

# 已运营地铁隧道盾构管片破损的竖井永久修复技术

连逢逾<sup>1</sup> 陈刚<sup>2</sup> 廖林川<sup>3</sup> 贺威<sup>4</sup>

(1. 四川成德轨道交通有限公司, 610041, 成都; 2. 成都轨道建设管理有限公司, 610200, 成都; 3. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 610059, 成都; 4. 中国交通建设股份有限公司轨道交通分公司, 102209, 北京)

**摘要** [目的]某地铁运营区间盾构隧道在地表降水井钻孔施工中,隧道管片被钻穿,导致破损,引发突水灾害,造成地铁停运。对此,需针对已运营地铁隧道内盾构管片破损的情况研究永久修复技术。[方法]针对该区间内砂卵石、泥岩地层稳定的特点,提出明挖竖井修复破损管片的技术,并详细阐述了管片破损竖井修复施工工艺。建立有限元模型,对降水、竖井开挖、管片修补、竖井回填等不同施工阶段管片破损位置的应力变化进行了研究。[结果及结论]管片破损位置修复后的压应力最小为 0.732 MPa,随着竖井的回填,修复部位边缘处和中心处的应力开始逐渐增加,最终边缘处应力稳定在 2.124 MPa 左右,中心处应力稳定在 0.732 MPa 左右。满足安全性要求,表明该修复技术是可靠的。

**关键词** 地铁隧道; 盾构; 管片破损修复; 明挖竖井

**中图分类号** U455.8

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.01.034

## Permanent Shaft Repair Technology for Damaged Shield Segments in Operating Metro Tunnels

LIAN Fengyu<sup>1</sup>, CHEN Gang<sup>2</sup>, LIAO Linchuan<sup>3</sup>, HE Wei<sup>4</sup>

(1. Sichuan Chengde Rail Transit Co., Ltd., 610041, Chengdu, China; 2. Chengdu Rail Construction Management Co., Ltd., 610200, Chengdu, China; 3. State Key Laboratory of Geological Disaster Prevention and Geological Environment Protection (Chengdu University of Technology), 610059, Chengdu, China; 4. Rail Transit Branch of China Communications Construction Co., Ltd., 102209, Beijing, China)

**Abstract** [Objective] During the drilling construction of ground surface dewatering shaft in a metro operational interval shield tunnel, the tunnel segments were damaged due to being pierced, resulting in sudden water hazards to interrupt metro service. In light of this, it is necessary to study permanent repair technologies for damaged shield segments within the operational metro tunnel. [Method] Considering the stability characteristics of the gravel and mudstone formations in the inter-

val, a technology for repairing damaged segments in open-excavation vertical shaft is proposed, and this repair construction technology is elaborated in details. A finite element model is established to study the stress changes at the positions of the segment damage during different construction stages, including dewatering, vertical shaft excavation, segment repair, and vertical shaft backfilling. [Result & Conclusion] The minimum compressive stress after repairing the segment damage position is 0.732 MPa. With the backfilling of the vertical shaft, the stresses at the edge and the center of the repair site gradually increase. Ultimately, the stress stabilizes at around 2.124 MPa at the edge, and around 0.732 MPa at the center. Safety requirements are met, indicating that the repair technology is reliable.

**Key words** metro tunnel; shield; segment damage repair; open-excavation vertical shaft

受外部施工作业的影响,地铁隧道盾构管片很可能出现破损,给地铁的正常运营及人员安全带来重大隐患,亟需对出现问题的地铁盾构隧道修复加固。国内外学者针对盾构隧道管片破损修复措施展开了多方面研究。目前通常使用钢内衬、芳纶纤维布及碳纤维等材料来修复加固受损的管片。文献[1]结合上海某隧道修复项目详细阐述了运营盾构隧道内的钢环整修修复工艺;文献[2]通过管片外注浆加固土体、管片内张钢环等工艺使得石家庄地铁1号线某盾构区间的隧道管片破损得以解决;文献[3-4]采用钢板内衬的方法修复盾构隧道管片破损,证明了该施工技术的可行性;文献[5]采用数值模拟的方法,证明了钢板对盾构隧道管片的加固效果;文献[6]依托武汉地铁4号线穿越长江隧道区间的修复工程,将粘钢结构应用于地铁盾构隧道修复施工,效果显著;文献[7]通过现场试验和有限元模拟相结合的方式,研究分析了芳纶纤维布加固盾构隧道管片的效果;文献[8]依托青岛地铁8号线大洋站管片损伤修复工程,研究了岩补泡沫水泥



