[文章编号] 1003－4684(2025)05-0086-07

钢-聚丙烯混杂纤维混凝土耐硫酸盐侵蚀性能研究

夏冬桃[1]，Itry Samira[1]，吴 晨[1]，李欣怡[2]

(1 湖北工业大学土木建筑与环境学院，湖北 武汉 430068；
2 湖北交投京港澳高速公路改扩建项目管理有限公司，湖北 武汉 430104)

[摘 要] 为探究钢-聚丙烯混杂纤维混凝土耐硫酸盐侵蚀性能，试验制备了 5 组纤维混凝土试件，通过改变纤维掺量和纤维掺入方式，分析了试件在 5% Na_2SO_4 溶液中分别浸泡 30 d、90 d、150 d、210 d、270 d 后强度及相关物理指标的变化规律。结果表明：随着侵蚀龄期增加，试件质量、相对动弹性模量、抗压强度、抗折强度呈现先增后减趋势，并在 210 d 时达到最大，210 d 后未掺入纤维的试件性能下降最快；混杂纤维混凝土的抗压强度和抗折强度损失率(即侵蚀 270 d 与 210 d 后的强度下降率)较钢纤维混凝土分别下降了 62.77%和 56.69%，其各项性能指标最优，损伤程度最小。最后，运用多项式回归分析法建立了质量损失率和相对动弹性模量的计算方程，提出了双指标侵蚀损伤模型，回归模型相关系数均大于 0.95，可为纤维混凝土在硫酸盐环境中的寿命预测和工程设计提供参考。

[关键词] 混杂纤维混凝土；硫酸盐侵蚀；力学性能；寿命预测

[中图分类号] TU528 [文献标识码] A

硫酸根离子对混凝土的侵蚀是严重威胁水工及地下混凝土结构安全和耐久性的重要因素之一[1]。国内外对混凝土材料和结构的抗硫酸盐性能改善进行了大量研究，提出了多种改善方法[2-6]。其中，在混凝土中掺加适量纤维可在一定程度上改善其抗硫酸盐侵蚀性能，提高混凝土材料和结构的寿命。例如，甘磊等[7]通过物理力学性能试验和微细观测发现玄武岩纤维对干湿循环和硫酸盐侵蚀条件下混凝土抗压及劈拉强度的改善效果显著。张广泰等[8]对聚丙烯纤维混凝土柱进行了偏心受压静力试验，结果表明，聚丙烯纤维的加入可有效抑制硫酸盐侵蚀给混凝土带来的负面影响，并建立了荷载和硫酸盐共同作用下聚丙烯纤维混凝土柱的承载力计算方程。Meng 等[9]通过测试高性能合成纤维混凝土(HPSFRC)在硫酸盐和干湿循环条件下的残余抗拉强度和抗压强度，发现 1.3%体积掺量聚丙烯腈纤维混凝土的性能在该条件下的表现最佳。同时，一些学者对混杂纤维混凝土(hybrid fiber reinforced concrete，HFRC)的耐久性能进行了研究[10-13]，结果表明混杂纤维可在不同尺度、不同层次增强混凝土的性能，形成混杂效应，共同约束微裂纹形成和扩展，进而显著改善混凝土的抗盐碱酸等性能。其中，于剑桥等[14]针对我国西部察尔汗盐湖特点，模拟盐雾腐蚀环境，对玄武岩-钢混杂纤维混凝土的耐久性能进行研究，结果表明，钢纤维掺量为 2%、玄武岩掺量为 0.1%的混凝土侵蚀损伤劣化程度最弱，基于相对动弹性模量，建立了可预测纤维混凝土剩余寿命的 Wiener 退化模型，聚丙烯纤维与玄武岩纤维的二元混杂也可以明显改善混凝土的抗硫酸盐侵蚀能力[15]。谈亚文等[16]通过干湿循环和硫酸盐长期浸泡试验，发现与普通混凝土相比，聚乙烯纤维和聚丙烯粗合成纤维掺量为 0.8%～1.2%的混凝土具有优异的混杂增韧效果及抗硫酸盐侵蚀性能。

不少学者对纤维混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的研究取得一定进展，但当前研究大多数停留在单一纤维对其抗硫酸盐性能的改善，混杂纤维尤其是钢-聚丙烯混杂纤维对其侵蚀性能的影响鲜有报道，混杂纤维对混凝土抗硫酸盐侵蚀性能改善效果及损伤状态预测仍需进一步探索。鉴于此，本文开展钢-聚丙烯混杂纤维混凝土抗硫酸盐侵蚀性能研究，重点分析不同硫酸盐侵蚀龄期下混杂纤维混凝土物理力学性能的变化规律，最后提出相应的寿命预测模型，为钢-聚丙烯混杂纤维混凝土在硫酸盐侵蚀环境下的服役状态及相关规范的完善提供参考。

