

# 与本项目有关的研究成果

佐

证

材

料

# 目录

序号	论文名称	页码
1	放电等离子烧结高合金工具钢的组织与性能	3
2	喷射成形 6061 铝合金的显微组织与力学性能研究	11
3	建筑产业现代化人才培养教学改革研究	20
4	基于煤直接液化残渣路面应用研究进展	24
5	高熵合金的研究现状和应用前景	32
6	高职院校装配式建筑教学课程改革浅述	41
7	人工土固结过程中微观结构效应研究	45
8	矿物成分对细颗粒粘土强度特性影响的试验研究	52
9	Sierpinski Fractal Characteristics of Consolidation of Soft Soil	60
10	Influence of Mineral Constituents for Fine Clay's Strength Characteristics	70
11	装配式预制构件粗糙面施工技术研究与应	81
12	型钢混凝土纯扭梁裂缝开展和变形特征	89
13	型钢混凝土纯扭构件抗扭刚度研究	94
14	Study on Cumulative Damage Law of Stainless Steel-Reinforced Concrete Columns under Step Impact Loading	98
15	Modeling Static Behavior of Rockfill Materials Based on Generalized Plasticity Model	99
16	上软下硬地层隧道稳定性因素及影响研究	100

# 1. 放电等离子烧结高合金工具钢的组织与性能

- 中国科技论文统计源期刊
- 中国科学引文数据库来源期刊

- 中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊
- 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊

- 中国科技核心期刊
- 中文核心期刊

# 粉末冶金工业

FENMO YEJIN GONGYE  
**POWDER METALLURGY INDUSTRY**  
 中国钢协粉末冶金分会 中国机协粉末冶金分会 会刊

**4**  
**2013**  
 第23卷  
 总第136期

ISSN 1006-6543  
 CODEN FYGOFU

## 山西黎城粉末冶金有限责任公司

展望未来 | Brilliant prospects



志存高远 自强不息  
 Soaring into the sky, exert to the utmost!

山西黎城粉末冶金有限责任公司  
 SHANXI LICHENG FENMO YEJIN YOUXIAN ZESEN GONGSI

(封面说明详见刊内)

ISSN 1006-6543



9 771006 654009

中国钢研科技集团有限公司  
 中国钢协粉末冶金分会  
 中国机协粉末冶金分会

CHINA IRON & STEEL RESEARCH  
 INSTITUTE GROUP  
 PM ASSOCIATION OF CHINA  
 STEEL CONSTRUCTION SOCIETY  
 POWDER METALLURGY ASSOCIATION OF CHINA  
 MACHINE COMPONENTS INDUSTRY ASSOCIATION

※中国科技论文统计源期刊  
※中国科学引文数据库来源期刊  
※中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊  
※中国学术期刊综合评价数据库来源期刊  
※中国科技核心期刊  
※中文核心期刊

## 粉末冶金工业

FENMO YEJIN GONGYE

双月刊 1991 年创刊

第 23 卷第 4 期(总第 136 期)2013 年 8 月 10 日

主管单位:中国钢铁工业协会

主办单位:中国钢研科技集团有限公司

中国钢协粉末冶金分会

中国机协粉末冶金分会

### 编辑委员会

主 编:杨树森

副主编:李献璐 韩凤麟 曲选辉

王尔德 易健宏 李元元

王鸿海 舒正平 方玉诚

柳学全

委 员:(以姓氏笔画为序)

王 平 王 健 王尔德 王鸿海

王崇琳 亓家钟 方玉诚 尹海清

申承秀 印红羽 曲选辉 吕大铭

乔国强 仲守亮 汤慧萍 纪向军

严 彪 严培义 李元元 李森蓉

李献璐 杨树森 肖志瑜 况春江

汪礼敏 张宏才 陈 越 邵 健

林晨光 易健宏 罗锡裕 金成海

周武平 孟庆芳 赵九洲 赵慕岳

荆 慧 胡连喜 柳学全 侯开太

耿 涤 桂业炜 贾成厂 倪冠曹

徐哲之 郭庚辰 曹勇家 崔建民

葛启录 韩 伟 韩凤麟 韩建国

焦立新 舒正平 蔡一湘 谭清平

编辑出版:《粉末冶金工业》编辑部

编辑部主任:荆 慧

责任编辑:王惠娟

地 址:北京市海淀区学院南路 76 号

邮 编:100081 传 真:(010)62185365

电 话:(010)62182922 (010)62181028

电子邮件:powderbj@163.com

印 刷:北京昌平百善印刷厂

国内发行:北京报刊发行局

国外发行:中国国际图书贸易总公司

订 阅 处:全国各地邮局(国内代号 82-79)

北京 399 信箱(国外代号 BM5649)

刊号:ISSN 1006-6543

CN11-3371/TF

广告经营许可证:京海工商广字第 8024 号

## 目 次

### 研究与评述

制造零件用的铬钢粉

..... Jeanette Lewenhagen(1)

高负载粉末冶金齿轮选择性表面致密化

..... 韩凤麟(6)

水热合成法制备细颗粒钨铜氧化物复合粉体

..... 赵晶晶,李继文,张盘龙,魏世忠,宫方方,马瑛华(18)

具有优异高频特性非晶磁粉芯的制备及磁性能研究

..... 王湘粤,卢志超,黄纯波,陆曹卫,李德仁(22)

感应熔覆 Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub>/Fe 耐磨涂层的组织与性能研究

..... 屈彦杰,郭志猛,刘祥庆,曾 鲜,陈 文(27)

不同表面活性剂对硅油基磁流体性能的影响

..... 谭易明,邵慧萍,郭志猛,林 涛,孙 森(33)

TiC 含量对 TiCp/M2 高速钢复合材料性能的影响

..... 李小峰,肖志瑜,罗 飞,吴苑标,邱 诚(39)

放电等离子烧结高合金工具钢的组织与性能

..... 刘丘林,王艳群(45)

硅铝复合材料杨氏模量有限元计算研究

..... 刘 超,浦玉萍,沈 伟(50)

粉末微注射成形的现状与展望

..... 罗铁钢,蔡一湘(54)

国内外采煤截齿合金的现状与发展

..... 刘华平,余立新,陆庆忠(65)

### 行业动态

中国钢协粉末冶金分会发布主要金属粉末的生产销售统计..... (64)

中国机械通用零部件协会粉末冶金分会发布 2012 年度创新优秀

新产品奖和粉末冶金机械零件产量及应用领域统计..... (64)

Federal Mogul 有限公司在中国上海建立新的工厂..... (69)

中国工程院化工、冶金与材料工程学部会议暨 2013 年粉末注射

成形技术产业高峰论坛即将召开..... (69)

### 国外信息

2012 年英国 GKN 公司粉末冶金部门的销售额比上年略有增长..... (5)

日本 NTN 有限公司开发出 不含镍的耐腐蚀轴承材料..... (5)

### 方针政策

工信部力推两大节能环保工程..... (17)

解读《钢铁工业规范条件》方针政策..... (32)

### 网络信息

Sintermetal 公司在墨西哥扩大粉末冶金制品生产..... (26)

2012 年版粉末冶金工业发展路线图(连载一)..... (44,49)

印度 Jayesh 工业有限公司扩大细金属粉的产能..... (53)

### 专利信息

雾化法制备低氧低松比铜基粉末的方法..... (70)

粗晶结构 WC-Co 硬质合金的制造方法..... (70)

用于制造金属粉末压制品的粉末压机..... (70)

一种粉末冶金制品连续脱脂、烧结、淬火、回火多功能炉..... (70)

一种粉末冶金凸轮廓动的制造工艺..... (70)

一种粉末冶金异形孔的整形芯棒..... (70)

### 新书简介

《粉末冶金汽车零件(设计·生产·应用)》出版..... (26)

### 征稿启事

《金属功能材料》征稿启事..... (38)

# 放电等离子烧结高合金工具钢的组织与性能

刘丘林, 王艳群

(广州城建职业学院 建筑工程技术系, 广东 广州 510925)

**摘要:** 本文研究了放电等离子烧结 (SPS) 参数对 HG SF01 高合金工具钢致密度、硬度的影响规律, 以及烧结态 HG SF01 高合金工具的显微组织、抗弯强度和摩擦磨损性能。结果表明: 材料的致密度随烧结温度的升高和保温时间的延长呈上升趋势, 而硬度则是先升高后降低; 经 SPS 得到的材料晶粒细小, 晶粒尺寸约为  $5\ \mu\text{m}$ , 碳化物颗粒细小、均匀、弥散分布在基体上; 烧结态材料的抗弯强度比电渣重熔态材料提高了一倍, 耐磨性比电渣重熔态材料略有提高。

**关键词:** 高合金工具钢; 放电等离子烧结; 显微组织; 力学性能

**中图分类号:** TG146.2<sup>+</sup>1; TG376

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6543(2013)04-0045-05

## MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF SPS HIGH-ALLOY TOOL STEEL

LIU Qiu-lin, WANG Yan-qun

(Guangzhou City Construction College Department of Architectural Engineering Technology, Guangzhou 510925, China)

**Abstract:** In this paper, the effects of SPS parameters on density and hardness of HG SF01 high-alloy tool were studied. The microstructure, bending strength and friction and wear properties of sintered HG SF01 high-alloy tool were also investigated. The results showed that the materials' density had a rising trend with increasing sintering temperature and holding time, while the hardness rised at first and then decreased. The samples after SPS were characterized by a fine-grained (about  $5\ \mu\text{m}$ ) structure with relatively small and uniform carbide particles located in the matrix. The bending strength of sintered materials was twice as high as the ESR materials' bending strength, while the wear resistance of SPS materials is slightly higher than that of the ESR materials.

**Key words:** high-alloy tool steel; spark plasma sintering; microstructure; mechanical properties

放电等离子烧结 (SPS) 是结合了传统电流烧结和热压烧结的一种在低温短时间内实现高效、快速烧结的一种新型烧结技术, 在较低烧结温度和较小压力条件下可将粉末原料烧结成具有高性能的材料。图 1 为其工作原理图。

HG SF01 高合金工具钢是一种新型工模具钢, 由于其作为刀具、模具使用场合的特殊性, 决定了它必须具有高强度、高硬度、高韧性、高耐磨性等性能。

而通过传统铸造和电渣重熔工艺制备的 HG SF01 高合金工具钢存在晶粒粗大、组织不均匀、碳化物严重偏析和碳化物粗大等缺陷, 使钢材的综合性能不高<sup>[1]</sup>。

为了充分发挥出 HG SF01 高合金工具钢的性能, 提高相应工模具的使用寿命; 又由于通过放电等离子烧结可获得高致密度的烧结试样, 同时使烧结试样具有超细微观组织结构, 与电渣重熔方法相比,

收稿日期: 2013-02-28

作者简介: 刘丘林 (1983-), 男 (汉), 湖南郴州人, 工学硕士, 主要研究方向为粉末冶金技术。

能解决电渣重熔合金中存在的晶粒粗大、宏观偏析严重、析出相粗大等问题<sup>[2,3]</sup>,提高合金的力学性能。为此,作者采用 SPS 技术制备了 HG SF01 高合金工具钢,并对其组织性能进行了分析研究。

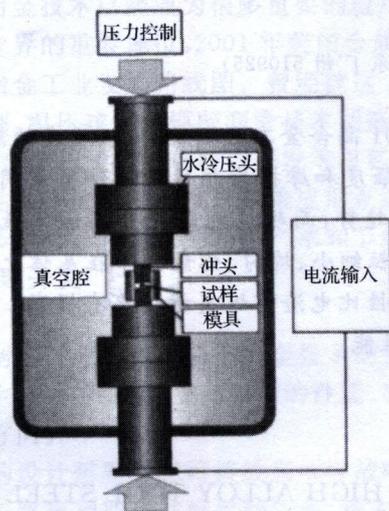


图 1 放电等离子烧结工作原理图

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料及工艺

设定球磨时间、球料比、烧结温度、升温速率和保温时间为本试验的试验因素,各因素均取 3 个水平,进行五因素三水平正交试验,正交试验因素水平表如表 1 所示。

表 1 放电等离子烧结正交试验因素水平表

因素 水平	球磨时间/ h	球料比 m : m	烧结温度/ ℃	升温速率/ ℃ · min <sup>-1</sup>	保温时间/ min
1	40	7.5 : 1	1 000	50	3
2	60	10 : 1	1 050	75	5
3	80	15 : 1	1 100	100	10

采用 QM-2SP 型行星式球磨机将合金元素粉末机械合金化制备 HG SF01 高合金工具钢粉末,各合金元素按 HG SF01 高合金工具钢成分(见表 2)配比。铁粉采用的是羰基铁粉,颗粒大小为 3~5 μm,其余合金元素均为纯度 99.9%、< 50 μm(-300 目)的单质元素粉。

表 2 HG SF01 高合金工具钢化学成分(质量分数) %

C	Cr	Mo	W	V	Fe
0.9~1.3	6.5~8.5	1.5~1.8	少量	1.5~3	余量

SPS 烧结采用日本进口的 DR. SINTER type

SPS-825 放电等离子设备,将机械合金化制备的粉末称取 32 g,装入直径为 30 mm 的石墨模具中,粉末与模具内壁之间以及粉末与上下压头之间用光滑的碳纸隔开。装完料后将模具放入放电等离子烧结系统内,轴向压紧,抽真空至低于 8 Pa 并加 50 MPa 压力。按照设定的升温速率达到烧结温度并在该温度下保温一定时间,烧结过程中始终保持 50 MPa 轴向压力。烧结结束后,随炉冷却,卸压,取出模具,空冷到室温,然后脱模,清除烧结试样表面的石墨纸。最终烧结试样尺寸为 φ30 mm×6 mm。

### 1.2 性能测试方法

采用阿基米德排水法测量试样的密度;用 HRC-150 型洛氏硬度计测硬度,取 5 点的算术平均值;在型号为 LEICA DMI 5000M 的金相显微镜下观察试样的金相组织;用 Quanta 200 扫描电子显微镜拍摄微观组织形貌;使用微机控制电子万能试验机 CMT5105 进行弯曲试验,试样尺寸为:长 16 mm×宽度 4 mm×厚度 2 mm,跨距 10 mm;在 M-2000 型摩擦磨损试验机上进行摩擦磨损试验,主轴转速 214 r/min,载荷 200 N,试验时间 1h,磨环规格 φ47 mm×10 mm,磨块尺寸 10 mm×10 mm×3 mm。

## 2 结果与讨论

### 2.1 烧结温度、保温时间对 HG SF01 高合金工具钢致密度、硬度的影响

#### 2.1.1 烧结温度对试样致密度的影响

图 2 为正交试验中烧结温度对 HG SF01 钢致密度的影响趋势图。在 1 000℃、1 050℃、1 100℃ 时致密度平均值分别为 93.96%、96.93%、98.04%。可见,随着烧结温度的升高,材料的致密度呈上升的趋势。从烧结机理分析可知:随着烧结温度的升高,烧结驱动力增大,这有利于材料致密化的进行。在烧结过程中,只有从晶内到颗粒颈部的晶界扩散和晶格扩散才能导致材料的高度致密化<sup>[4]</sup>。实验中,随烧结温度的升高,大部分晶界气孔被排除,粉末颗粒间互相结合加剧,晶粒开始接触,“烧结颈”充分形成,并逐渐长大;粉末颗粒间的细小间隙被粉末颗粒快速填充,吸附在粉末表面的气体大量逸散。此时烧结的主要驱动力不再是表面能的减少,而是晶界能的降低,粉末颗粒的接触面逐渐转变成晶界,并不断向两边颗粒内移动,烧结颗粒之间由松散的“连接”逐步转变成有较强作用的“联结”,

随着“联结”强度进一步增加,烧结体密度进一步提高;此时材料致密化过程接近完成,粉末间的原子扩散下降,致密度上升速率变慢。由此可推知,在一定的范围内,烧结体的致密化程度是随着烧结温度的升高而升高的,但其致密化速度却随着烧结温度的升高而降低。

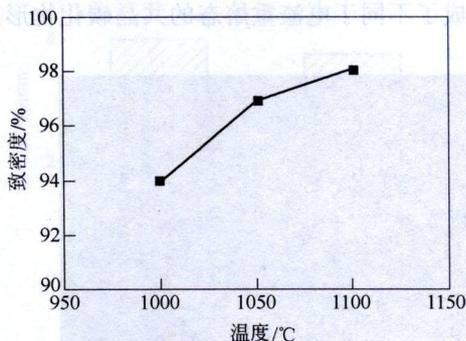


图2 烧结温度对 HGSF01 钢致密度的影响

2.1.2 保温时间对试样致密度的影响

图3为 正交试验中保温时间对 HGSF01 钢致密度的影响趋势图。从图中可以看出:随着保温时间的延长,试样平均致密度逐渐增大。表明保温时间对试样的致密度有一定的影响。随着保温时间的延长,各种扩散作用充分进行,残留在烧结试样内的孔隙逐渐消失,不规则孔隙充分球形化,因而试样的致密度逐渐增大。实验中,保温时间过短为 3 min 和 5 min 时,“烧结颈”没有充分形成,颗粒之间的接触面没有完全转变成晶界,烧结还没有充分进行,试样平均致密度只有 95.12% 和 95.90%;当保温时间为 10 min 时,试样平均致密度达到 97.91%,此时,“烧结颈”已经基本形成,颗粒之间的接触面基本消失、转变成晶界,孔隙率减少,致密度提高。

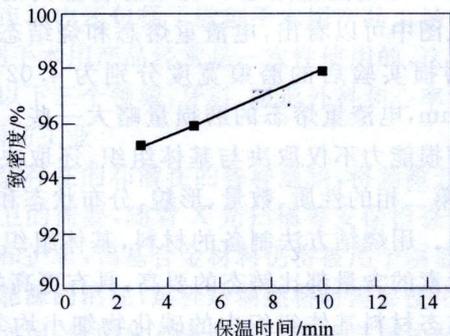


图3 保温时间对 HGSF01 钢致密度的影响

2.1.3 烧结温度、保温时间对试样硬度的影响

图4和图5为烧结温度和保温时间对烧结试样

硬度值的影响趋势图。可以看出:试样的平均硬度随着烧结温度的升高和保温时间的延长先升高后降低。这是由于当烧结温度较低时,试样的烧结为固相烧结,此时试样的硬度主要取决于固体颗粒的本征硬度,而此时试样烧结的致密化程度也较低,试样内部存在大量的孔隙,因此一定程度上影响其烧结硬度的提高。当烧结温度升高,试样由固相烧结转变为液相烧结,此时固相颗粒在液相中溶解并在不平衡的毛细管力的共同作用下,逐步促进坯体的致密化,颗粒间的结合强度增强,使得试样的硬度增加。但当烧结温度过高,又会因为某些组份的挥发和烧蚀造成基体硬度的下降<sup>[5]</sup>。另外,在烧结初期,随着保温时间的延长,试样致密化程度增加,空隙消失,烧结体硬度快速上升;但随着保温时间的进一步延长,易导致晶粒的长大,碳化物溶解,使得硬度值不再上升,反而下降。此外,比较图4、图5,还可以看出,保温时间对试样硬度的影响没有烧结温度的影响大。

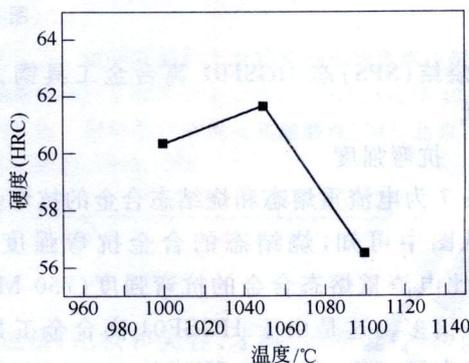


图4 烧结温度对 HGSF01 钢硬度的影响

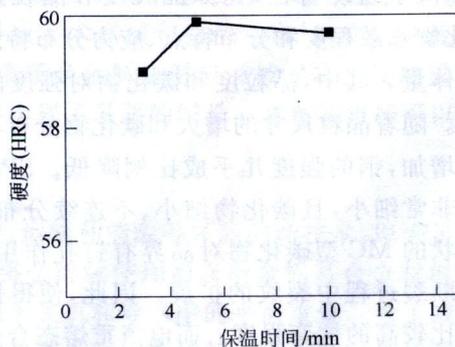


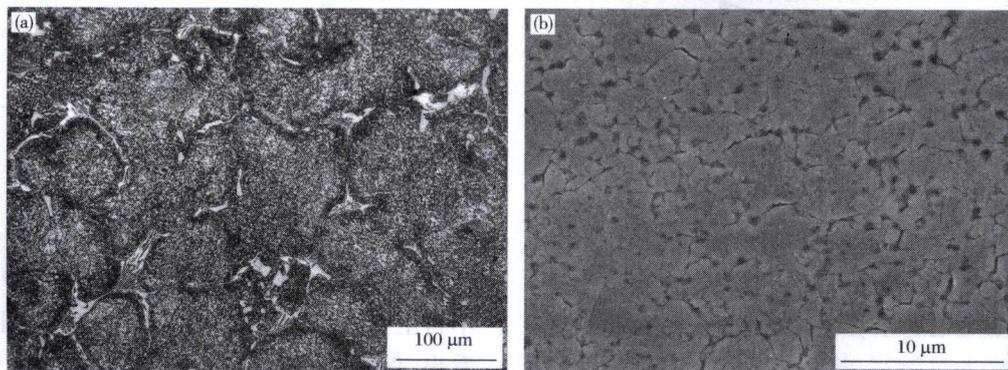
图5 保温时间对 HGSF01 钢硬度的影响

2.2 烧结 (SPS) 态 HGSF01 高合金工具钢显微组织分析

图6为不同工艺状态的 HGSF01 高合金工具

钢显微组织。电渣重熔态组织[图 6(a)]晶粒粗大,尺寸在 100  $\mu\text{m}$  左右。粗大的碳化物呈网状珠光体在晶界析出,且有鱼骨状的共晶莱氏体的出现。晶内的碳化物呈不规则的块状且分布不均匀,组织中存在少量的疏松。而烧结态组织[图 6(b)]晶粒细小,晶粒尺寸在 5  $\mu\text{m}$  左右。大量细小的碳化物颗粒均匀分布在基体上,无明显偏聚现象,组织非常均

匀。同时,试样中存在少量的孔洞,但是孔洞直径一般不超过 1  $\mu\text{m}$ 。相比较起来,烧结态组织的晶粒明显细化,碳化物分布更加均匀。这是由于烧结前粉末颗粒本来就很细,而 SPS 又具有加热迅速、烧结时间短的特点,能够有效抑制晶粒的长大。同时烧结态组织中的析出碳化物,也来不及长大,最终尺寸非常细小,形成了不同于电渣重熔态的共晶碳化物形态。



(a)电渣重熔态; (b)烧结态

图 6 HGSF01 钢显微组织

### 2.3 烧结 (SPS) 态 HGSF01 高合金工具钢力学性能测试

#### 2.3.1 抗弯强度

图 7 为电渣重熔态和烧结态合金的抗弯强度对比。从图中可知,烧结态的合金抗弯强度 (1520 MPa) 比电渣重熔态合金的抗弯强度 (750 MPa) 提高了一倍多。这是由于 HGSF01 高合金工具钢作为一种高硬度钢(硬度在 HRC59—60 以上的钢),其强度不仅取决于马氏体的含碳量和奥氏体的数量,还取决于组织特征,比如晶粒度和晶粒边界状态、碳化物弥散程度和分布特点、应力分布特点和残余奥氏体量。其中,晶粒度和碳化物对强度的影响最大<sup>[6]</sup>。随着晶粒尺寸的增大和碳化物分布不均匀程度的增加,钢的强度几乎成比例降低。SPS 合金的晶粒非常细小,且碳化物细小、不连续分布,晶界处颗粒状的 MC 型碳化物对晶界有钉扎作用,能有效阻止断裂过程中裂纹的扩展。因此,使得烧结态材料有比较高的抗弯强度。而电渣重熔态合金晶粒粗大,碳化物分布不均匀,沿晶界分布的粗大碳化物又极易成为裂纹源,当应力达到一定程度,裂纹迅速扩展到整个试样截面而断裂,从而表现出较低的抗弯强度。

#### 2.3.2 耐磨性

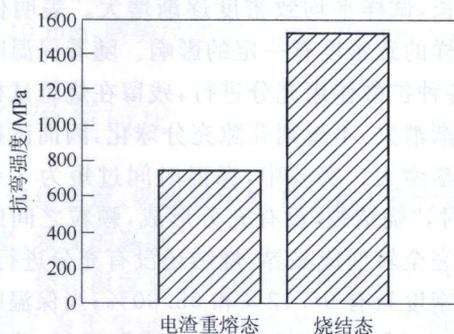


图 7 电渣重熔态和烧结态的抗弯强度对比

图 8 为电渣重熔态和烧结态合金的耐磨性对比。从图中可以看出,电渣重熔态和烧结态合金在摩擦磨损实验后的磨痕宽度分别为 4.02 mm 和 3.78 mm,电渣重熔态的磨损量略大一些。工具钢的抗磨损能力不仅取决于基体组织,还取决于第二相,如第二相的性质、数量、形貌、分布状态和尺寸大小等<sup>[7]</sup>。用烧结方法制备的材料,基体组织中 C 和合金元素的含量都比铸态的要高,具有更高的硬度;且烧结态材料基体组织中的碳化物细小均匀,摩擦磨损过程中,能够有效的承载和传递应力,阻碍裂纹的扩展;但由于烧结态试样不是全致密的,存在一定的孔隙,这又为磨损裂纹的扩展创造了条件,部分抵消了前面所述的优势。而电渣重熔态试样的组织中

虽然存在粗大的、棱角分明的碳化物,在磨损过程中容易断裂破碎从材料中分离出来,割裂基体或者在基体表面滑动,加剧材料的磨损;但由于其致密度较高,几乎没有孔隙,又加大了磨损裂纹形成和扩展的难度,所以其耐磨性只比烧结态材料略差一些。

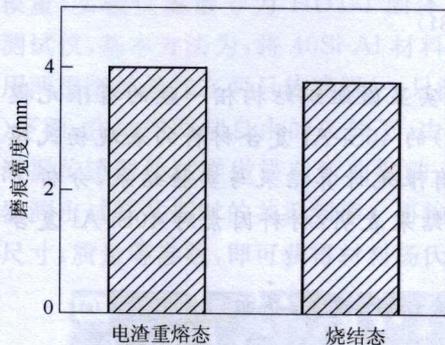


图8 电渣重熔态和烧结态的磨痕宽度对比

### 3 结论

(1) 在一定的范围内, HG SF01 高合金工具钢的致密度随烧结温度的升高和保温时间的延长呈上升趋势,而硬度则是先升高后降低。

(2) 经放电等离子烧结得到的 HG SF01 高合金

工具钢具有晶粒细小(尺寸约为  $5 \mu\text{m}$ ),碳化物颗粒均匀、细小、弥散分布在基体上的优良组织。

(3) 与电渣重熔态 HG SF01 高合金工具钢相比,烧结态 HG SF01 高合金工具钢的抗弯强度提高了一倍,耐磨性略有提高。

### 参考文献

- [1] 戚正风,王传雅. 少无来氏体高合金工具钢[J]. 材料热处理学报, 2001, 22(1): 31-34.
- [2] 彭超群,黄伯云. 喷射成形技术[J]. 有色金属, 2002, 54(1): 12-15.
- [3] 史海生,颜飞,樊俊飞,等. 喷射成形技术在高合金工模具钢中的应用[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2008, 13(3): 165-170.
- [4] Dwivedi S N, and Upadhyay K. Plasma Aided Manufacturing of Ceramics and Composite Materials[J]. International Journal of Production Research, 1993, 31(4): 901-912.
- [5] 李文虎,刘福田,黄巍岭,等. 烧结温度对利用废钢粉制备铁基粉末冶金制品的影响[J]. 山东冶金, 2006, 28(4): 40-41.
- [6] 吴元昌. 试样表面状态对淬硬粉末冶金高速钢抗弯强度的影响[J]. 粉末冶金工业, 1999, 9(4): 36-40.
- [7] 刘家浚. 材料磨损原理及其耐磨性[M]. 北京:清华大学出版社, 1993. 278.

(上接第44页)

#### 1.3 医疗市场

在医疗市场里存在很多的次级市场,医疗市场领域的产品包括:化妆和美容、牙科、诊断设备、医院家具和设备、移植物、医疗流动设备、轮椅、假体、医药品和外科用装置、急救和伤口护理等方面。金属注射成形制品在医疗市场中的应用主要分布在三个领域里:牙科制品、整形制品、其他医疗装置和设备,产品在这三个部分市场的应用方向构成了医疗设备和诊断行业。现在已经确定在医疗设备和诊断行业内有两个只能采用金属注射成形技术生产产品的次级市场,这两个次级市场是:外科或手术器械和移植物市场,在外科或手术器械次级市场内还包括了微创手术用产品市场,微创手术用产品市场是金属注射成形技术应用发展最快的领域,微创手术用产品经常是一次性使用的,这类产品的产量近年出现了显著的增长。移植物市场可以被进一步分成以下三个领域:牙科、整形外科和心率调整。

#### 1.4 国防工业

继续存在的和潜在的各种威胁,将刺激开发侦察、安全保护、运输和能源等领域的新技术,以满足国防和安全保卫的需要,随着 X 光扫描等安保检查领域的技术发展,将会继续使用粉末冶金钨基合金材料制作的准直器和护罩,钨基合金材料仍将被用于制造穿甲弹,以及使用于飞机和导弹中的平衡重量。为了减少运输过程中能源的消耗,远程运输燃料时需要使用粉末冶金制镁、铝和钛等轻金属材料。化石燃料替代能源的使用将会增加,使用化石燃料替代能源会增加对一些粉末冶金制品的需求。生产一些拥有独特性能的制品,可能需要使用如放电等离子烧结等粉末冶金新技术,制造和修复零件,可能会使用粉末冶金快速制造技术,如:选区激光烧结和冷喷涂等。信息摘译自美国金属粉末工业联合会网站 [http://www.mpif.org/IntroPM/2012\\_Industry\\_Roadmap.pdf](http://www.mpif.org/IntroPM/2012_Industry_Roadmap.pdf) 2012-7-4

(孙世杰)[未完待续]

**AT&M****安泰科技****粉末冶金事业部**

股票代码: 000969

安泰科技粉末冶金事业部继承中国钢研科技集团公司(原钢铁研究总院)50多年粉末冶金技术优势,通过上市募集资金规模投入,产业已形成“雾化超细合金粉末”、“金属多孔元件与过滤系统”、“金属注射成形零件”及“安全监测仪表”知名领域。创新技术,屡获殊荣,拥有国家发明一等奖等多项成果,授权专利20余项。已通过ISO9001/14000、OHSAS18000及ISO/TS16949体系认证,高性价比产品广泛服务于海内外知名企业。技术、装备和生产规模,均处国内和国际先进水平。

专利号为: 200720104263.2、02257153.1、02291444.7、200320102979.0、200310113285.1、02131320.2、99122287.3、200310113284.7、200320102978.6、200320124624.1、200820108202.8、94100917.3、96104650.3、200510117285.8、200610057538.1、200410101594.1、200410000816.0、96100315.4、94102823.2、200910088029.9、200920109642.x。

### >>雾化超细金属/合金粉末

拥有德国先进的真空氮(氩)气雾化和100MPa超高压水雾化设备等六条制粉生产线,同时配备了先进的粉末后处理和在线检测分析设备。可生产高纯、低氧、形貌可控的铁基,镍基,钴基和铜基等多种超细合金粉末。  
 产品及应用领域: 高品质软磁粉芯合金粉末、金刚石单晶合成触媒粉末、金刚石工具胎体预合金粉末、金属注射成形超细不锈钢和低合金钢粉末、高速钢和高温合金粉末以及热喷涂(焊)与钎焊粉末等六大类,五十余种合金粉末。年生产规模达2000吨。

### >>金属注射成形零件(MIM)

采用先进的MIM近终成形技术,批量生产高精度、高强度、复杂形状的精密金属零部件,拥有自主核心的原料粉末、粘结剂及模具设计加工技术,引进装备,经验丰富,产品80%出口欧、美、日等国的众多国际知名企业。  
 常用材料体系: 不锈钢、低合金钢、工具钢、难熔金属、硬质合金、软磁合金、钛合金、Kovar合金等。  
 主要应用领域: 汽车零件、医疗器械、消费电子与通信、五金及手电动工具、枪械、精密仪器及产业机械、体育及日用消费品。

### >>金属多孔元件及流体管理系统

以金属粉末、丝网及纤维为原料,通过多种成型工艺及高温烧结制备的金属多孔元件,通量大、强度高、孔隙结构稳定、渗透均匀性好、耐高温、抗腐蚀。已形成烧结粉末、多层丝网、纤维毡、金属膜、金属-陶瓷复合五个系列六十余种多孔元件产品。  
 主要材质: 不锈钢、高温合金、铁铝合金、钛合金及其它特种耐蚀合金等。  
 应用领域: 军工、石化、化工、冶金、环保、医药、新能源等领域的气液固三相过滤、分离、净化、流态化等流体管理。

集成过滤分离、系统切换和自动反清洗等专业技术,自行设计、制造的成套高效过滤、分离、净化设备,已为国内多套大型Shell煤气化与液化装置、S-Zorb低硫汽油炼化装置、冶金电力高温除尘环保装置以及化工高效强制换热系统成功实现国产化配套,并开始出口海外。

### 更多产品信息请浏览我们的网站

<http://www.atm.cn> 安泰科技  
<http://www.atmpowder.com.cn> 金属雾化制粉  
<http://www.atmmim.com.cn> 金属注射成型  
<http://www.atmfilter.com.cn> 多孔元件及过滤设备  
<http://www.atmyb.com> 安全检测与防护性仪器

安泰科技股份有限公司

中国 北京 海淀区学院南路76号 100081

联系人: 崔晓波

Tel:86-10-62443881 Fax:86-10-62443881

Http://www.atm.cn

E-mail:cuixiaobo@atm.cn

- 中国科技论文统计源期刊
- 中国学术期刊影响因子年报统计源期刊

- 中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊
- 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊

- 中国科技核心期刊
- 中文核心期刊

# 粉末冶金工业

**3**  
2015  
第25卷  
总第147期

FENMO YEJIN GONGYE  
POWDER METALLURGY INDUSTRY

中国钢协粉末冶金分会 中国机协粉末冶金分会 中国有色金属加工工业协会 会刊

ISSN 1006-6543  
CODEN FYGOFU



## 莱钢钢铁集团粉末冶金有限公司



我们谨向您提供  
钢铁粉末系列产品和优质的技术服务



莱钢集团  
粉末冶金有限公司

ISSN 1006-6543



9 771006 654153

中国钢研科技集团有限公司  
中国钢协粉末冶金分会  
中国机协粉末冶金分会

CHINA IRON & STEEL RESEARCH  
INSTITUTE GROUP

PM ASSOCIATION OF CHINA  
STEEL CONSTRUCTION OF CIETY

POWDER METALLURGY ASSOCIATION OF CHINA  
MACHINE COMPONENTS INDUSTRY ASSOCIATION

目次

专家论坛

钛合金粉末热等静压数值模拟及性能研究 ..... 郎利辉, 王刚, 布国亮, 黄西娜, 喻思 (1)

研究与开发

水雾化制备Fe-Si-B-C非晶软磁粉末及其晶化过程的研究

..... 覃思思, 李志, 王志勇, 谭澄宇, 曾克里 (7)

稀土添加量对TiC基钢结硬质合金性能的影响 ..... 陈骏, 郭志猛, 罗骥, 陈存广, 陈文 (12)

喷射成形6061铝合金的显微组织与力学性能研究 ..... 刘丘林, 王艳群 (17)

室温HPT制备SiC<sub>p</sub>/Al复合材料的硬度分布特征 ..... 马俊林, 王成国, 石文超, 李萍, 薛克敏 (21)

不同尺寸HDH钛粉末烧结后的显微组织与力学性能分析 ..... 刘珍珍, 王春明, 肖素芬, 陈云贵 (29)

真空烧结温度对WC-TiC-TaC-Co硬质合金组织和性能的影响

..... 陈慧, 彭玲玲, 姜中涛, 邓莹, 涂铭珪 (33)

烧结工艺对CuSn10含油轴承组织与性能的影响

..... 钱杭君, 刘子利, 刘希琴, 陶杰, 张浩瀚, 邹德华 (37)

WC-Cu-Ni粉末烧结层的组织与性能研究 ..... 王黎明, 胡梅 (44)

烧结温度对过滤用SiO<sub>2</sub>多孔陶瓷性能的影响 ..... 李悦, 刘昆, 姚春战, 刘大成, 郝斌 (51)

评述与进展

SiC颗粒增强Al基复合材料的研究现状与进展 ..... 李敏, 王爱琴, 谢敬佩, 孙亚丽, 张衡 (55)

粉末冶金表面致密化齿轮的国产化分析 ..... 彭景光, 陈迪 (61)

革新与交流

高密度高强度高精度粉末冶金同步器齿毂生产工艺探讨 ..... 孙国勋 (65)

科技前沿

苏州纳米所在碳纳米材料高能柔性电容器研究方面取得进展 ..... (6)

美国科学家研发出油水分离的新材料 ..... (54)

国防科大研制成功新型超轻纳米材料 ..... (71)

DOI:10.13228/j.boyuan.issn1006-6543.20140102

## 喷射成形6061铝合金的显微组织与力学性能研究

刘丘林, 王艳群

(广州城建职业学院建筑工程学院, 广东 广州 510925)

**摘要:**研究了喷射成形6061铝合金的显微组织和力学性能,并与熔铸成形6061铝合金进行对比。结果表明,喷射成形6061铝合金显微组织较好,但由于其还未进行致密化处理,组织内存在一定的孔隙,各项拉伸性能低于熔铸成形6061铝合金。

**关键词:**喷射成形;6061铝合金;显微组织;力学性能

**文献标志码:**A **文章编号:**1006-6543-(2015)03-0017-06

### Study on microstructure and mechanical properties of spray formed 6061 aluminum alloy

LIU Qiu-lin, WANG Yan-qun

(Institute of Architecture and Engineering, Guangzhou City Construction College, Guangzhou 510925, China)

**Abstract:** The microstructure and mechanical properties of spray formed 6061 aluminum alloy were studied, and were also compared with casting 6061 aluminum alloy. The results show that the microstructure of spray formed 6061 aluminum alloy is more uniform. However, there are residual pores in the samples, leading to worse tensile properties for the spray formed 6061 aluminum alloy.

