

劣质脱硫石膏与粉煤灰地质聚合物填方材料研究与应用

聂庆科^{1,2}, 李华伟^{1,3}, 贾向新^{1,2}, 王英辉^{1,2}, 茆玉超^{1,2}, 王俊明^{1,3}, 杨海朋^{1,3}

(1. 中冀建勘集团有限公司, 石家庄 050227; 2. 河北省岩土技术创新中心, 石家庄 050227;
3. 河北省工业固体废弃物综合利用重点实验室, 石家庄 050227)

摘要: 劣质脱硫石膏与粉煤灰不仅占用土地资源, 还会对环境造成污染。通过分析劣质脱硫石膏与粉煤灰的结构和成分, 研究其形成低强度地质聚合物作为厂房地基填方材料的可行性。结果表明: 劣质脱硫石膏和粉煤灰在碱激发下可形成低强度地质聚合物, 其结构以多聚体为主要骨架, 通过钙矾石搭接、脱硫石膏及粉煤灰微集料填充包裹黏结而成; 在 $D_g : F_a = 50 : 50$ 质量比混合后, 加入质量比为 3% 氢氧化钠, 能够形成具有较好承载能力的地质聚合物回填材料, 且具有良好的水稳性, 膨胀性能的影响忽略不计; 现场试验混合材料 ($D_g : F_a = 50 : 50$) 铺填厚度为 30 cm、碾压遍数为 8 遍时, 压实度可达到 0.94, 压缩模量可达到 10.74 MPa, 7 d 的轻型动力触探击数在 70 击以上, 平板载荷试验承载力特征值达到 150~200 kPa, 变形模量达到 52.7~56.5 MPa; 工程应用表明, 建筑最终沉降为 35.44~44.07 mm, 平均沉降速率小于 0.01 mm/d。研究对拓展地质聚合物在工程回填领域应用具有重要参考价值, 为实现“以废治废”的可持续岩土工程建设提供了新的技术模式。

关键词: 劣质脱硫石膏; 粉煤灰; 地质聚合物; 填方材料; 固废资源化利用

中图分类号: TU 443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 04-0015-10

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.04.003

Study and Application of Inferior Desulfurization Gypsum and Fly Ash Geopolymer as Filling Materials

NIE Qingke^{1,2}, LI Huawei^{1,3}, JIA Xiangxin^{1,2}, WANG Yinghui^{1,2}, MAO Yuchao^{1,2},
WANG Junming^{1,3}, YANG Haipeng^{1,3}

(1. China Hebei Construction & Geotechnical Investigation Co., Ltd., Shijiazhuang 050227, China;
2. Geotechnical Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Shijiazhuang 050227, China;
3. Key Laboratory for Industrial Solid Waste Comprehensive Utilization of Hebei Province, Shijiazhuang 050227, China)

Abstract: Poor quality desulfurization gypsum and fly ash not only occupy land resources but also cause environmental pollution. By analyzing the structure and composition of inferior desulfurization gypsum and fly ash, the feasibility of forming low

项目来源: 中央引导地方科技发展资金项目; 河北省重大科技支撑计划项目国际合作专项 (24293801Z)。

作者简介: 聂庆科 (1965—), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向: 岩土工程理论研究、固体废弃物综合利用的理论研究与应用。

通信作者: 杨海朋 (1979—), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向: 岩土工程的设计与理论研究。

收稿日期: 2025-06-23

材料科学

strength geopolymer as a filling material for factory foundation is studied. The results showed that low-quality desulfurization gypsum and fly ash can form low strength geopolymers under alkaline stimulation, with a structure mainly composed of polymers as the skeleton, which are bonded by overlapping calcium aluminate, filling and wrapping desulfurization gypsum and fly ash micro aggregates; After mixing at a mass ratio of $Dg : Fa = 50 : 50$, adding a mass ratio of 3% sodium hydroxide can form a geopolymer backfill material with good load-bearing capacity, and it has good water stability, with the expansion performance having negligible influence; When the on-site test mixed material ($Dg : Fa = 50 : 50$) is laid with a thickness of 30 cm and rolled 8 times, the compaction degree can reach 0.94, the compression modulus can reach 10.74 MPa, and the 7-day light dynamic penetration number is over 70. The bearing capacity of the plate load test can reach 150~200 kPa, and the deformation modulus can reach 52.7~56.5 MPa; Engineering applications have shown that the final settlement of the building ranges from 35.44 to 44.07 mm, and the average settlement rate of the two monitoring cycles is less than 0.01 mm/d. This research holds significant reference value for expanding the application of geopolymer in the field of engineering backfill, and provides a new technical model for achieving "reducing waste with waste" in sustainable geotechnical engineering construction.

Key words: inferior desulfurization gypsum; fly ash; geopolymer; filling material; resource utilization of solid waste

0 引言

随着我国能源结构的持续优化与环保政策的深入推进,燃煤电厂烟气脱硫技术(石灰石-石膏湿法脱硫)的大规模应用,使得脱硫石膏(FGD gypsum)与粉煤灰(Fly ash)的产量逐年攀升^[1-2]。然而,受限于区域资源化利用能力不足、堆存管理粗放以及材料性能退化等问题,大量脱硫石膏与粉煤灰被迫长期露天堆存,物理化学性质发生劣化,无法达到工业材料或建筑材料的加工使用要求。这不仅占用大量土地,更可能导致土壤酸化与水源二次污染。因此,研究劣质脱硫石膏和粉煤灰资源化利用技术对发展循环经济、节约资源、保护环境具有重要意义。

在脱硫石膏和粉煤灰的研究与利用中, Ma 等^[3]利用废烟气脱硫石膏作为回填材料进行了大量的试验研究,通过氢氧化钠、硅酸钠溶液活化和温度固化的方法,发现粉煤灰和脱硫石膏可形成具有一定强度的地质聚合物; Xiao 等^[4-5]对低活性煤制气粉煤灰(CGFA)开展试验分析,确定了煤制气粉煤灰可作为稳定集料基层进行利用; Hu 等^[6]、He 等^[7]分析了粉煤灰地质聚合物稳定集料基层的力学性能与微观结构特征,并对高掺量煤制气粉煤灰-水泥体系进行了试验与热力学分析,取得了一系列理论成果。国内外一些学者对脱硫石膏及其混合物作为填料的物理力学性能进行了试验研究,研究了水泥与不同比例的脱硫石膏和粉煤灰混合后胶凝材料的强度特

