

引用格式:郝逸飞,王雪寒,张默,等.水下管道填充复合激发高容重泡沫混凝土性能试验研究[J].北京工业大学学报,2025,51(8):957-965.

HAO Y F, WANG X H, ZHANG M, et al. Experimental study on properties of composite excited high volume weight foamed concrete filled with underwater pipeline[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2025, 51(8): 957-965. (in Chinese)

水下管道填充复合激发高容重泡沫混凝土性能试验研究

郝逸飞^{1,2}, 王雪寒^{1,2}, 张默^{1,2}, 潘竹^{1,2}

(1. 河北工业大学天津市装配式建筑与智能建筑重点实验室, 天津 300401;

2. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

摘要:为了解决地聚物泡沫混凝土(geopolymer foam concrete, GFC)的凝结时间与施工需求不匹配、高容重情况下抗压强度过高、不利于后期开挖检修等问题,基于回填料性能需求,采用单因素试验法揭示石膏掺量、硅酸钠掺量和前驱体比例对GFC的流动性、凝结时间和抗压强度的影响规律。结合X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)研究GFC水化反应产物,提出一种水下管道填充复合激发高容重泡沫混凝土。试验结果表明:增加硅酸钠掺量可显著提高GFC的流动度和抗压强度,凝结时间先增加后降低,石膏掺量的增加呈现抗压强度先上升后下降的趋势。石膏激发的GFC会为早期生成的钙矾石提供强度,掺入硅酸钠后,会生成无定形的C-S-H凝胶。复合激发高容重GFC的制备可以为水下油气管道的回填保护提供思路。

关键词:地聚物泡沫混凝土;隧道填充;抗压强度;凝结时间;复合激发;石膏

中图分类号: TU

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2025)08-0957-09

doi: 10.11936/bjtxb2023110030

Experimental Study on Properties of Composite Excited High Volume Weight Foamed Concrete Filled With Underwater Pipeline

HAO Yifei^{1,2}, WANG Xuehan^{1,2}, ZHANG Mo^{1,2}, PAN Zhu^{1,2}

(1. Tianjin Key Laboratory of Prefabricated Buildings and Intelligent Buildings, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. College of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: The setting time of geopolymer foam concrete (GFC) does not match with the construction demand, and the pressure resistance is too high in the case of high volume weight, which is not conducive to the subsequent excavation and maintenance. Based on the performance requirements of backfill, the effects of gypsum content, sodium silicate content and precursor ratio on the fluidity, setting time and compressive strength of GFC were revealed using single factor test. A composite excited high volume weight foamed concrete for underwater pipeline filling was proposed by X-ray diffraction (XRD) for the study of GFC hydration products. The test results indicate that the fluidity and compressive strength of GFC can be significantly improved with the increase of sodium silicate content, the setting time rises first and then falls, and the compressive strength increases first and then decreases with

收稿日期: 2023-11-29; 修回日期: 2024-02-22

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E2021202115)

作者简介: 郝逸飞(1985—), 男, 教授, 主要从事特种材料、结构抗爆抗冲击、应急防护方面的研究, E-mail: yifei.hao@hebut.edu.cn

increasing gypsum content. The gypsum excited GFC provides strength in the early formed ettringite, which produces an amorphous C-S-H gel when mixed with sodium silicate. The composite excited polymer foam concrete with high bulk density prepared in this paper provides a new idea for backfilling protection of underwater oil and gas pipelines.

Key words: geopolymer foam concrete; tunnel filling; compressive strength; setting time; compound excitation; gypsum

石油和天然气作为重要战略资源,影响国家的经济发展和社会稳定。为了适用于多种复杂地质环境,满足穿越河流的要求,同时避免在地面架设时管道被蓄意破坏,近年来油气管道多选择在水下盾构隧道中铺设,多采用隧道泡沫混凝土回填对水下油气管道进行保护。泡沫混凝土回填可以防止管道遭遇外力破坏,并且具有防腐蚀、开挖维护方便、为水下大断面盾构隧道提供重力抵抗水下浮力等优点^[1-2]。

基于长输管道全生命周期的建设维护需求,不同施工阶段对回填泡沫混凝土的行为及性能提出不同要求,各阶段施工流程与泡沫混凝土性能要求如下:

1) 设计阶段。为满足大断面盾构隧道水下抗浮力设计等要求,要求回填料密度大于水密度,一般要求泡沫混凝土的设计干密度为 $1\ 100\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

2) 泵送阶段。由于隧道内作业空间过于狭小,且隧道铺设距离较远,在地面采用粉料加水搅拌成为浆料,通过泵送机器的管道运输至浇筑点附近。

3) 填充阶段。对浇筑地点附近的浆料添加预制泡沫和促凝材料并充分混合内后,进行回填浇筑施工,为满足浇筑和工期要求,泡沫混凝土的流动度要求大于 $160\ \text{mm}$ 、初凝时间控制在 $6\ \text{h}$ 以内。

4) 维护阶段。为保证管道内后期运营维护便捷性,要求回填材料强度小于 $3\ \text{MPa}$ 。

综合上述施工阶段,泡沫混凝土性能要求如表 1 所示。

目前,大多数回填泡沫混凝土均采用水泥制备。但水泥基泡沫混凝土在泵送过程中存在凝结堵管现象,需额外添加缓凝剂,到达运输地点后再添加促凝材料来保证工期需求。水泥的使用也会加大生产能耗、增加碳排放。地聚物胶凝材料作为一种由活性硅铝酸盐在碱性介质中反应合成的新型胶凝材料,被认为是新型的水泥替代品^[3-4]。地聚物材料可完全利用粉煤灰、矿粉等工业固废制备,具有绿色环保、能耗低、耐久性强的特点^[5-6]。如图 1 所示,基于

