

再生混凝土细粉对砂浆耐久性能影响研究综述

陈亚玲

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2026年7月8日; 录用日期: 2026年7月30日; 发布日期: 2026年8月10日

摘要

再生混凝土细粉(recycled concrete powder, 简称RCP)是废弃混凝土破碎、筛分及再生骨料生产过程中产生的细粒副产物。将RCP用于砂浆制备, 有助于提高建筑固废资源化水平并降低水泥熟料用量, 但其来源复杂、组成波动、吸水率较高和潜在活性不足等特点会影响砂浆孔结构和介质传输行为。本文围绕RCP的来源组成、制备与活化方式、基本理化特征及其耐久性影响机制等方面进行归纳, 重点讨论毛细吸水、氯离子传输、碳化、硫酸盐侵蚀、冻融循环和干燥收缩等指标的变化规律。已有研究总体表明, 低掺量RCP可通过填充效应和成核效应细化孔径分布, 降低部分传输性指标; 掺量过高或粉体活性不足时, 水泥稀释效应、孔隙连通性增加和微裂缝发展会削弱抗渗、抗碳化及抗冻融能力。机械活化、热活化、碳化活化以及与矿物掺合料复合使用, 是改善RCP砂浆耐久性能的主要途径。后续研究应加强原料分级、长期服役性能验证和多因素耦合劣化机制分析, 为RCP在砂浆中的稳定应用提供依据。区别于侧重RCP制备、活性及水泥基材料综合性能的既有综述, 本文聚焦砂浆体系, 进一步将RCP活化路径与孔结构、浆体-细骨料界面过渡区及多因素耦合耐久劣化机制联系起来进行综述。

关键词

再生混凝土细粉, 砂浆, 孔结构, 氯离子传输, 碳化, 冻融循环

A Review of the Effects of Recycled Concrete Powder on the Durability of Mortar

Yaling Chen

College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: July 8, 2026; accepted: July 30, 2026; published: August 10, 2026

Abstract

Recycled concrete powder (RCP) is a fine-grained by-product generated during the crushing and screening of waste concrete and the production of recycled aggregates. Incorporating RCP into

mortar can promote the resource-efficient utilization of construction and demolition waste and reduce cement clinker consumption. However, its heterogeneous sources, variable composition, high water absorption, and limited latent reactivity may affect the pore structure and transport behavior of mortar. This paper reviews the sources and composition, preparation and activation methods, fundamental physicochemical properties, and durability-related mechanisms of RCP, with particular emphasis on capillary water absorption, chloride ion transport, carbonation, sulfate attack, freeze-thaw resistance, and drying shrinkage. Existing studies generally indicate that, at low replacement levels, RCP can refine the pore-size distribution through filler and nucleation effects, thereby reducing certain transport-related parameters. By contrast, excessive RCP content or insufficient powder reactivity may impair resistance to water penetration, carbonation, and freeze-thaw damage because of the cement dilution effect, increased pore connectivity, and microcrack development. Mechanical activation, thermal activation, carbonation activation, and the combined use of RCP with supplementary cementitious materials are the principal approaches for improving the durability of RCP-containing mortar. Future research should focus on raw-material classification, validation of long-term service performance, and deterioration mechanisms under coupled environmental actions, thereby providing a basis for the reliable application of RCP in mortar. Unlike previous reviews that mainly address RCP preparation, reactivity, and the overall performance of cement-based materials, this review specifically focuses on mortar systems and further establishes links among RCP activation pathways, pore structure, the paste-fine aggregate interfacial transition zone, and durability deterioration mechanisms under multiple coupled factors.

Keywords

Recycled Concrete Powder, Mortar, Pore Structure, Chloride Ion Transport, Carbonation, Freeze-Thaw Cycles

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

再生混凝土细粉的资源化利用与低熟料胶凝材料的发展密切相关。Yao 等[1]在最新综述中指出, RCP 可作为辅助胶凝组分或微细填料用于水泥基材料; Rocha 和 Filho [2]的系统综述也认为, 其应用效果受材料来源、处理方式和微观结构演化共同制约。Zhou 等[3]进一步从材料处理、性能表现和作用机制角度归纳了再生微粉研究进展, 说明 RCP 耐久性评价需要建立在原料特征和孔结构分析的基础上。

