

多源固废基地质聚合物制备研究进展

李伟璋¹, 刘 栋², 赵友杰², 赵长霞³, 高伟杰³, 孙英杰¹, 陈英达¹, 徐伟宸¹, 李卫华^{1*}, 张庆建¹, 卞荣星¹

(1. 青岛理工大学环境与市政工程学院, 青岛市固体废物污染控制与资源化工程研究中心, 山东 青岛 266520; 2. 青岛西海岸康恒环保能源有限公司, 山东 青岛 266500; 3. 青岛市固体废物处置有限责任公司, 山东 青岛 266300)

摘要: 系统阐述了固废基地质聚合物的反应机理, 探讨了激发剂种类及其作用原理、不同类型固废基地质聚合物(粉煤灰、赤泥、垃圾焚烧飞灰、高炉矿渣等)的力学特性及重金属固化情况, 并对现存问题和未来发展方向进行了总结与展望, 旨在为进一步充实多源固废基地质聚合物胶凝材料理论, 助力大宗固废协同资源化利用提供一定的理论参考。

关键词: 地质聚合物; 固废资源化; 碱激发; 力学性能; 重金属固化

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)05-0048-07

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.05.009

Research progress on preparation of multi-source solid waste based geopolymers

LI Yi-zhang¹, LIU Dong², ZHAO You-jie², ZHAO Chang-xia³, GAO Wei-jie³, SUN Ying-jie¹, CHEN Ying-da¹, XU Wei-chen¹, LI Wei-hua^{1*}, ZHANG Qing-jian¹, BIAN Rong-xing¹

(1. Qingdao Solid Waste Pollution Control and Resource Engineering Research Center, School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China; 2. Qingdao West Coast SUS Renewable Energy Co., Ltd., Qingdao 266500, China; 3. Qingdao Solid Waste Disposal Co., Ltd., Qingdao 266300, China)

Abstract: This review systematically elaborates on the reaction mechanism of solid waste based geopolymers, explores the types and principles of activators, the mechanical properties and heavy metal solidification of different types of solid waste base polymers (e. g., fly ash, red mud, MSW incineration fly ash, blast furnace slag), and comprehensively summarizes and prospects their existing problems and future development directions. The aim is to provide a theoretical reference for further enriching the current theory of multi-source solid waste base geopolymer cementitious materials and assisting in the collaborative resource utilization of bulk solid waste.

Key words: geopolymer; solid waste resource utilization; alkaline stimulation; mechanical properties; solidification of heavy metals

工业固废的规模化处置与资源化利用是 21 世纪全球可持续发展的重大挑战之一。截至 2023 年, 我国工业固废年产生量已达 42.7 亿 t^[1]。建材化利用是长期以来规模化消纳固体废物的主要路径, 其中多源固废作为水泥熟料替代品的资源化利用途径有效解决了传统水泥行业因煅烧而产生大量碳排放的问题^[2]。

地质聚合物(简称“地聚物”)由法国化学家 Joseph Davidovits 于 1978 年首次提出^[3], 是通过碱激发硅铝质原料(如偏高岭土、粉煤灰、矿渣、赤泥等)发生解聚-缩聚反应, 形成的以—Si—O—Al—O—为主链的三维网状无机聚合物, 具有良好的力学性能。

基于此, 本文中就多源固废基地质聚合物的制备为

关注点, 详细阐述了地聚物的定义、组成要素及反应机理; 深入剖析了常见的固废基地质聚合物种类, 如粉煤灰基、赤泥基、钢渣基等; 着重探讨了地聚物的力学性能及其影响因素; 评估了地聚物对重金属污染物的固化效能, 重点总结了当前研究存在的问题并对未来研究方向进行了展望, 旨在为进一步充实当前多源固废基地质聚合物胶凝材料的制备理论, 助力大宗固废协同资源化利用提供了一定的理论参考。

1 制备地聚物的反应机理

地聚物的形成是一个复杂的多阶段过程, 主要包括铝硅酸盐矿物粉体原料在溶液中的溶解、铝硅配合物的扩散、凝胶相的形成以及最终的聚合和硬化。

收稿日期: 2025-07-15; 修回日期: 2026-03-13

基金项目: 青岛市科技惠民示范专项项目(24-1-8-cspz-10-nsh); 国家自然科学基金项目(52370139); 山东省高等学校“青创团队计划”项目(2023KJ117)

作者简介: 李伟璋(1997-), 男, 硕士生; 李卫华(1989-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为固体废物污染控制与资源化研究, 通讯联系人, liweihua@qut.edu.cn。

以碱激发为例,在溶解阶段,碱性激发剂促使铝硅酸盐矿物中的硅氧键和铝氧键断裂。在强碱性环境下,硅铝矿物和硅酸盐会发生一系列溶解反应,这些反应使硅铝组分溶解进入溶液,产生硅酸根离子(SiO_4^{4-})和铝酸根离子(AlO_4^{5-})等单体。Davidovits^[3]认为,硅铝酸盐矿物的溶解是聚合反应的起始步骤,其溶解程度直接影响后续反应进程及产物性能。图1展示了不同硅铝比的硅铝酸盐结构类型及其对应的链式结构^[4]。