性,得出其可以替代部分水泥的结论。Sarah 等^[8]利用废弃石膏板回收的石膏粉与粉煤灰,研究了其部分替代水泥用于混凝土的可行性。一些学者研究了原始赤泥和脱硫赤泥在常温固化条件下制备的聚晶型材料力学性能,并对赤泥在烟气脱硫及粉煤灰基聚晶型材料制备中的协同利用^[9-10]。还有一些学者对脱硫石膏和粉煤灰的机理进行了研究,苏清发等^[11]研究了脱硫灰和脱硫石膏对熟料水泥水化放热特性及水化产物矿物组成的影响,水化过程中,脱硫灰和石膏均会与水泥的矿物成分作用形成钙矾石等,对水泥起到缓凝作用;郭晓璐等^[12]以粉煤灰和城市垃圾焚烧飞灰为主要原料,水热合成了固废基铝掺杂托贝莫来石,研究了不同外源阴离子对试样的抗压强度、反应产物、微观形貌和孔结构的影响;朱绘美等^[13]研究了碱激发粉煤灰胶凝材料具有优异的抗腐蚀、耐高温和固化重金属等性能;仵震远等^[14]以矿渣-活性 MgO-脱硫石膏固化疏浚淤泥为研究对象,探究碳化处理其在干湿循环与冻融循环作用下耐久性的影响;聂庆科等^[15]对矿渣、电石渣协同制备赤泥-II级粉煤灰地质聚合物力学与微观特性进行研究,研究了矿渣和电石渣复掺条件下赤泥-II级粉煤灰地质聚合物(RFG)强度形成与微观反应机理;沈剑羽等^[16]对碱激发剂对矿渣/粉煤灰固化工程渣土性能进行研究,矿渣作为极具应用潜力的绿色胶凝材料,其高活性为固化提供了基础;金胜赫等^[17]采用由矿渣、脱硫石膏与电石渣构成的复合固化剂固化黏土,发现电石渣提供的碱性环境

可以激发矿渣活性，在最佳配比下该固化黏土的后期强度和水稳定性均优于水泥土；李锐铎等^[18]采用正交试验设计方法进行钢渣、脱硫石膏、粉煤灰混凝土7 d抗压强度试验，分析各种因素及水平对混凝土抗压强度的影响，为快速合理确定混凝土配合比提供依据，进一步拓展和延伸了脱硫石膏和粉煤灰的研究与应用。

但可以发现，国内外多位学者的研究着重探讨原理、研究缺口与发展潜力，主要针对的是纯度高、品相好、性能较稳定的脱硫石膏和粉煤灰，对于长期堆存的劣质、低活性、稳定性差的脱硫石膏和粉煤灰，将其作为回填材料的物理化学性质、材料性能等方面的研究较少，对低活性材料的地质聚合反应机理研究还有不足。以露天堆放超过10余年的劣质脱硫石膏和粉煤灰协同利用为切入点，提出基于地质聚合理论的固废资源化创新路径。通过研究原材料特性和微观特征，阐明材料的反应机理及作用效应；通过室内与现场工艺试验，研究混合料在NaOH激发作用下，压实后的工程性能及长期稳定性。

1 材料的组分及微观结构

1.1 组分

1.1.1 脱硫石膏

脱硫石膏元素组成及矿物成分组成见表1、2。

表1 脱硫石膏元素组成

Table 1 Element composition of desulfurization gypsum

元素	重量百分比	原子百分比	化合物百分比	化学式
	/%			
S	24.58	17.25	61.37	SO ₃
Ca	27.61	15.50	38.63	CaO
O	47.81	67.25		
总量	100.00	100.00	100.00	

表2 脱硫石膏矿物成分组成

Table 2 Composition of mineral components of desulfurized gypsum

化合物名称	化学式	百分比/%
Gypsum 石膏	Ca (SO ₄) (H ₂ O) ₂	78.8
Calcium Sulfite Hydrate 亚硫酸钙水合物	CaSO ₃ · 0.5H ₂ O	17.2
Quartz 石英	SiO ₂	3.9

脱硫石膏的X射线能谱分析(EDX)和X射线衍射分析(XRD)分析如图1、2所示。

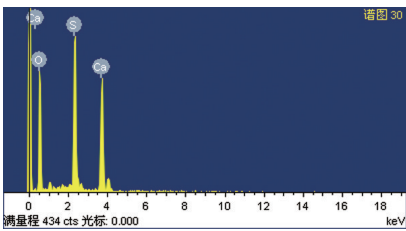


图1 脱硫石膏原材料能谱分析图(EDX)
Fig. 1 Energy dispersive X-ray spectroscopy analysis of desulfurization gypsum raw material (EDX)

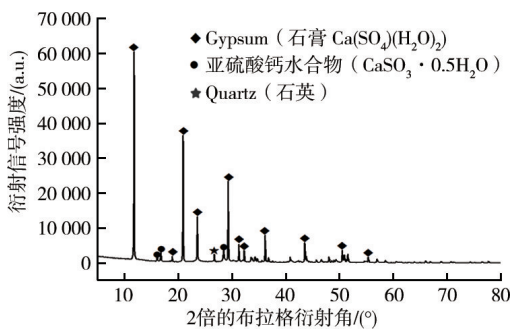


图2 脱硫石膏X射线衍射图谱(XRD)
Fig. 2 X-ray diffraction pattern of desulfurization gypsum (XRD)

1.1.2 粉煤灰

粉煤灰的X射线能谱分析(EDX)和X射线衍射分析(XRD)如图3、4所示，粉煤灰元素组成及矿物成分组成见表3、4。

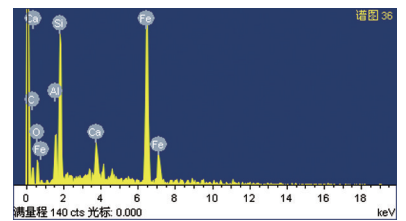


图3 粉煤灰原材料能谱分析图(EDX)
Fig. 3 Energy dispersive X-ray spectroscopy analysis of fly ash raw material (EDX)

