

再生砖骨料 - 秸秆灰地聚物混凝土机理与改性综述

宋波波, 孙洪军

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年7月10日; 录用日期: 2026年8月2日; 发布日期: 2026年8月11日

摘 要

为了将建筑废弃物资源利用实现环境美化的问题, 提出地质聚合物(Geopolymer)作为一种绿色建筑材料, 具有替代硅酸盐水泥的潜力, 因其具有固废资源利用和原料广泛等优点, 有望实现低碳环保目标。基于此, 本文研究了地质聚合物的反应机理和力学性能影响因素; 分析了碱激发剂、凝胶材料、水胶比对GPC胶凝分子的影响, 总结了固废秸秆灰理化性质、作用机制、性能影响以及对地聚物的研究; 掌握了废砖再生骨料物理性质、化学改性以及对地聚物的研究; 介绍了地聚物的微观分析和界面强化。旨在为固废基地质聚合物中的发展研究提供理论支持和技术借鉴。

关键词

废砖再生骨料, 秸秆灰, 界面过渡区, 凝胶材料, 地质聚合物, 微观结构

Review on Mechanism and Modification of Recycled Brick Aggregate-Straw Ash Geopolymer Concrete

Bobo Song, Hongjun Sun

School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: July 10, 2026; accepted: August 2, 2026; published: August 11, 2026

Abstract

In order to solve the problem of environmental beautification by using construction waste resources, Geopolymer is proposed as a green building material, which has the potential to replace

Portland cement. Because of its advantages of solid waste resource utilization and wide range of raw materials, it is expected to achieve low-carbon environmental protection goals. Based on this, this paper studies the reaction mechanism of geopolymer and the influencing factors of mechanical properties; the effects of alkali activator, gel material and water-binder ratio on GPC gelling molecules were analyzed. The physical and chemical properties, action mechanism, performance influence of solid waste straw ash and the research on geopolymer were summarized. Mastered the waste brick recycled aggregate physical properties, chemical modification and the study of geopolymer; the microscopic analysis and interface strengthening of geopolymers are introduced. The aim is to provide theoretical support and technical reference for the development of solid waste-based geopolymers.

Keywords

Recycled Brick Aggregate, Straw Ash, Interfacial Transition Zone, Gel Material, Geopolymers, Microstructure

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

我国为应对环境污染问题,提出了力争在2030年达到“碳达峰”,2060年达到“碳中和”。针对此问题制定了“双碳”目标[1],以应对二氧化碳排放量逐年增加的情况。近年来,我国城市化进程迅速发展,每年新建建筑面积超过20亿平方米,拆除旧建筑面积达2亿平方米,由此每年产生的建筑废弃物超过18亿吨[2]。拆除建筑废弃物主要包括废混凝土和废黏土砖,其中废混凝土和废黏土砖所占大致相同,均在40%以上;而在非中心城区的建筑物所含的废黏土砖比例高达七成[2]。从20世纪末开始,中国相继出台了一系列关于建筑垃圾处理的政策,提出到2025年,建筑垃圾综合利用率要达到60%,将建筑垃圾资源化处理的战略地位提升到了前所未有的高度[3]。我国作为农业大国,每年产生的农作物秸秆巨大,因此生物质发电厂也应运而生,解决了秸秆露天燃烧带来的CO₂排放问题,但随着生物质发电技术的成熟,植物秸秆被大量用于燃烧发电,产生大量的秸秆灰未能及时处理也会对环境造成二次污染和形成雾霾天气[4]。因此,废弃物废砖再生骨料和固废秸秆灰的价值利用亟待解决。

地质聚合物是替代水泥的新型凝胶材料,能够利用固废资源,为建筑行业碳排放做出重要贡献。目前针对单一固废地质聚合物混凝土已经取得一定的进展,但是对废砖再生骨料和秸秆灰之间的协同作用尚不清楚,尤其是两者之间的界面过渡区的作用、微观结构变化。基于此,本文针对废砖再生骨料-秸秆灰地质聚合物混凝土展开综述;研究了地质聚合物的反应机理和力学性能影响因素;对秸秆灰理化性质、作用机制、性能影响以及对地聚物的研究;以及废砖再生骨料物理性质、化学改性以及对地聚物的研究;总结了地质聚合物微观结构与界面强化策略。