表 1 回填泡沫混凝土性能要求

Table 1 Performance requirements for backfilled foam concrete

性能指标	参数
密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 100
流动度/mm	>160
初凝时间/h	<6
28 d 抗压强度/MPa	<3

隧道回填工艺,利用地聚物前驱体遇水基本不反应的特点,将前驱体与水的混合物泵送至隧道内部浇筑地点,根据回填材料凝结时间需求,灵活复掺激发剂和预制泡沫,形成分离式泡沫混凝土工艺,并且在泵送阶段不添加缓凝剂,简化施工工艺。

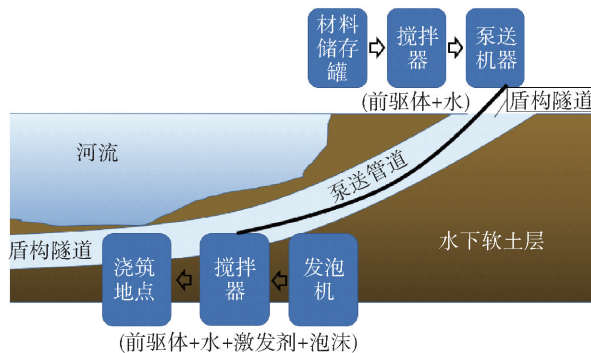


图 1 水下隧道回填施工示意

Fig. 1 Underwater tunnel backfill construction diagram

地聚物泡沫混凝土 (geopolymer foam concrete, GFC) 在同等密度的情况下,基体强度对 GFC 抗压强度影响较大,地聚物基体强度会受到激发剂含量、种类和前驱体材料类型及比例等因素影响^[7-10]。Ma 等^[11]研究表明石膏比硅酸钠活化地聚物强度更低。Wu 等^[12]的研究发现在地聚物胶凝体系中加入 5% 的石膏会导致强度降低。Deb 等^[13]研究表明矿渣掺量和水玻璃含量增加都会导致抗压增加,含 20% 矿渣比含 10% 矿渣的地聚核物混凝土抗压强度提高了 17%。降低 GFC 强度通常伴随着凝结时间的

延长,不利于施工的推进。常用的固废材料在碱液中的反应活性由大到小顺序依次为矿渣、粉煤灰^[14]。Samson 等^[15]研究认为少量石膏的加入会导致初始凝结时间和最终凝结时间延迟。Gijbels 等^[16]认为增加 Na₂O 含量会缩短地聚物的初始凝结时间,增加抗压强度。Atis 等^[17]研究发现体系中随着 Na⁺ 浓度的增加,碱活化矿渣的终凝时间缩短,随着 c(SiO₂)/c(Na₂O) 的增加,活性矿渣膏体的终凝时间也随之减少。因此,研究添加石膏降低 GFC 强度和添加硅酸钠加快凝结时间的协同作用,有助于解决施工过程中的抗压强度和凝结时间平衡问题。

本文通过调整前驱体比例、激发剂含量和种类研究其对流动度、凝结时间和抗压强度的影响,利用石膏和零水偏硅酸钠复合激发粉煤灰,利用矿粉制备符合隧道填充的 GFC,从反应产物角度揭示抗压

强度形成机理。本研究可以为水下隧道填充的可持续和高性能发展提供研究基础。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

GFC 由粉煤灰、矿粉、石膏、零水偏硅酸钠、水、泡沫拌和而成。粉煤灰和矿粉为江苏地区某工厂生产的 S75 矿粉和 II 级粉煤灰。粉煤灰、矿粉和石膏的质量分数如表 2 所示。X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 如图 2 所示,粉煤灰中主要成分为石英和莫来石,石膏的主要成分为二水硫酸钙。固体零水偏硅酸钠粉末作为碱性激发剂,成分为 Na₂SiO₃, c(SiO₂): c(Na₂O) = 1。发泡剂为密度为 1.13 kg/L 的 HTW-1 复合型发泡剂,性能指标如表 3 所示。

表 2 原材料质量分数

Table 2 Mass fraction of raw materia

%

原材料	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(CaO)	w(Fe ₂ O ₃)	w(TiO ₂)	w(K ₂ O)	w(SO ₃)	w(MgO)	w(SrO)	w(ZrO ₂)	w(MnO)	w(BaO)	w(ZnO)	w(F)	w(PbO)	w(P ₂ O ₅)
粉煤灰	48.71	27.92	8.47	7.87	2.32	1.75	1.25	0.75	0.40	0.17	0.13	0.07	0.05	0.02		
矿粉	28.59	13.36	45.35	0.50	1.63	0.34	2.40	7.13	0.13	0.07	0.32	0.13				
石膏	11.10	4.53	33.70	1.87	0.20	0.89	42.50	3.01	0.50	0.14	0.03			0.14	0.07	

