

公路地下管网固废充填材料力学特性及耐久性研究

刘春雷^{1*}, 孟凌霄², 田长进², 孙中华², 郭晓胜³, 刘春晖⁴

1. 山东农业大学基建处, 山东 泰安 271018
2. 中国建设基础设施有限公司, 北京 100044
3. 新汶矿业集团有限责任公司, 山东 泰安 271200
4. 泰安市泰泓投资置业有限公司, 山东 泰安 271000

摘要: 为推进工业固废在公路排水管道回填中的资源化利用, 本文以粉煤灰(FA)和粒化高炉矿渣(GGBS)为基础材料, 引入烟气脱硫石膏(DG)构建三元碱激发复合体系。设置 GGBS:(FA+DG) 为 70:30、60:40 和 50:50, DG 掺量为 0%~12%, 碱激发剂模数为 1.0、1.2 和 1.4, 共设计 45 组方案; 采用无侧限抗压试验, 并结合 XRD 和 SEM 分析 DG 对材料力学性能及微观结构的影响。结果表明: DG 掺入后材料强度呈先升后降趋势, 最佳掺量约为 6%; 其中 S60 组在 6% DG、模数 1.0 条件下 1 d 抗压强度达到 14.48 MPa, 较基准组提高约 23%。随着模数增大, 材料抗压强度整体下降, S60-6% DG 组强度由 14.48 MPa 降至 1.50 MPa。掺 6% DG 试样前 3 d 强度增长最快, 3 d 强度可达到 14 d 最终强度的 76.92%~79.70%。微观分析表明, 适量 DG 可促进钙矾石和 C-(A)-S-H 凝胶生成, 提高基体密实度; 过量 DG 则会导致硫酸盐残留、凝胶相减少, 不利于后期强度与结构稳定性。

关键词: 公路排水管道; 固废回填材料; 碱激发材料; 烟气脱硫石膏; 抗压强度; 微观结构

中图分类号: TU528.09

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2026)05-0972-13

Research on Mechanical Properties and Durability of Solid Waste Backfill Materials for Highway Underground Pipe Networks

LIU Chun-lei^{1*}, MENG Ling-xiao², TIAN Chang-jin², SUN Zhong-hua²,
GUO Xiao-sheng³, LIU Chun-hui⁴

1. Shandong Agricultural University Infrastructure Department, Taian 271018, China
2. China Construction Infrastructure Corporation, Beijing 100044, China
3. Xinwen Mining Group Corporation, Taian 271200, China
4. Taian Taihong Investment Corporation Property, Taian 271000, China

Abstract: To promote the resource utilization of industrial solid wastes in highway drainage pipeline backfill, this study uses fly ash (FA) and ground granulated blast furnace slag (GGBS) as the base materials, and introduces flue gas desulfurization gypsum (DG) to construct a ternary alkali-activated composite system. The mass ratios of GGBS to (FA+DG) are set at 70:30, 60:40, and 50:50, with DG content ranging from 0% to 12%, and the modulus of the alkali activator at 1.0, 1.2, and 1.4, resulting in a total of 45 mix proportions. Unconfined compressive strength tests are conducted, combined with X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM), to investigate the effects of DG on the mechanical properties and microstructure of the material. The results show that the strength first increases and then decreases with the addition of DG, with the optimal dosage being approximately 6%. The S60 group achieves a 1 d compressive strength of 14.48 MPa at 6% DG and a modulus of 1.0, which is about 23% higher than that of the control group. As the activator modulus increases, the compressive strength decreases significantly, with the strength of the S60-6% DG specimen dropping from 14.48 MPa to 1.50 MPa. The specimens containing 6% DG exhibit the fastest strength development within the first 3 days, with the 3 d strength reaching 76.92%–79.70% of the 14 d strength. Microstructural analysis indicates that an appropriate amount of DG can promote the formation of ettringite and C-(A)-S-H gel, thereby improving matrix compactness, whereas excessive DG leads to sulfate residue and reduced gel phases, which is unfavorable to later strength and structural stability.

Keywords: Highway drainage pipelines; solid waste backfill materials; alkali-activated materials; FGD gypsum; compressive strength; microstructure

收稿日期: 2026-02-04

修回日期: 2026-09-16

基金项目: 泰安市工业领域科技创新发展项目“市政道路路基填料地质聚合物固化研究”(编号:2025GX076); 中建股份科技研发计划资助“山地城市洪涝灾害韧性提升关键技术与智慧运维系统研究”(编号:CSCEC-2024-Z-31)

第1作者简介: 刘春雷(1989-), 男, 硕士, 工程师。研究方向: 土木工程。E-mail: 981255163@qq.com

***通讯作者:** Author for correspondence. E-mail: 981255163@qq.com

普通硅酸盐水泥(OPC)作为传统胶凝材料,已广泛用于基础设施建设,尤其在水利与道路工程中应用广泛^[1]。然而,OPC的大规模生产不仅消耗大量不可再生矿产资源,还伴随着显著的碳排放问题。研究表明,每生产1 kg OPC约产生0.66~0.82 kg的二氧化碳排放^[2],长期积累导致温室气体排放、固体废弃物堆积等一系列环境问题^[3,4]。因此,寻求环境友好、经济可持续的OPC替代材料,成为当前建筑材料领域的重要研究方向。

碱激发材料(AAMs)作为一种节能环保的胶凝体系,以富铝硅酸盐天然矿物或工业废料(如粉煤灰、粒化高炉矿渣、偏高岭土等)为主要原料,通过碱激发反应形成三维网络结构,具有显著的碳排放降低(约73%)与能耗减少(约43%)优势^[5-8]。其中,粉煤灰(FA)与粒化高炉矿渣(GGBS)因其来源广泛、SiO₂与Al₂O₃含量高,成为AAMs体系中最常用的原材料组合^[9]。FA/GGBS体系在常温或热养护条件下可形成水化硅酸钙(C-S-H)、铝硅酸钙(C-A-S-H)及地质聚合物凝胶(N-A-S-H)等产物^[10],显著提升材料的力学性能与早期强度。然而,高GGBS含量易导致材料干燥收缩与微结构细化,尤其在早期养护阶段可能影响长期耐久性^[11,12]。

为优化FA与GGBS体系的性能并进一步提升其工程适用性,近年来学者开始探索工业副产品的掺杂效应。烟气脱硫石膏(DG)作为燃煤电厂脱硫过程的副产品,其主要成分为CaSO₄·2H₂O,目前尚未得到有效利用,多被填埋处理。研究表明,硫酸盐的引入可促进氧化铝溶出,并促使纤维状钙矾石晶体生成,形成网络结构填充微孔,从而增强材料密实度、减少收缩,并提高力学强度^[13]。DG的双重作用机制,为改善FA与GGBS基材料的性能提供了新思路。近两三年的研究进一步表明,DG不仅可在FA-GGBS碱激发体系中促进AFt生成、改善早期强度,还可能对凝结时间、干燥收缩及硫酸盐环境下的强度保持产生影响;但DG过量时亦可能带来工作性下降、耐蚀性衰减或微裂纹风险,相关结论存在差异与争议^[14-16]。

目前,碱激发材料在道路工程中已展现出良好的应用潜力,可用于路基稳定、路面基层加固及排水结构回填等领域^[17]。然而,作为公路排水

管道回填材料,其力学性能—体积稳定性—耐久性仍需系统研究。本文重点聚焦于常温高湿养护条件下材料的强度发展与微观结构演化;关于干湿循环、化学侵蚀等复杂环境作用下的性能演变规律,将在后续工作中进一步研究。

