

# 铁尾矿和钢纤维复掺对粉煤灰基混凝土性能的影响

郝利斌<sup>1</sup>, 董泽彬<sup>2</sup>, 郭峰<sup>1</sup>

(1. 华冠天诚检测认证有限公司, 太原 030000; 2. 西南交通大学, 成都 611730)

**摘要:** 为了提高铁尾矿的利用效率, 并降低混凝土材料的生产成本, 以铁尾矿砂取代部分天然砂作为细骨料, 并掺入钢纤维, 制备出了铁尾矿-钢纤维复合粉煤灰基混凝土。通过抗压强度和劈裂抗拉强度试验评价了铁尾矿和钢纤维掺量对混凝土力学性能的影响, 通过碳化试验和盐雾侵蚀试验评价了混凝土的耐老化性能。结果表明: 钢纤维的长度和掺量越大, 铁尾矿砂的掺量越大时, 混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度均先升高后降低, 当钢纤维的长度为 35 mm, 掺量为 1.5%, 铁尾矿砂的掺量为 40% 时, 混凝土的力学性能达到最佳, 抗压强度和劈裂抗拉强度分别为 30.08、6.64 MPa。铁尾矿-钢纤维复合混凝土的耐老化性能较好, 当碳化龄期和盐雾侵蚀龄期达到 56 d 时, 混凝土的碳化深度为 12.8 cm, 碳化试验后的抗压强度为 36.72 MPa, 盐雾侵蚀试验后的抗压强度为 29.51 MPa。

**关键词:** 铁尾矿; 钢纤维; 粉煤灰基混凝土; 力学性能; 耐老化性能

**中图分类号:** TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 01-0037-06

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.01.007

## Effect of Iron Tailings and Steel Fiber Composite on the Performance of Fly Ash based Concrete

HAO Libin<sup>1</sup>, DONG Zebin<sup>2</sup>, GUO Feng<sup>1</sup>

(1. Huaguan Tiancheng Testing and Certification Co., Ltd., Taiyuan 030000, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 611730, China)

**Abstract:** In order to improve the utilization efficiency of iron tailings and reduce the production cost of concrete materials, iron tailings sand was used to replace some natural sand as fine aggregate, and steel fibers were added to prepare iron tailings steel fiber composite fly ash based concrete. The influence of iron tailings and steel fiber content on the mechanical properties of concrete was evaluated through compressive strength and splitting tensile strength tests, and the aging resistance of concrete was evaluated through carbonation tests and salt spray erosion tests. The results showed that as the length and dosage of steel fibers increased and the dosage of iron tailings sand increased, the compressive strength and splitting tensile strength of concrete first increased and then decreased. When the length of steel fibers was 35mm, the dosage of steel fibers was 1.5%, and the dosage of iron tailings sand was 40%, the mechanical properties of concrete reached their optimum, with compressive strength and splitting tensile strength of 30.08、6.64 MPa, respectively. The aging resistance of iron tailings steel fiber composite concrete is good. When the carbonation age and salt spray erosion age reach 56 days, the carbonation depth of the concrete is 12.8 cm, and the compressive

作者简介: 郝利斌 (1989—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 试验检测。

通信作者: 董泽彬 (2005—), 男, 本科在读, 研究方向: 材料科学与工程。

收稿日期: 2025-10-24

## 材料科学

strength after carbonation test is 36.72 MPa, and the compressive strength after salt spray erosion test is 29.51 MPa.

