

矿渣粉和钢纤维掺量对混凝土力学及耐磨性能影响分析

化思瑜, 贾 嘉

(云南航空产业投资集团有限责任公司, 昆明 650211)

摘要: 为降低混凝土路面水泥用量, 采用矿渣粉大比例替代水泥, 开展了不同矿渣粉 (20%、30%、40%) 和钢纤维 (0.5%、1.0%、1.5%) 复掺对混凝土抗压、劈裂抗拉、抗折强度以及耐磨性能、吸水率的影响规律。结果表明: 矿渣粉延缓早期水化反应, 导致 28 d 力学强度降低, 但 90 d 力学强度显著增大; 低掺量 ($\leq 1.0\%$) 钢纤维增强作用不足, 甚至劣化力学强度及耐磨性能, 掺量为 1.5% 时增强效应最为显著; 矿渣粉可提升抗压强度和耐磨性能, 但会降低抗折强度, 且劈裂抗拉强度、吸水率呈先增强后劣化趋势; 40% 矿渣粉和 1.5% 钢纤维复掺, 抗压强度提高 38.4%、磨损深度降低 14.1%; 20% 矿渣粉和 1.5% 钢纤维复掺劈裂抗拉、抗折强度提升最显著, 分别提高 46.2%、27.9%。研究结果可为制备低碳、高强度混凝土路面提供依据。

关键词: 矿渣粉; 钢纤维; 混凝土; 力学强度; 耐磨性能; 吸水率

中图分类号: TU528.01 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 02-0061-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.02.010

Analysis of the Effects of Blast Furnace Slag Powder and Steel Fiber Content on the Mechanical Properties and Abrasion Resistance of Concrete

HUA Siyu, JIA Jia

(Yunnan Aviation Industry Investment Group Co., Ltd., Kunming 650211, China)

Abstract: To reduce cement usage in concrete pavements, slag powder was employed as a high-proportion cement replacement. The study investigated the effects of different slag powder dosages (20%, 30%, 40%) and steel fiber content (0.5%, 1.0%, 1.5%) on concrete compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength, abrasion resistance, and water absorption rate. Results indicate: - Blast furnace slag powder retards early hydration reactions, reducing 28-day mechanical strength but significantly increasing 90-day mechanical strength; Low steel fiber content ($\leq 1.0\%$) provided insufficient reinforcement, even degrading mechanical strength and abrasion resistance, while the reinforcement effect was most pronounced at 1.5% content; Slag powder enhanced compressive strength and abrasion resistance but reduced flexural strength, with splitting tensile strength and water absorption initially improving then deteriorating; The combined use of 40% slag powder and 1.5% steel fibers increased compressive strength by 38.4% and reduced wear depth by 14.1%. The combination of 20% slag powder and 1.5% steel fibers showed the most significant improvement in splitting tensile strength and flexural strength, increasing them by 46.2% and 27.9%, respectively. This study provides a basis for preparing low-carbon, high-strength concrete pavements.

Key words: slag powder; steel fiber; concrete; mechanical strength; wear resistance; water absorption rate

作者简介: 化思瑜 (1982—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 工程管理。

通信作者: 贾 嘉 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 施工管理。

收稿日期: 2025-09-24

材料科学

0 引言

混凝土路面凭借高强度、优良耐久性和低维护成本等优势,广泛应用于城市道路、机场道面等工程中^[1]。然而,混凝土核心胶凝材料——水泥,属于高能耗、高碳排放产业;在“碳达峰、碳中和”战略背景下,降低水泥用量、开发低碳胶凝材料已成为行业的紧迫任务。利用工业废渣作为辅助胶凝材料部分替代水泥,是实现混凝土低碳化的有效途径;矿渣粉是一种优质火山灰材料,因其活性高、资源丰富且技术成熟,成为当前研究与应用的热点^[2]。

