

# 聚丙烯纤维增强再生粗骨料混凝土性能研究

Study on the Properties of Recycled Coarse Aggregate Concrete Reinforced with Polypropylene Fibers

卢惟铭

(厦门市湖里区建设服务中心, 厦门 361000)

**摘要:** 为探究粉煤灰、硅灰、聚丙烯纤维 (PPF) 对再生粗骨料 (RA) 混凝土力学及耐久性影响, 采用 20% 粉煤灰、5% 硅灰等质量替代水泥制备了不同 PPF、RA 掺量的混凝土试件, 进行抗压强度、劈裂抗拉强度、吸水率、抗硫酸盐侵蚀、无损强度试验。结果表明: 抗压、劈裂抗拉强度随 RA 掺量增加而减小, 随 PPF 掺量增加而增大, 掺入粉煤灰、硅灰、PPF 可降低因掺入 RA 引起的强度损失; 吸水率、硫酸盐侵蚀抗压强度损失率、无损检测抗压强度随 RA 掺量增加而增大, 随 PPF 掺量增加而减小; 掺入 PPF 体积分数 1.5%、RA 掺量 50% 的再生粗骨料混凝土性能优于天然骨料混凝土。研究成果可为再生粗骨料混凝土的工程实际应用提供理论依据。

**关键词:** 再生粗骨料; 聚丙烯纤维; 多元矿物; 力学性能; 耐久性能; 无损强度检测

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 06-0012-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.06.003

LU Weiming

(Xiamen City Huli District Construction Service Centre, Xiamen 361000, China)

**Abstract:** To investigate the effects of fly ash, silica fume, and polypropylene fiber (PPF) on the mechanical and durability properties of concrete incorporating recycled coarse aggregate (RA), concrete specimens with varying PPF and RA contents were prepared. These specimens utilized 20% fly ash and 5% silica fume to replace cement at an equal mass ratio. Tests conducted included compressive strength, splitting tensile strength, water absorption, sulfate attack resistance, and non-destructive strength evaluation. The results showed that compressive and splitting tensile strength decreased with the increase of RA dosage and increased with the increase of PPF dosage, and the doping of fly ash, silica fume, and PPF could reduce the strength loss caused by the doping of RA; Water absorption, loss rate of compressive strength against sulfate erosion, and the difference of non-destructive strength testing increased with the increase of RA dosage, and decreased with the increase of PPF dosage, and the difference between the volume fraction of PPF of 1.5%, RA The performance of recycled coarse aggregate concrete with 1.5% PPF volume fraction and 50% RA dosage is better than that of natural aggregate concrete. The research results can provide theoretical basis for the practical application of recycled coarse aggregate concrete.

**Key words:** recycled coarse aggregate; polypropylene fiber; multi-mineral; mechanical properties; durability; nondestructive strength testing

## 0 引言

随着城市更新改造工程的推进, 将产生大量废弃建筑垃圾, 采用再生混凝土技术<sup>[1]</sup>可以将其二次利用, 不仅有效地解决了建筑垃圾积累、存放污染环境, 而且能够减少天然骨料用量, 节约自然

作者简介: 卢惟铭 (1970—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 工程建设管理。

收稿日期: 2025-06-30

资源，促进建筑行业可持续性发展。再生骨料因附着水泥砂浆，孔隙率增大，其强度低于天然骨料，导致再生混凝土的力学及耐久性较天然骨料混凝土有所降低<sup>[2-3]</sup>，制约了再生混凝土的应用与发展。基于此，研究增强再生骨料混凝土性能的材料与技术，对提高再生骨料混凝土的应用场景具有重要意义。

