

ECC 力学性能与流变性研究

邹红武¹, 徐培军¹, 方智², 曾汝峰², 邹攀博², 刘珏³, 尹健³, 邓涵文³

(1. 长沙市公共工程建设中心, 长沙 410000; 2. 中国建筑第五工程局有限公司, 长沙 410000;
3. 中南林业科技大学 土木工程学院, 长沙 410000)

摘要: 为探究硅灰对纤维增强水泥基复合材料 (ECC) 性能影响, 通过凝结时间、抗压试验、抗折试验以及流变性试验, 研究了不同硅灰掺量对国产 ECC 力学性能和流变性的影响规律。研究表明: 随着硅灰掺量的增加, 凝结时间逐渐缩短。硅灰掺入有助于提升 ECC 在不同养护龄期下的抗压强度和抗折强度。当硅灰掺量达到 10% 时, ECC 的 7、14、28 d 抗压强度分别达到 14.32、26.91、38.92 MPa, 抗折强度分别达到 8.12、15.65、18.53 MPa, 相较于未掺硅灰组, 强度显著提升; 在流变性方面, 随着硅灰掺量的增加, ECC 的流动度呈先上升后下降的趋势, 掺量为 2% 时流动度达到最大值为 255 mm; 硅灰的掺入能够显著提高浆体的屈服应力和塑性黏度, 并且硅灰掺量越高, ECC 浆体的屈服应力和塑性黏度整体越高, 当硅灰掺量为 10% 时, 屈服应力为 27.976 6 Pa, 塑性黏度为 0.909 88 Pa·s。研究结果为国产 ECC 在低水泥用量下的性能优化提供了理论依据, 促进绿色发展。

关键词: 纤维增强水泥基复合材料; 硅灰; 流变性; 力学性能

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 01-0047-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.01.009

The Investigation on Mechanical and Rheological Properties of Engineered Cementitious Composites with Varied Silica Fume Dosage

ZOU Hongwu¹, XU Peijun¹, FANG Zhi², ZENG Rufeng², ZOU Panbo²,
LIU Jue³, YIN Jian³, DENG Hanwen³

(1. Changsha Public Engineering Construction Center, Changsha 410000, China; 2. China Construction Fifth Engineering Bureau Co., Ltd., Changsha 410000, China; 3. School of Civil Engineering, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410000, China)

Abstract: To explore the impact of silica fume on the properties of fiber-reinforced cementitious composite (ECC), the effect of different silica fume replacement levels of cement on the mechanical properties and rheological behavior of domestic ECC was investigated through setting time, compressive strength, flexural strength, and rheological tests. The results show that the setting time gradually decreases with the increase of silica fume content. The addition of silica fume contributes to enhancing the

项目来源: 湖南省自然科学基金项目 (2021J41078)。

作者简介: 邹红武 (1976—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程、新型低碳环保材料。

通信作者: 邓涵文 (1986—), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 高延性水泥基复合材料多功能特性。

收稿日期: 2025-03-20

材料科学

compressive and flexural strength of ECC at different curing ages. When the silica fume content reaches 10%, the 7day, 14day, and 28day compressive strengths of ECC reach 14.32, 26.91, and 38.92 MPa, respectively, and the flexural strengths reach 8.12, 15.65, and 18.53 MPa, respectively, which are significantly higher than those of the group without silica fume. In terms of rheology, the flowability of ECC first increases and then decreases with the increase of silica fume content, reaching a maximum value of 255 mm at a content of 2%. The addition of silica fume can significantly increase the yield stress and plastic viscosity of the paste, and the higher the silica fume content, the higher the overall yield stress and plastic viscosity of the ECC paste. When the silica fume content is 10%, the yield stress is 27.9766 Pa and the plastic viscosity is 0.90988 Pa·s. The research results provide a theoretical basis for the performance optimization of domestic ECC with low cement content and promote green development.