因此,本文以FA与GGBS碱激发体系为基础,系统研究不同掺量DG对材料力学性能(早期与中期强度)及微观结构的影响规律。通过XRD与SEM等微观测试手段,揭示DG参与反应的物相演化与结构致密化机制,并讨论其作为公路排水管道固废回填材料的工程适用性与潜在耐久性表现。本研究旨在推动工业固废资源化利用,为绿色低碳道路材料的发展提供理论与技术支撑。

1 公路排水管道回填土的缺陷

1.1 压实度不足

回填土未达到设计压实度要求,存在松散区域,导致管道上方土体沉降,引发管道结构变形、接口渗漏。车辆荷载作用下,沉降差异加剧,易造成管道破裂,见图1所示。

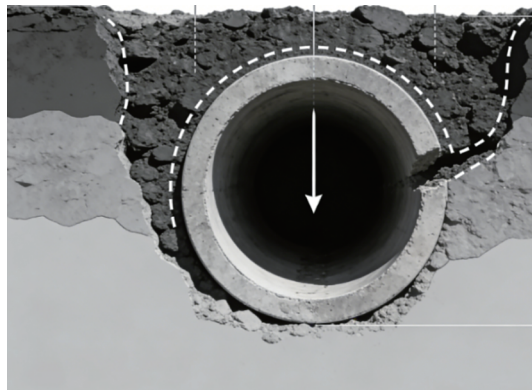


图1 管道沉降变形

Fig. 1 Pipeline settlement and deformation

1.2 回填材料不合格

使用腐殖土、冻土或粒径过大的石块等劣质材料,其物理力学性能不稳定,易发生二次固结。石块等硬物还可能直接挤压管道,造成局部应力集中破坏。

1.3 回填工艺不规范

未按分层回填、分层压实要求施工,或压实机械选择不当(如对管径较小的管道采用重型压路机),导致回填土密实度不均。管道两侧回填

不对称,易使管道产生侧向位移,见图2所示。

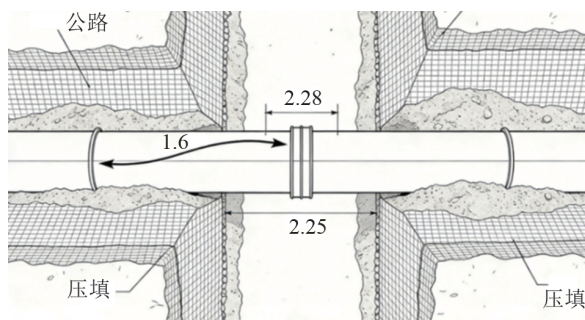


图 2 侧向位移平面图

Fig. 2 Lateral displacement plan

1.4 地下水影响

回填过程中遭遇雨水或地下水浸泡,土体含水率过高,碾压时出现“橡皮土”现象,无法达到有效压实。后期水分蒸发后,土体会产生较大孔隙,引发沉降。

1.5 与管道衔接不良

管道周边回填土未进行特殊处理,管腋部位压实不到位,形成空洞。在外部荷载作用下,管道易因受力不均而断裂,同时雨水渗入空洞加剧缺陷发展。

2 材料与方法

2.1 原材料

2.1.1 FA、GGBS 和 DG GGBS 和 FA 采集自位于中国湖北省的武汉华新水泥有限公司,DG 则由中国江苏省某煤矸石循环流化床电厂提供。原材料包括 FA、GGBS 和 DG,如图3所示。具体

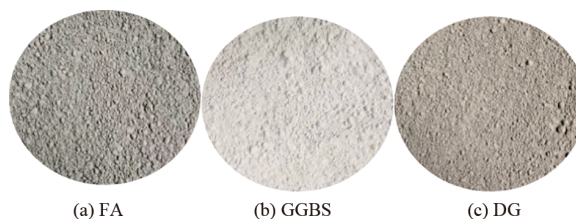


图 3 三种原材料的表现特征

Fig. 3 Apparent characteristics of three raw materials

而言,FA 呈浅灰色,而 GGBS 和 DG 分别为灰白色和灰黄色。SEM 图像如图4所示。可见,粉煤灰颗粒呈球形,且有一些微小杂质附着在 FA 表面,而 GGBS 则呈现不规则块状结构。DG 颗粒呈长柱状和近圆形。使用 EyeTech 激光粒度分析仪测量了三种原材料的粒度分布,结果总结于表1和图5。FA、GGBS 和 DG 的中位粒径(D50)分别为 12.793 μm 、12.423 μm 和 13.139 μm 。此外,表1显示颗粒的统计离散度(STD)小于 5 μm ,表明原材料具有良好的级配,从而保证地质聚合物性能的稳定性。

此外,通过 XRD 鉴定了所有原材料的化学和矿物组成,结果如表2和图6所示。如图6所示,GGBS 的 XRD 图谱显示出明显的无定形弥散峰。GGBS 含有 CaO 、 Al_2O_3 和 SiO_2 ,其中 Al_2O_3 和 SiO_2 是聚合反应的主要化学成分^[1,12]。方解石(CaCO_3)是 CaO 与 CO_2 碳化反应的产物。FA 是一种富硅铝材料,其中石英(SiO_2)和莫来石($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$)是主要化学成分。FA 中 CaO 的含量仅为 3.7%,试验中使用的这种 FA 属于低钙型。此外,在 DG 中发现了许多明显的硬石膏(CaSO_4)峰。

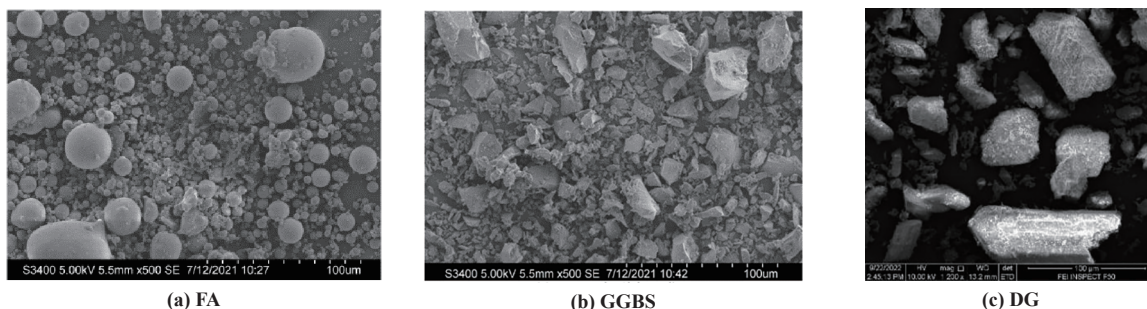


图 4 原材料 SEM 图像

Fig. 4 SEM images of raw materials

2.1.2 碱激发剂 采用的碱激发剂由纯度 96% 的 NaOH 、 SiO_2 含量 26.98 wt%、 Na_2O 含量 8.53 wt%、 H_2O 含量 64.49 wt% 的水玻璃以及去

离子水组成。氢氧化钠以固体颗粒形式制备,而水玻璃以溶液形式使用,其初始模数为 3.3。模数是一个无量纲单位,由 SiO_2 与 Na_2O 的摩尔比

表 1 原材料的物理性质					
Table 1 Physical properties of raw materials					
样品 Sample	比重 Specific gravity	粒度参数 Particle-size parameters			
		D10/ μm	D50/ μm	D90/ μm	STD/ μm
FA	1.84	2.683	12.793	83.746	4.08
GGBS	2.60	2.034	12.423	37.658	3.41
DG	1.88	4.767	13.139	82.427	3.22