[收稿日期] 2023－12－04
[基金项目] 国家自然科学基金(51108164)
[第一作者] 夏冬桃(1975－)，女，湖北蕲春人，湖北工业大学教授，研究方向为混凝土结构与材料。
[通信作者] 吴 晨(2001－)，男，河南周口人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为混凝土结构与材料。

1　试验

1.1　原材料及配合比设计

试验采用湖北华新水泥厂生产的 P.O 42.5 级普通硅酸盐水泥；选用粒径为 5～25 mm 连续级配碎石作为粗骨料；细骨料为湖北鄂州优质河砂，其细度模数为 2.6 且含泥量小于 2%；钢纤维采用新途工程纤维有限公司制造的超短微丝钢纤维，聚丙烯纤维(Polypropylene fiber ，PP fiber)为美国“杜拉”牌纤维，纤维相关性能列于表 1；高炉矿渣粉是由武汉微神科技发展有限公司提供的 S95 磨细矿渣粉；减水剂为聚羧酸高性能液体减水剂(减水率 20%)；试验用水为自来水。

表 1　纤维基本特征参数

纤维	长度/mm	直径/mm	抗张强度/MPa	长宽比
钢纤维	13	0.2	2000	65
聚丙烯	12	0.03	276	400

考虑纤维体积掺量、纤维掺入方式两个因素，设计 5 组纤维混凝土试件(含对照组)，试件设计配合比见表 2。

表 2　纤维混凝土配合比

标本	水/(kg·m^{-3})	水泥/(kg·m^{-3})	沙子/(kg·m^{-3})	石材/(kg·m^{-3})	渣粉/(kg·m^{-3})	减水剂 /(kg·m^{-3})	钢纤维/%	聚丙烯/%
PC	152	380	758	1 073	20	5.2	0	0
0.8 SFRC	152	380	758	1 073	20	5.2	0.8	0
1.0 SFRC	152	380	758	1 073	20	5.2	1.0	0
PFRC	152	380	758	1 073	20	5.2	0	0.11
HFRC	152	380	758	1 073	20	5.2	1.0	0.11

PC、SFRC、PFRC 和 HFRC 分别代表素混凝土、钢纤维混凝土、聚丙烯纤维混凝土和钢聚丙烯混杂纤维混凝土，而 SFRC 前的数字代表钢纤维的体积掺量。

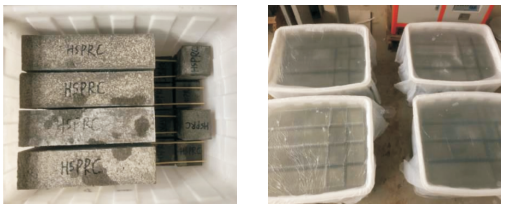
1.2　试件制作及养护

试件的浇筑与成型参照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T50080－2016)[17]，具体步骤为：1)浇筑：首先依次将粗骨料、细骨料、水泥、高炉矿渣粉加入搅拌机；先干拌 3 min，再将钢纤维和聚丙烯纤维均匀分散并加入搅拌机内干拌 3 min；随后倒入 90%的水湿拌 3 min；最后将剩余的水及减水剂搅拌均匀后加入搅拌机内湿拌 3 min。2)成型：将搅拌完毕后的混凝土拌合物立即填入模具，并用振动台将其振捣成型。

1.3　试验方法

1)硫酸盐浸泡试验：依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082－2009)[18]开展硫酸盐侵蚀试验，将养护好的试件自然风干 24 h 后放入水箱中，再将水箱内注入 5%的浓度硫酸钠溶液至漫过试件上表面。为保证试件处于全浸泡状态，如图 1a，每两相邻试块之间预留 20 mm 左右的间距，试件与浸泡箱壁留有孔隙，且相邻两层试件之间用木条隔开。试验期间每 30 d 更换一次溶液，且对浸泡箱进行密封处理，如图 1b。待各个龄期浸泡完毕后，取出试件将其擦拭干净，晾晒 24 h 后，进行性能试验。

