

城市地下空间环路大体积混凝土侧墙裂缝控制研究

Research on Crack Control of Mass Concrete Side Wall of Urban Underground Space Loop

张登科¹, 王丙垒², 刘 拼², 徐智丹²

(1. 武汉源锦建材科技有限公司, 湖北 武汉 430083;
2. 武汉三源特种建材有限责任公司, 湖北 武汉 430083)

摘要: 以武汉市某地下空间环路工程侧墙为研究对象, 探究大体积混凝土施工过程中的体积变形和温度变化情况。结果表明: 内掺 5.4% M 型 MgO 膨胀剂 (等量取代粉煤灰) 配制强度等级为 C40 的补偿收缩混凝土, 采取有效保温保湿养护措施, 可以在大体积混凝土结构内部产生一定微膨胀, 补偿混凝土的内部收缩, 有效降低混凝土收缩开裂风险。

关键词: 地下空间环路工程; MgO 膨胀剂; 大体积结构; 补偿收缩混凝土; 裂缝控制

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 03-0040-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.009

ZHANG Dengke¹, WANG Binglei², LIU Pin², XU Zhidan²

(1. Wuhan Ujoin Building Material Technology Co., Ltd., Wuhan 430083, China;
2. Wuhan Sanyuan Special Building Material Co., Ltd., Wuhan 430083, China)

Abstract: Taking the side wall of an underground space loop project in Wuhan City as the research object, the volume deformation and temperature change of the shrinkage compensated concrete during the construction of mass concrete were investigated. Results show that: By adding 5.4% M type MgO expansion agent (replacing fly ash in equal amount), the concrete with strength class of C40 was prepared to compensate for shrinkage. By taking effective insulation and moisturizing maintenance measures, a certain micro expansion could be generated in the large volume concrete structure to compensate for the internal shrinkage of concrete and reduce the risk of concrete shrinkage cracking.

Keywords: underground space loop project; MgO expansion agent; large volume structure; compensation shrinkage concrete; fracture control

0 引言

随着我国城镇化进程和基建工程的快速发展, 交通拥堵、用地紧张等问题接踵而至, 严重制约经济和社会发展, 因此发展地下工程成为缓解以上压力的重要途径^[1-2]。王铁梦^[3]从大量工程的调查中发

现, 混凝土外墙中部约束最大, 出现裂缝的概率很高。地下工程混凝土结构多与土壤接触, 一旦存在贯穿性裂缝, 极易造成建筑物服役期渗漏水、钢筋锈蚀、混凝土劣化损伤等问题。所以相关部门于 2019 年在《建筑与市政工程防水通用规范 (征求意见稿)》中首次提出“地下工程的防水设防年限不应低于工程结构设计工作年限”的提议^[4], 颁布实施 GB 55030—2022《建筑与市政工程防水通用规范》。

地下空间环路工程作为一种箱涵结构, 因受覆土深度、车道规模、地下水压等因素的影响, 主体结构墙板厚度大于 1 m 情况居多, 属于典型的大体

作者简介: 张登科 (1989—) 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑材料研发以及工程应用技术研究。

收稿日期: 2024-01-20

积混凝土结构^[5]。大体积混凝土浇筑后，胶凝材料在水化过程中释放的大量的热量在混凝土内部积聚而不易散发，使混凝土内部温度较高。混凝土硬化后在降温过程中，因内部温度较高产生压缩应力，而表层温度较低产生拉应力，同时受到外部地基等约束作用，混凝土内部容易产生微裂缝，进而发展成贯穿裂缝，导致结构破坏。采用膨胀剂配制补偿收缩混凝土是控制混凝土非结构性裂缝的有效措施之一，GB/T 23439—2017《混凝土膨胀剂》规定了氧化钙类膨胀剂、硫铝酸钙类膨胀剂以及氧化钙—硫铝酸钙类膨胀剂三种常用膨胀剂，但其适用条件有限^[6]。阎培渝^[7-8]认为氧化钙膨胀剂具有很高的水化活性，在与水接触后 6 h 内完全水化，大量膨胀不能被有效储存；硫铝酸钙类膨胀剂水化产物钙矾石（AFt）长期处于 80 ℃ 以上环境会分解，转化为单硫型水化硫铝酸钙（AFm），无膨胀效果，所以混凝土结构内部的最高温度应控制在 70 ℃ 以下。徐菊^[9]试验表明掺氧化镁膨胀剂胶砂 3 d 抗压强度低于不掺氧化镁膨胀剂组，7、28 d 抗压强度高于基准组，当氧化镁膨胀剂掺量为 6% 时，抗压强度较基准组增加了 10% 左右。Mehta^[10]提出采用氧化镁膨胀剂配制混凝土，利用氧化镁膨胀剂水化产生的膨胀能可补偿大体积混凝土的温降收缩。氧化镁膨胀剂具有水化速率可调控、延迟性微膨胀和水化产物稳定的性能，其膨胀时间能与混凝土收缩速率相匹配，可有效防止大体积混凝土开裂，提高混凝土耐久性^[11-12]。