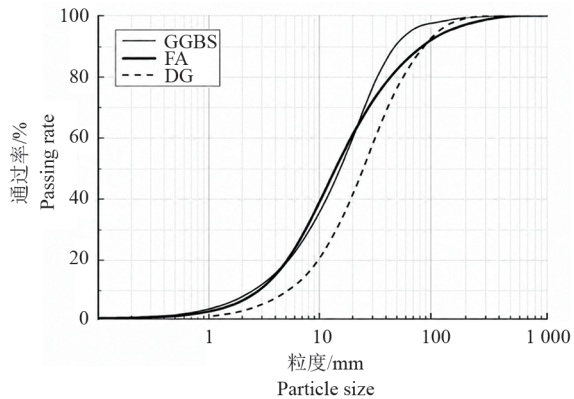


图 5 GGBS、FA 和 DG 的粒度分布
Fig. 5 Particle size distribution of GGBS, FA, and DG

表 2 原材料的化学成分						
Table 2 Chemical composition of raw materials						
含量/% Content	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
GGBS	36.82	26.75	19.66	-	0.32	11.1
FA	3.7	47.7	37.53	-	4.55	0.94
DG	34.75	1.93	0.4	41.27	0.26	0.26

值计算得出。通过添加氢氧化钠调整水玻璃的模数。本文中碱激发剂的模数分别确定为 1.0、1.2 和 1.4,旨在研究模数对力学性能的影响。碱激发剂的具体配合比列于表 3。模数值越小意味着碱激发剂含有更多的 OH⁻,反应体系的碱性越强。当向碱激发剂中添加不同质量的 NaOH 时,额外加水量也相应变化。

NaOH 溶解在硅酸钠溶液中会释放大热量,导致温度升高和水分挥发,因此碱激发剂在使用前需在密封状态下冷却至室温。

2.2 试验方案

2.2.1 选取依据 (1)GGBS 比例:GGBS 提供 CaO 以促进 C-(A)-S-H 生成并提升早期强度,但过高 Ca 含量可能加剧干燥收缩与体积稳定性风险。因此设置 GGBS:(FA+DG)为 70:30、60:40 与 50:50 三档,覆盖“高钙—中钙—低钙”反应体

系,用于比较强度增长路径与微观产物差异。
(2)DG 掺量:DG 提供 SO₄²⁻与 Ca²⁺,有利于促进 AFt 生成并填充孔隙,但过量硫酸盐可能残留并引发体积稳定性与强度劣化。基于前期预试验与相关研究中常见的有效掺量区间,本文将 DG 设置为 0%~12%,步长 2%,以捕捉“增强—劣化”的转折点并评估安全上限。

(3)激发剂模数:水玻璃模数反映溶液中 SiO₂/Na₂O 比例,进而影响 OH⁻浓度与硅铝溶解—聚合速率。工程上常采用低到中模数以兼顾反应活性与施工性,因此选取模数 1.0、1.2 与 1.4 三档,表征“强碱—中等—较弱碱”条件下 DG 的协同效应。

2.2.2 试验方案 以 DG 作为添加剂的地质聚合物浆体的配合比设计如表 4 所示。将 GGBS 和 FA 视为基本原材料,部分被 DG 替代以评估 DG 对最终强度的影响。为了使钙含量充足,能够与硅和铝元素反应,GGBS 占据了前驱体质量的大部分。这也能促进反应体系生成更多的 C-A-S-H 和 C-S-H,从而提高强度。如表 4 所示,根据 GGBS 与 (FA+DG)的质量比,将试验方案分为三组,分别为 70:30、60:40 和 50:50。对应的缩写表示为 S70、S60 和 S50。此外,DG 的应用旨在生成钙矾石以进一步填充铝硅酸盐凝胶内部的微孔,起到增强强度的作用,而过量的 DG 不利于最终强度的提高。DG 含量以 2% 为间隔从 0% 变化到 12%,以探究 DG 含量对最终强度的影响。在每组中,DG 分别占 FA 和 DG 总质量的 0%、6%、8%、10% 和 12%。因此,根据地聚合物三种组分含量的变化,共有十五种配合比方案。然而,需要注意的是,碱激发剂的 pH 值对碱激发地质聚合物的反应程度有显著影响。这可以通过添加 NaOH 改变模数来调整。在试验中,模数在表 3 中的 1.0、1.2 和 1.4 之间变化。综上所述,总共有四十五组方案。

如表 4 所示,碱激发剂与地质聚合物的质量比确定为 0.3,即每 100 g 地质聚合物添加 30 g 碱激发剂。此外,水灰比设定为 0.5,这是碱激发剂中的水和额外添加的水与地质聚合物及碱激发剂中固体质量之比。为满足地质聚合物的和易性要求,选择并测试了一系列比值,分别设为 0.3、0.4、0.5 和 0.6。结果表明,比值为 0.5 时具有最佳的流变性能,能更好地填充模具并成型。当

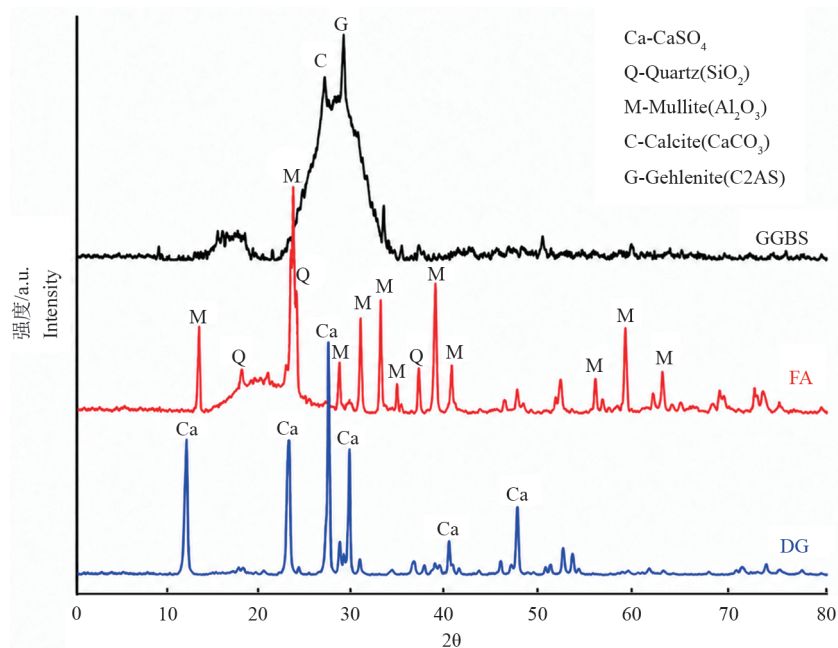


图 6 原材料的 XRD 图谱
Fig. 6 XRD patterns of raw materials

表 3 碱激发剂配合比
Table 3 Mix ratio of alkaline activator

模数 Modulus	水玻璃/g Water-glass	NaOH/g	额外加水/g Additional water
1	23.9	6.1	39.8
1.2	25.2	4.8	39.0
1.4	26.1	3.9	38.4

向碱激发剂中添加不同质量的 NaOH 时,额外加水量会变化,已在表 4 中计算得出。

2.3 试样制备

使用实验室浆料搅拌机制备地质聚合物。首先,将 FA、GGBS 和 DG 干混 300 s 以实现均匀混合。然后,加入碱激发剂并进一步搅拌 180 s 制成地质聚合物浆体,随后浇注到尺寸为 4 cm×4 cm×4 cm 的立方体模具中以进行强度测试。之后,将带模试样置于温度为 20±2℃、相对湿度为 95±5% 的养护室中养护,24 h 后脱模。脱模后的试样再次存放于养护室中分别养护 1 d、2 d、3 d、7 d 和 14 d。试样制备流程如图 7 所示。

