

# 特区建工技术

SEZ CONSTRUCTION TECHNOLOGY



NO.03

VOL.16 2022年10月号

特区建工技术

主办：深圳市特区建工集团有限公司  
承办：深圳市天健（集团）股份有限公司  
协办：深圳市建安（集团）股份有限公司 深圳市建设（集团）有限公司 深圳市路桥建设集团有限公司  
深圳市特区建工科工集团有限公司 深圳市综合交通与市政工程设计研究总院 深圳市特区建工产业空间发展有限公司  
深圳市特区建工园林生态科技集团有限公司 深圳市特区建工固废资源化有限公司

二〇二二年第三期

## 深圳市青少年足球训练基地项目 ——由特区建工集团旗下天健二建承建

二〇二二年十月



主办：深圳市特区建工集团有限公司  
承办：深圳市天健（集团）股份有限公司  
协办：深圳市建安（集团）股份有限公司 深圳市建设（集团）有限公司  
深圳市路桥建设集团有限公司 深圳市特区建工科工集团有限公司  
深圳市综合交通与市政工程设计研究总院 深圳市特区建工产业空间发展有限公司  
深圳市特区建工园林生态科技集团有限公司 深圳市特区建工固废资源化有限公司  
地址：深圳市福田区红荔西路7019号天健商务大厦16楼  
电话：0755-82565321 邮编：518034



### 智能成套路面设备及施工技术交流会圆满举办

8月24日，天健集团与三一重工股份有限公司在天健商务大厦举办“智能成套路面设备及施工技术交流会”，本次交流会内容涵盖了智能机械发展、电动化小型施工设备、沥青搅拌站自动化控制、施工成果交流等多个内容，深入讨论了道路施工智能化、电气化的协同创新以及路面机械行业的全新技术、业态与模式。



### 天健集团成功承办市级交通设施BIM大赛

近日，由深圳市交通运输局指导，深圳市城市交通协会主办，天健集团承办的“深圳市交通设施BIM大赛”顺利举办。与以往由建筑企业提交各自参建作品不同，这次BIM大赛由深圳市交通运输局统一命题，参赛企业在规定时间内提交作品。此举在全国业界尚属首次。

本次大赛吸引了深圳市市政工程总公司、深圳市市政设计研究院、上海城建信息科技有限公司等10多家企业报名参加。会上，各参赛单位通过PPT、视频、施工模拟等形式综合展示了参赛作品，并从BIM基础、建模质量与价值、应用广度、应用深度等进行汇报与答辩。5位行业知名专家依据评分细则逐项打分，最终根据得分高低确定6家获奖单位。

此次大赛形式创新、竞争激烈、硕果累累。未来，天健集团将不断提升交通数字化技术应用能力，持续为交通产业绿色化、工业化、数字化、智能化发展贡献力量。



深圳市文化馆新馆项目  
——由特区建工旗下建设集团作为施工总承包单位承接

# 目次

## 装配式建筑与装修

深圳市体育运动学校过渡校区快速建造技术研究.....	陈兰生 夏芬 武亚 揭双全 邵帅	3
BIM正向设计在装饰装修项目中的应用研究.....	潘庆伟 王世旭	8
装配式装修“部品划分”及制作研究.....	潘庆伟 曾瑞明	13

## 新材料应用

MICP固化建筑渣土抗风扬尘影响因素试验研究.....	刘忠 黄旭生 刘飞飞 肖水明 张敏霞	18
复合型胶粉改性沥青胶浆的流变性能研究.....	涂亮亮 江建 范璐璐 许劼 田蕾	28
聚烯烃干法改性沥青混合料在道路改建工程中的应用.....	钱勇	32

## 理论研究

公路车辙路面在潮湿天气下的抗滑性能评估.....	付饶	39
--------------------------	----	----

## 施工应用

水力旋流器在禹门口黄河大桥河滩桩基换浆法清孔施工中的应用.....	汪浩	44
-----------------------------------	----	----

## 经验交流

浅析民用建筑配电变压器容量与节能运行.....	莫智源	48
生活垃圾填埋场处置技术及实例分析.....	沈海林	56

## 简讯

深圳建设科技计划项目快报.....	60
《广东省建筑节能与绿色建筑发展“十四五”规划》解读.....	61
广东多举措推动建设科技创新.....	63
我国多个桥隧项目取得新进展.....	64
培育智能建造试点城市 打造建筑业高质量发展标杆.....	66
征稿启事.....	7



2022年10月出版 VOL.16  
2022年 第3期 第16卷

(内部资料 业内交流)

### 《特区建工技术》杂志编辑委员会

主任：韩德宏  
副主任：宋扬 何云武 孙凯 方东红 尹剑辉 张心亮 李锋 臧翀  
江建 魏晓东 陈强 陈惠劼 张明哨 王超 刘铁军 刘进跃  
黄海 洪绍友 韩良君 谢勇利 李军 缪静静 于晗  
编委：彭晓钢 陈俭 揭选松 邹爱华 盛宴 于芳 赵晓宜 郑志刚  
张平 周保生 龙桂华 范璐璐 黄小芳 汪洋 张建同 牛双健  
徐东 蔺军  
主编：江建  
副主编：刘铁军 于芳 陈志龙 武亚 赵晓明 刘晓华 刘艾轩  
校对：陈威 全云霞  
主办：深圳市特区建工集团有限公司  
编辑出版：《特区建工技术》编辑部  
地址：广东省深圳市福田区红荔西路7019号天健商务大厦1609  
邮政编码：518034  
电话：0755-88910245  
排版：深圳市新鸿兆文化传播有限公司  
印刷：深圳市长江印刷公司  
登记证号：(粤B) L018010008

- 3 Research on Shenzhen Sports School Transition Campus Rapid Construction Technology  
Chen Lansheng Xia Fen Wu Ya Jie Shuangquan Shao Shuai
- 8 Research on the Application of BIM Positive Design in Decoration Projects  
Pan Qingwei Wang Shixu
- 13 Research on Prefabricated decoration "parts division" and production  
Pan Qingwei Zeng Ruiming
- 18 Experimental study on influence factors of anti-wind erosion and anti-dust of MICP consolidated construction waste residue  
Liu Zhong Huang Xusheng Liu Feifei Xiao Shuiming Zhang Minxia
- 28 Research on the rheological properties of the compound rubber power modified bitumen mortar  
Tu Liangliang Jiang Jian Fan Lulu Xu Meng Tian Lei
- 32 Application of Polyolefin Dry Modified Asphalt Mixture in Road Reconstruction Project  
Qian Yong
- 38 Evaluating wet-weather skid resistance of rutted highway pavements  
Fu Rao
- 44 The hydrocyclone for slurry used to clean application of hole in construction of bridge pile foundation of Yumenkou Yellow River Highway Bridge  
Wang Hao
- 48 Analysis on capacity and energy saving operation of distribution transformer in civil buildings  
Mo zhiyuan
- 56 Domestic waste landfill disposal technology and successful examples  
Shen Hailin

## 装配式建筑与装修

# 深圳市体育运动学校 过渡校区快速建造技术研究

陈兰生, 夏 芬, 武 亚, 揭双全, 邵 帅  
(深圳市建安(集团)股份有限公司, 深圳 518040)

**[摘要]** 在深圳市体育运动学校过渡校区建设过程中, 面临时间紧、任务重、资源组织困难, 且处于疫情防控的敏感时期。本项目通过建立单独的应急项目管理体系, 采用全装配式钢结构设计, 采用就市采购的原则, 以及采用强穿插与大面积同时施工的原则, 分别从项目的管理、设计、采购、施工四个方面介绍学校建设过程中快速建造技术。并描述了板缝处理、卫生间防水、内外隔墙、屋面、机电的快速施工工艺。最终在规定工期内高效率、高质量完成建设项目。

**[关键词]** 学校; 快速建造; 装配式; 钢结构; 强穿插

## Research on Shenzhen Sports School Transition Campus Rapid Construction Technology

Chen Lansheng, Xia Fen, Wu Ya, Jie Shuangquan, Shao Shuai  
(Shenzhen Jianan (Group) Co., Ltd, Shenzhen, 518040)

**Abstract:** In the process of building the transition campus of Shenzhen Sports School, the time is tight, the task is heavy, the resources are difficult to organize, and it is in the sensitive period of epidemic prevention and control. This project introduces the rapid construction technology in the process of school construction from the four aspects of project management, design, procurement and construction respectively through the establishment of a separate emergency project management system, the adoption of fully fabricated steel structure design, the adoption of the principle of purchasing in the city, and the adoption of the principle of strong penetration and large area construction simultaneously. It also describes the rapid construction technology of plate seam treatment, toilet waterproof, internal and external partition wall, roof, electrical and mechanical. Finally, the construction project will be completed with high efficiency and high quality within the specified time limit.

**Keywords:** school; rapid construction; fabricated; steel structure; strong penetration

## 0 引言

随着经济的快速发展, 以及各种突发情况的出现, 人们对一些工期短的临时建筑的需求量快速增加。这些临时建筑主要是为了满足人们日常基本生活、学习、工作需求。在这些情况下, 装配式建筑显然更适用于此种场景, 相对于现浇建筑, 装配式建筑具有施工速度快, 所需劳动力少, 产品质量统一, 且绿色节能。

目前国内的快速建造体系的搭建还处于起步阶段, 国内部分大型的国企已经在研究并搭建自己的快速建造体系, 但主要是通过使用新的施工工艺, 或者改进以往的施工工艺, 或者使用强穿插工艺<sup>[1]</sup>, 或者使用模块化集成建筑<sup>[2]</sup>, 从而达到减少工期的效果。此外, 大部分快速建造技术的适用性具有一定的局限性, 大部分都只能适用于施工总承包工程, 只有少数能够同时适用施工总承包和工程总承



SEZ Construction  
Technology  
Vol.16.No.3  
Oct.2022

### Editorial Board of SEZ Construction Technology

**Director:** HAN Dehong

**Vice Director:** SONG Yang HE Yunwu SUN Kai FANG Donghong YIN Jianhui  
ZHANG Xinliang LI Feng ZANG Chong JIANG Jian WEI Xiaodong  
CHEN Qiang CHEN Huijie ZHANG Mingshao WANG Chao LIU Tiejun  
LIU Jinyue HUANG Hai HONG Shaoyou HAN Liangjun XIE Yongli  
LI Jun MIAO Jingjing YU Han

**Members:** PENG Xiaogang CHEN Jian JIE Xuansong ZOU Aihua SHENG Yan YU Fang  
ZHAO Xiaoyi ZHENG Zhigang ZHANG Ping ZHOU Baosheng LONG Guihua  
FAN Lulu HUANG Xiaofang WANG Yang ZHANG Jiantong NIU Shuangjian  
XU Dong LIN Jun

**Chief Editor:** JIANG Jian

**Editor:** LIU Tiejun YU Fang CHEN Zhilong WU Ya ZHAO Xiaoming LIU Xiaohua LIU Yixuan

**Proofreader:** CHEN Wei QUAN Yunxia

**Edited and published by:** Shenzhen SEZ Construction Group Co., Ltd.

**Sponsored by:** SEZ Construction Technology Editorial Department

**Address:** Room 1609, Tianjian business building, No.7019, Hongli Road, Futian District, Shenzhen City, Guangdong Province

**Postcode:** 518034

**Tel:** 0755-88910245

**Printed by:** Shenzhen Xinhongzhao Culture Spreading Co. Ltd

包项目。

本文通过深圳市体育运动学校快速建造项目，总结出一套可复制的快速建造技术。其适用范围包括工程总承包和施工总承包。这将为公司后续的快速建造工程提供依据，也为行业的发展起到一定的推动作用。

## 1 工程概况

深圳市体育运动学校过渡校区（以下简称过渡校区）位于深圳市龙岗区龙飞大道与风采路交汇处深圳市体育运动学校南校区田径运动场，本项目设计、采购、施工全部由深圳市特区建工集团有限公司完成。项目总建筑面积9720.33m<sup>2</sup>，分为4栋三层教学楼，包含各类教室和办公室共62间，如图1所示。



图1 项目效果图

本项目主体结构全部采用钢结构，且节点全部采用高强螺栓链接。楼板采用较为经济的预应力空心板和预制板有机结合<sup>[3]</sup>，充分发挥各自的优势。建筑内外隔墙全部采用轻钢龙骨+双层纸面石膏板，面层还需要刷大白和刷漆进行装饰处理。地面装饰采用的是PVC地胶。防水材料采用的是SBS改性沥青防水卷材与聚氨酯防水涂料的有机结合。

## 2 项目重难点分析

### 2.1 时间紧、任务重

我司于2022年3月7日中标该项目，3月8日组织各公司开展设计和施工工作，计划工期43天，工期非常紧张，因此需要设计、施工同时进行<sup>[4]</sup>，从而加大了保证施工质量的难度。本项目施工内容主要包括：完成基础施工，主体结构施工，装饰装修施工，机电工程及室外园林施工等，相对而言工程量非常大。

### 2.2 资源组织难度大

2022年3月13日，4栋教学楼的筏板基础施工完成，由于疫情防控，3月14日起，市各企业、项目停工12天，大部分施工原材料厂商被迫停工停产。疫情期间，劳动力进场须持有4天4核酸阴性证明才能进场，这给项目资源调度带来很大难度。

### 2.3 人员密集度高

高峰期管理人员达到52人，劳动力达到约540人，疫情期间由于防控要求，人员调配进场很不方便，施工现场人员密集<sup>[5]</sup>，项目采用全封闭管理模式，现场采用两班制施工，工人的身心健康易出现异常，很有必要进行身心健康安抚，一旦出现疫情，将给施工带来很大影响。

### 2.4 吊装数量多

本工程采用全装配式结构，所采用的预制构件有：钢柱和钢梁、钢楼梯、预应力空心板和预制板。需要吊装的预制构件量大，其中钢柱92根，钢梁685根，钢柱最长13.2m，钢梁最长9m，构件尺寸较大，最大重量为3.63t，楼屋面板采用预应力空心板和预制板，预应力空心板最大尺寸为1200×9120mm，最大重量为3.5t，采用吊具吊装，吊具加上预应力空心板重量达到5吨。预制板最大重量为2.97t，采用四点吊装方式。

### 2.5 板缝数量多

本工程楼板全部采用预应力空心板和预制板，预应力空心板和预制板吊装完后，板与板之间会存在空隙，且数量众多。为了使其连成一个整体，需对缝隙进行处理，这成为本工程的重点。对于有防水要求的卫生间和屋面，板缝处理这成为本工程的难点。

### 2.6 多专业平行施工

本工程建造涉及钢结构主体、装饰装修、机电安装、给排水及暖通、教学设备等多专业，由于工期紧张，各专业必须平行施工，导致作业空间受到限制，需将各专业进行最优组合，因此在项目组织和管理方面存在较大难度。

## 3 装配式钢结构快速建造技术

### 3.1 项目管理

从企业层面来说，由于我们自身企业层级的管理并不能满足快速建造的需求，过分崇尚“程序正确”，对于责任不明的互相推诿，对于责任明确的常以“走流程”代替主动作为，导致决策效率降低，制约项目快速推进。因此为了此次应急项目能

够按时完成，企业成立了应急小组，给予项目最大的支持，包括人员支持、资金支持、企业管理流程的简化等。

从项目层面来说，项目每周组织周例会，会上各部门汇报各自的进度情况，对进度滞后项要分析滞后原因，提出解决方案。每天还组织生产例会，对每天的进度完成情况进行核对，对于进度滞后项，会后立即组织人员进行抢工，保证实际进度与计划进度同步。此外，本项目运用BIM技术进行项目管理，设计阶段建立BIM模型，各专业协同设计，及时有效的解决专业之间的设计问题。深化设计阶段，BIM模型直接对接工厂生产，提高生产效率，并且生产的产品信息直接对接现场的施工安装。利用BIM模型的可视化技术，对现场进行可视化施工交底和施工工序模拟，实现了末端设备一次性精准安装到位、机电系统一次性调试到位<sup>[6]</sup>。基于BIM模型，利用智慧建造平台可以实时采集施工现场生产过程中的各专业进度数据，实现云端进度管控，实时掌控项目进度，对于进度滞后项可以立即做出调整。

### 3.2 方案设计

本项目由于时间进度控制要求高，确定了采用装配式快速全拼装体系的技术方案。通过对现有快速建造体系的对比研究，最终决定采用深圳市特区建工旗下科工集团的快速建造拆装体系。其基础采用施工速度较快的筏板基础。主体结构采用全螺栓连接钢框架体系，所有连接节点均采用高强螺栓连接，达到快速安装和拆卸方便的要求，设计用的钢结构材料均采用国标H型钢，实现工厂标准化生产。楼、屋面采用预应力空心板+预制楼板体系；预应力空心板预应力空心板具有承载力高、刚度大、跨度大、尺寸偏差小、隔音效果好等优点<sup>[7]</sup>，因此大跨度教室采用预应力空心板，走廊卫生间采用预制楼板，充分发挥各自的优势，有机结合，整个楼、屋面板无混凝土现浇层，实现楼板体系全干作业。装修采用部分装配式<sup>[8]</sup>，达到减少工期的目的，内墙采用轻钢龙骨+双层石膏板，墙体填充岩棉，具有隔热、隔音、快速建造等多项特点；外墙采用轻钢龙骨+双层面石膏板+硅酸钙板+水泥纤维板，组成防疏结合的三层外墙体系，具有防水、隔热、隔音、快速建造等多项特点；屋面采用双层面体系，既具有防水效果，又具有保温隔热功能。通过采用MASC快速建造拆装体系，建筑结构实

现100%装配率，全楼干作业率达到90%，异地重建利用率达到85%，最大限度实现低碳绿色的建造方式。

### 3.3 物资采购与招采

本项目在设计策划阶段，提前与采购和生产厂家进行沟通，设计人员根据市场现有存量的产品和型号进行材料的选型，这样既可以节省采购周期，也可以降低采购成本和产品生产时间。本项目在保证可拆卸、重复利用的前提下，对比目前市场比较主流的应急项目，建造成本大大降低，有很好的经济性示范作用。项目还提前根据施工进度计划做好物资和机械设备需求计划，并按照需求计划进行物资采购和机械设备租赁。

### 3.4 施工策划

本工程所有钢结构在工厂生产制作加工，运至施工现场吊装，现场采用12台汽车吊同时进行吊装作业，能满足4栋楼同时进行钢结构和楼板安装。施工作业实行强穿插，当楼板安装完成后立即进行地面垫层施工，随后进行外墙施工和内隔墙施工。墙体安装过程中插入机电管线和消防管道安装。为了满足进度要求，项目延长每天的工作时间，实行两班倒，增加劳动力及管理人员，高峰期工人达540人，管理人员达50人，配备足够的施工机械组织机械化配套作业线，以先进的设备保证项目顺利开展，最终本项目比计划工期提前1天完成。

#### 3.4.1 板缝处理及卫生间防水快速施工技术

本工程由于楼板全部采用预应力空心板和预制板，因此板缝较多，且种类较多，对于不同的种类其处理方式略有不同。对于预应力空心板拼接缝，需放置钢筋网片，并用微膨胀抗裂砂浆塞缝，如图2、图3所示。对于预应力空心板对接缝，需在洞口放置钢筋桁架筋，并在预留洞口进行灌浆，如图2、图4所示。

预制板的板缝处理的处理方式主要是通过通过在预制板预留孔洞处焊接栓钉，然后在洞口灌浆，使其与钢梁连接成整体，如图5、图6所示。

本工程所有的卫生间楼板均采用预制板，板缝较多加大了防水施工的难度，因此防水采用防水效果较好的聚合物水泥防水涂料。

#### 3.4.2 内隔墙快速施工技术

内墙采用轻钢龙骨+双层石膏板体系，如墙体需挂重物，可加设阻燃板，增加墙体的可靠性，板材安装顺序按照交替封板方式进行，填充材料为岩棉。

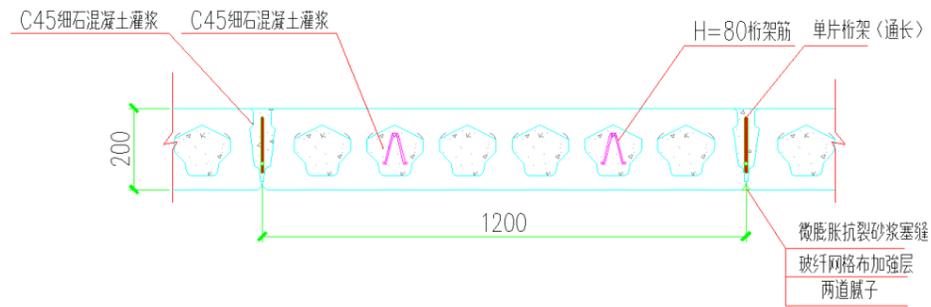


图2 预应力空心板缝处理截面图

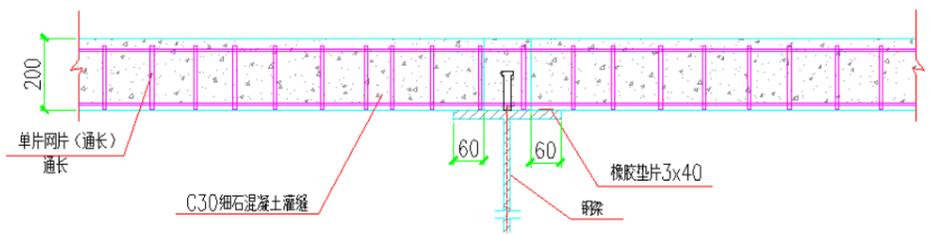


图3 预应力空心板拼接处理

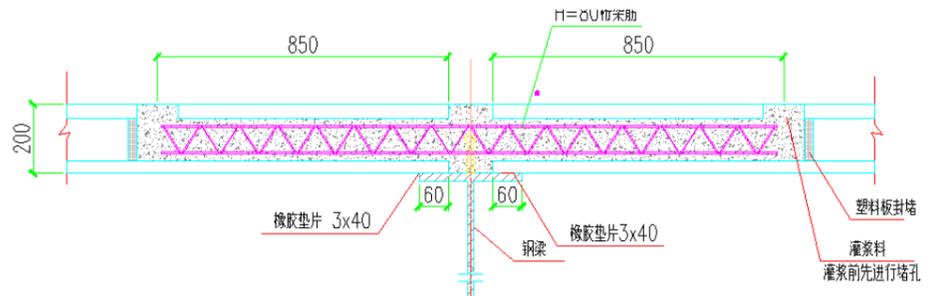


图4 预应力空心板对接处理

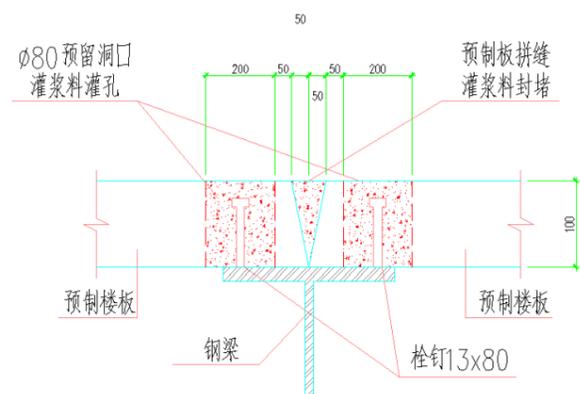


图5 预制板拼缝处理

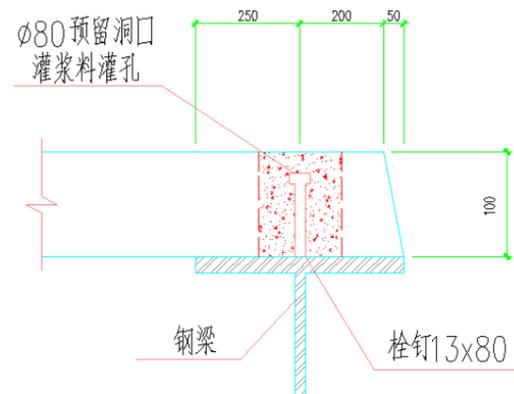


图6 预制板端跨处理

施工流程为：弹性→安装天地龙骨→安装贯通龙骨→机电管线安装→安装横撑龙骨→门窗等洞

口制作→安装石膏板（一侧）→安装填充材料（岩棉）→安装石膏板（另一侧）。

### 3.4.3 防疏结合的外墙快速施工技术

外墙采用水泥纤维板+硅酸钙板（中间）+双层石膏板，先安装硅酸钙板和双层石膏板，采用交替方式进行安装，即先安装外侧的硅酸钙板，然后安装填充材料岩棉，再安装石膏板；最后安装水泥纤维板。当硅酸钙板安装好后，在硅酸钙板底部与楼板交接处外立面缝隙使用耐候胶进行封堵，并进行八字角抹灰，并在距楼板高度400mm范围内涂聚氨酯防水涂料。

施工流程为：弹线→安装天地龙骨→安装贯通龙骨→机电管线安装→安装横撑龙骨→门窗等洞口制作→安装硅酸钙板（一侧）→安装填充材料（岩棉）→安装石膏板（另一侧）→安装水泥纤维板（最外侧）。

### 3.4.4 双层屋面快速施工技术

屋面采用彩钢瓦斜屋面+防水平屋面体系，先进行平屋面的防水层施工，平屋面防水采用1.5mm厚聚氨酯防水涂料+2mm厚SBS改性沥青防水卷材，起到双层防水作用。待闭水试验合格后，然后安装檩条进行彩钢瓦斜屋面的安装，平屋面防水与彩钢瓦斜屋面组成双层屋面防水体系。

### 3.4.5 机电安装快速施工技术

提前利用BIM进行深化设计，确定各专业管道的走向及标高，并进行净高和碰撞分析。通过在工作作业模型的基础上附加建造过程、施工顺序等信息，进行施工过程的可视化模拟，并充分利用建筑信息模型对方案进行分析和优化，提高方案审核的准确性，实现施工方案的可视化交底。

## 4 结语

装配式建筑既节省工期，又绿色环保，必将

是未来建筑行业发展的趋势，尤其是在工期较短的项目中应大力推广。深圳市体育运动学校项目工期短，任务重，难度大，但本项目通从管理、设计、采购、施工四个方面进行优化，构建出一套快速建造技术，在保证工程质量的前提下，大大减少了项目的施工工期，最终本项目于5月1日提前竣工验收并交付使用，期间由于深圳市疫情防控原因停工12天，实际施工工期为42天。

本项目通过使用快速建造技术，相对于传统的现浇混凝土结构，大大缩短了工期，这将为今后的应急项目提供宝贵的经验教训。

### 参考文献

- [1]贾瑞华, 况彦, 李琦, 等. 雷神山医院快速建造技术[J]. 施工技术, 2020, 49(12):108-110.
- [2]陆通、叶创、胡宗友. 2020. 火山山医院装配式钢结构快速建造技术[J]. 施工技术. 2020, 49(12):74-79.
- [3]任晓勇, 金文一, 弥建海, 等. 预应力空心板结构的经济性研究[J]. 建筑结构. 2022, 52(S1):385-390.
- [4]彭厚胜, 向阳阳, 李彪, 等. 大型钢结构厂房项目快速建造技术研究与应用[J]. 建筑安全, 2021, 36(08):27-29.
- [5]赵宝军, 姚杰, 黄明洋. 钢结构模块化建筑技术在城市应急管理项目中的应用[J]. 广东土木与建筑, 2022, 29(7):48-51.
- [6]于学刚. 基于BIM的快速建造技术在设计施工中的应用研究[J]. 建筑施工, 2021, 43(05):935-938.
- [7]王洪欣, 孙占琦, 袁佳佳, 等. 预应力空心板在高层建筑中应用研究[J]. 建筑结构. 2022, 52(S1).
- [8]谷守朴. 装配式建筑发展背景下装配式装修设计的合理化思考[J]. 中国建筑装饰装修, 2022(6):3.

## 征稿启事

本刊为深圳市特区建工集团有限公司主办，深圳市天健（集团）股份有限公司承办的内部技术类期刊。旨在促进学科理论和实践的发展、促进行业内学术交流、加速科研成果向现实生产力转化。现长期征集建筑设计、建筑施工、建筑工业化、城市综合管养、专业开发、建筑科技产业培育等方面的稿件，欢迎广大技术人员及专家踊跃投稿。

本刊各栏目均欢迎投稿，来稿优先采取电子邮件投稿，请将文稿发送至投稿邮箱。如有不明事项，请通过电话联系。

投稿邮箱：tqjgs@163.com

联系人：陈威（0755-88910245，13530639399）

# BIM正向设计在装饰装修项目中的应用研究

潘庆伟, 王世旭

(深圳特区建工科工集团设计顾问有限公司, 深圳 518000)

**【摘要】** BIM作为计算机建模软件来实现建筑物模拟建造的一种先进的建造管理技术, 同传统的建筑类软件相比, 它具备提前预知的可视性、系统性、模拟性及规范性。BIM正向设计是协同各专业以BIM的思维和工作方式进行总体设计活动, 目前BIM正向设计与装饰装修项目相互配合的应用也逐渐兴起, 但两者的协同应用的发展程度还未完全成熟。本文旨在如何将BIM正向设计与装饰装修项目更好的配合进行阐述。

**【关键词】** BIM正向设计; 虚拟建设; 装配式部品; 装饰装修设计

## Research on the Application of BIM Positive Design in Decoration Projects

Pan Qingwei, Wang Shixu

(Shenzhen Special Economic Zone Construction Engineering Technology Group Design Consultant Co., Ltd., Shenzhen 518000)

**Abstract:** As an advanced construction management technology, BIM is used to realize building simulation by computer modeling software. Compared with traditional building software, it has visibility, systematicness, simulation and standardization that can be predicted in advance. BIM positive design refers to the overall design activities carried out by all disciplines in collaboration with BIM thinking and working methods. At present, the application of BIM positive design and decoration projects is gradually emerging, but the development of the collaborative application of the two is not yet fully mature. This paper aims at how to better coordinate BIM positive design with decoration projects.

