

粉煤灰-钢渣砂对混凝土性能影响研究

罗玉艳¹, 武刚², 王丹³, 李亚然³

(1. 云南开放大学, 昆明 650000; 2. 云南省公路科学技术研究院, 昆明 650000;
3. 石家庄铁路职业技术学院, 石家庄 050061)

摘要: 为获得大掺量钢渣砂 (SS)、粉煤灰 (FA) 对混凝土性能的影响, 通过采用 SS、FA 替代河砂和水泥 (替代率均为 25%、50%) 制备混凝土试件, 开展了抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量、抗水渗透性、抗氯离子渗透性、干缩变形试验, 系统分析了 SS 单掺及与 FA 复掺对混凝土力学及耐久性能的影响规律。结果表明: 随 SS 掺量增加, 混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量、抗水渗透性能和抗氯离子渗透性能增大; 随 FA 掺量增加, 混凝土力学性能有所降低, 抗水渗透性能和抗氯离子渗透性能显著改善; 掺 SS 会降低混凝土早期干缩变形、但后期干缩增大, 掺 FA 可有效缓解该趋势, 并显著降低总干缩变形; 掺 50%FA+50%SS 的混凝土具有较优的力学与耐久性能。研究成果可为固废资源在混凝土中应用提供配合比设计依据。

关键词: 粉煤灰; 钢渣砂; 混凝土; 力学强度; 耐久性能

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 03-0064-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.011

Study on the Effect of Fly Ash-Slag Sand on Concrete Properties

LUO Yuyan¹, WU Gang², WANG Dan³, LI Yaran³

(1. Yunnan Open University, Kunming 650000, China;

2. Yunnan Provincial Highway Science and Technology Research Institute, Kunming 650000, China;

3. Shijiazhuang Institute of Railway Fechnology, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: To investigate the effects of high-volume steel slag sand (SS) and fly ash (FA) on concrete properties, test specimens were prepared by replacing river sand and cement with SS and FA (at replacement rates of 25% and 50%, respectively). Tests conducted included compressive strength, splitting tensile strength, elastic modulus, water permeability, chloride ion permeability, and dry shrinkage deformation. A systematic analysis was conducted on the influence patterns of single SS addition and combined SS-FA addition on concrete's mechanical and durability properties. Results indicate: As SS content increases, concrete exhibits enhanced compressive strength, splitting tensile strength, elastic modulus, water permeability resistance, and chloride ion permeability resistance. As FA content increases, concrete's mechanical properties slightly decrease, while water permeability resistance and chloride ion permeability resistance significantly improve. SS addition reduces early-stage dry shrinkage deformation but increases late-stage shrinkage, while FA effectively mitigates this trend and

项目来源: 云南省现代综合交通数字技术创新中心 (202405AK340003); 公路工程混凝土收缩开裂的影响因素研究 (23YN0U49)。

作者简介: 罗玉艳 (1986—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 建筑材料、工程地质、土木结构及试验检测。

通信作者: 武刚 (1991—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 公路养护管理、检测、设计。

收稿日期: 2026-01-07

significantly reduces total dry shrinkage deformation; concrete with 50% FA + 50% SS exhibits superior mechanical and durability properties. The research findings may provide a basis for mix design in the application of solid waste resources within concrete.

Key words: fly ash; steel slag sand; concrete; mechanical strength; durability performance

0 引言

混凝土是我国基础设施建设中应用最广泛的建筑材料,其年消耗量巨大,相关环境影响与资源压力日益凸显^[1];水泥、河砂作为混凝土的主要原材料,在生产与开采过程中均面临严峻的可持续性问题。采用工业固废(如粉煤灰、钢渣等)替代部分水泥与河砂制备环保型混凝土,已成为推动建筑业向绿色、低碳方向转型,实现可持续发展的关键路径^[2-3]。

