

粉煤灰-钢纤维增强全再生粗骨料混凝土性能研究

Study on the Performance of Fly Ash-Steel Fiber Reinforced Fully Recycled Coarse Aggregate Concrete

郑宇炜

(青岛大学附属医院, 青岛 266003)

摘要: 为提高全再生粗骨料混凝土的性能, 实现废弃混凝土资源最大化利用, 以粉煤灰 (FA)、钢纤维 (SF) 掺量为设计变量, 开展全再生粗骨料混凝土力学强度、吸水率、氯离子渗透深度试验, 分析 FA、SF 掺量变化对力学及耐久性能影响。结果表明: 再生粗骨料混凝土抗压、劈裂抗拉强度随 FA 掺量增加先增大后减小, 随 SF 掺量增加而增大; 吸水率、氯离子渗透深度随 FA 掺量增加先减小后增大, 随 SF 掺量增加略有增大; 15% FA 掺量时混凝土性能最佳, 90 d 30% FA 掺量优于未掺 FA; 双掺 FA、SF 具有协同效应, 可提高力学强度并缓解 SF 对耐久性不利影响, 推荐采用 15% FA + 1.0% FS 的掺量组合。研究成果可为全再生粗骨料混凝土的配合比设计提供参考。

关键词: 全再生粗骨料混凝土; 粉煤灰; 钢纤维; 力学性能; 耐久性能

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 05-0049-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.010

ZHENG Yuwei

(The Affiliated Hospital of Qingdao University, Qingdao 266003, China)

Abstract: In order to improve the performance of fully recycled coarse aggregate concrete and maximize the use of waste concrete resources, the mechanical strength, water absorption, and chloride ion penetration depth tests of fully recycled coarse aggregate concrete were carried out with the mixing amounts of fly ash (FA) and steel fibers (SF) as the design variables to analyze the effects of the changes in the mixing amounts of FA and SF on the mechanical and durability performance. The results show that: the compressive and split tensile strength of recycled coarse aggregate concrete increases and then decreases with the increase of FA dosage, and increases with the increase of SF dosage; water absorption, chloride ion penetration depth decreases and then increases with the increase of FA dosage, and slightly increases with the increase of SF dosage; 15% FA dosage has the best performance of the concrete, and 30% FA dosage in 90 d is better than that of unadulterated FA; the double-dosing of FA and SF has a synergistic effect, which can improve the mechanical strength and alleviate the effects of SF dosage. The double mixing of FA and SF has synergistic effect, which can improve the mechanical strength and alleviate the unfavorable effect of SF on durability, and it is recommended to use the mixing combination of 15% FA + 1.0% FS. The results of the research can provide reference for the proportion design of fully recycled coarse aggregate concrete.

Key words: fully recycled coarse aggregate concrete; fly ash; steel fibre; mechanical property; durability

0 引言

作者简介: 郑宇炜 (1972—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 医院建筑建设及维护。

收稿日期: 2025-05-15

将废弃混凝土加工为再生骨料替代传统天然砂石材料, 制备再生粗骨料混凝土, 可降低建筑行业对天然砂石依赖, 充分发挥废弃混凝土的低碳潜

材料科学

力, 解决建筑垃圾带来的环境问题, 为建筑行业混凝土循环经济利用提供新模式。但大量研究证明, 再生骨料混凝土相比于普通混凝土力学及耐久性能均有所降低^[1-2], 制约了再生骨料混凝土的广泛应用。