现有综述[1]-[3]主要从 RCP 的制备处理、活性评价及其在水泥基材料中的综合性能展开, 研究对象通常涵盖净浆、砂浆和混凝土, 因而对砂浆特有的细骨料约束效应、浆体-细骨料界面过渡区以及多种环境作用下长期耐久性之间的关联讨论相对有限。区别于上述研究, 本文聚焦 RCP 砂浆, 在梳理粉体来源、制备及活化方法的基础上, 按照“活化技术-微结构演化-介质传输-耐久性响应”的逻辑, 系统讨论 RCP 对毛细吸水、氯离子传输、碳化、硫酸盐侵蚀、冻融和收缩的影响, 并重点评述浆体-细骨料界面过渡区及多因素耦合劣化机制。在本文检索和分析的文献范围内, 本综述尝试首次将 RCP 活化技术与砂浆长期耐久性的多因素耦合影响机制进行系统关联, 以明确现有认识边界、关键争议及后续研究重点。

与粉煤灰、矿渣粉等成熟矿物掺合料相比, RCP 的性能离散性更强。制备工艺、颗粒形貌、化学组成、活性激发方式以及复合掺合料体系, 均会影响其工作性、强度发展和孔结构演化[4][5]。因此, 已有

成果虽然证明了 RCP 的资源化潜力，但其耐久性评价仍需从多指标和多机制角度展开。

基于上述研究现状，本文以“原料特征-微结构演化-耐久性响应”为主线，对 RCP 影响砂浆耐久性能的规律与机制进行综述。文中将“再生混凝土细粉”“再生混凝土粉”和“再生微粉”等相近概念统一表述为 RCP；当引用文献涉及砖粉、砂浆粉或混合拆除废料细粉时，则按原研究材料类型进行说明。为保证结论的适用边界，本文在引用水泥净浆或混凝土研究时明确标注其试验体系，并将相关结果作为砂浆机理分析的间接证据，而非直接等同于砂浆结论。

2. RCP 的来源、制备与基本特性

2.1. 来源与组成差异

按来源划分，RCP 主要包括废弃混凝土破碎筛分细粉、再生骨料生产副产细粉、旧砂浆粉和旧硬化水泥浆体粉。Xue 等[5]总结了 RCP 的组成特征及其对水泥基材料性能的影响，认为不同来源粉体在 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaCO_3 及残余水化产物含量方面差异明显。通常，旧硬化水泥浆体含量越高，粉体潜在反应活性越明显；天然骨料粉末或砖粉比例较高时，惰性组分增加，活性贡献相对有限。

拆除废料细粉并不等同于单一的再生混凝土粉。蒸压加气混凝土砌块粉、黏土砖粉以及废混凝土-砖混合粉体的吸水性、需水量和活性贡献差异较大，且粒径、组分比例和取代率会共同改变砂浆性能[6][7]。因此，RCP 在工程应用前应进行筛分、除杂和基本性能检测，并根据活性、需水量及有害离子含量进行分级。

2.2. 制备与活化方法

RCP 的制备通常包括破碎、筛分、除铁、粉磨和分级等步骤。机械粉磨可提高细度和比表面积，增强填充效应与成核效应；但粉磨过度会增加需水量、颗粒团聚风险和能耗。Zhang 等[8]比较了机械、化学和热活化方法，指出不同活化方式在增效机制和适用条件上存在差异；Gao 等[9]则从机械-化学复合活化角度证明，该方法有助于提升废混凝土粉体的火山灰活性。

除机械活化外，热活化、碳化活化和硫酸盐激发也是提高 RCP 反应性的常见路径。Kim 和 Ubysz[10]的研究显示，多次循环热活化可改善再生粉体作为辅助胶凝材料的反应活性；硅酸甲酯钠辅助碳化有助于优化 RCP 颗粒表面结构，热处理与硫酸盐激发的协同作用也可提高再生细粉在低碳胶凝材料中的反应贡献[11][12]。

2.3. 物理化学特性与活性评价

从物理化学特征看，RCP 颗粒多呈粗糙、多孔形貌，比表面积和吸水率往往高于同细度惰性石粉；其主要氧化物包括 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 ，常见物相包括方解石、石英、残余 C-S-H 凝胶、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 以及少量未水化熟料矿物[5]。

RCP 是否适合作为辅助胶凝材料，不宜仅依据抗压强度活性指数判断。需水量比、烧失量、氯离子含量、碱含量、安定性以及孔结构变化均应纳入评价范围[2]。在表征方法上，XRD 可识别晶体相，TG-DTG 可估算 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaCO_3 和结合水变化，MIP、氮吸附和显微图像分析则有助于揭示孔结构及微裂缝演化。不同来源 RCP 的典型组成、活性水平及应用关注点见表 1。