为提高再生骨料混凝土的力学及耐久性能，学者们进行了大量试验研究。刘凯华等<sup>[4]</sup>、张美香等<sup>[5]</sup>研究了骨料强化工艺对再生混凝土性能的影响，详细分析了级配强化、化学强化、纳米 SiO<sub>2</sub> 复合碳化对混凝土性能的影响规律及改性机理。纤维可有效改善混凝土的力学及耐久性能，孙小飞等<sup>[6]</sup>、董硕等<sup>[7]</sup>研究了钢纤维对再生混凝土力学性能的增强规律，钢纤维可增强混凝土的力学及抗裂性能，破坏形态由脆性转变为延性。苏炜炜等<sup>[8]</sup>分析了聚丙烯纤维体积分数对再生粗骨料混凝土力学影响，掺入聚丙烯纤维混凝土仍为脆性破坏，但可提高抗压、抗折强度及静压弹性模量。郑传磊等<sup>[9]</sup>采用快速冻融法进行不同再生粗骨料掺量的聚丙烯纤维混凝土抗冻性能试验，建立了纤维-再生粗骨料混凝土冻融损伤模型，可预测再生混凝土的使用寿命。金宝宏等<sup>[10]</sup>通过正交试验，研究钢纤维、聚丙烯纤维、再生粗骨料三因素对混凝土抗压、劈裂抗拉、抗折强度的影响，获得了三种材料的显著性因子。张培恒等<sup>[11]</sup>采用正交试验，研究聚丙烯纤维掺量、水灰比、泡沫掺量对再生粗骨料泡沫混凝土力学性能影响，纤维体积掺量为 0.2% 时提升效果最佳。辛志鹏等<sup>[12]</sup>认为复掺聚丙烯纤维、粉煤灰可提高全再生骨料透水混凝土力学及抗冻性能，降低透水性能，10% 粉煤灰 + 6 kg/m<sup>3</sup> 聚丙烯纤维掺量效果最优。矿物材料具有优异的填充效应及火山灰效应，适量替代水泥可增强混凝土强度。陈义国等<sup>[13]</sup>通过对粉煤灰再生骨料混凝土微观结构机理分析，认为再生骨料具有内养护效应，促进浆体的进一步水化反应，进而改善混凝土的力学性能。张鑫鑫等<sup>[14]</sup>研究硅灰对再生骨料混凝土抗冻性能影响，掺入硅灰可显著提升抗冻性能。廖丽萍等<sup>[15]</sup>采用正交试验得出 30% 粉煤灰 + 6% 硅灰掺量对提升生态再生混凝土性能最佳。乔宏霞等<sup>[16]</sup>基于 Wiener 方法建模分析，认为掺 20% 粉煤灰和 8% 硅灰的再生骨料混凝土耐久性

能最好。

综上，对于采用多种矿物材料和聚丙烯纤维协同增强再生骨料混凝土性能研究尚不清晰，故采用掺入一定量粉煤灰、硅灰，改变聚丙烯纤维及再生粗骨料掺量，分析再生粗骨料混凝土力学强度、吸水率、抗硫酸盐侵蚀性能、无损检测强度的变化规律，以期对再生粗骨料混凝土的工程实际应用提供技术支撑。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥，密度为 3.2 g/cm<sup>3</sup>，比表面积为 2 900 cm<sup>2</sup>/g，其他性能指标见表 1。Ⅰ级低钙粉煤灰，表观密度为 2 240 kg/m<sup>3</sup>，细度为 26.4%，烧失量为 2.5%，普通硅灰。水泥、粉煤灰、硅灰主要化学成分见表 2。聚丙烯纤维（PPF）长度为 12 mm，直径为 0.55 mm，密度为 920 kg/m<sup>3</sup>，抗拉强度为 3 160 MPa，拉伸强度为 420 MPa，失效应变为 0.21。细骨料为河砂，细度模数为 2.8，中砂，表观密度为 2 549 kg/m<sup>3</sup>；天然粗骨料采用本地碎石，再生粗骨料（RA）由建筑垃圾破碎筛分后获得 4.75 ~ 19.0 mm 粒径连续级配碎石，表观密度为 2 312 kg/m<sup>3</sup>，吸水率为 6.7%，压碎值为 19.4%。聚羧酸高效减水剂，减水率不低于 49%，拌合水为自来水。

表 1 水泥技术性能指标 Table 1 Technical indicators of cement						
凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa		细度/%
初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d	
190	225	29.9	51.5	5.1	9.3	3.6

表 2 水泥、粉煤灰、硅灰主要化学成分 Table 2 Main chemical components of cement, fly ash, and slag powder							
材料名称	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
水泥	6.1	22.7	63.4	1.2	4.6	0.6	0.3
粉煤灰	29.4	53.2	4.8	0.5	7.4	0.1	2.6
硅灰	1.7	91.6	0.2	0.4	0.6	0.1	0.5