**Keywords:** BIM forward design; virtual construction; prefabricated parts; decoration design

### 0 引言

BIM正向设计作为各专业同步配合的一种协同设计, 将一个建设项目所应用到的所有设计信息汇总在BIM中, 最终完成模型虚拟建设。本文将以为装饰装修项目作为BIM正向设计的应用对象展开论述。

### 1 BIM正向设计的概念界定

BIM正向设计是协同建筑类专业从一个项目的方案设计初期到施工图绘制完成的配合协调的全过程。同传统的设计软件效果相比, BIM正向设计最能够体现预知性, 使项目整体的水平、质量和效率

都大大提高<sup>[1]</sup>。BIM正向设计的出现节省了项目中人、材料、机械的浪费, 真正实现方案优化、协同设计、数据参数化和模型一体化。

### 2 BIM正向设计发展目前存在的问题

在整体的大环境看来, 我国目前正大力推广BIM正向设计, 放眼建筑业当前的发展状况, BIM的应用形势也成为了主流。BIM正向设计推出的本质是为了同施工图同步协调进行, 但目前的问题在于BIM还未开始的时候本应同步进行的设计工作已经完成, BIM的正向设计失去了价值, 无法真正达到高质量、零返工的设计效果。



图1 BIM正向设计流程

### 2.1 BIM正向设计与装饰装修项目同步进行中存在逆向设计

由于BIM作为与设计活动同步协调进行的软件, 而目前只利用了BIM软件的可视化和模型化的功能来作为即有设计结果的检验, 通过检验出的问题再次修改。这种辅助性质的设计对结果进行检验的过程被称为逆向设计(也称“设计后BIM”)。

深圳某办公室及展厅的装配式装修项目作为其企业第一个真正意义上的全装配式装修项目, 具有一定的实验性、新技术示范性。项目面积900平方米, 采用快铺承重地板系统、装配式墙板系统、定制装配式天花系统等装配式系统。在这个项目中就应用到了BIM技术与装饰装修项目的结合, 但项目中出现由于BIM的逆向设计导致了在装饰施工结束后在展示效果上出现了诸多问题。

问题一: 在现场复盘时发现窗帘盒部品的安装后出现尺寸大小不一的情况。在进行BIM建模时并未对窗帘盒部品做明确的尺寸划分表示, 模型中并未及时发现问题所在, 工人在现场安装时根据现有空间对有尺寸偏差的窗帘盒成品做任意切割后直接安装, 最终呈现的现场效果比预期有所差距(图2)。在项目后期复盘过程中在BIM模型内将其纠正(图3及图4)

问题二: 在现场办公室区域的玻璃幕墙处天花与墙板的过渡衔接同样出现了逆向设计问题。BIM根据已有的设计图纸, 对墙板的模型拉伸只延伸至天花处, 并未及时发现墙板与天花板并没有完全贴合, 墙板还需要做向上延伸或天花做延伸将棚顶



图2 现场成品窗帘盒

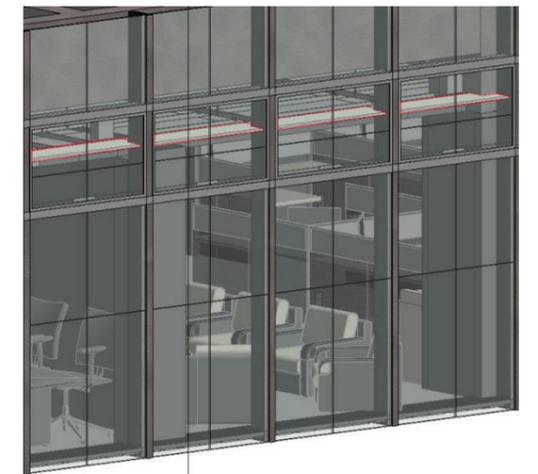


图3 BIM后期修正窗帘盒模型展示

彻底封闭, 最后导致在现场施工后发现了问题(图5)。因为BIM建模缺乏实时跟进导致模型在项目复盘过程中才给予修正(图6)。

### 2.2 BIM正向设计在装饰装修项目应用中的普遍性不高

BIM正向设计作为及时调整更好的展现装饰设计方案合理性, 以及避免在后期施工上出现做工错误导致返工的情况。但是目前将BIM应用在装饰装修项目中的技术程度还并未向建筑BIM那样应用的广泛, 将装饰装修设计仿照建筑设计结合BIM正向设计进行模拟施工, 提升装饰装修设计精细化程度, 从而正确推动BIM正向设计的发展<sup>[2]</sup>。

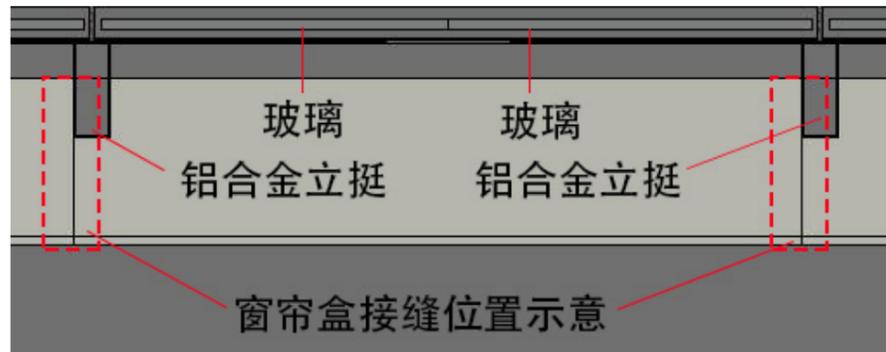


图4 BIM后期修正窗帘盒接缝示意图



图5 现场天花效果现状

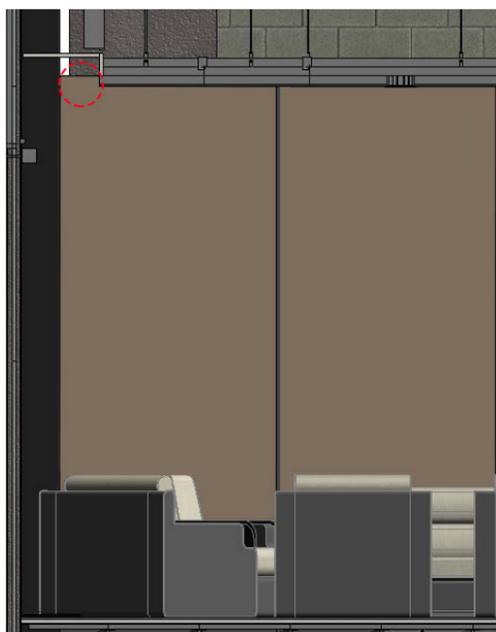


图6 BIM后期修正天花效果展示

### 3 BIM正向设计在装饰装修项目中的应用

通过BIM建立出完整的装饰装修项目系统，可以精确把控对装饰施工的预算、成本、造价、全过程正向进度管理、利用虚拟建设实现一比一还原建造、实时跟踪检查的正向全过程实施，达到更高效的作业程度。

#### 3.1 BIM正向设计指导装配式部品的生产与安装

在建筑行业中，装配式成为了行业内的主流趋势，装配式的理念也逐渐渗透到了装饰装修项目中，施工人员能够在现场将在工厂生产好的装配式构件直接组装，提升施工便捷的同时也大大提升了施工效率，从整体上促进了我国建筑行业的发展与进步<sup>[3]</sup>。在装饰装修项目中，装配式部品应用更为广泛，能够将室内布局按块划分，装配式卫浴、装配式隔墙系统、装配式吊顶等装配式部品都均有应用，做到“搭积木”式装修施工。其次再利用BIM正向设计做到指导装配式部品的生产与安装。

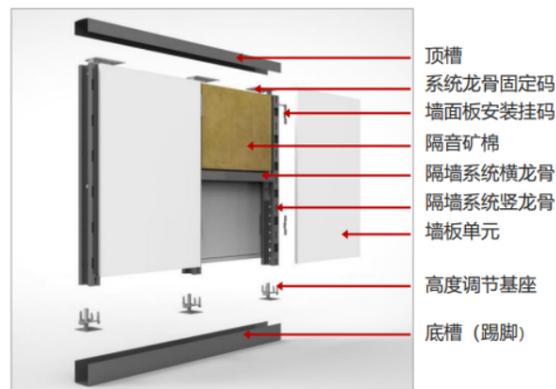


图7 装配式部品构件组成

装配式部品在设计初期便具备系统性和便捷性，系统性把设计使各系统间无缝衔接，按照统一

的安装逻辑和标准的安装工艺达到标准化设计，在工厂中形成流水线制造。便捷性体现在所有装配式部品在使用过后可以做到重复无损拆装。其部品构件整体达到装饰装修规范要求的环保性、防火性、隔音性、装饰性等。在性价比方面，可以列出以下三点：

(1) 装修：质量和效率大幅度提高、安装成品大幅度降低、同传统部品的档次和造价基本相同、现场施工环境大幅度改善。在材料的选用上大大提高了使用率，对比传统装修也更加环保。

(2) 使用：延长使用寿命、维护费用大大降低，对后期的维修也十分方便，且对原有结构不会产生破坏、可重复拆装重复利用。

(3) 拆换：龙骨构件可以重复使用、拆除后现场不产生多余的建筑垃圾、钢材可以回收再利用<sup>[4]</sup>。

装配式部品采用干式工艺进行安装，这种施工工艺取代了传统装修工艺中的腻子、砂浆找平及砂浆粘接工艺，全面采用锚栓、支托、结构胶粘贴等方式实现连接构造；管线的搭接也可完全填充在面与支撑结构中的缝隙中，取代预埋方式；部品的集中定制既满足工业化生产也满足个性化定制，从而避免在施工现场因不确定因素而导致的二次加工。

在深圳某公寓B2户型的装饰装修项目也应用了BIM正向设计指导装配式卫浴的生产及安装的全过程（图8）。卫浴间整体采用装配式定做，结合图纸在BIM模型上确定卫浴及内部部品的尺寸，安装整体卫浴底盘并连接好下部管道，卫浴底盘下部通过混凝土垫块支撑起整体卫浴，垫起的空间内部可以布局排污系统，整体卫浴墙板上部的冷热水管及消防管并与预埋管道接通（图9）<sup>[5]</sup>。

BIM正向设计的介入完全严格控制装配式部品的尺寸，能够更高效的协同CAD软件绘制施工图纸并指导现场安装，更大程度提升设计精度。BIM正向设计在装饰装修项目中的指导作用尤为重要<sup>[6]</sup>。

#### 3.2 BIM正向设计在装饰装修项目实施要点

(1) 可视化技术交底：BIM技术的应用可以使装饰工程的全过程都以虚拟模型的形式表现出来，技术交底更为直观清楚，更有利于施工人员对设计意图的理解。并且通过BIM

模型对工程中的复杂工序进行模拟，能辅助项目决策，避免财力物力的损失，节约工程工期。

(2) 基于BIM的信息同步：基于BIM技术，建筑对象的物理信息和工程相关信息能够同步给各相关

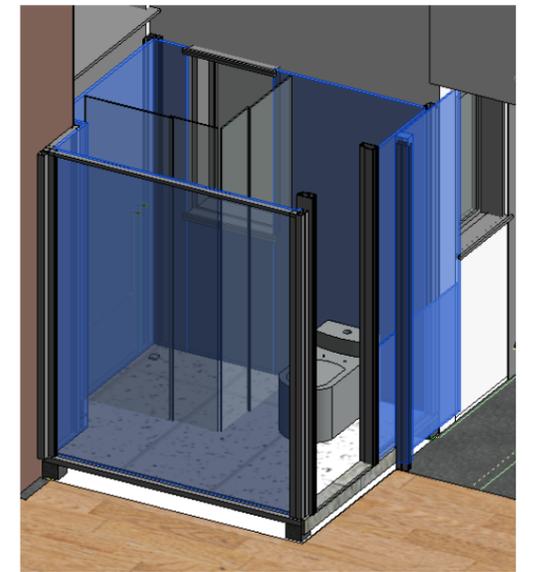


图8 装配式卫浴BIM展示



图9 装配式整体卫浴构造

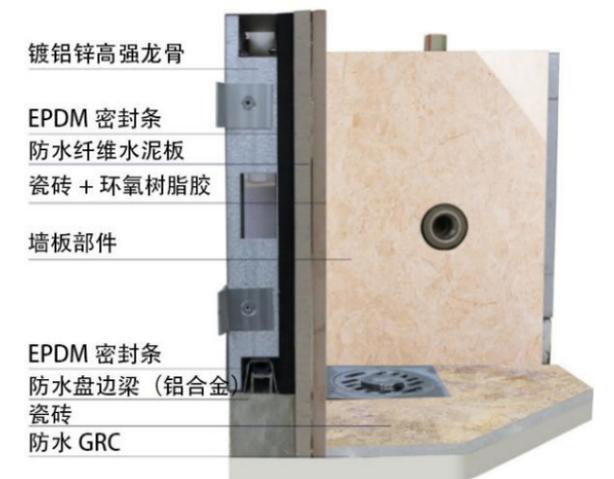


图10 装配式整体卫浴构造

单位，消除各参与单位之间的信息传递时间差和内容差，能够极大提高参与单位之间信息沟通效率，形成更好的沟通，有助于装饰工程的顺利实施。

(3) 数据共享：在装饰工程全过程中，基于BIM技术创建建筑对象的装饰工程数据库，围绕装饰工程的设计、施工，各参与方可协同作业，提高数据的共享效率。并且此数据库可以与工程的其他建设过程中的BIM数据库相统一，使工程数据库完善真实。

(4) 提高材料下料准确度：BIM模型中包含建筑对象的物理信息，在装饰工程中，对于一些需要加工下料的构件，根据BIM模型中的构件信息，可以在工厂批量生产装饰工程构件，避免人工现场下料产生的误差，节省材料和成本<sup>[7]</sup>。

#### 4 BIM正向设计应用在装饰装修项目在未来的发展趋势

BIM正向设计作为今后行业发展的趋势，能够逐渐代替传统装饰装修的实施方式，在设计规范上能够更符合要求，利用BIM正向设计结合图纸直接进行设计出图和节省装饰装修项目中的管理成本，从而提升整体设计质量和效率，与项目节奏环环相扣，BIM正向设计必然作为未来建筑行业发展的主流趋势<sup>[8]</sup>。

#### 5 结论

综上所述，在装饰装修项目中，通过BIM正向设计技术的应用，可以提升装饰设计方案的合理

性，及时减少或消除装饰施工过程中存在的各种问题。BIM技术可以生成虚拟立体建筑模型，设计人员要充分发挥出BIM正向设计技术的重要指导作用，利用虚拟模型结合实际，来实现更加高效合理的建筑装饰装修设计及施工，达到预期的设计目的地，为建筑行业的发展推动发挥积极力量。

#### 参考文献

[1] 王丽洋. 基于BIM的装配式住宅协同设计管理方法研究[D]. 河北科技大学, 2020. DOI:10.27107/d.cnki.ghbku.2020.000342.

[2] 刘志忠, 申靖宇. BIM技术正向设计建模标准研究[J]. 大众标准化, 2022(06):4-6.

[3] 常伟. 装配式施工在建筑装饰装修工程中的应用[J]. 房地产世界, 2020(23):103-105.

[4] 丁勇军. 基于BIM技术的绿色装饰应用研究[D]. 湖北工业大学, 2016.

[5] 雷霆. 传统设计行业升级背景下的BIM正向设计研究[D]. 青岛理工大学, 2019. DOI:10.27263/d.cnki.gqudc.2019.000356.

[6] 谢伦杰, 戴江文. BIM技术在装配式内装设计中的应用[J]. 新型建筑材料, 2022, 49(01):98-102.

[7] 朱峰. 装饰装修工程施工中BIM技术的应用分析[J]. 居舍, 2022(02):22-24+60.

[8] 麻倬领. BIM技术在装饰工程中的应用研究[D]. 河南工业大学, 2018.

### 装配式建筑与装修

# 装配式装修“部品划分”及制作研究

潘庆伟, 曾瑞明

(深圳特区建工科工集团设计顾问有限公司, 深圳 518000)

**【摘要】** 鉴于基础部件的部品划分及制作是装配式装修的核心之所在，故本文以装配式装修的“部品划分”为研究对象，通过对于装配式装修与传统装饰装修方法进行多方面对比，浅析装配式装修部品划分及制作的优劣，从质量、安全、效率、成本及环保等多方面因素突出装配式装修部品划分及制作的必要性。

**【关键词】** 装配式装修；部品划分；装饰装修；模数化

## Research on Prefabricated decoration "parts division" and production

Pan Qingwei, Zeng Ruiming

(Shenzhen Special Economic Zone Construction Engineering Group Design Consultant Co., Ltd., Shenzhen 518000)

**Abstract:** In view of the fact that the division and production of basic components is the core of prefabricated decoration, this paper takes the "division of parts" of prefabricated decoration as the research object, through the multi-faceted comparison between prefabricated decoration and traditional decoration methods, analyzes the advantages of prefabricated decoration parts division and production, and highlights the necessity of prefabricated decoration parts division and production from many factors such as quality, safety, efficiency, cost and environmental protection.

**Keywords:** prefabricated decoration; division of parts; decoration; modularization

## 0 引言

当前我国传统的装饰装修行业存在着诸多问题，如工程质量参差不齐、完工现场与设计图纸出入较大、环境污染严重、维修翻新困难、技术工人供应不足等等，而装配式装修的兴起与发展，便是人们对于装饰装修工程日益严苛的要求之下所产生的必然结果，代表了装饰装修工程未来的发展趋势。

### 1 装配式装修的概念

装配式装修也称工业化装修，是将工业化生产的部品、构件通过可靠的连接方式，由工

人按照标准化程序采用干法施工的装修过程。简单来说，是在设计阶段进行部品构件的设计及划分，工厂根据设计尺寸进行标准化的制作，进入现场之后根据图纸进行组装挂嵌的装配装修方式。

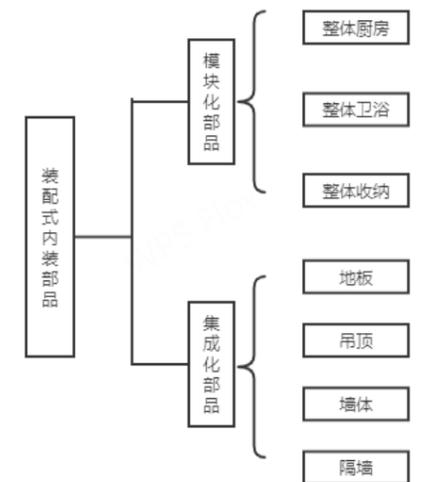


图1 装配式内装部品划分

## 2 装配式装修基础部品的界定

装配式装修体系中，将内装部品概括的分为模块化部品和集成化部品，模块化部品主要是整体部品的设计及定制，集成化部品主要是将墙面构件、地面构件、顶面构件、结构构件进行产品化和标准化的划分，产生的独立的可复制的“部品构件”，我们称之为基础部品。基础部品是组成装饰面的单位零件，部品的划分也应在设计阶段进行精密的考量，寻求合理的整体或局部划分。

## 3 装配式装修部品划分及制作的优势

### 3.1 保证工程质量

传统装饰装修项目质量依赖于装修工人的工作经验，尤其在异形、结构复杂的装修部位更为明显，造型表现上的精度、完整度及流畅度都容易存在着较大的差异性，施工方与设计方的想法容易割裂，施工工人也会带有主观思维进行施工。装配式装修通过将部品进行数据化的划分，所有部品构件均为系统集成生产，通过引入BIM系统，实现全流程信息化管理，极大程度地保证了构件造型上的统一性和关联性，用稳定的“机械工艺”代替波动的“传统手艺”，提高施工造型尺寸上的精确度，能更完美的展现最初的设计构想，保证装饰装修设计的工程质量。如图2为传统施工工艺方法所做的弧面造型，通过对石膏板进行人工切割，使其呈现相应的设计形式，当项目中批量出现同样形式，工人对于造型的弧度就会呈现出一定的差异性，施工手艺的参差也使整体工程质量存在着不确定性；图3为相同造型的装配式构件，在设计阶段进行部品的划分，把握好严格的尺寸与弧度，工厂针对划分好的部品进行批量生产与制作，进入现场之后只需安装至设计对应位置即可，整体流程充分地体现了装配式的“装修设计标准化、部品生产工厂化、现场施工装配化、建造过程信息化”的特点，完美还原设计造型，充分保证了工程质量。

### 3.2 降低安全隐患

传统装饰装修过程中，最为常见的安全隐患包括高空坠落、坍塌、物体打击、触电等，其部分原因与传统施工工艺的复杂、施工工序的繁多离不开关系。装配式装修部品制作完全在工厂内作业，产品合格后进入现场直接进行拼装连接，工序简单，降低了施工过程中的安全隐患。

装配式装修部品所采用的材料包括了竹木纤维、铝合金、高分子集成材料、蜂窝铝及其他金属



图2 传统施工工艺弧面造型



图3 装配式部品生产弧面造型

板材等，这些材料均为绿色材料，本身不含有毒有害化学成分，并且生产完工后还需工厂检验，拥有产品合格证方可出厂，具有阻燃、防火、防水、防潮、隔热、隔音等特点，降低了使用过程中的安全隐患。

### 3.3 提高生产效率，降低人力成本

“用工荒”、“工人老龄化”等词条现已屡见不鲜，用工成本也日益增高。传统装修作业包含水、电、瓦、木、油等20多道工序，从项目进场到竣工验收，对于人工的需求量极大，尤其是高水平技术人员逐渐减少的情况下，人力成本在整个项目中都占着极大的比重。

装配式装修部品生产制作，从设计完成之后直



图4 装配式部品材质示意

接进入工厂流水线生产，用机械取代人工；部品生产制作完成之后直接运送至施工现场进行连接，对于高水平技术工人的需求量可以做到大幅度缩减；生产效率上的提高带来了施工工期上的优化、工人用工量上的减少，极大的降低了人力成本，缩短了项目建设周期，提高项目整体建造效率。（见图5）

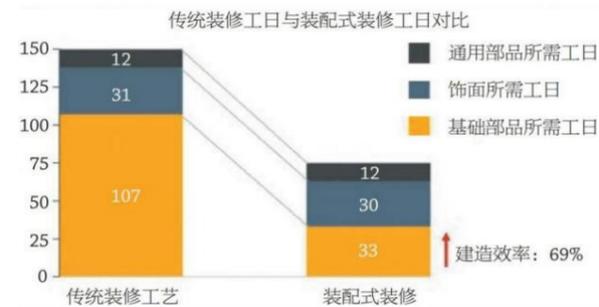


图5 某装修工程传统装修工艺与装配式装修所需工日对比

### 3.4 节能环保，减少污染

传统装修工程中，拆除作业、木工切割及金属切割作业都会产生较为严重的噪声污染，如图6(国家规定噪音标准为白天70dB，夜间55dB)，拆除作业还会产生粉尘污染(PM<sub>2.5</sub>)，涂饰作业会产生甲醛，油漆作业产生的TVOC(总挥发性有机物)等都会造成各种污染影响人的健康，施工中大量工程需要进行湿作业，造成了水资源的浪费，此外装修产生的装修垃圾、工程废料等也都会造成资源的浪费和环境的破坏。

采用装配式装修构件施工，工料受到严格把控，将部件作为产品进行生产加工，将可能会造成

装修工序	噪声声级/ dB	$\rho(\text{PM}_{2.5})$ / ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$\rho(\text{甲醛})$ / ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	$\rho(\text{TVOC})$ / ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	
拆改工程	最小值	49.9	107.0	0	0.02
	最大值	102.2	1 712.0	0.02	0.04
	平均值	88.5	157.6	0.01	0.03
涂饰工程	最小值	48.6	81.0	0.06	0.92
	最大值	102.8	1 188.0	0.69	1.6
	平均值	59.3	106.5	0.26	1.0
油漆工程	最小值	67.1	26.0	0.10	0.93
	最大值	92.4	645.0	0.32	1.9
	平均值	71.8	72.0	0.18	1.5
木工作业	最小值	49.9	29.0	0.05	0.20
	最大值	101.6	1 439.0	0.09	1.4
	平均值	79.6	127.6	0.07	0.72
金属工程	最小值	85.0	23.0	0	0
	最大值	93.1	791.0	0.02	0.21
	平均值	89.1	105.1	0.01	0.13

图6 传统施工工序不同污染物强度

污染的污染源止于工厂内部，施工现场也避免了湿作业项目。区别于传统装修工程，装配式装修构件具有可循环性，拆除后仍可进行二次利用，在节能环保、减少污染方面有着绝对的优势。

## 4 装配式装修部品划分及制作的要点

装配式装修部品的划分主要集中于设计阶段，通过设计效果的分析与BIM中部品构件的划分，对部品部件的尺寸规格进行界定。在进行装修部品的划分及制作中应注意以下几个要点：

### (1) 模数划分

部品的划分是装配式装修的核心。在设计时应按照模数化进行划分，考虑部品的共性和个性，使部品能够达到批量化生产：如墙面无特殊要求的板件部品，应确定其基准模数尺寸，现场施工时即可做到复制粘贴型施工方式。针对特殊性需求的，如曲面造型等，应通过CAD图纸、BIM图纸等进行辅助，做到信息化、数字化的处理，保证部品的标准化。

### (2) 标准制作

工业化制作是装配式装修的前提。工厂与设计方进行对接时，应确定好设计部品的尺寸、规格、材质、性能需求等各方面因素，如：竖向龙骨有无承重要求、墙面板材呈现的材质效果及其防火性能、厨房及卫生间部品的防水性能等多种条件，按照国家强制性标准及设计需求，进行标准化生产制作。

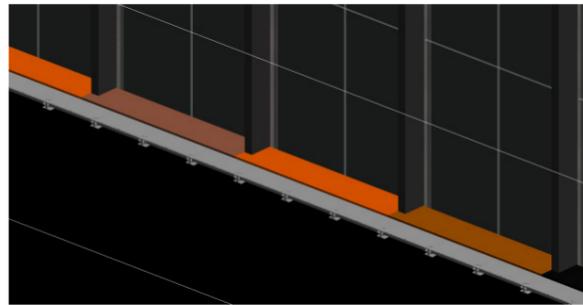


图7 在BIM模型中进行信息化的模数划分

(3) 可靠连接

部品的干作业安装是装配式装修的表现形式。各个部品间的连接方式包括了焊接、铆接、物理搭接、机械连接等，在现场装配过程中，应根据构件位置进行合理的连接方式进行可靠连接，特殊部位如卫生间的防水部位，应进行多层次防水抗渗处



图8 卫生间部品墙面地面防水方式

理，保证部品与整体之间的强度、刚度、稳定性及其他特殊要求。

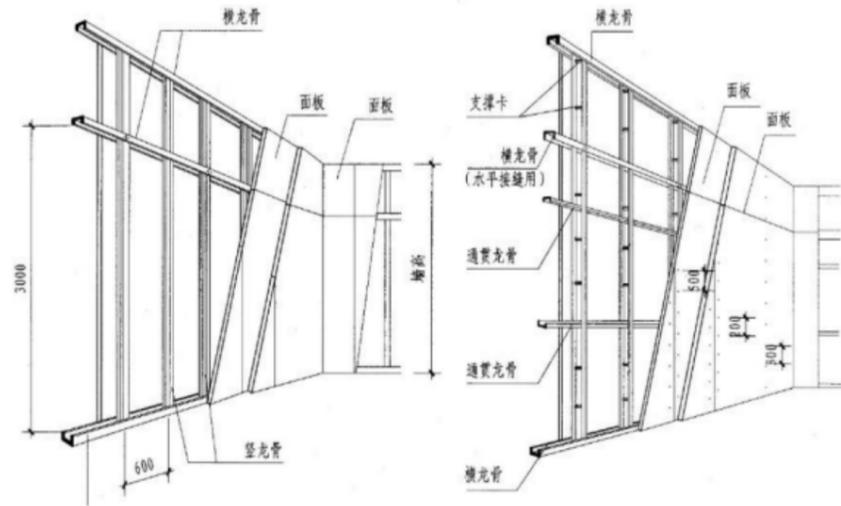


图9 墙面龙骨与板件连接

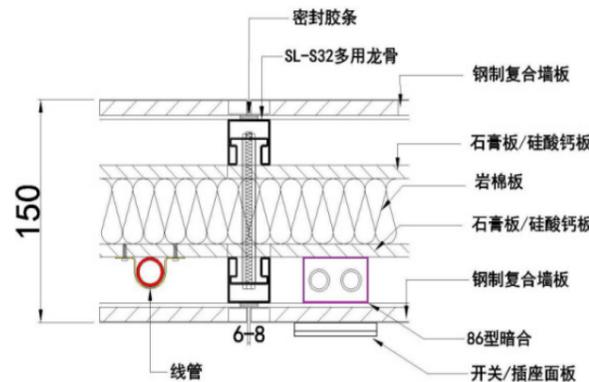


图10 装配式隔墙连接方式

(4) 效果整体

装饰效果的呈现是装配式装修的最终目的。装配式装修的呈现效果一方面是饰面装饰效果因素，另一方面取决于部品的组装，而组装的工艺不可避免的带来施工缝隙的存留，这种情况下就需要进行考量，是刻意留缝作造型上的分割，还是采取密拼的形式，或是将缝隙留在视野盲区，这些都需在设计阶段进行充分的考量。安装时也需严格按照设计要求进行操作，保证结构稳定性、安全性的同时，最大限度地满足整体的视觉效果。



图11 装配式隔墙墙面拼装效果

5 结语

综上所述，当前社会背景下，装配式装修方式有着多方面的竞争性优势，信息化、标准化、智能化的施工特点也将成为未来装饰装修行业发展的趋势。同时装配式装修也具有一定的局限性，如目前装配式装修技术系统不完善、还原设计标准程度受限、行业管理不成熟等问题。因此，装配式装修体系必须在实践中不断更新，继续推广，结合BIM技术使用到装饰装修工程的全过程当中，推进具有前瞻性的标准化装修体系的建设，实现设计、生产、

施工、使用、维护的全寿命周期一体化管理，节约资源，解放劳动力，进一步推动装饰装修行业的产业升级。

参考文献

[1]张庆勇,郑碧森,王科伟.传统装修与装配式装修的对比分析[J].中国住宅设施,2021(01):57-58.  
 [2]黄梅平.装配式装修应用分析[J].福建建设科技,2022(02):103-104+116.  
 [3]王强,王炜,石利汝,王瑶.装配式装修基础部品低碳化及重要性研究[J].世界建筑,2021(07):52-57+128. DOI:10.16414/j.wa.2021.07.010.  
 [4]连世洪.装配式装修技术工程实践及发展建议[J].福建建筑,2021(11):82-85.  
 [5]刘运林,胡章桂.装配式装修技术在建设工程中的应用[J].洛阳理工学院学报(自然科学版),2020,30(01):42-46.  
 [6]顾盼.现行标准对装配式装修的适用性研究[D].东北林业大学,2018. DOI:10.27009/d.cnki.gdbl.2018.000014.  
 [7]昌盛.装配式装修在内装产业化发展中的应用[J].居舍,2020(22):27-28+92.  
 [8]张晟熙.装配式装修部品设计要素分析[J].建筑,2019(14):73-75.

# MICP固化建筑渣土抗风蚀扬尘影响因素试验研究

刘忠<sup>1</sup>, 黄旭生<sup>1</sup>, 刘飞飞<sup>2</sup>, 肖水明<sup>1</sup>, 张敏霞<sup>2</sup>

(1. 深圳市市政工程总公司沥青公司, 深圳 518033; 2. 河南理工大学, 焦作 454003)

**[摘要]** 为系统研究钙源、胶结液浓度、菌液浓度、温度和胶结液pH值等对MICP固化工程裸土抗风蚀扬尘的影响, 试验设计开展了单因素正交MICP固化建筑渣土试验和风洞试验, 同时辅以SEM和XRD等微观手段。试验结果表明: 以氯化钙为钙源, 胶结液浓度为0.5mol/L, 菌液浓度(OD<sub>600</sub>)为4.0, 温度为20℃~40℃, 中性或弱碱性环境MICP固化建筑渣土抗风蚀效果最佳; MICP固化建筑渣土的易溶盐含量和pH值最大增幅分别为0.92%和0.20, MICP固化对原有建筑工程渣土影响较小。研究成果符合当前国家低碳环保需求, 且环境友好性强。

**[关键词]** MICP; 建筑渣土; 抑尘; 影响因素; 微观机理

## Experimental study on influence factors of anti-wind erosion and anti-dust of MICP consolidated construction waste residue

Liu Zhong<sup>1</sup>, Huang Xusheng<sup>1</sup>, Liu Feifei<sup>2</sup>, Xiao Shuiming<sup>1</sup>, Zhang Minxia<sup>2</sup>

(1. Shenzhen Municipal Engineering Corporation Asphalt Co., Ltd., Shenzhen, 518033;

2. Henan University of Technology, Jiaozuo, 454003)

**Abstract:** In order to systematically study the effects of calcium source, cementing solution concentration, bacteria solution concentration, temperature and cementing fluid pH value of microbial liquid on wind erosion dust resistance of MICP consolidated construction engineering residue, single-factor orthogonal MICP consolidated construction residue test and wind tunnel test were carried out, supplemented by SEM and XRD microscopic methods. The test results showed that using calcium chloride as calcium source, the concentration of cementation solution is 0.5mol/L, the concentration of bacterial solution (OD<sub>600</sub>) is 4.0, the temperature is 20℃~40℃, and the wind erosion resistance effect of MICP consolidated construction waste residue in neutral or weak alkaline environment is better. The maximum increases of soluble salt content and pH value of MICP consolidated construction waste residue were 0.92% and 0.20 respectively. MICP consolidation had little influence on the original construction waste residue. The research results are in line with the current national low-carbon environmental protection needs, and environmentally friendly.

