

模拟酸雨和冻融循环对地聚物砂浆抗压/抗折强度和重金属固化的影响

汪颖,李映莹,张学,金舜铂,赵彬妮,李佳*

(中南民族大学 a.资源与环境学院; b.湖北省重金属污染防治工程技术研究中心; c.催化转化与能源材料化学教育部重点实验室,武汉 430074)

摘要 为探究单掺PVA纤维地聚物砂浆(GPP)和混掺PVA纤维和玄武岩纤维(GPPB)的砂浆抗压/抗折强度变化、重金属离子浸出、质量损失以及强度损失,采用XRD、SEM、BET等表征手段,研究了砂浆在酸雨浸泡、冻融循环过程中微观结构的损伤演变.结果表明:GPP与GPPB地聚物砂浆中的Mn、Zn、Pb、Cr、Cd、As、Cu、Ni等重金属离子浸出浓度符合GB 8978—1996标准,混掺纤维地聚物砂浆GPPB的抗冻性能优于单掺纤维地聚物砂浆GPP.

关键词 地聚物砂浆;模拟酸雨;冻融循环

中图分类号 TQ578.1 文献标志码 A 文章编号 1672-4321(2026)03-0306-09

doi:10.20056/j.cnki.ZNMDZK.20250813

Effects of simulated acid rain and freeze-thaw cycles on compressive strength and heavy metal immobilization of geopolymer mortar

WANG Ying, LI Yingying, ZHANG Xue, JIN Shunbo, ZHAO Binni, LI Jia*

(South-Central Minzu University, a. College of Resources and Environment; b. Hubei Engineering Research Center for Prevention and Control of Heavy Metal Pollution; c. Key Laboratory of Catalytic Conversion and Energy Materials Chemistry of Ministry of Education, Wuhan 430074, China)

Abstract To explore the changes in compressive and flexural strength of geopolymer mortar mixed with PVA fibers (GPP) and geopolymer mortar mixed with PVA fibers and basalt fibers (GPPB), as well as heavy metal ion leaching, mass loss, and strength degradation, characterization methods such as XRD, SEM, and BET were used to study the microstructural damage evolution of the mortar during acid rain immersion and freeze-thaw cycles. The results showed that the leaching concentrations of heavy metal ions such as Mn, Zn, Pb, Cr, Cd, As, Cu, and Ni in GPP and GPPB geopolymer mortars complied with GB 8978—1996 standard. The freeze-thaw resistance of the mixed fiber geopolymer mortar GPPB was superior to that of the single fiber geopolymer mortar GPP.

Keywords geopolymer mortar; simulated acid rain; freeze-thaw cycles

酸雨腐蚀是导致混凝土路面开裂敏感性增加和使用寿命缩短的关键因素,引发了严重的安全问题,且酸雨中的硫酸根离子会降解混凝土中的水泥水化产物,导致混凝土强度下降和开裂,进而造成建筑结构受损^[1].因此,减轻酸雨对混凝土结构的腐蚀和破坏、提高混凝土耐久性以及延长路面使用寿命

命,是酸雨多发地区的城市亟待关注的关键挑战.除此之外,郑锦辉分析了PVA纤维地聚物砂浆抗弯性研究^[2],班馨语研究了煤矸石地聚物在冻融循环作用下的耐久性^[3],但目前关于纤维增强地聚物在冻融气候条件下的性能演变研究尚显不足^[4].传统的冻融循环研究主要集中在宏观尺度上,探讨地聚

收稿日期 2025-01-18

*通信作者 李佳(1982-),女,副教授,博士,研究方向:固体废弃物资源化利用,E-mail:2014079@mail.scuec.edu.cn
基金项目 国家自然科学基金资助项目(52470170);甘肃省重点研发计划-工业类项目资助(25YFGA055)

物材料初始缺陷的局部冻融损伤演变和力学性能的降解特性.因此,本文旨在研究纤维增强碱活化地聚物砂浆在冻融环境下的力学性能退化,实现对冻融条件下地聚物砂浆微观结构演变的准确表征,为纤维地聚物砂浆在建筑修复和防护结构中的应用提供理论依据.

通过实验室模拟酸雨及冻融循环实验,本文探讨了砂浆在不同pH值下浸泡24 h后的抗压/抗折强度变化,以及探究砂浆在浸泡(1-30 d)过程中重金属离子的浸出浓度.同时,研究了砂浆经过冻融循环实验下的质量损失以及抗压抗折强度损失.利用各种表征手段分析了地聚物砂浆在酸雨浸泡及冻融循环条件下的作用机理.

表1 电解锰渣、磷石膏和高炉矿渣的化学成分

Tab. 1 Chemical compositions of EMR, PG and GGBS

不同物质	不同化学成分的质量分数/%									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MnO	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	其他
EMR	18.51	1.94	14.26	7.25	29.47	4.87	-	0.45	1.89	21.36
PG	10.22	1.59	26.70	0.58	38.54	-	1.49	0.83	0.20	19.85
GGBS	31.37	16.22	38.28	0.27	2.03	0.55	-	0.45	9.37	1.46

扫描电镜&能谱仪(SEM, SU8010, 日本 Hitachi); X射线衍射仪(XRD, DB高级模型, 德国 Bruker); 比表面积与孔径分布测试仪(BET, JW-BK132F, 北京精微高博科学技术有限公司); 电感耦合等离子体光谱仪(ICO-OES, Avio 200, 上海赛默飞世尔).