1.2 配合比

RA 替代天然骨料分别为 50%、75%、100%；掺 RA 试件中掺入适量粉煤灰、硅灰替代水泥，改善再生骨料混凝土的性能，粉煤灰、硅灰分别替代水泥质量分数为 20%、5%，未掺 RA 试件不掺粉煤灰、硅灰；PPF 体积分数为 0.05%、0.1%、0.15%，减水

材料科学

剂掺量为胶凝材料的 1.5%，水灰比为 0.4；混凝土配合比见表 3。

表 3 混凝土配合比  
Table 3 Concrete mix ratio / (kg/m³)

试验组 编号	水泥	粉煤灰	硅灰	PPF	河砂	天然 粗骨料	RA	水	减水剂
POR0	440				696	1 124		176	6.6
P0.5R0	440			4.6	696	1 124		176	6.6
P1R0	440			9.2	696	1 124		176	6.6
P1.5R0	440			13.8	696	1 124		176	6.6
P0R50	330	88	22		696	562	562	176	6.6
P0.5R50	330	88	22	4.6	696	562	562	176	6.6
P1R50	330	88	22	9.2	696	562	562	176	6.6
P1.5R50	330	88	22	13.8	696	562	562	176	6.6
P0R75	330	88	22		696	281	843	176	6.6
P0.5R75	330	88	22	4.6	696	281	843	176	6.6
P1R75	330	88	22	9.2	696	281	843	176	6.6
P1.5R75	330	88	22	13.8	696	281	843	176	6.6
P0R100	330	88	22		696		1 124	176	6.6
P0.5R100	330	88	22	4.6	696		1 124	176	6.6
P1R100	330	88	22	9.2	696		1 124	176	6.6
P1.5R100	330	88	22	13.8	696		1 124	176	6.6

1.3 试验方法

将 RA 饱水，晾至面干状态后待用。首先将 PPF、河砂、粗骨料加入搅拌机，搅拌 2 min；然后加入水泥、粉煤灰、硅灰，搅拌 1 min；再加入水、减水剂，搅拌 3 min。拌合物入模后放置于振动台振捣密实，抹平试件表面，再用保鲜膜覆盖，室内洒水养护 24 h 脱模，放置标准养护室中分别养护 28、90 d。

按照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》要求，浇筑尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试件，进行抗压强度、劈裂抗拉强度试验。试验采用电液伺服万能试验机，抗压、劈裂抗拉强度试验荷载施加速率分别为 0.5、0.05 MPa/s。

按照 GB/T 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》进行 28 d 吸水率、抗硫酸盐侵蚀试验。采用浸泡法进行抗硫酸盐侵蚀试验，将养护 28 d 混凝土试件完全浸没在 5% 质量分数的 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中，浸泡 90 d 后取出晾干进行立方体抗压强度测试，浸泡期间每 15 d 标定一次 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液质量分数，确保含量恒定。

混凝土 90 d 龄期立方体抗压强度试验前进行无损抗压强度检测，采用 HT-550A 混凝土回弹仪测试，每个立方体侧面测试 2 次，取平均值。

2 结果与分析

2.1 抗压强度

由图 1 可以可知，混凝土抗压强度随着 RA 掺量的增加而减小，随着 PPF 掺量的增加而增大。28 d 龄期，与未掺 RA 试件相比，RA 掺量为 50%，PPF 体积分数分别为 0、0.5%、1%、1.5% 时，混凝土抗压强度分别降低 4.2%、3.9%、3.0%、2.5%；同理，RA 掺量为 75% 时，混凝土抗压强度分别降低 8.5%、7.8%、6.7%、4.6%；RA 掺量为 100% 时，混凝土抗压强度分别降低 21.7%、19.9%、19.3%、16.8%。由此可以看出，掺入 RA 显著降低了混凝土抗压强度，掺入粉煤灰、硅灰，减少了混凝土抗压强度损失；未掺 PPF，RA 掺量为 50%、75% 试件，混凝土抗压强度降低小于 10%；但 RA 掺量增加至 100% 后抗压强度出现显著降幅，这主要是因为 RA 中的水泥砂浆存在较多微孔隙，增加了混凝土孔隙率，由此降低了混凝土抗压强度。28 d 龄期，与未掺 PPF 相比，PPF 体积分数为 1.5%，RA 掺量为 0、50%、75%、100% 的试件抗压强度分别增长 24.2%、27.9%、29.5%、32.0%。可见，RA 掺量越大，混凝土抗压强度随着 PPF 体积分数的增加而增长得越显著。掺入 PPF 可增强混凝土抗压强度表现为两个方面：一方面，PPF 可细化混凝土基体中孔隙分布、充填微孔隙，提高结构密实度，由此提高混凝土结构强度；另一方面，其特有的桥接效应，约束混凝土裂缝开展而提高承载能力。