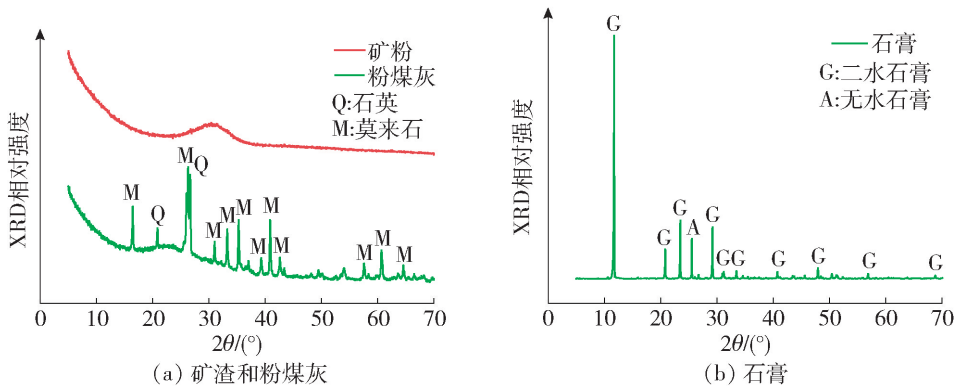


图 2 矿渣、粉煤灰和石膏的 X 射线衍射示意

Fig. 2 X-ray diffraction pattern of slag, fly ash and gypsum

表 3 发泡剂性能特性

Table 3 Performance characteristics of blowing agent

稀释倍数	沉降距/mm	泌水量/mL	发泡倍数	pH(未稀释)
1:50(发泡剂:水)	1	6	31.4	7.1

1.2 配合比设计

根据表 1 的性能指标,研究石膏、硅酸钠掺量及前驱体比例对 GFC 流动度、凝结时间及抗压强度的影响,本试验采用单因素调控法以满足工程对抗压强

度和凝结时间的需求。试验共设计 12 种配合比,水胶比均为 0.4,配合比计算在保证预设干密度为 1 100 kg/m³ 情况下,根据体积计算每 m³ 的各个材料占比及质量,剩余体积采用泡沫填充。此试验方法是

通过调整石膏掺量控制抗压强度;添加硅酸钠进行凝结时间及流动度调控,确定激发剂含量及类型;利用前驱体比例对回填泡沫混凝土综合性能进行调控。

试验配合比设计如表4所示,其中A组(只有A1)为基准组,未掺入任何石膏或硅酸钠,B组(包括B1、B2、B3、B4)为单掺石膏组,石膏质量分数分

别为2%、6%、10%、15%。通过前期试验对比,选择抗压强度符合的B1掺入硅酸钠。C组(包括C1、C2、C3、C4)在B1基础上通过调整硅酸钠比例调节其凝结时间及流动度,硅酸钠质量分数分别为0.5%、1.5%、2.0%、3.0%。通过前期试验对比,D组在C1组基础上调整前驱体比例。

表4 GFC配合比

Table 4 Mix proportion of GFC

编号	材料用量/(kg·m ⁻³)					
	水	粉煤灰	矿粉	硅酸钠	石膏	泡沫
A1	366.7	458.3	458.3	0.0	0.0	18.1
B1	366.7	449.2	449.2	0.0	18.3	18.1
B2	366.7	430.8	430.8	0.0	55.0	18.1
B3	366.7	412.5	412.5	0.0	91.7	18.1
B4	366.7	389.6	389.6	0.0	137.5	18.1
C1	366.7	444.7	444.7	9.2	18.3	18.1
C2	366.7	436.1	436.1	27.5	18.3	18.1
C3	366.7	431.9	431.9	36.7	18.3	18.1
C4	366.7	423.7	423.7	55.0	18.3	18.1
D1	366.7	263.2	626.2	9.2	18.3	18.1
D2	366.7	626.2	263.2	9.2	18.3	18.1
D3	366.7	807.8	81.7	9.2	18.3	18.1

1.3 试件制备过程

首先将发泡剂和水按照质量1:50的比例制备成发泡溶液置入发泡机中预制泡沫;再将前驱体材料和水按照所需量称取后置入搅拌机中搅拌3 min至混合均匀;随后加入所需质量的激发剂继续搅拌3 min。称取所需泡沫体积置于搅拌机中同净浆一同匀速搅拌2~3 min至表面没有白色泡沫,测量GFC浆体密度,若不满足密度要求则继续添加泡沫并称重至满足要求;将制得的浆体部分装入流动度和凝结时间模具中,部分浇注成70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm试块,覆保鲜膜在自然条件下养护1 d后脱模并置于标准养护条件(温度(20±2)℃,湿度95%)下养护至测试龄期。

1.4 试验方法

1) 流动度测试方法

根据《气泡混合轻质土填筑工程技术规程》(CJJ/T 177—2012)^[18]中流动度的测试方法,采用直径80 mm、高80 mm的圆筒模具对新拌泡沫混凝土浆体的流动度进行测试。将新拌泡沫混凝土浆体倒入圆筒模具中,用直尺刮平表面,使其在平板上自然流动1 min后,用直尺测量圆饼的直径。

2) 凝结时间测试方法

参照《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性

检验方法》(GB/T 1346—2011)^[19],考虑到泡沫混凝土的多孔性和抗压强度低的特点,采用终凝测定试针来测定泡沫混凝土的初凝时间。测试泡沫混凝土的沉入深度,当试针落下后距离底板的深度为(4±1) mm,并辅助判断泡沫混凝土从流塑状态转变成硬塑状态时,即为达到初凝,每次测试3组取平均值。

3) 干密度测试方法

将3块试件放入(60±5)℃烘箱中连续烘干至前后2次相隔4 h的质量差不大于1 g,取出后,试件应放入干燥器内并冷却至室温,称重精确至1 g,记为 m ,干密度计算公式为

$$\rho_0 = \frac{m}{v_0} \times 10^6$$

式中: ρ_0 为干表观密度,kg/m³; m 为试件烘干质量,g; v_0 为试件的体积,cm³;

