

硫酸盐侵蚀作用下低热水泥浆体退化行为研究*

Deterioration Behavior of Low Heat Portland Cement Paste under Sulfate Attack

陈 宇¹, 姜春萌^{1,2}, 李双喜^{1,2}, 王 贝¹

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;
2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘 要: 低热水泥广泛应用于水工混凝土, 抗硫酸盐侵蚀是其耐久性设计的重要指标之一。采用硫酸钠溶液全浸泡试验法, 对比研究了低热水泥基净浆试件与普通水泥净浆试件孔隙率、硫酸根离子分布、膨胀率、抗压强度和维氏硬度等物理、力学性能演化规律, 对其侵蚀退化行为和损伤机理进行了分析。结果表明: 硫酸钠溶液环境下低热水泥浆体的抗侵蚀性能优于普通硅酸盐水泥, 掺入 30% 粉煤灰可提升其抗侵蚀能力。低热水泥浆体沿其侵蚀方向可由表及里分为损伤区、增强区、侵入区和完好区, 维氏硬度指标能够较好地表征水泥石损伤时变行为。

关键词: 硫酸盐侵蚀; 低热水泥; 离子浓度; 维氏硬度; 退化行为

中图分类号: TU528.0 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 01-0057-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.011

CHEN Yu¹, JIANG Chunmeng^{1,2}, LI Shuangxi^{1,2}, WANG Bei¹

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;
2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China)

Abstract: Low heat portland cement is widely applied in hydraulic concrete, where much attention should be paid to its performance of sulfate attack. In this paper, the evolution laws of physical and mechanical properties such as porosity, sulfate ion distribution, expansion rate, compressive strength and Vickers hardness of low heat cement-based pastes were determined through the full immersion test of sodium sulfate solution, as well as the compared ordinary cement pastes. Based on which, their sulfate attack deterioration behavior and damage mechanism were also analyzed. Results show that compared with ordinary portland cement, low heat cement has better resistance to sodium sulfate attack, and adding 30% fly ash could also improve its anti-corrosion performance. The corrosion section of low heat cement paste can be divided into degraded zone, strengthened zone, ingressive zone, and sound zone from the surface to the inside. Vickers hardness could better characterize the time-varying behavior of cement paste under sulfate attack.

Keywords: sulfate attack; low heat cement; ion concentration; Vickers hardness; deterioration behavior

0 引言

* 基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目 (2022D01B104)。

作者简介: 陈宇 (2001—), 男, 本科, 主要研究方向: 水工材料研究。

通信作者: 姜春萌 (1993—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 水工混凝土耐久性相关研究。

收稿日期: 2023-10-24

硫酸盐侵蚀是指外部硫酸根离子侵入到水泥基体并与其发生化学反应, 生成石膏、钙矾石等膨胀性产物, 进而导致混凝土开裂以及承载能力下降的现象^[1]。我国西北地区盐碱地面积大, 土壤和地下水中的硫酸根离子含量偏高, 此类地区修建的水工混凝土结构普遍面临硫酸盐侵蚀潜在危害^[2-3]。

材料科学

低热硅酸盐水泥具有水化热低、后期强度高、生产能耗低等特点，被广泛应用于水工大体积混凝土工程以控制其温度裂缝的产生^[4]。低热水泥 C₂S 含量高、C₃A 含量低，水化生成的 Ca (OH)₂ 量较普通硅酸盐水泥降低 30%~50%^[5]，通常认为具有良好的抗硫酸盐侵蚀性能。例如，彭小平、范磊等^[6-7]研究发现，硫酸钠侵蚀环境中低热水泥砂浆试件的抗弯侵蚀系数较普通水泥提高了 143.5%；Sui 等^[8]比较了浸泡于硫酸钠溶液中的低热水泥混凝土和普通水泥混凝土的动弹性模量和抗压强度，结果表明低热水泥的抗硫酸盐侵蚀性能明显较优；Wang 等^[9]研究了海水腐蚀环境下低热水泥混凝土的抗压强度和质量变化规律，发现提高水泥材料中的 C₂S 含量能够有效提升混凝土耐硫酸盐侵蚀和氯离子侵蚀能力。