3. RCP 对砂浆基本性能的影响

3.1. 工作性能

RCP 对砂浆工作性能的影响主要受粒径、颗粒形貌和吸水率控制。Wu 等[7]研究了废混凝土-砖混

Table 1. Typical characteristics of RCP from different sources**表 1.** 不同来源 RCP 的典型特征

来源类型	主要组成	活性水平	应用关注点
废弃混凝土破碎细粉	旧硬化水泥浆体、骨料微粉	中等或偏低	来源波动较大，应控制含泥量和有害离子
再生骨料副产细粉	旧砂浆、天然骨料粉末	偏低	惰性组分较多，宜以填料效应为主
旧水泥浆体富集粉	水化产物、未水化熟料颗粒	中等	潜在活性较好，但需控制需水量
碳化处理细粉	CaCO ₃ 、残余水化产物	中等	表面稳定性较好，可作为微细填料或复合掺合料

合粉体在不同组分、取代率和粒径条件下对砂浆性能的影响，结果表明粉体粒径和取代率会改变砂浆流动性与力学性能；在低水胶比高强胶凝体系中，建筑废弃物粉体还会同步影响宏观性能和微观结构[13]。需要说明的是，文献[13]的结论来源于低水胶比高强水泥净浆体系，在砂浆中其影响可能因细骨料体积分数、吸水调节及界面约束而有所调整。

颗粒粗糙和孔隙发育会增加拌合水需求，使砂浆流动度降低；但当细度适中且级配合理时，RCP 又可通过微填充作用改善浆体稳定性。王炳雷等[14]发现，建筑垃圾再生微粉掺量过高会削弱水泥浆体性能，而适当处理可改善其应用效果。由此可见，RCP 掺入后不宜简单通过增加用水量维持流动度，而应结合减水剂、预湿处理和配合比优化控制实际水胶比。该结论同样来源于水泥净浆体系，外推至砂浆时应考虑细骨料对自由水、流变行为和浆体-细骨料界面结构的影响。

3.2. 力学性能与耐久性能的关系

力学性能方面，低掺量 RCP 可填充水泥颗粒间孔隙，并为水化产物提供成核位点，对早期强度和结构致密化具有一定促进作用；当取代率超过合理范围时，有效熟料含量降低，水化产物不足，砂浆强度和弹性模量可能下降[5] [13]。

需要注意的是，强度变化与耐久性变化并不总是同步。Ma 等[15]利用高强砂浆废料制备再生骨料和粉体时发现，材料微结构与氯离子迁移行为需要单独评价；Tokareva 和 Waldmann [16]关于细拆除废料砂浆耐久性的研究也说明，应将强度、毛细吸水、孔结构和传输性能结合分析，避免仅以抗压强度作为 RCP 适用性的判定依据。

4. RCP 对砂浆耐久性能的影响

4.1. 毛细吸水与抗渗性能

毛细吸水反映水分沿连通毛细孔进入砂浆内部的能力，是评价传输性耐久指标的重要基础。Tokareva 和 Waldmann [16]的研究表明，细拆除废料对砂浆毛细吸水和孔结构具有明显掺量敏感性：适量细粉可细化孔径分布并降低毛细吸水系数，过量掺入则可能因自身多孔和水泥稀释效应增加连通孔比例。

粉体粒径、组分和水胶比会共同影响砂浆浆体结构和水分传输行为[7] [13]。对于吸水率较高的 RCP，应采用预湿或饱和面干状态计量，并通过外加剂和矿物掺合料优化孔结构。

4.2. 氯离子传输性能

氯离子传输是沿海、除冰盐和含氯环境下砂浆及混凝土耐久性评价的关键内容。Ma 等[15]从微结构和氯离子迁移角度分析了高强砂浆废料再生粉体的应用效果；Guan 等[17]关于再生复合粉体混凝土的研究也显示，适量再生粉体可通过改善微结构降低氯离子传输，而掺量过高时迁移系数或电通量可能上升。其中，文献[17]的结论来源于混凝土体系；砂浆中缺少粗骨料，其孔隙曲折度和界面结构不同，因此相关

规律应视为机理参照，而非直接量化依据。

从机制上看，RCP 对氯离子传输的影响不仅取决于总孔隙率，还与临界孔径、孔隙连通性及水化产物的氯离子结合能力有关。若 RCP 中旧水泥浆体含量较高，可能提供一定铝相和钙相，有利于氯离子物理吸附或化学结合；若惰性骨料粉末含量较高，则主要表现为填料作用，过量取代时抗氯离子传输性能更易下降。