近年来, 研究矿物掺料、纤维增强再生骨料混凝土性能, 对再生骨料混凝土制备及应用具有重要推动作用。粉煤灰是优异的水泥替代矿料, 刘婷等^[3]研究了不同粉煤灰掺量、再生骨料取代率对混凝土强度影响规律, 结果表明粉煤灰掺量为 10% 时可提高抗压强度; 高瞻等^[4]研究超细粉煤灰替代水泥对再生骨料混凝土力学及抗冻性的变化规律, 15% 粉煤灰掺量时可提高抗压强度、降低质量损失率; 陈祥花等^[5]以粉煤灰掺量、水胶比为变量, 制备了 11 组全再生粗骨料自密实混凝土试件, 研究发现粉煤灰掺量为 20%~30% 时混凝土工作性能最佳; 张玉栋等^[6-7]采用双掺粉煤灰、矿粉改性全再生粗骨料混凝土力学及工作性能, 数据显示 10% 粉煤灰 + 5% 矿粉掺量可制备 C30 强度等级混凝土; 程子扬等^[8]研究单掺或复掺纳米 CaCO_3 、粉煤灰时再生骨料混凝土力学及抗氯离子渗透性能变化规律, 认为单掺粉煤灰可提高抗氯离子渗透及后期力学性能; 胡耀文等^[9]研究水灰比、再生骨料取代率、粉煤灰变化对混凝土吸水率影响, 结果表明添加粉煤灰增强混凝土抗渗性能, 钢纤维对混凝土具有显著的增韧、阻裂作用; 崔正龙等^[10]研究了钢纤维体积掺量对全再生粗骨料混凝土受压损伤影响, 获得了轴心受压破坏规律, 建立了钢纤维再生粗骨料混凝土损伤模型; 苏炜炜等^[11]研究了不同钢纤维体积分数时全再生粗骨料混凝土破坏形态及应力-应变曲线, 认为纤维体积掺量不宜大于 1.5%; 刘春阳等^[12]采用缩尺模型进行了钢纤维再生粗骨料钢筋混凝土梁抗弯承载力变幅试验, 数据显示相比传统骨料混凝土梁承载力提高约 6%; 张鹏等^[13]通过正交试验, 研究端钩钢纤维、玄武岩纤维对再生粗骨料混凝土力学性能的影响, 建立了力学强度预测模型; 王俊波等^[14]通过纳米 SiO_2 、钢纤维改性再生骨料混凝土, 结果表明复掺相比单掺提升力学效果更为显著, 建议纳米 SiO_2 、钢纤维掺量分别为 1.0%、1.5%; 余芳等^[15]研究了钢纤维体积分数、长径比对全再生骨

料混凝土力学影响, 长径比 63.6、体积分数 0.5% 时提升效果最佳。综上, 单独采用粉煤灰、钢纤维均可增强再生骨料混凝土力学性能, 但尚未见粉煤灰、钢纤维协同增强全再生骨料混凝土力学及耐久性能的报道, 当前对再生骨料混凝土耐久性研究多集中于骨料、水灰比、外加剂、辅助胶凝材料等方向^[16], 对于粉煤灰、钢纤维协同增强耐久性影响规律尚不清晰。

鉴于此, 拟开展通过改变粉煤灰、钢纤维掺量变化, 分析对全再生粗骨料混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度、吸水率、氯离子渗透深度变化规律的影响, 为完善全再生粗骨料混凝土配合比设计、推动其工程应用提供参考。

1 试验

1.1 原材料

海螺 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥, 比表面积 $256\text{ m}^2/\text{kg}$, 密度 $3\,130\text{ kg}/\text{m}^3$; 低钙粉煤灰, 密度 $2\,340\text{ kg}/\text{m}^3$, 比表面积 $435\text{ m}^2/\text{kg}$, 烧失量 4.6%, 水泥、粉煤灰 (FA) 主要化学成分见表 1。纤维采用工业冷拔端钩钢纤维 (SF), 纤维长度 35 mm, 直径 0.9 mm, 长径比 39, 抗拉强度 1 200 MPa, 弹性模量 210 GPa。细骨料为机制砂, 由花岗岩破碎而成, 密度 $1\,675\text{ kg}/\text{m}^3$, 吸水率 1.2%, 细度模数 2.3, 为中砂; 粗骨料由废弃 C30 混凝土机械破碎成, 最大粒径 19.5 mm, 密度 $1\,359\text{ kg}/\text{m}^3$, 吸水率 7.5%。减水剂为聚羧酸高效减水剂, 拌合水为自来水。

