

研究论文

DOI: 10.63221/eesp.v02i01.22-28

亮点:

- 系统梳理再生骨料与污泥协同利用的研究进展
- 揭示两者复合对混凝土力学性能与微观结构的影响规律
- 提出性能互补与环境效益并重的固废高值化利用路径

*通讯作者邮箱:

man200177@163.com

英文引用: Wang Hang, Chen Shoukai, Wang Liujiang, et al., 2026. Research progress on synergistic resource utilization of recycled aggregate concrete and sludge. Evidence in Engineering Science and Practice, 02 (01), 22-28.

中文引用: 王航, 陈守开, 王柳江等, 2026. 再生骨料混凝土与污泥协同资源化利用的研究进展. 工程科学与实践, 02 (01), 22-28.

稿件处理节点:

接收	2026年3月4日
修订	2026年3月8日
接受	2026年3月14日
发表	2026年3月16日

基金资助:

本研究未受到基金资助。

版权:

本作品原创内容可依据《知识共享署名4.0国际许可协议》条款使用。任何对本作品的后续分发须标明原作者及作品标题、期刊引用及DOI信息。

再生骨料混凝土与污泥协同资源化利用的研究进展

王航¹, 陈守开^{1*}, 王柳江², 孙妍¹

¹ 华北水利水电大学, 郑州市 450000

² 河海大学, 南京市 210098

摘要 随着全国城市化进程的加速发展和环境保护意识的增强, 建筑固体废弃物与市政或工业污泥的处理与资源化利用已成为土木、水利工程与生态环境工程的重要研究内容。再生骨料混凝土已成为减少天然砂石开采、降低环境负荷的关键技术路径, 污泥则将其转化为具有一定火山灰活性的辅助性胶凝材料(SCM), 旨在解决污泥污染环境的难题。本文首先综述了再生骨料混凝土(RAC)与污泥在建材领域的各自利用现状。在此基础上, 重点探讨了将两者协同利用的新路径, 即采用再生骨料(RA)作为混凝土骨料, 并以经处理的污泥替代水泥作为辅助性胶凝材料的相关研究进展。然后, 通过系统梳理国内外文献, 从预处理技术、配合比设计及力学性能等方面进行展开讨论。最后, 总结了两者结合利用的研究成果, 为推动建筑与工业废弃物的协同高值化利用, 以及发展低碳绿色建材提供理论参考。

关键词: 再生骨料混凝土; 制革污泥; 力学性能; 工作性能;

Research progress on synergistic resource utilization of recycled aggregate concrete and sludge

Wang Hang¹, Chen Shoukai^{1*}, Wang Liujiang², Sun Yan¹

¹ North China University of Water Resources and Electric Power

² Hohai University

Abstract With the accelerated development of national urbanization and the enhancement of environmental protection awareness, the treatment and resource utilization of construction solid waste and municipal or industrial sludge has become an important research content of civil engineering, water conservancy engineering and ecological environment engineering. Recycled aggregate concrete has become a key technical path to reduce natural sand and gravel mining and reduce environmental load. Sludge converts it into an auxiliary cementitious material (SCM) with a certain pozzolanic activity, aiming to solve the problem of sludge polluting the environment. This paper summarizes the respective utilization status of recycled aggregate concrete (RAC) and sludge in the field of building materials, and further discusses the combination of the two—that is, using recycled aggregate (RA) as concrete aggregate, and using treated sludge instead of cement as auxiliary cementitious material, the research progress of this new path of synergistic utilization. Therefore, through the research literature at home and abroad, this paper gradually combs the pretreatment technology, mix design, mechanical properties and other building materials of recycled aggregate concrete and sludge, and finally summarizes the research results of the combination of recycled aggregate concrete and sludge. The status quo provides a theoretical reference for promoting the coordinated high-value utilization of construction and industrial waste and the development of low-carbon green building materials.

Keywords: Recycled Aggregate Concrete; Tannery Sludge; mechanical property; Working Performance

1. 引言

当前,随着全国城市化建设与工业化发展的加速推进,虽然城市快速发展对社会创造巨大经济价值,但随之产生的建筑垃圾和污泥也日益加剧了对环境的污染。然而目前,我国主要通过堆放、掩埋及资源化利用这三种途径处置建筑垃圾,这三种处理方式不仅污染环境,而且资源利用率较低^[1];而污泥则是通过焚烧法、填埋法、农业堆肥、固化法四种处理方式,同样会对环境造成污染,如果处理不当可能会对人类健康造成危害。因此,推动建筑与工业固废的资源化、高值化利用,是我国实现“双碳”战略目标的迫切需求,也是循环经济发展的必然路径。