4.3. 抗碳化性能

抗碳化性能受孔结构和碱性储备共同控制。Lu 等[18]研究发现，碳化硬化水泥浆体粉会改变水泥水化行为和微观结构，说明碳化处理后的旧浆体粉末对孔结构调控具有影响；同时，碳化养护材料在冻融和硫酸盐作用下的耐久性表现具有环境依赖性[19]。文献[18]基于水泥净浆体系，未包含细骨料及浆体-细骨料界面过渡区，其对 RCP 砂浆抗碳化性的指示意义主要限于水化和孔结构机制。

因此，RCP 砂浆的抗碳化性能不能仅从孔结构致密化角度判断。适量粉体可降低 CO_2 进入速率，但 RCP 替代水泥后会减少 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等碱性储备。碳化活化可改善 RCP 表面稳定性，不过其对抗碳化性能的长期影响仍需结合碱度保持能力、环境湿度和养护制度综合评价[11]。

4.4. 抗硫酸盐侵蚀性能

硫酸盐侵蚀通常与硫酸根离子进入、膨胀性产物生成和微裂缝扩展有关。Yao 等[20]在硫酸盐侵蚀-冻融循环耦合条件下分析了再生粉混凝土的劣化机制，结果表明耦合作用会使损伤发展明显快于单一侵蚀过程，离子传输、膨胀产物累积和裂缝扩展之间存在相互促进关系。由于该研究对象为混凝土，砂浆体系中的骨料尺度、界面数量和饱水路径不同，耦合损伤速率及临界阈值仍需通过砂浆试验专门验证。

冻融、硫酸盐等因素共同作用时，材料耐久性受孔结构、饱水状态和侵蚀产物膨胀共同控制[19][20]。通过材料改性和配合比优化可改善再生砂浆性能，但在硫酸盐环境中仍需兼顾早期强度、体积稳定性和抗侵蚀能力[21]。

4.5. 抗冻融性能

冻融损伤与孔隙中水分冻结膨胀、临界饱水程度和孔径分布密切相关。Bosque 等[22]对含混合再生骨料和建筑拆除废料掺合料的混凝土开展冻融研究，发现水环境和除冰盐条件下损伤特征存在差异，说明孔结构和侵蚀介质会共同影响质量损失及相对动弹性模量。安新正等[23]关于砖粒和粉煤灰再生粗骨料混凝土的研究也表明，再生组分掺量、粉煤灰掺量和孔结构均会影响抗冻性能。上述两项结果均来自混凝土体系；砂浆不含粗骨料，冻融水分迁移与界面损伤模式可能不同，因而只能作为趋势性依据。

据此可推断，RCP 提高吸水率后，砂浆在饱水条件下更易达到临界饱水状态，冻融循环中质量损失和相对动弹性模量下降可能加快。寒冷或盐冻环境下的 RCP 砂浆不宜仅依据常温强度确定掺量，应开展冻融循环、盐冻或硫酸盐-冻融耦合试验。

4.6. 干燥收缩与体积稳定性

RCP 的高比表面积和多孔特征会增加浆体内部吸附水需求，进而影响低水胶比体系的宏观性能和微观结构[13]。细拆除废料对砂浆耐久性的影响也与孔结构和水分传输密切相关[16]。

因此，RCP 掺量较高时，干燥过程中毛细张力增大，收缩开裂风险提高；收缩裂缝又会为水分、 CO_2 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 提供快速传输通道，使其他耐久性指标同步劣化。降低 RCP 砂浆收缩的关键在于控制有效水胶比、粉体总比表面积和养护制度，并可结合减水剂、膨胀剂或内部养护材料改善体积稳定性。综合而言，RCP 掺量对砂浆主要耐久性指标的影响规律及控制因素见表 2。

Table 2. Effects of RCP content on the major durability indicators of mortar
表 2. RCP 掺量对砂浆主要耐久性指标的影响规律

耐久性指标	低掺量可能作用	高掺量可能风险	主要控制因素
毛细吸水	孔径细化，吸水系数下降	自身吸水和连通孔增加	细度、吸水率、水胶比
氯离子传输	填充和成核作用降低迁移通道	水泥稀释、结合能力降低	临界孔径、C-S-H 含量、铝相含量
碳化	孔结构致密化，CO ₂ 进入受限	碱性储备不足，碳化深度增加	Ca(OH) ₂ 含量、养护制度、环境湿度
硫酸盐侵蚀	介质进入速率降低	侵蚀产物累积和开裂加剧	连通孔、膨胀产物、矿物掺合料类型
冻融循环	低掺量影响有限或略有改善	饱水程度升高，损伤加快	含气量、孔径分布、饱水程度
干燥收缩	级配改善时可能减缓	毛细张力和微裂缝增加	比表面积、用水量、养护条件

