

文章编号:1004-2954(2026)04-0141-06

碱激发对掺玻璃粉混凝土抗钙溶蚀能力的影响

蒋雅君¹, 郑屹¹, 宿耀坤¹, 喻良敏¹, 徐建奇²

(1. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031; 2. 成都扬华源动新材料科技有限公司, 成都 610213)

摘要:钙溶蚀引起的混凝土钙离子析出是造成隧道排水系统结晶堵塞的主要原因,使用玻璃粉替代部分水泥可以增强混凝土的抗钙溶蚀能力,但其在初期效果有限。为提升玻璃粉对混凝土抗钙溶蚀能力在水化初期的效果,通过室内接触溶蚀试验研究3种碱激发方式对掺玻璃粉混凝土试块抗钙溶蚀性能的影响。研究表明,不进行碱激发只掺入20%玻璃粉能够减少43.43%的钙离子析出;碱激发后,在溶蚀第5d,碱激发组试块减少钙离子析出的效果能达到不使用碱激发试块在第25~30d的效果;使用氢氧化钠单独激发、硅酸钠单独激发以及氢氧化钠和硅酸钠复合激发在试验期间内减少钙离子析出的效果分别为62.96%、49.50%和57.69%。然而,在溶蚀第56d时,碱激发试块中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量没有明显减少,这表明在长期溶蚀过程中,碱激发对玻璃粉火山灰活性的提升效果有限;使用硅酸钠单独激发时,在溶蚀第56d时其试块中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量反而高于未碱激发组试块,这表明长期状态下硅酸钠不利于玻璃粉的火山灰活性发挥。基于本研究结果,推荐使用氢氧化钠单独激发方式提升掺玻璃粉混凝土的抗钙溶蚀能力。

关键词:隧道工程; 喷射混凝土; 碱激发; 玻璃粉; 钙溶蚀

中图分类号:U25; TU528.45 文献标识码:A DOI:10.13238/j.issn.1004-2954.202406070001

Effect of Alkali Activation on Calcium Leaching Resistance of Concrete Containing Glass Powder

JIANG Yajun¹, ZHENG Yi¹, SU Yaokun¹, YU Liangmin¹, XU Jianqi²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Chengdu Yanghua Yuandong New Materials Science and Technology Co., Ltd., Chengdu 610213, China)

Abstract: Calcium ion precipitation in concrete caused by calcium leaching is the main cause of crystallization clogging in tunnel drainage systems. Replacing part of the cement with glass powder can enhance the calcium leaching resistance of concrete, but its effect is limited at the early stage. To improve the effect of glass powder on the calcium leaching resistance of concrete at the early stage of hydration, this study investigated the effects of three alkali activation methods on the calcium leaching resistance of concrete specimens containing glass powder through laboratory contact leaching tests. The results showed that adding 20% glass powder without alkali activation reduced calcium ion precipitation by 43.43%. After alkali activation, on day 5 of leaching, the reduction effect on calcium ion precipitation in the activated specimens reached the level achieved by the non-activated specimens at days 25 to 30. During the test period, the reductions in calcium ion precipitation achieved by NaOH activation alone, Na_2SiO_3 activation alone, and combined activation of NaOH and Na_2SiO_3 were 62.96%, 49.50%, 57.69%, respectively. However, the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content in the alkali-activated specimens did not decrease significantly on day 56 of leaching, indicating that alkali activation has a limited effect on

improving the pozzolanic activity of glass powder during long-term leaching. Under Na_2SiO_3 activation alone, the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content in the specimens was higher than that in the non-activated specimens on day 56 of leaching,

收稿日期:2024-06-07; 修回日期:2024-08-19; 网络首发日期:2024-12-03

基金项目:成都扬华源动新材料科技有限公司研发项目(2018H010255)

作者简介:蒋雅君(1980—),男,副教授,2008年毕业于西南交通大学隧道工程专业,工学博士,主要从事隧道工程教学和科研工作,E-mail:yajunjiang@swjtu.edu.cn.

indicating that Na_2SiO_3 is unfavorable for the pozzolanic activity of glass powder in the long term. Based on the results of this study, NaOH activation alone is recommended to enhance the calcium leaching resistance of concrete containing glass powder.

Key words: tunnel engineering; shotcrete; alkali activation; glass powder; calcium leaching

引言

近年来,随着我国隧道运营里程的不断增加,西部山区隧道排水系统结晶堵塞问题频繁发生^[1-2]。排水系统对隧道的安全运营有重要意义,排水系统堵塞后,地下水无法及时排出,造成隧道衬砌所受水压力上升,引发隧道渗漏水加剧、衬砌掉块等一系列问题,影响隧道结构安全^[3-4]。