**Key words:** iron tailings; steel fiber; fly ash based concrete; mechanical properties; aging resistance

### 0 引言

随着我国城市化和工业化进程的不断加快,对混凝土类材料的需求量也逐年增多。其中混凝土生产会消耗大量的碎石以及细砂等砂石材料,而天然矿山以及河砂的大量开采会引发一系列的环境问题,迫切需要寻找相应的替代材料,以降低砂石材料的用量<sup>[1]</sup>。因此,将铁尾矿砂代替部分细砂作为细骨料来制备混凝土材料,不仅能够减少天然砂的用量,降低混凝土的生产成本,还能将铁尾矿高效回收利用,降低环境污染风险<sup>[2]</sup>。

目前,已有许多学者针对混凝土中掺入钢纤维或者铁尾矿开展了相关研究,例如郑宇炜<sup>[3]</sup>研究了粉煤灰和钢纤维掺量对全再生粗骨料混凝土力学性能和耐久性能的影响,结果表明当粉煤灰的掺量为15%,钢纤维的掺量为1%时,混凝土的综合性能最佳;谢家化等<sup>[4]</sup>研究了纯钢纤维混凝土盾构管片的力学性能,结果表明钢纤维掺量和长度与混凝土管片的承载力呈正相关,而纤维直径则与其呈负相关;孙夏令等<sup>[5]</sup>以铁尾矿砂再生混凝土为研究对象,考察水灰比以及钢纤维对混凝土力学性能的影响,结果表明当水灰比为0.3时,钢纤维与铁尾矿砂的共同作用可大幅提高混凝土的力学性能;宁波<sup>[6]</sup>研究了铁尾矿和钢纤维同时掺入时对混凝土抗压强度的影响,结果表明铁尾矿和钢纤维的掺入均能有效提升混凝土的抗压强度;王晨光等<sup>[7]</sup>将铁尾矿部分代替石英砂制备出了一种活性粉末混凝土,并考察了不同材料掺量对混凝土抗压强度的影响,结果表明粉煤灰、钢纤维以及减水剂对混凝土的抗压强度的影响均比较大,此外,高温养护有利于混凝土抗压强度的提高;刘巧会等<sup>[8]</sup>考察了钢纤维掺量对高性能混凝土力学性能的影响,发现钢纤维的掺入能够有效提升混凝土的受压弹性模量、峰值应力以及峰值应变等参数;赵松松等<sup>[9]</sup>考察了不同类型铁尾矿对混凝土性能的影响,结果表明铁尾矿的掺入与粉煤灰相比可降低混凝土的力学性能,但仍能满足混凝土强度设计要求,可将铁尾矿应用于实际工程中;

刘文胜等<sup>[10]</sup>研究了钢纤维掺量对尾矿砂喷射钢纤维混凝土弯曲性能的影响,结果表明钢纤维的掺入对混凝土峰值载荷的影响较小,但其对混凝土变形性能的影响比较大;李涛等<sup>[11]</sup>考察了钢纤维掺量对铁尾矿砂混凝土流动性能和抗压性能的影响,结果表明钢纤维的掺入可使混凝土流动性能降低,但可大幅增大混凝土的抗压强度;刘泽琳等<sup>[12]</sup>研究了钢纤维掺量对超高性能喷射混凝土力学性能的影响,结果表明合适掺量的钢纤维可有效提高混凝土的力学性能;王永刚等<sup>[13]</sup>研究了铁尾矿砂掺量对混凝土综合性能的影响,结果表明当铁尾矿砂掺量达到40%时,混凝土的工作性能和力学性能均比较好;吴海林等<sup>[14]</sup>研究了带缝钢-聚丙烯混杂纤维对混凝土碳化性能的影响,结果表明当钢纤维和聚丙烯纤维的掺量分别为1.5%和0.06%时,混凝土的抗碳化性能最佳;赵继祖等<sup>[15]</sup>研究了铁尾矿再生混凝土抗盐雾侵蚀性能,结果表明掺入30%铁尾矿可有效提高再生混凝土的抗盐雾侵蚀能力。

目前针对铁尾矿和钢纤维单独掺入对混凝土性能的影响研究已比较多,而针对混凝土中同时掺入铁尾矿和钢纤维的研究则仍相对较少,仍需开展进一步的研究。因此,将铁尾矿砂取代部分天然砂作为细骨料,并同时掺入钢纤维,制备了一种铁尾矿-钢纤维复合粉煤灰基混凝土材料,重点考察了钢纤维长度、掺量以及铁尾矿砂掺量对粉煤灰基混凝土力学性能的影响,并通过碳化试验和盐雾侵蚀试验考察了混凝土的耐老化性能,以为高性能混凝土的研究和发展提供一定的参考。

