



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403353

引用格式:宋永远,周文娟,赵依琳.修补用碱激发材料的泛碱抑制研究[J].科学技术与工程,2025,25(6):2499-2510.

Song Yongyuan, Zhou Wenjuan, Zhao Yilin. Floodinginhibition measures of alkali-inspired materials for patching[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(6): 2499-2510.

修补用碱激发材料的泛碱抑制研究

宋永远¹, 周文娟^{1,2*}, 赵依琳¹

(1. 北京建筑大学土木与交通工程学院, 北京 100044; 2. 住房城乡建设部建筑垃圾资源化工程技术创新中心, 北京 100044)

摘要 为降低修补用碱激发材料的泛碱,通过表面喷涂外加剂、掺加玻璃粉、掺加赤泥的方式研究了修补用碱激发材料的泛碱抑制措施。并通过扫描电镜、氮吸附分析、超景深图像分析等方法分析其抑制机理。结果表明:在砂浆试件表面涂刷 PNC401 防水涂料或有机硅防水剂后泛碱量分别减少了 61.3% 和 26.7%;玻璃粉、赤泥的掺量在 15% 内满足修补砂浆各项性能要求;掺加 15% 的玻璃粉、赤泥后泛碱量分别减少了 60.7%、52.0%,且砂浆内部孔隙数量较少,无明显裂缝产生,减少了碱性离子的溶出通道,对修补用碱激发材料的泛碱有很好的抑制效果。

关键词 路面快速修补砂浆; 碱激发; 泛碱; 抑制措施

中图分类号 TU526; 文献标志码 A

Floodinginhibition Measures of Alkali-Inspired Materials for Patching

SONG Yong-yuan¹, ZHOU Wen-juan^{1,2*}, ZHAO Yi-lin¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Engineering Technology Innovation Centre for Construction Waste Recycling, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Beijing 100044, China)

[Abstract] In order to reduce the panalkalisation of alkali-inspired materials for repair, the inhibition of panalkalisation of alkali-inspired materials for repair was investigated by means of surface spraying of admixtures, doping of glass powder, and doping of red mud. The inhibition mechanism was also analysed by scanning electron microscopy, nitrogen adsorption analysis and super depth of field image analysis. The results show as follows. After brushing PNC401 waterproof coating or organosilicon waterproofing agent on the surface of mortar specimen, the amount of alkali flooding is reduced by 61.3% and 26.7%, respectively. The dosage of glass powder and red mud within 15% meets the requirements of the performance of the repair mortar. The amount of alkali flooding was reduced by 60.7% and 52.0% after doping of 15% glass powder and red mud, respectively, and the number of pore spaces inside the mortar was less, no obvious cracks were produced, which reduced the dissolution of alkaline ions. The number of pores inside the mortar is less, and there is no obvious crack, which reduces the dissolution channel of alkaline ions, and it has a good inhibition effect on the alkaline flooding of alkaline stimulating materials for repairing.

[Keywords] rapid repair mortar for road surface; alkali-activated; efflorescence; suppression measures

近年来,中国交通运输业蓬勃发展,水泥混凝土路面因其高强度、低成本和长寿命等优点,被广泛应用于交通工程和市政工程中。据统计,截至 2022 年底,中国公路总里程达到 535×10^4 km,其中水泥混凝土路面占据了很大比例。然而,由于设计、施工、养护以及超载等原因,水泥混凝土路面经常出现裂缝、错台、露骨、胀起等病害,需要进行修补处理。

碱激发材料具有快速凝结硬化和良好的耐久

性,符合路面修补材料的性能要求^[1-2]。此外,作为一种绿色环保的建筑材料,应用碱激发混凝土于路面修补也能带来良好的环境效益。因此,碱激发材料适宜作为路面修补材料来使用。但是其在大规模使用过程中仍存在很多问题,首先,易泛碱是碱激发材料面临的一个问题。碱激发材料中的碱性激发剂使用较多,导致容易产生泛碱现象。泛碱会影响碱激发材料制品的外观,降低抗渗性和力学性能^[3],泛碱现象主要是由于碱激发材料中过多的游

收稿日期:2024-05-07; 修订日期:2024-12-16

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3803403)

第一作者:宋永远(1999—),男,汉族,山东临沂人,硕士研究生。研究方向:固体废弃物的资源化利用。E-mail:2108590022111@stu.bucea.cn。

*通信作者:周文娟(1977—),女,汉族,安徽宿州人,硕士,副教授。研究方向:固体废弃物的资源化利用。E-mail:zhouwenjuan@ bucea.edu.cn。

离碱和较多的孔隙,导致水分蒸发时游离碱迁移到材料表面。为了解决泛碱问题,可采取降低内部孔隙率、进行表面疏水改性和控制激发剂化学成分的方法^[4]。王金邦^[5]通过加入5A沸石和纳米SiO₂的方式来减少防护/修补用碱激发矿渣/钢渣胶凝材料的泛碱程度。Saludung等^[6]发现通过加入硅灰可以降低碱激发矿渣胶凝材料的泛碱程度,这主要是由于硅灰中的活性SiO₂在强碱条件下容易被激发从而发生地质聚合反应,优化了材料内部的孔结构^[7],同时由于硅灰的比表面积较小,可以起到微集料填充效应^[8],提高了材料的密实度。王国栋^[9]的研究结果表明与未添加改性材料相比,在碱激发矿渣涂层材料的表面涂刷甲基硅油和纳米环保渗透型有机硅防水剂可以大幅降低了试样的泛碱程度。Longhi等^[10]通过优化地聚物配合比,使体系中可溶性硅酸盐增加,从而削弱其泛碱程度。泛碱程度的降低与地聚物凝胶中Si含量较高有关,较高的Si含量降低了试件的孔隙率和渗透性,并延缓碱金属离子浸出的过程。房杰等^[11]研究发现不同模数和碱当量的激发剂对碱激发偏高岭土泛碱有着影响。研究表明,碱激发材料的激发剂模数和碱当量不宜过高或过低。因此,在选择激发剂时需要注意模数和碱当量的合适性,以避免泛碱问题的发生。

综上所述,目前大多研究是通过减少游离碱的含量和优化体系孔隙率,以及降低碱金属阳离子的浸出来减少泛碱。原料绝大多数都是粉煤灰、高炉矿渣粉或偏高岭土,对使用再生微粉的修补用碱激发材料却鲜有研究,并且减少泛碱的措施单一。因此,现通过单一措施(如表面涂刷外加剂或掺加矿物掺合料)和复合措施(将表面涂刷外加剂与掺加矿物掺合料相结合)来改善修补用碱激发材料的泛碱程度,以期以降低修补用碱激发材料的泛碱问题提供参考。

1 实验

1.1 原材料

本次试验所用矿渣为S95级矿渣,密度为

2.85 g/cm³,细度为3.17%(45μm筛余量),需水量比为102%,7d、28d活性指数分别为86%、90%。再生微粉比表面积为744.2 m²/kg,需水量比为106%。骨料为天然河砂,细度模数2.3,表观密度2630 kg/m³、堆积密度1820 kg/m³、孔隙率31%。本次试验所用水包括自来水和去离子水,其中自来水用于修补砂浆的制备,去离子水用于泛碱加速试验。采用水玻璃作为碱激发剂,模数2.25、波美度50°Bé。氢氧化钠为片状,纯度为99.2%。

抑制泛碱的措施主要有降低内部孔隙率、对材料表面进行疏水改性和控制激发剂化学成分等。本次实验中泛碱抑制材料分为试件表面喷涂外加剂和掺加玻璃粉、赤泥两种方式。外加剂为有机硅防水剂和PNC401防水涂料。有机硅防水剂为无色透明液体,主要成分为甲基硅酸钠,防水性能优异,使用时按照外加剂:水=1:8的比例,均匀喷涂在试件表面。PNC401防水涂料是一种青灰色干粉状混合物,由硅酸盐水泥、石英砂以及多种活性化合物组成。使用时按照水与粉体的比例为0.3:1,配制涂料,均匀刮涂在试件表面。玻璃粉是由废弃玻璃经清洗、干燥、磨细后得到的,外观为白色粉体,如如图1(a)所示,密度为3.12 g/cm³,平均粒径5~6 μm。本次试验采用的拜耳法赤泥,如图1(c)所示,粒径分布不均匀,其中细颗粒可以促进Si⁴⁺的浸出,从而生成凝胶物质,粗颗粒可以起到胶结作用^[12],比表面积为1262 m²/kg。矿渣、再生微粉、玻璃粉、赤泥化学组成如表1所示。