4) 抗压强度测试方法

参照《泡沫混凝土》(JG/T 266—2011)^[20],加载速度为0.5 kN/s,分别测量7、14、28 d抗压强度,每次测试3组取平均值。

5) XRD 测试方法

将制备好的试块在无水乙醇中浸泡72 h,在30℃条件下进行低温烘干48 h,将干燥后的试块研

磨成固体粉末并在 $45\ \mu\text{m}$ 筛上筛分,对粉末进行 XRD 分析,扫描范围 2θ 为 $5^\circ \sim 70^\circ$,扫描速率为 $5^\circ/\text{min}$,步长为 0.02° ,最终峰值物相的确定使用 Jade 分析。

2 试验结果与分析

2.1 流动度

图 3(a) 研究表明 2.0% ~ 15.0% 石膏掺量的回填泡沫混凝土流动度全部保持在 160 mm 以上,符合浇筑泡沫混凝土性能需求。Panagiotopoulou 等^[14] 研究表明由于石膏的颗粒呈板状,需要更多的水才能达到相同的稠度。在泡沫混凝土中,不同石膏掺量对流动度影响不大。掺入的粉煤灰因其球形颗粒改善了颗粒之间的接触。随着石膏掺量的升高,同样表现出轻微泌水的情况,与 Zhong 等^[21] 研究的地聚物石膏材料结果一致。掺量大于 10.0% 的石膏在掺入粉煤灰和矿粉中,表面出现水膜,但并未出现液体水渗出。

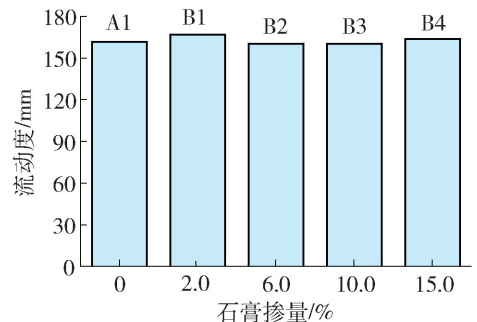
图 3(b) 为硅酸钠掺量对回填泡沫混凝土流动度的影响。随着硅酸钠含量的增加,新拌泡沫混凝土浆体和易性良好,GFC 的流动度从 160 mm 上升到 210 mm。高掺量的硅酸钠导致体系中的硅酸根离子和氢氧根离子质量浓度升高,加入的含 Si 基团可以使浆体中絮凝状结构更不稳定,从而延缓絮凝结构的形成,流动度表现出上升趋势^[7-9]。

图 3(c) 为前驱体比例对泡沫混凝土流动度的影响。随着粉煤灰占比的增加,流动度先上升后下降,在 $m(\text{粉煤灰}):m(\text{矿粉}) = 3:7$ 情况下,其流动度为 147 mm, $m(\text{粉煤灰}):m(\text{矿粉}) = 5:5$ 时,其流动度为 168 mm,随后,粉煤灰占比增加,流动度出现降低现象。出现这种现象的原因是在浆料搅拌过程中,粉煤灰(球形玻璃微珠)和微聚集体的存在更有利于减小摩擦,从而流动性提高。随着粉煤灰占比继续增加,其吸水能力增加,导致其流动度呈现下降的趋势^[22]。

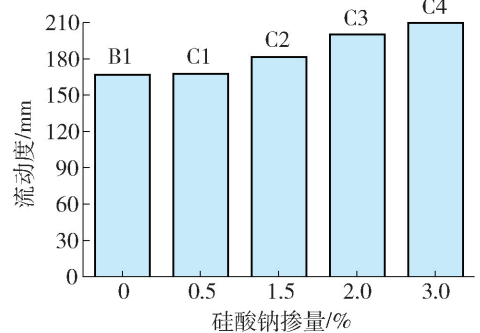
因此,除硅酸钠掺量为 0.5%、石膏掺量为 2.0%、 $m(\text{粉煤灰}):m(\text{矿粉}) = 3:7$ 情况下流动度为 147 mm 外,其余配合比均满足回填流动度大于 160 mm 的设计要求。

2.2 凝结时间

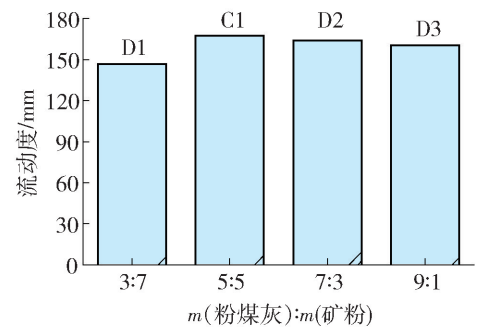
图 4(a) 为单掺石膏组对泡沫混凝土凝结时间的影响,随着石膏掺量的增加,与对照组(A1)相比,加入 2.0% 和 6.0% 的石膏会缩短其凝结时间,当石膏掺量为 2.0% 时,其初凝时间为 6.5 h,随着石膏



(a) 石膏掺量



(b) 硅酸钠掺量



(c) 前驱体比例

图 3 不同影响因素对泡沫混凝土流动度的影响

Fig. 3 Influence of different influencing factors on fluidity of foamed concrete

掺量不断增加,其凝结时间逐渐延长,与净浆材料表现出轻微泌水的情况有关。在石膏掺量超过 10.0% 的情况时,凝结时间增加到 10.0 h 左右。这与 Wu 等^[12] 研究类似,石膏对地聚物胶凝材料的凝结时间有降低的效果,同时发现其延缓凝结的主要原因是由于地聚物胶凝材料的凝固行为发生在初始溶解期,石膏的加入会延迟加速周期,表明微观结构发展较慢。Neto 等^[23] 研究发现,石膏中的磷酸等杂质对碱活化渣性能的影响,磷酸可以延长凝固时间,而石膏会缩短凝固时间,这两者的组合将产生一个中值凝结时间。本试验在不加其他硅酸钠的情况下,凝结时间随着石膏掺量的增加逐渐延长,为保证其凝结时间符合要求,应控制其石膏掺量在 2.0% ~ 6.0%。

