DOI：10.13245/j.hust.260198

矿渣强化飞灰地聚物性能与污染物同步固化机制

曹丽琼[1,3] 左义兵[2] 孙滢斐[1] 胡敬平[1] 龚建宇[1] 侯慧杰[1]
(1．华中科技大学环境科学与工程学院，湖北 武汉 430074；2．华中科技大学土木与水利工程学院，湖北 武汉 430074；3．山西大学资源与环境工程研究所，山西 太原 030006)

摘要 针对城市生活垃圾焚烧飞灰中重金属与氯离子(Cl^-)含量高、资源化利用难度大的问题，向粉煤灰-飞灰地聚物体系中掺入粒状高炉矿渣(GBFS)，探究了25 °C和60 °C固化条件下GBFS掺量对力学性能及重金属和Cl^-固化效果的影响及其作用机制．结果表明：25 °C条件下，质量分数为20%GBFS的改性试样(GB20-25)28 d抗压强度达32.41 MPa，较未掺加GBFS的样品提升126%，满足国家标准GB/T 21144—2023 MU30强度等级要求；Zn，Pb，Cd浸出质量浓度分别下降25.7%，55.1%，61.1%，Cl^-固定量由13.36 mg/g提升至16.31 mg/g；同时GB20-25的长期稳定性明显增强．机理分析表明GBFS促进更多水合硅铝酸钙/钠(C(N)-A-S-H)凝胶生成，优化基体孔结构；密度泛函计算证实引入Ca^{2+}有助于增强体系对重金属和Cl^-的固定能力．

关键词 垃圾焚烧飞灰；地聚物；固化稳定化；重金属；高炉矿渣
中图分类号 X705 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2026)10-0153-07

Performance enhancement and pollutant immobilization mechanism of slag-modified MSWI fly ash based geopolymer

CAO Liqiong[1,3] *ZUO Yibing*[2] *SUN Yingfei*[1] *HU Jingping*[1] *GONG Jianyu*[1] *HOU Huijie*[1]
(1．School of Environmental Science and Engineering，Huazhong University of Science and Technology，Wuhan 430074，China；
2．School of Civil and Hydraulic Engineering，Huazhong University of Science and Technology，Wuhan 430074，China；
3．Institute of Resources and Environmental Engineering，Shanxi University，Taiyuan 030006，China)

Abstract To address the problems of the high contents of heavy metals (HMs) and chloride ions (Cl^-) in municipal solid waste incineration fly ash (MSWI-FA) and the difficulty of its resource utilization，granulated blast furnace slag (GBFS) was incorporated into a coal fly ash/MSWI-FA geopolymer system．The effects and mechanisms of GBFS content on mechanical properties as well as the immobilization performance of HMs and Cl^- were investigated at solidification temperatures of 25 °C and 60 °C．Results show that the 28 d compressive strength of the GBFS-modified sample with a GBFS mass fraction of 20% and solidified at 25 °C (GB20-25) reaches 32.41 MPa，which is increased by 126% compared with that of the sample without GBFS addition，meeting the MU30 strength grade requirement specified in national standard GB/T 21144—2023．The leaching mass concentrations of Zn，Pb and Cd decrease by 25.7%，55.1% and 61.1%，respectively，while the Cl^- fixation amount is increased from 13.36 mg/g to 16.31 mg/g．Meanwhile，the long-term stability of GB20-25 is significantly enhanced．Mechanism analysis show that the formation of more calcium (sodium) aluminosilicate hydrate (C(N)-A-S-H) gel is promoted by GBFS，and the pore structure of the matrix is optimized．Density functional theory calculations confirm that the introduction of Ca^{2+} contributes to enhancing the immobilization capability of the system for HMs and Cl^-．

Key words MSWI fly ash；geopolymer；solidification/stabilization；heavy metals；granulated blast furnace slag

随着城市化进程加快，我国城市生活垃圾年产　　量持续增长．据统计年鉴数据显示，2024年已达

收稿日期 2026-04-20．
作者简介 曹丽琼(1983—)，女，博士研究生；侯慧杰(通信作者)，教授，E-mail：houhuijie@hust.edu.cn．
基金项目 国家重点研发计划项目(2023YFC3902803)．

2.6×10^8 t，较2014年增长约45.25%．焚烧处理因其减量化和能量回收优势已成为主要方式；然而焚烧产生的飞灰富含重金属、二噁英，氯元素质量分数较高，属于危险废物[1]．其不仅对生态环境和人体健康造成长期风险，而且Cl^-还可能导致材料腐蚀及土壤盐渍化，因此飞灰安全稳定与资源化利用是固废处理领域亟待解决的关键问题．