表 1 水泥、粉煤灰主要化学成分

Table 1 Cement, FA main chemical composition							/%
化学成分	Al_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O
水泥	5.4	23.7	61.4	1.6	4.1	0.4	1.3
FA	32.4	55.2	3.1	0.5	3.4	0.1	2.6

1.2 配合比

制备 9 种全再生粗骨料混凝土试件, 各试件配合比见表 2。FA 取代水泥质量分数为 0、15%、30%, SF 体积掺量为 0、0.5%、1.0%; 所有配合比试件机制砂、再生粗骨料掺量分别为 885 、 $822\text{ kg}/\text{m}^3$, 减水剂掺量为胶凝材料的 1%, 再生粗骨料均为饱水-表面干燥条件下使用, 不额外考虑其吸水率, 固定水灰比为 0.33。

表 2 FA、SF 再生粗骨料混凝土配合比

Table 2 FA, SF recycled coarse aggregate concrete mix ratio / (kg/m³)			
编号	水泥	FA	SF
FA0SF0	490.0		
FA0SF0.5	490.0		39
FA0SF1	490.0		78
FA15SF0	416.5	73.5	
FA15SF0.5	416.5	73.5	39
FA15SF1	416.5	73.5	78
FA30SF0	343.0	147.0	
FA30SF0.5	343.0	147.0	39
FA30SF1	343.0	147.0	78

1.3 试样制备及试验方法

拌合物制备前将再生粗骨料浸泡 2 h，控干水分后晾干 15 min，以其表面干燥为宜。再生粗骨料晾干后立即投入搅拌机，加入机制砂、水泥、FA，以 60 r/min 干拌 1 min；加入 60% 拌合水，同样转速搅拌 2 min；再加入 SF、剩余拌合水、减水剂，以 100 r/min 高速搅拌 4 min，确保 SF 充分分散至整个混合料中。将搅拌完成的混合料入模成型并振捣密实，抹平试件表面并用保鲜膜覆盖，常温养护 24 h 脱模，放置标准养护室中养护至预定龄期。

抗压、劈裂抗拉强度试件龄期为 28、90 d，吸水率试件龄期为 90 d，抗压强度试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm，劈裂抗拉强度试验尺寸为直径 100 mm、高度 200 mm 圆柱体。吸水率采用边长 100 mm 立方体试件，按照式 (1) 计算吸水率；试验方法按照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》执行。

$$W_a = \frac{m_s - m_d}{m_d} \times 100\%$$

(1)

式中： W_a 为吸水率； m_s 为饱水试件表干质量，g； m_d 为烘干试件质量，g。

采用浸泡法测定再生骨料混凝土氯离子渗透深度，试件尺寸为边长 100 mm 立方体，养护龄期为 90 d。将试件完全浸入质量分数为 10% 的 NaCl 溶液侵蚀 60 d，侵蚀完成后取出试件晾干，将试件从中间切为两半，喷雾硝酸银溶液，测量形成白色沉淀物平均深度。

2 结果与分析

2.1 抗压强度

由图 1 可知，试件的抗压强度在 FA 掺量为 15% 时增长最为显著；与 FA0SF0 试件相比，FA15SF0、FA30SF0 试件 28 d 抗压强度分别增长 4.3%、-7.9%，90 d 抗压强度分别增长 12.5%、2.8%；可以看出，掺入适量 FA 可有效提高再生骨料混凝土的抗压强度，这主要归结于 FA 中的 SiO_2 颗粒与水泥水化 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生胶凝反应，生成坚固、致密的硅酸钙水合物，由此提高混凝土强度，同时 FA 中细小颗粒具有优异的填料效应，可减小混凝土基体中的孔隙，提高结构密实度；FA 掺量为 30% 时混凝土 28 d 强度出现降低现象，一方面归结于 FA 掺量增大导致胶凝材料中氧化钙含量减小，由此降低了水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量，抑制了水化硅酸钙 (C-S-H) 生成，另一方面低钙 FA 水化周期长，28 d 后强度贡献更大，与水泥火山灰反应生成水化铝酸钙 (C-A-H) 凝胶和钙矾石晶体，故 90 d 强度出现显著增长。