砂浆修补损伤管片的效果,发现修补后的衬砌管片抗渗抗裂性以及耐久性显著提高;文献[9]采取开挖辅助竖井的施工方法和措施对破损管片进行彻底修复,成功地解决了邻近高压电力铁塔开挖竖井修复管片空间狭小、涌水量大、沉降变形要求高、施工难度大等难题;文献[10]对竖井洞外修补方案及其适用性进行了研究,研究发现,管片破碎至竖井开挖阶段,拱顶弯矩增大、轴力减小,影响结构安全;管片破碎修复部位,在回填土荷载作用下,内力可能由内侧受拉转变为外侧受拉,可能会加剧管片内侧裂缝或局部碎裂现象。

然而,目前关于采用明挖竖井修复破损管片的研究较少。本文以某地铁隧道区间盾构管片顶拱穿孔竖井修复为工程依托,详细阐述对已运营地铁隧道内盾构管片破损的永久修复技术。以期盾构隧道管片破损修复提供一定的工程经验和参考。

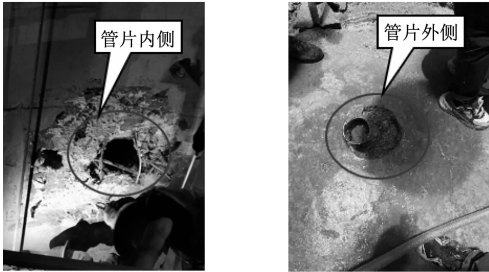
## 1 工程概况

### 1.1 工程概述

某地铁隧道区间右线起始里程为 YK23 + 187.167,终止里程为 YK24 + 382.026。该区间右线长 1 194.859 m。盾构区间隧道外径为 6.0 m、内径为 5.4 m,管片长度为 1.5 m,厚度为 0.3 m。每环衬砌环由 6 块管片组成,包括 1 块封顶块、2 块邻接块及 3 块标准块。区段管片采用 M27 螺栓连接。在降水井施工时,施工单位不慎将 YK23 + 568.561 处拱顶管片击穿。

### 1.2 管片破损情况

被击穿管片为隧道直线段衬砌环标准块。受损范围内混凝土及部分钢筋出现损伤;受损区域在该标准块与另一标准块连接手孔附近,位于列车前进方向隧道横断面 12 点钟方位,管片破损处现场示意图如图 1 所示。



a) 管片内侧                      b) 管片外侧

图 1 管片破损处现场示意图

Fig. 1 Display of segment damage site

### 1.3 工程地质和水文地质

该区间范围内上覆第四系全新统人工填土,其下依次为松散卵石、中砂、稍密卵石、中砂、中密卵石、中风化泥岩。管片被击穿处的覆土厚度为 17.3 m,管片破损位置所处地层情况如图 2 所示。地下水位埋深为 4.1 ~ 6.1 m,水量较丰富。

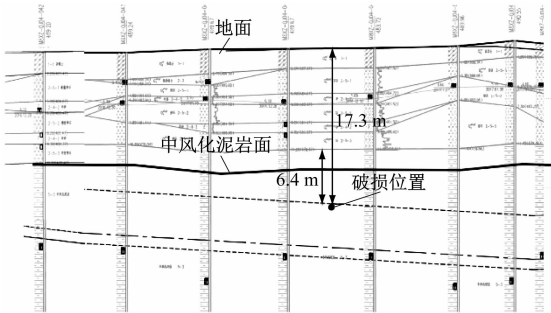


图 2 管片破损位置所处地层情况

Fig. 2 Stratum condition of segment damaged position

## 2 隧道管片修复技术

### 2.1 修复技术

在常见修复施工的方法中,在盾构隧道内施加钢内衬或是在盾构管片上部施作钢筋混凝土拱都具有一定的施工难度,而且施加钢内衬施工还会对地铁的正常运营造成较大影响,也不能彻底修复。

考虑到该隧道范围内地层围岩稳定性较好的特点,可以在管片破损上方直接开挖竖井,不仅能缩短施工工期,彻底地修复破损位置,还能确保隧道的结构和防水质量。由此,现场采用管片破损竖井修复技术,即明挖竖井修复破损管片,待管片达到强度要求后直接分层回填竖井。管片破损竖井修复施工示意图如图 3 所示。