目前,为了践行国家资源循环利用及环境保护的政策要求,许多建筑行业的学者开展对建筑垃圾和污泥再循环利用的研究,为固废资源高值化利用提供了可行的路径。再生骨料混凝土是指把工业垃圾经过收集、筛选、清洗和处理的步骤后按照合适的取代率替代传统混凝土中的粗、细骨料制备而成^[2],已成为建筑垃圾资源化的主流趋势。然而,再生骨料通常由原生骨料和附着旧砂浆组成,存在孔隙率高、强度低、吸水率大等性能缺点,这些缺陷直接制约了再生混凝土的力学性能与长期耐久性^[3]。污泥由于种类较多,能作为固废混凝土原料的主要来源于市政和工业污泥,将污泥应用于混凝土中已成为污泥资源化利用的一种常用方式^[4]。但是因为污泥的化学成分波动大、重金属潜在浸出风险,所以对作为固废混凝土原料的污泥,通常需要对污泥进行预处理,通过焚烧、热解等方式将其转化为污泥灰,处理后的污泥灰 SiO_2 、 CaO 和 Al_2O_3 含量丰富,污泥灰与黏土和硅酸盐水泥矿物成分相类似,因此污泥灰可广泛应用于建筑材料领域^[5]。

为此,本文针对以建筑固体废弃物作为再生骨料和污泥作为胶凝材料对固废混凝土资源化利用展开论述,归纳总结再生骨料混凝土和污泥的研究现状及两者结合混凝土的性能表现,为固废资源化利用提供现实的参考依据。

2. 再生骨料混凝土的研究现状

2.1 再生骨料混凝土概述

再生骨料混凝土(RAC)是由废弃混凝土经过破碎、清洗、分级后,部分或全部取代天然砂石骨料的一种新型建筑材料。正是由于再生骨料混凝土来

自建筑工程中拆除废弃的混凝土,所以在处理过程中会导致表面和内部出现一些细小的裂缝以及表面会附着一些旧水泥浆,以及再生骨料替换了天然骨料,导致再生骨料混凝土的很多性能都不如普通混凝土^[6]。朱树玲等^[7]的试验结果表明,由于再生骨料相较天然骨料具有更强的吸水能力,混凝土坍落度不断降低,弹性模量、劈裂抗拉强度随再生骨料取代率提升不断降低,导致混凝土性能有所下降。衣利伟等^[8]的研究结果表明,随着再生骨料替换率的增大,试件的抗压强度逐渐降低及再生粗骨料对试件抗压强度的影响比再生细骨料大,如图1所示。张花杰等^[9]开展对全再生骨料混凝土基本力学性能与孔隙结构的研究,发现再生细骨料自身固有的众多裂隙与孔隙会形成多害孔,导致混凝土的多害孔的孔体积占比明显增加。

针对以上再生骨料混凝土表现出的性能缺陷,当前对再生骨料混凝土的改性研究主要从骨料自身强化和混凝土复合掺合料两个层面展开。李疏影等^[10]探究再生骨料进行固碳处理后的混凝土的力学性能,结果表明:固碳处理再生骨料优化了界面过渡区(ITZ)密实度和混凝土的孔隙结构,提升了再生骨料混凝土的抗压强度和表观密度。张芸等^[11]利用粉煤灰、矿渣及硅灰三种掺合料,研究对再生骨料混凝土力学性能及微观结构的影响,结果表明:硅灰、粉煤灰、矿渣复掺显著优化孔隙分布、改善界面过渡区特性及促进水化产物生成来提升再生骨料混凝土的综合性能。肖文淇等^[12]以拆除的C40混凝土构件为基础,研究结果显示玉米秸秆生物炭掺量在4.0%掺量处为最优,抗压、劈裂抗拉和抗折强度均有增加。

现阶段,再生骨料混凝土的研究已从基础性能探索进入深度应用与系统创新阶段。提升高性能化的再生骨料混凝土,旨在突破材料极限,通过固碳强化、纳米改性及纤维复合等技术,制备适用于严酷环境的高强、高耐久性再生骨料混凝土,甚至探索其在超高性能混凝土(UHPC)中的应用;与此同时,数字化与智能化正深刻影响着社会,利用人工智能与机器学习模拟优化配合比与性能预测已成为研发趋势。

