

铁尾矿水泥基材料力学性能和耐久性试验研究

谭小蓉

(西安铁路职业技术学院, 西安 710600)

摘要: 为研究铁尾矿砂 (IOT) 取代率对铁尾矿砂水泥基复合材料 (IOTCC) 力学性能与耐久性能的影响, 采用强度试验、抗氯离子侵蚀试验和碳化深度测试评价其宏观性能, 并结合核磁共振 (NMR) 和扫描电子显微镜 (SEM) 分析其孔结构与微观形貌, 揭示碳化作用下材料性能演化机制。结果表明: IOT 可作为 IOTCC 的细骨料, 在 25%~75% 取代率范围内均有助于改善材料力学性能, 其中 25% 取代率时综合力学性能、抗氯离子侵蚀性能和抗碳化性能最优, 且孔隙率最低。随着碳化时间延长, IOTCC 孔隙率呈前期快速降低、后期缓慢下降的变化规律。综上, 25% 的 IOT 取代率为本研究条件下 IOTCC 细骨料替代的推荐掺量, 其性能改善主要归因于 IOT 的微填充效应及由此带来的孔结构致密化。研究成果可为相关工程提供参考。

关键词: 铁尾矿砂; 水泥基; 力学性能; 耐久性; 微观特征

中图分类号: TU528.09

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2026) 04-0025-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.04.004

Experimental Study on the Mechanical Properties and Durability of Iron Tailings-Based Cementitious Composites

TAN Xiaorong

(Xi'an Railway Vocational and Technical Institute, Xi'an 710600, China)

Abstract: To investigate the effects of iron ore tailings sand (IOT) replacement ratio on the mechanical properties and durability of iron ore tailings cementitious composites (IOTCC), compressive strength tests, chloride ion penetration resistance tests, and carbonation depth tests were conducted to evaluate their macroscopic performance. In addition, nuclear magnetic resonance (NMR) and scanning electron microscopy (SEM) were employed to characterize the pore structure and micro-morphology of IOTCC, thereby revealing the performance evolution mechanism under carbonation. The results show that IOT can be used as a fine aggregate in IOTCC. Within the replacement ratio range of 25% to 75%, IOT contributes to the improvement of the mechanical properties of the composites. Among them, the specimen with a 25% replacement ratio exhibits the best overall mechanical performance, chloride ion penetration resistance, and carbonation resistance, as well as the lowest porosity. With increasing carbonation age, the porosity of IOTCC decreases rapidly at the initial stage and then declines gradually at later stages. This behavior is mainly attributed to the filling effect of carbonation product CaCO_3 on the pores and its inhibition of further CO_2 diffusion. Overall, a 25% IOT replacement ratio is recommended for fine aggregate substitution in IOTCC under the conditions of this study, and the performance enhancement is mainly associated with the micro-filling effect of IOT and the resulting densification of the pore structure. The research findings can provide reference for relevant engineering projects.

Key words: iron tailing sand; cementitious; mechanical properties; durability; microscopic characteristics

项目来源: 陕西省自然科学基金 (2021JQ-844); 陕西省重点研发项目 (2022SF-375)。

作者简介: 谭小蓉 (1980—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 低碳水泥基复合材料及工程结构加固。

收稿日期: 2026-07-01

材料科学

0 引言

铁尾矿（iron ore tailings, IOT）是选矿过程产生的大宗工业固体废弃物，长期堆存严重影响生态环境。将其用于水泥基材料，能够减少天然砂消耗并促进固废规模化消纳，是建材低碳化的重要途径^[1]。近年来，铁尾矿砂的应用研究正由单纯材料替代向性能与工程适配协同优化发展^[2]。