目前,国内外学者对此问题已经开展一定研究,初步表明,初支喷射混凝土的钙溶蚀是导致隧道排水系统结晶的主要原因,通过掺加矿物掺合料等方法提升喷射混凝土的抗钙溶蚀能力可以起到预防该问题发生的作用^[5-7]。玻璃粉中含有大量 SiO_2 ,能够通过火山灰反应将混凝土中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 转化为 C-S-H 凝胶,起到提升混凝土抗钙溶蚀能力的作用^[8-10]。有一些学者将其作为辅助胶凝材料提升混凝土的抗钙溶蚀能力,如 JAIN 等制备水泥净浆试块和掺 10% 中位粒径为 20 μm 玻璃粉的水泥-玻璃粉试块,正常养护 90 d 后,进行为期 90 d 的纯水浸泡溶蚀试验,结果显示溶蚀时间较长时,掺入玻璃粉后水泥浆体的孔隙率增长幅度和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的损失量均小于纯水泥浆体^[11]。ALI-BOUCETTA 等的研究也显示对于正常养护 56 d 后的混凝土,使用玻璃粉替代部分水泥试块的抗钙溶蚀能力有所增加^[12]。试验结果表明,经过正常养护后,玻璃粉能提升混凝土的抗钙溶蚀能力。但玻璃粉的火山灰活性较低,在水泥水化提供的碱性环境中其高能硅氧键被 OH^- 破坏后,才能发挥出明显的火山灰作用,因此在水泥水化初期,玻璃粉对混凝土性能的改善能力较弱。研究表明,在水泥水化初期,玻璃粉对混凝土的强度和抗钙溶蚀能力有负面作用^[13]。在隧道工程中,初支喷射混凝土在施作之初就很可能受到地下水溶蚀作用,因此如果要在初支混凝土中应用玻璃粉,需要采取措施快速激发其火山灰活性。

快速提升玻璃粉火山灰活性的方法有很多,碱激发就是其中一种。孔庆秋通过室内试验发现,NaOH 能够在养护早期增强玻璃粉的火山灰活性,玻璃粉掺量为 10% 时效果最好,在砂浆龄期为 3 d、7 d 和 28 d 时都能提高砂浆的抗压强度^[13]。GAO 等研究表明,在碱激发体系中,正常养护的掺玻璃粉试块在水泥水化进程前 72 h 时,玻璃粉的活性与硅灰相似,这表明

在碱激发体系中玻璃粉具有较高的使用价值^[14]。研究表明,碱激发玻璃粉在水泥基材料中应用具有可行性,但目前直接探讨不同碱激发条件下玻璃粉对混凝土抗钙溶蚀能力影响的研究效果尚有欠缺,有必要开展相关研究。

为探究碱激发对掺玻璃粉混凝土抗钙溶蚀能力的影响,设计基于混凝土试块的室内接触溶蚀试验,通过钙离子浓度监测、扫描电镜分析 (SEM) 和热重分析 (TGA) 研究 3 种碱激发方式 (NaOH、 Na_2SiO_3 及两种方式复合) 对掺玻璃粉混凝土抗钙溶蚀性能的影响效果和机理,最终得到提升玻璃粉活性效果最好的建议碱激发方式。

1 试验方案

1.1 原材料

水泥为诸城市杨春水泥厂生产的 P. O 42.5 硅酸盐水泥;玻璃粉中位粒径为 1.2 μm ;细骨料为 0.3 ~ 0.5 mm 的石英砂;粗骨料为粒径 5 ~ 10 mm 连续级配碎石;拌合用水为自来水;硫酸铝基无碱速凝剂和高效减水剂。

水泥和玻璃粉的化学组成如表 1 所示。碱激发剂为粉状氢氧化钠和粉状硅酸钠,均为分析纯。

表 1 水泥和玻璃粉主要化学组成 %
Tab. 1 Main chemical composition of cement and glass powder (mass fraction)

原材料	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	Fe_2O_3	MgO	SO_3
水泥	28.73	45.23	10.84	0.43	1.03	3.27	4.35	4.89
玻璃粉	70.42	8.06	1.26	14.97	0.35	0.10	4.36	0.26

1.2 配合比设计

本试验中喷射混凝土配合比按照 JGJ/T 372—2016《喷射混凝土应用技术规程》和 JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》进行设计,具体配合比如表 2 所示。玻璃粉采用内掺的方式添加,即替代同等质量的水泥,内掺量为水泥用量的 20%。试块制备 24 h 后脱模,开展溶蚀试验。

其中,C 组为混凝土试块用于接触溶蚀试验;M 组试块用于 XRD 分析、SEM 分析和热重分析,为减少骨料对水化产物分析的影响,用于 XRD 分析、SEM 分析和热重分析的试块没有添加骨料。C-0 为对照组试块,C-20 和 M-20 为内掺 20% 玻璃粉末进行碱激发的

试块,N、S 和 F 代表的意义分别为单独使用 NaOH 激发、单独使用硅酸钠激发以及复合使用 NaOH 和硅酸钠激发。

表 2 混凝土和水泥净浆配合比

Tab.2 Mix proportions of concrete and cement paste

样品 编号	水泥	玻璃粉	粗骨料	砂子	水	速凝剂	减水剂	NaOH	硅酸钠
C-0	175	0	332.5	280	78.8	10.5	1.4	0	0
C-20	140	35	332.5	280	78.8	10.5	1.4	0	0
C-N	140	35	332.5	280	78.8	10.5	1.4	2	0
C-S	140	35	332.5	280	78.8	10.5	1.4	0	2
C-F	140	35	332.5	280	78.8	10.5	1.4	1	1
M-20	140	35	0	0	78.8	10.5	1.4	0	0
M-N	140	35	0	0	78.8	10.5	1.4	2	0
M-S	140	35	0	0	78.8	10.5	1.4	0	2
M-F	140	35	0	0	78.8	10.5	1.4	1	1

