

超深地铁车站地下连续墙盾构接收洞口 玻璃纤维筋技术及实践

邓稀肥¹ 王圣涛¹ 邬家林¹ 刘子阳¹ 方知海² 陆苗祥³

(1. 中铁四局集团有限公司, 230023, 合肥; 2. 杭州市地铁集团有限责任公司, 310012, 杭州;

3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉//第一作者, 高级工程师)

摘 要 基于杭州地铁 6 号线火车东站项目, 分析了超深地铁车站盾构机接收的风险, 提出了地下连续墙单侧玻璃纤维筋优化方案。以现场试验和数值计算为基础, 采取了地下连续墙幅宽调整、钢筋笼合理分节、玻璃纤维筋卡扣连接和吊装方案优化等措施, 探讨了超深超厚玻璃纤维筋地下连续墙的施工技术要点, 并阐述了盾构磨除墙参数的选取。工程实际应用结果表明, 单侧玻璃纤维筋技术成功应用于超深地铁车站地下连续墙盾构接收洞口, 既保证了超深基坑盾构接收掌子面稳定性, 又隔断了承压水层, 减小了因端头加固施工质量不可控导致的接收风险。

关键词 超深地铁站; 单侧玻璃纤维筋; 超厚地下连续墙; 盾构接收; 施工技术

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.12.035

Technology and Practice of GFRP Bars for Underground Diaphragm Wall Shield Receiving Portal in Ultra-deep Metro Station

DENG Xifei, WANG Shengtao, WU Jialin, LIU Ziyang, FANG Zhihai, LU Miaoxiang

Abstract Based on the Hangzhou Metro Line 6 East Railway Station project, the risk of shield machine receiving in ultra-deep metro station is analyzed, and underground diaphragm wall single side GFRP (glass fibre reinforced polymer) bars optimization scheme is proposed. On the basis of field test and numerical calculation, the width adjustment of diaphragm wall, reasonable segmentation of reinforcement cage, snap connection of GFRP bars and optimization of hoisting scheme are adopted. The technological key points of ultra-deep ultra-thick GFRP bars diaphragm wall construction are discussed. Selection of wall grinding parameters of shield machine is elaborated. Practical engineering application results show that single side GFRP bars technology can be successfully applied for ultra-deep metro station diaphragm wall shield receiving portal, which guarantees tunnel face stability of ultra-deep foundation

pit shield receiving, and blocks confined aquifer, lowering risk of receiving induced by uncontrollable end reinforcement construction quality.

Key words ultra-deep metro station; single side GFRP bars; super-thick underground diaphragm wall; shield receiving; construction technology

First-author's address China Tiesiju Engineering Group Co., Ltd., 230023, Hefei, China

对于超深多层地铁站施工, 盾构机能否安全接收是此类工程的重难点。在超深多层地铁车站, 盾构机的安全接收尤为重要。超深地铁车站接收洞门处, 外侧土压力大, 可能临近地下承压水层。端头加固结合人工破除地下连续墙的传统盾构接收方案极易发生掌子面失稳坍塌和承压水突涌问题, 从而威胁施工人员安全和周边环境稳定, 造成不可估量的损失。

为实现超深地铁车站的盾构机安全接收, 在盾构机要穿越的围护结构处设置玻璃纤维筋-混凝土结构, 能使得盾构机刀盘磨穿围护结构, 从而降低盾构接收风险^[1-4]。

国内外应用玻璃纤维筋地下连续墙进行盾构接收技术虽已趋于成熟, 但该技术多应用于较浅基坑或 800 mm 厚地下连续墙^[1-4], 对于超深基坑超厚地下连续墙的应用尚无可参考的案例。本文针对杭州地铁 6 号线火车东站项目, 对 34.5 m 超深基坑、厚度 1.5 m 单侧玻璃纤维筋地下连续墙在复杂高风险工况下盾构接收的成功案例进行分析与研究。

1 工程概况

如图 1 所示, 杭州地铁 6 号线火车东站为地下 4 层车站。基坑端头开挖深度为 34.5 m。基坑围护

结构为 1.5 m 厚地下连续墙,其深入中风化凝灰岩 1.5 m,总长约为 60 m。地下连续墙钢筋笼最大质量约 111.4 t(含单侧十字型钢接头)。在大里程端,地下连续墙外侧距既有 SMW 工法桩(型钢水泥土搅拌桩)仅 0.4 m,SWM 工法桩的型钢在盾构接收前拔除。地下 3 层地下室开挖深度为 16.2 m,底板

