

DOI: 10.7672/sgjs2025070077

# DMP工法在敏感环境深基坑工程中的应用\*

杜策<sup>1,2,3</sup>, 李青<sup>4,5</sup>, 张振<sup>1,2</sup>, 周振<sup>3</sup>, 叶怀文<sup>3</sup>

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 上海渊丰地下工程技术有限公司, 上海 201015; 4. 华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200011;  
5. 上海基坑工程环境安全控制与工程技术研究中心, 上海 200011)

[摘要] 针对传统搅拌桩数字化程度低、施工扰动不可控等问题, 研发了数字化微扰动搅拌桩(DMP工法), 并在上海浦东机场四期项目中成功应用。结果表明, DMP工法通过配置多通道异形钻杆、差速叶片、地内压力监控系统, 能够实现施工过程对周边环境的微小扰动, 实测捷运维修基地沉降仅1~2mm。数字化施工控制系统可确保设备按照输入的设计参数进行自动化施工并在云端展示施工进度。桩体开挖后表观质量明显优于三轴搅拌桩, 桩体芯样强度及均匀性较好。研究成果对于提升搅拌桩施工质量和施工数字化水平具有重要的实践意义。

[关键词] 深基坑; 支护; DMP工法; 施工控制; 地内压力; 微扰动

[中图分类号] TU753 [文献标识码] A [文章编号] 2097-0897(2025)07-0077-05

## Application of DMP Method in Deep Foundation Excavation Engineering in Sensitive Environments

DU Ce<sup>1,2,3</sup>, LI Qing<sup>4,5</sup>, ZHANG Zhen<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhen<sup>3</sup>, YE Huaiwen<sup>3</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Yuan Feng Underground Engineering Co., Ltd., Shanghai 201015, China;  
4. East China Architecture Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200011, China; 5. Shanghai Engineering Research Center of Safety Control for Facilities Adjacent to Deep Excavations, Shanghai 200011, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of low digitization and uncontrollable construction disturbance of traditional mixing piles, a digital micro-disturbance soil mixing pile (DMP method) was developed and successfully applied in the fourth phase project of Shanghai Pudong Airport. The results indicate that the DMP method can achieve a small disturbance to the surrounding environment during the construction process by configuring multi-channel special-shaped drill pipe, differential blade, and ground pressure monitoring system. And the measured settlement of the MRT maintenance base is only 1~2mm. The digital construction control system ensures that the equipment is automatically constructed according to the input design parameters and the construction process is displayed in the cloud. The apparent quality of the pile after excavation is obviously better than that of the three-axis mixing pile, and the strength and uniformity of the pile core sample are better. The research results have practical significance for improving the construction quality and construction digitization of mixing piles.

**Keywords:** deep foundation excavation; supports; digital micro-disturbance soil mixing pile (DMP); construction control; underground pressure; minor-disturbance

## 0 引言

搅拌桩作为岩土工程常用工艺, 被广泛应用于

地基处理、基坑支护等领域。常用的搅拌桩类型主要有单轴搅拌桩、双轴搅拌桩、三轴搅拌桩等, 不少学者对搅拌桩的施工工艺及施工环境影响机理进行了研究。赵伟等<sup>[1]</sup>分析水泥土搅拌桩施工会引起邻近地层位移, 具有挤土效应。赵春风等<sup>[2]</sup>通过

\* 国家自然科学基金面上项目(42372317)

[作者简介] 杜策, 博士研究生, 高级工程师, E-mail: 78127107@qq.com

[收稿日期] 2024-09-25

现场试验,证明五轴搅拌桩相较双轴及三轴搅拌桩强度高、试样离散性小。叶观宝等<sup>[3]</sup>总结了搅拌桩施工产生扰动的原因为搅拌叶片对周边土体的挤压和拉裂作用以及水泥浆液的渗透和劈裂作用。龚灵迪等<sup>[4]</sup>通过现场试验发现水泥掺量是影响土体挤压变形的重要因素,三轴搅拌桩施工对周边土层的影响同水泥掺量正相关。Vesic<sup>[5]</sup>提出无限土体中圆孔扩张的解析解,Shen等<sup>[6]</sup>、Chai等<sup>[7]</sup>基于该理论推导了考虑叶片剪切作用的圆柱扩张公式,认为搅拌桩施工对周边土体的影响来自搅拌叶片转动和浆液压力引起的超孔隙水压力。