为促进矿渣粉在混凝土中的应用,众多学者进行了大量研究。杜兴亮^[3]基于正交试验研究了矿渣粉比表面积、活性等级、掺量对混凝土性能的影响机理,认为矿渣活性等级影响最大,掺量次之;杨军平等^[4]开展了不同矿渣粉掺量对混凝土力学性能影响,结果表明掺入20%矿渣粉混凝土28 d力学强度最大;黄法礼等^[5]研究了超细矿渣粉对水泥基材料孔隙充填效应影响,总结了矿渣粉掺量与堆积密度的变化关系;杨尊等^[6]系统研究高钛矿渣粉在混凝土中的应用,总结了力学强度及耐久性能变化规律,并对影响机理进行了深入阐述;杜婷等^[7]、周岳等^[8]开展了粉煤灰、矿渣粉单掺及复掺对混凝土性能的影响,发现单掺矿渣粉的效果优于单掺粉煤灰,单掺30%矿渣粉抗氯离子渗透性与抗碳化性能较好。矿渣粉可在一定程度提高混凝土强度及耐久性能,但矿渣粉混凝土仍存在传统混凝土易开裂、韧性差等固有缺陷;掺入纤维可对混凝土进行增韧、阻裂,钢纤维以其高弹性模量和优异的抗拉强度,能够有效地桥接裂缝,传递应力,将其应用于路面混凝土有助于延长路面使用寿命,减少裂缝类病害^[9]。夏冬桃等^[10]研究了钢纤维增强再生骨料混凝土力学强度,结果表明0.5%钢纤维掺量可显著提升力学强度;赵云等^[11]研究矿渣粉、钢纤维对混凝土性能影响,发现30%矿渣粉与0.9%钢纤维复配时力学强度最优;宁波^[12]研究铁尾矿、钢纤维混凝土抗压强度变化规律,掺2%钢纤维时抗压强度最高;孙小飞等^[13]开展了钢纤维再生骨料混凝土劈裂抗拉强度试验,结果表明掺入钢纤维后劈裂抗拉强度显著

提高,破坏模式由脆性转变为韧性;张兴龙^[14]采用钢纤维增强高掺量粉煤灰混凝土,发现1%钢纤维掺量可有效弥补强度损失;袁晓辉等^[15]研究了钢纤维对碱矿渣混凝土力学性能的影响,发现钢纤维掺量过大将导致纤维团聚,降低力学性能,1.4%钢纤维掺量最佳。

综上所述,现有研究多集中于单一掺入矿渣粉或钢纤维对混凝土性能的改善,而对二者复合效应的研究尚不充分。为此,通过大比例掺入矿渣粉替代水泥,并复掺钢纤维,系统开展混凝土力学强度、耐磨性及吸水率试验,以期为低碳高韧路面混凝土的开发与应用提供参考。

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325 m²/kg。S95级矿渣粉,密度2.73 g/cm³,比表面积约为575 m²/kg;水泥、矿渣粉主要化学成分见表1。端钩型钢纤维长度为50 mm,直径为1 mm,长径比为50,弹性模量为200 GPa,拉伸强度为1 050 MPa。细骨料采用本地河砂,细度模数为2.5,属中砂,密度2.61 g/cm³,吸水率2.4%;粗骨料采用花岗岩碎石,最大粒径为19.5 mm,密度为2.64 g/cm³,吸水率为0.7%;骨料级配曲线如图1所示。采用聚羧酸醚基高效减水剂,拌合水为自来水。

表1 水泥与矿渣粉主要化学成分

Table 1 Chemical composition of portland cement and ground granulated blast furnace slag /%

化学成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O
水泥	61.4	21.2	4.3	2.9	1.7	4.1	0.6
矿渣粉	33.1	35.7	15.1	5.7	0.9	7.6	0.4

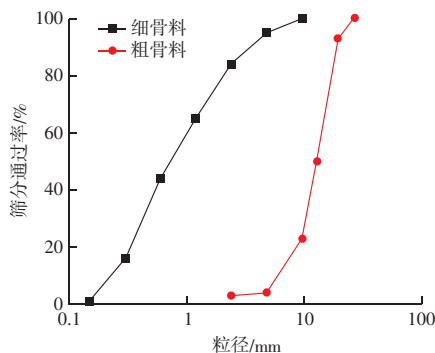


图1 骨料级配曲线

Fig. 1 Aggregate gradation curve

1.2 试验方案

为研究矿渣粉掺量、钢纤维掺量对混凝土性能的影响,共设计 13 组水灰比为 0.4 的混凝土试件;矿渣粉替代水泥质量分数分别为 20%、30%、40%;钢纤维掺量按体积百分数计,掺量分别为 0.5%、1.0%、1.5%;基准组试件未掺矿渣粉和钢纤维,记为“G00”,混凝土配合比见表 2。