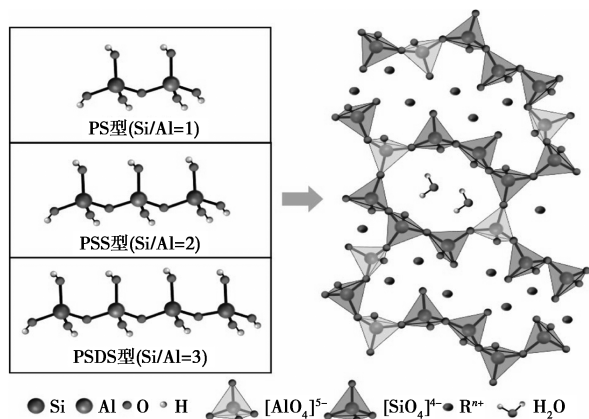


图1 地聚物结构单元

溶解后的铝硅配合物在溶液中具有较高活性,能够在颗粒间隙扩散,为后续聚合反应创造条件。随着反应进行,硅酸根离子和铝酸根离子之间发生聚合反应,通过共享氧原子,逐步构建起硅氧四面体和铝氧四面体交替连接的三维网络结构,即地聚物凝胶相^[5](图2),其具有早强快硬、固化重金属能力强、耐腐蚀、耐久性高、耐火耐高温等优异的性能。

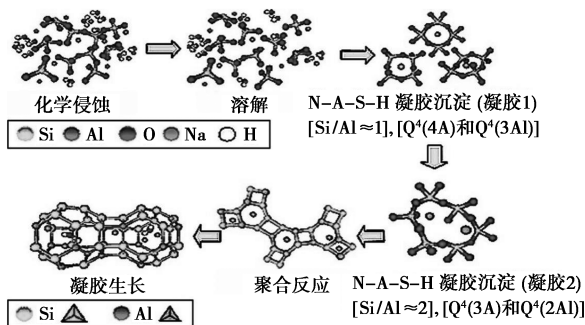


图2 地聚物反应机理

2 地聚物制备前驱体活性激活

激发剂在地聚合反应中类似催化剂的作用,能够溶解铝硅酸盐矿物,促使硅氧键、铝氧键断裂,进而使生成的硅、铝酸根离子发生聚合反应。如今常用的激发剂基本可分为以下3类:碱激发剂、酸激发

剂以及盐类激发剂。

2.1 碱激发剂活化

碱激发剂是制备地聚物的关键材料之一,在地聚合反应中起着至关重要的作用。常见的碱激发剂包括NaOH、水玻璃等。

在地聚物反应中NaOH在水中能够完全电离,提供大量的氢氧根离子(OH^-),使体系的碱性增强,从而促进铝硅酸盐矿物的溶解。NaOH的浓度对地聚物的抗压强度有显著影响,当NaOH浓度较低时,不足以充分激发前驱体中的活性成分,导致聚合反应不完全,地聚物的抗压强度较低;随着NaOH浓度的增加,前驱体中的硅铝成分逐渐溶解,聚合反应更加充分,抗压强度逐渐提高。然而,当NaOH浓度过高时,会使反应体系的碱性过强,胶凝材料凝结时间加快,使得前驱体反应不完全,抗压强度反而下降^[6]。

水玻璃模数 $n(\text{SiO}_2)/n(\text{Na}_2\text{O})$ 对地聚合反应和地聚物性能影响显著,影响着溶液中硅酸根离子的聚合程度和碱性强弱^[7]。较低模数的水玻璃,其溶液中 Na_2O 含量相对较高,碱性较强,能够快速激发铝硅酸盐矿物的溶解,但可能导致凝胶相形成过快,不利于体系的均匀性和后期强度发展;较高模数的水玻璃, SiO_2 含量较高,能为聚合反应提供更多的硅源,有助于形成更致密的网络结构,提高地聚物的强度和耐久性,但过高的模数可能会使水玻璃的溶解性变差,影响激发效果。当激发剂模数增大时, OH^- 含量减少,无法提供足够的强碱性环境,导致前驱体中的Si—O、Al—O键难以断裂,溶解产物减少。少量的溶解产物形成带有羟基的胶凝体后,也很难发生缩聚反应,生成高强度的N—A—S—H大分子聚合结构较少,从而使试件强度较低。而当 OH^- 浓度增大,水玻璃模数降低,虽然硅酸钠的黏结性能下降,但此时地聚物强度依靠其强碱性环境实现前驱体共价键的断裂和重组,碱性浓度越高,组成的地聚物的有序程度越好,强度也就越高^[8]。