5. RCP 影响耐久性能的作用机制

5.1. 填充效应、成核效应与稀释效应

综合已有研究，RCP 影响砂浆耐久性能的基本机制可概括为填充效应、成核效应和稀释效应的竞争 [5] [15] [16]。填充效应来源于细颗粒对浆体孔隙的堵塞和颗粒级配改善；成核效应表现为 RCP 表面为水化产物沉积提供位点，促进早期 C-S-H 凝胶形成；稀释效应则是 RCP 替代水泥后有效熟料含量降低，导致水化产物减少。

在低掺量且细度适宜时，填充效应和成核效应通常占优，砂浆孔结构趋于致密；当掺量较高或粉体活性不足时，稀释效应逐渐占主导，孔隙率和连通孔比例增加，耐久性能下降。不同 RCP 原料的最佳掺量并不相同，应结合活性指数、需水量比和耐久性指标综合确定。

5.2. 孔结构与传输性能

孔结构是连接 RCP 微观作用与宏观耐久性能的关键因素。Ma 等 [15] 关于氯离子迁移的研究表明，即使强度变化不显著，临界孔径、连通孔比例和传输路径连续性的变化仍可能引起耐久性差异；Guan 等 [17] 对再生复合粉体混凝土的结果也印证了孔结构和水化产物组成对氯离子传输的控制作用。其中，文献 [17] 属于混凝土尺度证据，将其用于砂浆机理解释时仍应考虑粗骨料及其界面效应被移除后的结构差异。

RCP 低掺量时可将部分大孔细化为毛细孔或凝胶孔，降低渗透路径连续性；高掺量时，由于水化产物不足和自身孔隙引入，可能形成更多连通孔。建议将 MIP、氮吸附、低场核磁共振和显微图像分析与电通量、氯离子迁移系数和毛细吸水系数联合使用，以建立孔结构参数与耐久性指标之间的定量关系。

5.3. 浆体 - 细骨料界面过渡区

浆体 - 细骨料界面过渡区(ITZ)是砂浆区别于水泥净浆的关键结构层级，也是判断 RCP 研究结论能否由净浆外推至砂浆的重要环节。受细骨料表面壁效应、局部泌水和颗粒堆积疏松影响，ITZ 通常具有较高孔隙率和较低黏结强度，并可能成为水分及侵蚀性离子的优先传输通道。RCP 的粒径、表面粗糙度、吸水行为和活性组分会共同改变该区域的局部水胶比及水化产物分布 [5] [15] [16]。

在低掺量和适宜细度条件下，RCP 细颗粒可填充细骨料周围的堆积空隙，并通过成核效应促进 C-S-H 在骨料表面附近沉积，从而降低 ITZ 厚度和孔隙连通性；若 RCP 吸水率较高、掺量过大或活性不足，则可能造成有效水胶比空间分布不均、浆体量减少及黏结弱化，使 ITZ 缺陷和界面微裂缝增多。碳化或

热活化虽然能够改变 RCP 表面反应性，但其是否能持续改善 ITZ，还取决于粉体与细骨料粒径匹配、养护条件以及后期体积稳定性。

现有关于 RCP 的界面研究仍多借助净浆水化结果或混凝土整体性能进行间接推断，直接针对 RCP 砂浆“浆体-细骨料界面过渡区”的定量证据相对不足。后续宜结合背散射电子成像、SEM-EDS 线扫描、纳米压痕、显微硬度和界面区域孔隙统计，表征 ITZ 厚度、元素梯度、局部弹性模量及裂缝密度，并将其与毛细吸水、氯离子迁移和冻融损伤建立关联。

5.4. 微裂缝演化与耐久性耦合

微裂缝是多种耐久性劣化过程的共同通道。硫酸盐侵蚀与冻融循环耦合会促进微裂缝扩展，并使损伤表现出加速特征[20]。因此，评价 RCP 砂浆耐久性能时，应将微裂缝数量、宽度和分布纳入分析，而不仅关注孔隙率或抗压强度。需要区分的是，文献[20]基于混凝土耦合侵蚀试验，砂浆中缺少粗骨料约束，其裂缝起源、扩展路径及损伤阈值可能不同。上述作用机制与主要耐久性指标的对应关系见表 3。

Table 3. Relationships between influencing mechanisms and durability indicators
表 3. 作用机制与耐久性指标的关联