表3 粉煤灰元素组成

Table 3 Composition of fly ash elements

元素	重量百分比	原子百分比	化合物百分比	化学式
	/%			
C	8.96	16.01	32.85	C、CO ₂
Al	2.96	2.35	5.59	Al ₂ O ₃
Si	8.66	6.61	18.53	SiO ₂
Ca	2.35	1.26	3.29	CaO
Fe	30.90	11.87	39.75	FeO
O	46.17	61.90		
总量	100.00	100.00	100.00	

材料科学

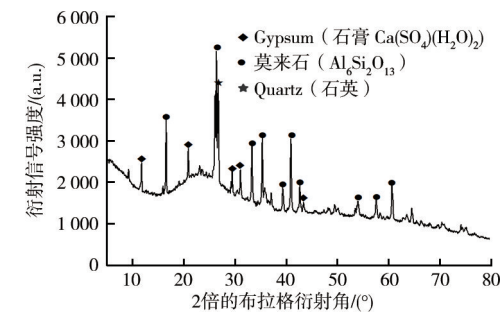


图4 粉煤灰 X 射线衍射图谱 (XRD)
Fig. 4 Fly ash X-ray diffraction pattern (XRD)

表4 粉煤灰矿物成分组成

Table 4 Composition of mineral components in fly ash		
化合物名称	化学式	百分比/%
Mullite 莫来石	Al ₆ Si ₂ O ₁₃	78.3
Gypsum 石膏	Ca (SO ₄) (H ₂ O) ₂	4.6
Quartz 石英	SiO ₂	17.1

1.2 脱硫石膏和粉煤灰微观结构

脱硫石膏和粉煤灰在电镜下的微观结构如图 5、6 所示。

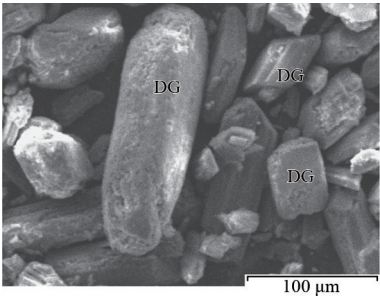


图5 脱硫石膏扫描电镜图
Fig. 5 Scanning electron micrograph of desulfurized gypsum

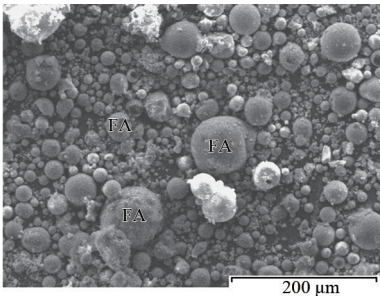


图6 粉煤灰扫描电镜图
Fig. 6 Scanning electron microscope image of fly ash

2 低强度地质聚合物的室内试验

2.1 试验方案

根据劣质脱硫石膏和粉煤灰的组分、微观结构

和地质聚合物机理, 分析确定脱硫石膏和粉煤灰在碱性激发条件下形成聚合物的可行性。制备 70 : 30、50 : 50、30 : 70 三种不同配比的复合材料试样, 设计无激发剂 (纯水)、氢氧化钠溶液、水玻璃溶液 (硅酸钠溶液) 三种条件, 对其进行强度特征、水稳定性、膨胀性的研究。配合比中, 材料的掺量为质量比, 具体试验配合比设计见表 5。

表5 配合比设计表

Table 5 Mix ratio design table / (kg/m ³)					
分组 (Z)	序号	脱硫石膏 (Dg)	粉煤灰 (Fa)	NaOH	水玻璃 (SS)
1	1-1	1 071.4	459.2		
	1-2	786.4	786.4		
	1-3	482.9	1 126.8		
2	2-1	1 071.4	459.2	15.3	
	2-2	786.4	786.4	15.7	
	2-3	482.9	1 126.8	16.1	
3	3-1	1 071.4	459.2	45.9	
	3-2	786.4	786.4	47.2	
	3-3	482.9	1 126.8	48.3	
4	4-1	1 071.4	459.2		15.3
	4-2	1 071.4	459.2		45.9

2.2 地质聚合物反应试验测试

根据聚合物聚合反应机理, 采用微量热仪监测反应过程的放热量, 分析反应情况。试验采用劣质脱硫石膏与粉煤灰为原料, 按 50 : 50 的质量比并分别掺入一定量氢氧化钠、水玻璃作为激发剂, 测试结果如图 7 所示。

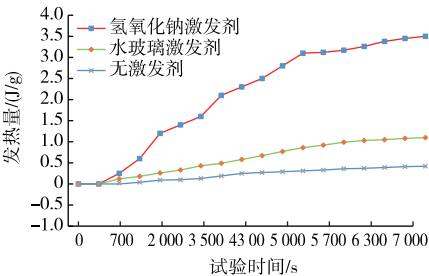


图7 材料热量测定结果
Fig. 7 Results of material heat measurement

结果表明: 劣质脱硫石膏与粉煤灰在 NaOH 溶液作用下比在硅酸钠溶液、水溶液下放热现象明显, 放热量为在硅酸钠溶液反应放热量的 3.5 倍, 为在水溶液反应放热量的 7 倍, 表明其在 NaOH 溶液激发下反应相对充分, 且随时间的增长 (0~2 h), 放热速率逐渐变缓。

由图 8 可知, 劣质脱硫石膏和粉煤灰, 在 NaOH 溶液激发下, 粉煤灰中的硅铝玻璃体结构溶解, 活性成分溶出生成无定形、非晶态相的水化硅酸钙和水化铝酸钙凝胶。脱硫石膏溶解析出的二水石膏晶体与部分水化铝酸钙凝胶反应生成棒状的钙矾石。在碱性环境下, 部分水化硅酸钙和水化铝酸钙凝胶进一步发生 Si-O-Si、Al-O-Al 键断裂, 形成的硅氧四面体和铝氧四面体等单体发生聚合反应, 生成 $[-Si-O-Al-]_n$ 的多聚体, 形成以多聚体为主要骨架、钙矾石搭接、脱硫石膏及粉煤灰微集料填充包裹黏结的结构体。