目前国内外使用的碱激发剂一般为NaOH与水玻璃共同制备而成,经过计算后向水玻璃中加入不同质量的NaOH,即可得到实验所需模数的水玻璃。但是由于碱激发剂的使用,导致地聚物的制备成本增加,而许多固体废物本身就具有很强的碱性,可以利用其水洗上清液来替代地聚物的激发剂^[9],不仅大大减少了制备成本,还使固废得到了更深层次的利用。

2.2 酸激发剂活化

酸激发剂主要包括 H_2SO_4 、 H_3PO_4 等。酸激发剂的作用原理与碱激发剂不同,是通过提供质子 (H^+) 来促进铝硅酸盐矿物的溶解和聚合反应。

铝硅酸盐前驱体也可以被 H_3PO_4 激活, Wang 等^[10] 研究发现,高钙粉煤灰中的活性钙源可引发酸碱或水解反应。该反应生成的 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 化合物,如透钙磷石和磷酸氢钙,加速了地聚物的凝结和早期强度发展。Louati 等^[11] 认为,以偏高岭土为前驱体的酸基地聚合反应包括 3 个步骤:偏高岭土的脱铝反应;四面体单元与脱铝后的硅氧层反应形成无定形的 Si—O—P—O 结构;四面体单元与浸出的铝反应生成结晶态的 AlPO_4 无定形相的缩聚反应。最终产物是由结晶态 AlPO_4 和无定形 Si—O—P—O 结构组成的地聚物复合材料。

酸激发剂在地聚物反应中具有独特的性能和潜力,但与碱激发剂存在类似的强腐蚀性问题,在制备和使用过程中需要特殊的防护措施,不仅增加了操作的复杂性,还提高了成本。

2.3 盐类激发剂活化

盐类激发剂相较于碱激发剂、酸激发剂,对地聚物前驱体的活化与利用的研究较少。一般认为盐类激发剂通过以下 2 种途径来激发材料活性:一种是盐类水解会产生 OH^- 与金属阳离子,水解产生的 OH^- 破坏前驱体中原有的结构,促使 Si—O 键、 Al—O 键断裂,发生解聚;另外一种则是在盐类激发剂本身的重金属离子与酸根离子的作用下,促进反应进行^[12]。

庞超明等^[13] 以水泥熟料、钢渣、水淬高炉渣以及硬石膏为原料,硫酸钠、三乙醇胺和丙烯酸共聚乳液为激发剂,制备胶凝材料,28 d 抗折、抗压强度分别可达到 10.18、43.5 MPa。 Na_2SO_4 溶于水后,与水泥水化后的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 作用,生成了 NaOH 和 CaSO_4 ,对胶凝体系起到硫酸盐激发与碱激发的双重作用,提高试件的强度;丙烯酸共聚乳液的掺入,起到了明显的减水和引气作用,大量减少了试件内部的裂缝;三乙醇胺的加入,在不改变胶凝材料水化产物的同时,加速水化。实验所得试件抗折、抗压强度,脆度系数,干缩率和耐磨性均优于 32.5# 水泥。Nikolov 等^[14] 在天然沸石基地聚物中引入铝酸盐 (NaAlO_2) 激发剂,研究表明,使用铝酸盐溶液作为激发剂时,地聚物的收缩率仅为 2.84%~3.34%,远低于以硅酸盐为激发剂的 7.22%~14.29%。XRD 分析显示,铝酸盐激发体系中生成了新的沸石相,这

些矿物的形成与铝酸盐提供的铝源有关,同时降低了整个体系中的硅铝比,优化了凝胶结构。

相较于起步较早、技术相对成熟的碱激发来说,盐激发可以避免碱集料反应以及试件“泛碱”的问题;酸激发一般也存在激发剂的制备需严格控制酸浓度与用水量的问题;而且酸、碱 2 类激发剂在使用时存在安全隐患。

2.4 机械活化

提高前驱体的活性,除了药剂活化外还可通过机械化学球磨来提高前驱体的活性。一般来说,原料的机械活化导致了粒度的减小和比表面积的增加,允许颗粒在碱性介质中的更高溶解速率,从而促进地质聚合过程。

Nath 等^[15] 将粉煤灰球磨磨细,来研究不同细度对其物理、力学和微观结构性能的影响。在球磨初期,颗粒尺寸显著减小,30 min 时 D_{50} 降至初始的一半,物理和力学性能明显提升。研究表明随着粉煤灰颗粒细化,能生成更多碱性铝硅酸盐 (N—A—S—H) 凝胶,填充孔隙,提高材料致密度,增强力学性能。Hounsi 等^[16] 对高岭土以 250 r/min、球料比 1.56 进行球磨 1 h 后,高岭土的 D_{90} 从 31.49 μm 降低至 24.04 μm ,比表面积由 12.10 m^2/g 增加到 17.97 m^2/g 。经机械活化的高岭土地聚物在 40、100℃ 固化温度下的 28 d 抗压强度分别提升 51%、86%。