2. 地质聚合物的研究

2.1. 反应机理

为减少温室气体CO₂的排放及固废资源利用,能够替代硅酸盐水泥的一种新型绿色建筑材料。其中

Davidovits [5] 于 1978 年首次提出了地质聚合物的概念, 并通过研究与分析得出地质聚合物水泥制备过程中产生的二氧化碳较普通硅酸盐水泥减少了 26%~45%。地质聚合物(Geopolymer)是指硅、铝化合物在碱激发剂作用下发生溶解-聚合反应而形成的三维网络状凝胶体, 目前, 较为认可碱基地质聚合的反应机理是在碱性环境的作用下地聚物的化学键发生断裂和重组[6], 但大致可以归纳为三个过程[7]: 溶解-缩聚-固化。因此, 地质聚合物混凝土(geopolymer concrete, GPC)的发现可以为全球建筑领域绿色低碳的目标做出贡献。

2.2. 地聚物力学性能影响因素

地聚物混凝土(Geopolymer concrete, 简称 GPC)是以碱激发剂激发硅铝酸盐形成的胶凝相的一种新型混凝土材料。GPC 中各组分骨料主要由凝胶产物实现粘结在一起, 因而可以认为 GPC 强度的来源是凝胶产物强度[8], 而 GPC 中凝胶产物的生成又受到碱激发剂、胶凝材料及水胶比三者共同调控, 由此可见, 三类参数均 GPC 宏观力学性能存在显著影响。

2.2.1. 碱激发剂

碱激发剂作为地聚物体系中驱动前驱体发生聚合反应的重要组成部分, 能够激活胶凝材料潜在的火山灰活性, 充分发挥凝胶作用, 进而推动反应进程。目前而言, 国内外制备 GPC 采用的碱激发剂主要为氢氧化钠、硅酸钠和氢氧化钾等碱性激发材料, 碱激发剂掺量浓度和水玻璃模数的改变, 也会显著影响到 GPC 的宏观力学性能特征上。Sung Choi 等[9]则研究了不同碱激发剂浓度对 GPC 力学性能最优的水玻璃模数探讨。Mohammed Ibrahim 等[10]探讨了碱激发剂浓度的变化对于 GPC 力学性质的影响情况。研究结果表明, 当氢氧化钠和水玻璃的比例增加, 抗压强度的表现为先逐渐增强然后逐渐减少的现象。此外, 这种现象还受到胶凝物质类型及碱激发剂浓度的共同影响。

2.2.2. 凝胶材料

地聚物胶凝体系的反应前驱体以硅铝酸盐物质为主要成分, 包括粉煤灰、矿渣和稻壳灰等固体废弃物的原料, 相较于粉煤灰, 秸秆灰铝、硅元素含量偏低, 可作为辅助凝胶材料, 粉煤灰基 GPC, 其内部凝胶结构十分致密。Bharat Bhushan Jindal 等[11]通过在稻壳灰基 GPC 中掺加矿渣进行力学性能实验。随着矿渣掺量的增加, 稻壳灰基 GPC 的内部结构更加致密、进而其力学性能也在增强, 其中最优矿渣掺量下其 28 d 抗压强度可达 50 MPa。

2.2.3. 水胶比

水是制备 GPC 必不可少的一部分, 虽然 1989 年 Davidovits [5]提出的两个地聚物聚合机理中水只作为反应的生成物, 并不参与聚合反应。水胶比处于较低水平时, 其浆体的流动性较差, 实现振捣密实难度较大, 不利于力学性能发展; 而提升水胶比时, 能够有利于硅铝酸盐前驱体充分发生碱激发聚合反应, 但过量的自由水残留在基体内部, 进而导致了基体内部产生大量孔隙、显著降低材料力学性能。

3. 秸秆灰在地质聚合物的研究

3.1. 秸秆灰的物理化学性质

如下表 1 所示, 生物质灰的主要化学成分包括 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 CaO 等活性成分, K_2O 、 Na_2O 碱性成分以及有机物。活性成分参与水化反应是生物质灰能作为掺合料使用的基础。其中, CaO 与水反应生成 Ca(OH)_2 , 而 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 会与水泥水化过程中生成的 Ca(OH)_2 发生二次水化反应生成 C-S-H 等产物[12][13]。

Table 1. Main chemical components of some biomass ash [14]**表 1.** 部分生物质灰的主要化学成分[14]