2)相对动弹性模量：根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082－2009)[18]，使用 DT-20 型混凝土动弹性模量测定仪对 100 mm×100 mm×400 mm 的棱柱体试件进行测试，并根据式(1)计算试件的相对动弹性模量：



(a)浸泡箱内试件放置　　(b)塑料薄膜密封浸泡箱

图 1　硫酸盐溶液浸泡试验方法

$$E_r = \frac{E_n}{E_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中：E_0为试件未经硫酸盐浸泡时的初始动弹性模量；E_n为试件经 n 天硫酸盐浸泡后的动弹性模量。

3)力学强度性能试验：参照《纤维混凝土试验方法标准》(CECE13:2009)[19]与《普通混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081－2019)[20]中的规定，进行立方体抗压和抗折强度试验。

2　结果与讨论

2.1　表观形貌

图 2 为 5 组试件在各侵蚀龄期下的表观形貌。与未在硫酸盐溶液中浸泡的试件相比，浸泡 30 d 后的试件表面出现少量白色盐结晶，这是由于在自然条件下，随着试件内部水分的快速蒸发，孔隙溶液达到了超饱和状态，硫酸钠结晶析出，即盐析现象[21]。侵蚀龄期为 90 d 的试件表面可见有微小孔洞生成，且变得粗糙，但试件未出现明显的胶凝材料流失及剥落现象，试件在硫酸盐侵蚀前期可保持较好的完整性，在硫酸盐侵蚀前期，硫酸根离子渗透到混凝土

内部，与水化产物的反应生成物填充了基体内的微裂缝和微孔洞，混凝土密实度暂时增强，而混凝土表层会存在一定程度的砂化现象[7]，这与文献[22]的研究结果相一致。在经历 150 d 侵蚀下的纤维混凝土试件均未出现明显损伤，但此时 PC 试件四周有轻微的胶凝材料剥落。随着侵蚀龄期的增加，在 210 d 时，PC 试件出现明显掉角现象，这是因为硫酸盐侵蚀后期，钙矾石等膨胀结晶产物的大量生成促进了裂缝的发展，0.8 SFRC 表面出现局部孔洞，1.0 SFRC 的剥蚀程度较轻，HFRC 较 PC、0.8 SFRC、1.0 SFRC、PFRC 损伤程度最小，仅在试件表面发现些许白色盐结晶。在 270 d 时，PC 试件四周胶凝材料出现大量剥落，部分骨料外露，相比纤维混凝土试件其损伤最为严重，PFRC 和 0.8 SFRC 均出现棱角处胶凝材料剥落现象，试件边缘可见些许纤维外露，而 1.0 SFRC 和 HFRC 均保持较好的完整性，钢纤维掺入在混凝土基体内部形成了致密的三维网络，遏制了裂缝在多个方向上的发展，聚丙烯纤维在混凝土基体内部断裂时吸收能量，并通过自身的延长限制了微裂缝的发展[27]。

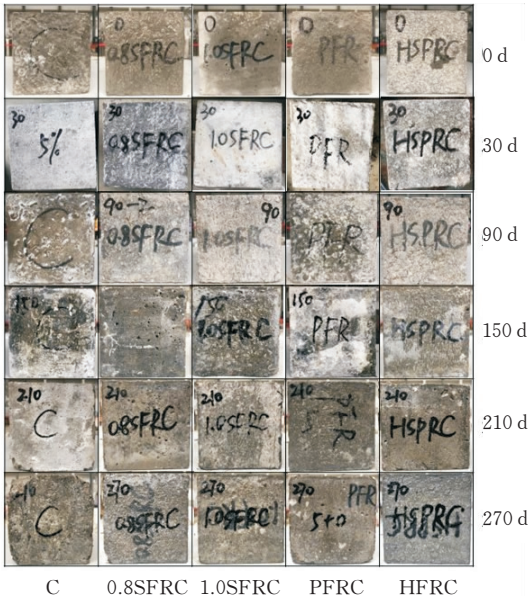


图 2 不同侵蚀龄期下纤维混凝土表观形貌

2.2 质量损失率

结合《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082－2009)[18]及相关研究[23-25]，质量损失率可作为评价纤维混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的物理性能指标之一，定义 L_m 为质量损失率，计算公式为：

$$L_m = \frac{M_0 - M_n}{M_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中：M_0 为试件未经硫酸盐侵蚀的初始质量；M_n 为经 n 天硫酸盐浸泡后的试件质量。

