

纤维增强再生骨料混凝土研究现状分析

张伟绅¹, 杨学超^{1,*}

1. 山东理工大学, 建筑工程与空间信息学院, 山东 淄博, 255000

摘要: 再生骨料混凝土在资源节约与碳减排方面潜力巨大, 但其固有性能缺陷限制了推广应用。纤维增强技术为提升再生骨料混凝土性能提供了有效途径。本文系统分析了再生骨料因表面残留砂浆导致的性能劣化特征, 如强度降低、吸水率与孔隙率增高, 并综述了聚丙烯纤维、聚乙烯醇纤维、玄武岩纤维及碳纤维等多种纤维对再生骨料混凝土抗压、劈裂抗拉、抗折强度及韧性等力学性能的改善作用与影响规律, 同时揭示了纤维通过桥接裂纹、强化界面过渡区等微观机制提升性能的机理。研究指出, 纤维掺量存在阈值效应, 过量或分布不均可能产生负面影响。未来研究需深入探索不同纤维的协同效应、优化组合及其在严苛环境下的长期性能与耐久性, 以推动纤维增强再生骨料混凝土的实际应用。

关键词: 再生骨料混凝土; 废弃纤维; 力学性能; 机理分析

Analysis of the current status of fiber-reinforced recycled aggregate concrete research

Weishen Zhang¹, Xuechao Yang^{1,*}

1. Department of Civil Engineering, School of Civil Engineering and Geomatics, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China

Abstract: Recycled aggregate concrete has great potential for resource saving and carbon reduction, but its inherent performance defects limit its popularization and application. Fiber reinforcement technology provides an effective way to improve the performance of recycled aggregate concrete. This paper systematically analyzes the performance degradation characteristics of recycled aggregate due to the residual mortar on the surface, such as reduced strength, increased water absorption and porosity. And reviewed the polypropylene fiber, polyvinyl alcohol fiber, basalt fiber and carbon fiber and other fibers on the recycled aggregate concrete compressive, splitting tensile, flexural strength and toughness and other mechanical properties of the improvement and influence of the law, and reveals the fiber through the bridging cracks, strengthen the interfacial transition zone, and other micro-mechanisms to enhance the performance of the mechanism. The study points out that there is a threshold effect of fiber doping, and excessive or uneven distribution may have a negative impact. Future research needs to explore the synergistic effect of different fibers, their optimal combinations, and their long-term performance and durability in harsh environments, in order to promote the practical application of fiber-reinforced recycled aggregate concrete.

Keywords: Recycled aggregate concrete; Waste fibers; Mechanical properties; Mechanistic analysis

随着建筑业的蓬勃发展，混凝土需求量持续增大与天然骨料资源短缺的矛盾日益尖锐。建筑垃圾大量排放引发的环境问题已引起社会各界广泛关注，如何有效减少建筑垃圾排放并提升其资源化利用水平，已成为我国建筑业发展亟待解决的重大挑战与迫切需求。此外，中国作为全球最大的纺织品生产国和出口国，每年产生的巨量废旧纺织品也对生态环境造成了严重的污染与破坏。将建筑固体废弃物与废旧纺织品进行高效资源化处理，用以制备纤维增强再生骨料混凝土，对于推动社会可持续发展和实现环境有效保护具有双重积极意义。

1 再生骨料特性

再生混凝土是利用废弃建筑固体材料，如废弃混凝土块、烧结砖等，经过加工处理（主要包括杂质去除、破碎、筛分、清洗及分级等步骤），最终形成符合规范要求的再生骨料，用以替代天然粗骨料制备再生混凝土，其制备过程如图 1 所示。该材料的应用，不仅有效削减了建筑垃圾的堆积量，也显著降低了对天然砂石资源的依赖，具有突出的环保效益与经济效益。再生混凝土骨料表面通常粗糙、棱角多且存在大量微裂缝^[1]，使其与天然骨料相比，表观密度、吸水率和压碎指标等关键参数存在显著差异。此外，再生混凝土骨料经过长时间自然侵蚀和二次破碎，其表面常残留旧砂浆层^[2]，导致其内部裂缝和孔隙率高于天然骨料，进而使再生骨料混凝土的力学性能通常低于普通混凝土^[3]。相较于再生混凝土骨料，再生砖骨料通常表现出更高的孔隙率及吸水率^[4]，使其表观密度降低，而压碎指标和吸水率则相应升高^[5]。此外，再生混凝土骨料的磨损损失和破碎指标值会随着其表面旧砂浆覆盖率的增加而增大^[6]。本质上，再生骨料表现出的强度降低、密度减小、吸水率上升、孔隙率增大以及破碎指标值升高等特征，主要归因于其表面包裹的残留砂浆层^[7]。

