

纤维-膨胀剂协同改性混凝土耐硫酸盐侵蚀机理研究

田正宏^{1,2}, 颜伟³, 胡桂宝³, 钱长根³

(1. 河海大学苏州高等研究院; 2. 河海大学水利水电学院; 3. 南京江北新区建设和交通工程质量安全监督站)

摘要:针对高硫酸盐环境下混凝土的侵蚀劣化问题,通过硫酸盐干湿循环试验,系统研究了聚酯纤维、玄武岩纤维及 U 型膨胀剂不同复掺方式对混凝土耐硫酸盐侵蚀性能的影响;通过分析试件外观损伤、质量损失及孔结构演变的劣化规律,评价了混凝土耐硫酸盐侵蚀的特性,揭示了纤维与膨胀剂协同抑制混凝土劣化的机理。结果表明:玄武岩纤维体积分数为 0.15%、U 型膨胀剂质量分数为 4%(以胶凝材料计)的混凝土耐蚀性能最优,50 次循环后试件外观保持完整,无浆体脱落,质量损失率为 6.12%(对照组为 9.52%),无害孔占比较试验前降低了 5.55 个百分点(对照组降低了 10.00 个百分点);膨胀剂与纤维的协同作用优化了混凝土的孔隙结构,提升了混凝土的抗渗和耐侵蚀性能。

关键词:硫酸盐侵蚀;干湿循环;试验分析;劣化特征;微观分析;作用机理

Study on mechanism of sulfate erosion resistance of concrete modified by synergistic action of fiber and expansive agent//Tian Zhenghong^{1,2}, Yan Wei³, Hu Guibao³, Qian Changgen³(1. Suzhou Institute for Advanced Research of Hohai University; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University; 3. Nanjing Jiangbei New Area Construction and Traffic Engineering Quality and Safety Supervision Station)

Abstract: To address the deterioration of concrete exposed to high-sulfate environments, sulfate wet-dry cycling tests were conducted to systematically investigate the effects of different combined incorporation methods of polyester fiber, basalt fiber, and U-type expansive agent on the sulfate erosion resistance of concrete. By analyzing the deterioration patterns of specimen appearance damage, mass loss, and pore structure evolution, the sulfate erosion resistance of concrete was evaluated, and the synergistic mechanism by which fibers and expansive agent inhibit concrete deterioration was revealed. The results show that the concrete incorporating 0.15% basalt fiber by volume and 4% U-type expansive agent by mass of cementitious materials exhibited the best sulfate erosion resistance. After 50 cycles, the specimens remained intact in appearance, with no paste spalling observed. The mass loss rate was 6.12%, compared with 9.52% for the control group. The proportion of harmless pores decreased by 5.55 percentage points relative to that before the test, while that of the control group decreased by 10.00 percentage points. The synergistic effect of the expansive agent and fibers optimized the pore structure of concrete, thereby improving its impermeability and resistance to sulfate erosion.

Key words: sulfate erosion; wet and dry cycles; test analysis; deterioration characteristics; microscopic analysis; mechanism of action

混凝土因其良好的力学性能和较低的成本,被广泛应用于水利、航运等领域,但混凝土结构的施工浇筑层面以及裂缝等薄弱区域的耐久性较差,在高硫酸盐环境下易发生侵蚀劣化,严重影响了建筑物的使用寿命^[1-4]。例如:八盘峡水电站坝体结构多处遭受侵蚀出现开裂、脱落现象;李家峡水电站取芯检测发现混凝土内部硫酸根离子含量超标,存在硫酸盐侵蚀现象^[5]。此外,我国华北、华东及黄淮等地区地下水中含有较多硫酸根离子,长三角某些工业集聚区则由于常年受到工业污染,河湖水体中硫酸盐质量浓度均值达 354.40 mg/L,导致附近水工混凝土

结构受到极大侵蚀影响,工程服役年限大幅缩短^[6-7]。

已有学者提出采用掺加纤维和膨胀剂来提升混凝土的耐硫酸盐侵蚀性能,并开展了相关研究。例如:甘磊等^[8]采用室内干湿耦合试验研究了玄武岩纤维的加入对混凝土耐硫酸盐侵蚀性能的影响,发现掺入短切玄武岩纤维能够提升混凝土的抗压及劈裂抗拉强度,各项指标均优于对照组;陈红莉^[9]的干湿循环试验结果表明,聚酯纤维的加入可以明显改善混凝土的耐硫酸盐侵蚀性能和混凝土的整体强度性能,尤其是抗压、抗拉强度;Cai 等^[10]采用中国

铁道科学研究所的硫铝酸盐膨胀剂与沥青乳液搭配制作了一种水泥沥青混凝土,试验发现 U 型膨胀剂与浆体结构的结合显著提高了混凝土的抗蚀系数; Xu 等^[11]研究了掺加 U 型膨胀剂的混凝土在 15% 硫酸钠溶液条件下的物理力学性能,试验结果表明,随着膨胀剂掺量的增加,混凝土试件的强度降低,但其抗硫酸盐侵蚀能力显著提高。