不同矿床类型、选矿工艺和磨矿分级条件使 IOT 的化学组成、矿物组成、粒径分布及颗粒形貌存在显著差异。研究表明，硅质铁尾矿用于混凝土后可对材料耐久性产生重要影响^[3]；尾矿的矿物组成和潜在反应活性是决定其资源化利用方式的重要基础^[4]。对于以石英等惰性矿物为主的高硅型 IOT，其可主要发挥细集料替代、微填充和级配优化作用；而石粉含量变化会进一步影响铁尾矿砂水泥基材料的耐久性能^[5]。富铁型 IOT 中赤铁矿、磁铁矿等矿物的存在，则可能改变材料的界面行为及反应特征，相关矿物在碱激发体系中的作用机制已有报道^[6]。目前，IOT 在水泥基材料中的利用主要包括细骨料替代和辅助胶凝材料制备两类路径。机械活化能够提高铁尾矿的火山灰活性，为其制备胶凝材料提供条件^[7]；活化后的 IOT 掺入水泥体系后可对水化过程和材料性能产生调控作用^[8]。在细骨料替代方面，适量 IOT 有利于改善颗粒堆积状态和孔隙结构，但其掺量增加也可能带来孔隙增多及强度下降等问题^[9]。已有试验发现，铁尾矿砂对混凝土强度及抗硫酸盐冻融性能的影响与取代率密切相关^[10]；纤维与铁尾矿砂复掺时，二者对抗压性能还表现出耦合作用^[11]。此外，IOT 替代细骨料的可行性已得到早期研究验证^[12]，多固废协同体系中 IOT 对抗压性能和微观结构的影响亦受到关注^[13]。在超高性能混凝土中，IOT 掺量会显著影响抗压强度和渗透性能^[14]。不同来源 IOT 的材料特性差异被认为是导致铁尾矿混凝土性能离散的重要原因^[15]，相关绿色混凝土制备研究也证实了配合比与尾矿品质的匹配必要性^[16]。

现有研究多侧重于 IOT 取代率对铁尾矿水泥基复合材料（IOTCC）力学性能与耐久性的宏观表征，而对其性能形成与演化机制的系统认识仍显不足，尤其缺乏基于孔隙结构演化和微观形貌特征的阐释。

因此，有必要从宏观性能响应与微观结构演变的内在关联出发，揭示 IOT 对 IOTCC 性能调控的作用机制。基于此，采用砂粒径小且棱角分明的 IOT 部分取代天然砂，系统研究不同取代率下铁尾矿水泥基复合材料（IOTCC）的抗压强度、抗氯离子侵蚀能力及抗碳化性能；结合核磁共振（NMR）和扫描电子显微镜（SEM）测试，分析孔隙分布与微观形貌演化规律，揭示 IOT 调控 IOTCC 宏观性能的作用机制。

1 原材料及试验方法

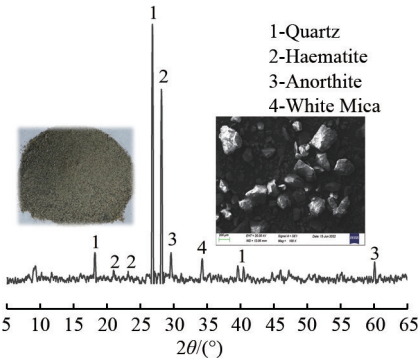
1.1 原材料

胶凝材料：采用 P·O 42.5R 普通硅酸盐水泥，其初凝时间不小于 152 min，终凝时间不大于 241 min，3、28 d 抗压强度分别 24.8、45.3 MPa，安定性合格；粉煤灰产地为河北唐山，等级为Ⅰ级，45 μm 方孔筛筛余为 10.3%，需水量比为 94%，烧失量为 3.4%；偏高岭土由山西锯丰公司生产，比表面积为 15 680 m²/kg，45 μm 方孔筛筛余为 3.6%，需水量比为 107%，28 d 活性指数为 113%。三种材料化学组成测试结果见表 1。

表 1 胶凝材料化学组成

Table 1 Chemical composition of cementitious materials /%								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	其他
水泥	18.30	5.47	54.25	2.95	2.78	0.25	3.12	0.20
偏高岭土	63.80	22.10	5.00	0.90	5.50		2.10	0.60
粉煤灰	52.97	29.96	3.66	1.52	7.98		0.65	3.26