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

编号	水泥	矿渣粉	钢纤维	细骨料	粗骨料	水	减水剂
G00	420			726	1 114	168	6.3
G20	378	42		726	1 114	168	6.3
G30	336	84		726	1 114	168	6.3
G40	294	126		726	1 114	168	6.3
G20S0.5	378	42	39.3	726	1 114	168	6.3
G30S0.5	378	42	39.3	726	1 114	168	6.3
G40S0.5	378	42	39.3	726	1 114	168	6.3
G20S1.0	336	84	78.5	726	1 114	168	6.3
G30S1.0	336	84	78.5	726	1 114	168	6.3
G40S1.0	336	84	78.5	726	1 114	168	6.3
G20S1.5	294	126	117.8	726	1 114	168	6.3
G30S1.5	294	126	117.8	726	1 114	168	6.3
G40S1.5	294	126	117.8	726	1 114	168	6.3

1.3 试验方法

混凝土力学性能试验依据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》开展,分别进行 28、90 d 养护龄期抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度试验;抗压强度、劈裂抗拉强度试件尺寸均为 150 mm × 150 mm × 150 mm,抗折强度试件尺寸为 150 mm × 150 mm × 600 mm。每组试验进行 3 个试样测试,结果取平均值。

进行 90 d 龄期混凝土试件的吸水率试验,依据 GBT 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》开展 24、48 h 吸水率测试。

耐磨性试验按照 GB/T 16925—1997《混凝土及其制品耐磨性试验方法》开展。试件尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm,采用 NS-2 型滚珠轴承式耐磨试验机对 90 d 龄期混凝土进行测试,进行 5 组平行试验。试验前将试件放置于 (65 ± 5) °C 烘箱中烘干至恒重,自然冷却至室温。将试件固定至耐磨机,设定磨头压力为 200 N,磨头转速为 75 r/min。每 1 000 转检查磨头磨损情况,分别测量 3 000、6 000 转时试件磨损深度。

2 结果分析

2.1 抗压强度

由图 2 可知,养护龄期为 28 d 时,所有掺入矿渣粉、钢纤维的试件抗压强度均低于基准组 G00;未掺钢纤维试件中,矿渣粉掺量 40% 的 G40 试件抗压强度损失最小,相比基准组降低了 18.7%;采用矿渣粉部分替代水泥后混凝土的抗压强度降低,这源于矿渣粉延缓了水泥的水化动力学反应,降低了胶凝材料火山灰反应速率,使水化胶凝产物数量减小,从而劣化混凝土的微观结构,导致早龄期混凝土抗压强度降低。钢纤维掺量为 0.5% 时,同样矿渣粉掺量 40% 的 G40S0.5 试件抗压强度损失最小,相比基准组降低了 25.6%,且同样小于 G40 试件;而钢纤维掺量为 1.0% 时,矿渣粉掺量 30% 的 G30S1.0 试件抗压强度损失最小,相比基准组降低了 17.5%,略高于 G40 试件;钢纤维掺量为 1.5% 时,混凝土抗压强度相比掺量为 0.5%、1.0% 有所提高,40% 矿渣粉掺量的 G40S1.5 试件抗压强度损失最小,相比基准组降低了 5.5%。掺入 0.5% 钢纤维导致混凝土抗压强度有所降低,说明掺量较低时无法起到纤维增强效果;当钢纤维掺量增加至 1.0% 时,增强效果开始显现;掺量为 1.5% 时,增强效果显著提高。这是由于过低的纤维掺量难以起到“桥联”和“约束”效应,无法有效抑制裂缝扩展;另外钢纤维与基体的界面区域容易引入微小空隙,形成结构薄弱区,由此导致抗压强度降低。适当钢纤维掺量下,纤维可均匀分布在基体中形成三维增强网络结构,细化孔隙分布,抗压强度得到显著提升。

随养护时间至 90 d,基准组 G00 抗压强度提升幅度最小,相比 28 d 龄期仅提高了 2.7%。而掺入矿渣粉的各组试件抗压强度大幅提升,且均高于基准组试件,抗压强度随矿渣粉掺量增加而增大,各组试件相比 28 d 龄期提高了约 50%。这是由于随胶凝材料水化反应周期延长,水泥与矿渣粉反应生产更多的 C-S-H、C-A-S-H 凝胶,促进了混凝土的长期强度发展。未掺钢纤维的试件中 G40 抗压强度最大,相比基准组提高了 18.2%;钢纤维掺量为 0.5% 时, G40S0.5 强度最大,相比基准组提高了 8.4%;掺量为 1.0% 时, G30S1.0 强度最大,提高了 19.8%;钢纤维掺量为 1.5% 中 G40S1.5 试件抗压