基于上述研究基础，结合武汉市某地下空间环路现浇大体积混凝土主体工程，针对拆模后早期温降过程中出现的有害贯穿性裂缝，采用 MgO 膨胀剂配制补偿收缩混凝土，并通过原材料优选、配合比优化、施工过程控制等措施有效控制温度裂缝，可为其他相似工程提供借鉴。

1 工程概况

武汉某地下空间环路工程主线箱涵结构总体位于地下两层，标高约 -10.000 m，结构主体浇筑按照底板、侧墙、风道板和顶板的顺序进行，其中侧墙厚 1.3 m，净高 3.4 m（底板上表面至风道板下表面），分段浇筑长度为 25~30 m，混凝土强度等级 C40、抗渗等级 P8。受用地宽度的影响，环路基坑采

用无肥槽设计方案，结构外墙密贴支护桩，中间采用预铺反粘卷材，使用单边支模现浇工艺。为了降低结构尺寸偏差和防止爆膜，采用刚度较大和整体性较好的大块钢模板。

2 原材料及混凝土配合比

水泥采用焗石 P·O 42.5 级水泥；粗骨料采用 5~25 mm 连续级配碎石；细骨料采用细度模数为 2.7 的 II 区中砂（由天然河砂与机制砂复配而得）；掺合料采用 II 级粉煤灰和 S95 级矿粉；减水剂采用高性能聚羧酸减水剂；膨胀剂采用 M 型 MgO 膨胀剂，其性能满足 CBMF19—2017《混凝土用氧化镁膨胀剂》的要求（见表 1）。

表 1 MgO 膨胀剂主要技术指标
Table 1 Main technical indexes of MgO expande

MgO 含量 /%	反应时间/s	限制膨胀率/%				抗压强度 /MPa	
		20 ℃ 水中		40 ℃ 水中		7 d	28 d
		7 d	$\Delta\varepsilon$	7 d	$\Delta\varepsilon$		
81.72	178	0.016	0.017	0.032	0.042	38.4	56.7

为控制混凝土的收缩，在满足设计要求和性能的前提下，对混凝土配合比进行优化，为降低大体积混凝土的水化热，将 MgO 膨胀剂进行内掺，等量取代粉煤灰，最终确定满足要求的混凝土配合比（见表 2），MgO 膨胀剂掺量为胶凝材料用量的 5.7%，水胶比为 0.36，砂率为 0.43。

表 2 C40P8 混凝土配合比

Table 2 C40P8 concrete mix ratio / (kg/m³)

组别	水泥	粉煤灰	矿粉	MgO 膨胀剂	砂	碎石	水	减水剂
试验组	285	85	60	26	771	1015	165	10
空白组	285	111	60	0	771	1015	165	9.5

将混凝土试样分别装入 150 mm × 150 mm × 150 mm 的标准试模中，并用不透水的薄膜覆盖表面，在温度为 (20 ± 5) ℃ 的环境中静置 1 d 后拆模，然后放入温度为 (20 ± 2) ℃、相对湿度为 95% 以上的标准养护箱中养护至预定龄期。混凝土力学性能见表 3，试验组较空白组 3 d 和 7 d 力学性能略有提高，28 d 基本持平，60 d 略有降低，力学性能符合设计要求。