随着固废管理理念由单一末端处置向资源化利用转变，将飞灰经无害化处理后应用于建筑材料被认为具有良好的应用前景[2]．地聚物材料因其优异的力学性能及突出的重金属固化能力[3]，被认为是实现飞灰资源化利用的重要途径．当前，飞灰地聚物通常以粉煤灰等大宗硅铝酸盐工业固废为前驱体，但粉煤灰等材料通常存在反应活性不足的问题，限制了体系反应程度和力学性能的进一步提升．此外，粉煤灰基地聚物多依赖较高温度(60 ℃～80 ℃)固化以提高早期强度，这在一定程度上增加了能耗与工程成本[4]．已有研究表明：当氯含量高于一定阈值，会对地聚物的力学性能产生不利影响[5]．现有研究多集中于单一污染物的固化，对重金属与氯离子(Cl^-)的同步固化及其长期稳定性关注不足，因此在高氯含量飞灰体系中，如何通过引入高活性组分提升地聚物性能，并实现重金属与Cl^-的高效同步固化，仍缺乏系统认识，尤其是在低温固化条件下，其作用机制尚未得到充分阐明．

针对上述不足，本研究在前期构建的粉煤灰-飞灰二元地聚物体系基础上引入高炉矿渣(GBFS)形成三元体系，系统研究25 °C和60 °C固化条件下地聚物的力学性能及重金属与Cl^-的同步固化效果[4]，结合水化热与压汞法(MIP)等探讨微观结构演化，并利用密度泛函理论(DFT)从原子尺度揭示Ca^{2+}对体系稳定性及污染物固化的影响机制，采用荷兰扩散溶出试验标准NEN 7375评价长期稳定性．本研究旨在实现低温条件下污染物的高效同步固化与长期稳定性，满足建筑材料MU30等级要求，并阐明性能提升的微观机制，为高氯飞灰资源化利用提供理论依据与技术支撑．

1　材料与方法

1.1　实验材料

实验原料包括太原某生活垃圾焚烧厂飞灰、榆次某燃煤电厂粉煤灰、武汉市某钢铁集团高炉矿渣，原料粒径集中于0.1～100 μm范围内．碱激发剂由氢氧化钠与水玻璃按120 g：500 g的质量比混合，熟化24 h备用，初始水玻璃SiO_2/Na_2O摩尔比(即水玻璃模数)为3.3，原液中SiO_2与Na_2O质量分数总计为34%．实验试剂均为分析纯，溶剂为去离子水．原料化学成分质量分数见表1．

表1　实验原料主要化学组成　　%

原料	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	Cl
飞灰	3.09	1.03	32.93	9.29	5.73	20.96
粉煤灰	36.40	35.00	3.95	0.00	0.34	0.00
高炉矿渣	34.41	14.85	37.35	0.27	0.38	0.00

1.2　地聚物制备

固定飞灰掺量为20%(质量分数)，采用GBFS等质量替代部分粉煤灰，掺量梯度分别为0%，5%，10%，15%，20%．统一实验参数：碱激发剂模数为1.0，Na_2O掺量为18%、水灰比为0.5．依据GB 1346—2024方法制备试样．首先将固体原料低速搅拌2 min后加入碱激发剂及去离子水，再高速搅拌2 min；将浆体注入2×2×2 cm^3模具，振动排除气泡后，分别置于25 °C或60 °C条件下固化24 h；脱模后转入25 °C标准养护箱养护至规定龄期．抗压强度测试参照GB/T 17671—2021执行．

1.3　浸出实验

常规浸出实验依据HJ/T 300—2007和HJ/T 299—2007测试28 d试样中Zn，Pb，Cd和Cr浸出质量浓度．参照NEN 7375方法开展64 d中长期浸出试验[6]，按1.2节方法制备4×4×4 cm^3样品并养护至28 d，液固比为5：1，分别浸泡于三种溶液：**a**．硫酸-硝酸(Sul-Nit)浸出液(模拟酸雨环境)；**b**．醋酸(Ace)浸出液(模拟垃圾渗滤液)；**c**．去离子水(对照)．在第0.25，1.00，2.25，4.00，9.00，16.00，36.00和64.00 d更换浸出液，并测定浸出液中重金属质量分数，计算累积浸出率．测定浸出后试样强度、Cl^-质量分数和微观结构变化．试样命名为GB*x*-*y*(*z*)，其中：*x*为矿渣掺量；*y*为固化温度；*z*为浸出液类型(Sul，Ace，Wat分别为硫酸-硝酸浸出液、醋酸浸出液和去离子水)．