目前研究表明,对前驱体先进行球磨预处理后,再以激发剂来进一步激发活性,会使得地聚物的抗压、抗折强度进一步提升。

3 固废基地聚物重金属污染物的固化

从固废资源化利用角度,固废中的重金属 (Cu 、 Cr 、 Zn 、 Pb 等) 是关注度最高的污染物。因此以多源固废为地聚物前驱体时,不仅要关注其力学性能,还应关注其污染物的浸出,表 1 展示了部分引文中,地聚物掺入危险废物—垃圾焚烧飞灰后的重金属污染物的浸出情况。

表 1 常见固废基地聚物强度及重金属固化效果对比

| 原材料 | 配比 | 抗压强度/ MPa | 重金属浸出浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) | | | |
|-----------------|-----|--------------|---|------|------|------|
| | | | Pb | Zn | Cu | Cr |
| 飞灰-偏高岭土 | 3:7 | 36.6 | N. D. | 0.15 | 0.20 | 0.07 |
| 微波水热飞灰- 偏高岭土 | 5:5 | 38.1 | N. D. | 0.48 | 0.09 | 0.11 |
| 飞灰-偏高岭土 | 4:6 | 41.3 | 0.01 | 0.01 | 0.11 | 0.29 |

一般认为,地聚物固化重金属的机制包括物理封装和化学作用。化学作用主要为形成不溶性化合物、离子交换与静电平衡、形成共价键等机制。Cao等^[17]研究表明,重金属固化机制的差异会导致其在面对侵蚀时表现各异。如Pb可通过取代 Na^+ 平衡 $[\text{AlO}_4]^-$ 的负电荷或嵌入结构固化;Cu通过形成Cu—O—Si共价键固化;Zn难以通过共价键嵌入结构,主要依靠静电平衡。 H_2SO_4 侵蚀会破坏 $[\text{AlO}_4]^-$ 结构,导致Zn和Pb的浸出浓度显著增加,Cu和Cr的浸出浓度变化较小。在 H_2SO_4 的侵蚀下Zn的浸出浓度大幅上升,固化效率仅9.7%,而Cu和Cr的固化效率仍超70%。因此,在酸雨等酸性环境地区,使用高Zn含量固废制备地聚物时需谨慎。Yang等^[18]的实验也证实了地聚物对重金属和氯有良好的固化效果,重金属离子会与地聚物凝胶相中的活性位点发生化学反应,形成稳定的化学键,同时被包裹在凝胶的孔隙结构中,降低了重金属在环境中的迁移性和生物可利用性。飞灰中的氯离子可通过与钙、铝反应形成Friedel's盐,与重金属一起被具有致密硅铝四面体框架的地聚物包裹,实现了重金属和氯离子的固化/稳定化。地聚物能够有效固化重金属,降低其浸出风险,还因为地聚物的网络结构为环状分子链构成的“类晶体”结构可以物理包裹重金属离子,同时地聚物中的活性成分与重金属发生化学反应,形成稳定的化合物,从而实现重金属的固化^[7]。

4 多源固废基地聚物类别

固体废物成分复杂,杂质较多,且大多数情况下,由于不同的生产工艺或产地的不同,也会导致同种固废成分的差异性。表2对目前常见的固废基地聚物前驱体的成分进行了整理,可以看出,同种固废的成分组成有很大区别。

表2 常见固废基地聚物前驱体化学成分(质量分数)%

| 氧化物 | 粉煤灰 | 赤泥 | 垃圾焚烧飞灰 | 高炉矿渣 |
|-------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| SiO_2 | 38.3~61.08 | 16.93~34.50 | 3.17~20.48 | 26.75~37.21 |
| Al_2O_3 | 22.48~52.2 | 10.16~27.60 | 0.63~10.16 | 13.03~19.66 |
| CaO | 0.32~9.36 | 3.75~27.44 | 27.44~53.90 | 36.54~43.67 |
| MgO | 0.1~5.41 | 0.12~1.00 | 2.98~4.70 | 2.84~11.10 |
| Fe_2O_3 | 1.9~13.27 | 4.25~44.49 | 0.30~4.25 | 0.32~3.75 |
| SO_3 | 0.21~0.67 | 0.45~1.01 | 2.11~6.02 | 0.24~1.64 |
| Na_2O | 0.1~1.94 | 3.15~15.60 | 3.15~15.40 | 0.29~0.96 |
| K_2O | 0.4~1.73 | 0.43~1.19 | 2.17~9.40 | 0.29~0.61 |
| TiO_2 | 1.16~2.86 | 2.92~5.70 | 0.12~0.42 | 0.94~2.94 |
| Cl | — | — | 5.77~24.00 | — |

4.1 粉煤灰基地聚物

粉煤灰是火力发电过程中产生的固体废弃物,主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 。由于富含硅铝成分,具备潜在的火山灰活性,同时粉煤灰在制备混凝土时,可以起到密实填充的效果^[15],改善工作性能的同时降低成本,故而成为制备地聚物的常用原料之一。