1.2 地聚物砂浆的制备

将电解锰渣在105 °C的烘箱中干燥24 h后,放入球磨机中研磨30 min,并过100目筛.磷石膏在150 °C的烘箱中烘烤24 h,球磨10 min,过100目筛.高炉矿渣预先过100目筛备用.碱激发剂由氢氧化钠溶液与硅酸钠溶液按2:1的比例混合制备.将三种干燥后的配料放入胶砂锅中,慢速搅拌3 min,使混合基质更加均匀.在制备地聚物砂浆之前,需确保胶砂锅和搅拌叶片湿润.接着,将碱激发剂和一定量的蒸馏水倒入胶砂锅中,然后加入胶凝材料和ISO标准砂,分两次向砂浆中加入纤维,并将混合物继续搅拌4 min.将混合好的新浆料装入准备好的模具(40 mm×40 mm×160 mm)中,振荡120 s,并覆上一层薄膜.最后,将砂浆放置在水泥混凝土恒温恒湿标准养护箱中,在20 °C的温度为和95%的相对湿度下分别养护28 d.其中GPP代表单掺PVA纤维的地聚物砂浆,GPPB代表混掺PVA纤维及玄武岩纤维的地聚物砂浆.

1 实验部分

1.1 材料和仪器

电解锰渣(EMR)来源于广西省某锰矿业公司;磷石膏(PG)采集自中国湖北省荆门市的磷石膏渣场;高炉矿渣(GGBS)由巩义市龙泽净水材料有限公司提供;ISO标准砂来源于厦门艾思欧标准砂有限公司.表1为电解锰渣、磷石膏和高炉矿渣的化学成分.PVA纤维(直径=40 μm,长度=12 mm,抗拉强度=1600 MPa,杨氏模量≥380 cN·dtex⁻¹)来源于上海影佳实业发展有限公司;玄武岩纤维(直径=17 μm,长度=12 mm,抗拉强度=0.41 N·tex⁻¹,比重2.8~3.3 g·cm⁻³)来源于长沙宁祥建筑有限公司.

1.3 模拟酸雨实验及冻融循环实验

模拟酸雨实验为硫酸/硝酸混合溶液,本文采用硫酸和硝酸摩尔比为4:1,使用去离子水稀释,调节pH值分别为2.0、3.0、4.0、4.5、5.6.模拟酸雨实验分两组进行,第一组将养护28 d的试块放入1 L烧杯,并做好标记.随后,分别浸泡于pH值为2.0、3.0、4.0、4.5、5.6的硫酸/硝酸混合溶液,记录试块的浸泡日期.保证溶液浓度的稳定,每6 h更换一次硫酸/硝酸混合溶液,直到达到浸泡日期后取出试块.浸泡24 h后分别对GPP和GPPB进行抗折强度和抗压强度测试.另一组实验将地聚物砂浆浸泡1-30 d,并记录酸浸期间砂浆中重金属离子的浸出浓度.重金属离子的浸出浓度通过电感耦合等离子体光谱仪进行测试.

冻融实验,为验证地聚物砂浆能够在季冻区路面修补及新建路面中的应用及推广可行性,需验证其抗冻性能是否满足要求.采用快速冻融试验方法,将抗冻试样浸泡在水中48 h,擦干水分后称重,记录砂浆的原始质量.将试样置于-20 °C的冰箱中12 h,再置于20 °C,湿度为95%的标准养护箱12 h,此为一个冻融周期.分别对GPP进行5、10、15、20、25、30 d的冻融循环,记录冻融后砂浆的质量损失及抗折/压强度变化.

2 结果与讨论

2.1 模拟酸浸实验分析

2.1.1 模拟酸雨不同 pH 对地聚物砂浆的影响

基于前文研究,可知在养护 28 d 时,GPP 与 GPPB 地聚物砂浆的抗压强度和抗折强度数据如表 2 所示.

如图 1 所示,GPP 和 GPPB 在 pH 为 2.0、3.0、4.0、4.5、5.6 的条件下浸泡 24 h 后的抗压强度和抗折强度.与未经酸浸的地聚物砂浆相比,可以看出酸浸后的地聚物砂浆抗压强度和抗折强度均有所下降.对于单掺 PVA 纤维地聚物砂浆 GPP,在 pH 值为 2.0 时,其抗压强度降至 28.7 MPa,抗折强度为 4.0 MPa.