钢渣相比河砂具有更高力学强度,且其含有的钢渣粉具有一定火山灰活性,将其加工为钢渣砂替代河砂已引起研究者广泛关注^[4-5]。王敬东等^[6]、贺希茂等^[7]采用正交试验方法研究了钢渣细骨料、粗骨料等因素对混凝土力学强度影响,结果表明掺入适量钢渣骨料可显著提高混凝土强度,但掺量不宜超过 60%;王辉等^[8]采用钢渣微珠细骨料制备混凝土,结果表明钢渣微珠对提高抗压强度、抗折强度有促进作用,35%替代率较佳;王鑫等^[9]采用钢渣作为矿物掺料改善机制砂混凝土性能,结果表明复掺钢渣可增强机制砂混凝土性能,掺量为 10%时效果最佳;王成刚等^[10]研究了掺钢渣粗、细骨料对混凝土力学及耐久性能影响,结果表明提高钢渣掺量,力学强度增强、抗碳化及抗氯离子渗透性能减弱;薛刚等^[11]研究了钢渣细骨料混凝土抗盐溶液侵蚀性能,结果表明,掺 30%钢渣细骨料混凝土的抗侵蚀性能优于普通混凝土,复掺粉煤灰可进一步增强其抗侵蚀能力。粉煤灰是优质的火山灰材料,是混凝土中应用最广泛的矿物掺和料,部分学者关注了双掺粉煤灰、钢渣对混凝土性能的影响;邱胜强等^[12]、汪杰等^[13]制备了掺钢渣粉、粉煤灰的水泥砂浆试件,分析了掺量变化对力学强度影响规律,并从微观角度影响机理,结果表明掺 15%钢渣粉+25%粉煤灰效果较佳,复合掺量不宜超过 50%;王冬魁等^[14]研究了钢渣、粉煤灰稳定再生碎石的性能演变,钢渣和粉煤灰掺量分别为 50%、16%时力学性能最佳,

掺入粉煤灰可显著降低因掺入钢渣引起的干缩变形;李瞳等^[15]开展了粉煤灰、钢渣骨料替代率对水泥基材料性能的影响试验,结果表明掺入钢渣增强了抗渗和力学强度,促进了粉煤灰和水泥胶凝体系的水化反应。

钢渣砂作为细骨料部分替代河砂对混凝土性能具有促进作用,且其含有的活性成分还可促进粉煤灰二次水化,但关于大掺量粉煤灰和钢渣砂协同对混凝土性能的影响研究尚不充分。为此,采用钢渣砂、粉煤灰分别替代河砂和水泥,研究了二者掺量变化对混凝土力学强度、抗渗水性能、抗氯离子渗透性能、干缩变形的影响规律,旨在为固废资源在混凝土中的高效利用提供配合比设计依据。

1 材料与方法

1.1 原材料

P·O 42.5 普通硅酸盐水泥 (OPC), 中值粒径 17.4 μm , 比表面积为 338 m^2/kg , 比重为 3.2; I 级低钙粉煤灰 (FA), 中值粒径 28.6 μm , 比表面积为 304 m^2/kg , 比重为 2.1; OPC、FA 粒径分布曲线如图 1 所示。细骨料: 钢渣砂 (SS)、天然河砂, 细度模数为 2.7, 密度分别为 2.7、2.6 g/cm^3 , 吸水率分别为 2.2%、2.7%; 粗骨料采用石灰岩碎石, 粒径区间为 4.75~20 mm, 密度为 2.4 g/cm^3 。OPC、FA、SS 化学成分见表 1。聚羧酸醚基高效减水剂, 减水率不小于 25%, 拌合水采用自来水。

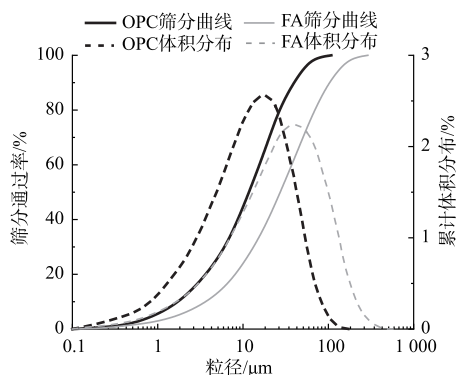


图 1 OPC、FA 径分布曲线

Fig. 1 OPC and FA diameter distribution curves

材料科学

表 1 OPC、FA、SS 主要化学成分
Table 1 Main chemical components of OPC, FA, and SS /%

化学成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O
OPC	62.1	22.6	5.2	4.3	2.7	0.2	0.9
FA	1.6	67.5	24.4	3.8	0.4	0.1	0.7
SS	33.6	31.7	18.9	0.8	6.1	0.8	6.5

