

建筑工程中回收塑料增强水泥基复合材料的性能

陈静

广州建筑集团股份有限公司 广东 广州 510030

摘要：在全球“双碳”目标引领与绿色建筑蓬勃发展的背景下，建筑行业的资源循环利用与低碳转型已成为不可逆转的趋势。塑料废弃物引发的“白色污染”持续威胁生态环境，而传统水泥基复合材料存在脆性突出、韧性不足、碳排放量高等固有缺陷，二者的跨界融合为建筑材料创新提供了全新路径。回收塑料增强水泥基复合材料通过将废弃聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯等经资源化处理后掺入水泥基体系，既实现了塑料垃圾的减量化与再利用，又通过塑料的物理改性与功能协同，赋予水泥基材料新的性能特质，构建起“环保效益—材料性能”双赢的绿色建材体系。本文立足材料科学与工程实践，系统解析回收塑料增强水泥基复合材料的性能演化规律，为其规范化应用提供科学依据。

关键词：建筑工程；回收塑料；水泥基复合材料；基本属性

Performance of Recycled Plastic Reinforced Cementitious Composites in Construction Engineering

Jing Chen

Guangzhou Construction Group Co., Ltd., Guangdong, Guangzhou, 510030

Abstract: Under the guidance of global "dual carbon" goals and the thriving development of green architecture, the recycling of resources and low-carbon transformation in the construction industry have become an irreversible trend. The "white pollution" caused by plastic waste continues to threaten the ecological environment, while traditional cement-based composite materials suffer from inherent flaws such as brittleness, insufficient toughness, and high carbon emissions. The cross-border integration of these two aspects provides a new pathway for the innovation of building materials. Recycled plastic-reinforced cement-based composites achieve both the reduction and reuse of plastic waste by incorporating recycled polyethylene, polypropylene, polyvinyl chloride, and other materials into the cement-based system. Through physical modification and functional synergy of plastics, these composites endow cement-based materials with new performance characteristics, establishing a green building material system that achieves a win-win balance between "environmental benefits and material performance." Based on materials science and engineering practice, this paper systematically analyzes the performance evolution patterns of recycled plastic-reinforced cement-based composites, providing a scientific basis for their standardized application.

Keywords: Construction engineering; Recycled plastic; Cement-based composite materials; Fundamental properties

引言

回收塑料增强水泥基复合材料的研发与应用，打破了传统建材“资源消耗—产品—废弃物”的线性模式，构建起“废弃物—再生资源—高性能建材”的循环价值链。然而，回收塑料与水泥基体之间存在界面相容性差、分散不均等固有矛盾，其掺量、形态、预处理方式等因素均会对复合材料的性能产生复杂影响，如何实现环保效益与材料性能的协同优化，成为制约该类材料大规模工程应用的核心难题。基于此，深入探究回收塑料对水泥基复合材料基本属性、机械性能与耐久性能的影响机制，明确性能调控规律与技术优化路径，对于推动绿色建材的技术升级、促进建筑行业的低碳转型具有重要的理论价值与实践意义。

1 回收塑料增强水泥基复合材料基础认知

1.1 材料组成与制备工艺

回收塑料增强水泥基复合材料是多组分协同作用的新型绿色建材，其组成体系以水泥基基体为承载核心，回收塑料为功能改性相，辅以骨料、水及专用外加剂，通过科学配比实现性能协同。核心组分中，水泥基基体选用普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥等作为胶凝材料，其水化反应形成的C-S-H凝胶为复合材料提供基础强度；回收塑料作为关键改性组分，来源于废弃包装材料、建筑废料、废旧日用品等，经分拣、清洗、破碎、干燥等预处理后，加工成颗粒状、纤维状或粉末状，常用类型包括聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚氯乙烯(PVC)、聚苯乙烯(PS)等，不同类型塑料的化学结构与物理特性直接影响复合材料的性能表现^[1]。