由上述分析可知，目前针对低热水泥的硫酸盐侵蚀研究多以抗压强度、抗弯侵蚀系数和质量损失等宏观性能为评价指标，少有考虑矿物掺合料对其抗侵蚀能力的影响，并且围绕低热水泥基材料侵蚀时变行为与损伤机理的研究鲜有报道。随着西部地

区水利工程建设不断深入，以及低热硅酸盐水泥的广泛应用，有必要针对硫酸盐侵蚀作用下低热水泥基材料的退化行为进行深入分析。

为此，本文围绕“硫酸盐侵蚀作用下低热水泥浆体退化行为”这一主题，对比普通硅酸盐水泥，研究了硫酸盐侵蚀条件下低热水泥基净浆试件孔隙率、硫酸根离子浓度、膨胀率、抗压强度和维氏硬度等性能演化规律，并在此基础上对其损伤机理进行分析。研究成果可为低热水泥基材料在西部地区水工混凝土中的应用提供参考。

1 原材料与试验

1.1 原材料

试验水泥采用四川嘉华水泥公司生产的低热硅酸盐水泥（LHC）和 42.5 级普通硅酸盐水泥（OPC），其化学成分与基本物理、力学指标见表 1、表 2；粉煤灰为南京热电厂生产的 F 类Ⅱ级粉煤灰，比表面积为 383 m²/kg。

Table 1 Chemical composition and mineral composition of cement												/%
水泥	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	R ₂ O *	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
LHC	58.74	22.82	3.55	4.28	4.99	2.43	0.39	28.7	43.9	2.1	13.0	
OPC	62.83	20.50	5.61	3.84	1.70	3.07	1.31	48.0	22.9	8.4	11.7	

注：R₂O=Na₂O+0.658K₂O

Table 2 Physical and mechanical properties of cement									
水泥	密度 /(g/m ³)	比表面积 /(m ² /kg)	凝结时间/min		安定性	抗压强度/MPa			
			初凝	终凝		7 d	28 d	90 d	
LHC	3.21	332	233	343	合格	25.4	53.6	69.8	
OPC	3.22	356	125	277	合格	41.5	57.1	65.3	

Table 3 Mix proportions of cement pastes				
试件编号	水胶比	低热水泥/%	普通水泥/%	粉煤灰/%
OPC	0.4	0	100	0
LHC	0.4	100	0	0
L-30F	0.4	70	0	30

1.2 试样制备

参考常见水工混凝土配合比方案，设计了水胶比为 0.4，粉煤灰掺量为 0、30% 的低热水泥净浆试件，并配制了普通水泥净浆试件作为对照，见表 3。根据表 3，将拌和好的水泥浆体倒入尺寸为 φ50 mm×100 mm 的 PVC 管具和尺寸为 25 mm×25 mm×280 mm 的金属模具中成型，轻轻震动模具以排除游离气泡，然后将试件表面覆盖保鲜膜后置于标准养护室（20℃、98%RH）内养护 24 h。拆模并检查试件外观，确认密实无缺陷后将其浸泡于饱和石灰水中，在 20℃ 的室温环境下养护 90 d，然后进行相关侵蚀试验。

1.3 试验方法

以 5.0% 的 Na₂SO₄ 溶液为侵蚀介质，将 3 组试件完全浸没于装有该溶液的密闭试验箱中，以研究水泥类型、粉煤灰掺量对水泥浆体硫酸盐侵蚀性能的影响。为了保证侵蚀沿圆柱形试件直径方向进行，浸泡前分别将试件两端用环氧树脂密封，用于测试膨胀率的棱柱体试件不做处理。此外，为保证侵蚀溶液浓度稳定，试验过程中将其每隔 30 d 更换一次。在规定龄期内将试件取出，分别切割成不同尺寸的小圆柱体进行孔隙率、硫酸根离子浓度、抗压强度和维氏硬度测试，膨胀率测试选择同组棱柱体试件进行。每项试验均以三个试样的测试平均值作为最

