

低碳背景下工业固废在纤维增强水泥基复合材料中的性能研究

寿瑞阳 张卓然 陈宇杰 李政希 王昕羽

南京工程学院

DOI:10.32629/btr.v8i5.4766

[摘要] 在中国“双碳”目标与基础设施建设持续推进的背景下,开发绿色纤维增强水泥基复合材料对于降低建筑业碳排放、推动“无废城市”建设具有重要的现实意义。本文聚焦于工业固废(粉煤灰、矿渣等)的资源化利用,旨在揭示其部分替代传统胶凝材料与骨料后,对纤维增强水泥基复合材料力学性能(抗压、抗拉、抗弯)的影响规律与作用机制,同时评估其碳减排潜力。本研究通过系统实验明确了工业固废在纤维增强水泥基复合材料中的关键作用:当粉煤灰与硅灰以相应的比例复配替代部分水泥时,可满足ECC抗压强度要求,且适量再生微粉不会显著改变其微观结构及抗压性能;在拉伸与弯曲性能方面,粉煤灰掺量低于50%时可有效优化纤维-基体界面特性,引导多缝开裂行为实现高延性,而矿渣掺量达30%时对抗弯强度增益效果最佳;通过建立的碳排放模型证实,使用粉煤灰等固废替代传统水泥可显著降低材料隐含碳,为绿色ECC的开发提供了明确的配比依据、机理解释与碳评估方法。本研究为材料-环境-政策的协同创新提供了可行的技术路径与理论支撑。

[关键词] 纤维增强水泥基复合材料; 固废资源化; 力学性能; 碳排放; 绿色可持续

中图分类号: P964 文献标识码: A

Research on the Application of Industrial Solid Waste in Fiber-reinforced Cement-based Composites under the Background of Low Carbon

Ruiyang Shou Zhuoran Zhang Yujie Chen Zhengxi Li Xinyu Wang

Nanjing Institute of Technology

[Abstract] Against the backdrop of the continuous advancement of China's "dual carbon" strategy and infrastructure construction, the development of green fiber-reinforced cement-based composites holds significant practical significance for reducing carbon emissions in the construction industry and promoting the development of "waste-free cities". This paper focuses on the resource utilization of industrial solid waste (such as fly ash and slag), aiming to reveal the influence laws and mechanisms of their partial replacement of traditional cementitious materials and aggregates on the mechanical properties (compressive strength, tensile strength, and bending strength) of fiber-reinforced cement-based composites, and at the same time assess their carbon reduction potential. This study, through systematic experiments, clarified the key role of industrial solid waste in fiber-reinforced cement-based composites: when fly ash and silica fume are compounded in the corresponding proportion to replace part of the cement, the ECC compressive strength requirements can be met, and an appropriate amount of recycled micro-powder will not significantly change its microstructure and compressive performance. In terms of tensile and bending properties, when the fly ash content is less than 50%, it can effectively optimize the fiber-matrix interface characteristics and guide the multi-seam cracking behavior to achieve high ductility, while when the slag content reaches 30%, the effect on the gain of flexural strength is the best. The established carbon emission model has confirmed that using solid wastes such as fly ash to replace traditional cement can significantly reduce the embodied carbon of materials, providing a clear proportioning basis, mechanism explanation and carbon assessment method for the development of green ECC. This research provides a feasible technical path and theoretical support for the collaborative innovation of materials, environment and policy.

[Key words] Fiber-reinforced cement-based composites; Resource utilization of solid waste; Mechanical properties; Carbon emissions; Green and sustainable

引言

随着城市化进程加快,建筑业每年产生大量建筑垃圾。这些垃圾经堆放、填埋等方式处理,不仅侵占大量土地资源,还引发严重的环境污染^[1]。如何有效处理与利用此类废弃物,已成为亟待解决的环保课题。固废资源化利用技术作为一种重要解决方案,因其高效转化废弃物与资源回收的潜力,正逐渐成为环境工程领域的研究热点。通过创新技术手段合理利用固体废物,既可减轻环境污染,又能为社会提供可持续资源,推动绿色低碳经济发展。固废资源化利用前景广阔,正不断催生新技术与应用实践^[2]。

数据显示,水泥生产过程中石灰石煅烧必然产生二氧化碳,该行业温室气体排放量已占全球总量的8%。作为全球最大的水泥生产国和排放国,中国已承诺在2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和。因此,中国在水泥行业的减碳行动至关重要。在建筑材料生产中,研究人员正尝试利用工业固废替代部分胶凝材料,以减少建筑垃圾,助力环境保护与可持续发展。