类别	w (SiO ₂)	w (Al ₂ O ₃)	w (Fe ₂ O ₃)	w (CaO)	w (MgO)	w (K ₂ O)	w (Na ₂ O)	w (SO ₃)	w (P ₂ O ₅)	烧失量
水稻秸秆灰 [15]	52.44	0.47	0.17	8.01	2.70	12.05	0.89	2.26	2.58	14.60
小麦秸秆灰 [16] [17]	51.20~ 65.10	1.20~ 9.10	0.32~ 2.67	5.90~ 10.30	1.11~ 6.45	8.40~ 23.82	0.32~ 4.60	1.13~ 4.93	2.40~ 3.80	4.03~ 10.30
高粱秸秆灰 [17]	71.42	2.52	0.74	4.20	2.35	11.3	2.16	0.78	1.94	6.47
青稞秸秆灰 [18]	61.75	5.92	3.83	10.63	2.04	5.31	2.60	1.75	5.72	4.55

3.2. 秸秆灰作用机制

3.2.1. 火山灰效应

生物质灰有着丰富的 SiO₂ 和 Al₂O₃ 等活性组分, 其与水化产物 Ca(OH)₂ 发生二次反应, 生成 C-S-H 和 C-A-H 等凝胶, 或者将钙硅比较高的 C-S-H 转化为钙硅比低的 C-S-H [14]。这些凝胶会填补部分孔隙, 提高密实度, 增强各组分的黏结程度, 从而改善 ITZ 界面[14], 提高混凝土的强度和耐久性能。

3.2.2. 微集料填充效应

生物质灰与大多数掺合料一样, 具有微集料填充效应[14]。经研磨加工后的生物质灰, 粒径更小, 比表面积更大。微集料填充效应不仅可以改善粉体颗粒级配, 还能填充孔隙。这是因为生物质灰具有较大的表面积, 可以为水泥水化物的沉淀提供更多的成核位点, 生成更多的水化产物(如 CH、C-S-H 和 C-A-H 等) [19], 从而提高基体的密实度, 减少孔隙率。

3.3. 秸秆灰在地聚物混凝土的研究分析

秸秆灰富含铝硅类活性组分, 可辅助促进凝胶生成, 填充基体孔隙, 有效提升地聚物材料抗压强度, 并且通过微观能够进行详细分析其反应原理。如下表 2 所示。

Table 2. Geopolymer performance analysis with different straw ash content**表 2.** 不同秸秆灰掺量的地聚物性能分析

秸秆灰来源	研究内容	力学性能指标	微观分析	参考文献
玉米秸秆灰	通过掺入玉米秸秆灰对碱激发矿渣试样力学性能影响	28 d 抗压强度较空白组分别提高了 16.9%	通过 XRD 谱分析了试块生成 C-S-H 和 C-A-S-H 等凝胶产物, 形成了微观致密结构。	[20]
向日葵秸秆灰	研究了不同向日葵秸秆灰添加量的灌浆材料, 并对其进行微观分析	28 天抗压强度达到 24.31 MPa	向日葵秸秆灰中的钾盐和钙盐, 如硅酸镁钾, 促进了 C(K)-A-S-H 和 C-S-H 凝胶的形成。	[21]
甘蔗秸秆灰	研究了甘蔗秸秆灰来等质量部分替代地质聚合物中的偏高岭土实验	90 d 后砂浆的抗压强度达到 50 MPa 以上	NASH 无定形反应产物的形成, 并且没有形成结晶相, 得出凝胶体系可以填充孔隙。	[22]

4. 废砖再生骨料在地质聚合物中的研究

4.1. 废砖再生骨料物理化学性质

4.1.1. 物理性质

废砖剔除多余的杂质后通过人工破碎的方法得到不同粒径大小的骨料, 根据粒径不同分为砖混再生

粗骨料(大于 2 mm)、砖混再生细骨料 0.075~2 mm、砖混再生粉料 0.075~2 mm, 粒径不同材料的物理性质也不同, 分为以下几个方面。再生骨料可以作为地质聚合物中替代天然骨料, 再生砖粉因具有火山灰效应能够作为地聚物的前驱体。

砖混再生粗骨料(Mixed Recycled Coarse Aggregate, MRCA), 是指粒径大于 2 mm 的再生骨料, 主要由破碎砖块、碎石以及老旧砂浆构成, 颗粒形态多表现为多边形, 其表观密度与天然骨料相比较低[23]。也具有吸水率大、压碎指标偏高、孔隙率高和表观密度较低等缺点, 这些固有缺陷导致再生骨料混凝土的力学性能较差的主要原因[23]。