骨料：骨料由铁尾矿砂和石英砂两部分组成，其主要物相组成及微观形貌分别采用 XRD 和 SEM 进行表征，结果如图 1 所示。



(a) 铁尾矿砂

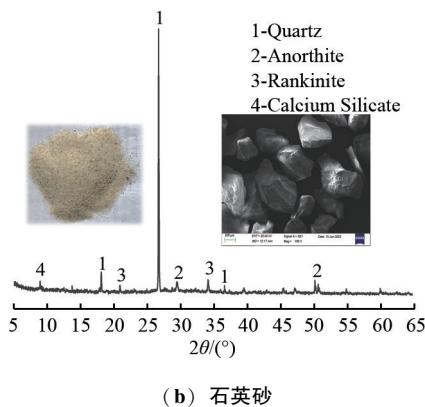


图 1 两种骨料的 XRD 谱和 SEM

XRD 结果表明，铁尾矿砂与石英砂的主要晶体相组成较为接近，二者均以石英晶体相为主，说明其晶体部分化学性质较稳定。需要说明的是，XRD 主要用于表征晶体相组成，对非晶相成分的识别能力有限，因此关于组成的分析主要基于其晶体相特征。此外，SEM 结果发现，铁尾矿砂比石英砂具有更多的棱角。

铁尾矿砂和石英砂的粒径分布采用筛析法进行测试，如图 2 所示。铁尾矿砂粒径小于石英砂，细颗粒含量高。两种骨料的主要物理性能见表 2。

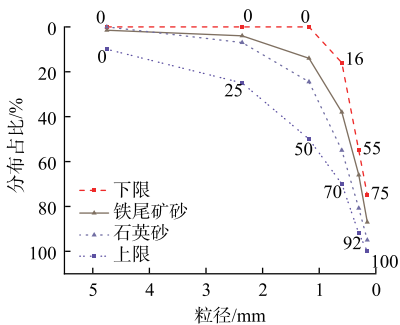


图 2 骨料粒径分布

1.2 配合比

结合课题组前期研究成果，胶凝体系中偏高岭土与粉煤灰对水泥的替代比例分别设定为 15% 和 30%。水胶比设置为 0.3，骨料与胶凝材料比为 0.5。研究对象为砂浆型水泥基复合材料基材，体系中仅采用细骨料，不掺粗骨料，因此主要适用于高性能修补砂浆、薄壁制品及纤维增强水泥基复合材料基体等。为系统评估铁尾矿砂作为环保型细骨料的资

源化利用潜力，设置其对硅砂的取代率为 0、25%、50%、75% 和 100% 五组。通过减水剂调控各组拌合物流动性，使扩展度不低于 180 mm。各组配合比见表 3，其中“T25”表示铁尾矿砂取代率为 25%。试件成型后于 20±2 ℃、相对湿度 95% 以上标准养护 28 d 后进行测试。

表 2 两种骨料的主要物理性能

	表观密度	堆积密度	压碎指标	吸水率	含泥量
	/ (kg/m ³)	/ (kg/m ³)	/ %	/ %	/ %
铁尾矿砂	2 736.00	1 824.00	20.34	0.95	2.80
石英砂	2 759.00	1 845.00	<10.00	0.48	

表 3 试样配合比

编号	骨料		胶凝材料			水	减水剂
	石英砂	铁尾矿砂	偏高岭土	粉煤灰	水泥		
T0	565.60	0.00	188.70	377.40	692.00	377.40	5.66
T25	424.20	141.40	188.70	377.40	692.00	377.40	5.69
T50	282.80	282.80	188.70	377.40	692.00	377.40	5.67
T75	141.40	424.20	188.70	377.40	692.00	377.40	5.71
T100	0.00	565.60	188.70	377.40	692.00	377.40	5.76

1.3 试验方法

1.3.1 力学试验

根据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》，并结合砂浆型水泥基复合材料的成型特点，在 MTS 万能试验机上对试件进行抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度试验。各组均采用 3 个试件进行平行测试。需要说明的是，研究对象为不含粗骨料的砂浆型水泥基复合材料，采用上述试件形式与测试方法，主要用于比较不同铁尾矿砂取代率下材料力学性能的相对变化规律。

1.3.2 耐久性试验

1.3.2.1 抗氯离子侵蚀测试

采用电通量法进行抗氯离子侵蚀测试。测试前，将预先加压饱和的试块（100 mm×50 mm）固定杂夹具中，并进行密封。在阳极和阴极的试验槽中分别注入 NaOH（0.3 mol/L）溶液和 NaCl（质量浓度 3%）溶液。施加 60 V 的外电压测试 6 h，每隔 5 min 记录电流值。