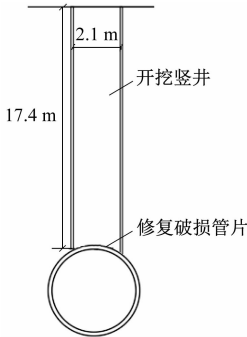


图 3 管片破损竖井修复施工示意图

Fig. 3 Diagram of segment damage shaft repair technology construction



## 2.2 管片破损竖井修复施工工艺

管片破损竖井修复的施工工序为:降水井成井并抽水→开挖竖井范围内地表以下 2.2 m 深的土体并及时施作混凝土护壁→开挖至地表以下 5.0 m 并及时施作混凝土护壁→开挖至地表以下 6.2 m 并及时施作混凝土护壁→开挖至地表以下 8.2 m 并及时施作混凝土护壁→开挖至地表以下 9.2 m 并及时施作混凝土护壁→开挖至地表以下 11.2 m 并及时施作混凝土护壁→开挖进入中风化泥岩层之后每挖深 1.0 m 就及时施作护壁,直到挖至管片破损深度位置 17.4 m→修复破损管片→对修复后的盾构管片进行防腐和防水处理→竖井内部分层回填→施工完成。破损管片修复施工工艺流程如图 4 所示。

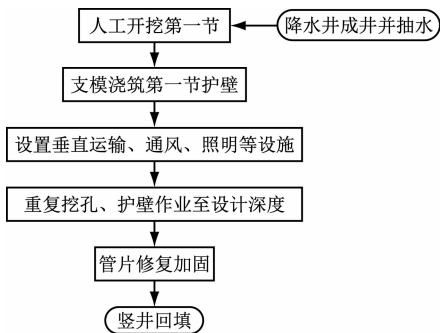


图 4 竖井修复施工工艺流程图

Fig. 4 Flow chart of shaft repair construction process

### 2.2.1 降水井布置

竖井开挖前,由于地下水位较高,为提供良好的施工环境,需在隧道周边打设 10 口降水井,其中 8 口(降水井 1)沿线路方向分布于隧道两侧且间隔 6 m,其余 2 口(降水井 2)位于隧道上方,将水位降至中风化泥岩面。降水井分布如图 5 所示。

### 2.2.2 竖井开挖

抽水不少于 7 d 后,在管片破损处上方人工开挖内径为 2.1 m 的竖井,开挖至管片外轮廓面。开挖过程中随时观察土层变化情况。人工挖孔竖井段深约 17.4 m;当挖孔深度达到 6.0 m 后,应加强通风,桩体每挖掘 1.0 m 就必须浇筑 1 节 C30 混凝土护壁。护壁是厚度为 150 mm 的内齿式护壁,每节高度为 1.0 m。护壁模板为钢制,拼装紧密,支撑牢固不变形。上下护壁使用竖向筋拉结,拉结长度为 5 cm,以保证护壁的支撑强度。