终结果。

1.3.1 孔隙率测试

将切割后尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的小圆柱体试件放入 38°C 的真空干燥箱中恒温干燥 24 h, 取出后称量其干燥质量 m_0 。然后将试样置于真空饱水仪中 (绝对压力 65 kPa) 保持 60 min, 使其充分饱水后取出并擦干表面, 称其质量 m_t , 采用排液法测量试件体积 V , 按照式 (1)、式 (2) 计算试件孔隙率 P 及孔隙率损失率 ΔP 。

$$P_t = \frac{m_t - m_0}{V\rho_w} \times 100\% \quad (1)$$

$$\Delta P_t = \frac{P_t - P_0}{P_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: ρ_w 为水的密度, g/cm^3 ; t 为试件在硫酸盐侵蚀溶液中的浸泡时间, d。

1.3.2 线性膨胀率测试

试验周期内, 每隔 30 d 测试一次侵蚀试件长度, 测试过程参考 JCT 603—2004 《水泥胶砂干缩试验方法》^[10] 中的相关要求进行。

1.3.3 硫酸根离子浓度测试

将切割后尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的圆柱体试件固定在车床上, 沿其直径方向从边缘到中心逐层研磨并收集水泥石粉末, 每次进刀深度为 1 mm, 总研磨深度为 8 mm。将收集到的粉末进行干燥后, 按照 GB/T 176—2008 《水泥化学分析方法》^[11] 中硫酸钡重量法要求测试硫酸根离子浓度。

1.3.4 抗压强度测试

将切割后尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的小圆柱体试件置于 CSS-44100 电子万能试验机上进行抗压强度试验, 控制加载速率为 $0.10 \text{ mm}/\text{min}$, 记录其破坏荷载, 依据相关公式计算得出抗压强度及抗压强度损失率。

1.3.5 维氏硬度测试

将切割后尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的水泥石试件依次用 400、800 和 1200 目的砂纸打磨, 直至待测表面光滑平整。然后, 将试件放在图 1 所示的 HDX-1000TC 显微硬度计上, 试验负荷设置为 0.9807 N, 持荷时间为 15 s, 沿着硫酸盐侵蚀方向由表及里每隔 0.5 mm 测量一次维氏硬度, 试验结果取 8 个相同测距点的平均值。

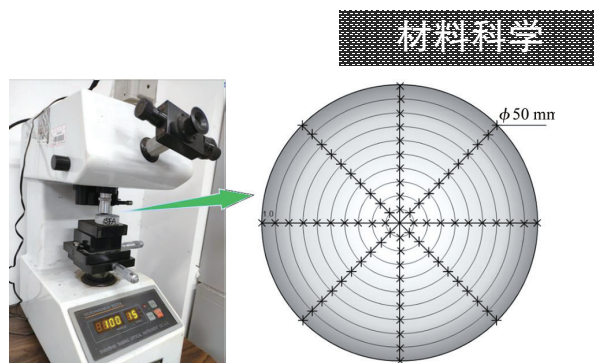


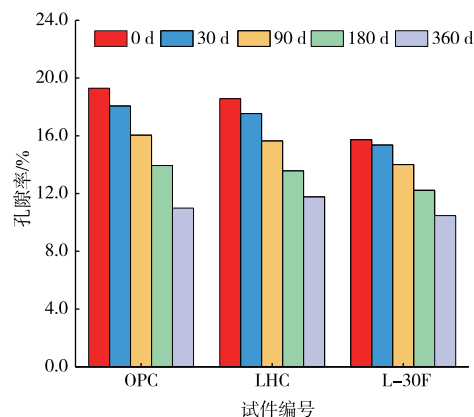
图 1 维氏硬度测试示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Vickers hardness test