1.2 试验方案

钢渣细骨料混凝土配合比见表 2，FA 替代 OPC 质量分数分别为 25%、50%，SS 替代河砂质量分数分别为 25%、50%，基准组 S0 不掺 FA 和 SS，共计 9 组试件。水灰比为 0.4，减水剂掺量为胶凝材料的 1%。

表 2 钢渣细骨料混凝土配合比
Table 2 Mix proportion of steel slag fine aggregate concrete / (kg/m³)

编号	OPC	FA	SS	河砂	碎石	水
S0	420			730.0	1 070	168
S25	420		182.5	547.5	1 070	168
S50	420		365.0	365.0	1 070	168
F25S0	315	105		730.0	1 070	168
F25S25	315	105	182.5	547.5	1 070	168
F25S50	315	105	365.0	365.0	1 070	168
F50S0	210	210		730.0	1 070	168
F50S25	210	210	182.5	547.5	1 070	168
F50S50	210	210	365.0	365.0	1 070	168

按照各组试件配合比将原材料投入倾斜式混凝土搅拌机，搅拌 4 min，使混合料充分混合均匀；将混合料分层浇筑至模具中，采用振动台对模板外表面施加振动，将混合料振捣密实后采用抹刀刮平表面，静置 24 h 后脱模，将试件放入标准养护室养护。

1.3 试验方法

根据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》开展混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量试验。抗压强度试验试件养护龄期分别为 7、28、90、180 d，劈裂抗拉强度和弹性模量试验试件养护龄期分别为 28、90 d。力学强度试验采用 YDW-300 型伺服压力试验机，抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量试验加载速率分别为 0.20、0.03、0.25 MPa/s。

依据 GB/T50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》开展混凝土的干缩变形、抗氯离子渗透性能、抗水渗透性试验。干缩变形试验采用非接触法，测量环境温度为 23 ℃、相对湿度为 65%，采用千分表读取 90 d 龄期内的干缩应变。采

用 RCM 法进行抗氯离子渗透性能试验，试件养护龄期分别为 28、90 d。采用渗水高度法进行抗水渗透性试验，试件养护龄期分别为 28、90 d，对试件施加 1.2 MPa 的恒定水压 72 h，测量渗水深度。

2 结果与讨论

2.1 力学性能分析

2.1.1 抗压强度

由图 2 可知，各组混凝土试件的抗压强度随 SS 掺量增加呈增大趋势，180 d 龄期时 S0、S25、S50 试件的抗压强度分别为 44.9、48.2、53.1 MPa，与基准组 S0 试件相比，SS 掺量分别为 25%、50% 时抗压强度分别增长了 7.3%、18.3%；可见，采用 SS 替换河砂可提高混凝土的抗压强度，且随 SS 掺量增加，抗压强度增幅增大。与 7 d 龄期抗压强度相比，S0、S25、S50 混凝土试件的抗压强度在 28 d 分别增长了 25.6%、27.8%、30.2%，90 d 分别增长了 39.2%、47.1%、48.8%，180 d 分别增长了 45.3%、54.5%、57.1%；这表明混凝土的抗压强度发展主要集中于 7~28 d，28~90 d 抗压强度增幅显著减小，90~180 d 增长小于 10%。SS 骨料呈烧结陶瓷特性，颗粒强度高于河砂，另外 SS 中含有活性硅铝元素，可消耗水泥水化氢氧化钙，生成额外的 C-（A）-S-H 凝胶，故掺 SS 的 S25、S50 试件随养护龄期增长抗压强度及抗压强度增幅高于 S0 试件。