砖混再生细骨料, 粒径在 0.075~2 mm, 其物理性质与粗骨料相似, 具有空隙率高、吸水率大等物理特征[24]。

砖混再生粉料, 粒径为 0.075~2 mm, 通过扫描电镜观察表明, 粉体颗粒表面粗糙, 边缘处带有尖角、凹槽和缺口[25], 进一步在高倍数下, 能够观察发现颗粒表面附着大量微细粉, 也能观测到微裂隙结构, 这些结构导致了粉体吸水率上升[26]。

4.1.2. 化学改性

由于废砖再生骨料有高吸水率、高孔隙率、高压碎性以及低表观密度等自身缺陷, 需要对其进行化学改性, 提高再生骨料-地聚物界面过渡区的强度。目前常用的改性方法可分为附着砂浆去除和附着砂浆加固两种。附着砂浆加固即用预制溶液, 水玻璃溶液浸泡[27]等对再生骨料进行浸渍、淋洗以及干燥等处理以期达到增强再生骨料性能的效果。邱继生等[28]水玻璃溶液有效提升再生骨料的性能, 综合考虑各项指标, 得出水玻璃溶液的最佳改性方案是浓度为 4%浸泡 5 h; PVA 溶液浓度为 10%, 浸泡 24 h 后对再生骨料性能的改性效果最优。

4.2. 废砖再生骨料在地聚物混凝土的研究

建筑和拆除废弃物产生的大部分废弃物约占 80%, 主要为混凝土和砖块废弃物[29], 将这些废弃物合理回收利用, 不仅缓解 CO₂ 的排放, 还减少了建筑行业对天然原材料的依赖。关于砖块废料的利用, 通常的做法是将其破碎, 然后作为混凝土中细骨料或粗骨料的部分替代品使用。目前关于在地聚合物粘结剂中利用这种砖块废料的研究还比较有限[30]。再生砖粉被用作地聚合物前体的研究, Dadsetan 等[31]总结了关于在地质聚合物技术中利用混凝土、砖块和陶瓷等废弃物作为原料的文献, 这些材料可以独立使用, 也可以与辅助水泥材料(SCMs)结合使用, 可以通过减少对波特兰水泥和骨料的需求来减少二氧化碳排放, 同时为废弃物处置提供了合适的解决方案。此外, Ye 等[32]综述了过去十年(2012~2021)关于含回收砖粉和回收混凝土粉(RCP)地聚合物的已发表文章, 通过计算抗压强度超过 40 MPa 的地聚合物的碳排放, 确认了 RBP 和/或 RCP 作为前体的可行性, 并倡导使用火山灰材料或波特兰水泥。与天然骨料相比, 砖骨料的孔隙度、高吸水率和低硬度对混凝土性能产生负面影响, 包括可加工性、机械性能和耐久性, 需要对其进行化学改性。但相反, 也有研究指出砖骨对混凝土发展的有益或促进作用[33]。相关再生骨料地聚物相关研究如下表 3 所示。

Table 3. Impact of recycled brick aggregate on polymer concrete
表 3. 再生砖骨料对地聚物混凝土的影响

研究内容	研究成果	参考文献
探究不同砖骨料替代率地聚物混凝土试块实验	探究了应力-应变曲线与砖骨料取代率的关系, 建立了砖骨料地聚物混凝土的本构模型	[34]
研究纳米材料裹浆再生砖骨料强化地聚物混凝土实验	分析了改性后的砖骨料产生正向作用, 骨料孔隙度降低, 力学性能也提高了	[35]

续表

研究高温下再生砖骨料地聚物混凝土受压本构模型	建立起凝胶材料与粗骨料类型对地聚物混凝土的本构模型, 分析了高温下地聚物混凝土的力学性能, 结果表明, 模型与实验结果相符	[36]
分析不同类型短纤维对再生砖骨料的物理化学性质与微观影响	再生烧结砖具有更好的实用性	[37]
采用再生砖细骨料替代河砂对地聚物混凝土的影响	掺入再生砖细骨料对基体的强度产生负面影响, 但其表面粗糙会使基体抗拉强度增强。	[38]