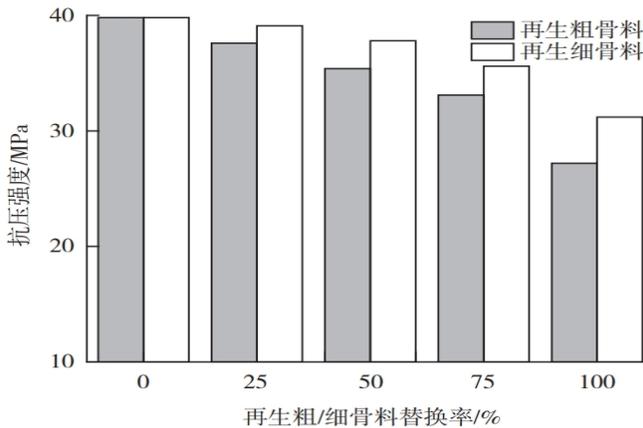


图1 再生粗/细骨料不同替换率与试件抗压强度关系^[8]

2.2 再生骨料混凝土的配合比设计

再生骨料的形态、表面特性和内部结构与天然骨料存在差异，这些差异会影响再生混凝土的力学性能^[13]。所以针对再生骨料混凝土的配合比设计不能简单的套用普通混凝土的方法，其中RA的高吸水率是RAC配合比设计的首要因素。虽然目前学术界没有统一的配合比设计标准，但是已有很多学者进行了大量研究形成主流的设计思路与方法。

黄浩^[14]通过正交试验法，研究水泥用量、再生细骨料掺入率、再生粗骨料掺入率及砂率4个因素对再生混凝土28d抗压、抗折强度的影响，结果表明：水泥用量和再生细骨料对28d抗压强度影响最大，再生骨料对28d抗折强度影响最大。陈家春^[15]通过设定不同水灰比和再生骨料替代率，结合坍落度与含气量控制，采用相对质量值法评估骨料吸水率等影响并建立强度公式，经试验验证调整，最终确定满足目标性能的再生骨料混凝土配合比。乔建新^[16]深入研究高品质再生粗骨料混凝土(RCAC)配合比优化，通过测定骨料物理性能，调节水灰比、替代率及胶凝材料用量，基于强度公式与线性回归计算材料用量。优化后的RCAC在强度、抗裂性和耐久性等方面均具有较高综合性能。

综上所述，当前再生骨料混凝土配合比设计的研究主要围绕其高吸水率特性展开。现有研究在普通混凝土配合比基础上，主要通过调整再生骨料替代率与水灰比等参数，并结合试验验证进行优化，以平衡其力学与工作性能。

2.3 再生骨料混凝土的力学性能

混凝土的力学性能通常包括抗压强度、抗拉强度、抗折强度、弹性模量等性能指标。但再生骨料

混凝土与普通混凝土有所不同，再生骨料是由废弃混凝土破碎处理而成，且RA表现出密度降低、吸水率增加、孔隙率更高和大量裂缝的特征^[17]。所以RA因其固有的缺陷使得RAC的力学性能普遍低于普通混凝土且呈现出复杂而有规律的变化。

混凝土抗压强度是指混凝土在受到压力作用下的抵抗能力，它是衡量混凝土质量和耐久性的重要指标，通常用来评估混凝土的质量和结构的承载能力^[6]。大量研究表明，再生骨料(RA)的引入不可避免地会对抗压强度产生影响，其总体规律通常表现为：在固定水灰比条件下，RAC的28d标准抗压强度随RA取代率的增加而呈现下降趋势。这一现象已被学界普遍证实，例如李家和等^[18]采用再生粗骨料配制的C30混凝土，研究了不同取代率对再生混凝土抗压强度的影响，结果表明：混凝土的抗压强度随着再生粗骨料取代率的增加而降低，且当再生粗骨料取代率为100%时，再生粗骨料混凝土的抗压强度较普通混凝土降低14%~18%。肖倍等^[19]设计了4种取代率和3种水灰比对再生混凝土抗压强度的试验研究，研究发现，再生骨料中残余外包装砂浆的存在及其内部微裂缝导致黏结界面薄弱，随着取代率增加，混凝土力学性能总体呈现下降或波动下降趋势。温永钦等^[20]通过掺入研究钢纤维对再生骨料混凝土力学性能的影响，结果表明：随着钢纤维体积掺量的增加，再生骨料混凝土的28d抗压和抗折强度均先增后降，当钢纤维体积掺量为1.5%时，再生骨料混凝土的28d抗压强度最高。Zina Manaf Bakr^[21]等人通过将预湿处理的再生粗骨料与微硅粉(5%)和纳米硅粉(2.5%)复掺，使再生骨料混凝土的28d抗压、劈裂抗拉强度分别显著提升了44.6%和32.5%。