1.2 试验方法

1.2.1 样品制备

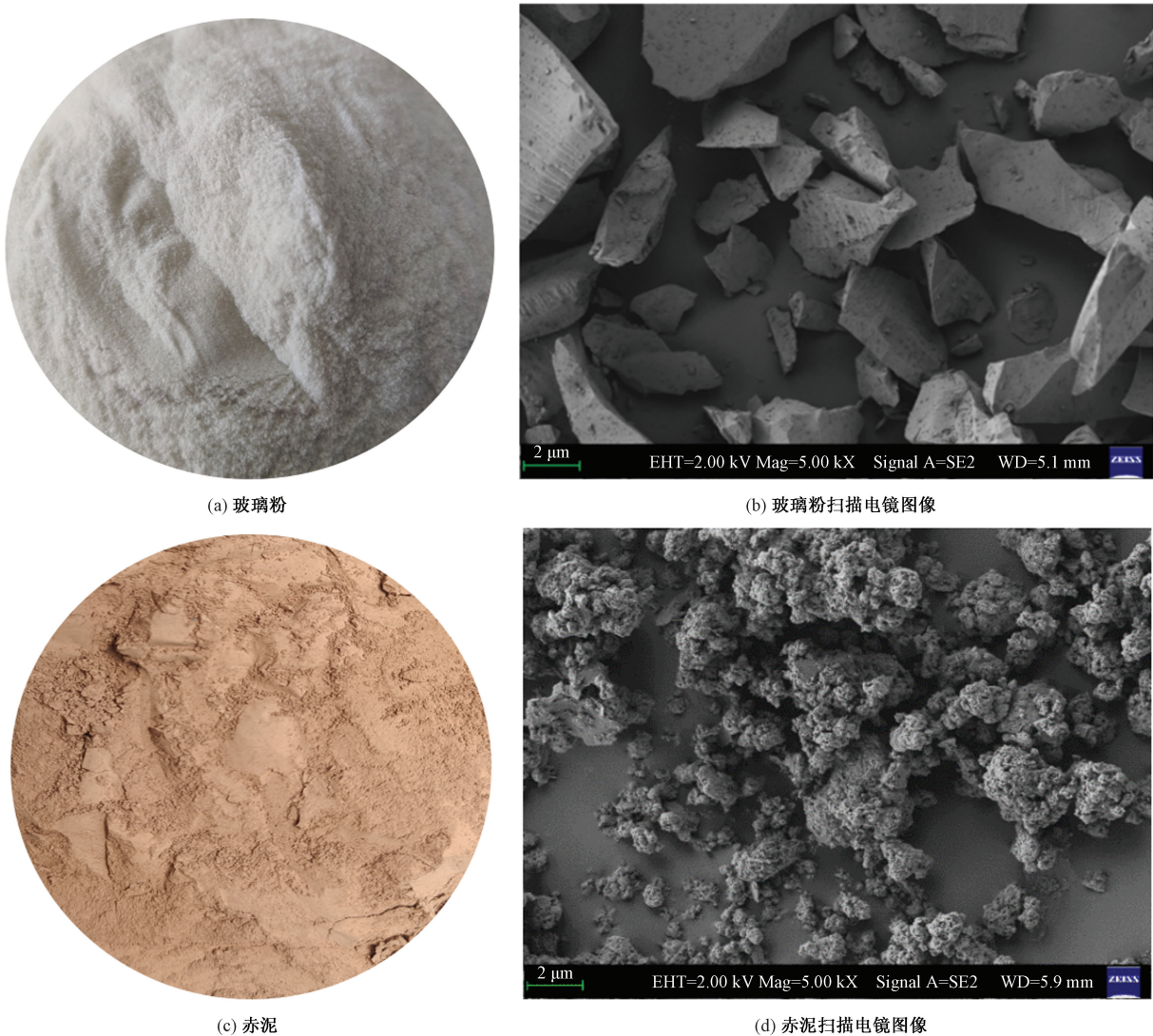
表2为所制备的修补用碱激发材料配合比,玻璃粉、赤泥分别以5%、10%、15%的掺量等量替代矿渣和再生微粉,对照组不掺加玻璃粉、赤泥。预试验结果表明掺加玻璃粉、赤泥显著提高了砂浆的流动度,同时对强度造成了不利影响,为保持砂浆的工作性能和力学性能,对掺有玻璃粉、赤泥的砂浆选用0.35的水胶比。

本次试验需使用模数 $n=1.2$ 的水玻璃,故需要加入NaOH降低水玻璃模数,经计算每100g水玻

表1 矿渣、再生微粉、玻璃粉、赤泥化学组成

Table 1 Chemical composition of slag, recycled micro powder, glass powder, red mud

材料类别	化学成分/%								
	CaO	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	SO ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
赤泥	0.70	9.11	—	19.39	12.77	0.15	0.68	49.28	7.43
再生微粉	28.76	1.14	6.03	9.92	43.63	2.16	1.12	4.57	—
矿渣	45.36	0.42	6.86	15.98	28.73	0.57	1.98	0.95	—
玻璃粉	8.01	12.32	4.12	0.98	72.90	0.45	0.22	0.21	—



EHT 为加速电压;Mag 为放大倍数;Signal A = SE2 表示使用 SE2 探测器;WD 为工作距离

图1 玻璃粉、赤泥及其扫描电镜图像

Fig. 1 Glass powder, red mud and their SEM (scanning electron microscope) images

璃需加入 15.53 g NaOH。提前 24 h 配制碱激发剂,将配制好的溶液倒入搅拌锅中,加入粉料搅拌成型,养护至规定龄期后进行相关测试。

1.2.2 测试方法

(1)力学性能。参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—2021)进行抗压抗折强度测试^[13]。

(2)黏结性能。将界面弯拉强度作为修补砂浆的黏结强度,黏结强度试件成型后,分别测试 6 h、1 d、7 d、28 d 抗折强度,取 3 个试件的平均值作为修补砂浆的黏结强度。

(3)泛碱加速试验。目前,尚无统一的中外测试方法来评估泛碱程度。参考相关文献,本次试验选择称量泛碱质量作为评价指标。首先制备 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的砂浆试件,并进行 7 d 的养护。然后将试件放置在 500 mL 的塑料烧杯中,注入等量

的去离子水,自然发至水分完全干燥。最后,使用不锈钢药勺轻轻刮下试件表面的碱,并称量其质量,以定量评价泛碱程度。

(4)微观实验。X 射线衍射分析(X-ray diffraction, XRD)样品经磨细后过 200 目筛,使用岛津 XRD-6100 分析材料的矿物组成,使用 MDI Jade 6 软件对测得的原始数据进行处理与分析;使用 Malvern 3000 型马尔文激光粒度仪对原材料进行粒径分析;使用蔡司 sigma300 扫描电子显微镜观察和拍摄不同倍数下样品的密实程度和水化产物的微观形貌图像,并进行能谱分析;使用麦克 ASAP2420 多站全自动比表面及孔隙度分析仪分析修补砂浆的介孔累计孔体积和孔径分布;使用基恩士 Keyence VHX-2000 3D 超景深三维显微镜分析试样表面孔隙分布情况及孔隙数量。

表2 修补砂浆配合比

Table 2 Mix proportions of repair mortar with added glass powder

掺合料种类	编号	掺合料掺量/%	水胶比	掺合料/g	矿渣/g	再生微粉/g	水玻璃/g	NaOH/g	河砂/g	外加水/g
玻璃粉	对照组	0	0.40	0	576.0	144.0	194.4	30.2	1 080.0	178.5
	GP-5	5		36.0	547.2	136.8				
	GP-10	10	0.35	72.0	518.4	129.6	194.4	30.2	1 080.0	142.5
	GP-15	15		108.0	489.6	122.4				
赤泥	RM-5	5		36.0	547.2	136.8				
	RM-10	10	0.35	72.0	518.4	129.6	194.4	30.2	1 080.0	142.5
	RM-15	15		108.0	489.6	122.4				

