



多因素耦合作用下硅灰石-矿渣-偏高岭土基地 聚合物砂浆侵蚀试验及强度预测模型

李瑞涛, 罗李亭, 何梓湘

(长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434023)

摘要: 为了深入探究硅灰石-矿渣-偏高岭土基地聚合物砂浆在多因素耦合作用下的侵蚀性能, 本文通过试验分析砂浆在干湿交替与海水侵蚀等耦合条件下的质量损失率、抗压强度及抗折强度的变化规律, 并进一步剖析各因素对砂浆性能的影响机制, 同时构建了相应的强度预测模型。结果表明: 1) 随着干湿交替与海水侵蚀耦合次数的递增, 砂浆质量损失率呈上升趋势, 抗折强度逐步升高, 而抗压强度呈现先升后降的趋势; 2) 碱激发剂浓度对提升地聚合物砂浆在多因素耦合侵蚀情境下的抗侵蚀性能具有促进作用, 其中 A30 表现最为优异; 3) 经 90 次干湿交替与海水侵蚀后, 其质量损失率仅为 4.55%, 抗折强度达 22.3 MPa, 抗压强度达到 67 MPa; 4) 浸泡方式对砂浆强度存在一定影响, 全浸泡试块展现出更高的强度与更优的抗侵蚀性能; 5) 基于砂浆相对强度构建的强度预测模型, 能够有效表征硅灰石-矿渣-偏高岭土基地聚合物砂浆在干湿交替-海水侵蚀耦合作用下相对强度与干湿交替次数及碱激发剂浓度之间的关联, 可为其在实际工程中的应用提供参考依据。

关键词: 地聚合物; 多因素耦合; 干湿交替; 侵蚀试验; 强度预测模型

中图分类号: TU57⁺8.12

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)08-0012-08

doi:10.13402/j.gjcs.2025.08.096

Erosion test and strength prediction model of polymer mortar based on wollastonite-slag-metakaolin under multi-factor coupling

LI Ruitao, LUO Liting, HE Zixiang

(School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei, China)

Abstract: In order to further explore the erosion properties of wollastonite-slag-metakaolin-based polymer mortar under multi-factor coupling, a systematic experimental study is carried out. The changes of mass loss rate, compressive strength and flexural strength of mortar under the coupling conditions of alternation of drying and wetting and seawater erosion are analyzed by experiments, and the influence mechanism of each factor on the mortar performance is further analyzed, and the corresponding strength prediction model is constructed. The results show that: 1) With the increase of the number of coupling times between alternation of drying and wetting and seawater erosion, the mass loss rate of mortar shows an upward trend, the flexural strength gradually increases, and the compressive strength shows a trend of first increasing and then decreasing. 2) The concentration of alkali exciter has a promoting effect on the erosion resistance of the polymer mortar under the multi-factor coupled erosion scenario, among which A30 performs the best. 3) After 90 times of alternation of drying and wetting and seawater erosion, the mass loss rate is only 4.55%, the flexural strength reaches 22.3 MPa, and the compressive strength reaches 67 MPa. 4) The immersion method has a certain impact on the strength of the mortar, and the full immersion test block shows higher strength and better erosion resistance. 5) The strength prediction model based on the

收稿日期: 2024-11-27

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目(2023AFB804); 荆州市科技计划资助项目(2023EC38)

作者简介: 李瑞涛(1998—), 男, 硕士研究生, 从事地聚合物材料方面的研究。

relative strength of mortar can effectively characterize the correlation between the relative strength of wollastonite-slag-metakaolin-kaolin based polymer mortar under the coupling of alternation of drying and wetting and seawater erosion, and provide reference for its application in practical engineering.

Key words: geopolymer; multi-factor coupling; alternation of drying and wetting; erosion test; strength prediction model

地质聚合物 (Geopolymer) 是由富硅铝质材料在碱激发条件下生成的水合铝硅酸钠 (N-A-S-H) 凝胶, 属于由 SiO_4 和 AlO_4 单元聚合形成的三维网状无机聚合物^[1]。作为一种传统水泥的绿色替代品, 这种新型建筑材料具有早强快硬、优异的耐酸碱腐蚀性能、优良的力学性能以及绿色环保等优点^[2-3], 近年来已成为建筑材料学领域的研究热点, 尤其是在油井钻探固井、重金属固化以及建筑结构的腐蚀防护等方面取得了广泛关注^[4-7]。然而, 地聚合物性能影响因素众多, 以碱激发剂浓度对砂浆力学性能影响最为显著^[8-10]。此外, 实际工程环境复杂多变, 如沿海地区的建筑物、道路和桥梁通常处于海水侵蚀与干湿交替等多重耦合作用环境中。在这种复杂环境下, 碱激发剂浓度对地聚合物砂浆耐久性的影响及其损伤机理尚不明确。