表 3 混凝土力学性能试验结果

Table 3 Test results of mechanical properties of concrete /MPa

组别	抗压强度				抗折强度			
	3 d	7 d	28 d	60 d	3 d	7 d	28 d	60 d
空白组	44.3	46.1	47.4	50.2	6.5	6.9	7.5	8.1
试验组	45.1	46.5	47.3	48.5	6.8	7.1	7.5	7.7

材料科学

3 试验方案

在侧墙内部埋设 VWS - 15 型振弦式应变计, 应变计布设情况详见图 1 和图 2。测点 S_1 和 S_2 位于试验组墙体 1/2 长度方向位置, 其中 S_1 位于墙厚中心, S_2 位于外表层、距离墙体表面 80 mm 处, S_3 位于试验组墙体 1/4 长度方向中心位置, K_1 位于空白组墙体 1/2 长度方向中心位置, S_1 、 S_2 、 S_3 和 K_1 均位于墙高 1/2 处。混凝土覆盖测点后开始计时并监测, 监测频率为 1 次/1.5h。

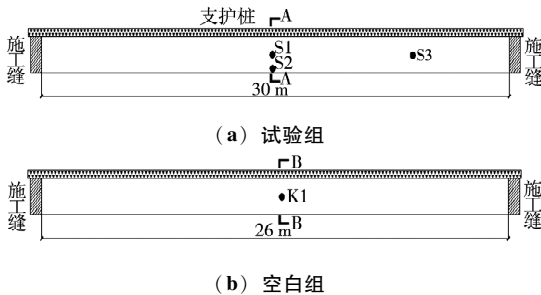


图 1 测点平面图

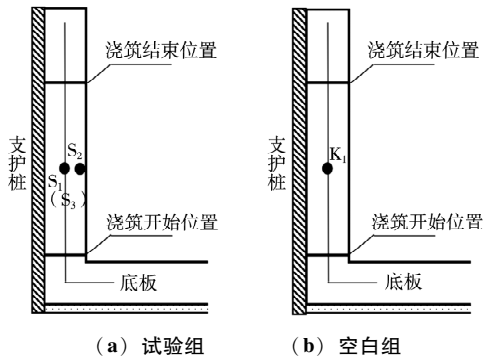


图 2 测点剖面图

Fig. 2 Cross - section drawn of measuring points

4 现场数据分析

4.1 温度数据分析

试验组和空白组侧墙均于 11 月底浇筑, 试验组和空白组浇筑时间间隔约 5 d, 但浇筑环境温度基本相同, 均为 5 ~ 25 ℃。从图 3 可知: 混凝土的入模温度为 22 ℃左右, 满足国家标准^[13]中大体积混凝土入模温度不大于 30 ℃的要求; 测点 S_1 、 S_2 、 S_3 和 K_1 的温度变化历程基本一致, 混凝土中胶凝材料水化产生大量水化热无法及时散发, 不断在积聚结构内部导致混凝土开始升温, 达到峰值后, 随着混凝土

体系与环境温度热交换的进行开始降温, 直至到达环境温度后随环境温度小幅波动; S_1 、 S_3 测点温度变化曲线基本重合, 均于 1.3 d 达到温峰 55 ℃, K_1 测点于 1.8 d 达到温峰 56.7 ℃, 可以看出 MgO 膨胀剂对混凝土中水泥的水化进程有促进作用, 使其提前达到温峰, 同时可以略微降低混凝土温峰值; S_2 曲线明显不同, 温峰值仅 42.2 ℃, 主要原因是 S_2 位于结构表面, 胶凝材料水化热被及时导出, 散热较快, 同时受环境温度综合影响较大, 导致 S_2 曲线形状随着环境温度变化出现一定的波浪形。