2 结果与分析

2.1 力学性能

2.1.1 掺加玻璃粉对碱激发材料力学性能的影响

图2、图3和图4(a)分别为不同玻璃粉掺量下对修补砂浆抗压、抗折强度、压折比和黏结强度影响规律。图2可以看出,随着玻璃粉掺量的增加,砂浆的抗压强度均呈先增加后下降趋势。与对照组相比,GP-5组6 h、1 d、7 d和28 d抗压强度分别增加了11.0%、23.8%、9.9%和11.5%,可以看出玻璃粉的加入对早期强度影响较大,这主要是因为玻璃粉能在早期水化过程中提供成核位置,促进更多胶凝相水化物的生成^[14]。随着玻璃粉掺量的增加,GP-15组6 h、1 d、7 d和28 d抗压强度分别减少了7.3%、3.8%、8.1%和1.3%,玻璃粉部分替代矿渣和再生微粉,使得水化产物数量相对较少,因此强度降低,而玻璃粉在后期发挥了火山灰活性,玻璃粉在碱性环境下不断溶出无定形SiO₂,与Ca²⁺反应生成部分凝胶^[15],提高了后期强度。由图3可以看出玻璃粉的加入会对修补砂浆的抗折强度均会产生不利影响。而修补砂浆的黏结强度与抗压强度由关联。综上所述,可以看出掺加5%玻璃粉对碱激发材料的力学性能有积极影响,而玻璃粉掺量达到15%时,却会产生不利影响。

2.1.2 掺加赤泥对修补用碱激发材料力学性能的影响

图2、图3和图4(b)为不同赤泥掺量下对修补砂浆力学性能的影响规律。可以看出,当赤泥掺量增加时,修补砂浆的抗压抗折强度和黏结强度均呈先增加后缓慢下降趋势。与对照组相比,掺加5%赤泥的RM-5组6 h、1 d、7 d和28 d抗压强度分别增加了9.1%、13.6%、7.1%和9.4%;而RM-15组6 h、1 d、7 d和28 d抗压强度分别减少了6.7%、8.1%、6.0%和5.9%。掺加5%赤泥后,抗压强度有所增加,这表明赤泥在一定掺量内对抗压强度有积极影响,在水化过程中起到微骨料的作用^[16]。而

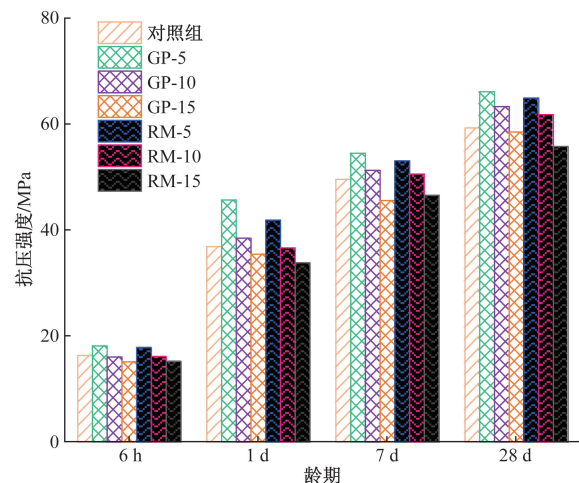


图2 玻璃粉、赤泥对修补砂浆抗压强度影响

Fig. 2 Effect of glass powder and red mud on the compressive strength of repair mortar

随着赤泥掺入量的增加,会对修补砂浆的抗压强度产生不利影响。一方面是因为赤泥是从铝土矿中用强碱溶解后分离得到的产物,含有大量晶体,活性较低^[17],同时其含有的Na₂O阻碍了钙矾石的生成^[18],另一方面掺入赤泥后降低了矿渣和再生微粉的掺量,减少了水化产物的生成,因此导致力学强度下降。由图3可看出随着赤泥掺量的增加,抗折强度逐渐下降,RM-15组28 d抗折强度仅为7.8 MPa。而赤泥黏结强度的发展规律与抗压强度类似。

2.2 泛碱程度

2.2.1 表面涂刷外加剂

由图5可知,与对照组相比,涂刷PNC401防水涂料与涂刷有机硅防水剂组的泛碱量分别减少了61.3%和26.7%,因此表面涂刷PNC401防水涂料与有机硅防水剂均可以减少泛碱量,且涂刷PNC401防水涂料对泛碱程度改善效果优于有机硅防水剂。两种外加剂涂刷在试件表面后,均能不同程度地渗透进试件的表层,从而阻碍材料内部水分的迁移,减少了游离盐碱的溢出载体,故在一定程度上降低了砂浆的泛碱程度。

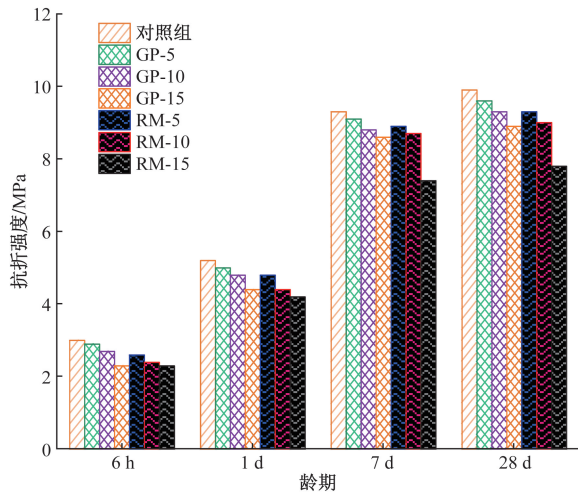


图3 玻璃粉、赤泥对修补砂浆抗折强度影响
Fig. 3 Effect of glass powder and red mud on the flexural strength of repair mortar

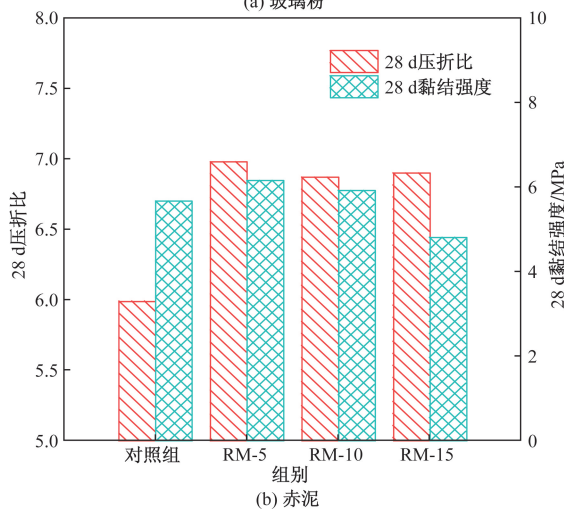
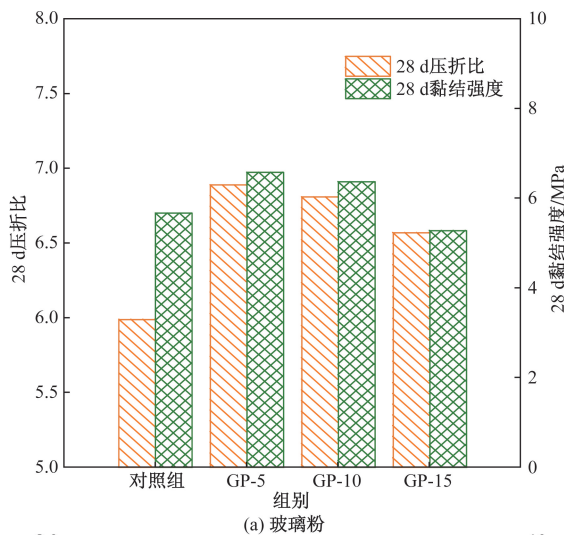


图4 玻璃粉、赤泥对修补砂浆压折比与黏结强度影响
Fig. 4 Effect of glass powder and red mud on the ratio of compressive strength to flexural strength and bonding strength of repair mortar

2.2.2 掺加玻璃粉

由图5可知,与对照组相比,掺加玻璃粉能降低砂浆的泛碱程度,且随着玻璃粉掺量的增加,砂浆的泛碱程度也逐渐降低。与对照组相比,GP-5、GP-10和GP-15的泛碱量分别降低了49.3%、54.7%和60.7%。玻璃粉能改善砂浆泛碱程度可能是因为玻璃粉的粒径较小,具有微集料效应,掺入后能改善砂浆的颗粒级配,提高了体系密实度,同时玻璃粉也具有一定的潜在活性,火山灰效应^[19]生成低碱度水化硅酸钙,降低六方板状结构的氢氧化钙富集程度,改善混凝土的孔隙结构。