表 2 实验样品的组成及性质

Tab. 2 Composition and properties of test samples

不同样品	组成和性质						
	$m(\text{EMR})/\text{g}$	$m(\text{PG})/\text{g}$	$m(\text{GGBS})/\text{g}$	$m(\text{PVA})/\text{g}$	$m(\text{BF})/\text{g}$	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa
GPP	200	40	160	0.7	0	35.8	7.0
GPPB	200	40	160	0.4	0.4	36.8	7.9

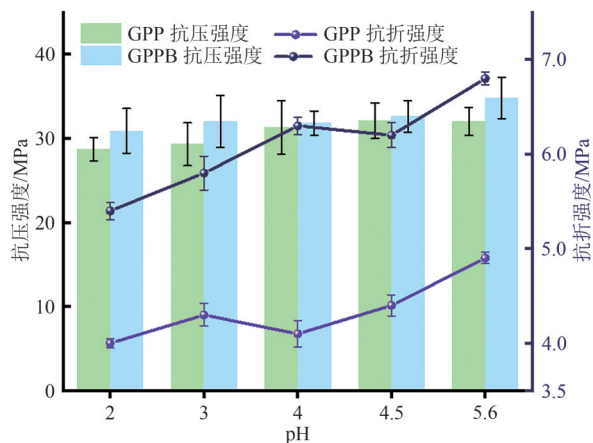


图 1 GPP 和 GPPB 在不同 pH 酸雨浸泡 24 h 下的抗压及抗折强度
Fig. 1 Compressive and flexural strength of GPP and GPPB under acid rain immersion at different pH for 24 h

2.1.2 pH 为 4.5 时重金属离子的浸出浓度

采用电感耦合等离子体光谱仪测试 pH 为 4.5 时重金属离子的浸出浓度.如图 2(a)所示,为 pH 为 4.5 时单掺纤维地聚物砂浆 GPP 重金属离子浓度随时间而变化.可以从图中看出,在浸泡时间为 30 d 内,Cr、Ni、Cd、As 的重金属浸出浓度均低于 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其中重金属 Pb 在浸泡时间为 1 d 时浸出浓度最高,达到 $0.049 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.重金属 Zn 的浸出浓度随着浸泡时间的增加而上升,在浸泡时间为 30 d 时,重金属 Zn、Pb、Cr、Cd、As、Cu、Ni 的浸出浓度分别为 0.058 、 0.037 、 0.003 、 0.017 、 0.001 、 0.05 、 $0.004 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

GPP 材料强度下降了 28.2%,折度下降了 42.9%.而混掺 PVA 纤维及玄武岩纤维地聚物砂浆 GPPB 抗压强度保持在 30.9 MPa,抗折强度为 5.4 MPa.GPPB 材料强度下降了 16.0%,折度下降了 31.6%.这表明在酸浸浓度较低的情况下,相较于单掺纤维地聚物胶凝材料,混掺纤维地聚物砂浆具有更优异的耐酸侵蚀能力.这可能是归因于混掺纤维砂浆在地质聚合过程中形成了致密而稳定的钠-铝硅酸盐网络,该网络高度交联且孔隙率低,因此不易受到化学侵蚀和降解^[5].当 pH 值为 4.5 时,GPP 的抗压强度为 32.1 MPa,抗折强度为 4.4 MPa;GPPB 的抗压强度为 32.6 MPa,抗折强度为 5.7 MPa.这表明 GPP 与 GPPB 在模拟酸雨的情况下均展现出较强的耐腐蚀性.

图 2(b)所示为 pH 为 4.5 时混掺纤维地聚物砂浆 GPPB 重金属离子浓度随时间的变化情况.从图中可以看出,混掺纤维地聚物砂浆 GPPB 重金属离子浸出浓度整体低于单掺纤维地聚物砂浆 GPP.在浸泡时间为 30 d 内,Cd、Ni、Cr 重金属浸出浓度均低于 $0.015 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,重金属 Cu 的浸出浓度整体趋势是随着浸泡时间的增加而升高.Zn、Pb、Cr、Cd、As、Cu、Ni 的浸出浓度分别为 0.037 、 0.034 、 0.009 、 0.005 、 0.023 、 0.045 、 $0.009 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

图 2(c)所示为 pH 为 4.5 为 GPP 和 GPPB 的锰金属离子浓度随时间的变化情况.从图中可以看出,GPPB 固化重金属锰的效果优于 GPP.即地聚合物中重金属的浸出浓度较低,在有害元素的稳定/固化(S/S)中表现出更好的性能,这种现象与地质聚合物更密集和三维的网络结构有关^[6].浸出实验后,样品中所有重金属的浸出浓度均未超过相关限值,符合 GB 8978—1996 所规定的标准: $\rho(\text{Mn}) < 2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\rho(\text{Zn}) < 2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\rho(\text{Pb}) < 1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\rho(\text{Cr}) < 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\rho(\text{Cd}) < 0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\rho(\text{As}) < 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\rho(\text{Cu}) < 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\rho(\text{Ni}) < 1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,重金属离子浸出浓度符合国家标准,表明该砂浆存在资源利用的安全条件.