1.4　氯离子固化量的测定

地聚物中Cl^-分为物理结合(M_1)、化学结合(M_2)、未反应氯化物(M_3)和自由Cl^-(M_4)四种形态．实验测定Cl^-总量(M_{total})和水溶性Cl^-含量(M_{ws})．由于孔隙中游离Cl^-在真空干燥过程中会沉积并转移到结晶氯化物中，通过X射线衍射(XRD)分析结合Rietveld精修得到结晶氯化物质量分数(M_{XRD})，其为M_3和M_4之和，并可计算得到M_1，M_2和Cl^-固定总量(M_{ts})[7]

$$M_{total}=M_1+M_2+M_3+M_4;$$
$$M_{ws}=M_1+M_3+M_4;$$
$$M_2=M_{total}-M_{ws};$$
$$M_1=M_{ws}-(M_3+M_4);$$
$$M_1=M_{ws}-M_{XRD};$$
$$M_{ts}=M_1+M_2.$$

M_{total}通过酸溶法测定：将称2.00 g养护至28 d并研磨过筛的地聚物样品，加入50 mL 1 mol/L的HNO_3溶液，搅拌5 min后静置24 h，再过滤收集上清液并按照GB11896—89测定Cl^-质量分数．M_{ws}测定方法相同，仅以去离子水代替HNO_3溶液，并测定溶液中Cl^-质量分数．

1.5　测试与理论计算方法

将地聚物样品破碎后于乙醇中浸泡5 d终止水化，真空干燥后分级处理：粒径小于1 cm的用于扫描电子显微镜(SEM)及MIP孔结构分析；过100目筛后的粉末用于XRD测试；采用BCR(欧洲共同体参考局)连续分级提取法分析重金属的化学形态．

采用VASP 5.4.4软件开展DFT计算，分析了Ca取代Na后地聚物体系的Bader电荷、总能量及Cl^-与重金属吸附能．基于前期的研究，构建水化硅铝酸钠凝胶(N-A-S-H)和水合硅铝酸钙/钠凝胶(C(N)-A-S-H)模型[8]，并计算吸附能

$$E_{Ads}=E_{Total}-E_{Surf}-E_{Atom},$$

式中：E_{Total}为各原子被吸附后地聚物体系总能量；E_{Surf}为优化后体系能量；E_{Atom}为各原子优化后能量．

2　结果与讨论

2.1　高炉矿渣对地聚物力学与污染物固化性能的影响

2.1.1　力学性能的变化规律

两种固化温度下，GBFS的掺入均可提升粉煤灰-飞灰地聚物的抗压强度(见图1)．GB20-25在28 d抗压强度达到32.41 MPa，满足国家标准GB/T 21144—2023 MU30等级要求，是GB0-25的2.26倍；在60 °C条件下，GB20-60的抗压强度是GB0-60的1.13倍[9]．提高固化温度可显著增强地聚物早期强度．GB20-60养护3 d和7 d的强度，分别为GB20-25的2.33倍和1.71倍．当GBFS质量分数较低(0%，5%)时，60 °C固化强度高于室温固化．但当GBFS质量分数超过10%时，高温反而使养护28 d的强度低于常温固化样品．高温固化虽能在短期内提高强度，但后期强度增长较缓慢．例如，GB20-60在3 d的情况下已达28 d强度的81.53%，但其28 d抗压强度仅为GB20-25的88.21%．

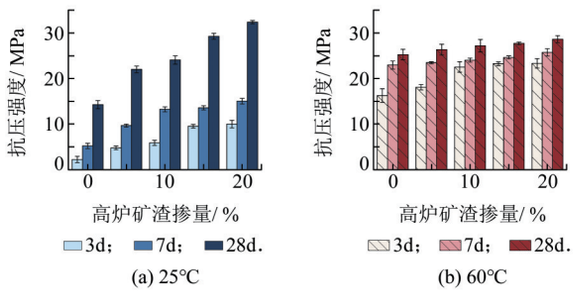


图1　不同GBFS掺量地聚物的抗压强度

2.1.2　重金属固化性能的变化规律

表2为采用HJ/T 300—2007和HJ/T 299—2007方法测定的Zn，Pb，Cd和Cr的浸出质量浓度，表中ND为低于检出限．表2显示：GB20-25和GB20-60中Zn，Pb，Cd和Cr的浸出质量浓度显著低于原飞灰，且满足标准GB 18598—2019，GB 16889—2024及HJ 1134—2020要求；但GB0-25，GB10-25，GB0-60中Pb，Cd的浸出质量浓度均超过了标准GB 16889—2024规定的限制(0.25 mg·L^{-1}，0.15 mg·L^{-1})．两种固化条件下，随着GBFS掺量增加，重金属浸出质量浓度持续降低．在醋酸浸出条件下，GB20-25中Zn，Pb和Cd的浸出质量浓度较GB0-25分别降低25.7%，55.1%和61.1%；在60 °C固化温度下，重金属浸出质量浓度呈现相似规律．Sul-Nit浸出体系中pH呈碱性，浸出液中重金属质量浓度基本低于检出限；此外，固化温度的升高能显著提高重金属的固化效率．因此，GBFS的加入能够提升地聚物对重金属的固定能力，降低重金属的环境释放风险．