近年来,国内外学者围绕ECC的力学性能开展了大量研究,充分验证了其技术可行性。然而,当前研究仍存在明显局限:多数成果集中于采用标准材料(如纯净石英砂、高标号水泥)制备的ECC体系,而在“绿色低碳”导向下,系统探索大掺量工业固废(如粉煤灰、矿渣、再生细骨料等)替代传统组分对ECC性能影响的研究仍较为薄弱。

1 水泥基复合材料的“绿色化”途径

1.1 胶凝材料的绿色替代

为降低水泥基复合材料的碳足迹,其核心组分正朝着绿色化方向革新。在胶凝材料方面,现在已有大量研究尝试利用多种低碳材料来代替传统高能耗的波特兰水泥。聚合物是一类在碱性激发剂作用下,由粉煤灰、矿渣等工业固废中的铝硅酸盐成分通过化学反应形成的具有三维网状结构的无机聚合物材料^[3]。地质聚合物相较于传统水泥材料能显著减少碳排放。硫铝酸盐水泥制备过程中温度要求较低、熟料用量少而使其具备低碳特性。何世钦等研究者论证了高贝利特硫铝酸盐水泥是一种早期强度高、后期强度发展良好的胶凝材料,应用前景广阔^[4]。研究证实,利用大理石粉/花岗岩粉、粉煤灰及矿渣替代部分水泥制备胶凝材料,可以有效降低胶凝体系的隐含碳,可在兼顾环境与经济效益的同时保障工程性能,具备规模化应用潜力。

1.2 骨料的绿色来源

在增强与填充体系方面,再生骨料来自建筑垃圾,替代天然砂石,减少了资源消耗;研究发现,建筑垃圾再生骨料经合理处理后应用于道路工程,为此提出优化生产工艺、完善质量控制体系等措施,为其在道路工程中的合理应用提供参考,进而推动该领域可持续发展^[5]。废弃玻璃粉等则被磨细后作为微骨料或辅助胶凝材料使用,改善了颗粒级配并具有一定活性,对UHPC的性能有积极作用^[6]。此外柴少锋的研究表明,适量的回收塑料添加在水泥基体中,能有效改善微观结构、限制裂缝发展,并显著提升混凝土的机械性能及耐久性^[7]。这些变革共同推动了水泥基复合材料向环境友好与资源节约的方向发展。

2 工业固废对高延性水泥基复合材料机械性能的影响

2.1 工业固废添加对抗压性能的影响

工业固废主要通过物理填充和火山灰反应两大机制影响高延性水泥基材料的抗压性能^[8]。一方面,粉煤灰、硅灰等微细颗粒能有效填充孔隙,使基体更为密实;另一方面,其活性组分可与水泥水化产物反应,生成更多C-S-H凝胶,从而优化孔结构并增强界面过渡区。

研究表明,粉煤灰虽导致早期强度偏低,但有助于后期强度显著增长。邓明科等学者发现由于粉煤灰的水化反应很慢,高延性纤维混凝土在掺入较大量粉煤灰后,试块初期强度较低,但后期强度显著提升^[9]。适量的硅灰掺量有效改善了水泥基复合材料的微观结构^[10],是制备超高强ECC的关键。然而,硅灰的掺量对高延性水泥基材料性能产生较大影响。适量的硅灰掺量和通过“微集料效应”填充孔隙,并通过“火山灰反应”生成更多C-S-H凝胶,二者协同提升材料的致密性与强度。反之,过量掺入则会导致颗粒聚集,增加孔隙率,从而损害其微观结构与力学性能^[11]。优化复配比例至关重要,例如当粉煤灰与硅灰以1:1.2的比例替代26.2%水泥时,即可满足抗压强度基本要求^[12]。刘鑫也通过研究证实,在高延性纤维增强复合材料中适量掺入再生微粉,不仅不会明显改变其微观结构及抗压强度,还能在新浆体中发挥良好的成核与填充作用^[13]。而部分活性较低的再生微粉(如砖粉、玻璃粉),则可能导致水泥基复合材料强度下降,需通过优化级配或与其他高活性废料复配来弥补。

因此,工业固废在ECC中的应用效果高度依赖于其活性特性与掺量配比,通过科学复配与优化设计,可在保障力学性能的同时,实现废料的资源化高效利用。

2.2 工业固废添加对抗拉性能的影响

工业固废对ECC抗拉性能的影响,核心在于其对纤维-基体界面粘结特性的精准调控,这直接决定了材料的拉伸韧性与极限拉应变。为实现稳定的多缝开裂与高延性,该界面必须达到一种“精心平衡”。

