

DOI: 10.7672/sjgs2025230072

温控型氧化镁膨胀剂在明挖隧道大体积混凝土 裂缝控制中的应用*

李 军¹,王宏伟¹,王德民²,张 港²

(1. 中铁一局集团有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 武汉三源特种建材有限责任公司, 湖北 武汉 430083)

[摘要] 在大型明挖高速铁路隧道拱形明洞结构中,为控制侧墙大体积混凝土开裂,利用温控型氧化镁膨胀剂配制的温控补偿收缩混凝土进行施工。研究表明,温控补偿收缩混凝土比基准混凝土7d抗压强度略低,比28,60d抗压强度略高,凝结时间延长,限制膨胀率增大;在足尺模型试验中,验证段混凝土相较于基准段混凝土温峰出现时间延后了24h,温峰值降低了5.5℃,温度修正后微应变最大值增大了62με;拱形侧墙大体积混凝土实体结构中中心温升值≤29.0℃,早龄期降温速率≤5℃/d,混凝土内部较长时间处于微膨胀状态,收缩开裂风险较小,由温控型氧化镁膨胀剂配制的温控补偿收缩混凝土在大体积混凝土结构中取得了良好的裂缝控制效果。

[关键词] 高速铁路;明挖隧道;拱形侧墙;大体积混凝土;氧化镁膨胀剂;裂缝;控制

[中图分类号] TU528

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)23-0072-06

Application of Temperature-controlled Magnesium Oxide Expansive Agent in Crack Control of Mass Concrete in Open-cut Tunnel

LI Jun¹, WANG Hongwei¹, WANG Demin², ZHANG Gang²

(1. China Railway First Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Wuhan Sanyuan Special Building Materials Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430083, China)

Abstract: Based on the arch open-cut tunnel structure of large open-cut high-speed railway tunnel, in order to control the cracks of mass concrete in the side wall, the temperature-controlled shrinkage-compensating concrete prepared by temperature-controlled magnesium oxide expansive agent was used for construction. The results showed that the compressive strength of temperature-controlled shrinkage-compensating concrete was slightly lower than that of reference concrete at 7d, slightly higher at 28d and 60d, the setting time was prolonged, and the limiting expansion rate was increased. In the full-scale model test, the time of the temperature peak of the concrete in the verification section was delayed by 24h compared with the reference section, the temperature peak was reduced by 5.5℃, and the maximum micro-strain value after temperature correction was increased by 62με. The center temperature rise of the mass concrete solid structure of the arch side wall was less than or equal to 29.0℃, the cooling rate of the early age was less than or equal to 5℃/d, the concrete was in a micro-expansion state for a long time, and the risk of shrinkage cracking was small. The temperature-controlled shrinkage-compensating concrete prepared by the temperature-controlled magnesium oxide expansive agent has achieved good crack control effect in the mass concrete structure.

Keywords: high-speed railway; open-cut tunnel; arch side wall; mass concrete; magnesium oxide expansion agent; crack; control

0 引言

至2023年底,我国已投入运营的高速铁路总长已超过4.5万km,共建成4561座高速铁路隧道,隧道总长约7735km^[1]。高速铁路建设和发展是我

* 2024年度湖北省建设科技计划(2024118)

[作者简介] 李 军,高级工程师,E-mail:1076581864@qq.com

[通信作者] 王德民,高级工程师,E-mail:717002166@qq.com

[收稿日期] 2025-09-18

国建筑发展史上的重要里程碑,是我国高新建筑技术的重要代表,我国已成为名副其实的高速铁路大国、超级隧道大国。高速铁路隧道具有埋深大、断面大、距离长、服役环境复杂等突出特点,施工技术标准 and 运营耐久性要求均高于普通铁路隧道。高速铁路隧道混凝土结构耐久性问题是工程建设中的重难点,控制混凝土结构收缩变形及裂缝病害是关键^[2]。

高速铁路隧道往往采用暗挖法施工工艺,其拱形衬砌结构薄壁混凝土裂缝控制相关报道和研究较多,已积累了较多的工程施工经验^[3-5]。明挖法施工工艺一般应用于埋深不大或穿越湖域的隧道工程,针对明挖现浇的箱形结构大体积混凝土裂缝控制关键技术研究资料和文献较多^[6-9]。而高速铁路隧道采用明挖法施工工艺的做法相对较少,明挖高速铁路隧道主体以拱形明洞结构为主,其结构尺寸相对较大,拱形结构大体积混凝土裂缝控制难度较大。