LUO 等^[11]的研究表明, 在偏高岭土地聚合物混凝土中加入 5% 硅灰石、5% 透辉石以及 2% 短切玄武岩纤维, 可显著提高混凝土的抗压强度和抗硫酸盐侵蚀性能; IBRAHIM 等^[12]通过研究纤维素纳米纤维和硅灰石增强偏高岭土地聚合物的抗硫酸盐侵蚀及微观结构, 发现硅灰石与地聚合物基质之间具有良好的桥接作用, 能够细化微孔并改善微裂纹; ÖZCAN 等^[13]对比了 5% Na_2SO_4 、5% MgSO_4 、5% NaCl 和 5% MgCl_2 溶液对矿渣基地聚合物混凝土质量和抗压强度的影响, 发现尽管侵蚀后混凝土的质量变化不明显 (约为 0.1%), 但强度损失较大, 且硫酸盐对混凝土的侵蚀作用明显比氯盐更为显著。综上所述, 硅灰石和矿渣的加入有助于提升地聚合物砂浆的抗侵蚀性能, 但目前的研究主要集中在结构抗氯离子和硫酸盐

侵蚀方面, 而关于多因素耦合作用下抗海水侵蚀的研究相对较少。

基于此, 本文将开展多因素耦合作用下硅灰石-矿渣-偏高岭土地聚合物砂浆的侵蚀试验和物理力学性能试验, 揭示碱激发剂浓度和干湿交替次数对地聚合物砂浆抗侵蚀性能的影响及其损伤机理。同时, 根据干湿交替-海水侵蚀后地聚合物砂浆的相对强度变化规律, 建立硅灰石-矿渣-偏高岭土地聚合物砂浆相对强度随干湿交替次数变化的预测模型, 并推导出干湿交替-海水侵蚀耦合作用下砂浆相对强度与干湿交替周期及碱激发剂浓度之间的定量关系式, 以期为该材料在复杂环境下的建筑工程应用提供理论依据和实践参考。

1 试验概况

1.1 试验材料

硅铝原料由偏高岭土 (MK)、矿渣 (GGBFS) 和硅灰石 (WS) 提供, 原材料的氧化物组成如表 1 所示。NaOH 为纯度达 96% 以上的片状固体; 硅酸钠溶液 (Na_2SiO_3) 采用 SP38 型水玻璃溶液, 其密度为 1.36 g/cm^3 , 模数为 3.3; 砂采用 ISO 标准砂; 人工配制海水时, 各溶质均采用分析纯盐; 试验用水为荆州本地自来水。

1.2 试验配合比

试验采用水胶比为 0.5、胶砂比为 0.4 以及硅酸钠模数为 1.2 的碱激发剂, 制备尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ 的试块。其中, 碱激发剂浓度为变量, 通过计算碱激发剂中含固量与胶凝材料的质量比确定其质量分数值, 分别为 20%、25%、30%。试验共设置 3 组配合比, 具体配合比如表 2 所示。

表 1 原材料氧化物组成 (质量分数)

原材料	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	SO_3	Na_2O	K_2O	%
MK	54.00	43.00	0.40	0.04	0.09	0.04	0.03	0.30	
GGBFS	34.50	17.70	1.03	6.01	34.00	1.64	0	0	
WS	49.60	0.32	0.31	1.77	54.89	0.01	0.01	0.01	

表 2 试验配合比用量

组别	MK	GGBFS	WS	砂	H ₂ O	NaOH	Na ₂ SiO ₃
A ₂₀	378.00	81.00	81.00	1 350.00	144.34	37.81	195.85
A ₂₅	378.00	81.00	81.00	1 350.00	112.93	47.26	244.81
A ₃₀	378.00	81.00	81.00	1 350.00	81.51	56.71	293.78

1.3 试验方法

1.3.1 干湿交替-海水侵蚀试验

根据《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2024)中关于硫酸盐侵蚀试验的相关要求,所有试块在养护箱中进行标准养护 28 d 后,采用 NJW-LS-18 全自动混凝土硫酸盐干湿交替试验机开展试验。试验的干湿交替流程设置:25 ℃浸泡 15 h、风干 1 h、60 ℃烘干 6 h、风冷 1 h 及制冷 1 h,侵蚀龄期设计为 0、30、60、90 次。侵蚀溶液采用人工制备的模拟海水溶液,依据《水泥抗海水侵蚀试验方法》(GB/T 38140—2019)中的相关规定进行制备,并在静置 8 h 后使用。为确保溶液浓度稳定,每隔 1 个月更换 1 次侵蚀溶液。