硫酸盐侵蚀下纤维混凝土质量损失率变化如图 3 所示，由图可见，5 组试件在浸泡 0～210 d 内，质量损失率下降，质量增加，这是因为硫酸根离子进入纤维混凝土基体内部与水泥水化产物反应生成了一些难溶于水的物质，如钙矾石、二水石膏等[5]，而且硫酸钠固体溶于水会形成十水硫酸钠结晶，这些产物填充了纤维混凝土试件内部的若干孔隙，试件质量增加。在 210～270 d 侵蚀龄期内，试件的质量损失率均出现不同幅度的增加，分析可知，随着侵蚀反应的进行，基体内部孔隙被侵蚀产物填满，当骨料与水泥砂浆的粘结力小于侵蚀产物所产生的膨胀应力时，试件内部裂缝开展，表面胶凝材料剥落，试件质量下降。

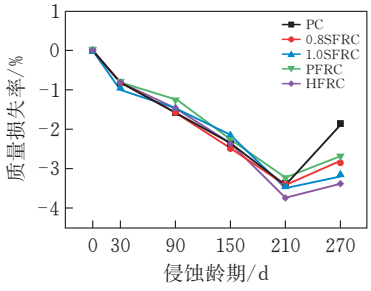


图 3 质量损失率与侵蚀龄期的关系

在 210 d 时，各组试件均达到质量损失率的最小值，此时的纤维混凝土基体内部的抗拉强度小于侵蚀反应带来的膨胀应力，表面砂浆开始脱落，试件质量下降，其中 PC 的质量损失最为急剧，纤维混凝土试件的质量变化较为缓和。在浸泡 270 d 时，PC、0.8 SFRC、1.0 SFRC 和 HFRC 的质量损失率分别为－1.886%，－2.803%，－3.202%、－2.685% 和－3.382%，可见 PC 的质量损失率最大，纤维的掺入可有效减轻试件表面砂浆剥落等现象；对于不同掺量的钢纤维混凝土而言，1.0 SFRC 的质量损失率较 0.8 SFRC 减小了 14.23%，说明 1.0% 体积掺量的钢纤维混凝土的阻裂效果优于 0.8% 掺量；若仅考虑纤维掺入方式，HFRC 的质量损失率较 1.0 SFRC 低 25.96%，由此可见，在硫酸盐长期浸泡环境下，钢-聚丙烯混杂纤维混凝土在延缓裂缝发展、限制材料剥落方面优于单掺钢纤维混凝土。

2.3 相对动弹性模量

纤维混凝土在硫酸盐浸泡下的相对动弹性模量变化曲线如图 4 所示。

由图 4 可知，在 0～30 d 时，各组试件相对动弹模陡增，此时 PFRC 的相对动弹模较 PC 的小，出现此现象的原因是：聚丙烯纤维具有憎水性且表面光滑，在试件基体内部，携带有硫酸根离子的水难以在聚丙烯纤维附近的孔道聚集并与水泥水化产物发生反应，结晶产物较少，而且聚丙烯纤维易结团，导致

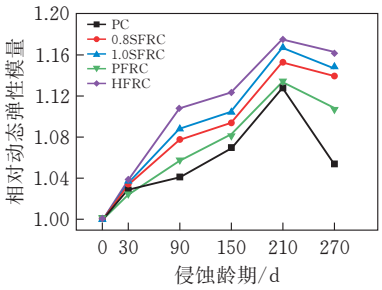


图 4　相对动弹性模量与侵蚀龄期的关系

试件内部出现较多的初始孔洞[26]。随着侵蚀反应的进行，钙矾石等结晶产物的不断生成，使试件内部变得更加密实，所以在浸泡 0～210 d 这段时间内，5 组试件的相对动弹模不断上升并在 210 d 时达到峰值，其中，掺入纤维组别的相对动弹性模量的峰值和上升幅度较素混凝土的大，这是由于纤维的掺入了填充混凝土内部空隙，有助于形成更为密实的基体。此后，在膨胀应力的作用下，试件基体内骨料与砂浆粘结力逐渐减小，内部裂缝不断发展，从而导致 210～270 d 这段时间内各组相对动弹模的下降，这时 PC 的降幅最大，而其他四组试件的降幅较小，这得益于纤维的阻裂作用。浸泡 270 d 时，PC 的相对动弹模最小，表明此时 PC 内部损伤较为严重，而纤维的掺入可以改善硫酸盐侵蚀作用下基体密实度；1.0 SFRC 的相对动弹模较 0.8 SFRC 提升了 8%，说明 1.0 SFRC 较 0.8 SFRC 在改善混凝土内部损伤及孔隙结构方面更占优势；与 1.0 SFRC 相比，HFRC 的相对动弹模有所提升，提高了 13.2%，分析可知，将钢纤维与聚丙烯纤维二元混杂，可实现不同纤维间的优势互补，在延缓混凝土裂缝发展及改善内部孔隙结构等方面优于单一纤维。