明挖高速铁路隧道拱形明洞结构既有暗挖拱形衬砌结构异形的特点,又有明挖公路隧道大体积混凝土裂缝较难控制的难点,相比而言,其裂缝控制难度更大,尤其是对拱形侧墙现浇大体积混凝土结构的相关研究报道较少。通过配制低温升、低收缩、高抗裂的混凝土是提高隧道类大体积混凝土结构裂缝控制效果最有效的技术措施之一,其核心技术是温控型抗裂剂的应用^[10]。温控型氧化镁膨胀剂是温控型抗裂剂的一种,具有补偿混凝土收缩和调控水泥水化放热历程的双重作用,在大体积混凝土结构早期温降阶段能够较好控制裂缝^[11]。目前采用温控型氧化镁膨胀剂配制温控补偿收缩混凝土,并将其应用于明挖高速铁路隧道拱形侧墙大体积混凝土结构中的研究较少,有必要研究其实际工程应用效果。基于此,本文通过大体积混凝土配合比设计优化、足尺模型试验相关参数对比、拱形侧墙结构内部温度和应变变化规律等方面分析实体结构裂缝控制效果。

1 工程概况

南通海门高铁北站配套隧道工程是连接新建沪渝蓉高速铁路上海至合肥段南通海门高铁北站两端的工程,分为隧道进口段(全长 1.3km)和出口段(全长 1.3km)部分,该隧道采用明挖暗埋法施工工艺,断面类型分为拱形明洞结构(长 2 262m)和矩形明洞结构(长 338m),隧道纵断面设计竖曲线半径为 25m。隧道主体结构设计使用年限为 100 年,结构防水等级为 I 级,环向施工缝设置间距为 12m,

环向变形缝设置间距为 60m,防水混凝土设计强度等级为 C45,抗渗等级为 P12。

该隧道拱形明洞结构总宽度和总高度最大值分别为 15.1、13.3m,拱形底板和顶板厚度分别为 1 300、900mm。现场以环形施工缝方式进行分段施工,以水平施工缝方式将底板、侧墙和顶板混凝土分开浇筑施工,拱形侧墙上口和下口厚度分别为 1 100、1 400mm,中间最薄处厚度为 900mm,高度为 3.5m。从结构形式及约束程度角度考虑,拱形侧墙结构裂缝控制难度最大;从控制温度收缩裂缝角度考虑,侧墙混凝土应按照大体积混凝土配合比进行设计和施工,以降低实体结构开裂风险。

工程前期由于采用了普通 C45P12 混凝土,拱形侧墙结构出现了较多的竖向有害裂缝且裂缝处存在明显的渗漏水现象。后经专家多次论证分析可知,大体积混凝土在温降阶段的温度收缩变形过大是导致其开裂的主要原因。基于此,中心实验室进行了多轮大体积混凝土配合比优化设计,并对比分析足尺模型试验相关参数,最终确定了将温控型氧化镁膨胀剂配制的温控补偿收缩混凝土作为本工程主体结构防水混凝土,并在拱形侧墙实体结构施工过程中取得了良好的裂缝控制效果。

2 大体积混凝土配合比优化设计

2.1 原材料

原材料包括 P·O 42.5 水泥、F 类 I 级粉煤灰、II 区天然中砂、粒径 5~25mm 连续级配碎石、聚羧酸类高效减水剂(减水率为 27%)、液体钢筋阻锈剂、网状聚丙烯纤维、TME 温控型镁质抗裂剂、拌合用水,其中抗裂剂由改性淀粉和 S 型氧化镁膨胀熟料复配而成,同时满足 CBMF 19—2017《混凝土用氧化镁膨胀剂》和 JC/T 2608—2021《混凝土水化温升抑制剂》中的相关要求,技术参数如表 1 所示。

由表 1 可知,氧化镁膨胀熟料组分在 40℃ 养护条件下的限制膨胀率明显高于 20℃ 养护条件下,说明其在内部温度相对较高的大体积混凝土中更能发挥早期补偿收缩作用;改性淀粉成分为多羟基羧酸及其多元醇、酯类化合物,具有明显抑制水泥水化反应速率的特点,其初凝、终凝时间相对较长,可有效降低水泥早龄期(1~3d)水化放热量^[12-13]。