1.3 测试方法

(1) 钙离子浓度检测

为加快溶蚀速度采用纯净水作为溶蚀液体,将脱模后的 C 组试块分别置入同等规格白色密封乳胶桶中,并使用 1 L 纯净水将试块完全浸泡,进行接触溶蚀试验,进行溶蚀时装有试块的桶保持密封状态,如图 1 所示。每隔 5 d 使用 EDTA 滴定法进行钙离子浓度检测,每组试块每次滴定 3 次,最终钙离子浓度取 3 次的平均值,检测完成后更换浸泡所用纯净水。

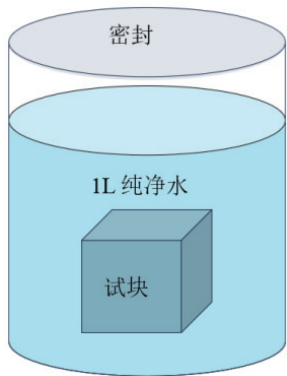


图 1 接触溶蚀示意
Fig.1 Schematic diagram of contact leaching

(2) 热重分析

将脱模后的 M 组试块分别置入相同规格的带盖白色乳胶桶中,浸泡在 1 L 纯净水中进行 56 d 的接触溶蚀,装有试块的桶保持密封状态。溶蚀第 7,14,28 d 和 56 d 时,分别取出 M 组试块各 1 块,在干燥箱中 60 ℃烘 24 h 后,取离试块表面 1 cm 处,研磨成粉后进行热重分析。热重分析所用仪器为 METTLER TOLEDO 公司生产的 TGA/DSC3+型仪器。测试参数如下:测试温度范围为 30~1 000 ℃;升温速率为 20 ℃/min;氛围为 N₂。

本研究中热重分析的主要用途为定量分析样品中 Ca(OH)₂ 的百分比含量,并通过该数据的分析玻璃粉对水泥基材料水化过程的影响。Ca(OH)₂ 的百分比含量计算方法概述如下:在热重分析仪中,Ca(OH)₂ 会在 400~500 ℃ 的温度范围内分解为 CaO 和 H₂O,H₂O 会完全汽化,使样品出现质量损失^[15]。同时样品中的 CaCO₃ 主要是在制备过程中 Ca(OH)₂ 的碳化而形成的^[16-17],因此计算 Ca(OH)₂ 含量时也考虑样品中的 CaCO₃。CaCO₃ 在 600~800 ℃ 之间分解为 CaO 和 CO₂,其中 CO₂ 也会完全逃逸,造成样品质量损失^[18]。因此,样品中 Ca(OH)₂ 的相对含量可以通过失去 H₂O 和 CO₂ 的质量来计算,计算公式如下

$$CH(\%) = WL_{H_2O} \times \frac{74}{18} + WL_{CO_2} \times \frac{100}{44} \times \frac{74}{100} \quad (1)$$

式中,CH(%)为试块中 Ca(OH)₂ 的含量百分比;WL_{CO₂} 为 400~500 ℃ 温度区间的质量损失;74 为 Ca(OH)₂ 的相对分子质量;18 为 H₂O 的相对分子质量;WL_{H₂O} 为 600~800 ℃ 温度区间的质量损失;44 为 CO₂ 的相对分子质量;100 为 CaCO₃ 的相对分子质量。

(3) SEM 分析

SEM 分析测试样品来源和取样方式与热重分析大致相同,区别在于所用样品为 0.5 cm×0.5 cm 的小块,而不是研磨成粉。SEM 分析所用仪器型号为 JSM7500F。

2 试验结果与分析

2.1 钙离子浓度

浸泡液中钙离子浓度随溶蚀时间的变化规律如图 2 所示,可以看出碱激发与否的最大区别在于溶蚀前期。在溶蚀第 5 d,C-0、C-20、C-N、C-S 和 C-F 组试块析出的钙离子量分别为 280,213,122,120 mg 和 140 mg。可以看出,相较于 C-0 组,C-20 组试块在溶蚀 5d 时能够减少 23.9%的钙离子析出;碱激发后减少钙离子析出的效果大幅提高,分别达到 56.43%(C-N)、57.14%(C-S)和 50%(C-F),3 种碱激发方式在溶蚀第 5 d 时减少钙离子析出的效果达到 C-20 组试块溶蚀第 25~30 d 的效果,这表明使用碱激发提升掺玻璃粉混凝土试块溶蚀前期的抗钙溶蚀能力可行。

不同溶蚀时间下钙离子累积溶出情况绘制如图 3 所示。由图 3 可知,在整个试验期间内,C-0、C-20、C-N、C-S 和 C-F 组分别析出 891,504,330,450 mg 和 377 mg 的钙离子,相较于 C-0 组,C-20、C-N、C-S 和 C-F 组分别少析出 43.43%、62.96%、49.50% 和