尽管已有研究证实单一纤维(如玄武岩纤维、聚酯纤维)或膨胀剂(如 U 型膨胀剂)可部分改善混凝土耐硫酸盐侵蚀性能,但在实际工程中,硫酸盐侵蚀往往与干湿循环、温度变化等多因素耦合作用,单一改性手段难以满足复杂工况需求。此外,现有研究多聚焦于单一材料的作用机理,对纤维-膨胀剂复掺的协同效应缺乏系统性分析,尤其是微观孔结构演变与界面结合机制的关联性研究尚未深入。鉴于此,本文选择应用广泛的玄武岩纤维和聚酯纤维以及一种 U 型膨胀剂制备纤维-膨胀剂复掺混凝土,从宏微观多尺度探究其抗硫酸盐侵蚀性能,以期为高硫酸盐环境下混凝土的应用提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验材料主要包括 P·O 42.5 型普通硅酸盐水泥、Ⅱ级粉煤灰、粗骨料(粒径分布为 5~20 mm)、细骨料(细度模数 2.8,天然Ⅱ区中砂)、聚羧酸系高效减水剂、普通自来水、纤维和膨胀剂。纤维是河北某厂生产的聚酯纤维和玄武岩纤维,其性能指标见表 1。

表 1 纤维的主要性能指标

纤维种类	长度/mm	直径/ μm	密度/(g/cm^3)	弹性模量/GPa
聚酯纤维	12	28.22	1.31	26.6
玄武岩纤维	12	17.00	2.65	95.6

纤维种类	拉伸强度/MPa	极限伸长率/%	碱蚀强度保持率/%	熔点/ $^{\circ}\text{C}$
聚酯纤维	1861	13	96.3	265
玄武岩纤维	1556	3	86.0	1050

试验所用膨胀剂为湖北三元特种建材有限公司生产的硫铝酸钙型膨胀剂(U 型膨胀剂),其比表面积为 $375\text{ m}^2/\text{kg}$,细度为 0.27%,初凝时间和终凝时间分别为 200、340 min,水中 7 d 和 21 d 限制膨胀率分别为 0.051%、-0.014%,7 d 和 28 d 抗压强度分别为 33.7、47.2 MPa。

1.2 混凝土配合比

纤维和膨胀剂均为外掺,所用基准混凝土水灰比为 0.43,水泥、粉煤灰、粗骨料、细骨料的质量比为 1:0.21:2.89:2.18,减水剂用量为胶凝材料质量的 1.2%。参考文献[12-14],聚酯纤维和玄武

岩纤维分别按混凝土体积分数掺加,U 型膨胀剂按胶凝材料质量分数掺加;聚酯纤维、玄武岩纤维和 U 型膨胀剂的最优掺量分别为 0.1%、0.15%和 4%,且混凝土工作性能几乎保持不变,但上述研究全基于单一变量,本文设置了最优掺量的不同组合,同时为避免偶然性,增设了其他掺量,每组试件的纤维和膨胀剂掺加方式如表 2 所示,其中第一组为对照组,用于对比掺加纤维和膨胀剂后混凝土的性能变化。

表 2 纤维和膨胀剂掺量

试件编号	聚酯纤维/%	玄武岩纤维/%	U 型膨胀剂/%
对照组	0	0	0
P0.1	0.10	0	0
B0.15	0	0.15	0
PB0.15	0.15	0.15	0
P0.1-4U	0.10	0	4
B0.15-4U	0	0.15	4
PB0.15-4U	0.15	0.15	4

1.3 试件制备及试验设备

试验设置了“分类多拌”的拌合物制备方法,可防止纤维出现聚团现象^[15],避免局部膨胀应力集中,减少微裂缝的产生,保证试验结果的准确性。具体流程如图 1 所示:首先,将称好的水泥、粉煤灰和细骨料倒入搅拌机中干拌 30 s,此过程中加入一半的纤维和膨胀剂;然后将粗骨料倒入搅拌机中继续搅拌 30 s,此过程中加入剩下的纤维和膨胀剂;最后将掺有减水剂的自来水倒入搅拌机中搅拌 60 s,搅拌结束后入模振捣,同时取出部分样品测试其工作性能。本次试验试件均为立方体,尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,混凝土试件脱模后标准养护 28 d,养护温度为 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$,养护相对湿度在 95%以上。

试验设备主要包括数显电热恒温鼓风干燥箱、AutoPore V 压汞仪以及 HITACHI SU5000 型扫描电子显微镜(SEM)。数显电热恒温鼓风干燥箱用于混凝土高温烘干,压汞仪用于测量试件孔隙直径分布情况,SEM 用于观测试件微观形貌以及侵蚀产物的主要成分。