表2　不同GBFS添加量地聚物养护28 d后Zn，Pb，Cd和Cr的浸出质量浓度　　mg·L^{-1}

样品编号	HJ/T 300—2007				HJ/T 299—2007			
	Zn	Pb	Cd	Cr	Zn	Pb	Cd	Cr
原飞灰	74.40	26.70	5.97	0.27	0.86	15.31	0.12	0.47
GB0-25	4.94	0.49	0.36	0.02	0.05	ND	ND	ND
GB10-25	3.85	0.36	0.23	0.02	ND	ND	ND	ND
GB20-25	3.67	0.22	0.14	0.02	ND	ND	ND	ND
GB0-60	4.41	0.42	0.26	0.03	ND	ND	ND	ND
GB10-60	3.44	0.25	0.15	0.03	ND	ND	ND	ND
GB20-60	3.35	0.11	0.08	0.03	ND	ND	ND	ND

2.1.3　氯离子固化性能的变化规律

GBFS掺入可显著提升Cl^-的固定能力(见图2)．当未掺GBFS时，25 °C样品中M_{ts}明显高于60 °C固化样品．随着GBFS掺量增加，Cl^-总固化量逐步上升，主要以物理吸附形式被固定．这主要由于

GBFS 促进了更多 C(N)-A-S-H 凝胶生成并增大比表面积，提供了更多吸附位点[10]，有效提升了体系固氯能力．

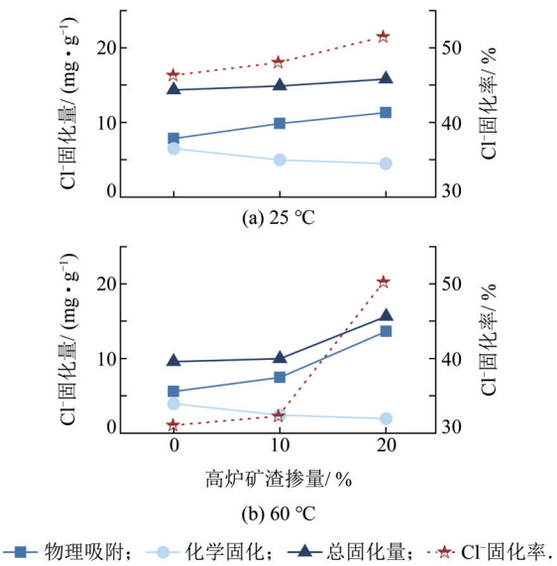


图 2　不同 GBFS 掺量地聚物中 Cl^- 的固化性能

2.2　高炉矿渣对地聚物长期稳定性能的影响

2.2.1　长期浸出对地聚物力学性能的影响

64 d 浸出实验结果表明：在三种浸出液中，GBFS 改性可显著降低地聚物强度衰减率，如图 3 所示．在 Sul-Nit 浸出液和去离子水中，GB20-25 的强度衰减率分别为 4.10% 和 2.34%，远低于 GB0-25 的 10.69% 和 8.94%．同时 GB20-25 经 Sul-Nit 浸出液浸出后强度为 31.08 MPa，满足 MU25 要求．醋酸侵蚀环境下试样劣化最严重，但 GB20-25 的强度衰减率 (38.35%) 仍远低于 GB0-25(64.99%)．在 60 ℃ 固化条件下，改性试样长期强度损失同样低于未改性试样．总之，GBFS 的加入有效减缓了地聚物在不同侵蚀环境下的性能劣化，显著提升了其长期稳定性．

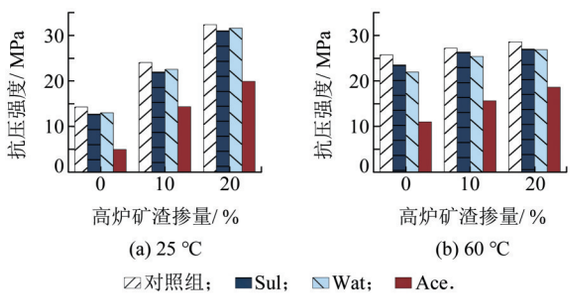


图 3　不同地聚物经过 64 d 浸出前后的力学性能变化

2.2.2　长期浸出对重金属与氯离子固化的影响

长期浸出后，随着 GBFS 掺量增加，重金属累积浸出率均显著降低，如图 4 所示．这是因为 GBFS 促使更多 C(N)-A-S-H 凝胶形成，并通过物理包埋和化学键合作用增强重金属固定能力，提升了残渣态占比．