在再生骨料混凝土的力学性能体系中，劈裂抗拉强度与抗折强度是评估其抗裂性能与弯曲韧性的关键指标。相较于抗压强度，这两项性能对混凝土内部的微缺陷、孔隙及界面黏结强度更为敏感。因此，再生骨料的引入所带来的不利影响，在此表现得尤为显著，且规律更为复杂。徐芊等^[22]通过试验研究揭示了再生粗骨料取代率、水胶比对再生骨料混凝土劈裂强度的影响，结果表明：50%和70%再生粗骨料取代率的再生混凝土在28d时劈裂抗拉强度分别降低了1.4%和3.2%。张健等^[23]通过试验研究分析得出，发现水灰比越小，随再生骨料掺量的增加，再生混凝土相对劈裂抗拉强度总体呈下降趋势。秦红杰^[24]通过研究发现由于再生骨料自身的缺

陷,各取代率下再生混凝土抗折强度均小于普通混凝土,取代率为50%试件抗折强度较普通混凝土试件下降的幅度最大为24.2%。陈龙祥^[25]利用矿渣、再生粗骨料、再生细骨料结合,制备一种绿色低碳的碱激发再生骨料混凝土(AARAC),研究发现AARAC的劈裂抗拉强度随着RCA掺入量的增加而逐步下降,但一定的碱含量对RCA的界面粘结有着一定的增强作用。

由此可见,再生骨料的固有缺陷(高孔隙率、微裂缝等)是导致再生混凝土力学性能随其取代率增加而普遍下降的根本原因。然而,现有研究也证实,通过掺入钢纤维、硅粉等增强材料或采用碱激发、预湿处理等优化工艺,可有效弥补骨料缺陷,显著提升其力学性能。

3. 污泥固废混凝土的研究现状

3.1 基于污泥固废混凝土概述

污泥是指在市政污水处理和工业废水处理过程中产生的半固态或固态废弃物,是水处理过程的必然副产物,成分极其复杂。污泥主要分为两大类,一类是市政污泥,这些污泥中含有大量有机物、寄生虫、重金属、氮磷等营养物质^[26];另一类是工业污泥,主要是来自工业废水处理站产生的污泥,含无机物质较多,部分含有重金属物质;其种类繁多,主要包括造纸污泥、皮革污泥、印染污泥、金属加工污泥、食品加工污泥和电镀污泥等^[4]。因为工业污泥具有与黏土和普通硅酸盐水泥相似的矿物组成,如 SiO_2 、 Al_2O_3 和 CaO 等,所以可用于建筑材料的生产^[27]。目前污泥在固废混凝土中的应用以轻骨料制备混凝土和干化污泥或焚烧灰作为辅助胶凝材料制备混凝土为主。其中本文主要以工业污泥中的制革污泥作为固废混凝土中的胶凝材料为主进行分析。

3.2 制革污泥的应用与挑战

制革污泥是制革过程中产生的危险固体废弃物,主要源于鞣制与复鞣工序中未被吸收的铬粉(约占30%)进入水体后经共沉淀形成,其成分复杂,除铬外还含有砷、镉、汞、铜、铅、镍等多种重金属,以及蛋白质、油脂、糖类等有机物。制革污泥具有含水率高、强碱性、易腐化、恶臭等特点,且三价铬在碱性条件下易转化为毒性更强的六价铬^[28]。其中以制革污泥中的六价铬危害最为突出,六价铬具有较强的腐蚀性、刺激性和致癌性,如果不适当的

处置会对土壤、空气、水和人类健康造成风险,因此解决制革污泥的处置问题迫在眉睫^[29]。然而,经预处理后的制革污泥,因其具有一定的硅铝成分和细颗粒特性,在固化后可作为辅助胶凝材料或骨料掺合料应用于固体废物基混凝土中,不仅能够减少水泥用量、降低混凝土生产成本,还能实现固体废物的资源化循环。例如徐娜等^[30]采用水泥基固化/稳定化技术处理制革污泥,通过正交试验设计极差分析方法确定了制备建筑材料的最优配合比,经28d养护后所得固化块的抗压强度达20.39MPa,远超建筑材料最低强度要求(10MPa),从而使得固化/稳定化处理后的制革污泥应用到建筑材料成为可能。

3.3 制革污泥的预处理及性能表现

当前利用制革污泥制备固废混凝土的技术尚不成熟,其核心难点在于经预处理(如化学还原稳定化、脱水、磨细等)后的污泥掺入,会显著干扰水泥基体的正常水化进程并劣化微观结构,导致所制备混凝土的抗压强度与劈拉强度普遍偏低,性能不稳定且提升空间有限。因此制革污泥的预处理是提升制革污泥力学性能的关键。