在制备粉煤灰基地聚物时,可以通过引入钙基组分的方式来优化地聚物的性能,这是由于钙基组分的加入,促进了体系中C—S—H和C—A—S—H的形成^[19]。彭玉清等^[20]在制备粉煤灰-矿渣基地聚物时发现,当碱激发剂浓度为7%时各龄期的地聚物抗压强度达到最大值,且随着矿渣取代率增加,粉煤灰地聚物砂浆凝结时间缩短,早期抗压强度从5.1 MPa增至31.93 MPa,这是因为矿渣活性高,反应放热促使地聚合过程加快,且其CaO含量高,能在前期生成更多的C—S—H和C—A—S—H凝胶。CaO有利于钙矾石生成,使早期强度提高,但地聚物的强度来源主要为通过激活硅铝酸盐原料(如高岭土、粉煤灰)形成的三维网状凝胶结构(如N—A—S—H或K—A—S—H),提供骨架支撑;前驱体中CaO含量过高会导致反应产物以C—S—H为主,后期强度下降^[21]。

由于粉煤灰活性组分含量的差异性,导致试件强度的变化规律、影响因素有所不同,这为粉煤灰制备地聚物以及激发机理的研究带来不小的困难。

4.2 赤泥基地聚物

赤泥是氧化铝生产过程中产生的固废,主要成分包括 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 SiO_2 等,由于高含量的 Fe_2O_3 外观表现为红色或红褐色,同时还含有少量的重金属元素如钒、钛等。

有研究表明^[22],仅依靠赤泥自身进行水化无法产生胶凝特性,赤泥基地聚物的制备需要耦合其他前驱体。Han等^[23]将垃圾焚烧飞灰、粉煤灰和偏高岭土与赤泥结合,制备地聚物复合材料,该材料能有效固化飞灰中的重金属。高梦实^[24]以粉煤灰、赤泥、矿渣为前驱体制备地聚物时发现,粉煤灰掺量越高,浆体流动度越好,赤泥的掺入会延长浆体的初终凝时间,矿渣则会促进N—A—S—H凝胶向C—A—S—H凝胶的转化,从而提高抗压强度和抗渗水性。

目前相关研究者开展了大量的基本力学性能试验与理论分析工作,探讨了不同参数对赤泥基地聚物的基本力学性能的影响规律,但是并没有统一的标准来解释不同因素对赤泥基地聚物的影响规律,也没有公认、严谨的配比设计方法,这些都是赤泥基

地聚物进行规模化、产业化生产的限制因素。

4.3 飞灰基地聚物

垃圾焚烧飞灰(简称“飞灰”)是生活垃圾焚烧过程中产生的固体废物,因为飞灰具备 SiO_2 、 Al_2O_3 等制备地聚物的物质条件,越来越多的研究人员以飞灰作为前驱体,进行飞灰资源化利用,但由于其危废属性与低活性的特点,制备地聚物时通常需要进行预处理以及耦合其他高活性前驱体来共制备。

袁正璞等^[25]以偏高岭土和飞灰为原料制备地聚物。同一飞灰掺量下,固化体抗压强度随着碱激发剂添加量的增加而增加,而飞灰掺量的增加会降低固化体抗压强度。当飞灰掺量 90%,碱掺量不小于 7%时,固化体抗压强度可达 10 MPa 以上。同时,地聚物材料对重金属有良好的固化效果,试件中 Pb、Cd 的水浸、无机酸浸、有机酸浸出浓度均满足进入生活垃圾填埋场标准要求。Ye 等^[26]以飞灰与碱热活化赤泥为原材料制备地聚物,综合考虑固化体早期和长期抗压强度后,明确飞灰掺量为 50%,地聚物 7 d 抗压强度为 3.5 MPa。虽然强度较低,但满足填埋标准,英国垃圾填埋场的验收标准要求固化 28 d 后的最低抗压强度 1 MPa,而且赤泥、飞灰(危险废物)作为大宗固(危)废,经过共处置后可以较好地固化重金属,也不失为一种新的消纳途径。Yang 等^[18]通过微波水热的方式对飞灰进行了预处理,制备的地聚物性能提升的同时,重金属浸出浓度也大幅下降。

随着飞灰的掺加,固废基地聚物的机械强度普遍下降,由于飞灰塑限指数较高,具有很强的吸水性,且体积膨胀率大,也会对强度产生不良影响,进一步加大了飞灰实现高掺量目标的难度。但地聚物对重金属、氯盐具有良好的固化效果,为飞灰的无害化处理处置开辟了新道路。

4.4 矿渣基地聚物

粒化高炉矿渣是冶炼生铁时从高炉中排出的废渣,经过高温烧制而成,主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 和 MgO ,在碱激发常温条件下即可具备较高机械性能,目前已成为制备胶凝材料的主要原料之一。