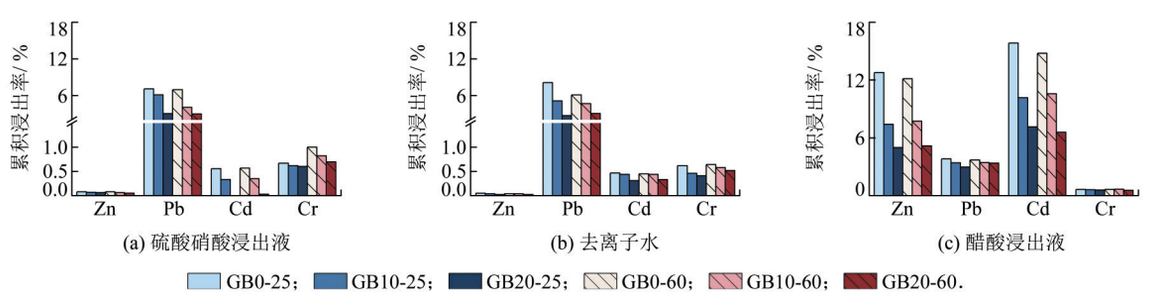


图 4　不同地聚物经过 64 d 浸出前后 Zn，Pb，Cd 和 Cr 的累积浸出率

同样，GBFS 显著增强了地聚物对 Cl^- 的固定能力，如图 5 所示．在醋酸体系中，地聚物中 Cl^- 的累积浸出率最高．这归因于醋酸侵蚀导致地聚物凝胶的分解，孔隙率增加，促进了原本被物理包封的 Cl^- 扩散，导致 Cl^- 累积浸出率升高．

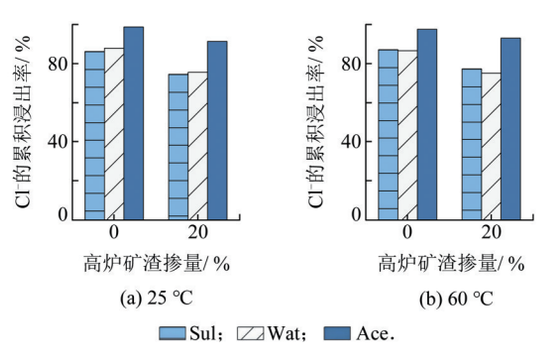


图 5　不同地聚物经过 64 d 浸出后 Cl^- 的累积浸出率

2.3　高炉矿渣改性强化机制分析

2.3.1　水化热分析

随着 GBFS 掺量增加，地聚物的累积放热量 (Q) 持续上升 (见图 6)，表明 GBFS 引入提供了足量 Ca，Si 等活性元素，加速地聚合反应．此外，提高固化温度显著提高累积放热量，例如 GB20-60 的 Q 值为 149.51 J/g，高于 GB20-25 的 133.33 J/g．这表明高温能加速初期反应，促进离子扩散和硅铝相解聚，从而释放更多热量，与早期抗压强度随固化温度升高而增大的结果一致．

2.3.2　微观结构变化

图 7 为不同地聚物经过 64 d 浸出实验前后 XRD

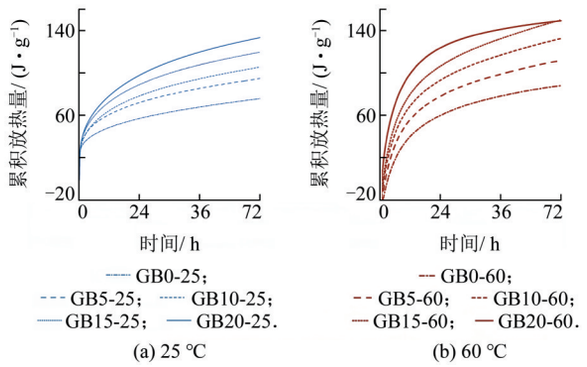


图6　不同地聚物的累积放热量

图谱，XRD结果表明：所有样品中均生成了C(N)-A-S-H凝胶[11]，且未发现新晶相．随着GBFS掺量增加，C(N)-A-S-H凝胶特征峰逐渐增强，表明凝胶生成增多；同时，NaCl特征减弱，说明GBFS促进更多凝胶生成提高Cl^-固定能力．64 d长期浸出实验后，所有样品中NaCl特征峰消失，说明以NaCl形式存在的Cl^-稳定性较差，在三种浸出环境中均易溶出，表明物理固化的Cl^-在长期浸泡条件下存在流失风险．经Sul-Nit和去离子水浸出后，C(N)-A-S-H凝胶特征峰未见明显变化，表明这两种环境中凝胶较稳定．醋酸浸出后，C(N)-A-S-H凝胶特征峰完全消失，归因于醋酸环境持续提供H^+促进地聚物凝胶分解，与醋酸浸出后抗压强度显著下降的规律一致(见图3)，揭示了宏观力学性能劣化的微观原因．