### 1 试验

#### 1.1 原材料

铁尾矿砂取自西部某铁矿厂,细度模数为2.4;水泥为P.O 42.5型硅酸盐水泥;纤维为端勾型钢纤维长度为20~50 mm,直径为0.75 mm;萘系高效减水剂;天然砂细度模数为2.5、碎石直径为5~10 mm;二级粉煤灰;试验用水为自来水。

## 1.2 混凝土配合比设计

固定水胶比为 0.3，砂率为 40%，然后通过改变铁尾矿砂和钢纤维的掺量对铁尾矿 - 钢纤维

复合粉煤灰基混凝土的配合比进行设计，设计结果见表 1。

表 1 试验混凝土配合比设计结果

Table 1 Experimental concrete mix design results

编号	材料用量/(kg/m <sup>3</sup> )						铁尾矿砂 /wt%	铁尾矿砂 /wt%	
	水	水泥	粉煤灰	天然砂	碎石	减水剂			
F-0	153	450	90	680	1 020	2.5			
F-1	153	450	90	544	1 020	136	1.5	20	
F-2	153	450	90	476	1 020	204	1.5	30	
F-3	153	450	90	408	1 020	272	1.5	40	
F-4	153	450	90	340	1 020	340	1.5	50	
F-5	153	450	90	272	1 020	408	1.5	60	
F-6	153	450	90	408	1 020	272	2.5	40	
F-7	153	450	90	408	1 020	272	2.5	0.5	40
F-8	153	450	90	408	1 020	272	2.5	1.0	40
F-9	153	450	90	408	1 020	272	2.5	1.5	40
F-10	153	450	90	408	1 020	272	2.5	2.0	40
F-11	153	450	90	408	1 020	272	2.5	2.5	40

## 1.3 混凝土试件制备及养护

将水泥、粉煤灰、天然砂、碎石和铁尾矿砂加入到搅拌机中，混合搅拌 2 min；加入钢纤维，搅拌 3 min；将减水剂加入到水中，继续搅拌 2 min；将复合混凝土原料倒入模具中振捣成型；试件放置于干燥处 24 h，放置于恒温恒湿养护箱中养护 28 d 后取出，拆模。

## 1.4 试验方法

参照国家标准 GB/T 50081—2019《普通混凝土力学性能试验方法标准》中抗压强度试验和劈裂抗拉强度的相关试验要求，以混凝土试件的抗压强度和劈裂抗拉强度为评价指标，考察不同混凝土试件的力学性能，试件的尺寸均为 100 mm × 100 mm × 100 mm 立方体试件。

参照国家标准 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中快速碳化法的相关试验要求，以碳化深度和碳化试验后混凝土试件的抗压强度为评价指标，考察不同碳化龄期对混凝土试件性能的影响。

参照国家标准 GB/T 10125—2012《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》中性盐雾试验的相关要求，采用盐雾试验机，以盐雾侵蚀后混凝土试件的抗压强度为评价指标，考察不同盐雾侵蚀龄期对混凝土试件性能的影响。其中盐雾侵蚀试验用盐溶液为 50 g/L 的氯化钠溶液。

## 2 结果与讨论

### 2.1 混凝土力学性能试验结果

#### 2.1.1 钢纤维长度对混凝土力学性能的影响

钢纤维掺量统一为 1%，铁尾矿砂掺量统一为 40%。图 1 结果显示，随着钢纤维长度的逐渐增大，铁尾矿 - 钢纤维复合粉煤灰基混凝土试件的抗压强度和劈裂抗拉强度均呈现出“先升高后降低”的趋势。当钢纤维的长度为 35 mm 时，铁尾矿 - 钢纤维复合混凝土试件的抗压强度和劈裂抗拉强度均能达到最大值，分别为 28.46、6.01 MPa。再继续增大钢纤维的长度，混凝土试件的抗压强度和劈裂抗拉强度均有所降低。这是由于合适长度的钢纤维能够在混凝土结构内部形成更加稳定的网络空间结构，其对混凝土基体的锚固作用和支撑能力更强，从而有助于提升其力学强度；而当钢纤维的长度过大时，影