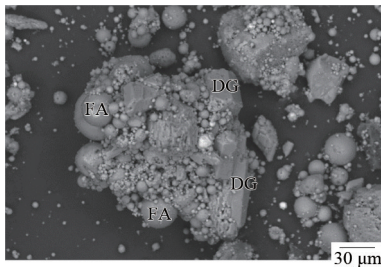


图 8 加 NaOH 反应后材料的 SEM 分析

Fig. 8 SEM analysis of the material after reacting with NaOH

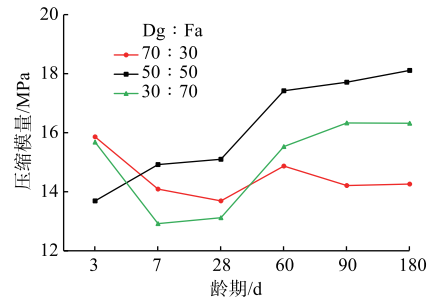
2.3 强度特征

2.3.1 压缩模量

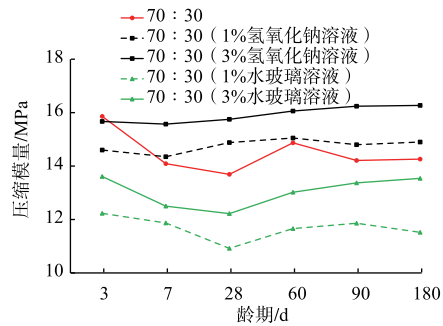
根据试验方案, 每种配比、龄期混合材料试样均留置 3 组, 进行固结试验, 分析地质聚合物材料的压缩性指标随时间的变化规律。每种龄期、配比混合材料试样压缩模量指标取 3 组试验的平均值。由图 9 (a) 可知, 无激发剂作用下, 混合材料的压缩模量随时间上升, 在 90 d 后趋于稳定。配比为 70 : 30、50 : 50 和 30 : 70 混合材料的最终压缩模量分别为 14.26、18.11 和 16.32 MPa。配比为 50 : 50 混合材料压缩模量最优。

由图 9 (b) 可知, 采用 NaOH 作为激发剂时, 配比 70 : 30 混合材料的压缩模量在 60 d 后趋稳, 其压缩模量较无激发剂条件增长 14%; NaOH 掺入比由 1% 增加至 3%, 压缩模量增加约 9%, 主要原因为激发剂含量增加, 提高了地质聚合反应, 使混合材料更加致密、集料充填更充分; 采用水玻璃激发剂时, 混合材料压缩模量较无激发剂时, 整体呈降低趋势, 降幅 5%~15%。因此, 仅增加水玻璃不能形成地质聚合物结构, 无法达到提升混合材料的压缩

模量的效果。



(a) 无激发剂材料压缩模量随时间变化曲线



(b) 配比为 70 : 30 材料试样压缩模量随时间变化曲线

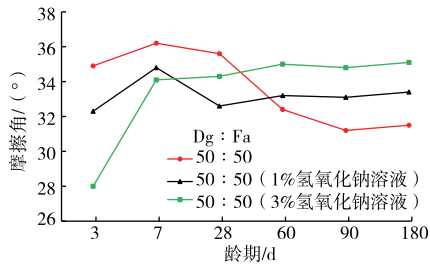
图 9 试样压缩模量指标变化曲线图

Fig. 9 Curve change of compression modulus of specimen

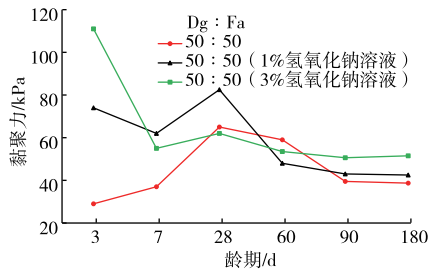
2.3.2 抗剪强度特征

对加入不同量激发剂条件、不同龄期的混合材料试样进行直接剪切试验, 测定材料的抗剪强度指标随时间的变化特征。配比为 50 : 50 的混合材料试样剪切指标。由图 10 可知, 材料的剪切强度随时间变化有明显阶段性规律, 强度参数表现为先增大后趋于稳定。以龄期 60 d 为界分为两阶段, 第一阶段为 60 d 内, 加入激发剂的复合材料, 强度参数随时间变化差异明显, 配比 50 : 50 混合材料 (3% NaOH) 的内摩擦角和黏聚力 > 配比 50 : 50 混合材料 (1% NaOH) > 配比 50 : 50 混合材料 (无激发剂), 说明地质聚合反应对强度产生了不同程度的影响; 第二阶段为 60 d 后, 强度变化趋于稳定, 说明地质聚合反应达到稳定状态; 分析其原因, 在 NaOH 激发剂作用下, 混合材料颗粒形成了地质聚合物结构, 粉煤灰地质聚合物颗粒包裹脱硫石膏形成联合结构, 提高了颗粒间摩擦力, 对黏聚力也有一定提升, 但内摩擦角的提高更为显著, 且在第二阶段后趋于平稳形成长期强度。

材料科学



(a) 配比 50 : 50 混合材料内摩擦角随时间变化曲线



(b) 配比 50 : 50 混合材料材料黏聚力随时间变化曲线

图 10 配比 50 : 50 混合材料试样剪切强度指标变化曲线图

Fig. 10 Variation curve of shear strength index of mixed material samples with a ratio of 50 : 50

2.4 浸水稳定性试验

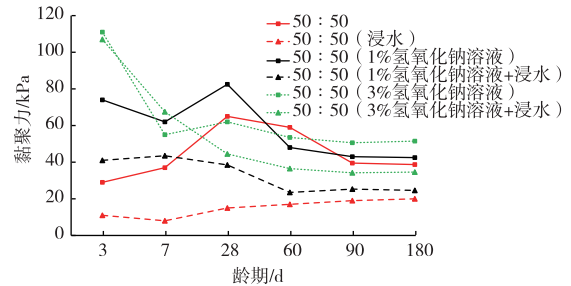
2.4.1 浸水黏聚力特征

采用直接剪切法对试样进行剪切试验。由图 11 (a) 可知, 浸水条件下, 掺加激发剂的混合材料的黏聚力在 0~60 d 内呈降低趋势, 且随 NaOH 掺量降低, 降幅越明显; 配比 50 : 50 混合材料 (3% NaOH) 在 60 d 黏聚力约为配比 50 : 50 混合材料 (1% NaOH) 的 200%; 60 d 以后, 黏聚力趋于稳定; 不掺加激发剂的混合材料, 在浸水条件下黏聚力始终低于激发剂组, 说明激发剂对混合材料黏聚力具有增强作用。