1.4 试验方案

硫酸盐侵蚀试验参照 GB/T 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中的加速浸泡试验法,利用高浓度盐溶液浸泡和高温烘干的干湿循环手段。为研究混凝土在硫酸盐侵蚀后的整体性能,选择分析纯无水硫酸钠(Na_2SO_4 ,AR 级)作为侵蚀介质配制侵蚀溶液。为提高试验结果可靠性并缩短试验周期,结合硫酸盐干湿循环试验相关研究^[16-17],确定配制 Na_2SO_4 溶液质量分数为 15%,浸泡过程中用塑料盖对试件箱进行密封,防止水分散失,且每隔 10 次循环换新溶液。烘干温度为 60°C ,

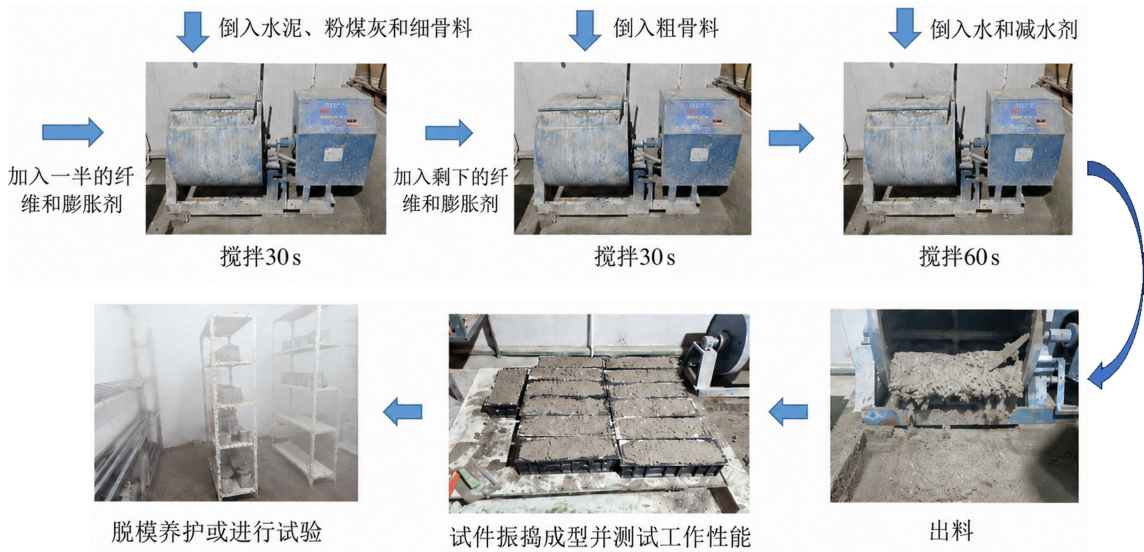


图1 试件制备流程

1个干湿循环周期为24h,其中盐浸18h、烘干6h,浸泡与烘干时间比为3:1。硫酸盐侵蚀试验共进行50次干湿循环,持续50d。

混凝土试件受侵蚀后的质量损失情况通过质量损失率来评价:

$$K_n = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K_n 为试件经历 n 次干湿循环后的质量损失率,%; m_0 为试件干湿循环前的质量,g; m_n 为试件经历 n 次干湿循环后的质量,g。

2 试验结果与分析

2.1 外观损伤

混凝土试件经历了50次硫酸盐干湿循环过程,采用实物图记录试件经历10、30、50次干湿循环后的外观侵蚀损伤情况,图2为各组试件外观损伤形态。

从图2可以看出,干湿循环10次后,不同试件均只出现轻微损伤。试件表面有轻微砂化痕迹,表面微小孔洞有所增加,个别棱角处有缺损浆体掉落。这一阶段对照组、单掺纤维组、复掺纤维和膨胀剂组试件的外观无明显差异。

干湿循环30次后,试件中度损伤,表面孔洞增多增大,出现蜂窝状坑蚀,如图2所示,对照组试件棱角等薄弱部位开始出现脱落和掉渣现象,部分棱角甚至已经“胀裂”。单掺纤维组试件整体虽保持较为完整,但试件表面细小裂纹明显增多,部分试件浆体外壳脱落,并有少量纤维外露。复掺纤维和膨胀剂的试件劣化程度明显低于前两者。损伤主要表现为试件表面的砂化和孔洞增多,试件出现“盐霜”,浆体脱落不明显,整体结构保持完整。出现