2.2 配合比优化设计

为提高明挖高速铁路隧道拱形明洞结构裂缝控制效果,对 C45P12 大体积混凝土配合比进行了多次优化设计,并对优化调整后的相关性能参数进行了测试分析,最终的配合比如表 2 所示,部分性能

表 1 温控型氧化镁膨胀剂技术参数

Table 1 Technical parameters of temperature-controlled magnesium oxide expansion agent

材料指标	要求	结果
氧化镁含量/%	≥80.0	81.6
烧失量/%	≤4.0	3.6
碱含量/%	≤0.75	0.05
含水率/%	≤0.30	0.18
反应时间/s	≥200 且 <300	219
细度/%	80μm 方孔筛筛余	≤5.0
	1.18mm 方孔筛筛余	≤0.5
抗压强度/MPa	7d	≥22.5
	28d	≥42.5
限制膨胀率/%	20℃水中 7d	≥0.015
	20℃水中 28d 和 7d 差值	≥0.010
	40℃水中 7d	≥0.020
	40℃水中 28d 和 7d 差值	≥0.040
凝结时间/min	初凝	≥45
	终凝	≤600
水化热降低率/%	24h	≥30
	7d	≤15

测试结果如表 3 所示。出机坍落度、凝结时间按照 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》进行测试,限制膨胀率参考 JGJ/T 178—2009《补偿收缩混凝土应用技术规程》进行测试,只是将水中 14d 养护水温调整为 40℃,抗压强度按照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行测试,试件尺寸为 150mm×150mm×150mm。

由表 2 可知,验证段大体积混凝土中添加了温控型氧化镁膨胀剂,采用了内掺 8% 等质量取代粉煤灰做法,相比于基准段混凝土总重度不变。由表 3 可知,相比于基准段,验证段混凝土凝结时间延长了 1 倍多,7d 抗压强度略低,但 28,60d 抗压强度略高;验证段混凝土各龄期限制膨胀率高于基准段,其抗裂防渗性能更优。

表 2 C45P12 大体积混凝土配合比

Table 2 Mix proportion of C45P12 mass concrete

试验段	混凝土配合比/(kg·m ⁻³)								
	水	水泥	粉煤灰	温控型氧化镁膨胀剂	钢筋阻锈剂	网状聚丙烯纤维	天然砂	碎石	减水剂
基准段	130	260	170	0	12	1.8	656	1 165	5.16
验证段	130	260	138	32	12	1.8	656	1 165	5.16

表 3 C45P12 大体积混凝土部分性能测试结果

Table 3 Partial performance test results of C45P12 mass concrete

试验段	出机坍落度/mm	凝结时间/min		限制膨胀率/%		抗压强度/MPa		
		初凝	终凝	40℃水中 14d	40℃水中 14d 转 20℃空气中 28d	7d	28d	60d
基准段	200	510	630	0.003	-0.026	39.8	49.5	54.3
验证段	200	1 040	1 270	0.026	0.009	38.7	50.5	55.6

3 大体积混凝土足尺模型试验

在大体积混凝土配合比优化设计的同时进行了足尺模型试验(见图 1),混凝土模型试件结构尺寸为 1.0m×1.0m×1.2m(长×宽×高),混凝土模型浇筑前在其中心位置埋设了振弦式应变计,用于监测试件中心温度和微应变随时间的变化规律。在整个试验数据监测过程中试件一直处于带模状态,试验周期为 8d。基准段和验证段的 C45P12 大体积混凝土中心温度和环境温度随时间变化曲线如图 2 所示,大体积混凝土微应变随时间变化曲线如图 3 所示。