随着搅拌桩工艺的逐渐发展,传统搅拌桩由于数字化程度低、施工扰动不可控,制约了其在敏感环境工程中的应用<sup>[8]</sup>。智能建造已成为建筑业发展的必然趋势和转型升级的重要抓手,面向人机共融的智能化工程机械是智能建造的关键领域<sup>[9]</sup>,搅拌桩工艺也迫切需要采用数字化程度高、施工扰动小的装备及工艺。郭克诚等<sup>[10]</sup>建议研发和改进桩机设备装备,构建地层自动识别系统,进行施工搅拌与喷浆的自动优化控制,加快桩工行业数字化与智能化升级步伐。张振等<sup>[11]</sup>结合远程监测系统,以段灰量、搅拌次数和桩长作为控制指标,建立了搅拌桩施工质量评定办法。万瑜等<sup>[12]</sup>针对目前国内水泥土搅拌桩施工自动化程度低、施工质量监控方法落后等问题,研发水泥土搅拌桩智能化施工控制系统。

数字化微扰动搅拌桩,又称DMP工法,是一种自主研发的自动化程度较高的搅拌桩工艺。施工装备配置先进的数字化施工控制系统<sup>[13]</sup>,能够便捷地控制施工过程中浆液流量、钻杆下沉提升速度、加气量等各种施工参数,施工过程可视可控,同时具备微扰动施工工艺,是一种面向敏感环境的智能化施工机械。本文详细介绍了DMP工法在上海浦东机场四期南区地下交通枢纽及配套工程中的实施效果及同常规工艺的工后比较。

## 1 工程概况

### 1.1 基坑概况

浦东机场南区地下交通枢纽及配套工程为新建四期航站楼地下工程部分,基地J1-7分区环境如图1所示,基坑面积2100m<sup>2</sup>,开挖深度9.85m,呈狭长形,长度约135.7m,宽度25m。

J1-7基坑东侧为既有捷运车辆维修基地,地上为1~2层钢筋混凝土框架结构,结构宽度约32.1m,其下设置直径500mm管桩基础,桩长约33m。基地内有两条捷运轨道,基坑距离建筑最近约4.55m,距离捷运轨道最近约9.40m。既有捷运

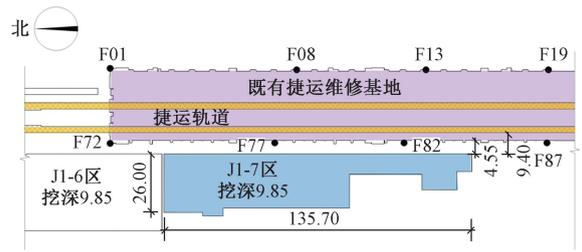


图1 基地环境总平面(单位:m)

Fig. 1 General layout of the site environment (unit:m)

线的环境保护要求较高,需要控制变形 $\leq 10\text{mm}$ ,并且建筑外侧分布有众多管线。

### 1.2 工程地质条件

基坑施工影响范围内典型地层剖面及土层参数如图2所示,场地浅部以流塑~软塑状态的黏性土和松散~稍密的砂质粉土为主,其中第②<sub>3</sub>层和③<sub>2</sub>层粉土渗透性强,易产生流砂风险,对基坑止水帷幕结构的施工质量提出了较高要求。基底则普遍位于流塑状态的淤泥质土中,土性软弱,并具有含水量高、压缩性高、易流变、开挖易扰动等特点。上海地区地下水位设计埋深一般为0.5m,止水帷幕设计首先考虑对粉土进行有效阻隔,同时桩端进入基坑底以下一定深度,满足抗渗流稳定性的要求。