毕广泽等^[27]研究发现高温养护条件对材料早期强度有显著增强作用,60℃高温加速水化速率的同时,孔隙结构更加密实。然而,随着养护龄期延长,高温对地聚物强度的优化作用逐渐减弱。这是因为高温加速了早期的反应,使凝胶生成量增加,但后期可能导致反应过度,影响了结构的稳定性。适宜湿度(70%)促进水化的同时抑制碱析出,激发效

果提升,缩聚反应充分进行,进而增加了凝胶含量,结构密实度提高,大孔占比减少至 13%,28 d 强度可达 60 MPa。湿度过高易导致激发剂析出与孔隙结构退化,削弱材料的力学性能与耐久性;湿度过低则加剧地聚物的干燥收缩,诱发裂缝形成,严重阻碍强度发展。刘俊芳等^[28]研究了矿渣复合物固化/稳定化 Pb 污染沙土的特性,发现掺入矿渣后相比水泥基及其他分组,对 Pb 的固化/稳定化效果更好。在污染程度较高情况下,随着养护龄期增长和地聚物替代比例升高,Pb 的浸出浓度降低,在掺量达到 80%时最低,稳定率显著提高。这主要是因为矿渣中活性 Si、Al 在 NaOH 的激发下,缩聚生成三维网状结构,产生 C—A—S—H 凝胶,将 Pb^{2+} 键合到 $[\text{AlO}_4]$ 单元上,同时水泥水化反应生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与矿渣中的 Al_2O_3 反应生成钙矾石,共同作用使重金属稳定在网状凝胶中。

目前矿渣的资源化利用已相对成熟,矿渣作为硅铝质原料用来制备地聚物,既能提供足量的硅铝来进行地聚合反应,同时较高的钙基组分对地聚物的制备也起到了正向的作用。

4.5 其他固废基地聚物

除了上述几种常见的固废基地聚物,还有许多其他类型的固废(如稻壳灰、煤矸石等),在地聚物的制备过程中展现出了优异的性能和应用潜力。

Liang 等^[29]研究了稻壳灰掺量对偏高岭土地聚物性能的影响。结果表明,稻壳灰中的铝硅酸盐成分参与地聚合反应,促进凝胶形成,同时其微颗粒的填充作用细化了地聚物的孔隙结构,提升了材料的热稳定性和抗压强度。郭凌志等^[30]以煤矸石、粉煤灰等为原材料制备煤基固废地聚物注浆材料,该材料析水率、流动性、凝结时间和抗压强度均满足要求。煤基地聚物试件的孔隙率远小于水灰比为 0.6 和 0.8 的水泥基注浆材料,小于 1 μm 的孔径占比在 75%左右,孔径分布良好,具有很好的抗渗性。这得益于原状煤矸石粉、粉煤灰等复掺使主体胶凝材料的颗粒级配更合理,密实度提高,且不同活性的煤基固废发生聚合反应的时间不同,细化了结石体的孔隙结构。

在合适的条件下,开展多种固废协同利用处置,利用固废原材料之间存在互补性,能够大量消纳固体废物,有效缓解大宗废物污染问题,“全固废”基地聚物拥有更加广阔的前景。不过,这类全固废工艺对具体原料成分的依赖程度较高。当下,固废前驱体成分及地聚物工艺机理的复杂性,使得这项技

术难以广泛应用。

5 存在的问题

尽管多源固废地质聚合物的研究取得了显著进展,但仍面临诸多问题。

5.1 不同类型固废成分复杂且波动大,导致地聚物性能不稳定

固废地质聚合物的性能高度依赖于前驱体中的硅铝含量,但工业固废(如粉煤灰、赤泥、高炉矿渣等)的成分因来源、生产工艺及地域差异存在显著波动。这种成分波动直接影响地聚物的硅铝比和反应活性,进而导致力学性能(如抗压强度)和耐久性的不稳定。

5.2 有害物质(氯盐、硫酸盐)引发二次污染风险

部分固废(如垃圾焚烧飞灰)富含 Cl^- (5.77%~24.00%) 和 SO_3 (2.11%~6.02%), 这些物质在地聚物制备和使用过程中可能迁移至环境,造成二次污染。尽管通过一系列预处理手段可降低飞灰中 Cl^- 含量,但能耗较高,且对硫酸盐的去除效果有限。

5.3 制备成本较高,制约规模化应用

固废地质聚合物的成本主要集中于激发剂和预处理环节。虽然利用固废自身碱性(如电石渣上清液)可部分替代激发剂,但成分波动可能影响反应的效率。此外,预处理技术(如球磨、微波水热)需额外能耗。相比之下,传统水泥生产工艺成熟,地聚物在短期内难以拥有成本优势。