**Keywords:** Microbial induced calcite precipitation (MICP); Construction waste residue; Dust suppression, Influence factor; Microscopic mechanism

## 0 引言

建筑渣土风蚀扬尘作为主要的建筑扬尘源之一, 严重危害大气空气质量, 威胁人类身体健康<sup>[1-3]</sup>。我国政府为治理生态环境, 改善人民居住环境, 不惜采取史上“最强停工令”、“封土行动”等措施控制环境质量, 此类措施简单高效, 但存在粗暴且可能引发延误工期、工人流失等问题, 对企业造成较大的经济损失, 严重影响我国经济与基础建设的快速发展。施工单位也积极采取各种措施对建筑扬尘进行防治, 常用工程裸土风蚀扬尘控制措施包括铺设防尘网、临时铺装/硬化、植物覆盖、洒水降尘及喷洒抑尘剂等, 但这些措施在使用过程中普遍存在操作繁琐、费用高昂、产生二次污染等难以忽视的缺点<sup>[4-6]</sup>。

微生物诱导生成碳酸钙(Microbial Induced Calcite Precipitation, MICP)固化建筑渣土抗风蚀扬尘, 因具有见效快、成本低和环境友好等特点已受到广泛关注<sup>[7-9]</sup>。MICP固化裸土效果直接影响其抗风蚀扬尘能力, 高玉峰等<sup>[10]</sup>利用微生物固化标准砂表面, 发现适当提高处理液体积、浓度和菌液浓度均可提高MICP固化效果; Bang等<sup>[11, 12]</sup>在不同环境温度、不同湿度条件下分别对级配良好与不良的砂土进行表面微生物处理, 发现在较低湿度、较高温度环境下, MICP固化级配良好的土体抗风蚀扬尘能力较好; Wang等<sup>[13]</sup>的研究发现随MICP固化次数的增加, 砂土表面硬砂层厚度和抵抗开裂、风蚀的能力增加; 还有学者研究发现细菌种类、土体类型和钙源等也与MICP固化效果密切相关<sup>[14, 15]</sup>; 目前对MICP固化砂土的抗风蚀扬尘方面研究较多, 鉴于建筑渣土风蚀扬尘对当前环境的影响和危害, 有必要开展对MICP固化工程裸土抗风蚀扬尘机理及其影响因素的系统研究。

本文通过MICP固化建筑工程渣土和室内风洞试验, 研究钙源、胶结液浓度、菌液浓度和pH值、温度等因素对MICP固化建筑渣土效果和抗风蚀扬尘能力的影响; 采用X射线三维显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)和X射线衍射仪(X-Ray Diffraction, XRD), 揭示MICP固化建筑渣土抗风蚀扬尘的微观机理及其生态兼容特性, 以其为今后MICP固化建筑渣土抗风蚀扬尘的系统研究

和进一步开发应用提供参考。

## 1 试验设计

### 1.1 MICP固化溶液

MICP固化溶液包含菌液和胶结液。菌液采用培养所得菌液, 试验用微生物为巴氏芽孢杆菌(Sporosarcina paste, CGMCC1.3687), 该脲酶菌为非致病性高活性土壤菌。细菌培养基主要成分: 酵母提取物、NH<sub>4</sub>Cl、MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O和NiCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O。将配置完成的培养液用1mol/L氢氧化钠调节pH至9左右, 用高压灭菌锅121℃高温蒸汽灭菌, 冷却并进行紫外线灭菌后接种, 然后将培养液置于振荡培养箱(设置温度为30℃、转速为200r/min)中培养16~24h得到原菌液。胶结液为尿素与氯化钙按浓度比1:1混合的溶液。

### 1.2 试验用土及试样制备

采用BT-9300SE激光粒度仪测定其颗粒组成, 其中C<sub>10</sub>=15.26, C<sub>c</sub>=2.56, 级配良好, 颗粒级配曲线详情如图1所示, 控制干密度约为1.20g/cm<sup>3</sup>, 分层均匀铺设, 表面整平, 试样表面积为840cm<sup>2</sup>, 如图2所示。

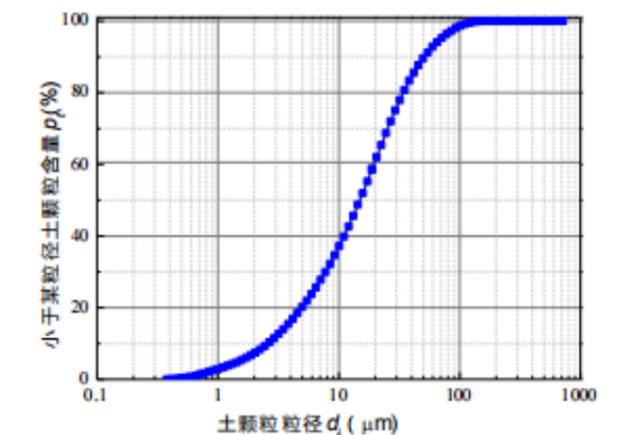


图1 试验用土土颗粒级配曲线

试验模型箱: 试验采用长×宽×高=35cm×24cm×10cm的无盖长方形有机玻璃箱, 可直接观测微生物菌液的沿程入渗情况及土样固化深度。

### 1.3 MICP固化方法

采用喷洒法开展微生物固化工程裸土试验: 使用手持式喷壶先均匀喷洒菌液, 喷嘴距离试样表面



图2 建筑渣土试样

约10cm，喷洒完成后静置30分钟，使微生物在土壤中的入渗与固定，再向土样中喷洒胶结液。喷洒完毕后，将试样置于室温（约20℃）下养护7天。菌液喷洒量为0.5L/m<sup>2</sup>，胶结液喷洒量为1L/m<sup>2</sup>，并设

表1 土的基本物理指标

天然密度g·cm <sup>-3</sup>	最大干密度g·cm <sup>-3</sup>	最小干密度g·cm <sup>-3</sup>	控制干密度g·cm <sup>-3</sup>	液限%	塑限%	含水率%	D50μm	D90μm
1.67	1.51	1.00	1.20	24.6	16.7	0.75	12.36	36.82

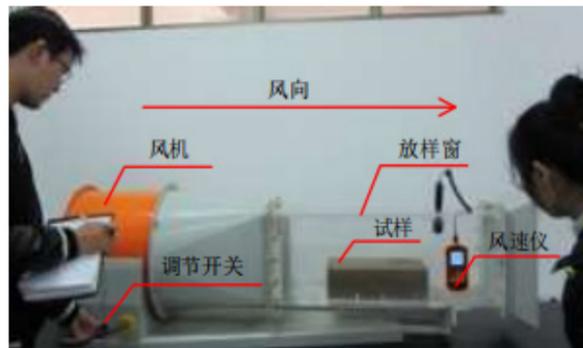


图3 MICP固化土样抗风蚀能力检测

## 2.2 表面强度测试

MICP固化工程裸土表面强度主要是指试样表层MICP固化硬壳层的强度，硬壳层强度越高，试样抵抗风力破坏的能力越强，是判断试样能否长期抵抗风蚀的一个重要评判依据。表面强度测试采用WXGR-2型微型贯入仪进行，制备并养护两组平行MICP固化试样分别用于风蚀前后表面强度测试，测量时将测头匀速从试样表面贯入土内至测头上刻线与土面接触为止，如图4所示，单个试样在表面取3个点进行测量取平均值。

## 2.3 矿物成分和微观结构测试

采用河南理工大学国家重点实验室的

置不同钙源、胶结液浓度、菌液浓度、度和pH值等变量，研究其对MICP固化程度的影响。

## 2 MICP固化效果测试

### 2.1 抗风蚀能力测试

试验采用小型风洞试验机进行抗风蚀能力试验，测试不同等级风速条件下试样的质量损失，以反映MICP固化试样在不同风力条件下的抗风蚀扬尘能力，如图3所示。

土壤扬尘起动风速一般在4-7m/s范围内，而北方地区为我国裸土风蚀扬尘主要释放源区，该区出现8级以上风速的天数较少<sup>[17-20]</sup>，因此试验设计6m/s、9m/s、12m/s、15m/s等四个等级风速，分别对应4~7级风，各级风速下风洞试验持续10min，试验前后分别记录试样的质量，质量差即表示试样在该级风速下的质量损失。



图4 微生物加固土样表面强度检测

D8ADVANCE型X射线衍射（X-Ray Diffraction, XRD）仪和X射线三维显微镜（Scanning Electron Microscope, SEM），测试MICP固化建筑渣土矿物成分变化和微观结构。X射线衍射检测试验过程中电压设定为40kV，电流设定为40mA，扫描速度6°/min，扫描范围5°~80°。

### 2.4 易溶盐含量及酸碱度测定

MICP固化土建筑渣土易溶盐含量及pH值的测定参照《土工试验方法标准-GBT50123-2019》<sup>[16]</sup>进行，其碳酸钙含量参照《水质钙的测定EDTA滴定法》<sup>[21]</sup>进行测定，每个试样进行3次平行试验，取平均值。

## 3 MICP固化建筑渣土抗风蚀扬尘影响因素分析

### 3.1 钙源影响

为研究钙源对MICP固化建筑渣土抗风蚀扬尘能力的影响，在常温20℃分别采用氯化钙、硝酸钙和乙酸钙三类钙源对工程渣土进行固化，胶结液浓度1.0mol/L，菌液浓度/OD<sub>600</sub>为6.0，胶结液pH值为9，试样编号分别为Z1-1、Z1-2、Z1-3。

对各试样依次开展室内风洞试验，实测了不同钙源条件下MICP固化建筑渣土的风蚀质量损失，如图5所示。由图5可知，在相同条件下，钙源对MICP固化建筑渣土试样累计风蚀质量损失影响明显；在6m/s、9m/s、12m/s、15m/s风速下各试样累计风蚀质量损失逐渐增大，但始终Z1-1<Z1-2<Z1-3，表明风速是影响土壤扬尘的重要因素，氯化钙作为MICP固化钙源，累计风蚀质量损失最小，即抗风蚀扬尘能力最好；在最大风速15m/s条件下各试样累计质量损失均在100g以下，微生物固化建筑工程渣土可有效控制其风湿扬尘量。

采用WXGR-2型微型贯入仪分别对风洞试验前后的不同钙源MICP固化建筑渣土表面强度进行测试，所得结果如图6所示。氯化钙、硝酸钙和乙酸钙三类钙源固化建筑渣土表面强度分别为：73.90kPa、63.39kPa、46.13kPa和61.67kPa、48.91kPa、28.29kPa，强度损失率分别为：16.5%、22.8%、38.7%，微生物固化建筑渣土表面强度Z1-1>Z1-2>Z1-3，风洞试验强度损失率则呈相反规律：强度：Z1-1<Z1-2<Z1-3，即氯化钙为钙源微生物固化建筑渣土表面强度最高且风洞试验后强度损失率最低，其抗风蚀扬尘能力最强。

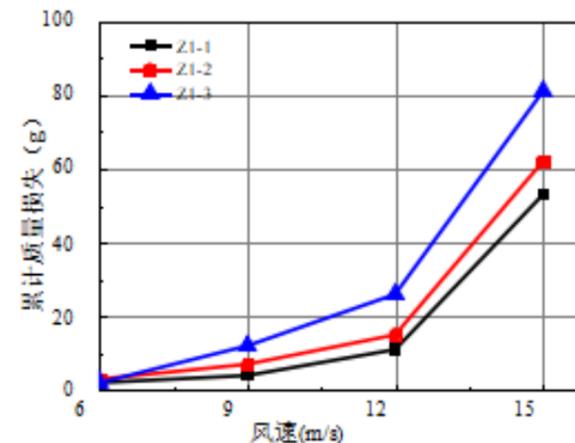


图5 钙源对MICP固化建筑渣土抗风蚀扬尘能力的影响

EDTA滴定法分别对不同钙源MICP固化建筑渣土的易溶盐碳酸钙含量进行测试，氯化钙、硝酸钙和乙酸钙三类钙源微生物固化渣土的碳酸钙含量分别为：1.498%、1.402%、1.232%，显然Z1-1>Z1-2>Z1-3，渣土原状样中碳酸钙含量仅为0.07%，氯化钙、硝酸钙和乙酸钙为钙源微生物诱导产生较多的碳酸钙晶体，但以氯化钙为钙源微生物诱导产生的碳酸钙晶体最多，因此其固化效果也最好，抗风蚀扬尘能力也最强，与风洞试验结果吻合。

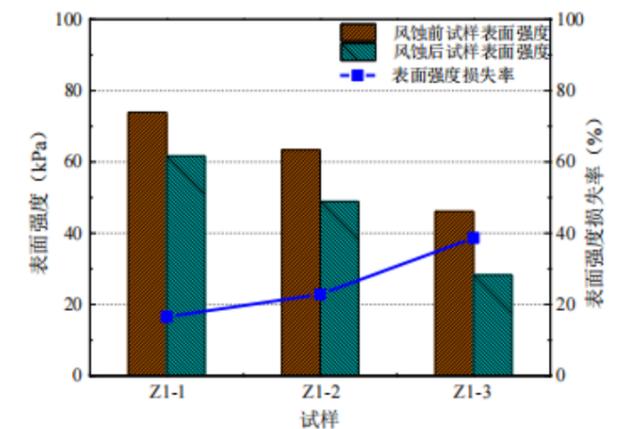


图6 钙源对MICP固化建筑渣土的表面强度和表面强度损失率影响

### 3.2 胶结液浓度影响

为分析胶结液浓度对MICP固化建筑渣土抗风蚀扬尘能力的影响，在常温20℃以氯化钙为钙源微生物诱导固化渣土，菌液浓度/OD<sub>600</sub>为6.0，胶结液pH值为9，胶结液浓度分别为0.10mol/L、0.25mol/L、0.50mol/L、0.75mol/L、1.0mol/L，试样编号分别为Z2-1、Z2-2、Z2-3、Z2-4和Z2-5。

通过室内风洞试验，胶结液浓度对MICP固化建筑渣土抗风蚀扬尘能力影响如图7所示；由图7可以看出，在各级风速条件下，胶结液浓度越高，则MICP固化建筑渣土累计质量损失越小，其抗风蚀扬尘能力越强；特别是胶结液浓度从0.10mol/L增至0.50mol/L时，累计风蚀质量损失降低显著，而胶结液浓度增至0.75mol/L和1.0mol/L时，MICP固化渣土的累计风蚀质量损失降幅则不明显。

对风洞试验前后的不同胶结液浓度MICP固化建筑渣土表面强度进行测试，结果如图8所示。由图8可知，胶结液浓度对MICP固化建筑渣土的表面强度的影响具体表现为：当胶结液浓度从0.10mol/L增至

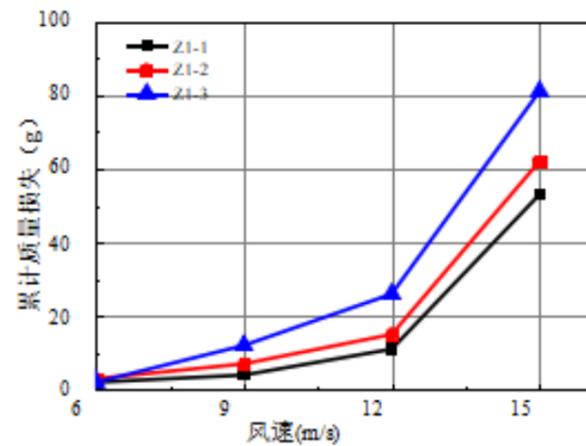


图7 胶结液浓度对MICP固化建筑渣土抗风蚀扬尘能力影响

0.50mol/L时, 试样表面强度显著提高, 继续增加至0.75mol/L和1.0mol/L时, 试样表面强度略有增加, 但增幅较小; 风蚀会降低各胶结液浓度下MICP固化建筑渣土的表面强度, 风蚀后强度损失率分别为: 65.99%、34.63%、22.34%、16.24%、16.55%, 呈随着胶结液浓度越高, 其强度损失率越小的趋势, 但是当胶结液浓度达0.5mol/L时, 随后的强度损失率降低幅度减小, 且强度损失率试样Z2-5略大于试样Z2-4, 表明胶结液不是浓度越高, 其抗风蚀扬尘能力越好。

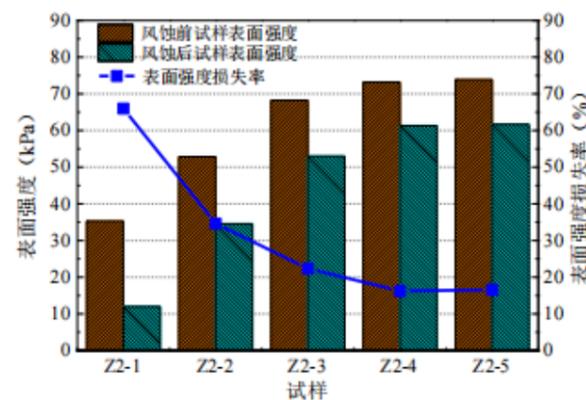


图8 胶结液浓度对MICP固化建筑渣土表面强度的影响

EDTA滴定法测得Z2-1、Z2-2、Z2-3、Z2-4和Z2-5的碳酸钙含量分别为: 0.57%、0.81%、1.13%、1.38%和1.50%, 胶结液浓度越高, 则碳酸钙含量越高, 但当胶结液浓度大于0.5mol/L时, 微生物诱导产生的碳酸钙增长率却略有下降, 综上所述三个因素,

胶结液浓度经济合理的宜为0.5mol/L左右。

### 3.3 菌液浓度影响

为研究菌液浓度对MICP固化建筑渣土抗风蚀扬尘能力的影响, 在常温20℃以氯化钙为钙源微生物诱导固化渣土, 试验设计菌液浓度 ( $/OD_{600}$ ) 分别为0.5、1.0、2.0、4.0和6.0, 胶结液pH值为9, 胶结液浓度为0.50mol/L, 试样编号分别为Z3-1、Z3-2、Z3-3、Z3-4和Z3-5。菌液浓度对MICP固化建筑渣土抗风蚀扬尘能力的影响如图9所示。由图9可知, 相同菌液浓度下, 风速越大, 则试样累计风蚀质量损失越大; 在各级风速下, 菌液浓度越高, 则试样累计风蚀质量损失越小, 其抗风蚀扬尘能力则越高, 特别是菌液浓度 ( $/OD_{600}$ ) 从0.5增至2.0时, 累计风蚀质量损失降低显著, 而菌液浓度 ( $/OD_{600}$ ) 继续增加至4.0和6.0, MICP固化渣土的累计风蚀质量损失降幅则不明显。

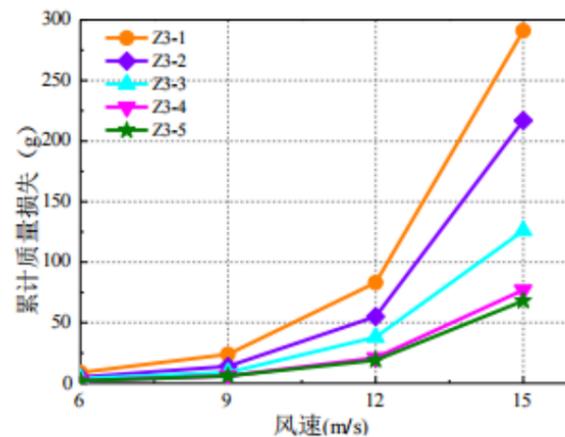


图9 不同菌液浓度对MICP固化建筑渣土抗风蚀扬尘能力的影响

对风洞试验前后的不同菌液浓度MICP固化建筑渣土试样表面强度进行测试, 结果如图10所示。由图10可知, 风洞试验前, MICP固化建筑渣土试样表面强度随着菌液浓度升高而升高; 但强度增长则分为两个阶段, 当菌液浓度 ( $/OD_{600}$ ) 从0.5增至4.0时, 试样表面强度显著提高; 4.0增加至6.0时, 试样表面强度增加速度减小。风洞试验后, MICP固化建筑渣土试样表面强度均有所下降, Z3-1~Z3-5试样风蚀后强度损失率分别为: 65.99%、34.63%、22.34%、16.24%、

16.55%, 呈胶结液浓度越高, 其强度损失率越小的趋势, 但是当菌液浓度 ( $/OD_{600}$ ) 超过4.0

时, 随后的强度损失率降低幅度减小, 且强度损失率试样Z3-5略大于试样Z3-4, 表明菌液浓度 ( $/OD_{600}$ ) 不是浓度越高, 其抗风蚀扬尘能力越好。

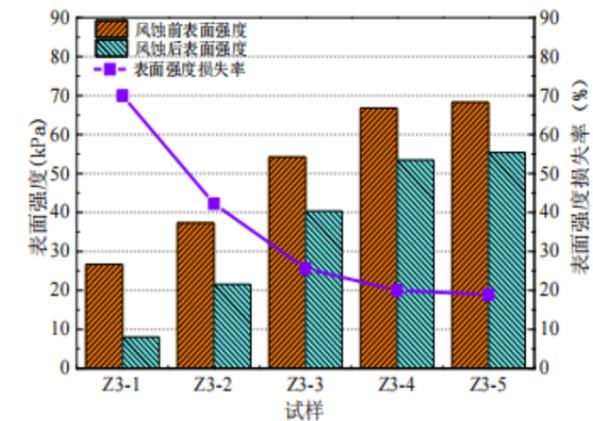


图10 菌液浓度对MICP固化建筑渣土的表面强度的影响

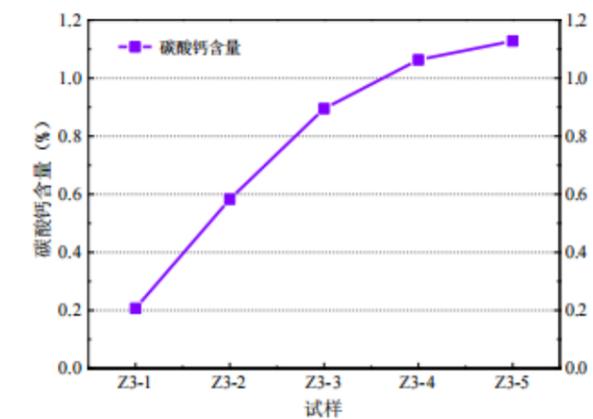


图11 菌液浓度对MICP固化建筑渣土碳酸钙含量的影响

EDTA滴定法测得Z3-1~Z3-5的碳酸钙含量如图11所示, MICP固化建筑渣土试样的碳酸钙含量随着菌液浓度的增高而增长, 但当菌液浓度 ( $/OD_{600}$ ) 大于4.0时, 微生物诱导产生的碳酸钙增长率相对降低, 综上所述三个因素, 推荐菌液浓度 ( $/OD_{600}$ ) 为4.0。

### 3.4 温度影响

为研究温度对MICP固化建筑渣土抗风蚀扬尘能力的影响, 以氯化钙为钙源、菌液浓度 ( $/OD_{600}$ ) 为4.0、胶结液pH值为9, 胶结液浓度为0.50mol/L, 试验设置温度分别为10℃、20℃、30℃和40℃, 对应的试样编号分别为Z4-1、Z4-2、Z4-3和Z4-4。

通过室内风洞试验, 温度对MICP固化建筑工程渣土抗风蚀扬尘能力影响如图12所示。由图12可

知, 温度对MICP固化建筑工程渣土抗风蚀扬尘能力影响存在一个峰值, 在各级风速下, 试样Z4-3 (30℃) 风蚀质量损失最小。

温度对菌液活性和MICP固化建筑渣土表面强度影响13所示。对比分析图12和图13, 温度对细菌活性的影响与对MICP固化试样抗风蚀扬尘能力的影响相互吻合, 存在峰值, 即当环境温度为30℃时, 菌液活性最高, MICP固化建筑渣土试样抗风蚀扬尘能力也最好。表明微生物的新陈代谢、分泌脲酶等生命过程受环境温度的影响, 30℃为细菌进行生命活动的适宜温度, 在该环境温度下, 微生物活性高, 诱导生成的碳酸钙晶体较多, 建筑渣土试样固结效果较好, 其表面强度和抗风扬尘能力较高。

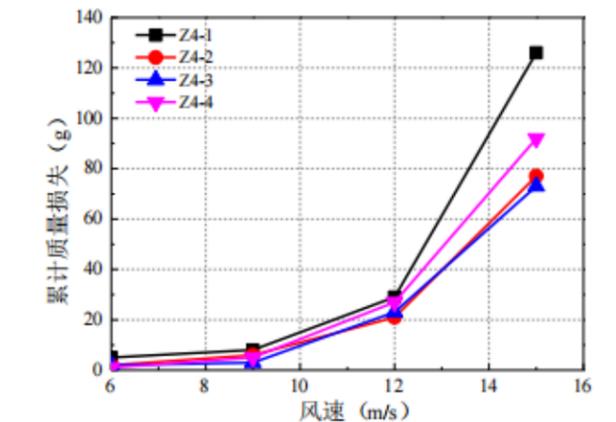


图12 温度对MICP固化建筑渣土抗风蚀扬尘能力影响

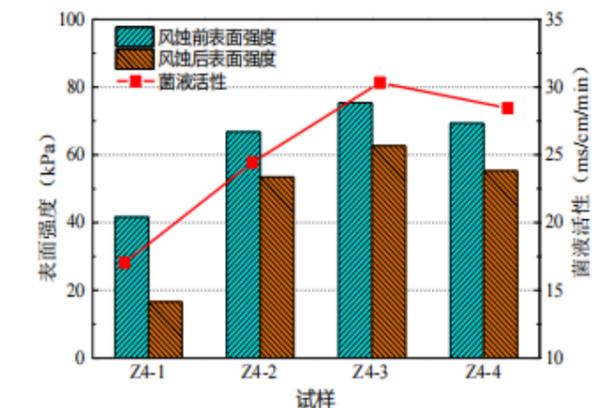


图13 不同温度下菌液活性和MICP固化建筑渣土表面强度

### 3.5 胶结液pH值影响

为研究胶结液pH值对MICP固化建筑渣土抗风蚀扬尘能力的影响, 以氯化钙为钙源、菌液浓度 ( $/$

OD<sub>600</sub>)为4.0、胶结液浓度为0.50mol/L、温度为30℃, 试验设置胶结液pH值分别为5、7、9、11, 对应的试样编号分别为Z5-1、Z5-2、Z5-3和Z5-4。

胶结液pH值对MICP固化建筑渣土抗风蚀扬尘能力影响如图14所示, 由图14可知, 随着胶结液pH值从5增加到9, 试样风蚀质量损失整体呈减小的趋势; pH值从9增加到11的过程中, 试样风蚀质量损失开始增加, 即当胶结液pH值为9时, MICP固化建筑渣土效果最好, 风蚀质量损失最小。

胶结液pH值对菌液活性和MICP固化建筑渣土表面强度影响如图15所示, 胶结液pH值对菌液活性和MICP固化建筑渣土表面强度的影响与MICP固化建筑渣土抗风蚀扬尘能力影响高度吻合, 表明酸性和强碱性环境会破坏微生物菌体, 甚至导致微生物菌体死亡溶解, 进而影响微生物产酶量, 同时脲酶的主要成分蛋白质为两性电解质, 过高或过低的胶结液pH值均会在一定程度上抑制脲酶活性, 进而影响碳酸钙产量, 导致试样表面胶结较弱, 表面强度难以得到较高的提升, 由图14和图15可知, 过高或过低的胶结液pH值对试样抗风蚀扬尘能力、菌液活性和试样表面强度均存在不利影响, 胶结液pH值宜为9。

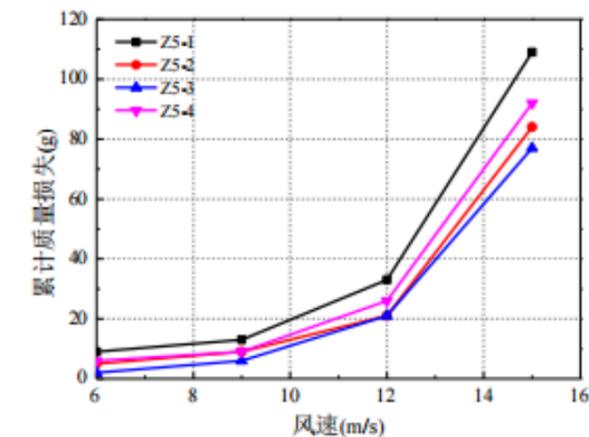


图14 胶结液pH值对MICP固化建筑渣土抗风蚀扬尘能力影响

#### 4 MICP固化建筑渣土组成及微观结构特性

##### 4.1 微观结构特性

采用X射线三维显微镜分别对洒水建筑渣土试样和MICP固化建筑渣土试样进行扫描, 其微观结构分别如图16(a)和(b)所示。洒水建筑渣土试样(图16(a))表面疏松, 孔隙明显, 土颗粒表面附着一定量片状或粒状矿物质, 孔隙处无明显碳酸钙沉淀沉积, 可清晰观察到土颗粒表面且土颗粒

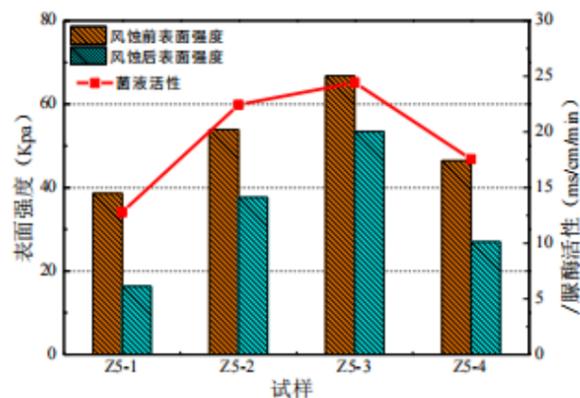


图15 胶结液pH值对菌液活性和MICP固化建筑渣土表面强度影响

表面较为平整光滑。MICP固化建筑渣土试样(图16(b))表面较为密实, 由于微生物诱导矿化生成了较多碳酸钙矿物质, 覆盖在土颗粒表面, 部分孔隙区可看到矿物胶结, 试样表面呈现整体胶结均匀、结构密实的特点, 形成了一层有效的硬壳层, 起到了有效提高建筑工程渣土抗风蚀扬尘目的。

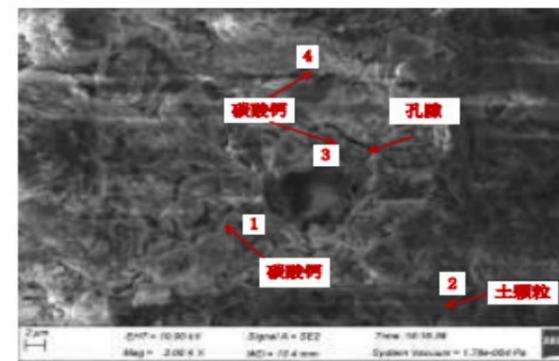
采用X射线能谱分析仪对MICP固化建筑渣土试样进行扫描分析, 分析图16中位置1和2的矿物成分, 其对应的EDS能谱图分别如图17(a)和(b)所示。对比分析发现, 图17(a)比图16(b)的Ca元素显著增多, Si元素含量明显减少, 可判断位置1处为微生物诱导矿化生产的碳酸钙矿物质, 且矿物质为钙的化合物方解石晶体, 位置2为土颗粒表面。

##### 4.2 矿物组成

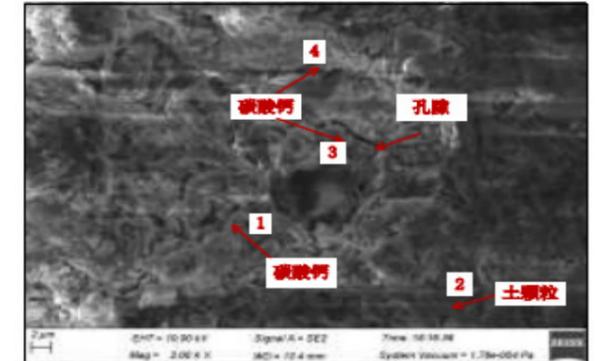
为进一步确认微生物固化产生的物质结构, 采用X射线衍射技术(XRD)对微生物固化建筑渣土前后试样进行扫描, 其对应的XRD图谱分别如图17(a)和(b)所示。

对比分析发现, MICP固化后的建筑渣土XRD谱图中方解石特征峰强度显著增强, 结合EDS能谱图17(b), MICP固化建筑渣土过程中生成矿物质为方解石晶体, 同时还可由SEM图16(b)可观测到方解石晶体形貌主要为球状和片状晶体, 与彭劫等<sup>[22]</sup>利用微生物加固有机黏土时所沉积球状颗粒碳酸钙沉淀和Soon等<sup>[23]</sup>固化粉土过程中所沉积的片状晶体吻合。

MICP固化建筑渣土土样的电镜扫描图16(b)、EDS能谱图17(a)和XRD图谱图1(b)多手段测试研究均表明, 即从微观结构和矿物构成角度

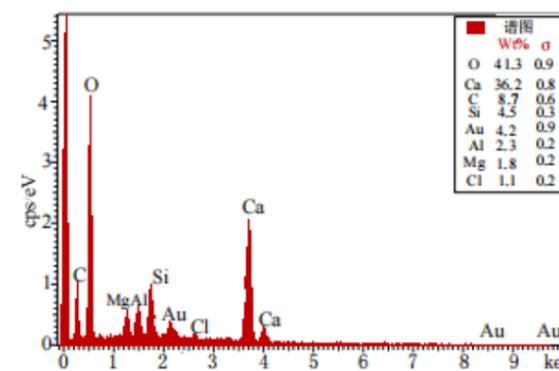


(a) 洒水试样(2000倍)