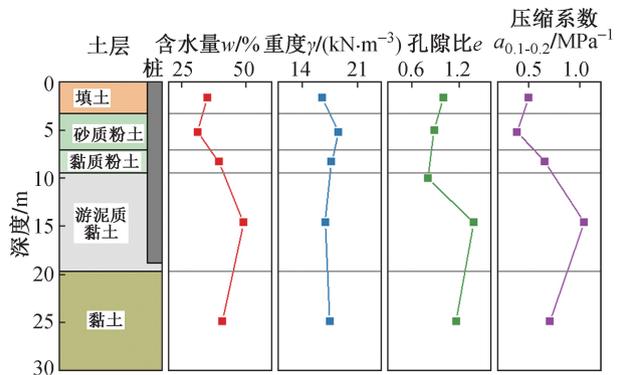


图2 典型土层剖面及参数

Fig. 2 Typical soil stratum profile and parameters

## 2 支护设计方案

基坑紧贴运营中的既有捷运维修基地,捷运线变形控制要求苛刻,基坑支护结构设计应采取合理的针对性措施控制支护体侧移以满足规范要求以及捷运系统的变形控制标准。

基坑支护典型剖面如图3所示,基坑东侧临近捷运区域止水帷幕采用DMP工法,以降低帷幕施工对捷运线路的影响。由于施工空间较小,支护墙采用双排DMP工法内套打 $\phi 900@1100$ 灌注桩排桩,灌注桩有效桩长26.65m,嵌入基底以下16m,帷幕有效桩长18.85m,水泥掺量15%,帷幕嵌入基底以

下7m。基坑西侧环境条件相对宽松,采用直径 $\phi 850\text{mm}$ 三轴搅拌桩内插H型钢的SMW工法,桩体水泥掺量20%。基坑内首道支撑采用钢筋混凝土支撑,其下设置两道预应力伺服钢支撑,支撑采用对撑结合少量角撑的布置形式。

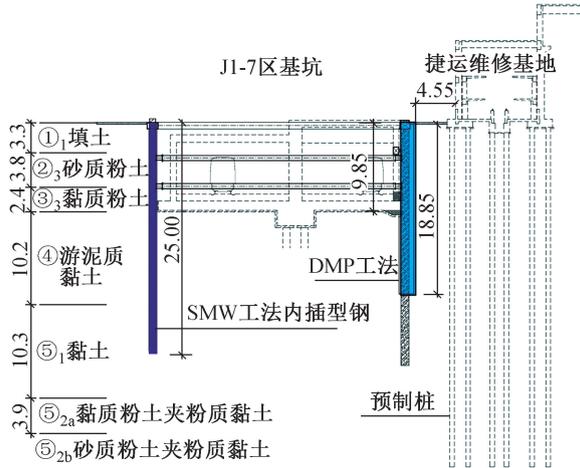


图3 基坑支护剖面(单位:m)

Fig. 3 Cross-section of excavation support (unit:m)

### 3 施工关键技术

#### 3.1 施工微扰动

施工速度和浆气压力是搅拌桩施工对周边土层产生影响的主要因素<sup>[6]</sup>,较高的进尺速度和转速将会提升施工效率,但速度过快对设备稳定性、能耗、搅拌均匀性和周边环境都会产生影响。增大浆液压力和加气压力能够降低钻进阻力,提升施工效率,但过大的压力会显著增加桩周超孔隙水压力,进而引起地层位移<sup>[14]</sup>。本工程环境保护要求较高,止水桩紧靠既有建筑施工,需要采用对环境影响较小的设备和工艺。DMP工法通过以下4个方面实现施工微扰动<sup>[8]</sup>:①配置了4根三通道异形钻杆,1个通道对应喷气口,剩余2个通道分别对应钻头上下部的喷浆口,下部喷浆口喷射的浆液降低了钻头底部的土体强度,可以有效减小搅拌的阻力和对周边土体的拖带作用;②异形钻杆在旋转过程中形成圆形孔道,异形钻杆和圆形孔道间形成了浆气压力释放通道,从而避免了搅拌钻头附近浆气压力因缺少通道不断累积增大并对周边地层产生较大侧压力的情况;③钻杆设置差速叶片,差速叶片和钻杆滑动连接,同刚接的普通叶片在旋转时速度不一致,都能够防止黏土粘附钻杆和泥球的形成;④搅拌钻头上配备地内压力监控系统,成桩全过程实时监测地内压力变化。通过大量现场成桩试验,发现地内压力分布如图4所示,总体上地内压力随着深度的增加而增加,浅部10m左右范围地内压力小于