**Key words:** spray forming; 6061 aluminum alloy; microstructure; mechanical property

随着社会经济的快速发展和节能环保的大力提倡,在各行业零部件高性能化和轻量化的进程中,铝合金是最佳的选择<sup>[1]</sup>。铝合金的成形方法有很多,目前铸造法仍是生产铝合金最普遍的方法,主要包括重力铸造法、低压铸造法、挤压铸造法等。但是,采用铸造法制备的铝合金,存在很多问题,包括:强度低、塑性差、刚度差、耐热性和耐腐蚀性不佳等。

采用粉末冶金工艺可以实现传统熔铸工艺制备高性能铝合金无法胜任的任务<sup>[2]</sup>。但是,粉末冶金法也存在一些难以克服的缺点:(1)制造工序相当复杂;(2)制粉过程能量利用率极低,粉末收得率也低;(3)粉末的氧化较严重,产品的韧性不高;(4)难于制备大型零部件<sup>[3-4]</sup>。

而喷射成形工艺是介于铸造和粉末冶金之间

的一种快速凝固工艺,与传统工艺不同,制备出的合金显微组织和力学性能也有很大的差异。本文采用喷射成形技术制备6061铝合金,并对其显微组织和力学性能进行了分析研究。

### 1 实验

采用广东佛山兴发铝业有限公司的熔铸态6061铝合金为母合金材料,其成分见表1。可知,各元素含量均在标准范围内,根据Mg、Si元素形成Mg<sub>2</sub>Si相的质量比为1.73,可知母合金中Mg元素稍有过量。

采用ZGSP-0.2型喷射成形设备进行喷射成形实验,其雾化喷嘴为一次聚焦环孔式喷嘴,喷射方式为固定式。采用高压N<sub>2</sub>雾化,通过反复调整过热

**作者简介:**刘丘林(1983—),男,硕士,讲师,主要从事粉末冶金技术的研究。

**收稿日期:**2014-12-19

度、喷射距离、喷射角、雾化压力、偏心距等工艺参数,最终确定较为合理的喷射成形工艺参数(见表

2),得到了外轮廓形状较好且质量较高的喷射成形坯,如图1(a)所示。

表1 6061 铝合金化学成分(质量分数)

元素	Mg	Si	Cu	Fe	Cr	Zn	Mn	V	Al
标准	0.80~1.20	0.40~0.80	0.15~0.40	<0.70	0.04~0.35	<0.25	<0.15	<0.05	余量
实际	0.88	0.47	0.25	0.18	0.11	0.02	0.01	0.01	98.07

表2 喷射成形实验工艺参数

工艺参数	取值
过热度/℃	~100
喷射距离/mm	~500
喷射角/(°)	10~30
辅助雾化压力/MPa	~0.3
主雾化压力/MPa	~0.6
导流管直径/mm	3.5~4.0
偏心距/mm	~50
接收器旋转速度/(r·min <sup>-1</sup> )	40~60
接收器下降速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	2~4

注:由于喷射成形实验过程比较难控制,辅助雾化压力需要人为进行实时调整,该参数在整个实验过程中并不是一直稳定不变的。

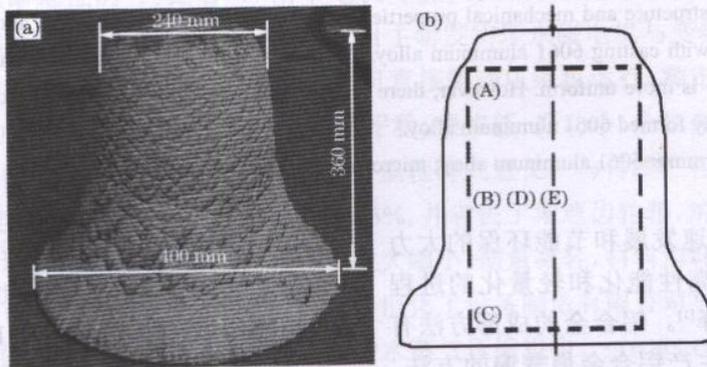
分别在图1(b)所示的(A)(B)(C)(D)(E)5个部位取样,用排水法测定各样品的密度,计算得喷射成形坯的平均相对密度为97.49%。之后,分析样品(B)(孔隙率为0.68%)的组织性能,并与熔铸成形6061铝合金进行对比。

## 2 结果与分析

### 2.1 显微组织对比分析

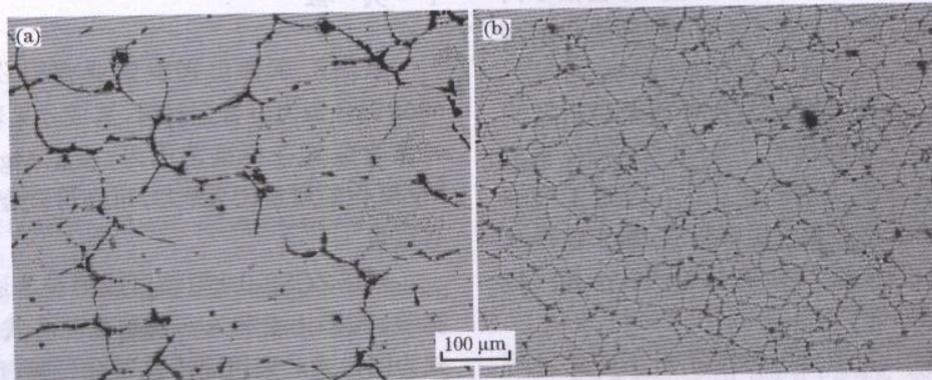
#### 2.1.1 金相组织对比分析

图2是6061铝合金不同工艺状态下的金相显微组织。2种试样都经水磨砂纸预磨—机械抛光—电解抛光(电解液为70%高氯酸(质量分数)10 mL+无



(a) 实物图; (b) 示意图。

图1 喷射成形坯宏观形貌



(a) 熔铸态; (b) 喷射态。

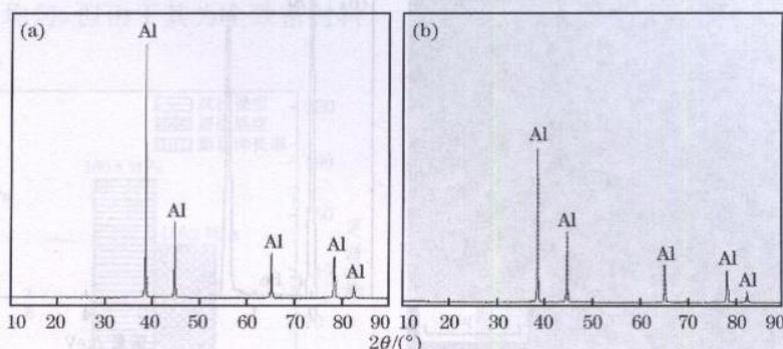
图2 6061 铝合金不同工艺状态下的金相组织

水乙醇 90 mL, 电压 20 V, 电解时间约 15 s) 后, 用 kaller 试剂进行腐蚀。可以看到, 熔铸态 6061 铝合金为粗大枝晶组织, 并且第二相偏聚于晶界处, 组织很不均匀, 这归因于原材料在铸造过程中的冷却速度慢, 合金元素容易偏析, 晶粒长大严重的缘故。而喷射态 6061 铝合金为较细小的等轴晶, 且在晶界处没有发现粗大的第二相聚集区, 组织非常均匀, 如图 2(b) 所示。这是由于喷射成形过程是材料在惰性气氛中借助高压惰性气体雾化形成固液两相的颗粒喷射流, 并直接喷射到较冷基底上, 产生撞击、粘结、凝固而形成沉积坯, 材料的冷却速度很快<sup>[5]</sup>, 从而沉积坯晶粒细小、组织均匀、无宏

观偏析。

### 2.1.2 XRD 物相对比分析

对熔铸态 6061 铝合金和喷射态 6061 铝合金进行 XRD 分析, 如图 3 所示。可以看出, 熔铸态 6061 铝合金和喷射态 6061 铝合金的相成分基本相同, 除了有很明显的 Al 元素衍射峰外, 没有发现 6061 铝合金主要析出相  $Mg_2Si$  和次要析出相  $AlFeSi$  相<sup>[6]</sup>。根据表 1 中 Mg、Si 元素的含量, 计算得合金中  $Mg_2Si$  的质量分数最高只有 1.28%, 因此推测, 可能是由于含量过少, 以至于在 XRD 衍射图中很难发现  $Mg_2Si$  相和  $AlFeSi$  相的衍射峰。为了得到精确结果, 借助能谱仪进行进一步分析。



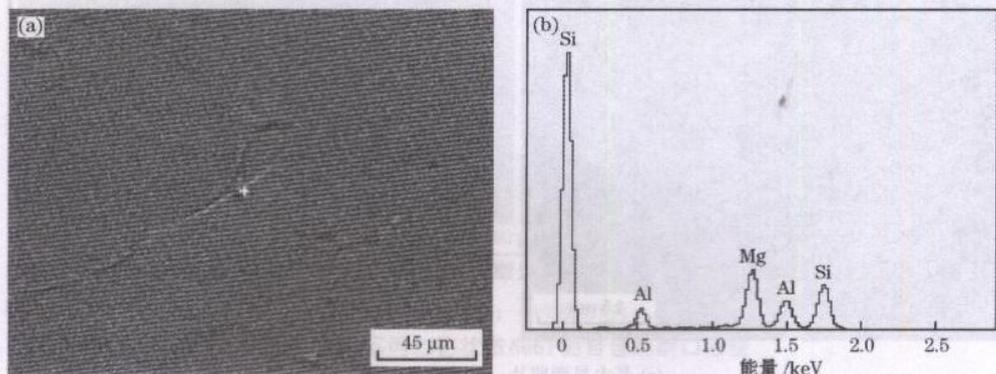
(a) 熔铸态; (b) 喷射态。

图3 6061 铝合金不同工艺状态下的物相分析

### 2.1.3 析出相能谱(EDS)对比分析

图 4 是熔铸态 6061 铝合金晶界显微照片及能谱分析。Mg 原子分数为 33.48%, Si 原子分数为

44.13%, 其余为 Al。由于 6061 铝合金主要包含  $Mg_2Si$  和  $AlFeSi$  析出相<sup>[6]</sup>, 因此可知熔铸态 6061 铝合金晶界析出相主要为  $Mg_2Si$  相。

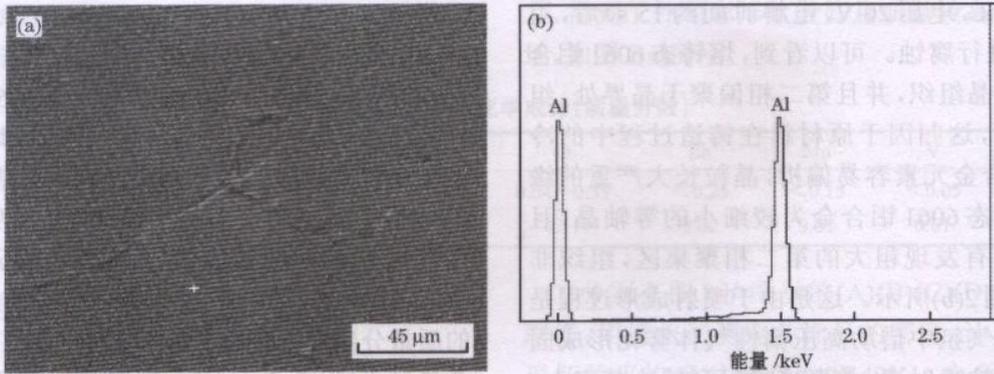


(a) 晶界显微照片; (b) 能谱分析。

图4 熔铸态 6061 铝合金晶界显微照片及能谱分析

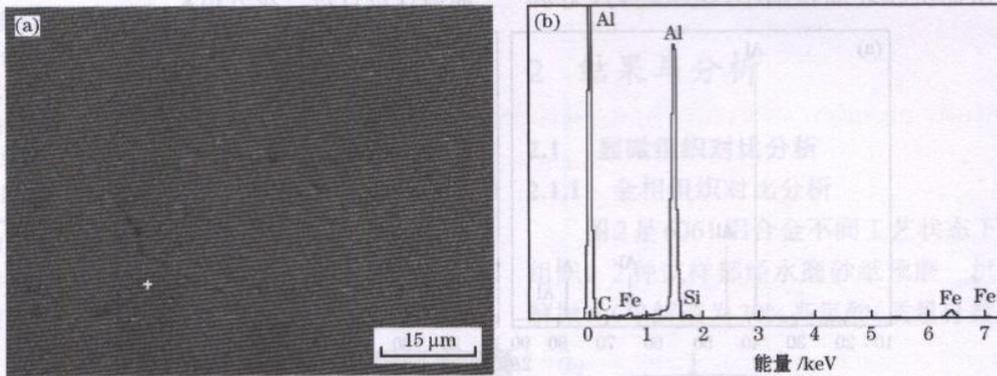
图 5 是熔铸态 6061 铝合金晶内显微照片及能谱分析。只可看到 Al 元素的峰, 可知其晶内没有合金元素, 或者合金元素含量很少没有被探测到, 主要是因为熔铸工艺造成了合金元素的晶界偏析。

图 6 是喷射态 6061 铝合金晶界显微照片及能谱分析。Al 原子分数为 61.95%, Fe 原子分数为 4.67%, Si 原子分数为 1.95%, 可知喷射态 6061 铝合金晶界析出相主要为  $AlFeSi$  相。



(a) 晶内显微照片; (b) 能谱分析。

图5 熔铸态6061铝合金晶内显微照片及能谱分析

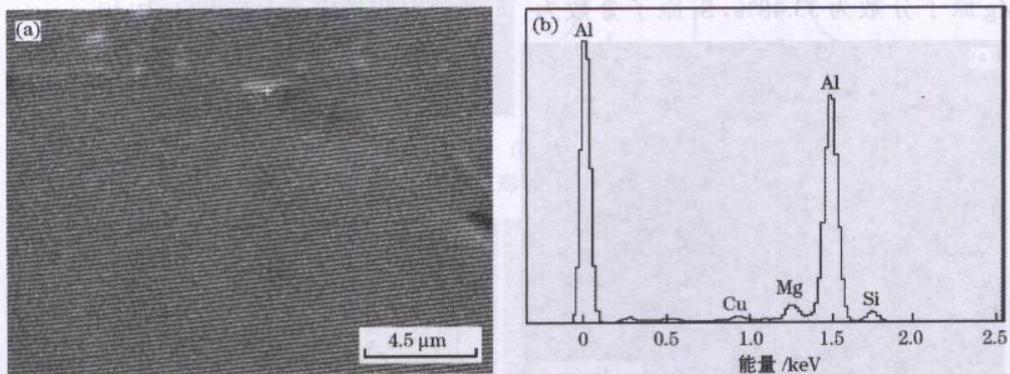


(a) 晶界显微照片; (b) 能谱分析。

图6 喷射态6061铝合金晶界显微照片及能谱分析

图7是喷射态6061铝合金晶内显微照片及能谱分析。Mg原子分数为5.37%，Si原子分数为

10.95%，可知喷射态6061铝合金晶内析出相主要为Mg<sub>2</sub>Si相。



(a) 晶内显微照片; (b) 能谱分析。

图7 喷射态6061铝合金晶内显微照片及能谱分析

比较图4、图5、图6、图7，可以看出，熔铸态6061铝合金中Mg<sub>2</sub>Si相主要析出于晶界处，且较粗大，呈连续条状，其晶内只发现了Al元素，没有第二相存在；而喷射态6061铝合金中，晶界处分布着断

续的细小颗粒状AlFeSi相，晶内有颗粒状的Mg<sub>2</sub>Si相析出。造成熔铸态和喷射态合金内析出相分布和形态区别的主要原因是：在铸造工艺中，原材料在熔铸过程中的冷却速度较慢，合金元素容易偏

析、聚集于晶界处,形成分布于晶界上的较粗大的第二相;而在喷射成形过程中,冷却速度很快,合金元素来不及偏聚,因此在其晶界和晶内都分布着细小的第二相<sup>[7]</sup>。

### 2.2 力学性能对比分析

图8是熔铸态6061铝合金和喷射态6061铝合金的拉伸性能对比。可以看出,熔铸态6061铝合金的抗拉强度195.1 MPa、屈服强度141.5 MPa、断后伸长率27.39%,均比喷射态6061铝合金的160.4 MPa、116.2 MPa、13.2%要高。这是因为喷射态合金在进行致密化之前,内部存在一定的孔隙,这对合金的力学性能相当不利;而熔铸态合金虽然显微组织不如喷射态合金均匀,但由于其为全致密材料,所以力学性能较好。

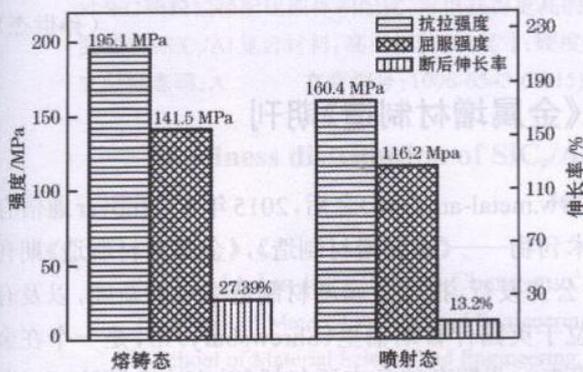


图8 不同工艺状态6061铝合金的力学性能

### 2.3 拉断试样及断口形貌对比分析

熔铸态6061铝合金和喷射态6061铝合金拉伸后的试样宏观形貌如图9所示。可以看出,熔铸态6061铝合金试样有明显的缩颈,而喷射态6061铝合金试样缩颈不是很明显,这说明熔铸态6061铝合金的塑性比喷射态6061铝合金要好。图10是不同工艺状态6061铝合金的微观断口形貌。可以看到,熔铸态6061铝合金断口存在大量韧窝,属于典型的韧性断裂;但喷射态6061铝合金断口却由一些颗粒界面组成,这是因为喷射态合金成形后沉积颗粒间的结合强度不够高,同时有些沉积颗粒间还存在一些孔隙,在拉伸实验中,合金受到拉应力的作用,结合强度不够高且有孔隙存在的颗粒界面便成为了裂纹的形成和扩展源。因此喷射态6061铝合金的拉伸性能低于熔铸态6061铝合金。

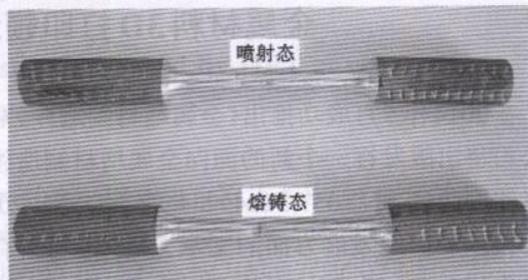
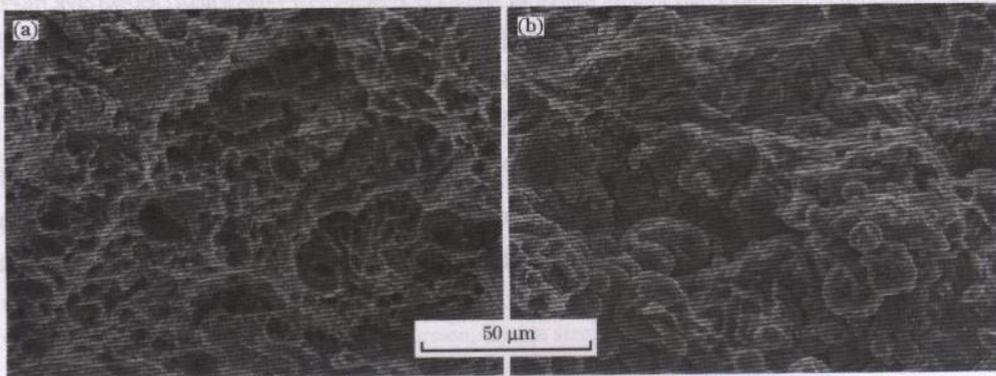


图9 不同工艺状态6061铝合金拉伸后的试样宏观形貌



(a) 熔铸态; (b) 喷射态。

图10 不同工艺状态6061铝合金的断口形貌

## 3 结论

(1) 喷射成形6061铝合金组织均匀,由细小的等轴晶组成,第二相弥散分布于晶内和晶界,组织中存在少量的孔隙;而熔铸态6061铝合金晶粒粗大,第二相偏聚于晶界处,组织很不均匀。

(2) 通过XRD和EDS对合金进行物相分析,喷射成形6061铝合金还在晶粒内部分布着颗粒状Mg<sub>2</sub>Si相,在晶界上分布着颗粒状AlFeSi相;而熔铸态6061铝合金主要在晶界处析出条状Mg<sub>2</sub>Si相。

(3) 对合金进行室温拉伸力学性能测试,喷射态6061铝合金由于还未进行致密化处理,组织内存

## · 国外信息 ·

## 透博梅卡公司使用增材制造技术生产直升机引擎零件

世界著名的直升机引擎制造企业透博梅卡公司(Turbomeca)开始在法国 Bordes 的工厂使用增材制造技术大规模生产引擎零件。透博梅卡公司宣布:透博梅卡公司正在利用选择性激光熔化技术制造 Arrano 发动机的燃料喷射器喷嘴和阿蒂丹3发动机的燃烧室旋流器。这些引擎零件是透博梅卡公司最新型号的产品,也被认为是现在最先进的涡轮轴产品。在透博梅卡公司发行的出版物中曾报道:“经过了多年的发展和原型试验,透博梅卡公司已经进入利用最新的增材制造技术批量生产零件的阶段,透博梅卡公司在 Bordes 的工厂是法国首先利用增材制造技术为宇航推进产业大规模生产零部件的工厂之一。”透博梅卡公司使用细颗粒镍基超合金粉为原料,利用选择性激光熔化技术,通过迭加 20~100  $\mu\text{m}$  的金属薄层制造金属零件制品。增材制造有利于简化制造工艺,传统方法制造的燃料喷射器喷嘴是由几个零件组成的,而使用增材制造方法生产的燃料喷射器喷嘴是一体的,并具有先进的喷射和冷却功能。信息摘自《金属增材制造》网站 <http://www.metal-am.com/news/003097.html> 2015-1-12/2015-1-20

(孙世杰)

## 金属材料3D打印领域创立《金属增材制造》期刊

在2014年5月成功推出《金属增材制造》网站(<http://www.metal-am.com>)之后,2015年4月 Inovar 通信有限公司将出版发行一个新的面向金属增材制造领域的学术刊物——《金属增材制造》,《金属增材制造》期刊将以印刷版(ISSN 2057-3014)和数字版(ISSN 2055-7183)公开发刊,报道金属增材制造领域的新闻,以及有关的技术和商业发展方面的文章。Inovar 通信有限公司位于英国什鲁斯伯里(Shrewsbury)市,是一个在金属粉末行业有12年以上从业经验的出版公司,其在金属粉末行业拥有的杂志还包括《粉末冶金评论》和《国际粉末注射成形》。《金属增材制造》期刊为季刊,将特别专注于金属材料增材制造领域的发展动态,不止向目前参与这一行业者提供相关信息,还将向全世界零件制品生产企业和潜在的用户宣传金属材料增材制造技术。2015年4月底创刊的第1期《金属增材制造》的电子版将可以免费从《金属增材制造》网站(<http://www.metal-am.com>)下载,印刷版的《金属增材制造》可以通过订购或在2015年5月18日—5月20于美国圣地亚哥市召开的增材制造与粉末冶金研讨会期间购买。读者如果需要了解有关《金属增材制造》期刊编辑出版方面的问题,可以与 Nick Williams ([nick@inovar-communications.com](mailto:nick@inovar-communications.com))或 Paul Whittaker([paul@inovar-communications.com](mailto:paul@inovar-communications.com))联系, Jon Craxford 负责《金属增材制造》期刊的广告业务。信息摘自《金属增材制造》网站 <http://www.metal-am.com/news/003133.html> 2015-2-2/2015-3-15

(孙世杰)

在一定孔隙,拉伸性能低于熔铸态 6061 铝合金。

## 参考文献:

- [1] 肖亚庆. 铝加工技术实用手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [2] 赵玉谦, 方世杰. 粉末冶金高强铝合金在汽车工业中的应用[J]. 汽车工艺与材料, 2004(9): 1-5.
- [3] 张春芝, 边秀房. 粉末冶金铝合金的研究现状和发展趋势[J]. 特种铸造及有色合金, 2008(年会专刊): 55-57.
- [4] 彭超群, 黄伯云. 喷射沉积技术[J]. 有色金属, 2002, 54(1): 12-15.
- [5] Srivastava V C, Mandalb R K, Ojha S N. Evolution of microstructure in spray formed Al-18%Si alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 383: 14-20.
- [6] 郑存阅. 噴覆成型與連續鑄造 6061 鋁合金之塑性加工性及機械性質的研究[D]. 台北: 國立成功大學, 2004.
- [7] 霍光, 王学兵, 况春江, 等. 喷射成形过共晶 AlSi 合金锭坯的渐变组织研究[J]. 粉末冶金工业, 2011, 21(6): 26-29.



# ANSTEEL

## 鞍钢重型机械有限责任公司冶金粉材厂



鞍钢重型机械有限责任公司冶金粉材厂是我国专业生产水雾化铁粉的企业，目前产销量位居国内同行业领先水平。成立于1986年，隶属于鞍山钢铁集团公司。2012年4月份，当选为中国钢结构协会粉末冶金分会理事长单位。

冶金粉材厂全套引进德国曼内斯曼公司水雾化铁粉生产技术、设备及管理模式，后又引进德国克莱默公司板带式还原炉，现可生产水雾化纯铁粉、合金铁粉、无偏析混合铁粉、易切削铁粉、焊条粉、阀座粉等六大系列上百个品种。厂研发“水雾化扩散合金粉及其制造方法”在第二十届全国发明展览会上获银奖；“一种汽车发动机专用合金钢粉的生产方法”获第七届国际发明展览会暨国际教学新仪器和新设备展览会银奖。



冶金粉材厂经过二十多年的发展和改造，目前拥有完善的水雾化制粉生产技术和现代化的15吨、10吨电弧炉各1座，20吨精炼炉一座，年冶炼能力达8万吨；年生产能力10万吨雾化干燥系统2套，7000吨还原炉5台，自行设计、建造、安装的2万吨还原炉3台，年还原能力10万吨。按照鞍山钢铁集团公司战略发展规划，2015年前冶金粉材厂预计具备年生产能力可达20万吨。

地址：辽宁省鞍山市立山区灵山红旗路9号  
 邮编：114042  
 邮箱：angangfencaijyb@126.com

电话：0412-6761177  
 传真：0412-6761388

刊号：ISSN 1006-6543  
 CN11-3371/TF

广告经营许可证：京海工商广字第8276号

国内订阅代号：82-79  
 国外订阅代号：BM5649

定价：10.00元

# 环球市场

Global Market

风力发电对电网的影响研究

新经济背景下企业财管管理创新研究

ISSN 1005-9644

国内统一刊号: CN46-1042/F



国际标准刊号: ISSN1005-9644

9 771005 964086

定价: RMB 20.00元

2017年第2期  
(总第730期)



由 扫描全能王 扫描创建

大型风力发电机组的智能控制研究.....	张 鹏 41
个人分拆销售汇监管难点及对策.....	杨 楠 42
企业会计财务管理与内部控制要点探析.....	马银萍 卜祥海 43
ERP 环境下税务会计模式的选择.....	王海芳 夏青松 44

## 网络经济

有关计算机管理技术分析探讨.....	王庆伟 45
计算机数据库技术在信息管理中的应用.....	周绪珍 46
云计算在安防视频监控领域的应用.....	曹 怀 47

## 市场论坛

浅谈单片机的步进电机控制系统.....	黄 斌 48
煤粉炉燃烧稳定性的研究.....	朱德强 49
浅谈党刊编辑如何树立现代编辑意识.....	郭文利 50
汽车年审与维修技术的探讨.....	阳明斗 51
房地产项目无效成本的分析及控制措施.....	蔡晓波 52
浅谈 ISO9001 质量管理体系认证在企业管理工作中的重要作用.....	张兆祺 53

## 理论探讨

实验室质量控制计划的制定与评价方式.....	李 君 54
浅谈三亚空管站多点场面监视自动化系统.....	王其江 56
地质灾害防治与地质环境利用.....	赵石磊 黄 萌 57
职工教育培训效果评估与优化策略研究.....	柳 颖 59
简述国产地铁信号系统发展进程.....	张 宁 60
计算机网络管理系统应用的现状及发展.....	何 毅 62
档案利用效果存在的问题及方法.....	李慧敏 63
建筑产业现代化人才培养教学改革研究.....	刘丘林 王艳群 64
浅谈中速磨煤机喷嘴环部的作用与改进.....	张晓明 钟金亮 65
论舞蹈基训中钢琴伴奏的角色及功能.....	王 彬 66
试论高职语文课堂如何激发学生兴趣.....	于雪筠 67
大型透平压缩机叶轮裂纹故障的监测分析与诊断.....	逯梅研 68
煤矿井下通风及瓦斯防治研究.....	张 坤 王 辉 69
论市政给排水工程造价控制与管理的措施.....	李兴宝 70
如何做好防汛物资社会化储备工作.....	阴魁元 71
地铁车辆检修模式探讨.....	龙一帆 李 泷 72
可靠性测试方法在电子产品中的应用研究.....	黄海月 73
色彩景观在园林设计中的应用研究.....	曲 凯 代婉莹 74
计算机科学与技术专业实践教学体系的构建.....	吴秀锋 王 欢 75
燃气计量新技术发展及应用.....	李增荣 76
民用建筑防雷工程设计与施工的几点探讨.....	岳秋杰 77
山东省莱州市马塘二矿区外围找矿前景.....	刘玉琪 78
浅析基于设计方法论的绿色建筑设计.....	姬广洋 79
中央空凋节能技术的应用研究.....	王灿华 80
城市污水处理中污泥处理的可持续分析.....	尚 峰 81

工业电气自动化仪器仪表控制的分析.....	李 鹏 杨全立 82
试论电气自动化技术在矿山中的应用.....	孔维存 宋 超 83
风机发电现状与发展趋势.....	白方媛 84
浅谈计算机硬件维护.....	吕 鹏 胡景宇 85
特高压物资供应计划管控及供应商生产进度监控.....	冯 博 86
浅谈如何提高燃气计量的准确性.....	李增荣 87
新形势下艺术设计的表现特征.....	佟 哲 88
环境艺术设计对生活空间发展的影响.....	孙 澜 89
试析水文地质因素对地质灾害的影响.....	惠云峰 毕立坤 90
概预算编制质量对建筑工程造价的影响.....	李雪威 91
关于装潢艺术设计中的视觉语言分析及其应用探讨.....	廉 阳 92
探究热能与动力工程的现状及科技创新.....	刘泽鹏 93
碳化硅质泡沫陶瓷过滤片的研制.....	刘 磊 毕家林 张翠敏 高琳琳 94
论生态理念在环境艺术设计中的融入.....	黄禹涵 95
MPS 中速磨煤机密封系统布置方式优化研究.....	刘鹏祥 吕洪悦 96
浅论生态理念下的室内装潢设计.....	崔铁林 97
金融工具预期损失减值模型的比较研究.....	李 然 98
论违章建筑的法律保护.....	张 磊 99
公司治理水平影响因素分析.....	洪 玲 100
城乡总体规划战略环境评价研究.....	陈玉芳 101
高压试验对电力系统高压的影响分析.....	冷 川 何 楠 黄淑英 张亚敏 102

变电检修工作现状及趋势探索.....	陈 旭 吴 帅 朱 辉 王 坤 103
信息化视角下中职计算机教改研究.....	沈 涛 104
超临界水氧化技术处理污泥的研究与应用进展.....	高占朋 105
论电气仪表工程安装与调试.....	王雷科 106
浅析通信工程施工招标评标方法.....	刘 静 107
浅谈如何加强冶金企业铁路线路维修养护.....	付永红 108
解析岩土工程勘察中的水文地质问题.....	王繁春 109
岩土工程地质灾害成因与防治.....	梁 敏 110
找正过程中比例系数的确定方法.....	杜国营 鲍德宝 111

## 电力工程

浅谈制动器故障引起电梯溜车的原因分析及预防措施.....	梁汝芳 112
浅谈窃电行为及反窃电措施.....	罗俊杰 113
火力发电厂中的热工自动化技术研究.....	孙国廷 115
新技术在电气设备状态检修中的应用.....	苗春雨 116
电力系统自动化设备的电磁兼容技术.....	姜冠男 117
电气设备状态监测及故障诊断系统的构建.....	纪舜尧 118
风力发电及其技术发展综述.....	白晓红 119
论建筑电气设计中的节能措施.....	姚向玉 何艳艳 120
变电运维管理中的问题及预防措施.....	蔡欧阳 121
变电站设计阶段造价管理方法与对策研究.....	俞 敏 122
关于电能计量装置带负荷检查用的宽量程负荷箱的研制.....	





# 建筑产业现代化人才培养教学改革研究

刘丘林 王艳群

广州城建职业学院建筑工程学院

**摘要:** 论述了建筑产业现代化的特点,分析了我国建筑产业现代化的发展现状,阐述了装配式建筑人才培养存在的问题,并提出了相应的教学改革策略。

**关键词:** 建筑产业现代化; 装配式建筑; 人才培养; 教学改革; 策略

建筑产业现代化是指通过管理模式的现代化、建筑设计标准化以及构件、部品生产的工厂化、模数化,实现建筑构件的通用化和现场施工的机械化和装配化。发展建筑产业现代化是建筑生产方式从粗放型生产向集约型生产的根本转变,是建筑产业现代化的发展方向和必然途径。

## 1 我国建筑产业现代化的发展现状

目前,我国各行各业都在飞速发展,城市扩张迅速,国家对建筑业的发展提出新要求,降能耗、降成本、实现集约化建设,加大力度推进建筑产业现代化发展,而在实践过程中,如何有效地推进建筑产业现代化实施,具体方略是什么,如何借鉴其他产业的先进生产理念来突破发展瓶颈,诸多学者在这些方面进行了一些研究。但是,对建筑产业现代化专业技术人才的培养没有进行很好的研究,导致当前相关人才极度匮乏。

当前,我国已将推进建筑产业现代化列为“十三五”期间建筑业发展的重点工作。推进建筑产业现代化,有利于提高建筑业生产效率和经济效益,有利于提升建筑品质和改善人居环境质量,有利于促进建设领域节能减排及实现绿色安全施工。推进建筑产业现代化的关键是加快提升建筑企业实力,而适用人才短缺是建筑企业在实力提升过程中面临的主要障碍——以“标准化设计”、“工厂化生产”、“装配施工”、“一体化装修”、“信息化管理”为主要特征的建筑产业现代化,对行业从业人员的知识结构、专业能力有很高要求,这就高校土建专业的人才培养提出了全新的挑战。

## 2 我国装配式建筑教育存在的问题

据推算,我国新型现代建筑产业发展需求的专业技术人才紧缺近800万人,装配式建筑所需后备人才在高校培养中刚刚起步。当前,我国装配式建筑教育存在的问题具体表现在:

(1) 装配式建筑师资力量急需提升,装配式建筑高校教育目前刚刚起步,各高校建筑相关专业大教师对装配式建筑的了解和研究不够深入,对产业化人才需要具备的技能缺乏较为清晰的认识,对如何实现人才培养目标没有可参考借鉴的方法,产业化师资力量不足成为目前制约高校建筑产业化人才培养的重要因素。

(2) 亟待将企业产业技术转化为教学内容,装配式建筑专业方向具有较强的实践性,单一的理论讲解很难达到理想的教学效果,所以需要校企联合,发挥企业的技术实力优势,将企业专家的一线工作经验通过科学的教学方法传授给学生,协同育人、合作发展。

(3) 装配式建筑教育更需要丰富的教学手段,装配式建筑领域知识涵盖面要广,要求熟悉预制构件生产、施工、验收、装配化施工及信息化管理等,简单的课程讲解很难使学生形成产业链的概念难以满足教学要求,必须通过辅助教学手段帮助学生理清知识体系及其内在逻辑关系,通过创新的授课形式激发学生的学习兴趣,理论结合实践在实训中巩固所学技能,从而掌握建筑产业化全产业链的技术要点。

## 3 装配式建筑人才培养教学改革策略

### 3.1 装配式建筑人才培养标准体系宣贯

组织相关高等职业院校,对装配式建筑产业相关单位进行深入调研,基于产业链协调发展需求及岗位标准,修订完善专业教学内容、课程标准、实习及实训体系,确定培养质量标准及相应实施方案。组织宣贯,统一装配式建筑人才培养的认识,为推进装配式建筑教育奠定基础。

### 3.2 核心主干课程教学能力提升

以建筑类专业装配式方向人才培养方案为依据,以“集成化设计,工业化生产,装配化施工,信息化管理,一体化装修”为主线,围绕“概念、设计、生产、施工、钢结构、BIM、成本控制、质量与安全、部品集成”等核心主干课程为主体,开展培训与课程研发,采用一线专家授课、仿真平台实训、线上线下理论实践相结合等形式进行,进而丰富教师教学手段,提升教师实践能力与信息化教学水平,为装配式建筑教育培训奠定师资基础。

主要内容包括:

(1) 企业一线专家授课,快速把握装配式建筑技术要点。企业一线专家担任课程开发与授课任务,依照科学的萃取和加工流程,以实际工程案例为载体,将经验转化为标准化的课程内容,将现场的新知识和新技术及时地融入培训中,不但能够推动专业课程改革,使得所传授课程内容知识与企业实际生产需求无缝衔接,帮助教师快速把握装配式建筑技术要点,有效地帮助提升教师教学能力。

(2) 企业现场轮训,助力实践能力提升。联合装配式建筑领军企业,按照工作岗位为参训教师配备专门的指导老师,“跟、看、学、练”相结合,采用现场观摩、技能训练、关键岗位上岗操作等形式帮助教师掌握专业领域内相关岗位职责、操作规范,锤炼教师实操技能,从而更好地完善教师自身知识、能力结构,使参训教师在后续教学中更能注重面向企业需求,从而及时调整授课内容、课程安排和教学组织形式,有效满足行业不断发展的专业人才需求。

(3) 虚拟仿真教学培训,丰富完善教学手段。学做结合,借助虚拟仿真平台、资源库与教学实训模型,对教师进行教学手段的培训,辅助参训教师将“一维教材、二维图纸、三维模型”有机融合在课程教学中,以多维形式展现知识要点,不断丰富教学手段,并与传统教学协调地融合,激发课堂教学活力,提高课堂教学效果。

(4) “互联网+”教学模式培训,提升信息化教学水平。为促进信息技术与教育教学深度融合,对教师进行信息化教学培训,使教师掌握装配式建筑在线教学平台的使用,将线上教育平台相应的视频、图片、PPT等教学资源库融入课程设计辅助教学,探索“装配式建筑+互联网+教育”的线上线下理论实践相结合的教学新模式。

## 4 结语

现代建筑产业是建筑业、房地产业及相关产业发展到一定阶段的高级状态。它不是单纯的节能减排、环境保护,而是在转型发展中有机地将新的生产力和新的生产方式融入整个经济建设、环境建设、社会建设的全过程。

**第一作者简介:**

刘丘林,男,1983年生,硕士研究生,讲师,主要研究方向为材料科学和高职教育。

**基金项目:** 广东省高等职业教育品牌专业建设项目—建筑工程技术专业(2016gzpp016)



让

# 回忆

得到保护



ISSN 1000-033X CN 61-1119/U

# 筑路机械与施工机械化

## ROAD MACHINERY & CONSTRUCTION MECHANIZATION

www.roadm-china.com  
微信公众号: rmc1984

- 中文核心期刊
- 中国高校特色科技期刊
- 《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊
- 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊

2017年 第9期 第34卷



XAMC 西筑

### 筑绿色层脊 攀环保顶峰

中国首套沥拌设备通过藏地高原环评

SG2000 SG3000 SG4000 SG5000  
环保智能沥青搅拌设备



ISSN 1000-033X



9 771000 033176



中交西安筑路机械有限公司  
CCCC XI'AN ROAD CONSTRUCTION MACHINERY CO., LTD

④ 公司地址: 中国·西安经济技术开发区泾渭新城泾高南路西段8号 ⑤ 邮编: 710200  
 ① 公司电话: 029-86966888 86966889 租赁公司电话: 029-86966659 86966658  
 服务专线: 029-86966666 配件专线: 029-86966677 E-mail: rm@rm.com.cn Http: www.rm.com.cn



由 扫描全能王 扫描创建

# CONTENTS目录

## 话题

- 23 | 高速公路隧道行车安全若干问题探讨  
叶飞, 高翔, 秦鲜卓, 等
- 29 | 振荡压路机压实机理再探讨  
姜右良

## 特稿

- 41 | 基于煤直接液化残渣路面应用研究进展  
刘丘林, 冯雷
- 46 | 煤液化残渣与胶粉复合改性沥青的制备与性能研究  
冯雷, 赵鹏, 秦杨晓

## 设计与试验

- 51 | 断级配综合稳定碎石的路用性能  
李天宇, 王朝辉, 李彦伟
- 55 | 潍坊白浪河大桥主桥钢结构设计  
余沛, 韩守杰, 马建宁, 等
- 59 | 基于SBS改性沥青特征指标的多次再生评价  
邹桂莲, 鄢然, 张陈
- 64 | 有限元法在连续梁落架方案可行性模拟中的应用  
尹忠文, 杨军
- 70 | 高填方路基大孔径钢波纹管涵洞有限元分析  
邓玉川, 杨波, 梁养辉, 等
- 76 | 基于正交试验的新型隧道防火涂料配方优化及其应用  
景宏君, 景宏彬, 孙明东, 等

- 81 | 泡沫(乳化)沥青冷再生混合料的剪切性能  
王燕

## 施工技术与应用

- 89 | 桥台涵背特殊位置路基快速液压实技术  
司葵卯, 赵建成, 邵现田, 等
- 93 | 深水嵌岩桩冲击钻施工技术  
钱华伟
- 98 | 大风高温气候下水稳基层全宽超厚摊铺施工技术  
邓长忠, 赵明庆, 艾尼瓦尔江·吐尔洪

## 施工机械与管理

- 103 | 沥青混凝土路面智能压实监控系统的设计与应用  
曹亚东, 朱志国, 乐海淳, 等
- 107 | 面向人工智能2.0的工程机械创新趋势  
陈伟, 吴金海
- 111 | 多点测试在工程车辆冷却性能预测中的应用  
王宝中, 刘佳鑫, 邢梦龙, 等

## 质量检测与控制

- 116 | 基于正态云模型的桥梁结构安全风险评价  
刘洋, 熊伟芬, 邱明喜
- 121 | 沥青路面施工质量控制中数理统计技术的应用  
王群智, 王洁林, 王春丽
- 126 | 大跨度人行悬索桥静动力性能评价  
江志远



本刊微信公众帐号

我们的微信公众帐号已经开通, 搜索“rmcm1984”订阅即可!



