

硅灰 - 矿渣粉改性多孔透水混凝土力学及抗冻性能研究

白小龙, 魏亚龙, 毕红卫, 甘 宏

(华能伊敏露天矿, 呼伦贝尔 021234)

摘要: 为提升多孔透水混凝土 (PPC) 的力学性能与抗冻性能, 采用硅灰、矿渣粉部分替代水泥进行改性, 研究了单掺或复掺硅灰、矿渣粉对 PPC 的密度、透水系数、抗压强度、劈裂抗拉强度以及抗冻性能的影响规律。结果表明: 掺入硅灰、矿渣粉会提高 PPC 密度, 降低其透水系数; 掺入硅灰和矿渣粉 7 d 抗压强度、劈裂抗拉强度降低, 对 28 d 力学强度影响不显著, 但能显著提升 90 d 的抗压强度、劈裂抗拉强度; 在冻融循环作用下, 掺入硅灰、矿渣粉对 25 次冻融循环后的残余强度影响较小, 而 100 次冻融循环后的残余抗压强度、残余劈裂抗拉强度损失小于对照组, 其中单掺 10% 硅灰的 PPC 抗冻性能最佳, 复掺 5% 硅灰 + 5% 矿渣粉次之。研究成果可为 PPC 配合比设计提供理论依据。

关键词: 硅灰; 矿渣粉; 多孔透水混凝土; 透水系数; 力学强度; 抗冻性能

中图分类号: TU528.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 02-0035-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.02.006

Study on Mechanical Properties and Freeze - Thaw Resistance of Silica Fume and Granulated Blast Furnace Slag - Modified Porous Permeable Concrete

BAI Xiaolong, WEI Yalong, BI Hongwei, GAN Hong

(Huaneng Yimin Open - pit Mine, Hulunbuir 021234, China)

Abstract: To enhance the mechanical properties and frost resistance of porous pervious concrete (PPC), silica fume and slag powder were used to partially replace cement for modification. The effects of single or combined incorporation of silica fume and slag powder on the density, permeability coefficient, compressive strength, splitting tensile strength, and frost resistance of PPC were investigated. The results showed that incorporating silica fume or slag powder increases the density of PPC and reduces its permeability coefficient. The addition of silica fume or slag powder decreases the 7 - day compressive and splitting tensile strengths of PPC, has no significant effect on the 28 - day mechanical strength, but significantly improves the 90 - day compressive and splitting tensile strengths. Under freeze - thaw cycling, the incorporation of silica fume or slag powder has little influence on the residual strength after 25 cycles, while the losses in residual compressive strength and residual splitting tensile strength after 100 cycles are smaller than those of the control group. Among the mixes, PPC with 10% silica fume alone exhibits the best frost resistance, followed by the mix with 5% silica fume plus 5% slag powder. The research findings can provide a theoretical basis for the mix design of PPC.

Key words: silica fume; slag powder; porous pervious concrete; permeability coefficient; mechanical strength; frost resistances

材料科学

0 引言

随着我国城市化快速发展,海绵城市建设越发受到重视。在城市道路工程中采用多孔透水混凝土可增强道路工程的排水能力,有利于缓解城市内涝,也可将雨水就地消纳,降低城市排水管道负荷,提高水资源利用率,并显著改善城市生态环境^[1]。但提高多孔透水混凝土透水能力,会显著削弱其力学强度;且其作为多孔介质材料,相比传统混凝土存在力学强度低、抗冻性能差等问题^[2],制约了其在道路工程中的应用范围。