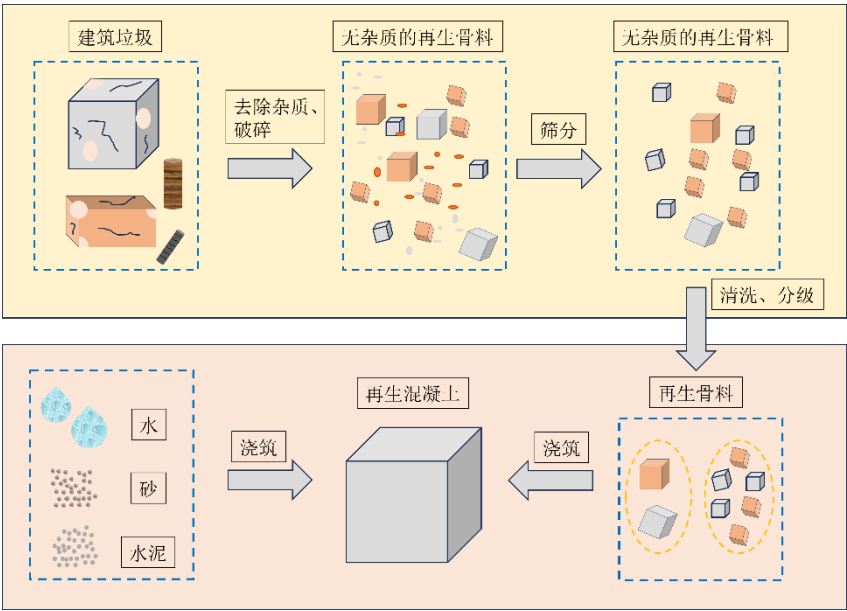


图 1 再生混凝土制备过程

Fig. 1 Preparation process of recycled concrete

2 纤维增强再生混凝土力学性能

纤维增强技术作为改善混凝土性能的有效途径，近年来获得了广泛的关注与研究。纤维混凝土（即纤维增强水泥基复合材料）是以水泥浆、砂浆或混凝土为基体，掺入金属纤维、无机非金属纤维、合成纤维或天然有机纤维等增强材料复合而成。普通混凝土作为建筑材料，普遍存在抗拉强度

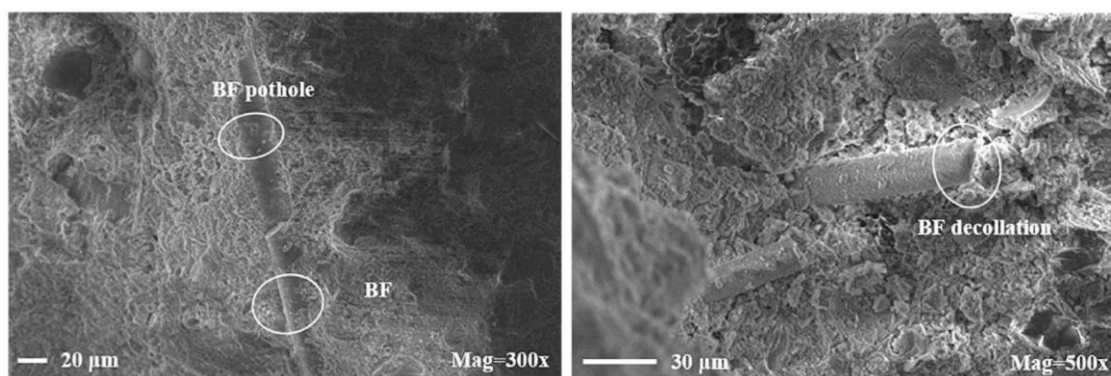
低、极限变形小、易发生脆性破坏等固有缺陷^[8]。在混凝土中掺入适量纤维,能够有效改善基体内部存在的微观缺陷,进而提升混凝土的抗拉强度、抗压强度、韧性以及耐久性等综合性能^[9]。研究证实,添加聚丙烯纤维^[10]、玄武岩纤维^[11]、聚乙烯醇纤维^[12]、碳纤维^[13]等多种纤维材料,均可通过改变微裂纹扩展路径、有效抑制宏观裂纹的发展^[14],从而显著改善混凝土抗拉强度不足、变形能力差及易发生脆性破坏的缺点^[15],整体提升混凝土的结构性能。Zhou 等人^[16]的研究发现,将废弃聚丙烯纤维掺入再生混凝土中,能有效提升其力学性能,尤其在提高抗压强度和劈裂抗拉强度方面效果显著。Nghia 等人^[17]的研究进一步证实,废弃纤维不仅能显著增强混凝土的强度及韧性^[18],还可提高其长期耐久性^[19]。Das 等^[20]观察到添加适量体积分数(0.5%)的聚丙烯纤维可使开裂拉伸强度显著提高 16.87%,弯曲强度提高 11.96%。然而,He 等^[21]发现与普通混凝土相比,再生骨料混凝土在聚丙烯纤维对抗压强度的影响上呈现出不同结果:当聚丙烯纤维含量从 0.6%增加到 1.2%时,再生骨料混凝土的抗压强度非但没有增加,反而进一步降低了 2.2~5.5%。聚乙烯醇纤维在物理特性上与聚丙烯纤维等合成纤维相近,但值得注意的是,聚乙烯醇纤维在提升胶凝材料体系耐久性,尤其是抗冻融循环能力方面,表现优于聚丙烯纤维^[22]。