### 2.2.3 管片修复加固

1) 竖井清孔。人工挖竖井挖至管片(隧道顶)后,对竖井进行清孔、洗孔,为保证管片修补的质

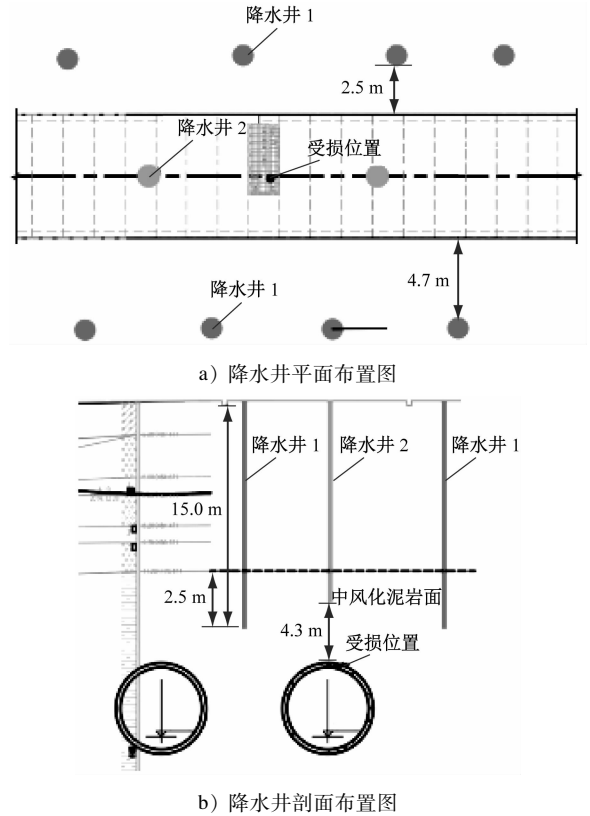


图 5 降水井分布图

Fig. 5 Diagram of dewatering well distribution

量,须保证修补处管片表面干燥。采用功率不小于 800 W 的电吹风热风风干,风干时长不小于 2 h。

2) 破损混凝土处理。使用小型电镐凿除管片外侧受损处松散混凝土和骨料颗粒,并采用高压气体清除管片外侧待修复部位混凝土表面碎屑及灰尘。若有钢筋锈蚀情况,则还须对钢筋进行除锈处理。

3) 受损钢筋恢复。管片内外侧受损主筋采用 2 根  $\phi 14$  mm 钢筋按原设计间距进行焊接连通,分布筋采用 2 根  $\phi 10$  mm 钢筋按原设计间距进行焊接连通。主筋与分布筋交叉位置新增  $\phi 8$  mm 拉结筋;主筋及分布筋均采用双面焊接,焊缝长度为  $5d$  ( $d$  为钢筋直径);手孔两侧各增加 1 根  $\phi 10$  mm 钢筋,采用植筋方式进行安装,且植筋锚固长度为 150 mm。在管片破损位置上方设置一道防坠梁,防坠梁截面尺寸为  $250\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ ,长度为 900 mm。

4) 界面处理。对管片外侧受损部位混凝土结合面进行界面处理,涂刷水泥基渗透结晶防水涂料。涂刷时应沿两个方向进行涂刷,不少于两遍,确保均匀、无遗漏。

5) 填充修复。填充材料采用掺钢纤维微膨胀



细石混凝土。混凝土标号为 C55,抗渗等级为 P12。钢纤维选用材质为不锈钢型的高强钢丝切断型钢纤维,抗拉强度不低于 1 000 级,形状为平直形;钢纤维长度为 50 ~ 60 mm,直径为 0.5 ~ 0.9 mm,长径比为 60 ~ 80;每 m<sup>3</sup> 混凝土的钢纤维掺量为 40 kg。混凝土界面处理剂涂刷完成后,向受损部位灌注修复材料。

6) 防水处理。待修复材料强度达到 20 MPa 后,对管片修复部位内外侧涂刷环氧树脂防水涂料进行防水封闭。涂刷面积不小于破洞修复范围外侧 360 mm;防水涂料涂刷完成后在上部粘贴一层自粘高分子聚合物防水卷材,防水卷材四周采用密封胶进行收口处理。

2.2.4 竖井回填

盾构管片修复后,将分层回填竖井。竖井回填施工工序为:竖井内中风化泥岩层部分分层回填,每层回填 1.2 m 直至中风化泥岩层表面→回填中风化泥岩层以上 0.9 m 竖井范围内的土层→继续回填 1.1 m 竖井范围内的土层→继续回填 2.0 m 竖井范围内的土层→继续回填 1.2 m 竖井范围内的土层→继续回填 3.5 m 竖井范围内的土层→继续回填 1.5 m 竖井范围内的土层至原地面。

不同深度竖井采用不同方式回填,从下至上回填材料依次为:6.2 m 厚的 C35 混凝土、9.7 m 厚的轻质泡沫混凝土(填充重度为 8.5 kN/m<sup>3</sup>,强度等级为 CF2.5)、1.5 m 厚的杂填土。

3 竖井修复效果

3.1 三维有限元模型的建立

为了能够更直观地显示出竖井开挖及回填过程中对地层地应力和隧道结构内力的影响,采用三维方式来建立竖井开挖有限元模型。计算模型应考虑边界效应的影响,隧道上边界到模型上部为实际埋深 17.4 m,模型上部边界为自由面,底部为 X、Y、Z 三向约束,两侧边界均施加法向约束,模型范围为 54.0 m(X 向) × 30.0 m(Y 向) × 47.4 m(Z 向)。有限元模型如图 6 所示。