由 扫描全能王 扫描创建

# 基于煤直接液化残渣路面应用研究进展

Research Progress of Application of Direct Coal Liquefaction Residue in Pavement

刘丘林<sup>1</sup>, 冯雷<sup>2</sup>

1. 广州城建职业学院 建筑工程学院, 广东 广州 510925

2. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061

## 0 引言

中国的能源特点是煤炭富足、油气贫乏, 因此要完善煤炭资源的开发和利用, 并开发煤炭制备油气技术, 从而促进社会经济的持续快速增长, 实现能源的可持续发展。目前中国的能源消耗结构中煤炭占68%, 石油占23.45%, 天然气仅占3%, 煤炭资源占有举足轻重的地位。表1和表2分别为世界石油、天然气和煤炭储量排名前10名的国家以及世界能源消耗量前10名的国家<sup>[1]</sup>。由于煤炭资源的开采技术落后以及不合理使用, 极大地增加了大气中二氧化碳的排放量, 严重影响了自然环境<sup>[2-4]</sup>。为了解决应用煤炭资源所带来的环境污染问题, 研究者们研发出了洁净煤技术(Clean Coal Technology, CCT), 目前这项技术正在逐渐形成一个体系, 将指导解决更多由煤炭利用而带来的环境污染问题<sup>[5]</sup>。

煤直接液化技术是一种洁净煤技术, 可以生产汽油、柴油、液化石油气以及芳香烃等工业产品, 但是会有20%~30%的副产品DCLR(煤直接液化残渣)。对DCLR的利用程度将直接影响煤液化技术的转化效率以及经济性, 所以这种副产品备受研究者的关注。自1913年德国柏吉乌斯开始研究煤高压加氢液化以来, 煤直接液化技术经历了漫长的发展过程, 逐渐趋于成熟。从资源再利用和环境保护的角度出发, 十分有必要对DCLR进行高附加值转化利用<sup>[6]</sup>, 因此很多学者开始进行这方面的研究, 并取得了显著的成果。

## 1 DCLR基本结构的特性

目前, 中国已经实现了煤直接液化技术的工业化应用。由于原煤中的无机矿物较多, 导致DCLR中的灰分总量较高, 同时在液化过程中需要使用硫来催化, 这些催化剂会残留在DCLR之中<sup>[7-10]</sup>, 导致DCLR的组成较为复杂, 使其再利用面临巨大的挑战。不同液化工艺下所生成的产物组成如表3所示, 由表3可见, 煤直接液化的方式决定了产物各组分的比例。

DCLR通常指煤加氢液化产物经过减压蒸馏后得到的副产品。图1为DCLR的扫描电镜观察图。残渣主要由煤中的矿物质、残留催化剂、未反应煤、沥青质以及少量重油组成, 是一种高灰、高碳、高硫的“三高产物”。为了可以顺利地减压蒸馏装置中排出, DCLR必须具有一定的流动性, 因此DCLR软化点不高于180℃, 固含量不超过50%。通过使用凝胶色谱、核磁共振和裂解色谱质谱等元素分析方法进行研究, 发现DCLR主要含有C、H、O、N、S等元素, C元素的含量高达70%~85%, 密度为1.43 g·cm<sup>-3</sup>, 软化点为193℃, 主要成分为20%~30%的重质油、20%~30%的沥青烯、5%~10%的前沥青烯和45%的四氢呋喃不溶物。其中: 重质油的平均分子量为339, 平均分子式为C<sub>25</sub>H<sub>31</sub>O<sub>2</sub>N<sub>0.26</sub><sup>[11]</sup>; 前沥青烯的分子量为1 000<sup>[12]</sup>; DCLR的芳香度为0.25~0.33<sup>[13]</sup>, 芳烃的种类多、含量高, 大分子的缩合芳环是DCLR的主要组成部分<sup>[14]</sup>。通过对DCLR进行显微光学研究, 发现其含有未反应的情质组、

基金项目: 广东省高等职业教育品牌专业建设项目(2016gzpp016)



表1 世界石油、天然气和煤炭储量前10名的国家

石油			天然气			煤炭		
国家	储量 / (10 <sup>8</sup> t)	占世界总量百分比/%	国家	储量 / (10 <sup>12</sup> t)	占世界总量百分比/%	国家	储量 / (10 <sup>8</sup> t)	占世界总量百分比/%
沙特阿拉伯	36.0	25.2	俄罗斯	47.57	30.7	美国	249 994	25.4
伊拉克	15.2	10.6	伊朗	23.00	14.8	俄罗斯	157 010	15.9
科威特	13.3	9.3	卡塔尔	14.40	9.3	中国	114 500	11.6
阿联酋	13.0	9.0	沙特阿拉伯	6.22	4.0	印度	84 396	8.6
伊朗	12.3	8.6	阿联酋	6.01	3.9	澳大利亚	82 090	8.3
委内瑞拉	11.2	7.8	美国	5.02	3.2	德国	66 000	6.7
俄罗斯	6.7	4.7	阿尔及利亚	4.52	2.9	南非	49 520	5.0
墨西哥	3.8	2.7	委内瑞拉	4.18	2.7	乌克兰	34 153	3.5
利比亚	3.8	2.7	尼日利亚	3.51	2.3	哈萨克斯坦	34 000	3.5
美国	3.7	2.6	伊拉克	3.11	2.0	波兰	22 160	2.3
总计	119	83.2	总计	117.54	75.8	总计	893 823	90.8

表2 世界能源消耗量前10名的国家

石油			天然气			煤炭		
国家	消耗量 / (10 <sup>8</sup> t)	占世界总量百分比/%	国家	消耗量 / (10 <sup>8</sup> t)	占世界总量百分比/%	国家	消耗量 / (10 <sup>8</sup> t)	占世界总量百分比/%
美国	895.6	25.5	美国	616.2	25.6	美国	555.7	24.6
日本	247.2	7.0	俄罗斯	372.7	15.5	中国	520.6	23.1
中国	231.9	6.6	英国	95.4	4.0	印度	173.5	7.7
德国	131.6	3.7	德国	82.9	3.4	俄罗斯	114.6	5.1
俄罗斯	122.3	3.5	日本	79.0	3.3	日本	103.0	4.6
韩国	103.1	2.9	加拿大	72.6	3.0	德国	84.4	3.7
印度	97.1	2.8	乌克兰	65.8	2.7	南非	80.6	3.6
法国	95.8	2.7	伊朗	65.0	2.7	波兰	57.5	2.5
意大利	92.8	2.6	意大利	64.5	2.7	澳大利亚	47.6	2.1
巴西	85.1	2.4	沙特	53.7	2.2	韩国	45.7	2.0
总计	2 102.5	59.9	总计	1 567.8	65.2	总计	1 783.2	79

表3 不同液化工艺所对应的产物含量

液化工艺	原料煤	操作条件		收率/%	各产物质量百分率/%				
		温度/℃	压力/MPa		轻油	中油	重油	残渣	气体和水
H-Coal	Minois	450	21	11.5	19	31.5		27	11
CTSL	Minois	442/400	17	14.35	14.31	30.34	15.12	11.19	14.69
IGOR	Bosper	475/400	30	21.8	21.8	33.4		17	10.1
EDS	Minois	450	14	6.6	6.6	8.7	8.3	42.8	14
NEDOL	Wandoam	450	17	9.6	9.6	29.3	2.1	22.2	16.1

注: H-Coal为氢煤法; CTSL为两段催化液化法; IGOR为精制联合工艺; EDS为供氢剂法; NEDOL为烟煤液化法。

中间相小球体和半焦等成分<sup>[15]</sup>。DCLR对温度非常敏感,在升温过程中黏度下降很快,没有黏度峰,是一种非牛顿型假塑性流体,高温时接近牛顿流体<sup>[16]</sup>。

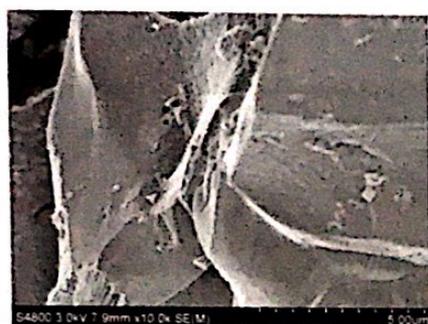
## 2 DCLR的高附加值利用

### 2.1 DCLR的主要利用方法

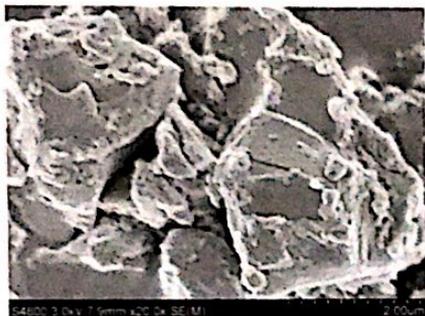
在中国石化燃料资源越来越少的情况下,深入研究DCLR的高效利用具有重要的意义。无论是从改善煤炭直

接液化整体的经济性考虑,还是从提高资源利用率和环境保护的角度出发,对DCLR的转化再利用都是一项重要的课题。对DCLR的合理利用,必须以其性质为基础,结合环保理念,实现废物的高附加值再利用。DCLR的高附加值利用主要有以下几个方面:加氢液化<sup>[17-18]</sup>、气化<sup>[19-20]</sup>、干馏(热解和焦化)<sup>[21-23]</sup>、作为锅炉和窑炉的燃料<sup>[24-25]</sup>、制备碳素材料<sup>[26-27]</sup>和作为道路沥青改性剂<sup>[28-29]</sup>等。其中较常见的是DCLR的液化、气化以及干馏热解。DCLR中的重油及沥青质组分可以进一步加氢转化为石油制品,对提





(a) 放大1万倍



(b) 放大2万倍

图1 DCLR的SEM图像

高煤液化油收率具有重要意义。因液化过程需要大量的氢气，DCLR用于气化制氢既能消耗部分DCLR，又能为液化提供一定量的氢气，所以DCLR的气化利用可起到一举两得的作用。DCLR的干馏热解是从DCLR中回收油分的主要方法，可分为DCLR的单独热解和与煤的共热解，DCLR中的沥青类物质及高沸点油类还可以通过热解过程转变为焦炭和可蒸馏油等工业产品。

## 2.2 DCLR基于路面的应用研究

所谓的改性沥青是指在石油沥青中添加相应的改性剂后制得的均匀沥青混合物。改性剂主要分为聚合物和非聚合物两大类，其中聚合物改性剂主要有树脂类和橡胶类等，如SBS和PE等，非聚合物改性剂主要有天然沥青、纤维、抗剥离剂、抗氧化剂、硫黄、炭黑和湖沥青等。图2为天然沥青（TLA），中国有很多重大工程使用天然沥青作为改性剂铺筑改性沥青路面，如首都国际机场、成渝高速等路段。TLA的需求量逐年增加，但由于TLA资源有限，且进口价格普遍较高，严重制约了TLA改性沥青的使用。

将DCLR作为道路沥青改性剂是一种二次利用DCLR的手段之一。中国科学院山西煤炭化学研究所通过研究TLA的结构组成特征，开发出由煤和催化裂化油浆共处理而制得的TLA替代产品<sup>[30]</sup>，为煤基重质产物的优化利



图2 天然沥青TLA

用提供了一条新途径。长安大学的何亮<sup>[31]</sup>研究以煤直接液化残渣为原料、以煤液化残渣和提纯残渣为改性剂制备改性沥青的方法，研究制备DCLR改性沥青的过程及各种参数对DCLR改性沥青性能的影响，通过沥青混合料试验进一步验证其路用性能，确定最佳配比。长安大学赵鹏<sup>[32]</sup>研究了DCLR在道路沥青混凝土中的应用，按沥青用量的15%、20%和25%分别替代道路沥青混凝土中的沥青，发现在湿法配混工艺下，DCLR改性沥青混合料的高温性能、低温性能以及水稳定性等技术指标均符合规范要求。山西交科院的王寒霞进行了DCLR对道路沥青改性作用的初步评价，图3为DCLR的质量分数对改性沥青软化点、针入度和延度的影响。该研究发现：DCLR的添加量为7%时，所制得的DCLR改性沥青的相关指标均能够满足ASTM D5710-95标准的40~55针入度级别和BSIBS-3690标准的50针入度级别对TLA改性沥青的指标要求；且随着DCLR在改性沥青中质量分数的增加，DCLR改性沥青的软化点逐渐升高，针入度和延度逐渐下降；单纯从改性沥青的试验结果看，DCLR有可能替代TLA而获得40~55或50针入度级别的改性沥青，且用量明显小于TLA改性剂的用量。

北京建筑大学的季节等人研究了DCLR与沥青共混后的改性沥青的高温性能、低温性能和改性沥青混合料的路用性能等，并针对DCLR的不同掺量（5%、10%、15%、20%），利用DSR、BBR、红外光谱仪和凝胶色谱仪等设备分析了DCLR改性沥青的宏观性能和微观结构变化，试验结果如图4所示。由图4可知，无论基质沥青为SK-90还是DM-70，与10% DCLR共混后，其官能团与基质沥青官能团基本是一致的，在主官能区和指纹区出现的特征峰的位置和强度也基本相同，DCLR对基质沥青的分子结构和组分没有影响，而DCLR改性沥青的高温性能优于基质沥



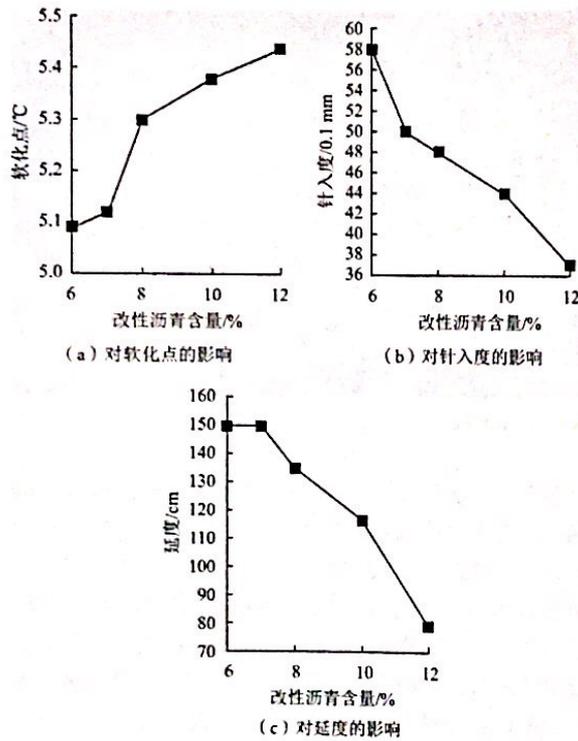


图3 DCLR的质量分数对改性沥青的软化点、针入度和延度的影响

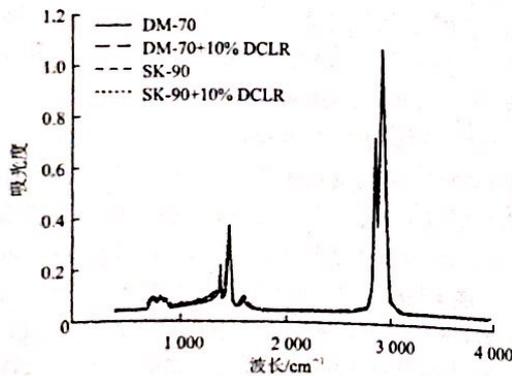


图4 10%DCLR与沥青共混后的官能团

青, 低温性能则略低于基质沥青, 即DCLR对基质沥青的改性属于物理改性, 而非化学改性, 物理改性主要表现在DCLR的溶胀、溶解和被溶解以及填充作用等方面<sup>[11]</sup>。

朱伟平<sup>[12]</sup>研究了DCLR和基质沥青的配混工艺对DCLR改性沥青的影响, 图5为采用一定量的DCLR和基质沥青配制不同DCLR改性沥青的制备工艺。课题组研究了3种不同的配合工艺对DCLR改性沥青三大指标的影响, 通过对比这3种配混工艺, 发现第3种工艺混合效果较好, DCLR在基质沥青中分散较好, 所制得的改性沥青的三大

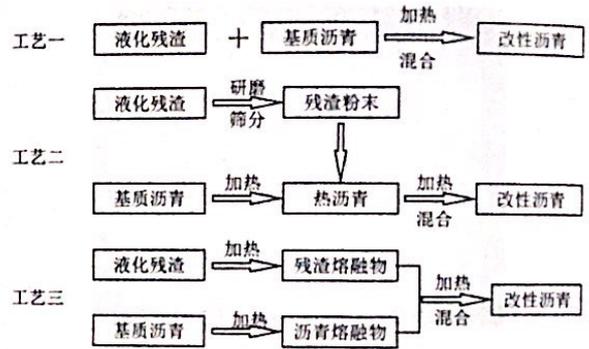


图5 DCLR改性沥青制备工艺

指标优于其他2种工艺; 研究还发现, 混合温度对DCLR改性沥青的性能有一定影响, 综合考虑老化前后的针入度、延度和软化点, 确定了混合温度为200 °C。

### 2.3 DCLR的实体工程应用

长安大学赵鹏在陕西省榆林市清水工业园区进行了煤液化残渣改性沥青混合料路面的试铺, 如图6所示。该地区最高气温为35 °C, 最低气温为-25 °C, 年平均降雨量为400 mm, 该实体工程于2015年6月铺筑完成, 路面使用效果良好, 没有出现裂缝、塌陷等路面病害。

目前, 石油供需紧张使路用沥青的生产成本增加, 然而, 以残渣为原料制备的改性沥青的性能可以满足道路交通的需要和相关规范的要求。DCLR可以降低沥青路面铺筑的成本, 此外对治理工业污染、提高自然资源的利用率、增加DCLR利用价值都会产生积极的影响。DCLR应用于道路工程的重要意义是其所带来的节能环保效益, 主要体现在能够处理煤直接液化所产生的大量副产品。目前世界各国研究者都在寻找合理利用DCLR的方法, 以提高自然资源的利用效率。在中国, 大规模的煤直接液化副产品DCLR将会带来巨大的社会环保问题和资源浪费问题, 因此DCLR用作路面材料, 是一种长期、可靠、经济、可循环的方式, 能基本解决因煤直接液化工业所产带来的环境污染和资源浪费, 符合当代节能环保的发展主题。

### 3 结语

中国对于煤直接液化工业的副产品DCLR的处理还没有成熟可靠的技术, 目前对DCLR处理技术的探索偏重于试验性, 研究不够全面, 距离实际的工业化应用还有一定差距, 如何高效、清洁地利用液化残渣是行业学者们必须解决的一个重点问题。当代社会, 环境保护和能源节约是一切社会活动应遵循的准则, 无论是从煤直接液化技术的





图6 实体工程铺筑

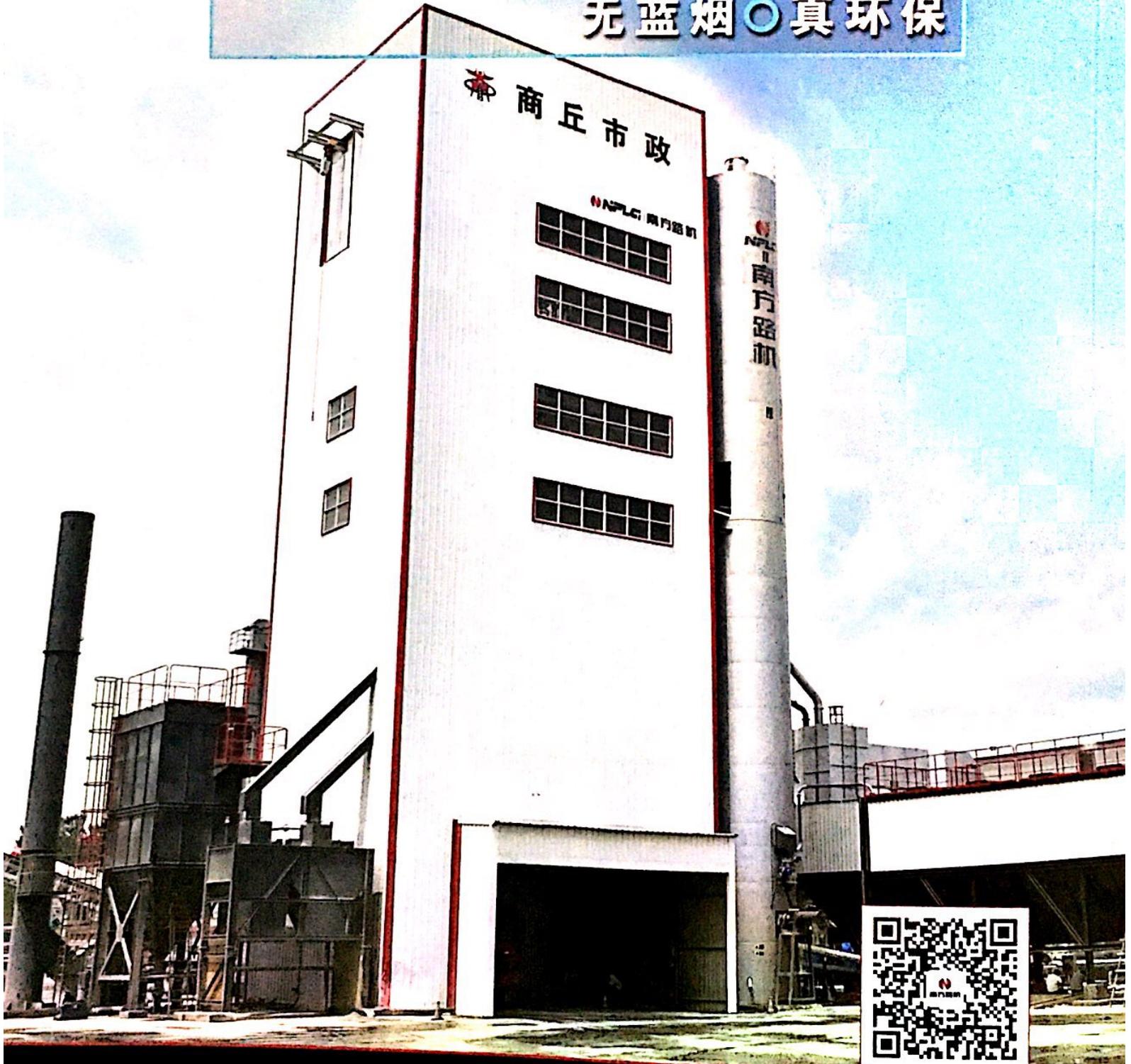
经济性考虑,还是从资源再利用、环境保护的角度出发,都十分有必要对DCLR进行高附加值转化利用。DCLR用于道路石油沥青的改性,不仅为DCLR开辟了一条新的使用途径,而且为沥青改性剂添加了新的种类。

#### 参考文献:

- [1] 全晶.世界及中国能源结构[J].能源研究与信息,2003,19(1):20-26.
- [2] 张慧琴,王秋玲,高树婷.中国火电发展环境效益初探[J].中国能源,1995(3):47-49.
- [3] 陈宏刚,李凡,谢克昌.中国洁净煤技术的研究与开发[J].煤炭转化,1997(3):1-7.
- [4] 陈鹏.中国高硫煤及其排放SO<sub>2</sub>污染控制[J].煤炭转化,1998(3):1-6.
- [5] 王洪记.国内洁净煤技术研究现状及开发动态[J].化学工业,1998(4):7-11.
- [6] N P, SHIPMAN A, RUI H. Coal Liquefaction, Shenhua Group, and China's Energy Security[J]. European Management Journal, 2004,22(2): 150-164.
- [7] H CUI, YANG J, LIU Z. et al. Characteristics of Residues from Thermal and Catalytic Coal Hydroliquefaction[J]. Fuel, 2003, 82(12): 1549-1556.
- [8] 田新娟,杨平平,李育群,等.硫含量对煤直接液化性能的影响[J].煤田地质与勘探,2009,37(6):19-21.
- [9] 赵鹏,孙淑君,卢正元,等.煤直接液化残渣性质及高附加值应用研究进展[J].洁净煤技术,2009,15(6):33-35.
- [10] HIRANO K. Outline of NEDOL Coal Liquefaction Process Development (Pilot Plant Program)[J]. Fuel Processing Technology, 2000, 62(2-3): 109-118.
- [11] 谷小会.神华煤直接液化残渣结构特性的探讨[D].北京:煤炭科学研究总院,2005.
- [12] MASUDA K, OKUMA O, KANAJI M, et al. Chromatographic Characterization of Preasphaltenes in Liquefied Products from Victorian Brown Coal[J]. Fuel, 1996, 75(9): 1065 - 1070.
- [13] RATHBONE R F, HOWER J C, DERBYSHIRE F J. The Application of Fluorescence Microscopy to Coal-derived Resid Characterization[J]. Fuel, 1991,70(8): 1177-1185.
- [14] 位艳宾.煤液化残渣的组成结构分析和催化加氢[D].徐州:中国矿业大学,2013.
- [15] 陈洪博,李文华,姜英,等.神东煤液化残渣显微组分的特征与分类研究[J].燃料化学学报,2006,34(5):513-518.
- [16] 任英杰,魏安岭,张德祥,等.煤加氢液化残渣的流变特性研究[J].燃料化学学报,2007,35(3):262-267.
- [17] 宋宜诺,王力.神华煤液化残渣的液化特性研究[J].自动化应用,2008,(1):38-40.
- [18] 王国龙,徐蓉,张德祥,等.煤液化残渣加氢性能[J].石油学报:石油加工,2009,25(5):747-751.
- [19] 崔洪,杨建丽,刘振宇,等.煤直接液化残渣的性质与气化制氢[J].煤炭转化,2001,24(1):15-19.
- [20] 崔洪,杨建丽,刘振宇.煤液化残渣基本性质及气化活性的考察研究[J].燃料化学学报,1999,27(1):16-20.
- [21] 周俊虎,方磊,程军,等.神华煤液化残渣的热解特性研究[J].煤炭学报,2005,30(3):349-352.
- [22] 王鹏,步学刚,忻仕河,等.煤直接液化残渣热解特性研究[J].煤化工,2005,33(2):20-23.
- [23] 陈明波,王彬,赵奇,等.煤直接液化残渣焦化特性研究[J].洁净煤技术,2005,11(1):29-33.
- [24] 张维东,云智明.CFB锅炉掺烧油灰渣的研究与应用[J].内蒙古科技与经济,2011(16):86-87.
- [25] 周俊虎,方磊,程军,等.煤液化残渣与褐煤混合燃烧硫污染物排放规律[J].浙江大学学报:工学版,2006,40(1):131-134.
- [26] 周颖,张艳,李振涛,等.以煤炭直接液化残渣为原料制备炭纳米管[J].煤炭转化,2007,30(3):41-44.
- [27] Nan Xiao, Ying Zhou, Jie Shan Qiu, et al. Preparation of carbon nanofibers/carbon foam monolithic composite from coal liquefaction residue[J]. Fuel, 2010, 89(5): 1169-1171.
- [28] 郑丽珍.澄合10<sup>#</sup>高硫煤直接液化性能及其残渣改性基质沥青研究[D].西安:西安科技大学,2012.
- [29] 王塞霞,杨建丽,刘振宇.煤直接液化残渣对道路沥青改性作用的初步评价[J].燃料化学学报,2007,35(1):109-112.
- [30] 薛永兵,杨建丽,刘振宇,等.煤与FCC油浆共处理重质产物对道路沥青改性作用的评价[J].石油学报:石油加工,2006,22(1):95-99.
- [31] 何亮.煤液化残渣复合改性沥青制备及其性能研究[D].西安:长安大学,2013.
- [32] 赵鹏,冯雷,刘盖,等.煤液化残渣在道路沥青混凝土中的应用研究[J].筑路机械与施工机械化,2016,33(2):61-64.
- [33] 季节,索智,石越峰,等.煤直接液化残渣与沥青共混后的性能试验研究[J].公路交通科技,2016,33(5):33-38.
- [34] 朱伟平.煤直接液化残渣改性沥青的研究[J].神华科技,2009,7(6):68-71.



南方路机全环保沥青搅拌设备  
**节能！降耗！减排！**  
无蓝烟○真环保



**福建南方路面机械有限公司**  
FUJIAN SOUTH HIGHWAY MACHINERY CO.,LTD.

网址：www.nflg.com 地址：福建省泉州市丰泽区高新产业园区体育街700号  
国内统一刊号：CN61-1119/U 订阅：全国各地邮电局（所） 邮发代号：52-57 国外代号：M4170 定价：20.00元

南方路机官方微信

**0595-28200033**



由 扫描全能王 扫描创建

# 5. 高熵合金的研究现状和应用前景

中国科技论文统计源期刊 | 中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊 | 中国科技核心期刊  
中国学术期刊影响因子年报统计源期刊 | 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊 | 中文核心期刊

ISSN 1006-6543  
CODEN FYGOFU

# 粉末冶金工业

## POWDER METALLURGY INDUSTRY

中国钢协粉末冶金分会 中国机协粉末冶金分会 中国有色金属加工工业协会 会刊



### 莱芜钢铁集团粉末冶金有限公司

我们谨向您提供  
钢铁粉末系列产品和优质的技术服务



莱钢集团  
粉末冶金有限公司



中国钢研科技集团有限公司  
中国钢协粉末冶金分会  
中国机协粉末冶金分会

主办

# 6 2017

第27卷 总第162期  
(卷终)

### 目次

专家论坛	
世界金属注射成形发展现状 .....	张志恒 (1)
研究与开发	
碳/氮源对碳热还原(Ti, W)(C, N, B)固溶体粉末合成的影响 .....	张正权, 金永中, 杨林, 明月星, 姜伦 (8)
.....	田键, 周昱, 叶斌, 潘皇宇, 黄志林 (13)
纳米级氮化钨最佳纳米化尺度的计算研究 .....	张慧娟 (18)
固相反应法制备铈钨共掺硅酸盐荧光粉材料及其应用研究 .....	原波, 丘永亮, 何显运, 徐勇军 (22)
PCL微/纳米纤维弹性性能在弯曲实验中的尺度效应研究 .....	孔祥吉, 刘超, 况春江, 顾虎, 王凡 (27)
316L不锈钢粉末微注射成形的烧结过程有限元模拟研究 .....	葛渊, 谈萍, 李增峰, 王建永, 汪强兵, 杨保军 (34)
.....	张汪年, 邓宁 (39)
蒙乃尔多孔板的力学性能研究 .....	
Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> 对白云石烧结性能和抗水化性能的影响 .....	
评述与进展	
航空航天用高品质3D打印金属粉末的研究与应用 .....	韩寿波, 张义文, 田象军, 刘明东, 贾建 (44)
SPS技术在粉末冶金材料中的应用现状 .....	刘春荣, 刘胜林, 张唯玮, 董佑邦, 杨晶晶 (52)
烧结Nd-Fe-B的力学性能研究进展 .....	程星华, 周磊, 李建, 刘涛, 喻晓军, 李波 (57)
高熵合金的研究现状和应用前景 .....	刘丘林, 刘允中, 王艳群 (64)
革新与交流	
地铁受电弓用自润滑材料研究 .....	谢健全, 张彦林 (70)
科技前沿	
亚纳米尺度光热转换材料取得新进展 .....	(26)
Materialise新软件: 自动3D打印金属支撑, 缩短50%时间, 节省20%粉末 .....	(43)
行业动态	
第三届注射成形专题研讨会及产业论坛在广东东莞召开 .....	(38)
安泰科技霸州粉末工厂隆重开业 .....	(56)

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1006-6543.20160115

## 高熵合金的研究现状和应用前景

刘丘林<sup>1</sup>, 刘允中<sup>2</sup>, 王艳群<sup>1</sup>

(1. 广州城建职业学院建筑工程学院, 广东广州 510925; 2. 华南理工大学国家金属材料近净成形工程技术中心, 广东广州 510640)

**摘要:**综述了高熵合金的制备方法、特性及其应用前景。高熵合金是近年发展起来的新型合金, 通常包含 5 种以上的主要元素, 各主元的原子分数在 5%~35% 之间, 其组织和性能在许多方面有别于传统合金。随着对高熵合金研究的深入, 其应用会越来越广, 对各行各业的影响也会越来越大。

**关键词:**高熵合金; 制备方法; 特性; 应用

**文献标志码:**A **文章编号:**1006-6543-(2017)06-0064-06

### Research status and application prospect of high-entropy alloy

LIU Qiu-lin<sup>1</sup>, LIU Yun-zhong<sup>2</sup>, WANG Yan-qun<sup>1</sup>

(1. Institute of Architecture and Engineering, Guangzhou City Construction College, Guangzhou 510925, China;  
2. National Engineering Research Center of Near-Net-Shape Forming Technology for Metallic Materials, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The preparation methods, properties and application prospect of high-entropy alloys were summarized. High entropy alloy is a new type of alloy developed in recent years, which usually contains more than five main elements, and the atom percent of each principal element is between 5% -35%. The microstructure and properties of high-entropy alloys are different from the traditional alloys in many aspects. With the deepening of the research on high entropy alloy, its application will be more and more wide, and the influence on all walks of life will be more and more.

**Key words:** high-entropy alloy; preparation method; property; application

以一至两种元素为主, 并辅以少量其他元素改善合金性能<sup>[1]</sup>, 是传统合金的设计思路。20 世纪 90 年代, 台湾国立清华大学叶均蔚教授<sup>[2]</sup>打破传统的合金设计理念, 提出了等物质的量多主元合金的概念, 并将其定义为高熵合金。Cantor 等<sup>[3]</sup>也在同一时间将其命名为等原子比多组元合金。高熵合金是一种超级固溶体, 无法区分溶质和溶剂, 一般由 5 种或 5 种以上金属或非金属元素组成, 以等物质的量比或近等物质的量比组合而成, 没有一种元素的含量超过 50% (原子分数), 因而高熵合金特性由各主

元共同决定<sup>[4]</sup>。

### 1 高熵合金的定义

在规则固溶体合金体系中,  $n$  元合金的混合熵  $\Delta S_{\text{mix}}$  可由式(1)获得<sup>[5]</sup>。

$$\Delta S_{\text{mix}} = -R \sum_{i=1}^n (c_i \ln c_i) \quad (1)$$

式中:  $R$  为气体常数, 取  $8.31 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$ ;  $c_i$  表示第  $i$  种元素在该合金体系中所占的原子分数。当合金

**基金项目:**广东省高等职业教育品牌专业建设项目(2016gzpp016)

**作者简介:**刘丘林(1983—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事粉末冶金技术的研究。

**收稿日期:**2016-10-12

中各组元原子比相等时,该  $n$  元合金体系的混合熵达到最大值,最大混合熵可表述为式(2)<sup>[5]</sup>。

$$\Delta S_{\text{mix}}^{\text{max}} = -R \left( \frac{1}{n} \ln \frac{1}{n} + \frac{1}{n} \ln \frac{1}{n} + \dots + \frac{1}{n} \ln \frac{1}{n} \right) = R \ln n \quad (2)$$

根据式(1)和式(2)易知:随着合金组元数的增加,合金体系的混合熵不断增加,但熵的增加幅度则逐渐变小,并且当组元数  $n \geq 13$  时,组元数的增加对混合熵的增量贡献变得十分有限。

因此,大多学者把高熵合金定义为:以多种合金元素 ( $5 \leq n \leq 13$ ) 为主要组成基元,且每种主元的原子分数介于 5%~35% 之间而构成的新型合金。

## 2 高熵合金的 4 大效应

高熵合金作为一种新型的固溶体合金,具备一些与传统合金不同的特征,主要体现在以下 4 个方面。

### 2.1 高熵效应

由上述可知,多主元 ( $n \geq 5$ ) 的特性造成高熵合金的“混合熵”很高,从而形成“高熵效应”。而正是这种“高熵效应”促使各组成元素自由无序地分布,形成了简单的无基元固溶体,而不是结构复杂的物相或化合物<sup>[6]</sup>。

### 2.2 严重的晶格畸变

在多主元高熵合金这种无基元的固溶体中,各原子周围都分布着其他不同种类的原子,而不同种类的原子具有不同的原子半径,导致晶格存在很大的应力而使得晶格发生严重的畸变。另外,不同种类原子间的结合能和晶体结构的差异也会导致晶体晶格畸变严重<sup>[7]</sup>。

### 2.3 迟缓扩散效应

要完成高熵合金中原子扩散的相变,就需要调动比传统合金中更多种类的原子;多种不同类型的原子扩散会造成晶格势能波动范围加大,从而产生很多可作为“陷阱”的低晶格势能的晶格间隙,这些“陷阱”能有效地阻碍原子运动。所以,产生了原子迟缓扩散效应<sup>[7]</sup>。

### 2.4 鸡尾酒效应

鸡尾酒效应,是基于主要组元本身特性及其交互作用相结合产生的一种复杂效应,并不是各组元本身特性的简单叠加。例如:加入 Fe、Ni、Co 等磁性元素能使合金获得磁性能,但合金的磁性能并不是各元素磁性的简单叠加<sup>[8]</sup>。

## 3 高熵合金的制备方法

### 3.1 真空熔炼法

真空熔炼法制备高熵合金的主要工艺为:将纯金属按一定的比例放入坩埚中,抽真空后充入氩气,在氩气保护下熔炼,待全部均匀熔化后浇铸成形。该方法是目前大多数研究者制备高熵合金所采用的方法。其熔炼温度较高,可熔炼熔点较高的合金,并且对于易挥发的杂质和某些气体的去除具有良好的效果<sup>[9]</sup>。

张华等<sup>[10]</sup>采用真空电弧炉制备了  $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFe-Ni}$ 、 $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFeNiSi}_{0.2}$ 、 $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFeNiTi}_{0.5}$  高熵合金,测定了合金的抗高温氧化性。发现 3 种高熵合金在 800 °C 和 900 °C 氧化增重均较少,具有优异的抗高温氧化性能。尹可心等<sup>[11]</sup>用真空电磁感应炉制备了一种以 Al、Mg、Zn、Cu、Ti 等 5 种元素作为主元素的高熵合金。发现制备的  $\text{Al}_7\text{Mg}_{3.6}\text{Cu}_{1.2}\text{Zn}_7\text{Ti}_{1.2}$  合金虽然脆性较大,但抗压强度较高,达到了 572.89 MPa。孙昭媛<sup>[12]</sup>利用 WK-II 型非自耗真空熔炼炉制备了  $\text{AlFeCoNiCrCuV}_x$ 、 $\text{Cu}_{0.5}\text{FeAlNiCrMo}_x$  系列高熵合金,对合金的显微组织和力学性能进行了分析测试,研究了合金元素对高熵合金显微组织和力学性能的影响。发现随着 V 含量的增加,合金组织明显细化,硬度和强度逐渐增大,塑性逐渐降低;随着 Mo 含量的增加,bcc 和有序 bcc 结构的晶格常数逐渐增加,合金硬度逐渐增大,强度逐渐增加,塑性也得到一定的改善。

但是,用真空熔炼法制备的高熵合金中往往存在组织不均匀、孔隙、缩孔、内应力大、脆性大等缺陷,使得高熵合金的性能难以发挥到最优,限制了合金的进一步应用。

### 3.2 机械合金化法

采用机械合金化法制备高熵合金,就是将合金粉末混合,与磨球按适当的配比放入高能球磨机中进行球磨,经球磨机长时间运转而使粉末机械混合,并将机械能传递给粉末,使其承受冲击、剪切、压缩、摩擦等多种力的综合作用,发生塑性变形,最终得到成分均匀的纳米晶或非晶颗粒<sup>[13]</sup>。

方思聪<sup>[14]</sup>采用机械合金化-放电等离子烧结的方法,制备了  $\text{AlCoFeNiCu}$  系高熵合金,研究了不同 Al、Cu 含量下该系高熵合金的机械合金化行为、相形成规律、显微组织和力学性能。发现该系高熵合

金为单一 fcc 相或 (fcc+bcc) 相组成; 并且随着 Al 元素的增加和 Cu 元素的减少, 该系合金的强度、硬度上升, 塑性降低。袁尹明月等<sup>[15]</sup>采用机械合金化和真空热压烧结方法制备了  $\text{Al}_x\text{CoCrCu}_{0.5}\text{FeNi}$  高熵合金, 研究 Al 含量对合金系的晶体结构、显微组织、硬度、压缩性能以及摩擦磨损行为的影响。发现合金晶体结构均为 fcc 和 bcc 双相结构, Al 含量的增加使合金塑性降低, 硬度和强度增大。许世红等<sup>[16]</sup>通过机械合金化球磨反应制备了不同组元数和等物质的量组成的合金体系 Mg-Ti-V-Cr-Ni, 研究了组元数及热处理对合金球磨产物显微组织和相形成规律的影响。发现高熵合金 MgTiVCrNi 球磨产物可形成富 Mg 的非晶相与贫 Mg 的纳米晶 bcc 型相, 该 bcc 型固溶体结构具有较高的热稳定性。

采用机械合金化法制备的高熵合金, 没有成分偏析和消极共晶等现象, 具有稳定的微观结构, 优异的室温加工性和化学均质性。此外, 该方法还具有能制备原材料熔点相差较大的产品的优点。不过, 用机械合金化法制备的产品都为粉末状态, 还必须采用其他方法使其固结为块状材料, 才具有更高的应用价值。

### 3.3 粉末冶金法

粉末冶金法就是用金属或非金属粉末作原料, 将其压制成形, 然后烧结成具有一定强度制品的方法<sup>[17]</sup>。

GUAN 等<sup>[18]</sup>采用粉末冶金法制备了  $\text{AlNiCrFe-CuMo}_x$  ( $x=0\sim 0.2$ ) 高熵合金, 研究了 Mo 元素对该合金显微组织和力学性能的影响。发现合金由简单的 fcc 相和 bcc 相组成, Mo 的增加可以促进 fcc 相的形成, 当  $x=0.1$  时合金具有较高的硬度和强度。赵瑞锋等<sup>[19]</sup>采用粉末冶金工艺制备了  $\text{AlCrMn-MoNiZr}$ 、 $\text{AlCrMnMoNiZrB}_{0.1}$  高熵合金, 发现两种合金的组织均为富 Cr、Mo 的 bcc 相和金属间化合物的混合组织, 同时合金的高温稳定性较好, 硬度较高。邵霞等<sup>[20]</sup>采用粉末冶金技术制备了  $\text{AlCrFeNi}_x\text{CoCuTi}$  ( $x=0.5、1.0、1.5$ ) 高熵合金, 研究了 Ni 元素对合金组织和性能的影响。发现合金的硬度均随着 Ni 含量的增加而降低, 合金具有较好的塑性, 同时强度较高。

粉末冶金法可用于制备一些熔点较高的金属和合金, 且能避免成分偏析; 与其他方法相比具有材料利用率高, 对设备的要求不高, 且烧结温度、时

间和气氛可以控制等优点。

### 3.4 激光熔覆法

激光熔覆是一种表面改性技术, 它通过在基材表面添加熔覆材料, 并利用高能量密度的激光束使之与基材表面薄层一起熔凝, 在基材表面形成与其冶金结合的熔覆层<sup>[21]</sup>。

邹朋津等<sup>[22]</sup>利用激光熔覆法在 45 钢基体上制备了成形质量良好的  $\text{CrNiAlCoMoB}_x$  系高熵合金涂层, 并研究了激光熔覆工艺参数和 B 含量对涂层成形质量、微观组织结构和硬度的影响。发现合金涂层与基体结合良好, 均匀致密, 硬度较高, 摩擦磨损性能优异, 耐腐蚀性良好。安旭龙<sup>[23]</sup>运用激光熔覆技术在 45 钢表面制备了  $\text{Ti}_x\text{FeCoCrWSi}$  系高熵合金涂层, 研究了涂层的微观结构、物相、组织成分、硬度、磨损性能及腐蚀性能。发现高熵合金  $\text{Ti}_x\text{FeCoCrWSi}$  涂层主要由树枝晶组成, 合金涂层平均硬度在 500~800 HV; 随着 Ti 含量的增大磨损率增大, 耐磨性变差。李栋梁等<sup>[24]</sup>采用激光熔覆法在 Q235 钢基体上制备了不同 Mo 含量的  $\text{FeCoNiMnMoB}_{0.5}$  系高熵合金涂层, 着重探究了 Mo 对高熵合金组织与性能的影响。发现该系高熵合金的组织为树枝晶, 主要由 fcc 相和少量金属间化合物构成; 另外, 随着 Mo 含量的增加, 合金涂层的硬度增加。温立哲等<sup>[25]</sup>通过真空激光熔覆制备了  $\text{AlCoCrCu}_{0.5}\text{FeMoNiTi}$  高熵合金涂层, 合金具有很好的热稳定性, 熔覆态合金的硬度达到 1 080 HV, 经 500 °C 退火后, 涂层硬度下降, 但再升高退火温度, 硬度变化极小, 在 900 °C 退火后, 硬度仍然达到 943 HV。

激光熔覆法制备高熵合金涂层具有以下优点: (1)理论上, 由任何元素组成的高熵合金都可用该方法制备; (2)能随意改变合金的组成成分, 得到不同的涂层; (3)能制备基体金属跟熔覆层合金熔点差异较大的涂层, 而其他方法很难做到。因此, 激光熔覆技术是一种非常好的制备高熵合金涂层的方法。

### 3.5 电化学沉积法

电化学沉积是一种化学过程, 也是一种氧化还原过程, 是指在外加电压的电解液中, 金属阳离子在阴极还原成原子, 而形成沉积层的过程。主要用于制备各种金属或合金镀层<sup>[26]</sup>。