彭川^[31]采用水泥固化/稳定化技术处理制革污泥,研究结果表明:水泥掺量为8%、水灰比为0.8时制革污泥中铬能得到有效固定,固化体力学强度远超填埋要求。鄂涛等^[32]通过添加高岭土到制革污泥中,利用其丰富的羟基与有机质协同作用,实现了Cr(III)的高效无害化稳定。符成龙等^[33]研究表明,采用“常温硫酸浸取+150°C热水解”联合工艺,可有效实现制革污泥中铬的转移和稳定化,其中pH是影响铬溶出的关键因素。畅浩^[34]通过热重分析、低温热解等方法,得出制革污泥在400°C低温碳化效果最佳,碳化产物对离子态铬吸附效果差,而脱脂处理后对铬的吸附率显著提升至88.5%,表明脱脂处理更具资源化潜力。黄雪芬^[35]选用抗坏血酸为还原剂模拟制革污泥中六价铬的还原条件,并采用氧化焙烧-水浸实验的技术路线回收制革污泥中的铬,六价铬的还原率和 Cr_2O_3 的回收率均能达到90%左右。杨永林^[36]通过热处理和掺杂氧化物等方法,发现制革含铬污泥在热处理中铬易氧化释放,采用控制气氛热处理和添加 SiO_2 、 TiO_2 等可抑制氧化,协同粉煤灰或形成尖晶石相能有效固定铬,降低浸出毒性。张慷^[37]研究制革污泥在不同热解条件下重金属的迁移转化及对热解产物的影响,发现制革污泥中的重金属在热解后转化为稳定化合物,且在氮气气氛下可

有效避免三价铬氧化，表明热解对污泥中重金属固定具有积极作用。

宁寻安等^[38]采用石灰、粉煤灰和煤渣固化制革污泥，通过扫描电镜和能谱分析观察其微观结构变化，结果表明：随着养护时间延长，固化块内部孔隙减少、密实性提高，并出现针状钙矾石结构，使其抗压强度显著增强，重金属浸出风险降低。夏睿祺^[39]使用偏高岭土和碱激活剂合成地质聚合物固化制革污泥，通过优化地质聚合物中的 $[n(\text{SiO}_2)/n(\text{Al}_2\text{O}_3)]$ 和 $[n(\text{Na}_2\text{O})/n(\text{SiO}_2)]$ 的摩尔比，显著提升了固化体的力学性能，使抗压强度最高超过 70MPa，同时有效固化了制革污泥中的铬，浸出浓度大幅降低。郭磊等^[40]将污泥与硅灰、粉煤灰、矿渣、玻璃粉等固体废弃物组成二元及三元胶凝替代体系，发现三元体系（尤其是污泥-硅灰-粉煤灰组合）能显著提升混凝土的抗压强度、微观物相和孔隙结构，其力学性能优于二元体系及普通混凝土。史海波^[41]通过优化配合比发现，激胶比、碱激发模数、水胶比三因素对制革污泥-矿渣基复合地质聚合物的抗压强度有显著性影响，且微观分析表明：其水化产物以无定形 C-S-H 凝胶为主，Cr 进入结构形成钙铬榴石，实现稳定固化和具备耐久性。

综合来看，现有研究主要通过化学稳定化（还原铬、碱激发）、热处理（热解、气氛控制）及物理封装（水泥固化、矿物掺合）等路径，旨在稳定重金属并激发污泥活性。其中，引入高活性矿物构建多元胶凝体系（如地质聚合物、碱激发矿渣）在提升固化体力学性能与微观结构方面效果显著。然而，当前研究仍缺乏对预处理工艺与复杂胶凝体系适配机制的深入揭示，制约了制革污泥在混凝土中高效、稳定的资源化应用。

4. 基于再生骨料-污泥复合材料的固废混凝土

4.1 再生骨料污泥混凝土研究现状

本文通过再生骨料作为固废混凝土的骨料，污泥替代水泥作为胶凝材料来制备再生骨料污泥混凝土，但是目前根据文献调查，学术界的研究方向还多聚焦于将经过改性后的再生骨料和污泥单一的应用于混凝土中。例如石岩等^[42]研究再生微粉、矿渣粉和玄武岩纤维对含 50%再生粗骨料的混凝土性能影响，结果表明：三元复配效果最佳，抗压、抗折强度分别提高 18.3%、36.3%。戴君等^[43]通过分析碱激发地质聚合物固化污泥研究发现，与传统水泥相比，以矿渣、