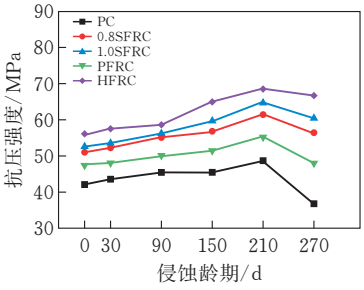
2.4　抗压强度

图 5a 为纤维混凝土在硫酸盐侵蚀条件下抗压强度的变化规律。从图 5a 可以看出，在 0～210 d 时，抗压强度增大，并在浸泡 210 d 时达到抗压强度峰值。在 210～270 d 时，膨胀应力大于试件内部材料的胶结力，裂缝发展，致使胶凝材料与骨料分离，抗压强度下降。

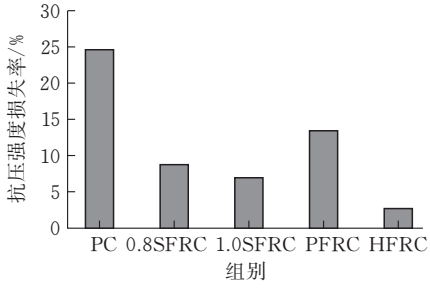
$$L_c = \frac{C_{210d} - C_{270d}}{C_{210d}} \times 100\% \tag{3}$$

式中：L_c 为试件在硫酸盐侵蚀 210～270 d 下的抗压强度损失率；C_{210d} 为试件在硫酸盐侵蚀 210 d 时的抗压强度，C_{270d} 为试件在硫酸盐侵蚀 270 d 时的抗压强度。

试件在侵蚀龄期为 210～270 d 的抗压强度损失率如图 5b 所示，其计算方法如式(3)所示。由图可见，纤维混凝土试件的抗压强度损失率小于 PC，分析可知，纤维填充了混凝土内部孔隙，侵蚀通道减少，导致纤维混凝土的侵蚀损伤程度较低；对于不同掺量的钢纤维混凝土而言，1.0 SFRC 的抗压强度损失率较小，较 0.8 SFRC 减小了 21.15%，1.0 SFRC 的侵蚀损伤程度较小；HFRC 的抗压强度损失率较 1.0 SFRC 下降了 62.77%，可见钢-聚丙烯混杂纤维的抗硫酸盐侵蚀性能要优于钢纤维混凝土，这是因为在侵蚀反应过程中，低弹模、高延性的聚丙烯纤维通过自身桥接作用限制微裂缝的发展，能够吸收因膨胀应力而产生的能量，当宏观裂缝出现时，聚丙烯纤维退出工作，在混凝土中三维分布的钢纤维可延缓宏观裂缝的发展[27]，以防止试件的快速破坏，改善混凝土的耐久性。



(a)抗压强度与侵蚀龄期的关系



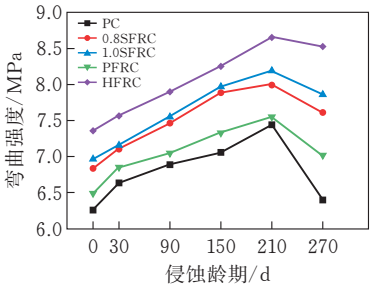
(b)侵蚀 210～270 d 时抗压强度损失率

图 5　纤维混凝土抗压强度变化规律及 210～270 d 时抗压强度损失率

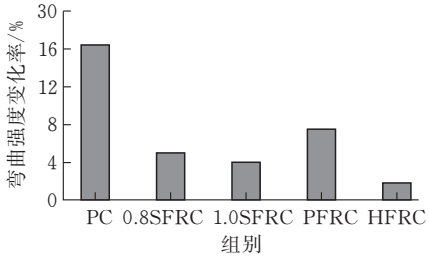
2.5　抗折强度

硫酸盐侵蚀下纤维混凝土抗折强度的变化曲线如图 6a 所示，不难发现，抗折强度的变化规律与抗压强度相似，膨胀产物是造成此规律的主要因素。在自然状态下，抗折强度的大小关系为 HFRC＞1.0 SFRC＞0.8 SFRC＞PFRC＞PC，可见，钢纤维或聚丙烯纤维的掺入可一定程度上可以改善混凝土的受弯韧性，而混杂纤维的改善效果最佳，这与文献[28]的研究结果一致。