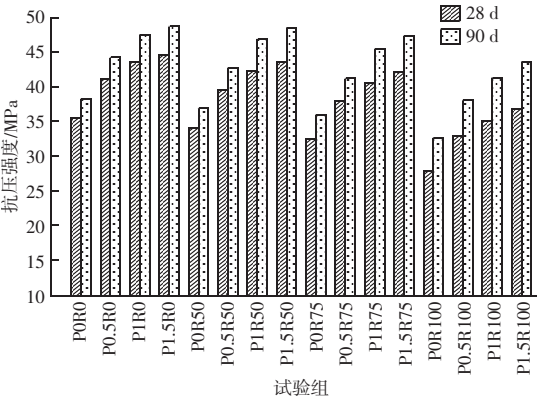


图 1 PPF 体积分数对混凝土抗压强度影响规律  
Fig. 1 The influence of PPF integral number on the compressive strength of concrete

PPF 体积分数为 1.5%，RA 掺量为 0、50%、75%、100% 时，90 d 相比 28 d 混凝土的抗压强度分别增长 9.2%、11.6%、12.4%、18.8%；90 d 龄期，PPF 体积分数为 1.5%，相比未掺 RA 试件，RA 掺量为 50%、75%、100% 的试件抗压强度分别降低 0.4%、2.9%、10.5%。由此可以看出，采用粉煤灰、硅灰适量替代水泥后，混凝土抗压强度仍显著增长，RA 掺量为 50%、75% 的试件抗压强度仅略有降低。这是由于粉煤灰水化反应速率低于水泥，长龄期时其可与再生骨料中水泥砂浆的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  生成更具胶凝性的硅酸钙水合物，提高基体强度；而硅灰则通过双重作用提升性能，微细颗粒填充混凝土基体孔隙，高效火山灰效应参与反应生成水化硅酸钙凝胶；粉煤灰、硅灰的水化反应产物硅酸钙凝胶可提高 PPF 与基体的黏结强度，避免了纤维受力而出现拔出现象，充分发挥纤维的抗拉效应。

## 2.2 劈裂抗拉强度

由图 2 可知，采用 RA 替代天然骨料将导致混凝土抗压强度显著降低。随着养护龄期增长和 PPF 掺量的增加，混凝土劈裂抗拉强度增大；随着 RA 掺量增加，混凝土劈裂抗拉强度减小。PPF 体积分数为 1.5% 时，未掺 RA，90、28 d 混凝土劈裂抗拉强度分别为 7.5、6.6 MPa，90 d 比 28 d 增长 13.6%；RA 掺量为 50% 时，90、28 d 混凝土劈裂抗拉强度分别为 7.2、6.1 MPa，90 d 比 28 d 增长 18%；RA 掺量为 75% 时，90、28 d 混凝土劈裂抗拉强度分别为 7.0、5.9 MPa，90 d 比 28 d 增长 18.6%；RA 掺量为 100% 时，90、28 d 混凝土劈裂抗拉强度分别为 6.5、5.2 MPa，90 d 比 28 d 增长 25%。可见，随着 RA 掺量的增加，再生粗骨料混凝土劈裂抗拉强度随着养护龄期的增长而增大，这是由于掺入粉煤灰、硅灰、RA 会显著降低水泥的水化速率与水化产物的数量，当粉煤灰与再生骨料共体系时，其活性成分与水化  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应生成的 C-S-H 凝胶可有效充填 RA 中的裂缝与孔隙，显著改善再生粗骨料与胶凝材料之间界面过渡区 (ITZ) 结构黏结性能，随着养护龄期的增长，粉煤灰的水化反应得以充分发挥，生成大量硅酸钙水合物凝胶，提高了基体的抗拉性能。