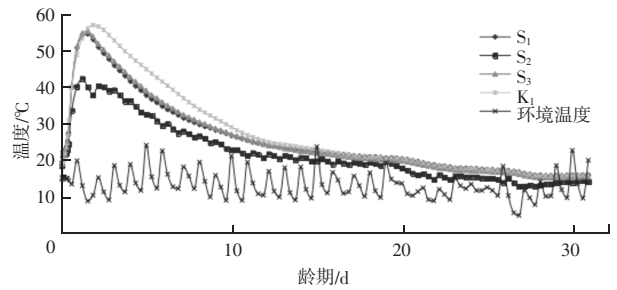
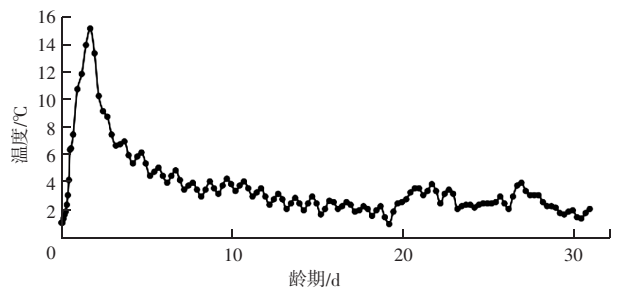


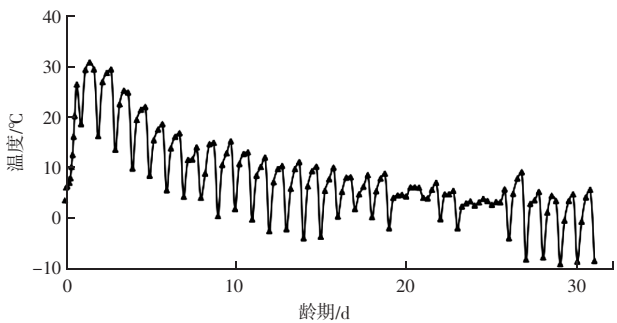
图 3 温度变化曲线

Fig. 3 Temperature change curve

由图 4 可知, S_1 和 S_2 的差值 (里表温差) 存在峰值, 于 1.63 d 时到达, 为 15.1 ℃; S_2 和环境温度的差值 (表环温差) 也存在峰值, 于 1.38 d (凌晨 2:30) 时到达, 为 31 ℃。杨和礼^[14]认为, 混凝土



(a) 里表温差



(b) 表环温差

图 4 温差变化曲线

Fig. 4 Temperature difference curve

表面以下 50 ~ 100 mm 的温度作为表面温度，和混凝土面上的温度作为表面温度，两种测试方法在同一条件下测温，一般要相差 5 ~ 6 °C，按照其理论进行修正后， S_1 和 S_2 的最大温差为 20.1 ~ 21.1 °C，符合国家标准^[15]中大体积混凝土里表温差不大于 25 °C 的要求； S_2 和环境温度的最大温差为 25 ~ 26 °C，大于国家标准^[15]中大体积混凝土表环温差不大于 20 °C 的要求，说明采用水能量养护膜保湿养护和毛毡覆盖保温养护措施效果良好，但在昼夜温差较大的季节，需要进一步加强保温措施，以降低混凝土表面和环境的热交换速率。

4.2 应变数据分析

由图 5 可知， S_1 、 S_3 和 K_1 的应变曲线变化规律与其对应的温度曲线相似，应变随着温度的升高而升高，均在温峰时应变达到最大值， S_1 应变峰值为 170.91 $\mu\epsilon$ 、 S_3 应变峰值为 195.88 $\mu\epsilon$ 、 K_1 应变峰值为 210.45 $\mu\epsilon$ 。 S_1 位于试验组墙体 1/2 长度方向中心位置， S_3 位于试验组墙体 1/4 长度方向中心位置， S_1 的约束大于 S_3 的约束，导致 S_1 应变峰值小于 S_3 应变峰值。而 K_1 应变峰值大于 S_1 应变峰值，可能是由于 K_1 的温峰大于 S_1 的温峰所致。自混凝土浇筑 25 d 后，混凝土内部温度和环境温度平衡，此时 S_1 和 S_3 的应变值分别为 56.15 $\mu\epsilon$ 和 39.04 $\mu\epsilon$ ， K_1 的应变值为 -80.88 $\mu\epsilon$ ， S_1 和 K_1 的应变绝对值为 137.03 $\mu\epsilon$ ，说明 MgO 膨胀剂可有效补偿大体积混凝土的收缩，达到裂缝控制的目的。