2.4 测试方法

2.4.1 无侧限抗压试验 无侧限抗压试验参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2019)^[18]中立方体抗压强度测试的基本流

表 4 地聚合物与碱激发剂的配合比
Table 4 Mix ratio of geopolymer to alkaline activator

系列 Series	地聚合物质量百分比 Geopolymer mass percentage			碱激发剂/g	水胶比
				Alkali- activator	Water- binder ratio
	GGBS/g	FA/g	DG/g		
S70	70		30	30	0.5
			0		
			24		
			6		
			22		
	8				
	20	10			
	18	12			
S60	60		40		
			0		
			34		
			6		
			32		
	8				
	30	10			
	28	12			
S50	50		50		
			0		
			44		
			6		
			42		
	8				
	40	10			
	38	12			

程执行,并结合浆体试样特点进行适当调整。试样尺寸为 40 mm×40 mm×40 mm 立方体,分别在 1、2、3、7 和 14 d 龄期测量抗压强度。每种配合比与每个龄期设置 3 个平行试样,结果以平均值表示。加载采用位移控制,加载速率为 0.5 mm/min。抗压强度按式(1)计算:

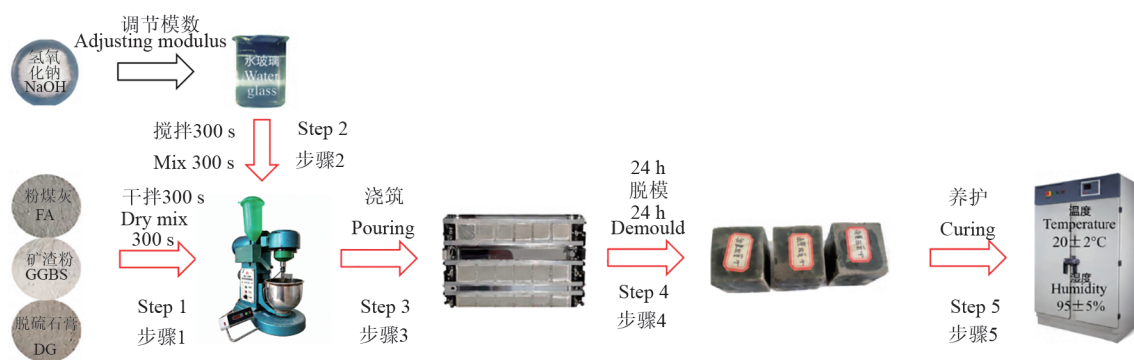


图7 试样制备流程

Fig. 7 Specimen preparation procedures

$$cs = P/A \quad (1)$$

其中: cs 为抗压强度 (MPa); P 为最大总荷载 (N); A 为承压面积 (mm^2)。

2.4.2 XRD 分析 为揭示 DG 对 FA-GGBS 地聚合物力学性能影响的微观机制,采用 X 射线衍射 (XRD) 分析了地聚合物的矿物成分和凝胶产物。用于 XRD 分析的样品取自抗压强度试验后的破碎样品,将其进一步研磨成细粉以满足 XRD 要求。XRD 仪器采用 $\text{Cu-K}\alpha$ 辐射源,电流 30 mA,电压 40 kV。XRD 数据扫描范围在 10° 至 80° 之间。

分析了 S60 组 DG 含量变化下的 XRD 图谱,旨在识别不同 DG 含量对地聚合物最终产物的影响。DG 含量在 0%、6%、8%、10% 和 12% 之间变化。养护龄期设定为 14 d,碱激发剂模数为 1.0。此养护条件被视为充分养护,可以达到最终强度。

同时,也考虑了养护龄期的影响,使用 S60-D6 试样进行分析。分析了 1 d、3 d 和 14 d 不同养护龄期下的 XRD 谱图。碱激发剂模数为 1.0。

2.4.3 SEM 观察 为揭示 DG 对 FA-GGBS 地聚合物力学性能影响的微观机制,采用扫描电子显微镜 (SEM) 观察各养护龄期下水化产物的矿物组成和微观结构。使用 FEI Inspect F50 高分辨率 SEM 对干燥并抛光的试样形貌进行成像,加速电压为 20.0 kV。

对 S60 组掺 6% DG 的 1 d、2 d 和 14 d 养护试样进行分析,以研究掺入 DG 后养护龄期对强度发展的影响;同时,采用 S60 组 DG 含量为 0%、6% 和 12% 的 3 d 养护试样,以揭示 DG 含量对微观结构的影响。

3 试验结果

3.1 DG 对抗压强度的影响

分析了 DG 对三元浆体体系早期抗压强度的影响。模数设定为 1.0,测定养护 1 d 试样的抗压强度。结果如图 8 所示。

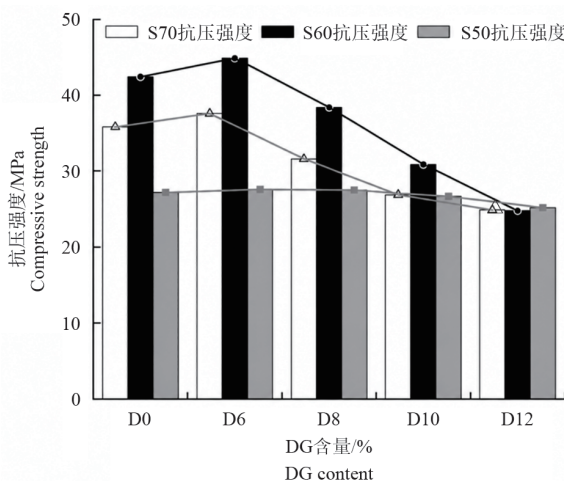


图8 模数为 1.0 时 DG 对抗压强度的影响

Fig. 8 Effect of DG on compressive strength at a modulus of 1.0

脱硫石膏 (DG) 的掺入对碱激发材料的抗压强度具有显著影响。对于 S60 与 S70 组,抗压强度随 DG 含量增加呈现先升高后降低的趋势,最佳 DG 掺量为 6%。在此掺量下, S60 的强度 (14.48 MPa) 高于 S70 (13.00 MPa),表明 S60 具有更高的聚合程度。相比之下, S50 组的抗压强度随 DG 掺量仅略有增加,整体保持稳定,且强度水平低于 S60 和 S70。值得注意的是,当 DG 含量达到 12% 时,所有体系的强度均劣化至相近的低水平。

碱激发材料的强度主要来源于两部分:一是通过水化反应生成的C-(A)-S-H凝胶与钙矾石(Aft);二是通过聚合反应形成的地质聚合物凝胶。其中,钙矾石呈针状微观形貌,能有效填充基体中的孔隙,从而显著提高强度;而地质聚合物凝胶形成类沸石网络结构^[19],其强度通常低于水化产物。DG中的 SO_4^{2-} 在体系中起着关键作用:适量时能促进粉煤灰(FA)中铝酸盐的溶出,与 Ca^{2+} 结合生成更多钙矾石,提升密实度与强度;过量时则会导致FA含量相对减少,活性硅铝酸盐不足,同时过量 SO_4^{2-} 自身对浆体强度产生负面影响。

对于S60和S70体系,适量的DG($\leq 6\%$)能显著提高强度,例如S60在6%DG时强度较基准提升约23%。然而,当DG超过6%后,FA减少,可用于生成凝胶和钙矾石的活性组分不足,且过量