1.3.2.2 碳化深度测试

根据 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》，对各配合比的立方体试

材料科学

块进行时间为 7、14、28、56 d 的碳化试验。通过喷洒 1% 浓度的酚酞溶液辨别碳化部分, 并对碳化区域进行测定。

1.3.3 微观试验

1.3.3.1 孔结构测试

核磁共振作为一种无损检测技术, 已经被广泛应用于复合材料孔结构分析。采用磁场大小为 0.3 T、共振频率 50 ~ 60 Hz、线圈直径 60 mm 的 Macro MR12-150H-I 型核磁共振仪进行 IOTCC 的 T_2 谱和孔隙流体分布测试。由于核磁共振测试主要是通过低磁场作用下材料孔隙内的 H^+ 发生运动, 以此来获得 T_2 谱分布, 通过 CPMG 脉冲反演, 得到材料内部孔结构。

1.3.3.2 SEM 微观结构测试

采用扫描电子显微镜 (SEM, EVO-10) 对试样的微观结构与形貌特征进行表征。样品取自抗压试验后的破碎试块, 经切割制备成尺寸约为 5 mm × 5 mm × 2 mm, 用于后续微观形貌观察与分析。

2 试验结果与讨论

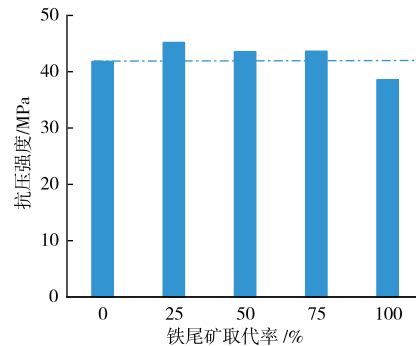
2.1 不同取代率对 IOTCC 强度影响

由图 3 (a) 可知, 铁尾矿砂取代率为 25%、50%、75% 和 100% 的 IOTCC 试样抗压强度。相比于 T_0 , 当铁尾矿砂取代率分别为 25%、50% 和 75% 时, 试样的抗压强度分别增加了 7.4%、3.9% 和 4.1%。当铁尾矿砂掺量为 100% 时, T_{100} 的抗压强度下降了 8.5%。这主要是高取代率会使骨料整体级配变小从而增加孔隙率。因此, 铁尾矿砂替换率为 25% 最佳。

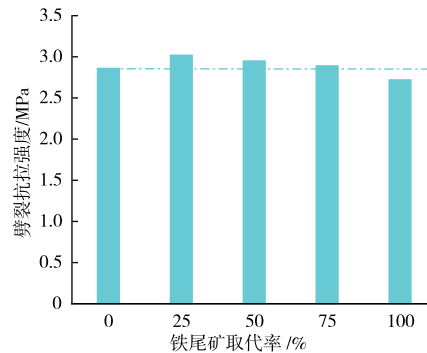
由图 3 (b) 可知, 随着铁尾矿砂取代率的提高, 试样的劈裂抗拉强度呈现先增大后减少的趋势。当铁尾矿砂取代率分别为 25%、50% 和 75% 时, T_{25} 、 T_{50} 和 T_{75} 的劈裂抗拉强度分别增加了 5.3%、3.1% 和 1%, 掺有 25% 铁尾矿砂的试样劈裂抗拉强度最高。然而, 铁尾矿砂取代率 100% 时, T_{100} 的劈裂抗拉强度下降了 5.1%。从以上分析结果可以看出, 使用达到 75% 的铁尾矿砂作为骨料不会对劈裂抗拉强度产生负面影响。

2.2 不同取代率对 IOTCC 抗氯离子侵蚀性能

由图 4 可知, 随着铁尾矿砂取代率的增加, 电流和电通量也逐渐增加。其中, 铁尾矿砂取代率大于



(a) 抗压强度



(b) 劈裂抗拉强度

图 3 铁尾矿砂取代率对强度的影响

Fig. 3 Effect of substitution rate of IOT on strength

75% 时, 电流和电通量的值均大于 T_0 。铁尾矿砂高取代率下, IOTCC 内部孔隙和界面等缺陷增加, 这有利于氯离子渗透, 试样抗氯离子性能变差, 因此, 合理掺量的铁尾矿砂能够有效地发挥填充效应, 改善孔结构, 增加基体密实性。