作用机制	正向影响	潜在不利影响	对应耐久性指标
填充效应	细化孔径、降低连通孔	粉磨过细时需水量增加	吸水、氯离子传输、硫酸盐侵蚀
成核效应	促进水化产物沉积	受 RCP 表面状态和活性限制	早期致密化、抗渗性能
稀释效应	低掺量下影响有限	水化产物减少、碱储备下降	强度、碳化、氯离子传输
孔结构调控	降低临界孔径和传输路径连续性	高掺量下连通孔增加	各类传输性耐久指标
ITZ 优化	改善细骨料界面结构	浆体不足时界面缺陷增加	抗渗、抗硫酸盐、抗冻融
微裂缝演化	低收缩体系中影响较小	形成快速传输通道并诱发耦合劣化	收缩、冻融、硫酸盐及氯盐侵蚀

6. RCP 砂浆耐久性能的改善措施

6.1. 物理活化与热活化

机械粉磨是最常用的物理活化方法，可提高 RCP 细度、改善颗粒级配并增强填充作用。Zhang 等[8]指出，机械、化学和热活化方法在增效机制和经济性方面存在差异，具体选择应结合原料组成、目标性能和成本约束综合确定。

对于旧水泥浆体含量较高且具有高值化利用需求的 RCP，热活化能够提高其反应活性。Kim 和 Ubysz [10]提出的多次循环热活化路径表明，再生粉体具有重复利用潜力；机械-化学活化也可进一步改善火山灰活性，但应同步评价能耗、环境收益和工程可行性[9]。

6.2. 碳化活化与化学激发

碳化活化通过生成 CaCO_3 改善 RCP 颗粒表面结构，并提升其作为微细填料的稳定性。Wang 等[11]对硅酸甲酯钠辅助碳化活化的研究表明，该方法的处理效果受 CO_2 浓度、相对湿度、处理时间和含钙组分含量影响。

化学激发可通过碱激发或硫酸盐激发促进潜在活性组分反应。Shin 等[12]研究了热处理与硫酸盐处理的协同激发效果，认为二者结合可提升再生细粉活性；但化学激发体系仍需关注后期膨胀、碱含量升高和环境适应性。

6.3. 复合掺合料与配合比优化

与硅灰、偏高岭土、粉煤灰或矿渣粉复合使用，是提升 RCP 砂浆耐久性能的重要途径。热活化再生水泥与再生骨料的复合利用可用于制备全再生砂浆，废混凝土 - 砖粉体的粒径、组分和取代率组合也会显著影响砂浆性能[7] [21]。

因此，RCP 砂浆配合比优化应从 RCP 掺量、胶凝材料总量、水胶比、砂胶比、外加剂和养护制度等方面综合考虑。对于以耐久性为目标的砂浆，不宜单纯追求高取代率，而应在资源化率、力学性能、传输性能和体积稳定性之间取得平衡。各类耐久性能改善方法的主要作用、适用条件及注意事项见表 4。

Table 4. Comparison of methods for improving the durability of RCP-containing mortar
表 4. RCP 耐久性能改善方法比较

方法	主要作用	适用条件	注意事项
机械活化	提高细度，增强填充效应和成核效应	多数 RCP 均可采用	需控制能耗、需水量和颗粒团聚
热活化	脱水旧水化产物，提高潜在活性	旧浆体含量较高的 RCP	需评价能耗、温度窗口和经济性
碳化活化	生成 CaCO ₃ ，改善表面稳定性	含钙组分较高的 RCP	受湿度、CO ₂ 浓度和处理时间影响
化学激发	促进硅铝相反应，提高早期或后期性能	具有一定潜在活性的 RCP	需防范碱含量升高和后期膨胀
复合掺合料	协同水化，细化孔结构	耐久性要求较高的砂浆	需兼顾抗碳化、收缩和早期强度

7. 现有研究不足与发展方向

总体来看，RCP 研究仍面临原料来源复杂、术语和粒径界定不统一、评价指标分散以及长期服役数据不足等问题[1]-[3]。不同文献对“再生混凝土粉”“再生微粉”和“拆除废料细粉”的粒径范围及组分界定并不一致，导致研究结果可比性不足。

耐久性评价方面，仅依靠单一指标难以全面反映 RCP 砂浆在实际服役环境中的性能[16]。在多因素共同作用下，耐久性劣化往往具有加速特征，尤其是碳化 - 氯盐、冻融 - 硫酸盐和干湿循环 - 盐侵蚀等耦合环境仍需进一步研究[20]。