1.3.2 测试方法

地聚合物砂浆试块的质量损失率测定按照 GB/T 50082—2009 中的相关规定执行;抗压强度和抗折强度检测试验遵循《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—2021),分别使用水泥恒应力压力试验机 HYE-300 和 DKZ-6000 型电动抗折试验机进行测试,并以每组试件的平均值作为最终试验结果;砂浆动弹性模量检测依据《水工混凝土试验规范》(SL/T 352—2020)中关于动弹模测定的要求,使用 DT-20 动弹仪进行测定。

1.3.3 评价指标

相对动弹性模量计算公式:

$$E_r = \frac{E_{di}}{E_{d0}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: E_r 为试件的相对动弹性模量; E_{di} 、 E_{d0} 分别

为试件经过 i 次干湿交替后和初始状态下的动弹性模量, MPa。

2 结果与讨论

2.1 表观形貌变化

不同碱激发剂浓度的硅灰石-矿渣-偏高岭土基聚合物砂浆,在经历全浸泡-干湿交替-海水侵蚀耦合作用后,其表观形貌变化通过试件颜色、剥落情况以及孔洞变化等指标进行评估,以反映砂浆在侵蚀环境下的耐久性能。试块的表观形貌变化如图 1~3 所示。表 3 为 A₂₀ 试块表观形貌的详细变化。由图 1~3 可知:随着干湿交替-海水侵蚀时间的延长,试块的颜色由深变浅,表面孔洞和剥落现象逐渐加重。具体而言,当干湿交替-海水侵蚀次数为 30 次时,各组试件表面并无明显区别;而在 60 次时,试块颜色从暗红色变为褐色,不同碱激发剂浓度试块表面出现显著差异。其中,碱激发剂浓度越高,砂浆表面变化越不明显; A₂₀ 试块表面出现了明显的大孔洞, A₂₅ 试块边缘出现了明显的剥落,而 A₃₀ 试块仅观察到轻微的剥落和细小孔洞。当干湿交替-海水侵蚀次数达到 90 次时,试块颜色呈浅褐色,且表面出现不同程度的砂浆裸露现象。其中, A₂₀ 试块表面出现裂纹,部分区域剥落严重,砂浆表面已发生脱落; A₂₅ 试块成型面剥落最为严重,并伴随部分砂浆裸露; A₃₀ 试块未观察到明显剥落。由此可知,在干湿交替-海水侵蚀耦合作用下,碱激发剂浓度越高,砂浆的抗侵蚀性能越好。

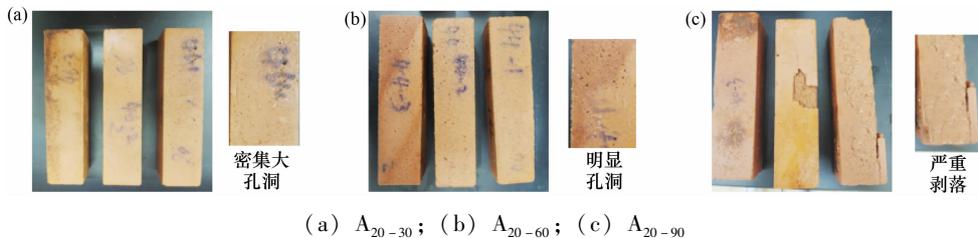
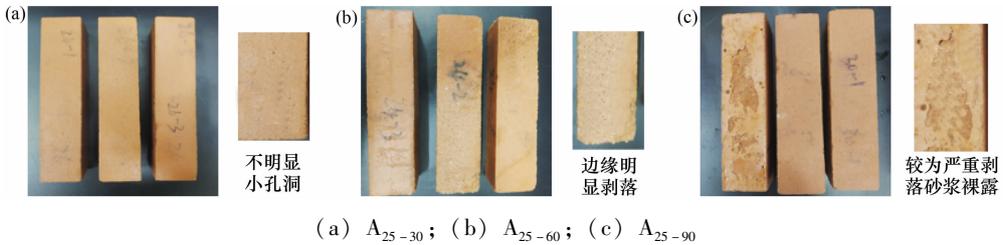
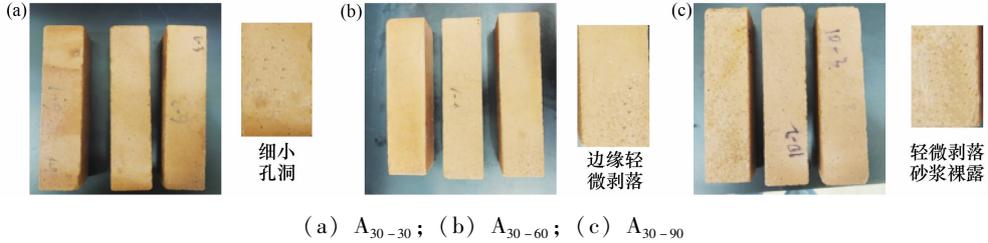