2.2.3 掺加赤泥

由图5可知,与对照组相比,RM-5、RM-10和RM-15组的泛碱量分别降低了43.3%、46.0%和52.0%。添加赤泥后,可以有效降低修补砂浆的泛碱量。这主要是因为碱性激发剂提供了碱性介质,使赤泥中的Si-O和Al-O键断裂,形成游离的活性成分,从而更容易与钙质成分反应生成具有水硬性的水化铝硅酸钙等物质,使修补砂浆结构更加密实。相比于添加玻璃粉的组别,添加赤泥的组别的泛碱程度稍高。这可能是因为赤泥的活性较低,水化产物含量较少,只有少量凝胶能够填充砂浆内部的孔隙,因此添加赤泥的组别的泛碱程度较添加玻璃粉的组别稍大。

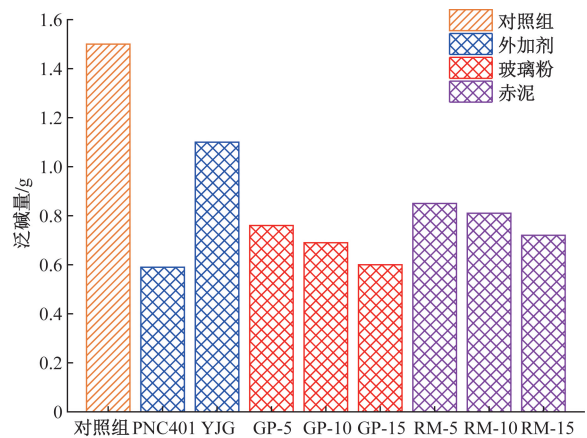


图5 不同泛碱抑制措施对修补砂浆泛碱量影响
Fig. 5 Effect of surface coating with admixtures on the efflorescence content of repair mortar

2.2.4 复合措施

由图6可知,与GP-15组相比,在GP-15组表面涂刷PNC401防水涂料或有机硅防水剂能够显著降低砂浆的泛碱程度,图6(c)和图6(d)中试件的表面均未出现明显的泛碱;与RM-15组相比,在RM-15组表面涂刷PNC401防水涂料和有机硅防水剂均显著减少了修补砂浆的泛碱,图6(e)和图6(f)中试件的表面均未出现明显的泛碱。综上所述,与单掺

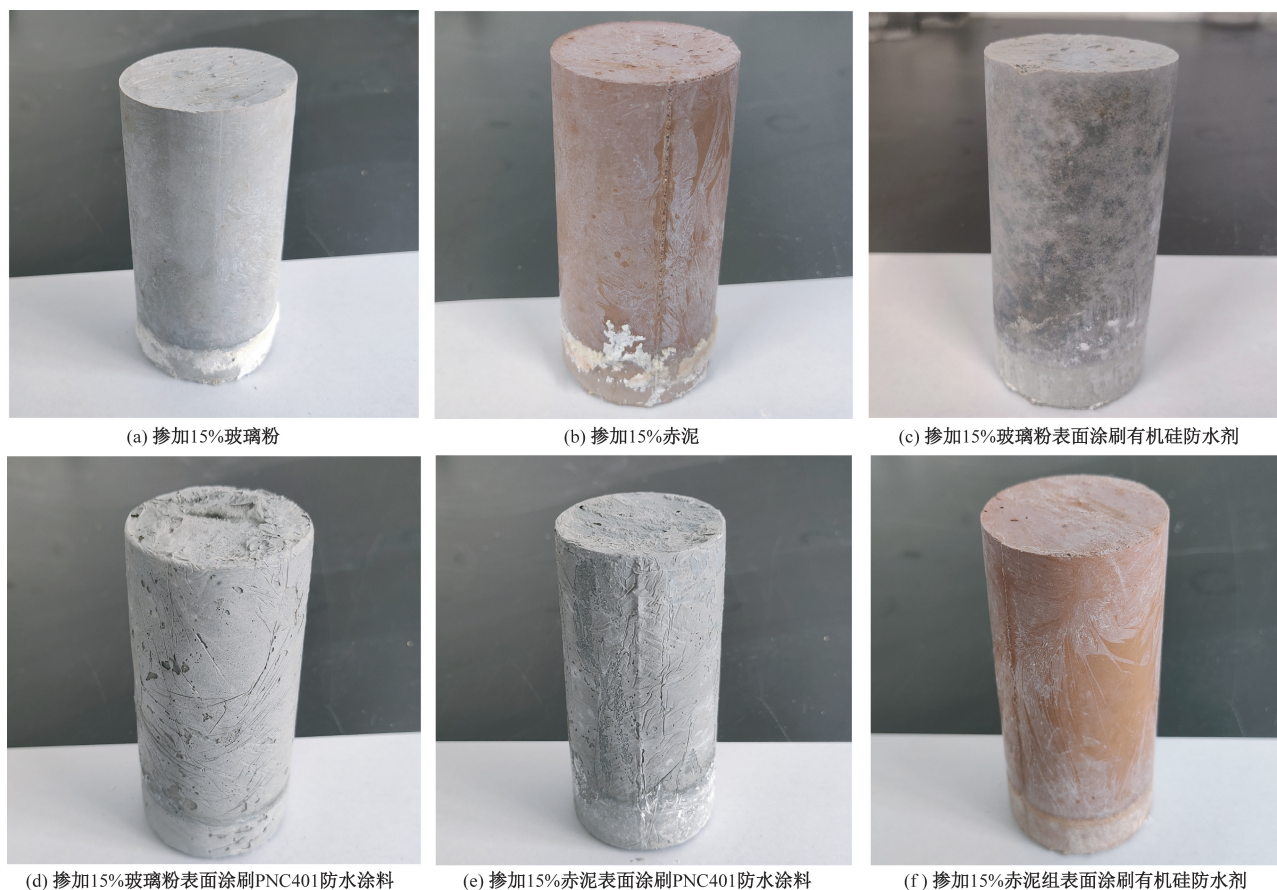


图6 涂刷外加剂与掺加玻璃粉、掺加赤泥复合措施

Fig. 6 Compound measure of applying admixture with glass powder and red mud mixing

玻璃粉、赤泥相比,将表面涂刷外加剂与掺加玻璃粉、赤泥相结合显著减少了砂浆的泛碱。

2.3 微观实验

2.3.1 扫描电镜-能谱分析

1) 对照组

由图7(a)可以看出,对照组的表面存在明显的微小孔隙和较大孔隙,以及较多的裂缝,这增加了碱性离子溶出的通道,并提高了毛细管应力,从而导致对照组的泛碱程度较高。从图7(b)中可以观察到水化产物中含有较多的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体和 AFt (钙矾石),由图7(c)中可以看到许多凝胶状产物覆盖在表面,同时填充在缝隙中。对图7(c)中红色标记处进行能谱电扫,如图7(d)显示该处凝胶体的主要元素为 Ca 、 Na 、 Si 以及少量 Al 等,其中 Ca/Si 大于1.5,说明对照组为高钙体系,生成了较多的 C-S-H 凝胶^[20],且 C-S-H 凝胶主要为水硅钙石六水合物^[21]。

2) 掺加玻璃粉

由图8(a)可以看出 GP-15 试样表面较为均匀、平整、致密,且无明显裂纹,孔隙数量也较少,因此有利于降低试件的泛碱程度。由图8(b)可以看出

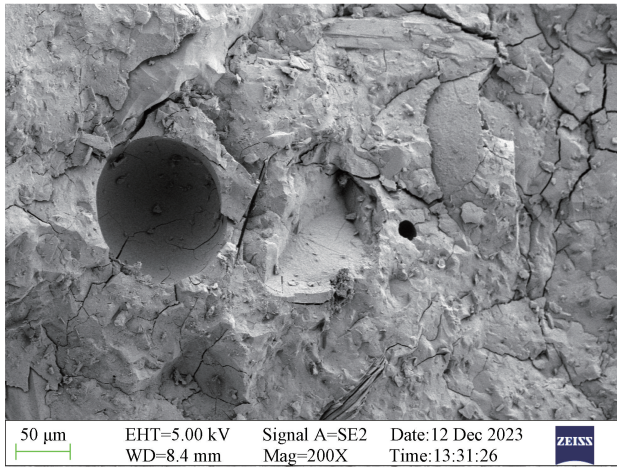
GP-15 水化生成了少量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体和凝胶产物附着在试样表面。将图8(c)中红色标记处进行能谱电扫后结果如图8(d)所示,该处凝胶体的主要元素为 Si 、 Ca 、 Al 、 Na ,其中 Ca/Si 为0.75,研究表明当 $\text{Ca}/\text{Si} \geq 0.6$ 时,碱激发胶凝材料体系中主要生成的是 C-A-S-H 凝胶^[22]。