的DG仅起惰性填充作用,导致强度下降。S70的整体强度低于S60,主要归因于其FA含量较低,活性 Al_2O_3 和 SiO_2 较少,凝胶与钙矾石生成量受限。S50体系FA含量最高而钙含量最低,强度发展主要依赖于地质聚合物凝胶,钙矾石的生成因钙源不足而受限,因此DG的掺入对其强度改善效果不明显,整体强度较低。

综上所述,DG对碱激发材料抗压强度的影响具有双重性,存在最佳掺量(约6%)。体系的钙含量与FA含量共同决定了DG的增强效果与强度发展路径。为确保力学性能,需严格控制各组分含量,避免DG过量。

3.2 模数对抗压强度的影响

还分析了不同模数下的影响。结果如图9所示。

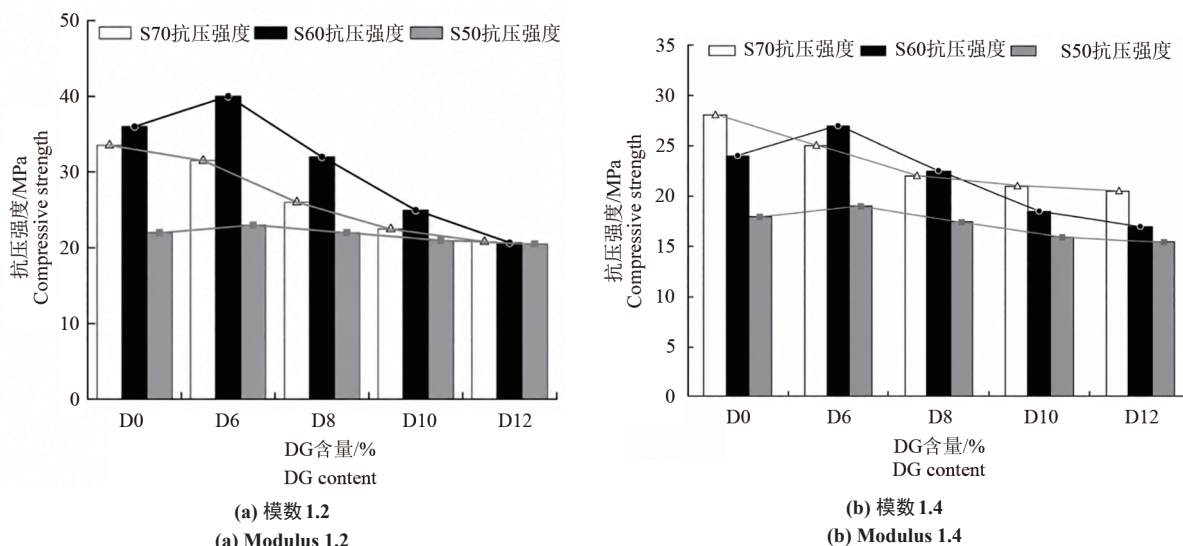


图 9 抗压强度随模数变化的规律

Fig. 9 Compressive strength variation pattern with modulus

碱激发剂的模数对碱激发材料的抗压强度具有显著影响。模数越高,反应体系中 OH^- 的含量越低,对粉煤灰(FA)中硅酸盐和铝酸盐的碱激发作用越弱,导致强度随模数增加而降低。以S60-6%DG组为例,当模数从1.0增至1.4时,抗压强度由14.48 MPa显著下降至1.5 MPa。

在不同模数条件下,S60与S70组均表现出相似的强度变化趋势:抗压强度随DG含量增加先升高后降低,且S60的整体强度始终高于S70。具体而言,当模数为1.2和1.4时,在最佳DG含量下,S60的强度分别比S70高15.34%和

18.39%。这主要归因于S70中FA含量较低,可用于生成凝胶与钙矾石的活性组分不足。

值得关注的是,最佳DG含量随模数升高而增加:模数为1.0、1.2和1.4时,对应的最佳DG含量分别为6%、8%和10%。在较高模数(即碱性较弱)的反应体系中,DG提供的 SO_4^{2-} 能增强氧化铝的溶出,起到“二次增强活化”的作用,从而显著提升聚合度与强度。这一效应在低碱环境中尤为突出,使得掺加DG的试件强度始终高于未掺加组,且增强率随模数增大而提高(以S60为例,模数为1.0、1.2和1.4时的强度提升率分别

为23.07%、56.91%和219.15%)。而在强碱性体系(模数1.0)中,过量的DG则会因活性原料不足和未反应DG的惰性填充作用,导致强度低于无DG的基准组。

在不同模数下,S50组的变化规律与上述类似,其强度提升效应在低碱环境中更为显著,且最佳DG含量在模数为1.2和1.4时均对应10%。综合而言,DG的掺入不仅能有效提高碱激发材料的强度,尤其在低碱体系中增强效果更为明显,还具有提升固体废物利用率的环保与经济价值。

3.3 GGBS对抗压强度的影响

在未添加DG的GGBS和FA二元浆体体系中分析了GGBS对抗压强度的影响,同时分析了不同模数的影响。结果如图10所示。

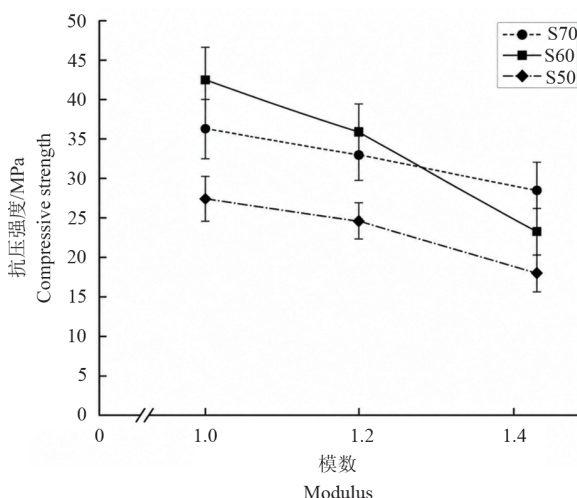


图10 GGBS对抗压强度的影响

Fig. 10 Effect of GGBS on compressive strength

需要注意的是,抗压强度主要来源于水化C-(A)-S-H产物和聚合反应生成的地质聚合物凝胶。地质聚合物凝胶具有三维网络结构特征,被认为比水化产物具有更高的强度。钙、硅酸盐和铝酸盐是必要的主要化学成分。根据表2中的化学成分,钙主要由GGBS提供,其中CaO含量为36.82%,而在FA中仅为3.7%。 SiO_2 和 Al_2O_3 是FA中的主要化学成分,其含量远高于GGBS中的含量。FA和GGBS的相对含量对形成抗压强度起着重要作用。

当模数为1.0,碱激发剂碱度浓度最高时,在 OH^- 作用下,更多的Si-O和Al-O四面体单体可以被充分释放。对于S70二元浆体,FA含量占

30%,与S60相比,S70组不能提供足够的活性硅酸盐和铝酸盐来生成同等量的C-(A)-S-H和地质聚合物凝胶。此外,在高钙反应体系中,由于更容易生成C-(A)-S-H,聚合反应受到阻碍。这体现在S70的抗压强度低于S60。此外,在三种二元地质聚合物中,S50的强度最低。这是因为钙的缺乏,导致凝胶产物含有更多的N-A-S-H和更少的C-A-S-H。这低于S60和S70。

模数的增加意味着碱激发剂中 OH^- 减少,导致对硅酸盐和铝硅酸盐的碱激发作用减弱,特别是对聚合反应的影响。因此,二元地质聚合物的抗压强度均随模数增加而降低。然而,S70的强度变化最慢。在模数为1.2时,S60和S70之间的强度差异小于模数为1.0时,而当模数为1.4时,S70的抗压强度高于S60。这是因为在低碱反应体系中,地质聚合物凝胶的生成受到阻碍,进一步降低了抗压强度。S70组具有最高的钙含量,活性硅酸盐和铝酸盐在高钙反应体系中更容易与钙反应生成C-(A)-S-H,从而提高强度。因此,当碱性相对较低时,高钙含量有助于强度提高。