2 结果与分析

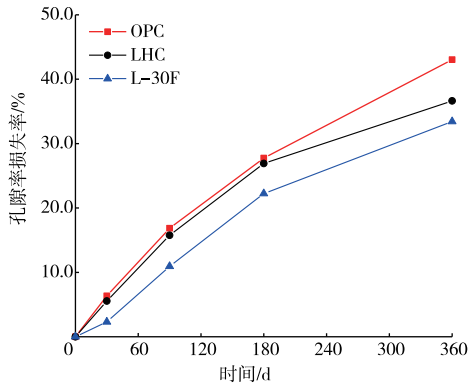
2.1 孔隙率

试件经侵蚀 0、30、90、180 和 360 d 后的孔隙率与孔隙率损失率如图 2 所示。由图 2 (a) 可知, LHC 试件的初始孔隙率略低于 OPC, 当掺入 30% 粉煤灰后其孔隙率进一步降低, 说明低热硅酸盐水泥试件较普通水泥更加密实, 掺入粉煤灰后由于其形态填充效应, 可以提高水泥浆体的流动性。此外, 3 组试件的孔隙率均随侵蚀龄期的延长而降低, 其原因一方面是水泥的继续水化作用使浆体结构更加密实, 另一方面主要是由于溶液中的硫酸根离子进入水泥浆体中, 反应生成了钙矾石和石膏等膨胀性产物, 进而造成其孔隙率降低^[12]。由图 2 (b) 可知, 在同一侵蚀龄期内, 3 组试件孔隙率损失率由大到小依次为 OPC、LHC 和 L-30F, 其中 OPC 和 LHC 孔隙率损失率在浸泡初期较为接近, 而 L-30F 则明显较低。这说明在硫酸钠侵蚀环境下, 普通水泥石中的硫酸根离子侵入速度较快, 因此反应生成的膨胀性产物多于低热水泥, 表现为孔隙率损失率较高。粉



(a) 孔隙率

材料科学



(b) 孔隙率损失率

图2 硫酸盐侵蚀条件下水泥石孔隙率及其损失率

Fig. 2 Porosity and its loss rate of cement pastes under sulfate attack 煤灰的掺入降低了低热水泥浆体的总钙含量和铝化合物含量,减少了膨胀性侵蚀产物的生成^[13],因此孔隙率损失率较低。

2.2 线性膨胀率

试件在不同侵蚀龄期的线性膨胀率如图3所示。各组试件膨胀率均随侵蚀时间的延长而增加,同一侵蚀龄期下3种水泥浆体的膨胀率由大到小依次为OPC、LHC、L-30F,与其孔隙率损失率的变化趋势一致。在侵蚀早期阶段,3组试件膨胀率的增长速率均较低,说明该时期反应生成的石膏、钙矾石等膨胀性侵蚀产物主要用于填充水泥浆体的初始孔隙,并不会使试件产生明显的体积膨胀。当浸泡超过180 d后,3组试件均表现出明显的体积膨胀,并且膨胀率随龄期的延长而明显增大。这一现象说明此时水泥浆体孔隙中的膨胀性硫酸盐侵蚀产物已经累积到一定程度,开始产生膨胀拉应力,使水泥石局部发生体积应变,表现为宏观线性膨胀率的增加。