3.2 材料物理力学参数

计算模型中,土体的本构关系采用摩尔-库伦弹性塑性模型,隧道衬砌管片和竖井使用实体单元进行模拟。有限元模型的材料相关参数如表 1 所示。

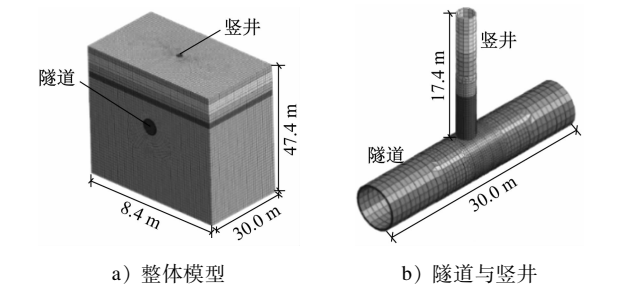


图 6 竖井开挖有限元模型示意图  
Fig. 6 Diagram of finite element model for shaft excavation

表 1 有限元模型材料的相关参数  
Tab. 1 Related parameters of finite element model materials

材料	弹性模量/ MPa	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	泊松比
杂填土	6.1	18.0	10	8	0.30
松散卵石土	22.0	20.0	32	2	0.33
稍密卵石土	30.0	21.0	35	5	0.30
中砂	12.0	19.5	38	2	0.30
中密卵石土	35.0	22.0	40	5	0.25
中风化泥岩	380.0	22.0	35	300	0.31
竖井护壁	31 500.0	25.0			0.20
衬砌管片	34 500.0	25.0			0.20

3.3 修复效果分析

管片破损处修复后的最小主应力计算结果如图 7 所示。绘制破损管片修复前后的环向最小主应力曲线如图 8 所示。其中正值为受拉应力,负值为受压应力。

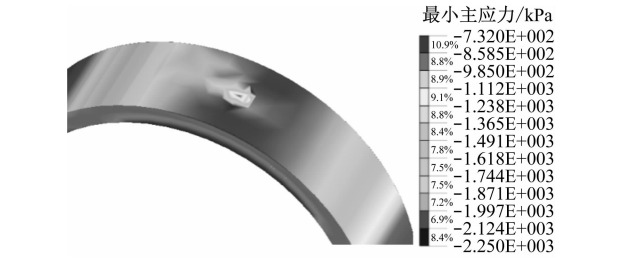


图 7 管片破损处修复后的最小主应力云图  
Fig. 7 Minimum principal stress nephogram after repair of segment damage

由图 7 及图 8 分析可知,使用竖井修复破损管片后,修复部位应力最小为 0.732 MPa,盾构管片破损部位之外的其他部分管片应力减小并不明显,应力减小最大的部位在距管片顶部约 30° 附近的管片,管片应力由 2.049 MPa 减小为 1.632 MPa,应力最多减小了 20.35%。



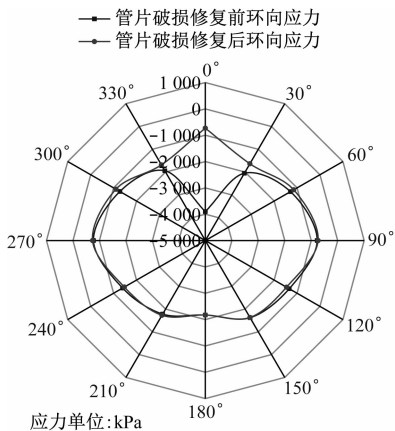


图8 破损管片修复前后的环向最小主应力曲线

Fig. 8 Circumferential minimum principal stress curve before and after the repair of segment damage

提取管片顶部破损处中心位置和边缘位置随修复施工各阶段的应力数据,并绘制盾构管片破损处在各施工阶段的应力变化曲线如图9所示。

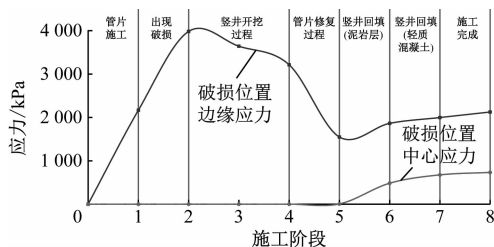


图9 盾构管片破损处在各施工阶段的应力变化曲线图

Fig. 9 Stress change curve of shield segment damage at each construction stage

由图9可知:盾构管片经过修补施工后,破损处边缘位置应力由3.982 MPa减小为1.549 MPa;待修复部位混凝土达到强度要求后,随着竖井回填C35混凝土和轻质混凝土,管片应力开始逐渐增加,最终应力稳定在2.124 MPa左右;管片修补完成后破损位置中心处的混凝土应力为0,之后随着竖井的回填,应力也在逐渐增大,最终稳定在0.732 MPa左右;各施工阶段管片应力数据均小于C50混凝土的承载强度,满足安全控制要求。