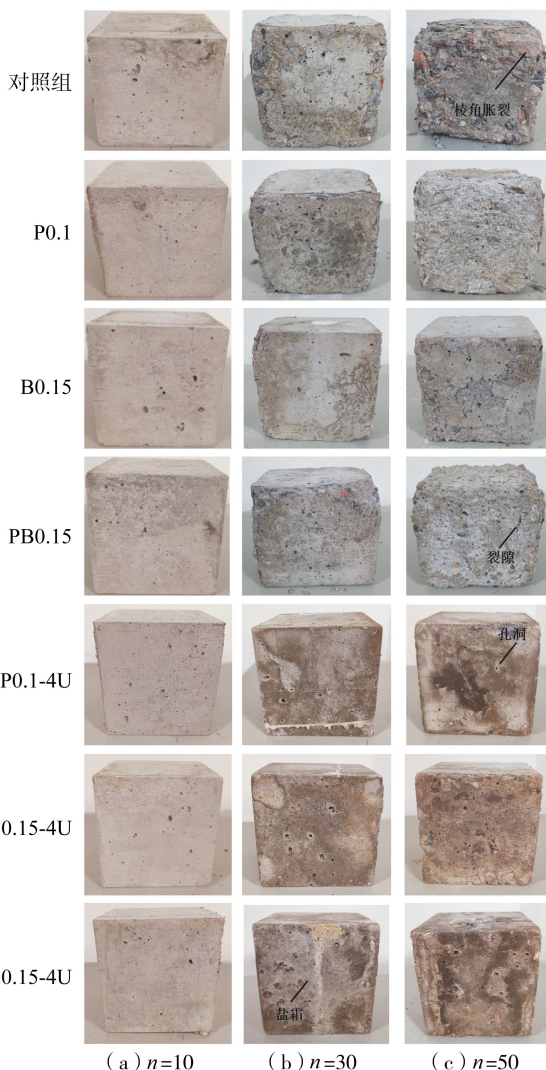


图2 干湿循环后混凝土试件外观形态变化

“盐霜”是因为硫酸盐侵蚀过程中产生硫酸盐结晶(图2),其外观呈淡白色、接近透明,微观形貌呈圆饼状,大小在 $0.2 \sim 2 \mu\text{m}$ 范围内^[18]。

干湿循环50次后,试件发生重度损伤,对照组

试件出现大量浆体剥蚀,试件外部浆体几乎全部脱落,砂石等骨料明显外露,无法保持原有的立方体外形。在干湿循环过程中,硫酸盐结晶不断形成与溶解,构成了一个反复加载与卸载的疲劳循环。这一过程不仅显著促进混凝土内部微裂纹的生成与延伸,同时因过量侵蚀产物的累积而导致混凝土基体孔洞、裂隙扩大,硫酸盐侵蚀通道增多,加重了侵蚀破坏。单掺纤维组试件出现浆体块状脱落现象,但无骨料缺损,破坏主要发生在表面较浅部位以及棱角处,外形仍维持较完整。复掺组试件外观保持完整,虽然浆体表面已被侵蚀砂化而呈颗粒状,但未发生浆体脱落,仅部分棱角出现少量缺损。

2.2 质量损失

混凝土试件经历了 50 次硫酸盐干湿循环过程,采用电子秤分别称量试件经历 10、30、50 次干湿循环后试件的质量,并计算其质量损失率。

混凝土试件在不同硫酸盐干湿循环周期的质量损失情况如图 3 所示。从图 3 可以看出,不同复掺方式下试件的质量变化规律均一致,前 10 次干湿循环中,所有试件质量损失率均下降;当干湿循环次数为 10~40 次时,试件质量损失率均急剧上升;当干湿循环次数达 40~50 次时,试件质量损失率开始缓慢上升。这主要由于混凝土在硫酸盐侵蚀过程中会产生不同的侵蚀产物,而侵蚀产物在不同阶段的作用不同。侵蚀产物生成的具体化学反应方程式为:

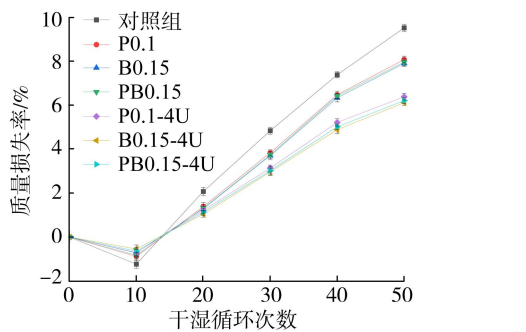
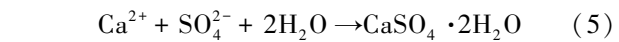
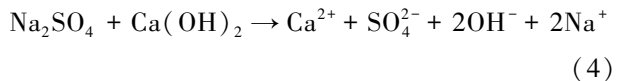
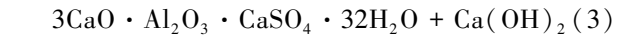
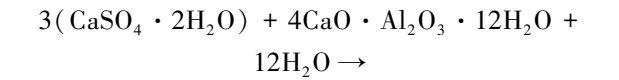
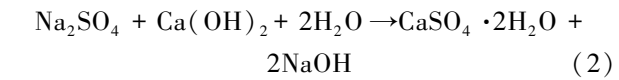


图 3 混凝土试件质量损失率与干湿循环次数的关系

侵蚀初始阶段生成的侵蚀产物填充孔隙,试件质量增加;随着干湿循环次数的增加,式(2)反应持续生成的 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (石膏)为式(3)中 $3\text{CaO} \cdot$