骨料分为细骨料（河砂、机制砂）与粗骨料（碎石、卵石），其级配需与回收塑料的粒径适配，以保证体系密实性；外加剂根据性能需求精准选用，减水剂可改善复合材料的工作性，偶联剂（硅烷偶联剂、钛酸酯偶联剂）能强化回收塑料与水泥基体的界面结合，引气剂可提升材料的抗冻性能。制备工艺需遵循“精准配料—均匀混合—密实成型—规范养护”的核心逻辑，配料阶段严格控制各组分比例，回收塑料掺量通常为水泥质量的5%–20%，水胶比控制在0.4–0.6之间；混合阶段采用“先干后湿”顺序，先将水泥、骨料、回收塑料干粉高速搅拌均匀，再加入溶有外加剂的水，持续搅拌至浆料匀质细腻，避免塑料团聚；成型阶段根据应用场景采用浇筑、压制或喷射成型，振动密实排除气泡；养护阶段控制温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $\geq 90\%$ ，养护时间不少于28天，确保水泥充分水化，形成稳定的微观结构。

1.2 材料特性与应用优势

回收塑料增强水泥基复合材料是多组分协同作用的新型绿色建材，其组成体系以水泥基基体为承载核心，回收塑料为功能改性相，辅以骨料、水及专用外加剂，通过科学配比实现性能协同。核心组分中，水泥基基体选用普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥等作为胶凝材料，其水化反应形成的C-S-H凝胶为复合材料提供基础强度；回收塑料作为关键改性组分，来源于废弃包装材料、建筑废料、废旧日用品等，经分拣、清洗、破碎、干燥等预处理后，加工成颗粒状、纤维状或粉末状，常用类型包括聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP）、聚氯乙烯（PVC）、聚苯乙烯（PS）等，不同类型塑料的化学结构与物理特性直接影响复合材料的性能表现。

骨料分为细骨料（河砂、机制砂）与粗骨料（碎石、卵石），其级配需与回收塑料的粒径适配，以保证体系密实性；外加剂根据性能需求精准选用，减水剂可改善复合材料的工作性，偶联剂（硅烷偶联剂、钛酸酯偶联剂）能强化回收塑料与水泥基体的界面结合，引气剂可提升材料的抗冻性能。制备工艺需遵循“精准配料—均匀混合—密实成型—规范养护”的核心逻辑，配料阶段严格控制各组分比例，回收塑料掺量通常为水泥质量的5%–20%，水胶比控制在0.4–0.6之间；混合阶段采用“先干后湿”顺序，先将水泥、骨料、回收塑料干粉高速搅拌均匀，再加入溶有外加剂的水，持续搅拌至浆料匀质细腻，避免塑料团聚；成型阶段根据应用场景采用浇筑、压制或喷射成型，振动密实排除气泡；养护阶段控制温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $\geq 90\%$ ，养护时间不少于28天，确保水泥充分水化，形成稳定的微观结构^[2]。

2 回收塑料对水泥基复合材料基本属性的影响

2.1 工作性的动态博弈与调控

工作性核心涵盖流动性、保水性与粘聚性，回收塑料的掺量、粒径、形态及表面特性对其产生动态影响。流动性方面，回收塑料表面惰性疏水，会增加浆体摩擦阻力导致流动性下降：低掺量

（ $\leq 10\%$ ）可通过高效减水剂补偿；掺量超15%时，塑料易团聚阻碍流动，需优化粒径或表面改性缓解。粒径与形态影响差异化：细粒径（ $\leq 0.5\text{mm}$ ）通过填充效应间接提升流动性，粗粒径（ $>2\text{mm}$ ）则增大阻力；纤维状对流动性负面影响大于颗粒状，长径比需控制在50–100以平衡性能。保水性与粘聚性因塑料疏水特性与物理阻隔作用得到改善，低水胶比体系中效果更突出。总体而言，通过调控掺量（5%–12%）、选择适配粒径（0.1–1mm）、采用颗粒–纤维复合形态，并配合高效减水剂，可实现工作性与其他性能的协同优化。