玄武岩纤维以其高强度、耐酸碱腐蚀、环境友好及成本相对较低等优点备受关注。研究发现,掺入适量玄武岩纤维可有效增强再生混凝土的力学性能,包括抗折强度和延性,但其掺量需控制在合理区间内。田凯等^[23]指出,在最优掺量下,玄武岩纤维能显著提升再生粗骨料取代率为 50%的再生混凝土的各项力学性能;李晓路等^[11]则发现,玄武岩纤维的加入能有效提高再生混凝土的抗折强度,但其掺量对不同力学性能指标的影响趋势并非完全一致。

碳纤维作为一种极具前景的工程材料,具备拉伸强度高、弹性模量高、化学稳定性相对较好及密度低等显著特点^[24]。Arslan 等^[25]发现,掺入碳纤维不仅提高了混凝土的劈裂抗拉强度,还提升了其断裂能和韧性指标。王建超等^[26]对碳纤维再生混凝土力学性能的研究表明,纤维长度为 6 mm、掺量为 0.12%时对再生混凝土强度的改善最为明显;采用 50%再生骨料掺量的混凝土其力学性能优于 100%再生骨料掺量;混凝土力学性能随水灰比的增大而呈现下降趋势;龄期对抗压强度的增长也具有显著影响。

3 纤维增强再生混凝土微观结构

Zhang 等^[27]的研究发现,使用再生粗骨料替代天然粗骨料会导致再生骨料混凝土力学性能降低,而纤维的掺入可改善这一状况,其改善机制主要归功于纤维与基体间界面过渡区的强化作用,如图 2 所示。纤维在 RAC 内部均匀无序分布,与砂浆基质具有良好的胶结能力,在荷载作用下,纤维对混凝土内部裂缝产生阻碍作用,使裂缝停止在纤维处扩展。说明纤维在砂浆基体中起到了良好的桥接作用,承担了部分应力,从而有效提升了混凝土的力学性能。此外,Cui 等^[28]的研究表明,利用废弃纤维作为增强材料可提高混凝土的力学性能和耐久性,特别是能提高再生骨料混凝土的抗冻性,具体表现为显著减少水泥砂浆剥落和骨料暴露现象,降低质量损失率、相对动弹性模量损失率及抗压强度损失率。然而,必须指出,若废弃纤维掺量过多,则可能导致其在混凝土内部分散不均,增加内部有害空隙及薄弱界面的数量,反而对再生混凝土的抗冻性能产生不利影响。

图2 纤维增强再生骨料混凝土 SEM 微观示意图^[27]Fig. 2 SEM microscopic diagram of fiber reinforced recycled aggregate concrete^[27]

4 结论

纤维凭借其优异的性能正日益成为增强水泥基复合材料不可或缺的关键组分。将纤维引入再生骨料混凝土,有望为解决其强度不足等问题提供有效途径。为推进纤维增强再生混凝土研究,建议未来工作重点探索不同纤维组合对混凝土性能的协同增强效应。预期将更深入地揭示纤维在抑制混凝土开裂方面的具体作用机制,旨在寻找到最优的纤维组合与应用方式。同时,未来研究也应致力于解决混合纤维增强再生骨料混凝土在实际工程应用中可能存在的局限性和挑战。有必要开展长期纵向研究,系统考察混合纤维增强再生骨料混凝土在不同严苛环境条件(如冻融循环、化学腐蚀、持续荷载作用等)下的长期力学性能演变规律与耐久性表现。