90 d 龄期，与未掺 RA 试件相比，未掺 PPF 时，

RA 掺量分别为 50%、75%、100% 的试件劈裂抗拉强度分别降低 10.2%、14.1%、17.7%；同样，PPF 体积分数为 1.5% 时，RA 掺量分别为 50%、75%、100% 的试件劈裂抗拉强度分别降低 4.0%、6.7%、13.3%。可以看出，再生粗骨料混凝土中添加 PPF 后，可缩小因掺入 RA 而引起的劈裂抗拉强度损失，粉煤灰、硅灰与 PPF 具有良好的协同充填效应，降低混凝土基体中的孔隙数量，形成致密的复合材料结构，PPF 纤维具有裂纹阻滞作用与增韧效应，添加 PPF 提升抗拉强度更为显著。

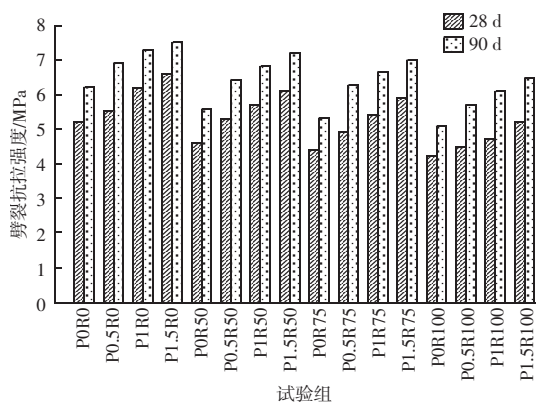


图 2 PPF 体积分数对混凝土劈裂抗拉强度影响规律

Fig. 2 The influence of PPF integral number on the splitting tensile strength of concrete

## 2.3 吸水率

因 RA 为多孔结构，相比天然骨料具有更高的吸水率，掺入 RA 后将提高再生粗骨料混凝土的吸水性能，水分入侵后将劣化基体内部结构的完整性。由图 3 可知，随着 PPF 体积分数增加，混凝土吸水率呈减小趋势；随着 RA 掺量增加，混凝土吸水率呈增大趋势。未掺 RA，PPF 体积分数由 0 增加至 1.5% 时，再生粗骨料混凝土吸水率分别为 6.6%、5.9%、5.5%、5.2%；RA 掺量为 50%、PPF 体积分数由 0 增加至 1.5% 时，再生粗骨料混凝土吸水率分别为 6.7%、5.8%、5.3%、4.9%。由此可以看出，掺入 RA、粉煤灰、硅灰的混凝土经 PPF 改性增强，吸水率显著减小，优于天然骨料混凝土；且随 PPF 体积分数增加，吸水率降幅显著大于天然骨料混凝土。说明经粉煤灰、硅灰的填充作用可降低再生粗骨料混凝土的孔隙率，提高 PPF 杂化分散性，显著降低再生粗骨料混凝土的吸水率。PPF 体积分数为 1.5%，RA 掺量为 0、50%、75%、100% 的混凝土

材料科学

吸水率比未掺 PPF 分别降低 1.4%、1.9%、2.0%、2.2%。可见, PPF 在粉煤灰、硅灰协同作用下, 降低混凝土吸水率更佳, 且 RA 掺量越大, 掺加 PPF 降低混凝土吸水率效果越显著。均匀分散的 PPF 使混凝土孔隙分布离散化, 填充基体微孔隙, 进而提高混凝土结构的密实程度; 同时 PPF 的桥接作用, 减少了混凝土因干缩变形而出现的微裂缝, 消除外部水分侵入通道, 从而降低吸水率。

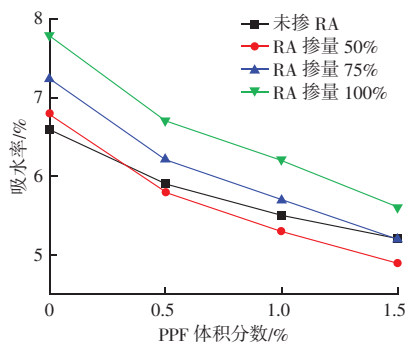


图3 PPF 体积分数对 28 d 龄期混凝土吸水率影响规律  
Fig.3 The influence of PPF score on the water absorption rate of 28-day old concrete