童叶翔<sup>[27]</sup>采用电化学沉积法在 Ti 基体上制备了稀土-过渡金属纳米有序非晶高熵合金薄膜, 探讨了

电化学沉积条件对薄膜形貌的影响。发现在有机溶剂体系中,过渡金属离子对稀土离子具有诱导共沉积作用,在Ti基体上可得到纳米有序且分布均匀的颗粒薄膜,所制备的合金材料为无定型结构。姚陈忠等<sup>[20]</sup>通过电化学沉积在室温下制备了具有纳米结构组织的Nd-Fe-Co-Ni-Mn高熵合金磁性薄膜,发现该薄膜是无定形态的,在室温下具有良好的软磁性能。

简单快捷是用电化学沉积法制备高熵合金薄膜材料的最大优点。但是,其对于基体表面上晶核生长和长大的速度不能控制,制得的化合物薄膜性能不高。

除上述制备方法外,利用真空熔体快淬法制备高熵合金非晶薄带,用磁控溅射法、热喷涂法、微波辅助燃烧合成等<sup>[21]</sup>制备高熵合金薄膜等在文献中也有报道。

## 4 高熵合金的特性

### 4.1 组织结构特性

#### 4.1.1 相结构简单

根据吉布斯自由能公式,合金系统的自由能 $\Delta G_{\text{mix}}$ 可表述为式(3)<sup>[20]</sup>。

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}} \quad (3)$$

式中: $\Delta H_{\text{mix}}$ 为合金系统的混合焓; $T$ 为绝对温度。显然,在一个固定的合金系统中,当温度一定时,混合熵 $\Delta S_{\text{mix}}$ 越大,则越有利于自由能 $\Delta G_{\text{mix}}$ 的降低,从而使得合金系统趋于稳定。因此,尽管高熵合金拥有多个主元,具有形成复杂相的趋势;但是,“高熵效应”导致合金实际上形成的是具有简单fcc或bcc或两者复合结构的固溶体相,而不是形成金属间化合物等复杂相。

#### 4.1.2 纳米化与非晶化

高熵合金不仅相结构简单,而且在铸态、均匀化退火甚至完全退火态下均存在大量的纳米相和非晶相,但传统合金只有在特殊的热处理条件下才可以获得纳米化结构。从动力学上可以解释高熵合金纳米化倾向的主要原因。当高熵合金熔炼时,所有元素金属杂乱无章的溶解排列成无序的液体,凝固时,由于多元素原子的扩散及分配,使得析出物的形核长大延迟,这样有助于纳米相的形成。另外,由于高熵合金的元素配比为等物质的量比或近等物质的量比,所以其相分离的长程扩散非常缓慢,元素之间的

置换也比较困难,晶体的形核率和生长速度因此降低,从而极大地细化了合金的晶粒。

### 4.2 力学性能特性

#### 4.2.1 高硬度及高强度

高熵合金的强度、硬度比一般的常规合金要高,硬度多在600~900 HV。原因在于:(1)高熵合金由于其主元数目较多,并且各个主元之间的原子半径存在差异,在凝固过程中熵值非常高,原子的扩散运动变得非常困难,影响了位错的移动。(2)高熵合金内大块第二相的形成非常困难,析出相很难大面积地连续在一起,大部分尺寸非常细小,只有纳米尺寸,纳米相的弥散强化作用使得合金的强度、硬度进一步提高。(3)高熵合金在生成纳米相的同时,非晶态的组织也易于形成,由于非晶相中没有位错,滑移变形更困难,所以合金的强度、硬度有了更大程度的提高。

#### 4.2.2 高耐磨性

材料的硬度越高,往往耐磨性也越好<sup>[21]</sup>。因此高熵合金具有较高的耐磨性。这使其在模具、刀具等方面有很好的应用前景。

#### 4.2.3 良好的耐腐蚀性

高熵合金具有单一稳定的相结构,不存在相与相之间的界面,因此结构上和能量上都不具备形成原电池的条件,抗腐蚀性很强。此外,高熵合金中还常有Co、Cr、Cu、Ni和Ti等元素,而这些元素是极易形成氧化膜的元素,氧化膜的保护使高熵合金的耐腐蚀性进一步增强。

#### 4.2.4 良好的热稳定性

传统合金在高温环境下容易发生软化和不稳定现象,高温回火时也会出现回火软化的现象。与传统合金相比,高熵合金具有很好的热稳定性。因为高熵合金由多个主元组成,原子尺寸差异等因素导致其晶格发生很大畸变,使固溶强化作用加强,热稳定性提高。

此外,高电阻率及软磁特性也是高熵合金的显著特性。含有Al和Cr的高熵合金还具有高达1100℃的优异抗氧化性<sup>[22]</sup>。

## 5 高熵合金的应用

高熵合金优异的性能决定了其广阔的应用空间<sup>[23]</sup>。其潜在的应用领域包括:模具与刀具、电子元器件、发动机、耐磨涂层、高频交流材料、核结构材

料、光传输材料、生物医用材料、热阻隔材料、储氢材料、船舶与海洋工程材料、化工材料、耐腐蚀材料、耐磨材料、热电材料、超导材料和电磁材料等。

(1) 传统的高速钢硬度高但塑性和韧性较差, 作为刀具时容易出现折断现象, 而高熵合金能够同时具备多种优异性能, 因此高熵合金可用于制造对材料要求较高的模具和刀具。当前, 生产塑料模和挤压模的普通模具钢正逐渐被高熵合金替代。

(2) 很好的耐高温性能和较高的抗压强度使得高熵合金可用作焊接材料、涡轮叶片、热交换器及高温炉的耐热材料, 也可用作超高大楼的耐火骨架、微电机材料等。

(3) 高熵合金优异的耐蚀性可使其在易产生腐蚀的环境下工作, 例如可应用到化学工厂、航海船舶的建设及生产中。

(4) 高熵合金不仅具有高硬度和高耐磨性, 还具有较低的弹性模量, 这使其非常适合制作高尔夫球头的打击面、油压气压杆、钢管及辊压筒的硬面。

(5) 软磁性及高电阻率也是高熵合金的特性之一, 因此高熵合金在高频通讯器件方面也具有很大的应用潜力, 可以替代其他材料用以制作高频变压器、马达的磁心、磁头、磁盘、高频软磁薄膜等。

(6) 除此之外, 在很多其他领域, 例如电热材料、储氢材料、IC 扩散阻绝层等工业领域, 高熵合金也具有广阔的发展前景。

## 6 结束语

高熵合金是一个不同于传统合金的新合金, 其显现出与传统合金不同的特性, 具有很高的研究价值和开发应用意义。但至今还需进一步研究高熵合金的微观结构, 进行相图、热力学分析, 物理、化学及力学性能的测定, 建立科学的选择合金元素理论、高熵合金的熔铸理论、凝固结晶理论、压力加工理论与热处理理论等<sup>[3]</sup>。随着对高熵合金研究的深入, 高熵合金的应用会越来越广, 对各行各业的影响也会越来越大。

### 参考文献:

- [ 1 ] 阳隽麒, 周云军, 张勇, 等. 多组元高熵合金的研究现状及前景展望[J]. 中国材料科技与设备, 2007, 4(6): 16.
- [ 2 ] Yeh J W, CHEN S K, LIN S J, et al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2004, 6(5): 299.
- [ 3 ] Cantor B, CHANG I T H, Knight P, et al. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 375/377(1): 213.
- [ 4 ] 李忠丽, 孙宏飞, 高鹏, 等. 新型多主元高熵合金的研究进展[J]. 新技术新工艺, 2010(8): 62.
- [ 5 ] ZHANG Y, ZHOU Y J. Solid solution formation criteria for high entropy alloys[J]. *Materials Science Forum*, 2007, 561/565: 1337.
- [ 6 ] 叶钧蔚, 陈瑞凯. 高熵合金[J]. 科学发展, 2004, 377(5): 16.
- [ 7 ] ZHANG Y, ZUO T T, TANG Z, et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys[J]. *Progress in Materials Science*, 2014, 61(8): 1.
- [ 8 ] 张勇. 非晶和高熵合金[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [ 9 ] 郭卫凡. 多主元高熵合金的研究进展[J]. 金属功能材料, 2009, 16(1): 49.
- [ 10 ] 张华. 高熵合金的高温氧化与高温腐蚀[D]. 福州: 福州大学, 2013.
- [ 11 ] 尹可心, 武保林, 王大鹏, 等. 高熵合金 Al<sub>1</sub>Mg<sub>1</sub>Cu<sub>1</sub>Zn-Ti<sub>1</sub> 的制备与组织结构分析[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2015, 32(3): 25.
- [ 12 ] 孙昭媛. 高熵合金的制备及其组织和力学性能的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [ 13 ] 张恒, 张邦维, 吴力军. 机械合金化致二元过渡金属非晶态合金形成规律的探讨[J]. 物理学报, 1994, 43(10): 1638.
- [ 14 ] 方思聪. 机械合金化 AlCoFeNiCu 系高熵合金组织与性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [ 15 ] 袁尹明月, 彭坤, 王海鹏. 机械合金化方法制备 Al<sub>1</sub>CoCrCu<sub>1</sub>FeNi 高熵合金组织结构和性能研究[J]. 材料导报, 2016, 30(8): 69.
- [ 16 ] 许世红, 邱建平, 常国华. 机械合金化和热处理对高熵合金 MgTiVCrNi 微观组织演化和相结构的影响[J]. 甘肃高师学报, 2015, 20(2): 44.
- [ 17 ] 沈元勋, 肖志瑜, 温利平, 等. 粉末冶金高速压制技术的原理、特点及其研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2006, 16(3): 19.
- [ 18 ] GUAN Hongyan, ZHANG Yunpeng, FAN Yuhu, et al. Microstructure and properties of sintered AlNiCrFeCuMo<sub>x</sub> alloys[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, 41(S2): 532.
- [ 19 ] 赵瑞锋, 李红菊, 任波, 等. 粉末冶金制备 AlCrMnMoNiZr (B<sub>2</sub>) 合金的组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(3): 288.
- [ 20 ] 邵霞, 张云鹏, 周航. 粉末冶金制备 AlCrFeNi<sub>1-x</sub>CoCuTi 高熵合金的组织及性能研究[J]. 铸造技术, 2013, 34(3): 283.
- [ 21 ] 李国英. 材料及其制品表面加工新技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2003.
- [ 22 ] 邹朋津, 董刚, 姚建华. 激光熔覆制备 CrNiAlCoMoB<sub>x</sub> 系高熵合金涂层的组织与性能研究[J]. 应用激光, 2015, 35(1): 1.
- [ 23 ] 安旭龙. 激光熔覆制备 Ti<sub>1-x</sub>FeCoCrWSi 高熵合金组织与性能研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.

## · 行业动态 ·

## 粉末冶金产业技术创新战略联盟二届三次理事会扩大会议在京召开

2017年9月22日,粉末冶金产业技术创新战略联盟第二届第三次理事会扩大会议在北京顺利召开。会议由粉末冶金产业技术创新战略联盟(以下简称“联盟”)理事长才让主持,联盟98家理事单位(含新加入的11家)百余名代表,共聚一堂商议行业发展大事。

才让理事长首先对在座的各位理事及专家表示热烈欢迎,并作了简短致辞。接着,韩伟秘书长汇报了联盟2017年上半年的工作总结、下半年的工作计划以及成立联盟标准化工作委员会的提案。韩伟秘书长介绍到,联盟自2010年成立以来,在相关领导和广大理事单位的支持和帮助下,组织行业广大企、事业单位积极开展技术创新、海内外学术研讨、技术交流、展览展示,在组织策划和承担实施国家重大科技计划项目、推动联盟内外合作与交流以及联盟自身建设方面开展了一系列具有创造性的工作,取得了显著运行成效,在海内外粉末冶金产业领域形成了一定的品牌影响力。2017年,联盟通过不断加强组织建设、整合创新资源、促进产学研紧密合作、开展两岸和国际合作、积极促进成果转化以及推进 World PM2018 筹备工作等,继续发挥桥梁纽带和创新服务平台的作用,有力推动了中国的粉末冶金行业的发展。

王莹副秘书长代表秘书处提请第二届第三次理事会增补11家单位为联盟理事单位,并详细介绍了这11家单位的基本情况。随后,韩伟秘书长汇报了关于联盟拟新聘任的专家委员会顾问人选情况。

联盟理事会经过讨论,集体表决,一致通过了《增补后的专家委员会顾问》、《关于联盟增补理事单位建议》以及《成立粉末冶金产业技术创新战略联盟标准化工作委员会的提案》。随后,才让理事长为正、副秘书长,联盟专家委员会副主任及顾问颁发了聘书。

最后联盟秘书处详细汇报了将于2018年9月16—20日在北京主办的 World PM2018 世界粉末冶金大会的筹备工作情况,包括赞助落实情况、场地情况;组织委员会、国际联络委员会和技术委员会的人员分工及职责;大会秘书处分工、具体工作安排(时间轴);大会特邀报告、特殊兴趣分会建议、各分会场及负责人;论文集出版情况、会议的奖项设置、会议日程安排;下一步的工作重点等等。现场各位与会代表热烈讨论,献言献策并踊跃表示在人力物力等方面支持大会的筹备。大家一致认为每一届世界粉末冶金大会都是一次世界性的盛会,对于中国粉末冶金行业来说,World PM2018 更将是一次实现质的飞跃的契机,大家都将积极筹备、共同迎接 World PM2018 的到来。

才让理事长发表总结讲话,他指出 World PM2018 是中国粉末冶金行业一次前所未有的盛会,办好这次会不仅能体现大国形象,体现行业进步,同时也能把全球的技术、装备、上下游吸引来,这将是联盟下一步工作的重中之重,希望大家进一步明确责任细节,齐心协力共同办好这次盛会。

当天下午,联盟召开了 World PM2018 世界粉末冶金大会第9次筹备工作会(技术),由筹备工作组全体成员及大会15个分领域负责专家出席参加。会议就各分领域的论文组织、征集、邀请报告、审稿筛选等事宜进行了讨论。

(粉末冶金产业技术创新战略联盟秘书处)

- [24] 李栋梁,周芳,余师豪.激光熔覆 FeCoNiMnMo<sub>2</sub>B<sub>2</sub> 高熵合金涂层组织与耐蚀性能[J].强激光与粒子束,2016,28(2):1.
- [25] 温立哲,黄元盛.激光熔覆 AlCoCrCu<sub>2</sub>FeMoNiTi 高熵合金涂层的组织与性能[J].粉末冶金技术,2016,34(4):268.
- [26] 杨防祖,姚士冰,周绍民.电化学沉积研究[J].厦门大学学报:自然科学版,2001,40(2):418.
- [27] 童叶翔.含稀土的纳米有序非晶高熵合金的电化学制备及磁性研究[C]//中国材料研讨会论文集.北京:2011.
- [28] 姚陈忠,马会宜,童叶翔.非晶纳米高熵合金薄膜 Nd-Fe-Co-Ni-Mn 的电化学制备及磁性性能[J].应用化学,2011,28(10):1189.
- [29] 王腾,孔见,巢岗轩.微波辅助燃烧合成 FeCoNiCuAl 高熵合金的组织与性能[J].粉末冶金技术,2011,29(6):435.
- [30] YANG X, ZHANG Y. Prediction of high-entropy stabilized solid-solution in multi-component alloys[J]. Materials Chemistry and Physics, 2012, 132(2/3): 233.
- [31] Khrushchovand M M, Babichev M A. Friction and wear in machinery[J]. ASME, 1956, 11(9): 36
- [32] 高家诚,李锐.高熵合金研究的新进展[J].功能材料,2008,39(7):52.
- [33] 李文虎,艾桃桃.多元高熵合金相研究进展[J].粉末冶金工业,2016,26(1):64.



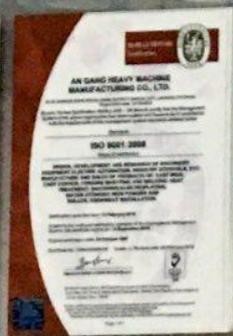
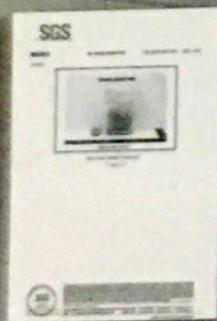
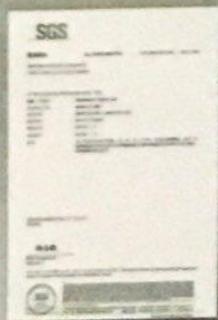
ANSTEEL

鞍钢（鞍山）冶金粉材有限公司



鞍钢（鞍山）冶金粉材有限公司于2016年元月20日正式注册成立，其前身是鞍钢重型机械有限责任公司冶金粉材厂。公司是我国专业生产水雾化铁粉的企业，目前产销量位居国内同行业领先水平。公司始建于1986年，隶属于鞍山钢铁集团公司。2012年4月份，当选为中国钢结构协会粉末冶金分会理事长单位。

公司全套引进德国曼内斯曼公司水雾化铁粉生产技术、设备及管理模式，后又引进德国克莱默公司板带式还原炉，现可生产水雾化纯铁粉、合金铁粉、无偏析混合铁粉、易切削铁粉、焊条粉、阀座粉等六大系列上百个品种。公司研发“水雾化扩散合金粉及其制造方法”在第二十届全国发明展览会上获银奖；“一种汽车发动机专用合金钢粉的生产方法”获第七届国际发明展览会暨国际教学新仪器和新设备展览会银奖。



公司经过近三十年的发展和改造，目前拥有完善的水雾化制粉生产技术和现代化的15吨、10吨电弧炉各1座，20吨精炼炉1座，年冶炼能力达8万吨；年生产能力10万吨雾化干燥系统2套，7000吨还原炉5台，自行设计、建造、安装的2万吨还原炉3台，年还原能力10万吨。按照鞍山钢铁集团公司战略发展规划，2018年前公司预计具备年生产能力可达20万吨。

地址：辽宁省鞍山市立山区灵山红旗路9号  
 邮编：114042  
 邮箱：angangfencaijyb@126.com

电话：0412-6761177  
 传真：0412-6761388

ISSN 1006-6543



9 771006 654160

刊号：ISSN 1006-6543  
CN11-3371/TF

广告经营许可证：京海工商广字第8276号

国内订阅代号：82-79  
国外订阅代号：BM5649

定价：15.00元

# 建筑工程技术与设计

Architectural Engineering Technology And Design

主管：中南出版传媒集团股份有限公司  
主办：湖南科学技术出版社有限责任公司  
出版：湖南科学技术出版社有限责任公司  
编辑：《建筑工程技术与设计》编辑部

2018. 12<sub>中</sub>

国内统一刊号：CN 43-9000/TU  
国际标准刊号：ISSN 2095-6630

ISSN 2095-6630



由 扫描全能王 扫描创建

铁路信号工程技术的施工管理.....	林伟	唐华剑	346
创新思维在建筑工程管理中的应用.....	陈志强	朱元星	347
建筑工程经济在工程管理中的应用分析.....		陈军	348
BTM技术在建筑工程管理中的应用研究.....		张瑞	349
		赵宝森	350

**建筑电气**

机电技术及自动化的发展趋势.....	王百路	351
浅谈电力系统电气二次回路的常见故障及防范措施.....	陈爱红	352
电气设备及二次回路中隐蔽故障的分析与防范.....	李淑	353
发电厂电气的二次设备检修方法分析.....	赵冀鲁	354
高层建筑电气工程的防雷接地技术探讨.....	张树红	355
防雷接地技术在建筑电气安装中的应用.....	陈峰	356
电气自动化在电气工程中的应用探索.....	耿建军	357
电力电缆导体直流电阻测量与不确定度评定.....	王冰	358
热力热电厂电气设计的应用研究.....	黄一梅	359
试论电气工程及其自动化的智能化技术应用.....	刘钰	360
电气安装工程施工图预算工程量计算要点探析.....	孙浩	361
关于建筑电气火灾自动报警系统的设计分析.....	汤容	362
浅谈海洋钻井平台电气变频技术.....	王亚军	363
变电继电保护的主要故障及解决对策.....	吴振奋	364
浅析建筑电气施工方面存在的问题及解决措施.....	张岩	365

**房地产业**

新形势下房产测绘单位面临的问题及对策研究.....	柴秀琴	366
房地产项目开发过程中的成本控制方法及要点.....	刘颀	367

**建筑论坛**

关于保障性住房绿色宜居规划设计分析.....	吴德敏	368
某500kV变电站站网复合地基土工格棚选型探讨.....	叶建哲 谭小兵 王建华 单俊 张汉荣	
浅谈土木工程中的绿色施工和可持续发展.....	吴炳坚	369
大数据分析对电力营销工作的重要性探微.....	敖德健	370
计算机信息化在人力资源管理中的应用浅谈.....	陈涛	371
浅谈高层建筑结构抗震设计.....	邓文强	372
城市人防工程建设的现状与对策.....	吉海俊	373
南水北调三阳河工程生产安置做法及效果评价.....	冯伟民	374
基于绿色理念下的机场建设思考及分析.....	徐一斌 杨爱华	
对建筑水电安装工程问题的研究.....	俞小钦	375
软土地基处理技术探讨.....	王效敏	376
高职院校装配式建筑教学课程改革浅述.....	赵连来	377
试论电力客户企业绩效考核在人力资源管理中的作用.....	李红	378
浅谈基坑监测的主要方法及应注意的问题.....	李林杰	379
高职业院校装配式建筑教学课程改革浅述.....	李明政	380
土工建项目岩土工程勘察的实施.....	刘向利	382
土木工程中深基坑支护施工技术的应用.....	朱健青	383
更换既有接触网软横跨施工方法探讨.....	吕彦涛	384
岩土工程勘察与深基坑支护设计.....	吕中棣	385
浅谈暖通空调技术在绿色建筑中的应用分析.....	毛清龙	386
关于襄阳市东津新区彭胀土地基城市道路路基工程设计简介及探讨.....	宁跃云	
GIS母线故障处理方法探析.....	霍冬霞	387
市政工程给排水管道施工技术浅谈.....	孙丹丹	389
水文地质问题在岩土工程中的危害性浅述.....	王君玲	390
浅谈桥梁道路工程现浇混凝土质量通病及处理.....	王艳群	391
新型加气混凝土砌块墙体裂缝成因分析及防治.....	王银杰	392
	左学海	393

**科技创新**

基于可靠性测试方法的电气自动化控制设备设计.....	张伟柱	394
低压智能监控系统在化工企业中的应用.....	王敬垒	395
浅谈选择性非催化还原烟气脱硝技术(SNCR)在循环流化床锅炉上的应用.....	杨月明	396

**节能环保**

民用建筑电气节能与环保技术探讨.....	王瑞刚	397
节能控制措施在建筑工程管理中的方法探讨.....	王光强	398
河道治理与水环境保护有效策略研究.....	王灵琦	399

建筑工程外墙保温系统研究与应用.....	蔡文杰	400
建筑给排水节能技术的应用.....	马悦童	401
变电站站用电节能降耗措施研究.....	黄文超	402
现代智能建筑电气设计及节能措施分析.....	朱峰	403
环保节能技术在建筑装饰装修中的应用论述.....	刘超	404
变频器在风机节能降耗改造中的应用.....	朴涛	405
浅析目前煤炭能源低碳清洁利用的发展模式.....	高元勇	406
煤化工废水处理技术面临的问题与技术优化研究.....	邓福龙	407
地铁通风空调系统节能探讨.....	许为优	408
绿色节能施工技术在房屋建筑工程中的应用分析.....	周娟	409

**园林绿化**

对风景园林景观设计及管理分析.....	吴伟	410
园林绿化苗木栽植和养护技术探究.....	于美艳	411

**建筑与发展**

遵义市轨道交通迎宾大道换乘站方案研究.....	王正	王泽	412
-------------------------	----	----	-----

**理论实践**

核电管道安装技术探析.....	胡勇	413
工业水处理中浅除盐技术的应用分析.....	牛清波	414
水利工程施工中的防渗新技术及应用研究.....	杜婷婷	415
计算机应用教学.....	房郎	416
煤矿机电系统控制中PLC技术的应用分析.....	韩腾	417
测绘技术在水文地质勘查中的应用.....	汤力栋	418
烟草切片机齿形带防拉断控制方法改进.....	肖一博	419
某大型水闸闸门维修工程设计.....	刘修水	420
开关电源电磁干扰及其抑制技术的分析.....	秦进进	421
微型电动汽车焊装节拍技术分析及优化.....	胡扬	422
自动化控制中弱电控制强电的方法分析.....	谢志军	423
基于露天铜矿山爆破有害效应研究.....	孙庆富	424
新型胶带运输机防跑偏装置的应用分析.....	唐辉	425
移动式压力容器汽车罐车紧急切断阀检验问题研究.....	周云涛	426
电力系统继电保护不稳定原因及解决办法研究.....	孙斐	427
浅谈反渗透系统在化学水处理中的平稳运行及优化.....	岳文娟	428
电子警察在智能交通中的应用初探.....	张群	429
监理工程师对ZDJ9型转辙机控制要点.....	崔军祥	430
建筑工程测量教学方法的浅析.....	罗朋飞	431
金属切削通用机床大修理工艺研究.....	金鑫	432
汉代社稷坛建置及西汉社稷坛复原设计.....	张林书	433
监测技术在高速公路高边坡治理中的应用.....	邓艳青	434
对建筑机电设备安装问题的探讨.....	丁远坤	435
煤矿开采新技术的利用与实践.....	徐光晓	436
采矿新技术对煤矿开采的重要性探讨.....	戚焕虎	437
船舶油漆保养表面处理要点及常见油漆缺陷.....	付士群	438
高邮市水利现代化试点的探析.....	俞小钦	439
管系对船舶发电机组隔振系统响应的影响分析.....	包晓峰	440
输电线路智能化建设现状及对策探究.....	包冬冬	441
火电厂热控仪表管路安装技术.....	鹏	442
高压主汽门安装步骤.....	非	443
煤矿开采沉陷充填开采技术应用研究.....	建刚	444
煤矿机电设备故障诊断及维修技术.....	飞	445
煤矿机电一体化应用的探讨.....	杰	446
煤矿机电设备常见故障及维修技术探析.....	娜	447
浅析矿山测量的常见问题及应对措施.....	飞	448
地铁通风空调系统研究.....	明	449
理论结合实践的《中国民居》课程教学探索.....	婷	450
新时期加强国企党建工作的措施分析.....	霞	451
地铁车辆制动系统特点分析与研究.....	华	452
循环水系统状况分析.....	卫	453
变电站电压互感器一次保险频繁熔断原因浅析.....	萍	454
铁路信号设备维护及新技术的应用.....	孟	455
浅谈焦炉烟气治理.....	军	456
探析汽车制造企业的柔性自动化装配系统.....	霞	460



# 高职院校装配式建筑教学改革浅述

刘丘林

(广州城建职业学院 广东 广州 510925)

**【摘要】**随着国家经济的提升,建筑产业规模不断扩大,并形成了现代化的产业体系。其中,装配式建筑施工方式具有低成本、施工期的优势,是现代城市发展的必然选择。在这种背景下,高职院校装配式建筑教学也应发生变化,与时代接轨,与产业融合,进而培养大批量专业的技术型人才。  
**【关键词】**高职院校;装配式教学;课程改革;学生

## 1 装配式建筑的发展趋势

1.1 环境污染逐渐变小。传统的建筑容易产生很多固体废弃物,比如建筑垃圾、石块以及粉尘等,这会造成很大的环境污染。通过应用装配式建筑,能够在施工现场实现装配工作,这样很好地避免了污染的产生,可以很好地改善施工周围的环境。

1.2 安全质量稳步提高。因为目前建筑工程更加注重高层楼房的建设,相应的高空作业也就更加频繁,具有一定的危险性,同时由于具体的施工人员素质参差不齐,很容易导致整个工程出现质量问题。一旦出现质量问题,在后期改进过程中将增加工作难度,无形中加大了工作量。而应用装配式建筑的施工都是在低空作业,避免了高空坠落等情况,使得建筑的安全和质量稳步提高,也就从一定程度上,促使我国建筑水平不断提升。

1.3 节能效果更加显著。由于我国水资源比较紧张,而装配式建筑很少进行混凝土的浇筑,从而节约了大量的水资源。另外对施工中的其他材料,通过装配式施工的办法,能够进行科学地设计,并且合理使用材料,这样也避免了建筑材料的浪费,极大地节约了能源,所以在节能领域,装配式建筑大有用武之地。

## 2 高职院校装配式建筑教学改革的有效举措

### 2.1 装配式建筑教学应补充的内容

2.1.1 装配式建筑设计基本原理。掌握装配式建筑教学基本原理,围绕该知识点构建一套完整的教学内容,包括房屋建筑与装配式建筑设计之间的关系,以及房屋建筑设计的有关内容。鼓励学生在装配式建筑学习中创新思维,以房屋建筑学为起点,设计一次装配式建筑设计教学内容。主要培养学生的设计能力、想象能力、探索能力,并熟练运用基础知识,为日后的学习奠定基础。

2.1.2 装配式建筑构造内容。装配式建筑通过形式创建与精细化的设计,创造出许多实用的新型构造。其内部结构点的连接使得建筑成为复合多层装修构造特点。因此,教学中要紧跟时代发展的步伐,将装配式建筑施工技术的成熟内容、适宜内容补充到教学中,及时进行总结,紧跟时代发展需要。尤其应利用地方的标准图纸,为学生讲解装配式建筑构造中BIM技术的运用,应用软件进行教学以提升学生的直观触感。

2.1.3 装配式建筑与智能化。在教学过程中应增加装配式教学工业的有关内容,如设计标准化、构件工厂化、施工机械化以及管理科学化。尤其BIM技术的运用,更应体现在装配式建筑教学中,利用该软件为学生展示装配式建筑从设计、构建,到施工、运用的全过程,利用信息化教学方式为学生展示基本内容。

### 2.2 合理安排教学内容

在建筑工程类教学过程中,专业教师要结合装配式建筑技术的基本情况,以及实际内容进行分析,并设计与学生实际生活、周边建筑等有关的教学内容。利用成功的案例将抽象的知识转化为实际内容,让学生看得见、摸得到,能够真正融入其中来了解装配式建筑的真正内涵。或开展专题讲座,将装配式教学内容与建筑工程的相关知识融合在一起,利用丰富的教学内容吸引学生兴趣,创设具体化的教学情境引导学生深入理解专业知识。

### 2.3 优化教学方法与手段

变革教学方法,要重视手段与模式的改变。在建筑工程教学中,教师应重视教学手段的变革,充分运用案例教学、情境教学、现场实训等多种教学手段。其中,BIM三维模型信息教学方式能够为学生创造良好的真实的现场施工情境,让学生在具体的环境中学习有关知识。准确把握装配式建筑与传统建筑之间的差别,以及装配式建筑中的施工流程、施工工艺、注意事项、质量要求等内容。当然,教师也可以利用具有代表性的建筑类型为学生讲解,包括外墙挂板体系、装配式剪力墙体系等,针对不同体系内

容让学生了解其中的受力结构、内部构造、以及细节构造等。并将装配式建筑与传统建筑做比较,分析其中所涉及的新材料、新工艺、新方法、新特点,以及适合哪些建筑类型。继而具有针对性的把握装配技术与建筑要求之间的关系,做到有的放矢。

### 2.4 加强校企合作

校企合作是近年来流行的教学模式,可有效提升学生解决问题的能力,以及实际操作能力。高职院校应与多家施工企业加强合作,深化校企合作力度。利用施工企业为学生提供实习基地,实训机会。按照学习阶段,合理安排学生参与到实际施工中去,切实了解装配式建筑的特点、体系结构、施工要点以及施工工艺。在实践中掌握操作技巧,准确掌握装配式建筑的施工顺序,了解预制件与装配之间的关系,以及组装顺序、组装方式。利用学生自己的力量在实践中培养发现问题、解决问题的能力,在实践中不断提升学生的探索能力、分析能力、逻辑能力。校企合作是当前高校装配式教学实践改革的重要手段之一,越来越多的高校加入校企合作的教学实践中。高校应重视人才的培养,重视实践教学的重要作用。将自己有限的资源与企业合作,拓宽自身教学途径。在合作过程中了解装配式建造的方式,提升教师对装配式专业生产操作的熟练性。而企业能够通过合作,不断完善自身理论体系,直接获取人才,增强企业内人才队伍的建设与培养能力。

### 2.5 充分利用BIM技术开展实践教学

在高职院校的装配式教学过程中,尤其是实践教学,需要充分利用BIM技术。比如高校可以对社会上的公司进行调查,选择装配式项目上比较有实力的公司进行合作。这种合作主要是实践方面的合作,可以邀请专家和学者到学校进行讲座,为学生答疑解惑,先从理论知识上做好理清工作,为以后的实践打好基础。专家们的见解和知识都比较独到,并且能够紧密联系实际,可以向学生介绍最新的技术与世界前沿科学理论。尤其是BIM技术更新和升级比较快,必须时刻把握形势,及时进行学习。更重要的是,学校要定期组织一系列的实践活动,包括安排学生去施工单位的构建制作中,可以一边参观,一边听着专业人员进行讲解,从而更深入地了解BIM技术。

### 2.6 发展人才培养战略

装配式建筑将成为未来建筑发展的主流方向,对人工劳动力的需求将大大降低。因此,传统教学手段与人才培养理念已经落后,高校应以培训专业工程师的理念为主要培训方式。建立装配式教育师资培训机制。地方高校是人才的培育基地,对装配式建筑人才的培养有着更高的要求,因此要加强师资队伍的建设能力,打造一支专业化较强的优秀师资队伍。要强化装配式人才培养理念,组织地方高校教师深入建筑产业链的各个环节,并进行深入的调研与学习。加深教师对装配式人才培养的认识,围绕设计、生产、施工、管理、装修等几个领域为中心,开展实训课程并加强实践教学。同时,教师还可以老鹰互联网教育的方式,将实践课堂与理论知识相结合,有效丰富课堂内容,提升教师教学质量,培养学生的主动性、创造性以及探索性。在不断的研究与实践中,完善装配式人才培养教育体系,利用先进的师资队伍加强实践教学质量。

## 3 结论

综上所述,要合理安排教学内容,实现模块化教学方式。要优化教学手段,充分运用现代信息技术,尤其是BIM技术的运用,为学生创造真实的教学场景,亲身体验施工过程。要加强校企合作,为学生提供实习场地,在实践中掌握知识原理,了解装配顺序,掌握施工要点。

## 参考文献:

[1] 曹在平, 胡志明, 李斌. 装配式建筑在建筑结构课程中的“BIM工作室”实训教学模式研究[J]. 中国标准化, 2018(16): 54-55+58.  
[2] 刘建邦. 高职建筑工程类专业装配式建筑教学课程改革[J]. 晋城职业技术学院学报, 2018, 11(03): 42-44.  
项目来源: 广东省品牌专业建设资助项目(2016gzpp016)





官网二维码

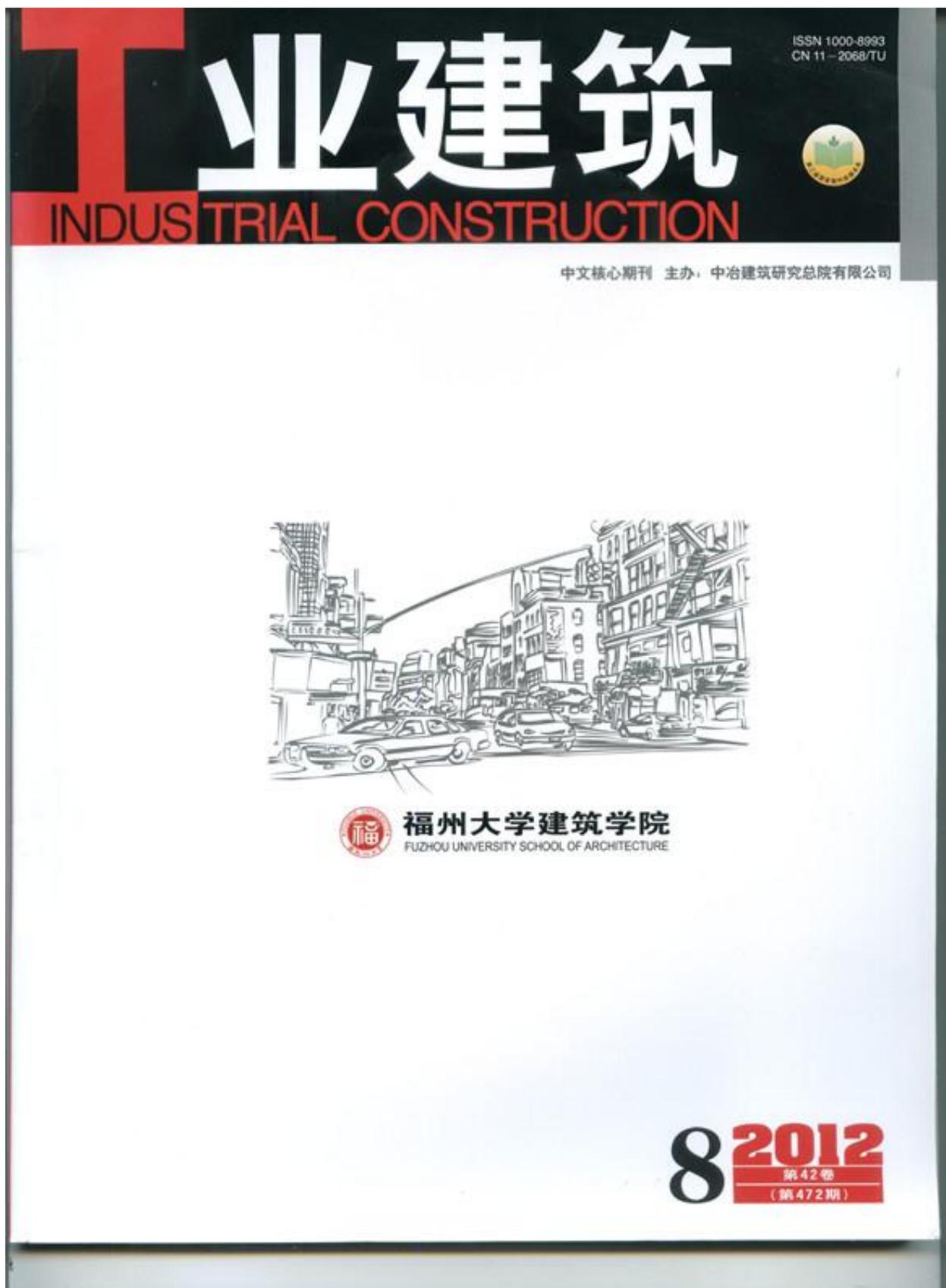


微信公众号



由 扫描全能王 扫描创建

7.人工土固结过程中微观结构效应研究



## 可装配式密肋复合墙结构体系的研究

- 1 基于IDA法的生态复合墙结构抗震性能评估
- 6 基于统一强度理论的生态复合墙结构 ABAQUS 二次开发平台建设
- 12 基于不同剪跨比的生态复合墙体抗震性能及受剪承载力分析
- 18 开洞生态复合墙体抗震性能及抗侧刚度研究
- 23 基于统一强度理论生态复合墙体受剪极限承载力分析
- 27 联肢生态复合墙体抗震性能及受剪承载力研究
- 33 现浇加强肋生态复合墙体斜截面抗剪承载力研究
- 37 生态复合墙结构桩筏基础优化设计分析
- 41 框支生态复合墙结构非线性地震反应分析

黄 玮 蒋小平 张程华, 等  
 黄 玮 刘 季 赵 冬, 等  
 刘健行 黄 玮 张程华, 等  
 尚春林 黄 玮 张程华, 等  
 黄 玮 王君媛 张程华, 等  
 杨雪松 黄 玮 侯莉娜, 等  
 张文斌 张程华 黄 玮, 等  
 张 蔚 卢俊龙 黄 玮, 等  
 田 洁 黄 玮 卢俊龙, 等

- 45 拉萨传统城市建筑色彩的内涵及形态表现
- 49 湖南地区节能住宅屋顶设计研究
- 54 钢筋混凝土梁疲劳弯曲损伤指标的计算方法
- 59 下沉式楼面板结构受力性能数值分析
- 64 新型混合配筋预应力混凝土管桩抗弯性能试验研究
- 69 核电站取水口建筑物的抗震性能分析
- 75 桩端刺入的离心机试验研究
- 79 黏土矿物及粉粒对普格达组粉质黏土可塑性的影响
- 84 人工土固结过程中微观结构效应研究
- 89 合成纤维水泥稳定土抗裂性试验研究
- 93 广州新客站主站房逆作法施工及预应力混凝土张拉全过程模拟分析
- 97 酒阳体育场预应力钢结构施工技术
- 102 浅埋大断面隧道施工工法优化分析
- 108 盾构在不良地层中穿越别墅区施工技术
- 113 成都东客站钢结构工程“青铜面具”柱钢结构加工制作技术

丁 祝 刘加平  
 肖 敏 张国强 刘宏成  
 贾金青 张丽华 孟 刚  
 刘海峰 孙 宁 黄辉群, 等  
 王新玲 高会宗 周同和, 等  
 薛志成 王振清 袁 强, 等  
 周 健 王强强 郭建军  
 徐宗恒 徐则民 孟庆会, 等  
 周 辉  
 高大峰 任禹州 王方群, 等  
 张开臣 徐 刚 钱英欣, 等  
 王泽强 陈新礼 尤德清, 等  
 吴占瑞 潘泰岳 唐进才  
 徐芙蓉 吕秋鸿 刘 新  
 钱志忠

## 名家论坛

- 118 我国规范中混凝土结构用钢筋的若干规定

金虎根

## 综 述

- 121 几种新型工业化住宅结构体系综述

黄 玮 张振中 赵 冬, 等

## 现代钢结构

- 128 门式刚架平齐式端板梁柱节点有限元与试验分析
- 133 新型组合桁架式吊车梁试验研究
- 139 飘带形大跨屋盖风致响应振型耦合效应研究
- 144 钢管混凝土构件抗弯刚度折减系数的回归分析
- 149 成都双流国际机场 T2 航站楼空间相贯节点极限承载力研究
- 154 水泥工厂预均化库落地球面网壳优化设计

林仁德  
 谢 攀 罗 浩 邢 丽  
 孙滨雁 张旭伟 陈家光  
 吴乃森 吴志坤 赵艳艳, 等  
 邵铁峰 王 伟 陈以一  
 尹 越 赵桐丽 陈志华, 等

## 鉴定·加固·改造

- 158 某钢管混凝土系杆拱桥病害检测及其加固

吕建根 王荣辉

## 国际科技交流

- 162 近年美国老年居住建筑设计的发展趋势

张天宇

## 建筑设计漫谈

- 166 建筑结构与体造型的创新互动

刘永德 罗梦潇

## BIM 技术与应用

- 169 Rhino 在大同图书馆中的 BIM 实践

杜书波 孙胜男 李慧男

# 人工土固结过程中微观结构效应研究

周 晖

(广州城建职业学院, 广州 510925)

**摘 要:**通过定量分析固结人工土的微观结构,研究非黏土矿物与黏土矿物对土体微观结构(颗粒和孔隙)变化的影响。经 ESEM 图片比对分析后发现:非黏土矿物长石试样颗粒较大,粒间大多以面-面连接,结构较致密,加载后,大颗粒碎散成小颗粒,颗粒平均粒径减小,圆形度提高,颗粒定向性变化较大而其分布分维数呈现下降趋势;黏土矿物高岭土试样颗粒较小,粒间大多以边-边、边-面连接,孔隙较多,加载后,团聚现象明显致使颗粒平均粒径增大,圆形度降低,孔隙也逐渐向团聚单元体内部孔隙转变,在加载初期( $p < 100$  kPa),颗粒与孔隙的定向概率熵与分布分维数均明显下降,之后趋于稳定。

**关键词:**非黏土矿物;黏土矿物;微结构;定向概率熵;分布分维数

## MICROSTRUCTURE EFFECTS OF ARTIFICIAL SOIL IN THE CONSOLIDATION PROCESS

Zhou Hui

(Guangzhou City Construction College, Guangzhou 510925, China)

**Abstract:** The effect on the soil microstructure (grain and pore) of non-clay on clay minerals and clay minerals is analyzed quantitatively by studying the artificial soil's microstructure in the consolidation process. The ESEM image analysis found that the non-clay minerals feldspar sample has the following characteristics including larger particles, face to face connection mostly with dense structure. After loaded large particles shattered into small particles, particle mean diameter decreases, increases, the particles directional change greatly and its distribution fractal dimension shows a downward trend. However, clay mineral kaolin sample has smaller particles, which are connected with edge to edge or edge to face with more pore. After loaded, agglomeration significantly causes the average granule diameter to increase, the circularity reduce, pore also gradually change to internal porosity of agglomeration unit, in the early stage of loading ( $p < 100$  kPa), directional probability entropy and fractal of particle and pore are significantly decreased, then tends to be stable.