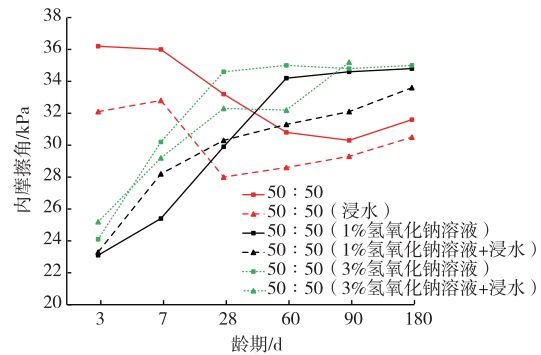
混合材料配比为 50 : 50, NaOH 掺量分别为 1% 和 3%, 最终稳定黏聚力分别为 24.6、34.6 kPa, 其黏聚力值较非浸水条件分别降低 42% 和 33%。分析其原因, 混合材料浸水后, 对于未发生地质聚合反应的脱硫石膏形成了软化作用, 水分子分散、润滑了粉煤灰地质聚合物结构内充填的石膏微集料, 宏观表现为黏聚力降低。

对于浸水条件下材料的内摩擦角, 由图 11 (b) 可知, 掺加激发剂的混合材料其摩擦角在 0~60 d 逐渐增加, 90 d 基本稳定, 其稳定值较不掺加 NaOH 激发剂的高约 8.9%~9.2%。相比掺加激发剂组, 不掺

激发剂组水敏性显著, 抗剪强度损失较大; 掺加激发剂组形成稳定地质聚合结构, 水分子仅作用于未反应石膏相, 主体结构保持水稳定性。



(a) 浸水条件材料黏聚力随时间变化曲线



(b) 浸水条件材料内摩擦角随时间变化曲线

图 11 材料浸水剪切强度指标变化曲线图

Fig. 11 Variation curve of shear strength index of material soaking in water

2.4.2 浸水压缩模量

由图 12 可知, 在不浸水条件下, 掺加激发剂的混合材料随时间 (0~180 d) 缓慢增高, 且随着激发剂加入比例从 1% 到 3% 时, 180 d 模量从 14.9 MPa 提升到 16.27 MPa, 模量提升约 9.2%。在浸水条件下, 混合料试样各个龄期条件下的压缩模量均有不同

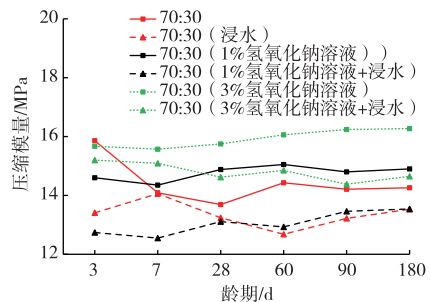


图 12 材料浸水压缩模量变化曲线图

Fig. 12 Variation curve of compressive modulus of material immersed in water

程度的降低,但当 NaOH 掺入量为 3%,其压缩模量在 28 d 后趋于稳定,最终稳定压缩模量为 14.65 MPa,较不浸水条件约下降 10%。

根据地质聚合物原理分析,混合材料在 NaOH 激发剂作用下,形成的以多聚体为主要骨架、钙矾石搭接、脱硫石膏及粉煤灰微集料填充包裹黏结的结构体,提高了混合料的耐水性,维持了混合材料压缩模量的稳定性。

2.5 膨胀特性

以 NaOH 作为激发剂和无激发剂的混合材料试样进行浸水膨胀性研究,由图 13 可知,无激发剂的混合材料试样在浸水条件下在 1~10 min 体积应变呈直线上升趋势,由 0.5% 到 1%;10 min 以后趋于稳定至 1.1%;掺加激发剂的混合材料试样体积应变变化呈缓变型上升,在 6~24 min 体积应变变化稳定在 0.6%。浸水条件下,掺加 NaOH 激发剂的试样的体积稳定性较未掺加激发剂的试样有较大提高。

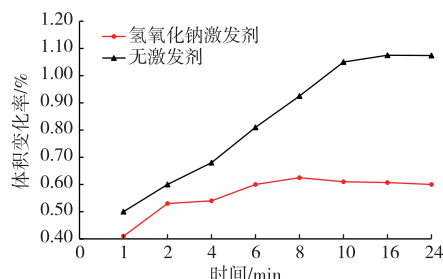


图 13 浸水条件下试样体积应变变化

Fig. 13 Sample volume strain under water conditions

从地质聚合物反应角度,加入 NaOH 后,混合材料中发生地质聚合反应,生成溶解度低、具有水硬性的钙矾石与地质聚合物多聚体对二水石膏的包裹保护作用,阻止、削弱了水对二水石膏的侵蚀破坏,提高了混合材料的水稳性,且钙矾石和多聚体的体积膨胀率均较低,对材料整体膨胀性影响较小。

3 现场试验

采用脱硫石膏和粉煤灰配比为 70 : 30、50 : 50 和 30 : 70 三种混合料,加入 NaOH 激发剂,掺入量 3%,制备混合材料并进行现场试验,研究混合料的压实性能及压实参数。

试样制备首先将材料粉碎,然后根据配合比,

将脱硫石膏和粉煤灰按比例混合均匀,按照最优含水率来控制各方案混合材料的初始含水率,加入设计用水量和激发剂,搅拌均匀,使水、激发剂及掺入材料均匀混合,利用轻型击实仪进行击实试验,并将击实后的试样制备成试验用样。