针对多孔透水混凝土在工程应用中存在的诸多问题,众多学者开展了大量研究。刘红等^[3]开展了多孔混凝土透水系数试验研究,发现有效孔隙率和透水系数与水泥浆体流变特性有关,水胶比为 0.28~0.32 时,有利于提升 PPC 的透水性能;梁锦程等^[4]、周大福等^[5]研究了硅灰掺量对透水混凝土抗压强度、孔隙率等影响,结果表明掺入适量硅灰可显著提升抗压强度;李崇智等^[6]研究了 C40 透水混凝土配比设计,结果认为采用硅灰替代 10% 水泥时有助于改善混凝土的内部结构,可用于城市主干道;国越皓等^[7]开展多种无机材料对透水混凝土性能影响,硅灰掺量 6%~8% 时渗透性能较佳;王玥^[8]开展了掺硅灰多孔混凝土试验,结果发现硅灰掺量小于 10% 时,可以增强微观结构、并提高强度;温煦等^[9]研究超细矿渣粉对透水混凝土性能影响,掺量为 10% 时抗压强度可达到 35.6 MPa;陈尚鸿等^[10]研究了钢渣、矿渣复合粉替代水泥对透水混凝土性能影响,掺入复合粉可优化 ITZ 的微观性能,提高力学强度,钢渣、矿渣质量比为 3:7 时最佳;刘沛等^[11]研究了粉煤灰、矿渣、偏高岭土单掺或复掺对透水混凝土微观结构及力学性能影响,结果表明复掺效果优于单掺,三掺分别为 15%、15%、10% 时透水混凝土性能最佳;吴庆等^[12]基于微观测试研究了单掺粉煤灰、矿粉、硅灰对透水混凝土性能影响,结果表明单掺 15% 矿粉效果较好,能满足轻型混凝土路面使用要求;梁巧等^[13]采用快速冻融试验研究了掺矿渣多孔混凝土抗冻性能,研究发现掺入矿渣后质量损失率变低,相对动弹性模量随矿渣掺量增加先增后减,掺量为 20% 时抗冻性能最佳;张贵等^[14]开展了

多孔混凝土的不同冻融试验并进行抗冻性能评价,结果表明快速冻融试验方法适用于生态多孔混凝土;聂清念等^[15]研究了单掺入粉煤灰、矿渣、硅灰对高承压多孔混凝土抗冻性能的影响,结果表明单掺硅灰对提高抗冻性能最为显著,单掺矿渣粉效果不明显。

既有研究多为单掺硅灰或矿渣粉改善 PPC 力学、抗冻性能,缺乏对硅灰、矿渣粉协同作用下 PPC 力学性能尤其是抗冻性能研究。故围绕单掺或复掺硅灰、矿渣粉对 PPC 的密度、透水系数、力学强度、抗冻性能的影响规律进行研究,以期改善 PPC 配合比设计提供指导依据。

1 材料与方法

1.1 原材料

采用 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥,比表面积为 324.2 m²/kg,密度 3 160 kg/m³;S95 级矿渣粉,比表面积为 399.6 m²/kg,烧失量为 2.4%,密度 2 840 kg/m³;普通硅灰,比表面积为 2 108.8 m²/kg,密度 2 320 kg/m³;水泥、硅灰和矿渣粉的主要化学成分见表 1。粗骨料采用石灰岩碎石,颗粒粒径范围为 15~25 mm,密度为 2 710 kg/m³,吸水率为 2.3%。

表 1 水泥、硅灰、矿渣粉主要化学成分
Table 1 Main chemical components of cement silica fume and slag powder /%

化学成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	SO ₃
水泥	62.17	19.18	4.50	3.61	1.23	0.57	3.57
硅灰	1.33	87.20	0.71	0.91	4.76	0.41	0.37
矿渣粉	30.15	32.28	17.45	4.11	9.46	0.28	0.78

1.2 配合比设计

设计 7 种混凝土配合比,见表 2。C1 试件胶凝材料全部采用水泥,为对照组;C2、C3 试件分别采用 10%、20% 的硅灰等质量替代水泥;C4、C5 试件

表 2 PPC 配合比
Table 2 PPC mix ratio / (kg/m³)

编号	水泥	水	粗骨料	硅灰	矿渣粉	水胶比
C1	350	126	1 680			0.36
C2	315	126	1 680	35.0		0.36
C3	280	126	1 680	70.0		0.36
C4	315	126	1 680		35.0	0.36
C5	280	126	1 680		70.0	0.36
C6	315	126	1 680	17.5	17.5	0.36
C7	280	126	1 680	35.0	35.0	0.36

分别采用10%、20%的矿渣粉等质量替代水泥；C6、C7试件硅灰和矿渣粉以5%+5%、10%+10%的比例等质量替代水泥。研究中固定水胶比为0.36，设定目标总孔隙率为0.15~0.20之间，设定目标透水系数为高于0.10 cm/s。