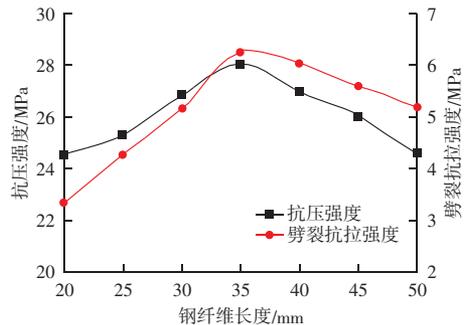


图 1 钢纤维长度对混凝土力学性能的影响  
Fig. 1 Influence of steel fiber length on the mechanical properties of concrete

## 材料科学

响其在混凝土结构内部的均匀分布, 减弱了其桥接作用, 使混凝土的骨架结构变得松散, 从而降低了其力学强度。因此, 从钢纤维长度对混凝土力学性能的影响考虑, 推荐钢纤维的最佳长度为 35 mm。

### 2.1.2 钢纤维掺量对混凝土力学性能的影响

钢纤维长度统一为 35 mm, 铁尾矿砂掺量统一为 40%。图 2 结果显示, 随着钢纤维掺量的逐渐增大, 铁尾矿 - 钢纤维复合粉煤灰基混凝土试件的抗压强度和劈裂抗拉强度同样均呈现出“先升高后降低”的趋势。当钢纤维的掺量为 1.5% 时, 铁尾矿 - 钢纤维复合混凝土试件的抗压强度和劈裂抗拉强度均能达到最大值, 分别为 30.08、6.64 MPa, 与未掺入钢纤维的空白混凝土相比, 抗压强度和劈裂抗拉强度分别提升了 40.04%、63.95%, 提升幅度均比较大。再继续增大钢纤维的掺量, 混凝土试件的抗压强度和劈裂抗拉强度均有所降低。这是由于合适掺的钢纤维能够在混凝土结构中均匀分散, 并起到良好的桥接作用, 使混凝土基体更加密实, 提升了其力学强度; 而当钢纤维的掺量过大时, 钢纤维容易出现局部聚集现象, 混凝土内部结构的稳定性被破坏, 从而使其力学强度有所降低<sup>[16]</sup>。因此, 从钢纤维掺量对混凝土力学性能的影响考虑, 推荐钢纤维的最佳掺量为 1.5%。

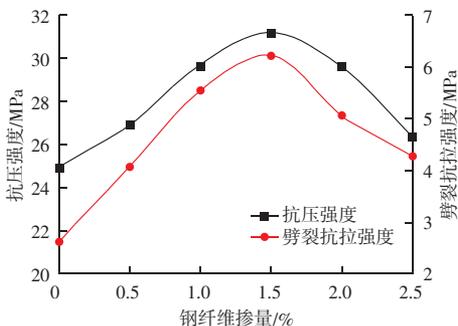


图2 钢纤维掺量对混凝土力学性能的影响  
Fig. 2 Influence of steel fiber content on the mechanical properties of concrete

### 2.1.3 铁尾矿掺量对混凝土力学性能的影响

钢纤维长度统一为 35 mm, 钢纤维掺量统一为 1.5%。图 3 结果显示, 随着铁尾矿砂掺量的逐渐增大, 铁尾矿 - 钢纤维复合粉煤灰基混凝土试件的抗压强度和劈裂抗拉强度同样均呈现出“先升高后降低”的趋势, 这与钢纤维掺量对混凝土力学性能的影响结果趋势相似。当铁尾矿砂的掺量为 40% 时,