3.4 DG对强度随养护龄期变化的影响

分析了三组DG含量为6%时抗压强度随养护龄期的变化趋势。选择的养护龄期为1 d、2 d、3 d、7 d和14 d。结果如图11所示。

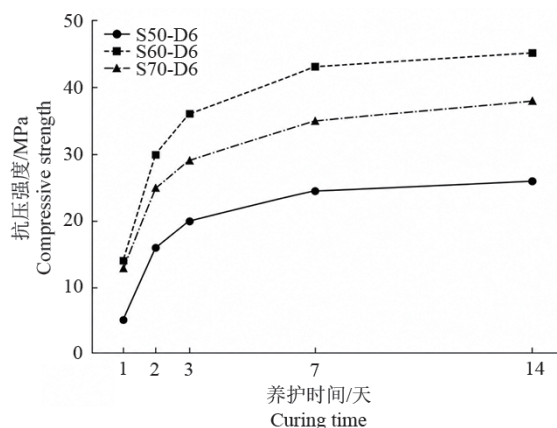


图11 抗压强度随养护龄期的变化

Fig. 11 Compressive strength variation with curing age

对于1 d养护龄期,S70-D6和S60-D6的强度相同且高于S50-D6,这是由于高钙反应体系有助于生成更多的C-(A)-S-H凝胶和钙矾石产物,进一步提高了早期强度,这在强度组成中起

主要作用。碱激发材料的强度在前 3 d 内迅速增长,并在 7 d 时趋于稳定。3 d 养护龄期的强度可达到 14 d 最终强度的 76.92%、79.70% 和 76.84%。3 d 养护龄期可被视为强度发展过程中的一个关键时间点。随后,随着养护龄期延长至 14 d,7 d 龄期的强度略有增长,S50-D6、S60-D6 和 S70-D6 的增长率分别为 6.12%、4.56% 和 7.52%。就最终强度而言,S60-D6 高于 S70-D6 和 S50-D6。FA 中的活性硅酸盐和铝酸盐与金属离子和硫酸盐反应生成 C-(A)-S-H 凝胶、钙矾石和地质聚合物凝胶。高钙含量易于在早期养护期间与活性硅酸盐和铝酸盐反应,并且在养护过程中阻碍了地质聚合物凝胶的生成,导致最终强度降低。这适用于 S70-D6 和 S60-D6 的比较。此外,低钙不利于 C-(A)-S-H 凝胶提供强度和钙矾石的孔隙填充效应。因此,S50-D6 的强度最低。可以得出结论,钙含量也应加以控制,以平衡早期强度和最终强度。

3.5 XRD 分析

通过 XRD 对 S60 组在不同 DG 含量及养护龄期下的物相演变进行了分析,相关图谱如图 12-13 所示。结果表明,体系矿物组成复杂,主要检测到硅酸钙(Ca_3SiO_5)、莫来石($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$)、石英(SiO_2)、方解石(CaCO_3)、硬石膏(CaSO_4)、钙矾石($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$)及少量马加迪石($\text{Na}_2\text{Si}_4\text{O}_{29} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)等物相^[20]。

随着 DG 掺量增加,体系中钙含量相应升高,促进了水化反应进程,表现为硅酸钙(对应 C-(A)-S-H 凝胶)及钙矾石的特征衍射峰逐渐增强,尤其在 6% DG 时最为显著,同时硬石膏峰几乎消失,说明此时 SO_4^{2-} 被充分消耗并转化为钙矾石。钙矾石能有效填充基体微孔隙,有利于强度发展。然而,钙含量的增加也对聚合反应产生抑制作用,表现为约 30° 处的无定形弥散峰(代表地质聚合物凝胶)随 DG 增加逐渐减弱,说明凝胶相生成量减少。

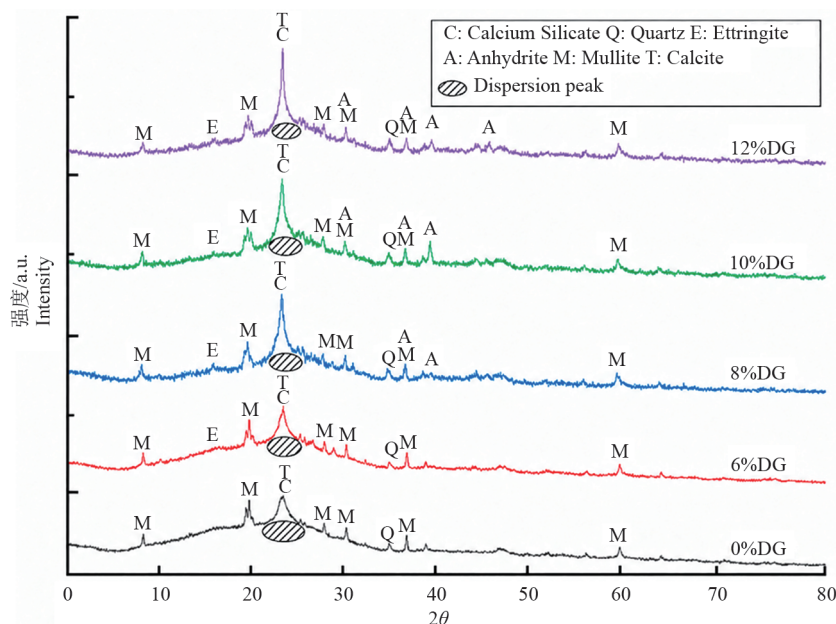


图 12 掺入不同 DG 含量的地质聚合物的 XRD 图谱

Fig. 12 XRD patterns of geopolymers with different DG contents

当 DG 超过 6% 后,粉煤灰含量降低,活性硅铝酸盐相对不足,无法完全消耗新增的 Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} ,导致硬石膏衍射峰再度增强,表明有过量 SO_4^{2-} 残留。尽管钙矾石峰继续增强,但大量 SO_4^{2-} 的存在对浆体强度具有劣化作用,同时地质聚合物凝胶的减少进一步削弱了三维网络结构的整体强度。因此,尽管水化产物量增加,但宏观

抗压强度在 $\text{DG} > 6\%$ 后仍持续下降。

不同养护龄期的 XRD 谱图显示,随养护时间延长(1 d→14 d),部分在早期出现的莫来石特征峰逐渐消失,表明活性硅铝酸盐持续参与反应^[21];同时硬石膏峰在 14 d 时已不可见,说明 SO_4^{2-} 在后期被逐步消耗并转化为钙矾石,这一过程有助于孔隙填充和强度增长。