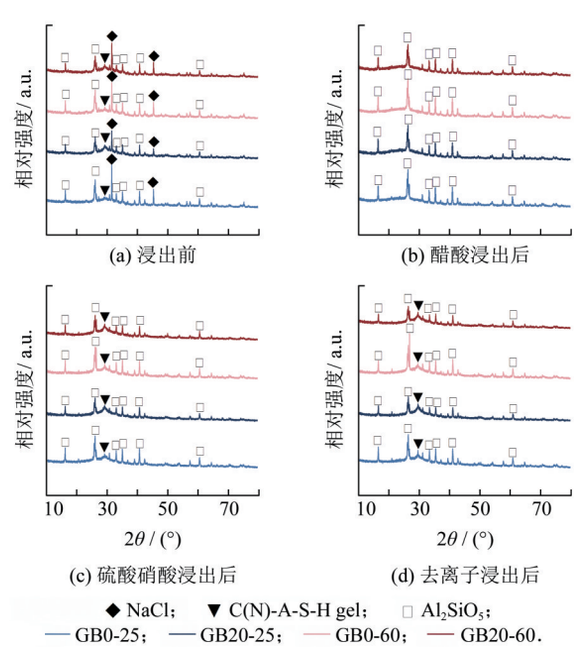


图7　不同地聚物经过64 d浸出实验前后XRD图谱

孔径结构分析(见表3和图8)表明：随着GBFS掺加量增加，地聚物孔结构在25 °C和60 °C两种固化条件下均明显细化．这是因为GBFS提供充足Ca，Si，Al等活性元素，促进更多C(N)-A-S-H凝胶生成，填充大孔隙，从而提高基体致密性．孔径改善不仅提高了地聚物抗压强度，也阻碍Cl^-扩散[12]，增强了对Cl^-的固化能力．此外，在相同GBFS添加量下，25 °C固化体系的平均孔径与孔隙率均小于60 °C体系，说明常温固化条件下形成的地聚物结构更致密，与其抗压强度更高的结果一致．

表3　不同GBFS添加量地聚物的总孔隙率和孔径分布

样品编号	孔隙率/%	平均孔径/nm	总孔容/(mL·g⁻¹)
GB0-25	47.45	20.13	0.38
GB10-25	46.58	12.57	0.37
GB20-25	46.42	11.98	0.36
GB0-60	53.12	22.14	0.48
GB10-60	49.84	14.18	0.43
GB20-60	49.28	12.85	0.41

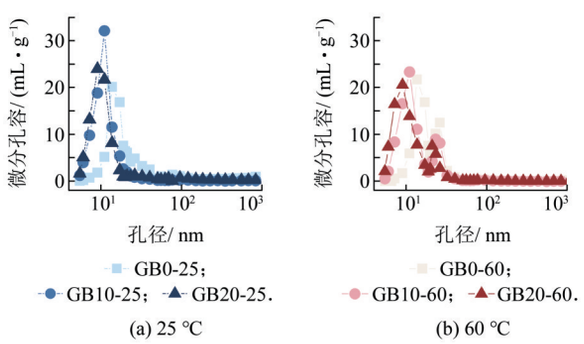


图8　不同地聚物的孔径分布

浸出前微观形貌结果(见图9)表明：随着GBFS掺量增加，地聚物结构逐渐致密均匀，其中GB20-25最致密，孔隙较少，这解释了其抗压强度最高的原因．在图9(a)圆圈内观察到有序排列的六方晶相结构，推测为弗里德尔盐，表明部分Cl^-通过化学结合被固定[13]，但在GB20-25中未检测到，可能是由于加入GBFS后优先生成了C(N)-A-S-H凝胶，因此减少了Cl^-反应所需Ca和Al．图9(b)圆圈内是NaCl．相比之下，GB20-60虽反应更充分，但出现微裂纹，说明高温加快了水化动力学，使凝胶在短时间内大量生成，伴随局部体积膨胀．因凝胶生成速率超过基体应变释放能力，内部产生较大收缩应力，导致微裂缝形成，使28 d抗压强度低于常温固化样品．

经醋酸浸出后，地聚物表面变得粗糙，出现侵蚀孔，具体见图9(e)和(f)圆圈内．与未添加GBFS样品相比，加入GBFS后侵蚀孔数量减少、尺寸变

小．经 Sul-Nit 浸出液和去离子水浸出后，固化体表面变化较小，仍保持平整．这是由于浸出液终点 pH 值呈碱性，因此对凝胶结构起到保护作用，表明 GBFS 可提高地聚物长期稳定性．