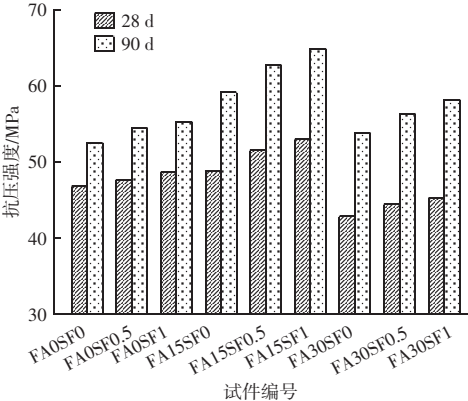


图 1 不同龄期 FA、SF 掺量再生粗骨料混凝土抗压强度
Fig. 1 Compressive strength of recycled coarse aggregate concrete with different ages of FA and SF admixture

试件抗压强度均随 SF 掺量增加呈增大趋势；28 d 时，FA0SF0.5、FA0SF1 相比 FA0SF0 试件抗压强度分别增长 1.7%、3.9%，FA15SF0.5、FA15SF1 相比 FA15SF0 试件抗压强度分别增长 5.5%、8.4%，FA30SF0.5、FA30SF1 相比 FA30SF0 试件抗压强度分别增长 3%、5.1%；90 d 时，FA0SF0.5、FA0SF1 相比 FA0SF0 试件抗压强度分别增长 3.6%、5.3%，FA15SF0.5、FA15SF1 相比 FA15SF0 试件抗压强度分别增长 6.1%、9.6%，FA30SF0.5、FA30SF1 相比

材料科学

FA30SF0 试件抗压强度分别增长 4.1%、7.6%。添加 SF 纤维可为再生骨料混凝土基体提供约束效应,由此提高了混凝土的抗压强度;FA 掺量为 15% 时随 SF 掺量增加混凝土抗压强度增幅最大,且 FA 掺量为 30% 的试件增幅大于未掺 FA 试件,这说明适量添加 FA 可改善 FS 与基体之间的黏结力,提高 FS 的增强效率,15% FA + 1.0% FS 掺量时协同效应最优。

2.2 劈裂抗拉强度

如图 2 所示,从 28、90 d FA 掺量对再生骨料混凝土劈裂抗拉强度影响分析,与 FA0SF0 试件相比,FA15SF0、FA30SF0 试件 28 d 抗压强度分别增长 6.6%、-6.1%,90 d 抗压强度分别增长 14.5%、2.9%;同样,FA 掺量为 15% 时提高再生骨料混凝土劈裂抗拉强度效果最佳,30% FA 掺量下 28 d 劈裂抗拉强度出现损失,90 d 时抗拉强度才能充分增长,这是由于低钙 FA 火山灰效应的延时性造成,导致混凝土后期强度增长更为显著。掺入适量 FA 可增强胶凝材料与骨料之间界面过渡区 (ITZ) 的黏结性能,改善 ITZ 的密实程度,从而提升劈裂抗拉强度;高 FA 掺量时需加长养护龄期,方可达到与未掺 FA 时相当的抗拉强度。

试件抗压强度均随 SF 掺量增加呈增大趋势;未掺 FA,28 d 时 FA0SF0.5、FA0SF1 相比 FA0SF0 试件劈裂抗拉强度分别增长 19.8%、25.9%,90 d 时 FA0SF0.5、FA0SF1 相比 FA0SF0 试件劈裂抗拉强度分别增长 22.8%、24.9%;可以看出,再生骨料混凝土的劈裂抗拉强度随 SF 掺量增加而增大,且抗拉强度增幅随养护龄期增长未见显著增大,这是由于 SF 相比混凝土具有极高的抗拉强度,掺入混凝土中形成水泥基复合材料,对增大抗拉强度极为有效;SF 可延缓混凝土基体受拉应力作用下裂缝的开展,避免基体过早开裂而失效。掺入 FA,28 d 时,FA15SF0.5、FA15SF1 相比 FA15SF0 试件劈裂抗拉强度分别增长 23.3%、33.4%,FA30SF0.5、FA30SF1 相比 FA30SF0 试件劈裂抗拉强度分别增长 30.5%、37.2%;90 d 时,FA15SF0.5、FA15SF1 相比 FA15SF0 试件劈裂抗拉强度分别增长 25.5%、30.9%,FA30SF0.5、FA30SF1 相比 FA30SF0 试件劈裂抗拉强度分别增长 25.5%、34.1%;可见,随 FA 掺量增加,提高 SF 掺量对增大混凝土劈裂抗拉强度效果更