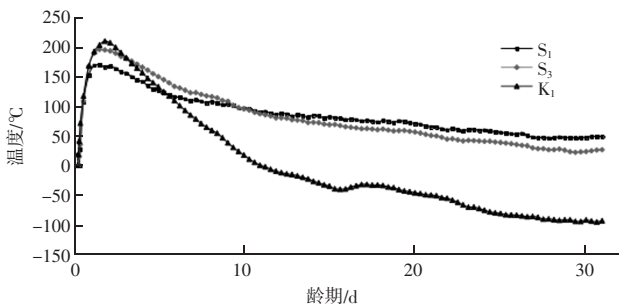


图 5 应变变化曲线
Fig. 5 Strain curve

5 应用效果

对试验组侧墙和空白组侧墙效果持续观察，发现试验组侧墙裂缝仅 3 条，且长度短，宽度窄，均为表面裂缝；而空白组侧墙裂缝为 13 条，多为竖向裂

缝，宽度 0.15 ~ 0.25 mm，从顶部一直贯穿至导墙止水钢板处，且大部分已经出现渗水，具体见图 6。抗裂效果与试验数据相吻合，说明采用 MgO 膨胀剂作为混凝土膨胀源和通过合理的保温保湿养护措施，可以有效控制大体积混凝土开裂风险。

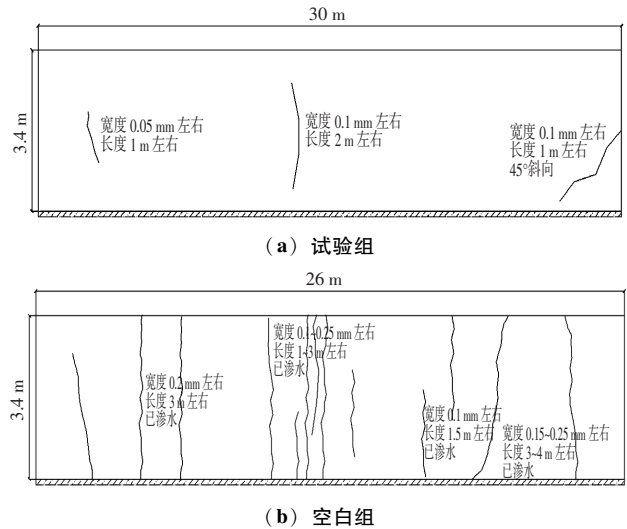


图 6 裂缝分布图

Fig. 6 Fracture distribution map

6 结论

武汉市某地下空间环路工程采用 MgO 膨胀剂配制补偿收缩混凝土，通过优化混凝土配合比、采用分层浇筑的施工方式和采用水能量养护膜保湿以及毛毡覆盖保温的养护工艺，辅以温度应变数据监测手段，试验组侧墙取得了良好的抗裂效果，能够为该类工程提供借鉴。

在强度等级为 C40 的大体积混凝土中，内掺 5.4% 的 M 型 MgO 膨胀剂（等量取代粉煤灰）配制补偿收缩混凝土，可以在混凝土结构内部产生一定微膨胀，补偿混凝土的内部收缩，试验组侧墙结构内部应变最终稳定在 56.15 $\mu\epsilon$ 。

参考文献

- [1] 沈杰, 严小亮. 地下工程施工和运营期监测的研究与应用进展 [J]. 广西教育, 2018 (15): 191-192.
- [2] 左自波, 龚剑, 吴小建, 等. 地下工程施工和运营期监测的研究与应用进展 [J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13 (增刊 1): 294-305.
- [3] 王铁梦. 工程结构裂缝控制 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 1-10.