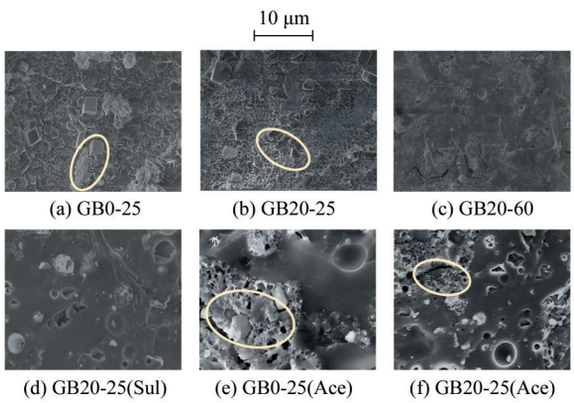


图 9　不同地聚物经过 64 d 浸出前后 SEM 图

2.3.3　重金属形态的变化

重金属形态(见图 10)分析结果显示：随着 GBFS 掺量增加，重金属 Zn，Pb，Cd 和 Cr 的残渣态占比明显升高，进一步解释了重金属浸出质量浓度降低的原因．这表明 GBFS 促进了更多凝胶生成，使重金属通过物理包埋、化学键合等方式稳定地固定在地聚物结构中．

此外，60 °C 固化的地聚物中重金属残渣态占比大于 25 °C 固化样品，与高温固化后重金属的浸出质量浓度较低一致，这是因为高温促进地聚合反应，加速凝胶向晶相转变，从而提高了重金属固化率．

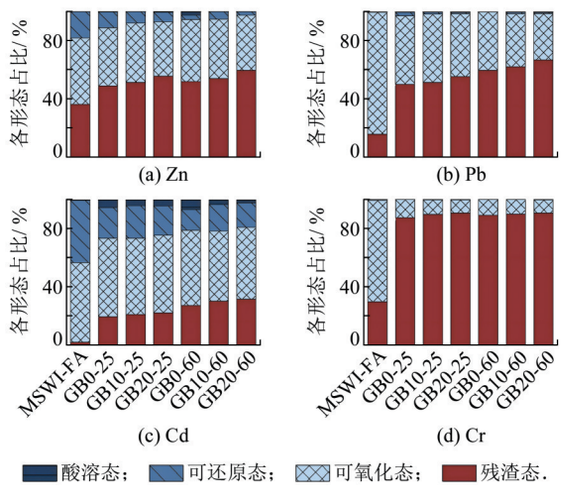


图 10　地聚物中重金属的形态分布

2.4　DFT 理论计算分析

图 11 为 Ca 取代前后地聚物体系能量的变化及氯和重金属原子吸附能的变化图．DFT 结果表明：Ca 取代 Na 后，凝胶表面正电性增强(由+0.37 e 增至+0.39 e)，总能量降低，表明体系结构更稳定．正电性增强有利于 Cl^- 的吸附与固定．稳定的凝胶结构使局部铝硅酸四面体氧原子排列更规则，从而为重金属离子提供更强的配位/共价结合位点，增强了对重金属离子的固定能力，尤其对 Cd 的固化作用最强，其次为 Pb，Zn，Cr．该结果从原子尺度证实了矿渣改性强化机制．

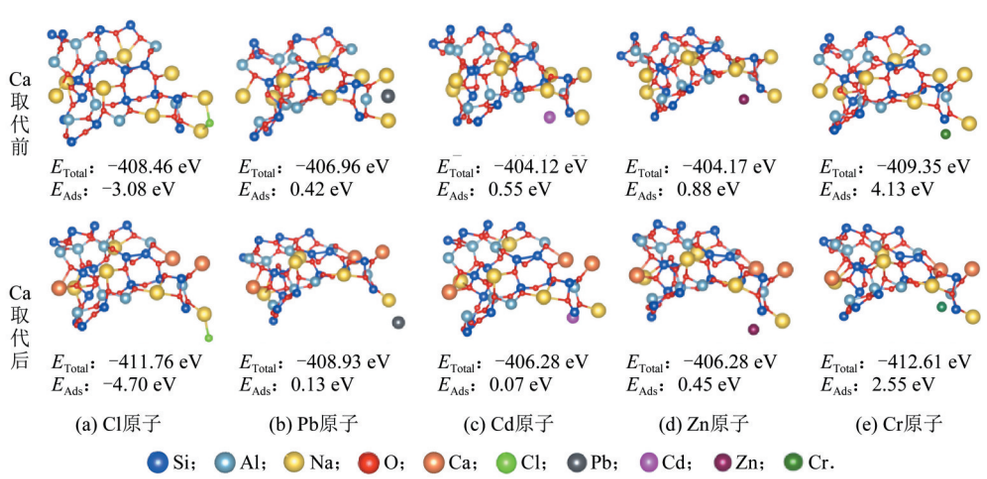


图 11　Ca 取代前后地聚物体系能量的变化及氯和重金属原子吸附能的变化图

2.5　高炉矿渣强化重金属与氯离子同步固化机制

GBFS 通过多重效应协同提升地聚物性能与重金属和 Cl^- 同步固化效果(见图 12)：一是提供充足的 Ca，Si，Al 等活性元素，促进更多 C(N)-A-S-H 凝胶生成，优化三维网络结构，提升力学性能与对重金属与 Cl^- 的物理包埋与吸附固定能力，这是同步固化能力提升的主要原因；二是细化孔径、降低孔隙率，发挥微集料填充效应，提升长期稳定性；三是 Ca^{2+} 优化凝胶表面电性，强化 Cl^- 的物理吸附与重金属化学键合作用，实现重金属和 Cl^- 同步高效固化．常温固化可规避高温引发的微裂纹缺陷，获得更优异的综合性能．

