

掺粉煤灰 - 硅灰混凝土冻融性能试验研究

颜世忠¹, 施振跃²

(1. 济宁高新区王因街道办事处, 济宁 272103; 2. 山东科技大学 资源学院, 泰安 271019)

摘要: 为研究复掺粉煤灰、硅灰对水工混凝土抗冻性能的影响, 设定粉煤灰、硅灰掺量为 30%、40%, 质量比分别为 2:1、3:1、4:1, 分析了冻融循环过程中混凝土的质量损失率、相对动弹性模量、抗压强度、劈裂抗拉强度、抗冲磨强度的变化规律。结果表明: 掺粉煤灰、硅灰可提升混凝土抗压、抗拉、抗冲磨强度, 掺量为 30%、质量比为 2:1 时效果最佳; 随冻融循环次数增加, 掺粉煤灰、硅灰混凝土各项性能指标均有所下降, 其中掺量为 30%、质量比为 2:1 和 3:1 的混凝土质量损失率、抗冲磨强度损失最小, 掺量为 30%、质量比为 2:1 以及掺量为 40%、质量比为 4:1 的混凝土抗压、劈裂抗拉强度以及相对动弹性模量冻融损失最小; 建议硅灰掺量为 10%, 粉煤灰掺量宜为 20%~30%。研究成果可为混凝土配合比设计提供理论依据。

关键词: 粉煤灰; 硅灰; 混凝土; 冻融循环; 抗冻性能; 劣化损失

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2026) 01-0052-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.01.010

Application of Fly Ash and Silica Fume Concrete in Hydraulic Engineering under Freeze - Thaw Cycling

YAN Shizhong¹, SHI Zhenyue²

(1. Wangyin Sub - district Office Ji'ning High - tech Zone, Ji'ning 272103, China; 2. College of Resources, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019, China)

Abstract: Concrete structures in hydraulic engineering are susceptible to damage from prolonged freeze - thaw cycles, leading to a shortened service life. To investigate the effect of combined fly ash and silica fume additions on the freeze - thaw resistance of hydraulic concrete, fly ash and silica fume were added at 30% and 40% by mass, respectively, with mass ratios of 2:1, 3:1, and 4:1. The variation patterns of concrete mass loss rate, relative dynamic modulus of elasticity, compressive strength, splitting tensile strength, and abrasion resistance during freeze - thaw cycles were analysed. Results indicate that fly ash and silica fume enhance concrete compressive, tensile, and abrasion resistance, with optimal performance achieved at 30% fly ash content and a 2:1 mass ratio. With increasing freeze - thaw cycles, all performance indicators of fly ash and silica fume concrete decreased. Among these, concrete with 30% fly ash/silica fume at mass ratios of 2:1 and 3:1 exhibited the smallest mass loss rate and abrasion resistance loss. Concretes with 30% fly ash at a 2:1 mass ratio and 40% fly ash at a 4:1 mass ratio exhibited the smallest losses in compressive strength, splitting tensile strength, and relative dynamic modulus of elasticity during freeze - thaw cycles. It is recommended that fly ash content be maintained between 20% and 30%, with silica fume at 10%.

项目来源: 国家自然科学基金青年基金 (52404134)。

作者简介: 颜世忠 (1968—), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 水利水电工程。

通信作者: 施振跃 (1989—), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 安全科学与工程。

收稿日期: 2025 - 11 - 06

These findings provide theoretical reference for concrete mix design in hydraulic engineering projects. The research results can provide a theoretical basis for concrete mix design.