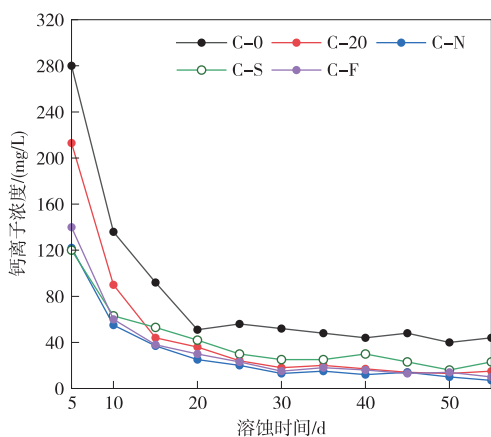


图 2 钙离子浓度随溶蚀时间的变化

Fig. 2 Changes in calcium ion concentration with leaching time

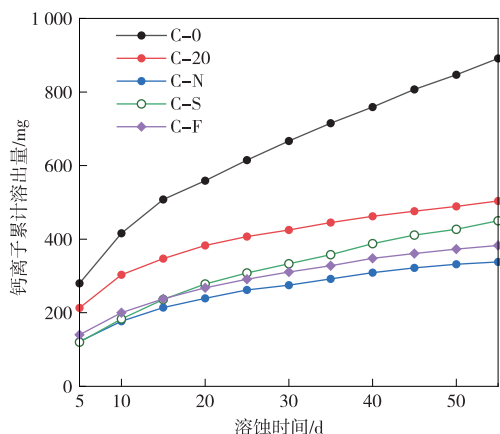


图 3 钙离子累积溶出量随溶蚀时间的变化

Fig. 3 Changes in cumulative calcium leaching amount with leaching time

57.69%的钙离子。虽然碱激发组试块析出的钙离子都少于 C-0 组和 C-20 组,但结合图 2 可以发现,溶蚀 15 d 后碱激发组试块析出的钙离子没有明显少于 C-20 组,其中 C-S 组试块析出的钙离子甚至高于 C-20 组。试验结果表明,长期状态下碱激发改善掺玻璃粉混凝土试块抗钙溶蚀能力的效果有限,硅酸钠单独激发不适合应用在掺玻璃粉混凝土中。

以上试验结果主要由以下原因造成: OH^- 的浓度是破坏玻璃粉高能硅氧键的关键, OH^- 的浓度越高,破坏速度越快^[19]。在试块中加入硅酸钠和 NaOH,都能够提供额外的 OH^- ,同时 Na^+ 同样能够通过促使玻璃体网格解聚的方式来提升玻璃粉的活性^[20],这两点的共同作用使得玻璃粉的活性能够在溶蚀前期得到快速激发,更快发挥火山灰效应。其次,NaOH 和硅酸钠本身具有一定速凝能力,也能够提升喷射混凝土的早期抗钙溶蚀能力^[21-22]。这些原因使得 3 种碱激发方式

都能在溶蚀前期有效提升掺玻璃粉混凝土的抗钙溶蚀能力。

硅酸钠是一种很容易发生水解的材料,水解后会生成大量 H_2SiO_4^- ,然后产生一种强度很低的硅溶胶的副产物导致整个试块的强度降低^[23],这可能是因为硅酸钠会使得混凝土试块的微观结构变差,孔隙变多,导致其后期的抗钙溶蚀能力削弱。这种影响和硅酸钠的模数有很大关系,因此出现溶蚀 15 d 后,C-S 组试块析出的钙离子>C-20 组,C-F 组试块析出的钙离子只是略低于 C-20 组。

2.2 热重分析

将各组试块在不同溶蚀时间的 TG-DTG 曲线绘制如图 4 所示。对比图 4 中各组试块的 DTG 曲线,可以看出,各试块吸热峰的大小出现明显改变,相反吸热峰的位置基本没变,这表明 3 种碱激发方式对水化产物的类型和水化产物的热分解特征基本没有影响,主要影响水化产物的相对含量。

将根据热重曲线通过式(1)计算所得碱激发前后玻璃粉试块在不同溶蚀时间的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量绘制如图 5 所示。在接触溶蚀条件下,影响试块 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量的主要因素有以下 3 个:①水泥水化反应生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,主要是 C_2S 和 C_3S 的水化;②玻璃粉的火山灰反应消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$;③钙离子的析出消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,目前研究显示,水泥基材料的钙溶蚀首先是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 脱钙分解,在其没有完全脱钙溶出之前,C-S-H 凝胶不会开始脱钙,因此本试验中溶出的钙离子都来自 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ^[11]。