图 4(b) 为硅酸钠掺量对回填泡沫混凝土凝结

时间的影响,与不掺硅酸钠相比,在加入 0.5% 硅酸钠时,其凝结时间缩短为 5.5 h,硅酸钠的加入对 2.0% 石膏掺量泡沫混凝土的凝结时间起到加快效果。随着硅酸钠掺量的增大,凝结时间出现延长的现象,在硅酸钠掺量为 2.0% 时,凝结时间最长达到 9.8 h,增加硅酸钠掺量到 3.0% 时,泡沫混凝土凝结加快。与 A1 组对比,少量硅酸钠的加入会加快凝结,材料中用于反应的二氧化硅含量较低,地聚合完成主要溶解反应的时间较短,地聚合物凝固时间较短,随后在 1.5% 硅酸钠掺量时表现出缓凝现象,这是由于 $c(\text{Si})/c(\text{Al})$ 从 1.90 增加到 1.95,可溶性二氧化硅含量升高,反应需要更多的时间凝固和硬化^[24]。进一步增加硅酸钠掺量,硅铝浓度比上升的同时, Na_2O 的含量增加,高碱性环境增强了聚合反

应,导致凝固时间缩短。图 4(c) 为前驱体比例对泡沫混凝土凝结时间的影响,当粉煤灰占比少于 70% 时,凝结时间与流动度发展类似,都呈现先上升后下降的趋势。在 $m(\text{粉煤灰}):m(\text{矿粉})=9:1$ 时,氧化钙含量下降,凝结时间明显增加。

因此,当硅酸钠掺量为 0.5%,石膏掺量为 2.0%, $m(\text{粉煤灰}):m(\text{矿粉})=5:5$ 和 7:3 时,GFC 凝结时间符合回填要求。

2.3 干密度和抗压强度

图 5(a) 为石膏掺量对于干密度和抗压强度的影响,由图 5(a) 可知,A1 在 1~14 d 表现出凝结但是无抗压强度,28 d 表现出 0.3 MPa 的抗压强度。主要原因是其体系中没有可以激发矿粉和粉煤灰中二氧化硅活性的碱性物质,依靠矿粉中的氧化钙含量只能表现出较低的碱性,因此,在没有外加激发剂的情况下泡沫混凝土 28 d 强度仅为 0.3 MPa。不同石膏掺量的泡沫混凝土在常温下湿密度为 $1\,170\sim 1\,230\text{ kg/m}^3$,干密度保持在 $1\,050\sim 1\,150\text{ kg/m}^3$,符合 $1\,100\text{ kg/m}^3$ 密度设计要求,排除由于密度变化对强度的影响。随着石膏掺量的增加,抗压强度先表现出上升趋势,其中,10.0% 石膏掺量的抗压强度增长最快,相对于 6.0% 石膏掺量的泡沫混凝土抗压强度增长了 69%。当石膏掺量小于 10.0% 时会提高早期强度,主要是由于石膏提供的 SO_4^{2-} 与溶解的 Ca^{2+} 和 Al^{3+} 反应,优先产生钙矾石,钙矾石随着石膏添加量的增加而增加。此外,与 A1 相比,当石膏掺量为 2.0%、6.0%、10.0% 时都表现出上升趋势,当石膏掺量达到 15.0% 时,其抗压强度开始下降,早期强度和后期强度均降低,这与 Zhong 等^[21] 发现结果一致,其研究也发现,当石膏掺量高于 10.0% 时,混凝土后期强度会提高较大,早期强度会降低。

根据抗压试验结果,当石膏掺量超过 6.0% 时,其抗压强度超过 4.0 MPa,不符合后期方便开挖的需求,因此,需要控制其石膏掺量不超过 6.0%。

图 5(b) 为硅酸钠掺量对泡沫混凝土干密度和抗压强度的影响,泡沫混凝土干密度均在 $1\,100\text{ kg/m}^3$ 设计范围内。随着硅酸钠的加入,抗压强度不断增加,硅酸钠掺量为 0.5% 的情况下,后期强度略有增长,这与碱性环境腐蚀颗粒表面形成的钙矾石有关。由于粉煤灰和矿粉一次水化生成的水化硅酸钙和水化铝酸钙附着于前驱体表面,阻止了材料内活性 Al_2O_3 的进一步溶出,限制了钙矾石的生成。通过加入硅酸钠来提高粉煤灰内活性 Al_2O_3