距盾构区间 8.9 m。盾构区间距承压水层(水头 37 m)约 7.8 m。盾构接收方案为端头加固+钢套筒,地下室底至区间底以下 3.0 m 深度范围内采用高压旋喷桩进行加固,加固体长 12.0 m,宽 26.2 m;地下室围护结构与火车东站地下连续墙间采用超高压旋喷技术进行加固。土体分层情况及地层参数如表 1 所示。

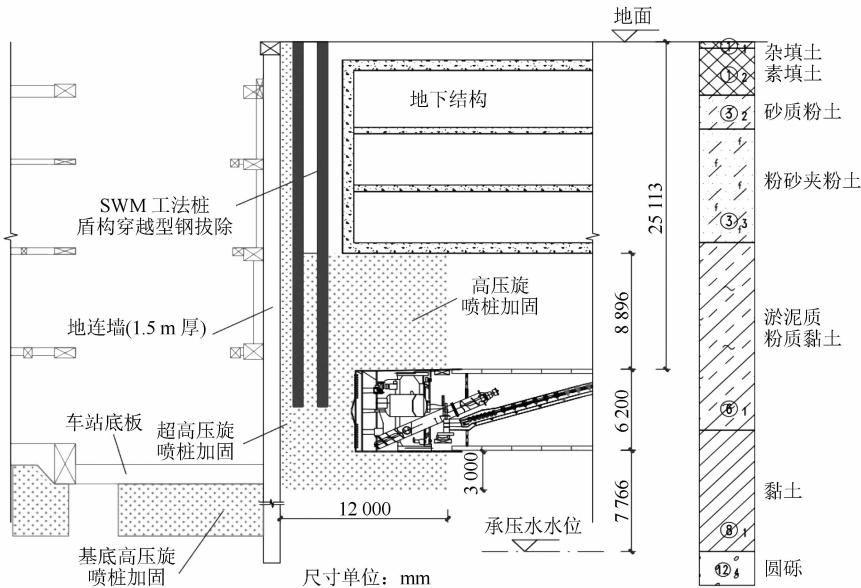


图 1 杭州地铁 6 号线火车东站盾构接收端断面图

Fig. 1 Section of shield receiving end of Hangzhou Metro Line 6 East Railway station

表 1 杭州地铁 6 号线火车东站基坑地层参数表
Tab. 1 Formation parameters of Hangzhou Metro Line 6 East Railway station foundation pit

土层	厚度/ m	重度/ (kN/m ³)	静止侧 压力系数	渗透系数/ (10 ⁻⁶ cm/s)	黏聚 力/kPa
①1 杂填土	1.1	19.30	0.55		15.0
①2 素填土	0.6	19.50	0.50		10.0
③1 砂质粉土	2.3	19.37	0.32	424.00	7.3
③2 砂质粉土	2.9	19.60	0.33	293.00	6.6
③3 砂质粉土夹粉砂	8.0	19.80	0.32	665.32	5.1
⑥1 淤泥质粉质黏土	14.5	17.80	0.55	0.41	14.8
⑧1 黏土	10.8	17.84	0.48	0.80	21.2
⑫4 圆砾	4.5	20.00	0.32	58 400.00	3.0
⑫3 圆砾	4.5	20.00	0.32	58 400.00	5.0
②0d-2 强风化凝灰岩	3.1	22.00	0.47		50.3
②0d-3 中风化凝灰岩		23.00	0.48		74.4

2 盾构接收风险分析

2.1 端头加固效果不可控

车站端头井加固采用加固深度为 34.5 m、桩心距为 600 mm 的 φ800 mm 三重管高压旋喷桩。相关研究证明^[5], 相较透水砂层或圆砾层等透水地层,在淤泥及黏土层中高压旋喷桩加固质量明显下降,且在黏土层中容易存在固结体强度不均、缩颈

现象^[6]。为进一步验证端头井加固效果,现场进行了取芯验证。由芯样可见,在 20.0~34.5 m 深度,加固体已明显不成桩,故在洞门破除时极易发生因土体强度不足造成的掌子面坍塌,从而存在地面沉降、围护结构变形风险。

2.2 洞门破除、掌子面稳定性差

地下 4 层地铁站盾构接收深度大,而且洞门外侧土层为⑥1 淤泥质粉质黏土及⑧1 黏土,其土体侧压力系数大,故地下连续墙承受的土压非常大。如人工破除洞门,则掌子面稳定性难以保证,施工风险极高。