3) 掺加赤泥

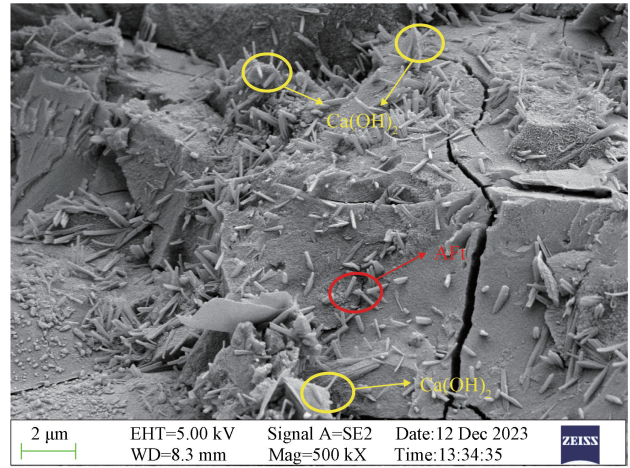
由图9(a)可以看出 RM-15 试样表面较为均匀密实、光滑平整,无微裂纹,因此显著降低了试件的泛碱程度。由图9(b)可以看出颗粒间的缝隙中有大量的凝胶状和块状的水化产物,由图9(c)中可以看出大量的凝胶状产物互相交织在一起,对图9中红色标记处进行能谱电扫,结果如图9(d)所示,其中主要元素为 Si 、 Ca 、 Al 、 Na ,其中 Ca/Si 为0.69,说明此处主要生成了 C-A-S-H 凝胶。

2.3.2 氮吸附分析

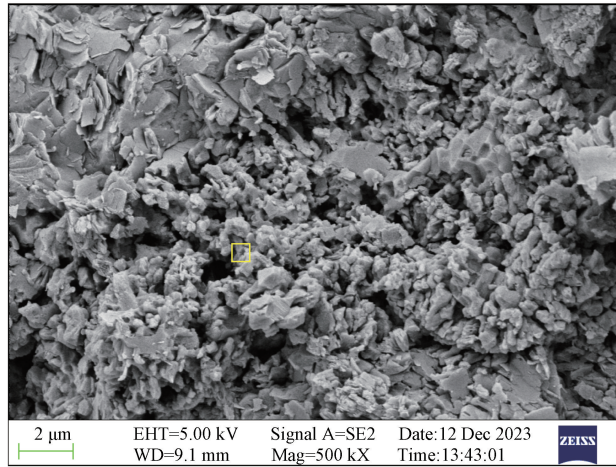
为探究掺加玻璃粉和赤泥后对修补砂浆孔结构的影响,选取对照组、 GP-15 和 RM-15 组进行氮吸附试验,测量的孔径范围为 $1 \sim 100 \text{ nm}$,试验结果如图10所示。根据孔径大小,材料的孔隙主要分为小凝胶孔($< 10 \text{ nm}$)、大凝胶孔($10 \sim 50 \text{ nm}$)、毛细孔



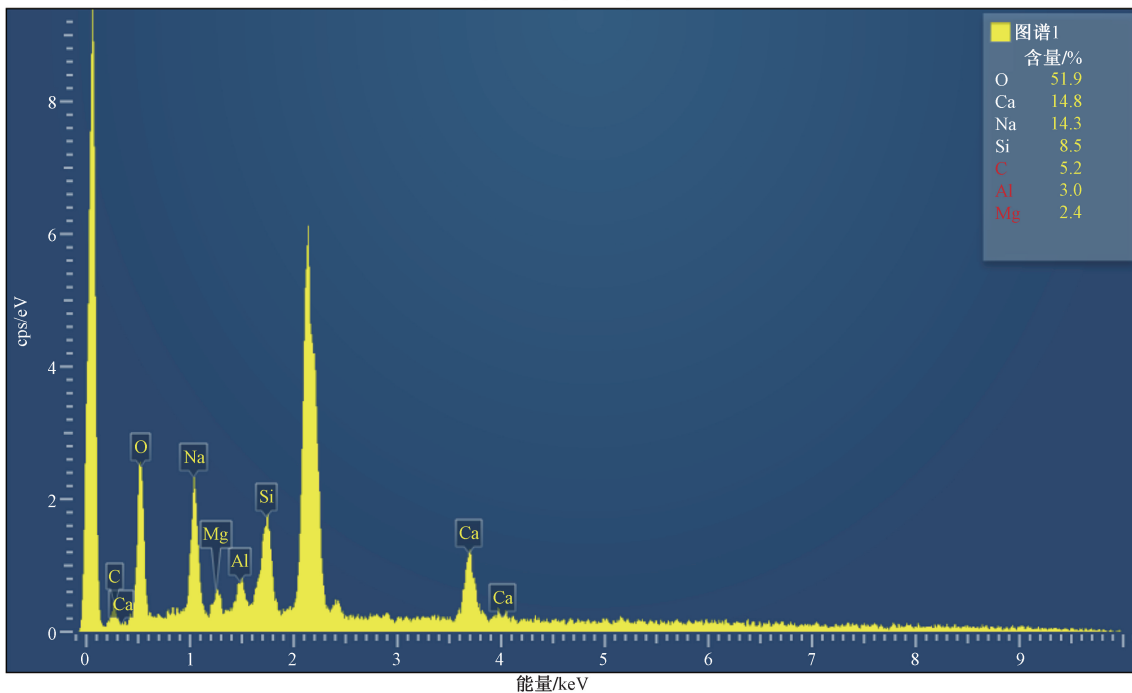
(a) 对照组(×200)



(b) 对照组(×5 000)



(c) 对照组(×5 000)