粉煤灰在其中发挥着关键作用:其球形颗粒特性不仅有效改善了纤维的分散性,更通过缓慢的火山灰反应,优化了界面的结构与性能。随着粉煤灰掺量的增加,水泥基体变得更加均匀致密,有效减少了较大缺陷裂缝的产生;同时,它改善了纤维与基体界面的微观结构,使得界面化学粘结强度适中,保证了荷载的有效传递^[14]。这种机制引导了多条微裂缝的稳定开展,从而实现高延性。此外,粉煤灰还能提升浆体流动性并降低基体断裂韧度,共同增强了材料的裂缝控制能力。研究表明,粉煤灰掺量在35%-50%范围内能有效优化此界面。当掺量达到35%时,基体化学粘结强度适中,能促使PVA纤维在受力时发生以“滑移”为主的拔出行为,而非被拉断,从而引导稳定的多缝开裂,使极限拉应变较掺量为20%时提升了9.8%。然而,当粉煤灰掺量超过50%时,会因过度削弱基体强度与界面黏结而损害性能,此时需借助混杂纤维等技术进行平衡^[15]。

与此同时,地聚物通过优化纤维-基体相互作用和改善微观结构,能显著提高材料的韧性、应变硬化能力与能量吸收能力。相关研究证实,随着GPA取代率的增加,地聚物基ECC的拉伸峰值应变可提升约19%-130%,同时能量吸收能力也显著增强,使其特别适用于高韧性与大变形工程场景^[16]。

2.3 工业固废添加对抗弯性能的影响

抗弯性能是ECC抗压与抗拉性能在弯曲应力下的综合体现。受工业固废掺入的直接影响,具体反映在弯曲强度、变形能力及能量吸收能力等方面。合理设计的绿色ECC在弯曲荷载下可呈现优异的多缝开裂行为与大幅挠度变形,其韧性将远超普通混凝土。

大量研究表明,适量的粉煤灰量能够改善纤维与基体的截面性质,可以使ECC材料具有优异的延展性和抗弯韧性^[17]。再者,矿渣粉可以通过二次水化反应填充微孔隙,从而提升ECC密实度与抗弯强度。研究表明,其达到掺量的30%左右,可显现出最佳效果。适量掺量的矿渣粉对高延性水泥基材料早期和后期强度均有增益,但过量会因稀释水泥而削弱基体^[18]。而若掺入硅灰等导致基体过脆或界面粘结失衡的废料,则可能引发少数宽裂缝快速发展,从而显著降低材料韧性。例如,Kang等^[19]发现再生微粉为惰性粉体,单独掺入会降低砂浆抗折强度,但将其与粉煤灰、硅灰按适宜比例混合后,可替代水泥制备出符合要求的砂浆^[20]。此外,尽管再生细骨料(RFA)因固有缺陷会早期削弱基体并降低抗压强度。其微集料填充效应与自胶结潜力却有助于改善高延性水泥基复合材料(HDCC)的后期弯曲强度与延性,尤其在100%全替代情况下仍可维持约7.9MPa的弯曲强度与3.06%的高峰值应变,展现出良好的弯曲韧性与工程应用前景^[21]。因此,通过合理选择与复配工业固废,可制备兼具高弯曲韧性与整体性能的ECC。

3 不同固废组分纤维增强水泥基复合材料的碳排放量计算

在“双碳”战略背景下,采用科学的生命周期评价(LCA)方法量化不同固废组分纤维增强水泥基复合材料的碳排放量,对评估其环境效益至关重要。本研究基于国际通用的LCA框架^[22], M_i 为第*i*种材料的用量, EF_i 为其碳排放因子,建立了适用于绿色ECC的碳排放核算模型:

$$CE_{ECC} = \sum(M_i \times EF_i) + CE_{transport} + CE_{mixing}$$

该模型充分考虑了原材料生产、运输及现场搅拌等全生命周期阶段的碳排放来源。传统硅酸盐水泥的碳排放因子取值约为870kgCO₂/t,而粉煤灰、矿渣等工业副产品的碳排放因子仅为15-30kgCO₂/t和40-70kgCO₂/t,显示出显著的碳减排潜力。通过将大掺量固废ECC配方与传统基准配方进行案例对比分析。综合结果表明,科学设计的绿色ECC可实现显著的碳减排,为材料-环境-政策的协同发展提供了可靠的量化依据。

4 结语

绿色纤维增强水泥基复合材料通过大掺量利用粉煤灰、矿

渣、再生微粉等工业固废,在实现力学性能有效调控的同时,显著降低了材料的碳足迹,契合“双碳”战略下建材行业的绿色转型需求。然而,其规模化发展仍面临严峻挑战:一方面,固废来源多样性与工艺波动直接影响材料性能的均质性与稳定性;另一方面,相关标准与评价体系的缺失制约了其工程认证与应用。未来研究应聚焦于多种固废的协同优化与复配设计,进一步探索高活性、低环境影响的替代胶凝材料,推动材料-结构-环境的多学科交叉融合,并加快建立统一的性能测试与工程应用规范,以促进绿色ECC在可持续土木工程中的规模化、标准化发展。

[基金项目]

2025年国家级大学生创新训练项目“基于绿色低碳背景的纤维增强水泥基复合材料自愈合性能研究”(项目编号:202511276008Z)。

[参考文献]

[1]JUMAR U A,SHAFIQ N,AHMAD F A.A case study on the effective implementation of the reuse and recycling of construction & demolition waste management practices in Malaysia[J].Ain Shams Engineering Journal,2021,12(1):283-291.