**Keywords:** non-clay minerals; clay minerals; microstructure; directional probability entropy; distribution fractal

### 0 引 言

土的固相矿物成分比较复杂,一般由各种结晶质的非黏土和黏土类矿物、非晶体质材料、有机物以及沉淀析出的盐类等几部分组成,其工程土体成分中的绝大多数为无机质结晶的非黏土和黏土矿物。

长期的工程实践表明<sup>[1-3]</sup>,虽然工程土体成分中非黏土矿物含量往往比黏土矿物含量多得多,但是后者对土体性状的影响程度却远超前,其深层次的原因还在于两者微观结构的巨大差异。当土体中有黏土矿物存在,较小的黏土矿物颗粒会包裹在非黏土矿物颗粒的表面,使得非黏土矿物颗粒之间不能直接接触,从而黏土矿物得以控制土体的性状。当土体受到固结荷载作用时,由于其中黏土矿物的作用,促进了土颗粒间的相互运动,增大了土体的压缩性。通过对不同矿物成分比的固结人工土进行

微观结构定量分析,研究土体受到荷载作用后,非黏土矿物与黏土矿物对其微观结构(颗粒单元体和孔隙)变化的影响。

### 1 试样及其制备

#### 1.1 试样制备

本试验用土包括非黏土矿物长石和黏土矿物高岭土。除了利用常规土工试验测试其主要物理力学参数外,还运用 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪测试两种人工土的体积平均粒径和表面积平均粒径,测量范围为  $0.02 \sim 2\,000 \mu\text{m}$ ,测试方法为湿法。

作者:周晖,女,1979 年出生,博士研究生,讲师。

E-mail:zhouhuanhui@126.com

收稿日期:2012-02-28

表1为两种人工土的主要物理力学参数和平均粒径。根据粒度分析结果,长石和高岭土的平均粒径达到微米级,均属于极细颗粒土。

表1 土的主要物理力学参数及平均粒径

Table 1 The main physical and mechanical parameters and the average particle size of the soil materials

土样名称	土颗粒相对密度	液限/ %	塑限/ %	塑性指数限/ %	体积平均粒径/ $\mu\text{m}$	表面积平均粒径/ $\mu\text{m}$
长石	4.78	11.6	6.2	5.4	10.24	2.70
高岭土	2.76	61.4	35.1	26.3	6.12	2.32

注:体积平均粒径,即具有此粒径的颗粒的体积正好等于所有颗粒的体积的平均值;表面积平均粒径,即具有此粒径的颗粒的表面积正好等于所有颗粒的表面积的平均值。

为研究矿物成分对加载后土体微观结构的影响,依据矿物成分对比共制作了4组试样,试样成分及其物理性质如表2所示。

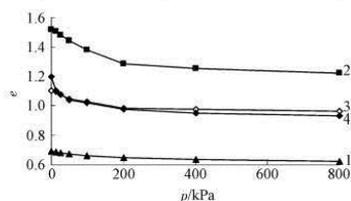
表2 试样成分及物理性质

Table 2 Sample composition and physical properties

编号	试样成分	干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	初始孔隙比 $e_0$	初始含水量 $w / \%$
Y1	100%长石	2.83	0.69	10
Y2	100%高岭土	1.10	1.51	50
Y3	50%长石+50%高岭土	1.81	1.08	27.5
Y4	33.3%长石+66.7%高岭土	1.64	1.09	33.3

## 1.2 常规固结试验

根据常规固结试验中土体压缩量与时间关系可求出试样在最终荷载稳定后的孔隙比 $e_0$ 。图1即为各试样孔隙比 $e$ 随荷载 $p$ 的变化曲线( $e-p$ 曲线)。



1—Y1; 2—Y2; 3—Y3; 4—Y4

图1 人工土试样的 $e-p$ 曲线

Fig. 1 The  $e-p$  curve of the artificial soil sample

由图1可知,长石试样(非黏土矿物)总压缩量很小,孔隙比降幅很小,说明其结构相对致密;高岭土试样(黏土矿物)总压缩量较大,尤其加载初期( $p \leq 200$  kPa时)压缩量突变明显,加载后期( $p > 200$  kPa时)压缩趋缓。这既与试样的初始孔隙比有关也说明非黏土矿物试样的微观结构更致密;对于

两种矿物混合试样,其孔隙比介于纯矿物试样之间,说明两种矿物混合后,由于颗粒粒径更不均匀,级配变好使得微观结构更加稳定。

## 1.3 ESEM 样品制备

将固结前和各级荷载后的土样分别制备 ESEM 样品<sup>[4-3]</sup>,放入 Quanta 200 环境扫描电子显微镜的观测仓中,选择试样竖直断面为观测面,控制仓内温度 $5^\circ\text{C}$ ,压力 $650\text{ Pa}$ 。对各试样样品进行微观观测并拍摄 ESEM 图片,如图2所示。

## 2 土体固结过程的微结构效应

### 2.1 微观结构形态特征分析

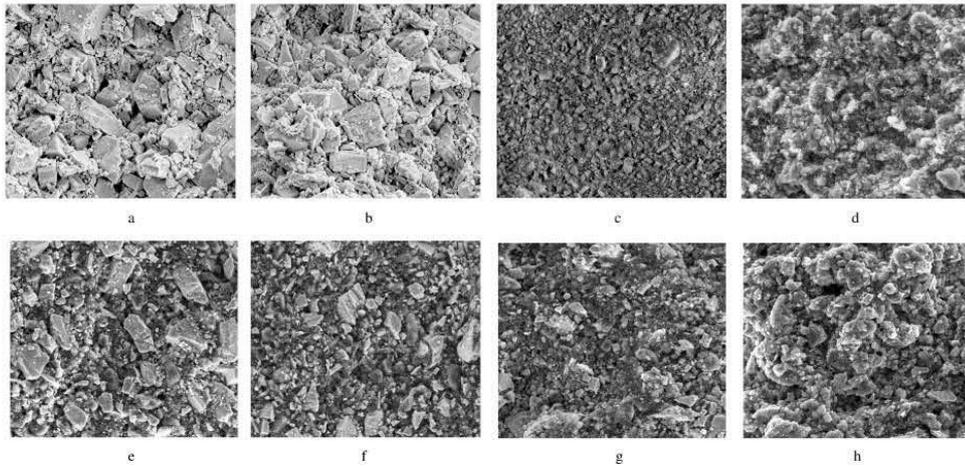
土体结构的形态学特征,即颗粒单元体或孔隙的大小、形状、表面特征及其定量化的比例关系,如颗粒单元体或孔隙的粒径(分布)、孔径(分布)、周长和总面积、形状系数等。

由图2可见, $p=0$  kPa时,非黏土矿物试样与黏土矿物试样在微观形态上存在明显差异。长石试样(Y1)颗粒较大,棱角分明,粒间大多以面-面方式连接,相互嵌固,较多的碎屑填充于大颗粒之间,孔隙少而结构较致密;高岭土试样(Y2)颗粒较小,无明显棱角,有较多颗粒以聚合体形式存在,个别呈片状,粒间多以边-边、边-面方式连接,孔隙分布多;两种矿物混合试样(Y3、Y4)中较大的长石颗粒被较小的高岭土颗粒包裹,使大部分长石颗粒间不能直接接触,粒间嵌固作用明显减弱,有较多团聚在一起的颗粒单元体存在,随着高岭土含量的增加,团聚现象明显,孔隙分布较多。

随着荷载的增加,长石试样(Y1)的颗粒结构更加致密,粒间以面-面接触为主,相互间嵌固作用更加明显,颗粒难于滚动和移动,孔隙主要分布于粒间;高岭土试样(Y2)的颗粒出现了明显的团聚现象,颗粒排列方式也由边-边、边-面连接向面-面连接转变,孔隙也逐渐由粒间孔隙向团聚单元体内部孔隙转变。

两种矿物混合试样(Y3、Y4)中,长石颗粒多数被细小的高岭土颗粒所包裹,Y3试样中,长石颗粒被包裹程度弱,一些长石颗粒之间仍接触,在荷载作用下,土体颗粒更加密实;反之,高岭土所占比例较高的试样(Y4),长石颗粒被包裹程度强,大部分长石颗粒与颗粒之间不能相互接触,随荷载的增加,颗粒团聚现象明显,当荷载达到 $800\text{ kPa}$ 时颗粒团聚单元体广泛分布。

ESEM 图片经处理,得到各级荷载下颗粒的粒径分布如表3所示。随着荷载增加,长石试样(Y1)



a—Y1,0 kPa; b—Y1,800 kPa; c—Y2,0 kPa; d—Y2,800 kPa; e—Y3,0 kPa; f—Y3,800 kPa; g—Y4,0 kPa; h—Y4,800 kPa  
图2 人工土试样 ESEM 图片( $\times 2000$ )

Fig.2 ESEM photos of the artificial soil samples ( $\times 2000$ )

的较大颗粒明显减少,而小颗粒比例增多,说明在压力作用下,大颗粒碎散成小颗粒;相反,高岭土试样(Y2)的较小颗粒含量减少,而大于  $20\ \mu\text{m}$  的颗粒逐渐出现并增多,说明颗粒团聚现象逐渐呈现;两种矿

表3 各试样颗粒在不同压力下的粒径分布

试样	压力 / kPa	颗粒所占百分含量 /%			
		$<1\ \mu\text{m}$	$1-5\ \mu\text{m}$	$5-20\ \mu\text{m}$	$>20\ \mu\text{m}$
Y1	0	25.5	61.4	13.1	0
	200	32.8	59.6	7.6	0
	400	33.4	60.7	5.9	0
	800	35.2	61.9	2.9	0
Y2	0	15.2	78.8	6.0	0
	200	9.3	78.7	11.6	0.4
	400	7.8	76.4	15.1	0.7
	800	7.5	73.6	18.1	0.8
Y3	0	26.8	67.1	6.1	0.0
	200	24.4	68.1	7.1	0.4
	400	22.1	67.5	10.0	0.4
	800	20.9	67.9	10.9	0.3
Y4	0	25.5	69.4	5.1	0.0
	200	22.3	68.1	9.2	0.4
	400	20.8	67.3	11.0	0.9
	800	19.6	65.4	13.9	1.1

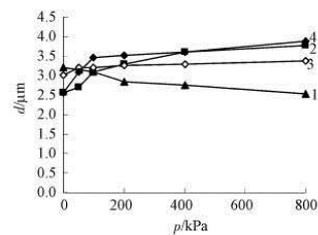
物混合试样(Y3)中,颗粒初始粒径较大,荷载增加使其小颗粒减少,中等粒径颗粒增加并有较大粒径产生,这与两种颗粒之间的包裹作用有关,当长石颗粒被包裹住时,大荷载作用下也不易使其大颗粒破碎;高岭土比例高的试样(Y4),由于高岭土本身等效粒径较小且数量较多的缘故,随着荷载的增大,其

小颗粒减小,大颗粒(团粒)增多,这说明其颗粒的团聚现象显著。

各试样的等效粒径  $d$ 、颗粒平均圆形度  $R$  随荷载的变化关系分别如图3、图4所示。由图3知,黏土矿物含量较大的试样(Y2、Y4),颗粒等效粒径变化程度大,这说明黏土矿物增加了颗粒的活动性,使土颗粒更易发生转动和聚合;由图4知,当黏土矿物成分比例较高时(Y2、Y4),其土体颗粒初始圆形度较高,随荷载增大,颗粒的压缩变形更为明显,颗粒平均圆形度变化程度大,说明黏土矿物成分使土颗粒间转动阻力减小,使颗粒的活动性增大。由于两种配比试样(Y3、Y4)成分比例相差不大,故其圆形度的变化情况也较为接近。

## 2.2 微观结构的排列特征

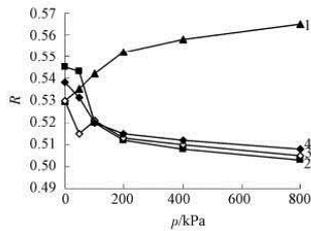
微观结构的排列特征主要是指结构单元体或孔隙在空间中的排列状况,是微观结构在几何学上的



1—Y1; 2—Y2; 3—Y3; 4—Y4

图3 颗粒平均粒径与固结荷载关系( $d-p$ 曲线)

Fig.3 The  $d-p$  curves of samples



1—Y1; 2—Y2; 3—Y3; 4—Y4  
图4 颗粒平均圆形度与固结荷载关系 ( $R-p$  曲线)  
Fig. 4 The  $R-p$  curves of samples

主要表现<sup>[8]</sup>。现仅从分布分维数  $D_p$  和定向概率熵  $H_m$  两项指标对土体的微观结构排列特征进行研究。

### 2.2.1 分布分维数 $D_p$

由相关文献可知<sup>[7-8]</sup>, 分布分维数  $D_p$  主要反映颗粒或孔隙的分布状况,  $D_p$  越大说明颗粒或孔隙越分散, 反之说明集团化程度越高。

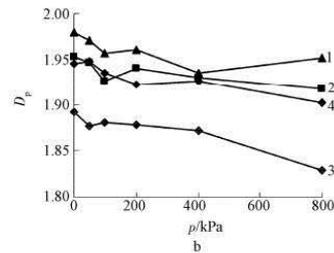
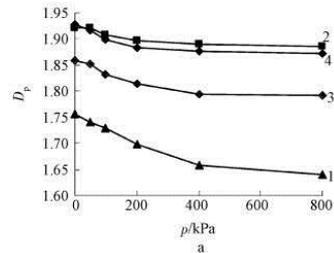
由图5可知, 颗粒的分布分维数较孔隙的分布分维数变化更加稳定且有规律, 这是由于孔隙在荷载增加的过程中, 同时发生大孔隙分离成小孔隙与小孔隙兼并成大孔隙的现象, 导致其分布分维数变化趋势出现波动, 但总体呈现下降趋势。在加载初期 ( $P \leq 200$  kPa 时), 各组试样的颗粒分布分维数降幅较大, 当荷载达到 400 kPa 时, 长石试样 (Y1) 由于有小部分颗粒被压碎, 分布分维数变化较大, 其余试样颗粒分维数基本趋于稳定。

### 2.2.2 定向概率熵 $H_m$

定向概率熵  $H_m$ <sup>[9-14]</sup> 主要反映颗粒或孔隙的有序化程度,  $H_m$  越大说明颗粒或孔隙的有序性越差, 反之则越好。

图6为定向概率熵  $H_m$  随荷载的变化关系。由于各组试样均为矿物粉末击样制备而成, 故颗粒的初始概率熵  $H_m$  均较高, 表现出较大的无序性, 而各组试样孔隙的定向概率熵  $H_m$  均较颗粒小, 原因是孔隙对荷载作用更为敏感, 相对颗粒更显有序。

随着荷载的增加, 各组试样的颗粒与孔隙的定向概率熵  $H_m$  均呈现下降趋势, 表明其有序性增强, 但各组反应仍有差异。长石试样 (Y1) 由于结构紧密, 在受到荷载作用时, 土颗粒不易发生转动, 使得颗粒定向性变化很小, 仍表现出比较大的无序性; 高岭土试样 (Y2) 受到荷载作用后, 颗粒定向性变化显著 ( $P \leq 100$  kPa 时), 说明黏土矿物颗粒活动性较强, 容易发生转动, 当荷载超过 100 kPa 后, 颗粒定向性渐趋稳定; 由两种配比试样 (Y3、Y4) 定向性变化趋势可以说明, 黏土矿物成分比例的增加, 能对土体内部起到一定的润滑作用, 有助于微观结构内部

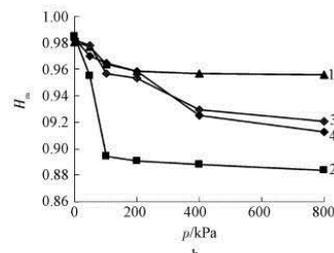
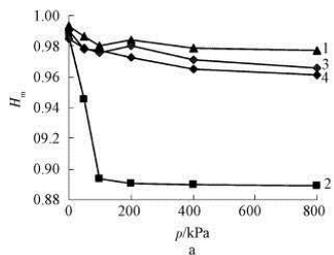


a—颗粒; b—孔隙

1—Y1; 2—Y2; 3—Y3; 4—Y4

图5 人工土颗粒、孔隙的  $D_p-p$  关系

Fig. 5 The  $D_p-p$  curves of artificial soil particles and pores



a—颗粒; b—孔隙

1—Y1; 2—Y2; 2—Y3; 3—Y4

图6 人工土颗粒、孔隙的  $H_m-p$  关系

Fig. 6  $H_m-p$  curves of artificial soil particles and pores

颗粒在受荷时的运动, 相对于颗粒而言, 孔隙受荷载变化带来的定向性影响则更为显著。

## 3 结语

1) 由 ESEM 图片可知, 非黏土矿物试样与黏土

矿物试样在微观形态上存在明显差异。长石试样颗粒较大,棱角分明,粒间大多以面-面方式连接,相互嵌固,颗粒较难滚动和移动,孔隙主要分布于粒间,荷载增加使得大颗粒碎散成小颗粒;高岭土试样颗粒较小,大多以聚合体形式存在,粒间大多以边-边、边-面方式连接,孔隙分布多,荷载增加使得颗粒团聚现象明显,其排列方式也转向面-面连接,孔隙也逐渐由粒间孔隙向团聚单元体内部孔隙转变。

2) 对于黏土矿物含量较大的试样,因黏土矿物增加了颗粒的活动性,使得土颗粒更易发生转动和聚合颗粒,故在荷载增加过程中等效粒径变化程度较大,且土体颗粒初始圆形度较高,荷载作用下,颗粒的压缩变形更为明显。

3) 荷载增加使得各组试样颗粒与孔隙的分布分维数均呈现下降趋势,但前者更加稳定且有规律。而孔隙在加载过程中,因同时出现大孔隙分离成小孔隙、小孔隙兼并成大孔隙的现象,导致其分布分维数变化趋势出现一定波动。

4) 荷载增加使得各组试样颗粒与孔隙的定向概率熵  $H_m$  均呈现下降趋势,表明其有序性增强。长石试样因结构相对牢固,颗粒定向性变化很小,仍表现出比较大的无序性;高岭土试样加载初期 ( $P < 100$  kPa 时),颗粒定向性变化显著,之后趋于稳定;对比试样定向性变化说明,黏土矿物成分能对土体

内部润滑作用,有助于微观结构内部颗粒在受荷时的运动。相对于颗粒而言,各组孔隙定向性受荷载的影响则更为显著。

#### 参考文献

- [1] Mitchell J K. 岩土工程土性分析原理 [M]. 高国瑞,韩选江,张新华,译. 南京:南京工学院出版社,1988.
- [2] 施斌,刘志斌,姜洪涛. 土体结构系统层次划分及其意义 [J]. 工程地质学报,2007,15(2):145-153.
- [3] Cheng X H, Janssen H, Barends F B J, et al. A Combination of ESEM, EDX and XRD Studies on the Fabric of Dutch Organic Clay from Oostva Ardersplassen (Netherlands) and its Geotechnical Implications [J]. Applied Clay Science, 2004, 25(3):179-185.
- [4] 周晖,房莹光,禹长江. 广州软土固结过程微观结构的显微观测与分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S2): 3830-3837.
- [5] 李耀芬,彭元贵. 珠江三角洲软土微观结构的定量研究 [J]. 华东地质学院学报, 2001, 24(2):127-130.
- [6] 施斌. 黏性土微观结构研究回顾与展望 [J]. 工程地质学报, 1996, 4(1):39-44.
- [7] 吴义祥. 工程黏性土微观结构的定量评价 [J]. 中国地质科学院院报,1991,23(2):143-150.
- [8] 黄丽. 饱和软黏土微观孔隙的定量分析及其分形研究 [D]. 武汉:武汉理工大学, 2007.
- [9] 王清,王凤艳,肖树芳. 土微观结构特征的定量研究及其在工程中的应用 [J]. 成都理工学院学报,2001(2):41-46.
- [10] 施斌. 黏性土微观结构定向性的定量研究 [J]. 地质学报, 1997,71(1):36-44.

(上接第 101 页)

形等施工参数,并据此制定了切实可行的施工方案,确定了合理的张拉方案,确保了工程施工质量满足设计及相关规范要求。

2) 本工程钢结构安装、拉索安装及张拉均为高空作业,特别是拉索安装和张拉难度较大,通过设计专用工装及工具,并精心组织施工,顺利完成了此项目的预应力施工任务。

3) 根据该结构特点确定合理的预应力施加方案,总体上采用对称分级的张拉方法。具体施加方法为:支撑条件下,将各种拉索进行预紧;然后,同时张拉 LS2 和 LS4 拉索,LS3 被动受力,后拆除支撑,最后,进行拉索 LS1 预应力张拉工作。

4) 对于索结构等非线性较强的结构施工,必须对施工过程的结构和构件变形进行全过程监测和控制。如果发现偏差较大,则应立即停止,分析原因,并准确评估偏差对结构功能的影响;然后,采取措施确保复杂结构的施工质量和安装精度要求。本工程通过测量控制结构安装过程,保证了钢结构及拉索施工安全,确保工程施工精度满足要求。根据索力

和竖向位移的抽查结果可见,预应力张拉满足了规范和设计要求,为类似的工程提供一个很好的借鉴。

#### 参考文献

- [1] 陆贻麟,尹思明,刘锡良. 现代预应力钢结构 [M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [2] CECS 180:2005 预应力钢结构技术规程 [S].
- [3] GB 50205—2001 钢结构工程施工质量验收规范 [S].
- [4] 王泽强,秦杰. 印度尼西亚亚运会主体育场预应力钢结构施工技术 [J]. 工业建筑,2008,38(12):8-11.
- [5] 王泽强,秦杰. 金沙遗址采光顶预应力悬索结构设计与施工 [J]. 工业建筑,2008,38(12):26-29.
- [6] 沈斌,秦杰. 天津滨海国际会展中心(二期)预应力钢结构施工技术 [J]. 施工技术,2008,37(4):59-60.
- [7] 尤德清,王泽强,陈新礼. 营口体育场吊挂结构预应力施工技术 [C] // 全国钢结构学术年会论文集. 北京:中国钢结构协会, 2011:532-537.
- [8] 王泽强,秦杰. 2008 年奥运会羽毛球馆弦支穹顶结构预应力施工技术 [J]. 施工技术,2007,36(11):9-11.
- [9] 秦杰,王泽强. 2008 年奥运会羽毛球馆预应力施工监测研究 [J]. 建筑结构学报,2007,28(6):83-91.
- [10] 杜彦勋,刘敏敏. 连云港体育馆弦支穹顶预应力张拉技术研究 [C] // 2009 预应力上海论坛学术论文集. 上海:2009:541-548.

## 8. 矿物成分对细颗粒粘土强度特性影响的试验研究

全国中文核心期刊  
中国科技精品期刊  
中国科技论文统计源期刊  
教育部优秀科技期刊

ISSN 1672-9102  
CODEN XKUXEM

# 湖南科技大学学报

## 自然科学版

JOURNAL OF HUNAN UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Natural Science Edition



第31卷 第4期  
Vol.31 No.4

**4**  
**2016**

中国·湘潭  
XIANGTAN CHINA

# 湖南科技大学学报(自然科学版)

第 31 卷第 4 期(卷终)  
(总第 111 期)

## 目次

2016 年 12 月 20 日出版  
(季刊)

### 采矿科学与工程

- 长臂充填开采上覆岩层移动规律数值模拟 ..... 王公忠, 张袁娟(1)
- 鄂尔多斯盆地北部煤系非常规天然气成藏特征—以 U-1 井为例 ..... 姚海鹏, 朱炎铭, 刘刚(6)

### 机电工程

- 微晶白云母/UHMWPE 复合材料冲蚀磨损及其与材料性能的相关性研究 ... 郭源君, 杨润, 吴浩然, 等(14)
- 液压阀用本质安全型防爆电磁铁吸力特性研究 ..... 胡燕平, 熊梦琦(19)
- 套阀型液压凿岩机冲击机构结构与实验 ..... 欧阳斌, 杨书仪, 伍先明, 等(24)

### 建筑与土木工程

- 基于数据融合的中央空调系统综合评价方法 ..... 邹声华, 丁雨晴, 李孔清, 等(29)
- 贵州红黏土的胀缩性与水敏性研究 ..... 朱建群, 易亮, 龚琰, 等(35)
- 矿物成分对细颗粒黏土强度特性影响的试验研究** ..... **周晖**, 房莹光, 梁健伟, 等(40)
- 均布荷载作用下四边简支预制带肋底板混凝土双向叠合板的简化弹性计算方法  
..... 黄海林, 李金华, 曾垂军, 等(46)
- 西南山区低频泥石流块石粒径特征 ..... 周洪福, 何静, 铁永波(52)
- 墙体开洞及建筑间距对串列低矮建筑屋面易损区影响 ..... 刘也, 戴益民, 雷静敏, 等(57)

### 信息与控制工程

- 主观性评价网上阅卷误差控制限的统计模型 ..... 田俊忠(65)
- 空间啁啾对非线性“热像”的影响 ..... 游开明, 张龙青, 田立伟(70)
- 一类机电系统的谐波分析与微分几何控制 ..... 李永新, 王震, 张善文(77)
- 动态社交网络中基于结构多样性的隐私保护方案 ..... 孙莉娜(83)

### 化学·环境科学

- 纳米生物活性玻璃形貌与粒径控制研究 ..... 周金华, 侯英杰, 易重庆, 等(91)
- 基于 GIS 技术的环泉州湾地区生态环境综合评价 ..... 甘宗平, 李俊晓, 李朝奎, 等(95)

### 数理科学

- 再论蜕化抛物型方程的 Harnack 不等式 ..... 黄清龙(102)
- BESIII 测量  $\chi_{cJ} \rightarrow \eta\eta'$  的蒙特卡罗研究 ..... 肖浩, 姬清平, 王至勇, 等(108)

### 管理科学

- 小微企业众筹融资需求及影响因素研究 ..... 刘杰, 刘友金(114)
- 进攻策略、双向溢出与跨国企业国际竞争力培育 ..... 曾剑云(122)

期刊基本参数: CN43-1443/N\*1983\*q\*A4\*128\*zh\*p\*¥ 12.00\*1500\*21\*2016-12

本期责任编辑: 许中坚, 邱喜阳 英文译校: 谭敏

## 矿物成分对细颗粒粘土强度特性影响的试验研究

周晖<sup>1</sup>, 房莹光<sup>2</sup>, 梁健伟<sup>3</sup>, 谷任国<sup>2</sup>

(1. 广州城建职业学院 建筑工程学院, 广东 广州 510925;  
2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641;  
3. 广东省电力设计研究院, 广东 广州 510663)

**摘要:** 通过人工土和天然软土的快速剪切试验,从微观角度研究矿物成分对细颗粒粘土强度特性的影响.研究表明:单一矿物成分试样的强度特性与矿物颗粒的表面特性与结合水性质有关.粘土矿物颗粒具有较大的比表面积、阳离子交换当量,颗粒表面形成强烈微电场而产生较厚的粘滞性结合水膜,使颗粒间粘聚力增强,故表现出较高的粘聚力,而粒间容易错动而形成润滑摩擦,表现出较低的抗剪强度与内摩擦角;混合矿物成分人工土和天然软土试样的强度特性是不同类型矿物颗粒间摩擦、胶结粘聚和结合水性质等微观因素的综合体现,只要某种细颗粒粘土矿物含量超过一定限值,混合土试样的强度特性便由该细颗粒粘土矿物决定.

**关键词:** 细颗粒粘土;矿物成分;粘滞性结合水膜;强度特性

**中图分类号:** TU411.92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2016)04-0040-06

### The influence of mineral constituents for fine clay's strength characteristics

Zhou Hui<sup>1</sup>, Fang Yingguang<sup>2</sup>, Liang Jianwei<sup>3</sup>, Gu Renguo<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Guangzhou City Construction College, Guangzhou 510925, China;  
2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;  
3. Guangdong Electric Power Design Institute, Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** Through quick shear test of artificial soils and natural soft soils, the effects of mineral constituents for fine clay's strength characteristics from micro perspective were studied. Studies show that: the shear strength and the index of single component samples are correlated with the surface properties of mineral particles and bound water properties. Clay minerals have larger specific surface area and cation exchange equivalent, the particle surface produce micro electric field strongly and the formation of thick viscosity bound water film, enhance the cohesive force between the particles which showed high cohesion, and the intergranular dislocation easily lead to lubrication friction which present the lower shear strength and internal friction angle; strength characteristics of artificial soils with mixed mineral composition and natural soil samples is micro factors' comprehensive reflection, such as friction between the particles, cement agglomerated of different types of minerals and bound water properties. As long as some fine clay mineral content exceeds a certain limit, strength properties of mixed soil samples is determined by the fine particles of clay minerals.

**Keywords:** fine particles of clay; mineral composition; hydrated water film with viscosity; strength properties

收稿日期: 2015-05-04

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51208211); 广东省高等学校优秀青年教师培养项目(Yq201462)

通信作者: 周晖(1979-), 女, 浙江金华人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方面的研究. E-mail: zhouhuihui@126.com

在沿海地区普遍分布着细颗粒粘土形成的软土地基,由于其主要成分为黏土矿物、氧化物和有机质等,导致其粒径主要为微米级,而孔径为十几分之一微米甚至更小<sup>[1-2]</sup>,通常只能在较低应力状态下工作.细颗粒粘土表面常带负电荷,可以吸附孔隙水中的阳离子使其在土颗粒表面聚集,同时,分子热运动和浓度差又引起阳离子脱离土-水界面形成扩散运动,土颗粒对阳离子的吸附及阳离子的扩散运动共同导致颗粒表面形成黏滞性结合水膜<sup>[3-4]</sup>.矿物成分、孔隙液性质及浓度的改变促使结合水膜厚度改变,进而改变土粒间相对运动的润滑性质,引起变形阻力的增减,其宏观表现为土体的抗剪强度及指标发生改变.

本文从黏滞性结合水膜这一微观视角,通过试验分析矿物成分对细颗粒粘土强度的影响机制,为建立细颗粒土强度与变形原理论及大面积软土地基加固处理新技术提供理论指导和参考.

## 1 细颗粒粘土的强度特性试验

### 1.1 土样基本特性

为研究矿物成分对细颗粒粘土强度特性的影响,共设计12组试样进行快剪试验.其中,前4组试样仅含单一成分,分别为细颗粒粘土矿物的膨润土、高岭土和非粘土矿物的石英、长石;第5~10组试样为混合试样,控制石英和长石含量比2:1,保持膨润土含量为5%,10%和20%(第5~7组)、高岭土含量为10%,20%和30%(第8~10组);第11~12组为广州及深圳地区天然软土试样,取土深度分别为7.6~8.0 m和5.4~5.8 m,X射线衍射分析得到的矿物组成情况如表1所示.其中,采用击样法制备人工土样,控制含水量在各自的塑限附近,保持天然土样为原状样,各试样的组成成分及物理性质见表2.

表1 天然软土试样的矿物组成及比例 %

试样	蒙脱石	石英	高岭石	长石	白云母	石盐	赤铁矿
广州淤泥土	25.5	32.9	20.5	10.2	8.3	2.6	—
深圳淤泥质土	25.1	11.2	36.0	8.3	17.2	—	2.2

表2 各试样的组成成分以及物理性质

编号	试样成分	数量	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	含水量/%	孔隙比	塑限/%	液限/%
KJ-1	膨润土	4	0.96	58.2	1.60	56.1	187.9
KJ-2	高岭土	4	0.95	32.6	1.98	34.6	60.2
KJ-3	石英	4	2.24	9.6	0.89	9.3	15.9
KJ-4	长石	4	2.70	6.3	0.79	6.7	12.5
KJ-5	5%膨润土,石英:长石=2:1	4	1.71	17.1	1.52	18.1	27.6
KJ-6	10%膨润土,石英:长石=2:1	4	1.71	18.9	1.49	20.2	34.0
KJ-7	20%膨润土,石英:长石=2:1	4	1.71	22.8	1.37	24.5	46.7
KJ-8	10%高岭土,石英:长石=2:1	4	1.40	16.9	1.97	18.0	25.2
KJ-9	20%高岭土,石英:长石=2:1	4	1.40	18.5	1.89	19.9	29.1
KJ-10	30%高岭土,石英:长石=2:1	4	1.40	20.6	1.79	21.8	33.0
KJ-11	广州淤泥土	4	1.36	74.1	2.06	22.9	42.6
KJ-12	深圳淤泥质土	4	1.34	58.3	1.52	19.8	45.1

为了分析结合水膜对试样抗剪强度的影响,分别利用乙二醇醚吸附法(EGME法)<sup>[5-6]</sup>和乙酸铵交换法<sup>[7-8]</sup>测试各试样的总比表面积和阳离子交换量(CEC),以此换算土颗粒表面单位面积的阳离子交换当量(或颗粒表面电荷密度)<sup>[9]</sup>,测试结果如表3所示.

表3 各试样的总比表面积和阳离子交换量测试结果

编号	总比表面积/( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	阳离子交换量/( $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	阳离子交换当量/( $10^{-3} \text{ meq} \cdot \text{m}^{-2}$ )
KJ-1	455.8	73.50	1.61
KJ-2	17.5	3.65	2.09
KJ-3	6.6	0.22	0.33
KJ-4	3.9	0.21	0.54
KJ-5	34.9	4.03	1.15
KJ-6	64.0	7.84	1.23
KJ-7	111.1	15.30	1.38
KJ-8	6.7	0.64	0.96
KJ-9	7.8	1.07	1.37
KJ-10	8.1	1.82	2.25
KJ-11	89.1	23.45	2.63
KJ-12	115.5	28.73	2.49

## 1.2 强度特性试验

快剪强度试验每组设计4个试样,直径和高度分别为61.8 mm和20 mm,分级施加100~400 kPa的竖向压力,保持剪切速率0.8 mm/min,制样及快剪试验操作步骤详见《土工试验方法标准》,保持试验条件一致.各组试样的抗剪强度及指标测试结果如表4所示.

表4 试样的抗剪强度及其强度指标

编号	抗剪强度/kPa				快剪指标	
	竖向压力	竖向压力	竖向压力	竖向压力	粘聚力/kPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )
	100 kPa	200 kPa	300 kPa	400 kPa		
KJ-1	59.2	62.7	65.6	69.1	55.2	1.9
KJ-2	108.5	165.6	216.1	259.9	61.8	26.8
KJ-3	77.9	126.9	178.2	241.7	12.4	28.6
KJ-4	56.0	115.1	161.9	222.8	2.7	28.7
KJ-5	80.7	133.2	191.2	238.3	28.2	28.0
KJ-6	77.4	128.8	174.1	217.8	32.9	25.0
KJ-7	54.0	59.6	73.1	83.0	42.4	5.7
KJ-8	65.6	115.2	174.1	233.3	6.5	29.3
KJ-9	78.6	131.1	182.0	226.6	30.9	26.3
KJ-10	93.3	143.9	206.5	259.2	35.7	29.3
KJ-11	11.4	17.2	23.0	29.1	5.5	3.4
KJ-12	21.8	35.5	49.2	62.9	8.1	7.8

图1(a)~(f)分别为不同成分混合土样(KJ-5~KJ-10试样)的粘聚力、内摩擦角和抗剪强度与矿物成分含量的关系曲线.

由表4和图1的快剪试验结果可知,细颗粒粘土的强度特性受矿物成分影响较大,具体表现为

1)对于KJ-1~KJ-4的单一成分试样,土样抗剪强度均随竖向增大而增大,但强度增幅不同.以100 kPa竖向压力时的抗剪强度为基准,其余各级压力下试样强度增幅分别为5.9%~16.7%(膨润土),52.6%~139.5%(高岭土),62.9%~210.3%(石英),105.5%~297.9%(长石),说明除膨润土外,其他三者的抗剪强度均明显增长;在相同竖向压力下,高岭土试样的抗剪强度最高,膨润土最低,约为高岭土强度的26.6%

~54.6%,而石英试样的强度值略高于长石稍低于高岭土;从抗剪强度指标分析,膨润土试样具有较高的粘聚力及很小的内摩擦角,高岭土试样的2个值均较高,而石英与长石的粘聚力均较小,但内摩擦角较大且接近30°。

2)对于KJ-5~KJ-10的混合试样,则呈现不同的强度反应。

由图1(a)~(c)可知,膨润土—石英—长石的混合试样(KJ-5~KJ-7),随着膨润土相对含量增大,试样的粘聚力增大而内摩擦角减小,在同级竖向压力下试样的抗剪强度降低,膨润土含量在5%~20%时,抗剪强度随膨润土含量增大而明显减小,但当膨润土含量超过20%后,抗剪强度曲线下降趋缓,说明膨润土—石英—长石混合土样中,只要其粘性矿物蒙脱石含量超过一定限值后,就得以控制土体的强度性状,与单一成分的该土样性质较接近。

由图1(d)~(f)表明,对高岭土—石英—长石混合试样(KJ-8~KJ-10)而言,随高岭土含量增加,其粘聚力迅速增大而内摩擦角几乎不变,仅有±2°的波动。在同级竖向压力下,试样的抗剪强度值有所提高,当高岭土含量超过30%后,抗剪强度增幅缓慢,说明高岭土—石英—长石的混合土样中,只要其粘性矿物高岭石的含量超过一定值后,粘性矿物就得以控制土体的强度性状。与100 kPa压力下的强度值相比,其他各级压力下强度增幅依次为75.6%~255.6%(KJ-8),66.8%~188.3%(KJ-9),54.2%~177.8%(KJ-10)。

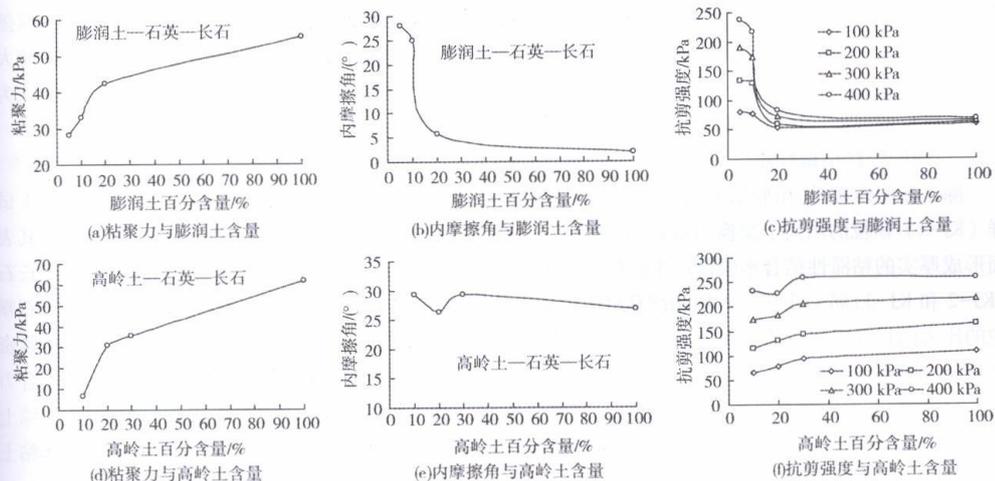


图1 混合土样的粘聚力、内摩擦角、抗剪强度与矿物成分含量的关系曲线

3)对于天然软土试样(KJ-11~KJ-12),由于其含水量较高且粘土矿物成分含量超过50%(见表1),导致抗剪强度指标较低,两者的粘聚力均在10 kPa以内,内摩擦角低于8°。

## 2 细颗粒粘土的强度特性微观分析

细颗粒粘土强度取决于土体的各种宏观物理状态变量,但其宏观特性的改变实际是由微观性状改变而引起的<sup>[10-12]</sup>。实际上,细颗粒粘土的强度受变形时粒间的摩擦作用、结合水性质及胶结状态等因素共同影响决定,下面进行初步分析探讨。

### 2.1 粒间的摩擦作用

在法向应力 $N$ 作用下,粘土颗粒间通过各自的凸起体形成接触面<sup>[13-14]</sup>,而接触处的抗剪强度由粒间滑动阻力提供,如图2所示。

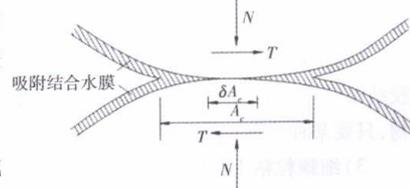


图2 粘土颗粒间的接触

颗粒接触处的强度  $T$  和摩擦系数  $\mu$  可用式(1)、式(2)表示:

$$T = A_c [\delta \tau_m + (1 - \delta) \tau_c] \quad (1)$$

$$\mu = \tan \varphi_u = T/N \quad (2)$$

式中,  $A_c$  为粒间总接触面积,  $\text{mm}^2$ ;  $\delta$  为直接接触的面积百分数;  $\tau_m$  为粒间直接接触强度,  $\text{kPa}$ ;  $\tau_c$  为吸附结合水膜强度,  $\text{kPa}$ ;  $\varphi_u$  为粒间纯滑动摩擦时的内摩擦角,  $^\circ$ .