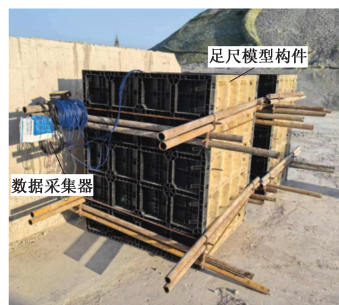


图 1 现场足尺模型试验

Fig. 1 In-situ full-scale model test

由图 2 可知,基准段混凝土入模温度为 21.0℃,中心温度历时约 27h 达到温峰值 49.0℃,温升值为 28.0℃;验证段混凝土入模温度为 20.8℃,中心温度历时约 51h 达到温峰值 43.5℃,温升值为 22.7℃。由图 3 可知,基准段混凝土在 8d 龄期内的温度修正后微应变从最大值 0με 缓慢降至约 -92με,综合微应变从最大值 118με 缓慢降至约 -65με;验证段混凝土在 8d 龄期内的温度修正后微应变从最大值 62με 缓慢降至约 -30με,综合微应变从最大值 154με 缓慢降至约 22με。相比于基准段,验证段足尺模型试验中大体积混凝土温峰值出

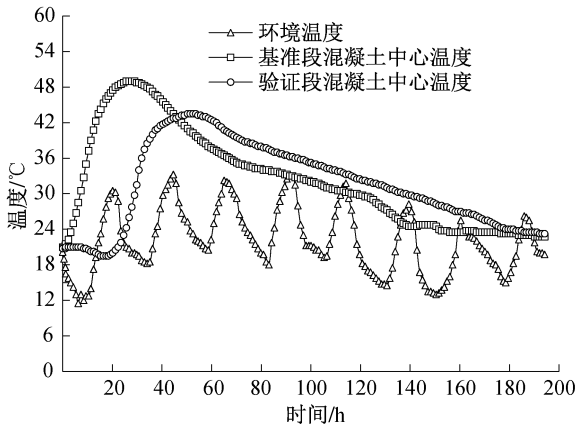


图2 足尺模型试验大体积混凝土中心温度和环境温度随时间变化曲线

Fig. 2 Mass concrete center temperature and ambient temperature curves with time in full-scale model test

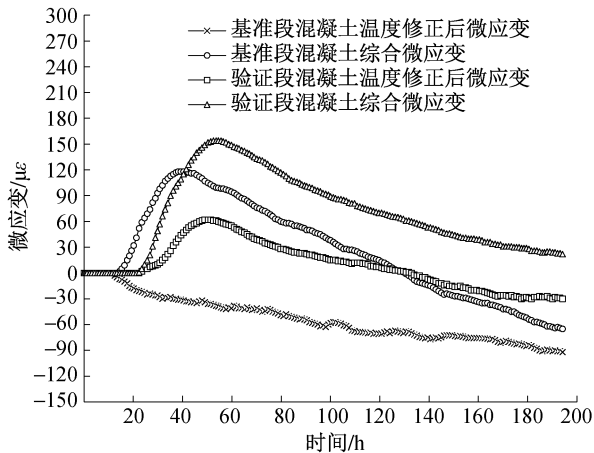


图3 足尺模型试验大体积混凝土内部微应变随时间变化曲线

Fig. 3 Mass concrete internal micro-strain curves with time in full-scale model test

现时间延后了24h,温峰值降低了 5.5°C ,温度修正后微应变最大值增大了 $62\mu\epsilon$ 。

4 大体积混凝土浇筑施工工艺

为提高大体积混凝土裂缝控制效果,将优化调整后的验证段C45P12大体积混凝土应用于本工程实体结构中,拱形侧墙和拱形顶板采用了12m长钢模板台车工艺做法。其中拱形侧墙结构大体积混凝土施工如图4所示,关键技术如下。

1) 模板台车封模前,在实体结构长度(12m)和高度(3.5m)居中位置中心埋设振弦式应变计,在其内、外表面埋设温度计,埋设监测点处的侧墙厚1.0m,采用无线远程传输装置实时监测和采集数据。