Key words: fiber-reinforced cement-based composite; silica fume; rheological properties; mechanical properties

0 引言

纤维增强水泥基复合材料(ECC)是在水泥基体中掺入不同种类的纤维,使ECC具有良好的抑制裂缝能力,从而有效缓解水泥基材料脆性大、限制裂缝开裂能力弱等问题。硅灰是以无定形 SiO_2 为主要成分的粉体材料,具有颗粒细小、活性高、质量轻、耐高温的性能,合适的硅灰掺量有助于提升材料的性能。

已有学者对不同硅灰掺量下水泥浆体的力学性能和流变性能进行研究。赵诗语等^[1]发现同时掺入适量的聚丙烯纤维和硅灰可以有效提高轻骨料混凝土的抗压强度、抗折强度和抗冻性能;王清梦等^[2]发现对比复掺稻壳灰,单掺40%硅灰时可以显著降低 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 对竹浆纤维的侵蚀作用,提高竹浆纤维水泥基复合材料的抗弯强度和断裂韧性,改善其抗劣化性能;何华庭等^[3]发现ECC试件的抗压强度随着硅灰掺量增加逐渐上升,掺量为5%时抗折强度达到18.6 MPa,掺量超过8%时,材料的抗折强度和流动度则会受到抑制;庞建勇等^[4]发现硅灰的加入使试件动态峰值应力、动态峰值应变均呈上升趋势,动态增长因子值也有所增加;Bhatta等^[5]发现纳米二氧化硅不仅作为填料,而且作为水化过程的促进剂,改善了混凝土的微观结构,从而提高了强度;吴帅^[6]发现当低二氧化硅含量硅灰掺入混凝土后,会不同程度地提升混凝土的力学性能及耐久性能;张露晨等^[7]认为硅灰对速凝剂的作用有进一步提升效果,硅灰的加入可有效提高混凝土黏聚性;陈超等^[8]研究认为硅灰对水泥水化具有促进作用,其中对水泥浆体早期水化的影响主要在晶体生长期与水

化加速期;王洪涛等^[9]通过试验5种硅灰掺量率对水泥基材料的影响,发现硅灰掺入显著改善了材料的抗氯离子渗透性能;陈柏琪等^[10]研究表明,不同矿物掺合料取代率会影响混凝土的流动性,其中掺入硅灰可使混凝土的流动性较好;张倩倩等^[11]研究了硅灰、粉煤灰和矿渣粉对水泥浆体流变性的影响,研究发现加入硅灰会提高浆体的屈服应力和黏度;蒋睿等^[12]采用涡流式高速分散设备探究了不同转速对水泥基浆体流变行为的影响,结果表明硅灰的加入显著提升了流变性,但高分散速率下浆体间流变参数差异较小;陈昭等^[13]研究发现,硅灰单掺时浆体流动性、屈服应力及低转速黏度随掺量增加而降低,复掺硅灰与漂珠时,强度提升不显著且随漂珠掺量增加而降低,屈服应力增加,黏度变化复杂;李正虎等^[14]研究发现,黄磷渣粉与硅灰复掺会减小流动度、提高屈服应力和黏度;关素敏等^[15]研究发现,硅灰掺量越大,C60自密实钢管混凝土的流动性降低越明显,其塑性黏度和屈服应力与扩展度呈线性关系,而与T500和倒塌时间呈非线性关系。

以往学者已对不同掺量下硅灰对水泥浆体的力学和流变性进行研究,而对硅灰掺量下ECC研究较少。且以往的研究多倾向于将硅灰应用于使用进口纤维的ECC中,且国产PVA纤维与硅灰的协同作用机制尚不清晰,且高粉煤灰掺量下如何通过硅灰调控流变性与力学性能的平衡仍需探索,所以使用高掺量粉煤灰掺入国产ECC中,并使用硅灰进行改性增强,分析不同硅灰替代率对国产ECC流变性能和力学性能影响,从而优化硅灰的掺量,为实际工程提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