由式(1)可知, 粒间的直接摩擦和吸附水膜的润滑摩擦共同形成抗剪强度  $T$ , 当法向应力  $N$  一定时, 颗粒的表面特性及结合水性质共同决定了粒间抗剪强度及内摩擦角的值. 由表3可知, 粘土矿物膨润土试样的总比表面积最大(接近  $460 \text{ m}^2/\text{g}$ ), 其次是高岭土(接近  $20 \text{ m}^2/\text{g}$ ), 而非粘土矿物石英和长石试样的比表面积均小于  $10 \text{ m}^2/\text{g}$ . 拥有大比表面积的矿物颗粒通常具有活跃的表面能, 其中, 阳离子交换当量值越大则颗粒表面电荷密度越大, 强亲水矿物含量越多, 吸附的结合水越多, 以致于不同矿物颗粒产生差异化的表面特性, 进而影响土体的宏观摩擦性状.

从微观角度分析, 矿物成分对试样的强度特性有着显著的影响. 就 KJ-1~KJ-4 试样而言, 膨润土试样(KJ-1)的颗粒比表面积最高, 可以吸附相当厚的结合水膜, 粒间主要由低强度的水膜连接主导, 粒间产生错动而形成润滑摩擦, 表现为抗剪强度与内摩擦角低; 石英和长石试样(KJ-2 和 KJ-3), 其颗粒的总比表面积很小, 仅为膨润土的 1.45% 和 0.86%, 且阳离子交换当量仅为膨润土的 20.5% 和 33.6%, 使得粒间包裹较薄的结合水膜, 摩擦阻力主要由强度较高的直接接触提供, 因此试样表现出较高的抗剪强度和内摩擦角; 由于高岭土试样(KJ-4)的颗粒总比表面积稍高于非粘土矿物颗粒, 吸附水膜能力有限, 故表现出较大的抗剪强度和内摩擦角; 混合土(KJ-5~KJ-10)所表现的强度特性是各种成分综合作用的结果, 可以认为混合土试样的强度特性受含量较高的粘土矿物成分控制.

## 2.2 粒间的胶结粘聚作用

除了粒间摩擦外, 由胶结和吸附形成的粘聚力也是提供土体强度的重要部分. 经分析可知, 膨润土试样(KJ-1)颗粒的阳离子交换当量较大(见表3), 颗粒表面电荷密度聚集形成强烈的微电场, 从而使其表面形成厚实的粘滞性结合水膜以产生强烈的吸附作用, 粒间粘聚力增强, 表现为其值较大; 而石英和长石(KJ-2 和 KJ-3)属于非粘土矿物, 液塑限低、表面活性小(见表2), 粒间作用属于物理作用. 石英和长石颗粒的比表面积和表面电荷密度远低于膨润土颗粒(见表3), 吸附结合水膜很薄, 其粘聚力主要靠颗粒紧密堆积产生的机械咬合力及毛细管应力提供, 故粘聚力较低; 高岭土(KJ-4)颗粒相互堆积形成机械咬合力的同时, 颗粒表面的结合水膜也可以产生一定的吸附作用和毛细管应力, 故宏观表现为粘聚力较大. 综上所述, 粘土矿物颗粒的粘聚力主要由结合水的吸附作用提供, 而毛细管应力与机械咬合力则是影响非粘土矿物粘聚力的重要因素.

粘土矿物含量对混合土和天然土的粘聚力起了主要影响, 当干密度相同时, 随着粘土矿物颗粒含量的提高, 非粘土矿物颗粒逐渐被粘土矿物颗粒包裹而缺乏直接接触, 粒间的吸附和胶结作用加强, 表现为粘聚力增大. 最终, 混合土体的强度特性就由该粘土矿物主导, 分析结论与“粘土只需占土体固相的 1/3, 就可以控制土体性状”的观点一致<sup>[14-15]</sup>.

## 3 结论

1) 单一成分试样, 土样抗剪强度均随竖向压力增大而增大, 但强度增幅不同, 表明不同成分矿物颗粒的强度性状有其各自特点.

2) 混合矿物成分人工土的抗剪强度及其指标值粘聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  是不同类型矿物颗粒间摩擦和胶结粘聚性质的综合体现, 证明某种细颗粒粘土矿物含量越高, 混合土试样的强度特性便越接近该粘土矿物, 只要某种细颗粒粘土矿物含量超过一定限值, 混合土试样的强度特性便由该细颗粒粘土矿物决定.

3) 细颗粒粘土强度的微观本质是由变形时粒间的摩擦性质、胶结粘聚状态以及结合水的性质等因素共同决定.

## 参考文献:

- [1] 何开胜,沈珠江.结构性土的微观变形和机理研究[J].河海大学学报(自然科学版),2003,31(2):161-165.
- [2] Zhou H,Fang Y G,Gu R G,et al.Microscopic analysis of saturated soft clay in Pearl river delta[J].Journal of Central South University of Technology,2011,18(2):504-510.
- [3] 孙钧.岩土材料流变及其工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [4] Zhou H,Fang Y G,Liang J W,et al.Influence of mineral constituents for fine clay's strength characteristics[J].Electronic Journal of Geotechnical Engineering,2015,20(17):9717-9724.
- [5] 周晖.矿物成分对软土强度性质的影响分析[J].工业建筑,2013,43(7):61-64.
- [6] Shchukin E D, Pertsov A V, Amelina E A, et al. Colloid and surface chemistry[M].London:Elsevier Science Limited,2001.
- [7] 于天仁,季国亮,丁昌璞.可变电荷土壤的电化学[M].北京:科学出版社,1996.
- [8] 中华人民共和国农业部. NY/T295-1995 中性土壤阳离子交换量和交换性盐基的测定[S].北京:中国标准出版社,1996.
- [9] 李学垣.土壤化学及实验指导[M].北京:中国农业出版社,1997.
- [10] 周晖.珠江三角洲软土显微结构与渗透固结机理研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [11] Zhou H,Fang Y G,Gu R G.Modified consolidation model and calculation of soft soil based on microcosmic test[J].Electronic Journal of Geotechnical Engineering,2015,20(17):9725-9734.
- [12] 刘文骏,陈秋南,赵磊军,等.水泥改良花岗岩残积土的强度和崩解特性研究[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2016,31(1):54-59.
- [13] 梁健伟.软土变形和渗流特性的试验研究与微细观参数分析[D].广州:华南理工大学,2010.
- [14] Mitchell J K.Fundamentals of soil behavior[M].2nd ed.New York:John Wiley & Sons Incorporated,1993.
- [15] Fan R D,Du Y J,Liu S Y,et al.Engineering behavior and sedimentation behavior of lead contaminated soil-bentonite vertical cutoff wall backfills[J].Journal of Central South University,2013,20(8):2255-2262.

## 9. Sierpinski Fractal Characteristics of Consolidation of Soft Soil

This issue of the Electronic Journal of Geotechnical Engineering currently contains the following papers in this bundle.

 [Go to Volume 21 \[2016\] Bundle 10](#)

21.11

### Table of Contents

- ▶ [Sensitivity Analysis of Urban Tunnel Behavior into Geotechnical Inherent Parameters and Tunnel Geometric Parameters \(Case Study: Isfahan Subway Tunnel Line 1\)](#)  
**Farshad Ghalamzan, Fariba Kargaranebafghi, R. Ajalloeain, and M. Mohebi**
- ▶ [Rock Physics Analysis in Determining Reservoir Properties between Western Platform and Southern Taranaki Basin, New Zealand](#)  
**Joseph Gnappragasan and Umar Hamzah**
- ▶ [Improving Disturbance State Constitutive Model by Incorporating Plastic Volumetric Strain into Disturbance Function](#)  
**Yunliang Cui, Xinquan Wang and Pengfei Xiang**
- ▶ [Microstructure Characteristics of Backfill Paste Under Different Loading Terms](#)  
**Luo Xiao, Zhang Junwen, and Fang Jian**
- ▶ [Seismic Performance of Reinforced Retaining Wall: a Dynamic Centrifuge Test](#)  
**Yun Liu, Jie Lai, and Gao Feng**
- ▶ [Application of Self-balanced Method to Detect Bearing Capacity of Large Diameter Rock-socketed Piles at Inland High-piled Wharf](#)  
**Wu Tong qing, Lin Jun zhi, Zhou Liang, and Fan Xin ran**
- ▶ [Rheological Test and Model Analysis of Guangzhou Luogang Soft Soil](#)  
**Jie Yuan, Zhongping Chen, Zhuhui Liu, and Xun Wu**
- ▶ [Sierpinski Fractal Characteristics of Consolidation of Soft Soil](#)  
**Hui Zhou and Weifeng Yan**
- ▶ [Prediction of Bearing Capacity from SPT Values Using Genetic Algorithm](#)  
**Athira C.R., and Dr. N. Sankar**
- ▶ [Induced Surface Settlement of Stochastic Medium Theory Based on Optimization of Subway Tunnel Construction](#)  
**Jie Yuan, Zhuhui Liu, Xun Wu, and Yadong Li**
- ▶ [Calculation Formula and Process Optimization Research of Random Medium Method to Predict the Surface Subsidence and Deformation](#)  
**Jie Yuan, Zhuhui Liu, Xun Wu,, and Yadong Li**

# Sierpinski Fractal Characteristics of Consolidation of Soft Soil

**Hui Zhou**

*Guangzhou City Construction College, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong, 510925, China  
e-mail: 554149267@qq.com*

**Weifeng Yan**

*Guangzhou City Construction College, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong, 510925, China*

## ABSTRACT

Sierpinski fractal model was used to test the ESEM image of the consolidation process of soft soil, calculating elements of soft soil structure and the distribution of pore fractal dimension. The research shows that the structure element and porosity of soft soil have obvious fractal characteristics, and the correlation coefficient of Sierpinski fractal is more than 0.958. The pore size distribution of the reconstituted soil is relatively concentrated, the structure is relatively compact, and its value  $D_{bd}$  of pore distribution fractal dimension is significantly smaller than that of undisturbed soil. During the initial period of consolidation of soft soil, the adjustment of pore distribution is not obvious, and the load is increased with the increase of load. The large and medium pores of soft soil are gradually disintegrated into small and micro pores, even the micro pores and micro pores. The degree of group is higher, the pore ratio (ratio) decreases, and the structure unit is arranged closely, so that the pore distribution is more significant. When the load is further increased, the small and micro pores are difficult to be developed and adjusted to the micro pores (mainly in the particles), so the fractal dimension of pore distribution is gradually stabilized.

**KEYWORDS:** Soft soil; Sierpinski model; consolidation; fractal characteristic

## INTRODUCTION

Fractal theory is used to describe a system which is very fragmented and complex, but the local and global self similarity<sup>[1]</sup>. Because of the heterogeneity and inhomogeneity of soils, it is very complicated to quantitatively describe the micro structure and the geometrical characteristics of the pore. The process of forming soil particles and pores by soil accumulation is similar to the process of fractal structure. Therefore, the principle of fractal model for the generation of repeated copy of initial elements by fractal theory can be used to simulate the spatial structure of soil body structure unit<sup>[2]</sup>. By using fractal dimension, the structure unit of soil (mainly composed of single particle and aggregate) and pore is quantitatively described. In this paper, according to the measured data of the micro structure parameters of soft soil from the Pearl River Delta, fractal characteristics of soft soil microstructure are studied, the evolution law of fractal dimension in describing structural unit and pore in consolidation process is discussed, and the relationship

between the macroscopic deformation of soft soil and its fractal characteristics is revealed.

### SIERPINSKI FRACTAL MODEL OF SOIL MICROSTRUCTURE

Sierpinski fractal model<sup>[3,4]</sup> can be used to describe the distribution of the elements of the soft soil structure, namely, computational structural unit or fractal dimension value of pore distribution. Firstly, the 2D image information is obtained by taking the surface of soil micro structure (ESEM image). Then, the soil structure unit or the specific the image of volume of the pore characteristics by "sampling" to select a certain area of the image as the object of analysis and image processing. , the white part from assuming the 1×1 image is the object of study, as shown in figure 1. The image is divided into (1/ε)×(1/ε) orthogonal grid by using measurement unit size ε, and then the distribution image is calculated by Sandbox method, which can get a series number N(ε) of measuring units for regular graphs. By changing the measurement unit size ε, and then making it change in the range of the domain [1, 256], ε1, ε2, ..., εn, the corresponding sequence value is N(ε1), N(ε2), ..., N(εn). Finally, by making the lnε-lnN(ε) map,the minimum square method is used to fit the corresponding point on the map. If there is a linear feature, then the soil structure unit or pore has fractal characteristics, the negative value of D of the slope is the fractal dimension value<sup>[5,6]</sup>. The definition of D is as follows:

$$D = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln \varepsilon} = -K \tag{1}$$

In the formula: ε is the side length of square; N(ε) is the number of lattices, which is the research object (i.e. soil structure unit or pore) after side length ε of the image is divided; K is the slope of the lnε-lnN(ε) function.

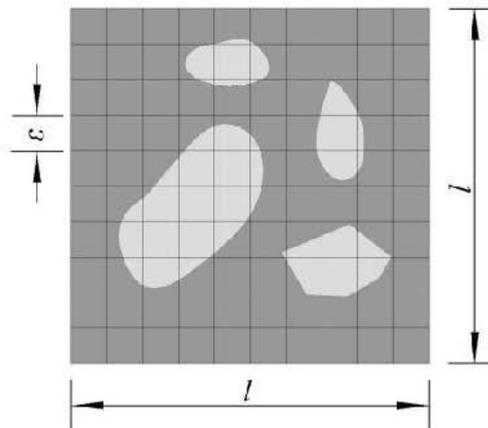


Figure 1: Algorithm for distributing fractal dimension of research object

(soil structure unit or pore)

$D_{pd}$  is used to express the distribution of structural units. The larger  $D_{pd}$  reflects the disperse distribution of particles in the soil, the lower the degree of group, the greater the density of soil.  $D_{pd}$  is used to show the distribution fractal dimension of pore size, the greater the  $D_{pd}$  the greater the distribution area of the pores. Conversely, the smaller the distribution area of pores, the closer the particle aggregates are.

## SIERPINSKI FRACTAL ANALYSIS OF MICROSTRUCTURE OF SOFT SOIL

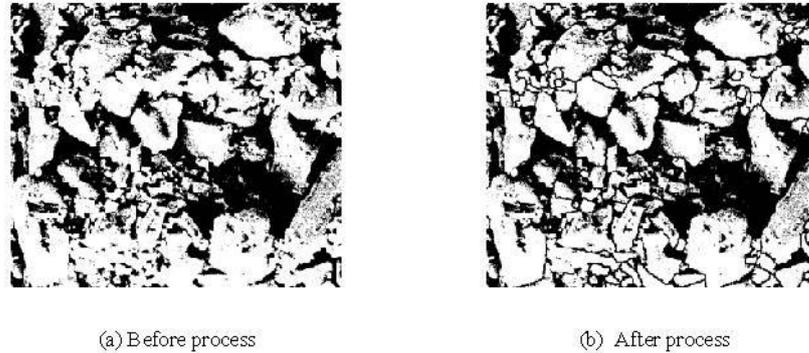
### Sierpinski fractal characteristics of natural soft soil

The soil is a typical soft soil in the Pearl River Delta, and its physical and mechanical properties are shown in Table 1. By shooting the typical soft soil ESEM image and binarization image editing and morphological processing<sup>[7]</sup> to accurately distinguish between structural units and the pore of the soft soil, as shown in Figure 2. Based on the principle<sup>[8]</sup> of Sierpinski fractal model, fractal dimension of pore distribution value and pore of typical soft soil in the Pearl River Delta is obtained, and the results are shown in table 2.

**Table 1:** Main physical and mechanical indexes of typical soft soil in the Pearl River Delta

Soil samples	Soil sample name	Physical indexes				Mechanical indexes			
		Natural moisture content $\omega(\%)$	Natural density $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	Void ratio $e_o$	Liquid index $I_L$	Compression coefficient $\alpha_{1-2}$ ( $\text{MPa}^{-1}$ )	Cohesion force $c(\text{kPa})$	Angle of internal friction $\phi$ ( $^\circ$ )	Permeability coefficient $k_v$ ( $10^{-7}\text{cm/s}$ )
Jinshazhou soft soil	Silt	65.5	1.55	1.84	1.69	1.26	5.0	3.1	3.5
Panyu soft soil	Silt	74.1	1.51	2.06	1.59	1.48	5.50	3.30	2.8
Panyu remolded soft soil	remolded soft soil	74.0	1.51	1.90	1.59	1.30	5.50	3.30	4.6
Shenzhen soft soil	Silt	58.3	1.62	1.52	2.23	1.01	8.1	7.8	1.9

Note: after the text, the Jinshazhou with JSZ said; Panyu with PY said; Shenzhen with SZ said.



**Figure 2:** ESEM image binarization processing and editing

**Table 2:** Calculation results of fractal dimension of typical soft soil in the Pearl River Delta (vertical section)

Soft soil types	Structural units		Pore	
	<i>The distribution fractal dimension <math>D_{pd}</math></i>	Correlation coefficient $R$	<i>The distribution fractal dimension <math>D_{pd}</math></i>	Correlation coefficient $R$
JSZ soft soil	1.855	0.996	1.786	0.996
PY soft soil	1.773	0.989	1.793	0.968
PY remolded soft soil	1.734	0.998	1.671	0.976
SZ soft soil	1.896	0.992	1.509	0.958

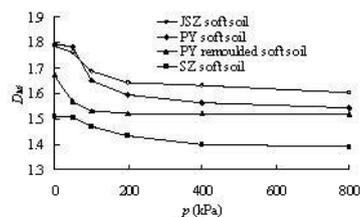
From table 2, we can see that the structure element and pore of soft soil have obvious fractal feature, and the correlation coefficient of Sierpinski is more than 0.958. Because of the distribution fractal dimension  $D_{pd}$  about soft soil structure elements in the 1.734~1.896, comparatively speaking, it is slightly larger than other soft soil in Shenzhen. It showed that the structure elements of soft soil in Shenzhen distributed dispersion, the degree of homogenization is poor, and the degree of the group is low. So the soil mass density is high, the results show that the conclusion of fractal dimension about structural units is consistent with the conclusions of physical and mechanical parameters.

There are obvious differences in the fractal dimension of pore distribution of soft soil in different regions. The fractal dimension of pore distribution  $D_{pd}$  of soft soil is the maximum value of 1.793 in Panyu, but its minimum value is 1.509 in Shenzhen. The pore distribution of soft soil in Panyu area is large, and the aggregate of the particles is relatively loose, the soft soil of Jinshazhou is the second, and the structure of Shenzhen soft soil is relatively compact. Compared with the Panyu natural soft soil, Panyu remolded soil was influenced by disturbing and remodeling, so that the aggregates of its original structure was damaged, its large pore is destroyed, pore distribution become relatively concentrated, structure was more dense, and pore ratio decreased. Therefore, the fractal dimension value  $D_{pd}$  of the pore distribution of

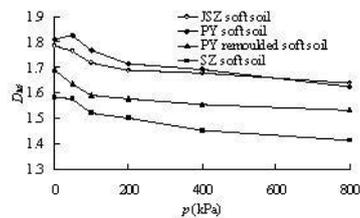
the remolded soft soil was significantly smaller than that of the undisturbed soil, with a decrease of 6.8%.

### The Calculation and analysis of the fractal dimension value $D_{bd}$ of the pore distribution in consolidation process

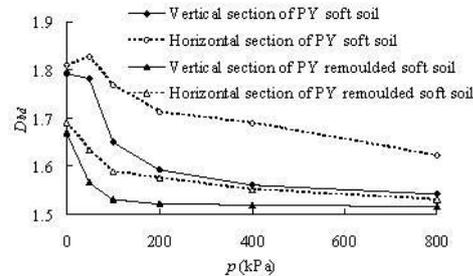
Porosity is an important part of the soil. When the nature of soft soil has changed, the change of pore structure was more direct and significant than that of the structural unit<sup>[9]</sup>. Therefore, from the point of view of statistics, the soil has the fractal structure features of self-similar. By using the soil's features and processing the ESEM image of the natural soft soil and the reconstituted soil in the consolidation process, the engineering properties of soft soil can be studied from the view the microscopic point. Figure 3 to Figure 5 respectively showed 4 kinds of distribution fractal dimension value  $D_{bd}$  of soft soil pore with pressure variation curve (Dbd-p curve), including the vertical sections of soft soil, horizontal sections of soft soil, the vertical and horizontal sections of Panyu soft soil (including the remolded soft soil).



**Figure 3:** Relationship between P and  $D_{bd}$  in the vertical section of the typical soft soil



**Figure 4:** Relationship between P and  $D_{bd}$  in the horizontal section of the typical soft soil



**Figure 5:** Relationship between  $P$  and  $D_{bd}$  in the vertical and horizontal sections of PY soft soil (PY remoulded soft soil)

From the figure 3 and Figure 4, we can see that the distribution fractal dimension value  $D_{bd}$  of pore size is decreasing in the whole process of consolidation. The distribution fractal dimension value  $D_{bd}$  of soft soil pore of the vertical section in each soil sample was decreased at 7.8%~13.9%, and it horizontal section was decreased by 8.2%~10.7%. For natural soft soil, because of its special structure, the structural property of the soft soil in Panyu (py) and Shenzhen (SZ) is more obvious with comparing Jinshazhou (JSZ) soft soil regardless of the vertical section and horizontal section.

Figure 5 shows that the distribution fractal dimension value on the horizontal plane is the same as that of the vertical section. But the extent of the the former has a less change, it reflects the dotted line in the upper and the solid line in the under. Furthermore, it shows that the effect of loading on the pore of soft soil is anisotropic, and the response of the vertical to the load is more sensitive. By a analysis about comparing the distribution fractal dimension value  $D_{bd}$  between the remoulded soil and the undisturbed soft soil in the figure 5, it is known that the original structural strength of the reconstituted soft soil was destroyed, so the adjusting trends of the pore and the natural soil were significantly different in the consolidation process. Because there is no structural strength, in the initial consolidation ( $p < 100\text{kPa}$ ), the pore distribution is adjusted significantly, and the distribution fractal dimension value decreases sharply. With the increase of the consolidation pressure, in the consolidation and later period ( $p > 100\text{kPa}$ ), the fractal dimension value  $D_{bd}$  of pore distribution of the remoulded soft soil decreased gradually and stabilized, and which is finally consistent with the fractal dimension value  $D_{bd}$  of pore distribution of the undisturbed soft soil.

### Calculation and analysis of the fractal dimension value $D_{pd}$ of the structural units in the consolidation process

The soil properties are the comprehensive performance of the structural unit, and the properties of the structural units are affected by the properties of the soil aggregates or single particle, which are even smaller<sup>[10]</sup>. Table 3 respectively showed the fractal dimension values  $D_{bd}$  of structural units of four soil samples in vertical and horizontal under different consolidation pressures.

**Table 3:** The fractal dimension values  $D_{bd}$  of soft soil structural units under different consolidation pressures

Samples of soft soil	The consolidation pressure (kPa)	The vertical section		The horizontal section	
		The distribution fractal dimension value $D_{pd}$	The correlation coefficients	The distribution fractal dimension value $D_{pd}$	The correlation coefficients
JSZ soft soil	0	1.855	0.996	1.736	0.992
	100	1.835	0.987	1.734	0.985
	200	1.899	0.979	1.766	0.990
	400	1.903	0.990	1.807	0.992
	800	1.911	0.992	1.823	0.987
PY soft soil	0	1.773	0.989	1.769	0.995
	100	1.815	0.979	1.805	0.987
	200	1.819	0.996	1.804	0.977
	400	1.825	0.995	1.816	0.989
	800	1.836	0.991	1.827	0.978
PY remolded soft soil	0	1.734	0.998	1.695	0.999
	100	1.788	0.981	1.706	0.988
	200	1.802	0.988	1.723	0.979
	400	1.811	0.991	1.729	0.987
	800	1.826	0.967	1.736	0.981
SZ soft soil	0	1.896	0.992	1.908	0.991
	100	1.896	0.989	1.916	0.987
	200	1.912	0.980	1.934	0.979
	400	1.915	0.986	1.942	0.990
	800	1.919	0.974	1.948	0.992

As can be seen from the table 3, the distribution fractal dimension  $D_{pd}$  of structure units of the typical soft soil in the Pearl River Delta between 1.695~1.908, the range of its variation is about 0.21, the mean value of 1.796. In the consolidation processing, for the four kinds of soil samples, whether vertical or horizontal section, in the consolidation of the initial ( $p < 100$  kPa), the structural unit of the distribution of the adjustment are more significant, and there is a large fluctuations in the data points. With the increase of the pressure, the density of the soil increases, and the distribution of the structural units is finally increasing and tends to be stable. When the consolidation pressure up to 800kPa, the fractal dimension values  $D_{bd}$  of structural units of the vertical section and the horizontal section are respectively between 1.826~1.919 and 1.823~1.948, which shows that the structure of soft soil is still complex.

## CONCLUSIONS

Through the study on the Sierpinski fractal characteristics of the consolidation process of the soft soil in the Pearl River Delta, the main conclusions of this study are as follows:

(1) The structure element and pore of soft soil have obvious fractal feature, and the correlation coefficient of Sierpinski is more than 0.958. The larger the fractal dimension values  $D_{bd}$  of structural units, the larger the distribution of the particles in the soil, the lower the degree of the group, and the greater the density of the soil body. In addition, the greater the fractal dimension value  $D_{bd}$  of pore distribution, the greater the distribution area of the pores, and the looser between the aggregate of the particles.

(2) The remolded soil was influenced by disturbing and remodeling, so that the aggregates of its original structure was damaged, its large pore is destroyed, pore distribution become relatively concentrated, structure was more dense, and pore ratio decreased. Therefore, the fractal dimension value  $D_{bd}$  of the pore distribution of the remoulded soft soil was significantly smaller than that of the undisturbed soil.

(3) During the initial period of consolidation, the pore distribution adjustment is not obvious because the load is less than the structure yield stress of soft soil. During the consolidation period, the medium and large pores in the soft soil gradually disintegrated into medium and small pores, even the micro pores and ultra-micro pores. Therefore, the group degree of soft soil becomes higher, the structure unit is arranged closely, and the density of the soil is increased, so that the distribution of the pore is more significant. When the load increases further, to adjust the pore becomes more and more difficult, soil structure tends to be a new balance, pore distribution fractal dimension has gradually become stable state and the fractal dimension value  $D_{bd}$  of the structural unit distribution eventually was increasing trend and tended to be stable.

## REFERENCES

1. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature[M]. New York: W H Freeman, 1982: 361-366
2. Zhu Hua, Ji Cuicui. Fractal Theory and Application [M]. Beijing: Science Press, 2013:21-35 (in Chinese)
3. Perfect E., Kay B. D. Applications of Fractals in Soil and Tillage Research: A Review[J]. Soil & Tillage Research, 1995, (36): 1-20
4. FENG Y J, Yu B M, Zou M Q and Zhang D M. A Generalized Model for The Effective Thermal Conductivity of Porous Media Based On Self-similarity. J.Phys.D: ApplPhys., 2004, 37: 3030-3040
5. Peng Yuangui, Li Liufen. Quantitative Study On The Microstructure of Soft Soil in the Pearl River Delta [J]. Journal of East China Institute of Geology, 2001, 24 (2):127-130 (in Chinese)
6. Zhang Jizhong. Fractal [M]. Beijing: Tsinghua University press, 2001:101-115 (in Chinese)
7. Zhou H. Study On Soft Soil Microstructure and Mechanism of Seepage and Consolidation in PRD[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013 (in Chinese)
8. Hu Ruilin. Quantitative Study On The Micro Mechanism of Special Soil Engineering [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences Geology and Geophysics, 2000 (in Chinese)

9. Xi Heping. Study on Macro and Micro Mechanics of Porous and Broken Rock Mass [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20 (4):113-114 (in Chinese)
10. Yang Jing. The high Content of Clay Filled on the Reinforcement of the Structural Strength Simulation Test On [D]. Changchun: Jilin University, 2009 (in Chinese).
11. Jennifer McPhail, Paul Hellen, Sherry Britton, Charlie Colvin, Travis Silvey, and Joe Jones: "Evaluation of Consolidation Settlement Using the Sublayer Method" *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2012(Vol.4): 1157-1162. Available at [ejge.com](http://ejge.com).
12. Wei Zhang and Xu-feng Wang "Analysis on the Degree of Consolidation Based on Measured Settlements" *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2013(18.W): 5441-5448. Available at [ejge.com](http://ejge.com).
13. Zulkifli Abu Hassan, Mohd Nazrin Mohd Daud, Muhamad Azani Yahya, Mohammad Shahir Shaharuddin: "Effect of Granular Material on the Rate of Consolidation of Peat Soil" *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2013(18.Z): 6113-6123. Available at [ejge.com](http://ejge.com).



© 2016 ejge

**Editor's note.**

This paper may be referred to, in other articles, as:

Hui Zhou and Weifeng Yang: "Sierpinski Fractal Characteristics of Consolidation of Soft Soil" *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2016 (21.11), pp 4101-4119. Available at [ejge.com](http://ejge.com).

10. Influence of Mineral Constituents for Fine Clay's Strength Characteristics

ELECTRONIC	1996
JOURNAL OF	1997
GEOTECHNICAL	1998
ENGINEERING	1999
	2000
	2001
	2002
	2003
	2004
	2005
	2006
	2007
	2008
	2009
	2010
	2011
	2012
	—

Mete Öner  
FOUNDER  
Editor-in-Chief



## EJGE<sup>®</sup> Information

[Announcement](#)  
[Editorial Board](#)  
[Scope & Call for Papers](#)  
[Authors Guide](#)  
[Paper Format](#)  
[Discussions](#)

Please see the  
[Editor's Status Report \(Jan. 2008\)](#)

EJGE is indexed by

- Chemical Abstracts
- GVL
- EEVL
- GeoRef
- Scopus
- Compendex

[Here is information about indexing](#)

**ISSN 1089-3032**



## World Wide Web of Geotechnical Engineers

-Table of Contents-

- 1996: [Premiere Volume](#)
- 1997: [Volume 2](#)
- 1998: [Volume 3](#)
- 1999: [Volume 4](#)
- 2000: [Volume 5](#)
- 2001: [Volume 6](#)
- 2002: [Volume 7 \(A - C\)](#)
- 2003: [Volume 8 \(A - D\)](#)
- 2004: [Volume 9 \(A - E\)](#)
- 2005: [Volume 10 \(A - G\)](#)
- 2006: [Volume 11 \(A - D\)](#)
- 2007: [Volume 12 \(A - E\)](#)
- 2008: [Volume 13 \(A - L\)](#)
- 2009: [Volume 14 \(A - P\)](#)
- 2010: [Volume 15 \(A - R\)](#)
- 2011: [Volume 16 \(A - U\)](#)
- 2012: [Volume 17 \(A - Z\)](#)
- 2013: [Volume 18 \(A - Z\)](#)
- 2014: [Volume 19 \(A - Z\)](#)
- 2015: [Volume 20 \(20.1 - 20.23\)](#)

No trees were killed in publishing this journal.

However a large number of electrons were terribly inconvenienced.



## ***EJGE Magazine Room***

- [iGEM Front Page](#)
- [Geotechnical Hall of Fame](#)
- [Terzaghi's "Home Page"](#)
- [Good bye, Nilmar Janbu!](#)
- [Jobs](#)
- [Calendar Geotech events](#)
- [Geotech Software](#)
- [Opinionated Geotechs](#)



Awards to this website are now in a separate page



See the other W3G Projects while here.



Visit your library while in the neighborhood

Search for Geotechnical books at [Largest Online Bookstores: Barnes & Noble and Amazon.com](#)

---

## Table of Contents

---

- ▶ [Influence of Mineral Constituents for Fine Clay's Strength Characteristics](#)  
**Hui Zhou, Yingguang Fang, Jianwei Liang, and Renguo Gu**
  - ▶ [Modified Consolidation Model and Calculation of Soft Soil Based on Microcosmic Test](#)  
**Hui Zhou, Yingguang Fang, Renguo Gu**
  - ▶ [Offshore Earth-rock Cofferdam Reinforcement Optimization by Probability Analysis](#)  
**Dai Yuwen and Dr. Wang Zhan**
  - ▶ [Fractal Analysis of Cracks Due to Mixed Mining of Coal Seam Group](#)  
**Hu Yong-zhong, Liu Chang-you, and Li Jian-wei**
  - ▶ [The REEs Characteristics of Dolomite from Lower Triassic Feixianquan Formation in Puguang Gas Field and their Geological Implications](#)  
**Huang Chang-bing, Li Zhen, Jin Min-gang, Yang Gang, Chen Ke-gui, and Wu Jun**
- 
- ▶ [Failure Degree of Rock Mass in Mining Tunnel by Nonlinear Criterion](#)  
**Xiaoming Li and Qunyi Liu**
  - ▶ [Key Points of Short Interval Distance of Jiahua Tunnel](#)  
**Dr. Yang Kui**
  - ▶ [Thrusting Force and Horizontal Displacement of Railway Pier by FEM](#)  
**Dr. Yang Kui, Liu Yong-biao, and Yi Li-yun**
  - ▶ [Analysis of Anti-overturning Stability of Leaning Towers Based on the Theory of Loess Deformation](#)  
**Wei Lu, Dong Zhao, Yulan Wang, and Guoxue He**
  - ▶ [Analysis of Reducing Medium Consumption Based on Lean PDCA Circulation](#)  
**Qing-he Yuan, Yan-yan Tan, and Xue-jie Xu**

## Influence of Mineral Constituents for Fine Clay's Strength Characteristics

**Hui Zhou**

*School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong, 510641, China*  
e-mail: 554149267@qq.com

**Yingguang Fang**

*School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China*  
e-mail: fangg@scnu.edu.cn

**Jianwei Liang**

*Guangdong Electric Power Design Institute, Guangzhou 510663, China*  
e-mail: 12074356@qq.com

**Renguo Gu \***

*School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China*  
\*Corresponding Author, e-mail: 38622786@qq.com

### ABSTRACT

Through quick shear test of artificial soils with single or mixed mineral constituents, the effects of mineral constituents for fine clay's strength characteristics from micro perspective are studied. Experiments show that, the shear strength and the index of single component samples are correlated with the surface properties of mineral particles and bound water properties. Compared with clay minerals and the non-clay minerals, the former with larger specific surface area and cation exchange equivalent, the particle surface can produce micro electric field strongly and the formation of thick viscosity bound water film, enhance the cohesive force between the particles which showed high cohesion, and the intergranular dislocation easily lead to lubrication friction which present the lower shear strength and internal friction angle. Strength characteristics of artificial soils with mixed mineral composition is micro factors' comprehensive reflection, such as friction between the particles, cement agglomerated of different types of minerals and bound water properties. As long as some fine clay mineral content exceeds a certain limit (not to the solid part 1/3), strength properties of mixed soil samples are determined by the fine particles of clay minerals.

**KEYWORDS:** fine particles of clay ; mineral composition ; bound water film ; strength properties ; microscopic analysis

## INTRODUCTION

There have widely distributed soft soil foundation formed by fine particles of clay in the vast of coastal areas, because it often contains some substances such as clay minerals, organic matter and oxides, the particle diameter are mainly micron and the pore diameter can reach one several tenth of micron or even smaller [1,2].The negative charge existed in the particle surface of fine particles of clay will adsorb cationic existed in pore water and aggregate them on the particle surface of soil. At the same time, molecular thermodynamic movement and concentration difference cause diffusion motion which cation divorce from the soil-water interface .The interaction of them lead to cation present diffusion state distribution around the interface of soil particles and water, namely form diffuse double layer, the surface of the particles forms viscosity hydrated film have the nature of solid [3].The change of mineral composition, pore fluid concentration and other factors lead to the thickness of water film wrapped soil particles in thickness changes, then change the lubricating properties of the relative motion between the soil particles, making contact friction, lubrication friction and the friction between them occur in among of particle, causing the change of deformation resistance, which macroscopic manifestations are the change of soil cohesion, internal friction angle and shear strength.

In this paper, the micro perspective of viscosity water film is regarded as the starting point, through experimental we analysis the influence mechanism of strength of fine particles clay caused by mineral composition, providing new technologies and processes, theoretical guidance and reference for reinforce the soft foundation in large of coastal areas.

## STRENGTH CHARACTERISTIC OF FINE PARTICLES OF CLAY

### The basic characteristics of soil samples

In order to study the effects of mineral constituents for fine clay's strength characteristics, 10 groups specimen were designed for the quick shear test .Among them the group of 1-4 only have single component, followed by betonies, kaolin, quartz and feldspar, the first two were the fine particles clay minerals, the latter two were non-clay minerals; Bentonite content were 5%, 10% and 20% in group of 5-7,the content of quartz and feldspar remains 2: 1;Kaolin content were 10%, 20% and 30% in group 1-10, the content of quartz and feldspar remains 2: 1.Using strike sample mothod to make samples and made their water content in the vicinity of plastic limits, the composition and physical properties of each sample are shown in Table 1.

**Table 1: Number, composition and physical properties of samples**

Sample No.	The composition of sample	number of samples	Dry density $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Void ratio e	Water content w (%)	Plastic limit $w_p$ (%)	Liquid limit $w_L$ (%)
KJ-1	bentonite	4	0.96	1.59	59.2	56.1	187.9
KJ-2	kaolin	4	0.95	1.98	30.6	34.6	60.2
KJ-3	quartz	4	2.23	0.87	9.8	9.1	15.7
KJ-4	feldspar	4	2.68	0.81	6.0	6.8	12.6
KJ-5	5% bentonite+63.3% quartz +31.7% feldspar	4	1.70	1.53	16.0	18.1	27.6
KJ-6	10% bentonite+60% quartz+30% feldspar	4	1.70	1.47	17.9	20.2	34.0

KJ-7	20% bentonite+53.3% quartz+26.7% feldspar	4	1.70	1.36	21.7	24.5	46.7
KJ-8	10% kaolin+60% quartz+30% feldspar	4	1.41	2.01	15.9	18.0	25.2
KJ-9	20% kaolin+53.3% quartz+26.7% feldspar	4	1.41	1.90	17.6	19.9	29.1
KJ-10	30% kaolin+46.7% quartz+23.3% feldspar	4	1.41	1.79	19.3	21.8	33.0

To analyze the effect of shear strength of the sample caused by water film, using glycol ether adsorption (EGME) [4,5] and ammonium acetate exchange method [6,7] to test the total surface area of each sample and the cation exchange capacity (CEC), by this convert the unit surface area of the soil particles cation exchange equivalent (or charge density of particle surface), the specific test method described in the literature [8], the test results are shown in Table 2.

**Table 2: Total surface area and cation exchange capacity test results of samples**

Sample No.	Total specific surface area $S_s(m^2/g)$	cation exchange capacity CEC (cmol/kg)	cation exchange equivalent $\Gamma (\times 10^{-3} meq/m^2)$
KJ-1	455.8	73.50	1.61
KJ-2	17.5	3.65	2.09
KJ-3	6.6	0.22	0.33
KJ-4	3.9	0.21	0.54
KJ-5	34.9	4.03	1.15
KJ-6	64.0	7.84	1.23
KJ-7	111.1	15.30	1.38
KJ-8	6.7	0.64	0.96
KJ-9	7.8	1.07	1.37
KJ-10	8.1	1.82	2.25

### Strength characteristics test

In quick shear test each group has 4 specimens, vertical pressure respectively applied were 100, 200, 300 and 400kPa and the shear rate was 0.8mm / min. The diameter and height of specimen were 61.8mm and 20mm, the concrete method of making samples and the operation steps of quick shear test described in "Geotechnical engineering test method and criterion" (GB / T 50123-1999), keeping test conditions consistent. Strength and index test results for each sample as shown in Table 3.

**Table 3: The shear strength and the strength index of sample**

Sample No.	shear strength under the different of vertical pressure $\tau$ (kPa)				Index of quick shear test	
	100kPa	200kPa	300kPa	400kPa	$c$ (kPa)	$\varphi$ (°)
KJ-1	58.2	61.7	64.6	68.2	55.0	1.9
KJ-2	109.5	166.7	216.1	261.9	61.9	26.9
KJ-3	76.7	125.9	177.3	240.5	12.3	28.5
KJ-4	57.1	116.0	163.7	224.5	2.8	28.8
KJ-5	80.7	133.2	191.2	238.3	28.2	28.0
KJ-6	77.4	128.8	174.1	217.8	32.9	25.0
KJ-7	54.0	59.6	73.1	83.0	42.4	5.7

KJ-8	65.6	115.2	174.1	233.3	6.5	29.3
KJ-9	78.6	131.1	182.0	226.6	30.9	26.3
KJ-10	93.3	143.9	206.5	259.2	35.7	29.3

Figure 1 (a)~(f) are curves show that the relation between the cohesion, internal friction angle and shear strength of soil samples mixed different components (KJ5 ~ KJ10) and mineral ingredients.