后续研究可从以下方面展开：一是建立 RCP 品质分级体系，明确粒径、活性指数、需水量比、有害离子含量和烧失量等控制指标；二是构建砂浆耐久性多指标评价框架，综合考虑抗氯离子传输、抗碳化、抗硫酸盐侵蚀、抗冻融和收缩性能；三是结合 MIP、XRD、TG-DTG、SEM 和图像识别等方法，建立微结构参数与耐久性指标之间的定量关系；四是开展长期暴露和示范工程验证，为 RCP 在砂浆中的规范化应用提供数据支撑。现有研究中的主要问题及相应建议汇总见表 5。

Table 5. Major issues and recommendations for research on RCP-containing mortar
表 5. RCP 砂浆研究中的主要问题及建议

问题	具体表现	建议方向
原料异质性强	来源、龄期、碳化程度和杂质含量差异大	建立分类、分级和预处理标准
术语与粒径界定不统一	不同研究中粉体粒径范围和命名不一致	明确 RCP 定义并报告筛分粒径和比表面积
耐久性评价不系统	多集中于单项指标，缺少耦合环境研究	建立多指标综合评价体系
宏微观关联不足	孔结构和微裂缝证据不足	构建微结构 - 传输性能定量模型
长期数据不足	以短期室内加速试验为主	开展自然暴露和工程示范验证

8. 结论

(1) RCP 可作为砂浆中的辅助胶凝材料或微细填料使用,但其性能受来源、组成、细度、活性和吸水率显著影响。与传统矿物掺合料相比, RCP 品质波动更大,应用前应进行基本性能检测和分级。

(2) RCP 对砂浆耐久性能具有掺量依赖性。低掺量时,填充效应和成核效应有利于改善孔结构,降低毛细吸水和氯离子传输;高掺量时,稀释效应、连通孔增加和微裂缝发展会削弱抗渗、抗碳化、抗硫酸盐侵蚀和抗冻融性能。

(3) 浆体-细骨料界面过渡区是砂浆区别于净浆和混凝土的关键结构层级,孔结构、ITZ 及微裂缝演化共同控制 RCP 砂浆的介质传输与耐久性。引用净浆或混凝土结果时,应明确材料体系边界,并通过砂浆尺度试验验证,避免将不同材料层级的结论直接等同。

(4) 机械活化、热活化、碳化活化、化学激发以及与矿物掺合料复合使用,可在不同程度上改善 RCP 砂浆耐久性能。今后应重点完善品质分级、长期服役验证和多因素耦合耐久性评价,为 RCP 规模化利用提供技术依据。

参考文献

- [1] Yao, L., Zhao, Z., Lin, C., Ning, J., Alam, S.Y. and Tošić, N. (2026) Using Recycled Concrete Powder in Sustainable Cement-Based Materials: An Updated Review. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 1-22. <https://doi.org/10.1080/21650373.2026.2691297>
- [2] Aquino Rocha, J.H. and Toledo Filho, R.D. (2023) The Utilization of Recycled Concrete Powder as Supplementary Cementitious Material in Cement-Based Materials: A Systematic Literature Review. *Journal of Building Engineering*, 76, Article 107319. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107319>
- [3] Zhou, C., Wang, D., Zhan, P., Tao, H., Li, M. and Wang, J. (2026) A Review of Recycled Micro-Powder Concrete: Material Treatment, Performance and Mechanism. *Developments in the Built Environment*, 25, Article 100861. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2026.100861>
- [4] Yang, Y., Kang, Z., Zhan, B., Gao, P., Yu, Q., Wang, J., et al. (2022) Short Review on the Application of Recycled Powder in Cement-Based Materials: Preparation, Performance and Activity Excitation. *Buildings*, 12, Article 1568. <https://doi.org/10.3390/buildings12101568>
- [5] Xue, C., Wang, Z., Qiao, H., Su, L. and Feng, Q. (2025) The Characteristics of Recycled Concrete Powder and Its Influences on the Properties of Cement-Based Materials. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, 40, 496-508. <https://doi.org/10.1007/s11595-025-3085-9>
- [6] Liu, Q., Li, B., Xiao, J. and Singh, A. (2020) Utilization Potential of Aerated Concrete Block Powder and Clay Brick Powder from C&D Waste. *Construction and Building Materials*, 238, Article 117721. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117721>
- [7] Wu, H., Liang, C., Wang, C. and Ma, Z. (2022) Properties of Green Mortar Blended with Waste Concrete-Brick Powder at Various Components, Replacement Ratios and Particle Sizes. *Construction and Building Materials*, 342, Article 128050. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128050>
- [8] Zhang, D., Zhang, S., Huang, B., Yang, Q. and Li, J. (2022) Comparison of Mechanical, Chemical, and Thermal Activation Methods on the Utilisation of Recycled Concrete Powder from Construction and Demolition Waste. *Journal of Building Engineering*, 61, Article 105295. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105295>
- [9] Gao, Q., Li, X., Shi, X., Li, X., Lyu, X., Zhu, X., et al. (2025) Clean and High-Value Recycling Approach for Waste Concrete Powder: Mechano-Chemical Activation of Pozzolanic Activity. *Powder Technology*, 458, Article 120988. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.120988>
- [10] Kim, J. and Ubysz, A. (2024) Thermal Activation of Multi-Recycled Concrete Powder as Supplementary Cementitious Material for Repeated and Waste-Free Recycling. *Journal of Building Engineering*, 98, Article 111169. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111169>
- [11] Wang, C., Zhan, B., Yu, Q., Gao, P., Guo, B., Chu, Y., et al. (2025) Experimental Investigation and Mechanism of Sodium Methyl Silicate Assisted Carbonation Activation of Recycled Concrete Powder. *Construction and Building Materials*, 486, Article 141995. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141995>
- [12] Shin, S., Kim, G., Kang, I. and Kim, J. (2026) Synergistic Activation of Recycled Concrete Fines by Thermal and Sulfate Treatments for Low-Carbon Cement Applications. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 15, 633-659.