掺入 FA 后混凝土的 7、28 d 抗压强度有所降低，抗压强度在 7~90 d 龄期内均具有显著发展；FA 掺量为 25%，与未掺 FA 试件相比，3 种 SS 掺量的试件 7 d 抗压强度约降低 29%，而 90 d 抗压强度仅约降低 2%，至 180 d 抗压强度略超过未掺 FA 试件；FA 掺量为 50%，与未掺 FA 试件相比，3 种 SS 掺量的试件 7 d 抗压强度约降低 47%，而 90、180 d 抗压强度约分别降低 15%、8%。高掺量 FA 混凝土早期强度发展非常低，这是由于 FA 掺量增加稀释了水泥，延缓了水泥早期水化反应；随养护龄期增长，FA 中的活性硅铝成分与水泥水化产物进行二次水化反应，形成的额外胶凝材料是混凝土后期强度增长的主要因素，另外，FA 球形颗粒形态具有良好的集料效应，可提高混凝土密实程度，故掺入 25%FA 时混凝

土的抗压强度未见削弱, 掺 50%FA 时混凝土的抗压强度仅约降低 8%。

F50S0、F50S25、F50S50 试件 90 d 抗压强度分别为 36.3、39.6、44.3 MPa, 相比 180 d 抗压强度分别低了 10.5%、11.6%、11.7%; 这表明掺 50%FA 的混凝土养护至 90 d 时抗压强度约达到 180 d 的 90%, F50S50 试件抗压强度等级已达到 C40 水平。F50S0、F50S25、F50S50 试件相比未掺 FA 的 S0、S25、S50 试件, 抗压强度分别降低了 10.7%、8.3%、6.8%, 这说明掺入 SS 可适当恢复因掺入 FA 引起抗压强度损失。

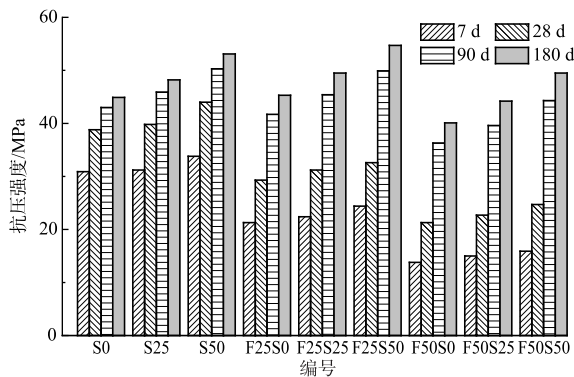


图2 不同SS、FA掺量混凝土抗压强度
Fig. 2 Compressive strength of concrete with different SS and FA content

2.1.2 劈裂抗拉强度

由图3可知, 混凝土的劈裂抗拉强度随SS掺量增加而增大, 随FA掺量增加而减小。未掺FA时, 与S0试件相比, SS掺量分别为25%、50%时90 d劈裂抗拉强度分别增长了9.7%、17.7%; FA掺量为25%时, 与F25S0试件相比, SS掺量分别为25%、50%时90 d劈裂抗拉强度分别增长了9.6%、18.1%; FA掺量为50%时, 与F50S0试件相比, SS掺量分别为25%、50%时90 d劈裂抗拉强度分别增长了15.6%、23.3%; 可见, 掺25%FA对SS增强劈裂抗拉强度几乎无影响, 掺50%FA可提高SS对劈裂抗拉强度发展的效果。与未掺FA的S0、S25、S50试件相比, F25S0、F25S25、F25S50试件劈裂抗拉强度分别降低了5.2%、5.3%、4.9%, F50S0、F50S25、F50S50试件劈裂抗拉强度分别降低了21.0%、18.2%、13.1%; 可见, 钢渣砂对降低50%

FA掺量的劈裂抗拉强度损失更显著。S0、S25、S50试件由28~90 d劈裂抗拉强度分别增强了3.5%、8.3%、11.1%; F25S0、F25S25、F25S50试件由28~90 d劈裂抗拉强度分别增强了31.5%、37.8%、39.8%; F50S0、F50S25、F50S50试件由28~90 d劈裂抗拉强度分别增强了59.4%、67.9%、69.4%; 这表明掺入SS后可提高混凝土长龄期的劈裂抗拉强度, 而FA降低了28 d早龄期时的劈裂抗拉强度, 在90 d长龄期时劈裂抗拉强度又具有较大发展。SS相比河砂其表面含有一定的火山灰活性成分, 与水泥通过水化反应生成的胶凝材料黏附于骨料结构表面, 增强了骨料界面过渡区的强度, 由此增强了混凝土劈裂抗拉强度; 粉煤灰的集料填充效应和火山灰反应对抗压强度具有一定增强效果, 但高掺量时因水泥掺量减少会劣化界面过渡区强度, 进而降低了混凝土劈裂抗拉强度。