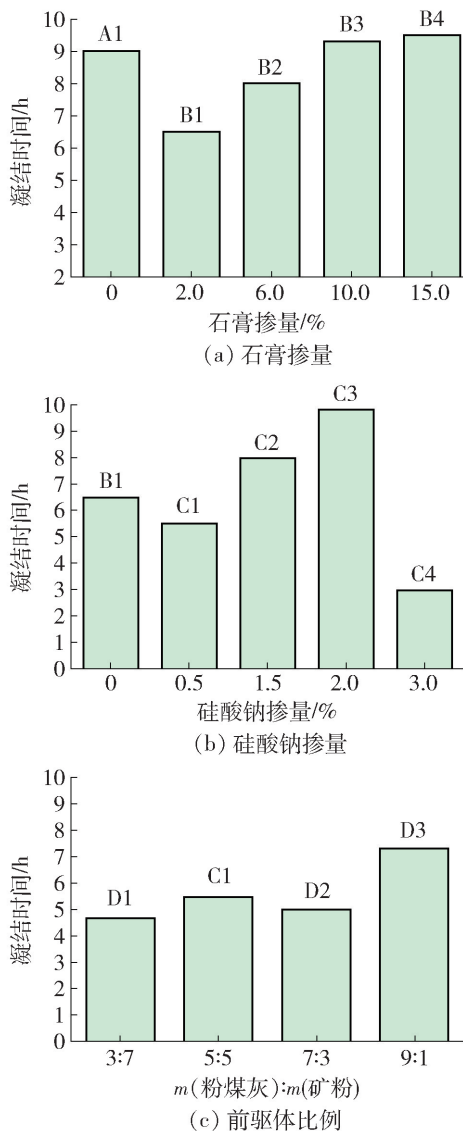


图 4 不同因素对泡沫混凝土凝结时间的影响

Fig. 4 Influence of different factors on setting time of foamed concrete

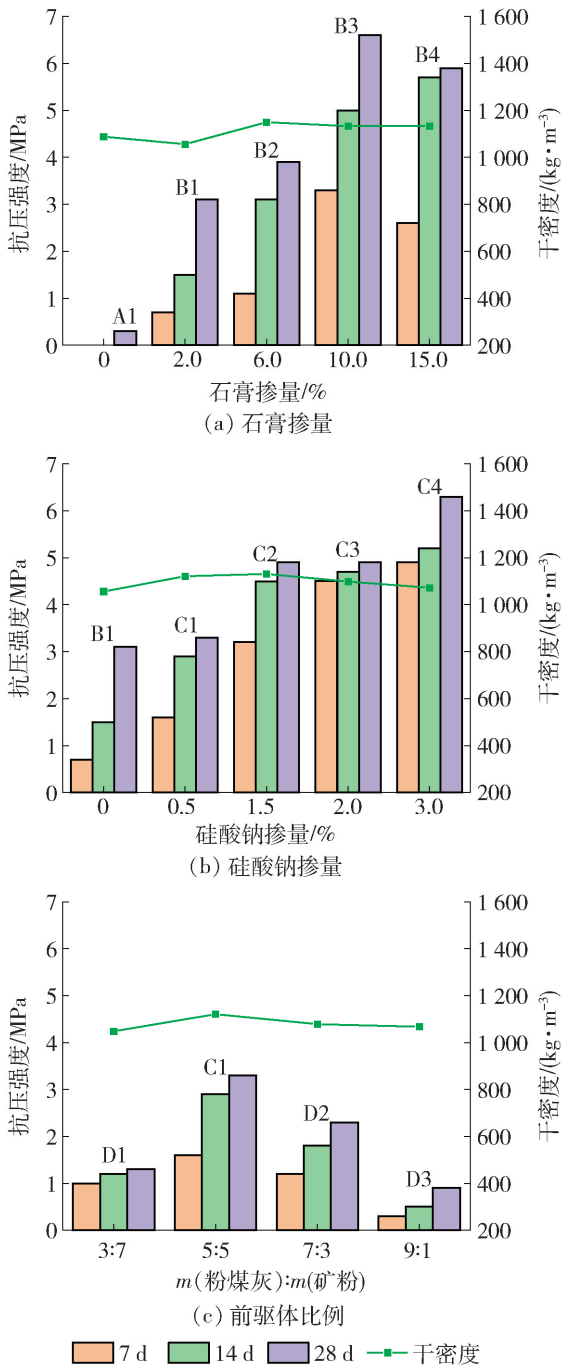


图5 不同因素对泡沫混凝土抗压强度的影响

Fig. 5 Influence of different factors on compressive strength of foamed concrete

的进一步溶出,可以提高 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 激发粉煤灰的活性效果。在硅酸钠掺量达到 2.0% 之前,后期抗压强度基本变化不大,稳定在 4.0 ~ 5.0 MPa。这与泡沫在浆体中存在的稳定性有关,据观察,当硅酸钠掺量为 1.5% 时,泡沫在其中的稳定性较差,影响了 7 d 抗压强度的提高。当硅酸钠掺量大于 2.0% 时,后期抗压强度开始逐步提高。

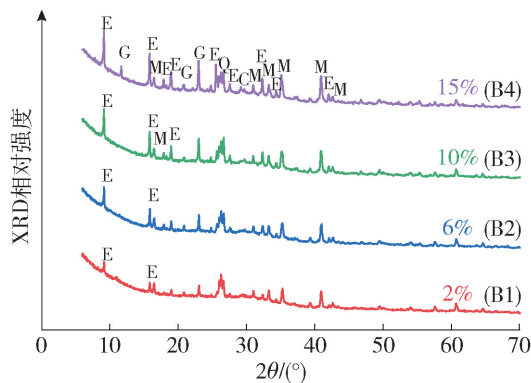
图 5(c) 为前驱体比例对干密度和抗压强度的影响。泡沫混凝土干密度为 1 048 ~ 1 121 kg/m^3 。随着粉煤灰占比的增加,抗压强度表现出先上升后下降的趋势,这是因为矿渣里含有更多的氧化钙,矿粉的活性高于粉煤灰,在碱性相同的条件下能较快地与碱性激发剂中的硅酸钠发生反应,生成水化硅酸钙类凝胶 (C-S-H) 来提供强度^[8]。在相同条件下,隧道回填泡沫混凝土中粉煤灰占比越低,试样的抗压强度则越高。在 $m(\text{粉煤灰}):m(\text{矿粉})=3:7$ 情况下,其 28 d 抗压强度仅为 1.3 MPa,观察试样表面可知,试块浇筑存在分层现象,各层之间存在缝隙,抗压试验进行时会在其缺陷较大的位置形成裂缝,导致其较快地破坏,这是导致抗压强度降低的原因。