在施工现场下,对混合材料进行压实度、压缩模量、轻型动力触探、平板载荷试验,以确定不同承载性状条件下回填材料的回填工艺参数。

3.1 拌合料压实度

材料铺填厚度分别为 30、50 cm,采用 20 t 压路机碾压 4、6 和 8 遍,碾压完成后 7 d 进行压实度测试。由图 14 可知,不同铺填厚度下,各配比混合材料的压实度随碾压遍数增加逐渐增加;同一铺填厚度下,配比为 50 : 50 的劣质脱硫石膏粉煤灰混合料在相同碾压遍数下的压实度 > 配比为 30 : 70 和 70 : 30 的劣质脱硫石膏粉煤灰混合料;其他条件相同,铺填厚度为 30 cm 的材料压实度 > 铺填厚度为 50 cm 的材料压实度;当 $D_g : F_a = 50 : 50$ 时,铺填厚度为 30 cm,碾压遍数为 8 遍时,压实度最大可达到 0.94。试验表明,当脱硫石膏比例较高时,不易压实,在实际工程中,应选择脱硫石膏和粉煤灰比例小于等于 1 的组分比例,可优选 50 : 50 配比。

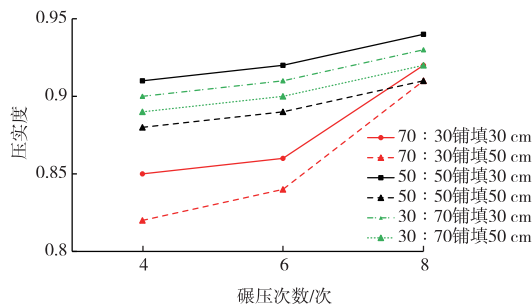


图 14 不同组合比例材料碾压次数与压实度关系曲线

Fig. 14 Relationship curves between the number of rolling passes and the degree of compaction for materials with different mix proportions

3.2 拌合料压缩模量

混合材料击实试样在 60 d 后力学性能趋于稳定。现场试验取碾压后的试样,进行 60、90 及 180 d 龄期的试验,分析其压缩模量的变化特征。以 $D_g : F_a = 50 : 50$ 配比试样,混合材料试样的压缩模量与龄期变化规律如图 15 所示。

试验结果表明,拌合料的压缩模量指标整体随龄期增长,增势较平稳,表现为分层摊铺厚度薄,

材料科学

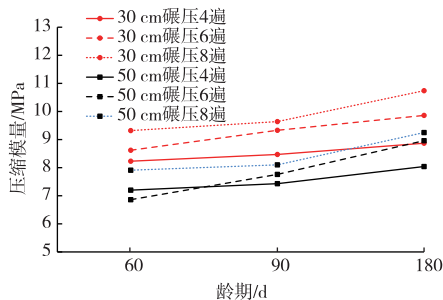


图 15 50 : 50 配比材料压缩模量变化曲线

Fig. 15 Compression modulus change curve of 50 : 50 ratio material
 碾压遍数多, 压缩模量高。根据试验结果, 现场试样 180 d 龄期时, 铺填厚度为 30 cm、碾压遍数为 8 遍时, 其压缩模量可达到 10.74 MPa; 铺填厚度为 50 cm、碾压遍数为 8 遍时, 其压缩模量达到 9.25 MPa。试样压缩模量随时间增长的特性表明, 随着龄期的增加, 地质聚合物的反应持续缓慢进行, 其结合性不断增强, 表现为压缩模量随龄期提高。

3.3 触探反应特性

现场试验区碾压完成后, 选择 50 : 50 的混合材料试验区, 在 1、3 和 7 d 进行了轻型动力触探测试, 测试深度为 30 cm。轻型动力触探击数与龄期的变化关系如图 16 所示。

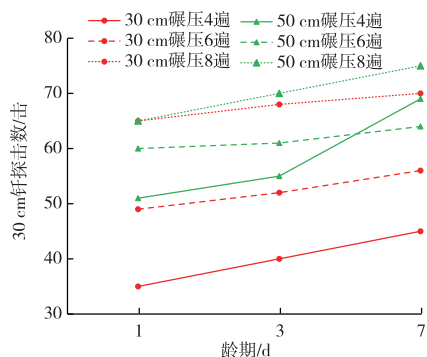


图 16 轻型动力触探击数龄期的对比图

Fig. 16 Comparison chart of the age of light power penetration tests

试验结果表明, 轻型动力触探击数随龄期 (0~7 d) 增长而逐渐提高, 随碾压遍数 (4~8 遍) 增加而逐渐提高; 铺填厚度为 30、50 cm, 碾压遍数为 8 遍时, 各龄期轻型动力触探击数接近, 7 d 动力触探击数均在 70 击以上, 表明填方材料均匀, 具有较高的承载力。

3.4 压实拌合料承载特性

现场平板载荷试验通过直接加载可以模拟地基

实际受力, 能够精确测定承载力与变形参数, 弥补触探、钎探等间接方法的不足, 适用于验证填方材料的真实工程性质及优化设计。

在现场设置了配比试验区, 在碾压完成第 7 d 后, 对混合材料配比为 $D_g : F_a = 50 : 50$ 、铺填厚度为 30 cm 碾压遍数为 8 遍的试验区进行了平板载荷试验。

试验承压板为 0.25 m^2 , 每级加载 40 kPa, 共加载 13 级, 施加最大荷载为 520 kPa。由图 17 可知, 回填区 P-S 沉降曲线为缓降型, 加载 400 kPa 曲线为线性变形, 未出现沉降拐点, 在 400~520 kPa 压力段出现沉降突变点, 试验测得累计最大沉降量为 20.2 mm。分析 P-S 曲线变形特征可知极限承载力可取 400 kPa, 承载力特征值为 200 kPa, 对应的沉降为 4.0 mm。

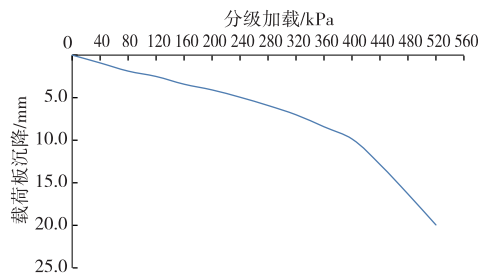


图 17 回填区平板载荷试验 P-S 曲线图

Fig. 17 P-S curve of plate load test in backfill area

平板载荷试验结果表明, 回填厚度 30 cm, 采用 20 t 振动碾, 碾压 8 遍承载力能达到 150~200 kPa, 变形模量为 52.7~56.5 MPa, 检测结果表明回填材料承载力能够满足一般回填工程需要。