溶蚀 7 d 时 M-20、M-N、M-S 和 M-F 四组试块中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量分别为 16.00%、15.66%、15.07%和 15.94%,相较于 M-20 组都有所下降,其中 M-S 组试块下降最多。由图 3 可知,在溶蚀 5 d 和 10 d 时,M-N、M-S 和 M-F 试块析出的钙离子都远少于 M-20 组,说明在溶蚀 7 d 时碱激发试块被钙溶蚀消耗的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量要远少于 M-20 组;同时因为 NaOH 还可以促进 C_2S 和 C_3S 水化、硅酸钠水解后也能发挥一部分 NaOH 的效果,所以碱激发试块在溶蚀 7 d 由水泥水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 也多于 M-20 组。在因钙溶蚀消耗的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 少于 M-20 组和因水泥水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 多于 M-20 组的情况下,碱激发试块的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量仍然低于 M-20 组,说明碱激发试块中的玻璃粉在溶蚀 7 d 时火山灰活性因为大量 OH^- 得到充分激发,大量消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。

溶蚀 14 d 后,M-20 组中的玻璃粉火山灰活性也得到充分激发,开始大量消耗钙离子,可以看到,从溶蚀第 14 d 到 28 d M-20 组中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量降低幅

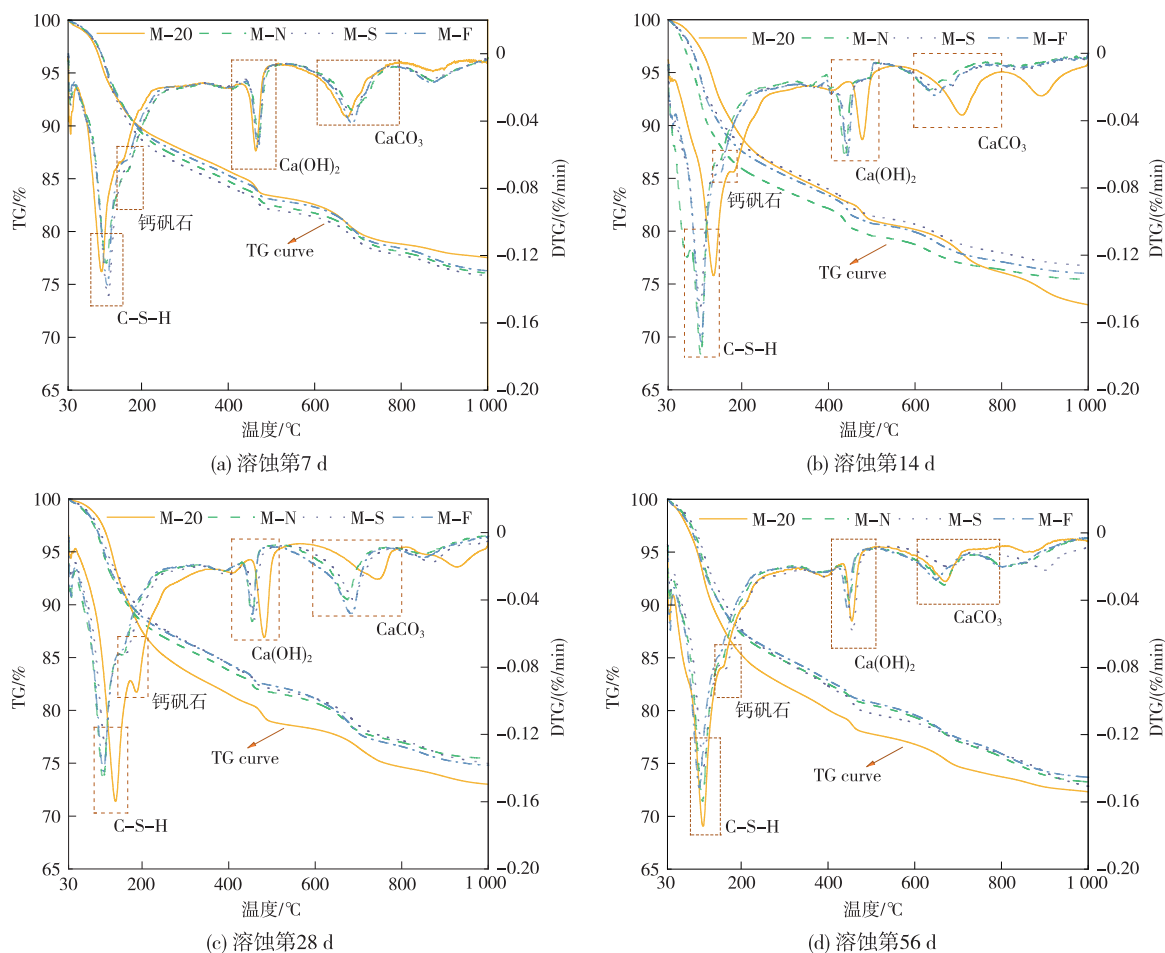
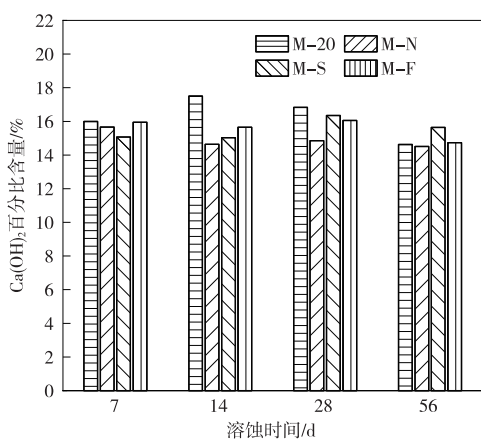