基于以上性能研究,利用地聚物制备硅酸钠掺量为 0.5%,石膏掺量为 2.0%, $m(\text{粉煤灰}):m(\text{矿粉})=7:3$ 的复合激发泡沫混凝土能够满足流动度大于 160 mm,初凝时间小于 6.0 h,抗压强度小于 3.0 MPa,回填材料性能需求。

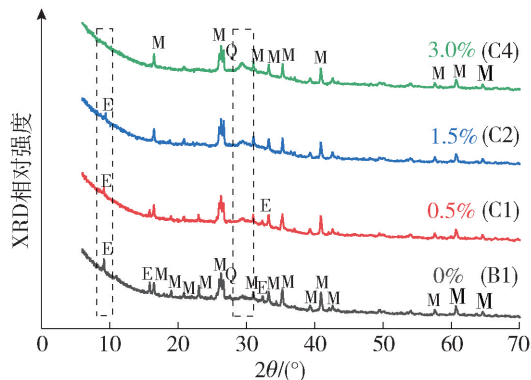
2.4 水化产物分析

泡沫混凝土在固化 28 d 后,利用 XRD 衍射可以获得结晶相信息。图 6 表明水化产物中出现了钙矾石,且随着硅酸钠掺量、石膏掺量的提高,钙矾石的含量显著增加,说明硅酸钠和石膏可以促进泡沫混凝土的水化作用。钙矾石形成量越大,其水化程度越高^[25]。

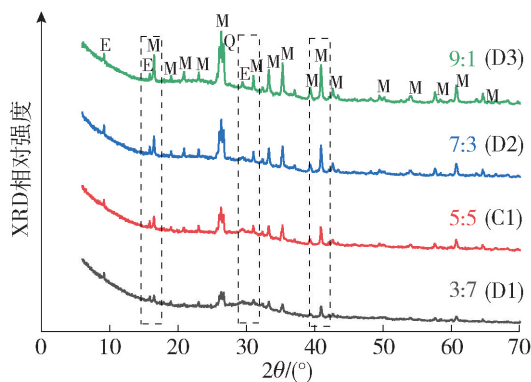
GFC 中有 3 种结晶物质,即二水石膏、钙矾石和莫来石,二水石膏和莫来石分别来自原材料的石膏和粉煤灰,钙矾石是石膏与矿粉或粉煤灰水化反应的主要结晶物质。在矿粉或粉煤灰中具有潜在活性的氧化铝四面体被 OH^- 激活,生成水合铝酸钙,然后水合铝酸钙与石膏产生的 SO_4^{2-} 作用形成钙矾石^[26]。随着石膏掺量的增多,钙矾石的峰更加明显,其主要水化产物为钙矾石和 C-S-H,见图 6(a),当硅酸钠的掺入到 3.0% 时,表征钙矾石的峰在第 28 d 时消失,同时在 29° 左右出现无定形的 C-S-H,在图 6(b) 中表现为弥散峰。同样地,从图 6(c) 可以看出,随着粉煤灰含量的减少,钙矾石的峰也逐渐减弱,这表明随着硅酸钠掺量的增加和粉煤灰占比的减少,会提高环境中的碱性,能够很大程度上剥离粉煤灰和矿粉一次水化后表面附着的水化硅酸钙和水化铝酸钙等胶凝性产物,并进一步促进内部更多的 SiO_2 、 Al_2O_3 释放并参与进一步的水化反应^[27-28]。



(a) 不同石膏掺量作用下的XRD图



(b) 不同硅酸钠掺量作用下的XRD图



(c) 不同前驱体比例作用下的XRD图

M—莫来石 Q—石英 E—钙矾石
C—方解石 G—二水石膏

图6 不同影响因素下的泡沫混凝土XRD图

Fig.6 XRD patterns of foamed concrete under different influencing factors

3 结论

1) 硅酸钠掺量对流动度的影响大于前驱体比例和石膏掺量。增加硅酸钠掺量可显著提高泡沫混凝土的流动度,在硅酸钠掺量为3.0%时,其流动度达到220 mm。

2) 随着硅酸钠掺量的增加,初凝时间先延长后缩短,在硅酸钠掺量为2.0%时,凝结时间最长达到

9.8 h,当硅酸钠掺量超过2.0%时,泡沫混凝土凝结时间开始缩短。

3) 增加硅酸钠掺量,GFC的抗压强度表现出上升趋势。石膏掺量和粉煤灰占比的增加导致抗压强度先上升后下降,石膏掺量超过10.0%后,抗压强度表现出下降趋势。 $m(\text{粉煤灰}):m(\text{矿粉})=1:1$ 时,抗压强度达到最高为3.3 MPa。

4) 复合激发泡沫混凝土抗压强度可满足水下管道填充需求,流动度为164 mm,凝结时间为5.0 h,抗压强度为2.3 MPa。

参考文献:

- [1] 张森馨. 天然气专用隧道中填充物的研究[J]. 上海煤气, 2018(3): 1-3, 28.
ZHANG M X. Study on filling in natural gas special tunnel [J]. Shanghai Gas, 2018(3): 1-3, 28. (in Chinese)
- [2] 马永政, 温小栋, 冯蕾, 等. 早期人防隧洞工程泡沫混凝土现浇回填施工应用研究[J]. 土工基础, 2021, 35(5): 553-556.
MA Y Z, WEN X D, FENG L, et al. Application of foam concrete in backfill of abandoned civil air defense tunnel [J]. Soil Engineering and Foundation, 2021, 35(5): 553-556. (in Chinese)
- [3] DHASINDRAKRISHNA K, PASUPATHY K, RAMAKRISHNAN S, et al. Progress, current thinking and challenges in geopolymer foam concrete technology [J/OL]. Cement and Concrete Composites, 2021, 116: 103886[2023-02-22]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946520303905>.
- [4] YANG K H, SONG J K, ASHOUR A F, et al. Properties of cementless mortars activated by sodium silicate [J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(9): 1981-1989.
- [5] ZHUANG X Y, CHEN L, KOMARNENI S, et al. Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 125: 253-267.
- [6] 田雨泽, 张兴师, 胡君一, 等. 铁尾矿粉对碱矿渣泡沫混凝土力学性能的影响[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(5): 742-747.
TIAN Y Z, ZHANG X S, HU J Y, et al. Effect of iron ore tailings powder on performance of alkali-activated slag foamed concrete [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(5): 742-747. (in Chinese)
- [7] LIU M Y J, ALENGARAM U J, JUMAAT M Z, et al. Evaluation of thermal conductivity, mechanical and transport properties of lightweight aggregate foamed geopolymer concrete [J]. Energy and Buildings, 2014, 72: 238-245.
- [8] ZHANG Z H, PROVIS J L, REID A, et al. Mechanical,

- thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 62: 97-105.
- [9] UANG Y J, GONG L L, SHI L, et al. Experimental investigation on the influencing factors of preparing porous fly ash-based geopolymer for insulation material [J]. *Energy and Buildings*, 2018, 168: 9-18.
- [10] 孙诗兵, 陈华, 兰明章, 等. 聚合物对发泡水泥制品孔结构和性能影响 [J]. *北京工业大学学报*, 2014, 40(6): 922-927.
SUN S B, CHEN H, LAN M Z, et al. Effect of polymer on the pore structure and properties of foam cement products [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2014, 40(6): 922-927. (in Chinese)
- [11] MA Y, NIE Q, XIAO R, et al. Experimental investigation of utilizing waste flue gas desulfurized gypsum as backfill materials [J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2020, 245: 118393 [2023-02-22]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820303986>.
- [12] WU M, SHEN W, XIONG X, et al. Effects of the phosphogypsum on the hydration and microstructure of alkali activated slag pastes [J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2023, 368: 130391. [2023-02-22]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061823001022>.
- [13] DEB P S, NATH P, SARKER P K. The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature [J]. *Materials & Design*, 2014, 62: 32-39.
- [14] PANAGIOTOPOULOU C, KONTORI E, PERRAKI T, et al. Dissolution of aluminosilicate minerals and by-products in alkaline media [J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42(9): 2967-2973.
- [15] SAMSON G, CYR M, GAO X X. Thermomechanical performance of blended metakaolin-GGBS alkali-activated foam concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 157: 982-993.
- [16] GIJBELS K, IACOBESCU R I, PONTIKES Y, et al. Alkali-activated binders based on ground granulated blast furnace slag and phosphogypsum [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 215: 371-380.
- [17] ATIŞ C D, BILIM C, ÇELİK Ö, et al. Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(1): 548-555.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 气泡混合轻质土填筑工程技术规程: CJJ/T 177—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [19] 中国国家标准化管理委员会. 水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法: GB/T1346—2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 泡沫混凝土: JG/T 266—2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [21] ZHONG S Y, NI K, LI J. Properties of mortars made by uncalcined FGD gypsum-fly ash-ground granulated blast furnace slag composite binder [J]. *Waste Management*, 2012, 32(7): 1468-1472.
- [22] CHEN Y G, GUAN L L, ZHU S Y, et al. Foamed concrete containing fly ash: properties and application to backfilling [J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2021, 273: 121685. [2023-02-22]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820336898>.
- [23] NETO A A M, CINCOTTO M A, REPETTE W. Mechanical properties, drying and autogenous shrinkage of blast furnace slag activated with hydrated lime and gypsum [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2010, 32(4): 312-318.
- [24] SIYAL A A, AZIZLI K A, MAN Z, et al. Effects of parameters on the setting time of fly ash based geopolymers using taguchi method [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 148: 302-307.
- [25] ZHANG J, TAN H, HE X, et al. Compressive strength and hydration process of ground granulated blast furnace slag-waste gypsum system managed by wet grinding [J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2019, 228: 116777 [2023-02-22]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819321956>.
- [26] 贺希, 吴永强, 李慷, 等. 复合激发地聚物超细粉灌浆料的制备与性能研究 [J]. *洛阳师范学院学报*, 2020, 39(2): 12-17.
HE X, WU Y Q, LI K, et al. Research on the preparation and properties of grouting material composed of co-activated ultra-fine geopolymer particles [J]. *Journal of Luoyang Normal University*, 2020, 39(2): 12-17. (in Chinese)
- [27] 任永鹏, 魏启荣. $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 复合激发粉煤灰活性机理研究 [J]. *混凝土*, 2007(11): 82-84, 88.
REN Y P, WEI Q R. Study of hydration mechanism to the fly ash with the compound activator $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{-CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [J]. *Concrete*, 2007, (11): 82-84, 88. (in Chinese)
- [28] 刘春原, 庞云泽, 左丽明, 等. 复合激发下石膏对碱渣-粉煤灰浆液性能的影响 [J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(3): 120-125.
LIU C Y, PANG Y Z, ZUO L M, et al. Effect of gypsum on properties of soda residue-fly ash slurry under compound activation [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(3): 120-125. (in Chinese)