2.3 盾构接收邻近承压水

车站基坑下深度为 6~8 m 范围为高承压水层,其压力水头约为 37 m。由于端头井加固体质量不佳,人工破除洞门时极易发生承压水击穿隔水层、形成喷涌,造成严重后果。

3 单侧玻璃纤维筋技术

综合考虑盾构接收风险、基坑稳定性及大型钢筋笼吊装安全原则,针对原盾构接收方案(端头加

固+钢套筒)存在的问题,本文提出了地下连续墙盾构接收洞口采用单侧玻璃纤维筋方案,见图 2。

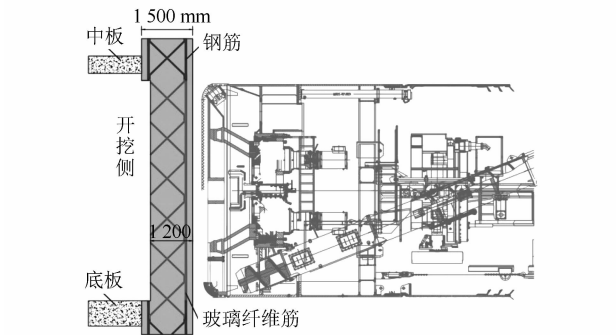


图 2 地下连续墙盾构接收洞口采用单侧玻璃纤维筋方案
Fig. 2 Scheme of underground diaphragm wall shield receiving portal adopting single side GFRP bars

玻璃纤维筋地下连续墙施工完成后,基坑开挖至基坑底;底板施工完成后继续施工上部车站结构;在盾构机到达前,提前安装钢套筒后,人工凿除基坑开挖侧的 30 cm 厚地下连续墙,并将钢筋剥除,迎土侧洞门处玻璃纤维筋由盾构机磨穿。相比较传统的盾构接收方案,本方案能确保车站超深基坑接收洞门掌子面的稳定性,隔绝了承压水,尽可能地降低了洞门破除的施工风险。

3.1 单侧玻璃纤维筋的结构设计

火车东站 A 区端头井洞门处,原有地下连续墙幅宽设计为 6.00 m,盾构刀盘外径为 6.48 m。为使盾构机穿过地下连续墙时能避开地下连续墙十字钢板接头,现将地下连续墙幅宽调整为 8.00 m。地下连续墙加宽后,为了减少钢筋笼总质量,采用无十字钢板接头的闭合幅段施工。调整后钢筋笼总质量为 127 t,满足既定施工方案中起重设备的要求,保证了玻璃纤维筋地下连续墙钢筋笼吊装入槽的安全。地下连续墙分幅调整方案如图 3 所示。

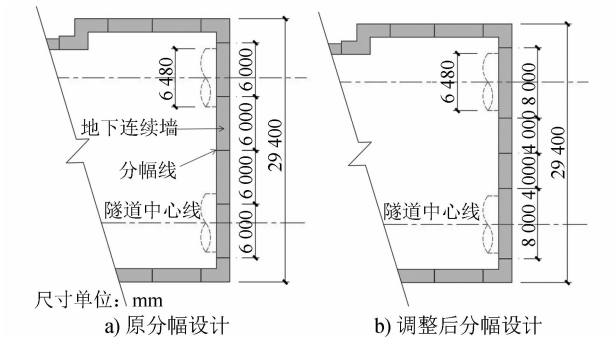


图 3 钢筋笼分幅调整示意图
Fig. 3 Schematic diagram of reinforcement cage framing adjustment

3.2 玻璃纤维筋地下连续墙受力计算

采用有限元法建立玻璃纤维筋地下连续墙模型。土体采用摩尔库伦准则,其参数如表 1 所示。按实际施工开挖工况设置有限元模型施工阶段,基坑水平分层开挖见底时,端头井处玻璃纤维筋地下连续墙受力计算结果如图 4 所示。

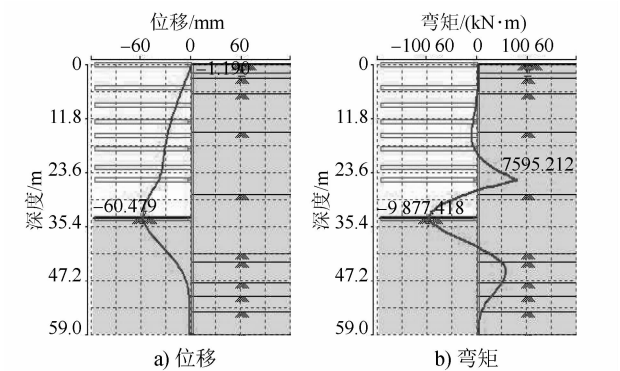


图 4 玻璃纤维筋地下连续墙受力计算结果实景图
Fig. 4 Stress calculation results of GFRP bars underground diaphragm wall