Key words: fly ash; silica fume; concrete; freeze - thaw cycle; frost resistance; deterioration loss

0 引言

混凝土作为工程中应用最广泛的材料,其长期性能与耐久性直接决定着水工建筑物的安全服役寿命与长期运维成本^[1]。值得注意的是,我国严寒地区的混凝土结构常年承受剧烈的冻融循环作用,导致混凝土的性能劣化、寿命缩短^[2]。因此,研发并应用高抗冻性能的混凝土材料,已成为当前水利工程建设中的重要课题。

为提升混凝土的抗冻耐久性,掺入矿物掺合料^[3]被视为一种行之有效且符合绿色建材发展理念的技术路径。其中,粉煤灰、硅灰作为工业副产品,其资源化替代水泥不仅可改善混凝土的微观结构与宏观性能^[4-5],也符合国家“双碳”战略。倪杨洲等^[6]研究了硅灰对低水灰比再生混凝土抗冻性能影响,结果认为硅灰可提升早期强度,但会劣化长期冻融环境下强度;师佳田等^[7]研究了单掺或复掺粉煤灰、硅灰对桥面铺装混凝土抗冻融循环能力的影响,得到了掺 10% 硅灰、14% 粉煤灰时抗冻性能效果最佳;刘佳敏等^[8]研究认为,粉煤灰掺量不大于 20% 时,均可提升渠道用混凝土抗冻性能;周厚贵等^[9]研究了水工超高掺量粉煤灰混凝土设计方案,获得了粉煤灰掺量为 35% 的混凝土抗冻性能仍有提升;赖海珍等^[10]研究了多种矿物掺量对水工混凝土抗冻耐久性的影响,结果认为稻壳灰增强最高,硅灰次之,粉煤灰最弱;云子豪^[11]研究了掺粉煤灰、硅粉对混凝土抗冻性能影响,结果表明粉煤灰掺量超过 30% 后抗冻性能下降,复掺效果优于单掺;王杰等^[12]研究了粉煤灰增强花岗岩混凝土抗冻性能影响规律,掺量为 20% 时抗冻性能最优,300 次冻融循环质量损失仅为 7%;颜剑秋等^[13]从优化粉煤灰掺量、水灰比、外加剂掺量改善水工混凝土抗冻性能,获得了最佳配合比;乔雨等^[14]分析了粉煤灰水工混凝土抗盐冻循环性能劣化规律,认为提高粉煤灰掺量会降低抗盐冻循环性能;刘伟等^[15]研究了粉煤灰、硅粉对渠道衬砌混凝土冻融风蚀能力影响,结果表明掺 15% 粉煤灰、4% 硅粉混凝土服役寿命提升 1.3 倍。

综上所述表明,单掺或复掺粉煤灰、硅灰均可提高混凝土的抗冻冻融循环能力,但最佳掺量结果并不一致,且二者复掺时最佳质量比尚不清晰。基于此,开展了复掺粉煤灰与硅灰为 30%、40%,质量比为 2:1、3:1、4:1 时混凝土的冻融循环试验,旨在获得高抗冻、长寿命水利工程用混凝土粉煤灰、硅灰的最佳掺量。研究成果可为混凝土配合比设计提供理论依据。

1 实验

1.1 原材料

胶凝材料: P·O 42.5 普通硅酸盐水泥、I 级低钙粉煤灰、优质硅灰。胶凝材料颗粒级配曲线如图 1 所示,主要化学成分见表 1。

骨料: 粗骨料采用 5~20 mm 连续级配石灰岩碎石,细骨料采用河砂,细度模数 2.3,含泥量不大于 2%。

聚羧酸高效减水剂,减水率 24%,调整掺量使混凝土拌合物坍落度不小于 160 mm,拌合水采用自来水。

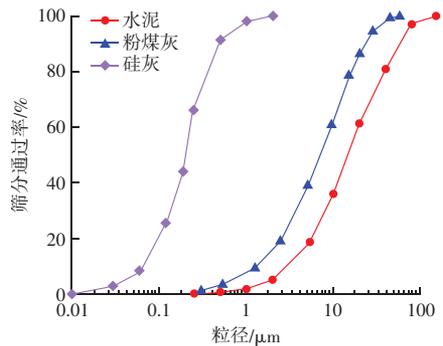


图 1 胶凝材料颗粒级配曲线

Fig. 1 Particulate size distribution curve of cementitious materials

表 1 胶凝材料主要化学成分

Table 1 Main chemical components of cementitious materials /%

材料	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O
水泥	19.40	61.80	7.10	2.60	0.90	2.70	0.50
粉煤灰	66.70	2.40	22.50	4.20	0.40	0.70	1.10
硅灰	91.60	0.45	0.67	0.53	0.18	1.16	0.37