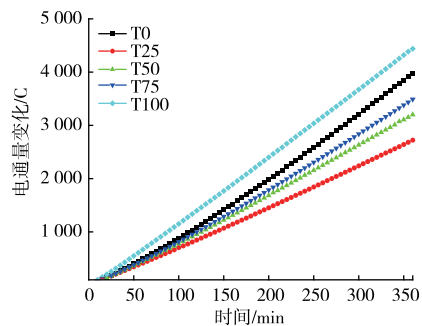


图 4 抗氯离子侵蚀

Fig. 4 Resistance to chloride erosion

2.3 不同取代率对 IOTCC 抗碳化性能影响规律

由图 5 可知, 当铁尾矿取代率小于 75%, IOTCC 试样的碳化深度降低。碳化 28 d 后, T_{25} 、 T_{50} 和 T_{75} 的碳化深度分别降低了 44.7%、34.1% 和

13.8%，表明了铁尾矿砂良好的填充效应。随着碳化时间的增加，IOTCC 的碳化深度增加，碳化速率在初始阶段很快，然后在后期阶段变慢。例如，在 0~28 d 时，T100 碳化深度增加了 46.7%，而在 28~56 d 时，其碳化深度增加了 11.2%。主要是由于 CO_2 气体通过孔隙迅速扩散到内部，随后与胶凝材料水合过程中产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和胶凝材料中的未水化熟料反应形成不溶性 CaCO_3 随后填充基体中的孔隙，阻碍 CO_2 气体进一步扩散到材料中。

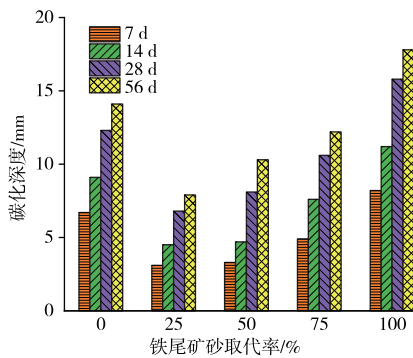


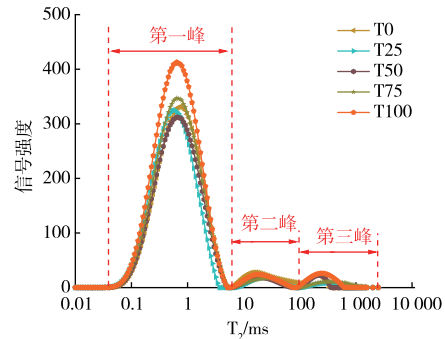
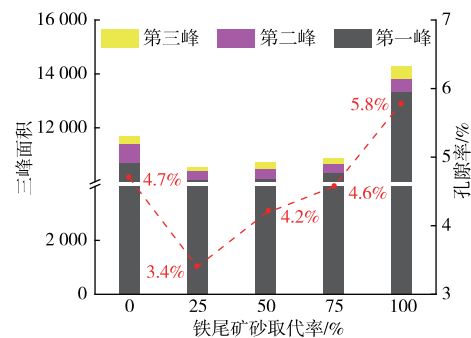
图 5 碳化深度试验结果

Fig. 5 Carbonization depth test results

2.4 孔结构特征

由图 6 (a) 可知，每一条 T_2 谱曲线包括一个主信号峰（第一峰）和两个次信号峰（第二峰和第三峰）。由图 6 (b) 可知，随着铁尾矿砂取代率的增加，各试样的 T_2 谱曲线峰面积先减小后增大。T25 的峰面积减少 9.7%，并且两个次信号峰（第二峰和第三峰）所占比例相对较小。而当铁尾矿砂取代率为 100% 时，T100 的峰值面积相比于 T0 增加了 22.3%。同时，第二峰和第三峰的比例也有所增加。此外，当铁尾矿砂取代率高达 25% 时，IOTCC 的总孔隙率最低。这一发现证实了铁尾矿砂的“填充效应”，并解释了 T25 的力学性能优于其他配比。