[2]谈爽.环境工程中固废资源化利用技术的研究与实践[C]//广西网络安全和信息化联合会.第五届工程技术管理与数字化转型学术交流论文集.南阳碧水源环境科技有限公司,2025:72-74.

[3]赵恒锋.地质聚合物在建筑废料再生循环中的应用[J].建材发展导向,2025,23(19):130-132.

[4]何世钦,李发文,孙晓燕,等.基于工业固废的低碳高贝利特硫铝酸盐水泥研究进展[J].硅酸盐通报,2024,43(11):4072-4082.

[5]官敏权,贾学军,喻林杰,等.道路工程中建筑垃圾再生骨料的性能研究[J].建筑机械化,2025,46(10):166-170.

[6]徐丹.废弃玻璃粉再生高性能混合料试验分析[J].福建交通科技,2025,(02):15-20.

[7]柴少锋.建筑工程中回收塑料增强水泥基复合材料的性能[J].塑料助剂,2025,(05):75-78.

[8]乔思皓,薛婉文,吴绍奇,等.粉煤灰掺量对ECC力学性能及纤维破坏形态的影响[J].混凝土,2022,(08):82-86+91.

[9]邓明科,秦萌,梁兴文.高延性纤维混凝土抗压性能试验研究[J].工业建筑,2015,45(04):120-126.

[10]ASHRAF M J,IDREES M,AKBAR A.Performance of silica fumeslurry treated recycled aggregate concrete reinforced with carbonfibers[J].Journal of Building Engineering,2023,66:105892.

[11]王洪涛,杨斌.硅灰掺量对再生高延性水泥复合材料的力学性能和抗氯离子渗透性能的影响[J].混凝土,2025,(03):138-141.

[12]贾昊璋.低碳胶凝体系高延性水泥基复合材料设计及固碳性能研究[D].青岛理工大学,2025.

[13]刘鑫.掺再生微粉制备高延性纤维增强复合胶凝材料的性能研究[D].扬州大学,2025.

[14]刘从亮,毕远志,华渊.高掺量粉煤灰PVA-ECC的力学性能研究及粉煤灰作用机理分析[J].硅酸盐通报,2017,36(11):3739-3744.

[15]王振波,刘小慧,张悦宁,等.粉煤灰及混杂纤维对ECC流变与力学行为的影响[J/OL].华中科技大学学报(自然科学版),1-8[2025-10-29].

[16]苏骏,钟子龙,蔡雅琼,等.基于地聚物骨料的高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能与拉伸本构模型[J].复合材料学报,2024,41(11):6122-6137.

[17]刘秋江,邱俊峰,李茹芸.高延性水泥基复合材料粉煤灰掺量优化试验[J].福建建材,2024,(02):6-10.

[18]高象虫,时领军.高延性水泥基复合材料(ECC)配合比设计及力学性能研究[J].江西建材,2025,(04):88-90.

[19]KANG X M,YING L.Effect of recycled fine powder and mineral admixture on the properties of the cement mortar [J].IOP Conference Series:Earth and Environmental Science, 2019,219:012026.

[20]李滢,马丽媛,陈曦.再生微粉和矿物掺合料对水泥基材

料性能的影响研究[J].混凝土,2025,(08):78-82.

[21]吴寅佳,王新杰,朱平华,等.再生细骨料对高延性水泥基复合材料力学性能及碳化耐久性的影响[J].硅酸通报,2024,43(8):2984-2995.

[22]Finkbeiner M, Inaba A, Tan R, et al. The New International Standards for LifeCycle Assessment:ISO 14040 and ISO 14044[J].International Journal of LifeCycle Assessment, 2006,11(2):80-85.

作者简介:

寿瑞旻(2004--),女,汉族,浙江省杭州市人,大学本科,研究方向:造价管理。

张卓然(2005--),女,江苏省淮安市人,本科,研究方向:土木工程。

陈宇杰(2005--),男,汉族,江苏省扬州市人,本科,研究方向:工程造价。

李政希(2005--),男,汉族,广东揭阳人,本科,研究方向:造价管理。

王昕羽(2005--),女,汉族,江苏省常州市人,本科,研究方向:智能建造。