在制备PPC时，对粗骨料进行预湿润处理，将粗骨料放入清水浸泡30 min，捞出后静置沥干20 min，直至骨料表面无明水、内部孔隙达到饱和状态，预湿润处理后尽快和胶凝材料搅拌。C1试件将水泥和粗骨料干拌2 min，然后加入拌合水再搅拌2 min。对于含有硅灰和矿渣粉的试件，将胶凝材料和粗骨料混合，干拌3 min，加入拌合水后再搅拌3 min。混合料按照GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》规定方法测试坍落度，验证拌合物工作性能。混合料搅拌完成后，将拌合物倒入模具并振捣密实，振捣采用平板振捣器低频低振幅振捣，振捣频率30 Hz，振幅0.3 mm，单试件振捣时间15 s，振捣至试件表面泛浆无泌水、骨料骨架稳定，试件脱模后放置于(20±2)℃的恒温水池中养护至规定龄期。

1.3 试验方法

测定密度采用养护龄期为28 d的Φ150 mm×300 mm圆柱体试件，通过测定重量和体积计算试件的密度。采用保水表干法测定试件的总孔隙率，将养护28 d龄期的100 mm立方体试件做好侧面密封、保水饱和，称取饱和面干质量，采用排水法测定表观体积，同样取试样烘干后称取干质量。测定透水系数采用养护龄期28 d的Φ100 mm×50 mm圆柱体试件，根据CJJ/T 135—2009《透水水泥混凝土路面技术规程》(2023年版)要求进行透水系数测试。测试采用恒定水头法，水头高度取50 mm，试件侧面采用热熔石蜡密封，试件预处理采用24 h预浸泡，控制试验水温在(20±2)℃，同一配合比制备3个平行试件，每个试件重复测试2次，取6个数据的算数平均值作为试验测试结果。

测定抗压强度采用养护龄期分别为7、28、90 d的150 mm×150 mm×150 mm立方体试件，测定劈裂抗拉强度采用养护龄期分别为7、28、90 d的Φ150 mm×300 mm的圆柱体试件，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。每组试验采用3个平行试件，试验结果取平均值。

冻融循环试验按照GB/T 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》慢冻法试验方法进行，试件养护龄期为90 d，分别进行25、50、75、100次冻融循环后测定抗压强度、劈裂抗拉强度试验。冻融循环在自动测试箱内执行，冻结阶段温度维持在(-18±2)℃，融化阶段温度维持在(5±2)℃，每个冻结期持续2 h，随后是2 h的融化期。冻融介质采用洁净自来水，标准养护的试件，置于(20±2)℃洁净水中浸泡4 d，试验全程保持试件完全浸没于冻融介质中，避免水分流失对孔隙结构及冻融损伤程度产生干扰。

2 结果分析

2.1 工作性能

由图1可知，采用硅灰、矿渣粉代替部分水泥，PPC的坍落度均呈现下降趋势。对比C1对照组，C2~C7试件的坍落度分别降低了12%、24%、8%、16%、10%、22%。可以发现，掺入越多硅灰、矿渣粉代替水泥，PPC的坍落度下降越多，表明其工作性能越差；同等掺入比例下，硅灰比矿渣粉导致的坍落度下降更多。

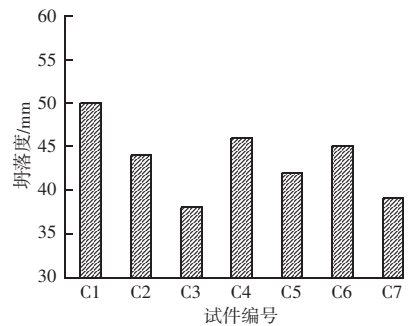


图1 不同混合物的坍落度

Fig. 1 Slump of different mixtures

2.2 密度

由图2可知，C1~C7试件的密度在2 180~2 390 kg/m³之间，低于一般混凝土密度(2 400 kg/m³)。掺入了硅灰和矿渣粉的试件密度高于C1对照组，随着硅灰和矿渣粉添加比例的增加，试件密度成比例增加。对比C1对照组，掺入10%、20%硅灰的C2、C3试件密度分别增加了3.21%、4.82%；掺入