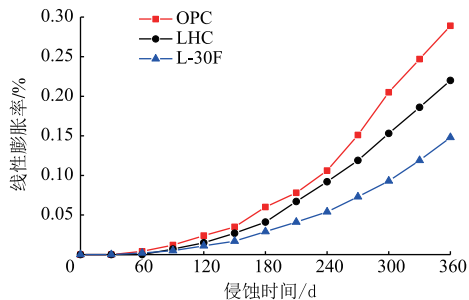


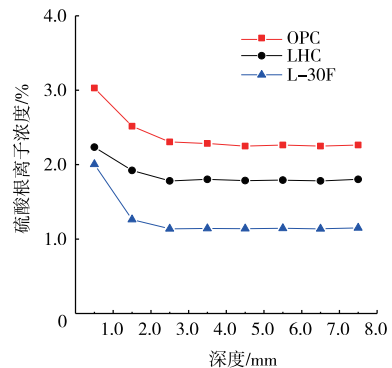
图3 硫酸盐侵蚀条件下水泥石线性膨胀率

Fig. 3 Linear expansion rate of cement pastes under sulfate attack

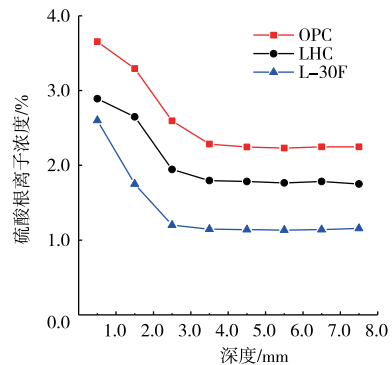
2.3 硫酸根离子分布

经侵蚀30、90和180 d后,3组水泥石中的硫酸根离子分布结果如图4所示。就试样表层区域而言,

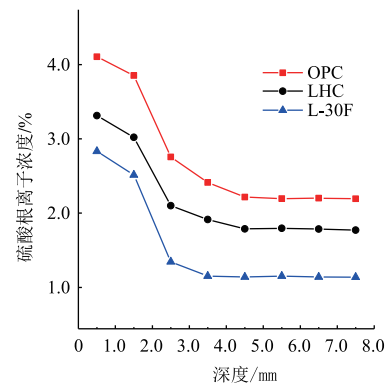
3种浆体中的硫酸根离子浓度均随其深度的增加而不断降低,并且随着浸泡龄期的延长而显著增加,这主要是由于硫酸根离子进入水泥石后与水化产物反应生成的石膏、钙矾石等膨胀性产物附着在试样表层孔隙,在一定程度限制了硫酸根离子的进一步扩散^[14]。在试件内部,水泥石的硫酸根离子浓度随着深度的增加并无明显变化,可视为恒定值,由高到低依次为OPC、LHC、L-30F,这与胶凝材料中所含石膏等含硫化合物的初始含量有关。



(a) 30 d



(b) 60 d



(c) 90 d

图4 硫酸盐不同侵蚀龄期下水泥石中 SO_4^{2-} 浓度

Fig. 4 Content of sulfate ion in cement pastes under sulfate attack

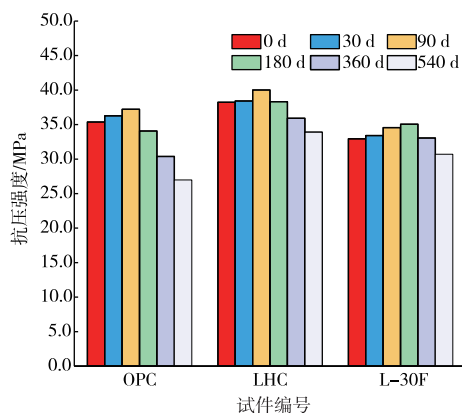
将图 4 中硫酸根离子含量曲线分别做光滑处理, 计算各组水泥石未侵蚀区域硫酸根离子的初始含量平均值, 并在图像上绘制以此数据为纵坐标的水平横线, 该线与侵蚀区域硫酸根浓度曲线的交点即为硫酸根离子扩散深度, 结果见表 4。

表 4 水泥浆体中硫酸根离子扩散深度
Table 4 Ingress depth of sulfate ions in cement pastes

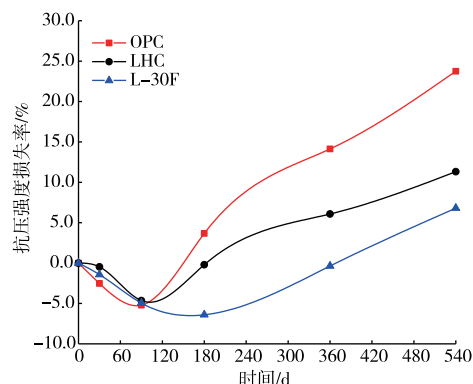
试件编号	侵蚀深度/mm		
	30 d	90 d	180 d
OPC	2.63	4.08	4.75
LHC	2.27	3.30	4.19
L-30F	1.88	2.79	3.83