5. 地质聚合物的微观结构分析

随着科技的发展, 可用于观测地质聚合物混凝土微观结构的手段逐渐增多, 例如扫描电子显微镜测试(SEM)、X 射线衍射测试(XRD)、能谱分析(EDS)等分析方式[39], 可以从不同角度对地质聚合物混凝土进行微观结构分析。如下表 4 所示。

Table 4. Microscopic analysis of geopolymers
表 4. 地质聚合物微观分析

设备名称	研究手段	代表性研究
扫描电子显微镜测试(SEM)	一种利用高能电子束与物质之间的相互作用以激发物理信息, 并收集信息进行再成像的微观研究手段。	黄华等[40]通过 SEM 测试, 得出地质聚合物混凝土的微观结构随龄期与凝胶含量的增加而变得更为致密。
X 射线衍射测试(XRD)	利用 X 射线通过受测试材料的原子相互作用并散射到不同方向上, 形成衍射图案	王婕等[41]通过 XRD 分析, 得出随着龄期的增长, 试件内部孔隙会被逐渐产生的水化硅酸钙凝胶所填补, 使后期的地质聚合物更加致密。
能谱分析(EDS)	利用 X 射线经过特定元素时会被吸收, 产生不同能量的 X 射线, 并生成能谱图, 可配合 SEM 使用。	张大旺等[42]通过 EDS 能谱分析的方式, 对地质聚合物进行微观结构分析, 得到随水玻璃掺量的增加, 颗粒间相互作用力显著降低, 结构变得更加致密。

6. 地质聚合物界面强化

对于地质聚合物混凝土, 一个重要的问题是理解地质聚合物凝胶材料与骨料之间的界面行为(包括化学和物理行为)。近年来, 已经进行了一些实验研究以表征地质聚合物混凝土中的界面微观结构和结合行为。Peng 等人[43]报告称, 在相同的抗压强度下, 地质聚合物混凝土显示出比普通硅酸盐水泥混凝土更高的抗拉强度, 这来源于地质聚合物凝胶材料与骨料界面更强的结合力。通过降低硅/铝比能促进界面强度。

7. 结论

地质聚合物混凝土的研究是非常有必要的。通过对地质聚合物机理、性能影响和微观分析的综述, 明确了秸秆灰具有火山灰效应而作为辅助胶凝前驱体和废砖再生骨料化学改性, 采取界面强化的方法, 进一步明确了废砖再生骨料与基体的粘结力, 对废砖再生骨料与秸秆灰之间的协同作用有更加客观的可行性认识。但同时也存在问题的改进。

(1) 开发高吸水性再生砖骨料与地聚物浆体协同的复合材料制备。再生砖骨料自身缺陷易导致地聚物浆体水胶比失衡和骨料-浆体界面缺陷增多, 是限制复合材料力学性能与耐久性提升的关键因素。目前单一改性手段难以实现骨料吸水特性调控与界面粘结性能优化, 未来可聚焦骨料改性与浆体适配的协

同作用机制, 研发适配高吸水再生砖骨料的复合表面改性技术, 提升制备工艺。

(2) 构建复合材料微观结构与宏观性能之间的关联。本文仅分析了材料微观结构与宏观性能的对立关系, 缺乏精准的量化表征手段。通过对骨料-浆体界面过渡区薄弱区域的研究, 系统分析界面过渡区孔隙分布、孔隙率、微裂纹等微观界面结构, 开展复合材料力学性能和耐久性等试验, 通过仿真模拟等方法, 建立起复合体系的“微观结构-宏观性能”的模型, 实现从微观结构调控到宏观性能精准优化的目标, 为秸秆灰与再生砖材料的地聚物工程应用、性能可控化设计提供理论依据与数据支撑。