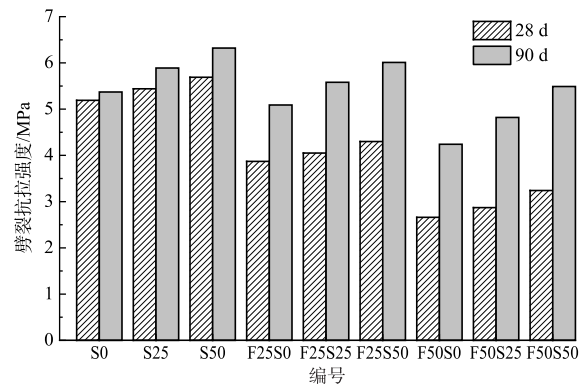


图3 不同SS、FA掺量混凝土劈裂抗拉强度
Fig. 3 Splitting tensile strength of concrete with different SS and FA content

2.1.3 弹性模量

由图4可知, S0、S25、S50、F25S0、F25S25、F25S50试件90 d弹性模量差异性较小, 但掺25%FA使混凝土28 d弹性模量降低了约8%; 与基准组S0试件相比, S25、S50试件90 d弹性模量分别增长了2.2%、4.7%; 与F25S0试件相比, F25S25、F25S50试件90 d弹性模量分别增长了5.3%、8.6%; 这表明随SS掺量增加, 弹性模量呈增大趋势。掺入50%FA使混凝土弹性模量显著降低, 与未掺FA的S0、S25、S50试件相比, F50S0、F50S25、F50S50试件28 d弹性模量分别降低了29.6%、25.7%、23.2%, 90 d弹

材料科学

性模量分别降低了 18.7%、18.3%、14.8%。综上,掺 25%FA 时对钢渣砂混凝土弹性模量影响不大,掺 50%FA 时弹性模量出现较大降幅;混凝土的弹性模量取决于孔隙率、密度、骨料特性,掺 25%FA 时,一部分 FA 参与水化反应提高基体强度及密实度,一部分通过填充效应降低孔隙率,两者共同作用抵消了水泥掺量降低带来的不利效应;而掺 50%FA 时,多数 FA 颗粒仅能作为填充作用赋存于基体中,虽可提高基体密实度,但由于粉煤灰颗粒强度低于,同样降低了混凝土弹性模量。