1.2 配合比设计

固定胶凝材料用量为 480 kg/m³,水灰比为 0.35;其中粉煤灰、硅灰总掺量分别为胶凝材料的 30%、40%,粉煤灰与硅灰质量比分别为 2:1、3:1、

材料科学

4:1, 共制备 7 组混凝土试件, 基准组 F00 试件不掺粉煤灰、硅灰。配合比见表 2。

表 2 混凝土配合比
Table 2 Concrete mix proportion / (kg/m³)

编号	水泥	粉煤灰	硅灰	砂	碎石	水
F00	480			680	1 020	168
F30-2	336	96.0	48.0	680	1 020	168
F30-3	336	108.0	36.0	680	1 020	168
F30-4	336	115.2	28.8	680	1 020	168
F40-2	288	128.0	64.0	680	1 020	168
F40-3	288	144.0	48.0	680	1 020	168
F40-4	288	153.6	38.4	680	1 020	168

1.3 试验方法

混凝土冻融循环试验按照 SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》(以下简称规程)中快速冻融试验方法进行。试验均采用尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm 立方体试件, 将标准养护条件下养护 24 d 的混凝土试件放入 (20 ± 2) °C 水中养护 4 d, 取出试件, 擦干表面水分并称重, 然后开展冻融循环试验, 共进行 200 次冻融循环试验; 每 25 次冻融循环后取出试件称重, 并采用动弹性模量仪测量动弹性模量, 每组试验进行 3 次, 取结果平均值。当试件质量损失率超过 5% 时停止冻融循环试验。

开展冻融循环为 0、50、100、150、200 次时抗压强度、劈裂抗拉强度试验, 试验采用电液伺服压力机, 力学强度试验方法按照《规程》进行, 每组试验进行 3 次, 取结果平均值。

开展冻融循环为 100、200 次时抗冲磨试验, 试验采用《规程》中圆环法, 将试件仪器采用混凝土抗冲刷试验机进行 30 min 冲磨, 计算混凝土抗冲磨强度, 每组试件进行 3 次, 取结果平均值。

2 结果与分析

2.1 质量损失率

由图 2 可知, 冻融循环 50 次时, 混凝土表现为吸水状态而导致质量增加; 随冻融循环次数增加, 冻胀应力作用对混凝土造成的损伤逐渐增大, 混凝土表面的浆体材料与骨料逐渐从基体剥离, 导致质量损失逐渐增大。基准组 F00 试件质量损失增长最快, 在 125 次冻融循环时质量损失达到 4.7%, 150 次冻融循环时质量损失超过 5%。掺入粉煤灰、硅灰后混凝土质量损失相比基准组试件均减小, 掺量为 30% 的 F30-2 试件质量损失最小, F30-3 试件居

中, 200 次冻融循环后质量损失分别为 3.3%、3.7%; F30-4 试件质量损失最大, 175 次冻融循环时质量损失即达到 5%。而在粉煤灰、硅灰掺量为 40% 时, F40-3 试件质量损失最小, 200 次冻融循环时质量损失为 4.4%; F40-2 试件质量损失最大, 在 150 次冻融循环时质量损失即达到 5%, F40-4 试件在 200 次冻融循环后质量损失超过 5%。综上分析表明, 粉煤灰、硅灰掺量为 30% 混凝土抗冻能力优于掺量为 40%, 粉煤灰、硅灰掺量分别为 20%、10% 的 F30-2 试件抗冻能力最佳, 增加粉煤灰掺量, 降低硅灰掺量抗冻能力降低; 而掺量为 40% 时, 粉煤灰、硅灰掺量分别为 30%、10% 的 F40-3 试件抗冻能力最大, 增大硅灰掺量为 13.3% 的 F40-2 试件抗冻能力反而降低, 而硅灰掺量为 6% 的 F30-4 试件抗冻能仅略高于 F40-2 试件。这表明硅灰掺量过高或过低时均会劣化混凝土抗冻性能, 掺量为 10% 对抗冻能力贡献最佳, 粉煤灰掺量超过 20% 后, 随掺量增加混凝土质量损失增大。混凝土的质量损失源于表面浆体和砂浆剥落, 增大粉煤灰掺量会延缓胶凝材料水化反应, 导致早期强度降低引起质量损失增加; 掺入硅灰可与水泥快速反应, 生成大量 C-S-H 凝胶而提高早期强度, 由于硅灰的高比表面积特性, 导致其吸水率高, 高掺量时抑制水化反应进行, 降低基体强度而导致质量损失增大。