2) 混凝土生产过程中采用制冷水(水温 $5\sim$

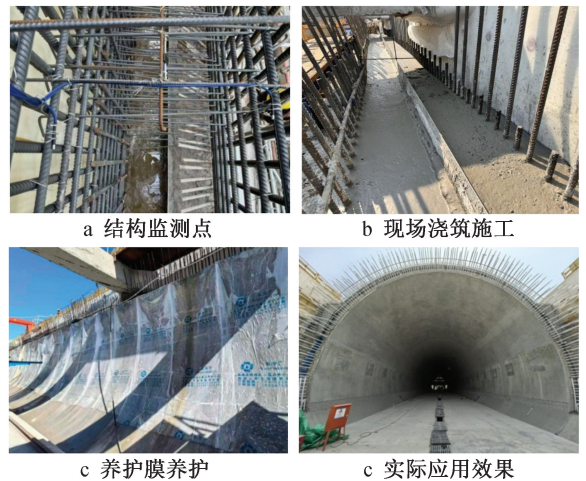


图4 拱形侧墙结构大体积混凝土施工

Fig. 4 Construction of arch side wall structure mass concrete

6°C)进行降温,到场混凝土坍落度和含气量分别按照 $(180\pm 20)\text{mm}$ 和 $3\%\sim 5\%$ 进行控制。3.5m高拱形侧墙共分2层进行混凝土浇筑施工,采用二次复振方式提高振捣质量。

3) 混凝土浇筑成型后带模养护3d,然后拆除模板台车并于当天铺贴吸水树脂养护膜,养护膜养护时间 $>15\text{d}$ 。

5 拱形侧墙实体结构监测数据分析

为评估拱形明洞结构大体积混凝土裂缝控制效果,在拱形侧墙实体结构内部埋设了监测点进行数据采集,拱形侧墙1和侧墙2大体积混凝土内部温度和环境温度随时间变化曲线如图5所示,微应变随时间变化曲线如图6所示。

由图5a可知,对于拱形侧墙1,中心混凝土入模温度为 24.8°C ,中心温度历时约51h达到温峰值 53.3°C ,温升值为 28.5°C ;混凝土内表面入模温度为 25.0°C ,历时约54.0h达到温峰值 53.8°C ,温升值为 28.8°C ;混凝土外表面入模温度为 24.7°C ,历时约50h达到温峰值 45.8°C ,温升值为 21.1°C 。侧墙1实体结构最大里表温差为 10.0°C ,从温峰值开始约96h中心温度由 53.3°C 降至 35.0°C ,降温速率约为 $4.6^{\circ}\text{C}/\text{d}$,降温速率相对缓慢,温降收缩开裂风险较低。

由图5b可知,对于拱形侧墙2,中心混凝土入模温度为 32.3°C ,中心温度历时约40h达到温峰值 61.3°C ,温升值为 29.0°C ;混凝土内表面入模温度为 31.5°C ,历时约43h达到温峰值 62.3°C ,温升值为 30.8°C ;混凝土外表面入模温度为 31.8°C ,历时约32h达到温峰值 47.5°C ,温升值为 15.7°C 。侧墙2实体结构最大里表温差为 16.5°C ,从温峰值开始

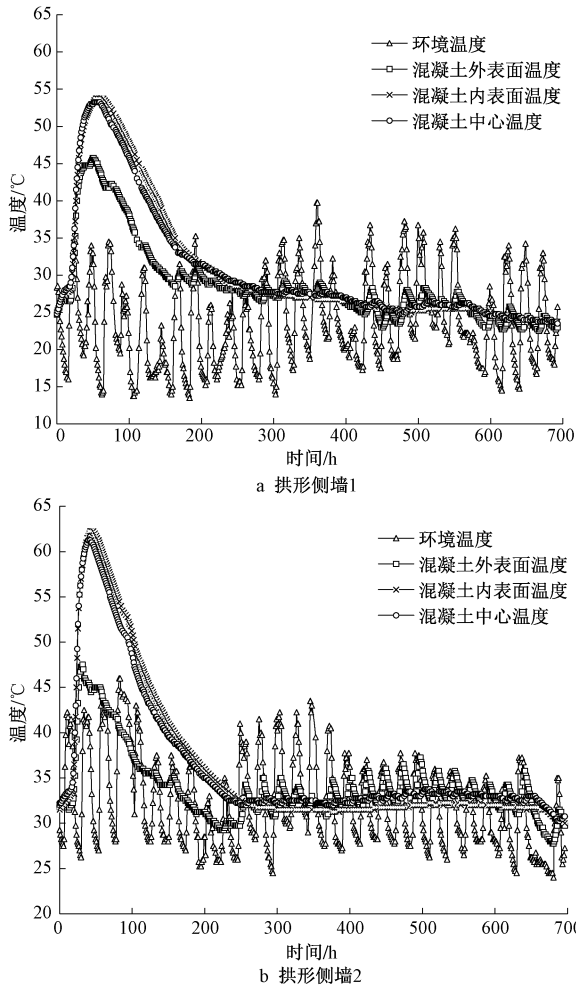


图5 拱形侧墙大体积混凝土内部温度和
环境温度随时间变化曲线

Fig. 5 Mass concrete internal temperature and ambient
temperature curves with time of arch side wall