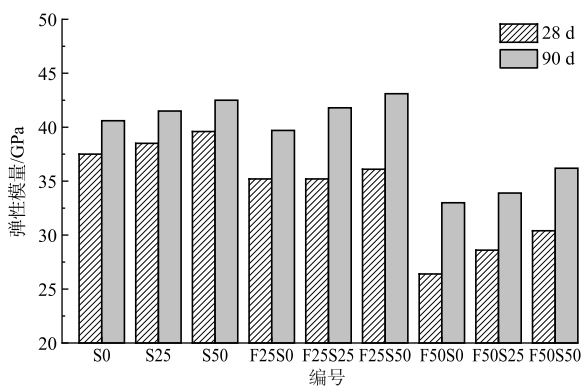


图 4 不同 SS、FA 掺量混凝土弹性模量

Fig. 4 Elastic modulus of concrete with different SS and FA content

2.2 耐久性能分析

2.2.1 抗水渗透性能

由图 5 可知,未掺 FA 和 FA 掺量为 25%、50% 时,混凝土的渗水深度均随 SS 掺量的增加而降低;未掺 FA 时,与基准组 SS 试件相比,SS 掺量分别为 25%、50% 的试件 28 d 渗水深度分别降低了 11.1%、19.2%,90 d 渗水深度分别降低了 14.2%、23.1%。FA 掺量为 25% 时,3 种 SS 掺量的试件 28 d 渗水深度相比未掺 FA 试件平均约增长了 13%,而 90 d 渗水深度降低了约 40%;FA 掺量为 50% 时,3 种 SS 掺量的试件 28 d 渗水深度相比未掺 FA 试件平均约增长了 34%,而 90 d 渗水深度平均约降低了 45%。综上所述,掺入 SS 可提高混凝土的抗水渗透性能,延长养护龄期抗水渗透性能进一步增强,这源于 SS 骨料的低吸水和含有的火山灰活性成分,SS 骨料相比河砂可与水泥产生更为密实胶结作用,阻碍了水分沿砂浆结合面的渗透;而掺入 FA 会延缓早期水化反应,故 28 d 龄期时试件的渗透性能大幅提高,但随

养护龄期增长,粉煤灰与水泥产生了充分的水化反应,细化了基体中孔隙分布,混凝土微观结构更加致密化,形成更为复杂的微孔隙网络,大大延长了外部水分的侵入路径,故 90 d 龄期时抗水渗透性能大大增强,因粉煤灰的充填效用占据主导作用,25% 与 50%FA 掺量的试件 90 d 的渗水深度并未有显著差异。

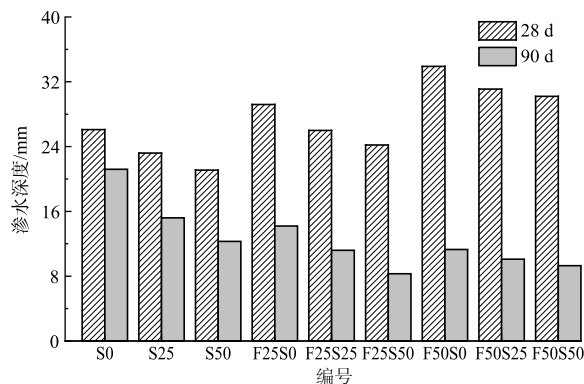


图 5 不同 SS、FA 掺量混凝土渗水深度

Fig. 5 Depth of water seepage in concrete with different SS and FA dosages

2.2.2 抗氯离子渗透性能

由图 6 可知,未掺 FA 时,未掺 SS 试件 28、90 d 氯离子渗透系数分别为 16.7×10^{-12} 、 $12.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,SS 掺量分别为 25%、50% 的试件 28 d 氯离子渗透系数分别降低了 7.2%、10.8%,90 d 分别降低了 9.6%、18.4%;养护龄期由 28 d 增加至 90 d,S0、S25、S50 试件的氯离子渗透系数分别降低了 25.1%、27.1%、31.5%。FA 掺量为 25% 时,3 种 SS 掺量的试件 28 d 氯离子渗透系数相比未掺 FA 试件平均约降低 14%,而 90 d 氯离子渗透系数降低了约 45%;养护龄期由 28 d 增加至 90 d,F25S0、F25S25、F25S50 试件的氯离子渗透系数分别降低了 52.7%、54.5%、56.0%。FA 掺量为 50% 时,3 种 SS 掺量的试件 28 d 氯离子渗透系数相比未掺 FA 试件增长了约 23%,而 90 d 氯离子渗透系数降低了约 68%;养护龄期由 28 d 增加至 90 d,F50S0、F50S25、F50S50 试件的氯离子渗透系数分别降低了 65.1%、69.7%、74.3%。可见,随 SS、FA 掺量增加,养护龄期增长,混凝土的氯离子渗透系数均呈减小趋势;掺入 FA 对提高混凝土抗氯离子渗透性能相比掺入 SS 更为

优异, 掺 50%FA+50%SS 时混凝土抗氯离子渗透性能最佳。这源于 FA 通过填充作用和火山灰效应细化了基体孔隙, SS 中含有的活性氧化钙通过水化反应增强骨料与浆体界面密实度。