2.4 抗硫酸盐侵蚀性能

由图 4 可知, 随着 PPF 体积分数增加, 混凝土抗压强度损失率呈减小趋势; 随着 RA 掺量增加, 混凝土抗压强度损失率呈增大趋势。未掺 RA, PPF 体积分数由 0 增加至 1.5% 时, 混凝土抗压强度损失率分别为 15.5%、12.7%、10.5%、9.3%; 随着 PPF 体积分数增加, 混凝土抗压强度损失率降幅逐渐减小。RA 掺量为 50%, PPF 体积分数由 0 增加至 1.5% 时, 再生粗骨料混凝土抗压强度损失率分别为 17.4%、13.9%、10.7%、8.4%。可见, 掺入粉煤灰、硅灰后, 未掺 PPF 时再生粗骨料混凝土抗压强度损失率大于天然骨料混凝土; 随着 PPF 体积分数增加, 混凝土抗压强度损失率逐渐减小, 至 PPF 体积分数为 1.5% 时, 再生粗骨料混凝土抗压强度损失率小于天然骨料混凝土, 抗硫酸盐性能得到显著提升。RA 掺量为 75%、100%, PPF 体积分数为 1.5% 时, 再生粗骨料混凝土 90 d 硫酸盐侵蚀后抗压强度损失率分别为 11.8%、14.1%, 与未掺 RA 混凝土抗压强度损失率仅相差 2.5%、4.8%。这进一步说明, 掺加粉煤灰、硅灰, 并通过 PPF 增强效应后, 全再生粗骨料混凝土的抗硫酸侵蚀性能与天然骨料混凝土性能相当。

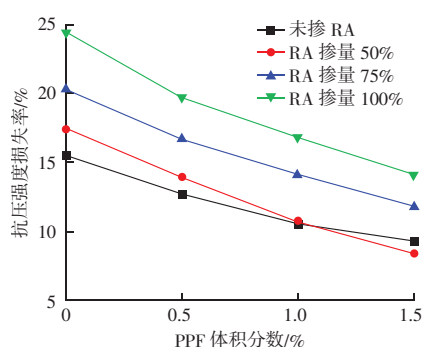


图4 不同 PPF 体积分数的再生粗骨料混凝土抗硫酸盐侵蚀性能  
Fig.4 Resistance to sulfate attack of recycled coarse aggregate concrete with different PPF integral numbers

2.5 无损强度检测

由图 5 可以看出, 无损检测抗压强度结果相比实测抗压强度均偏小。随着 RA 掺量增加, 无损检测结果与实测结果之间的差异越来越大; 随着 PPF 掺量增加, 无损检测结果与实测结果之间的差异有所减小。未掺 RA, 不同 PPF 体积分数时两者之间差异范围为 2.8%~7.6%; RA 掺量为 50% 时, 两者之间差异范围为 7.9%~12.9%; RA 掺量为 75% 时, 两者之间差异范围为 10.9%~16.4%; RA 掺量为 100% 时两者之间差异范围为 11.6%~19.3%。未掺 PPF 时, 全再生粗骨料混凝土无损检测结果与实测值最大相差 20%; 掺入 PPF 可提高无损检测的准确度, 但无法消除差异性。无损检测结果受混凝土孔隙率、表面硬度、密实程度等因素影响, 掺入粉煤灰、硅灰、纤维可提高混凝土的密实程度, 降低再生粗骨料对混凝土无损强度检测结果的影响, 但矿物材料、

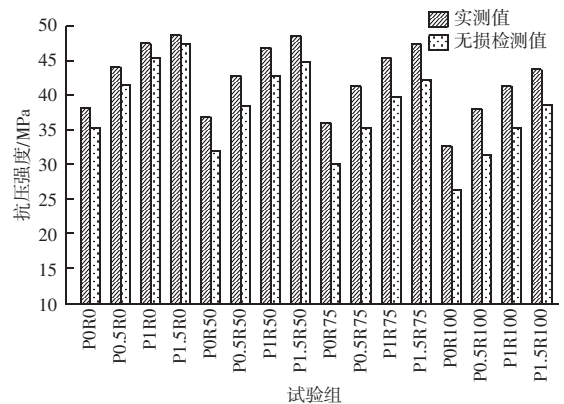


图5 混凝土无损检测抗压强度与实测抗压强度  
Fig.5 Non-destructive testing compressive strength of concrete versus measured compressive strength