铁尾矿 - 钢纤维复合混凝土试件的抗压强度和劈裂抗拉强度均能达到最大值, 分别为 30.08、6.64 MPa, 与未掺入铁尾矿砂的混凝土相比, 抗压强度和劈裂抗拉强度分别提升了 22.18%、21.61%。再继续增大铁尾矿砂的掺量, 混凝土试件的抗压强度和劈裂抗拉强度均有所降低。这是由于铁尾矿砂的粒径与天然砂相比相对较小, 其能够更好的填充混凝土结构内部的微小孔隙, 使混凝土的密实度有所提高, 从而有助于提升其力学性能; 而当铁尾矿砂的掺量过大时, 会导致细骨料中小颗粒的占比升高, 总比表面积过大, 反而不利于力学强度的提升<sup>[17]</sup>。因此, 从铁尾矿砂掺量对混凝土力学性能的影响考虑, 推荐铁尾矿砂的最佳掺量为 40%。

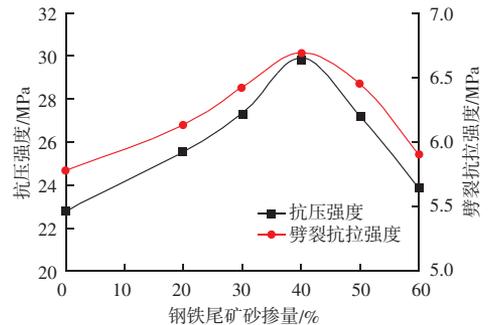


图3 铁尾矿砂掺量对混凝土力学性能的影响  
Fig. 3 Influence of iron tailings sand content on the mechanical properties of concrete

## 2.2 混凝土耐老化性能试验结果

### 2.2.1 碳化试验结果

钢纤维长度统一为 35 mm, 钢纤维掺量统一为 1.5%, 铁尾矿砂掺量均为 40%。图 4 结果显示, 随着碳化龄期的逐渐延长, 铁尾矿 - 钢纤维复合粉煤灰基混凝土试件的碳化深度和抗压强度均呈现出逐渐增大的趋势。当碳化龄期达到 56 d 时, 混凝土的碳化深度为 12.8 mm, 碳化试验后混凝土试件的抗压强度增大至 36.72 MPa, 与未碳化时相比, 抗压强度增大了 22.07%。这是由于混凝土材料中通常含有较多的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 致使其碱性较强, 在碳化试验过程中引入的酸性气体  $\text{CO}_2$  会与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生反应生成  $\text{CaCO}_3$ , 从而能够对混凝土内部孔隙产生一定的封堵作用, 有助于提高混凝土的密实度, 并阻止后续  $\text{CO}_2$  的继续侵入, 致使混凝土的抗压强度有所增大。综合来看, 制备的铁尾矿 - 钢纤维复合粉煤灰基混凝土的抗碳化性能较强, 适合在高含  $\text{CO}_2$  环境中进行使用。

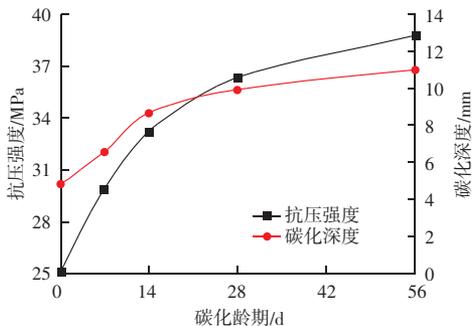


图4 碳化龄期对混凝土碳化深度和抗压强度的影响

Fig. 4 Influence of carbonation age on the carbonation depth and compressive strength of concrete