静止土压力,超过此深度后逐渐增大,近似呈线性分布。根据上述规律,引入地内压力控制系数 $\xi$ <sup>[13]</sup>,通过数字化施工控制系统自动调整加气压力和下沉速度,确保地内压力控制在合理范围以内。

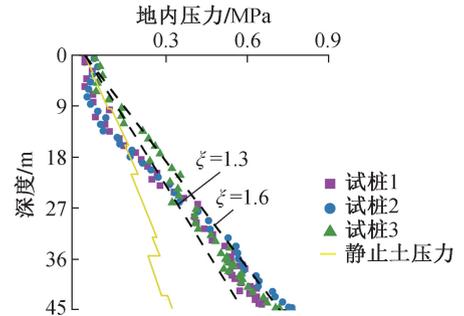


图4 地内压力测试

Fig. 4 In-situ testing of underground pressure

#### 3.2 变水灰比参数自动控制

常规搅拌桩采用单一水灰比施工,浆液在下沉或者提升阶段全部喷射完毕,较大的水灰比会降低桩体强度,单一的喷浆方式增加了置换土量,造成了资源浪费。DMP工法下沉和提升阶段采用不同的水灰比,其中下沉阶段水灰比相对较大,便于钻进的同时减小施工扰动。提升阶段采用较低的水灰比,这样桩体总用水量将显著减小,水泥土强度得到了保证。变水灰比由数字化施工控制系统自动控制,显著提升了控制精度和施工便利性。

本项目DMP工法施工下沉速度取0.8m/min,下沉单杆浆液流量68L/min,提升速度1.0m/min,提升单杆浆液流量79L/min,加气压力0.2~0.4MPa,下沉水胶比1.5,提升水胶比0.8,下沉喷浆占比40%,提升喷浆占比60%,地内压力控制系数取1.3。以上参数在施工前输入数字化施工控制系统,设备据此参数自动成桩。

#### 3.3 自动化施工

DMP工法成桩按照“W”形成桩曲线施工,数据实时上传云平台进行展示,如图5所示。

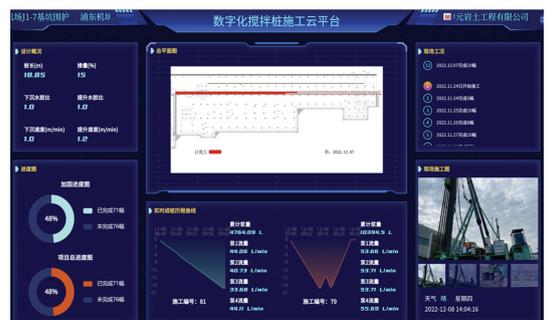


图5 DMP工法施工云平台

Fig. 5 Construction cloud platform of DMP method

数字化施工控制系统控制浆液流量同下沉或者提升速度相匹配,单杆浆液流量、下沉速度同深度的对应变化情况如图 6 所示,可以看出,随着钻进深度增加,下沉速度受到土层不均等因素影响有所波动,但总体以设定参数为均值变化。