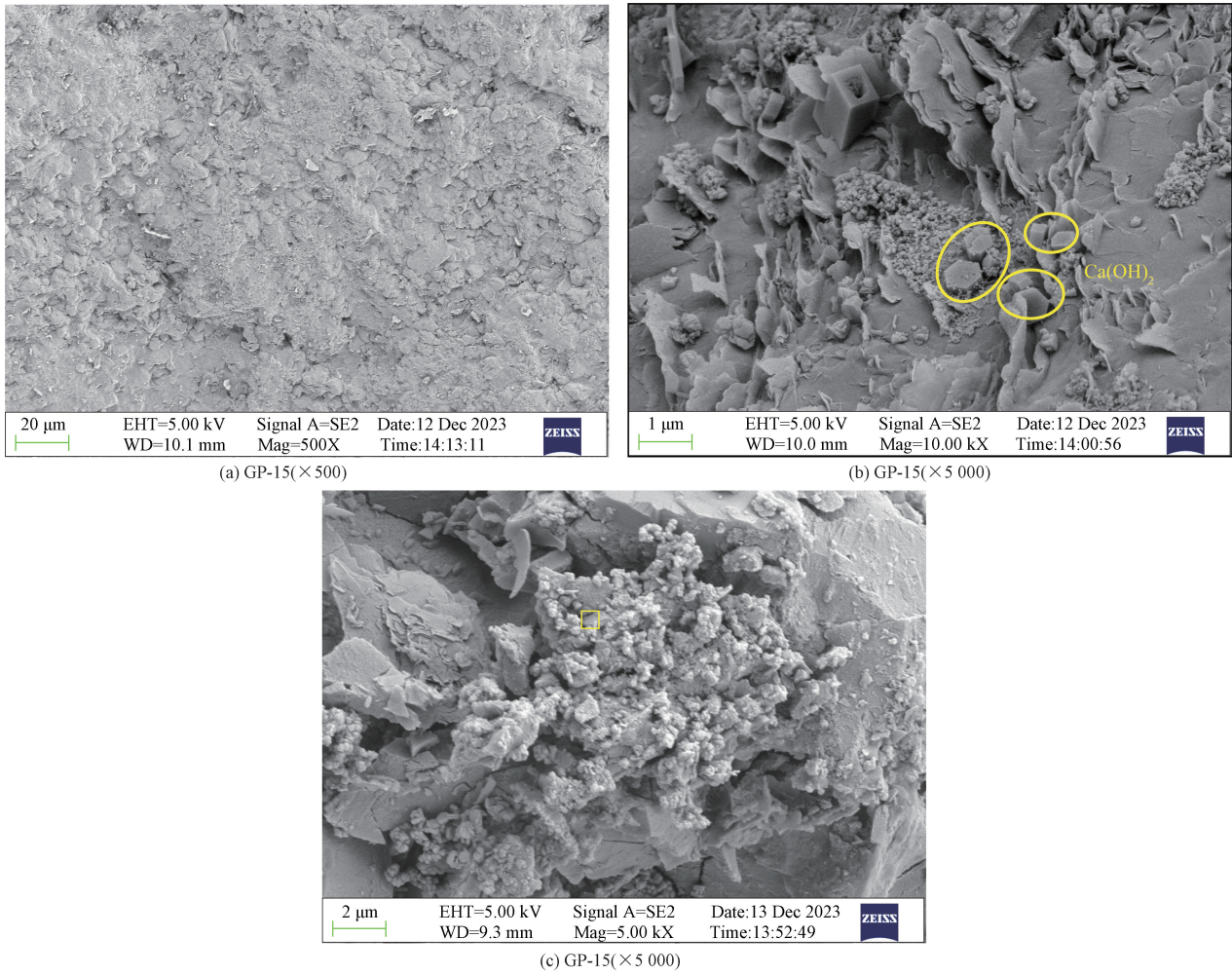


(d) 对照组能谱图[图7(c)黄色标记处]

EHT 为加速电压; Mag 为放大倍数; Signal A = SE2 表示使用 SE2 探测器; WD 为工作距离; Date 为日期; Time 为时间; CPS 为每秒计数率

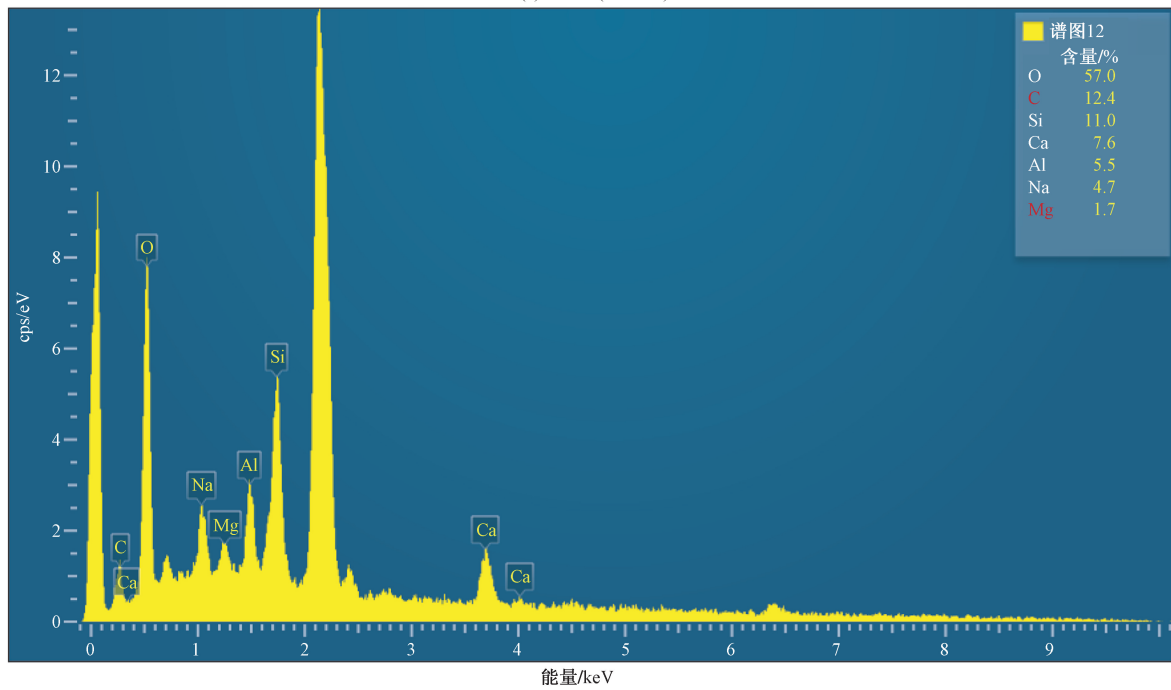
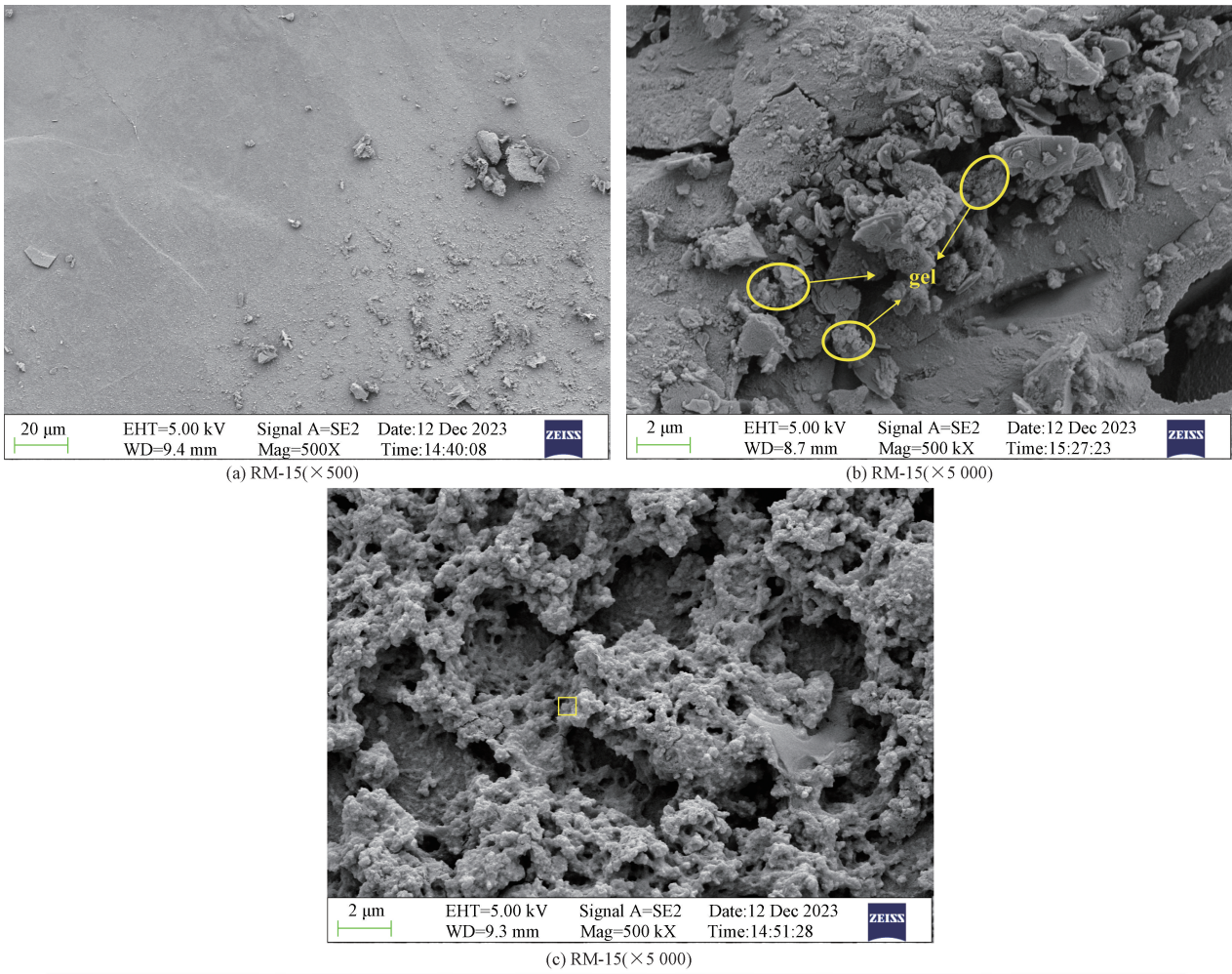
图 7 对照组扫描电镜和能谱图

Fig. 7 SEM images and EDS spectra collected on the selected area of control group



EHT 为加速电压;Mag 为放大倍数;Signal A = SE2 表示使用 SE2 探测器;WD 为工作距离;Date 为日期;Time 为时间;CPS 为每秒计数率
图 8 GP-15 扫描电镜和能谱图