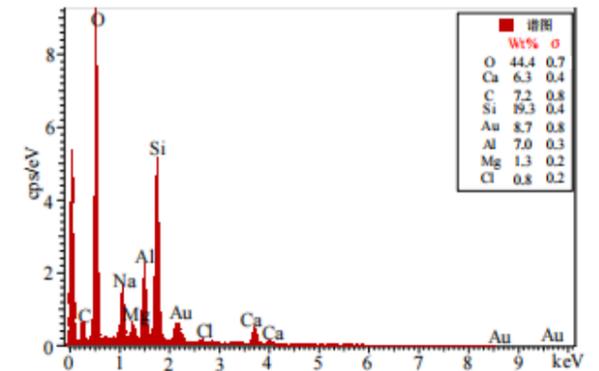


(b) MICP 固化试样(2000倍)

图16 洒水建筑渣土和MICP固化建筑渣土微观结构



(a) 位置1

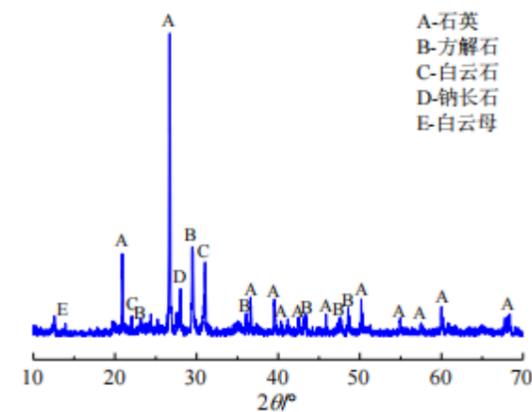


(b) 位置2

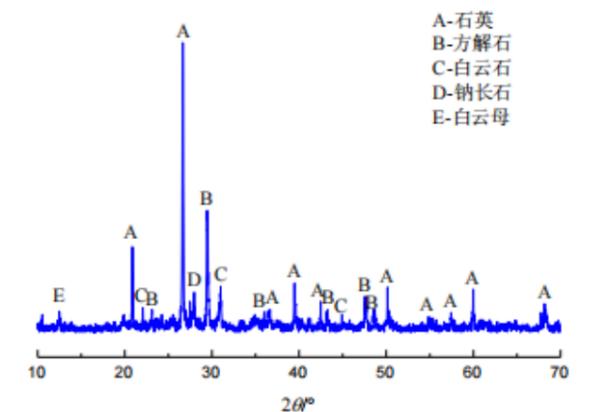
图17 MICP固化建筑渣土试样EDS能谱图

分析, 微生物诱导产生的矿物质主要为碳酸钙, 沿微生物菌液入渗路径在土颗粒表面结晶或者胶结形成方解石晶体, 起增大土颗粒粒径和填充孔隙的作用, 随着矿化反应的进行, 土颗粒表面和孔隙间

方解石不断累积增长, 逐渐发挥胶结相邻土颗粒的作用, 在土体表面形成MICP固化层, 增大土体表面强度, 从而有效提高建筑工程渣土抗风蚀扬尘能力。



(a) MICP固化前建筑渣土



(b) MICP固化后建筑渣土

图18 MICP固化前后建筑渣土的XRD图谱

### 4.3 易溶盐含量和 pH 值

为了研究MICP固化对建筑工程渣土易溶盐含量和pH值的影响,考虑胶结液是影响MICP固化建筑渣土pH值的主要因素,试验实测了表3中MICP固化建筑工程渣土的易溶盐含量和pH值,实测结果如表2所示。与建筑渣土原状样Z相比,不同胶结液浓度

MICP固化建筑渣土易溶盐含量均有略微增加,但增加最大为0.92%;MICP固化建筑工程渣土后其pH值也略微增长,最大增长值为0.20;可见MICP固化对建筑工程渣土的易溶盐含量和土壤pH值影响较小,具有较好的生态兼容特性;即MICP固化建筑渣土可有效抵抗风蚀扬尘,且兼具环境友好的特性。

表2 MICP固化前后土样易溶盐含量和pH值

试样编号	固化前pH值	固化后pH值增量	固化前易溶盐含量(%)	固化后易溶盐含量增量(%)	试样编号
Z	8.40	-	0.33	-	Z
Z2-1	8.36	-0.04	0.50	+0.17	Z2-1
Z2-2	8.46	+0.06	0.58	+0.25	Z2-2
Z2-3	8.53	+0.13	0.92	+0.59	Z2-3
Z2-4	8.60	+0.20	1.25	+0.92	Z2-4
Z2-5	8.56	+0.16	1.08	+0.75	Z2-5

### 5 结论

本文通过单因素正交试验设计开展了微生物固化建筑渣土试验,同时采用风洞试验和表面强度测试分析了钙源、胶结液浓度与pH值、菌液浓度、温度等对其固化效果和抗风蚀扬尘能力的影响;采用SEM和XRD等微观手段测试,揭示微生物固化建筑渣土抗风蚀扬尘机理及对土体组成、易溶盐含量和pH值的影响,具体结论如下:

(1) 试验研究表明MICP固化建筑渣土抗风蚀扬尘影响因素较多:采用氯化钙为钙源、胶结液浓度和pH值分别为0.50mol/L和9、菌液浓度(OD<sub>600</sub>)为4.0、环境温度为30℃时,MICP固化建筑渣土效果较佳,在建筑渣土表面可形成一层固结硬壳,有效提高建筑工地建筑渣土抗风蚀扬尘能力,同时兼具较好的经济性。

(2) 微观结构分析表明:MICP诱导产生的碳酸盐类矿物,矿化结晶会产生方解石晶体,方解石沉淀或附着在土颗粒表面或相邻土颗粒间,起到增大土颗粒粒径和胶结相邻土颗粒的作用,使松散建筑渣土表面胶结在一起,增强建筑渣土表面强度,提高建筑渣土抗风蚀扬尘能力。

(3) 易溶盐含量和pH值测试发现,MICP固化后建筑渣土的易溶盐含量和pH值均产生微小增长,最大增幅分别为0.92%和0.20,对原有建筑工程渣土的易溶盐含量和pH值影响较小,表明MICP固化建筑渣土不仅可有效抗风蚀扬尘,还符合当前国家绿色低碳发展需求。

### 参考文献

- [1]Douglas W.Dockery CAPX. An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities[J].The New England Journal of Medicine, 1993,329(24):1753-1759.
- [2]Pryor S C, Simpson R, Guise-Bagley L et al. Visibility and Aerosol Composition in the Fraser Valley During Reveal[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1997,47(2):147-156.
- [3]田延振.工地建筑扬尘对大气污染的影响及其防治对策[J].环境与发展, 2018,30(11):69-72.
- [4]Yan W, Hoekman S. Dust Suppression with Glycerin from Biodiesel Production: A Review[J]. Journal of Environmental Protection, 2012,3:218-224.
- [5]江召兵,张倩,杨峰等.施工工地扬尘治理工程技术概述[J].

- [6]薛丹,刘小彬.深圳市裸土地扬尘污染治理成效与提升对策[J].环境科学导刊, 2019,38(05):66-70.
- [7]Naeimi M, Chu J. Comparison of conventional and bio-treated methods as dust suppressants[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017,24(29):23341-23350.
- [8]Tian K, Wu Y, Zhang H et al. Increasing wind erosion resistance of aeolian sandy soil by microbially induced calcium carbonate precipitation[J]. Land Degradation & Development, 2018,29(12):4271-4281.
- [9]Zhan Q, Qian C, Yi H. Microbial-induced mineralization and cementation of fugitive dust and engineering application[J]. Construction and Building Materials, 2016,121:437-444.
- [10]高玉峰,杨恩杰,何稼.基于微生物诱导碳酸钙沉积的防风固沙试验研究[J].河南科学, 2019,37(01):144-150.
- [11]S B, H M S, S B S. Application of Microbiologically Induced Soil Stabilization Technique for Dust Suppression[J].International Journal of Geo-Engineering, 2011,3(2):27-37.
- [12]D M F, S B, S M et al. Microbiologically- Induced Soil Stabilization: Application of Sporosarcina pasteurii for Fugitive Dust Control[C]: 4002-4011.
- [13]Wang Z, Zhang N, Ding J et al. Experimental Study on Wind Erosion Resistance and Strength of Sands Treated with Microbial- Induced Calcium Carbonate Precipitation[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018,2018:3463298.
- [14]Oliveira P J V, Freitas L D, Carmona J O P S. Effect of Soil Type on the Enzymatic Calcium Carbonate Precipitation Process Used for Soil Improvement[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016:4016263.
- [15]明道贵,邱明喜,殷立静等.钙源对微生物固化风积沙效果影响的试验研究[J].人民黄河, 2020,42(4):85-88, 111.
- [16]中华人民共和国水利部.《土工试验方法标准》GBT 50123-2019[G].北京:中国计划出版社,2019.
- [17]Song H, Zhang K, Piao S et al. Spatial and temporal variations of spring dust emissions in northern China over the last 30 years[M]. 2016: 117-127.
- [18]Jiang L, Xiao Y, Zheng H et al. Spatio-temporal variation of wind erosion in Inner Mongolia of China between 2001 and 2010[J]. Chinese Geographical Science, 2016,26(2):155-164.
- [19]王雅倩.基于风洞实验的裸露农田土壤PM10和PM2.5起尘特征研究[D].天津:天津师范大学,2019.
- [20]石俊汇,张明远,赵芳芳.平原县风沙区的水土流失与防治对策[J].中国水土保持, 2012(02):61-62.
- [21]中华人民共和国质检总局.水质钙的测定EDTA滴定法[G].北京:中国标准出版社, 1987.
- [22]彭劫,温智力,刘志明等.微生物诱导碳酸钙沉积加固有机质黏土的试验研究[J].岩土工程学报,2019,41(04):733-740.
- [23]Soon N W, Lee L M, Khun T C et al. Factors Affecting Improvement in Engineering Properties of Residual Soil through Microbial- Induced Calcite Precipitation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014,140(5):1-1.

# 复合型胶粉改性沥青胶浆的流变性能研究

涂亮亮<sup>1</sup>, 江建<sup>1</sup>, 范璐璐<sup>1</sup>, 许勔<sup>2</sup>, 田蕾<sup>1</sup>

(1. 深圳市特区建工集团有限公司, 深圳 518034;  
2. 深圳市天健(集团)股份有限公司, 深圳 518034)

**【摘要】** 通过Brookfield粘度试验及动态剪切流变试验, 测试分析了复合型改性沥青胶浆的流变性能。研究表明, 与SBS沥青相比, 复合型改性沥青胶浆明显改善了沥青在高温下的稳定性, 同时也降低了沥青的温度敏感性。

**【关键词】** 橡胶沥青; SBS沥青; 流变性能

## Research on the rheological properties of the compound rubber power modified bitumen mortar

Tu Liangliang<sup>1</sup>, Jiang Jian<sup>1</sup>, Fan Lulu<sup>1</sup>, Xu Meng<sup>2</sup>, Tian Lei<sup>1</sup>

(1. Shenzhen Sez Construction Group Co., Ltd, Shenzhen, 518034, China;  
2. Shenzhen Tagen Group Co., Ltd., Shenzhen, 518034, china)

**Abstract:** Through the Brookfield revolving viscosity test and the dynamic shear rheometer test, this paper analyzed the rheological properties of the compound rubber power modified bitumen mortar. The results indicated that, compared with the SBS bitumen mortar, the high-temperature stability of the compound rubber power modified bitumen mortar was significantly improved, and the temperature sensitivity of the bitumen was also reduced.

**Keywords:** rubber bitumen, SBS bitumen, rheological property

## 0 引言

由于沥青与橡胶都属于有机高分子材料, 具有天然的亲和性。将废旧轮胎磨成胶粉, 制成橡胶改性沥青, 是十分可行的。大量的工程实践证明, 橡胶改性沥青混凝土路面十分优良的路用性能, 并能满足公路对于改性沥青的要求<sup>[1]</sup>。橡胶沥青的产生可以降低改性沥青的制备成本, 并有效地解决了“黑色污染”的问题。然而, 橡胶沥青在储存、运输及使用过程中所需温度较高, 能耗较大, 另外橡胶沥青高温易降解, 储存过程中容易离析<sup>[2]</sup>。为改善橡胶沥青的缺点, 美国研制了复合型胶粉改性沥青胶浆, 其制备过程是将基质沥青与胶粉进行湿法改性, 再在胶粉沥青表面包裹消石灰及添加剂, 压制成型制得颗粒状的固态样品。作为一种新型材

料, 目前对其胶结料物理性能的研究严重匮乏。因此, 本文主要对复合型改性沥青胶浆的流变性能进行了研究。

### 1 试验材料与试验方法

试验原材料主要包括复合型胶粉改性沥青胶浆SBS改性沥青和70#基质沥青, 其基本性能分别见表1、表2和表3。本试验利用DV-型旋转粘度计, 分析复合型改性沥青胶浆材料的动力粘度; 采用动态剪切流变仪(DSR)来分析该新型材料的流变性能, 本研究对样品进行频率扫描和温度扫描试验, 并以SBS沥青胶浆作为参比物。

### 2 试验结果与分析

#### 2.1 Brookfield粘度试验

沥青胶浆的粘度随温度升高而快速下降, 其粘

表1 复合型胶粉改性沥青胶浆的基本性能

性能	粗	细	
15.6℃密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.31	1.384	
闪点(℃)	304	313	
溶解度(三氯乙烯)(%)	77.8	59	
软化点(℃)	Top 1/3	95.6	98.9
	Bottom 1/3	93.1	99.4
旋转薄膜老化质量变化(%)	-0.040	-0.047	

表2 SBS改性沥青测试结果

试验项目	试验结果	技术要求	
针入度(25℃、100g、5s)(0.1mm)	62	60~80	
软化点(环球法)(℃)	74	≥65	
延度(5cm/min、5℃)(cm)	61	≥30	
针入度指数(%)	0.04	≥-0.4	
溶解度(%)	99.5	≥99	
闪点(℃)	265	≥230	
薄膜老化试验(163℃、5h)	质量变化不大于(%)	0.03	≤1.0
	残留针入度比不小于(%)	64.6	≥60
	残留延度(5℃)不小于(cm)	22.1	≥20

表3 70#基质沥青的基本性能

试验项目	试验结果	技术要求	
密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.022	实测	
针入度(25℃、100g、5s)(0.1mm)	73.5	60~80	
软化点(环球法)(℃)	≥150	≥100	
延度(5cm/min、5℃)(cm)	49	≥43	
闪点(COC)(℃)	320	≥260	
溶解度(三氯乙烯)(%)	99.7	≥99.5	
薄膜烘箱试验163℃, 5h	质量损失(%)	0.02	≤0.8
	针入度比(%)	72	≥58
	延度(15℃)(cm)	9	≥6

温曲线的变化规律复合幂函数的形式:

$$\eta = Ae^{BT} \quad (2-1)$$

式中:  $\eta$ 表示粘度;  $T$ 表示温度;  $A$ 、 $B$ 表示回

归系数。一般情况下回归系数 $A$ 越大, 即代表沥青胶结料的粘度越大; 回归系数 $B$ 的绝对值越大, 则对应胶结料的温感性越大。

根据回归参数意义，由图1可知，复合型胶粉改性沥青胶浆的粘度大于SBS沥青胶浆的粘度，并且温

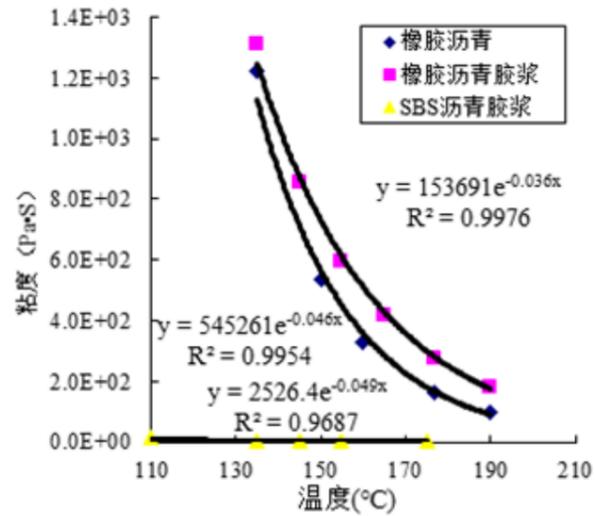


图1 沥青胶结料的回归曲线

对于粘温曲线的分析，大量实验数据研究证明，最符合粘温关系的表达式为Saal公式<sup>[3]</sup>，其表达式为：

$$\lg(\lg \eta \times 10^3) = n - m \lg(T + 273.13) \quad (2-2)$$

式中： $\eta$ 表示动力粘度；T表示温度；m表示回归系数；n表示与流体物性有关的常数。回归指数m表征了所试验温度范围内材料的温度敏感性，其粘温指数的绝对值越小，表示沥青对温度越不敏感，利用Saal公式处理数据得到的双对数粘温曲线图如图2所示。由图2可以看出，复合型胶粉改性沥青胶

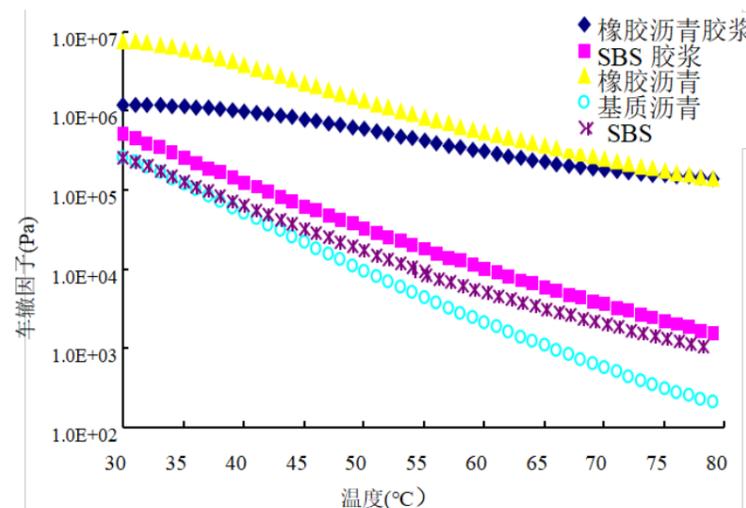


图3 沥青种类对车辙因子的影响

度敏感性下降；而相对于橡胶沥青，外加剂的加入使得沥青胶结料粘度以及其温度敏感性有所降低。

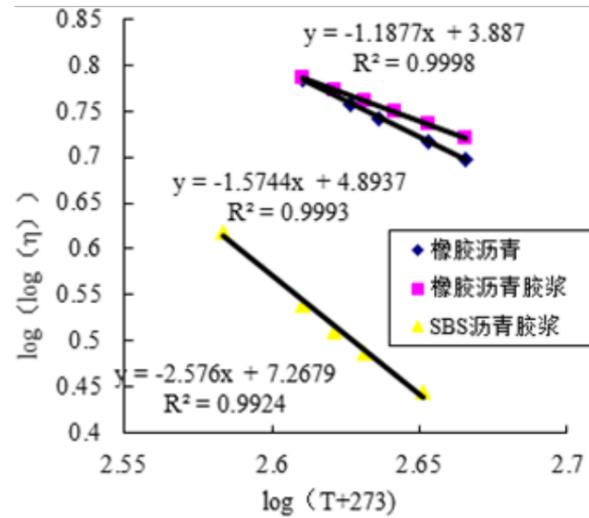


图2 双对数沥青胶结料的粘温曲线

浆的温度敏感性优于SBS沥青胶浆，并且也优于橡胶沥青，结论与回归曲线分析的结论相吻合。

### 2.2 温度扫描试验

沥青胶结料的力学性能受温度的变化影响很大，本文通过温度扫描试验研究沥青的高温性能。从图3可知，车辙因子随温度的升高而降低。在高温阶段橡胶沥青胶浆以及橡胶沥青的车辙因子要大于其他沥青及胶浆，其中基质沥青的车辙因子最小，可以说明它们的温度敏感性优于SBS沥青及其胶浆，另外基质沥青对温度最为敏感。

### 2.3 频率扫描试验

沥青路面所受荷载是动态的，荷载的作用频率的变化会造成沥青材料粘弹性能的不同。为了评价复合型胶粉改性沥青胶浆的性能，本试验主要将其与SBS沥青胶浆进行比较。由图4可以看出，随着

频率的升高，复数剪切模量随之增大。其中复合型胶粉改性沥青胶浆的低频复数剪切模量大于SBS胶浆，而高频复数剪切模量小于SBS胶浆，说明其同时具备更优的高低温性能，矿粉的加入增加了材料对频率的敏感性。

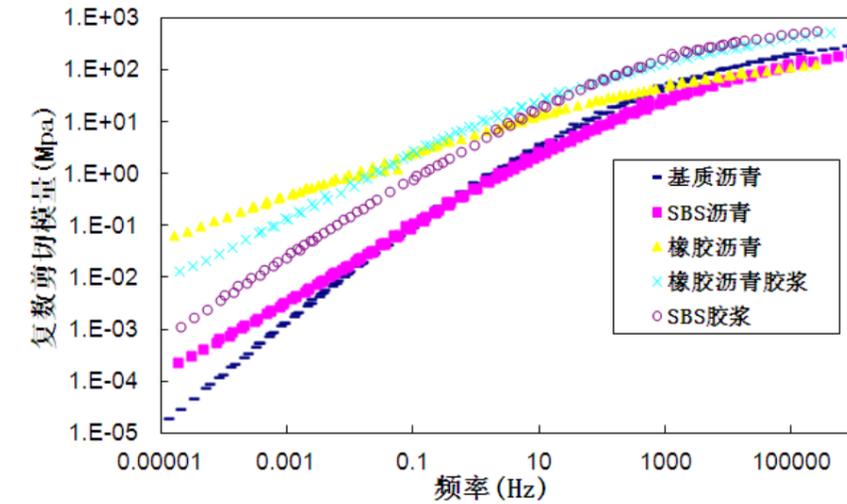


图4 复数剪切模量的主曲线图

### 3 结论

复合型胶粉改性沥青胶浆的粘度大于SBS沥青胶浆的粘度，并且温度敏感性更优；而相对于橡胶沥青，外加剂使得沥青胶结料粘度及其感温性能有所降低。

复合型胶粉改性沥青胶浆及其橡胶沥青的高温抗车辙性能优于基质沥青与SBS沥青及胶浆，其中基质沥青的高温抗变形能力最差。

沥青胶结料复数模量随着频率的升高而增大，其中复合型胶粉改性沥青胶浆的低频复数模量大于SBS胶浆，而高频复数模量小于SBS胶浆，反映出复

复合型胶粉改性沥青胶浆同时具有优良的高低温性能，另外，矿粉的加入增加了模量对频率的敏感性。

### 参考文献

- [1] 孙祖望, 陈颀. 橡胶沥青技术应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [2] 李美江, 王旭东. 橡胶粉在沥青及混合料中的作用机理研究[J]. 第四届亚太可持续发展交通与环境技术大会论文集, 2005.
- [3] 陈华鑫, 张争奇, 胡长顺. 纳米蒙脱土沥青混合料低温抗裂性能[J]. 华南理工大学学报. 2004, 32(4): 82-86.

# 聚烯烃干法改性沥青混合料在道路改建工程中的应用

钱 勇

(深圳市路桥建设集团有限公司, 深圳 518024)

**【摘要】** 结合深圳某市政道路改建工程中的聚烯烃干法改性沥青混合料施工情况,介绍了聚烯烃干法改性沥青混合料原材料性能检测及配合比设计、混合料拌和、施工等环节的工艺。聚烯烃干法改性沥青混合料在深圳某项目上应用效果良好,混合料各项指标满足设计及施工要求,通车1年后路面质量仍旧良好。聚烯烃改性剂KZD-I简化了改性沥青的生产及使用要求,实现了废旧塑料的循环利用。

**【关键词】** 沥青路面; 改性沥青; 聚烯烃改性剂; 施工工艺; 性能指标

## Application of Polyolefin Dry Modified Asphalt Mixture in Road Reconstruction Project

Qian Yong

(Shenzhen Road &amp; Bridge Group, Shenzhen 518024)

**Abstract:** Combined with the construction of polyolefin dry modified asphalt mixture in a municipal road reconstruction project in Shenzhen, this paper introduces the process of raw material performance detection, mix proportion design, mixture mixing and construction of polyolefin dry modified asphalt mixture. The application effect of polyolefin dry modified asphalt mixture in a project in Shenzhen is good. Various indexes of the mixture meet the design and construction requirements. The pavement quality is still good one year after opening to traffic. Polyolefin modifier KZD-I simplifies the production and use requirements of modified asphalt and realizes the recycling of waste plastics.

**Keywords:** asphalt pavement; Modified asphalt; Polyolefin modifier; Construction method; performance index

## 0 前言

沥青路面中上面层直接承受轮胎作用,受到高温、低温、水冲刷的严酷考验,普通石油沥青难以满足要求,需要进行改性<sup>[1]</sup>。沥青改性主要通过掺加高分子材料增强沥青分子之间的联结程度<sup>[2]</sup>,提高沥青混凝土对高温、低温、水损坏的抵御能力。我国沥青路面中上面层一般采用SBS改性沥青,高剂量SBS能够提升沥青高温性能达到PG82的要求。

沥青改性通常有2种途径:干法、湿法<sup>[3-6]</sup>。目前湿法的应用更加普遍,湿法将改性剂预先添加到

沥青中搅拌,改性剂有较为充足的时间与基质沥青融合,可以让改性剂更加均匀的分散在沥青中<sup>[7-10]</sup>。湿法改性需要额外的设备,对材料加工、运输要求更加高,存储时间较短。干法改性沥青工艺将沥青与改性剂同步添加到拌合楼拌缸中,沥青与改性材料在拌和、运输过程中混合、反应,具有工艺简单、无需额外设备、耐存储等特点。

随着碳中和战略的实施,对材料循环利用的重视,越来越多的研究将日常废弃的石化材料添加到沥青<sup>[11-12]</sup>,如橡胶、废旧塑料改性沥青,在提高沥

青性能的同时,实现材料循环利用。聚烯烃干法改性沥青,采用废旧塑料为主材,能够降低碳排放,改善沥青混合料性能<sup>[14]</sup>,但大规模生产能否实现改性剂与基质沥青均匀混合仍旧待验证。

深圳红荔路西起农林路,东至红岭中路路段全长8.0km,交通量大,使用多年后出现了较为严重的病害。为恢复路面功能,项目拟将原有路面铣刨10mm厚,摊铺10mm厚4%SBS改性沥青同步碎石封层、60mm厚KZD改性沥青砼(AC-20C)中面层及40mm厚细粒式KZD改性沥青砼(SMA-13)上面层。本文通过聚烯烃干法改性沥青在市政道路改建中的应用,考察该项技术在市政工程中的适应性,为同类工程的应用提供参考。

## 1 原材料

聚烯烃干法改性沥青混合料原材料包括矿粉、碎石、基质沥青。中面层AC-20、上面层SMA-13采用不同的粗集料,其余材料相同。

中上面层0-5mm细集料采用惠东星展石场石料,检验结果如下。

中上面层矿粉采用惠州博罗产品,检验结果如下。中上面层沥青均采用东莞东交70#A级沥青,技术要求及检验结果如下。

试验指标	指标要求	0~5mm	试验方法
表观相对密度	实测	2.673	T0330
毛体积相对密度	实测	2.534	T0330
坚固性/%	≥12	5.0	T0340
棱角性	≥26	39.3	T0344
砂当量/%	≥60	66.6	T0334
亚甲蓝值/g·kg <sup>-1</sup>	≥1	9.1	T0349

试验指标	指标要求	矿粉	试验方法
表观密度 /g·cm <sup>3</sup>	≥2.45	2.701	T0352
亲水系数	<1	0.76	T0353
塑性指数	<4	0	T0354
含水率/%	≤1	0.5	T0332
加热安定性	/	颜色无明显变化	T0355

中面层粗集料检验指标如表4。

上面层碎石选用河源石场。检测指标如表5。

表3 沥青结合料指标

试验项目	要求	结果	采用方法	
针入度(25℃)/10 <sup>-1</sup> mm	60-80	63	T0604	
软化点(R&B)/℃	≥46	51.0	T0606	
延度(15℃)/cm	≥100	>100	T0605	
动力黏度/Pa·s	≤150	211	T0620	
闪点/℃	≥260	304	T0611	
蜡含量/%	≥2.2	1.2	T0615	
溶解度/%	≥99.5	99.68	T0607	
RTFOT后残留物	质量变化率/%	≥±0.8	0.11	T0610
	针入度比(25℃)/%	≥61	73.3	T0604

## 2 中面层AC-20配合比试验

中面层配合比采用马歇尔方法设计。中面层矿料级配采用10-20mm:5-10mm:0-5mm:矿粉=32:29:36:3,各档材料通过率、合成级配结果如表6。

依据预估4.5%油石比,以0.5%油石比的间隔成型马歇尔试件,掺加混合料质量0.28%的聚烯烃改性剂,AC-20混合料测试结果如表7。

依照马歇尔试验结果,考虑项目所处气候环境、交通情况,确定最佳油石比为4.5%。对应的集

表4 AC-20粗集料的物理力学指标

试验指标	指标要求	粗集料试验结果		试验方法
		10-20mm	5-10mm	
表观相对密度	≧2.6	2.668	2.686	T0304
毛体积相对密度	/	2.632	2.621	
吸水率 /%	≧2.0	0.52	0.92	T0314
坚固性（质量损失）/%	≧12.0	5	5	
洛杉矶磨耗损失/%	≧30.0	25.8	25.4	T0317
针片状颗粒含量/%	≧15	7.2	5.8	T0321
压碎指标值/%	≧28	23.7	/	T0312
沥青粘附性	/	4级	/	T0616
水洗法<0.075mm含量/%	≧1.0	0.5	1.0	T0310

表5 SMA-13 粗集料的物理力学指标

试验指标	指标要求	粗集料试验结果		试验方法
		5-10mm	10-15mm	
表观相对密度	≧2.600	2.928	2.937	T0304
毛体积相对密度	/	2.860	2.900	
吸水率 /%	≧2.00	0.82	0.44	T0314
坚固性（质量损失） /%	≧12	3	2	
洛杉矶磨耗损失 /%	≧28	13.2	12.4	T0317
针片状颗粒含量 /%	≧15	/	3.4	T0321
压碎值 /%	≧26	/	9.6	T0312
沥青粘附性	≧5	/	5级	T0616
水洗法<0.075mm含量 /%	≧1	0.8	0.4	T0310
磨光值（PSV）	≧42	/	46	T0321

表6 集料筛分与配合比结果（AC-20）

筛孔尺寸/mm	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
10-20mm	100	92.1	52.9	8.0	1.4	0.7	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5-10mm	100	100	100	100	86.1	7.6	2.4	1.2	0.9	0.0	0.0	0.0
0-5mm	100	100	100	100	100	90.8	73.2	54.0	36.8	21.8	11.2	4.4
矿粉	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	96.8	84.2
合成级配	100	97.5	84.9	70.6	64.4	38.1	30.3	22.9	16.7	11.3	7.4	4.6
级配范围	100	90-100	78-92	62-80	50-72	26-56	16-44	12-33	8-24	5-17	4-13	3-7

表7 配合比试验结果（AC-20）

油石比/%	实测相对密度	理论最大密度/g·cm <sup>-3</sup>	空隙率/%	饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm
3.5	2.295	2.504	8.4	48.5	13.03	20
4.0	2.340	2.487	6.0	60.4	14.79	26
4.5	2.351	2.471	4.9	67.5	12.64	32
5.0	2.373	2.455	3.4	77.1	12.35	36
5.5	2.366	2.439	3.0	80.4	12.02	41

料吸收沥青比例为0.78，有效沥青含量3.53%，粉胶比1.3，有效沥青膜厚度7.13 μm。

从性能试验可以看出，掺加0.28%的聚烯烃改性剂的AC-20混合料各项指标满足要求，与湿法改性沥青混合料的性能相当。

3 上面层SMA-13 配合比试验

上面层配合比采用马歇尔设计法，合成级配采用10-15mm:5-10mm:0-5mm:矿粉=38:35:16:11，合成级配粗集料毛体积密度2.881g/cm<sup>3</sup>，松方密度1.661g/cm<sup>3</sup>，VCA DRC为42.35%。矿料级配及配合比如表9。