材料科学

10%、20%矿渣粉的 C4、C5 试件密度分别增加了 6.93%、8.35%；混合掺入硅灰和矿渣粉的 C6、C7 试件密度分别增加了 8.12%、9.63%。硅灰、矿渣粉的密度均小于水泥，但部分替代水泥后提高了 PPC 的密度；这源于矿渣粉、硅灰颗粒粒径较水泥更小，会变相增大拌合物浆体体积，使浆体更加充分包裹骨料。另外，硅灰、矿渣粉比水泥更有利于填充拌合物的孔隙，进一步提高胶凝材料的密实程度，故掺入硅灰、矿渣粉的 PPC 密度更大。

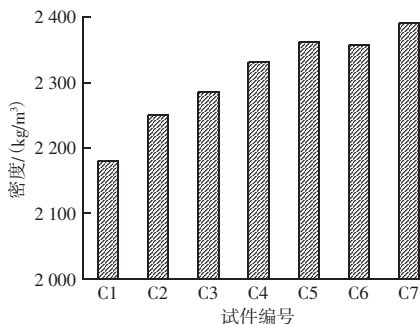


图2 28 d 龄期 PPC 密度

Fig. 2 PPC density at 28 days of age

2.3 孔隙率

由图3可知，采用硅灰、矿渣粉代替部分水泥，PPC 的总孔隙率均呈现下降趋势。对比 C1 对照组，C2 ~ C7 试件的总孔隙率分别降低了 2.99%、5.39%、5.99%、7.19%、6.59%、9.58%。可以发现，掺入越多硅灰、矿渣粉代替水泥，PPC 的总孔隙率下降越多，表明试件越密实。

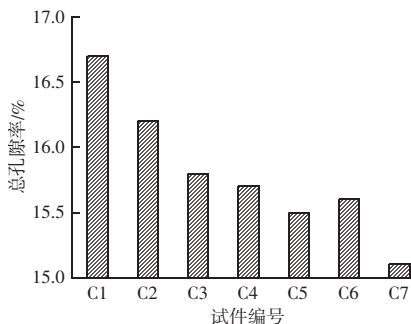


图3 28 d 龄期 PPC 总孔隙率

Fig. 3 28 day age PPC total porosity

2.4 透水系数

由图4可知，PPC 的透水系数与混凝土的密实度、孔隙率直接相关。相比于普通混凝土，应用于路面工程的 PPC 要求具有更高的孔隙率和透水系数。对比 C1 对照组，C2、C3 试件的透水系数分别降低

了 1.64%、4.92%；C4、C5 试件的透水系数分别降低了 6.56%、9.84%；C6、C7 试件透水系数分别降低了 11.48%、16.39%。结果表明，掺入硅灰和矿渣粉均可降低 PPC 的透水系数。单掺硅灰降低渗透系数小于单掺矿渣粉；复掺硅灰、矿渣粉对降低渗透系数最大。这主要因为硅灰和矿渣粉矿物添加剂通过填充效应填充了水泥浆体和粗骨料界面处的孔隙，减小了基体连通孔隙，阻碍了水分迁移。

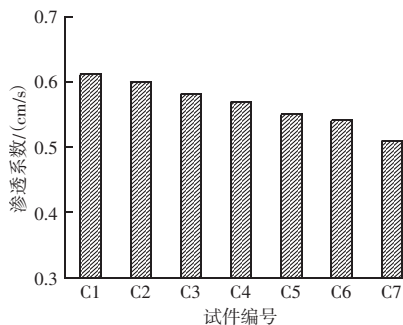


图4 28 d 龄期 PPC 透水系数

Fig. 4 28 day age PPC permeability coefficient

2.5 抗压强度

由图5可知，掺入硅灰和矿渣粉的试件 7 d 抗压强度对比如下：对比 C1 对照组，C2、C3 试件分别降低了 17.9%、24.1%；C4、C5 分别降低了 21.4%、26.8%；C6、C7 试件分别降低了 20.5%、25.1%。掺入硅灰和矿渣粉的试件 7 d 抗压强度低于 C1 对照组，最重要的原因是硅灰和矿渣粉的水化速率低于水泥所致。

掺入硅灰和矿渣粉的试件 28 d 抗压强度对比如下：对比 C1 对照组，C2、C3 试件分别增加了 1.6%、0.4%；C4、C5 分别增加了 1.0%、0.4%；C6、C7 试件分别增加了 1.7%、0.2%。掺入硅灰和矿渣粉的试件 28 d 抗压强度稍高于 C1 对照组，硅灰和矿渣粉在 28 d 龄期时对 PPC 抗压强度的提升效果不明显。