DG的掺入显著改变了体系的物相组成与反应路径:适量DG(约6%)可优化钙矾石与C-(A)-S-H生成,提升密实度与强度;过量则导致 SO_4^{2-}

残留与凝胶相减少,反而造成强度下降。此外,钙矾石的形成是一个随时间发展的过程,其长期生长对强度具有积极贡献。

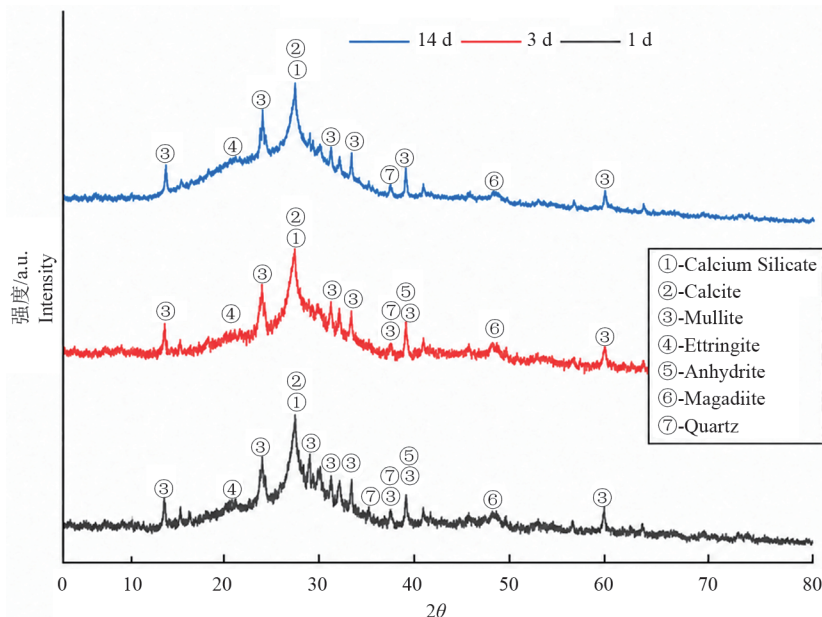


图 13 S60组养护龄期变化下的XRD谱图

Fig. 13 XRD patterns of group S60 at different curing ages

3.6 SEM观察

通过对S60组地质聚合物浆体在不同DG含量及养护龄期下的SEM图像观察,可以分析其微观结构演变及其对宏观力学性能的影响。

图14显示了含6% DG的浆体在不同养护龄期下的微观形貌。在1 d龄期时,钙矾石已开始形

成,呈现极其细长的针状特征,同时无定形的絮状凝胶产物随机分布,覆盖于原材料表面。至3 d龄期,钙矾石进一步发育,棒状晶体明显变粗,凝胶产物大量生成并与钙矾石相互交织。养护至14 d时,钙矾石数量持续增加,与凝胶产物交错生长,形成更为致密的结构,孔隙显著减少。

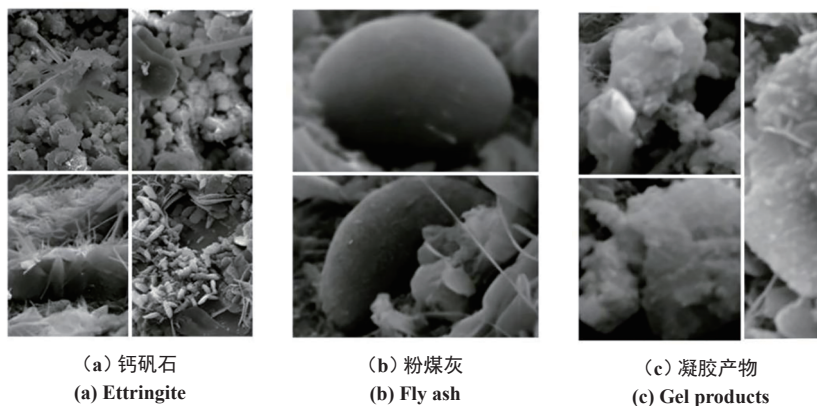


图 14 S60-D6各成分SEM图像

Fig. 14 SEM images of components in S60-D6

图15展示了3 d养护龄期下,不同DG含量对浆体微观结构的影响。当不含DG时,基体内部存在大量微裂纹与尺寸较大的孔隙,凝胶以絮

状团簇形式分布,结构疏松。引入6% DG后,微观结构显著致密化,未见明显裂纹。凝胶产物大量增加并形成连续三维网络,同时可见细长针状

钙矾石与板状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 分布于凝胶中, 孔隙尺寸减小, 展现出良好的微观填充效果。

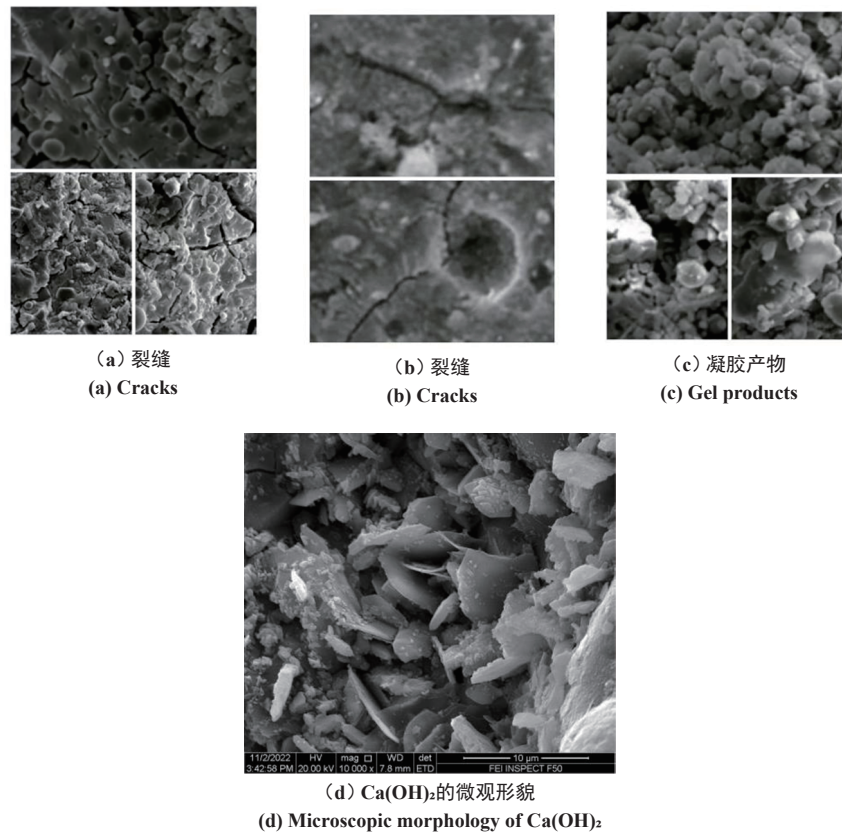


图 15 3 d 养护龄期下, 不同 DG 含量对浆体微观结构的影响

Fig. 15 Effects of different DG contents on the microstructure of the paste at a 3-day curing age

综上, SEM 分析表明, 适量 DG(6%) 可促进凝胶生成与钙矾石形成, 协同提升微观结构致密性; 而过量 DG 则引发裂纹增多、孔隙增大等缺陷, 导致结构劣化。养护龄期延长有利于钙矾石发育与凝胶网络完善, 进一步提升材料密实程度。这些微观特征的变化与宏观力学性能具有明确的对应关系。

4 讨论

关于“最佳”掺量的界定: 回填材料的“最佳”应为多指标权衡结果。鉴于本文试验以强度与微观结构为主, 本文所称“最佳 DG 掺量”限定为在给定水胶比与养护条件下, 使 1~3 d 早期强度提升显著, 同时 14 d 强度不劣化且微观结构更致密的组合; 工程应用中仍需结合流动度/和易性、凝结时间、干燥收缩、渗透性及经济性等指标进一步校核并优化。

本文的研究结果与前人关于 DG(脱硫石膏)

掺量对材料早期强度促进作用的研究结论一致。实验数据显示, 适量 DG(6%) 能够有效促进钙矾石的生成, 进而增强早期强度。图 8 中的宏观抗压强度与图 15 中的微观结构图像可以相互印证, 表明钙矾石的形成和微观结构的致密化是强度提升的关键机制。当 DG 掺量为 6% 时, S60 组强度提高了约 23%, 此时材料呈现出更为紧密的凝胶网络结构与钙矾石颗粒。通过 SEM 图像(图 15)我们可以清晰看到, 在 6% DG 条件下, 凝胶结构和钙矾石共同作用, 形成了均匀分布且微裂纹较少的致密结构。