SMA-13混合料掺加占混合料质量0.25%的聚酯

表9 集料筛分与配合比结果（SMA-13）

筛孔尺寸/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	0.15	0.075
10-15	100	91.2	9.0	1.5	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0
5-10	100	100	90.4	7.2	2.1	1.0	0.8	0	0	0	0.0	0.0
0-5mm	100	100	100	90.8	73.2	54.0	36.8	21.8	11.2	4.4	11.2	4.4
矿粉	100	100	100	100	100	100	100	100	96.8	84.2	96.8	84.2
SMA-13级配	100	90-100	50-75	20-34	15-26	14-24	12-20	10-16	9-15	8-12	7.4	4.6
合成级配	100	96.7	62.0	28.6	23.6	20.2	17.4	15.0	12.9	10.5	4-13	3-7

4 路面施工

KZD聚烯烃改性沥青混合料生产流程为：集料干燥筒内烘干至180~210℃后二次筛分进入热料仓；根据配合比将集料依次投入拌和楼搅拌锅内，加入（混合料质量的0.28%）KZD-I改性剂，干拌0~5秒；喷入150~160℃的基质沥青，加入矿粉，湿拌30~40秒。KZD-I改性沥青混和料出厂温度控制在165~175℃。相较于常规的SBS改性沥青，KZD

表8 马歇尔试验配合比设计试验结果（AC-20）

试验指标	指标要求	试验结果	试验方法
稳定度/kN	不小于5.5	12.6	T0709
残留稳定度%	80	93.8	T0709
动稳定度次/mm	≧2800	大于10000	T0719
冻融劈裂残留强度比/%	≧80	88.0	T0729

纤维，另外掺加0.28%（混合料质量占比）聚烯烃改性剂。选用6.0%油石比成型马歇尔试件，试验结果如下。

沥青结合料各项指标符合要求。

聚烯烃改性沥青混合料的基质沥青以相对较低的温度运输，不存在改性剂离析的情况、耐存储，沥青在拌合楼的加热温度更低。

进行摊铺作业时，螺旋送料器均匀持续输料，混合料高度不少于送料器高度的2/3，减少摊铺混合料离析。机械摊铺的混合料，不应用人工修整，当出现局部缺料、表面不平整、局部离析等现象必须修整时，须在主管人员指导下进行。

表10 SMA-13马歇尔试验配合比设计试验结果

试验指标	指标要求	试验结果	试验方法
毛体积密度	/	2.483	T0705
理论相对密度	/	2.581	T0711
空隙率 %	3-4	3.8	T0709
矿料间隙率 %	不小于17.0	17.7	T0709
谢伦堡析漏 %	不大于0.2	0.07	T0732
肯塔堡飞散 %	不大于20	5.1	T0733
稳定度 /KN	不小于5.5	8.85	T0709
残留稳定度 %	/	94.0	T0709
动稳定度次 /mm	≥2800	大于10000	T0719
冻融劈裂残留强度比 /%	≥80	88.5	T0729



图1 KZD-I投放装置



图2 摊铺现场

进行摊铺作业时，螺旋送料器均匀持续输料，混合料高度不少于送料器高度的2/3，减少摊铺混合料离析。机械摊铺的混合料，不应用人工修整，当出现局部缺料、表面不平整、局部离析等现象必须修整时，须在主管人员指导下进行。

沥青混合料碾压按初压、复压、终压三阶段进行。初压温度145-155℃不低于145℃，双钢轮压路机从外侧向中心静压1遍；复压温度130-140℃，采用振动压路机碾压，速度控制在1.5~2km/h，碾压4~6遍，相邻碾压带重叠1/3~1/2轮宽；终压温度不低于90℃，采用吨位不同的双钢轮压路机组合进行作业：重型压路机静压2遍，轻型双钢轮压路机光面静压2遍，表面无轮迹。振动压路机倒车时

先关闭振动，以免形成拥包，影响平整度，复压至无显著轮迹。碾压完路面温度冷却到50℃以下后方可开放交通。

沥青混合料摊铺过程中抽样的检测结果如下。

检测结果表明，混合料指标未出现明显变异，动稳定度超过10000（次/mm），各项性能合格，KZD-I改性沥青的融混较为均匀。

完工后道路各项检测指标统计如下。

现场检测的统计结果表明各项指标合格，路面表面无离析、渗水、孔洞、泛油，表明混合料波动较小。

深圳红荔路改建路段通车1年后道路仍旧保持良好路况，未见明显病害，雨后不存在明显水印，改建后与改建前的外观对比图如下。

表11 混合料现场抽样试验结果（SMA-13）

序号	油石比/%	毛体积相对密度	4.75mm通过率/%	动稳定度/次·mm <sup>-1</sup>
1	6.01	2.365	27.5	10308
2	6.06	2.362	29.8	10500
3	6.10	2.361	26.6	10678

表12 现场试验结果统计（SMA-13）

测试参数	平均值	极大值	极小值	合格值
渗水系数 /ml·min <sup>-1</sup>	54	39	66	≤80
弯沉 /0.01mm	15	12	18	≤21.3
平整度（八轮仪） /mm	0.86	0.51	1.20	≤1.5
摩擦系数（摆式仪） /BPN	47	45	49	≥45
构造深度（手工铺砂） /mm	0.65	0.58	0.72	≥0.55
压实度 /%	98.6	98.2	99.3	≥98.0



翻修前



翻修后

图3 道路翻修前后对比

## 5 总结

通过应用于深圳红荔路中上面层，验证了KZD聚烯烃改性沥青混合料各项指标，材料均匀性良好。聚烯烃干法改性沥青降低了沥青的运输、存储、加热要求。沥青混合料添加0.28%KZD-I聚烯烃改性剂后高温抗车辙、抗水损性能均有明显提高，达到改性沥青的性能要求，翻修道路通车1年后路况优良，后续将继续进行路况跟踪。聚烯烃干法改性沥青在深圳红荔路改进工程的应用可为相近工程应用提供一定借鉴。

## 参考文献

- [1] 沈金安. 论聚合物改性沥青的发展方向[J]. 公路交通科技, 1998(01):6-11.
- [2] 王涛, 才洪美, 张玉贞. SBS改性沥青机理研究[J]. 石油沥青, 2008, 22(06):10-14.
- [3] 马嘉森, 薛永兵, 郭旗, 刘振民. 废旧塑料改性剂改性沥青的研究进展[J]. 中国塑料, 2022, 36(02):131-138.
- [4] 蒋永春. 直投式干法橡胶沥青混合料工艺与SBS改性沥青的对比研究[J]. 珠江水运, 2022(03):25-27.
- [5] 刘莹, 王涵, 郭娜, 等. 干法工艺生产改性沥青混合料的发展现状[J]. 石油沥青, 2017, 31(2):63-67.
- [6] 禹辉, 孟潇飞, 甘新众, 李闯民, 甘有为. 干投法废轮胎热解炭黑改性沥青表面层首件工程工艺试验研究[J]. 公路, 2022, 67(02):7-15.
- [7] 周昆, 刘西胤, 王鑫洋, 任瑞波. 不同支链的聚烯烃对SBS改性沥青低温及微观特性影响[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2020, 44(01):158-161.
- [8] 路再红, 童申家, 张优, 徐璐璐, 何坤. 废旧聚烯烃改性沥青混合料高温及水稳定性研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(06):846-851.
- [9] 丁智勇, 程旭乐, 杨光, 等. 颗粒型改性剂对沥青搅拌均匀性影响的研究[J]. 公路, 2019, 7:261-266
- [10] 念良宏, 王雄, 邓文军, 邵坤, 姚二华. 功能化回收聚乙烯改性沥青性能[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(10):154-157
- [11] 杨朋, 王雪莲, 任志福, 钱晓丽, 杨娥. 废旧聚烯烃类高模量沥青混合料改性剂适用性研究[J]. 江西建材, 2020(09):27-28+31.
- [12] 杨锡武, 刘克, 何泽, 赵波. 生活废旧塑料改性沥青混合料的路用性能研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(02):38-42.
- [13] 杨锡武, 刘克, 冯梅, 何泽. 生活废旧塑料改性沥青性能及机理研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(01):30-35+109.

理论研究

# 公路车辙路面在潮湿天气下的抗滑性能评估

付 饶

(深圳市路桥建设集团有限公司, 深圳 518024)

**【摘要】** 众所周知,车辙是潜在的道路安全隐患,在潮湿天气下可能导致打滑事故。车辙通常沿着车轮路径形成,在潮湿的天气下形成车辙的车轮路径中更深的积水会导致路面抗滑性能下降,进而增加行车的安全风险。尽管人们普遍认识到在积水的车辙路面上行驶的潜在危险,但由于分析雨天路面抗滑性能的复杂性,雨天车辙路面的抗滑性能降低幅度尚未得到很好的研究和记录。基于一个最新开发的抗滑性能仿真模型,本文提出了一种分析方法以评估在不同的路面水膜厚度和不同的车速下,有不同车辙深度的公路路面的抗滑性能。本文中的仿真模拟分析旨在强调评估抗滑性能时考虑车辙深度的重要性以及潮湿天气中车辙路面的打滑风险。

**【关键词】** 抗滑性能;车辙路面;车辙深度;路面水膜厚度;车速

## Evaluating wet-weather skid resistance of rutted highway pavements

Fu Rao

(Shenzhen Road & Bridge Group, Shenzhen 518024)

**Abstract:** Ruts are known to be a potential road safety hazard which can lead to skidding accidents in wet weather. Ruts are commonly formed along vehicle wheel paths and they present increased safety risks because they collect water during wet weather, thereby causing the skid resistance to fall due to the thicker water depths along the rutted wheel paths. Although the potential danger of driving on flooded ruts is well recognized, the magnitudes of reduced skid resistance on rutted pavements on rainy days have not been well studied and documented due to the analytical complexity in analyzing the skid resistance characteristics of a pavement surface during wet weather. Using a recently developed theoretical skid resistance simulation model, this paper presents a procedure to evaluate the skid resistance on rutted highway pavements for different rut depths under different surface runoff flow conditions and different vehicle speeds. The analysis serves to stress the importance of considering rut depth in assessing the skid resistance and hence the skidding risks of rutted pavements in wet weather.

**Keywords:** skid resistance; rutted pavement; rut depth; surface runoff depth; vehicle speed

### 0 引言

世界范围内的统计数据表明,潮湿天气下的道路交通事故约占所有道路交通事故的20%<sup>[1-4]</sup>。现有研究发现,雨天路面抗滑性能的降低是造成潮湿天气事故的主要原因之一<sup>[1, 3, 5]</sup>。湿滑路面的抗滑性能降低是由于运动的轮胎与路面积水之间的相互

作用引起的。轮胎和路面积水间的相对运动,导致轮胎受到积水浮力的影响,并减小了轮胎与路面的接触力和轮胎与路面的接触面积,进而导致轮胎与路面间抗滑性能的损失<sup>[6, 7]</sup>。

当车辆在潮湿的路面上行驶时,影响抗滑性能的主要因素是路面上水膜的厚度。过去的实验和现

场研究发现,在给定的车速下,路面的抗滑性能会随着路面上水膜厚度的增加而降低<sup>[6, 8]</sup>。在有车辙的路面上,车辙中的积水深度比路面上没有车辙的部分积水更深。由于车辙通常沿着路面的车轮路径形成,因此在评估车辙路面的抗滑性能时,有必要考虑车辙中更深的积水。

尽管人们已经充分认识到在有积水的车辙路面上行驶的潜在危险<sup>[9, 10]</sup>,但由于分析雨天路面抗滑性能的复杂性,雨天车辙路面的抗滑性能降低幅度尚未得到很好的研究和记录。基于一个最新开发的抗滑性能仿真模型,本文介绍了一种分析方法,用于评估在雨天时,已知车辙深度和路面表面水膜厚度的情况下,车辙路面的抗滑性能。基于该方法,本文还提供了一个示例,以评估正常公路运营中,在不同车辙深度和不同路面水膜厚度的情况下,车辙路面的潮湿天气抗滑性能降低程度。

### 1 研究意义

车辙是一种经常出现在沥青路面车轮路径上的主要病害,是在反复施加的车辆荷载作用下,路面层中不可逆(或永久)变形的积累导致的。除了导致路面粗糙度增加和行车舒适性下降外,车辙还会引起驾驶安全性问题,例如滑水和打滑<sup>[9-11]</sup>。如上所述,行驶安全性问题是车辙中存在的积水引起的抗滑性能降低导致的,主要存在以下两种与车辙路面的行车安全问题有关的不利道路状况:(i)在降雨停止后,没有更多的水流过路面,但是水沿着车轮路径被截留在车辙内;(ii)在降雨期间,路

面上不断有水流过,形成一定厚度的水膜,车轮路径上的车辙被水淹没。

上述情况(i)中,车辙内的水深可以认为与车辙深度相近;而在情况(ii)中,水的深度将比情况(i)高,因为车辙被水淹没,并且路面上出现了一定厚度的水膜。对于以给定速度行驶的车辆,情况(ii)的抗滑性能更低,因为路面上有车辙部分的总水深更深。需要注意的是,尽管在情况(ii)中,路面的抗滑性能比情况(i)低,但由于下雨,车辆也将以较低的速度行驶。因此,应仔细分析这两种情况,以确定它们各自给车辆带来的打滑风险。文献[10]中Fwa等人已经研究了情况(i)的打滑风险。本文将分析情况(ii)中,不同车辙深度和水膜厚度下路面有车辙部分降低的抗滑力,并将其与路面无车辙部分的抗滑力值进行比较。本研究的主要目的是强调在评估路面抗滑性能时考虑车辙深度的重要性,并且评估在潮湿天气中车辙路面的打滑风险。

### 2 抗滑机理

研究湿滑车辙路面的抗滑性能,首先需要明确路面与轮胎之间的抗滑机理。经过大量学者长时间的研究,目前公认路面的抗滑性能由轮胎与路面之间的摩擦力产生,此摩擦力的大小受路面与轮胎橡胶之间的附着力和滞后变形的综合影响。在干燥的路面上,轮胎与路面有良好的接触,因此抗滑性较高。当路面潮湿或有积水时,路面与轮胎之间形成水膜,水膜起润滑作用,抗滑性能会显著降低。

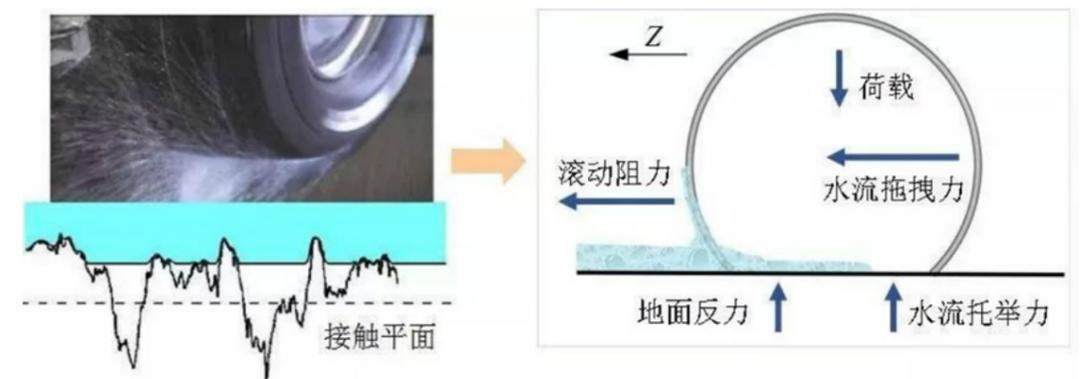


图1 轮胎与湿滑路面抗滑机理图

### 3 研究范围

本文中的分析主要针对高速公路和主要干道,因为较高的行车速度更容易发生打滑事故。而且与

其他低等级道路相比,这两种公路上的行车速度和交通量都更高,事故的后果可能比其他低级道路更加严重。分析中考虑的是在公路上行驶的标准用车

的情况。

在评估路面抗滑性能时,影响结果的三个关键变量是水膜厚度,路面车辙深度和车速。这三个变量的数值范围选择主要考虑覆盖潮湿天气中高速公路和主要干线的正常运行条件,因此选定的水膜厚度范围为0至10mm,车辙深度范围为0至15mm,车速为20至80km/h。为计算抗滑性能,选择的的车辙深度和水膜厚度具体数值如下:路面上的水膜厚度值为0、1、5和10mm;车辙深度值为0、1、3、6、9、12和15mm。其中0mm车辙深度是指没有车辙的路面情况,代表不考虑路面车辙时评估的抗滑性能,其结果作为对比分析的参考情况。在分析抗滑性能时,考虑了以下车速值:20、40、60和80km/h。

#### 4 分析方法

本研究中,基于对车辆轮胎、路面和路面上的积水之间相互作用的理论分析,对在公路路面上行

驶的车辆抗滑性能进行了评估。分析的关键是确定作用在车辆轮胎上的路面积水产生的浮力。浮力的提升会减小轮胎施加在路面上的净载荷,从而导致抗滑力的降低。

研究基于开发的三维有限元仿真模型,进行浮力和最终抗滑性能的计算。该模型通过分析轮胎,路面和路面积水之间的相互作用,计算车轮滑动受到的阻力。它利用固体力学和流体动力学的理论来分析轮胎和水的相互作用,轮胎和路面的相互作用以及水和路面的相互作用。

图2显示了用于分析抗滑性能的有限元模型,模型考虑了影响抗滑性能的三个关键要素:轮胎,路面和水之间的相互作用。本模型包括轮胎与路面接触模型,流体与轮胎相互作用模型和流体与路面相互作用模型。模型分析过程涉及三个元素之间相互作用的迭代。

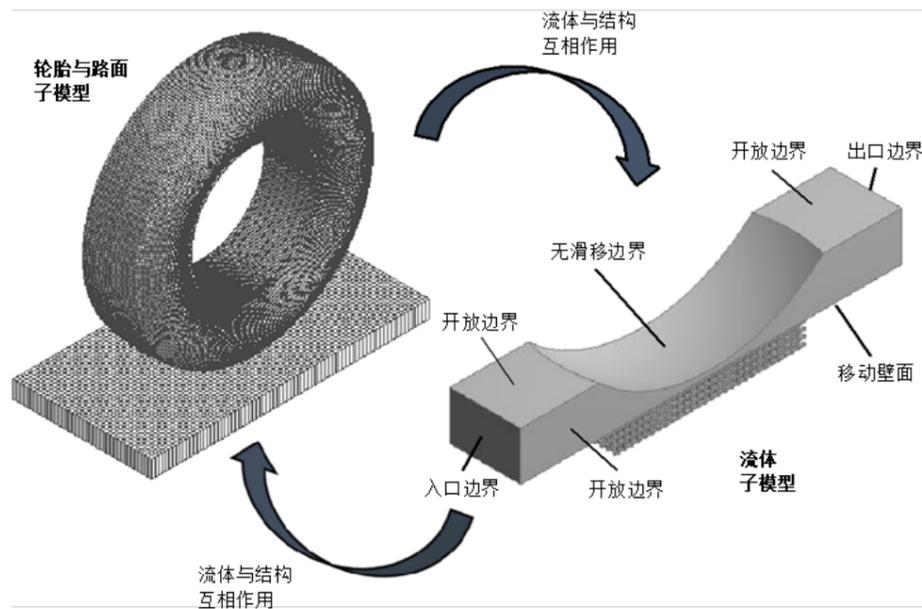


图2 有限元抗滑性能分析仿真模型

##### 4.1 轮胎子模型

本研究采用的轮胎子模型是ASTM E524标准光滑轮胎<sup>[13]</sup>,是用于确定抗滑指数SN的标准锁紧轮抗滑力测试的轮胎<sup>[14]</sup>。它是G78-15轮胎,其横截面半径为393.7mm,胎面宽度为148.6mm。轮胎模型由三个结构部件组成,即轮胎轮辋,轮胎侧壁和轮胎胎面。这三个分量的弹性模量分别为100000,20和90MPa。轮胎在作用于轮胎轮辋的向下集中载荷4,800N和作用于轮胎内壁的轮胎充气均匀压力

165.5kPa下与路面接触。

##### 4.2 路面子模型

由于路面与轮胎相比,相对较硬,因此将其模拟为支撑轮胎并承受轮胎载荷的刚性表面。在模拟分析中,为其设定了30GPa的弹性模量。本模拟假设轮胎胎面与路面之间的接触遵循库仑的摩擦理论<sup>[15]</sup>。假设路面是水密的,并且不渗水。

##### 4.3 流体子模型

在流体子模型中,流体行为通过完整的

Navier-Stokes方程模拟<sup>[12]</sup>。采用标准的k-ε模型来模拟轮胎周围的湍流<sup>[16-17]</sup>。流体子模型的边界条件如图2所示。在分析中,模拟水以指定速度朝车轮移动。分析的最终结果是通过三种子模型之间的相互作用迭代获得的,其中流体应力传递到轮胎和路面子模型,轮胎变形传递到流体子模型。

本研究使用25°C下的水和空气的特性。水的密度,动力粘度和运动粘度分别为997.0kg/m<sup>3</sup>,0.890x10<sup>-3</sup>Ns/m<sup>3</sup>和0.893x10<sup>-6</sup>m<sup>2</sup>/s。在标准大气压和25°C温度下,空气的密度,动力粘度和运动粘度分别为1.184kg/m<sup>3</sup>,1.831x10<sup>-5</sup>Ns/m<sup>3</sup>和1.546x10<sup>-5</sup>m<sup>2</sup>/s。

仿真模拟分析的最终结果是在速度为v时的抗滑力,由抗滑指数SN<sub>v</sub>表示,并使用库仑摩擦学概念<sup>[15]</sup>通过以下公式计算:

$$SN_v = \frac{F_x}{F_y} \times 100 = \left[ \frac{F_t + F_d}{F_z} \right] \times 100 = \left[ \frac{\mu(F_z - F_u) + F_d}{F_z} \right] \times 100 \quad (1)$$

式中:  $F_x$ 为作用在车轮上的总阻力,  $F_t$ 为牵引力,  $F_z$ 为垂直的车轮载荷,  $F_u$ 为流体升力,  $F_d$ 为流体阻力,  $\mu$ 为轮胎路面的摩擦系数。

#### 5 车辙路面的抗滑性能评估结果

本节通过一个示例分析车辙对雨天高速公路或主要干路沥青路面的抗滑性能影响。为掌握常见的潮湿天气车辆运行情况,本示例的分析将涵盖车辙深度从0到15mm,路面水膜厚度从0到10mm以及车速从20到80km/h的抗滑性能。对于给定车速范围的选择是基于,通常对速度低于20km/h的车辆,打滑并不是一个严重的问题,而在雨天,车辆的行驶速度极少超过80km/h。

##### 5.1 问题参数

除了前述各个子模型中的轮胎,路面和水的尺寸和材料特性之外,抗滑性能评估分析的每次模拟分析都需要输入水膜厚度和车速。对于有车辙的路面,沿着有车辙的车轮路径的总水深等于车辙深度和路面水膜厚度的总和。

有一点需要注意的情况是,本分析中的水深计算不计公路路面的纵向坡度和交叉坡度的影响。典型的高速公路路面的纵向坡度小于3%,交叉坡度为1.5至2.0%<sup>[18]</sup>。在水深计算中同时考虑纵向坡度和交叉坡度时,水深计算的差异将小于1.5%,

这在抗滑性能分析中不具有实际意义。因此,在本研究中,纵向坡度和交叉斜率没有计入抗滑力的模拟分析。本研究中给出的分析结果可普遍应用于一般的高速公路直行路段,但陡坡和水平曲线路段除外。

##### 5.2 抗滑性能分析结果

抗滑性能的仿真分析结果如图3所示。图3显示了不同车速下车辙路面上三种不同水膜厚度的抗滑力与车辙深度的关系。图3(a),3(b)和3(c)显示的是水膜厚度分别为1mm,5mm和10mm时车辙路面的抗滑指数。

在图3中,每条实线曲线表示给定车辙深度和水膜厚度时有车辙的车轮路径的抗滑指数,对应于实线曲线的每条虚线曲线表示同一路面无车辙部分的抗滑指数。两种情况的主要区别是水深的不同,有车辙的车轮路径处的水比路面无车辙部分的更深。在有车辙的车轮路径中,水深等于车辙深度与路面上水膜厚度之和。无车辙部分的水深等于路面上的水膜厚度。

图3中的曲线显示了抗滑性能变化的总体趋势。对于给定的水膜厚度,路面上有车辙部分和无车辙部分的抗滑指数之差随着车辙深度的增加而增加。这个趋势与预期一致,因为水深的差异随车辙深度的增加而增加。

比较图3(a),3(b)和3(c)可以看出,对于给定的车辙深度,路面有车辙和无车辙部分的抗滑指数差随着水膜厚度增加而减小。这是因为水膜厚度较厚时,路面的有车辙部分和无车辙部分之间的水深差较小。

在本例中,对抗滑性能产生影响的阈值水深为8mm左右,因此路面有车辙部分和无车辙部分之间抗滑指数之差会随着增加的水深靠近这个阈值而减小。这也是图3(c)中实线和虚线曲线之间的抗滑指数在10mm水膜厚度时差异微小的原因。

从图3的三个曲线图中,也可以看出车速对路面有车辙部分和无车辙部分之间抗滑指数差的影响方式。当车速从20km/h提高至40km/h时,抗滑指数差随着增加。但当车速提高到60km/h时,这个差降低了,而且随着车速的提高进一步降低。这种抗滑指数差随着车辆速度变化而改变的情况,可能与路面上的水从轮胎与路面的接触区域被排开有关。当车速非常低(例如20km/h或更低)时,抗滑性能受路面水深的影响相对较小,因为路面上的水从轮

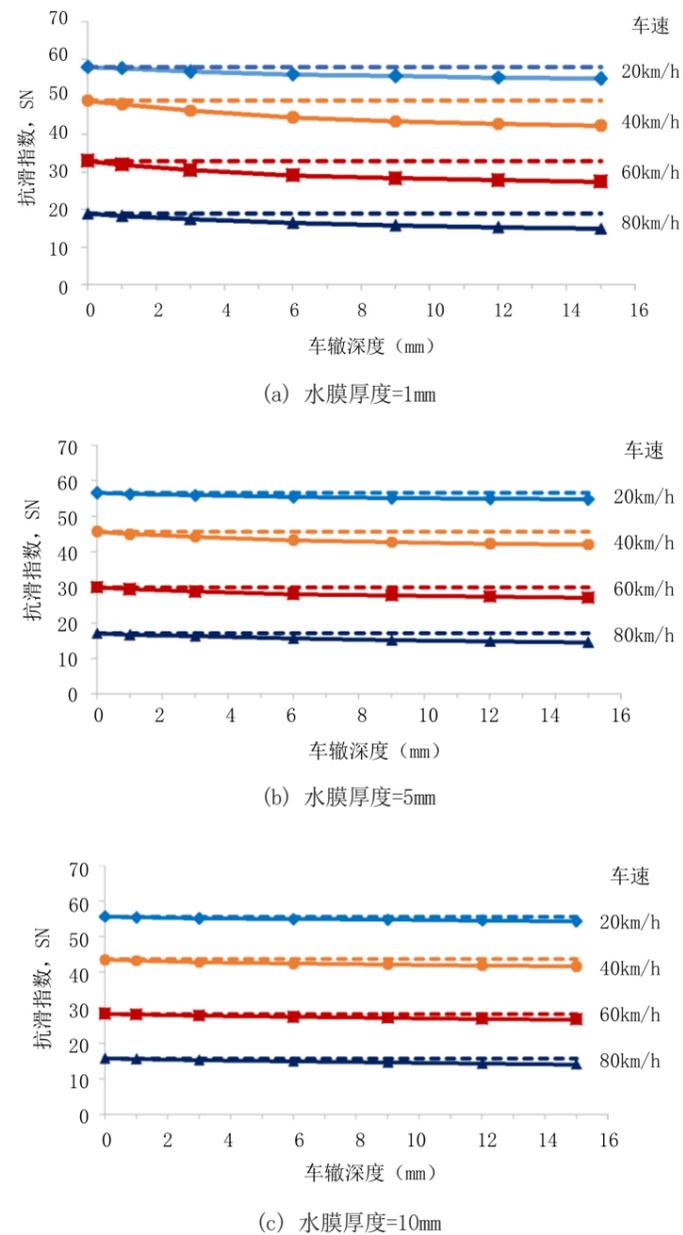


图3 积水的车辙路面抗滑性能

胎与路面间排出的时间相对较长。但当车速很高时（例如80km/h或更高），路面上的水排出的时间非常短，以至于水深对抗滑性能的影响也相对较小。这解释了为什么最高的抗滑指数差出现在中档车速范围。

从图3中的数据可以看出，路面有车辙部分和无车辙部分之间的抗滑指数差可以高达7 SN单位。需要注意的是，本例中得出的路面有车辙部分和无车辙部分之间的抗滑力差值的大小仅反映本研究

中的特定路面的情况。虽然在有不同磨损层材料和表面纹理的其他路面上会得到不同的抗滑力差值，但前文中描述的总体趋势对于其他路面类型仍然适用。

## 6 结论

本文提出了一种分析车辙路面上车辆抗滑性能的分析方法。所提出的方法被用于分析在车辙深度，水膜厚度和车辆行驶速度的典型范围，路面有车辙部分和无车辙部分之间的车辆抗滑力差异的大

小。本研究目的是强调需要在车辙路面的抗滑性能评估中考虑车辙深度。

本文分析结果表明，车辙的存在对车辙路面的车辆抗滑性能具有显著影响。对于稳重所研究的示例，抗滑力差可以高达7个SN单位。通常抗滑力差随车辙深度增加而增加，但随水膜厚度增加而减小。研究发现当车速低于20km/h或车速高于80km/h时，抗滑力差很小。

本文中案例分析的结果有助于强调在评估车辙路面的抗滑性能时考虑车辙深度的重要性。分析结果也证明，本文所提出的分析方法是评估高速公路和主要干线上的车辙路面在潮湿天气下抗滑性能的有效工具。

## 参考文献

- [1]IVAN J N, RAVISHANKER N, JACKSON E, et al. A Statistical Analysis of the Effect of Wet-Pavement Friction on Highway Traffic Safety [J]. Journal of Transportation Safety and Security, 2012, 4 (2):116-136.
- [2]MAYORA P J M, PINA J R. An Assessment of the Skid Resistance Effect on Traffic Safety under Wet-Pavement Conditions [J]. Accident Analysis and Prevention, 2009, 41 (4):881-886.
- [3]MCGOVERN C, RUSCH P, NOYCE D A. State Practices to Reduce Wet Weather Skidding Crashes [R]. Washington D. C.: Federal Highway Administration, 2011.
- [4]MURAD M M, ABAZA K A. Pavement Friction in a Program to Reduce Wet Weather Traffic Accidents at the Network Level [J]. Transportation Research Record, 2006, 1949 (1):126-136.
- [5]ALVAREZ A E, MARTIN A E, ESTAKHRI C K, et al. Synthesis of Current Practice on the Design, Construction, and Maintenance of Porous Friction Courses [R]. Texas: Texas Transportation Institute, 2006.
- [6]HORNE W B, DREHER R C. Phenomena of Pneumatic Tire Hydroplaning [R]. Washington D. C.: National Aeronautics and Space Administration, 1963.
- [7]BROWNE A L. Mathematical Analysis for Pneumatic Tire Hydroplaning [M]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1975.

- [8]FWA T F, ONG G P. Wet-Pavement Hydroplaning Risk and Skid Resistance: Analysis [J]. Journal of Transportation Engineering, 2008, 134(5):182-190.
- [9]AASHTO, Report of the AASHTO Joint Task Force on Rutting [R]. Washington D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1989.
- [10]FWA T F, HADUNNETHTHI R P, ONG G P. Critical Rut Depth for Pavement Maintenance Based on Vehicle Skidding and Hydroplaning Consideration [J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(4):423-429.
- [11]HICKS R G, SEEDS S, PESHKIN D G. Selecting a Preventive Maintenance Treatment for Flexible Pavements [R]. Washington D. C.: Federal Highway Administration, 2000.
- [12]ONG G P, FWA T F. Wet-Pavement Hydroplaning Risk and Skid Resistance: Modeling [J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(10):590-598.
- [13]ASTM Standard E524-88, Standard Specification for Standard Smooth Tire for Pavement Skid-Resistance Tests [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2000.
- [14]ASTM Standard E274-11, Standard Test Method for Skid Resistance of Paved Surfaces Using a Full-Scale Tire [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2014.
- [15]BATHE K J. Finite Element Procedures [M]. Third Edition. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [16]HINZE J O. Turbulence [M]. Second Edition. New Jersey: McGraw-Hill, 1975.
- [17]LAUNDER F T, SPALDING D B. The Numerical Computation of Turbulent Flows [J]. Computation Methods in Applied Mechanics in Engineering, 1974, 3:269-289.
- [18]AASHTO. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets [M]. Sixth Edition. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011.