佳,可降低因高 FA 掺量时引起的抗拉强度损失率;同时掺入 FA、SF 改善混凝土的抗拉性能效果更佳,15% FA + 1.0% FS 掺量劈裂抗拉强度最大。

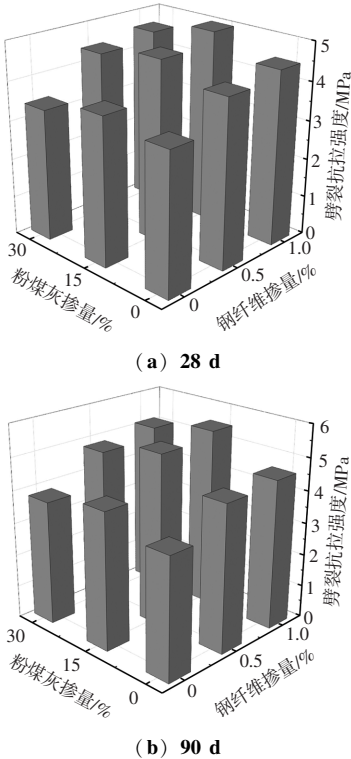


图 2 不同龄期 FA、SF 掺量再生粗骨料混凝土劈裂抗拉强度
Fig. 2 Splitting tensile strength of recycled coarse aggregate concrete with different ages of FA and SF admixture

2.3 吸水率

由图 3 可知,再生粗骨料混凝土吸水率随 FA 掺量增加先减小后增大,FA 掺量为 15% 时吸水率最小;与 FA0SF0 试件相比,FA15SF0、FA30SF0 试件吸水率分别减小 24.2%、15.8%;与 FA0SF0.5 试件相比,FA15SF0.5、FA30SF0.5 试件吸水率分别减小 24.5%、16%;与 FA0SF1 试件相比,FA15SF1、FA30SF1 试件吸水率分别减小 24.9%、16.8%。掺入 FA 可降低混凝土中的孔隙率,这主要由于 FA 中 SiO₂ 可与水化 Ca (OH)₂ 反应生成更多 C-S-H,形成致密的胶凝材料结构体,降低了混凝土的孔隙率,另外 FA 颗粒的填料效应也可充填混凝土拌合物中的微孔隙,提高结构密实程度;FA 掺量为 30% 时,水泥掺量大大减小,导致水化 Ca (OH)₂ 含量减小,影响了混凝土基体的密实程度,提高了吸水率,但吸水率仍小于未掺 FA 试件。

从同时添加 FA、SF 对混凝土吸水率的耦合效应

分析, FA 可以补偿因 SF 加入引起混凝土吸水率增大问题; FA15SF0.5、FA15SF1 相比 FA15SF0 试件吸水率分别增长 1.5%、3.2%, FA30SF0.5、FA30SF1 相比 FA30SF0 试件吸水率分别增长 1.8%、3.7%; 可以看出, 增大 SF 掺量, 再生骨料混凝土吸水率略微增大现象, 说明添加 SF 可略微增加混凝土拌合物的孔隙, 提高了再生骨料混凝土的吸水率; 15% FA 掺量时添加 SF 混凝土具有更小的吸水率, 说明 FA 可减少因加入 SF 而产生的孔隙数量。吸水率是表征混凝土孔隙率的重要参数, 减小吸水率可降低有害化学物质渗入到基体内部而引起水泥基材料劣化问题, 从而提高混凝土结构的抗渗性能。