参考文献

- [1] 程 鹏, 赵大威. 再生骨料绿色混凝土的力学性能研究[J]. 河北建筑工程学院学报, 2023, 41(04): 78-82.
- [2] 韦庆华. 重复荷载作用下再生混凝土轴压及与钢筋间粘结-滑移性能研究[D]. 广西大学, 2020.
- [3] Su T, Wang C, Cao F, et al. An overview of bond behavior of recycled coarse aggregate concrete with steel bar[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2021, 60(1): 127-144.
- [4] 王社良, 景龙平, 张 博, 等. 砖含量对再生骨料性能影响的试验研究[J]. 混凝土, 2011, (02): 83-85+88.
- [5] 刘子振, 肖 斌, 李晓龙, 等. 废旧烧结砖再生混凝土性能试验研究[J]. 混凝土, 2011, (03): 72-74.
- [6] Ashraf M J, Idrees M, Akbar A. Performance of silica fume slurry treated recycled aggregate concrete reinforced with carbon fibers[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 66: 105892.
- [7] Kazmi S M S, Munir M J, Wu Y F, et al. Axial stress-strain behavior of macro-synthetic fiber reinforced recycled aggregate concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 97: 341-356.
- [8] Rezazadeh M, Carvelli V. A damage model for high-cycle fatigue behavior of bond between FRP bar and concrete[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 111: 101-111.
- [9] 陈爱玖, 王 静, 杨 粉. 纤维再生混凝土力学性能试验及破坏分析[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(02): 244-248+265.
- [10] Althoey F, Zaid O, de-Prado-Gil J, et al. Impact of sulfate activation of rice husk ash on the performance of high strength steel fiber reinforced recycled aggregate concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 54: 104610.
- [11] 李晓路. 玄武岩纤维再生粗骨料混凝土力学性能及抗冻性、干缩性的试验研究[D]. 宁夏大学, 2018.
- [12] Du X, Li Y, Si Z, et al. Effects of basalt fiber and polyvinyl alcohol fiber on the properties of recycled aggregate concrete and optimization of fiber contents[J]. Construction and Building Materials, 2022, 340: 127646.
- [13] Bai W, Wang X, Yuan C, et al. Study on dynamic mechanical properties and meso-damage mechanism of carbon fibers recycled aggregate concrete under freeze-thaw environment[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 79: 107768.
- [14] Ardanuy M, Claramunt J, Toledo Filho R D. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent

- research[J]. Construction and building materials, 2015, 79: 115-128.
- [15] Rezazadeh M, Carvelli V. A damage model for high-cycle fatigue behavior of bond between FRP bar and concrete[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 111: 101-111.
- [16] Liu Y, Ren P, Garcia-Troncoso N, et al. Roles of enhanced ITZ in improving the mechanical properties of concrete prepared with different types of recycled aggregates[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 60: 105197.
- [17] Zhou J, Kang T, Wang F. Pore structure and strength of waste fiber recycled concrete[J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2019, 14: 1558925019874701.
- [18] Tran N P, Gunasekara C, Law D W, et al. Comprehensive review on sustainable fiber reinforced concrete incorporating recycled textile waste[J]. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 2022, 11(1): 28-42.
- [19] Rustamov S, Kim S W, Kwon M, et al. Mechanical behavior of fiber-reinforced lightweight concrete subjected to repeated freezing and thawing[J]. Construction and Building Materials, 2021, 273: 121710.
- [20] Das C S, Dey T, Dandapat R, et al. Performance evaluation of polypropylene fibre reinforced recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 189: 649-659.
- [21] He W, Kong X, Fu Y, et al. Experimental investigation on the mechanical properties and microstructure of hybrid fiber reinforced recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 261: 120488.
- [22] Nam J, Kim G, Lee B, et al. Frost resistance of polyvinyl alcohol fiber and polypropylene fiber reinforced cementitious composites under freeze thaw cycling[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 90: 241-250.
- [23] 田 凯. 玄武岩纤维对再生混凝土力学性能的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(06): 22-24+103.
- [24] Li H, Liebscher M, Ly K H, et al. Effect of electrophoretic deposition of micro-quartz on the microstructural and mechanical properties of carbon fibers and their bond performance toward cement[J]. Journal of Materials Science, 2022, 57(48): 21885-21900.
- [25] Akbar A, Liew K M. Assessing recycling potential of carbon fiber reinforced plastic waste in production of eco-efficient cement-based materials[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 274: 123001.
- [26] 王建超, 陆佳韦, 周静海, 等. 碳纤维再生混凝土力学性能的试验研究[J]. 混凝土, 2018, (12): 95-99+103.
- [27] Zhang X, Zhu Y, Shen Y, et al. Compressive mechanical performance and microscopic mechanism of basalt fiber-reinforced recycled aggregate concrete after elevated temperature exposure[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 96: 110647.
- [28] Cui S, Wang T, Zhang Z, et al. Frost resistance and life prediction of recycled brick aggregate concrete with waste polypropylene fiber[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2023, 62(1): 20230154.

基金项目: 2024 年国家级大学生创新创业训练计划项目: 盐冻环境下再生粗骨料绿色混凝土与钢筋粘结性能研究。(项目编号: 202410433053)

¹ **第 1 作者:** 张伟绅 (2004-), 男, 本科在读, 山东理工大学, 研究方向: 绿色混凝土。 E-mail: zws22188@163.com。

*** 通讯作者:** 杨学超 (2000-), 男, 硕士在读, 山东理工大学, 研究方向: 绿色混凝土。 E-mail: yxc1790772857@163.com。