施工应用

# 水力旋流器在禹门口黄河大桥河滩桩基换浆法清孔施工中的应用

汪浩

(深圳市路桥建设集团有限公司, 深圳 518024)

**[摘要]** 桩基施工技术的发展对桥梁工程技术的发展起到至关重要的推动作用, 针对桩基施工的探索从未停止。以禹门口黄河大桥下桑运煤铁路分离式立交桥为工程背景, 介绍了该桩基施工中水力旋流器换浆法清孔的过程, 对桩基施工清孔的各种方法进行对比, 从多角度分析了诸多方法的差异。研究表明: 水力旋流器换浆法清孔在诸多清孔方法中占有很大优势, 应加强水力旋流器在实际施工中应用的相关研究。

**[关键词]** 桩基; 清孔; 换浆法; 水力旋流器; 应用

## The hydrocyclone for slurry used to clean application of hole in construction of bridge pile foundation of Yumenkou Yellow River Highway Bridge

Wang Hao

(Shenzhen Road & Bridge Group, Shenzhen 518024)

**Abstract:** The development of pile foundation construction technology plays a key role in promoting the development of bridge engineering technology, and the exploration for pile foundation construction has never stopped. Based on the background of the the Yellow River bridge in Yu gate, the process of clearing the hole of the hydrocyclone in the construction of the pile foundation is introduced, and the various methods for the construction of the pile foundation are compared, and the differences of the methods are analyzed from many angles. The research shows that the clearing hole of the hydrocyclone has a great advantage in many methods of clearing holes, and the related research on the application of hydrocyclone in the actual construction should be strengthened.

**Keywords:** pile foundation; Hole cleaning; Pulping method; hydrocyclone; application

### 0 引言

桩基础的承载能力高, 能承受垂直荷载, 也能承受水平荷载, 能抵抗上拔荷载, 也能承受振动荷载, 被广泛应用于桥梁工程中。桩基础的施工依据施工方法的不同, 通常分为预制桩和灌注桩两大类, 由于灌注桩施工时具有噪声小、无挤土、无振动、适宜于都市构筑物密集区域使用等特点, 灌注桩在施工中得到较为普遍的应用。根据成孔工艺的

差异, 灌注桩可以分成干作业成孔的灌注桩、泥浆

护壁成孔的灌注桩和人工挖孔的灌注桩等。泥浆护壁成孔的灌注桩主要施工步骤包含: 钻孔成孔(冲击成孔)、清孔、灌注。泥浆的主要作用是保护孔壁, 同时还具有携渣和降温、润滑器械的作用, 清孔的目的就是通过对泥浆置换或者抽离将孔内泥浆中钻渣含量降低至一个合理范围, 孔内泥浆钻渣含量过大, 可能造成孔底沉淀过厚, 轻则引起混凝土灌注难度大, 重则造成桩基夹层、断桩、桩基承载力不够, 埋下质量隐患造成质量事

故。由此可见, 对于泥浆护壁成孔的灌注桩来说清孔是非常必要的。

我国对于灌注桩的清孔多有研究, 涌现出诸多里理论和方法, 大致分为四类: 抽浆法清孔、换浆法清孔、喷射法清孔、砂浆置换钻渣法清孔。这四类方法在不同的地质情况、施工情况都有应用, 各有所长。

本文以禹门口黄河大桥下桑运煤铁路分离式立交桥为例, 详细说明了该桩基施工中水力旋流器换浆法清孔的应用情况, 通过对水力旋流器在换浆法清孔中的应用进行分析, 着重介绍了其在施工应用中的部分规律, 通过与其他方法的对比, 展现出了水力旋流器清孔在施工过程中的成本低、效率高、清孔效果好等优势, 为类似工程的设计与施工提供借鉴。

### 1 工程概况

下桑运煤铁路分离式立交桥跨越下桑运煤专线及地方道路, 左右幅采用不等跨错孔布置, 左右幅分别采用(3\*30+4\*30)m及(3\*30+3\*30)米装配式预应力混凝土箱梁。左幅全长216.25m; 右幅全长185.76m。

本桥基础均为泥浆护壁成孔的灌注桩基础, 桩径1.2m, 其中桥墩处桩的横向距离为3.0m, 纵向桩间距9.14m, 左右幅共11个桥墩, 每个墩设置4根桩, 合计44根, 桩长为51米至55米, 采用工字形与一字形承台, 柱式墩; 其中桥台处桩的横向距离5.35m, 纵向桩间距为2.55m, 左右幅共4个桥台, 每个桥台设置4根桩, 合计24根, 桩长为32米至35米, 使用王字形承台, 肋板式支撑。

#### 1.1 工程地质条件

下桑桥所处地层自上而下依次为: 第一层0~1.5m杂填土、第二层1.5~5m粉质粘土、第三层5~11m中砂、第四层11~12.7m粉土、第五层12.7~34.4m细砂、第六层34.4~39.2m粗砂、第七层39.2~48.4m细砂、第八层48.4~65.7m粉质粘土。

#### 1.2 水文条件

该桥区域内地表水主要为黄河河水和鱼塘水, 黄河水季节性变化明, 枯水期水量较小, 雨季洪水暴涨, 水位及流量变化较大; 桥位区域的地下水为赋存于第四系全新松散层中的孔隙潜水, 埋深一般为0~3.5m, 水量大, 水位变化小。

#### 1.3 桩基施工清孔方法的选用

下桑桥是跨铁路桥, 临近铁路施工受到诸如场

地、铁路政策等限制, 临近铁路的16根桩基采用冲击钻成孔, 泥浆护壁成桩; 其余桩基采用旋挖钻成孔, 泥浆护壁成桩。为了降低桩孔内泥浆的粘度、相对密度、含砂率等指标, 清除钻渣, 减少孔底沉淀厚度, 防止桩底存留沉渣过厚而降低桩的承载力, 清孔采用换浆法。为了提高泥浆的重复利用率以及减小对环境的污染, 采用沉淀法以及水力旋流器分别对泥浆进行净化循环, 以达到清孔的目的。

### 2 水力旋流器在桩基施工换浆法清孔中的应用

#### 2.1 水力旋流器结构组成

水力旋流器上端是空心的圆柱状筒体, 下端是一个与圆柱体相连的倒锥形筒体, 两部分连接起来构成水力旋流器的工作筒体。圆柱形筒体顶端切向装有给浆管, 顶部装有回浆管。在圆锥形筒体底层有设有沉砂口。各部件之间用法兰盘及螺栓连接或者焊接。固体微粒沿壁面的快速运动会造成分离器的磨损加重, 为延长使用期限, 给浆管口、筒体和沉砂口通常衬有橡胶、聚氨酯、碳化硅或辉绿岩铸石, 以减少磨损并在磨损后易于更换。给浆管、出砂口还可以安装阀门, 制成可调的, 根据需要调节其流量大小。

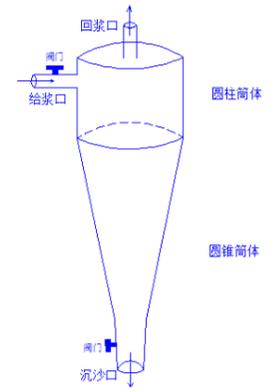


图1 水力旋流器结构组成图

#### 2.2 水力旋流器的工作原理

工作时将含有钻渣的泥浆用泥浆泵由泥浆池中以一定压力(一般是50~250kPa的压力)和流速(约5~12米/秒)由给浆管沿切线方位旋入水力旋流器的柱形筒体, 含有钻渣的混合泥浆随即绕轴线高速回旋, 产生很大的离心力, 离心力比重力大几十倍乃至百倍, 使钻渣的沉降速度以相应的倍数增加。混合泥浆中粒度和密度不同的微粒由于受到的离心力差异, 所以它们在旋流器中的加速度、运动速度及方向、向心浮力和流体曳力大小也各不

相同；粗而重的颗粒受的惯性离心力大，被抛向筒壁，沿倒锥形筒壁按螺旋线形状的痕迹下旋至倒锥形筒器底，作为沉砂从出砂口排出；细而轻的球粒受的离心力小，被带到中间，在锥形筒体中心形成内螺旋泥浆流，旋转到一定程度后随着二次上旋的内层旋流，向上移动，作为溢流从顶部中心的回浆管流出。内层旋流中央有一个处在负压的气柱，气柱中的气体是由含有钻渣的混合泥浆夹杂的或者是由于回浆管口外露于大气中时将气体带入水力旋流器内的。水力旋流器的特性是圆筒直径小而圆锥长，小直径的圆筒有利于加强惯性离心力，以加快下沉速率；同时，锥形加长可加长液流行程，从而延长了悬浮液在器内的滞留时间，通过小直径的圆筒与锥形长筒的合理组合，有效地提高了泥浆的过滤与回收效率，根据过滤的要求的差别，水力旋流器的尺寸比例也应做相关关系的调整。

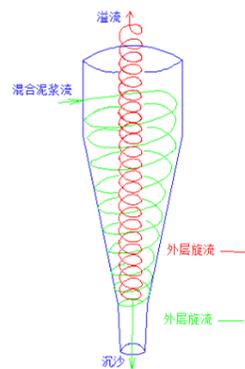


图2 水力旋流器工作原理图

### 2.3 水力旋流器在下桑桥桩基换浆法清孔施工中的使用情况及分析

#### 2.3.1 桩基施工情况

按照铁路部门的要求采用冲击钻成孔的方式，实际钻孔中捞出的钻渣印证了地质报告中提到的以沙层为主的情况。55米的桩从护筒埋设到成孔大致需要4天，采用自然沉淀的换浆法清孔大致需要2.5天；采用水力旋流器净化泥浆达到换浆清孔的要求大致需要1天；采用水力旋流器清孔的泥浆指标更易达到要求，孔底沉渣厚度明显减小，在灌注桩基混凝土性能相同的条件下，施灌更容易、安全。

#### 2.3.2 下桑桥桩基清孔施工中水力旋流器的使用情况

以一台15KW的泥浆泵通过直径为8cm橡胶管将含有钻渣的泥浆以8m/s的流速、180 kPa的压力沿进浆口顺圆筒的切向流入水力旋流器，经过净化的

泥浆从出浆口经过橡胶管回流至桩孔，钻渣通过沉沙口排除，往复循环，达到清孔的作用。

右幅2、3号承台，左幅3、4号承台16根桩基分别采用三种不同尺寸的水力旋流器，使用情况如下：

(1) 圆柱筒体直径为40cm，长度20cm，圆锥筒体长50cm，进浆口及回浆口直径8cm。使用泥浆三件套测定泥浆含砂率，由3.5%下降至2.0%平均需要15小时，由2.0%下降至1.6%平均需要7小时。

(2) 圆柱筒体直径为30cm，长为20cm，圆锥筒体长50cm，进浆口及回浆口直径8cm。使用泥浆三件套测定泥浆含砂率，由3.5%下降至2.0%平均需要13小时，由2.0%下降至1.6%平均需要6小时。

(3) 圆柱筒体直径为30cm，长20cm，圆锥筒体长70cm，进浆口及回浆口直径8cm。使用泥浆三件套测定泥浆含砂率，由3.5%下降至2.0%平均需要12.5小时，由2.0%下降至1.6%平均需要5.5小时。

(4) 以一台20KW的泥浆泵通过直径为8cm橡胶管将含有钻渣的泥浆以11m/s的流速圆柱筒体直径为30cm，长20cm，圆锥筒体长70cm，进浆口及回浆口直径8cm。使用泥浆三件套测定泥浆含砂率，由3.5%下降至2.0%平均需要11.5小时，由2.0%下降至1.6%平均需要5小时，过程中多次更换筒体内衬及沉沙口配件。

经过程分析，发现如下规律：圆锥部分长而圆筒直径小，圆筒的直径愈小浆液流动速度愈大，一定程度上有利于增大惯性离心力，能提高沉降速度；加长锥体部分可增大液流行程，从而延长了悬浮浆液在器内的滞留时间，增大了有效沉淀的时间；提高给浆口浆液流速能提高净化效率，但是对筒体内衬及沉沙口配件磨损增加，需要多次更换，延长了清孔过程的总体时间，增加了相应的人工及材料费用；由此得出：通过锥形长筒与小直径的圆筒的合理组合，能有效地提高泥浆的清孔效率。

### 3 水力旋流器换浆法与其他清孔方法的对比

清孔的目的是使泥浆的相对密度、粘度、含砂率等指标达到合理范围，清孔后泥浆的含砂率降至2%以下，粘度为17s~20s，相对密度为1.03~1.10g/cm<sup>3</sup>。清孔通常是抽、换原钻孔内悬浮有钻渣的泥浆。随着桥梁施工工艺的发展，采用大直径钻孔灌注桩已非常普遍，在施工中有效清除孔底沉淀对桩基过程控制和最终质量至关重要。

清孔方法应根据设计要求、钻孔措施、配备的机械设备和工程地质情况确定。依据各种工程实

例，对通常的灌注桩清孔办法优缺点简述如下：

#### 3.1 抽浆法清孔

抽浆法清孔有如下几种方式：

(1) 用反循环钻机钻孔时，成孔后，依靠钻机的反循环系统的自带泵持续抽渣5min~15min，将孔底钻渣清除干净。

(2) 利用空气吸泥机清孔，以灌注的导管作为吸泥通道，以高压风管提供压缩空气。

抽浆清孔比较彻底，适用于各种钻孔灌注桩。但孔壁易坍塌的桩孔选择此法清孔时要谨慎，防止坍塌；若不是泵吸式反循环钻机，则需增加其它工具。

#### 3.2 喷射法清孔

(1) 喷射法清孔通常用于二次清孔，钻孔工作完毕，由于工序转换，沉淀厚度可能会增大，是在灌注混凝土前，对孔底进行高压喷射泥浆浆或射风数分钟，扰动钻渣使之悬浮于混合浆中，立即灌注桩基混凝土。

喷射法清孔使用简单方便；但是作为清孔方法的补充，有很大局限性，高压射浆或射风易破坏孔壁，降低护壁效果，可能造成塌孔。

#### 3.3 砂浆置换钻渣法清孔

砂浆置换钻渣法清孔，先用掏渣筒清除尽可能多的钻渣，然后以活底筒在孔底泄入由炉灰与水泥加水拌和成的砂浆，其相对密度小，能浮托在混凝土之上。砂浆中加入适量的缓凝剂，通过搅拌器使孔底残留的钻渣均匀悬浮于砂浆中，灌注混凝土后，钻渣连同特殊砂浆被推至桩孔顶。

砂浆置换钻渣法清孔在国外有数千根桩的施工经验，效果良好，可满足柱桩质量要求；但是无形中增加了施工成本，对环境也有比较大的负面影响。

#### 3.4 换浆法清孔

换浆法清孔常见的几种方法简要描述：

(1) 使用正循环回转钻时，终孔后，停止进尺，空转，并保持泥浆连续循环，把钻孔内悬浮钻渣较多的泥浆换为较干净的泥浆。

(2) 使用冲击钻冲击成孔时，通常钻孔时间较长，过程中采用沉淀法对含有钻渣的泥浆进行自然沉淀，并持续循环达到清孔的目的。

换浆法清孔对正循环回转钻机和冲击钻来说，不需要另外增加器械，且孔内仍然有泥浆护壁，坍塌风险降低。经过下桑桥的工程实例发现：应用了水力旋流器的换浆法，大幅提高了清孔效率，相较于其他清孔方法，成本低廉且安全有效。

### 4 结论

钻孔灌注桩清孔的各种方法应结合实际施工情况，根据不同的地质情况、施工单位持有设备的情况、对各种清孔工艺的熟练程度，选择一种适宜的方法进行。通常工程中选用的清孔方法是持续循环换浆法清孔，当灌注前孔底沉淀层厚度不符合要求时，才考虑其它方法实施二次清孔。

本工程实例表明，水力旋流器的换浆法清孔在不提高工程造价成本、无特殊机具要求的条件下，提高了清孔的效率，减少了桩孔暴露的时间，降低了灌注过程中的风险，有效地保证了桩基的质量。

### 参考文献

- [1] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基技术规范 [S]. 中国建筑工业出版社, 1994.
- [2] 史佩栋. 实用桩基工程手册 [M]. 中国建筑工业出版社, 1999.
- [3] 佟明文. 灌注桩施工质量控制与事故预防 [D]. 中国地质大学, 2007.
- [4] 李世京. 钻孔灌注桩施工技术 [M]. 北京地质出版社, 1990.
- [5] M. J. Tomlison. Pile Design and Construction Practice 1997.
- [6] 向中富. 桥梁施工控制技术 [M]. 北京, 人民交通出版社, 2001.
- [7] 罗骥先. 桩基工程检测手册 [M]. 北京, 人民交通出版社, 2003.
- [8] 中华人民共和国交通部. 公路桥涵施工技术规范 (JTJ041-2000) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [9] 宫振堂, 姜大鹏. 浅谈桥梁工程钻孔桩施工 [J]. 黑龙江交通科技, 2003, 1.
- [10] 王振福, 等. 钻孔灌注桩质量事故的原因、预防及处理 [J]. 陕西地质, 2000, 18(2): 63-67.
- [11] 陈康隆. 阐述桩基工程检测中存在的问题及检测方法 [J]. 广东科技, 2008, (03).
- [12] 莫冠富. 公路桥梁桩基检测相关问题探讨 [J]. 科技资讯, 2009, (05).
- [13] 李永添. 桥梁桩基钻孔灌注桩施工质量控制 [J]. 广东建材, 2010 (07), 48-50.
- [14] 习康, 鲁浩. 复杂地质条件下桥梁桩基施工质量控制 [J]. 中南公路工程, 2005 (01), 45-47.
- [15] 周云军. 桥梁桩基设计施工中的几点感想 [J]. 山西建筑, 2009, (19).
- [16] 钟仕林, 张云, 丁静. 浅谈混凝土钻孔灌注桩施工工艺与技术控制 [J]. 山西建筑, 2010, (18).

# 浅析民用建筑配电变压器容量与节能运行

莫智源

(深圳市建安(集团)股份有限公司, 深圳 518040)

**【摘要】** 本文着眼于民用建筑中的变压器,对民用建筑中配电变压器的节能方法进行了研究,对降低电能损耗,提高能源利用率有着很大的现实意义。通过对理论的介绍与研究来寻找民用建筑变压器节能的方法,为变压器节能方法研究打下了理论基础,通过理论部分的分析与研究,推导出了减小民用建筑配电变压器损耗的措施,这是本文的核心部分,具体包括:(1)使用高效率的变压器,最好在 II 级以上;(2)利用TOC法对备选变压器进行分析,通过比对各种数据,选择经济效益最高的变压器容量;(3)使变压器运行在经济运行区,根据不同的负荷等级与供电方案综合选择出最经济的运行方式;(4)采取措施增大系统的功率因数,并阐述了无功补偿的具体理论与方法;(5)抑制建筑电气系统产生的谐波,并介绍了具体措施。

**【关键词】** 建筑配电;变压器;能耗;TOC法;无功补偿

## Analysis on capacity and energy saving operation of distribution transformer in civil buildings

Mo zhiyuan

(Shenzhen Jianan Group Co.,Ltd.,Shenzhen,518040)

**Abstract:** Focusing on the transformers in civil buildings, this paper studies the energy-saving methods of distribution transformers in civil buildings, which is of great practical significance to reduce power loss and improve energy utilization. Through the introduction and research of the theory to find the method of transformer energy saving in civil buildings, which lays a theoretical foundation for the research of transformer energy saving method. Through the analysis and research of the theoretical part, the measures to reduce the loss of distribution transformer in civil buildings are deduced, which is the core part of this paper, including: (1) use high-energy-efficient transformer, preferably above class II; (2) the TOC method is used to analyze the alternative transformer, and the transformer capacity with the highest economic benefit is selected by comparing various data; (3) make the transformer operate in the economic operation area, and comprehensively select the most economical operation mode according to different load levels and power supply schemes; (4) measures are taken to increase the power factor of the system, and the specific theory and method of reactive power compensation are described; (5) suppress the harmonics generated by the building electrical system, and introduce the specific measures.

**Keywords:** building power distribution; transformer; energy consumption; TOC method; reactive power compensation

## 0 引言

民用建筑中的配电变压器一般是电压等级为10kV,容量在2000kVA以下的电力变压器。作为与用户最末端相连的变压器,其应用十分广泛,几乎占据了在网运行变压器数量的百分之四十,造成的电能损耗不可忽视。它的广泛应用以及长期运行的特点引起了专家们的注意,如果采取一定措施,它将能节省巨大的能源。

本文将变压器的减损节能理论与民用建筑电气设计相结合,从变压器自身和建筑电气设计的角度进行研究,得出了民用建筑中配电变压器的几种节能措施。在设计时若能改善变压器的耗能情况将会对我国的节能工程有很大帮助,因此研究民用建筑中变压器的节能措施具有重要的现实意义。

## 1 民用建筑配电变压器基础理论

### 1.1 变压器的基本知识

变压器的工作原理如图1,将一个正弦交流电压 $U_1$ 加在变压器的一次绕组两端,导线中会产生交变电流 $I_1$ 和交变磁通 $\Phi$ , $\Phi$ 穿过一次绕组和二次绕组形成的闭合磁路并由于电磁感应在二次绕组中感应出电动势 $E_2$ ,在一次绕组中感应出自感电动势 $E_1$ 。此时将负载接入变压器的二次侧,二次绕组将产生电流 $I_2$ ,此时端电压 $U_2$ 就是变压器的输出电压,从而实现了电能的传递。

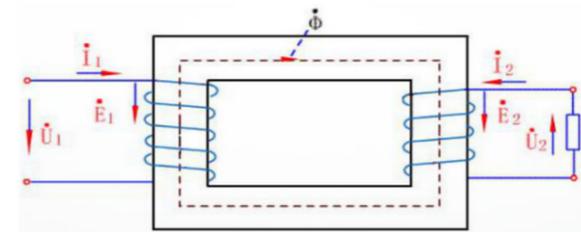


图1 变压器的工作原理

由电磁感应定律可得:

$$E_1=4.4fN_1\Phi_m$$

$$E_2=4.4fN_2\Phi_m$$

式中: $E_1$ 、 $E_2$ —二次绕组的感应电动势(V)

$f$ —一次侧交流电源频率(Hz)

$N_1$ 、 $N_2$ —绕组匝数

$\Phi_m$ —交变磁通中的最大值(Wb)

由于变压器绕组阻止较小,其本身的压降也很小,所以 $U_1 \approx E_1$ 、 $U_2 \approx E_2$ ,可以得到:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

即可以通过在变压器一次绕组上抽出分接头来实现二次绕组的电压,其原理是通过更改分接头改变了一次绕组的匝数,从而是一、二次绕组的匝数比发生改变(即改变了 $k$ 值),这样可以实现二次侧电压的调节。

变压器的器身是指变压器的铁心和绕组装配在一起组成的。当变压器的器身放置在充满变压器油的油箱里时,变压器就被称作油浸式变压器。如图2所示,该变压器就是电力变压器中常见的一种。



图2 三相油浸式电力变压器

### 1.2 变压器的损耗

变压器在工作中会产生很多损耗,通常由固定损耗和可变损耗两部分组成,固定损耗就是变压器空载时所消耗的能量,该损耗与负载大小没有关系,相对固定,所以为固定损耗。可变损耗为负载损耗,随着负载的大小改变而改变,因此为可变损耗。由于变压器的绕组大部分都是铜绕组,存在着电阻,在变压器运行时,负载电流通过这些电阻时会消耗一定的功率,这些功率形成了热量而浪费,从而造成了损耗,这部分损耗被称作“铜损”。铜损分为有功和无功两部分,有功就是电流通过绕组产生的损耗,无功部分主要是漏磁通产生的损耗。负载损耗随着负载的大小变化等而变化,因此为可变损耗。

#### 1.2.1 有功功率损耗

变压器的有功功率损耗可由 $P_0$ 、 $P_k$ 计算出来,双绕组变压器在时间T内消耗的有功功率稳态值 $\Delta P$ (kW)和稳态有功功率损耗率 $\Delta P\%$ 的求解方法如下:

$$\Delta P = P_0 + \beta^2 P_k$$

$$\Delta P = \frac{\Delta P}{P_1} \times 100\% = \frac{P_0 + \beta^2 P_k}{\beta S_N \cos \Phi + P_0 + \beta^2 P_k} \times 100\%$$

$$\beta = \frac{S}{S_N} = \frac{P_2}{S_N \cos \Phi}$$

式中： $P_0$ 、 $P_k$ —变压器的空载损耗、负载损耗 (kW)；

$\beta$ —变压器在T时间内的负载系数平均值；

$S$ —变压器在T时间内输出的视在功率平均值 (kVA)；

$P_1$ —T时间内电源向变压器输入的有功功率 (kW)；

$P_2$ —变压器在T时间内输出的有功功率平均值 (kW)；

$\cos\Phi$ —T时间内变压器二次侧的负载功率因数平均值  $\cos\Phi=P_2/S$

### 1.2.2 无功功率损耗

变压器属于感性负载，在其工作过程中，它耗费的无功功率要远大于耗费的有功功率，因此在计算其损耗时，绝不能忽略这部分无功损耗。

利用变压器的四个技术参数， $I_0$ 、 $P_0$ 、 $U_k\%$ 、 $P_k$ 可计算出变压器空载实验和短路实验时所损耗的无功功率：

$$S_0 = \sqrt{3}I_0U_{1N} = I_0\%S_N \times 10^{-2}$$

$$Q_0 = \sqrt{S_0^2 - P_0^2}$$

$$S_k = \sqrt{3}I_{1N}U_{1N} = U_k\%S_N \times 10^{-2}$$

$$Q_k = \sqrt{S_k^2 - P_k^2}$$

式中： $S_0$ —做空载实验时变压器接入电源一侧的视在功率 (kVA)；

$Q_0$ —变压器空载时所消耗的无功功率即励磁功率 (kVar)；

$S_k$ —做短路试验时变压器接入电源一侧的视在功率 (kVA)；

$Q_k$ —变压器承担额定负载时所消耗的无功功率即漏磁功率 (kVar)

双绕组变压器在时间T内的消耗的无功功率稳态值 $\Delta Q\%$  (kVar)和稳态无功功率损耗率的求解方法如下：

$$\Delta Q = Q_0 + \beta^2 Q_k$$

$$\Delta Q\% = \frac{\Delta Q}{P_1} \times 100\% = \frac{Q_0 + \beta^2 P_k}{\beta S_N \cos\Phi + P_0 + \beta^2 P_k} \times 100\%$$

由于变压器连接在电网里，它对电网有一定的影响。若电网所带变压器的首端无功功率发生变化，则引起受电电网无功功率也发生变化，最终导致电网有功损失的增加，为了准确计算和分析变压器的无功消耗所引起连接变压器电网的有功损耗的增加，引入无功经济当量的概念。

$K_Q$ 也叫无功功率经济当量，它实质表征着：当变压器的无功功率损耗每减少1kVar时，它所连接的电力系统有功功率损耗下降的数值。若已知从发电厂到变电站（所）变压器所在处的电阻 $R$  ( $\Omega$ )、线电压 $U$  (kV)、变压器无功负载 $Q$  (kVar)，可用下列公式近似计算：

$$K_Q \approx \frac{\Delta Q}{U} R \times 10^3$$

在实际应用中，人们根据以下情况确定 $K_Q$ 的数值：

(1) 当变压器处于发电厂母线直配位置时， $K_Q=0.02\sim 0.04$ kW/kVar；

(2) 当变压器在系统中处于二次变压时， $K_Q=0.05\sim 0.07$ kW/kVar；

(3) 当变压器在系统中处于三次变压时， $K_Q=0.08\sim 0.1$ kW/kVar；

(4) 当 $\cos\Phi$ 已经补偿到0.9以上时， $K_Q=0.02\sim 0.04$ kW/kVar；

(5) 对于建筑配电变压器 $K_Q=0.1$ kW/kVar。

### 1.2.3 综合功率损耗

变压器的综合功率损耗是指由变压器的有功功率损耗和无功功率损耗引起的电网增加的有功功率损耗和变压器自身的有功功率损耗之和。综合功率损耗是具有系统性的有功功率损耗，它立足于电力系统总体的最佳节能，既考虑有功电量节约，又考虑无功

电量节约的综合最佳；既考虑用电单位的节电，又考虑供电网损的降低。

双绕组变压器在时间T内的消耗的综合功率稳态值 $\Delta P_z$  (kW)和稳态综合功率损耗率 $\Delta P_z\%$ 的求解方法如下：

$$\Delta P_z = \Delta P + K_Q \Delta Q = P_{0z} + \beta^2 P_{kz}$$

$$\Delta P_z\% = \frac{\Delta P_z}{P_1} \times 100\% = \frac{P_{0z} + \beta^2 P_{kz}}{\beta S_N \cos\Phi + P_0 + \beta^2 P_k} \times 100\%$$

式中： $K_Q$ —无功功率经济当量 (kW/kVar)；

$P_{0z}$ —空载综合功率损耗 (kW)， $P_{0z} = P_0 + K_Q Q_0$ ；

$P_{kz}$ —额定负载综合功率损耗 (kW)， $P_{kz} = P_k + K_Q Q_k$

变压器功率损耗的稳态计算适用于T时间段内负载相对平稳、负荷率（平均负荷与最大负荷之比）大于等于95%时，此时，其计算误差一般不会超过0.3%。若T时间段内负载波动较大、负荷率小

于95%时，稳态计算法得到的结果可能误差较大，需用动态计算法。动态计算法与稳态计算法类似，只是将各种参数换为相应瞬时值。

### 1.3 变压器的经济运行

变压器的经济运行是在确保变压器安全运行及满足供电量和保证供电质量的基础上，利用各种设备、技术以及管理手段，优化变压器的负载及运行方式，从而最大限度的降低变压器的电能损耗。通俗的讲，变压器经济运行就是选择参数好的变压器和组合最佳的变压器运行方式。

#### 1.3.1 综合功率经济运行区

我国《电力变压器经济运行国家标准GB/T13462-2008》规定变压器在额定负载条件下运行属于经济运行区。变压器额定综合功率损耗率 $\Delta P_{ZN}\%$ 计算公式：

$$\Delta P_{ZN}\% = \frac{P_{0z} + P_{kz}}{S_N \cos\Phi + P_0 + P_k} \times 100\%$$

变压器综合功率的经济运行区负载系数下限值 $\beta_{L2Z}$ 为：

$$\beta_{L2Z} = \frac{P_{0z}}{P_{kz}} = \beta_{JZ}^2$$

变压器的综合功率经济运行区为： $\beta_{JZ}^2 \leq \beta \leq 1$ 。

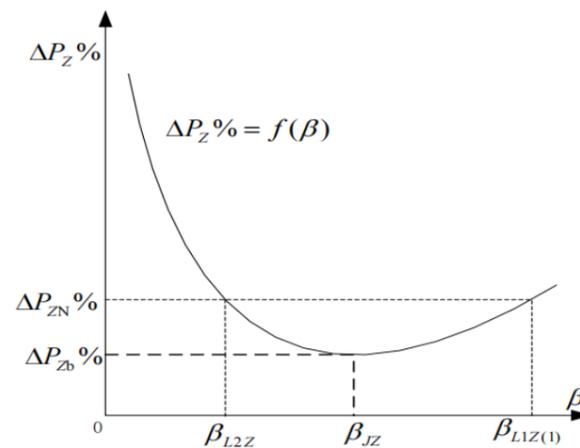


图3 变压器综合功率经济运行区划分图

#### 1.3.2 有功功率经济运行区

同综合功率经济运行区，有功经济运行区上限值取1，下限值取 $\beta_{Jp}^2$ ，则变压器有功功率经济运行区为： $\beta_{Jp}^2 \leq \beta \leq 1$ 。

#### 1.3.3 无功功率经济运行区

同综合功率经济运行区，有功经济运行区上限值取1，下限值取 $\beta_{JQ}^2$ ，则变压器有功功率经济运行区为： $\beta_{JQ}^2 \leq \beta \leq 1$ 。