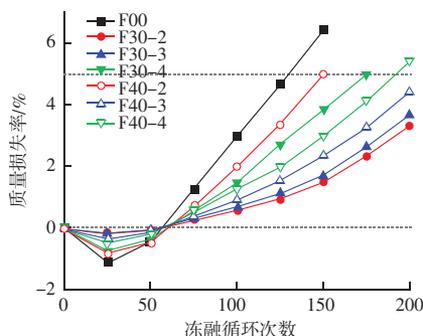


图 2 质量损失率随冻融循环变化曲线

Fig. 2 Mass loss rate variation curve with freeze-thaw cycles

2.2 相对动弹性模量

由图 3 可知, 掺粉煤灰、硅灰混凝土的相对动弹性模量经冻融循环次数增加而逐渐减小, 0~100 次循环过程中相对动弹性模量值降低较为缓慢, 之后随冻融循环次数增加, 相对动弹性模量降幅增加较为明显; 基准组 F00 试件的相对动弹性模量降幅最

快, 在 150 次冻融循环时已达到 68.6%, 而掺入粉煤灰、硅灰的混凝土相对动弹性模量值均高于基准组。各组试件经 200 次冻融循环后相对动弹性模量大小为: F30-2 > F40-3 > F30-3 > F40-4 > F30-4 > F40-2, 各组试件相对动弹性模量分别为 74.0%、70.1%、64.3%、60.1%、54.9%、52.7%。由此可见, F30-2 试件相对动弹性模量最大, 其次为 F40-3 试件。混凝土相对动弹性模量变化源于基体内部孔隙结构改, 适当硅灰掺量时, 凭借其极高火山灰活性和超细粒径, 能够大幅细化混凝土的孔隙结构, 提高基体密实度, 使内部结构难以被冻融循环作用破坏, 故 F30-2、F40-3 的相对动弹性模量最高; 粉煤灰具有微集料效应特性, 同样能够有效填充孔隙, 提高基体密实程度, 减少外部水分入侵而降低冻胀力破坏, 故掺量为 30% 粉煤灰掺量时混凝土仍具有较高相对动弹性模量。

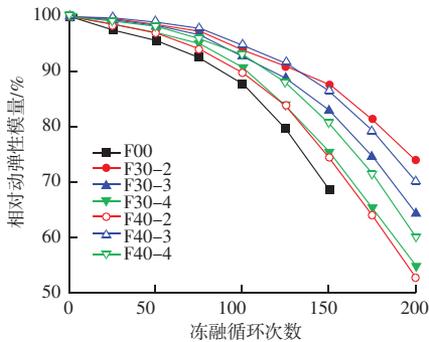


图3 相对动弹性模量随冻融循环变化曲线

Fig. 3 Curve of relative dynamic modulus variation with freeze-thaw cycles

2.3 抗压强度

由图4可知, 未冻前掺入粉煤灰、硅灰的混凝土抗压强度相比基准组 F00 试件均有增大, F30-2、F30-3、F30-4、F40-2、F40-3、F40-4 试件抗压强度分别为 57.8、53.4、50.4、49.6、56.9、52.9 MPa, 相比基准组分别提高了 23.5%、14.1%、7.7%、6.0%、21.6%、13.1%; 由此可见, 粉煤灰、硅灰的掺量与质量比改变均会影响混凝土的抗压强度, 掺量为 30%、粉煤灰与硅灰质量比为 2:1 时抗压强度提升最大。