2.4 抗压强度

试件在侵蚀 0、30、90、180、360 和 540 d 时的抗压强度与强度损失率结果如图 5 所示。低热硅酸盐水泥经养护 90 d 后的抗压强度高于相同配合比的普通水泥, 当掺入 30% 粉煤灰后其强度有所降低。OPC、LHC 和 L-30F 三组试件抗压强度随侵蚀时间的变化规律基本一致, 前 180 d 内抗压强度随着浸泡龄期的延长而增加, 之后开始降低, 其中 OPC 水泥石的抗压强度降低最为明显。强度增长期的出现一方面有水泥持续水化作用因素, 最主要的原因是硫酸盐侵蚀反应生成的石膏、钙矾石等膨胀性侵蚀产物密实了水泥浆体孔隙结构, 进而增强了其力学性能。随着硫酸盐侵蚀反应的持续发生和侵蚀产物的不断累积, 最终膨胀应力超过水泥石极限抗拉强度, 表现为试件开裂、剥落以及强度损失, 因此迅速进入劣化期。图 5 (b) 中的抗压强度损失率也证明了这一点, 3 组试件的抗压强度损失率在 90 d 之前均为负值, 且由大到小依次为 LHC、L-30F、OPC, 即普通水泥的抗压强度增长率最高、低热水泥次之,



(a) 抗压强度



(b) 抗压强度损失率

图 5 硫酸盐侵蚀条件下水泥石抗压强度及其损失率
Fig. 5 Compressive strength and its loss rate of cement pastes under sulfate attack

而掺入 30% 粉煤灰后抗压强度增长率略有提高。侵蚀 90 d 之后, 三组试件的抗压强度损失率从大到小变化为 OPC、LHC、L-30F, 且其最低值分别出现在 78、96 和 163 d, 强度损失率的转正时间为 142、181 和 367 d。

2.5 维氏硬度

经侵蚀 30、90、180 和 360 d 的试件截面维氏硬度结果如图 6 所示。三组试件的硬度分布规律相似, 在表层区域均随着水泥石深度的增加而逐渐增大, 达到最大值后经过短暂下降最终趋于某稳定值, 基本符合硫酸盐侵蚀由表及里、逐层发生的劣化规律。试件表层硬度值明显低于其右侧数值, 这可能是由于试样表层除发生硫酸盐侵蚀外, 还因与中性侵蚀溶液的长期接触而发生了钙离子溶蚀。硬度曲线上峰值增强区域的出现主要是由于膨胀性硫酸盐侵蚀产物填充了该区域的孔隙结构, 因此其位置也可在一定程度上反映硫酸根离子的侵入深度。对于靠近表层的损伤区域, 3 组试件维氏硬度均随侵蚀时间的延长而逐渐降低, 且损伤区域的深度随着侵蚀时间的延长而增加。侵蚀 30 d 后, 试件表层损伤区的硬度值由大到小依次为 LHC、OPC、L-30F, 这与其初始维氏硬度的相对大小一致, 也从侧面印证了低热水泥浆体力学性能均高于同配比的普通水泥。侵蚀 360 d 后, 三者硬度值由大到小改变为 LHC、L-30F、OPC, 说明硫酸盐侵蚀作用下低热水泥浆体的力学性能降低速率较慢, 即其抗硫酸盐侵蚀能力优于普通水泥, 掺入 30% 粉煤灰后可进一步改善这一性能。