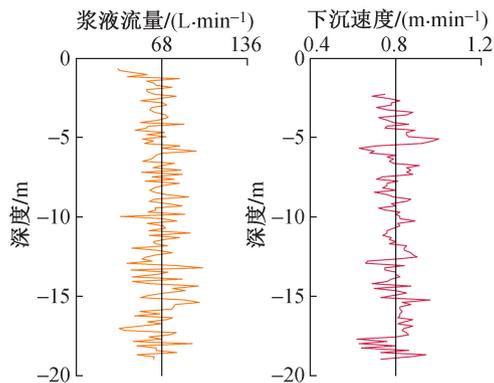


图 6 单杆浆液量同下沉速度曲线

Fig. 6 Relationship between single rod slurry volume and penetration rate

地内压力控制情况如图 7 所示,可以看出浅部地内压力距控制线相对较远,10m 以下地内压力逐渐靠近控制线,但总体成桩过程地内压力处于可控状态。

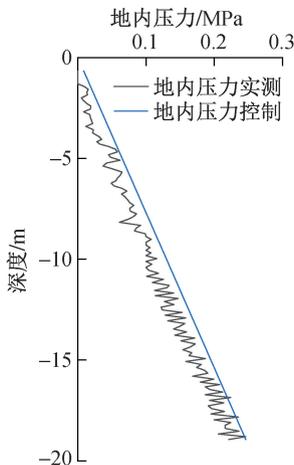


图 7 地内压力控制曲线

Fig. 7 Underground pressure control curve

## 4 工程实施效果

### 4.1 监测结果

142 幅 DMP 工法施工完成后,西侧捷运建筑累计沉降情况如图 8 所示,累计沉降范围处于 1.27~2.12mm,变化幅度较小,没有发生结构开裂、日变形报警等情况,建筑周边散水等构筑物完好,证明施工对既有捷运结构扰动较小。

### 4.2 强度质量

养护 28d 后,对 DMP 工法进行了取芯检测,搅

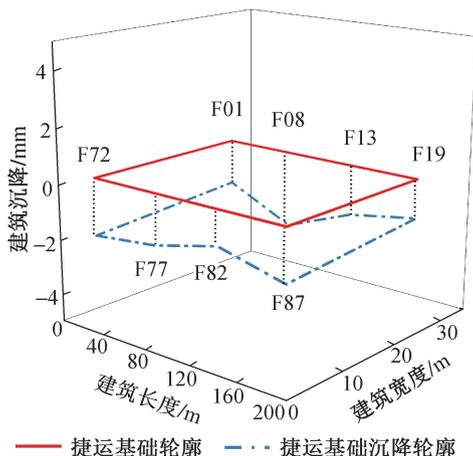


图 8 捷运建筑 DMP 工法完工后累计沉降

Fig. 8 Accumulated settlement of buildings after construction completion

拌桩芯样完整度高、均匀连续、胶结度好。强度检测结果如图 9 所示,试验结果表明不同深度水泥土 28d 无侧限抗压强度分布在 0.83~1.01MPa,满足设计要求。

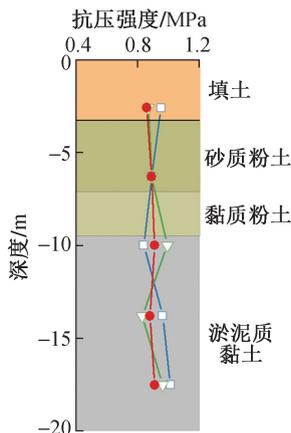


图 9 DMP 工法取芯检测结果

Fig. 9 Results of unconfined compressive strength testing for DMP method

### 4.3 同三轴搅拌桩比较

基坑开挖后照片如图 10 所示,图中左侧为基坑西侧采用 SMW 工法施工的区域,其表面渗水较多,桩体呈现湿润的深色。右侧为 DMP 工法,其成桩均匀性好,桩体表面没有渗水,桩体颜色较浅,证明桩体搅拌均匀,在水泥掺量更少的情况下,止水性能明显优于三轴搅拌桩。