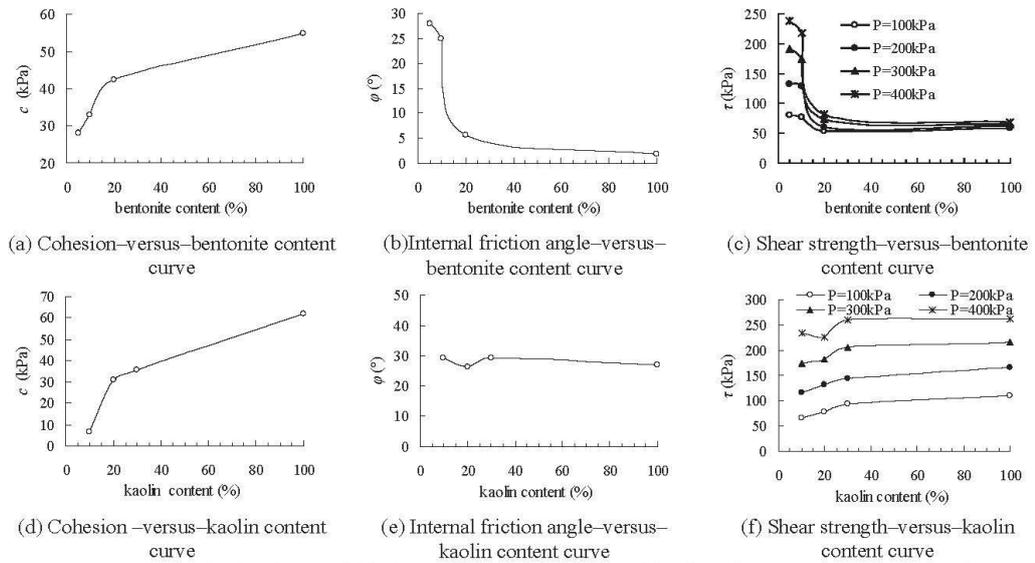


Figure 1: Cohesion, internal friction angle, shear strength with mineral content curves of mixed soil samples

From the result of quick shear test shown in Table 3 and Figure 1 we can know there have difference impact for the strength characteristic of fine clay caused by mineral composition:

(1) For soil samples only have single component (KJ-1 ~ KJ-4), soil's shear strength will increase with vertical pressure increase, but the amplification of strength is different, indicating that the strength trait of the different component's mineral particles has its own characteristics. Making shear strength as a benchmark below the 100kPa pressure in Table 3, at other levels of pressure, the growth rate of the bentonite sample strength was 6.0% ~ 17.2%, kaolin was 52.2% ~ 139.2%, quartz was 64.1% ~ 213.6%, feldspar was 103.2% ~ 293.2%, indicating that the shear strength of bentonite relative growth is not obvious, but the strength of the other three have increased significantly; At the same vertical pressure, the shear strength of kaolin samples was highest and bentonite sample was minimum, about 26.0% ~ 53.2% of kaolin strength, while the shear strength of quartz and feldspar were similar and both of them lower than kaolin; For strength indicators, bentonite's cohesion is higher and internal friction angle is very small, less than 2°. Both of kaolin's cohesion and internal friction angle at a high level, quartz and feldspar has a big internal friction angle approaching 30°, but cohesion is small.

(2) For mixed soil sample (KJ-5 ~ KJ-10), which showing the different reaction of intensity. From Figure 1(a) ~ (c), mixed soil samples contains bentonite - quartz - feldspar (KJ-5 ~ KJ-7), with bentonite's content increased, the sample's cohesion increase and the friction angle reduce with the

increase of bentonites' content, shear strength of sample is reduced at the same level of vertical pressure. When the bentonite content in 5%~20%, the shear strength curve occurred significant decline with bentonites' content increased, but when the bentonites' content over 20%, the shear strength curve decline slowly, indicating that in mixed soil samples contains bentonite - quartz - feldspar, as long as its viscosity mineral montmorillonite's content exceeds a certain limit, the strength properties of soil can be controlled, it's properties are close to soil samples have only component.

From Figure 1 (d) ~ (f), for the mixed soil samples contains kaolin - quartz - feldspar (KJ-8 ~ KJ-10), the sample's cohesion increases rapidly with increase of kaolin's content, but internal friction angle substantially no effect, only appeared  $\pm 2^\circ$  fluctuations. At the same level of vertical pressure, the value of shear strength of sample has increased, when kaolin's content exceeds 30%, the shear strength curve has slow growth, indicating that in mixed soil samples contains kaolin - quartz - feldspar, as long as the viscosity mineral kaolinite's content exceeds a certain value, the strength trait of soil can be controlled by viscosity mineral.

## MICROSCOPIC ANALYSIS ABOUT THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF FINE CLAY

From point of macroscopic view, the strength of fine clay depended on the physical state variable of soil, but the change of macroscopic properties actually caused by the change of microscopic trait[9]. In fact, the strength of fine clay determined by such factors as frictional property between particles, cemented cohesive state and properties of bound water, the following have preliminary analysis and discussed.

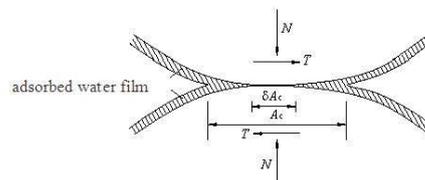
### Friction effect between particles

Friction cohesive theory [10] considered that the contact between particles formed by the respective projection, under the effect of normal stress  $N$ , these asperities formed contact surface caused by plastic deformation and yield, and lubrication friction between particles provided by the contact area and the shear strength at the contact, as shown in Figure 2. Strength  $T$  at the contact and friction coefficient  $\mu$  can be expressed as (1), (2):

$$T = A_c [\delta \tau_m + (1 - \delta) \tau_c] \quad (1)$$

$$\mu = \tan \varphi_u = T/N \quad (2)$$

On the formula,  $A_c$  is the total contact area,  $\delta$  is the percentage of the area of direct contact between particles,  $\tau_m$  and  $\tau_c$  are the strength of direct contact between particles and the strength of bound water film (usually considered  $\tau_m > \tau_c$ ),  $\varphi_u$  is pure sliding friction's friction angle between particles.



**Figure 2:** The contact between the particles

The formula (1) shows that the shear strength  $T$  between particles are composed by direct friction between the particles and lubricated friction of adsorbed water film. When the normal stress is constant, the value of shear strength and internal friction angle between particles determined by surface characteristics of properties and the nature of bound water. Surface area of different mineral composition have difference several magnitude, total specific surface area of clay mineral bentonite samples is biggest ( $455.8\text{m}^2/\text{g}$ ). The next is kaolin, specific surface area of non-clay minerals quartz and feldspar less than  $10\text{m}^2/\text{g}$ . Those mineral particles has high specific surface area are tend to have an active surface energy. The equivalent of cation exchange represent negative charge density of particle surface, the greater value represent the greater charge density of particle surface and the more content of strongly hydrophilic mineral, which can adsorb more bound water, resulting in surface properties of difference mineral particles produce differences, thus exhibiting different friction traits.

From samples KJ-1 ~ KJ-4, Specific surfaced area of particle is higher than quartz and feldspar for bentonite's sample (KJ-1), it can absorb relatively thick water film. Under the normal stress the particles mainly connected by water film which have lower intensity and lack of direct contact point, cementation formed by hydrated film between the particles is obvious, particles easy to dislocate and form lubricating friction, so the shear strength and the friction angle are low; Quartz and feldspar's samples (KJ-2 and KJ-3), which particle's total specific surface area is very small, only 1.45% and 0.86% of bentonite, and the equivalent of cation exchange only have 20.5% and 33.5% of bentonite. Making hydrated film is thinner between the particles, between the particles frictional resistance mainly formed by direct contact with high strength, intergranular need to overcome a large resistance for dislocation and then form direct friction, so the sample showing high shear strength and internal friction angle; For kaolin's samples (KJ-4) the total specific surface area of particles slightly higher than quartz and feldspar, thickness of assorted hydrated film is limited, large direct contact can be formed between the particles and then showing high shear strength and internal friction angle; Strength properties of mixed soil (KJ-5 ~ KJ-10) are the result of the combined effect of the various components, it can be considered that the content of some clay mineral in samples is higher and the strength properties of mixed soil samples will be close to the clay minerals.

### Cementation between particles

In addition to the friction, cohesion caused by cementation and adsorption also is an important part of soil strength. After analysis, because of the equivalent of cation exchange (see Table 2) are large for betonies' particle (KJ-1), the charge on the surface of particle aggregate and form strong micro-electric field, making thinness viscosity hydrated film formed on surface of particle and then caused strong adsorption, cohesion between particles increases, and it shows high cohesion; Quartz and feldspar (KJ-2 and KJ-3) are the non-clay minerals, surface activity is small, liquid and plastic limit are low (see Table 1), it's an large inert substance, nature of the interaction between particles belongs physical interaction. Surface charge density and specific surface area of quartz and feldspar grains are much lower than bentonite and kaolin (Table 2), they adsorbed water film are thin, and its cohesion most rely on the mechanical bite force and capillary stress caused by particles closely packed, so cohesion is low; Kaolin (KJ-4) particle surfaces have a certain thinness of hydrated film, which can produce some adsorption and capillary stress and accumulation of particles also can form the mechanical bite force, therefore cohesion is very impressive. It is believed that the adsorption of bound water is an important factor affecting the cohesion of clay mineral particles, the mechanical bite force and capillary stress are the main source for non-clay minerals formed cohesion.

Cohesion of mixed soil is mainly reflecting the impact of clay mineral. Under the conditions of dry density are same, with the content of flaky bentonite and kaolin gradual increase, granular quartz and feldspar gradually wrapped by clay mineral and cannot have direct contact, the nature of the

adsorption and cement between particles strengthened with the content of clay mineral increasing, reflected in increased cohesion. Finally, the strength properties of the mixed soil will be dominated by clay mineral, the conclusions are consistent with Mitchell's point that "clay most occupy one-third of the solid part, it can make granular particles cannot have direct contact, and the trait of soil can be controlled by clay "[10].

## CONCLUSIONS

Tests showed that the mineral composition has a significant effect on the strength characteristics of fine particles clay, the main conclusions are as follows:

(1) Single component samples, shear strength of soil increased with the vertical pressure increases, but the increase amplitude strength is different, showing strength characteristics of different mineral particles has its own characteristics.

(2) The shear strength and index value  $c$ ,  $\phi$  of artificial soil are the comprehensive embodiment about the nature of friction and cohesion between different types of mineral particles, proving the higher content of some kind of fine particles, the strength characteristics of the mixed soil samples will be closer the clay minerals, as long as the content of some kind of fine particles clay mineral exceeds a certain limit (less than 1/3 of its solid portion), strength properties of mixed soil samples will be determined by the fine particles clay minerals.

(3) Microscopic nature of the fine particles clay intensity is determined by the nature of friction between the particles when deform, cement cohesion state and nature of bound water and other factors.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This study presented here is financially supported by State Key Lab of Subtropical Building Science, South China University Of Technology (Grant No. 2012ZA04 and No. 2013ZC18), National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51208211) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. 2012ZM0089). The authors wish to acknowledge these supports.

## REFERENCES

1. HE Kai-sheng, SHEN Zhu-jiang. Study on Micro-deformation and Mechanism of Structural clay [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2003, 31(2): 161-165. (in Chinese)
2. ZHOU Hui, FANG Ying-guang, GU Ren-guo and etl. Microscopic analysis of saturated soft clay in Pearl River Delta [J].Journal of Central South University of Technology, 2011,18(2): 504-510.
3. SUN Jun. Geotechnical Material Rheological and Its Engineering Application [M]. Bei Jing: China Building Industry Press, 1999. (in Chinese)
4. ZHOU Hui. Impact analysis of mineral composition for soft soil's strength properties [J]. industrial Architecture, 2013, (7): 61-64. (in Chinese)
5. E.D. Shchukin, A.V. Pertsov, E.A. Amelina and etl. Colloid and Surface Chemistry [M]. UK: Elsevier Science Ltd, 2001.
6. YU Tian-ren, JI Guo-liang, DING Chang-pu. Electrochemical of Variable Charge Soils

- [M]. Bei Jing: Science Press, 1996. (in Chinese)
7. The ministry of agriculture of the People's Republic of China. The Measurement of Cation Exchange Capacity and Exchangeable bases of Neutral Soil (NY/T 295-1995) [M]. Bei Jing: China Standard Press, 1996. (in Chinese)
  8. LI Xue-huan. Soil Chemistry and Experiment Instruction [M]. Bei Jing: China Agriculture Press, 1997. (in Chinese)
  9. ZHOU Hui. Study on Soft Soil Microstructure and Mechanism of Seepage and Consolidation in Pearl River Delta [D]. South China University of Technology, 2013.(in chinese)
  10. Mitchell J. K., Fundamentals of Soil Behavior [M]. 2nd ed., New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993.



# 11. 装配式预制构件粗糙面施工技术研究与应用

第8卷第11期  
2018年11月

《新工业》  
2019年1月21日

新型工业化  
The Journal of New Industrialization

Vol.8 No.11  
Nov. 2018

## 装配式预制构件粗糙面施工技术研究与应用

印宝权<sup>1</sup>, 吴勇<sup>2</sup>

(1. 广州城建职业学院, 广东 广州 510925; 2. 广东中建科技有限公司, 广东 东莞 523550)

**摘要:** 粗糙面施工是装配式预制构件生产过程中必不可少的一道工序, 该工序实施的好坏直接关系到构件结合面的受力情况。论文针对装配式预制构件粗糙面施工的技术难题进行了研究, 研制了装配式预制构件混凝土分层浇筑面层加铺原浆骨料的施工技术, 通过试验确定了构件分层浇筑的分层面最佳位置和时间间隔, 采用自行研发的混凝土砂浆分离器, 保证了构件内部骨料的均匀性和构件表面的粗糙度, 形成了相应的新技术。该技术对装配式预制墙板、叠合梁、叠合柱、凸窗等构件的粗糙面施工具有普遍适用性。

**关键词:** 装配式建筑; 粗糙面施工; 分层浇筑; 原浆骨料

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.19335/j.cnki.2095-6649.2018.11.001

本文著录格式: 印宝权, 吴勇. 装配式预制构件粗糙面施工技术研究与应用 [J]. 新型工业化, 2018, 8(11):

109

### Research and Application of Construction Technology for Prefabricated Component Rough Surface

YIN Bao-quan<sup>1</sup>, WU Yong<sup>2</sup>

(1. Guangzhou City Construction College, Guangzhou, Guangdong 510925; 2. China Construction Science & Technology (Guangdong) Co., Ltd., Dongguan, Guangdong 523550)

**Abstract:** Rough surface construction is an indispensable process in the production of prefabricated components. The implementation of this process is directly related to the force of the joint surface of the component. This paper studies the technical difficulties in the construction of the rough surface of prefabricated components. The technology about laminated pouring surface layer of precast concrete with original slurry aggregate is developed. The optimal location and time interval of the stratified pouring of components are determined by experiments. The concrete mortar separator developed by ourselves is adopted to guarantee the uniformity of the aggregate inside the component and the roughness of the surface of the component, forming a corresponding new technology. his technology has universal applicability to the rough surface construction of prefabricated wallboard, composite beam, composite column and convex window.

**Key words:** Prefabricated building; Rough surface construction; Layered pouring; Protoplasmic aggregate

**Citation:** YIN Bao-quan, WU Yong. Research and Application of Construction Technology for Prefabricated Component Rough Surface [J]. The Journal of New Industrialization, 2018, 8(11): 109

## 1 工程概述

随着我国建筑业科技的发展、市场的需求与政策的导向, 以装配式建筑为代表的建筑工业化以其高效、环保、构件尺寸精准、品质高、外观质量好、安装精度高、湿作业少、节约劳动力、施工效率高、投资回收快等特点作为一种新的生产方式受到越来越多的关注、支持和推广。

深圳市某项目为华南地区装配式建筑中装配率最高的项目, 总用地面积 11164.76 m<sup>2</sup>, 共 3 栋塔楼 (1# 楼、2# 楼、3# 楼), 建筑高度分别为

92.8 m (1# 楼、2# 楼)、95.9 m (3# 楼), 总建筑面积 64050 m<sup>2</sup>。本工程预制范围从地上三层开始, 主要预制构件包括: 预制墙板、预制叠合梁、叠合板、预制楼梯、预制阳台、预制空调板等。经计算, 本工程预制率达 50%, 装配率达 70% 左右, 预制构件总方量约 7500 m<sup>3</sup>。其中预制墙板 3561 件, 叠合梁 1764 件, 叠合板 2374 件, 合计 7699 件。

## 2 研究背景

### 2.1 设计要求与标准规范

基金项目: 广东省品牌专业建设资助项目 (项目编号: 2016gzpp016)

作者简介: 印宝权 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 建筑土木工程管理与虚拟仿真, 装配式建筑施工与管理; 吴勇 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 装配式建筑设计、生产与施工管理。

根据设计文件的要求,本工程预制墙板、叠合梁、叠合板有结合面部位均需进行粗糙化处理。其中,预制墙板为3561件,按设计文件要求,该构件制作过程中上表面、侧面均为粗糙面,凹凸深度不小于6 mm。叠合梁1764件,构件上表面为粗糙面,凹凸深度不小于6 mm。

JGJ1-2014《装配式混凝土结构技术规程》的2.1.9条规定混凝土粗糙面是预制构件结合面上的凹凸不平或者骨料显露的表面,简称粗糙面。

该规程第6.5.5条的规定,预制构件与后浇混凝土、灌浆料、坐浆材料的结合面应设置粗糙面、键槽,并应符合下列规定。

(1) 预制板与后浇混凝土叠合层之间的结合面应设置粗糙面。

(2) 预制剪力墙顶部和底部与后浇混凝土的结合面应设置粗糙面;侧面与后浇混凝土的结合面应设置粗糙面,也可以设置键槽。

(3) 粗糙面的面积不宜小于结合面的80%,预制板的粗糙面凹凸深度不应小于4 mm,预制梁端、预制柱端、预制墙端的粗糙面凹凸深度不应小于6 mm。

根据JGJ1-2014《装配式混凝土结构技术规程》的规定,预制构件在工厂生产加工时应应对预制构件与后浇混凝土、灌浆料、坐浆材料的结合面部位及叠合板的顶部进行粗糙面加工,预制构件进入施工现场要由相关单位对其粗糙面进行验收,确保粗糙面能满足设计要求。

## 2.2 现场施工情况

在构件生产的混凝土浇筑环节,必不可少的一个工序是结合面的粗糙化处理,而本工序实施的好坏直接关系到构件后期使用过程的受力情况。

按设计文件的要求,本工程粗糙面的成型方法为水洗成型。技术人员预先在结合面模板上涂刷缓凝剂,在水平结合面喷洒缓凝剂。脱模后用高压水枪对构件结合面进行冲洗,由于构件表面的混凝土中渗透有缓凝剂,表面混凝土的凝结时间比构件内部混凝土的凝结时间长,操作人员利用时间差对构件表面进行冲洗,去除了构件表面的细骨料和浮浆,使粗骨料裸露出来形成粗糙面。但是由于混凝土在一次成型浇筑过程中因重力原因粗骨料下沉,导致构件上部无满足粗糙面成型的粗骨料,水洗过程中无法冲刷出粗糙度符合要求的粗糙面。经研究,选择结合面混凝土分层浇筑面层加铺粗骨料的施工方法能解决水洗面

粗糙度不高的问题。

## 2.3 国内外研究现状

国外对装配式建筑的相关研究相对较早,20世纪初欧洲开展了大量的研究并开发了大规模的装配式混凝土住宅。英国标准将预制构件结合面分为非常粗糙、粗糙、光滑、非常光滑四类,并将结合面表面特征分为凹坑等六种情形,针对各种情形规定了其粗糙度的量测与评价方法。欧洲规范规定了非常粗糙等四种结合面的初步成型方法与检验标准。美国规范明确构件受剪承载力与结合面特征时列举了整体现浇混凝土、未专门进行结合面处理、粗糙面凹凸深度6 mm等三种粗糙面的情形。

国内建筑工业化、装配化近几年得到了进一步的发展,国家、地方政府对装配式建筑的研发与应用给予了大力支持,国内一大批学者开始研究预制装配式建筑,从装配式建筑在工业建筑中的重要性,发展现状与未来趋势到装配式建筑的构件设计标准、构件的工业化生产、施工关键技术都有涉及。杨靖<sup>[1]</sup>指出了我国建筑工业化与产业化未来的发展方向——装配式住宅。王小艳<sup>[2]</sup>研究了BIM技术在装配式混凝土结构建筑中的全过程协同应用。窦晓玉<sup>[3]</sup>等人分析解读了装配式建筑产业链各相关企业的现状和未来可继续发展方向。

我国《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)和《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ1-2014)规定了预制构件的结合面应设置粗糙面的要求,提出了“制作时应按设计要求进行粗糙面处理”“可采用化学处理、拉毛或凿毛等方法制作粗糙面”“粗糙面面积不宜小于结合面的80%”等要求。国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB50204-2015)中将“预制构件的粗糙面质量”作为预制构件进场的一项验收内容。国内各装配式构件生产厂也非常重视构件结合面的粗糙化处理施工过程与成品质量,大多采用凿毛、拉毛、印花、水洗等工艺来完成构件结合面的粗糙化处理。

吴虎<sup>[4]</sup>对缓凝剂水冲凿毛工艺技术进行了总结,石磊<sup>[5]</sup>等人分析了未设置粗糙面的原因及对策,赵勇<sup>[6]</sup>等人结合当前各种粗糙面处理工艺讨论了预制构件结合面粗糙度的量测方法和评价方法。

## 3 构件结合面粗糙化施工方法选择

### 3.1 凿毛法

目前我国常用的混凝土结合面处理方法之一

为凿面处理,通常分为人工凿毛法和机械凿毛法。人工凿毛利用人力和手工机具对混凝土构件表面进行凿化处理,此法劳动强度大、工作效率低、人工成本高,机械凿毛采用机械设备对混凝土构件表面进行凿化处理,此法噪音非常大,且伴随着重大粉尘污染。此外,这两种方法均会对混凝土结合面产生扰动,结构上易产生微裂缝等现象。因此凿毛法具有一定的局限性,不提倡在较大面积的结合面粗糙化处理中使用。

### 3.2 定制模板法

对部分构件粗糙面处理采用定制模板,在模板上设有各种刻痕,脱模后刻痕就存留在了预制构件的结合面上。但是此法技术要求较高,刻痕过浅则达不到规范规定的粗糙度要求,刻痕过深则不利于构件脱模。因此采用带刻痕的定制模板制作预制构件需谨慎使用。

### 3.3 拉毛法

部分构件结合面采用拉毛法进行处理,如叠合板的上表面等。这种方法简单易行,设备简易,操作起来几乎不受限制,若实行机械化拉毛的流水线则会效率更高,因此实施效果较好,使用范围相对较广,实施过程需注意好拉毛后浮渣的清理。但对于存在钢筋外露的构件表面则无法采用拉毛法来实施,因此拉毛法具有较大的局限性。

### 3.4 水洗法

预先在结合面模板上涂刷缓凝剂,在水平结合面喷洒缓凝剂,脱模后用高压水枪对构件结合面进行冲洗,由于构件表面的混凝土中渗透有缓凝剂,表面混凝土的凝结时间将比构件内部混凝土的凝结时间长,操作人员利用时间差对构件表面进行冲洗,去除了构件表面的细骨料和浮浆,使粗骨料裸露出来形成粗糙面。这种方法是目前构件结合面粗糙化处理最理想的方法,水洗法不产生灰尘污染,且一般情况下水洗面粗糙度高,因此国内大部分生产车间已将水洗法作为标准方法在构件生产过程中实施。

但是对于厚度较大的构件,完成混凝土浇筑、振捣后,由于重力的作用,粗骨料会下沉,构件上表面粗骨料减少,水洗过程中则无法冲刷出粗糙度符合要求的粗糙面。此时必需增加凿毛等其他方式来完成粗糙面的处理,此外水洗过程都是通过人工手动完成,工人长期接触带缓凝剂的水泥浆对人体有害,产生的污水需经过处理以后才

能排放,冲刷掉的部分材料属于浪费部分。因此水洗方法也具有较大的局限性。

### 3.5 结合面混凝土分层浇筑施工技术

本工程在尝试多种方法进行构件粗糙面施工均宣告失败后,通过研究找到了失败的原因——混凝土在一次成型浇筑过程中因重力原因粗骨料下沉,构件上部无满足粗糙面成型的粗骨料。因此,研发构件混凝土分层浇筑捣面层加铺粗骨料的施工方法,从而解决粗糙面粗糙度不高的问题。

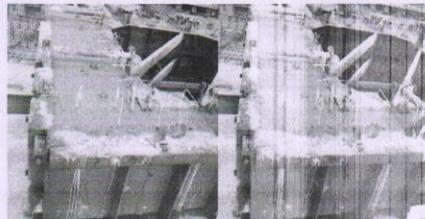


图 1 构件分层浇筑现场图

Fig. 1 Site map of component laminated pouring

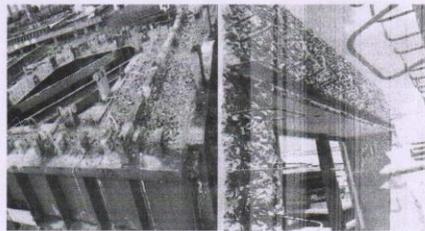


图 2 构件粗糙面成型现场图

Fig. 2 Site map of component rough surface molding

## 4 粗糙面混凝土分层浇筑施工技术原理

针对构件上表面结合面无法冲刷出粗糙度符合设计要求、规范规定的粗糙面,原因是混凝土浇筑、振捣后,由于重力的作用,粗骨料下沉,导致上表面粗骨料少引起的。结合面混凝土分层浇筑施工技术是为保证装配式预制凸窗结构骨料均匀性和结合面粗糙度而研制的一种混凝土浇筑方法,原理是:

① 将构件原本需要一次浇筑成型的混凝土分两层进行浇筑,首先浇筑底层混凝土,振捣密实后静养一段时间,在这部分混凝土初凝之前再浇筑面层混凝土。

② 在第二次浇筑混凝土之前采用混凝土砂浆分离器分离出一小部分粗骨料,待二次浇筑部分完成并振捣密实以后直接将分离出来的粗骨料加铺到构件表面,拍实或稍加振捣即可。

该工艺特点是通过分层浇筑混凝土,相比一次成型而言,每次浇筑量减少,浇筑厚度不大,静养后浇筑上层混凝土,粗骨料下沉的情况会减少很多,保证了结构内部的均匀性,一定程度上增加构件的强度和耐久性。采用分层浇筑的方式也降低了构件使用过程中的裂缝开展情况。最后加铺一层粗骨料,保证了结构表面的粗糙度。

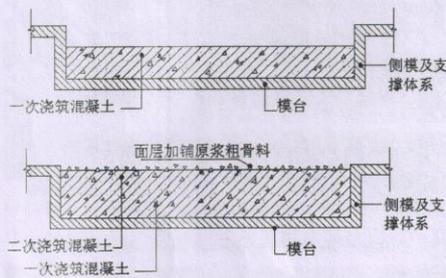


图3 构件分层浇筑施工技术原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of component layered pouring construction technology

## 5 实验性粗糙面混凝土分层浇筑施工技术

确定好构件采用分层浇筑施工的方法以后,为解决“构件分层浇筑的上下层混凝土最佳厚度比”“构件分层浇筑的上下层混凝土浇筑时间间隔”“构件上表面加铺骨料的选择”等疑问,作者制作了9组共27个混凝土标准试块进行了实验,对理论研究的结果进行了论证,以期用于实际工程中。

此后,为了验证本施工技术成型的构件结合面受力性能和粗糙度,制了7组共21个混凝土试块分别模拟新旧混凝土结合面受力性能(4组试块)和粗糙度(3组试块)对比,通过这两个实验,验证了通过本施工技术构件成型效果的可行性。

### 5.1 构件上下层混凝土浇筑分层面的选择

实验过程中,由于没有相似的经验借鉴,作者制作了五组对比试块,上下层混凝土厚度分别为150 mm+0 mm、140 mm+10 mm、120 mm+30 mm、100 mm+50 mm、75 mm+75 mm,静置在相



图4 构件分层厚度对比试块

Fig. 4 The reference blocks for layer thickness of member 同条件下养护。

经过对立方体试压,分层浇筑混凝土试块与一次成型的混凝土试块相比,抗压强度略有增加。经过对试块竖向切开观察,“100 mm+50 mm”组试块截面的骨料均匀性最好。

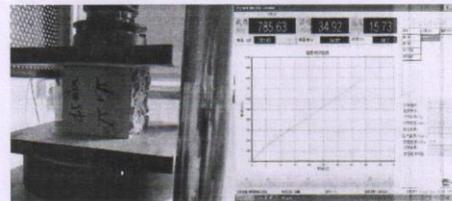


图5 试块结合面试压过程

Fig. 5 Test block combined with interview pressure process

### 5.2 构件上下层混凝土浇筑时间间隔的选择

实验过程中,作者制作了五组对比试块(与上一试验共用一组),对上下层混凝土厚度分别为“75 mm+75 mm”组试块分别做了静置45 min、60 min、75 min、90 min、2 h后浇筑上层混凝土,然后置于相同条件下养护。

经过对立方体试压,静置2 h后浇筑上层混凝土的试块抗压强度明显低于其他组试块。可见,上层混凝土的浇筑一定要在下层混凝土初凝之前。静置60 min和静置75 min后浇筑上层混凝土的试块抗压强度最高。

### 5.3 构件上表面加铺骨料的选择

构件上表面即为结合面(粗糙面),根据设计要求和标准规定,该结合面的粗糙度不得小于6 mm,考虑到骨料一部分要嵌入到构件中,表层骨料的选择应在10 mm~20 mm之间,建议采用专用的混凝土砂浆分离器将大骨料分离一部分出来使用。

### 5.4 模拟构件结合面受力性能对比实验

表 1 模拟构件结合面抗压强度对比实验结果

Table 1 Strength comparison experiment results of component surface

结合面成型法	试块 1/MPa	试块 2/MPa	试块 3/MPa	平均值 /MPa
铺原浆粗骨料	43.3	41.5	42.7	42.5
铺洗净粗骨料	44.4	36.5	40.3	40.4
水洗成型	39.6	41.2	42.4	41.0
无结合面 (构件一次成型)	44.9	45.4	44.6	45.0

为了验证本施工技术成型的构件在施工现场安装后结合面受力性能,作者制作了4组共12个混凝土试块模拟新旧混凝土结合面受力性能对比实验,构件制作过程中,只浇筑一部分混凝土(75 mm高试块),该部分构件上表面粗糙面分别通过三种方式成型(模拟预制构件上表面粗糙面),即加铺原浆粗骨料、加铺洗净粗骨料、喷缓凝剂水洗成型,养护7天以上,然后浇筑上层混凝土(模拟构件现浇混凝土部分),同时,制作一组一次性成型的同尺寸试块,4组试块同条件养护7天以上,试压其结合面的受压性能。

4组试块通过同条件养护7天以上,通过试压对比,结合面3种方式成型的试块受力性能差别不大,洗净粗骨料成型的受压性能稍低。同时,与同条件养护一次成型的试块强度相比,带有结合面的试块强度略低。本实验论证了通过构件分层浇筑成型的可行性。

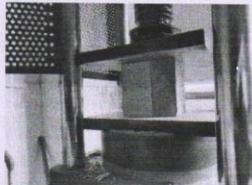


图 6 模拟构件结合面受力性能试块试压过程

Fig. 6 Force performance test process of component surface

5.5 模拟构件结合面粗糙度对比实验

现场安装的装配式预制构件形状不统一,且较多为异形构件,其粗糙度不易测量,通常情况下直接通过目测法进行定性检查。为了验证本施工技术成型的构件表面粗糙度质量,作者制作了3组共9个混凝土试块模拟构件结合面粗糙化处理,该三组构件上表面粗糙面分别通过三种方式成型,即加铺原浆粗骨料、加铺洗净粗骨料、喷刷缓凝剂水洗成型,然后养护。通过对比实验,该三组试件粗糙度均能满足设计要求和规范规定,但喷刷缓凝剂水洗成型的方法繁琐,耗材稍多,对环境造成一定的污染,而加铺原浆粗骨料和加铺洗

净粗骨料工艺简单、效果好、成品质量高。

6 结合面混凝土分层浇筑捣施工工艺流程

预制墙板、叠合梁、叠合板等构件表面或侧面都需要进行粗糙面的处理,下图为预制构件结合面混凝土分层浇筑捣施工工艺流程。



图 7 预制构件生产工艺流程图

Fig. 7 Process flow chart of prefabricated component production

6.1 具体施工技术

6.1.1 模台清扫

驱动装置驱动底模至清理工位,清扫机大件挡板挡住大块的混凝土块,防止大块混凝土进入清理机内部损坏设备。立式旋清电机组对底面进行精细化清理,把附着在底板表面的小块混凝土残余清理干净。风刀对底模表面进行最终清理,清洗底部废料回收箱收集清理的混凝土废渣,并输送到车间外部存放处理,模具清理需要人工进行清理。

6.1.2 刷脱模剂

驱动装置驱动底模至刷脱模剂工位,人工涂刷脱模剂,如无特殊要求采用水性脱模剂。

6.1.3 组装模具

组模时驱动装置将完成划线工序的底模驱动至模具组装工位,模板内表面要手工涂刷界面剂;同时,绑扎完毕的钢筋笼也吊运到此工位,作业人员在模台上进行钢筋笼及模板组模作业,模板在模台上的位置以预先画好的线条为基准进行调整,并进行尺寸校核,确保组模后的位置准确。

#### 6.1.4 刷缓凝剂

驱动装置驱动底模至刷缓凝剂工位，侧模上采用人工涂刷缓凝剂。

#### 6.1.5 钢筋笼、预埋件安装

驱动装置将完成模具组装修工的底模驱动至预埋件安装工位，按照图纸的要求，安装好钢筋笼，将连接套筒固定在模板及钢筋笼上；利用磁性底座将套筒软管固定在模台表面；将简易工装连同预埋件（主要指斜支撑固定预埋件、固定现浇混凝土模板预埋件）安装在模具上，利用磁性底座将预埋件与底模固定并安装锚筋，完成后拆除简易工装；安装水电网、穿线管、门窗防腐木块等预埋件。

#### 6.1.6 下部分混凝土浇筑及振捣

驱动装置将完成套筒和预埋件安装工序的底模驱动至震动平台并锁紧底模，中央控制室控制搅拌站开始拌制混凝土，此时应完成构件下部分混凝土的工程量，完成拌制后下料至混凝土运输小车，小车通过空中轨道运行至布料机上方并向布料机投料，布料机扫描到基准点开始自动布料，布料完成后震动平台开始工作至混凝土表面无明显气泡时停止工作。

#### 6.1.7 上部分混凝土浇筑及振捣

构件静养 60~75 min 后，中央控制室控制搅拌站开始拌制混凝土，此时应完成构件上部分混凝土的工程量，完成拌制后采用混凝土砂浆分离器过滤出一小部分粗骨料备用，量控制在能满足构件结合面铺满即可，剩余部分下料至混凝土运输小车，小车通过空中轨道运行至布料机上方并向布料机投料，布料完成后震动平台开始工作至混凝土表面无明显气泡时停止工作。

#### 6.1.8 加铺构件表层粗骨料

构件上部分混凝土完成浇筑、振捣后，将混凝土砂浆分离器过滤出的粗骨料铺至构件上表面，用抹子轻轻拍至一半裸露即形成粗糙面，或开启附着式振动台轻微振动，骨料一半裸露即可。

#### 6.1.9 构件养护

构件夏天可进行自然养护，进入冬季后为提高混凝土早期强度，构件进入养护窑养护。驱动装置将完成磨光工序的底模驱动至堆码机，堆码机将底模连同预制构件输送至空闲养护单元内，在蒸养 8-10 小时后，再由堆码机将平台从蒸养窑

内取出将其送入生产线，进入到下一道工序。

#### 6.1.10 构件拆模

将拆下的边模由两人抬起轻放到边模清扫区，并送至钢筋骨架绑扎区域。拆卸下来的所有的工装、螺栓、各种零件等必须放到指定位置。模具拆除完毕后，将底模周围的卫生打扫干净，再用电动扳手拆卸侧模的紧固螺栓，打开磁盒磁性开关后将磁盒拆卸，确保都完全拆卸后将边模平行向外移出，防止边模在此过程中变形。

#### 6.1.11 构件检查与修补

构件拆模后检查构件截面尺寸，检查构件的外观质量（变形、缺陷、损伤等），检查构件的型号与数量，检查预埋件的位置与质量，同时做好构件表面清理。

构件修补将预制构件上铁模接缝处凸出的混凝土用打磨机打磨平整，凹陷处修补平整，将蜂窝处的浮料凿除。用钢丝刷刷除表面的水泥浆，用水将蜂窝处杂物冲洗干净。

#### 6.1.12 厂内吊运

构件起吊时保持水平，慢速起吊并注意观察，下落时平缓，落架时防止摇摆碰撞、损伤货品棱角或表面。构件厂内吊运应轻起轻落，存放时对称放置存放架。

#### 6.1.13 构件存放

预制混凝土构件的存放应设置专用堆场。预制混凝土构件应按品种、规格、装车顺序分别设置堆垛。存放堆垛宜设置在吊装机械工作范围内并避开人行通道。堆场中预制构件堆放以装车次序为原则，对所有构件编号。

预制墙板宜采用堆放架插放或靠放，存放架应具有足够的承载力和刚度。预制墙板采用靠放时，用槽钢制作满足刚度要求的三角支架，对称堆放，外饰面朝外，倾斜度保持在  $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$  之间，墙板搁支点应设在墙板底部两端处，搁支点可采用柔性材料。

## 6.2 质量控制

### 6.2.1 质量控制标准

该技术必须遵循《装配式混凝土结构技术规范》JGJ1-2014、《装配式混凝土建筑技术规范》（征求意见稿）、《装配式混凝土建筑技术标准》GB/T51231-2016、《混凝土结构工程施工规范》

GB 50666-2011、《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204-2015、《预制混凝土剪力墙外墙板》15G365-1、《装配式混凝土结构表示方法及示例(剪力墙结构)》15G107-1 等规范标准。

#### 6.2.2 生产材料质量控制措施

所用水泥宜采用强度等级不低于 42.5 级硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥,质量应符合《通用硅酸盐水泥》(GB175-2007)的规定,严禁使用含氯化物的水泥。细集料宜采用中砂,细度模数为 2.3~3.0,质量应符合《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》(JGJ 52-2006)的规定,不得使用海砂。粗集料采用碎石,其颗粒级配为 5~25 mm,混凝土拌合用水的 PH 值应不小于 4.5。混凝土外加剂的静浆流动性不应小于 200 mm,质量应符合现行国家标准《混凝土外加剂》(GB8076-2008)的规定,严禁使用氯盐类外加剂或其他对钢筋有腐蚀作用的外加剂。混凝土外加剂的应用应符合《混凝土外加剂应用技术规范》(GB 50119-2013)等和有关环境保护的规定。掺和料粉煤灰应采用符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB1596-2017)等的规定不低于 I 级技术要求的粉煤灰,掺用矿物掺合料的质量应符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB1596-2017)的规定,矿物掺合料的掺量应通过试验确定。

#### 6.2.3 构件外观质量验收标准

预制构件外观质量不宜有露筋、蜂窝、孔洞、外形缺陷、外形缺陷等一般缺陷,对于已经出现的一般缺陷,应按技术处理方案进行处理,并重新检查验收。构件结合面应满足粗糙面不小于结合面的 80%,凹凸深度不小于 6 mm 的要求。

### 6.3 安全措施

#### 6.3.1 作业人员管理

对操作人员进行监督检查,保证持证上岗率为 100%,对操作人员按规定发放使用劳保用品;所有作业人员必须严格按照各自安全操作规程和安全部门所定的安全措施进行;制定安全生产的教育与培训计划,对新进厂的职工及时进行安全教育,进行岗位培训;对全体作业人员进行安全技术交底,并进行经常性安全教育;建立完善的联检制度,定期进行安全检查,对存在安全隐患问题要及时采取措施整改。

#### 6.3.2 用电安全措施

现场用电要统一调配,不许乱拉乱接。要求随时检查线路是否有漏电,带电部位作业必需作好监护,任何可能带电的金属导体都要作好防护,严禁对带电体直接作业;电焊机必须一机一闸一保护,外壳接地;手持式电动工具的外壳、手柄、负荷线插头、开关等必须完好无损,使用前应做空载检查,运转正常方可使用;漏电保护器必须做定期检查,以保证灵敏可靠;严禁私拉乱扯手持电动工具的电源电缆,停送电必需按规定办理手续。

#### 6.3.3 构件生产人员安全防护

模台上的材料、半成品和成品构件应分类摆放整齐且重心平稳可靠;码放构件的场地应坚实平整,码放后应支撑牢固、稳定以免构件松动滑下伤人;构件组对时,应对周围环境进行安全确认,对大型构件的组对要采取安装临时支撑等措施,确保其稳定性;夜间施工时,制作平台应设有充足的照明设施;必要时作业人员要配备手持照明工具。

#### 6.3.4 厂内吊运安全防护

龙门吊操作人员应身体健康,必须经过安全技术培训持证上岗;龙门吊严禁超额定载重量使用;作业人员严禁站在龙门吊轨道上操作,其他人员也严禁站在轨道上进行作业;作业前必须检查吊索具、绳扣等起重工具是否完好,根据所吊构件重量按吊装性能选用吊索具;构件在吊装过程中应有溜绳,防止构件旋转或碰撞伤人;吊装作业严格执行“十不吊”原则;穿绳时要确定吊物重心,选好挂绳位置;穿绳应用铁钩,不得将手臂伸到吊物下面;吊运棱角坚硬或易滑的吊物,必须加衬垫、有套索;试吊时吊绳套挂牢固,起重机缓慢起升,将吊绳绷紧稍停,起升不得过高;如发现吊物重心偏移或与其他物件粘连等情况时,必须立即停止起吊,采取措施确认安全后方可起吊。

## 7 总结与展望

将构件原本需要一次浇筑成型的混凝土分两层进行浇筑,首先浇筑下半部分混凝土(构件高度的 2/3),振捣密实后静养 60 min 到 75 min,再浇筑上半部分的混凝土。在浇筑上半部分混凝土之前采用混凝土砂浆分离器分离出一小部分粗骨料,待上半部分混凝土浇筑完成并振捣密实以后

直接将分离出来的粗骨料加铺到构件表面,拍实或稍加振捣即可。

通过混凝土的分层浇筑,有效避免了混凝土振捣过程中粗骨料下沉等问题,保证了构件结构的均匀性。同时增加了构件的强度和耐久性,降低了构件使用过程中的裂缝开展情况。静养 60 min 到 75 min,既能保证两次浇筑混凝土的整体性,又能最大限度降低粗骨料下沉的情况,从而保证构件成型的质量。加铺原浆骨料,保证了构件结合面的粗糙度,面层与构件的连接性好,整体性强。

该技术优化了工艺流程,施工简单,效果明显,更能保证装配式预制构件粗糙面的施工质量。采用“粗糙面混凝土分层浇筑施工技术”所生产的预制墙板、叠合梁等所有构件均已经过多个工程使用,使用效果佳,获得业主的一致好评。

该技术通过裕璟幸福家园等多个项目的实践应用,证明该技术能有效确保构件的质量和构件结合面的粗糙度要求,保证质量、节约工期、加快工程的形象进度、节能环保,具有明显的社会、经济和环保效益及广阔的推广应用前景。

#### 参与文献

- [1] 杨靖. 国内住宅工业化技术应用研究[J]. 住宅科技, 2011, 31(2): 33-38.  
YANG Jing. Study on application of domestic residential industrialization technology [J]. Housing technology, 2011, 31(2): 33-38.
- [2] 王小艳. BIM 技术在工业化 PC 建筑中的应用研究[D]. 广东工业大学, 2018.  
WANG Xiao-yan. Application of BIM technology in industrialized PC buildings [D]. Guangdong University of Technology, 2018.
- [3] 窦晓玉, 王其明, 王颖楠. 新型建筑工业化背景下装配式相关企业的现状和发展[J]. 住宅与房地产, 2016(9): 10-18.  
DOU Xiao-yu, WANG Qi-ming, WANG Ying-nan. Status quo and development of assembly related enterprises under the background of new building industrialization [J]. Housing and real estate, 2016(9): 10-18.
- [4] 吴虎. 缓凝剂水冲羊毛工艺技术总结[J]. 湖南交通科技, 2018(1): 146-149, 184.  
WU Hu. Summary of water-punching wool technology for retardant [J]. Hunan transportation technology, 2018(1): 146-149, 184.
- [5] 石磊, 崔士起, 刘传卿, 等. 预制混凝土构件裂缝与未设置粗糙面的原因与对策[J]. 建筑技术, 2015: 236-237.  
SHI Lei, CUI Shi-qi, LIU Chuan-qing, et al. Causes and countermeasures of cracks and unset rough surfaces of precast concrete members [J]. Architectural technology, 2015: 236-237.
- [6] 赵勇, 邹仁博, 王晓锋. 预制混凝土构件结合面粗糙化处理与评价[J]. 施工技术, 2014(22): 37-39, 64.  
ZHAO Yong, ZOU Ren-bo, WANG Xiao-feng. Roughening treatment and evaluation of precast concrete components [J]. Construction technology, 2014(22): 37-39, 64.