粉煤灰等为前驱体的地聚物胶凝材料能更高效地固化污泥，其固化体不仅具有更高的强度和更好的水稳定性，还能更有效地固定重金属。但是，目前也已有部分研究开始探索将再生骨料与污泥进行协同利用，并将其共同用于制备固废混凝土的初步尝试。

4.2 再生骨料污泥混凝土的耐久性能

以再生骨料和污泥复合材料制备固废混凝土，其核心优势在于实现了多重固体废弃物的协同处置与性能互补。再生骨料和污泥的复合使用不仅显著提升了建筑垃圾再生骨料的力学性能与界面稳定性，还通过胶凝体系的化学固化将工业污泥中潜在的重金属等污染物稳定固结于混凝土基体中，从根本上避免了二次环境污染。相较于传统的单一固废利用或填埋处置，两者复合使用同时减少了天然骨料开采与污泥处置的能源消耗与土地占用，为多重固废的协同处置与在建材领域的规模化应用提供了兼具环境效益与可行性的技术路径。

石膏爽等^[44]探讨污泥灰对再生混凝土性能的影响，系统测试坍落度、抗压、劈裂抗拉强度，并结合微观结构分析，得出以下结论：3%污泥灰掺量对再生混凝土的强度发展是较优掺量，由图 2 可见污泥灰是表面粗糙多孔隙的不规则颗粒；再生骨料中旧砂浆的存在有助于提高污泥灰的利用率，促进早期强度发展，但过量污泥灰会降低混凝土均匀性，影响强度发展。张宽裕^[45]研究发现，掺入污泥灰会降低混凝土坍落度，尤其对再生混凝土更明显；掺入 5%污泥灰对再生混凝土的抗压强度有促进作用和提高了地聚物再生混凝土的早期（7d）劈裂抗拉强度。总体而言，污泥灰的掺入使得再生混凝土的抗折强度提高，但抗压、劈裂抗拉强度下降，并对碱激发混凝土的强度发展不利。卢鹏^[46]利用再生粗骨料制备碱激发工业废料再生骨料混凝土（ATRC），系统研究不同污泥掺量和碱当量下 ATRC 的力学性能和微观结构结果表明：随污泥掺量增加，混凝土强度呈线性下降，微孔减少、大孔增多，密实性降低；随碱当量增加，ATRC 强度先升后降，当碱当量为 9%时，孔结构最密实、孔隙率最小，性能最优。尹鹏博等^[47]探索 100%再生粗骨料混凝土，污泥替代部分细骨料和胶凝材料，试验结果表明：随着污泥掺量增加，混凝土抗压强度和表观密度均下降，孔隙度增大，且无害孔减少、多害孔增多，导致耐久性降低；但当替代率达到 20%时，各养护龄期下的强度相当，这表明污泥制混凝土可能为早强混凝土。Ngoc Kien Bui 等^[48]通过在再生粗骨料混凝

土中分别掺入污泥灰、粉煤灰、硅灰和高岭土，系统评估其对再生混凝土力学性能和耐久性的影响，结果表明：污泥灰显著提高再生混凝土的早期抗压强度。

综上所述，再生骨料与污泥的复合利用实现了固废协同处置与性能互补。研究表明，适量污泥灰可利用再生骨料旧砂浆促进早期强度；但过量掺入会劣化孔隙结构，导致强度与工作性下降。目前该体系可行性已初步验证，但在界面协调机制与长期耐久性方面仍需深入探索。

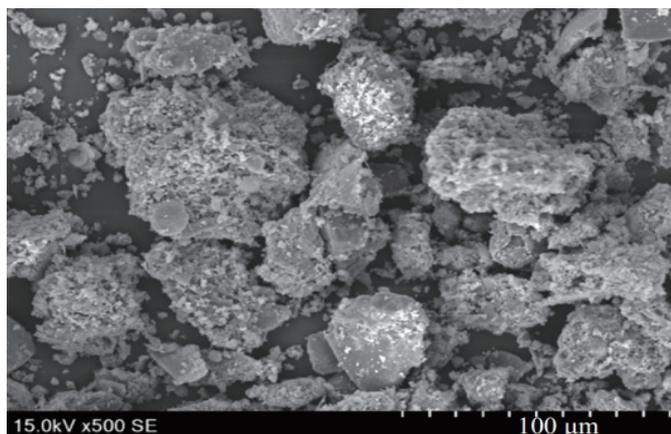


图2 污泥灰微观形貌^[44]