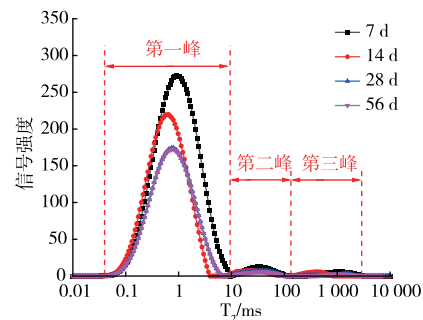
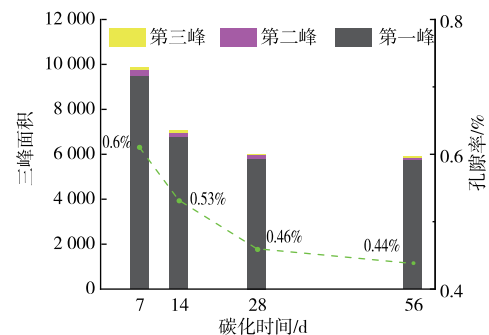
由图 7 (a) 可知，随着碳化时间的增加，两个次生信号峰的比例降低，T25 的总孔隙率分别降低了 8.8%、20.6%、32.3% 和 35.2%。此外，可以观察到碳化时间小于 14 d 时，总孔隙率下降较为明显，由图 7 (b) 可知，这是因为 CO_2 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生碳化反应，形成的 CaCO_3 有效填充基质孔隙。而碳化时间大于 28 d 后，总孔隙率几乎没有变化。表明 CaCO_3 填充效应抑制了 CO_2 进一步扩散。

(a) T_2 谱曲线

(b) 孔隙率和三峰面积占比

图 6 铁尾矿砂取代率对孔结构的影响

Fig. 6 Effect of iron tailing sand substitution rate on pore structure

(a) T_2 谱曲线

(b) 孔隙率和三峰面积占比

图 7 碳化时间对孔结构的影响 (以 T25 为例)

Fig. 7 Effect of carbonation age on pore structure (T25 as an example)

材料科学

2.5 微观形貌

由图 8 可知, T0 中存在较大孔隙, 整个基体内部缺陷明显。相比于 T0, T25 中连通孔和较大孔的数量降低, 基体总体上密实性显著改善。然而, 石英砂被完全替代时, 其所有骨料均拥有较大比表面积, 这使得水化过程中附着在单位面积铁尾矿砂上的水泥浆量减少, 基体完整性变差。直观表现为 T100 基体内部连通孔的数量较多, 基质的内部结构

相比于 T0 更加疏松。

由图 9 可知, 随着碳化时间的增加, 基体中 CaCO_3 的含量以及微观结构致密性逐渐增加。例如, 碳化 7 d 后, 基体微观结构中存在少量未反应片状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。随着 CO_2 气体的逐渐扩散, 基体内部 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 被消耗, 在碳化 14 和 56 d 后, 基体中形成了大量的 CaCO_3 。可以直观地看出基体微观结构的致密性显著提高, 特别是在碳化 56 d 后。

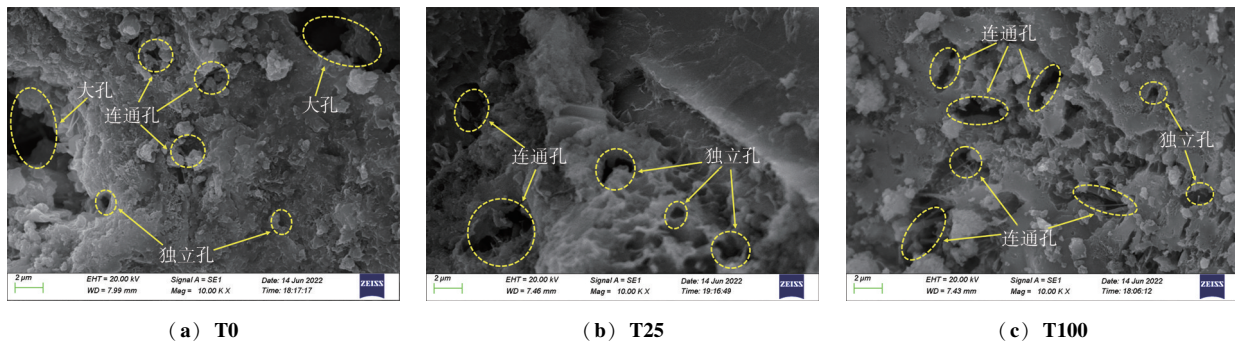


图 8 不同铁尾矿取代率的 IOTCC 微观形貌

Fig. 8 Microscopic morphology of IOTCC with different iron tailings substitution rate