掺入硅灰和矿渣粉的试件 90 d 抗压强度对比如下：对比 C1 对照组，C2、C3 试件分别增加了 30.5%、28.0%；C4、C5 试件分别增加了 28.8%、25.5%；C6、C7 试件分别增加了 29.8%、26.6%。结果表明，单掺硅灰为 10% 时，对提升 90 d 抗压强度最有利，复掺 5% 硅灰 + 5% 矿渣粉次之。掺入硅灰和矿渣粉的试件 90 d 抗压强度显著高于 C1 对照

组,通过延长养护期,由于持续的水化过程对 PPC 的强度有显著影响,主要是硅灰和矿渣粉与水泥产生持续性水化反应,产生大量 C-S-(A)-H 凝胶,还通过微填充效应来提高混凝土密实程度,由此提高抗压强度。综上,掺入硅灰和矿渣粉可以显著提升 PPC 后期的抗压强度。

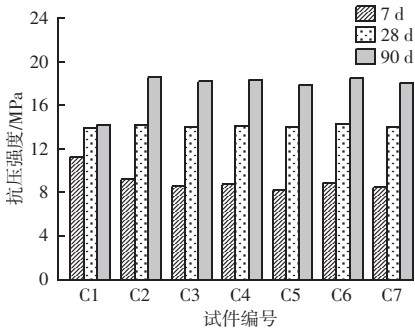


图5 不同龄期 PPC 抗压强度变化规律

Fig. 5 The variation law of compressive strength of PPC at different ages

2.6 劈裂抗拉强度

由图6可知,养护龄期90 d的试件劈裂抗拉强度显著大于养护7、28 d的试件。掺入硅灰和矿渣粉的试件7 d劈裂抗拉强度对比如下:对比C1对照组,C2、C3试件分别降低了37.4%、44.3%;C4、C5分别降低了43.5%、51.9%;C6、C7试件分别降低了44.3%、59.5%。与7 d抗压强度原因相同,最重要的原因是硅灰和矿渣粉的水化速率低于水泥所致。

掺入硅灰和矿渣粉的试件28 d劈裂抗拉强度对比如下:对比C1对照组,C2、C3试件分别增加了13.2%、1.3%;C4试件增加了1.0%、C5试件降低了5.3%;C6试件增加了8.6%,C7试件降低了2.6%。结果表明,单掺或复掺5%硅灰+5%矿渣粉时,对提升28 d劈裂抗拉强度效果最为显著,掺量为20%时,单掺矿渣粉或复掺矿渣粉、硅灰均引起28 d劈裂抗拉强度降低。掺入硅灰和矿渣粉的试件90 d劈裂抗拉强度对比如下:对比C1对照组,C2、C3试件分别增加了31.4%、21.7%;C4、C5分别增加了21.7%、17.1%;C6、C7试件分别增加了28.9%、19.6%;综上,掺入硅灰和矿渣粉进入PPC可以显著提升90 d劈裂抗拉强度,单掺10%硅灰最佳,复掺5%硅灰+5%矿渣粉次之。

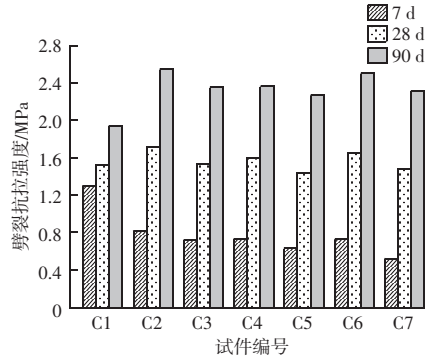


图6 不同龄期 PPC 劈裂抗拉强度变化规律
Fig. 6 The variation law of splitting tensile strength of PPC at different ages

2.7 冻融循环试验

2.7.1 质量损失

由图7可知,经过25、50、75、100次冻融循环后,PPC的质量损失显著增加。随着冻融循环次数的增加,掺入不同硅灰、矿渣粉的PPC试件,质量损失均呈现几何级增加。对比发现,掺入不同硅灰、矿渣粉的试件,在不同冻融循环次数下,C1试件质量损失无明显变化,表明掺入不同硅灰、矿渣粉的试件对冻融循环质量损失无显著作用。