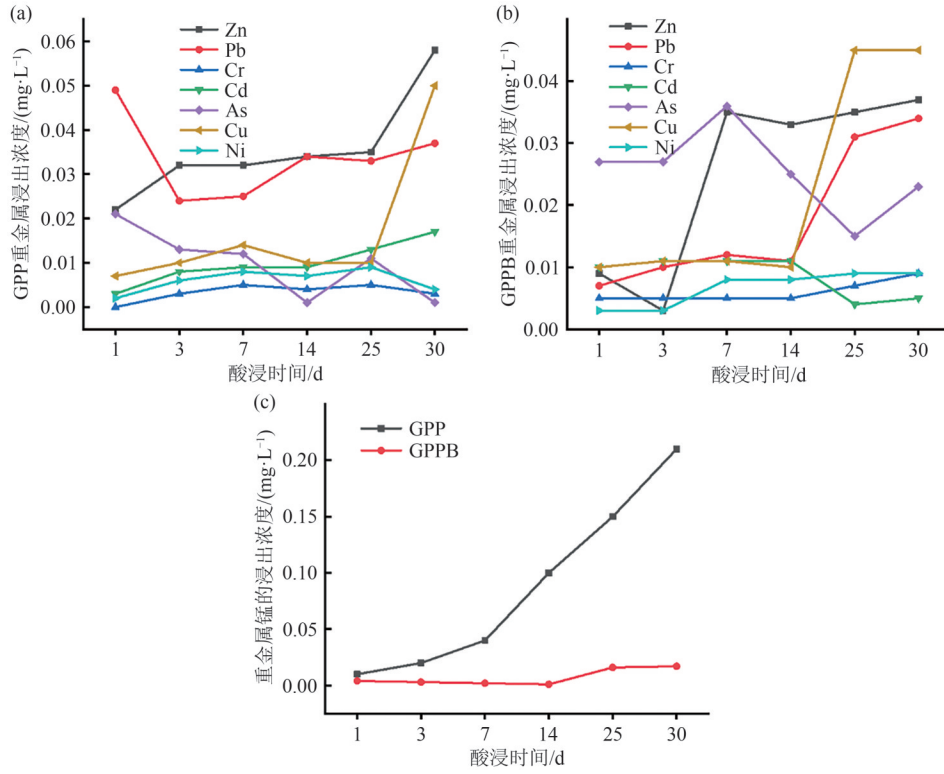
2.2 酸雨浸泡后地聚物砂浆表征分析

2.2.1 SEM 分析

由图 3(a)可以看出,单掺纤维砂浆 GPP 在酸浸 30 d 后,呈现出大量的独立的团状颗粒,孔隙较大,

整体结构显得松散且多孔.在图 3(b)中,可知在更大的倍数下,纤维团聚的现象更为直观,基体与团聚纤维之间的界面出现了裂纹^[7].图 3(c)显示,砂浆存在明显的蜂窝状结构,这与前文的结论相符,即酸浸后的砂浆 GPP 机械强度下降.由于存在蜂窝结

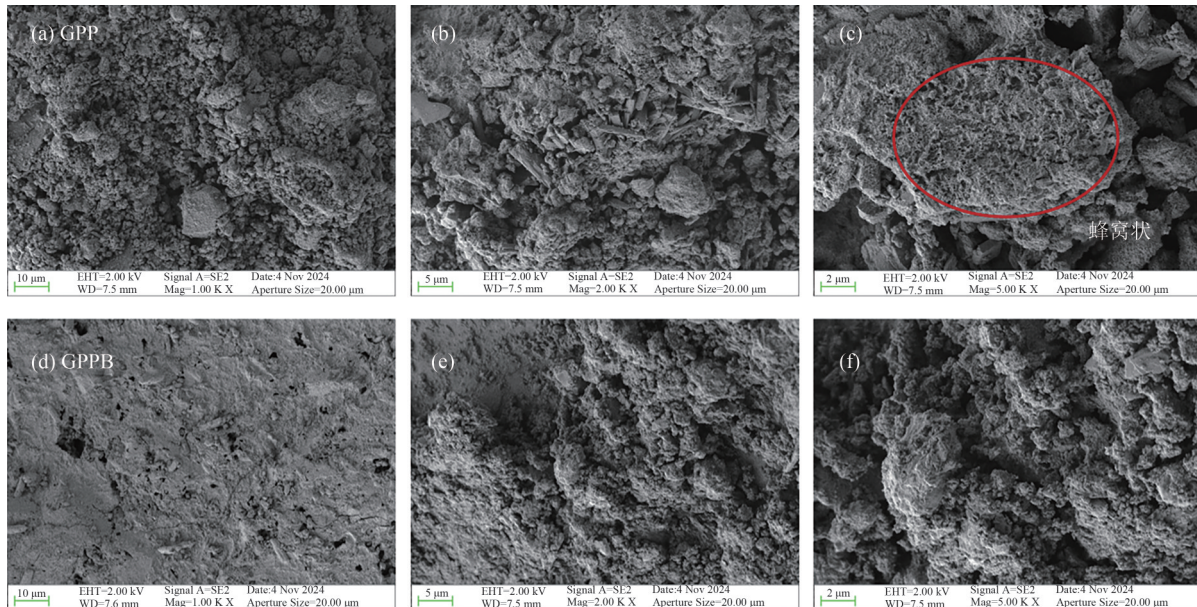
构,砂浆的整体强度降低,可能导致其承载能力不足.由图 3(d)中,发现混掺纤维地聚合物砂浆 GPPB 在酸浸 30 d 后,虽然有裂痕,但整体结构仍然紧密.在图 3(e)与(f)中,未观察到明显的纤维结构,说明纤维已被地聚合物砂浆凝胶包裹并结合^[8].