图 1 A₂₀ 干湿交替-海水侵蚀 30、60、90 次后表观形貌变化

图 2 A_{25} 干湿交替-海水侵蚀 30、60、90 次后表观形貌变化图 3 A_{30} 干湿交替-海水侵蚀 30、60、90 次后表观形貌变化表 3 A_{20} 试块在不同干湿交替周期下的外观变化

循环次数/次	颜色	裂纹、孔洞	敲击声音	剥落情况
30	褐色	大孔洞	温和	较为轻微
60	褐色	密集大孔洞	较为低沉	轻微
90	浅褐色	宽粗裂纹	低沉	严重

2.2 质量损失率

在干湿交替-海水侵蚀耦合作用下,硅灰石-矿渣-偏高岭土地聚合物砂浆的质量损失率随干湿交替次数的变化如图 4 所示。由图 4 可知:随着干湿交替次数的增加,各组试件的质量损失率均呈现出逐渐上升的趋势。究其原因,随着干湿交替次数的进一步增加,试块受侵蚀程度加深,内部孔隙和裂纹逐渐增多,从而导致质量损失率增大。当干湿交替次数达到 90 次时, A_{20} 、 A_{25} 、 A_{30} 试块的质量损失率分别达到最大值,分别为 9.00%、6.82%、4.55%。此外,全浸泡和半浸泡两种侵蚀方式对砂浆质量损失率的影响显著。在各干湿交替周期中,半浸泡试块的质量损失率均高于全浸泡试块。当干湿交替-海水侵蚀次数为 90 次时,不同侵蚀方式下的砂浆质量损失率差异最为明显: A_{20} 、 A_{25} 、 A_{30} 半浸泡试块的质量损失率分别比全浸泡试块高出 8.78%、20.53%、24.18%。相同侵蚀龄期下, A_{30} 试块的质量损失率同比增长了 24.18%,这说明地聚合物砂浆的碱激发剂浓度越高,侵蚀方式对砂浆质量损失率的影响越显著。

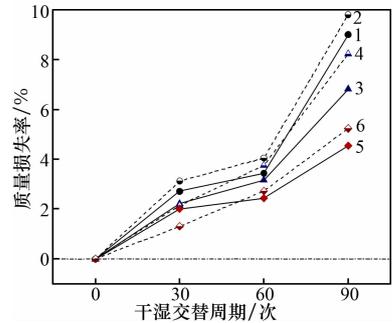
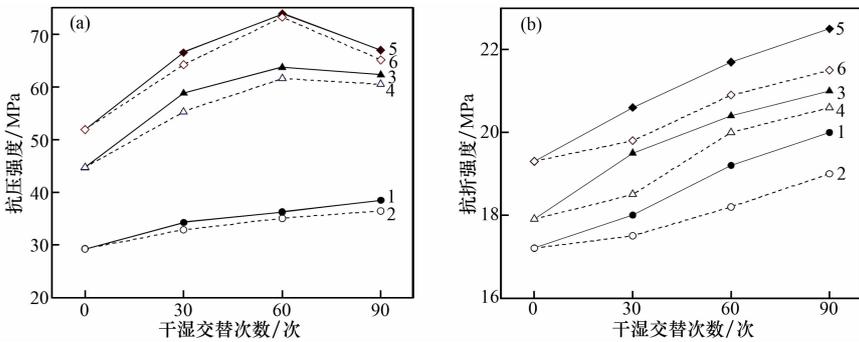
1— A_{20} 全浸泡; 2— A_{20} 半浸泡; 3— A_{25} 全浸泡; 4— A_{25} 半浸泡; 5— A_{30} 全浸泡; 6— A_{30} 半浸泡。