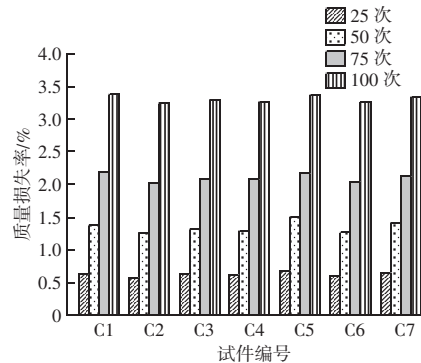


图7 不同冻融循环 PPC 的强度损失率
Fig. 7 Strength loss rate of PPC under different freeze-thaw Cycles

2.7.2 残余抗压强度

由图8可知,经过25、50、75、100次冻融循环后,PPC的残余抗压强度显著降低;经过25次冻融循环后,C1对照组残余抗压强度降低了1.4%,而掺入硅灰和矿渣粉的C2~C7试件的残余抗压强度降低幅度在1%~4.5%之间。经过100次冻融循环后,PPC的残余抗压强度显著下降,C1对照组残余抗压强度降低49.0%;C2、C3试件残余抗压强度分别降低了32.8%、39.2%;C4、C5试件残余抗压强度分别降低了37.8%、45.1%;C6、C7试件残余抗压强

材料科学

度分别降低了 36.4%、43.5%。结果表明, 经过 100 次冻融循环后, 单掺硅灰为 10% 时, 对提升残余抗压强度最有利, 复掺 5% 硅灰 + 5% 矿渣粉次之。可以看出, 在持续的冻融循环后, 掺入硅灰和矿渣粉的 PPC 试件残余抗压强度更高, 主要原因是硅灰和矿渣粉填充了 PPC 内部结构孔隙, 试件结构更密实。

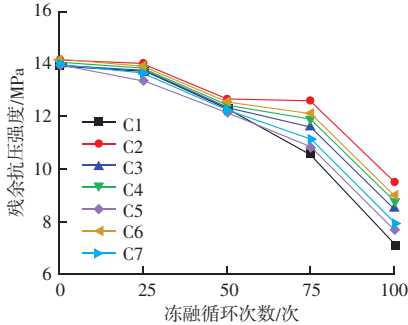


图 8 不同冻融循环次数 PPC 的残余抗压强度
Fig. 8 Residual compressive strength of PPC with different freeze-thaw cycles

对比发现, 在持续的冻融循环后, 仅掺入矿渣粉的 C4、C5 试件比仅掺入硅灰的 C2、C3 试件残余抗压强度更低, 说明硅灰对增强 PPC 试件的抗冻性能更为有利。主要是因为硅灰相比矿渣粉有更高的火山灰活性, 且颗粒粒径更小, 降低 PPC 基体内部孔隙方面具有积极作用, 水化形成的凝胶密实程度更高; 经过持续冻融循环, 会导致水泥浆体结构劣化, 产生裂缝, 损害浆体与骨料之间的黏结, 通过添加硅灰可使微观结构更加密实, 由此减轻冻融循环对水泥浆体的不利影响, 故硅灰在增强多孔透水混凝土抗冻融耐久性方面起着关键作用。

2.7.3 残余劈裂抗拉强度

由图 9 可知, 经过 25、50、75、100 次冻融循环后, PPC 的残余劈裂抗拉强度显著降低, 降低幅度高于残余抗压强度。经过 25 次冻融循环后, 相比于冻融前, C1 对照组残余劈裂抗拉强度基本未变化, C2~C7 试件的残余劈裂抗拉强度降低了 1.3%~2.4%。经过 50 次冻融循环后, 各组试件残余劈裂抗拉强度变化如下: C1 对照组降低了 11.8%; C2、C3 试件降低了 11.6%、9.1%; C4、C5 试件降低了 12.5%、13.2%; C6、C7 试件降低了 9.8%、11.5%。经过 100 次冻融循环后, 相比于冻融前, C1 对照组的残余劈裂抗拉强度降低了 47.4%, C2~C7 试件降低了 41.4%~44.6%。结果表明, 经过 100