(a)GPP在酸浸1-30 d重金属浸出浓度;(b)GPPB在酸浸1-30 d重金属浸出浓度;(c)GPP与GPPB在酸浸1-30 d重金属锰的浸出浓度

图2 pH为4.5时重金属离子浓度随时间的变化

Fig. 2 Variation of heavy metal ion concentration with time at pH 4. 5



(a)、(b)、(c)放大倍率分别为10、5、2 μm的GPP;(d)、(e)、(f)放大倍率分别为10、5、2 μm的GPPB

图3 不同放大倍率下的地聚合物砂浆的扫描电镜图像

Fig. 3 SEM images of geopolymer mortar at different magnifications

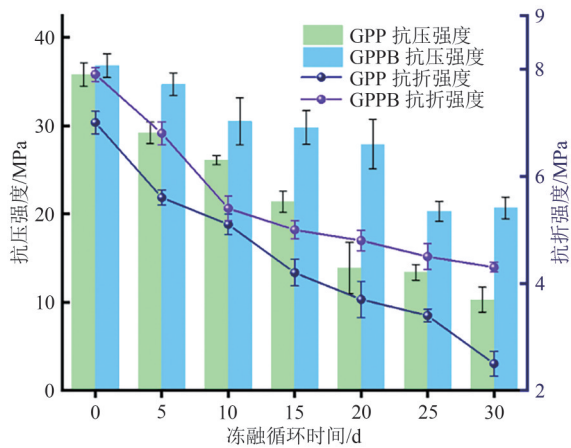


图5 经0-30 d冻融循环后的GPP与GPPB地聚物砂浆的抗压/抗折强度

Fig. 5 Compressive/flexural strength of GPP and GPPB ground polymer mortars after 0-30 d freeze-thaw cycles

表4 不同冻融循环天数后强度损失率

Tab. 4 Loss of strength after different freeze-thaw cycle days

循环天数/d	强度损失率/%	
	GPP	GPPB
5	18.43	5.70
10	27.09	17.12
15	40.22	19.02
20	61.17	24.18
25	65.56	44.83
30	71.22	43.75

2.4 冻融循环后地聚物砂浆表征分析

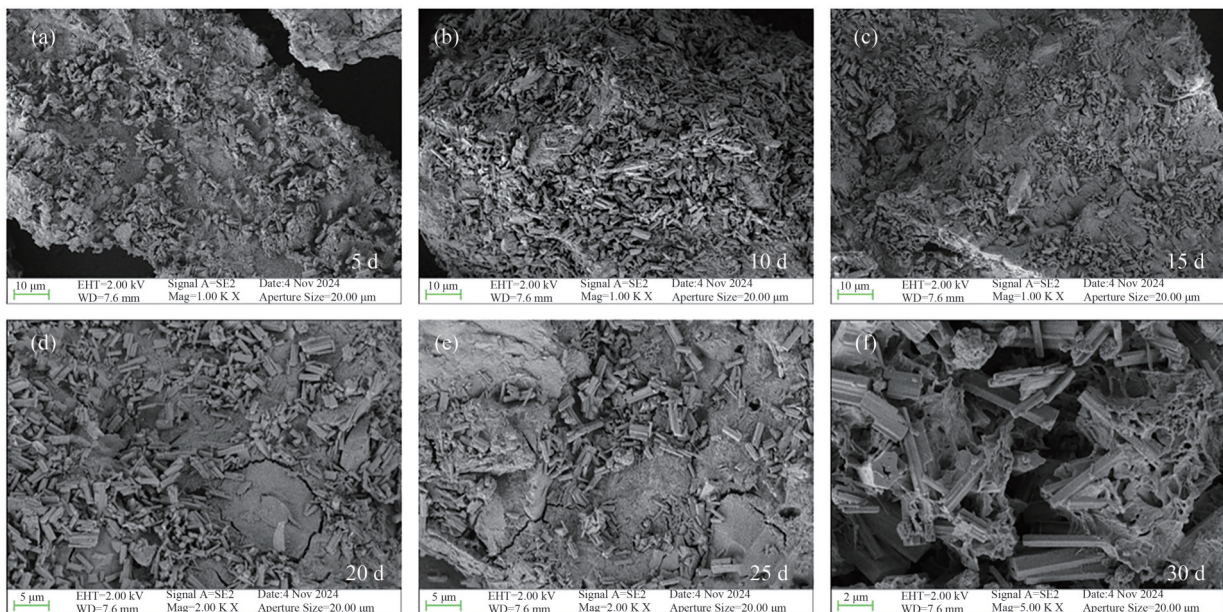
2.4.1 SEM分析

地聚物砂浆的冻融循环过程本质上是由于水分冻融引起的试件体积变化的循环.这一过程可能导致一系列问题,例如开裂、孔结构变化以及试样内部的化学反应.这些问题会导致表面开裂和内部裂纹的形成,从而恶化骨料材料的机械性能和耐久性^[10].图6显示了GPPB在冻融循环作用下,经过5、10、15、20、25、30 d的微观形态变化过程.