材料科学

强度最大,相比基准组提高了 38.4%。由此可见,矿渣粉通过其更细的粒径与火山灰活性,促进混凝土微观结构致密化,改善颗粒堆积并降低孔隙率,从而提升了抗压强度。低掺量钢纤维复合矿渣粉无法提升混凝土抗压强度,钢纤维掺量为 1.5% 时,提升混凝土抗压强度最显著。G20S1.5、G30S1.5、G40S1.5 相比基准组 G00 抗压强度分别提升 20.1%、29.3%、38.4%,随矿渣粉掺量增加,钢纤维增强效应逐渐增大。这表明矿渣粉通过提高水化反应凝胶数量,增强了钢纤维的在基体中的握裹力,可更好发挥钢纤维加筋增强效应。

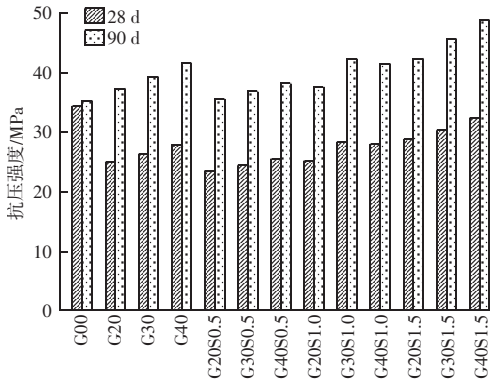


图 2 不同矿渣粉、钢纤维掺量混凝土抗压强度

Fig. 2 Compressive strength of concrete with varying dosages of GGBFS and steel fiber content

2.2 劈裂抗拉强度

由图 3 可知,矿渣粉、钢纤维掺量以及养护龄期对混凝土的劈裂抗拉性能均有显著影响。在 28 d 龄期时,钢纤维掺量为 0、0.5%、1.0% 的各组试件,劈裂抗拉强度均低于基准组 G00;其中,G40 试件劈裂抗拉强度降幅最大,较基准组降低 50.0%,反映出大掺量矿渣粉对混凝土早期抗拉强度具有抑制作用。这源于掺入矿渣粉减缓了水泥早期水化速率,且其与水泥水化产生的氢氧化钙之间的火山灰反应具有时间依赖性,导致养护初期强度发展较慢。值得注意的是,钢纤维的掺入可有效改善这一不足:随纤维掺量提高,劈裂抗拉强度损失逐步减小;G40S1.5 试件劈裂抗拉强度较基准组提升 5.9%。说明钢纤维在混凝土呈三维乱向分布,能够有效桥接裂缝、延迟裂缝扩展,从而提升混凝土的抗拉承载力。

至 90 d 龄期时,矿渣粉的长期火山灰效应显著发挥,除 G40、G40S0.5 试件外,其他各组试件劈裂抗拉强度均超过基准组。这是由于矿渣粉中活性组

分与水泥水化产物进一步反应,生成更多水化硅铝酸钙凝胶,强化了界面过渡区。然而,矿渣粉与钢纤维的协同作用呈现复杂性:当钢纤维掺量较低(0、0.5%)时,劈裂抗拉强度随矿渣粉掺量增加先增后减,在 30% 掺量附近达到峰值;而当纤维掺量较高(1.0%、1.5%)时,劈裂抗拉强度则随矿渣粉掺量增加持续下降。这可能与水化反应活性及其火山灰效应有关:矿渣粉掺量为 20% 时,矿渣粉与水泥水化反应较为充分,生成的凝胶可为纤维提供更强的锚固基础;当矿渣粉掺量增大导致水泥掺量减小,过量的矿渣粉无法参与水化反应,仅能通过填充效应提高抗压强度,但无法提高混凝土界面过渡区强度,由此导致劈裂抗拉强度降低。矿渣粉掺量为 20% 时,与钢纤维的增强效应尤为显著。当纤维掺量分别为 0.5%、1.0%、1.5% 时,劈裂抗拉强度较基准组 G00 分别提高 2.8%、22.7% 与 46.2%;而钢纤维掺量为 0,矿渣粉掺量为 20%、30%、40% 的试件,相比 G00 分别提高了 5.9%、11.6%、降低 5.7%。这表明钢纤维对劈裂抗拉强度的提升效果远优于矿渣粉,且其增强效率高于对抗压强度的贡献,这源于纤维在受拉过程中有效桥接裂缝、抑制裂缝扩展,从而显著改善混凝土的抗拉性能与韧性。