研究选用 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥、I 级粉煤灰、SiO₂ 含量为 93.4% 硅灰和粒径为 0.106 ~ 0.212 mm 的普通石英砂作为细骨料, 长度为 12 mm, 直径为 40 μm, 抗拉强度 ≥ 1 600 MPa PVA 纤维及聚羧酸系减水剂。水泥、粉煤灰、硅灰的化学成分见表 1。

表 1 水泥、粉煤灰、硅灰主要化学成分
Table 1 The main chemical composition of cement, fly ash and silica fume /%

原材料	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃
水泥	23.53	62.55	5.78	2.55	0.83	2.56	0.88	0.22	1.10
粉煤灰	48.20	7.56	29.93	6.83	1.32	1.27	1.24	1.72	1.65
硅灰	93.40	0.92	0.55	2.66		0.58			1.48

1.2 配合比设计

为研究硅灰对国产 ECC 工作性能及力学性能的影响, 设置了 6 组不同水泥取代率 (0、2%、4%、6%、8%、10%), 粉煤灰掺量为水泥的 2.2 倍, 水胶比为 0.3, 砂胶比为 0.35, 纤维为 1.6% 的体积掺量, 减水剂掺量为水泥的 1.7%。基于以上参数, 共设置 6 组 ECC, 其配合比见表 2。

表 2 ECC 配合比
Table 2 ECC mix proportion

编号	原材料质量 (kg/m ³)						
	水泥	粉煤灰	硅灰	水	砂	减水剂	PVA 纤维
SF0	120.0	484.0	0.0	115.2	144	2.04	3
SF2	117.6	258.7	2.4	115.2	144	2.04	3
SF4	115.2	253.4	4.8	115.2	144	2.04	3
SF6	112.8	248.2	7.2	115.2	144	2.04	3
SF8	110.4	242.9	9.6	115.2	144	2.04	3
SF10	108.0	237.6	12.0	115.2	144	2.04	3

1.3 试件的制备

称取干料 (水泥、硅灰、粉煤灰、石英砂、减水剂) 放入搅拌锅, 混合均匀后加水搅拌至无结块, 加入纤维搅拌至无结团, 停止后倒入模具。脱模后, 将试块置于标准养护箱养护至相应龄期, 进行性能测试。

1.4 试验设计

胶凝材料的凝结时间测试参照 GB/T 1346—2011 《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》进行测定;

抗压试验参照 JGJ/T 70—2009 《建筑砂浆基本性能试验方法》中的单轴压缩测试方法进行测试, 抗压试件选用 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 正方体试件; 抗折试件选用 160 mm × 40 mm × 40 mm 长方体试件。

新拌砂浆流动度试验参照 GB/T 2419—2005 《水泥胶砂流动度测定方法》; 测试温度为 (25 ± 1) °C, 剪切速率范围为 0.1 ~ 100 s⁻¹, 采用稳态剪切模式进行。通过仪器可测得 ECC 的剪切应力和表观黏度, 得到剪切速率和对应剪切速率下的剪切应力绘制相关流变曲线, 随后使用宾汉姆 (Bingham) 流体模型对所绘制曲线进行拟合, 得到塑性黏度、屈服应力指标对不同硅灰掺量下的 ECC 流变性进行相关评价。

2 结果与讨论

2.1 凝结时间

由图 1 可知, 当硅灰取代水泥掺入到 ECC 中后, 硅灰掺量的增加会使得浆体初凝时间和终凝时间缩短。相较于未掺硅灰组, 当硅灰掺量为 10% 时, 初凝时间减少了 50 min, 终凝时间减少了 82 min, 各减少了 21.93%、25.95%。这主要是因为纳米二氧化硅有着较高的火山灰活性, 当更大比表面积的纳米二氧化硅颗粒代替部分水泥时, 能够加速水泥的水合反应, 使得凝结时间缩短。