在砂浆经历冻融循环之前,胶凝材料与骨料及纤维之间形成了紧密的粘附,胶凝材料构成了稳定的三维结构^[11].经过20次循环后,可以在胶凝材料表面观察到明显的裂纹,孔洞数量开始增多.这与强度损失率的结果相吻合,20次的冻融循环下,强度损失率接近25%.经过25次循环后,如图6(f)所示,可以清楚地观察到穿过界面的裂缝,一些水化产物开始产生裂缝和孔洞.原本完整致密的结构开始松动,试样出现部分损伤.在孔隙结构中,不断受到水分冻结引起的冻结压力和膨胀压力的作用.这种压力变化对GPPB砂浆的内部孔结构造成了破坏,进而导致样品性能迅速恶化^[12].

2.4.2 XRD分析

图7显示了经过5-30 d冻融循环后,GPP与GPPB地聚物砂浆的XRD图.循环冻融效应不会在地聚合物上产生新材料^[13],因此,XRD测试出的主要物相包括石英(SiO₂)、方解石(Calcite)、白云石



(a) 5 d; (b) 10 d; (c) 15 d; (d) 20 d; (e) 25 d; (f) 30 d

图6 经5-30 d冻融循环后的GPPB地聚物砂浆的微观形态变化

Fig. 6 Micro-morphological changes in GPPB geopolymer mortar after 5-30 d freeze-thaw cycles

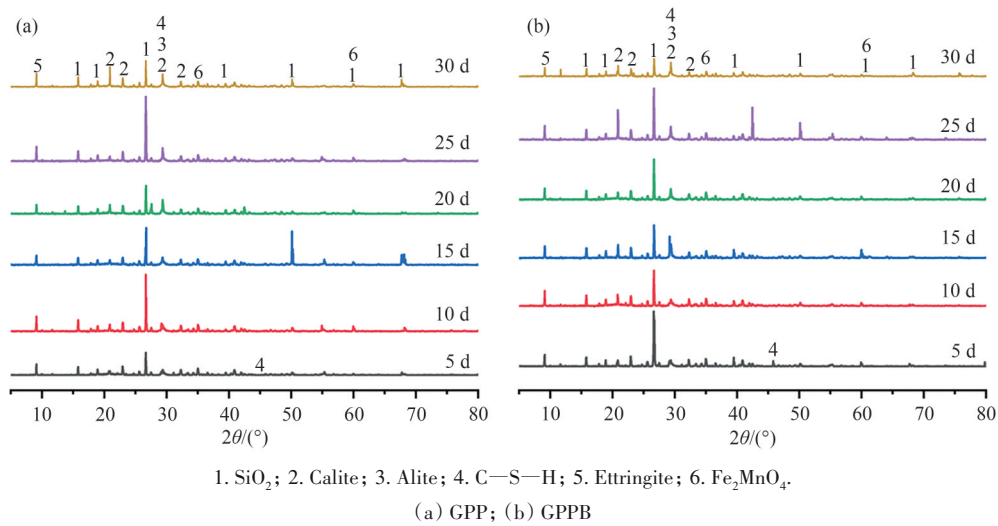


图 7 经 5-30 d 冻融循环后 GPP 与 GPPB 地聚物砂浆的 XRD 图
Fig. 7 XRD plots of GPP and GPPB geopolymers mortar after 5-30 d freeze-thaw cycles

(Alite)、C—S—H 凝胶、钙矾石 (Ettringite) 以及铁锰化合物 (Fe_2MnO_4)。由图中可以明显观察到,在冻融循环时间达到 30 d 时,GPP 与 GPPB 地聚物砂浆所检测的物相的衍射峰均较低。这表明在长时间的冻融作用下,维持地聚物砂浆强度的矿物相(如 C—S—H 结构和钙矾石等)正在逐渐减少。当 GPP 经历 5 d 冻融时,代表 C—S—H 结构的衍射峰较低,而在 GPPB 中,代表 C—S—H 结构的 XRD 衍射峰则相对显著。这可能是因为砂浆中 PVA 纤维与玄武岩纤维的协同作用,阻止了砂浆大规模分离。进一步说明,相较于仅添加单一纤维的地聚物砂浆 GPP,混掺纤维下的地聚物砂浆 GPPB 具有更好的抗冻性能,这与之前抗压强度的测试结果相一致。此外,一些研究者已经证实了地聚物的抗压强度与其抗冻融性能之间的相关性,表明高强度的地聚物同样具有更高的抗冻融性能^[14]。在冻融循环过程中,随着砂浆温度的降低,大孔隙中的水分开始结冰,从而增加了这些孔隙中未冻结水的碱度,而由于浓度差异产生的渗透压会导致砂浆的机械性能下降^[15]。