### 2.2.2 盐雾侵蚀试验结果

钢纤维长度统一为 35 mm，钢纤维掺量统一为 1.5%，铁尾矿砂掺量均为 40%。图 5 结果显示，随着盐雾侵蚀龄期的逐渐延长，铁尾矿 - 钢纤维复合粉煤灰基混凝土试件的抗压强度呈现出“先升高后降低”的趋势，但整体来看，变化的幅度并不大。当盐雾侵蚀龄期为 14 d 时，混凝土试件的抗压强度可由盐雾侵蚀试验前的 30.08 MPa 略微升高为 31.35 MPa，提升的幅度为 4.22%，提升幅度不大；而当盐雾侵蚀龄期继续延长至 56 d 时，混凝土试件的抗压强度则略微降低至 29.51 MPa，降低的幅度为 1.89%，降低幅度也不大。分析原因是由于在盐雾侵蚀试验前期，盐溶液与混凝土材料之间反应的生成物会对其中的孔隙进行填充，使混凝土的结构更加致密，从而使其抗压强度略有提升；而随着盐雾侵蚀试验的进行，氯盐与水泥水化产物等结合生成的结晶盐体积逐渐增大，会在混凝土内部产生一定的膨胀力，从而会对混凝土孔隙结构造成一定的破坏，导致其抗压强度有所下降。但综合来看，由于铁尾矿和钢纤维等材料的掺入，使得粉煤灰基混凝土材

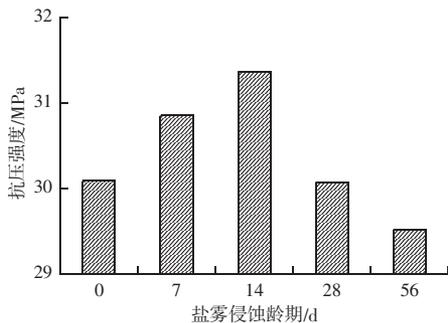


图5 盐雾侵蚀龄期对混凝土抗压强度的影响

Fig. 5 Influence of salt spray erosion age on the compressive strength of concrete

料的抗盐雾侵蚀能力较强，使其能够在高含盐环境中进行使用。

### 3 结论

使用铁尾矿砂取代部分天然砂作为细骨料，然后再掺入一定量的钢纤维，制备出一种铁尾矿 - 钢纤维复合粉煤灰基混凝土材料，并通过抗压强度试验、劈裂抗拉强度试验、碳化试验和盐雾侵蚀试验对混凝土的力学性能试验和耐老化性能进行了评价，主要得出如下结论：

(1) 铁尾矿 - 钢纤维复合粉煤灰基混凝土具有良好的力学性能，随着钢纤维长度、钢纤维掺量以及铁尾矿砂掺量的逐渐增大，混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度均先升高后降低。当钢纤维的长度为 35 mm，钢纤维的掺量为 1.5%，铁尾矿砂的掺量为 40% 时，混凝土的力学性能达到最佳。

(2) 铁尾矿 - 钢纤维复合粉煤灰基混凝土具有良好的耐老化性能，随着碳化龄期的逐渐延长，混凝土的碳化深度和抗压强度均逐渐增大；而随着盐雾侵蚀龄期的逐渐延长，混凝土的抗压强度则先升高后降低。当碳化龄期和盐雾侵蚀龄期达到 56 d 时，混凝土仍具有较高的力学强度。

### 参 考 文 献

- [1] 雷敏哲, 张少峰, 王雪. 钢纤维与尾矿砂替代率对混凝土基本力学性能影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2019, 33 (1): 23-27.
- [2] 孙欣, 马艺闻, 姚富兴, 等. 铁尾矿制备矿物材料研究进展 [J]. 矿业研究与开发, 2024, 44 (9): 252-262.
- [3] 郑宇炜. 粉煤灰 - 钢纤维增强全再生粗骨料混凝土性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (5): 49-54.
- [4] 谢家化, 古宗华, 张杰, 等. 纯钢纤维混凝土盾构管片力学性能研究 [J]. 公路工程, 2025, 50 (5): 70-78.
- [5] 孙夏令, 朱倩, 陈记豪, 等. 钢纤维对铁尾矿砂再生混凝土力学性能影响 [J]. 河南科技, 2022, 41 (2): 69-72.
- [6] 宁波. 铁尾矿 - 钢纤维双掺混凝土制备及性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (3): 16-19, 44.
- [7] 王晨光, 张立群, 刘宏波, 等. 铁尾矿砂制备活性粉末混凝土的试验研究 [J]. 河北建筑工程学院学报, 2023, 41 (1): 28-33.
- [8] 刘巧会, 黄海峰, 薛苗苗, 等. 钢纤维掺量对超高性能混凝土轴压力学性能影响研究 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2024, 43 (4): 454-462.