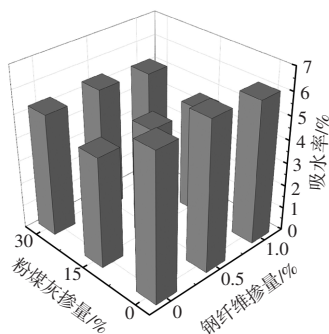


图3 不同 FA、SF 掺量再生粗骨料混凝土吸水率

Fig. 3 Water absorption of recycled coarse aggregate concrete with different FA and SF admixtures

2.4 氯离子渗透深度

由图4可知, 再生粗骨料混凝土氯离子渗透深度随 FA 掺量增加先增大后减小, FA 掺量为 15% 时氯离子渗透深度最小; 与 FA0SF0 试件相比, FA15SF0、FA30SF0 试件氯离子渗透深度分别减小 26.1%、20.9%; 这与吸水率变化规律基本相似, 掺入 FA 可降低混凝土结构孔隙率, 由此提高抗氯离子的渗透性能。FA 增强抗氯离子渗透性能表现为两个方面, 一方面为 FA 填料效应提高了拌合物的密实程度, 且长龄期时 FA 可与水泥生成更多致密结构的 C-S-H 和铝酸三钙 (C_3A) 凝胶, 填料效应和水胶反应均增强了结构密实程度, 增强抗氯离子渗透性能; 另一方面 FA 中氧化铝含量大于水泥, 氧化铝可提高水泥浆体固化氯离子能力, 提高混凝土抗氯离子渗透性能。

添加 FS 略微增大再生骨料混凝土氯离子渗透深度, FA0SF0.5、FA0SF1 相比 FA0SF0 试件氯离子渗透深度分别增长 2.9%、3.4%, FA15SF0.5、FA15SF1

相比 FA15SF0 试件氯离子渗透深度分别增长 0.7%、2.7%, FA30SF0.5、FA30SF1 相比 FA30SF0 试件抗压强度分别增长 3.1%、3.7%; 可以看出, 15% FA 掺量时增加 SF 掺量氯离子渗透深度增幅最小, 30% FA 与未掺 FA 试件氯离子渗透深度增幅相当; 添加 SF 不会改变混凝土微观结构, 仅能略微增加基体孔隙率, 从而增加氯离子渗透深度; FA 除了可增强胶凝材料结构性能外, 还可增强 SF 与胶凝材料之间的黏结力, 由此降低了掺入 SF 引起的耐久性劣化影响, 说明添加 FA 提高钢纤维再生骨料混凝土耐久性能具有显著效果, 15% FA 和 0.5%~1.0% SF 掺量的混凝土均具有较佳的抗氯离子渗透性能。

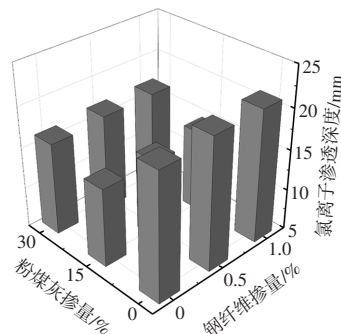


图4 不同 FA、SF 掺量再生粗骨料混凝土氯离子渗透深度

Fig. 4 Depth of chloride penetration in recycled coarse aggregate concrete with different FA and SF admixtures

3 结论

全掺再生粗骨料混凝土相比天然骨料混凝土具有强度低、耐久性差等缺陷, 为提高其力学及耐久性能, 研究粉煤灰、钢纤维掺量变化对抗压强度、劈裂抗拉强度、吸水率、氯离子渗透深度的影响规律, 得出以下结论:

(1) 再生骨料混凝土抗压、劈裂抗拉强度随 FA 掺量增加先增大后减小, FA 掺量为 15% 时最大; FA 掺量为 30% 时, 28 d 强度降低, 90 d 强度略有增长; 抗压、劈裂抗拉强度随 SF 掺量增加而增大, 添加 FA 时, 提高 SF 掺量对增大混凝土劈裂抗拉强度效果优于抗压强度, 15% FA + 1.0% FS 掺量时协同效应最佳。