$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ (钙矾石)的形成提供了物质基础;同时式(4)电离的 Ca^{2+} 与溶液中的 SO_4^{2-} 结合生成硫酸钙经水化形成石膏。在此过程中,石膏与硫酸钙可直接相互转化,显著提高了钙矾石和石膏的生成总量,同时反复的干湿循环导致试件内部产生温度梯度应力,引发周期性膨胀-收缩行为,该温度应力与侵蚀产物结晶膨胀应力相互耦合,形成复合破坏机制,共同作用于混凝土基体,加速微裂缝扩展,因此质量损失率急剧上升;当干湿循环次数超过 40 次后,试件表层砂浆在持续剥蚀作用下逐渐脱落殆尽,暴露出内部新鲜的密实基体,同时与侵蚀离子反应生成新的钙矾石与石膏结晶,形成局部堵塞效应,从而减缓了质量损失率的上升速度。

当干湿循环达 50 次时,各组质量损失率呈现显著差异:对照组达 9.52%,而单掺纤维组(P0.1、B0.15)与复掺纤维组(PB0.15)分别为 7.90%、7.72%和 7.81%,复掺玄武岩纤维和膨胀剂的试件(B0.15-4U)表现出最优抗蚀性,损失率仅为 6.12%,较对照组降低了 35.8%。该现象源于纤维和膨胀剂的协同作用:纤维和膨胀剂复合材料在硬化过程中,膨胀剂的微膨胀效应在受约束条件下使基体内部产生适度压应力,提高纤维与混凝土基体界面的黏结强度^[19];另一方面,纤维通过桥联和约束作用分散局部应力,抑制裂缝扩展,使混凝土砂浆和骨料不易脱落,从而延缓质量损失。

2.3 孔隙直径分布及孔结构变化

采用 AutoPore V 压汞仪测定了硫酸盐干湿循环前后对照组、B0.15 组和 B0.15-4U 组各试件样品的孔隙直径分布情况。根据现有孔结构理论基础^[20]和 ASTM C457M—24 标准^[21],结合孔隙结构分布(图 4),将试件内部孔隙按孔隙直径大小分为无害孔(0~0.1 μm)、低害孔(0.1~1 μm)、有害孔(1~10 μm)、危害孔(10~100 μm)(表 3)。

从图 4(a)~(c)可以看出,在干湿循环的硫酸盐侵蚀模式下,孔结构的劣化主要表现为:随着硫酸盐的侵入,新生细微孔隙和小孔隙逐渐变大,相对有害的小中孔隙发生劣化,中大孔隙扩展成裂缝,从而导致混凝土内部结构损伤、强度下降。从表 3 可以看出,试件中无害孔占比随着干湿循环次数的增加先小幅上升后有所下降,有害孔占比先下降后上升,这是因为早期混凝土中水化产物和侵蚀产物填充了试件中较大孔隙,但是随着侵蚀产物的增加孔隙逐渐扩大,低害孔、有害孔和危害孔的占比逐渐升高,累积孔隙体积越大,强度损失越严重。硫酸盐侵蚀试验开始前,3 组试件无害孔占比分别为 51.16%、55.19%和 58.64%,低害孔占比分别为 33.27%、

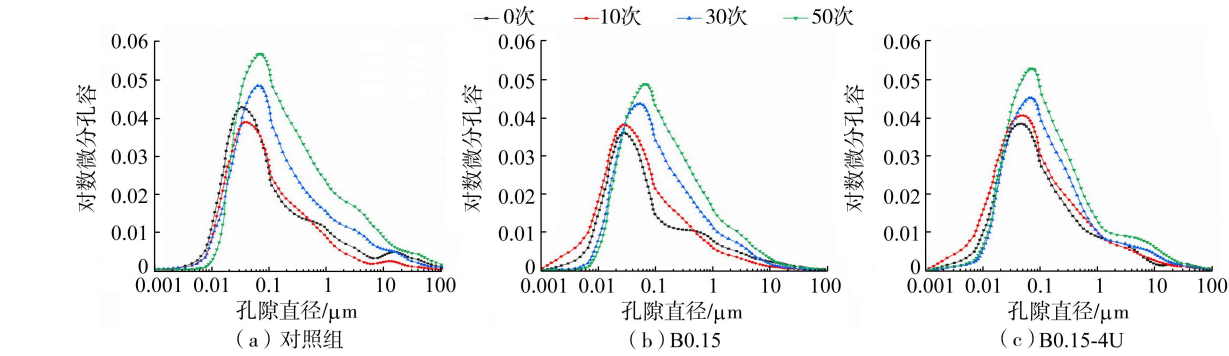


图 4 试件孔径分布随干湿循环次数的动态变化

表 3 硫酸盐干湿循环下不同试件孔隙占比					
试件编号	干湿循环次数	孔隙占比/%			
		无害孔	低害孔	有害孔	危害孔
对照组	0	51.16	33.27	10.65	4.92
	10	51.48	34.58	9.86	4.08
	30	46.67	36.34	11.56	5.43
	50	41.16	37.35	13.66	7.83
B0.15	0	55.19	32.23	8.82	3.76
	10	55.14	33.18	8.17	3.51
	30	51.20	33.72	10.35	4.73
	50	48.09	34.36	11.08	6.47
B0.15-4U	0	58.64	31.02	7.33	3.01
	10	58.78	31.38	6.91	2.93
	30	54.23	32.98	8.82	3.97
	50	53.09	33.17	9.53	4.21