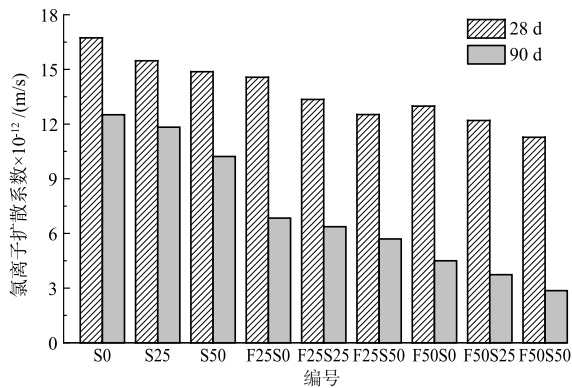


图 6 不同 SS、FA 掺量混凝土氯离子渗透系数
Fig. 6 Chloride ion permeability coefficient of concrete with different SS and FA content

2.2.3 干缩变形

由图 7 可知, 各组试件的干缩变形率均随时间发展逐渐减小, 至 90 d 龄期, 干缩变形发展基本稳定。未掺 FA 时, 掺入 SS 的 S25、S50 试件初始干缩变形发展小于基准组 S0 试件, 养护龄期超过 42 d 后干缩变形超过基准组 S0 试件, 且随养护龄期增长逐渐增大, 至 90 d 龄期, S0、S25、S50 试件干缩应变分别为 305、318.7、332.5 $\mu\epsilon$, 与未掺 SS 试件相比, SS 掺量为 25%、50% 时分别增长了 4.5%、9.0%; 这表明掺入 SS 会降低混凝土早期干缩变形发展, 但随养护龄期增长, SS 中的游离氧化钙可与水泥在骨料-浆体界面处发生后期反应, 消耗水分, 生成的 C-S-H、C-A-H、Ca(OH)₂ 凝胶而引起体积收缩加大。掺入 25%FA 混凝土的干缩变形显著降低, 90 d 龄期时 F25S0、F25S25、F25S50 试件的干缩应变分别为 254.6、260.、263.4 $\mu\epsilon$, 与未掺 SS 试件相比, SS 掺量为 25%、50% 时分别增长了 2.2%、3.4%; 可见, 掺入 FA 可以缓解因掺入 SS 引起的后期干缩变形增大现象。掺入 50%FA 混凝土的干缩变形进一步降低, 90 d 龄期时 F50S0、F50S25、F50S50 试件的干缩应变分别为 230.4、224.8、220.2 $\mu\epsilon$, 与未掺 SS 试件相比, SS 掺量为 25%、50% 时分别降低了 2.4%、4.4%; 可见, 随 FA 掺量增加, 降低混凝土

干缩变形效应进一步增强, 基本消除了因掺入 SS 引起的后期干缩变形增大现象; 这应该是由掺入 FA 降低了胶凝材料对拌合水的需求及水化反应放热量, 提高了基体微观结构的致密程度, 其含有的活性成分可与 SS 中的游离氧化钙反应, 消除其体积收缩效应, 由此增强混凝土的抗干缩变形能力。

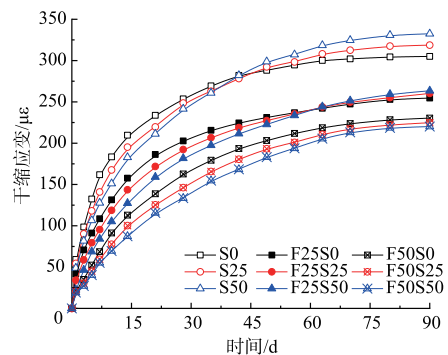


图 7 不同 SS、FA 掺量混凝土干缩应变
Fig. 7 Dry shrinkage strain of concrete with different SS and FA content

3 结论

采用 FA、SS 部分取代水泥和河砂, 可制备环保型混凝土。通过进行不同 FA、SS 掺量时混凝土力学强度及耐久性能试验, 研究了 FA、SS 掺量对混凝土性能的影响规律, 得出以下结论:

(1) 混凝土抗压强度随 SS 掺量增加而增大, 且抗压强度增幅随掺量增大。仅掺 SS 的混凝土抗压强度发展集中于 7~28 d 龄期, 掺入 FA 后混凝土 7、28 d 龄抗压强度显著降低, 至 90 d 龄期抗压强度基本完成; 掺 25%FA 时混凝土的抗压强度略有提高, 掺 50%FA 时抗压强度降低约 12%; 采用 SS 部分替代河砂, 可降低因掺入 FA 引起的强度损失。