- <https://doi.org/10.1080/21650373.2025.2575281>
- [13] Wu, H., Yang, D., Wang, C. and Ma, Z. (2023) Effects of Construction Waste Powder on Micro-Macro Properties of Green High-Strength Cement Paste with Low Water-to-Binder Ratio. *Construction and Building Materials*, **385**, Article 131493. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131493>
 - [14] 王炳雷, 吕泊宁, 姚坤宇, 等. 建筑垃圾再生微粉对水泥净浆性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(33): 14861-14869.
 - [15] Ma, Z., Liu, X., Hu, R., Ba, G. and Wang, C. (2023) Using Recycled Aggregate and Powder from High-Strength Mortar Waste for Durable Cement-Based Materials: Microstructure and Chloride Transport. *Journal of Cleaner Production*, **417**, Article 137998. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137998>
 - [16] Tokareva, A. and Waldmann, D. (2025) Durability of Cement Mortars Containing Fine Demolition Wastes as Supplementary Cementitious Materials. *Construction and Building Materials*, **477**, Article 141316. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141316>
 - [17] Guan, X., Ji, H., Qiu, J., Zhang, Y., Yu, J. and Li, L. (2024) Chloride Ion Permeability of Concrete Containing Recycled Composite Powder from Building Demolition Waste. *Construction and Building Materials*, **424**, Article 135934. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135934>
 - [18] Lu, B., Shi, C., Zhang, J. and Wang, J. (2018) Effects of Carbonated Hardened Cement Paste Powder on Hydration and Microstructure of Portland Cement. *Construction and Building Materials*, **186**, 699-708. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.159>
 - [19] Su, A., Chen, T., Gao, X., Li, Q. and Qin, L. (2022) Effect of Carbonation Curing on Durability of Cement Mortar Incorporating Carbonated Fly Ash Subjected to Freeze-Thaw and Sulfate Attack. *Construction and Building Materials*, **341**, Article 127920. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127920>
 - [20] Yao, Y., Liu, C., Liu, H., Zhang, W. and Hu, T. (2024) Deterioration Mechanism Understanding of Recycled Powder Concrete under Coupled Sulfate Attack and Freeze-Thaw Cycles. *Construction and Building Materials*, **388**, Article 131718. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131718>
 - [21] Wu, H., Gao, J., Liu, C., Luo, X. and Chen, G. (2024) Combine Use of 100% Thermoactivated Recycled Cement and Recycled Aggregate for Fully Recycled Mortar: Properties Evaluation and Modification. *Journal of Cleaner Production*, **450**, Article 141841. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141841>
 - [22] del Bosque, I.F.S., Van den Heede, P., De Belie, N., de Rojas, M.I.S. and Medina, C. (2020) Freeze-Thaw Resistance of Concrete Containing Mixed Aggregate and Construction and Demolition Waste-Added Cement in Water and De-Icing Salts. *Construction and Building Materials*, **259**, Article 119772. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119772>
 - [23] 安新正, 牛薇, 张亚飞, 等. 砖粒及粉煤灰掺量对再生混凝土抗冻性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(14): 237-240.