## 5 结语

本文通过在上海浦东机场四期项目中应用 DMP 工法,现场实测施工环境影响小,成桩质量显著提升,具体结论如下。

1) DMP 工法通过配置多通道异形钻杆、差速叶



图 10 DMP 工法同 SMW 工法开挖后对比

Fig. 10 Real scene after excavation with DMP method and SMW method

片、地内压力监控系统,能够实现施工过程中对周边环境的微小扰动,实测临近建筑沉降 1~2mm。

2) 数字化施工控制系统可实现按照输入的设计参数进行自动化施工,成桩过程记录详细,系统自动将浆液流量同钻杆下沉及或提升速度相互匹配,并且施工过程云端实时展示。

3) DMP 工法在同一基坑、相同地层条件下,开挖后表观质量优于三轴搅拌桩,桩体芯样强度高、均匀性好。

研究成果对于提升搅拌桩施工质量和施工数字化水平具有重要的实践意义。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 赵伟,杨龙才,王炳龙,等. 水泥搅拌桩施工引起邻近地层位移的监测分析[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(S2): 869-873.  
ZHAO W, YANG L C, WANG B L, et al. Monitoring and investigation on displacement of surrounding strata caused by soil-cement columns installation[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2018,14(S2): 869-873.
- [ 2 ] 赵春风,邹豫皖,赵程,等. 基于强度试验的五轴水泥土搅拌桩新技术研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(2):376-381.  
ZHAO C F, ZOU Y W, ZHAO C, et al. Experimental research on strength of five-axis cement-soil mixed piles [J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2014,36(2):376-381.
- [ 3 ] 叶观宝,王艳. 如何控制水泥土搅拌法对土体的扰动[J]. 地下空间与工程学报,2007,3(2):263-267.  
YE G B, WANG Y. How to control the disturbance by cement mixing method [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2007,3(2): 263-267.
- [ 4 ] GONG L D. In-situ test study of the squeezing effect on adjacent soil due to tri-axial cement mixing piling[J]. Hans journal of civil engineering,2020,9(9):864-874.
- [ 5 ] ALEKSANDAR SEDMAK VESIĆ. Expansion of cavities in

infinite soil mass [J]. Journal of the soil mechanics and foundations division,1972,98(3): 265-290.

- [ 6 ] SHEN S L, NORIHIKO MIURA, HIROFUMI KOGA. Interaction mechanism between deep mixing column and surrounding clay during installation [J]. Canadian geotechnical journal,2003,40(2): 293-307.
- [ 7 ] CHAI J C, MIURA N, KOGA H. Lateral displacement of ground caused by soil-cement column installation [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering,2005,131(5): 623-632.
- [ 8 ] 李青,杜策,王理想,等. 数字化微扰动搅拌桩技术与现场试验研究[J]. 施工技术(中英文),2023,52(11): 113-118.  
LI Q, DU C, WANG L X, et al. Technology and field testing research on digital minor-disturbance mixing pile [J]. Construction technology, 2023,52(11): 113-118.
- [ 9 ] 陈珂,丁烈云. 我国智能建造关键领域技术发展的战略思考[J]. 中国工程科学,2021,23(4):64-70.  
CHEN K, DING L Y. Development of key domain-relevant technologies for smart construction in China[J]. Strategic study of CAE, 2021,23(4): 64-70.
- [ 10 ] 郭克诚,孙伟,彭威,等. 搅拌桩技术的改进及工程应用[J]. 地基处理,2021,3(4):299-306.  
GUO K C, SUN W, PENG W, et al. Improvement and engineering application of mixing pile technology[J]. Journal of ground improvement, 2021,3(4): 299-306.
- [ 11 ] 张振,沈鸿辉,程义,等. 基于物联网技术的水泥土搅拌桩施工质量评价[J]. 施工技术,2020,49(19):7-11.  
ZHANG Z, SHEN H H, CHENG Y, et al. Construction quality evaluation of cement deep mixed column based on internet of things technique[J]. Construction technology, 2020,49(19):7-11.
- [ 12 ] 王瑜,朱志铎,高波,等. 水泥土搅拌桩智能化施工控制研究[J]. 施工技术,2019,48(13):43-47.  
WAN Y, ZHU Z D, GAO B, et al. Research on the intelligent construction control for cement soil mixing pile[J]. Construction technology,2019,48(13): 43-47.
- [ 13 ] 杜策,张振,张力,等. 微扰动四轴搅拌桩数字化施工应用研究 [J]. 水文地质工程地质,2023,50(6): 109-116.  
DU C, ZHANG Z, ZHANG L, et al. Application of digital construction of the minor-disturbance four-axial soil mixing pile [J]. Hydrogeology and engineering geology, 2023, 50 ( 6 ): 109-116.
- [ 14 ] 沈水龙,蔡丰锡,顾伟华. 有明黏土中搅拌桩施工时的孔隙水压力[J]. 岩土力学,2006,27(4):648-652.  
SHEN S L, CAI F X, GU W H. Excess pore pressure around deep mixing column in soft Ariake clay [J]. Rock and soil mechanics, 2006,27(4): 648-65.