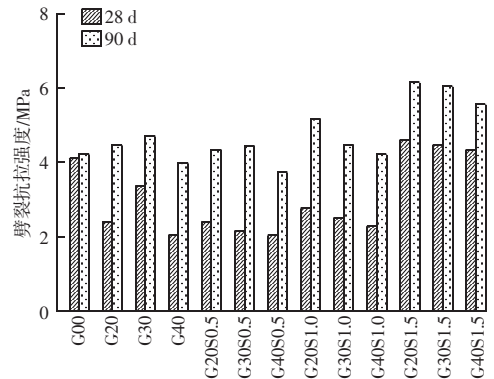


图 3 不同矿渣粉、钢纤维掺量混凝土劈裂抗拉强度

Fig. 3 Indirect tensile strength of concrete with varying dosages of GGBFS and steel fibers

2.3 抗折强度

由图 4 可知,在混凝土 28、90 d 抗折强度均随矿渣粉掺量增加而降低,这一趋势在不同钢纤维掺量下均保持一致。28 d 龄期时,未掺钢纤维的 G20、G30、G40 试件抗折强度均低于基准组 G00,分别降低了 7.5%、13.3%、20.9%。掺入钢纤维可显著提高混凝土的抗折强度,除 G40S0.5 试件外,各组掺

钢纤维的试件抗折强度均高于基准组 G00；G20S0.5、G20S1.0、G20S1.5 试件抗折强度增幅最为显著，相比基准组分别提高了 4.6%、15.1%、28.6%。90 d 龄期时，所有试件的抗折强度均高于基准组，各组试件混凝土抗折强度较 28 d 龄期均有所增长。这与抗压强度、劈裂抗拉强度增强随龄期增长的机制相同，更长的养护龄期可促进矿渣粉与水泥水化产物持续进行水化反应，生成更多的硅酸钙、硅铝酸钙凝胶，从而提高混凝土抵抗变形的能力。混凝土抗折强度随钢纤维掺量增加而提高，G20、G20S0.5、G20S1.0、G20S1.5 试件相比基准组分别提高了 5.6%、11.1%、16.8%、27.9%。但抗折强度随养护龄期增长幅值随钢纤维掺量增加而减小；G20、G20S0.5、G20S1.0、G20S1.5 试件 90 d 相比 28 d 抗折强度分别提高了 22.6%、14.1%、9.1%、6.9%。钢纤维通过桥接、抑制裂缝发展作用，使混凝土受弯时从脆性破坏变成韧性破坏，加载试验呈现“裂而不断”地破坏形态。这说明钢纤维对于抗折强度贡献远高于胶凝材料水化产物的作用。高纤维掺量下，混凝土早期抗折强度已显著提高，由此随养护龄期增长，抗折强度增幅不明显。

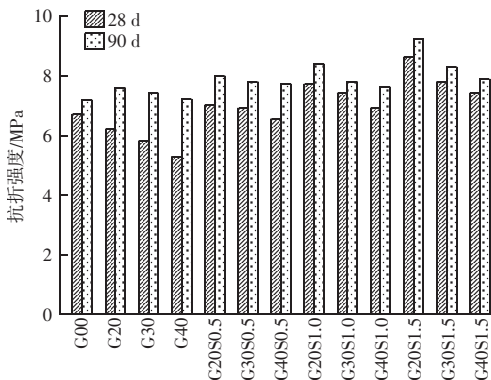


图 4 不同矿渣粉、钢纤维掺量混凝土抗折强度
Fig. 4 Flexural strength of concrete with varying dosages of GGBFS and steel fibers

2.4 耐磨性能

由图 5 可知，不同矿渣粉、钢纤维掺量的混凝土，其 3 000 转与 6 000 转循环磨损深度并非成比例增加；3 000 转循环磨损深度约为 6 000 转的 75%，这表明混凝土表层耐磨性能低于深层。仅掺矿渣粉的 G20、G30、G40 试件，其 3 000 转磨损深度较基准组 G00 分别降低 3.8%、4.6%、7.2%，6 000 转磨损深度分别降低 2.9%、4.3%、5.7%，说明矿渣