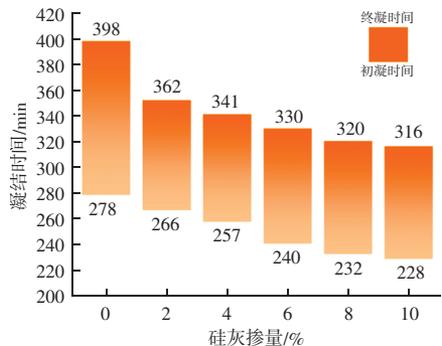


图 1 硅灰掺量对 ECC 初凝与终凝时间的影响
Fig. 1 Effect of silica fume content on initial and final setting time of ECC

2.2 抗压强度

由图 2 可知, 硅灰掺量增加对基体抗压强度提升有着良好的促进作用。因为在大粉煤灰掺量下, 未掺入硅灰 ECC 在 7、14、28 d 的龄期下抗压强度仅有 9.88、17.22、26.94 MPa, 当掺入 10% 的硅灰

材料科学

后,三个龄期抗压强度分别达到了 14.32、26.91、38.92 MPa,相较于未掺硅灰组分别提升了 45.94%、56.27%、44.47%,三个龄期的抗压强度都有着大幅度的提升。硅灰的掺入在一定程度上替代部分胶凝材料,均匀填充于水泥基复合材料孔隙之中,提高了结构整体密实度。此外因为硅灰自身固有的火山灰作用能够与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生作用,产生更多的 C-S-H 等凝胶产物使得抗压强度提高。

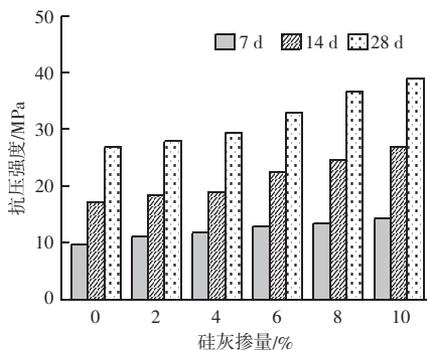


图2 不同硅灰掺量下 ECC 的抗压强度

Fig. 2 Compressive strength of ECC under different silica fume contents

2.3 抗折强度

由图3可知,抗折强度与抗压强度相似,试件抗折强度也随着硅灰掺量增加而增加。未掺入硅灰时,由于粉煤灰掺量过高而导致水化不足使得基体中胶凝材料之间的黏结界面、纤维与胶凝材料的界面黏结能力较弱,承受拉应力荷载能力较弱。在 ECC 加入硅灰后,因硅灰具有较大的比表面积,可为水化反应产物提供更多附着位点,从而促进基体水化反应更明显,水化产物分布更为均匀、密实,提升了界面之间黏结能力,抵抗荷载能力增加。未掺入硅灰时,ECC 在 7、14、28 d 的龄期下抗折强度仅有

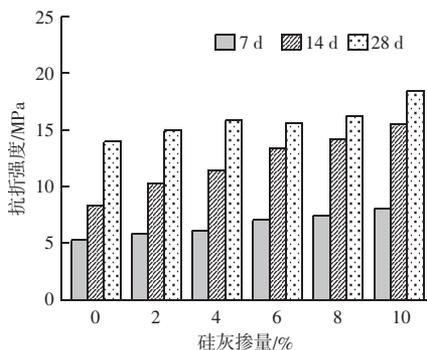


图3 不同硅灰掺量下 ECC 的抗折强度

Fig. 3 Flexural strength of ECC under different silica fume contents

5.34、8.40、14.03 MPa,当掺入 10% 的硅灰后,7、14、28 d 龄期下 ECC 的抗折强度达到了 8.13、15.62、18.58 MPa,分别提升了 52.25%、85.95%、32.5%,大幅度提升了材料的韧性。