32.23%和 31.02%，有害孔占比分别为 10.65%、8.82%和 7.33%，危害孔占比分别为 4.92%、3.76%和 3.01%；以 0 次干湿循环时的孔隙数据为基础，经历 50 次干湿循环后，试件的无害孔占比分别降低了 10.00、7.10、5.55 个百分点，低害孔占比分别上升了 4.08、2.13、2.15 个百分点，有害孔占比分别上升了 3.01、2.26、2.20 个百分点，危害孔占比分别上升了 2.91、2.71、1.20 个百分点。

结合图 3 和表 3 可以看出，混凝土试件的质量损失率与有害孔占比符合正相关关系，且都呈现先下降后上升的规律，这是因为早期混凝土中水化产物和侵蚀产物填充了试件中较大的孔隙，混凝土质量损失率减小，但随着侵蚀产物的增加，孔隙逐渐扩大，低害孔、有害孔和危害孔的占比逐渐上升，累积孔隙体积增大，砂浆达到破坏强度开始脱落，导致混凝土质量损失率增大。

宏观试验与孔隙分析表明，纤维和膨胀剂的加入能够提高无害孔占比，减少有害孔和危害孔占比，优化混凝土内部孔隙结构，从而提高混凝土耐硫酸盐侵蚀性能，且适量纤维和膨胀剂的共同添加对早期混凝土孔结构细化更具优势，能降低劣化速率。如图 5 所示，复掺混凝土内部存在的纤维在试件浇筑后起到了加固效果，抑制裂纹产生发展的同时也对裂缝起到了封堵作用，显著降低了混凝土内部孔

隙的连通性，增加了渗透路径的弯曲度；同时，膨胀剂早期具有自身微膨胀效应，加入膨胀剂可显著提高 60 min 后水泥浆体结构的堆积速率^[22]，在试件早期养护阶段细化了混凝土的孔隙，从而阻碍了硫酸根离子的扩散，降低了侵蚀作用。因此，复掺纤维和膨胀剂试件的抗渗性和耐侵蚀性明显提高。

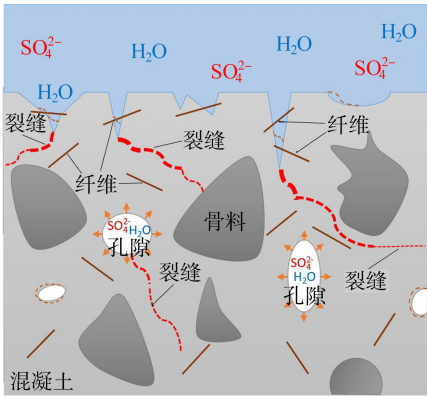


图 5 纤维-膨胀剂协同机制

2.4 微观结构分析

采用 SEM 对选取试件（对照组、B0.15 和 B0.15-4U）近表层 5 mm 横截面碎片进行微观检测，分别获取试件在硫酸盐侵蚀试验前后的照片，如图 6 所示。

从图 6(a)(c)(e)所呈现的未经历硫酸盐侵蚀的混凝土试件原生微观形态可知，对照组试件内部微观结构较为疏松且存在较多孔隙和细微裂缝，B0.15 组和 B0.15-4U 组试件中纤维在基体中随机取向，形成了大量微增强肋。B0.15-4U 组中纤维和膨胀剂在混凝土基体中均匀分布，形成了均匀复合体系，纤维表面附着的混凝土基体水化产物表明纤维与基体具有良好的黏结作用，使纤维在破坏过程中承担剪切应力，从而提高了材料初期的整体强度。

由图 6(b)(d)(f)可知，经历 50 次硫酸盐干湿循环后，对照组试件内部出现了大量针状和短棒状的微观特征，由于混凝土中的孔隙水逐渐蒸发，硫酸根离子侵入与基体反应，从而形成了石膏、C-S-H 凝胶和钙矾石共存的水化腐蚀产物体系^[23]，干湿循环