粉的掺入可提高混凝土耐磨性，随矿渣粉掺量增加耐磨性能有所提高。钢纤维掺量为 0.5% 时，不同矿渣粉掺量试件的磨损深度相差较小，相较基准组试件磨损深度略有增大；其中 G40S0.5 试件的增加最小，3 000、6 000 转分别增加了 1.8%、2.2%。钢纤维掺量为 1.0% 时，各试件的磨损深度较基准组略有减小；G40S1.0 试件的降幅最大，3 000、6 000 转磨损深度分别降低了 3.7%、1.9%。钢纤维掺量增加至 1.5% 时，磨损深度较基准组 G00 显著减小，且随矿渣粉掺量增加而减小；G20S1.5、G30S1.5、G40S1.5 试件 3 000 转磨损深度较基准组分别降低了 14.3%、17.7%、25.1%，6 000 转磨损深度相较基准组分别降低了 5.8%、9.1%、14.1%。综上，掺入 0.5% 钢纤维会略微降低混凝土耐磨性能；掺 1.0% 钢纤维混凝土耐磨性能相较基准组略有提高，但仍低于未掺钢纤维试件；钢纤维掺量为 1.5% 时，混凝土耐磨性能显著增大。综合对比抗压强度与耐磨性能，二者大致呈正相关性，抗压强度越高，耐磨性能越强。

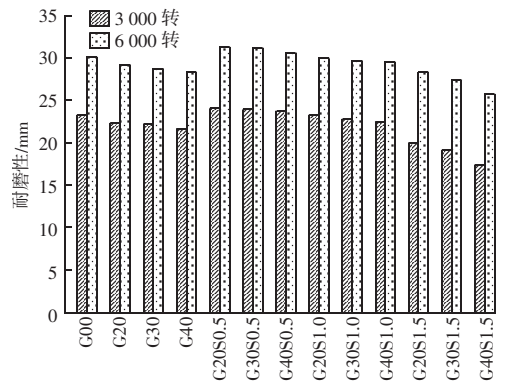


图 5 不同矿渣粉、钢纤维掺量混凝土耐磨性能
Fig. 5 Abrasion resistance of concrete with varying dosages of GGBFS and steel fibers

2.5 吸水率

由图 6 可知，基准组 G00 试件 24、48 h 吸水率分别为 4.7%、5.9%。未掺钢纤维的试件吸水率随矿渣粉掺量增加先减小后增大：G20、G30、G40 试件 24 h 吸水率相比基准组 G00 分别降低了 2.1%、4.3%、0.8%，48 h 吸水率分别降低了 1.9%、5.1%、1.2%。这表明适量掺入矿渣粉提高了混凝土的密实度，矿渣粉掺量为 30% 时混凝土吸水率最低。这源于矿渣粉通过水化、填充双重作用共同提高混凝土密实度；掺量过高时，未能水化的矿渣粉仅具有填充结构孔隙作用，对降低吸水率效果减弱。掺入钢纤维后，各组试件吸

材料科学

水率均表现出增大现象,且随钢纤维掺量增加而增大。矿渣粉掺量为 30%,钢纤维掺量分别为 0.5%、1.0%、1.5%的试件,48 h 吸水率相比基准组分别增加了 0.5%、1.1%、2.2%。G40S1.5 相比基准组吸水率增幅最大,48 h 吸水率增幅为 8.3%。掺入钢纤维将增大混凝土的吸水率,这源于钢纤维掺入使混凝土工作性降低,纤维与基体界面易于引入微小气泡,促使孔隙发育,导致吸水率增大。

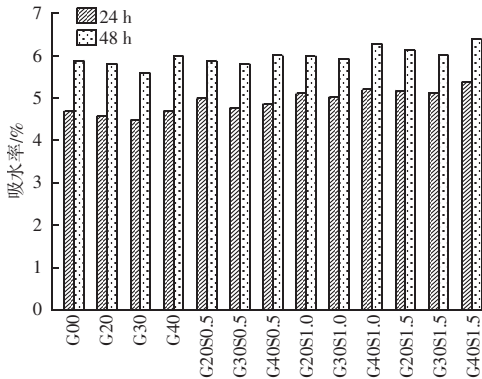


图6 不同矿渣粉、钢纤维掺量混凝土吸水率

Fig. 6 Water absorption of concrete with varying dosages of GGBFS and steel fibers