(2) 混凝土劈裂抗拉强度、弹性模量随 SS 掺量增加而增大, 劈裂抗拉强度随 FA 掺量增加而减小, 弹性模量在 FA 掺量为 25% 仅略有变化, 掺量为 50% 时显著降低; 50%FA 掺量时可提高 SS 的增强作用。掺入 FA 会降低混凝土 28 d 劈裂抗拉强度、弹性模量, 但 90 d 劈裂抗拉强度、弹性模量显著增长; 掺 50%FA+50%SS 混凝土仍具有较优异的强度性能。

(3) 混凝土抗水渗透性能和抗氯离子渗透性能随 SS 掺量增加、养护龄期增长而提高, 掺入 FA 后

材料科学

28 d 抗水渗透性能降低、抗氯离子渗透性能提高, 90 d 抗水渗透性能、抗氯离子渗透性能提高; 增加 FA 掺量会增强抗氯离子渗透性能, 但对抗水渗透性能影响不显著; FA 增强抗氯离子渗透性能较 SS 更为显著, 掺 50%FA+50%SS 混凝土的密实程度更佳。

(4) 掺入 SS 会提高混凝土 42 d 龄期后干缩变形, 混凝土的干缩变形随 FA 掺量增加而降低, 掺 50%FA+50%SS 后混凝土干缩变形降低了 27.8%; 掺入 25%FA 可缓解 SS 引起的干缩变形增长现象, 掺 50%FA 可基本消除该现象。

参 考 文 献

- [1] 张兴龙. 高掺量粉煤灰混凝土力学性能试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (2): 49-53.
- [2] 郭远新, 孔哲, 李秋义, 等. 建筑固废制备再生细骨料混凝土配合比优化研究 [J]. 混凝土, 2022, (12): 176-179, 184.
- [3] 明阳, 骆俊晖, 李玲, 等. 多元固废制备高活性超细矿物掺和料及性能研究 [J]. 非金属矿, 2022, 45 (5): 34-38.
- [4] 安胜利, 黄兰, 柴铁凡, 等. 钢渣处理技术及资源化利用研究进展 [J]. 钢铁, 2025, 60 (3): 1-12.
- [5] 薛刚, 付乾, 周海峰, 等. 钢渣细骨料混凝土单轴受压应力-应变关系试验研究 [J]. 西南交通大学学报, 2022, 57 (6): 1165-1174.
- [6] 王敬东, 詹新建. 粉煤灰-钢渣细骨料混凝土力学性能分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (5): 60-64, 71.
- [7] 贺希茂, 葛序尧, 张波. 钢渣骨料混凝土基本力学性能研究 [J]. 建筑科学, 2023, 39 (3): 37-43.
- [8] 王辉, 张伟, 张玉柱, 等. 钢渣微珠替代细骨料对不同等级混凝土力学性能的影响 [J]. 混凝土, 2021, (3): 83-85, 89.
- [9] 王鑫, 易越磊, 孙茂山. 矿物掺合料对机制砂混凝土性能影响的研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (6): 23-28.
- [10] 王成刚, 刘耀伟, 王帅, 等. 钢渣双掺混凝土力学与耐久性能试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (8): 2846-2855.
- [11] 薛刚, 邱永康, 秦政博, 等. 盐溶液干湿循环作用下钢渣细骨料混凝土的耐久性 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2025, 55 (5): 130-139.
- [12] 邱胜强, 王健, 许登尧, 等. 磨细钢渣粉和粉煤灰对水泥力学性能的影响 [J/OL]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 1-7 [2026-04-28]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1824.U.20250320.1541.054>.
- [13] 汪杰, 梁月华. 电炉钢渣-粉煤灰复合掺合料水泥胶砂性能研究 [J]. 钢铁钒钛, 2022, 43 (5): 123-128.
- [14] 王冬魁, 陈学武, 席爽, 等. 钢渣、粉煤灰协同增效下水泥稳定再生碎石基层性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (5): 1957-1966.
- [15] 李瞳, 王庆贺, 任庆新. 钢渣骨料/粉煤灰对 ECC 力学与介质传输性能的影响机理 [J]. 材料导报, 2025, 39 (19): 153-159.