Fig. 8 SEM images and EDS spectra collected on the selected area of GP-15



(d) RM-15能谱图[图9(c)黄色标记处]

EHT 为加速电压;Mag 为放大倍数;Signal A = SE2 表示使用 SE2 探测器;WD 为工作距离;Date 为日期;Time 为时间;CPS 为每秒计数率

图9 RM-15 扫描电镜和能谱图

Fig. 9 SEM images and EDS spectra collected on the selected area of RM-15

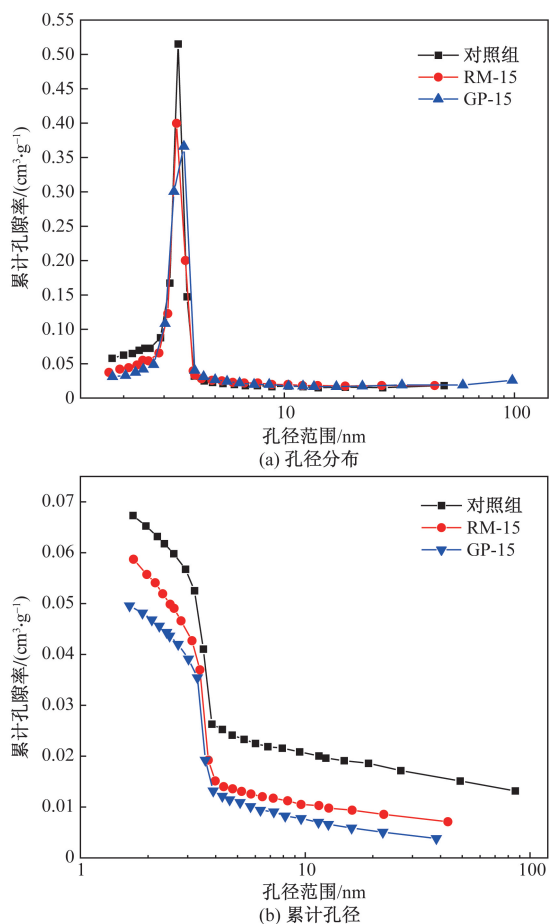


图 10 掺加玻璃粉和赤泥对修补砂浆氮吸附孔径分布影响曲线

Fig. 10 Effect curve of adding glass powder and red mud on nitrogen adsorption pore size distribution in repair mortar

(50 ~ 10 μm) 和粗孔 (> 10 μm)^[23]。毛细孔体积越大,孔隙内游离的 Na^+ 越容易随水分的蒸发迁移而析出^[24],从而导致出现泛碱现象。由图 10(a)可知,对照组、GP-15 和 RM-15 组的最可几孔径分别为 3.5、3.4、3.7 nm,属于小凝胶孔,可见掺加玻璃粉和赤泥后对修补砂浆最可几孔径的影响不大。由图 10(b)可知,对照组累计孔隙率为 0.067 cm^3/g , GP-15 组累计孔隙率为 0.050 cm^3/g , RM-15 组累计孔隙率为 0.059 cm^3/g ,与对照组相比,GP-15 组的累计孔隙率降低了 25.4%, RM-15 组的累计孔隙率降低了 11.9%,由此可见,掺入玻璃粉和赤泥后砂浆的凝胶孔数量和毛细孔数量均有所降低,因此能显著降低砂浆的泛碱程度。

2.3.3 超景深图像分析

为进一步分析掺加玻璃粉和赤泥对修补砂浆内部孔结构的影响,选取对照组、GP-15 和 RM-15 进行超景深图像分析,如图 11 所示,图 11 中红色部分即为孔隙。对照组砂浆的红色区域数量最多、面积最大,存在较多的孔隙,掺加玻璃粉和赤泥后,红色

区域明显减少,可以看出毛细孔的数量显著降低。由孔隙数据可知,对照组总孔隙数量为 20 518, GP-15 组的总孔隙数量为 7 486, RM-15 组的总孔隙数量为 9 973,与对照组相比,GP-15 组和 RM-15 组的总孔隙数量分别降低了 63.5% 和 51.4%。由于玻璃粉和赤泥的粒径较小,掺入后能填充砂浆内部的孔隙,同时生成的水化产物可以起到填充孔隙的作用。

3 结论

主要研究了通过单一措施和复合措施来改善修补用碱激发材料的泛碱程度,同时确保满足修补砂浆所要求的工作性能和力学性能,并对抑制泛碱机理进行微观解释,得出如下结论。

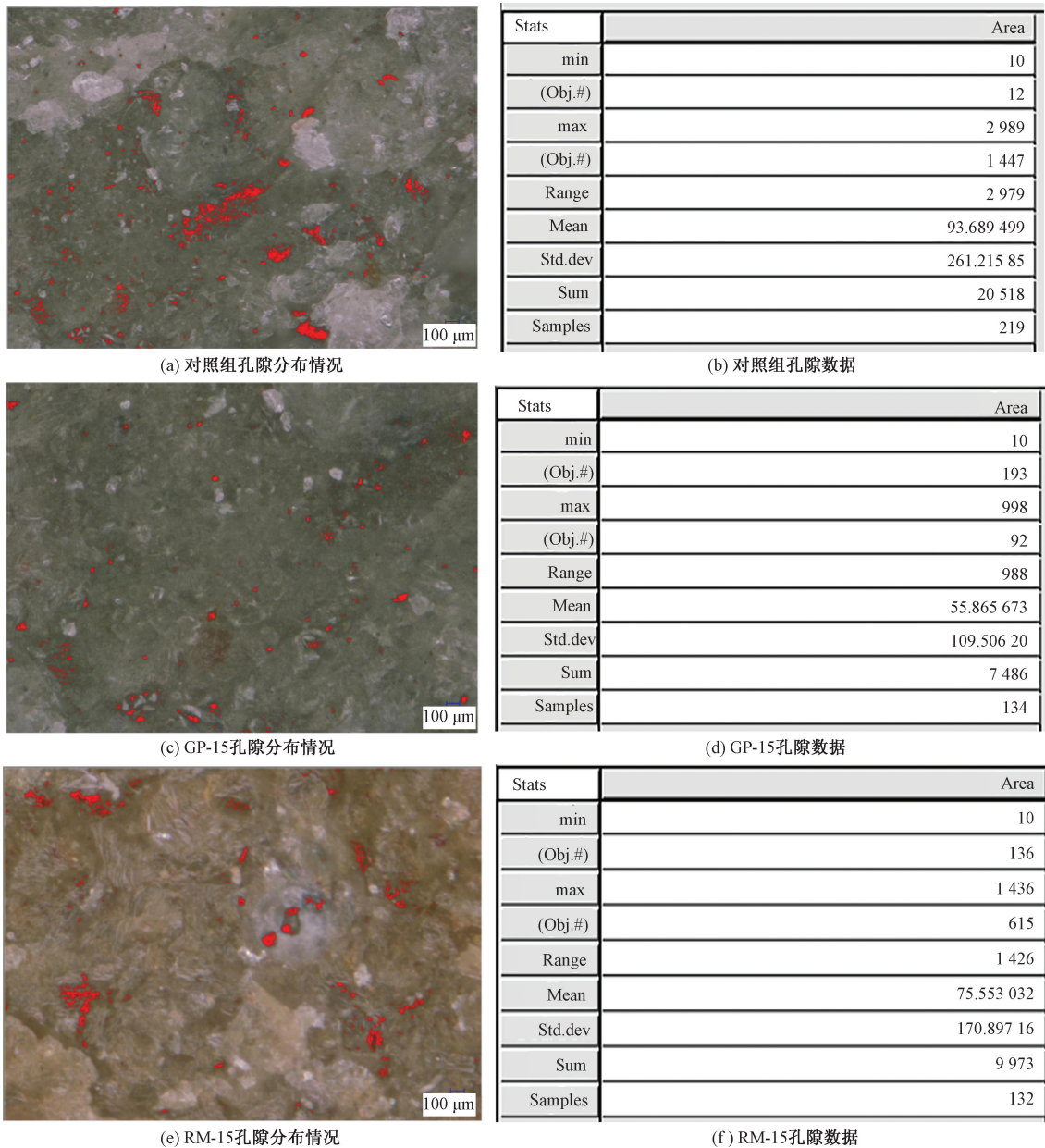
(1) 随着玻璃粉、赤泥掺量增加,修补砂浆抗压和黏结强度先增大后逐渐减小,抗折强度逐渐降低,尤其对早期强度的影响较大,玻璃粉、赤泥的掺量在 15% 内满足修补砂浆各项性能要求。