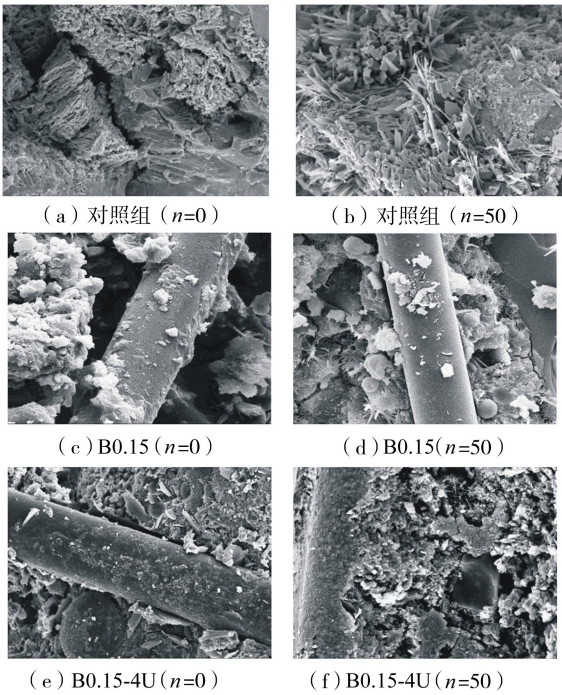


图 6 试件干湿循环前后 SEM 图像

次数越多,腐蚀产物不断增多,侵蚀产物堆积使得原生裂缝扩展、新裂缝生成,致使混凝土受损劣化。B0.15 和 B0.15-4U 组试件中的侵蚀产物明显减少,这是因为试件在受侵蚀过程中应力分散到纤维单丝上,从而有效提高了混凝土的抗压强度和韧性。同时,纤维的存在切断了微裂缝扩展通路以及裂缝间的连接,进一步抑制了裂缝的产生和发展。值得一提的是,无论是侵蚀前还是侵蚀后,B0.15 组试件中纤维与基体的结合都不如 B0.15-4U 组试件紧密,这可能是由于膨胀剂在基体中起到了“黏结剂”的作用,使纤维与基体间孔隙减少,从而减少了硫酸盐侵蚀通道。

为了更直观地解释上述协同效应,拍摄了 5000 倍的纤维和掺膨胀剂混凝土基体的 SEM 图像,如图 7 所示。从图 7 可以看出,膨胀剂使纤维-基体接合面的间隙更小,界面过渡更平滑。膨胀剂自膨胀时会对纤维产生压缩力,缩小了界面过渡区的间隙,并在纤维周围提供一定的应力,从而优化界面结合,添加适量的膨胀剂可以改善纤维的黏结性。协同效应的产生是由于纤维可以将膨胀和自膨胀转

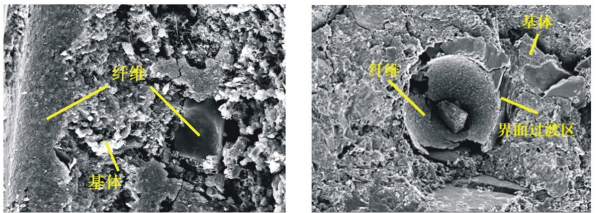


图 7 纤维与掺膨胀剂混凝土结合效果的 SEM 图像

化为被动约束,在此期间膨胀剂的有效性得到增强,而膨胀剂通过触发主动约束来提供自膨胀,同时纤维的增益效果也得到提升。

3 结 论

a. 复掺 0.15% 掺量的玄武岩纤维和 4% 掺量的 U 型膨胀剂的混凝土抗侵蚀整体性能最优,50 次干湿循环后试件外观保持完整,无浆体脱落,仅有部分棱角出现少量缺损,且其质量损失率仅为 6.12%,较对照组降低了 35.8%。

b. 复掺玄武岩纤维和 U 型膨胀剂的混凝土早期孔隙结构最佳,50 次干湿循环后试件无害孔占比达 58.64%,无害孔占比仅降低 5.55 个百分点,低害孔、有害孔和危害孔的增幅均小于对照组。孔结构细化和孔隙连通性降低是混凝土抗渗性和耐硫酸盐侵蚀性能提升的重要原因。

c. 适量添加自膨胀材料(如 U 型膨胀剂)能够使纤维-基体的界面过渡区间隙减小,改善纤维与基体之间的黏结性。同时,纤维和膨胀剂通过协同作用,发挥互补效应,提升 U 型膨胀剂的有效性和纤维抗裂效果,从根本上抑制混凝土劣化发展。

参考文献:

[1] 王少伟,徐应莉,朱平华,等. 溶蚀作用下混凝土层面劈裂抗拉强度试验研究[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):27-32. (Wang Shaowei, Xu Yingli, Zhu Pinghua, et al. Experimental study on splitting tensile strength of concrete layer interface under dissolution effects [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022,42(1):27-32. (in Chinese))

[2] 霍文龙,王泉华. GFRP 后锚固混凝土板抗爆性能及损伤评估研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(2):88-97. (Huo Wenlong, Wang Xiaohua. Research on blast resistance performance and damage assessment of GFRP post anchored concrete slabs [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(2):88-97. (in Chinese))

[3] 吴佳雯,王少伟,刘毅,等. 冻融溶蚀耦合作用下混凝土劣化机理及预测模型[J]. 水利水电科技进展,2025,45(6):53-60. (Wu Jiawen, Wang Shaowei, Liu Yi, et al. Mechanism and prediction model of concrete deterioration under coupled freeze-thaw and leaching action [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025,45(6):53-60. (in Chinese))

[4] 高猛,姚占全,王海龙. 混合砂混凝土加速盐侵蚀作用的孔隙结构分析[J]. 排灌机械工程学报,2025,43(1):53-59. (Gao Meng, Yao Zhanquan, Wang Hailong. Study on pore structure of mixed sand concrete to