当基坑开挖完成后,最大正弯矩和最大负弯矩分别在底板和逆作板(负 3 层板)处,洞门定点位置(深度为 28.7 m 处)弯矩接近 0,基坑内侧整体处于受弯状态,说明此时的玻璃纤维筋不处于弯矩最大处。

地下连续墙最大侧向位移发生在基坑底位置,且洞门处地下连续墙承受土压力较大。经计算,地下连续墙所受侧压力为 4 239.6 kN/m,故水平和竖向玻璃纤维筋靠基坑内侧受拉。参照 MT/T 1061—2008《树脂锚杆玻璃纤维增强塑料杆体及配件》^[7],对该玻璃纤维筋进行送样检验,检测结果如表 2 所示。由检测结果,该处地下连续墙玻璃纤维筋拉应力合力远小于地下连续墙受拉玻璃纤维筋试件平均抗拉强度,满足基坑开挖见底地下连续墙整体抗弯要求。

此外,地下连续墙分节位置选择在弯矩最小处附近,故地下连续墙钢筋笼整体接头安全可控。

表 2 玻璃纤维筋送样检验结果 Tab. 2 Inspection results of GFRP bars samples		
样品型号	横截面积/mm ²	平均抗拉强度/MPa
GFRP22	336.5	719.4
	343.1	805.2
	333.3	727.8
GFRP32	730.6	922.8
	730.6	897.3
	735.4	945.7

3.3 钢筋连接及卡扣设计

现场玻璃纤维筋钢筋笼竖向桁架筋与横向桁架筋直径均为 32 mm、间距均为 150 mm。为保证玻璃纤维筋间连接牢固,玻璃纤维筋之间采用镀锌扎丝+镀锌铁丝绑扎,以保证 100% 绑扎固定。玻璃纤维筋与钢筋的搭接长度为 1.5 m,采用 M10-U 型螺栓连接。U 型螺栓理论数量为每个接头 2 个。施工现场施作连接处拉拔试验。试验结果表明,单根接头拉脱需要 45 kN 拉力,满足吊装时接头抗拉要求。为保险起见,实际施工时每个接头设置了 3 个 U 型螺栓,且相邻 2 个接头相互错开 50 cm,实施情况如图 5 所示。

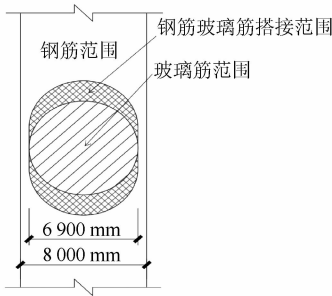


图 5 玻璃纤维筋与钢筋连接示意图

Fig. 5 Schematic diagram of connection between GFRP bars and rebar

4 施工技术要点

4.1 钢筋笼分节吊装及定位

如图 6 所示,钢筋笼分 2 节进行制作、吊装。第 1 节为含玻璃纤维筋的钢筋笼,长度为 37.5 m,第 2 节钢筋笼长度为 19.15 m。为保证接头安全,钢筋笼接头靠近图 4 中基底下弯矩为 0 处(深度约为 40 m 处)。含玻璃纤维筋钢筋笼吊装采用 1 个主吊机和 1 个副吊机配合吊装,吊点焊接在地下连续墙钢筋主筋处。试吊后,人工检查玻璃纤维筋有无断裂,接头是否完好,钢筋笼整体是否有变形。检查完毕后,于空中回直。

2 节钢筋笼对接时,先将下节钢筋笼固定在导墙上,再下放上节钢筋笼;在上节钢筋笼距离下节钢筋笼 5 cm 时,停止下放,并人工进行调整;待所有接头对齐后,再缓缓放下上节钢筋笼;在 2 节钢筋笼间隙约为 5 mm 时,停止下放,并将钢筋用套筒拧紧到位;之后,缓慢下放钢筋笼,逐一连接;确保所有接头完成连接后,即可进行第 1 节钢筋笼入槽。玻璃纤维筋节段钢筋笼在开始入槽时,需对玻璃纤维