然而, DG 掺量过高时, 强度反而会出现下降。实验结果表明, 当 DG 掺量超过 6% 时, DG 对材料的增强作用减弱, 甚至对最终强度产生负面影响。这是因为过量的 DG 会导致体系中硫酸根的过剩, 造成过多的钙矾石生成后产生抑制效应, 进而影响凝胶相和钙矾石的稳定生成, 最终导致强度下降。这一点在图 8 和图 15 中的数

据及图像中得到了体现,图15显示,在12%DG的条件下,孔隙增多且微结构松散,强度表现低于6%DG时的样本。

此外,碱激发剂模数对DG的协同作用也表现出显著影响。在低模数条件下,体系反应较为困难,此时DG提供的 SO_4^{2-} 离子能显著促进铝相的溶出,从而增强材料的强度。随着模数的增加, OH^- 浓度降低,DG的增强作用愈加突出,这一现象在S60组(图9)和S70组中也得到了证实。不同模数下DG最佳掺量的变化规律揭示了DG与碱激发体系之间复杂的协同效应。

综上所述,本研究不仅验证了DG在碱激发体系中的双重作用,还深入分析了DG掺量与碱激发剂模数对强度与微观结构的影响,并为后续固废资源化利用提供了宝贵的实验数据和理论依据。

5 结论

本研究以粉煤灰(FA)、粒化高炉矿渣(GGBS)和烟气脱硫石膏(DG)为主要原料,构建了一种适用于公路排水管道回填的三元碱激发复合材料系统。通过系统研究不同DG掺量、GGBS比例、碱激发剂模数及养护龄期对材料强度发展和微观结构的影响,结合XRD与SEM分析,揭示了DG在体系中的作用机制及其对材料力学特性与耐久性的影响规律,得出如下结论:

(1)DG的掺入可显著提升材料的早期强度,尤其在低碱性反应体系中,其强度提升效果更为显著。DG中的 SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 反应生成钙矾石(Aft),在微观结构中填充孔隙,增强基体密实度,进一步提高材料的早期强度。同时,DG在体系中还具有促进C-(A)-S-H凝胶生成的作用,从而增强了强度和结构稳定性。

(2)DG的作用机制包括促进铝硅酸盐中的氧化铝溶出,进而提高聚合反应程度。在碱性较低的环境下,DG提供的 SO_4^{2-} 离子能显著促进铝相溶出,增强反应体系的聚合效果,并进一步提升材料的强度。

(3)高钙含量虽有助于早期强度的提升,但过量的钙会抑制地质聚合物凝胶(如N-A-S-H)的生成,从而对最终强度发展产生不利影响。因此,需合理控制GGBS与DG的掺量比例,避免过量DG对后期强度和体积稳定性产生负面

影响。

(4)当DG掺量超过6%时,硫酸盐可能残留并影响材料的结构稳定性。过量DG的惰性填充效应将导致凝胶相生成减少,进而影响强度的持续提升。因此,建议将DG控制在不超过12%,并综合考虑“强度—体积稳定性—施工性”多项指标来确定工程应用中的推荐掺量。

说明:本文耐久性分析主要基于XRD/SEM对产物与孔隙特征的表征,尚缺少干燥收缩、渗透性以及干湿循环/化学侵蚀等直接耐久性试验数据。后续工作将补充收缩、吸水/渗透与硫酸盐侵蚀、冻融和干湿循环等试验,以建立宏观耐久性指标与微观结构之间的定量关联。

本研究不仅揭示了DG在碱激发材料中的作用机制,还为多元固废资源化利用提供了理论支持。未来的研究可进一步探索干湿循环、化学侵蚀等环境条件下材料的长期耐久性,以完善固废回填材料的应用性评价体系,并推动低碳绿色建材的广泛应用。

参考文献

- [1] Zhang P, Gao Z, Wang J, et al. Properties of fresh and hardened fly ash/slag based geopolymer concrete: A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 270:122389.
- [2] Peng J, Huang L, Zhao Y, et al. Modeling of carbon dioxide measurement on cement plants[C]//Xu QJ, Ju YH, Ge HH, eds. Progress in Environmental Science and Engineering, 2013:2120.
- [3] Zhang J H, Ding L, Li F, et al. Recycled aggregates from construction and demolition wastes as alternative filling materials for highway subgrades in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 255: 120223.
- [4] Zhang J H, Li C, Ding L, et al. Performance evaluation of cement stabilized recycled mixture with recycled concrete aggregate and crushed brick [J]. Construction and Building Materials, 2021, 296: 123596.
- [5] Almutairi A L, Tayeh B A, Adesina A, et al. Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review[J]. Case Studies in Construction Materials, 2021, 15:e00733.
- [6] Sandanayake M, Law D, Sargent P. A new framework for assessing the environmental impacts

- of circular economy friendly soil waste-based geopolymer cements[J]. *Building and Environment*, 2022, 210:108702.
- [7] Gonçalves M, Novais R M, Senff L, et al. PCM-containing bi-layered alkali-activated materials: A novel and sustainable route to regulate the temperature and humidity fluctuations inside buildings[J]. *Building and Environment*, 2021, 205:108281.
- [8] Meyer C. The greening of the concrete industry[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31(8): 601-605.
- [9] 杨 达, 庞来学, 宋 迪, 等. 粉煤灰对碱激发矿渣/粉煤灰体系的作用机理研究[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(09):3005-3011.
- [10] 周 宇, 徐 方, 顾功辉, 等. 地聚合物早期抗压强度及分子动力学模拟[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(01):93-98+120.
- [11] Thomas R J, Lezama D, Peethamparan S. On drying shrinkage in alkali-activated concrete: Improving dimensional stability by aging or heat-curing[J]. *Cement and Concrete Research*, 2017, 91:13-23.
- [12] Matalkah F, Salem T, Shaafaey M, et al. Drying shrinkage of alkali activated binders cured at room temperature[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 201:563-570.
- [13] 郭晓璐, 施惠生. 脱硫石膏粉煤灰地聚合物抗压强度和反应机理[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(04):573-577.
- [14] 苏文轩, 宁宝宽, 刘剑平, 等. 水泥与碱激发材料协同固化氯盐渍土的机理研究[J]. *建筑材料学报*, 2025, 28(01):26-32+41.
- [15] Zhou X, Wang X, Yu W, et al. Utilization of desulfurization gypsum in alkali-activated mortar: Performance enhancement and microstructural evolution[J]. *Buildings*, 2025, 15(19):3628.
- [16] Gökçe H S. Durability of slag-based alkali-activated materials: A critical review[J]. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 2024, 60(3):885-903.
- [17] 马亨通, 郝志红, 吴天齐, 等. 基于砂土与壤土的流态固化土工程性能及植生特性对比研究[J]. *水电能源科学*, 2025, 43(12):78-83.
- [18] GB/T 50081—2019. 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社, 2019.
- [19] Provis J L, Lukey G C, van Deventer J S J. Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? A reexamination of existing results[J]. *Chemistry of Materials*, 2005, 17(12):3075-3085.
- [20] Li F P, Chen D F, Yang Z M, et al. Effect of mixed fibers on fly ash-based geopolymer resistance against carbonation[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 322:126394.
- [21] Song W, Zhu Z, Pu S, et al. Multi-technical characterization and correlations between properties of standard cured alkali-activated high-calcium FA binders with GGBS as additive[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 241:117996.