4 工程应用

4.1 工程概况

在某碳素厂建设项目中, 现状场地标高与设计厂区标高相差最大为 3.0 m, 需回填地基约 20 万 m^3 。场地周边堆存了大量劣质脱硫石膏及粉煤灰, 最长堆存时间已超过 40 年。室内和现场试验研究表明, 劣质脱硫石膏和粉煤灰在碱激发下可以作为厂房地基的填方材料。由摊铺机将拌和料分层摊铺, 摊铺厚度为 30 cm; 用 20 t 压路机按照施工步骤进行碾压, 震动频率 25~35 Hz, 行进速度 3~5 km, 碾压 8 遍, 用夯实振动碾分层夯实, 最后进行平整、养护。

4.2 填方材料地基处理效果评价

铺填完成后对表面进行含水率和干密度共进行

900 次试验。试验结果: 密度 $1.26 \sim 1.28 \text{ g/cm}^3$, 含水率为 $22\% \sim 25\%$, 检测结果符合设计要求; 碾压完成后, 测试回填土压实度为 $0.94 \sim 0.96$, 承载力可达到 $150 \sim 200 \text{ kPa}$, 变形模量达到 $52.7 \sim 56.5 \text{ MPa}$, 测试结果满足设计要求。1#焙烧车间沉降监测曲线如图 18 所示。

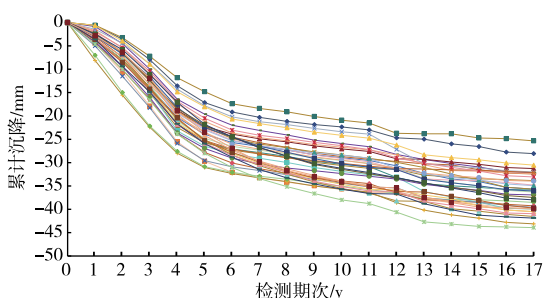


图 18 1#焙烧车间沉降监测曲线

Fig. 18 Settlement monitoring curve of 1# roasting workshop

对采用该填方材料的多个建筑物进行沉降观测, 监测历时 18 个月, 各建筑物最大沉降量为 $35.44 \sim 44.07 \text{ mm}$, 平均沉降量为 $32.33 \sim 36.64 \text{ mm}$, 监测两个周期的平均沉降速率小于 0.01 mm/d , 进入稳定期。各建筑地基变形满足规范及使用要求^[19]。

上述碳素厂的焙烧车间、炭块库等多个建(构)筑物地基均采用了此工艺进行换填处理, 消纳劣质脱硫石膏 20 余万 m^3 , 不仅大量节约了砂石回填材料, 还释放了土地资源, 具有显著的环境效益和经济效益。根据建筑变形监测结果, 以及后期生产运营情况分析, 换填处理地基的强度和刚度均能满足承载和变形的要求, 项目整体运行良好。

5 结论

研究以劣质脱硫石膏与粉煤灰为对象, 针对原材料微观结构和物理力学性质, 进行了室内不同配比与耐久试验, 并通过现场压实工艺试验, 形成了将劣质脱硫石膏与粉煤灰用于建筑地基回填材料的成套技术, 并应用于实体工程, 建筑沉降监测结果表明, 建筑运行效果良好。通过研究可以得出以下结论:

(1) 长时间堆存的劣质脱硫石膏和粉煤灰在碱激发下可形成低强度地质聚合物, 其结构以多聚体为主要骨架, 通过钙矾石搭接、脱硫石膏及粉煤灰

微集料填充包裹黏结而成;

(2) 劣质脱硫石膏和粉煤灰 ($\text{Dg} : \text{Fa} = 50 : 50$) 混合材料在激发剂 (3% 氢氧化钠) 作用下, 能够形成具有较好承载能力的地质聚合物回填材料, 具有良好的水稳性, 膨胀性能影响忽略不计;

(3) 现场试验中, 对于混合材料配比为 $\text{Dg} : \text{Fa} = 50 : 50$ 、铺填厚度为 30 cm 、碾压遍数为 8 遍的回填材料, 其压实度可达到 0.94 , 压缩模量可达到 10.74 MPa , 7d 轻型动力触探击数在 70 击以上, 平板载荷试验承载力可达到 $150 \sim 200 \text{ kPa}$, 变形模量达到 $52.7 \sim 56.5 \text{ MPa}$, 满足厂房地基的要求;

(4) 实际工程应用中, 使用劣质脱硫石膏与粉煤灰地质聚合物作为填方材料的建筑最终沉降为 $35.44 \sim 44.07 \text{ mm}$, 监测两周期的平均沉降速率小于 0.01 mm/d , 满足设计要求, 建筑运行效果良好。可消纳劣质脱硫石膏 20 余万 m^3 , 不仅大量节约了砂石回填材料, 还释放土地资源, 具有显著的环境效益和经济效益。

参 考 文 献

- [1] 石化彪, 李迎旭. 试论火电厂烟气脱硫脱硝技术应用与节能环保 [J]. 应用能源技术, 2022 (3): 32-34.
- [2] 王兆龙, 姚沛帆, 张西华, 等. 典型大宗工业固体废物产生现状分析及产生量预测 [J]. 环境工程学报, 2022, 16 (3): 746-751.
- [3] Ma Yuetan, Nie Qingke, Xiao Rui, et al. Experimental investigation of utilizing waste flue gas desulfurized gypsum as backfill materials [J]. Construction and Building Materials, 2020, 245: 118393.
- [4] Xiao Rui, Nie Qingke, He Junxi, et al. Utilizing lowly-reactive coal gasification fly ash (CGFA) to stabilize aggregate bases [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 370: 133320.
- [5] Xiao Rui, Nie Qingke, He Junxi, et al. Strategies for using lowly-reactive coal gasification fly ash (cgfa) to stabilize aggregate bases [J]. Available at SSRN 4057415.
- [6] Hu Wei, Nie Qingke, Huang Baoshan, et al. Mechanical property and microstructure characteristics of geopolymer stabilized aggregate base [J]. Construction and Building Materials, 2018, 191: 1120-1127.
- [7] He Junxi, Xiao Rui, Nie Qingke, et al. High-volume coal gasification fly ash-cement systems: Experimental and thermodynamic investigation [J]. Construction and Building Materials, 2023, 377: 131082.
- [8] Sarah H, Pedram S. Recycled gypsum powder from waste drywalls