参考文献

- [1] 王深, 吕连宏, 张保留, 等. 基于多目标模型的中国低成本碳达峰、碳中和路径[J]. 环境科学研究, 2021, 34(9): 2044-2055.
- [2] 刘琼, 肖建庄, 潘智生, 等. 废混凝土骨料和废砖骨料再生混凝土的模型化研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(12): 133-140.
- [3] 《“十四五”循环经济发展规划》发布[N]. 现代物流报, 2021-07-12(A03).
- [4] 王福成, 赵欣荣, 田家冰, 等. 水稻秸秆灰对混凝土抗压性能及微观结构的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(9): 2620-2630.
- [5] Davidovits, J. (1989) Geopolymers and Geopolymeric Materials. *Journal of Thermal Analysis*, **35**, 429-441. <https://doi.org/10.1007/bf01904446>
- [6] 黎洁, 谢贤, 李博琦, 等. 地质聚合物研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(6): 141-148.
- [7] 张鹏, 张顶飞, 吴庆东. 地质聚合物力学性能影响分析及应用前景探讨[J]. 中国陶瓷, 2023, 59(2): 37-46.
- [8] 岳子建, 徐金花. 地聚物混凝土的力学性能研究综述[J]. 四川建材, 2023, 49(2): 10-11.
- [9] Choi, S. and Lee, K.M. (2019) Influence of Na₂O Content and Ms (SiO₂/Na₂O) of Alkaline Activator on Workability and Setting of Alkali-Activated Slag Paste. *Materials*, **12**, Article 2072. <https://doi.org/10.3390/ma12132072>.
- [10] Ibrahim, M., Megat Johari, M.A., Maslehuiddin, M., Rahman, M.K., Salami, B.A. and Mohamed, H.D. (2019) Influence of Composition and Concentration of Alkaline Activator on the Properties of Natural-Pozzolan Based Green Concrete. *Construction and Building Materials*, **201**, 186-195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.117>
- [11] Jindal, B.B., Jangra, P. and Garg, A. (2020) Effects of Ultra Fine Slag as Mineral Admixture on the Compressive Strength, Water Absorption and Permeability of Rice Husk Ash Based Geopolymer Concrete. *Materials Today: Proceedings*, **32**, 871-877. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.219>
- [12] Shao, Q., Zheng, K., Zhou, X., Zhou, J. and Zeng, X. (2019) Enhancement of Nano-Alumina on Long-Term Strength of Portland Cement and the Relation to Its Influences on Compositional and Microstructural Aspects. *Cement and Concrete Composites*, **98**, 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.01.016>
- [13] Duna, L.L., Audrey, N.N.G., Tchamba, A.B., Billong, N., Kamseu, E., Qoku, E., et al. (2022) Engineering and Mineralogical Properties of Portland Cement Used for Building and Road Construction in Cameroon. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **15**, 821-834. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00055-9>
- [14] 马必聪, 梁健, 翁贻令. 生物质灰用作混凝土掺合料的研究综述[J]. 中外公路, 2024, 44(5): 97-107.
- [15] Hidalgo, S., Soriano, L., Monzó, J., Payá, J., Font, A. and Borrachero, M.V. (2021) Evaluation of Rice Straw Ash as a Pozzolan Addition in Cementitious Mixtures. *Applied Sciences*, **11**, Article 773. <https://doi.org/10.3390/app11020773>
- [16] Khan, K., Ishfaq, M., Amin, M.N., Shahzada, K., Wahab, N. and Faraz, M.I. (2022) Evaluation of Mechanical and Microstructural Properties and Global Warming Potential of Green Concrete with Wheat Straw Ash and Silica Fume. *Materials*, **15**, Article 3177. <https://doi.org/10.3390/ma15093177>
- [17] 许鹏, 许昌东, 王正君, 等. 生物质秸秆灰活性分析及对混凝土力学特性的影响[J]. 混凝土, 2020(3): 108-112+116.
- [18] Cao, F., Qiao, H., Li, Y., Shu, X. and Cui, L. (2022) Effect of Highland Barley Straw Ash Admixture on Properties and Microstructure of Concrete. *Construction and Building Materials*, **315**, Article 125802. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125802>
- [19] 张延年, 张祥坤, 顾晓薇, 等. 铁尾矿基多元矿物掺和料耦合水化机理分析[J]. 非金属矿, 2022, 45(3): 103-106.
- [20] 吕阳, 葛云露, 赵博宇, 等. 生物质灰对碱激发矿渣胶凝材料性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(4): 1288-1296.
- [21] Zhu, Z., Li, X., Liu, R., Wang, Z., Zhang, H., Zhao, D., et al. (2025) Workability and Environmental Evaluation of Using