2.4.3 BET 分析

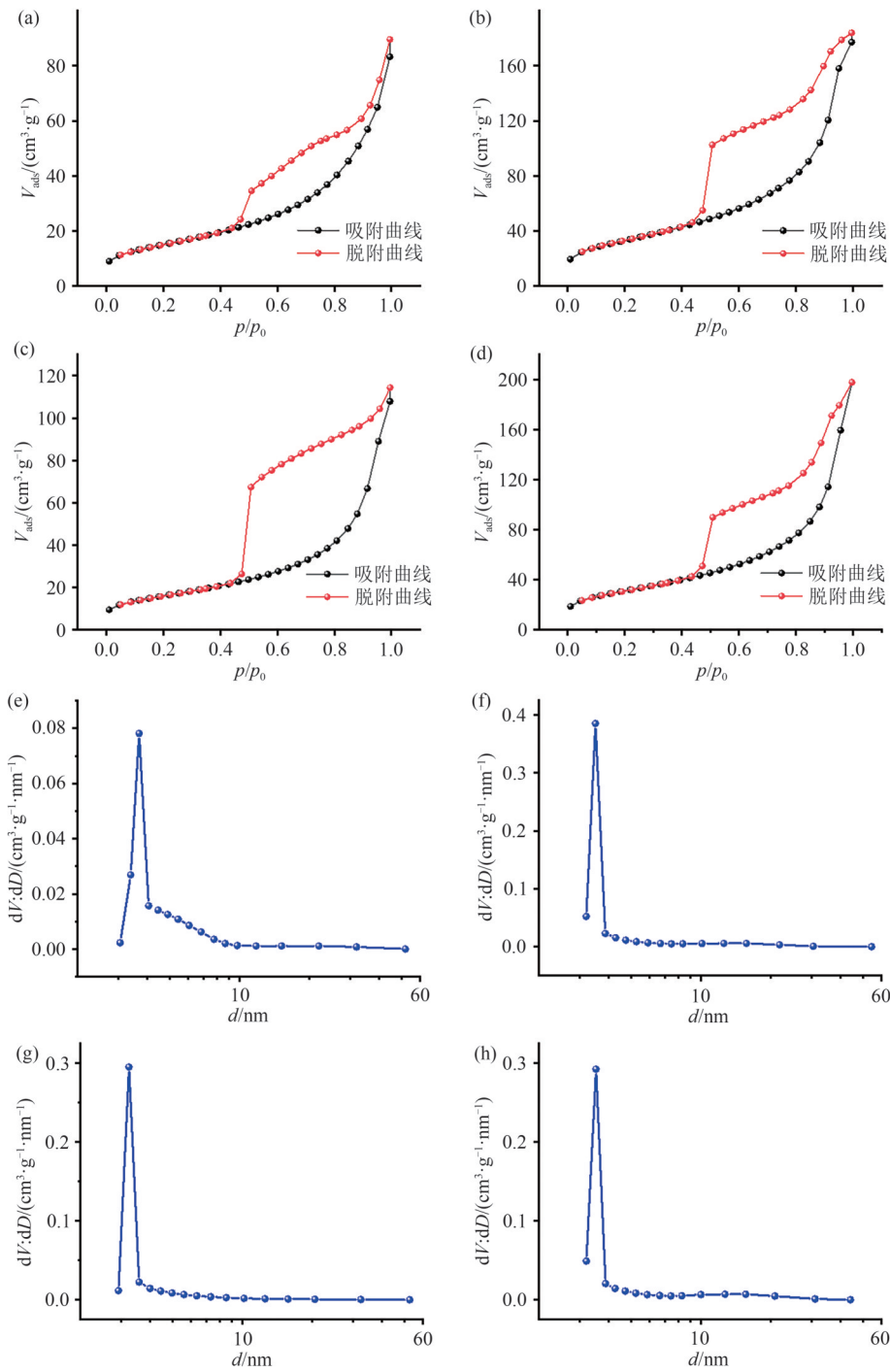
如图 8 所示,本文得到的等温吸附-脱附曲线与 H_4 型相似,即 N_2 吸附-脱附等温线为 IV 型,并伴随着 H_4 型回滞环,该曲线在低 p/p_0 (<0.4) 区域呈现出向上凸起的形态^[16]。所有样品在相对压力 0.40~0.98 范围内均显示出磁滞回线,这证实了介孔结构的存在^[17]。图 8 中孔径分布图显示,GPP 冻融前的 BET 比表面积为 $54.6828 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,冻融后的 BET 比表面积为 $119.9598 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。GPPB 在冻融前的 BET 比表面积为 $58.3249 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,GPPB 冻融后的 BET 比表面积为

$112.3492 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。经过冻融循环后,GPP 与 GPPB 的 BET 比表面积均有所增加,但 GPPB 的比表面积小于 GPP,这进一步表明 GPPB 具有更好的耐冻性能。冻融前 GPP 与 GPPB 的平均孔径分别为 6.2661 、 4.4985 nm ,冻融后分别为 7.0225 、 5.2583 nm ,说明在冻融条件下,材料的孔隙率逐渐增加,这是由于膨胀力导致的孔径扩大^[18]。