- accelerate salt erosion [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2025, 43(1): 53-59. (in Chinese))
- [5] Bensted J. Mechanism of thaumasite sulphate attack in cements, mortars and concretes [J]. ZKG International, 2000, 53(12): 704-709.
- [6] 张秋英, 李兆, 王健祺, 等. 南水北调东线湖泊硫酸盐污染现状与成因分析: 以东平湖为例 [J]. 环境科学学报, 2023, 43(7): 48-55. (Zhang Qiying, Li Zhao, Wang Jianqi, et al. Sulfate pollution and cause analysis in a lake along the South-North Water Transfer Project East Line: a case study of Dongping Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(7): 48-55. (in Chinese))
- [7] 王英浩, 景晓红. 某矿副井混凝土井壁服役环境分析 [J]. 内蒙古科技大学学报, 2016, 35(1): 8-10. (Wang Yinghao, Jing Xiaohong. Analysis on concrete lining service environment of the auxiliary shaft [J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2016, 35(1): 8-10. (in Chinese))
- [8] 甘磊, 吴健, 沈振中, 等. 硫酸盐和干湿循环作用下玄武岩纤维混凝土劣化规律 [J]. 土木工程学报, 2021, 54(11): 37-46. (Gan Lei, Wu Jian, Shen Zhenzhong, et al. Deterioration law of basalt fiber reinforced concrete under sulfate attack and dry-wet cycle [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(11): 37-46. (in Chinese))
- [9] 陈红莉. 干湿循环下混凝土受硫酸盐腐蚀断裂性能试验研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- [10] Cai Xiaopei, Zhang Yanrong, Gao Liang, et al. Deterioration of cement asphalt pastes with polymer latexes and expansive agent under sulfate attack and wetting-drying cycles [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 109: 104252.
- [11] Xu Ganggang, Wang Xiaodong, Wang Hai. Experimental study on sulfate attack resistance of cement slurry with UEA expansive agent [J]. E3S Web of Conferences, 2019, 136: 03012.
- [12] 郑君, 张信龙, 郭瑞晋, 等. 高温后冻融玄武岩纤维再生混凝土力学性能 [J]. 混凝土, 2025(3): 46-50. (Zheng Jun, Zhang Xinlong, Guo Ruijin, et al. Mechanical behaviour of freeze-thaw basalt fiber reinforced recycled aggregate concrete after high temperature [J]. Concrete, 2025(3): 46-50. (in Chinese))
- [13] 李艺, 张爽. 干湿循环作用下混杂纤维混凝土抗硫酸盐侵蚀性能 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2016, 37(6): 895-898. (Li Yi, Zhang Shuang. Resistance to sulfate attack of hybrid fiber concrete under dry-wet cycles [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(6): 895-898. (in Chinese))
- [14] 崔宏瑞, 孟祥瑞, 程详, 等. 水玻璃-膨胀剂-粉煤灰水泥基复合注浆材料研发与试验 [J]. 中国矿业, 2025, 34(8): 169-177. (Cui Hongrui, Meng Xiangrui, Cheng Xiang, et al. Research and test of sodium silicate-expansion agent-fly ash cement-based composite grouting material [J]. China Mining Magazine, 2025, 34(8): 169-177. (in Chinese))
- [15] 马建宏, 王琪, 焦华喆, 等. 纤维聚合物柔韧混凝土微观孔隙结构特征与增强机理 [J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(6): 1157-1170. (Ma Jianhong, Wang Qi, Jiao Huazhe, et al. Microscopic pore structure characteristics and strengthening mechanism of fiber polymer flexible concrete [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(6): 1157-1170. (in Chinese))
- [16] 徐惠. 硫酸盐腐蚀下混凝土损伤行为研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- [17] Zhao Nan, Wang Sheliang, Quan Xiaoyi, et al. Behavior of fiber reinforced cementitious composites under the coupled attack of sulfate and dry/wet in a tidal environment [J]. Construction and Building Materials, 2022, 314: 125673.
- [18] Liang Ninghui, Mao Jinwang, Yan Ru, et al. Corrosion resistance of multiscale polypropylene fiber-reinforced concrete under sulfate attack [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e01065.
- [19] Kumar R, Bhattacharjee B. Assessment of permeation quality of concrete through mercury intrusion porosimetry [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(2): 321-328.
- [20] 吴中伟. 混凝土科学技术近期发展方向的探讨 [J]. 硅酸盐学报, 1979, 7(3): 262-270. (Wu Zhongwei. An approach to the recent trends of concrete science and technology [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1979, 7(3): 262-270. (in Chinese))
- [21] American Society for Testing Materials. Standard test method for microscopical determination of parameters of the air-void system in hardened concrete; ASTM C457M—24[S]. West Conshohocken: ASTM, 2024.
- [22] Jia Zijian, Zhang Zedi, Jia Lutao, et al. Effect of different expansive agents on the early age structural build-up process of cement paste [J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 144: 105282.
- [23] Sarkar N, Chaudhuri B B. An efficient differential box-counting approach to compute fractal dimension of image [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1994, 24(1): 115-120.

(收稿日期: 2025-07-15 编辑: 俞云利)