次冻融循环作用, 掺入硅灰和矿渣粉试件残余劈裂抗拉强度均高于对照组, 掺 10% 硅灰试件残余劈裂抗拉强度最大, 其次为掺 5% 硅灰 + 5% 矿渣粉试件, 掺 20% 矿渣粉对提升抗冻效果不显著。试件冻融循环导致水泥浆体中产生新裂缝, 致使混凝土微观结构中的原有裂缝扩展, 外部水分沿裂缝渗入, 进一步增强了冻融破坏。

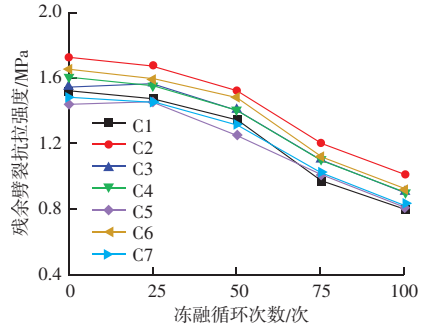


图 9 不同冻融循环 PPC 的残余劈裂抗拉强度
Fig. 9 Residual splitting tensile strength of PPC with different freeze-thaw cycles

PPC 在经历连续多次冻融循环后, 通过掺入硅灰和矿渣粉, 力学强度特性得以提升, 主要是由于硅灰和矿渣粉的掺入, 试件总孔隙率、透水系数下降, 试件形成了更致密的内部结构, 从而减缓了劈裂抗拉强度的降低。

3 结论

为提升 PPC 的力学及抗冻性能, 研究了单掺或复掺硅灰、矿渣粉对 PPC 的密度、透水系数、抗压强度、劈裂抗拉强度以及抗冻性能的影响规律, 得出以下结论:

(1) 采用硅灰或矿渣粉分别替代 10%、20% 水泥会提高 PPC 密度, 矿渣粉对提升 PPC 密度最显著; 相反, 掺入硅灰、矿渣粉会降低 PPC 透水系数, 单掺矿渣粉试件透水系数小于单掺硅灰, 复掺 10% 矿渣粉 + 10% 硅灰试件透水系数最小。

(2) 掺硅灰、矿渣粉会降低 PPC 7 d 抗压强度和劈裂抗拉强度, 对 28 d 的抗压强度和劈裂抗拉强度影响不大, 会显著提高 90 d 的抗压强度和劈裂抗拉强度。90 d 抗压强度较基准组提高均大于 25%, 90 d 劈裂抗拉强度较基准组提高均大于 17%, 其中单掺硅灰为 10% 时, 对提升 90 d 抗压强度和劈裂抗拉强度最有利, 复掺 5% 硅灰 + 5% 矿渣粉次之。

(3) 掺入硅灰和矿渣粉的 PPC, 在 25 次冻融循环后的残余抗压强度、残余劈裂抗拉强度影响较小, 100 次冻融循环后的残余抗压强度、残余劈裂抗拉强度值高于基准组, 降幅显著低于基准组; 掺硅灰和矿渣粉可提升 PPC 抗冻能力, 单掺 10% 的硅灰最佳, 复掺 5% 硅灰 + 5% 矿渣粉次之。

参 考 文 献

- [1] 张阳. 高强透水混凝土制备及在园林景观道路中的应用研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (4): 64-68.
- [2] 韩云婷, 杨利香, 严世聪. 粗骨料对透水混凝土性能的影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (1): 85-88.
- [3] 刘红, 曲广雷, 宋佳康, 等. 多孔混凝土透水性能试验及预测模型研究 [J]. 混凝土, 2025 (4): 241-246.
- [4] 梁锦程, 喻林, 陈建国. 硅灰掺量对多孔混凝土强度和植生性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2025 (1): 91-95.
- [5] 周大福, 陈代果, 杨福俭, 等. 材料组成对透水混凝土性能的影响研究 [J]. 混凝土, 2024 (8): 120-124.
- [6] 李崇智, 任强伟, 孙箫然, 等. C40 透水混凝土配合比设计及性能研究 [J]. 材料导报, 2022, 36 (增刊 2): 209-213.
- [7] 国越皓, 宋思成, 孙建伟. 无机增强材料对透水混凝土强度和

渗透性的影响 [J]. 人民黄河, 2024, 46 (10): 154-157, 162.