- Sunflower Stalk Ash as an Alkali Activator with Blast Furnace Slag and Black Rice Hull Ash to Prepare Geopolymer Grouts. *Waste and Biomass Valorization*, **16**, 1609-1626. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02686-y>
- [22] Moraes, J.C.B., Moraes, M.J.B., Batista, J.P.B., Akasaki, J.L., Font, A., Tashima, M.M., *et al.* (2024) Influence of Sugar Cane Straw Ash in Metakaolin-Based Geopolymers. *Construction and Building Materials*, **444**, Article 137835. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137835>
- [23] 焦杨, 方祥位, 申春妮, 等. 砖混建筑垃圾资源化再生利用研究进展[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文), 1-14. <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20250414.1008.002>, 2025-04-14.
- [24] 马昆林, 莫文波, 莫建红, 等. 砖混再生细骨料再生砂浆性能及工程应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(8): 2073-2080.
- [25] İlcan, H., Demirbaş, A.O., Ulugöl, H. and Şahmaran, M. (2024) Low-Alkaline Activated Construction and Demolition Waste-Based Geopolymers. *Construction and Building Materials*, **411**, Article 134546. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134546>
- [26] 洪永鹏. 再生砖混粉体性能提升技术研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [27] 王小娟, 刘路, 贾昆程, 等. 陶粒泡沫混凝土的力学性能及吸能特性[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(1): 207-215.
- [28] 邱继生, 王建伟, 冯泽平, 等. 不同化学溶液下再生砖混骨料强化及微观机理研究[J]. 混凝土, 2025(5): 113-119.
- [29] He, Z., Shen, A., Wu, H., Wang, W., Wang, L., Yao, C., *et al.* (2021) Research Progress on Recycled Clay Brick Waste as an Alternative to Cement for Sustainable Construction Materials. *Construction and Building Materials*, **274**, Article 122113. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122113>
- [30] Migunthanna, J., Rajeev, P. and Sanjayan, J. (2022) Waste Clay Bricks as a Geopolymer Binder for Pavement Construction. *Sustainability*, **14**, Article 6456. <https://doi.org/10.3390/su14116456>
- [31] Dadsetan, S., Siad, H., Lachemi, M. and Sahmaran, M. (2019) Construction and Demolition Waste in Geopolymer Concrete Technology: A Review. *Magazine of Concrete Research*, **71**, 1232-1252. <https://doi.org/10.1680/jmacr.18.00307>
- [32] Ye, T., Xiao, J., Duan, Z. and Li, S. (2022) Geopolymers Made of Recycled Brick and Concrete Powder—A Critical Review. *Construction and Building Materials*, **330**, Article 127232. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127232>
- [33] Jiang, J., Zhou, W., Gao, Y., Wang, L., Wang, F., Chu, H., *et al.* (2019) Feasibility of Manufacturing Ultra-High Performance Cement-Based Composites (UHPCs) with Recycled Sand: A Preliminary Study. *Waste Management*, **83**, 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.005>
- [34] 郑居焕, 刘如月, 颜桂云, 等. 砖骨料地聚物再生混凝土力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(9): 234-240.
- [35] 彭万里. 再生骨料地聚物高性能混凝土制备及其关键性能研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2024.
- [36] 王怀亮, 欧睿. 高温前后再生砖骨料地聚物混凝土受压本构模型[J]. 复合材料学报, 2024, 41(6): 3143-3153.
- [37] Cheng, J., Shao, Z., Wang, Y., Wei, W. and Yuan, Y. (2023) The Current Status and Future of Solid Waste Recycled Building Bricks. *Environmental Science and Pollution Research*, **30**, 105119-105148. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29902-x>
- [38] Lyu, B.C., Guo, L.P., Fei, X.P., *et al.* (2023) Preparation and Properties of Green High Ductility Geopolymer Composites Incorporating Recycled Fine Brick Aggregate. *Cement and Concrete Composites*, **139**, Article 105054. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105054>
- [39] 张逸超, 杨昊霖, 吴晓鑫, 等. 地质聚合物混凝土力学性能、耐久性及微观结构综述[J]. 混凝土, 2024(11): 84-87+92.
- [40] 黄华, 郭梦雪, 张伟, 等. 粉煤灰-矿渣基地聚物混凝土力学性能与微观结构[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(3): 74-84.
- [41] 王婕. 地质聚合物透水混凝土的性能及微观结构研究[D]: [硕士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2022.
- [42] 张大旺. 地质聚合物新拌浆体流变性、微结构与界面研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2020.
- [43] Peng, H., Cui, C., Cai, C.S., Liu, Y. and Liu, Z. (2019) Microstructure and Microhardness Property of the Interface between a Metakaolin/GGBFS-Based Geopolymer Paste and Granite Aggregate. *Construction and Building Materials*, **221**, 263-273. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.090>