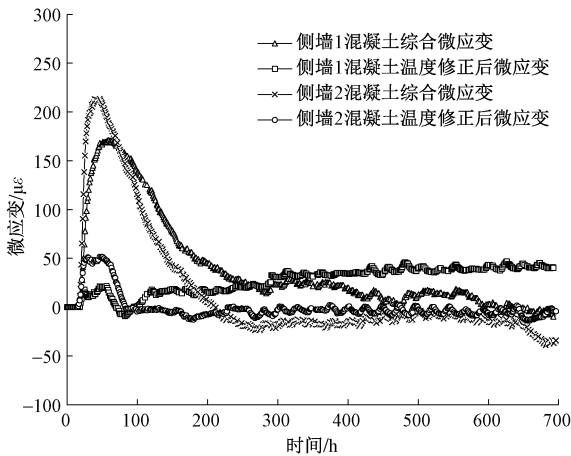


图6 拱形侧墙大体积混凝土内部微应变随时间变化曲线
Fig. 6 Mass concrete internal micro-strain curves
with time of arch side wall

约96h,中心温度由61.3℃降至41.3℃,降温速率
约为5.0℃/d,降温速率相对缓慢,温降收缩开裂风

险较低。

由图6可知,拱形侧墙1混凝土30d龄期内的
温度修正后微应变在-9~47με范围内变化且逐渐
趋于平稳,综合微应变为-10~172με,混凝土内部
基本处于微膨胀状态,开裂风险较低;拱形侧墙2混
凝土30d龄期内的温度修正后微应变在-14~52με
范围内变化且逐渐趋于平稳,综合微应变为-39~
214με,混凝土内部非结构性收缩变形较小,开裂风
险较低。

以拱形侧墙结构有害裂缝数量统计为例,在未
进行大体积混凝土配合比优化设计之前,混凝土实
体结构有害裂缝数量为3~5条/12m,且裂缝处均存
在明显的渗漏水现象。大体积混凝土配合比优化
调整后的拱形侧墙未发现明显有害裂缝,采用温控
型氧化镁膨胀剂配制的温控补偿收缩混凝土在实
体结构中取得了良好的裂缝控制效果。

6 结语

1)温控型氧化镁膨胀剂具有抑制水泥早期水
化反应速率和微膨胀补偿收缩的双重作用,用其配
制的温控补偿收缩混凝土在明挖高速铁路隧道拱
形明洞结构中应用取得良好的裂缝控制效果。

2)相比于基准值,温控补偿收缩混凝土7d抗
压强度略低,但28,60d抗压强度略高,凝结时间延
长1倍多,限制膨胀率增大,具有良好的抗裂防渗
性能。

3)在大体积混凝土足尺模型试验中,温控补偿
收缩混凝土相较于基准段混凝土温峰值出现时间
延后24h,温峰值降低5.5℃,温度修正后微应变最
大值增大62με。

4)在拱形侧墙大体积混凝土内部数据监测中,
实体结构中心温升值≤29.0℃,早龄期降温速率≤
5℃/d,混凝土内部较长时间处于微膨胀状态,在
30d龄期内的非结构性收缩变形较小,收缩开裂风
险较小。

参考文献:

[1] 巩江峰,王伟,王芳,等.截至2023年底中国铁路隧道情况统计及2023年新开通重点项目隧道情况介绍[J].隧道建设(中英文),2024,44(2):377-392.
GONG J F, WANG W, WANG F, et al. Statistics of China's railway tunnels by the end of 2023 and overview of tunnels of key new projects in 2023[J]. Tunnel construction, 2024,44(2):377-392.