材料科学

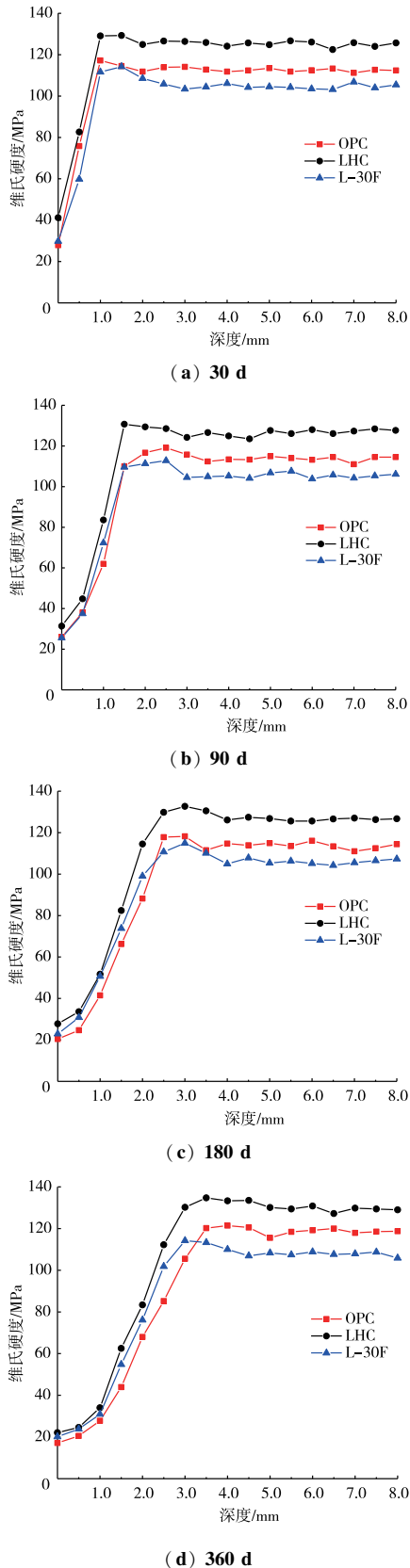


图6 硫酸盐不同侵蚀龄期下水泥石截面维氏硬度

Fig. 6 Vickers hardness of cement pastes under sulfate attack

对比图6和表3中数据,可以发现侵蚀试样的硫酸根离子扩散深度均略大于其硬度增强区最大深度,说明当水泥基体中出现侵入的硫酸根离子时,并不能代表侵蚀反应的发生,只有当其力学性能改变或者表现出其他材料特性损伤时才能证实硫酸盐侵蚀行为。据此,根据侵蚀水泥试件的截面劣化规律,可将其由表及里分为四个区域:(I)损伤区,该区域水泥石受到硫酸盐侵蚀或溶蚀作用,力学性能出现明显下降并且低于稳定区平均值;(II)强化区,该区域由于硫酸盐侵蚀生成的膨胀性产物对水泥石孔隙结构的密实作用,力学性能较稳定区平均值有所提高;(III)侵入区,该区域表示硫酸根离子已经扩散进入,但由于侵蚀反应尚未发生或者侵蚀产物累积不足以改变浆体宏观性能的区域;(IV)完好区,该区域未受硫酸根离子扩散以及侵蚀的影响,水泥浆体物理及力学性能保持稳定并与其初始值基本一致。

3 结论

(1) 低热水泥浆体的氢氧化钙和铝相化合物含量较低,与侵蚀溶液中硫酸根离子反应生成的石膏、钙矾石等膨胀性侵蚀产物量相对较少,与同配合比的普通水泥试件相比具有更低的孔隙率损失率、膨胀率、侵蚀深度及强度损失率,即抗硫酸盐侵蚀性能较优。

(2) 适量掺入粉煤灰能够消耗和降低水泥水化产物中的氢氧化钙和铝相化合物,增加浆体流动性和密实度,进而可以提高低热水泥基材料的抗硫酸盐侵蚀能力。当掺入30%粉煤灰时,低热水泥复合胶凝体系的抗硫酸盐侵蚀性能有明显提升。

(3) 根据水泥石硫酸根离子侵蚀深度和维氏硬度分布规律,可将其截面划分为损伤区、强化区、侵入区和完好区四个部分。水泥浆体中出现侵入硫酸根离子并不代表硫酸盐侵蚀反应的发生,只有当其力学性能改变或者表现出其他材料特性损伤时才能证实硫酸盐侵蚀作用,维氏硬度指标可较好地表征这一时变行为。

参考文献

- [1] SANTHANAM M, COHEN M D, OLEK J. Sulfate attack research—whither now? [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31 (6): 845-851.