材料科学

- combined with flyash for partial cement replacement in concrete [J], Journal of Cleaner Production • November 2020.
- [9] Nie Qingke, Hu Wei, Ai Tao, et al. Strength properties of geopolymers derived from original and desulfurized red mud cured at ambient temperature [J]. Construction and Building Materials, 2016, 125: 905–911.
- [10] Nie Qingke, Hu Wei, Huang Baoshan, et al. Synergistic utilization of red mud for flue-gas desulfurization and fly ash-based geopolymer preparation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 369: 503–511.
- [11] 苏清发, 周勇敏, 陈永瑞, 等. 脱硫灰/脱硫石膏作为水泥缓凝剂的水化行为 [J]. 硅酸盐学报, 2016, 44 (5): 663–667.
- [12] 郭晓璐, 宋猛, 鲍梦燕. 不同阴离子对固废基铝掺杂托贝莫来石的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2018, 46 (8): 1059–1066.
- [13] 朱绘美, 武幸子, 刘毓, 等. 常温下碱-晶种复合激发粉煤灰胶凝材料的性能 [J]. 硅酸盐学报, 2025, 53 (2): 289–303.
- [14] 作震远, 王 强. 碳化养护对矿渣-活性 MgO-脱硫石膏固化疏浚淤泥耐久性能的影响 [J]. 河南城建学院学报, 2026, 35 (2): 8–16.
- [15] 聂庆科, 李华伟, 杨海朋, 等. 矿渣、电石渣协同制备赤泥-II 级粉煤灰地质聚合物力学与微观特性 [J]. 硅酸盐学报, 2026, 54 (5): 1524–1535.
- [16] 沈剑羽, 肖建庄, 阳栋, 等. 碱激发剂对矿渣/粉煤灰固化工程渣土性能的影响 [J]. 新疆大学学报 (自然科学版中英文), 2025, 42 (2): 238–245.
- [17] 金胜赫, 王修山, 吴越鹏. 矿渣-脱硫石膏-电石渣固化剂固化黏土的研究 [J]. 工程地质学报, 2023, 31 (2): 397–408.
- [18] 李锐铎, 徐梓博, 赵林熠, 等. 基于正交试验的钢渣、脱硫石膏、粉煤灰混凝土抗压强度研究 [J]. 河南城建学院学报, 2017, 26 (2): 20–22.
- [19] 建筑地基基础设计规范 GB50007–2012 [S].

(上接第 7 页)

- [2] Amir M, Morteza R, Pooyan A, et al. 煤矸石粉与传统填料沥青混凝土力学性能和环境影响的对比研究 [J]. 中外公路, 2017, 37 (5): 251–256.
- [3] 高健, 王喜刚, 刘峰, 等. 加气煤矸石混凝土抗硫酸盐侵蚀试验研究 [J]. 混凝土, 2018, (3): 83–85, 90.
- [4] 李少伟, 周梅, 张莉敏, 等. 自燃煤矸石粗骨料特性及其对混凝土性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2020, 23 (2): 334–340, 380.
- [5] 杨尚谕, 周梅, 张玉琢, 等. 自燃煤矸石粗集料取代率对混凝土断裂韧性的影响 [J]. 建筑材料学报, 2020, 23 (4): 858–864.
- [6] 刘德慧, 李滢. 煅烧煤矸石再生细骨料混凝土徐变性能 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39 (9): 2837–2843.
- [7] 皇民, 赵玉如, 蔺世豪, 等. 全级配煤矸石混凝土导热性能试验与分析 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (3): 1144–1149.
- [8] 乔立冬, 姚占全, 王宗熙, 等. 煤矸石对混凝土宏观性能的灰熵分析 [J]. 排灌机械工程学, 2022, 40 (1): 30–34, 54.
- [9] 陈琦琦, 张大明, 任凤玉, 等. 干粉激发煤矸石基地聚物混凝土配合比优化研究 [J]. 矿业研究与开发, 2022, 42 (8): 125–129.
- [10] 姚志鑫, 穆川川, 单俊鸿, 等. 基于裹浆工艺的煤矸石混凝土性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (2): 587–597.
- [11] 张亚鹏, 张凤娇, 曹佳伟, 等. 洗选煤矸石透水混凝土的制备及其性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (6): 1–5.
- [12] 关斌, 龙行, 丁莎, 等. 煤矸石粉混凝土冻融损伤模型与劣化机制 [J]. 材料导报, 2024, 38 (16): 149–157.
- [13] 刘超, 蔡建赞, 朱超, 等. 硫酸盐干湿循环作用下煤矸石喷射混凝土劣化机理 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (10): 3686–3693.
- [14] 钱泽坤. 陕北矿区煤矸石混凝土冻融后力学性能试验研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
- [15] 邱继生, 朱梦宇, 周云仙, 等. 粉煤灰对煤矸石混凝土界面过渡区的改性效应 [J]. 材料导报, 2023, 37 (2): 75–81.
- [16] 袁猛. 非自燃煤矸石混凝土在冻融硫酸盐侵蚀下的耐久性研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [17] 石松涛, 徐飞, 李琦. 冻融循环作用下超高延性纤维增强水泥基复合材料加固力学性能试验研究 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (11): 4745–4754.
- [18] 彭亮. 硫酸盐-氯盐耦合传输下对混凝土损伤过程的试验研究及其数值模拟 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
- [19] Hasan M, Okuyama H, Sato Y, et al. By freezing and thawing cycle [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2004, 2 (1): 89–99.
- [20] 楚留声, 赵静静, 赫约西. 盐冻作用下再生砖粉 ECC 力学性能及寿命预测 [J]. 建筑科学与工程学报, 2025, 42 (2): 131–141.