### 3.4 现场修复效果

为确保盾构隧道的运行安全,对管片修复位置展开应力监测修复部位混凝土应力时程曲线如图10所示。

由图10可知,衬砌管片修补部位混凝土以受压应力为主,在破损管片修补后的43 d内混凝土应力增长较快,之后逐渐趋于稳定。截至2022年2月14日,衬砌管片修补部位钢筋应力已经监测了241

d,衬砌管片修补部位内侧混凝土应力约为0.89 MPa,说明受损管片修复后的安全性符合要求。此外,该实测数据与数值模拟得出的衬砌管片修补位置混凝土应力0.73 MPa结果相近,验证了数值模拟结果的正确性。

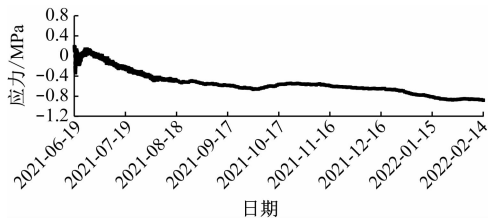


图10 修复部位内侧混凝土应力时程曲线

Fig. 10 Time-history curve of repair part internal side concrete stress

本次修复工程共计25 d,相较于预期缩短了约20%的工期,有效降低了地铁运营的风险。在监测期间内,修补的管片总体处于稳定状态。综上所述,该修复技术是可靠的。

## 4 结语

本文针对某地铁盾构区间管片破损及其修复工程,结合区间内的地质条件,采用在管片破损处上方开挖竖井的技术修复破损管片。通过本次修复工程,得出以下结论。

1) 基于区间内良好的地层条件,采用该竖井修复技术,很大程度上减小了施工难度和对地铁运营的影响,并且实现了对破损管片的高效修复。

2) 基于该修复技术的施工工艺,对其中具体技术作了较为详尽的阐述,如:人工降水、竖井开挖、竖井回填,重点介绍了管片修复加固。证明了该修复技术施工简便,具有良好的修复效果。

3) 修复后管片破损处的压应力最小为0.732 MPa,修复前后破损位置之外的管片应力减小并不明显。随着竖井的回填修复部位边缘处的管片应力开始逐渐增加,最终应力稳定在2.124 MPa左右,破损中心处稳定在0.732 MPa左右。满足C50混凝土承载强度要求,管片结构安全。

## 参考文献

- [1] 王同林. 既有运营地铁隧道整修修复工艺[J]. 建筑施工, 2017, 39(2): 212.  
WANG Tonglin. Renovation and restoration technologies for existing operational metro tunnel[J]. Building Construction, 2017, 39(2): 212.