3 结论

为研究矿渣粉部分替代水泥以及掺入钢纤维对混凝土性能的影响规律,通过室内试验分析了不同矿渣粉、钢纤维掺量对混凝土力学性能、耐磨性能、吸水率的影响,得出以下结论:

(1) 矿渣粉部分替代水泥将延缓水化反应,28 d 抗压强度均降低;延长养护龄期至 90 d,抗压强度显著提高,且抗压强度随矿渣粉掺量增加而增大。掺 40% 矿渣粉的试件抗压强度较基准组提高了 18.3%。钢纤维掺量不大于 1% 时,因引入缺陷以及纤维增强作用不足混凝土抗压强度有所下降;掺量为 1.5% 时,增强效应显著,掺 40% 矿渣粉与 1.5% 钢纤维试件抗压强度较基准组提高了 38.4%。

(2) 掺矿渣粉的混凝土 28 d 劈裂抗拉强度降低,掺 1.5% 钢纤维有效弥补这一不足,使强度较基准组提高了 5.9%。养护至 90 d 时,劈裂抗拉强度显著提高,20% 矿渣粉与 1.0%、1.5% 钢纤维组合协同效应最为显著,较基准组提升 22.7%、46.2%。

(3) 混凝土 28、90 d 抗折强度均随矿渣粉掺量增加而降低,随钢纤维掺量增加而增大。延长养护

龄期可提升抗折强度,但其增幅随钢纤维掺量增加而减小,说明钢纤维对抗折强度的贡献更为显著。

(4) 混凝土耐磨性能随矿渣粉掺量增加而增大,掺入 40% 矿渣粉的试件 6 000 转磨损深度较基准组降低 5.7%。掺 0.5% 钢纤维会降低耐磨性能,掺 1.0% 钢纤维耐磨性能略有提高,掺 1.5% 钢纤维耐磨性能显著提高,与 40% 矿渣粉复合 6 000 转磨损深度降低了 14.1%。

(5) 混凝土吸水率随矿渣粉掺量增加先增大后减小,30% 矿渣粉掺量吸水率最小,随钢纤维掺量增加而增大,掺 30% 矿渣粉与 1.5% 钢纤维的试件吸水率较基准组增加 2.2%。

参 考 文 献

- [1] 朱兆斌. 交通荷载下 Kelvin 地基上混凝土路面厚板动力响应研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (6): 124-130, 142.
- [2] 陈学理, 赵玉红, 张陌. 矿渣对轻骨料混凝土耐久性影响试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (3): 88-92.
- [3] 杜兴亮. 矿渣微粉在混凝土中的作用机理研究及工程指导意义 [J]. 混凝土, 2022, (8): 87-91.
- [4] 杨军平, 孙文. S105 级矿渣粉掺量对混凝土工作性能和力学性能的影响 [J]. 混凝土, 2024, (11): 126-128, 133.
- [5] 黄法礼, 王振, 易忠来, 等. 超细矿渣粉在水泥颗粒中的密实填充作用 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (8): 2647-2652.
- [6] 杨尊, 李碧雄, 张治博, 等. 高钛矿渣在水泥混凝土中的应用进展 [J]. 材料导报, 2024, 38 (18): 97-105.
- [7] 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.
- [8] 周岳, 周健, 唐孟雄, 等. 粉煤灰和矿渣粉对混凝土抗氯离子渗透和抗碳化性能的影响 [J]. 混凝土, 2021, (7): 60-64.
- [9] 王道远, 袁金秀, 武薇, 等. 纤维增强混凝土静动态力学性能研究进展 [J]. 材料科学与工程学报, 2025, 43 (3): 493-503.
- [10] 夏冬桃, 喻诗汀, 李彪, 等. 钢纤维增强碱矿渣再生混凝土的力学性能及碳排放评价 [J]. 建筑材料学报, 2024, 27 (10): 938-945.
- [11] 赵云, 毕继红, 王照耀, 等. 矿渣粉对钢纤维自密实混凝土性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2022, 25 (1): 24-30.
- [12] 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.
- [13] 孙小飞, 吴天乾, 余振鹏, 等. 钢纤维再生混凝土劈裂拉伸力学性能与破坏机理 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (3): 883-891.
- [14] 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.
- [15] 袁晓辉, 石艳羽, 陈宜新, 等. 钢纤维掺量对碱矿渣混凝土力学性能的影响 [J]. 信阳师范学院学报 (自然科学版), 2023, 36 (4): 656-662.