图4 不同溶蚀时间各试块 TG-DTG 曲线

Fig. 4 TG-DTG curves of specimens at different leaching times

图5 不同溶蚀时间各试块 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 百分比含量Fig. 5 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ percentage content of specimens at different leaching times

度最大;到溶蚀 56 d, M-20 组试块中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量已经和 M-N 组与 M-F 组大致相同,这表明此时 M-20 组试块中玻璃粉的火山灰反应程度与 M-N 和 M-F 组是接近的,即碱激发对溶蚀后期玻璃粉的火山灰反应程度影响很小。

M-S 和 M-F 组试块中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量在溶蚀

28 d 出现上升, M-S 组上升幅度更大;到 56 d, M-S 和 M-F 组试块中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量下降,但同样 M-S 组试块下降的幅度很低。这种情况充分表明硅酸钠对玻璃粉的火山灰活性有负面影响, M-F 组试块中玻璃粉火山灰活性受影响的程度小于 M-S 组的原因一方面在于添加到 M-F 组试块中的硅酸钠只有 M-S 组的一半;另一方面本试验中碱激发剂的使用方式是将碱激发剂先融入拌和水中,这样 M-F 组中添加的 NaOH 相当于调节了水玻璃(硅酸钠水溶液)的模数($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$),许多研究都表明水玻璃的模数对碱激发水泥基材料的性能有很大影响^[24]。

2.3 微观形貌分析

4 组掺玻璃粉试块溶蚀 7 d 时 SEM 图像绘制如图 6 所示。由图 6 可知,各组试块中都广泛生成各种形态的 C-S-H 凝胶、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、AFt 和 AFm 等物质。对比各组试块的 SEM 图片,在 M-20 组试块中虽然可以观察到生成有大量的 C-S-H 凝胶,但这些 C-S-H 凝胶大多各自成团,在空间上分层现象明显,结构之间的孔隙较大,没有相互搭接形成致密的网络;与 M-20 相

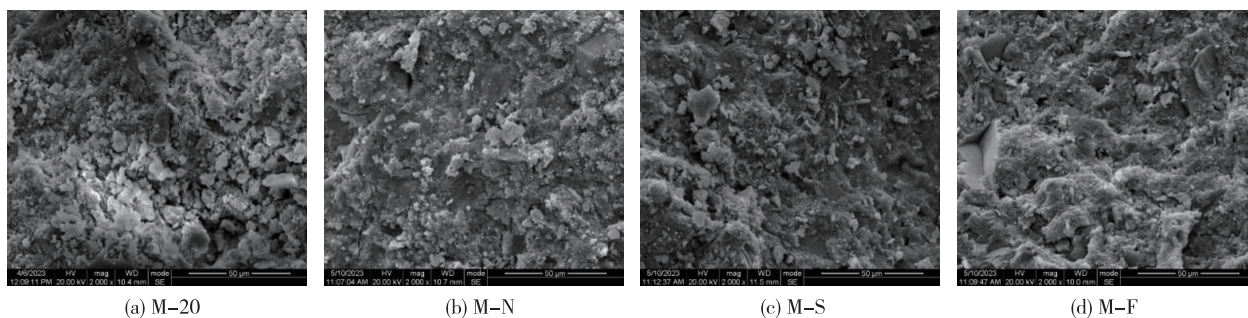


图 6 溶蚀 7 d 各试块的 SEM 图像

Fig. 6 SEM images of specimens on day 7 of leaching

比, M-N、M-S 和 M-F 试块的微观结构都有明显改善, 3 组试块中也都存在各自成团的 C-S-H 凝胶, 但整体上出现相互搭接的情况, 空间分层现象较弱, 使得试块孔隙的数量和大小减少。

3 结论

探究 3 种碱激发方式 (NaOH、 Na_2SiO_3 及 2 种方式复合) 对掺玻璃粉混凝土抗钙溶蚀能力的影响, 主要结论如下。

(1) 3 种碱激发方式都能够显著改善混凝土早期的抗钙溶蚀能力。在溶蚀 5 d 时, 碱激发组试块减少钙离子析出的效果能达到不使用碱激发试块在 25 ~ 30 d 的效果。

(2) 碱激发对玻璃粉的影响可以让原本在溶蚀 14 d 后才能充分发挥的火山灰活性提前到前 14 d。而在长期溶蚀状态下, 碱激发试块的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量没有明显低于未碱激发组的试块, 这表明 3 种碱激发方式都不能明显地增加玻璃粉的火山灰反应程度。

(3) 使用 NaOH 单独激发用于提升掺玻璃粉混凝土抗钙溶蚀能力较优, 在溶蚀后期, NaOH 单独激发试块减少钙离子析出的效果可以达到 70%, 因此建议采用此种激发方式提升掺玻璃粉混凝土的抗钙溶蚀性能。

参考文献:

- [1] 常凯, 郭小雄, 马伟斌, 等. 铁路隧道排水盲管堵塞引起的外侧水压及衬砌应力变化规律研究[J]. 铁道标准设计, 2025, 69(1): 120-128.
CHANG Kai, GUO Xiaoxiong, MA Weibin, et al. Research on Change Law of the Outer Water Pressure and Lining Stress Caused by Blockage of Drainage Blind Pipes in Railway Tunnels[J]. Railway Standard Design, 2025, 69(1): 120-128.
- [2] 卢冠楠, 王鹏, 杨蕴, 等. 岩溶区隧道排水系统地下水渗流结晶堵塞机理及阻垢技术研究综述[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(6): 11-20.
LU Guannan, WANG Peng, YANG Yun, et al. Review of Researches on Groundwater Seepage Induced Crystallization and Blockage Mechanism and Scale Inhibition Technology in the Tunnel Drainage System in Karst Areas[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021,

58(6): 11-20.

- [3] 段海澎, 陈发根, 姚春江, 等. 岩溶区隧道结晶堵塞管现象及其诱发的风险问题浅析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(S1): 332-335.
DUAN Haipeng, CHEN Fagen, YAO Chunjiang, et al. The Phenomenon of Crystal Pipe Blocking in Karst Tunnel and Its Induced Risk [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(S1): 332-335.
- [4] 蒋雅君, 杜坤, 陶磊, 等. 岩溶隧道排水系统堵塞机理的调查与分析[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(7): 131-135.
JIANG Yajun, DU Kun, TAO Lei, et al. Investigation and Discussion on Blocking Mechanism of Drainage System in Karst Tunnels [J]. Railway Standard Design, 2019, 63(7): 131-135.
- [5] 田崇明, 叶飞, 宋桂锋, 等. 隧道排水系统结晶堵塞机理及防治措施初探[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(5): 66-76, 83.
TIAN Chongming, YE Fei, SONG Guifeng, et al. On Mechanism of Crystal Blockage of Tunnel Drainage System and Preventive Countermeasures [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(5): 66-76, 83.
- [6] 叶飞, 李永健, 夏天晗, 等. 隧道喷射混凝土外掺料抗钙溶蚀结晶试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(5): 1515-1526, 1535.
YE Fei, LI Yongjian, XIA Tianhan, et al. Experimental Study on Resistance of Calcium Leaching and Crystallization of Tunnel Shotcrete Admixtures [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(5): 1515-1526, 1535.
- [7] 丁莎, 牛荻涛, 王家滨, 等. 粉煤灰对喷射混凝土强度和渗透性的影响[J]. 混凝土, 2014(12): 11-13.
DING Sha, NIU Ditao, WANG Jiabin, et al. Influence of Fly Ash on Strength and Permeability of Shotcrete [J]. Concrete, 2014(12): 11-13.
- [8] 蒋雅君, 郑屹, 喻良敏, 等. 接触溶蚀条件下玻璃粉对混凝土抗钙溶蚀能力的影响[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(2): 223-229.
JIANG Yajun, ZHENG Yi, YU Liangmin, et al. Effect of Glass Dust on the Resistance of Concrete to Calcium Corrosion under Contact Corrosion Conditions [J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(2): 223-229.
- [9] 刘数华, 巫美强, 高志扬. 废弃玻璃粉在活性粉末混凝土中的应用研究[J]. 混凝土, 2019(7): 125-127.
LIU Shuhua, WU Meiqiang, GAO Zhiyang. Study on Application of Waste Glass Powder into Reactive Powder Concrete [J]. Concrete, 2019(7): 125-127.

(下转第 181 页)