[2] 谢永江,李康,胡建伟,等.高速铁路混凝土结构耐久性技术创新及发展方向[J].土木工程学报,2021,54(10):72-81.
XIE Y J, LI K, HU J W, et al. Technology innovation and development tendency of concrete structure durability for high-speed railway[J]. China civil engineering journal, 2021, 54

- (10):72-81.
- [3] 李瑞俊,宋宗莹,李琛,等.重载铁路梁家山隧道病害多源融合诊断与处置对策[J].现代隧道技术,2025,62(4):301-308.
LI R J, SONG Z Y, LI C, et al. Multi-source data fusion-based diagnosis and treatment strategies for structural defects in Liangjiashan Tunnel on heavy-haul railway [J]. Modern tunnelling technology, 2025, 62(4) : 301-308.
- [4] 刘汉宏,杨飞,康磊,等.山岭隧道纤维抗裂混凝土抗压性能与本构关系试验研究[J].施工技术(中英文),2024,53(15):134-138.
LIU H H, YANG F, KANG L, et al. Experimental study on the compressive performance and constitutive relationship of fiber reinforced anti-cracking concrete in mountain tunnel [J]. Construction technology, 2024, 53(15) : 134-138.
- [5] 孔文亚,周立新,王君楼.西昆高速铁路隧道衬砌施工质量控制关键技术[J].铁道建筑,2024,64(7):96-100.
KONG W Y, ZHOU L X, WANG J L. Key technologies for quality control of tunnel lining construction of Xi'an-Kunming high speed railway [J]. Railway engineering, 2024, 64(7) : 96-100.
- [6] 王德民,宋长清,姚军,等.补偿收缩混凝土在某大型明挖穿湖隧道工程中的应用研究[J].混凝土与水泥制品,2024(12):47-50.
WANG D M, SONG C Q, YAO J, et al. Application research of shrinkage-compensating concrete in a large open-cut lake-crossing tunnel project [J]. China concrete and cement products, 2024 (12) : 47-50.
- [7] 杜彦东,张季超,李瑞祥,等.明挖隧道衬砌大体积混凝土水化热温控技术研究[J].施工技术(中英文),2024,53(24):74-77.
DU Y D, ZHANG J C, LI R X, et al. Hydration heat temperature control technology of mass concrete lining of open-cut tunnel [J]. Construction technology, 2024, 53(24) : 74-77.
- [8] 孟庆余,王旭,霍飞,等.海底隧道C50衬砌混凝土抗裂技术研究与应用[J].施工技术(中英文),2023,52(22):92-96,110.
MENG Q Y, WANG X, HUO F, et al. Research and application of crack resistance technology of C50 lining concrete in undersea tunnel [J]. Construction technology, 2023, 52(22) : 92-96, 110.
- [9] 周欣,夏文俊,王峻,等.太湖隧道结构混凝土收缩裂缝闭环控制关键技术[J].混凝土,2021(2):151-156.
ZHOU X, XIA W J, WANG J, et al. Key technology of closed loop control of shrinkage crack for Taihu Tunnel [J]. Concrete, 2021 (2) : 151-156.
- [10] 徐可,赵娟,闵强,等.明挖隧道工程混凝土抗裂防渗常见问题及提升技术研究综述[J].新型建筑材料,2022,49(12):144-150.
XU K, ZHAO J, MIN Q, et al. Review on common problems of anti-crack and anti-seepage of concrete in open-cut tunnel engineering and lifting technology [J]. New building materials, 2022, 49(12) : 144-150.
- [11] 郭耀雄,王德民,辜振睿,等.不同季节地铁站侧墙大体积混凝土抗裂防渗性能研究[J].新型建筑材料,2023,50(9):5-8,26.
GUO Y X, WANG D M, GU Z R, et al. Study on anti-cracking and anti-seepage performance of mass concrete of subway station side wall in different seasons [J]. New building materials, 2023, 50(9) : 5-8, 26.
- [12] 辜振睿,王德民,谷亚军,等.夏热季节地铁站侧墙混凝土裂缝控制技术[J].新型建筑材料,2023,50(8):131-135,159.
GU Z R, WANG D M, GU Y J, et al. The control techniques of crack for metro sidewall concrete in hot summer season [J]. New building materials, 2023, 50(8) : 131-135, 159.
- [13] 辜振睿,何贝贝,丁庆军,等.水化热抑制剂与管冷对混凝土温控的影响[J].混凝土,2023(4):170-175.
GU Z R, HE B B, DING Q J, et al. Effect of hydration heat inhibitor and pipe cooling on temperature control of concrete [J]. Concrete, 2023(4) : 170-175.