筋卡扣连接、绑扎情况和有无断筋进行二次复查,待现场确认无误后完成入槽。

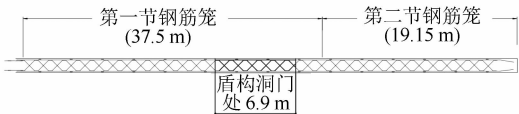


图 6 玻璃纤维筋钢筋笼吊装分节示意图

Fig. 6 Schematic diagram of GFRP bars reinforcement cage hoisting by section

4.2 人工破除单侧玻璃筋

接收井洞门处地下连续墙厚 1.5 m。施工时仅破除基坑开挖侧的 30 cm 厚地下连续墙。为了保证洞身结构稳定,洞门破除时按由上到下、先中间后两边的顺序进行破除。

洞门凿除完成后,需快速将洞门钢环周边的钢筋头全部剥除,以防盾构机推进时卡住刀盘。完成剥除钢筋后,检查地下连续墙掌子面是否完整,是否漏水,以及混凝土中是否存在玻璃纤维筋碎裂漏筋。

4.3 盾构机磨除玻璃纤维筋混凝土墙

盾构机到达前,通过测量算出端头地下连续墙的实际里程。盾构机到达此里程即进入掘进状态。以每天 2 次的频率监测掘进处地面的沉降情况,并根据监测数据采取补浆等措施。在盾构机距地下连续墙 50 环时对隧道轴线进行复核,并人工测量盾构机姿态,待测量及复测结果无误后再进行盾构掘进施工。盾构机磨除混凝土墙各阶段的掘进参数如表 3 所示。

表 3 盾构机磨除地下连续墙参数

Tab. 3 Parameters of shield machine grinding diaphragm wall

阶段	掘进 推力/kN	刀盘转速/ (r/min)	刀盘扭矩/ (kN·m)	掘进速度/ (mm/min)
碰壁前	16 000	1.3	385	5
磨墙中	8 000~9 000	1.3	1 950	3~4
磨墙后	15 000	1.4	327	4

在盾构机接触地下连续墙之前,应慎重选择合适盾构机掘进参数,并正确选取管片拼装点位,防止纠偏过急,保证盾构机接触地下连续墙时姿态无偏差。

在盾构机即将碰壁之前一环时,将掘进速度减至 4 mm/min,推力调整至 12 000 kN 以下;刀盘转速调整至 1.3~1.4 r/min;在磨墙中,将盾构机推力控制在 8 000~9 000 kN,将掘进速度控制为 3~4

mm/min,严密监测掌子面是否有碎裂塌方及漏水情况。在钢套筒与洞门环梁接缝位置安装百分表,以监测钢套筒位移情况有无异常。盾构机在完全破除地下连续墙后,逐渐恢复至钢套筒内掘进参数。

在现场实际接收过程中,掌子面安全稳定,无承压水突涌情况,钢套筒位移无超标,盾构接收安全完成。

5 结语

杭州地铁 6 号线火车东站 1.5 m 厚单侧玻璃筋地下连续墙盾构接收工程,基于数值计算和现场试验数据,采用地下连续墙幅宽调整、钢筋笼合理分节、玻璃纤维筋卡扣连接和吊装方案优化等措施,完成了 1.5 m 厚地下连续墙的玻璃纤维筋钢筋笼的吊装入槽。经实际工程验证,单侧玻璃纤维筋技术成功应用于超深地铁车站地下连续墙盾构接收洞口,既保证了超深基坑盾构接收掌子面稳定性,又隔断了承压水层,减小了因端头加固施工质量不可控导致的接收风险,保障了盾构接收安全,在国内类似工程具有一定的应用推广价值。