各组试件抗压强度随冻融循环次数增加而降低, 且降低幅值逐渐增大; 基准组 F00 试件前 50 次冻融循环抗压强度降幅较小, 之后抗压强度近似呈线性

减小, 至 200 次冻融循环抗压强度降低至 25.3 MPa, 降幅达 45.9%; F30-2 与 F40-3 试件前 100 次冻融循环抗压强度损失值较小, 100 次冻融循环后抗压强度降幅逐渐增大, 200 次冻融循环时抗压强度分别损失了 24.1%、25.3%, 相比其他各组抗冻性能最强; F30-3、F30-4、F40-2、F40-4 试件 200 次冻融循环时抗压强度损失分别为 32.0%、39.1%、37.3%、34.1%。这说明两种明粉煤灰、硅灰掺量下, 硅灰掺量为 10% 的试件抗冻能力最佳; 混凝土的浆体强度和基体密实程度决定了其抗压强度, 硅灰的高火山灰活性可迅速消耗强度较低的水泥水化氢氧化钙, 反应生成强度高 C-S-H 凝胶, 增强浆体包裹骨料强度, 硅灰同样具有更细小的颗粒, 能充填基体中微小孔隙, 提高基体密实程度; 低掺量硅灰时难以发挥充填效应, 而高掺量硅灰时, 因其吸水率大而抑制水化反应进行, 导致浆体强度降低, 故 10% 硅灰掺量时表现最佳效应。最佳硅灰掺量时, 提高粉煤灰掺量对抗冻影响不显著, 但低硅灰掺量时增大粉煤灰掺量混凝土抗冻性能显著降低, 这是由于粉煤灰的火山灰反应较为滞后, 28 d 龄期难以充分参与水化反应, 故高掺量时抗冻性能出现下降; 适量的粉煤灰掺量, 可充分发挥其火山灰效应和微集料效应, 改善混凝土微观结构, 添补水泥水化留下的微孔隙, 减小外部水分入侵, 提高混凝土抗冻性能。

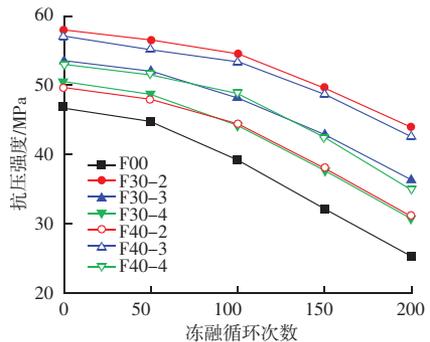


图4 抗压强度与冻融循环次数变化曲线

Fig. 4 Compressive strength vs. number of freeze-thaw cycles curve

2.4 劈裂抗拉强度

由图5可知, 未冻前基准组 F00 试件劈裂抗拉强度为 5.5 MPa, 掺入粉煤灰、硅灰的 F30-2、F30-3、F30-4、F40-2、F40-3、F40-4 试件的劈裂抗拉强

材料科学

度相比基准组 F00 试件分别提高了 17.2%、13.3%、8.4%、7.3%、19.9%、11.8%；由此可见，掺入粉煤灰、硅灰同样可提高混凝土的劈裂抗拉强度，粉煤灰掺量为 20%、30%，硅灰掺量为 10% 的 F30-2、F40-3 试件抗拉性能最好。

随冻融循环次数增加，不同粉煤灰、硅灰掺量的混凝土劈裂抗拉强度逐渐降低，与未冻前相比，F00、F30-2、F30-3、F30-4、F40-2、F40-3、F40-4 试件在 200 次冻融循环时劈裂抗拉强度分别下降了 39.4%、20.3%、27.9%、32.5%、37.6%、24.2%、29.2%；可见，基准组 F00 试件劈裂抗拉强度降幅最高，F30-2 试件受冻融循环作用抗拉强度下降最小，F40-3 试件未冻前劈裂抗拉强度最大，200 次冻融循环后抗拉强度已低于 F30-2 试件，且其抗拉强度损失超过了 F30-3 试件，这说明高粉煤灰掺量时会降低混凝土冻融环境下的抗拉强度，但其最终劈裂抗拉强度仅小于 F30-2 试件 2.7%；从工程经济性角度考虑，可选择粉煤灰掺量为 30%、硅灰掺量为 10% 的配合比。