图 4 地聚合物砂浆质量损失率随侵蚀龄期变化

2.3 力学性能

在干湿交替-海水侵蚀耦合作用下,硅灰石-矿渣-偏高岭土地聚合物砂浆试块的抗折强度和抗压强度随干湿交替次数的变化曲线如图 5 所示。

由图 5(a)可知:在同一干湿交替次数下,地聚合物砂浆的抗压强度由小到大依次为 A_{20} 、 A_{25} 、 A_{30} 。这表明碱激发剂浓度对砂浆的抗压强度有显著影响,地聚合物砂浆的抗压强度随碱激发剂浓度的增加而提升。 A_{20} 、 A_{25} 、 A_{30} 的初始强度分别为 29.3、44.7、51.9 MPa。当激发剂浓度每增加 5% 时,初始抗压强度分别提升了 52.56%、16.11%。由此可见,碱激发剂浓度越高,地聚合物砂浆的强度越高,力学性能越好。然而,随着浓度的升高,抗压强度的提升幅度逐渐减缓,这表明存在一个浓度临界值,这一结论与 XU 等^[10]的研究结论一致。对于 A_{25} 和 A_{30} 地聚合物砂浆,其抗压强度随干湿交替次数先增加后降低;而 A_{20}



(a) 抗压; (b) 抗折

1— A_{20} 全浸泡; 2— A_{20} 半浸泡; 3— A_{25} 全浸泡; 4— A_{25} 半浸泡; 5— A_{30} 全浸泡; 6— A_{30} 半浸泡。

图 5 地聚合物砂浆抗压/抗折强度随侵蚀龄期变化

砂浆的抗压强度则随着干湿交替次数的增加而持续上升。临界干湿交替次数为 60 次, 在此之前, 地聚合物砂浆的二次聚合反应生成更多的 N - A - S - H 和 C - A - S - H 基团, 填补了砂浆内部孔隙, 从而提升了砂浆的强度。在干湿交替 60 次时, $A_{20-全}$ 、 $A_{25-全}$ 、 $A_{30-全}$ 试件的抗压强度分别为 36.3、63.7、73.9 MPa, 较初始值分别提升了 23.89%、42.51%、42.39%。干湿交替 60 次后, $A_{25-全}$ 、 $A_{30-全}$ 的抗压强度逐渐下降; 当循环次数由 60 次增至 90 次时, 砂浆的强度分别降低了 2.20%、9.34%, 其中 $A_{30-全}$ 的强度下降速率最大。这是因为 A_{20} 、 A_{25} 的碱激发剂浓度较低, 水化聚合反应完成度较低, 随着侵蚀程度加深, 内部未反应基质进一步聚合增强了试块的强度, 从而使得强度下降幅度减缓。这也进一步说明了 A_{20} 的抗压强度随干湿交替次数的增加而逐渐上升。

由图 5(b) 可知: 硅灰石 - 矿渣 - 偏高岭土地聚合物砂浆的抗折强度逐渐增加。这是由于硅灰石和矿渣与地聚合物砂浆基质之间产生了桥接作用, 有效抑制了裂纹的产生, 从而逐步提升了砂浆的抗折强度^[14]。在同一干湿交替周期内, 砂浆的抗折强度随碱激发剂浓度的增加而逐渐升高。 A_{20} 、 A_{25} 、 A_{30} 砂浆的初始抗折强度依次为 17.2、17.9、19.3 MPa。当碱激发剂浓度每增加 5% 时, 初始抗折强度分别提升了 4.07%、7.82%, 进一步说明碱激发剂浓度越高, 地聚合物砂浆的力学性能越好。在经历干湿交替 - 海水侵蚀 90 次后, $A_{30-全}$ 、 $A_{25-全}$ 、 $A_{20-全}$ 的抗折强度分别为 22.5、21.0、20.0 MPa, 与初始值相比分别增长了

16.58%、17.32%、16.28%。这说明硅灰石 - 矿渣 - 偏高岭土地聚合物砂浆具有良好的抗侵蚀性能。

综上, 浸泡方式对地聚合物砂浆的力学性能存在一定影响。半浸泡试块的抗折强度、抗压强度均低于全浸泡试块, 这是由于半浸泡试块中浸泡部分与未浸泡部分之间的湿度差, 使得海水中的有害离子更容易进入砂浆内部, 进而侵蚀其内部的胶凝结构, 导致试块的强度降低。其中, 侵蚀方式对 A_{20} 试块的影响最为显著。经过 90 次干湿交替 - 海水侵蚀后, A_{20} 全浸泡侵蚀试块的抗压强度和抗折强度分别较半浸泡试块提升了 5.48%、5.26%。