2.2 微观结构的重构与优化机理

回收塑料通过“填充–分散–调控水化”三重作用重构水泥基复合材料微观结构。低掺量塑料颗粒均匀分散，填充毛细孔隙与界面空隙，减少有害孔隙（孔径 $>50\text{nm}$ ），提升结构致密性；掺量过高则易团聚形成“薄弱区域”，降低结构匀质性。水化反应方面，塑料虽不参与水化，但可延缓水分蒸发，为C-S-H凝胶生成提供持续水分，同时抑制水化产物过度生长，优化其形貌与分布。纤维状塑料与水化产物交织形成“网状支撑结构”，增强微观结构整体性。表面改性效果更优：硅烷偶联剂使塑料表面形成羟基，与C-S-H凝胶化学键合；等离子体处理提高表面粗糙度与亲水性，均能减少界面空隙，进一步优化微观结构致密性。

2.3 界面结合的耦合效应与突破路径

界面结合状态是复合材料性能的核心，核心矛盾是回收塑料与水泥基体“相容性差”。未改性塑料表面光滑疏水，与基体仅为微弱物理吸附，界面过渡区存在空隙与微裂缝，易发生界面剥离。优化路径以表面改性技术为核心：硅烷偶联剂通过分子两端分别与塑料和C-S-H凝胶化学键合，形成稳定结合层；等离子体改性引入极性基团并增加表面粗糙度，强化物理吸附与化学结合；氧化改性则在塑料表面形成活性基团，改善亲水性。目前仍面临高掺量团聚导致界面缺陷、不同塑料改性适配性不足等挑战。未来通过复合改性技术与掺量精准调控，有望深度优化界面结合状态，为性能提升奠定基础^[3]。

3.1 抗压强度的演化规律与平衡策略

抗压强度呈现“低掺量小幅波动、高掺量显著下降”的演化规律。低掺量（ $\leq 8\%$ ）回收塑料颗粒均匀分散，通过填充效应优化孔隙结构，同时缓解水化内应力，抗压强度仅小幅下降（ $\leq 10\%$ ），满足非承重构件要求；掺量超12%时，塑料团聚形成大量薄弱界面与空隙，导致强度显著下降，粗粒径与未改性塑料中趋势更明显。粒径与形态影响关键：细粒径（ $\leq 0.5\text{mm}$ ）填充效应优，强度损失更小；粗粒径（ $>2\text{mm}$ ）与纤维状塑料因分散问题加剧强度下降。表面改性可有效缓解损失，硅烷偶联剂改性使强度下降幅度降低30%–50%。工程中需采用“掺量调控+改性优化+粒径适配”策略，将掺量控制在5%–10%，选择细

粒径颗粒或短切纤维，平衡环保效益与工程要求。

3.2 抗拉强度的协同提升机制

回收塑料为抗拉强度提升提供有效路径，纤维状塑料表现出显著协同增强效应。其核心是“桥接–阻裂”作用：材料受拉产生微裂缝时，塑料纤维通过界面粘结力传递应力，阻止裂缝扩展并消耗断裂能量。纤维状增强效果远优于颗粒状，聚乙烯、聚丙烯纤维适配性最佳，长径比80–100时提升最显著；颗粒状通过填充效应间接提升，效果较温和。掺量呈现先升后降趋势，6%–10%时达到峰值，超范围则因团聚导致界面缺陷增多，强度下降。表面改性通过提升界面粘结力强化效应，使抗拉强度较未改性体系提升20%–40%。聚氯乙烯塑料因含氯成分提升幅度较小，需针对性优化改性工艺，整体实现传统水泥基材料抗裂难题的破解^[4]。

3.3 抗冲击与韧性的突破性提升

回收塑料的掺入实现了水泥基复合材料抗冲击性能与韧性的突破性提升。塑料凭借优良弹性与塑性变形能力，在体系中形成“弹性缓冲网络”，受冲击时通过弹性变形与界面摩擦消耗能量，抑制裂缝扩展，避免脆性断裂。不同形态效果差异显著：纤维状通过“桥接–拉拔”作用，增韧效果优于颗粒状，聚丙烯短切纤维掺量8%时，抗冲击强度提升60%–80%，断裂能提升1–2倍；颗粒状通过“弹性缓冲”提升30%–50%，更具成本与施工优势。掺量存在饱和效应，10%–12%时韧性达到峰值，超量团聚易抵消增韧效果。表面改性优化界面结合，使韧性较未改性体系提升25%–40%。该特性拓宽了材料应用场景，适用于道路、护坡等受动态荷载部位，兼具环保价值与工程意义。