- [16] LI X C, LIU Y X, GUO L, et al. Data-driven Based Uncertainty Set Modeling Method for Microgrid Robust Optimization with Correlated Wind Power[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(2):420-432.
- [17] 张磊,杨洪明,刘文洵. 基于矩不确定分布鲁棒的微网经济调度[J]. 电力科学与技术学报,2015,30(2):35-40,67.
ZHANG Lei, YANG Hongming, LIU Wenxun. Microgrid Economic Dispatch Based on Distributionally Robust of Moment Uncertainty[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015,30(2):35-40,67.
- [18] 王继东,边翊楠,许秋铭,等. 考虑风险和碳交易机制的微电网分布鲁棒优化调度[J]. 高电压技术,2024,50(8):3477-3485.
WANG Jidong, BIAN Yinan, XU Qiuming, et al. Distributional Robust Optimal Dispatching of Microgrid Considering Risk and Carbon Trading Mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2024,50(8):3477-3485.
- [19] 魏梅芳,吴燕,黎跃龙,等. 基于分布鲁棒优化的微电网日前经济运行模型与求解方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2022,34(12):81-90.
WEI Meifang, WU Yan, LI Yuelong, et al. Day-ahead Economic Operation Model of Microgrid and Its Solving Method Based on Distributed Robust Optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2022, 34(12):81-90.
- [20] MA M R, LOU C W, XU X M, et al. Distributionally Robust Decarbonizing Scheduling Considering Data-driven Ambiguity Sets for Multi-temporal Multi-energy Microgrid Operation[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2024,38:101-123.
- [21] 程杉,黄天力,魏荣宗. 含冰蓄冷空调的冷热电联供型微网多时间尺度优化调度[J]. 电力系统自动化,2019,43(5):30-40.
CHENG Shan, HUANG Tianli, WAI Rongzong. Multi-time-scale Optimal Scheduling of CCHP Microgrid with Ice-storage Air-conditioning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019,43(5):30-40.
- (编辑:夏梦然)
-
- (上接第146页)
- [10] LI Q, QIAO H X, LI A Y, et al. Performance of Waste Glass Powder as a Pozzolanic Material in Blended Cement Mortar[J]. Construction and Building Materials, 2022,324:126531.
- [11] JAIN J, NEITHALATH N. Analysis of Calcium Leaching Behavior of Plain and Modified Cement Pastes in Pure Water[J]. Cement and Concrete Composites, 2009,31(3):176-185.
- [12] ALI-BOUCETTA T, BEHIM M, CASSAGNABERE F, et al. Durability of Self-compacting Concrete Containing Waste Bottle Glass and Granulated Slag[J]. Construction and Building Materials, 2021, 270:121133.
- [13] 孔庆秋. 用化学激发和水热激发废玻璃粉活性的研究[D]. 衡阳: 南华大学,2014.
KONG Qingqiu. Study on the activity of waste glass powder by chemical excitation and hydrothermal excitation[D]. Hengyang: University of South China,2014.
- [14] GAO X, YU Q L, LI X S, et al. Assessing the Modification Efficiency of Waste Glass Powder in Hydraulic Construction Materials[J]. Construction and Building Materials, 2020,263:120111.
- [15] LIANG G W, NI D Y, LI H X, et al. Synergistic Effect of EVA, TEA and C-S-Hs-PCE on the Hydration Process and Mechanical Properties of Portland Cement Paste at Early Age[J]. Construction and Building Materials, 2021,272:121891.
- [16] 汤玉娟. 溶蚀与氯盐侵蚀下水泥基材料的失效机理及性能评估[D]. 南京:南京理工大学,2019.
TANG Yujuan. Study on Deterioration Mechanism and Performance Evaluation of Cement-based Materials under Calcium Leaching and Chloride Attack[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [17] 张全红,王涛,穆松,等. 不同侵蚀环境下喷射混凝土耐久性提升技术及作用机理[J]. 硅酸盐通报,2024,43(4):1410-1419.
ZHANG Quanhong, WANG Tao, MU Song, et al. Durability Improvement and Mechanism of Shotcrete under Different Corrosion Environments[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024,43(4):1410-1419.
- [18] YEŞİLMEN S, AL-NAJJAR Y, BALAV M H, et al. Nano-modification to Improve the Ductility of Cementitious Composites[J]. Cement and Concrete Research, 2015,76:170-179.
- [19] 刘光焰,樊磊,金大智,等. 玻璃粉的活性激发技术及机理研究进展[J]. 科学技术与工程,2016,16(26):152-157,194.
LIU Guangyan, FAN Lei, JIN Dazhi, et al. Progress in Stimulating Techniques and Mechanism of Activity of Glass Powder[J]. Science Technology and Engineering, 2016,16(26):152-157,194.
- [20] 宋百姓. 废玻璃粉活性激发试验研究[D]. 衡阳:南华大学,2013.
SONG Baixing. Active Provocation Test of Waste Glass Powder[D]. Hengyang: University of South China, 2013.
- [21] 崔博强,刘音,李浩,等. 化学激发水泥-粉煤灰充填膏体胶凝性实验研究[J]. 矿业研究与开发,2018,38(3):127-131.
CUI Boqiang, LIU Yin, LI Hao, et al. Experimental Study of the Chemical Excitation on Gelation of Cement and Fly Ash Filling Paste[J]. Mining Research and Development, 2018,38(3):127-131.
- [22] 李洋,王述银,殷海波,等. 碱对水泥基材料水化及水化产物的影响研究综述[J]. 长江科学院院报,2019,36(1):127-133.
LI Yang, WANG Shuyin, YIN Haibo, et al. Review on the Influence of Alkali on Hydration and Hydration Products of Cement-based Materials[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019,36(1):127-133.
- [23] 巫茂寅,王起才,张戎令,等. 复合水泥基-水玻璃双液注浆材料胶凝性能及抗压强度试验研究[J]. 硅酸盐通报,2016,35(9):2741-2746.
WU Maoyin, WANG Qicai, ZHANG Rongling, et al. Cementing Performance and Compressive Strength of Complex Cementitious-sodium Silicate Two-shot Grouting Materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016,35(9):2741-2746.
- [24] 郑文忠,邹梦娜,王英. 碱激发胶凝材料研究进展[J]. 建筑结构学报,2019,40(1):28-39.
ZHENG Wenzhong, ZOU Mengna, WANG Ying. Literature Review of Alkali-activated Cementitious Materials[J]. Journal of Building Structures, 2019,40(1):28-39.
- (编辑:夏梦然)