- LI W Q. Clean and efficient nuclear power ensures the realization of China's energy security and carbon peaking and carbon neutrality targets[J]. *Energy of China*,2022,44(11):42-48.
- [2] 荆春宁,高力,马佳鹏,等.“碳达峰、碳中和”背景下能源发展趋势与核能定位研判[J]. *核科学与工程*,2022,42(1):1-9.
- JING C N, GAO L, MA J P, et al. Study and judgment on energy developing trend and nuclear energy positioning under the background of “carbon peaking and carbon neutrality” [J]. *Nuclear science and engineering*,2022,42(1):1-9.
- [3] ORHAN M F, DINCER I, ROSEN M A, et al. Integrated hydrogen production options based on renewable and nuclear energy sources [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*,2012,16(8):6059-6082.
- [4] 王飞. CAP1400 核电站示范工程常规岛大体积混凝土施工技术[J]. *施工技术*,2016,45(S1):561-564.
- WANG F. CAP1400 Nuclear Power Plant Demonstration Project CI mass concrete construction technology [J]. *Construction technology*,2016,45(S1):561-564.
- [5] 陈晶晶,张加军,孙克彬,等. AP1000 核电站安全壳厂房建造施工逻辑分析[J]. *施工技术*,2014,43(21):36-39.
- CHEN J J, ZHANG J J, SUN K B, et al. Construction logic analysis to construction of containment building in AP1000 nuclear power station [J]. *Construction technology*, 2014, 43(21):36-39.
- [6] 何锦,蔡松,刘向荣. AP1000 核岛屏蔽厂房与人员闸门施工逻辑研究[J]. *施工技术*,2013,42(S2):393-395.
- HE J, CAI S, LIU X R. Research on construction logic of shield plant and personnel gate in AP1000 nuclear island [J]. *Construction technology*,2013,42(S2):393-395.
- [7] 兰学文,周少丽. AP1000 钢制安全壳施工技术优化分析[J]. *中国核电*,2016,9(2):151-155.
- LAN X W, ZHOU S L. Study on the optimization of the AP1000 containment vessel construction technology [J]. *China nuclear power*,2016,9(2):151-155.
- [8] 李子朋. AP1000 安全壳贯穿件安装逻辑和进度优化研究[J]. *项目管理技术*,2014,12(6):93-95.
- LI Z P. Research on the installation logic and schedule optimisation of AP1000 containment penetration [J]. *Project management technology*,2014,12(6):93-95.
- [9] 刘国星,黄永辉,万洋. 桥墩大体积混凝土水化热试验研究及数值模拟[J]. *混凝土与水泥制品*,2018(9):94-97.
- LIU G X, HUANG Y H, WAN Y. Experimental study and numerical simulation of heat of hydration of bridge pier mass concrete[J]. *Concrete and cement products*,2018(9):94-97.
- [10] 胡立飞,辛景舟,张兰,等. 拱座大体积混凝土水化热及温控措施[J]. *中国科技论文*,2023,18(2):152-157.
- HU L F, XIN J Z, ZHANG L, et al. Heat of hydration and temperature control measures of mass concrete for arch base[J]. *China science paper*,2023,18(2):152-157.
- [11] 何骏炜,黄政哲,谢旻杲,等. 不同厚度大体积混凝土底板温度控制分析及施工[J]. *建筑施工*,2023,45(11):2355-2358.
- HE J W, HUANG Z Z, XIE M G, et al. Temperature control analysis and construction of mass concrete floor with different thickness[J]. *Building construction*,2023,45(11):2355-2358.
- [12] 董事尔,刘杨,侯立群,等. 某核电站1号核岛底板大体积混凝土养护与测温技术[J]. *施工技术*,2011,40(14):98-101.
- DONG S E, LIU Y, HOU L Q, et al. Mass concrete curing and temperature measurement technology of No. 1 nuclear island floor slab of a nuclear power plant [J]. *Construction technology*,2011,40(14):98-101.
- [13] 邓晓阳,赵平,张冰冰. 基于动态设计养护法的核电站大体积混凝土裂缝控制研究[J]. *施工技术*,2013,42(18):54-57.
- DENG X Y, ZHAO P, ZHANG B B. Research on crack control of mass concrete in nuclear power plants based on dynamic design curing method [J]. *Construction technology*, 2013, 42(18):54-57.
- [14] LI L, DABARERA A, DAO V. Evaluation of zero-stress temperature and cracking temperature of high performance concrete at early ages[J]. *Materials and structures*,2022,55(7):181.
- [15] ZHONG A C, SOFI M, LUMANTARNA E, et al. Effects a simplified numerical model for temperature profiles of early age concrete[J]. *Magazine of concrete research*,2023.