(2) 再生骨料混凝土吸水率随 FA 掺量增加先减小后增大, 随 SF 掺量增加略微增大; 15% FA 掺量吸水率最小, 30% FA 掺量小于未掺 FA 试件; 添加 FA 可补偿因 SF 加入引起吸水率增大问题, 15% FA

材料科学

掺量时 SF 混凝土具有更小的吸水率。

(3) 再生骨料混凝土氯离子渗透深度随 FA 掺量增加先减小后增大, 15% FA 掺量时氯离子渗透深度最小, 30% FA 相比 15% 掺量时氯离子渗透深度仅增加约 6%, 同样具有优异的抗氯离子渗透性能; 氯离子渗透深度随 SF 掺量增加而增大, 15% FA 掺量时增加 SF 掺量, 氯离子渗透深度增幅最小。

参 考 文 献

[1] 肖建庄, 唐宇翔, 张航华, 等. 全再生骨料混凝土基本特性及受压损伤本构 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2023, 51 (12): 1910-1918, 1982.

[2] 陈义国, 齐仕杰, 纪续, 等. 粉煤灰再生骨料混凝土力学性能及微结构演变 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (1): 13-17, 23.

[3] 刘婷, 刘京红, 张仕桦, 等. 粉煤灰掺量和再生骨料替代率对再生混凝土强度影响研究 [J]. 河北农业大学学报, 2020, 43 (1): 148-152.

[4] 高瞻, 张启志. 超细粉煤灰改性再生骨料混凝土力学及抗冻性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (1): 104-107, 135.

[5] 陈祥花, 劳国威, 郑述芳, 等. 粉煤灰掺量对全再生粗骨料自密实混凝土工作性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (2): 531-539.

[6] 张玉栋, 张佳帅, 贾吉龙, 等. 粗骨料全替代再生混凝土的孔结构与力学性能分析 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (8): 3005-

3016, 3033.

[7] 张玉栋, 谢龙, 张富钧, 等. 掺粉煤灰和矿粉对粗骨料全替代混凝土力学性能的影响 [J]. 混凝土, 2024 (1): 134-138.

[8] 程子扬, 陈国夫, 屠艳平. 纳米 CaCO_3 对粉煤灰再生骨料混凝土性能及微结构的影响 [J]. 建筑材料学报, 2023, 26 (3): 228-235.

[9] 胡耀文, 李镜培, 谢峰. 再生混凝土抗渗性能试验研究 [J]. 结构工程师, 2020, 36 (3): 160-166.

[10] 崔正龙, 费海超, 孙万吉, 等. 钢纤维再生粗骨料混凝土受压声发射特性与损伤演化 [J]. 振动与冲击, 2023, 42 (5): 136-142.

[11] 苏炜炜, 陈宗平, 廖浩宇, 等. 钢纤维全再生粗骨料混凝土力学性能试验及强度指标换算 [J]. 应用力学学报, 2022, 39 (5): 947-957.

[12] 刘春阳, 顾一凡, 高英棋, 等. 钢纤维全再生粗骨料混凝土梁抗弯性能试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41 (5): 946-953.

[13] 张鹏, 罗冬, 豆桐, 等. 端钩钢-玄武岩混杂纤维再生混凝土力学性能试验研究 [J]. 混凝土, 2025 (2): 1-7.

[14] 王俊波, 申贺文, 王永贵, 等. 纳米二氧化硅与钢纤维对再生混凝土力学性能的影响 [J]. 武汉科技大学学报, 2025, 48 (2): 121-132.

[15] 余芳, 李林柏, 姚大立. 钢纤维自密实再生混凝土的力学性能 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (1): 264-273.

[16] 张少峰, 齐红军. 再生混凝土耐久性能研究进展 [J]. 混凝土, 2021 (9): 56-62.