3 结语

本文揭示了地聚物砂浆在酸雨侵蚀及冻融循环作用下的质量损失、力学性能及微观结构特征,结果表明:当 pH 值为 4.5 时,经酸雨浸泡 24 h 后,GPP 的抗压强度为 32.1 MPa,抗折强度为 4.4 MPa;GPPB 的抗压强度为 32.6 MPa,抗折强度为 5.7 MPa。由此可见:较于单掺纤维地聚物砂浆 GPP,混掺纤维地聚物砂浆 GPPB 具有更强的耐腐蚀性。GPP 与 GPPB 重金属离子 Mn、Zn、Pb、Cr、Cd、As、Cu、Ni 的浸出浓度符合 GB 8978—1996 的标准规定。经过 30 d 冻融循环后,GPP 及 GPPB 砂浆的整体质量损失率均小于 5%,GPP 在冻融循环 10 d 时强度损失率超过 25%,而 GPPB 在 20 次的冻融循环下的强度损失率小于 25%。这表明混掺纤维地聚物砂浆 GPPB 具有较好的抗冻性能。综上所述,与单掺纤维地聚物砂浆 GPP 相比,混掺纤维地聚物砂浆 GPPB 在酸雨侵蚀及冻融循环的条件下展现出更好的耐久性能。

未来可以考虑采用其他种类或不同长度的纤维来进一步提升地聚物砂浆的耐久性。虽然本材料



(a)、(b) GPP冻融循环前、后的氮气吸脱附等温线;(c)、(d) GPPB冻融循环前、后的氮气吸脱附等温线;(e)、(f) GPP冻融循环前、后的孔径分布图;(g)、(h) GPPB冻融循环前、后的孔径分布图

图8 GPP和GPPB BET分析图

Fig. 8 BET analysis chart of GPP and GPPB

在酸雨侵蚀和冻融循环下表现出较好的性能,但实际环境更为复杂,因此还需将材料置于更为复杂的环境中进行深入研究,以实现地聚物砂浆的实际应用.本文为地聚物材料在酸雨及冻融条件下的应用提供了坚实的理论基础,未来可进一步探索其在建筑修复和防护结构设计中的应用潜力.

参 考 文 献

[1] 刘新宇. 冻融和疲劳共同作用下地聚物再生透水砼抗酸雨性能研究[D]. 常州: 常州大学, 2023.
 [2] 郑锦辉. PVA纤维增强高强度地聚物砂浆抗弯性能研究[D]. 郑州: 中原工学院, 2024.
 [3] 班馨语. 冻融及硫酸盐侵蚀耦合作用下自燃煤矸石集

- 料地聚合物混凝土耐久性研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
- [4] 田志杰. 冻融循环作用下重力坝混凝土力学特性研究[J]. 水利科技与经济, 2024, 30(8): 122-125.
- [5] SUKONTASUKKUL P, INTARABUT D, PHOONGERNGKHAM T, et al. Self-compacting steel fibers reinforced geopolymer: Study on mechanical properties and durability against acid and chloride attacks[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 19: e02298.
- [6] LIANG D, YAN J, WANG F, et al. The long-term leaching behavior of heavy metals in geopolymers and Portland cement bricks containing MSWI fly ash: A comparative study[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(3): 112894.
- [7] FENG H, XIN X, GUO A, et al. Effect of mix proportion parameters on chloride erosion resistance of fly ash/slag-based engineered geopolymer composites[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 438: 140785.
- [8] ZHANG M, ZHAO M, ZHANG G, et al. Durability of red mud-fly ash based geopolymer and leaching behavior of heavy metals in sulfuric acid solutions and deionized water[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 124: 373-382.
- [9] VALENCIA-SAAVEDRA W G, MEJÍA DE GUTIÉRREZ R, PUERTAS F. Performance of FA-based geopolymer concretes exposed to acetic and sulfuric acids[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 257: 119503.
- [10] PANG S, ZHANG X, LEI B, et al. Effect of freeze-thaw cycle on deterioration of mechanical properties of fibre-reinforced geopolymer cemented aeolian sand[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 452: 138943.
- [11] LUO Y, KLIMA K M, BROUWERS H J H, et al. Effects of ladle slag on Class F fly ash geopolymer: Reaction mechanism and high temperature behavior[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 129: 104468.
- [12] BAO W, YIN Y, MI W, et al. Durability and microstructural evolution of high-performance ecological geopolymer concrete under low-pressure-salt-erosion-freeze-thaw cycling conditions[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 426: 136197.
- [13] LU J, LIU J, YANG H, et al. Experimental investigation on the mechanical properties and pore structure deterioration of fiber-reinforced concrete in different freeze-thaw media[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 350: 128887.
- [14] FU Y, CAI L, WU Y. Freeze-thaw cycle test and damage mechanics models of alkali-activated slag concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(7): 3144-3148.
- [15] WANG R, HU Z, LI Y, et al. Review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the freeze-thaw environment[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 321: 126371.
- [16] FENG B, LU Z, WU Y, et al. Mechanical strength and durability of GBFS geopolymer modified with metakaolin and functionalized beta-silicon carbide whiskers[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 446: 137998.
- [17] SU H X, LI C J, ZHANG Y J. Facile synthesis of geopolymer-based hierarchical porous materials for efficient adsorption-photocatalysis of dye wastewater[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(6): 114809.
- [18] ZHENG Y, RAO F, YANG L, et al. Comparison of ternary and dual combined waste-derived alkali activators on the durability of volcanic ash-based geopolymers[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2023, 136: 104886.

(责编&校对 刘钊)