由于经济运行区的下限值太低运行区范围太广，在边缘地区变压器的损耗率比最低点高很多，所以我们要再找到一个最佳运行区，以变压器综合功率最佳运行区为例。GB/T13462-2008 中规定变压器最佳运行区的上限值为，因为此时变压器损耗率已经有了较大下降。与上文求解变压器综合功率经济运行区负载系数的下限值方法相同，可求出变压器综合功率最佳运行区的下限值 $\beta_{JZ}^2$ 。

$$\beta_{JZ}^2 = \frac{P_{0z}}{0.75P_{kz}} = 1.333\beta_{JZ}^2$$

图4是变压器经济运行区的划分。根据上文，我们按损失率的大小将运行区划分为三个区：经济运行区，最佳运行区和最劣运行区。

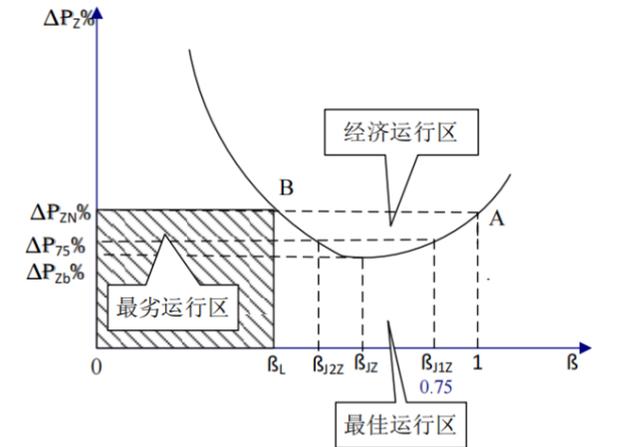


图4 变压器经济运行区划分

可见有变压器的综合功率运行区间范围：

- (1) 最佳运行区： $1.333\beta_{JZ}^2 \leq \beta \leq 0.75$ ；
- (2) 经济运行区： $\beta_{JZ}^2 \leq \beta \leq 1$ ；
- (3) 最劣运行区： $0 \leq \beta \leq \beta_{JZ}^2$ 。

## 2 民用建筑负荷分级与计算

### 2.1 民用建筑负荷等级

根据某用电场所或用电单位对其供电电源的可靠性要求及中断该场所供电所造成的后果，民用建筑电气设计规范对不同用电场所进行了负荷等级的划分。将用电负荷分为一级、二级、三级三个等级，分级的标准见表1。

不同等级负荷对供电回路要求不同，对变压器的容量、台数以及运行方式的确定都有影响。因此在设计时首先要确定负荷等级，可以查阅《民用建筑电气设计规范》等，此处不再赘述。

### 2.2 民用建筑负荷计算

表1 用电负荷分级判定条件及供电要求

负荷等级	负荷等级判定条件	供电要求
一级负荷	a. 中断供电将造成人身伤亡	独立双回路特别重要负荷应增设应急电源
	b. 中断供电将造成重大政治影响	
	c. 中断供电将造成重大经济损失	
	d. 中断供电将造成公共场所秩序严重混乱	
二级负荷	a. 中断供电将造成较大政治影响	双回路供电
	b. 中断供电将造成较大经济损失	
	c. 中断供电将造成公共场所秩序混乱	
三级负荷	不属于一级负荷和二级负荷的负荷	单回路供电, 无特殊要求

负荷计算也就是统计负荷量, 其目的是为得到供配电系统正常运行时的理论数据(也称计算数据), 这些数据是供配电系统设计中选设备、导线及二次系统整定和供电方案确定的依据。

在实际工程应用中负荷计算通常有三种方法: 需用系数法、二项式系数法、单位面积或单位产品瓦特法。需用系数法应用范围最广, 适用于各种场合下的负荷计算; 二项式系数法主要用于设备台数不多但容量差异大的动力系统, 二项式系数法可以有效减小个别大容量设备对整个供电系统的影响; 单位面积或单位产品瓦特法主要应用于工程初步设计。本文只介绍需用系数法。

负荷计算首先要计算设备容量, 设备容量又叫设备功率或安装功率, 用 $P_S$ 表示。对于连续工作的用电设备, 设备容量就等于设备铭牌所标额定功率, 计算公式为:

$$P_S = P_N$$

对于断续反复周期工作的用电设备, 设备容量应在设备铭牌额定功率的基础上进行转换, 计算公式为:

$$P_S = P_N \sqrt{\frac{\varepsilon_N}{\varepsilon_g}}$$

式中:  $P_N$ —电气设备的铭牌额定功率(W或kW);

$\varepsilon_N$ —电气设备额定负荷持续率;

$\varepsilon_g$ —某类电气设备负荷持续率的统一规定折算值。

将设备容量通过需用系数转化为计算数据的方法就是需用系数法, 对于单台设备需用系数法计算公式为:

$$P_{js} = K_x P_S$$

$$Q_{js} = P_{js} \tan \varphi$$

对于配电干线系统或多组用电设备需用系数计

算公式为:

$$P_{js} = K_{\Sigma P} \sum_{i=1}^n (K_{xi} P_{Si})$$

$$Q_{js} = K_{\Sigma Q} \sum_{i=1}^n (K_{xi} P_{Si} \tan \varphi_i)$$

无论是对单台设备还是配电干线系统或多组用电设备都有如下公式:

$$S_{js} = \sqrt{P_{js}^2 + Q_{js}^2}$$

$$I_{js} = \frac{S_{js}}{\sqrt{3} U_N}$$

式中:  $P_{js}$ —有功计算功率(W或kW);

$Q_{js}$ —无功计算功率(Var或kVar);

$K_x$ 、 $K_{xi}$ —电气设备的需用系数;

$\tan \varphi$ 、 $\tan \varphi_i$ —电气设备的功率因数角正切值;

$K_{\Sigma P}$ —有功功率同时系数, 一般取0.9~0.95;

$K_{\Sigma Q}$ —无功功率同时系数, 一般取0.93~0.97;

$S_{js}$ —视在计算功率(VA、kVA);

$I_{js}$ —计算电流;

$U_N$ —用电设备或系统的额定电压。

实际工程设计中, 使用计算电流来选择导线和设备以及二次系统整定和计算系统损耗。整个系统的计算视在功率通常作为变压器容量选择的重要依据。

### 3 配电变压器的节能方法分析

#### 3.1 选择变压器的经济容量

选择变压器时首先要满足各种用电负载的需要, 根据不同负荷的等级先来确定变压器的台数, 有以下原则:

- 当单位是三级负荷时可用一台变压器;
- 当单位有二级及以上负荷时, 至少有两台变压器;
- 在企业里, 要把动力负荷和生活区负荷严格

分开;

d) 当计量等级不同时, 要用不同的变压器(一般计量等级分为I商业用电; II工厂用电; III事业办公单位; IV民用用电);

e) 如果管理需要可以加独立的变压器;

f) 当 $\Delta U$ (输电距离过长如水泵房要就近水源, 矿井要就近矿源等)过大时, 可增加变压器台数(单独设立变压器);

g) 当负荷类型重要时(如手术室相关楼层; 电视直播中心等), 可设单独变压器供电。

确定变压器的台数后, 可以以 $\beta$ 为计算依据来选择变压器容量, 当已知用户的有功计算负载和功率因数或已知用户的视在计算负荷时, 可以利用下面公式来计算变压器容量:

$$S_{TN} = P_{js} / (\beta \times \cos \varphi) \text{ 或 } S_{TN} = S_{js} / \beta$$

为了选出变压器的经济容量, 我们一般使用TOC算法。TOC法即综合能效费用法(Total Owning Cost)的简称, TOC法的基本公式为:

$$TOC = CI + P_{OEPC} + P_{KEPC}$$

式中: CI—变压器初始投资费用(元);

$P_{OEPC}$ —变压器空载损耗等效费用(元);

$P_{KEPC}$ —变压器负载损耗等效费用(元)。

采用TOC法选择民用建筑配电变压器经济容量首先要计算出待选变压器的TOC值。实际分析过程中直接选择TOC值最小的变压器有时并不能选出真正经济的变压器, 还要结合变压器负载率 $\beta$ 、变压器综合功率损耗等效费用 $P_{ZEPC}$ 、变压器寿命期间的电能损耗量 $W$ 进行综合分析比较。 $P_{ZEPC}$ 和 $W$ 的计算公式如下:

$$P_{ZEPC} = P_{OEPC} + P_{KEPC}$$

$$W = T(P_0 + K_Q + Q_0) + \tau \beta_0^2 (P_K + K_Q Q_K)$$

TOC法适用范围广, 可用该方法对不同容量\不同类型的变压器进行经济性评价。使用该方法对变压器经济容量进行选择更具有实际意义。

#### 3.2 选择变压器的经济运行区间

考虑到电网负载增加的需要, 在选择变压器容量时一般都留有一定的余量, 因此变压器的容量一般选择偏大。而电网的季节性很强, 峰谷差大, 我们可以充分利用电网供电系统的特点, 避免出现变压器过载或轻载的现象。变压器的经济运行是在传输相同电量的情况下, 通过选择最佳运行方式和调整负荷, 使变压器电能损耗最低。对于单台变压器应尽量让其经济运行区即 $\beta_{LZ}^2 \leq \beta \leq 1$ 区间运行, 最好在最佳运行区 $1.333\beta_{LZ}^2 \leq \beta \leq 0.75$ 区间运行, 避免其在最劣运行区即 $0 \leq \beta \leq \beta_{LZ}^2$ 运行。

在民用建筑供电里, 分列运行是比较常用的一种方法。在民用建筑中, 为了满足建筑中一、二级负荷的用电需求, 一般有以下三种方案:

(1) 方案一: 市电网单回路或非独立双回路加发电机供电

图5所示为供电方案一的示意图, 系统10kV进线来自同一上级变电所, 对于系统中的一级负荷无法满足独立双回路供电的要求, 因此通过发电机来提供另一备用回路。正常状态时, 1、2#变压器各自承担自己低压母线所带三级负荷, 1#变压器为系统的一、二级负荷提供主电源, 2#变压器为系统的一、二级负荷提供备用电源; 当1#或2#变压器故障或检修时, 切除该变压器低压母线上的部分或全部三级负荷, 由另一台变压器保证系统一、二级负荷的供电; 当市电网失电或两台变压器同时故障, 系统一、二级负荷主电源失电, 此时采用发电机通过备用回路对一、二级负荷供电。

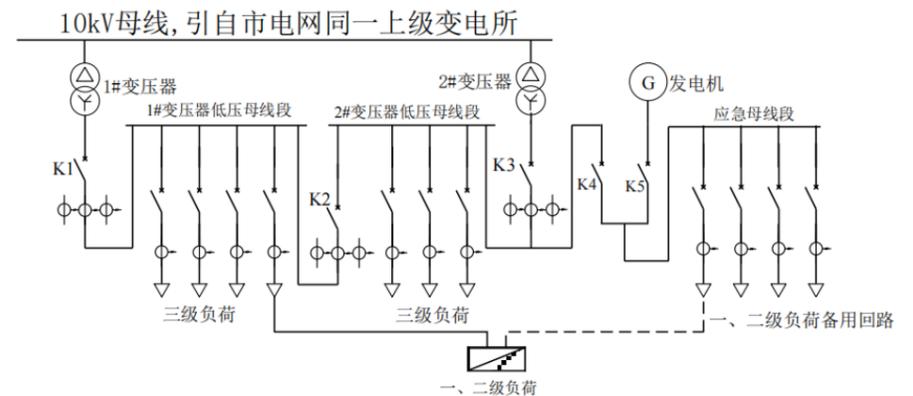


图5 市电网单回路或非独立双回路加发电机供电方案示意图

方案一主要适用于有一级负荷但取得第二电源有困难或不经济合理的场所,对于一、二级负荷容量不大的一般建筑如高层普通住宅、宿舍、普通办公楼等该方案也适用。

(2) 方案二:市电网独立双回路供电

图6所示为供电方案二的示意图。正常状态下,1、2#变压器各自承担自己低压母线所带三级负荷,1#变压器为系统的一、二级负荷提供主电

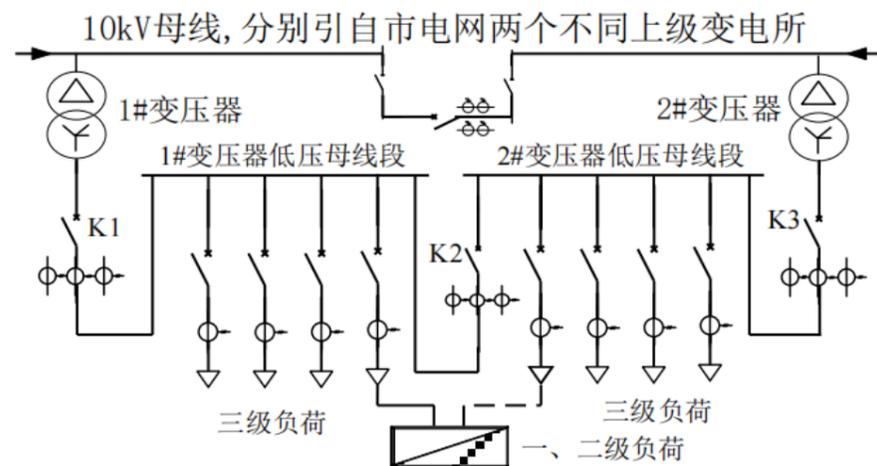


图6 市电网独立双回路供电方案示意图

方案二主要用于一级负荷用户,如大型火车站、大型商场、重点高等院校等大量人员集中的场所。

(3) 方案三:市电网独立双回路加发电机供电

图7所示为供电方案三的示意图。方案三主要考虑了市电网两路电源同时故障的情况,为了减小特别重要的建筑完全断电所带来的影响,在方案二的基础上增加了发电机和应急母线段。当市电网两路电源同时故障时,采用发电机通过备用回路对系

源,2#变压器为系统的一、二级负荷提供备用电源:当1#或2#变压器故障或检修时,切除该变压器低压母线上的部分或全部三级负荷,由另一台变压器保证系统一、二级负荷的供电;当市电网两路电源其中一路失电时,闭合高压母联开关,由另一路电源同时为1、2#变压器供电,保证系统正常运行。市电网两路电源同时故障的情况属于极小概率事件,此处不作考虑。

统中消防负荷和特别重要负荷进行供电,维持建筑的基本运营。对于一些消防负荷与特别重要负荷较小的系统或对停电范围有特殊要求的系统,可设置非消防应急母线段,将部分非消防一、二级负荷备用回路由非消防应急母线段引出,如图3.5中右侧虚线框中所示,这样不仅可以提高发电机利用率,同时还能减小停电范围。

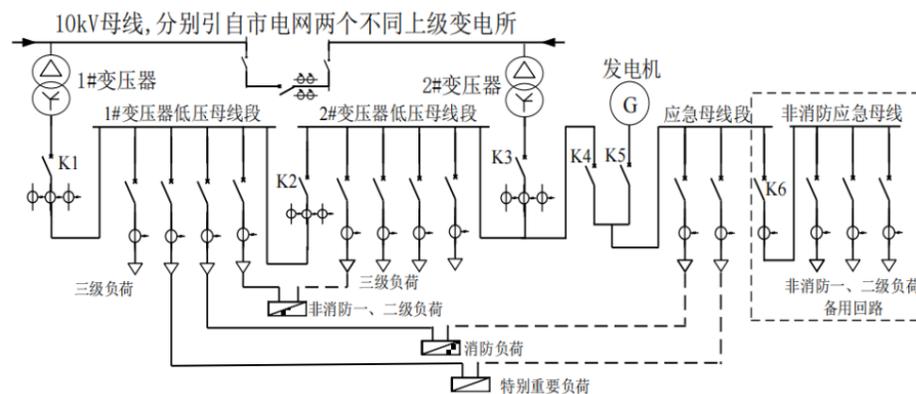


图7 市电网独立双回路加发电机供电方案示意图

方案三主要适用于特别重要负荷用户,如国际会议中心、大型金融中心、三级医院、电力调度中心、交通指挥中心、超高层地标性建筑等。

### 3.3 提高系统功率因数

系统的功率因数影响着变压器的损耗,提高系统功率因数是变压器节能的一个有力措施。一般采用提高自然功率因数(用户的用电设备未投入无功补偿装置时的功率因数)和使用无功补偿装置的方法。

提高自然功率因数可以采取的措施:合理选择电动机和变压器、采用功率因数高的用电设备。

常用的补偿装置是电力电容器,也叫并联电容器、移相电容器、静电电容器,将无功补偿电容器并联在需要无功功率的电气设备上即可提高功率因数。由于建筑负荷经常会变,为了让无功补偿装置能够随系统某些特定参数的变化而自动调节其无功补偿量,可以使用动态无源无功补偿装置SVC。在实际应用中,无功补偿装置一般采用将TCR与TSC组TCR+TSC型的SVC,或将SVC与固定电容器FC或机械投切电容器(Mechanically Switched Capacitor, MSC)组合成TCR+FC(或MSC)、TCR+TSC+FC(或MSC)等形式的混合型动态无源无功补偿装置,这样可以实现对系统无功功率的连续动态补偿。

### 3.4 减少系统谐波

系统的谐波影响着变压器的损耗,减少谐波可以减小变压器损耗,我们可以采取受端治理和被动治理的治理手段。受端治理是针对那些受谐波影响较大的用电设备,比如导线、电动机以及我们所说

的变压器等,增强它们及系统的谐波抗干扰水平。被动治理是使用滤波器来阻止谐波源产生的谐波注入电网,或者阻止电力系统的谐波流入负载端。一般可以使用无源滤波器、有源滤波器、混合滤波器等,不再赘述。

### 4 结语

民用建筑能耗中,变压器的能耗要占20%左右,降低变压器的损耗对节能有重要意义。本文在对变压器及影响其损耗因素进行分析的基础上,结合民用建筑中配电变压器的特点与选用原则以及民用建筑中负荷的特点,浅析了民用建筑配电变压器的经济运行方法。民用建筑变压器的节能研究对社会有着很大意义,变压器的节能减损之路仍然很长,需要我们的继续深入研究。

### 参考文献

- [1]《电力变压器经济运行国家标准 GB/T13462-2008》.
- [2]曾以雄. 变压器运行效率与最佳运行效率的计算[J]. 建筑电气.
- [3]张植保. 变压器原理与应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2007.
- [4]Francisco C. De, La Rosa. 电力系统谐波[M]. 北京:机械工业出版社, 2009. 8.
- [5]贺美杰. 民用建筑配电变压器节能措施分析[D]2017
- [6]JGJ/T 16-2008, 民用建筑电气设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.
- [7]刘欣. 民用建筑负荷分级及供电系统配电主接线设计探讨[J]. 现代建筑电气, 2013.
- [8]栗时平, 刘桂英. 静止无功功率补偿技术[M]. 北京:中国电力出版社.

# 生活垃圾填埋场处置技术及实例分析

沈海林

(深圳市天健坪山建设工程有限公司, 深圳 518118)

**【摘要】** 由于经济条件等历史原因,城市中往往存在着很多垃圾填埋场,其中很大比例未经过防渗等专业处理,这些填埋场既侵占珍贵的土地资源,又会对环境产生污染,随着经济的发展,亟需对这些历史垃圾填埋场进行合理处置。对深圳市垃圾填埋场的分布及垃圾成分等进行调研,针对深圳市垃圾填埋场特点,可采筛分综合利用、异地搬迁、原位封场、好氧加速稳定化等方法进行处理,深圳土地价值高,异位治理模式是可能性最高的处理模式。田寮垃圾填埋场搬迁整体采用“原位筛分、异地处置”的方法,对该项目处置方式进行简要介绍,供技术人员参考。

**【关键词】** 垃圾填埋场; 处置方法; 田寮案例

## Domestic waste landfill disposal technology and successful examples

Shen Hailin

(Shenzhen Tagen Pingshan Construction Engineering Co.Ltd, Shenzhen 518118)

**Abstract:** Due to historical reasons such as economic conditions, there are often many landfills in cities, a large proportion of which have not been professionally treated, such as anti-seepage treatment. These landfills not only encroach on precious land resources, with the development of economy, it is urgent to dispose these historical landfills reasonably. The distribution and composition of waste in Shenzhen Municipal Landfill were investigated, the land value of Shenzhen is high, and the treatment mode of Ectopia is the most possible one, which can be dealt with by comprehensive utilization, relocation, field closure in situ, and aerobic accelerated stabilization. The method of "In-situ sieving and off-site disposal" is adopted in the whole relocation of tianliao landfill, and the disposal method of this project is briefly introduced for the reference of technical personnel.

**Keywords:** Landfill site; disposal method; Tianliao case

## 0 引言

随着城市经济快速发展,近10年我市将垃圾填埋场对生态环境有影响又未经土地用地、规划、立项、环境保护等方面审批,及未按垃圾卫生填埋场建设的规范标准进行设计和建设的问题垃圾填埋场提上了整治的日程。没有防护措施的垃圾填埋场对生态环境的影响是巨大的,其主要的危害包括土地资源浪费、有机物、重金属、病原微生物多重污染、填埋气体污染、甲烷燃烧爆炸风险以及土壤、地下水污染风险。根据《“十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划》,“十三五”期

间,全国预计实施存量治理项目803个,工程投资241.4亿元,存量治理市场规模大,需求迫切。

### 1 垃圾场处置技术的现状

经过对深圳市垃圾填埋场情况进行调研,在当前垃圾分类背景下,深圳市垃圾主要分为生活垃圾、建筑垃圾两类,以及历史原因形成的非正规填埋场。生活垃圾主要处理方式焚烧、堆肥、填埋、回收可利用物以及上述方法的综合;建筑垃圾主要处理方式制备再生骨料,然后用于制砖、制预拌砂浆、再生种植土、用作道路基础填料等。非正规垃圾填埋场是指未经用地审批,未按规范标准

进行设计和建设的垃圾填埋场,具有土地资源浪费、环境污染等风险,治理模式主要有垃圾筛分综合利用、异地搬迁、原位封场、好氧加速稳定化;方式的选择主要取决于城市开发需求,深圳市土地再开发价值高,宜选择异位治理模式,技术主要为垃圾筛分综合利用,对于开发需求不高的地区,通常选择原位治理模式。深圳占地1997.47平方千米,人口的密度是,每平方公里高达5963人,是全国平均水平的41倍左右,值得注意的是,深圳市范围内,还有一大部分是山体,如果不是这个原因,深圳的人口密度将会更高。随之带来的生活垃圾就在肉眼可见的速度蚕食着这个城市的可用土地,处理生活垃圾更是迫在眉睫,刻不容缓。

## 2 生活垃圾的特点及处置的方法

### 2.1 生活垃圾场

#### 2.1.1 深圳生活垃圾特点

从整体角度分析,在我国城市当中,生活垃圾的主要构成便是无机物、有机物以及可回收物,其中无机物比较多,有机物以及可回收物比较少。但是在城市不断加快发展的条件下,使得电气化率有了很大程度的提升,极大的改变了人们的生活水平,这也使得生活垃圾当中的可燃物含量以及有机物有了明显的上升。由于城市管理有了较大的提升和改善,针对环卫设施的相关建设以及规划工作有所增强,所以已经基本杜绝生活垃圾中汇入建筑垃圾,有机物以及可回收物也在呈现出增长的态势。

根据深圳市生活垃圾处理监管中心报告,深圳市各个区源头生活垃圾各物理组分含量比例差异较小,总体分布规律相似,厨余类含量最高且比例较稳定,大部分占生活垃圾总量的55%以上;另外,开展了厨余分类的小区,厨余比例较低,仅占42.84%,说明这两个小区厨余分类工作已具有一定成效。其次比例较高的是纸类和橡塑类,纸类的比重达16~33%,在纸类中,以卫生纸类所占的比例最大,占纸类总量的2/3以上,多为浸湿的纸巾和纸尿裤等;其中橡塑类主要以塑料袋和其他橡塑为主,在10%~15%之间,塑料瓶很少;纺织类和玻璃类仅次于前三类,大约占2%~3%,样品中的织物主要以废弃抹布和少量小件破旧衣物为主,玻璃中则以调味瓶、啤酒瓶为主。金属占比接近1%,主要为

易拉罐、瓶盖等;木竹、砖瓦陶瓷、其他类等含量均在0.6%以下,其中木竹主要为一次性筷子;深圳地处南方,生活能源以天然气为主,小区的生活垃圾中基本无灰土。

深圳市2017年末端处理设施生活垃圾湿基低位热值为6053.32kJ/kg。各处理设施的生活垃圾湿基低位热值差别不大,最高为下坪填埋场生活垃圾热值达7115.32kJ/kg,而最低的为南山垃圾焚烧厂为5352.76kJ/kg。但经济稍落后的区域,需要使用卫生填埋以及堆肥法进行处理。

#### 2.1.2 生活垃圾处理方法

##### (1) 焚烧(发电)

焚烧的实质是将有机垃圾在高温及供氧充足的条件下氧化成惰性气态物和无机不可燃物,以形成稳定的固态残渣。首先将垃圾放在焚烧炉中进行燃烧,释放出热能,然后余热回收可供热或发电。烟气净化后排出,少量残余残渣排出、填埋或作其它用途。其优点是迅速的减容能力和彻底的高温无害化,占地面积不大,对周围环境影响较小,且有热能回收。因此,对MSW实行焚烧处理是无害化、减量化和资源化的有效处理方式。随着人们环境意识的不断增强和热能回收等综合利用技术的提高,世界各国采用焚烧技术处理生活垃圾的比例正在逐年增加。

##### (2) 堆肥法

利用垃圾中存在的微生物,使有机物质发生生物化学反应,生成一种类似腐植质土壤的物质,它既可用作肥料,又可用于改良土壤。

垃圾堆肥在中国农村已有数千年的历史,也是处理垃圾的主要方法之一。堆肥法按分解作用原理可分为好氧和厌氧两种,多数采用高温好氧法;按堆积方法可分为露天堆肥和机械堆肥两种。好氧堆肥一般在露天进行,其占地面积较大,成肥时间,冬季需一个月,夏季约半个月。工业发达的国家采用机械堆肥作业,成肥时间仅需3~4d,占地面积比常规法缩小五分之四。用机械化装置堆肥,初期常采用堆垛法,不需预先加工或粉碎,但必须把不能成肥的物质分离出去;目前,则采用固定塔、固定室或滚筒进行垃圾的堆肥处理,其中卧式滚筒使用最多,多层立式发酵塔使用也有一定比例。

在堆肥处理过程中,可养殖蚯蚓,蚯蚓既消化垃圾又可喂鱼、养鸡。垃圾与污泥一起处理或垃圾与粪便混合堆肥,既可减少环境污染,还能提高肥效。是发展中国家最有前途的生活垃圾处理方法。

### (3) 填埋法

是一种比较古老而又广泛被采用的垃圾处理方法。填埋处理可分为卫生填埋、压缩垃圾填埋和破碎垃圾填埋3种。煤矿区可充分利用塌陷区或废弃矿井作为垃圾填埋场地,既不占地,对矿区环境影响也较少。为防止二次污染和填埋方便,填埋物一般须符合下列要求:

1) 严禁含有毒有害物<sup>[2]</sup>。包括有毒工业制品及其残物、有毒药物;有化学反应并产生有害物的物质、有腐蚀性或有放射性的物质、易燃、易爆等危险品、生物危险品和医院垃圾及其它污染物。

2) 填埋物<sup>[3]</sup>的含水率小于20%~30%,无机成分大于60%,密度大于0.5t/m<sup>3</sup>。

3) 在降雨量大的地区,填埋物的含水率允许适当增大,但以不妨碍碾压施工为宜<sup>[10]</sup>。填埋是一种工程处理工艺,场址选择应符合当地城乡建设总体规划要求,并与当地的大气防护、水资源保护、大自然保护及生态平衡要求相一致。填埋场应设在交通方便、运距较短、征地费用少、施工方便的地方,并充分利用天然的洼地、沟、峡谷、废坑等。为防止对地下水污染,必须进行人工防渗,即场底

及四壁用防渗材料作防渗处理。垃圾填埋时,采取层层压实的方法<sup>[2]</sup>,压实后密度大于0.6t/m,每层垃圾厚度为2.5~3m,一次性填埋处理,垃圾层最大厚度为9m,垃圾压实后必须覆土20~30cm。

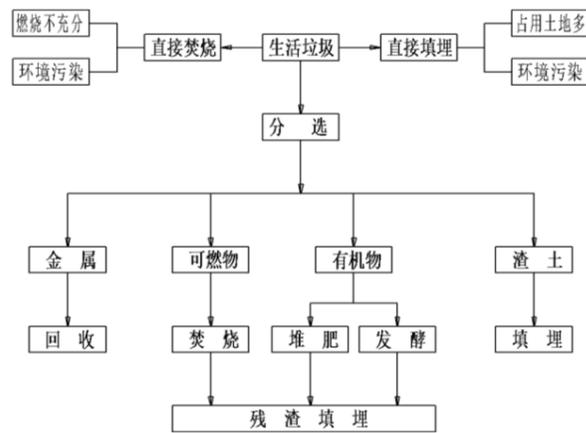
### (4) 回收有用物质

垃圾中的废纸、黑色和有色金属、塑料、织物、玻璃陶瓷、皮革橡胶等有用成分,应回收利用。这也是保护环境的重要措施之一。

回收方法<sup>[7]</sup>有重力、浮选、磁力分选、静电分选等方法,垃圾处理场有专业分选设备。

### (5) 综合处理法

上述方法的综合运用,示意如图:



## 2.2 生活垃圾填埋场处理的技术简述和技术特点

表3 对策措施表

处理技术	技术简述	技术特点
垃圾筛分综合利用	①将已有垃圾堆体开挖后利用机械分离设备对垃圾进行筛分,各项组分综合利用或无害化处置 ②筛分工艺 <sup>[11]</sup> 的原理是根据物料中各组分在密度、颗粒大小、磁化率和光电性质等方面的差异选用适当的设备,将物料分成性质相近的若干类,例如轻质筛上物、无机骨料、腐殖土及金属等	①轻质筛上物主要由塑料、橡胶、织物和木竹等组成,热值较高,可送往垃圾焚烧发电厂焚烧或制成垃圾衍生燃料(RDF) ②无机骨料(砖、石等建筑垃圾)无害化后经粉碎可以再生为骨料、混凝土、烧结砖等产品或直接作为路面基层或垫层填料 ③腐殖土可能受到重金属等污染 <sup>[4]</sup> ,同时还有腐殖质等可被植物利用的有机质,经土壤修复达标后的营养土可用于绿化种植、矿山修复等,也可通过适当调理(化学调理剂、菌剂)后堆肥化生产肥料,无法达标的则需规范填埋处理
异地搬迁	将垃圾清运至标准的生活垃圾卫生填埋场进行卫生填埋,以达到彻底消除污染的目的	①优点:能彻底解决非正规垃圾填埋场的污染问题,原场址可再次开发利用 ②缺点:清运及处理成本高,运输过程中可能造成二次污染,需再占用新的土地资源,若需新建填埋场,选址和审批建设流程复杂,周期长
原位封场	①通过工程阻隔措施将垃圾填埋场区与外部环境阻隔并进行景观生态建设,可分为垂向阻隔和水平阻隔 ②垂向阻隔是在垃圾填埋区边界建设人工隔水帷幕 <sup>[9]</sup> ,将垃圾填埋区与外部环境的水力联系隔断,控制垃圾填埋场渗沥液对地下水的污染 ③水平阻隔是在垃圾填埋区的顶部铺设天然或合成材料,并建设相应的排水系统,以减少自然降水渗入垃圾堆体,减少渗沥液的产生量 <sup>[8]</sup>	①优点:具有操作简单、施工工期短、见效快、费用可控,场地通过生态化改造措施可实现二次开发利用等优点。适合于垃圾存量较大、挖运费用过高的非正规垃圾填埋场的治理 ②缺点:污染和危害未完全消除,投资强度与客观条件的制约将决定治理后对污染控制的效果,从长远看依然存在环境污染风险。若填埋场尚未稳定,则需要较长周期的运行维护,包括渗沥液处理、填埋气导排等,因此通常与好氧加速稳定化技术同时使用

表3(续)