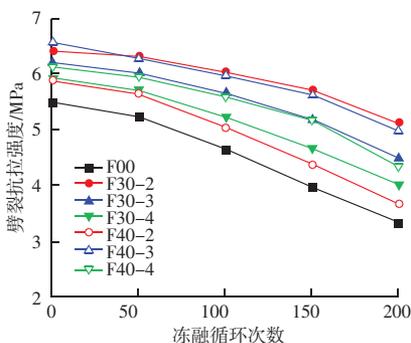


图5 劈裂抗拉强度与冻融循环次数变化曲线
Fig. 5 Variation curve of splitting tensile strength with freeze-thaw cycle count

2.5 抗冲磨性能

由图6可知，未冻融循环时，基准组 F00 试件抗冲磨强度为 $8.7 \text{ h}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ ，掺入粉煤灰、硅灰后混凝土抗冲磨强度均有所提高，与基准组 F00 试件相比，F30-2、F30-3、F30-4、F40-2、F40-3、F40-4 试件分别提高了 47.1%、42.1%、16.3%、8.8%、32.4%、28.8%；F30-2 试件抗冲磨强度增长最为显著，粉煤灰掺量增加至 22.5% 的 F30-3 试件抗冲磨强度仅略有减小。经 100 次冻融循环作用，基准组 F00 试件抗冲磨强度降低了 16.3%，而 F30-2、

F30-3、F30-4、F40-2、F40-3、F40-4 试件的抗冲磨强度分别降低了 7.6%、8.7%、13.6%、15.3%、10.1%、10.7%；同样经 200 次冻融循环作用，F00、F30-2、F30-3、F30-4、F40-2、F40-3、F40-4 试件的抗冲磨强度相比未冻融循环时分别降低了 40.8%、22.8%、24.2%、31.4%、34.2%、26.6%、27.9%。上述分析表明，掺入适量粉煤灰、硅灰同样可减小混凝土经冻融循环作用后的抗冲磨强度损失，粉煤灰掺量为 20%，硅灰掺量为 10% 时经冻融循环后抗冲磨强度损失最小，增加粉煤灰掺量会降低混凝土抗冲磨性能；这是由于混凝土的抗冲磨性能取决于其表面层强度，因为粉煤灰火山灰效应弱，高掺量时未二次水化的粉煤灰颗粒仅以填充作用存在混凝土中，导致水化产物 C-S-H 凝胶数量减少，劣化了浆体与骨料之间的黏结强度，导致混凝土更易于被冲刷磨损破坏。

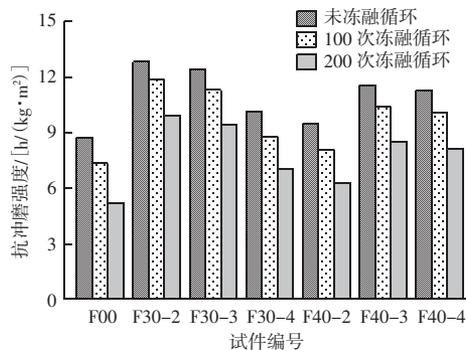


图6 混凝土的抗冲磨强度
Fig. 6 Abrasion resistance of concrete

3 结论

为获得粉煤灰、硅灰掺量和质量比对工程用混凝土抗冻性能的影响，研究了掺量为胶凝材料 30%、40%，粉煤灰、硅灰质量比为 2:1、3:1、4:1 时，混凝土在 200 次冻融循环过程中性能变化规律，得出以下结论：

(1) 未冻融循环时，改变粉煤灰、硅灰的掺量与质量比均会影响混凝土的强度性能，粉煤灰、硅灰掺量 30%、质量比为 2:1、3:1 的混凝土抗冲磨性能更佳，掺量为 30%、质量比为 2:1 和掺量为 40%、质量比为 3:1 的混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度性能最好。

(2) 复掺粉煤灰、硅灰为 30%、40% 的混凝土

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细观孔结构的影响 [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. 复掺粉煤灰硅粉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)