## 12. 型钢混凝土纯扭梁裂缝开展和变形特征



## 规划设计

- 90 开发主体的历史街区开发模式 /陈铁夫
- 92 价值工程理论在房地产绿色建筑管理中的应用 /李金文
- 94 天井在建筑设计中的应用方式 /贾静怡
- 96 办公空间设计中的色彩运用 /刘严 汪帆
- 98 非洲西部地区既有公路修复改造设计的前期信息收集 /张鹏飞
- 100 基于蒙特卡罗模拟的结构可靠性分析应用 /陈龙
- 102 高层建筑墙柱置换设计 /张峰 彭玲
- 104 基于砖混结构抗震加固设计 /李志国 王岚兰

## 建设施工

- 122 绿色建筑的特点及施工工艺 /徐子谦
- 124 建筑结构有限元力学分析 /安艳
- 126 混凝土表面气泡形成的原因及对策 /戴百新
- 128 土钉墙支护探析 /党智平 雷斌 雷东波
- 130 碳纤维混凝土超平耐磨地坪在仓储工程中的应用 /郭超志
- 132 建筑装饰装修工程施工技术要点 /简书庭
- 134 测量不确定度评定在混凝土抗压强度试验中的应用 /李操
- 136 输电线路角钢塔塔脚板连接节点装置经济性分析 /张元良 余云川 何健 陈田中
- 138 型钢混凝土纯扭梁裂缝开展和变形特征 /李红远 张胜利 王堂锐 刘平伟 韦殊
- 141 采坑回填场地地基强夯处理应用 /刘广飞 王思源 李晓龙

## 建设管理

- 106 地铁施工阶段交通影响分析及交通组织 /周彬
- 108 民用建筑项目全过程管理 /李军权
- 110 一般民用建筑工程造价的影响因素 /邝梦珊
- 112 建设项目安全管理问题分析 /周玉华
- 114 建筑工程施工工序的质量控制 /郭向永
- 116 建筑工程安全文明施工管理 /张中杰
- 118 建筑工程地基施工管理与监测 /张剑华
- 120 水利工程预决算编制相关问题 /李红春

## 读编往来

- 163 读编四则

## 广告

- 一汽大众
- 中联重科
- 欢迎订阅2016《中华建设》
- 《中华建设网》
- 理事会员单位
- 湖北城市建设职业技术学院

封面 喜迎2016

封底 中维世纪建设集团

## 工程技术

- 144 碎石注浆桩施工技术在公路工程中的应用 /魏利强
- 146 建筑工程混凝土构件加固技术 /杨碧波
- 148 农田水利工程给排水施工技术 /阿斯哈尔·托力吾巴衣
- 150 建筑工程基坑及基础施工技术要点 /龚勋
- 152 房屋建筑工程基坑支护施工技术 /赵鸿杰
- 154 现浇混凝土空心楼盖结构施工技术及其质量控制要点 /许志刚
- 156 超高层钢结构伸臂桁架施工方法及施工措施 /曾平雨
- 158 工程机械混合动力技术的发展与应用 /石宣喜
- 160 顺应自然语境的寒地建筑形式创作 /苑雪飞 梅洪元

封二 梦至美 行更远  
《中华建设》2016年新年寄语

封三 恩施州荣锦建设工程有限公司



Xing gang huan ning lu chun niu liang  
he feng kai zhuan he bian xing te zheng

# 型钢混凝土纯扭梁 裂缝开展和变形特征

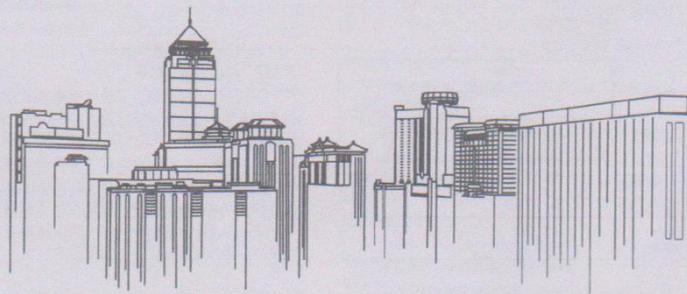
李红迅 张胜利 王堂锐 刘平伟 韦东

型钢混凝土组合结构 (Steel Reinforced Concrete Composite Structures), 是混凝土内配置型钢 (轧制或焊接成型) 和钢筋的结构, 型钢混凝土结构中型钢、钢筋 (纵筋和箍筋)、混凝土三种材料协同工作以抵抗各种外部作用, 内部型钢能很好地与外包混凝土形成整体、共同受力, 其受力性能优于型钢与混凝土的简单叠加。与传统的钢筋混凝土结构相比, 型钢混凝土结构具有承载力和刚度大、抗震性能好等优点; 与钢结构相比, 具有防火性能好、结构局部稳定和整体稳定性好以及钢材用量少的优点, 在国内外工程结构中越来越广泛的应用。纯扭性能是型钢混凝土构件重要的受力性能之一, 是构件压弯剪扭复杂受力状态下受力性能分析的重要基础。目前, 部分学者对型钢混凝土梁的扭转性能进行了研究, 但相对构件

的其他性能而言, 对型钢混凝土梁受扭性能的研究仍显不足, 国家规程中尚未列及抗扭设计内容。因此, 本文通过型钢混凝土梁在纯扭矩作用下的试验, 对型钢混凝土梁在纯扭矩作用的裂缝开展和变形特征进行研究, 可为型钢混凝土构件扭转性能分析和抗扭设计提供基础资料。

## 一、型钢混凝土梁扭转试验

试验共设计了4根 (2组) 型钢混凝土梁 (SRCB) 和2根钢筋混凝土对比梁 (RCB), 主要研究型钢的加入对梁裂缝开展和变形特征的影响。试验梁设计主要参数见表, 型钢混凝土梁在其核心区内层中配置了H形型钢 (H175×90×5×8), 其他参数与相应的钢筋混凝土对





比梁完全相同。扭转试验加载装置如图1所示。

编号	尺寸(宽×高×长) / (mm)	混凝土设计强度等级	纵筋	箍筋
RCB-1	230×315×1500	C30	4 <sub>φ</sub> 12	φ8@85
RCB-2	270×355×1500	C30	4 <sub>φ</sub> 14	φ8@75
SRCS-1 (2根)	230×315×1500	C30	4 <sub>φ</sub> 12	φ8@85
SRCS-2 (2根)	270×355×1500	C30	4 <sub>φ</sub> 14	φ8@75

梁设计主要参数表

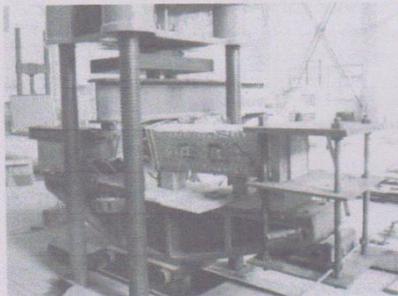


图1 扭转试验加载装置

## 二、试验结果及分析

### 1. 梁裂缝开展特征分析

RCB-1梁在施加纯扭矩初期,其表面无明显变化。当纯扭矩施加至16.5kN·m时,梁两侧面长边中点处各出现一条与梁纵轴线大致成45°的斜裂缝,其中较长的裂缝已经延伸到表面边缘,较短裂缝一端已延伸至表面边缘,两条裂缝的宽度均未超过0.1mm;以1.5kN·m为增量继续施加扭矩,原有斜裂缝宽度增大至0.3mm,并均扩展至表面边缘,同时,梁侧面有新的细微斜裂缝产生,顶面有两条斜裂缝产生,宽度不超过0.2mm,与两侧面斜裂缝相连;当扭矩达到19.5kN·m时,原有多条斜裂缝增大延伸,最大宽度接近2mm,底面有三条斜裂缝产生,梁表面裂缝呈螺旋状;扭矩继续增加0.5kN·m后,梁在初始开裂部位的裂缝迅速扩展,混凝土出现脱落现

象,表明梁达到破坏状态,其破坏主要集中在初始裂缝区。钢筋混凝土梁典型裂缝图如图2所示。

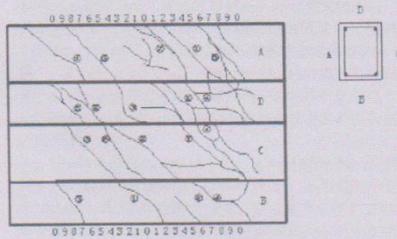


图2 RCB-1梁裂缝图

RCB-2梁在扭矩为25.0kN·m时出现裂缝,在扭矩达到31.5kN·m时达到破坏状态,其裂缝开展过程与梁RC-1相似。

SRCS-1 (1)梁在施加纯扭矩初期,其表面也无明显变化。当扭矩施加至19.5kN·m时,在一侧面出现第一条斜裂缝,并延伸至侧面边缘,其宽度达到0.15mm,以1.5kN·m为增量继续施加扭矩,梁两侧面各出现一条新的斜裂缝,达到0.25mm。当扭矩施加至22.5kN·m时,在梁上表面有两条新的斜裂缝产生,其宽度达到0.2mm,原有斜裂缝扩展延伸,裂缝宽度最大值为1.0mm,并伴随有新的斜裂缝产生;当施加的扭矩达到23.5kN·m时,梁承受的扭矩值不能继续增加,多条主斜裂缝宽度增长较快,表明梁达到破坏状态,各主斜裂缝破坏状况相近。SRCS-1 (2)梁的裂缝开展过程和破坏形态与SRCS-1 (1)梁的裂缝开展过程和破坏形态相似。型钢混凝土梁典型裂缝图如图3所示。

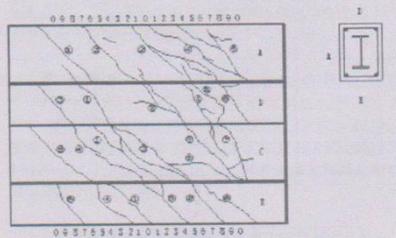


图3 SRCS-1 (1)梁裂缝图

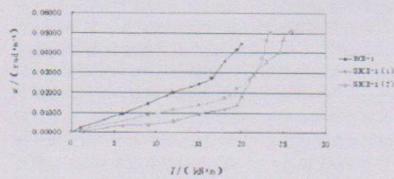


SRCB-2(1)梁在扭矩达到29.0 kN·m时出现裂缝,在扭矩达到39.0 kN·m时达到破坏状态,其裂缝间距较SRCB-1(1)梁的裂缝间距稍大。SRCB-2(2)梁的裂缝开展过程和破坏形态与SRCB-2(1)梁的裂缝开展过程和破坏形态相似。

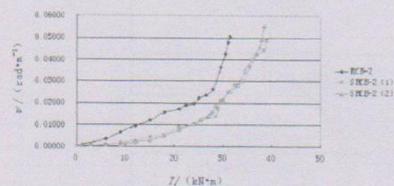
对比型钢混凝土梁和钢筋混凝土梁在纯扭矩作用下的破坏形态可见,二者的裂缝开展特征是不同的。型钢混凝土梁虽然与钢筋混凝土梁具有相似的裂缝开展过程,但其初始裂缝的出现较钢筋混凝土梁初始裂缝的出现晚;在纯扭矩的施加过程中,型钢混凝土梁的多条主裂缝在开展过程中基本处于同步扩展,而钢筋混凝土梁的初始裂缝较后期开展的其他裂缝扩展更快;破坏时多条主裂缝宽度和裂缝间距相近,明显不同于钢筋混凝土梁纯扭破坏主要集中在初始裂缝处的情况。对比图2和图3可见,型钢混凝土梁较钢筋混凝土梁纯扭时主斜裂缝分布更加均匀,破坏位置较为分散,而钢筋混凝土梁破坏位置比较集中。型钢混凝土梁较钢筋混凝土梁在纯扭矩作用下具有更好的裂缝开展性能。

#### 2. 梁变形特征分析

型钢混凝土梁与钢筋混凝土对比梁在纯扭矩作用下的两组扭矩-单位扭转角曲线如图4(a)和图4(b)所示。



(a) RCB-1与SRCB-1扭矩-单位扭转角曲线



(b) RCB-2与SRCB-2扭矩-单位扭转角曲线

图4 梁扭矩-单位扭转角曲线

由图4中RCB-1梁和RCB-2梁的扭矩-单位扭转角曲线可见,钢筋混凝土梁在开裂前其抗扭刚度变化不大;在开裂扭矩附近,钢筋混凝土梁的抗扭刚度发生了较明显的突变,开裂后的抗扭刚度较开裂前的抗扭刚度小;由图4中SRCB-1梁和SRCB-2梁的扭矩-单位扭转角曲线可见,在受纯扭矩的过程中,型钢混凝土梁的抗扭刚度大致连续地降低,而未像钢筋混凝土梁的抗扭刚度那样发生较大的突变。

由图4中两组对比曲线可见,在相同扭矩下,型钢混凝土梁的变形小于钢筋混凝土梁的变形,在相同变形下,型钢混凝土梁比钢筋混凝土梁能够抵抗的扭矩更大,这是由于型钢混凝土梁内配置了型钢,型钢除自身具有抵抗扭矩的能力外,还约束了梁核心区内的混凝土,提高了梁抵抗扭矩的能力,型钢混凝土梁变形曲线变化较为平缓,而钢筋混凝土梁变形曲线在开裂荷载处转折比较明显,说明型钢混凝土梁在施加纯扭矩至破坏整个过程中变形无明显突变。型钢混凝土梁较钢筋混凝土梁在纯扭矩作用下具有更好的变形性能。

#### 三、结论

通过对型钢混凝土梁和钢筋混凝土对比梁进行纯扭矩作用下的试验,记录了梁的裂缝开展和破坏状况,绘制了裂缝展开图和变形曲线,对试验梁的裂缝开展和变形特征进行了研究。试验结果表明:在纯扭矩作用下,型钢混凝土梁其裂缝开展状况与钢筋混凝土梁的裂缝开展状况存在一定的差异,型钢混凝土梁的裂缝宽度相近,裂缝间距大致相同,裂缝分布较钢筋混凝土梁的裂缝分布均匀,破坏时多条主斜裂缝同时扩展,不同于钢筋混凝土梁破坏主要集中在初始裂缝区,型钢混凝土梁在承受纯扭矩的过程中,其变形发展比较平缓,抗扭刚度大致连续地降低,无明显突变。型钢混凝土梁较钢筋混凝土梁在纯扭矩作用下具有更好的裂缝开展和变形性能。

**基金项目:** 广西高等学校立项科研项目(2013LX093), 广西自治区级大学生创新创业训练计划立项项目(201413639025), 广西科技大学鹿山学院科学基金资助项目(院科自1112202, 1112201), 广西科技大学鹿山学院大学生科技立项项目(序号10)

(作者单位: 广西科技大学鹿山学院土木工程系)

13. 型钢混凝土纯扭构件抗扭刚度研究



# 目 录

## 智城建设

新型城镇化建设进程中的小城镇体育发展路径研究	董世彪(1)
科技发展体系下的新农村建设	江鸿 赵甜(3)
探讨智慧城市安防解决方案	吴春祥 张跃进(5)
智能家居控制系统的设计与实现	翟波(7)
农用地宗地地价评估与城镇建设用地宗地估价的关系分析	朱丽芳 刘洋(9)
海南岛入境旅游经济市场空间时空分异特征研究	蔡瑞(10)
浅谈高速铁路接触网预埋槽道安装方法及工艺	常宇(12)
建造美丽幸福经开区—推进人居环境提升工程建设	王定宝 董丽(13)
矿区GPS变形监测网的建立	吴文正 钟晓春(15)
城市综合体空间设计方法初探	杨一秀(16)
旧住房修缮改造过程中的几个问题分析	金建明(18)
物联网技术在智慧城市建设中的应用	潘智淳(19)
气象防雷技术的未来发展趋势分析	刘志涛 王鹏 何洋 吴杨 孙忠旗(20)
公路工程计量支付管理中常见的问题及对策	陈源(21)
地铁网络化运营浅谈	代然然(22)
建筑工程给排水节水设计	杜士立(23)
综合体空间设计方法比较	韩健(24)
公路高边坡治理设计及稳定分析	敦祥(25)
软装饰与室内设计风格营造的研究	金倩(26)
房屋建筑设计中的美学规律分析与研究	况飞(27)
惠东庄园综合体的探索与实践	李小觅 张轲(28)
分析土建工程常见的质量问题与防治	李雄飞 陆明科 何伟(29)
城市园林绿化工程中的植物配置分析	李院平(30)
浅谈大连建设海绵城市的必要性和方法	荣丽琨 黄磊昌(31)

液压阀体中控制油路工艺孔密封方案探讨	李晓康(32)
浅析市政道路建设中软土地基的处理方法	沈安登(33)
绘画对现代园林景观设计的内在影响	董晓春(34)
旧路面水泥混凝土再生集料在公路基层中的运用	汪文毅(35)
嵌入式智能家居安防系统的研究与实现	王华杰(36)
浅谈中职《建筑工程施工实训》的现场教学	王有金(37)
浅析智慧城市发展对城市规划的影响	吴恒(38)
浅谈我国小城镇特色建设与发展	苑俊丽 刘娇(39)
建筑结构基础不均匀沉降的危害与防治方法	张旭(40)
工业厂房建筑结构设计优化研究	方振清(41)
岩石力学的发展及峰后力学特性的研究	赵炎炎(42)
基于主成分分析法的停车需求预测研究	朱家友 白翰 王臻(43)
新型建筑墙体节能材料与检测分析	唐德伟(44)
谈旧城改造中的可持续发展	王康 黄杰(45)
某大桥桥型方案比选	温涛(46)
超限高层建筑工程抗震设计中的若干问题	梁兆敏(47)
建筑工程质量监督存在的问题及解决对策	吴成龙(48)

## 智能技术

一种基于BPNN的企业简历筛选方法及其应用	张波 崔成优 崔基哲(49)
沥青铺装层GFRP筋低温抗裂性的有限元分析	王雪 何立 周开发(53)
基于毫米波雷达的汽车主动防撞预警系统	曹佳宝 刘灿 韩倩 魏文艺(55)
型钢混凝土纯扭构件抗扭刚度研究	李红远 张胜利 王堂锐 韦东 叶欣(57)
南疆某县城乡饮水安全工程-总净水厂设计介绍	李文全(59)
辋川诗集中的植物景观意境探析	李其普(61)

# 型钢混凝土纯扭构件抗扭刚度研究

李红远 张胜利 王堂锐 韦东 叶欣

广西科技大学鹿山学院 土木工程系, 广西柳州 545616

**摘要:**为研究型钢混凝土纯扭构件的抗扭刚度和影响因素,对5根(3种)型钢混凝土试件和2根钢筋混凝土对比试件进行了纯扭矩加载试验,记录了梁的受力过程和破坏形态,绘制了扭矩-单位扭转角的斜率与扭矩的变化曲线。试验结果表明:在纯扭矩作用下,型钢混凝土构件的抗扭性能较相同参数的钢筋混凝土构件抗扭刚度大、抗扭性能好,其抗扭刚度退化较钢筋混凝土构件抗扭刚度退化缓慢;配置型钢、增大构件截面尺寸和增大配筋率均可以提高构件的抗扭刚度和性能。型钢混凝土构件较具有相同参数的钢筋混凝土构件在纯扭矩作用下具有更好的抗扭性能。

**关键词:**型钢混凝土,抗扭刚度,抗扭性能

**基金项目:**广西高等学校立项科研项目(2013LX093, LX2014671),广西自治区级大学生创新创业训练计划立项项目(201413639025),广西科技大学鹿山学院科学基金资助项目(院科自1112202,1112201),广西科技大学鹿山学院大学生科技立项项目(序号10)。

## 引言

型钢混凝土结构是钢与混凝土组合结构的主要形式之一,是在混凝土结构内配置型钢,同时配置一定数量的纵筋和箍筋,在受力过程中型钢、钢筋(纵筋和箍筋)和混凝土三种材料能够很好地协同工作抵抗各种外部作用。与传统的钢筋混凝土结构相比,型钢混凝土结构具有承载力大、结构和构件刚度大、变形能力和抗震整体性好和施工速度快等优点;与钢结构相比,型钢混凝土结构具有耐火及耐久性能好、刚度大和经济性好等优点。由于型钢混凝土结构具有显著的优点,使得其在高层和大跨等结构中得到越来越多的应用。在纯扭矩作用下型钢混凝土构件的受力性能是型钢混凝土结构性能研究的重要内容之一,是研究型钢混凝土构件在压弯剪扭复杂受力状态下受力性能的基础,而抗扭刚度是型钢混凝土构件纯扭受力性能的重要研究内容之一。我国规程[1,2]尚未对型钢混凝土构件抗扭设计内容进行阐述,文献[3-5]虽然对型钢混凝土构件抗扭刚度进行了一定的研究和分析,但由于构件受扭性能的复杂性,尚未能全面掌握型钢混凝土构件的抗扭刚度。因此,本文通过型钢混凝土构件在纯扭矩作用下的试验,对不同参数型钢混凝土试件在纯扭矩作用下的扭矩-单位扭转角曲线的斜率进行对比和分析,研究型钢混凝土构件抗扭刚度与钢筋混凝土构件抗扭刚度的不同,分析不同因素对型钢混凝土构件抗扭刚度的影响,可为型钢混凝土构件扭转性能分析和抗扭设计提供基础资料。

## 1 型钢混凝土试件扭转试验

试验共设计了5根(3种)型钢混凝土试件(SRCB)和2根钢筋混凝土对比试件(RCB),主要研究型钢的加入对试件抗扭刚度的影响及不同参数(型钢配置、截面尺寸、配筋率)对型钢混凝土试件抗扭刚度的影响。试件设计主要参数见表1,型钢混凝土试件

在其核心区内居中配置了H形型钢(H175×90×5×8),混凝土设计强度为C30。扭转试验加载装置如图1所示。

编号	截面尺寸/mm	型钢	配筋
RCB-1	250×250×1800	HRB400	HRB400
RCB-2	250×250×1800	HRB400	HRB400
SRCB-1(1号)	250×250×1800	HRB400	HRB400
SRCB-1(2号)	250×250×1800	HRB400	HRB400
SRCB-2	250×250×1800	HRB400	HRB400

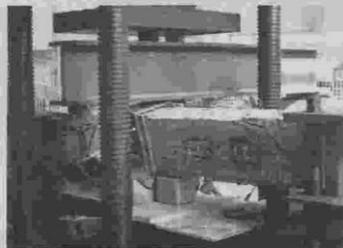
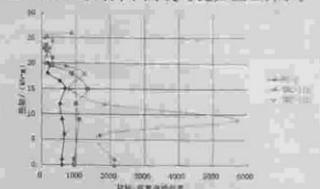


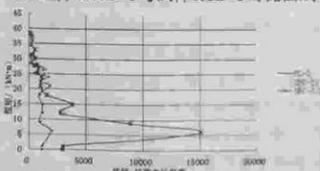
图1 扭转试验加载装置

## 2 试验结果及分析

试件RCB-1在纯扭矩的施加初期,表面无明显变化,试件单位扭转角随扭矩均匀增大;试件开裂后,单位扭转角较开裂前的单位扭转角增长明显加快。试件SRCB-1较试件RCB-1增加配置了核心区的H型钢,其在纯扭矩的施加初期,表面也无明显变化,单位扭转角随扭矩的增长呈线性关系增大;在试件开裂后,单位扭转角较开裂前的单位扭转角增长快,但比试件RCB-1的单位扭转角增长速度慢。试件SRCB-1和试件RCB-1的扭矩-单位扭转角的曲线斜率对比如图1所示。试件SRCB-2与试件RCB-2的扭矩-单位扭转角曲线斜率曲线对比如图2所示。



(a) 试件SRCB-1与试件RCB-1对比曲线

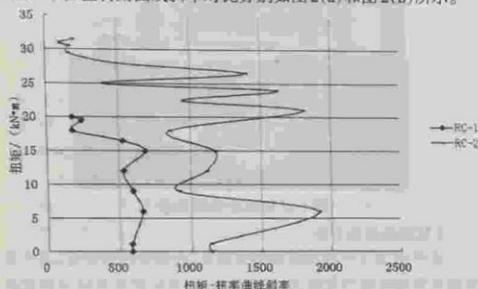


(b) 试件SRCB-2与试件RCB-2对比曲线

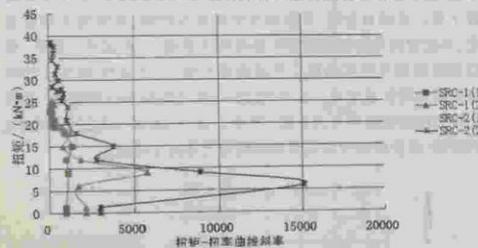
图1 型钢配置对试件扭矩-单位扭转角曲线斜率的影响

试件的扭矩-单位扭转角曲线斜率反映了试件某一扭矩抗扭刚度的大小和试件抗扭刚度的变化。由图1(a)可见,试件SRCB-1的扭矩-单位扭转角曲线斜率明显大于相同参数未配置型钢的试件RCB-1的扭矩-单位扭转角曲线斜率,说明试件SRCB-1在配置型钢后,其抗扭刚度较钢筋混凝土试件的抗扭刚度有明显的提高,抗扭能力增强。由图1(b)可见,试件SRCB-2较试件RCB-2增加了型钢后,其在纯扭矩作用下的各阶段扭矩-单位扭转角曲线斜率明显大于试件RCB-2各阶段扭矩-单位扭转角曲线斜率,表明试件SRCB-2在受纯扭矩各阶段抗扭刚度大于试件RCB-2的抗扭刚度。试件SRCB-1和试件SRCB-2的扭矩-单位扭转角曲线斜率的降低过程均较试件RCB-1和试件RCB-2的扭矩-单位扭转角曲线斜率的降低过程缓慢,说明型钢混凝土构件的抗扭刚度较钢筋混凝土构件抗扭刚度的退化慢。原因是型钢混凝土试件由于型钢约束了核心区内的混凝土,使得抗扭刚度增大,提高了试件的抗扭能力。

试件RCB-1与试件RCB-2、试件SRCB-1与试件SRCB-2的扭矩-单位扭转角曲线斜率对比分别如图2(a)和图2(b)所示。



(a)试件RCB-1与试件RCB-2对比曲线



(b)试件SRCB-1与试件SRCB-2对比曲线

图2 截面尺寸对试件扭矩-单位扭转角曲线斜率的影响

由图2(a)可见,试件RCB-2较试件RCB-1增大了截面尺寸,试件RCB-2的扭矩-单位扭转角曲线斜率明显大于试件RCB-1的扭矩-单位扭转角曲线斜率,截面尺寸的增加,增大了混凝土试件的抗扭刚度,提高了试件的抗扭能力;由图2(b)可见,试件SRCB-2的扭矩-单位扭转角曲线斜率在受纯扭矩作用下的各阶段均较试件SRCB-1的扭矩-单位扭转角曲线斜率大,说明型钢混凝土构件截面尺寸增大后,其抗扭刚度有了一定的增长。原因是截面尺寸增大,参与抗扭的混凝土增多,增大了型钢混凝土构件的抗扭刚度,提高了抵抗扭转的能力。

试件SRCB-1与试件SRCB-3的扭矩-单位扭转角曲线斜率对比分别如图3所示。

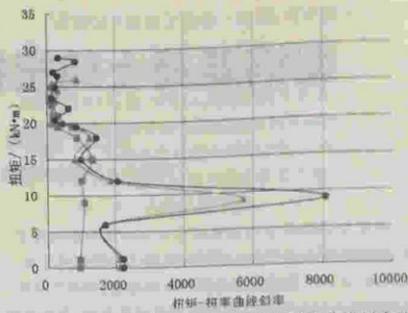


图3 配筋率对试件扭矩-单位扭转角曲线斜率的影响

由图3可见,试件SRCB-3的扭矩-单位扭转角曲线斜率与试件SRCB-1的扭矩-单位扭转角曲线斜率稍有提高,配筋率的增大,增大了型钢混凝土构件的抗扭刚度,提高了抗扭能力。原因是钢筋与型钢、混凝土形成整体,共同抵抗外扭矩作用,配筋量的增大,使得钢筋与型钢、混凝土组成的骨架抗扭能力提高,增大了型钢混凝土构件的抗扭刚度。

### 3 结论

通过对型钢混凝土试件和钢筋混凝土对比试件进行纯扭矩作用下的试验,记录了试件的变形过程,绘制了扭矩-单位扭转角曲线斜率,对型钢混凝土构件的抗扭刚度变化和特征进行了研究。试验结果表明:在纯扭矩作用下,型钢混凝土构件的抗扭性能较相同参数的钢筋混凝土构件抗扭刚度大、抗扭性能好,其抗扭刚度退化较钢筋混凝土构件抗扭刚度退化缓慢;配置型钢、增大构件截面尺寸和增大配筋率均可以提高构件的抗扭刚度和性能。型钢混凝土构件较具有相同参数的钢筋混凝土构件在纯扭矩作用下具有更好的抗扭性能。

### 参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院. JGJ 138—2001 型钢混凝土组合结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [2] 冶金工业部建筑研究总院. YB9082—2006 钢骨混凝土结构设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [3] 郑杰. 型钢混凝土复合受扭构件的抗扭刚度和变形的研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.
- [4] 白果, 秦士洪. 型钢混凝土构件受扭刚度分析研究[J]. 工业建筑, 2012 增刊: 1151—1158.
- [5] 杨文成, 邵永健. 型钢混凝土柱抗扭刚度试验研究[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2014(09): 1—4.

### 作者简介:

通讯作者: 李红远(1981-), 男, 汉族, 辽宁阜新, 硕士, 讲师, 主要从事钢与混凝土组合结构研究。

# 14. Study on Cumulative Damage Law of Stainless Steel-Reinforced Concrete Columns under Step Impact Loading

Hindawi  
Advances in Materials Science and Engineering  
Volume 2019, Article ID 4076145, 8 pages  
<https://doi.org/10.1155/2019/4076145>



## Research Article

# Study on Cumulative Damage Law of Stainless Steel-Reinforced Concrete Columns under Step Impact Loading

Bo Wu,<sup>1,2,3</sup> Shixiang Xu<sup>1,2,3</sup> and Guoxue Zhang<sup>4</sup>

<sup>1</sup>College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, 100 University Road, Nanning, Guangxi 530004, China

<sup>2</sup>The Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety of Guangxi, Nanning 530004, China

<sup>3</sup>The Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China

<sup>4</sup>School of Transportation and Civil Engineering & Architecture, Foshan University, Foshan 528000, China

Correspondence should be addressed to Shixiang Xu; 603559081@qq.com

Received 1 July 2019; Accepted 27 August 2019; Published 10 October 2019

Guest Editor: Alexander Balitskii

Copyright © 2019 Bo Wu et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In this study, an ultrahigh drop hammer impact test system was adopted for multiple horizontal impact tests on stainless steel-reinforced concrete columns and ordinary-reinforced concrete columns with the same longitudinal reinforcement diameter. The damage performance after impact was studied, and the finite element model was established. The test measured the impact force, displacement, cracking of the specimen during the impact, and the concrete damage near the bottom of the specimen. The test results showed that the failure mode of the stainless steel-reinforced concrete specimen under multiple impacts was the same as that of the ordinary reinforced concrete specimen. Under the same impact conditions, the maximum impact force, the maximum displacement, and the damage degree of stainless steel-reinforced concrete column specimen were lower than those of the ordinary reinforced concrete specimen.

## 1. Introduction

Compared with ordinary steel bars, stainless steel bars have better advantages in strength, ductility, corrosion resistance, and maintenance cost. A large number of stainless steel bars were used in the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge that has been opened to traffic. It is a development trend to replace ordinary reinforced concrete structures with stainless steel bars. Reinforced concrete columns are one of the most important components in bridges and building structures. Damage or damage under impact loads may cause partial or total collapse of the structure, causing catastrophic consequences.

Tian and Zhu [1] established a damage assessment method for members based on the vertical residual load capacity of reinforced concrete columns after impact, which was used to determine the damage degree of reinforced concrete columns under impact loads and analysis of the protective measures for column protection. Cheng et al. [2]

conducted a numerical study on the dynamic response of reinforced concrete columns under impact and analyzed the effects of collision velocity, mass, collision shape, reinforcement ratio, and concrete strength grade on deformation and impact force. Loedolff [3] conducted a horizontal impact test on the impact resistance of reinforced concrete cantilever columns. Liu et al. [4] studied the failure mode and transformation mechanism of axially compressed reinforced concrete columns under lateral impact loads using the finite element method. Demartino et al. [5] and Cai et al. [6] carried out an experimental study on the impact resistance of scaled reinforced concrete bridge piers. Zhou et al. [7] established a reliability analysis method for shear performance of reinforced concrete piers under falling rock impact load and discussed the influence of different parameters on the shear performance of columns. Wang et al. [8] studied the dynamic response of simply supported RC columns with axial compression under lateral impact loads and analyzed the effect of loading rate, longitudinal

# 15. Modeling Static Behavior of Rockfill Materials Based on Generalized Plasticity Model

Hindawi  
Advances in Civil Engineering  
Volume 2019, Article ID 2371709, 14 pages  
<https://doi.org/10.1155/2019/2371709>



Research Article

## Modeling Static Behavior of Rockfill Materials Based on Generalized Plasticity Model

Shihai Bian <sup>1</sup>, Bo Wu <sup>1,2</sup>, and Yongzheng Ma <sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China

<sup>2</sup>Engineering Research Center of Industrial Construction in Civil Engineering of Zhejiang, Ningbo University of Technology, Ningbo 315016, China

<sup>3</sup>School of Civil and Transportation Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315016, China

Correspondence should be addressed to Bo Wu; [wubo@gxu.edu.cn](mailto:wubo@gxu.edu.cn)

Received 15 July 2019; Accepted 10 August 2019; Published 8 September 2019

Academic Editor: Tayfun Dede

Copyright © 2019 Shihai Bian et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Rockfill materials are commonly used for dam construction. Establishing an effective model that can reasonably describe the mechanical properties of rockfill material is very important for the calculation of earth-rock dam engineering. Based on the generalized plasticity model of sand, a modified generalized plasticity model suitable for rockfill material is established by modifying the plastic modulus. Focusing on three types of stress paths (e.g., CT test, CP test, and CR test), the stress path adaptability of the modified generalized plasticity is studied. Simulation results show that the proposed model can well predict the strength characteristics while it underestimates the shrinkage characteristics of rockfill materials for constant P test. It is difficult for the generalized plasticity model to predict larger radial shrinkage strain for constant stress ratio tests. This shortcoming can be improved by employing a modified dilatancy equation. Finally, by introducing critical state theory and considering the effect of initial void ratio on plastic modulus, a state-dependent generalized plasticity model is proposed and verified by experiment of granite rockfill materials and TRM with different void ratios. These works covers the most common stress paths related to the construction of earth-rock dams and can capture static behavior of rockfill materials.

### 1. Introduction

Earth-rock dams are widely built in the world for their good adaptability to foundation conditions, full use of building excavation materials, and low cost. As the main material for dam construction, the stress-strain characteristics of rockfill materials become quite complex with the increasing height of earth-rock dam construction. The constitutive relationship of rockfill materials becomes a key problem in the calculation and analysis of earth-rock dam. In recent years, Dalian University of Technology has developed the generalized plasticity model, which is applied to the static and dynamic analysis of Zipingpu concrete face dam [1, 2], making the generalized plasticity model an important constitutive model in the static and dynamic calculation of earth-rock dam.

Wei and Zhu [3] developed an elastoplastic model within the framework of the generalized plasticity theory and

applied the model to analyze the deformation of the Shuibuya concrete-faced rockfill dam. Dong et al. [4] made a comparison between Duncan and Chang's EB Model and the generalized plasticity model in the analysis of a high earth-rockfill dam. Fu et al. [5] deduced the explicit plastic modulus expression of triaxial loading/unloading process in a framework of generalized plasticity and modeled the cyclic behavior of rockfill materials. Goorani and Hamidi [6] developed a generalized plasticity model to predict the mechanical behavior of sand-gravel mixtures. Liu and Gao [7] proposed a generalized plasticity model for coarse-grained materials by considering the effect of particle breakage on their critical state behavior. Cen et al. [8] presented a modified generalized plasticity model for sand considering a refined description of the pressure-dependent critical void ratio and described sand behavior under different densities and confining pressures. Abioghli and Hamidi [9] modified generalized plasticity

# 16. 上软下硬地层隧道稳定性因素及影响研究

第15卷 第2期  
2019年4月

地下空间与工程学报  
Chinese Journal of Underground Space and Engineering

Vol.15  
Apr.2019

## 上软下硬地层隧道稳定性因素及影响研究\*

吴波<sup>1,2,3</sup>, 王鸣涛<sup>1,2</sup>, 邓政<sup>3</sup>

(1.福建工程学院 土木工程学院,福州 350118;2.福建省土木工程新技术与信息化重点实验室,福州 350118;3.广西大学 土木建筑工程学院,南宁 530004)

**摘要:**采用正交试验以及极差分析法比较隧道跨度  $W$ 、埋深  $h$ 、高跨比  $\lambda$ 、隧道开挖技术以及机械掘进尺寸对施工工程因素作用下上软下硬地层隧道稳定性的影响。当软硬地层组合不同时,比较  $W$ 、 $h$ 、 $\lambda$  和地层隧道的软硬地层分界面中关键的位置参数  $\beta$  同地层隧道上部较软的地层参数  $D_1$  与地层隧道下部较硬的地层参数  $D_2$  对这三者同隧道地质因素以及隧道工程因素彼此相互作用为上软下硬地层隧道在稳定性方面所产生的一系列影响。研究只有  $h$  因素变化时对上软下硬地层隧道稳定性的影响,并分析了隧道的破坏演化规律。研究结果表明: $W$  和埋深  $h$  属于隧道工程因素给上软下硬地层隧道自身稳定性造成影响的因素里面最关键的,影响第二的是高跨比  $\lambda$ ;当隧道在开挖后自身稳定时, $W$  是影响地质因素、工程因素共同作用下隧道稳定性的主要因素,反之是  $D_1$ ;软硬分界面改变了上软下硬地层隧道的破坏模式,当为深埋隧道时,上部较软地层是最薄弱的地方,实际工程中要加强支护。

**关键词:**上软下硬地层隧道;敏感性分析;地质因素;工程因素;稳定性

中图分类号:TU457 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2019)02-0589-12

### Research on Stability Factors and Effect in Upper Soft and Lower Hard Stratum Tunnel

Wu Bo<sup>1,2,3</sup>, Wang Mingtao<sup>1,2</sup>, Deng Zheng<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, P.R. China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory for Advanced Technology and Informatization of Civil Engineering, Fuzhou 350118, P.R. China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, P.R. China)

**Abstract:** Orthogonal test method and therange analysis were adopted to contrast influence relation of some factors such as tunnel span  $W$ , buried depth  $h$ , depth-span ratio  $\lambda$ , tunnel excavation method, tunnel excavation method and the size of tunneling on the stability of upper soft and lower hard stratum tunnel in the engineering factors. When the combination of soft and hard stratum wasnot at the same time, the paper contrasted influence relation of some factors such as  $W$ ,  $h$ ,  $\lambda$ , soft and hard stratum interface position parameter  $\beta$  and upper soft formation parameter  $D_1$  and lower hard formation parameters  $D_2$  on the stability of upper soft and lower hard stratum tunnel in the dual role of geological factors and engineering factors. Only when the  $h$  factor was changed, the effect on the stability of upper soft and lower hard stratum tunnel was studied, and the damage evolution law of tunnel was analyzed. The results show that  $W$  and  $h$  are the two main factors that affect the stability of upper soft and lower hard stratum tunnel in the engineering factors, followed by  $\lambda$ . When the tunnel is stable after excavation,  $W$  is the main factor that affects the

\* 收稿日期:2018-08-26(修改稿)

作者简介:吴波(1971-),男,四川阆中人,博士,教授,主要从事隧道工程设计理论、施工技术与安全风险管理工作。E-mail:813792833@qq.com

通讯作者:王鸣涛(1989-),男,河南滑县人,硕士生,主要从事隧道与地下工程技术研究。E-mail:961953882@qq.com

基金项目:国家自然科学基金(51478118);福建省自然科学基金(2014J01170)