## 材料科学

- 材料力学性能的影响 [J]. 广西科技大学学报, 2021, 32 (3): 27-33.
- [5] 丁浩珉, 孙勇, 陈鑫. 硅烷偶联剂改性氧化石墨烯对水泥净浆性能的影响 [J]. 公路交通科技, 2025, 42 (7): 60-67.
- [6] 高丽敏, 付长璟, 毕建聪. 氧化石墨烯对水泥基材料性能的影响 [J]. 黑龙江科技大学学报, 2024, 34 (6): 903-908.
- [7] 王中明, 张贺玲. 氧化石墨烯纳米片层增强水泥基复合材料力学性能研究 [J]. 工业建筑, 2021, 51 (2): 153-157.
- [8] 罗素蓉, 姚佳敏, 周恩泉, 等. 氧化石墨烯改性纤维增强水泥基材料的拉伸性能 [J]. 建筑材料学报, 2024, 27 (5): 400-407.
- [9] 程思娜, 陈代果, 古巍. 氧化石墨烯改性水泥基注浆材料的制备及力学性能研究 [J]. 功能材料, 2023, 54 (2): 2153-2158.
- [10] 孙婷婷, 孙玉周. 合成水化硅酸钙对水泥基材料微观力学性能的影响 [J]. 中原工学院学报, 2021, 32 (4): 51-57.
- [11] 刘春晖. 玻璃粉-水泥基复合材料的力学性能和微观机理研究 [D]. 郑州: 中原工学院, 2024.
- [12] 李紫淇. 纳米碳纤维水泥基复合材料断裂力学性能研究 [D]. 郑州: 中原工学院, 2024.
- [13] 陈小文, 韩宇栋, 丁小平, 等. 水泥净浆弹性模量的纳米压痕表征与多尺度计算 [J]. 上海交通大学学报, 2022, 56 (9): 1199-1207.
- [14] 刘昭华. PVA-ECC 与碳化混凝土界面粘结性能试验研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2024.
- [15] OLIVER W C, PHARR G M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology [J]. Journal of Materials Research, 2004, 19 (1): 3-20.

## (上接第 41 页)

- [9] 赵松松, 王兴政, 王岩. 铁尾矿对混凝土性能影响试验分析 [J]. 黑龙江交通科技, 2025, 48 (6): 14-18.
- [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] 李涛, 李传博. 铁尾矿钢纤维混凝土复合材料流动性能与抗压性能试验研究 [J]. 西华大学学报 (自然科学版), 2017, 36 (2): 101-105.
- [12] 刘泽琳, 杨伟军, 杨建宇, 等. 钢纤维对超高性能喷射混凝土的力学性能影响研究 [J]. 混凝土, 2025 (9): 146-151.
- [13] 王永刚, 王慧锐, 曹浩磊, 等. 铁尾矿砂掺量对混凝土性能的影响研究 [J]. 混凝土世界, 2025 (10): 42-46.
- [14] 吴海林, 李岳松, 周超月, 等. 带缝钢-聚丙烯混杂纤维混凝土碳化试验研究 [J]. 混凝土, 2025 (5): 22-26.
- [15] 赵继祖, 杨万英. 不同纤维掺量的铁尾矿再生混凝土抗盐雾侵蚀性能试验研究 [J]. 河南科学, 2023, 41 (6): 867-874.
- [16] 张艺芳. 钢纤维改性建筑混凝土力学性能试验研究 [J]. 福建建材, 2025 (7): 27-29.
- [17] 程和平, 陆璐. 铁尾矿砂掺量对混凝土力学性能、耐久性 & 水化特性的影响研究 [J]. 金属矿山, 2021 (11): 215-220.