2.4 流变性

硅灰所具备的独特火山灰活性与微集料填充作用,其颗粒尺寸、形貌及掺量的差异均会影响 ECC 的流变特性。由图4可知,随着硅灰掺量的增加,ECC 流动度呈现先上升后下降的趋势,在掺量为 2% 时流动度达到最大值 255 mm,相较于未掺硅灰组,流动度提升了 8.51%,这是因为与水泥颗粒相比,硅灰的颗粒尺寸更小并呈球型状态,更容易起到滚珠润滑作用。少量的硅灰掺量有利于流动度的提升。当硅灰替代率超过 2% 时,ECC 流动度开始下降,当硅灰掺量为 10% 时,流动度此时最小,仅为 186 mm。与水泥相比较,硅灰的比表面积更小,吸水率更大,且硅灰颗粒的比表面积增加,致使表面所需水量增多,其形貌优势不再明显,因此流动度低于未掺硅灰的浆体。

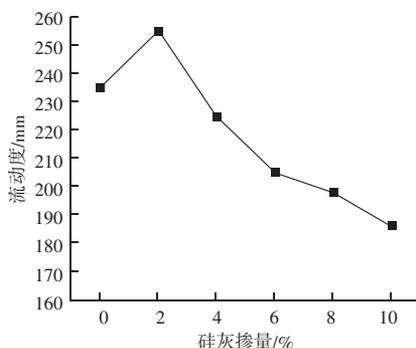


图4 不同硅灰掺量下的流动度

Fig. 4 Flowability of ECC under different silica fume contents

由图5和表3可知,掺硅灰后的 ECC 屈服剪切应力和塑性黏度值随着硅灰掺量增大而增大。相比未掺硅灰对照组 SF0,屈服剪切应力依次提升了 3.37%、15.14%、34.4%、27.55%、49.47%。塑性黏度依次提高了 21.38%、19.95%、24.42%、46.22%、57.78%。在 ECC 中,随着硅灰掺量的上升,其屈服应力不断增加。硅灰可以吸附 ECC 内的自由水,这使得 ECC 中颗粒间距缩小,进而增强分子间作用力,导致屈服应力增大。同时,硅灰的粒径远小于水泥颗粒粒径,从而有助于发挥填充作用,使得 ECC 内部结构空隙减少,自由水被寄出,接触

点增多。并且硅灰颗粒越细,比表面积越大,所需包裹颗粒的自由水越多,水泥颗粒间的静摩擦阻力随之增大,ECC 中颗粒间的相对滑动得以减小,从而使浆体的屈服应力增大。硅灰替代率越高,水泥中的填充作用越明显,屈服应力增大率随着硅灰掺量的增加而不断增大。在 ECC 中,随着硅灰替代率提升,其塑性黏度不断增加,这一现象与屈服应力不断提高的原因相似,硅灰加入会增大浆体比表面积。比表面积越大,ECC 稠度越高,浆体之间内聚力得到增强,颗粒之间的摩擦力和黏结力提高,从而导致塑性黏度增大。

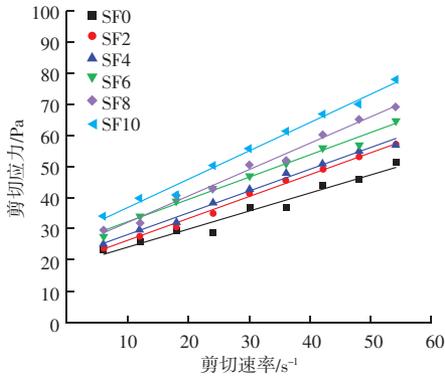


图 5 不同硅灰掺量下剪切应力 - 剪切速率 Bingham 拟合曲线

Fig. 5 Bingham fitting curves of shear stress - shear rate under different silica fume contents

表 3 Bingham 拟合后得到不同硅灰掺量下 ECC 的流变参数
Table 3 Rheological parameters of ECC under different silica fume contents obtained after bingham fitting