5. 结论

为促进再生骨料与污泥在建筑材料中的协同资源化利用，推动低碳绿色混凝土的工程应用与发展，本文综述了再生骨料混凝土与污泥的研究现状，并重点探讨了二者复合利用的可行性、性能表现及其环境影响，主要得到以下结论：

(1) 再生骨料可通过物理强化、化学改性及复合掺合料等手段提升其性能，其中碳化处理、聚合物浸渍及矿物掺合料复配等方法能有效改善骨料界面过渡区结构，提升混凝土力学性能。污泥经热处理、化学稳定化或地质聚合等技术预处理后，可作为辅助胶凝材料使用，但其掺入对混凝土工作性与力学性能存在一定负面影响。

(2) 再生骨料混凝土的配合比设计需重点考虑骨料高吸水率特性，宜采用正交试验、相对质量值法等方法进行优化，并重视水泥用量、骨料取代率与水胶比等因素的多重影响。污泥作为胶凝材料替代部分水泥时，应严格控制其掺量、预处理工艺及激发条件，以兼顾力学性能与重金属固化效果。

(3) 再生骨料与污泥复合使用时，可实现性能互补与环境协同效益。适量污泥灰掺入可提升再生混凝土的早期强度与微观结构致密性，但过量使用会导致孔隙结构劣化、强度下降；碱激发体系与地质聚合物技术为两者协同固化提供了新路径，能有效固定重金属并提升材料耐久性。

参考文献

- [1] 王宇平,张新东,刘亚美,等.再生骨料强化技术及其性能研究进展[J].混凝土世界,2025,(05):76-81.
- [2] 赵华,高益康,田乾,等.再生混凝土研究发展现状及评述[J].青海交通科技,2021,33(03):1-11+38.
- [3] 何子明,申爱琴,王路生,等.再生骨料强化技术及对再生混凝土性能影响研究综述[J].吉林大学学报(工学版),2025,55(03):790-810.
- [4] 陈德宏,陆道欢,侯家灿,等.基于市政和工业污泥的固废混凝土性能研究进展[J].福建建材,2025,(05):121-126.
- [5] 费豪文.污泥灰对混凝土力学性能影响机理的研究[J].中国水泥,2025,(11):66-70.
- [6] 杨文瑞,余佳城,黄跃文,等.玻璃纤维再生混凝土力学性能研究综述[J].科学技术与工程,2025,25(26):10996-11006.
- [7] 朱树玲,王欣.再生粗骨料取代率对混凝土力学性能的影响分析[J].江西建材,2024,(02):14-16.
- [8] 衣利伟,丁红军,尹翔,等.建筑垃圾再生混凝土强度特性研究[J].建筑技术开发,2025,52(05):141-143.
- [9] 张花杰,陈文婷.全再生骨料混凝土基本力学性能与孔隙结构研究[J].四川水泥,2026,(01):11-14+17.
- [10] 李疏影,谭勇庆,胡帅,等.再生骨料的碳化处理对再生混凝土力学性能及抗碳化能力的影响[J/OL].工业建筑,1-10[2026-02-10].
- [11] 张芸,马洁,宋杨.掺和料对再生骨料混凝土力学性能及微观结构的影响[J].中国建筑金属结构,2025,24(23):19-21.
- [12] 肖文淇,张克含,赵洪凯.CO₂养护与生物炭协同增强再生骨料混凝土强度与微观结构[J/OL].铁道科学与工程学报,1-16[2026-02-10].
- [13] 肖建庄,李佳彬,孙振平,等.再生混凝土的抗压强度研究[J].同济大学学报(自然科学版),2004,(12):1558-1561.
- [14] 黄浩.再生混凝土配合比设计及力学性能研究[J].福建建材,2025,(02):7-10.
- [15] 陈家春.再生骨料混凝土性能探究及配合比设计[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2025,38(03):101-108.
- [16] 乔建新.高品质再生粗骨料混凝土配合比优化[J].工程建设与设计,2025,(02):171-173.