2.4 相对动弹性模量

干湿交替 - 海水侵蚀耦合作用下, 不同碱激发剂浓度的硅灰石 - 矿渣 - 偏高岭土地聚合物砂浆相对动弹性模量随干湿交替次数的变化趋势如图 6 所示。由图 6 可知: 砂浆的相对动弹性模量随循环次数的增加逐渐降低, 这是因为随着侵蚀程度的加深, 内部孔隙和微裂纹增多, 使得有害离子更容易进入试块内部, 加剧腐蚀, 从而导致砂浆的动弹性模量下降。在相同循环次数下, 地聚合物砂浆试块的相对动弹性模量由大到小依次为 A_{30} 、 A_{25} 、 A_{20} , 其初始动弹模分别为 4.11、4.79、4.88 GPa。当激发剂浓度每增加 5% 时, 其动弹性模量分别增加了 16.55% 和 1.88%。经过 90 次干湿交替后, A_{30} 的相对动弹性模量仍高于 70%, 而 A_{20} 的相对动弹模仅达到 50.6%。这是因为在碱激发剂浓度增加的情况下, 砂浆的密实度

随之提高,从而减少了有害离子的侵入,进而提高了砂浆的抗海水侵蚀性能。

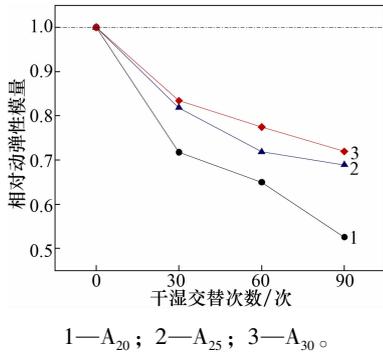


图 6 地聚合物砂浆相对动弹性模量随侵蚀龄期变化

3 硅灰石-矿渣-偏高岭土地聚合物砂浆强度预测模型

为了能够准确反映经过多因素耦合侵蚀后硅灰石-矿渣-偏高岭土地聚合物砂浆抗压强度的劣化程度,采用相对抗压强度和相对抗折强度进行评价。其计算表达式如下。

相对抗压强度、抗折强度计算公式:

$$R_c = \frac{f_{ci}}{f_{c0}} \quad (2)$$

$$R_f = \frac{f_{fi}}{f_{f0}} \quad (3)$$

式中: R_c 为试件的抗压强度, MPa; R_f 为试件的抗折强度, MPa; f_{ci} 为干湿交替 i 次后各试件的抗压强度, MPa; f_{fi} 为干湿交替 i 次后各试件的抗折强度, MPa; f_{c0} 为试件养护完成未侵蚀前的抗压强度, MPa; f_{f0} 为试件养护完成未侵蚀前的抗折强度, MPa。

3.1 相对强度随干湿交替次数的强度演化关系

针对干湿交替-海水侵蚀耦合作用下硅灰石-矿渣-偏高岭土地聚合物砂浆,在不同干湿交替次数 N 后,对其相对抗压强度 R_c 和相对抗折强度 R_f 采用一元二次函数进行拟合,函数模型如式(4)所示。

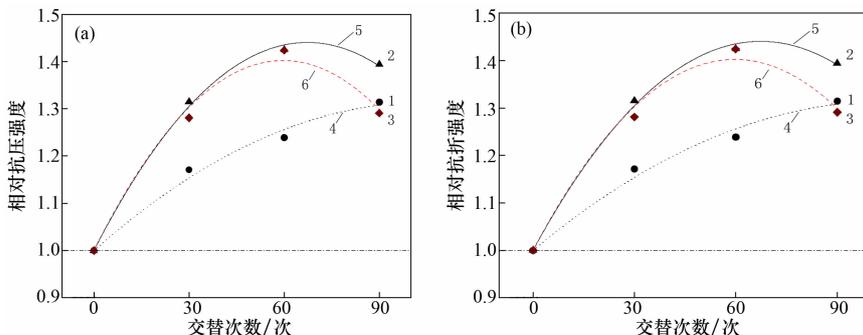
$$R_c = aN^2 + bN + c \quad (4)$$

式中: a 、 b 为待定系数;当 $N=0$ 时 $R_c=1$, 因此 $c=1$ 。

根据式(4),对不同碱激发剂浓度的硅灰石-矿渣-偏高岭土地聚合物砂浆在不同干湿交替次数下的相对强度进行回归分析。采用 Origin 软件进行数据拟合,并使用 Levenberg-Marquardt 优化算法,计算得到各砂浆试块的一元二次函数模型。抗压、抗折相对强度的拟合模型参数如表 4 所示,拟合曲线如图 7 所示。