(下转第76页)

材料科学

- 法及误差分析 [J]. 湘潭大学自然科学学报, 2012, 34 (1): 45-53.
- [3] 耿铁君. EN-1 土壤固化剂改良红砂岩的作用机理与路用性能研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [4] 力乙鹏, 李婷. 土壤固化剂的固化机理与研究进展 [J]. 材料导报, 2020, 34 (S2): 1273-1277, 1298.
- [5] 许福, 蒋川梓, 张书经, 等. 碱激发矿渣固化土压平衡盾构渣土的试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18 (3): 849-859.
- [6] 黎良元, 石宗利, 艾永平. 石膏-矿渣胶凝材料的碱性激发作用 [J]. 硅酸盐学报, 2008 (3): 405-410.
- [7] 何晶, 何建新. 利用碱激发矿渣粉制备的土体固化剂的力学性能研究 [J]. 新疆农业大学学报, 2016, 39 (5): 414-418.
- [8] 闫林, 何晶, 何建新, 等. 碱矿渣粉固化沙漠土力学性能及耐久性能研究 [J]. 人民黄河, 2019, 41 (5): 86-89.
- [9] GB 50021-2001. 岩土工程勘察规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [10] JTG E51-2009. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [11] 杨海华, 杨武, 刘汉龙, 等. 基于 PPR 数据建模技术的砂砾石料应力应变规律拟合 [J]. 材料导报, 2023, 37 (13): 1-13.
- [12] 郑祖国, 何建新, 宫经伟, 等. 复杂系统的投影寻踪回归无假定建模技术及应用实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- [13] 李驰, 于浩. 固化风沙土强度特性及固化机制试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (S2): 48-52.

(上接第 62 页)

- [2] 吴福飞, 侍克斌, 董双快, 等. 硫酸盐镁盐复合侵蚀后混凝土的微观形貌特征 [J]. 农业工程学报, 2015, 31 (9): 140-146.
- [3] 金祖权. 西部地区严酷环境下混凝土的耐久性与寿命预测 [D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [4] 姜春萌, 宫经伟, 唐新军. 低热水泥胶凝体系力学及热学综合性能评价 [J]. 长江科学院院报, 2019, 36 (5): 116-120.
- [5] 郭随华, 林震, 苏姣华, 等. 高贝利特硅酸盐水泥的水化和浆体结构 [J]. 硅酸盐学报, 2000 (S1): 16-21.
- [6] 彭小平. 低热高性能高贝利特水泥大坝混凝土的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
- [7] 范磊. 高贝利特水泥高性能混凝土的研究 [D]. 北京: 中国建筑材料科学研究院, 2003.
- [8] SUI T, FAN L, WEN Z, et al. Study on the properties of high strength concrete using high belite cement [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2004, 2 (2): 201-206.
- [9] WANG N, CHENG X, YANG Y. Seawater corrosion resistance of low heat Portland cement concrete [J]. Materials Science Forum, 2015, 814: 207-213.
- [10] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水泥胶砂干缩试验方法: JCT 603-2004 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. 水泥化学分析方法: GB/T 176-2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [12] NEHDI M, HAYEK M. Behavior of blended cement mortars exposed to sulfate solutions cycling in relative humidity [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35 (4): 731-742.
- [13] MA X, ÇOPUROĞLU O, SCHLANGEN E, et al. Expansion and degradation of cement paste in sodium sulfate solutions [J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 410-422.
- [14] SCHMIDT T, LOTHEBACH B, ROMER M, et al. Physical and microstructural aspects of sulfate attack on ordinary and limestone blended Portland cements [J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39 (12): 1111-1121.