- [8] 王玥. 掺硅灰多孔混凝土本构关系及微观结构研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [9] 温煦, 赵朋, 汤畅. 超细矿渣粉及可再分胶粉对透水混凝土的性能影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (1): 45-48, 93.
- [10] 陈尚鸿, 林佳福, 杨政险, 等. 钢渣-矿渣透水混凝土力学性能的试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (5): 1767-1777.
- [11] 刘沛, 姚素玲, 董宪妹, 等. 矿物掺合料透水混凝土微观结构及性能分析 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (7): 2504-2512.
- [12] 吴庆, 朱袁洁, 许耀, 等. 基于 SEM 和 XRD 微观测试下单掺矿物掺合料透水混凝土性能分析 [J]. 江苏科技大学学报 (自然科学版), 2020, 34 (3): 112-118.
- [13] 梁巧, 桑正辉, 伍松云, 等. 掺矿渣生态多孔混凝土的冻融试验 [J]. 湖南文理学院学报 (自然科学版), 2017, 29 (4): 81-84.
- [14] 张贵, 高婷. 生态多孔混凝土冻融试验方法探讨 [J]. 湖南文理学院学报 (自然科学版), 2017, 29 (1): 91-94.
- [15] 聂清念, 杨永民, 刘晓飞, 等. 高强承压多孔混凝土的抗冻融性能研究 [J]. 人民珠江, 2021, 42 (1): 53-59.

(上接第 34 页)

- [4] 陈辉, 陈芳芳. 石墨烯增韧粉煤灰混凝土的制备及耐久性能研究 [J]. 功能材料, 2023, 54 (5): 5198-5203.
- [5] 邵善庆, 龚爱民, 屈宝莉, 等. 冻盐耦合作用下掺碱粉煤灰混凝土的劣化规律 [J]. 水力发电学报, 2024, 43 (5): 115-122.
- [6] 罗加辉, 龚爱民, 王福来, 等. 碱性激发剂掺量对粉煤灰混凝土耐久性的分析 [J]. 湖北农业科学, 2024, 63 (12): 178-184.
- [7] 翟思敏, 黄金霞. 建筑用不同取代率粉煤灰再生混凝土的力学性能及耐久性能研究 [J]. 功能材料, 2024, 55 (4): 4121-4126.
- [8] 吴亚敏, 段君峰, 张莉, 等. 多壁碳纳米管对粉煤灰混凝土的力学和耐久性能的影响 [J]. 功能材料, 2024, 55 (9): 9229-9236.
- [9] 吕大为. PVA 纤维增强粉煤灰混凝土的力学性能及耐久性分析 [J]. 功能材料, 2025, 56 (2): 2201-2207, 2213.
- [10] 张启懿, 邹春霞, 郭晓松, 等. NaOH 改善粉煤灰混凝土微观结构及抗风蚀-冻融耐久性能 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2024, 54 (4): 131-140.

- [11] 李倩, 毛诗洋, 孙彬, 等. 大比例双掺矿物掺合料混凝土碳化性能试验研究 [J]. 建筑科学, 2024, 40 (9): 66-71.
- [12] 任亚伟, 蔡燕霞, 刘逢涛. 电石渣、粉煤灰稳定煤矸石基层混合料性能试验研究 [J]. 公路工程, 2023, 48 (1): 74-78, 97.
- [13] 杜婷, 帅小根, 石雯, 等. 粉煤灰-矿渣再生混凝土抗压强度及尺寸效应研究 [J]. 功能材料, 2024, 55 (2): 2142-2147.
- [14] 孔萌萌, 崔云鹏, 李洪斌, 等. 超低温环境下双掺粉煤灰及硅灰对砂浆力学性能的影响 [J]. 新型建筑材料, 2024, 51 (9): 30-34.
- [15] 郑永娟. 粉煤灰和塑料废料对混凝土力学和耐久性能的影响 [J]. 塑料科技, 2024, 52 (7): 105-108.
- [16] 秦哲焕, 周志刚, 朱国军, 等. 粉煤灰-矿粉超细复合型矿物掺合料对混凝土耐久性能的影响 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50 (6): 66-69, 79.
- [17] 李炳良, 陶李尧, 罗健林, 等. 内掺粉煤灰/再生砖粉的再生砂浆收缩及冻融耐久性能 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50 (7): 42-46.