参考文献

- [1] 方卫. GFRP 筋在超长地下连续墙钢筋笼中的应用及笼体吊装施工的研究[J]. 建筑施工,2009(9):767.
FANG Wei. Study on GFRP rebar applied to reinforcement cage in super long diaphragm wall and on hoisting and placement of reinforcement cage[J]. Building Construction,2009(9):767.
- [2] 金鑫. 盾构无障碍始发与接收施工力学行为及施工工艺[D]. 北京:北京建筑大学,2017.
- [6] 金永乐,张子健. 改善上盖地铁车辆段运营条件设计新思路[J]. 都市轨道交通,2018(3):6.
JIN Yongle,ZHANG Zijian. A new thought on improving working conditions in a metro depot with a superstructure[J]. Urban Rapid Rail Transit,2018(3):6.
- [7] 张邦力. 物业开发地铁车辆段首层盖板高度影响因素分析[J]. 铁道标准设计,2017(11):155.
ZHANG Bangli. Influence factors on the first cover plate height of property development of metro depot[J]. Railway Standard Design,2017(11):155.
- [8] 杨磊,郭晓彤. 浅谈带上盖物业开发车辆段建筑消防设计[J]. 科技资讯,2020(18):49.
YANG Lei, GUO Xiaotong. Discussion on building fire prevention design of depot with overhead property development[J]. Science & Technology Information,2020(18):49.
- [9] 张新,罗俊礼,徐志胜,等. 带上盖物业地铁车辆段盖板结构耐火性能研究[J]. 铁道科学与工程学报,2018(4):986.

JIN Xin. Construction mechanical behavior and construction technology of shield machine barrier-free launching and receiving[D]. Beijing:Beijing University of Civil Engineering and Architecture,2017.

- [3] 逮建栋. 含玻璃纤维筋地下连续墙笼体的制作及吊装施工[J]. 广东土木与建筑,2015(8):52.
LU Jiandong. The construction of skeleton frame of concrete diaphragm wall that including GFRP[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering,2015(8):52.
- [4] 冉海军,张文新,牛占威,等. 单层玻璃纤维筋网在超大直径盾构接收中的应用与分析——以苏埃通道工程盾构隧道为例[J]. 隧道建设(中英文),2020(增刊2):233.
RAN Haijun,ZHANG Wenxin,NIU Zhanwei,et al. Application and analysis of single-layer fiberglass mesh in reception of super-large diameter shield:a case study on shield tunnel of Su'ai Channel[J]. Tunnel Construction,2020(S2):233.
- [5] 施利斌,施振东,李淳学,等. 某工程超深旋喷桩止水帷幕的质量检测[J]. 浙江科技学院学报,2014(3):219.
SHI Libin,SHI Zhendong,LI Chunxue,et al. Quality testing of ultra-deep churning pile cofferdam[J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology,2014(3):219.
- [6] 施利斌. 超深旋喷桩在复杂地质条件下的工程应用研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2015.
SHI Libin. The engineering application research of ultra-deep chemical churning piles under complicated geological conditions[D]. Hangzhou:Zhejiang University of Technology,2015.
- [7] 国家安全生产监督管理总局. 树脂锚杆玻璃纤维增强塑料杆体及附件:MT/T 1061—2008[S]. 北京:煤炭工业出版社,2009.
State Administration of Work Safety. Fiber-glass reinforced plastics bar of bolt and accessories:MT/T 1061—2008[S]. Beijing:China Coal Industry Publishing House,2009.
- [10] 刘正清. 带有上盖物业开发的地铁车辆段通风防排烟系统设计[J]. 制冷与空调,2020(3):343.
LIU Zhengqing. Ventilation,smoke prevention and exhaust system design of underground metro depot with over development of buildings[J]. Refrigeration and Air Conditioning,2020(3):344.
- [11] 林金洲,尧国皇. 地铁车辆段上盖建筑设计有关问题探讨[J]. 四川建筑,2017(2):150.
LIN Jinzhou,YAO Guohuang. Discussion on relevant issues of building structural design of metro depot superstructure[J]. Sichuan Architecture,2017(2):150.

(收稿日期:2021-03-06)

(上接第 171 页)

- [6] 金永乐,张子健. 改善上盖地铁车辆段运营条件设计新思路[J]. 都市轨道交通,2018(3):6.
JIN Yongle,ZHANG Zijian. A new thought on improving working conditions in a metro depot with a superstructure[J]. Urban Rapid Rail Transit,2018(3):6.
- [7] 张邦力. 物业开发地铁车辆段首层盖板高度影响因素分析[J]. 铁道标准设计,2017(11):155.
ZHANG Bangli. Influence factors on the first cover plate height of property development of metro depot[J]. Railway Standard Design,2017(11):155.
- [8] 杨磊,郭晓彤. 浅谈带上盖物业开发车辆段建筑消防设计[J]. 科技资讯,2020(18):49.
YANG Lei, GUO Xiaotong. Discussion on building fire prevention design of depot with overhead property development[J]. Science & Technology Information,2020(18):49.
- [9] 张新,罗俊礼,徐志胜,等. 带上盖物业地铁车辆段盖板结构耐火性能研究[J]. 铁道科学与工程学报,2018(4):986.