(2) 在试件表面涂刷 PNC401 防水涂料或有机硅防水剂后泛碱量分别减少了 61.3% 和 26.7%,涂刷 PNC401 防水涂料抑制泛碱的效果优于涂刷有机硅防水剂。随着玻璃粉、赤泥掺量的增加,砂浆的泛碱程度逐渐降低,掺加玻璃粉对砂浆泛碱程度的抑制效果优于赤泥。

(3) 对照组内部存在明显的孔隙和裂缝,水化产物包括钙矾石、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体以及 C-S-H 凝胶等;掺加 15% 玻璃粉或 15% 赤泥后降低了水化产物的 Ca/Si ,促进了 C-A-S-H 凝胶的生成,砂浆内部孔隙数量较少,无明显裂缝产生,减少了碱性离子的溶出通道,最可几孔径无显著影响,凝胶孔数量和毛细孔数量均有所降低,毛细孔数量和总孔隙数量降低,从而降低了试件的泛碱程度。

参考文献

- [1] 马志明. MK-GGBS 基地聚合物水泥路面修补砂浆制备与性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
Ma Zhiming. Research on the preparation and performance of MK-GGBS base polymer cement pavement repair mortar[D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [2] 陈林, 李彬, 陈胜邦, 等. 碱激发矿渣加固淤泥的物理力学性能与机理[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(2): 789-796.
Chen Lin, Li Bin, Chen Shengbang, et al. Properties and mechanism of solidified silty sediment from alkali-activated slag[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(2): 789-796.
- [3] Xue X, Liu Y L, Dai J G, et al. Inhibiting efflorescence formation on fly ash-based geopolymer *via* silane surface modification[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 94: 43-52.
- [4] 罗仁, 芦雨薇, 许源, 等. 改性 5A 沸石对偏高岭土聚物微观结构及抗泛碱性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(10):



min 为最小值;max 为最大值; Range 为值域;Mean 为平均数;
Obj. #为物镜编号;Sum 为总和;Std. Dev 为标准差;Samples 为样品数量;Area 为面积

图 11 改善前后修补砂浆孔隙分布情况

Fig. 11 Distribution of pores in repair mortar before and after improvement

3633-3642.

Luo Ren, Lu Yuwei, Xu Yuan, et al. Effect of modified 5A zeolite on the microstructure and antipanning properties of metakaolin geopolymer[J]. Silicate Bulletin, 2023, 42(10): 3633-3642.

[5] 王金邦. 修补/防护用碱激发材料制备及性能研究[D]. 济南: 济南大学, 2020.

Wang Jinbang. Research on the preparation and properties of alkali excited materials for repair/protection[D]. Jinan: Jinan University, 2020.

[6] Saludung A, Azeyanagi T, Ogawa Y, et al. Effect of silica fume on efflorescence formation and alkali leaching of alkali-activated slag [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 315: 128210-128219.

[7] Matalkah F, Ababneh A, Aqel R. Efflorescence control in calcined

Kaolin-based geopolymer using silica fume and OPC[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(6): 1-8.

[8] 许事成, 苏壮飞, 刘泽, 等. 硅灰掺量对免烧粉煤灰陶粒性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(2): 506-512.

Xu Shicheng, Su Zhuangfei, Liu Ze, et al. Influence of silica fume dosage on the properties of no-fired fly ash granules [J]. Silicate Bulletin, 2022, 41(2): 506-512.

[9] 王国栋. 碱激发涂层材料的设计及其固液界面性能表征与评估[D]. 深圳: 深圳大学, 2018.

Wang Guodong. Design of alkali-excited coating materials and characterisation and evaluation of their solid-liquid interfacial properties [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2018.

[10] Longhi M A, Zhang Z, Walkley B, et al. Strategies for control

- and mitigation of efflorescence in metakaolin-based geopolymers [J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 144. DOI:10.1016/j.cemconres.2021.106431.
- [11] 房杰, 彭芑, 魏小凡, 等. 碱激发偏高岭土的泛碱规律及抑制机理研究[J]. *非金属矿*, 2020, 43(5): 37-40.
Fang Jie, Peng Peng, Wei Xiaofan, et al. Study on the flooding pattern and inhibition mechanism of alkali-excited biotite kaolinite [J]. *Nonmetallic Mining*, 2020, 43(5): 37-40.
- [12] 刘家庆, 谭茜文, 何延全, 等. 赤泥基胶凝材料半柔性路面应用[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2022, 42(5): 21-32.
Liu Jiaqing, Tan Xiwen, He Yanquan, et al. Application of semi-flexible pavement with red mud-based cementitious materials [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2022, 42(5): 21-32.
- [13] 全国水泥标准化技术委员会. 水泥胶砂强度检验方法(ISO法): GB/T 17671—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
National Technical Committee for Cement Standardisation. Test method for strength of cementitious sand (ISO method): GB/T 17671—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [14] 李碧雄, 汪知文, 饶丹, 等. 废玻璃在水泥混凝土中的应用研究评述[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(8): 2449-2457.
Li Bixiong, Wang Zhiwen, Rao Dan, et al. Review of research on the application of waste glass in cement concrete [J]. *Silicate Bulletin*, 2020, 39(8): 2449-2457.
- [15] DuH, Tan K H. Properties of high volume glass powder concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2016, 75: 22-29.
- [16] 武斌, 谭卓英, 宁迎福. 赤泥掺量对混凝土强度及经济性的影响[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(6): 182-188.
Wu Bin, Tan Zhuoying, Ning Yingfu. Effect of red mud dosage on strength and economy of concrete [J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 40(6): 182-188.
- [17] 顾童. 碱激发赤泥-粉煤灰基地聚物的制备研究[J]. *江苏建材*, 2022(5): 16-19.
Gu Tong. Preparation of alkali-stimulated red mud-fly ash based polymers [J]. *Jiangsu Building Materials*, 2022(5): 16-19.
- [18] 张宁, 高益凡, 李召峰, 等. 高掺量赤泥路基充填材料试验研究[J]. *中国资源综合利用*, 2020, 38(11): 10-13.
Zhang Ning, Gao Yifan, Li Zhaofeng, et al. Experimental study on high doped red mud-based roadbed filling material [J]. *China Resources Comprehensive Utilisation*, 2020, 38(11): 10-13.
- [19] 詹疆淮, 李宏波, 傅博, 等. 不同碱当量、粉煤灰和矿渣掺量对碱激发粉煤灰-矿渣地聚物力学性能及微观结构的影响[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(28): 12218-12224.
Zhan Jianghuai, Li Hongbo, Fu Bo, et al. Effect of different alkali equivalent, fly ash and slag content on the mechanical properties and microstructure of alkali-activated fly ash-slag geopolymer [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(28): 12218-12224.
- [20] Yip C K, Lukey G C, Deventer J S J V. The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation [J]. *Cement & Concrete Research*, 2005, 35(9): 1688-1697.
- [21] Lothenbach B, Scrivener K, Hooton R D. Supplementary cementitious materials [J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(12): 217-229.
- [22] 覃丽芳, 曲波, 史才军, 等. 钙硅比对铝硅酸盐凝胶形成与特性的影响[J]. *材料导报*, 2020, 34(12): 12057-12063.
Qin Lifang, Qu Bo, Shi Caijun, et al. Effect of calcium-silicon ratio on the formation and properties of aluminosilicate gels [J]. *Materials Guide*, 2020, 34(12): 12057-12063.
- [23] 宋维龙, 朱志铎, 浦少云, 等. 碱激发二元/三元复合工业废渣胶凝材料的力学性能与微观机制[J]. *材料导报*, 2020, 34(22): 22070-22077.
Song Weilong, Zhu Zhiduo, Pu Shaoyun, et al. Mechanical properties and microscopic mechanisms of alkali-excited binary/ternary composite industrial waste slag cementitious materials [J]. *Materials Guide*, 2020, 34(22): 22070-22077.
- [24] 陶志. 碱激发胶凝材料硬化体 Na^+ 分布规律及其影响研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2023.
Tao Zhi. Research on Na^+ distribution law of hardened body of alkali-excited cementitious materials and its influence [D]. Beijing: Beijing University of Architecture, 2023.