表 4 不同干湿交替次数下的强度预测模型

系数	激发剂类型	$a/10^{-5}$	b	相关系数
相对抗压强度	A_{20}	-2.827 490 0	0.005 97	0.982 28
	A_{25}	-9.704 680 0	0.013 07	0.997 15
	A_{30}	-11.298 200 0	0.013 48	0.984 24
相对抗折强度	A_{20}	0.064 327 5	0.001 78	0.990 24
	A_{25}	-1.584 800 0	0.003 34	0.998 15
	A_{30}	-0.663 743 0	0.002 44	0.999 98



1— A_{20} 实测值; 2— A_{25} 实测值; 3— A_{30} 实测值; 4— A_{20} 拟合曲线; 5— A_{25} 拟合曲线; 6— A_{30} 拟合曲线。

图 7 相对抗压、抗折强度与不同交替次数的关系曲线

结合表4、图7可知：不同碱激发剂浓度的硅灰石-矿渣-偏高岭土基地聚合物砂浆经干湿交替海水侵蚀后，其强度模型预测值与实测值的变化趋势基本一致。相关系数为0.982~0.999，表明数据拟合效果较好。因此，该模型能较为准确地反映硅灰石-矿渣-偏高岭土基地聚合物砂浆相对强度与干湿交替次数之间的关系。

3.2 强度预测模型构建

进一步分析硅灰石-矿渣-偏高岭土基地聚合物砂浆相对强度 R_c 、 R_f 与干湿交替次数 N 和碱激发剂浓度 C 之间的关系，以 N 、 C 为自变量，建立二元多项式函数。使用Origin软件进行数据拟合，得到干湿交替-海水侵蚀耦合作用下硅灰石-矿渣-偏高岭土基地聚合物砂浆的强度预测模型，具体如式(5)、(6)所示。

$$R_c = (1.46199 \times 10^{-6} C^2 - 7.95439 \times 10^{-5} C + 9.77807 \times 10^{-4}) N^2 + (-1.68211 \times 10^{-4} C^2 + 0.00899C - 0.10656) N + 1 \quad (5)$$

$$R_f = (5.09357 \times 10^{-7} C^2 - 2.62193 \times 10^{-5} C + 3.21287 \times 10^{-4}) N^2 + (-4.8579 \times 10^{-5} C^2 + 0.0025C - 0.02874) N + 1 \quad (6)$$

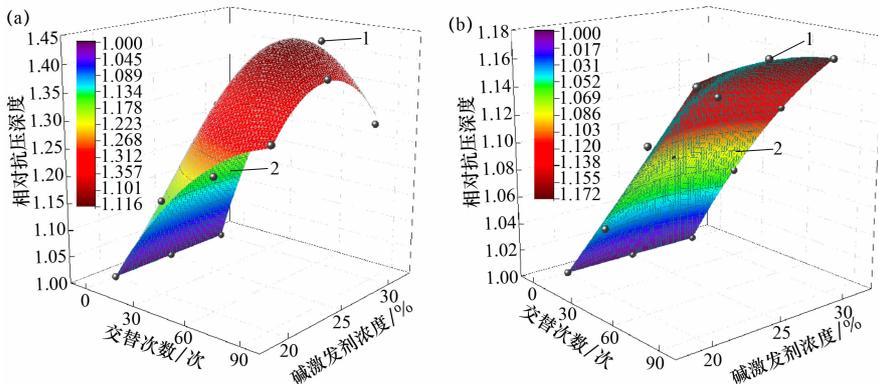
拟合模型的结果与试验实测值的对比如图8所示。由图8可知：干湿交替-海水侵蚀耦合作用下硅灰石-矿渣-偏高岭土的强度预测模型效果较好，大部分数据分布在三维模型的表面及周边区域。 R_c 、 R_f 拟合模型计算值的相关系数分别为0.977和0.997，表明模型具有较高的拟合精度和可靠性。

4 结 论

(1) 多因素耦合侵蚀作用下不同碱激发剂浓度的硅灰石-矿渣-偏高岭土基地聚合物砂浆表面变化基本一致，试件表面颜色由深变浅(呈现暗红色-褐色-浅褐色变化)，敲击声音由清脆逐渐变为低沉，试块的剥落程度逐渐严重，干湿交替-海水侵蚀90次试件表面出现了不同程度地掉皮、剥落，且碱激发剂浓度越高砂浆表观形貌变化越不明显。