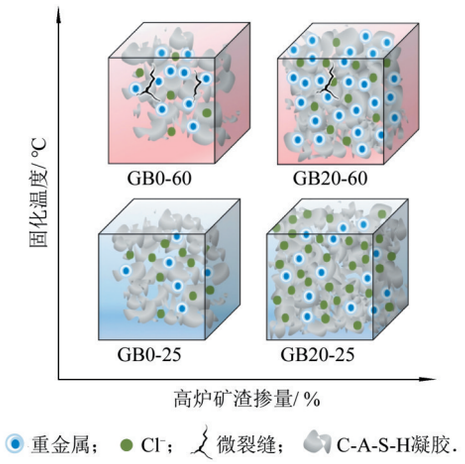


图12　GBFS强化粉煤灰-飞灰地聚物性能的机理

3　结语

GBFS的加入显著提高了地聚物的抗压强度及对重金属与Cl^-的固化能力．常温固化条件下，20%矿渣改性试样综合性能最优，抗压强度满足MU30等级要求，重金属与Cl^-固化效果大幅提升，兼具节能和环保优势．GBFS通过促进更多C(N)-A-S-H凝胶生成、优化网络结构，提升基体致密性，实现材料性能强化．DFT计算证实Ca^{2+}加入后体系总能量降低，表面正电性增强，重金属与Cl^-的吸附作用增强，从微观与原子尺度揭示了污染物同步固化机制．矿渣改性飞灰地聚物在酸雨环境下表现出良好的长期稳定性，有效解决了飞灰资源化利用的污染物释放与性能劣化问题，具备良好的工业化应用前景．

参　考　文　献

[1] CHEN L，WANG L，CHO D W，et al．Sustainable stabilization/solidification of municipal solid waste incinerator fly ash by incorporation of green materials[J]．Journal of Cleaner Production，2019，222：335-343．

[2] 许鹏．碱活化垃圾焚烧飞灰制备绿色砖材工艺及环境风险评估[D]．哈尔滨：哈尔滨工业大学，2019．

[3] 王凯，查晓雄，张新行．粉煤灰基地聚物浆体微观结构演变数值模拟[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2023，51(8)：25-31．

[4] CAO L Q，ZUO Y B，LIANG S，et al．Geopolymerization of MSWI fly ash and coal fly ash for efficient solidification of heavy metals：insights into stabilization mechanisms and long-term leaching behavior[J]．Construction and Building Materials，2024，411：134359．

[5] 王子帅．水盐含量对碱激发地聚物反应进程及强度影响[D]．兰州：兰州大学，2020．

[6] ZHANG W L，ZHAO L Y，YUAN Z J，et al．Assessment of the long-term leaching characteristics of cement-slag stabilized/solidified contaminated sediment[J]．Chemosphere，2021，267：128926．

[7] ZUO Y B，LIU G，YE J Y，et al．Experimental study and numerical modeling of the solidification capacity of chloride ions in alkali-activated slag cement exposed to sodium chloride[J]．ACS Sustainable Chemistry & Engineering，2024，12(21)：8104-8114．

[8] 柯妍．赤泥基地聚物胶凝体系中铁影响机制及固化铬渣的性能研究[D]．武汉：华中科技大学，2025.

[9] ALANAZI H，HU J，KIM Y R．Effect of slag，silica fume，and metakaolin on properties and performance of alkali-activated fly ash cured at ambient temperature[J]．Construction and Building Materials，2019，197：747-756．

[10] TONG L Y，ZHAO J H，CHENG Z R．Chloride ion binding effect and corrosion resistance of geopolymer materials prepared with seawater and coral sand[J]．Construction and Building Materials，2021，309：125126．

[11] CHEN X，GUO Y G，DING S，et al．Utilization of red mud in geopolymer-based pervious concrete with function of adsorption of heavy metal ions[J]．Journal of Cleaner Production，2019，207：789-800．

[12] REN X，WANG F，HE X，et al．Resistance and durability of fly ash based geopolymer for heavy metal immobilization：properties and mechanism[J]．RSC Advances，2024，14(18)：12580-12592．

[13] ZHU Y G，WAN X M，HAN X，et al．Solidification of chloride ions in alkali-activated slag[J]．Construction and Building Materials，2022，320：126219．