(上接第87页)

- [5] 龚靖渝,楼雨京,柳奉奇,等. 三维场景点云理解与重建技术[J]. *中国图象图形学报*,2023,28(6):1741-1766.
- GONG J Y, LOU Y J, LIU F Q, et al. 3D scene point cloud understanding and reconstruction technology [J]. *Chinese journal of image and graphics*,2023,28(6):1741-1766.
- [6] ZHANG J, SINGH S. LOAM: lidar odometry and mapping in real-time [C]. *Robotics: Science and Systems Conference*,2014.
- [7] 李晓亮,李海鹏,张筠卓. 地面三维激光扫描数据多站配准方法[J]. *北京测绘*,2023,37(5):676-682.
- LI X L, LI H P, ZHANG Y Z. Multi-station registration method for ground 3D laser scanning data [J]. *Beijing surveying and mapping*,2023,37(5):676-682.
- [8] 王少钦,姜耀,鲁宇明. 基于 Inventor 的零件三维建模研究[J]. *技术与市场*,2020,27(9):51-52.
- WANG S Q, JIANG Y, LU Y M. Research on 3D modeling of parts based on inventor [J]. *Technology and market*, 2020, 27(9):51-52.
- [9] 张伟,汤发树. 三维激光扫描技术在盾构隧道钢结构安装测量中的应用[J]. *测绘通报*,2018(S1):75-78.
- ZHANG W, TANG F S. Application of 3D laser scanning technology in steel structure installation of shield tunnel [J]. *Bulletin of surveying and mapping*,2018(S1):75-78.
- [10] 王珊,王春阳. 基于特征点匹配的三维点云配准算法[J]. *国外电子测量技术*,2020,39(12):23-28.
- WANG S, WANG C Y. 3D point cloud registration algorithm based on feature point matching [J]. *Foreign electronic measurement technology*,2020,39(12):23-28.
- [11] 贺磊,蔡乾广,许诚权,等. 地铁盾构断面椭圆度检测及数据分析研究[J]. *都市轨道交通*,2021,34(3):104-107,118.
- HE L, CAI Q G, XU C Q, et al. Research on ovality detection and data analysis of metro shield section [J]. *Urban rapid transit*,2021,34(3):104-107,118.