- [2] 王旭东, 李涛, 郭京波. 地铁隧道管片破损原因分析及加固技术[J]. 工程质量, 2016, 34(11): 52.  
WANG Xudong, LI Tao, GUO Jingbo. Damage reason analysis and reinforced technology for subway tunnel segment[J]. Construction Quality, 2016, 34(11): 52.
- [3] 罗昭明, 董志超. 地铁盾构隧道管片破损修复技术研究[J]. 人民长江, 2015, 46(24): 59.  
LUO Zhaoming, DONG Zhichao. Research on repairing technique of broken shield segment in metro tunnel excavation[J]. Yangtze River, 2015, 46(24): 59.
- [4] 康元锋. 地铁盾构隧道衬砌管片损伤修复关键技术研究[J]. 交通世界, 2019(8): 96.  
KANG Yuanfeng. Study on key technologies of repairing segment damage of metro shield tunnel lining[J]. Transpo World, 2019(8): 96.
- [5] LIU T J, CHEN S W, LIN P Q, et al. Failure mechanism and strengthening effect of shield tunnel lining reinforced by steel plates with corbels[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2022, 26(4): 1603.
- [6] 徐延召. 武汉地铁四号线越江盾构隧道修复施工技术[J]. 土工基础, 2016, 30(1): 28.  
XU Yanzhao. River crossing shielded tunnel remediation techniques for Wuhan Metro No. 4 Line[J]. Soil Engineering and Foundation, 2016, 30(1): 28.
- [7] 潘军. 芳纶纤维布加固地铁盾构隧道承载性能数值研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.  
PAN Jun. Numerical study on bearing behavior of metro shield tunnel reinforced by AFRP[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [8] 刁述红, 王凤民, 田斌, 等. 地铁预制混凝土衬砌管片损伤修复关键技术[J]. 山西建筑, 2019, 45(22): 149.  
DIAO Shuhong, WANG Fengmin, TIAN Bin, et al. The key technology for damage repair of reinforced concrete segments of subway[J]. Shanxi Architecture, 2019, 45(22): 149.
- [9] 花楠, 翟志国, 刘柳. 邻近高压电力铁塔盾构隧道被击穿管片修复施工技术[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(增刊1): 466.  
HUA Nan, ZHAI Zhiguo, LIU Liu. Construction technology for repairing damaged segment of shield tunnel adjacent to high-voltage power tower[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(S1): 466.
- [10] 戴志仁, 王泽宇, 王俊, 等. 城市地铁隧道击穿安全影响分析及其应对措施[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(12): 95.  
DAI Zhiren, WANG Zeyu, WANG Jun, et al. Analysis of breakdown safety influence of urban subway tunnel and its countermeasures[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(12): 95.
- 收稿日期:2023-03-10 修回日期:2023-04-04 出版日期:2024-01-10  
Received:2023-03-10 Revised:2023-04-04 Published:2024-01-10  
· 第一作者:连逢逾,高级工程师,87430094@qq.com  
通信作者:廖林川,硕士研究生,1833249109@qq.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## (上接第189页)

- CHEN Shaokuan, DI Yue, SHI Rongdan, et al. Simulation and analysis on impacts and evacuation during the process of fire on metro platforms[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(1): 241.
- [2] 杨晖, 董冰艳, 张思健. 某地铁站火灾安全疏散仿真研究[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(3): 368.  
YANG Hui, DONG Bingyan, ZHANG Sijian. Simulation on fire evacuation in a subway station[J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(3): 368.
- [3] CHEN Y, WANG C, HUI Y J B, et al. Emergency evacuation simulation at starting connection of cross-sea bridge: case study on Haicang Avenue Subway Station in Xiamen Rail Transit Line[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 29: 101163.
- [4] 张立茂, 吴贤国, 李博文, 等. 基于火灾模拟器和 Pathfinder 的地铁车站人员疏散[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(4): 203.  
ZHANG Limao, WU Xianguo, LI Bowen, et al. Fire evacuation of subway station based on fire dynamics simulator and pathfinder[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(4): 203.
- [5] 黄昕, 靳健, 林作忠, 等. 基于 A\* 算法的深部地下空间火灾疏散路径动态规划[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(7): 702.  
HUANG Xin, JIN Jian, LIN Zuozhong, et al. Dynamic evacuation path planning for fire disaster of deep underground space based on A\* algorithm[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 47(7): 702.
- [6] HURLEY M J. SFPE Handbook of fire protection engineering[M]. 5th ed. New York: Springer, 2016.
- [7] 陈和燕, 池秀文, 嵇舒翰, 等. 地铁站聚氨酯与聚氯乙烯火灾特性及人员安全疏散研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(12): 103.  
CHEN Heyan, CHI Xiuwen, JI Shuhan, et al. Study on metro station polyurethane and PVC fire characteristics and personnel safe evacuation[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(12): 103.
- [8] 王志刚, 倪照鹏, 王宗存, 等. 设计火灾时火灾热释放速率曲线的确定[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(增刊1): 50.  
WANG Zhigang, NI Zhaopeng, WANG Zongcun, et al. Determination of heat release rate curve when designing fire[J]. Journal of Safety and Environment, 2004, 4(S1): 50.
- 收稿日期:2022-09-20 修回日期:2022-10-18 出版日期:2024-01-10  
Received:2022-09-20 Revised:2022-10-18 Published:2024-01-10  
通信作者:罗佳程,硕士研究生,Luojc98@163.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license