编号	拟合方程	屈服应力 τ_0/Pa	塑性黏度 $\eta/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	相关系数 R^2
SF0	$y = 18.7167 + 0.57667x$	18.7167	0.57667	0.99888
SF2	$y = 19.3478 + 0.70722x$	19.3478	0.70722	0.98709
SF4	$y = 21.5506 + 0.69172x$	21.5506	0.69172	0.98701
SF6	$y = 25.1561 + 0.71751x$	25.1561	0.71751	0.98998
SF8	$y = 23.8733 + 0.84322x$	23.8733	0.84322	0.99602
SF10	$y = 27.9766 + 0.90988x$	27.9766	0.90988	0.95915

3 结论

通过凝结时间试验、抗压试验、抗折试验、流变性试验研究了不同硅灰掺量对纤维增强水泥基复合材料力学性能和流变性能的影响,得出如下结论:

(1) 随着硅灰掺量增加,ECC 凝结时间逐渐缩短。硅灰的加入能有效提升 ECC 在不同养护龄期下的抗压强度和抗折强度,当硅灰掺量为 10% 时,ECC 的 7、14、28 d 抗压强度分别为 14.32、26.91、

38.92 MPa,抗折强度分别为 8.12、15.65、18.53 MPa,较未掺硅灰组有大幅提升。

(2) 在流变性方面,ECC 流动度随硅灰掺量增加呈现先上升后下降的趋势,硅灰掺量为 2% 时流动度达最大值 255 mm。硅灰的掺入可显著提高 ECC 浆体的屈服应力和塑性黏度,且随着硅灰掺量的增加,ECC 浆体屈服应力和塑性黏度整体呈上升趋势,当硅灰掺量为 10% 时,屈服应力为 27.976 6 Pa,塑性黏度为 0.909 88 Pa·s。

(3) 研究揭示了硅灰在国产 ECC 中的作用,不同硅灰掺量通过火山灰效应与微填充对力学性能的提升和对 ECC 流变性的影响,为工程中硅灰掺量的选择提供了量化参考。

参 考 文 献

- [1] 赵诗语,苏有文,张文星,等. 聚丙烯纤维和硅灰对轻骨料混凝土性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2024 (8): 57-61.
- [2] 王清梦,谢晓丽,高健,等. 硅灰和稻壳灰对竹浆纤维水泥基复合材料抗劣化性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2023 (1): 50-55.
- [3] 何华庭,李庚英,张敏,等. 硅灰掺量对 ECC 材料性能的影响研究 [J]. 广东建材, 2022, 38 (5): 7-9.
- [4] 庞建勇,杨春春,姚韦靖,等. 硅灰改性聚丙烯纤维橡胶混凝土力学试验研究 [J]. 安徽理工大学学报 (自然科学版), 2022, 42 (5): 24-30.
- [5] BHATTA D P, SINGLA S, GARG R. Experimental investigation on the effect of Nano-silica on the silica fume-based cement composites [J]. Materials Today. Proceedings, 2022, 57: 2338-2343.
- [6] 吴帅. 低二氧化硅含量硅灰对混凝土力学及耐久性能的影响 [J]. 居业, 2024 (8): 182-184.
- [7] 张露晨,李树忱,李术才,等. 硅灰粉煤灰对喷射混凝土性能影响 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2016, 46 (5): 102-109.
- [8] 陈超,孙振平. 硅灰对掺有减水剂水泥浆体性能的影响 [J]. 材料导报, 2019, 33 (14): 2348-2353.
- [9] 王洪涛,杨斌. 硅灰掺量对再生高延性水泥复合材料的力学性能和抗氯离子渗透性能的影响 [J]. 混凝土, 2025 (3): 138-141.
- [10] 陈柏琪,李振宝,石南南,等. 掺合料对陶粒泡沫混凝土流动性及强度影响 [J]. 混凝土, 2024 (10): 69-73.
- [11] 张倩倩,刘建忠,张丽辉,等. 矿物掺合料对低水胶比浆体流变性能的影响机制研究 [J]. 材料导报, 2020, 34 (22): 22054-22057, 22086.