6 结论与展望

固废地质聚合物作为一种新型低碳胶凝材料,为解决大宗固废规模化处置与资源化利用提供了重要技术路径。多源固废地质聚合物不仅能够高效消纳粉煤灰、赤泥、高炉矿渣等大宗固废,还具备早强快硬、重金属固化效果优良等优势,在建材、道路工程、污染修复等领域拥有广阔的应用前景。然而,固废地质聚合物想实现大规模推广应用仍有诸多制约,未来研究可聚焦以下方向:①深化多固废协同机理研究,构建“成分-工艺-性能”智能优化平台;②开发绿色低碳激发体系与预处理技术,突破成本瓶颈;③建立涵盖多场景、长周期的耐久性与环境安全数据库;④推动政策引导与产学研合作,加速标准制定与产业化进程。通过技术创新与体系完善,多源固废地质聚合物有望成为“双碳”目标下固废资源化与低碳建材发展的核心驱动力,助力生态文明建设与循环经济模式构建。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴 2024[M].北京:中国统计出版社,2024.
- [2] 吴奇,刘晶晶,李倦生,等.固体废弃物在水泥行业中的应用进展[J].现代化工,2015,35(1):44-47.
- [3] Davidovits J.Geopolymers and geopolymeric materials[J].Journal of Thermal Analysis,1989,35(2):429-441.
- [4] Huang M,Bao S,Zhang Y, et al.The combined effects of calcium oxide and phosphate on burnt coal cinder-based cementitious materials[J].Construction and Building Materials,2023,362:129720.
- [5] Parathi S,Nagarajan P,Pallikkara S A.Ecofriendly geopolymer concrete:A comprehensive review[J].Clean Technologies and Environmental Policy,2021,23(6):1701-1713.
- [6] 李树峰,邓凯,阎胜利,等.多元固废地聚物干粉砂浆制备与性能研究[J].建筑技术,2025,56(1):117-121.
- [7] 金漫彤.地质聚合物固化生活垃圾焚烧飞灰中重金属的研究[D].南京:南京理工大学,2011.
- [8] 陈治坤,崔潮,赵建伟,等.激发剂模数及活性对偏高岭土基地聚物强度的影响研究[J].公路与汽运,2016,(6):76-79.
- [9] Bai Y,Guo W,Wang X, et al.Utilization of municipal solid waste incineration fly ash with red mud-carbide slag for eco-friendly geopolymer preparation[J].Journal of Cleaner Production,2022,340:130820.
- [10] Wang Y S,Arefaei Y,Dai J G.Influence of coal fly ash on the early performance enhancement and formation mechanisms of silico-aluminophosphate geopolymer[J].Cement and Concrete Research,2020,127:105932.
- [11] Louati S,Baklouti S,Samet B.Acid based geopolymerization kinetics:Effect of clay particle size[J].Applied Clay Science,2016,132:571-578.
- [12] 王磊,李金丞,张晓伟,等.地质聚合物激发剂及其激发原理[J].无机盐工业,2022,54(2):16-20.
- [13] 庞超明,秦鸿根,章春梅,等.激发剂对掺工业废渣胶凝材料路用性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2005,(3):11-13,34.
- [14] Nikolov A,Nugteren H,Rostovsky I.Optimization of geopolymers based on natural zeolite clinoptilolite by calcination and use of aluminate activators[J].Construction and Building Materials,2020,243:118257.
- [15] Nath S K,Kumar S.Role of particle fineness on engineering properties and microstructure of fly ash derived geopolymer[J].Construction and Building Materials,2020,233:117294.
- [16] Hounsi A D,Lecomte-Nana G L,Djéféli G, et al.Kaolin-based geopolymers:Effect of mechanical activation and curing process[J].Construction and Building Materials,2013,42:105-113.
- [17] Cao X,Yang W,Liu S, et al.Durability of calcium-rich municipal solid waste incineration fly ash-based geopolymer to sulfate and sulfuric acid[J].Construction and Building Materials,2023,405:133389.
- [18] Yang W,Cao X,Zhang Q, et al.Coupled microwave hydrothermal dechlorination and geopolymer preparation for the solidification/stabilization of heavy metals and chlorine in municipal solid waste incineration fly ash[J].Science of the Total Environment,2022,853:158563.
- [19] Temuujin J,van Riessen A,Williams R.Influence of calcium com-

- pounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 167(1/2/3): 82-88.
- [20] 彭玉清, 郭荣鑫, 林志伟, 等. 粉煤灰-矿渣地质聚合物砂浆凝结时间及力学性能试验研究[J]. *新型建筑材料*, 2021, 48(12): 138-144.
- [21] Chen X, Zhang J, Lu M, *et al.* Study on the effect of calcium and sulfur content on the properties of fly ash based geopolymer [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 314: 125650.
- [22] 宋丽娜. 陈化拜耳法赤泥基地聚合材料的制备与水化机理研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.
- [23] Han X, Zhang P, Zheng Y, *et al.* Utilization of municipal solid waste incineration fly ash with coal fly ash/metakaolin for geopolymer composites preparation [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 403: 133060.
- [24] 高梦实. 活化赤泥制备地聚物的力学和工作性能及微观机理研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2024.
- [25] 袁正璞, 李新颖, 陈泉源, 等. 垃圾焚烧飞灰合成地聚物及重金属稳定化效果[J]. *环境工程*, 2012, 30(6): 91-94.
- [26] Ye N, Chen Y, Yang J, *et al.* Co-disposal of MSWI fly ash and Bayer red mud using an one-part geopolymeric system [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 318: 70-78.
- [27] 毕广泽, 王伯昕, 郭嘉欢, 等. 偏高岭土-矿渣地聚物水化过程中的环境敏感性[J/OL]. *复合材料学报*, 1-10. [2025-07-15]. 10.13801/j.cnki.fhclxb.20250102.007.
- [28] 刘俊芳, 张天然, 刘霖, 等. 矿渣复合物固化/稳定化铅污染沙土特性[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(28): 12287-12295.
- [29] Liang G, Zhu H, Zhang Z, *et al.* Effect of rice husk ash addition on the compressive strength and thermal stability of metakaolin based geopolymer [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 222: 872-881.
- [30] 郭凌志, 周梅, 王丽娟, 等. 煤基固废地聚物注浆材料的制备及性能[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(10): 1092-1100. ■

(上接第 42 页)

- [23] Tariq M, Wang J, Sehar S, *et al.* Organics and nutrient transformation in a Microbial Fuel Cell influenced by antibiotics [J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2023, 51(6): 2200299.
- [24] Cui Q T, Fan M K, Liu X Y, *et al.* Activation ability of Yellow River (Huanghe) suspended sediment to degrade carbamazepine pollutants in water environment using peroxymonosulfate: Performance, mechanism, and potential toxicity evaluation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 337: 126422.
- [25] Lin W, Chen R L, Gong C X, *et al.* Sustained oxidation of Tea-Fe (III)/H₂O₂ simultaneously achieves sludge reduction and carbamazepine removal: The crucial role of EPS regulation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 470: 134182.
- [26] Bogusz A, Tomczyk B, Trzcńska M, *et al.* Effect of zeolites on the reduction of the ecotoxicity of carbamazepine in the environment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2024, 277: 116320.
- [27] Yao M C, Duan L, Wei J, *et al.* Carbamazepine removal from wastewater and the degradation mechanism in a submerged forward osmotic membrane bioreactor [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 314: 123732.
- [28] Rahman K O, Aziz K H H. Utilizing scrap printed circuit boards to fabricate efficient Fenton-like catalysts for the removal of pharmaceutical diclofenac and ibuprofen from water [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(6): 109015. ■

(上接第 47 页)

- [18] Zhang S, Xie X, Xie R, *et al.* Preparation and interface state of phosphate tailing-based geopolymers [J]. *Journal of Central South University*, 2024, 31(6): 1900-1914.
- [19] Zhou K, Zhou Q, Gong K, *et al.* Waste-to-resource strategy to fabricate environmentally benign flame retardants from waste phosphorus tailings [J]. *Composites Communications*, 2020, 19: 173-176.
- [20] Zheng Y, Wan Y, Zhang Y, *et al.* Recovery of phosphorus from wastewater: A review based on current phosphorus removal technologies [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2022, 53(11): 1148-1172.
- [21] 成倩兰, 张豪, 刘雁, 等. 焙烧磷尾矿处理含磷废水的研究[J]. *武汉工程大学学报*, 2021, 43(5): 496-499.
- [22] Meng W, Ma Z, Shu J, *et al.* Efficient adsorption of methylene blue from aqueous solution by hydrothermal chemical modification phosphorus ore flotation tailings [J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 281: 119496.
- [23] Wu S, Liu Y, Shang L, *et al.* Recycling of phosphate tailings for an efficient hydroxyapatite-based adsorbent to immobilize heavy metal cations [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30: 72160-72170.
- [24] 吴珊珊, 刘意章, 周旺旺, 等. 磷尾矿钝化材料研制及其对土壤重金属的修复机制[J]. *矿物学报*, 2024, 44(3): 326-334.
- [25] Venäläinen S, Nousiainen A, Silvennoinen M, *et al.* Stabilization of As and Sb in contaminated acidic shooting range soil with apatite mine tailings: Challenge of co-contamination [J]. *Soil & Environmental Health*, 2025, 3(100124): 1-10.
- [26] Li H, Yang J, Qu G, *et al.* Solidification and stabilization of fluorine and phosphorus in phosphate mine tailings and the mechanism of F and P fixation during soilization [J]. *Chemistry Select*, 2024, 9: e202401515.
- [27] Jia L, Yang S, Feng J, *et al.* Simultaneous removal of SO₂ and NO by phosphate tailings-derived composite slurry: A study of phosphorus element migration and transformation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 349: 119430.
- [28] Nie Y, Dai J, Hou Y, *et al.* An efficient and environmentally friendly process for the reduction of SO₂ by using waste phosphate mine tailings as adsorbent [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 388: 121748.
- [29] 马海翔. 含硫烟气浸提磷尾矿中磷元素及强化机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2024. ■