纤维无法改变再生粗骨料内部的孔隙分布，无法完全消除再生粗骨料的影响。

### 3 结论

通过对不同 PPF 掺量及掺粉煤灰、硅灰对再生粗骨料混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度、吸水率、抗硫酸盐侵蚀以及无损强度检测研究，得出以下主要结论：

(1) 再生粗骨料混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度随着再生粗骨料掺量的增加而减小，掺入粉煤灰、硅灰、聚丙烯纤维可降低因掺入再生粗骨料而引起的强度损失，掺入聚丙烯纤维体积分数为 1.5% 时，具有显著增强效果；90 d 龄期，聚丙烯纤维体积分数为 1.5%，再生粗骨料掺量为 50%、75% 时混凝土抗压、劈裂抗拉强度略有降低，再生粗骨料掺量为 100% 时抗压、劈裂抗拉强度损失约为 10%。

(2) 再生粗骨料混凝土吸水率、硫酸盐侵蚀强度损失率随着再生粗骨料掺量的增加而增大，随着聚丙烯纤维掺量的增加而减小；经粉煤灰、硅灰、聚丙烯纤维协同改性增强，聚丙烯纤维体积分数为 1.5% 时，再生粗骨料掺量为 50% 的混凝土吸水率、抗压强度损失率小于天然骨料混凝土；增强后的全再生粗骨料混凝土与天然骨料混凝土同样具有良好的耐久性。

(3) 采用无损检测获得的混凝土抗压强度小于实测抗压强度，随着再生粗骨料掺量的增加无损检测强度与实测抗压强度的差异增大，随着聚丙烯纤维掺量的增加两者差异有所减小；采用无损检测再生粗骨料混凝土的抗压强度准确度较低。

### 参 考 文 献

- [1] 赵静怡. 纤维改良建筑废料再生绿色混凝土工程性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (6): 88-92.
- [2] 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.

- [3] 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.
- [4] 刘凯华, 陈钊渊, 邹超英, 等. 再生粗骨料强化工艺对再生混凝土力学性能及耐久性能的影响 [J]. 混凝土, 2024 (6): 134-137, 142.
- [5] 张美香, 丁亚红, 杨小林, 等. 纳米  $\text{SiO}_2$  复合碳化全再生骨料混凝土力学特性及强化机制 [J]. 复合材料学报, 2025, 42 (4): 2102-2111.
- [6] 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.
- [7] 董硕, 郑立森, 史奉伟, 等. 钢纤维地聚物再生混凝土力学性能及强度指标换算 [J]. 材料导报, 2025, 39 (7): 100-107.
- [8] 苏炜炜, 陈宗平, 廖浩宇, 等. 聚丙烯纤维全再生粗骨料混凝土力学性能试验研究 [J]. 混凝土, 2022 (8): 92-96, 101.
- [9] 郑传磊, 赵亚娣, 侯玉飞, 等. 冻融环境下再生粗骨料对聚丙烯纤维增强自密实混凝土轴心抗压力学性能的影响 [J]. 材料科学与工程学报, 2023, 41 (4): 672-680, 567.
- [10] 金宝宏, 郑传磊, 侯玉飞, 等. 聚丙烯-钢纤维/再生粗骨料混凝土力学性能正交试验研究 [J]. 功能材料, 2021, 52 (12): 12175-12183.
- [11] 张培恒, 王正旺, 赵静, 等. 再生粗骨料复合聚丙烯纤维泡沫混凝土配合比设计与力学性能研究 [J]. 混凝土, 2025 (4): 257-262.
- [12] 辛志鹏, 朱亚光, 徐培蓁, 等. 粉煤灰及聚丙烯纤维对再生透水混凝土性能的影响 [J]. 混凝土, 2023, (1): 73-77, 81.
- [13] 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.
- [14] 张鑫鑫, 黄靓, 刘文琦, 等. 冻融循环下硅灰再生混凝土的力学性能试验研究 [J]. 混凝土, 2024 (6): 138-142.
- [15] 廖丽萍, 严裕佳, 马少坤, 等. 再生骨料生态混凝土的强度特性与降碱效果研究 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2024, 49 (6): 1259-1271.
- [16] 乔宏霞, 苏睿, 李琼, 等. 基于 Wiener 过程寿命预测的再生骨料混凝土耐久性能变化规律的研究 [J]. 工业建筑, 2022, 52 (6): 167-173, 139.