- [17] Zhu P, Hua M, Liu H, et al. Interfacial evaluation of geopolymer mortar prepared with recycled geopolymer fine aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 259: 119849.
- [18] 李家和,徐得阳.再生粗骨料对混凝土坍落度和抗压强度的影响[J].*低温建筑技术*,2010,32(04):12-14.
- [19] 肖倍,安旭文,杨瑞,等.再生混凝土基本力学性能试验及其影响因素研究[J].*混凝土*,2018,(11):32-36+40.
- [20] 温永钦,王盈锶,郭浩.钢纤维对再生骨料混凝土工作性、力学性能及韧性的影响研究[J].*混凝土与水泥制品*,2025,(09):106-109.
- [21] Bakr Z M, Jaf D K I. Performance enhancement of recycled aggregate concrete (RAC) incorporating pre-soaked recycled concrete aggregate (RCA) and silica-based additives[J]. *Results in Engineering*, 2025: 108318.
- [22] 徐芊,叶丽敏,游尹琛,等.再生骨料混凝土基本力学性能研究[J].*哈尔滨商业大学学报(自然科学版)*,2020,36(01):65-72+85.
- [23] 张健,张述雄,杜鹏,等.建筑垃圾对混凝土强度的影响试验研究[J].*硅酸盐通报*,2019,38(09):3004-3009+3014.
- [24] 秦红杰.再生混凝土抗折强度尺寸效应的试验研究及细观数值模拟[D].湖南大学,2020.
- [25] 陈龙祥.碱激发再生骨料混凝土性能研究[D].扬州大学,2025.
- [26] 黄晓阳.城市污水处理厂污泥最终处置方式研究[J].*现代盐化工*,2021,48(05):86-87.
- [27] 张敏,万俊锋,王岩.工业污泥建材化利用的研究进展[J].*应用化工*,2023,52(04):1133-1138.
- [28] 姚庆达,黄鑫婷,周华龙,等.制革含铬污泥处置及资源化技术进展[J].*中国皮革*,2023,52(05):7-14.
- [29] Xu G, Mei J, Yu F, et al. The properties, synergistic effects, response surface optimization, and the transport of nitrogen and sulphur of co-pyrolysis of tannery sludge and *Chlorella vulgaris*[J]. *Journal of Environmental Management*, 2026, 402: 129148.
- [30] 徐娜,章川波,强西怀,等.制革污泥固化用建材初探[J].*中国皮革*,2009,38(13):32-34.
- [31] 彭川.制革污泥水泥固化/稳定化及 Cr 形态研究[D].广西大学,2014.
- [32] Ma J, Tao E, Yang S, et al. Stabilizing Cr (III) deriving from tannery sludge with kaolin and organic matter[J]. *Environmental Research*, 2023, 236: 116798.
- [33] 符成龙,麻红磊,池涌,等.热水解处理制革污泥过程中总 Cr 的转移与稳定性研究[J].*浙江大学学报(工学版)*,2013,47(09):1631-1636.
- [34] 畅浩.制革污泥热解过程及其产物特性的研究[D].陕西科技大学,2014.
- [35] 黄雪芬.制革污泥中铬的化学形态及回收利用研究[D].广西大学,2017.
- [36] 杨永林.制革含铬污泥热处理过程中铬的形态转化与稳定化研究[D].陕西科技大学,2020.
- [37] 张慷.制革污泥热解过程中重金属的迁移转化及其机理探究[D].湘潭大学,2022.
- [38] 宁寻安,田宇,周云,等.制革污泥及其固化块的微观结构研究[J].*功能材料*,2012,43(03):405-408.
- [39] 夏睿祺.地质聚合物固化制革污泥工艺配方及耐久性研究[D].浙江工业大学,2016.
- [40] 郭磊,张忆庆,田文峰.基于污泥的多元固废体系混凝土性能研究[J].*土木工程学报*,2025,58(01):12-21.
- [41] 史海波.制革污泥—矿渣复合地质聚合物工艺配比及耐久性研究[D].华北水利水电大学,2023.
- [42] 石岩,陈晗.再生微粉、矿渣粉和玄武岩纤维对再生骨料混凝土性能影响研究[J/OL].*石家庄铁道大学学报(自然科学版)*,2025,(04):75-81[2026-02-10].
- [43] 戴君,雷志娟,陈亿煌,等.碱激发地聚物胶凝材料固化/稳定化市政污泥研究进展与评述[J].*广州建筑*,2025,53(12):108-120.
- [44] 石膏爽,张宽裕,栾晨晨,等.掺加污泥灰对普通混凝土和再生混凝土力学性能的影响[J].*工程科学与技术*,2021,53(02):103-109.
- [45] 张宽裕.掺入污泥灰对水泥基混凝土与碱激发混凝土力学性能影响的对比研究[D].四川大学,2021.
- [46] 卢鹏.碱激发工业废料再生骨料混凝土性能研究[D].华北水利水电大学,2023.
- [47] 尹鹏博,李璞媛,李聪霞.污泥再生混凝土力学性能及微观机理研究[J].*甘肃科学学报*,2025,37(03):109-118.
- [48] Bui N K, Satomi T, Takahashi H. Influence of industrial by-products and waste paper sludge ash on properties of recycled aggregate concrete[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 214: 403-418.