(2) 随干湿交替-海水侵蚀次数的增加，硅灰石-矿渣-偏高岭土基地聚合物砂浆的质量损失率、抗折强度逐渐增加，抗压强度先上升后下降，当干湿交替60次时砂浆的抗压强度达到临界值，相对动弹性模量逐渐降低。同时侵蚀方式对砂浆强度存在一定影响，同一侵蚀龄期全浸泡砂浆的力学性能均优于半浸泡试块以 A_{20} 的区别最明显。当干湿交替-海水侵蚀90次时， A_{20} 全浸泡侵蚀试块的抗压、抗折强度较半浸泡试块分别提升了5.48%、5.26%。

(3) 碱激发剂浓度越高地聚合物砂浆的质量损失率越低，抗折、抗压强度和相对动弹性模量越高，其中 A_{30} 的抗海水侵蚀性能最好，90次干湿交替-海水侵蚀后 A_{30} 质量损失率仅4.55%，抗折、抗压强度分别高达22.3 MPa和67 MPa，较初始值均有大幅度提升，说明碱激发剂浓度越高砂浆聚合反应完成度更高，结构更加致密，抗海水侵蚀性能更好。



(a) 抗压强度；(b) 抗折强度

1—实测值；2—拟合模型。

图8 相对抗压强度、抗折强度、交替次数、碱激发剂浓度的关系

(4) 采用损伤力学理论和一元二次函数,建立了基于相对抗压、抗折强度随干湿交替次数和碱激发剂浓度变化的强度预测模型,数据拟合效果较好,可为硅灰石-矿渣-偏高岭土地聚合物在复杂环境下的抗侵蚀研究提供参考。

参考文献:

- [1] NADZIRI N, ISMAIL I, SYAHMI BIN ARDI A, et al. Comparison of microstructural properties of one-and two-part fly ash geopolymer concretes [C]//Proceedings of AWAM International Conference on Civil Engineering 2022-Volume 3. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022.
- [2] ZHANG P, WANG K X, LI Q F, et al. Fabrication and engineering properties of concretes based on geopolymers/alkali-activated binders-Areview[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 258: 120896.
- [3] PAUDEL S R, YANG M, GAO Z L. pH level of pore solution in alkali-activated fly-ash geopolymer concrete and its effect on ASR of aggregates with different silicate contents[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(9): 04020257.
- [4] FARHAN K Z, JOHARI M A M, DEMIRBO Ğ A R. Impact of fiber reinforcements on properties of geopolymer composites: A review[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 102628.
- [5] SALEHI S, KHATTAK M J, BWALA A H, et al. Characterization, morphology and shear bond strength analysis of geopolymers: Implications for oil and gas well cementing applications[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 38: 323 - 332.
- [6] PAIVA M D M, SILVA E C C M, MELO D M A, et al. A geopolymer cementing system for oil wells subject to steam injection[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 169: 748 - 759.
- [7] 金漫彤. 地聚合物固化生活垃圾焚烧飞灰中重金属的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [8] 彭晖, 崔潮, 蔡春声, 等. 激发剂浓度对偏高岭土地聚物性能的影响机制[J]. 复合材料学报, 2016, 33(12): 2952 - 2960.
- [9] 马倩敏, 黄丽萍, 牛治亮, 等. 碱激发剂浓度及模数对碱矿渣胶凝材料抗压性能及水化产物的影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(6): 2002 - 2007.
- [10] XU Z K, YUE J C, PANG G H, et al. Influence of the activator concentration and solid/liquid ratio on the strength and shrinkage characteristics of alkali-activated slag geopolymer pastes[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(1): 6631316.
- [11] LUO R, LIU H, DUAN P, et al. Sulfate resistance and microstructure of metakaolin geopolymer reinforced by cellulose nanofiber and wollastonite[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 64: 105580.
- [12] IBRAHIM M, SALAMI B A, AMER ALGAIFI H, et al. Assessment of acid resistance of natural pozzolan-based alkali-activated concrete: Experimental and optimization modelling[J]. Construction and Building Materials, 2021, 304: 124657.
- [13] ÖZCAN A, KARAKO Ç M B. Evaluation of sulfate and salt resistance of ferrochrome slag and blast furnace slag-based geopolymer concretes[J]. Structural Concrete, 2019, 20(5): 1607 - 1621.
- [14] ZHU D Q, WEN A H, TANG A P. Mechanical properties, durability and environmental assessment of low-carbon cementitious composite with natural fibrous wollastonite[J]. Environmental Research, 2023, 234: 116552.