材料科学

- [4] 胡骏. 论刚性防水 [J]. 中国建筑防水, 2020 (7): 1-7, 13.
- [5] 颜敬, 王树峰, 贺红星, 等. 武汉滨江核心区地下空间环路工程设计与施工技术 [J]. 施工技术 (中英文), 2022, 51 (7): 44-48.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 国家标准第 1 号修改单: GB/T 23439-2017/XG1-2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [7] PAN P Y, ZHENG F, PENG J, et al. Relationship between delayed ettringite formation and delayed expansion in massive shrinkage-compensating concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26 (6): 977-981.
- [8] 阎培渝, 韩建国, 曹丰泽, 等. 补偿收缩混凝土性能的影响因素与质量控制 [J]. 施工技术, 2018, 47 (16): 97-99.
- [9] 徐菊, 王林, 侯维红. 外掺氧化镁膨胀剂对水泥净浆流变特性及胶砂强度的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2017 (6): 15-19.
- [10] MEHTA P K. Magnesium oxide additive for producing selfstress in mass concrete [C]. 7th International Congress on the Chemistry of Cement. Paris: Vol. III, 1980: 6-9
- [11] 宋蕴桥, 丁帅, 郑文才, 等. 氧化镁膨胀剂对大体积混凝土裂缝控制与应用 [J]. 建筑技术, 2024, 55 (7): 783-785. DOI: 10.13731/j.jzjs.2024.07.0783.
- [12] 曹丰泽, 高玉亭, 张慧杰, 等. MgO 膨胀剂在大体积混凝土结构中的抗裂效果研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2021 (8): 24-27. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2021.08.024.04.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 大体积混凝土施工标准: GB50496-2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [14] 杨和礼. 原材料对基础大体积混凝土裂缝的影响与控制 [D]. 武汉: 武汉大学, 2004.

(上接第 10 页)

型建筑材料, 2024, 51 (2): 83-86.

- [6] 况栋梁, 龙景潭, 张阳, 等. VAE 改性水泥砂浆微观结构及性能研究 [J]. 应用化工, 2020, 49 (9): 2182-2186.
- [7] 宋东方, 刘富强, 罗闯旦, 等. 聚合物改性水泥基材料力学性能研究 [J]. 中国科技论文, 2019, 14 (12): 1311-1316.
- [8] 黄展魏, 陈伟, 李秋, 等. 水性环氧树脂改性水泥砂浆力学性能及微观结构 [J]. 硅酸盐通报, 2017, 36 (8): 2530-2535.
- [9] 买淑芳, 吴怀国, 汪毅. 聚合物改性水泥砂浆试验规程: DL/T 51262-2001 [S]. 中华人民共和国国家经济贸易委员会, 2001.
- [10] 全国化工系统高校数学协作组. 工程数学: 概率统计 [M]. 河南科学技术出版社, 1992.

(上接第 19 页)

具有提升作用, 主要与其形成的空间骨架结构和桥接作用有关, 合适的纤维掺量和长度才会形成稳定支撑骨架。

(5) 氢氧化钠掺量与水胶比主要影响胶状聚合物的形成, 分布均匀、充足的胶状聚合物可有效连接水泥基体和钢纤维, 增强双掺混凝土的抗压强度。

参 考 文 献

- [1] 吴丽萍, 王军. 铁尾矿粉-硅粉矿物掺合料对混凝土性能的影响 [J]. 矿产综合利用, 2023 (2): 184-190.
- [2] 张海军, 李涛, 秦广冲. 铁尾矿砂对混凝土强度及抗硫酸盐冻融的影响 [J]. 矿业研究与开发, 2023, 43 (2): 76-81.
- [3] 万金侠, 孙博一. 铁尾矿粉沥青混凝土胶浆-集料粘附性和 TG-DSC 实验研究 [J]. 矿产综合利用, 2022 (6): 66-72.
- [4] 史波, 何旺. 铁尾矿砂超高性能混凝土的冻融循环耐久性分析 [J]. 金属矿山, 2022 (12): 65-69.
- [5] 吴瑞东. 石英岩型铁尾矿微粉及废石对水泥基材料的性能影响及机理 [D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- [6] 雷翔宇. 铁尾矿砂混凝土梁高温后受弯性能研究 [D]. 唐山: 华北理工大学, 2022.
- [7] 姚鹏飞. 复合石灰石粉-尾矿混合砂混凝土力学性能与微观机理研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2021.
- [8] 王康. 高强复合矿物掺合料-尾矿机制砂混凝土基本性能与梁力学性能研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2022.
- [9] 孙雪伟, 张万磊, 仲建军, 等. 钢纤维增强混凝土性能及微观结构研究 [J]. 路基工程, 2023 (2): 85-89.
- [10] 郁浩安. 中高强复合粉煤灰-矿渣-尾矿混合砂混凝土基本性能研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2021.
- [11] 刘益良, 李祥涛, 黄兴鹏, 等. 纤维增强铁尾矿砂水泥基充填材料实验研究 [J]. 北华航天工业学院学报, 2023, 33 (2): 10-12.