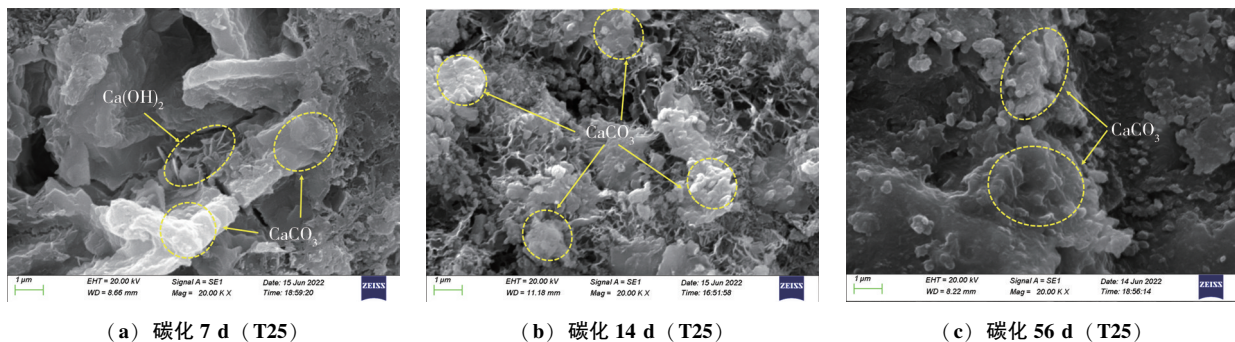


图 9 不同碳化时间的 IOTCC 微观形貌 (以 T25 为例)

Fig. 9 Microscopic morphology of IOTCC at different carbonation ages (T25 as an example)

3 结论

通过研究了铁尾矿砂取代率对 IOTCC 力学性能、耐久性能、孔结构及微观结构的影响, 得到以下结论:

(1) 铁尾矿砂在物理性能、粒度分布、微观形貌及矿物组成等方面与石英砂相近, 可作为 IOTCC 的细骨料。铁尾矿砂取代率为 25%~75% 时均有利于改善 IOTCC 的力学性能, 其中 25% 取代率下综合力学性能最佳。

(2) 铁尾矿砂取代率为 25% 时, IOTCC 的碳化

深度最小, 抗氯离子侵蚀性能最优, 表明适量掺入铁尾矿砂能够显著提升材料耐久性。

(3) 核磁共振分析表明, 铁尾矿砂取代率低于 75% 时可有效发挥填充效应, 降低基体孔隙率, 其中 25% 取代率试样孔隙率最低。随着碳化时间延长, IOTCC 孔隙率呈先快后缓的下降规律, 这主要与 CaCO_3 生成并填充孔隙、抑制 CO_2 进一步扩散有关。

(4) SEM 分析表明, 掺入 25% 铁尾矿砂可显著减少基体内部孔隙并提高结构致密性。随着碳化时间增加, CaCO_3 不断生成并填充孔隙, 基体致密化程度持续提高, 碳化 56 d 后表现尤为明显。(下转第 36 页)

材料科学

- [J]. 工业建筑, 2025, 55 (5): 280-291.
- [2] 贺晓铭, 张振龙, 尚汇源. 弯钩型钢纤维混凝土弯曲韧性试验研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2025 (6): 319-324.
- [3] 彭玉发, 胡利超, 李洪碧. 纤维混凝土强度及弯曲韧性试验研究 [J]. 四川建材, 2022, 48 (4): 6-7, 9.
- [4] 邢红杰, 宋叶房. 混杂纤维对桥梁铺装混凝土弯曲韧性的影响 [J]. 当代化工, 2025, 54 (4): 839-842, 847.
- [5] 段丹丹, 井玮翌. 高韧性纤维混凝土材料及应用性能研究 [J]. 化学工程师, 2024, 38 (1): 92-95, 60.
- [6] 吴三元. 基于钢纤维与聚丙烯纤维喷射混凝土的弯曲韧性 [J]. 合成纤维, 2023, 52 (2): 66-69.
- [7] 孟慧迪. 泵送混合砂钢纤维混凝土配合比及性能研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2022.
- [8] 刘元刚. 矿物掺合料和钢纤维对水工混凝土性能影响研究 [J]. 水利科学与寒区工程, 2024, 7 (3): 56-60.
- [9] 杨艳春, 张海红, 梁兴荣. 纤维增强硅粉高性能混凝土试验研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2022 (9): 54-57, 61.
- [10] 刘文胜, 陈晓云, 刘显峰, 等. 尾矿砂喷射钢纤维混凝土弯曲韧性研究 [J]. 低温建筑技术, 2017, 39 (2): 9-11.
- [11] 刘兵, 牟荣存, 王洋, 等. 多尺寸混杂纤维增强珊瑚混凝土的抗弯性能 [J]. 混凝土, 2025 (7): 173-179.
- [12] 赵健, 李伟清, 亓佳利, 等. 混合纤维超高强度混凝土的制备及力学性能研究 [J]. 煤矿现代化, 2026, 35 (4): 71-77.
- [13] 王金辉, 葛晨, 谈永泉, 等. 合成纤维混凝土弯曲韧性研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2020 (11): 61-65.
- [14] 满晨, 袁琳琳. 玄武岩纤维增强混凝土破坏形态及弯曲韧性研究 [J]. 合成纤维, 2024, 53 (6): 75-78.
- [15] 任海涛, 何娟, 符清露, 等. 混杂纤维对 OPC-CSA 复合模壳混凝土弯曲韧性和抗变形性的影响 [J]. 新型建筑材料, 2026, 53 (2): 49-55.
- [16] 许锋, 曾林, 柳德虎, 等. 基于钢纤维与聚丙烯纤维的喷射混凝土弯曲韧性研究 [J]. 合成材料老化与应用, 2024, 53 (1): 78-80.