处理技术	技术简述	技术特点
好氧加速稳定化	通过在填埋堆体中埋设注气井、注液井和抽气井,通过风机将空气注入垃圾堆体,并将收集的渗沥液和其他液体回注至垃圾堆体,使堆体中的有机物在适宜的含氧量、温度、湿度条件下,经好氧微生物的作用快速降解,生成以CO <sub>2</sub> 为主要成分的垃圾填埋气体,通过抽气风机从抽气井中抽出,经气水分离器后进入尾气处理设施处理达标后排放	①好氧加速稳定化技术比传统的厌氧降解法降解速度快,治理周期短,一般为2~4a ②有机物好氧降解的产物是CO <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> O等,可有效减少有害气体的产生,减少CH <sub>4</sub> 排放,可以降低气体爆炸的风险。垃圾渗沥液回灌到垃圾堆体中,减少了其对水体的污染。好氧生物反应放热使垃圾堆体中的温度升高,有助于杀灭垃圾中的病原菌,减少对环境的危害 ③渗沥液循环注入堆体起到了增加堆体湿度、提高有机物的降解速率的作用,同时大大降低渗沥液处理量,可有效降低投资和运行成本。垃圾可以在较短时间内达到稳定化,减少封场后填埋场维护的工作量,降低运行成本 <sup>[8]</sup>

## 3 垃圾筛分综合利用成功实例

深圳市光明区田寮垃圾填埋场筛分搬迁项目由我单位负责完成。该处场地原为鱼塘、平原等低洼区,于1997年开始平整作为简易垃圾填埋场:

填埋场位于光明燃机电源基地项目(《广东省能源发展“十三五”规划》<sup>[1]</sup>调增重点项目)用地范围内;2008年完成封场,在简易覆土时没有设置填埋气体、渗滤液的收集、导排设施,填埋气体自然排放;占地面积约2.25万平方米,为平地型垃圾填埋场,垃圾堆体地势较为平坦,垃圾堆体顶面标高多在42.5~40.0米之间,填埋深度平均在8m左右,最深处约11m。

田寮垃圾填埋场搬迁整体采用“原位筛分、异地处置”的主要路线,由于填埋场位于燃机电厂用地范围中部,筛分处置临时用地最终确定为填埋场西南侧的原外环高速建设废弃临用地,临时用地约3万m<sup>2</sup>,分为三个平台,主要设置有2个晾晒区(1.26万平)、1个筛分车间(0.24万平)、2个暂存区(0.7万平)以及场内道路,场内道路出口设置有1套地磅;晾晒区分为车间晾晒和露天晾晒,均配备有除臭喷淋系统,晾晒车间为6023m<sup>2</sup>,为钢结构厂房,高8m,露天晾晒区为6627m<sup>2</sup>,为避免垃圾开挖转运车辆拥堵,晾晒车间设置在一级平台,露天晾晒区设置在二级平台,平台间采用运输皮带机传送;筛分车间为钢结构厂房,高14m,配备3套筛分设备(原设计为2套),车间内配备有除臭气采用除臭喷淋系统外,在车间外侧设置有除臭塔集中收集臭气,处理后排放;场内渗沥液设置污水沟集中收集至渗沥液收集池。

## 4 结论

“十三五”期间,随着经济的快速增长,城市化的日益扩大,生活垃圾的数量与占地面积也在一步步地蚕食着城市用地。同时良好的宜居环境也在被垃圾造成的各种污染所侵占。人与垃圾有着不可分割的

关系,又不得不与垃圾争夺不可再生的生存空间。那么,唯有控制和治理才是人类取胜的捷径。时至今日,治理垃圾技术也在进一步发展,垃圾场的治理将向精细化、多元化方向转变,特别是出于发展循环经济、减少固废、提高资源利用率、释放土地资源的迫切需要,垃圾筛分综合利用在综合发展水平较高的地区将越来越受到青睐。垃圾场的严峻现状是迫在眉睫,各地政府也越来越关注相关工作。随着土壤污染修复工作的逐步规范,管理层面将更加重视对垃圾场地及周边土壤、地下水污染、植被、生态物种、附近河道水域,空气质量等的调查评估及修复工作。

## 参考文献

- [1]国家发展改革委,住房城乡建设部.“十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划:发改环资[2016]2851号
- [2]广东省人民政府.广东省人民政府关于印发广东省土壤污染防治行动计划实施方案的通知:粤府[2016]145号
- [3]生活垃圾填埋场污染控制标准(GB 16889-2008)
- [4]缪周伟.土壤污染防治背景下的非正规垃圾填埋场治理.上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司,上海2001251005-8206(2019)02-0036-06
- [5]生活垃圾焚烧污染控制标准(GB 18485-2014代替GB18485-2001)
- [6]《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485-2014)修改单
- [7]生活垃圾填埋场污染控制标准(GB 16889-2008)
- [8]江韬,赵秀兰.人工湿地系统在垃圾渗滤液处理中的应用[J].资源开发与市场,2007,23(3):232~233.
- [9]周益洪.人工湿地处理垃圾渗滤液工艺研究[D].同济大学,2006.
- [10]周菊霞,王庆,生活垃圾填埋场渗滤液处理工程实例分析,1671-8909(2020)4-0009-002
- [11]张美兰,兰盛泽,唐估,生活垃圾填埋场高龄期陈垃圾开采筛分方法研究D01:10.19841/j.cnki.hjwsgc.2021.03.010
- [12]刘晓成.填埋生活垃圾稳定化特征及开采可行性研究D.杭州:浙江大学,2018.

## 深圳建设科技计划项目快报

### (1) 盛腾科技工业园（一期）科技应用工程

本项目为深圳市“十三五”工程建设领域科技重点计划（攻关）项目，承担单位为深圳市深汕特别合作区盛腾科技有限公司。项目采用混凝土预制构件建造全装配、全干连接的大跨度工业厂房，结构体系采用预制双支柱、钢支撑及大跨度预应力屋盖，外墙采用预制通高预应力双T板，采用干式节点连接。工业园生产线应用长线台座法双模双T板生产工艺，可满足不同地区、不同现场条件的构件生产需求。本项目主要技术亮点如下：

1. 采用自产PC构件自建PC工厂的新模式，即生产线先行投产，使用自产的预制构件建设自有工厂，便于构件工厂取得更好的经济效益。
2. 采用预制构件全干式连接方式，克服了现有技术中装配式建筑节点连接设计这一关键性技术难题。
3. 项目结构体系采用预制双支柱、钢支撑及大跨度预应力屋盖，外墙采用预制通高预应力双T板，免除楼板和双T外墙板的模板和支撑。



### (2) 新型自浮可周转拼装式双壁钢围堰设计与施工技术研究

本项目为深圳市“十三五”工程建设领域科技重点计划（攻关）项目，承担单位为中国建筑第四工程局有限公司、中建四局土木工程有限公司。项目研究一种新型自浮可周转拼装式双壁钢围堰设计与施工技术，从围堰设计到施工进行全流程的研究，解决了深水承台钢围堰施工技术的一系列难题，不仅提升了跨江河深水承台施工技术创新能力，提高了工艺的标准化作业水平，同时大幅降低了施工成本及施工作业风险和对周边环境的影响，可为同类工程提供借鉴。本项目主要技术亮点如下：

1. 提出了双壁钢围堰单元化结构和钢围堰分仓设计方法，细化了钢围堰分节连接节点，实现了钢围堰快速安装和周转。
2. 研发了双壁钢围堰整体下沉导向系统，实现同时、同步整体下放钢围堰。



3. 提出了可自浮实现快周转使用的双壁钢围堰施工方法，改进了钢围堰内部连接工艺，研发了钢围堰抽水增浮技术。
4. 研发了适用于砂卵石层条件下双壁钢围堰多位平稳减阻下沉辅助系统。

来源：深圳市住建局官网

## 《广东省建筑节能与绿色建筑发展“十四五”规划》解读

近日，省住房城乡建设厅印发《广东省建筑节能与绿色建筑发展“十四五”规划》（以下简称《规划》）。现将《规划》有关内容解读如下：

### 一、编制背景

“十三五”期间，我省建筑节能和绿色建筑发展机制体制不断健全，标准和产业发展体系不断完善。城镇新建建筑节能标准进一步提高，绿色建筑实现跨越式发展，装配式建筑扎实推进，既有建筑节能改造和可再生能源建筑应用规模持续扩大，水泥散装率稳步提升，新型墙材、绿色建材广泛应用，圆满完成各项工作任务和发展目标。

“十四五”时期是落实2030年前碳达峰、2060年前碳中和目标的关键时期。城乡建设领域是碳达峰工作的重点行业领域之一，为推动城乡建设绿色低碳发展，我省认真贯彻住房和城乡建设部《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》，衔接2030年前碳达峰目标，制定发布《广东省建筑节能与绿色建筑发展“十四五”规划》（以下简称《规划》），多措并举提高建筑绿色低碳发展质量，降低建筑能源资源消耗，力争在全面建设社会主义现代化国家新征程中走在全国前列、创造新的辉煌。

## 二、主要思路

《规划》立足城乡建设更高质量、人居环境更加优良、人民生活更有品质、温室气体更少排放的目标，按照聚焦绿色低碳发展、强化标准技术支撑、紧扣关键环节施策、推动措施落地见效的工作思路，围绕提升建筑节能降碳水平、推进绿色建筑高质量发展、推动装配式建筑提质扩面、促进建设工程材料绿色发展应用、统筹区域能源协同与绿色城市发展五个方面，提出“十四五”发展目标、重点任务，明确了保障措施和组织实施。

## 三、发展目标

根据我省工程建设和绿色建筑发展现状，对接2030年前碳达峰目标，提出以下总体目标：到2025年，建筑运行一次二次能源消费总量控制在1.12亿吨标准煤，绿色建筑全面建设，建筑能源利用效率进一步提升，城镇新建居住建筑能效水平提升30%，城镇新建公共建筑能效水平提升20%。为实现总体目标确定九项具体目标：

1. 完成既有建筑节能绿色化改造面积3000万平方米以上；
2. 建设岭南特色超低能耗、近零能耗建筑面积300万平方米；
3. 全省新增建筑太阳能光伏装机容量200万千瓦；
4. 城镇建筑可再生能源替代率达到8%；
5. 建筑能耗中电力消费比例达到80%；
6. 全省城镇新增绿色建筑中星级绿色建筑占比超过30%；
7. 城镇新建建筑中装配式建筑比例达到30%；
8. 城镇新建政府投资工程中装配式建筑比例：重点推进地区达到70%，积极推进地区达到50%，鼓励推进地区50%；
9. 水泥散装率达到75%。

## 四、重点任务

一是提升建筑节能降碳水平。提高新建建筑节能要求，开展岭南特色超低能耗、近零能耗建筑技术路线和指标体系研究，制定技术标准，开展近零能耗建筑、零碳建筑试点。结合海绵城市建设、城市更新、绿色社区创建等工作，提升既有建筑能效和绿色品质。合理利用浅层地热能、生物质能，加强可再生能源建筑推广应用。实施建筑电气化工程，鼓励建设以“光储直柔”为主要特征的新型建筑电力系统，发展柔性用电建筑。

二是推进绿色建筑高质量发展。加强规划建设全流程管控，编制绿色建筑发展区域专项规划，健全完善绿色建筑的设计、建设、交付全过程监管配套制度，强化关键节点和质量通病监管，落实工程建设各方主体责任。鼓励建设绿色建筑智能化运行管理平台，利用现代信息技术，实现建筑能耗和资源消耗、室内空气品质等指标实时监测与统计分析。强化住宅健康性能设计，降低住宅用能需求，推动星级绿色建筑发展，提高绿色建筑品质。

三是推动装配式建筑提质扩面。完善政策体系，建立装配式建筑标准化部品部件库、项目库、产业链企业库和人才库。加大推广力度，按建筑类型支持采用相适应的装配式建造方式。提升装配式建筑品质，引导构件和部品部件标准化生产，推动复杂构件工厂化生产，提升装配式建筑品质，做大做强装配式建筑全产业链。

四是促进建设工程材料绿色发展应用。修订政府令，完善建设工程材料标准体系，建设预拌混凝土和砂浆的智能化生产试点。推广应用建筑废弃物生产的新型墙体材料。以“互联网+”监管模式，建立质量追溯机制，采集建设工程使用的新型墙体信息。因地制宜科学规划布局预拌混凝土和预拌砂浆搅拌站，深入推进预拌混凝土企业绿色化改造。加强绿色建材推广应用，开展绿色建材应用省级试点。

五是统筹区域能源协同与绿色城市发展。推动建筑用能与能源供应、输配响应互动，推进区域建筑能源协同发展。以全面落实绿色建筑专项规划为抓手，推动绿色城市建设。推广中新广州知识城、深圳光明区等低碳生态建设实践，依托横琴粤澳深度合作区、前海深港现代服务业合作区等有条件的地区率先开展绿色低碳城区建设，支持粤港澳大湾区珠三角九市建设绿色低碳城市试点。

## 五、保障措施

一是健全政策保障。落实执行《广东省绿色建筑条例》，加强各级跨部门协调沟通。对高星级绿色建筑、零

碳建筑等给予政策扶持，研究建筑能效交易、碳交易机制，推进碳普惠激励机制。

二是实施激励措施。拓宽专项资金支持范围，采用减免容积率核算方式鼓励建设绿色建筑和使用装配式技术，鼓励提高公积金贷款额度，开展绿色金融试点，优先推荐高等级标准建设或者采用装配式全装修方式建造的项目参与建筑工程奖项评审。

三是加强制度建设。开展星级绿色建筑认定工作，探索建立建筑能耗数据共享机制，完善合同能源管理市场机制。

四是推进科技创新。推动绿色建筑技术与装配式、智能技术深度融合发展与应用。建立省级科技应用成果库，推进建筑领域产学研合作。发挥大型国企研发带动作用，推动行业新技术、新工艺、新设备重点突破。

## 六、组织实施

一是加强组织领导。住建、发改等有关部门联合制定配套政策，形成推动合力。强化工作责任，加强监督管理，落实落细专项规划。

二是强化目标考核。将规划落实纳入目标责任评价考核，加强指导监督，及时跟进地方落实进度，促进规划落地见成效。

三是加大宣传培训。构建立体化宣传体系，推广先进地市成功经验，依托院校、科研院所、行业协会开展针对性专业培训，提升管理人员及从业人员的综合素质。

来源：广东省住建厅官网

## 广东多举措推动建设科技创新

广东省住房和城乡建设厅表示，创建省级及以上技术中心达到90家以上，培育不少于10个建筑产业互联网示范平台。推动建立以广州和深圳为主引擎、珠三角地区为核心、沿海经济带和北部生态区协同发展的区域创新格局。修订《广东省住房和城乡建设厅科技创新计划项目管理办法》，进一步完善科技项目管理制度。制订广东省住房和城乡建设厅科技创新平台管理暂行办法，开展省级住房城乡建设科技创新平台建设，提升科技创新支撑能力。

依托科研机构、高等院校、骨干企业、行业协会和省住房城乡建设科技协同创新中心等开展建筑领域碳达峰

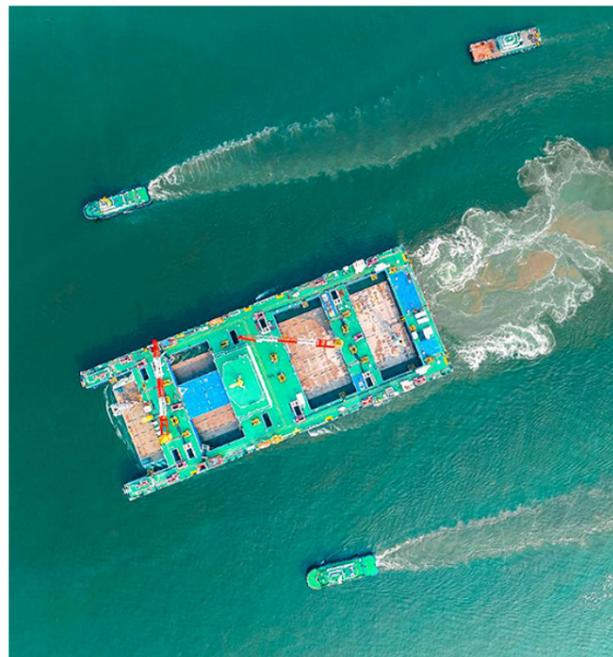


碳中和、绿色建筑、装配式建筑、新型建筑工业化、城市更新与品质提升、新型城市基础设施、城市安全与防灾减灾技术，特别是城市防台风、防内涝、防火灾、防路陷等关键技术研发，提升行业技术支撑能力。推动珠三角地区成为绿色建筑发展新高地，全省城镇新增绿色建筑中星级绿色建筑占比超过30%，城镇新建建筑中装配式建筑比例达到30%，新型墙材在城镇新建建筑中得到全面应用。继续开展省级建设科技创新计划项目申报和管理，打造150个省级以上建设领域科技创新计划项目，建立一批省级住房城乡建设科技示范工程。做好住房城乡建设部科学技术项目和华夏科学技术奖、中国专利奖、省专利奖、科技进步奖等科技奖项的推荐工作，力争获得的省部级科技奖项不少于50项。建立住房城乡建设科技应用成果库，加强科技成果推广，推进产学研用一体化。

在此之前，广东省住房和城乡建设厅出台《广东省住房和城乡建设厅科技创新计划项目管理办法》，明确广东省科技创新计划项目立项、申报、管理等各阶段要求；开发建设广东省科技计划项目管理信息系统，实现省建设科技项目全过程信息化管理；印发《贯彻落实“十四五”住房和城乡建设科技发展主要任务清单》，结合广东实际组织编制《广东省住房和城乡建设科技发展三年行动方案（2022-2024年）》，加强顶层设计，对未来三年全省建设科技创新工作进行部署。

来源：深圳市建筑产业化协会

## 我国多个桥隧项目取得新进展



### 01 深中通道沉管隧道E21管节完成水下对接

9月21日，深中通道的沉管隧道E21管节完成水下对接。至此，项目海底隧道沉管安装长度达4702.8米。

深中通道海底隧道长6845米，其中沉管段长5035米，由32个管节和1个最终接头组成，是目前世界最宽的钢壳混凝土海底沉管隧道。E21管节为标准管节，长165米，浇筑后重约8万吨。在海事部门护航下，沉管浮运安装一体船顺利抵达施工水域。9月20日11时40分，经沉放、拉合、水力压接等工序，E21管节成功完成对接。21日3时，经贯通测量确定，E21管节安装对接精度满足验收评定标准。

目前，深中通道岛隧、桥梁工程双线并进。沉管隧道累计沉放30个管节，剩余2个管节及1个最终接头未安装，计划年内还将完成1个管节的沉放安装。

### 02 天峨龙滩特大桥全面进入外包混凝土施工阶段

9月20日，“世界第一拱”天峨龙滩特大桥顺利完成外包混凝土首次浇筑，共浇筑1564立方，标志着大桥全面进入外包混凝土施工阶段。

天峨龙滩特大桥全长2488.5米，主桥为跨径600米的上承式劲性骨架混凝土拱桥，大桥外包混凝土浇筑以劲性骨架为支撑，施工分为底板环、腹板环、顶板环三个环节。每一环节分段现浇，采用“3环7段8个工作面”浇筑工艺，底板环分6次进行浇筑，每次8个工作面，共投入10台泵机、18辆罐车，施工组织和安全管控难度极大。

为保证本次底板环外包混凝土顺利完成浇筑，项目部在相关单位的指导下，通过召开技术研讨会编制施工方案，严格控制混凝土入模温度，规范化、精准化进行施工组织。技术、试验部门实时跟踪施工过程等举措严格控制外包混凝土质量，有序开展各项工作。

下一步项目部将进一步总结经验，克难攻坚优化施工组织，提高拱上作业班组协作配合度，高效推进外包混凝土施工，高质量、高标准完成全桥外包混凝土施工任务。

### 03 贵州龙里河特大桥计划年底竣工

近日，建设中的龙里河特大桥现场一片繁忙景象，在做好防控疫情的前提下，大桥封闭的施工工地上有80位施工人员在紧张施工。大桥计划今年底完工，现正在克服困难加紧施工，目前已经完成工程量的95%。

龙里河特大桥是世界首座车行道与玻璃观光步道共桥面的峡谷景观特大桥。全长1260米，桥面距离谷底280米，主桥为主跨490米的双塔双索面钢混叠合梁斜拉桥，桥梁中间设有双向各500米的玻璃栈道，按照城市次干路的标准进行建设，双向四车道，项目总投资12亿元。

龙里河特大桥横跨龙里县龙里大草原旁边的龙里河峡谷，是连接黔中龙溪内陆开放型经济发展先导区和龙里县草原片区的交通控制性工程。该桥是世界首座高山峡谷景观斜拉桥。大桥既是连接龙里大草原旅游景区与外界的唯一快速通道，也是景区旅游系统的一个重要组成部分。建成后推动当地旅游业发展，推动城市经济带内交通路网的完善。届时，贵阳至龙里大草原的车程将由原来的1.5小时缩短到30分钟。

### 04 九绵高速公路重难点工程平南隧道贯通

9月21日，九寨沟至绵阳高速公路建设取得重大进展，作为全线特长隧道之一的重难点工程平南隧道顺利贯通，为力争2023年底实现项目全线建成目标奠定坚实基础。

平南隧道位于绵阳市平武县境内，地处龙门山脉中



部，海拔约900米，全长3.5公里。隧道工程地质情况复杂，项目团队在施工过程中，严格执行“先探测、管超前、短进尺、弱扰动、强支护、快封闭、勤量测”的总体施工方案，采取各种有效措施，以安全为第一，严格把控质量，保障项目高质量完成。

九绵高速公路全长约240公里，起于阿坝州九寨沟县，经绵阳市平武县、北川县、江油市，止于游仙区，于2016年4月开工，预计2023年底建成。项目建成通车后，高速公路将直达九寨沟县，绵阳到九寨沟的时间将缩短为4小时，将进一步强化川西北经济区、成绵互通互融和沿线区域旅游产业振兴，推动沿线经济发展。

#### 05 乌尉高速天山胜利隧道进口端三洞累加开挖突破13公里

近日，新疆G0711线天山胜利隧道传来重大喜讯，随着TBM刀盘的隆隆转动，中导洞（服务隧道）的掘进进尺累计已达6162米。同时，左主洞开挖累计进尺已达3713米，右主洞累计已达3398米，左中右三洞开挖进尺累加已达13273米，胜利突破13公里，为整体工期计划的完成奠定了坚实的基础。

乌尉高速天山胜利隧道，全长22.13公里，是世界在建最长高速公路隧道，其穿越天山，连通南北疆，对促进新疆经济社会发展以及民族大融合具有重要意义。具有一长二深五高二新（隧道超长、埋深大、竖井深、高地应力、高地震烈度、高环保要求、高寒、高海拔、施工工法新、应用设备新）的特点，是国内在建高速公路中典型的特长高寒、高海拔公路隧道，地质复杂，穿越多个地质断裂带，施工难度大。



隧道进口端施工布置为左、中、右三个洞口同时掘进，中洞为服务隧道采用TBM硬岩盾构机掘进，为左右双主洞开辟辅助工作面，实现“长隧短打”，有效节约施工工期。据悉，该技术在国内外高速公路隧道施工中尚属首次应用。

项目团队自进场以来，克服气候恶劣、地质断裂带多，环保要求高、有效工期短、交通闭塞等困难。

天山胜利隧道是乌尉公路的“咽喉”工程，建成后将打通南北疆交通运输屏障，对于推动新疆丝绸之路经济带核心区建设，促进南北疆经济发展和区域优势资源开发具有重要意义，此次重大节点的完成，为隧道早日贯通、乌尉高速公路按时通车，创造了良好的条件。

来源：桥梁视界

## 培育智能建造试点城市 打造建筑业高质量发展标杆 ——住建部建筑市场监管司负责人解读《关于征集遴选智能建造试点城市的通知》

近日，住房和城乡建设部印发了《关于征集遴选智能建造试点城市的通知》，明确了开展智能建造城市试点的工作目标、重点任务和工作要求等内容。为更好引导各地开展智能建造试点工作，住房和城乡建设部建筑市场监管司负责人对通知进行了解读。

### 一、发展智能建造的重要意义

习近平总书记指出：“面向未来，我们要站在统筹中华民族伟大复兴战略全局和世界百年未有之大变局的高度，统筹国内国际两个大局、发展安全两件大事，充分发挥海量数据和丰富应用场景优势，促进数字技术和实体经济深度融合，赋能传统产业转型升级，催生新产业新业态新模式，不断做强做优做大我国数字经济。”立足新发展阶段，发展智能建造是住房和城乡建设领域贯彻落实习近平总书记关于数字化发展重要指示精神的必然要

求，对推动建筑业高质量发展具有重要意义。

一是促进建筑业转型升级、实现高质量发展的迫切需要。建筑业是我国国民经济的重要支柱产业。2021年，建筑业总产值29.3万亿元，同比增长11%，增加值占国内生产总值的比重达到7%，有力支撑了国民经济持续健康发展。但长期以来，我国建筑业主要依赖资源要素投入、大规模投资拉动发展，建筑业工业化、信息化水平较低，生产方式粗放、劳动效率不高、能源资源消耗较大、科技创新能力不足等问题比较突出，迫切需要通过发展智能建造，集成5G（第五代移动通信技术）、人工智能、物联网等新技术，推动建筑业工业化、数字化、智能化转型，走出一条内涵集约式高质量发展新路。

二是稳增长扩内需、做强做优做大数字经济的重要举措。智能建造产业具有科技含量高、产业关联度大、带动能力强等特点，既有巨大的投资需求，又能为新一代信息技术提供庞大的消费市场。发展智能建造不仅能够带动新兴软件、人工智能、物联网、大数据、高端装备制造等战略性新兴产业发展，还可以催生建筑产业互联网、建筑机器人、数字设计、智能生产、智能施工、智慧运维等新产业、新业态、新模式，乘数效应、边际效应显著，有助于充分发挥建筑业超大规模市场的优势，有效拉动数字经济发展，是当前有效应对疫情影响、稳增长扩内需、壮大发展新动能的重要举措。

三是顺应国际潮流、提升我国建筑业国际竞争力的有力抓手。德国、英国、日本等发达国家已相继发布实施了以融合应用智能建造相关技术为核心的建筑业转型发展战略，提出在工程建造中推广数字设计、物联网、人工智能、机器人等技术，提高施工效率，降低建造成本，应对劳动力减少的难题。与发达国家相比，我国智能建造核心技术还存在不小差距，迫切需要将发展智能建造作为抢占建筑业未来科技发展高地的战略选择，打造“中国建造”升级版，提升企业核心竞争力，迈入智能建造世界强国行列。

### 二、培育智能建造试点城市的总体考虑

踏上“十四五”新征程，《国民经济与社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》提出“发展智能建造”，首次从国家层面将发展智能建造列为推进新型城市建设、全面提升城市品质的重要内容。住房和城乡建设部等部门联合印发的《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》实施以来，我们积极开展智能建造试点，推动建设了7个试点项目，总结印发了第一批可复制经验做法清单，征集遴选了5大类124个创新服务典型案例，在数字设计、智能生产、智能施工和建筑产业互联网、建筑机器人等方面取得了初步成效。

为进一步贯彻落实党中央、国务院决策部署，大力发展智能建造，根据全国住房和城乡建设工作会议部署安排，住房和城乡建设部决定征集遴选部分城市开展智能建造试点，为全面推进建筑业转型升级、推动高质量发展发挥示范引领作用。试点目标包括三方面：一是推动试点城市建立跨部门协同推进机制，形成可复制可推广的智能建造政策体系、发展路径和监管模式，为全面推广智能建造提供经验借鉴。二是加快建筑业与先进制造技术、新一代信息技术的深度融合，实现对工程项目质量、安全、进度、成本等全过程数字化管控，促进建筑业提质增效。三是打造智能建造产业集群，催生一批新产业新业态新模式，打造地方经济发展新引擎。

本次征集遴选工作按照城市自愿申报、省级住房和城乡建设主管部门审核推荐、住房和城乡建设部评审公布的工作程序开展。申报试点的城市应高度重视建筑业高质量发展工作，具备必要的产业基础，如拥有具备统筹开展智能建造业务能力的建筑工程总承包企业、可长期稳定从事智能建造相关技术产品研发业务的高新技术企业、智能建造相关科技创新平台以及开设工程建设相关专业的高等院校等。下一步，住房和城乡建设部将组织评审各地报送的智能建造试点实施方案，视情对试点申报城市开展实地调研，综合考评后确定试点城市名单，向社会公开发布。

### 三、智能建造试点城市的主要任务

本次试点坚持“统筹谋划、因地制宜”的工作原则，既安排了完善政策体系、培育智能建造产业、建设试点示范工程和创新管理机制四项必选任务，也提供了打造部品部件智能工厂、推动技术研发和成果转化、完善标准体系和培育专业人才四项任务供地方结合实际自主选择，同时试点城市还可根据试点目标提出新的任务方向。

一是完善政策体系。重点是出台推动智能建造发展的政策文件或发展规划，在土地、规划、财政、金融、科技等方面发布实施行之有效的鼓励政策，形成可复制经验清单。

二是培育智能建造产业。重点是建设智能建造产业基地，完善产业链，培育一批具有智能建造系统解决方案能力的工程总承包企业以及建筑施工、勘察设计、装备制造、信息技术等配套企业，发展数字设计、智能生产、智能施工、智慧运维、建筑机器人、建筑产业互联网等新产业，打造智能建造产业集群。

三是建设试点示范工程。重点是有计划地建设一批智能建造试点示范工程，推进工业化、数字化、智能化技术集成应用，有效解决工程建设面临的实际问题，实现提质增效，发挥示范引领作用。

四是创新管理机制。重点是搭建建筑业数字化监管平台，探索建筑信息模型（BIM）报建审批和BIM审图，完善工程建设数字化成果交付、审查和存档管理体系，支撑对接城市信息模型（CIM）基础平台，探索大数据辅助决策和监管机制，建立健全与智能建造相适应的建筑市场和工程质量安全监管模式。

五是打造部品部件智能工厂。围绕预制构件、装修部品、设备管线、门窗、卫浴部品等细分领域，推动部品部件智能工厂建设或改造，实现部品部件生产技术突破、工艺创新、业务流程再造和场景集成。

六是推动技术研发和成果转化。每年投入一定科研资金支持智能建造科技攻关项目，建立产学研一体的协同机制，推动智能建造关键技术攻关和集成创新，加强科技成果转化，探索集研发设计、数据训练、中试应用、科技金融于一体的综合应用模式。

七是完善标准体系。引导相关科研院所、骨干企业、行业协会编制智能建造相关标准规范，提出涵盖设计、生产、施工、运维等环节的智能建造技术应用要求。

八是培育专业人才。探索智能建造人才培养模式和评价模式改革，引导本地高等院校开设智能建造相关专业，推动建设智能建造实训基地。

#### 四、对智能建造试点城市的工作要求

一是要高度重视建筑业高质量发展工作，将发展智能建造列入本地区重点工作任务和中长期发展规划。特别是建立跨部门协作的工作机制，加强统筹协调，保障试点各项任务有序推进。如成立由城市分管负责同志牵头的工作机制，明确工作机构和职责分工，安排专职工作人员等。

二是要完整准确全面理解智能建造的概念和内涵，科学制定工作目标和重点任务。既要注重问题导向，将解决生产方式粗放、劳动力紧缺、资源能源消耗大等制约建筑业高质量发展的关键问题作为工作出发点，推动工程项目提质增效；也要注重技术和管理协同创新，在推广应用新技术新产品的同时，积极探索配套管理模式和监管方式的创新；还要注重产业融合，推动建筑业与先进制造业、信息技术产业的跨界融合，为稳增长扩内需提供重要支撑。

三是要明确时间表、路线图和实施路径，确保各项任务和政策措施落地、落实、落细。一方面要组织编制切实可行的《实施方案》，制定年度工作计划表，将试点任务分解到各年度，明确职责分工、完成时限和成果产出；另一方面要加大政策支持力度，将现有各类产业政策进一步向智能建造领域倾斜，出台土地、规划、财政、金融、科技等鼓励政策的实施细则，充分调动市场积极性。

城市试点启动后，我们将加强跟踪指导，推动试点城市与智能建造骨干企业的产业对接，大力宣传推广先进经验做法和典型案例。试点期满后，住房和城乡建设部将组织评估验收，对工作成效显著、产业发展前景良好的试点城市进一步加强政策支持，着力打造建筑业高质量发展标杆。

来源：《中国建设报》