抗冻性能均高于基准组混凝土, 200 次冻融循环时, 掺量为 30%、质量比为 2:1、3:1 混凝土质量损失、抗冲磨强度损失最小。

(3) 经冻融循环作用, 混凝土的相对抗压强度、劈裂抗拉强度、动弹性模量均逐渐减小, 且降低幅值逐渐增大; 掺量为 30%、质量比为 2:1 和掺量为 40%、质量比为 3:1 的混凝土均表现出较好的抗冻能力; 硅灰掺量为 10% 时最佳, 粉煤灰掺量大于 20%、硅灰掺量大于 10% 后会劣化抗冻能力。

参 考 文 献

- [1] 刘拼, 易廷军, 何贝贝, 等. 外掺不同煅烧工艺 MgO 膨胀剂对水工混凝土安定性的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (1): 93-96, 132.
- [2] 刘骏霓, 路建国, 高佳佳, 等. 水工混凝土冰冻害机理及抗冻性能研究进展 [J]. 长江科学院院报, 2023, 40 (3): 158-165.
- [3] 魏威. 铁尾矿粉 - 硅粉矿物掺合料对混凝土性能的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (6): 41-47.
- [4] 魏荣华, 张康健, 张志强. 冻融环境混凝土配合比优化试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2025, 21 (4): 1211-1218, 1227.
- [5] 郭东锋. 粉煤灰掺量对机制砂混凝土耐久性能影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (4): 111-115.
- [6] 倪杨洲, 张伟勤. 矿物掺合料对低水灰比再生混凝土性能影响研究 [J]. 青海大学学报, 2025, 43 (5): 83-90.
- [7] 师佳田, 褚日鹏, 赵辉, 等. 粉煤灰与硅灰对桥面铺装混凝土抗冻性能与微观观孔结构的影响 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2025, 49 (4): 904-910.
- [8] 刘佳敏, 马玉薇, 李刚. 粉煤灰对渠道用混凝土抗冻及抗冲磨性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (4): 1436-1444.
- [9] 周厚贵, 张振宇. 水工超高掺粉煤灰混凝土设计与试验研究 [J]. 水力发电学报, 2017, 36 (5): 1-9.
- [10] 赖海珍, 陆程铭, 荆慧斌, 等. 高寒地区复掺矿物掺合料水工混凝土抗冻耐久性劣化机理研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30 (2): 191-197.
- [11] 云子豪. 复掺粉煤灰硅灰对混凝土力学性能及耐久性影响的试验研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [12] 王杰, 冯玉钊. 粉煤灰取代率对花岗岩混凝土抗冻性能研究 [J]. 公路, 2022, 67 (8): 368-371.
- [13] 颜剑秋, 王华东, 车向群. 严寒地区抽水蓄能电站面板混凝土性能试验研究 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2022, 53 (增刊 2): 115-119.
- [14] 乔雨, 刘泽峰. 盐冻作用下掺粉煤灰混凝土超声波波速测强理论模型 [J]. 水电能源科学, 2019, 37 (8): 118-121.
- [15] 刘伟, 邹春霞, 薛慧君, 等. 渠道衬砌混凝土冻融风蚀耐久性能及寿命预测 [J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41 (6): 568-575.
- [12] 蒋睿, 王月华, 刘子科, 等. 高速分散对水泥基浆体流变行为的影响研究 [J]. 混凝土, 2024 (4): 94-102.
- [13] 陈昭, 蔡畅, 李福海, 等. 辅助胶凝材料对高浆骨比砂浆流变特性的影响 [J]. 混凝土, 2024 (9): 150-156.
- [14] 李正虎, 吕乐乐, 杨顺由, 等. 黄磷渣粉和硅灰对水泥浆体流变性能的影响 [J]. 新型建筑材料, 2025, 52 (2): 134-137, 143.
- [15] 关素敏, 李颖, 蓝堂伟, 等. 矿物掺合料对 C60 自密实钢管混凝土流变性的影响研究 [J]. 混凝土世界, 2023 (10): 63-66.

(上接第 51 页)