4 回收塑料对水泥基复合材料耐久性能的多维调控

耐久性能直接决定水泥基复合材料的使用寿命与工程可靠性，回收塑料的掺入通过微观结构优化与自身特性加持，对复合材料的抗渗、抗冻、抗碳化、抗侵蚀等耐久性能产生多维调控效应。抗渗性能方面，低掺量回收塑料颗粒的填充效应使体系孔隙结构更致密，减少水分渗透通道，同时塑料的疏水特性降低水分吸附与渗透能力，使抗渗等级显著提升；但高掺量下塑料团聚导致的界面缺陷会削弱抗渗性能，因此需将掺量控制在5%–10%。经表面改性的回收塑料与水泥基体界面结合更紧密，可进一步减少渗透通道，抗渗性能较未改性体系提升40%–60%^[5]。

抗冻性能方面，回收塑料的弹性与疏水特性能够缓解冻融循环过程中的冻胀破坏，塑料颗粒占据部分孔隙空间，减少冻结水分的体积膨胀压力，同时疏水特性降低孔隙水含量，减轻冻融损伤；引气剂与回收塑料协同作用，可在体系中形成均匀分布的微小气泡，进一步提升抗冻性能。研究表明，掺量8%的改性聚丙烯塑料复合材料经200次冻融循环后，质量损失率与强度损失率

较基准材料降低50%以上，抗冻等级达到F200以上。抗碳化性能方面，回收塑料的化学稳定性使其不与CO₂发生反应，且致密的微观结构与疏水特性抑制CO₂渗透，延缓水泥石碳化进程；但高掺量下的界面缺陷会加速碳化，因此需通过掺量调控与界面优化平衡抗碳化性能。

抗侵蚀性能方面，回收塑料具有优良的化学稳定性，能够抵御酸碱盐等侵蚀介质的破坏，同时其疏水特性减少侵蚀介质与水泥基体的接触，提升抗侵蚀能力。在硫酸盐与氯盐环境中，掺量10%的改性回收塑料复合材料强度损失率较基准材料降低40%–50%，表现出良好的抗侵蚀性能。总体而言，回收塑料对耐久性能的影响具有双重性，低掺量、经改性的回收塑料通过优化微观结构与界面结合，能显著提升耐久性能；而高掺量、未改性的塑料则因团聚与界面缺陷，可能导致耐久性能下降。工程应用中需通过掺量精准调控、表面改性与外加剂协同，实现耐久性能的多维优化。

结语

回收塑料增强水泥基复合材料作为绿色建筑发展的重要方向，实现了塑料废弃物资源化与水泥基材料性能升级的双重目标。回收塑料的掺量、粒径、形态及改性方式对复合材料的基本属性、机械性能与耐久性能产生显著影响：低掺量、经改性的细粒径塑料可优化微观结构与界面结合，提升工作性、韧性、抗渗抗冻等性能；高掺量与未改性塑料则易导致团聚与界面缺陷，降低抗压强度与耐久性。该复合材料的核心创新在于通过“掺量调控+改性优化+工艺适配”的协同策略，平衡了环保效益与工程性能。当前仍面临高掺量下性能衰减、不同类型塑料改性工艺适配性不足等问题，未来需聚焦复合改性技术、智能化掺量调控、专用化工程配方等方向深入研究。随着技术的不断进步，这类绿色复合材料将在建筑工程中实现规模化应用，为行业低碳转型与生态环境保护提供有力支撑。

参考文献

- [1] 回收塑料材料首次被批准应用于美国食品包装[J]. 橡塑技术与装备, 2019, 45(20):51.
- [2] 塑料、垃圾成为德州水泥炉的燃料[J]. 工业设计, 2012, (08):66.
- [3] 段志军, 段望春, 张瑞庆. 国内外复合材料回收再利用现状 [J]. 塑料工业, 2011, 39(01):14–18.
- [4] 赵霄龙, 张仁瑜. 国内外建材业发展循环经济概览 [J]. 住宅产业, 2006, (02):44–47.
- [5] 刘震馨, 蔡淑萍. 减少包装负效应的对策 [J]. 中国流通经济, 1995, (04):30–34.