(上接第 30 页)

参考文献

- [1] 范明辉, 李薇, 焦宇浩, 等. 基于 SR-SSA-SVR 的铁尾矿砂混凝土抗压强度预测 [J]. 材料导报, 2025, 39 (24): 117-124.
- [2] 黄伟, 薛葵, 张子龙, 等. 铁尾矿砂的研究与应用进展 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (10): 3655-3665.
- [3] Cheng Yunhong, Huang Fei, Qi Shanshan, et al. Durability of concrete incorporated with siliceous iron tailings [J]. Construction and Building Materials, 2020, 242: 118147.
- [4] Manaviparast H R, Miranda T, Pereira E, et al. A comprehensive review on mine tailings as a raw material in the alkali activation process [J]. Applied Sciences, 2024, 14 (12): 5127.
- [5] 孙志磊. 铁尾矿砂中石粉含量对硫铝酸盐水泥基高性能混凝土耐久性能的影响 [J]. 材料化学前沿, 2024, 12 (1): 1-6.
- [6] Wu Xian, Zhou Xian, Guo Chao, et al. Behavior of hematite, magnetite, and reduced iron powder in geopolymers: Effects of mechanical properties and reaction mechanism [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 444: 141178.
- [7] Yao Geng, Wang Qiang, Su Yuewei, et al. Mechanical activation as an innovative approach for the preparation of pozzolan from iron ore tailings [J]. Minerals Engineering, 2020, 145: 106068.
- [8] Yao Geng, Wang Qiang, Wang Zhiming, et al. Activation of hydration properties of iron ore tailings and their application as supplementary cementitious materials in cement [J]. Powder Technology, 2020, 360: 863-871.
- [9] 王圣杰, 顾晓薇, 王岫宇, 等. 铁尾矿砂蒸压加气轻质混凝土的制备与孔隙结构研究 [J]. 矿业研究与开发, 2024, 44 (3): 232-238.
- [10] 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.
- [11] 郎文丽, 谢群, 惠婧, 等. 聚乙烯醇纤维掺量与铁尾矿砂替代率对混凝土抗压性能的影响 [J]. 济南大学学报 (自然科学版), 2025 (2): 245-251.
- [12] Shettima A U, Hussin M W, Ahmad Y, et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 120 (sep. 1): 72-79.
- [13] 张延年, 林吉森, 陈昊, 等. 铁尾矿基固废混凝土抗压性能及微观结构分析 [J]. 沈阳工业大学学报, 2024, 46 (2): 225-232.
- [14] Zhang Weifeng, Gu Xiaowei, Qiu Jingping, et al. Effects of iron ore tailings on the compressive strength and permeability of ultra-high performance concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 260: 119917.
- [15] Zhao Jiangshan, Ni Kun, Su Youpo, et al. An evaluation of iron ore tailings characteristics and iron ore tailings concrete properties [J]. Construction and Building Materials, 2021, 286: 122968.
- [16] 李致远, 陈峰. 铁尾矿砂绿色混凝土的制备与性能研究 [J]. 功能材料, 2023, 54 (6): 6230-6236.