在硫酸钠溶液中浸泡 210～270 d 时，各组韧性损失即抗折强度损失率曲线如图 6b 所示，其计算方法见式(4)，纤维混凝土试件的抗折强度损失率小于 PC，因为纤维的掺入可以有效遏制混凝土内部裂缝的发展，从而导致纤维混凝土试件在盐侵条件下抗折强度的损失较小；1.0 SFRC 的抗折强度损失率较 0.8 SFRC 降低了 18.47%，这是因为钢纤维的



(a)抗折强度与侵蚀龄期的关系



(b)侵蚀 210～270 d 时抗折强度损失率

图 6 纤维混凝土抗折强度变化规律及 210～270 d 时抗折强度损失率

体积掺量越高，基体内部会形成越致密的纤维网络，从多个方向延缓裂缝的发展，致使侵蚀破坏时裂缝的开展需要消耗更多的能量，抗折强度的损失会越小；HFRC 的抗折强度损失率较 PC、0.8 SFRC、1.0 SFRC、PFRC 分别减小了 89.39%、64.69%、56.69%、76.68%，与 1.0 SFRC、PFRC 相比，HFRC 的抗折强度下降趋势较为缓和，这表明混杂纤维混凝土受硫酸盐侵蚀损伤程度低于单一纤维混凝土。

$$L_f = \frac{F_{210d} - F_{270d}}{F_{210d}} \times 100\% \tag{4}$$

式中：L_f 为试件在硫酸盐侵蚀 210～270 d 下的抗折强度损失率；f_{210d} 为试件在硫酸盐侵蚀 210 d 时的抗折强度，f_{270d} 为试件在硫酸盐侵蚀 270 d 时的抗折强度。

3 寿命预测

混凝土的损伤破坏分为微观和宏观两个方面，宏观方面有质量的减小、动弹性模量和力学强度的降低等，而内部损伤的累积则属于微观方面[29]。纤维混凝土在硫酸盐侵蚀条件下，除自定义损伤因子外，作为使用无损检测技术测定的质量损失率和相对动弹性模量可长期有效地评价纤维混凝土损伤状态[30]，分析试验数据发现，质量损失率、相对动弹模与侵蚀龄期之间呈现出非线性的关系，一些学者在对混凝土的耐久性能进行研究时，发现采用多项式回归法可以较为准确地对其寿命进行预测[31,32]，本文采用三次多项式对纤维混凝土损伤状态评价参数(质量损失率、相对动弹模)进行拟合，将评价参数代入式(5)和(6)的三次多项式拟合方程进行回归分析。计算结果如表 3 所示，拟合曲线见图 7。

$$M_l = \theta_1 t + \theta_2 t^2 + \theta_3 t^3 + \mu \tag{5}$$

$$E_r = \zeta_1 t + \zeta_2 t^2 + \zeta_3 t^3 + \beta \tag{6}$$

式中，M_l 为质量损失率，%；E_r 为相对动弹性模量；t 为硫酸盐侵蚀时间，d；θ_1、θ_2、θ_3、ζ_1、ζ_2、ζ_3、μ、β 为回归参数。

表 3 三次项回归拟合模型参数

Group	PC	0.8 SFRC	1.0 SFRC	PFRC	HFRC
μ	−0.00189	−0.00151	−0.00229	−0.00188	−0.00179
θ_1	−6.52E-5	−1.21E-4	−1.12E-4	−5.80E-5	−7.75E-5
θ_2	−1.54E-6	−7.98E-7	−5.64E-7	−1.18E-6	−1.10E-6
θ_3	5.67E-9	3.24E-9	2.06E-9	3.87E-9	3.45E-9
R_M^2	0.88215	0.97812	0.94968	0.96688	0.9716
β	1.01134	1.00497	1.00419	1.0051	1.00122
ζ_1	−3.37E-4	6.99E-4	8.07E-4	2.44E-4	1.27E-3
ζ_2	1.04E-5	1.03E-6	1.04E-6	4.73E-6	−2.11E-6
ζ_3	−3.15E-8	−6.42E-9	−7.45E-9	−1.54E-8	−1.24E-9
R_E^2	0.96187	0.96274	0.96315	0.96632	0.97812

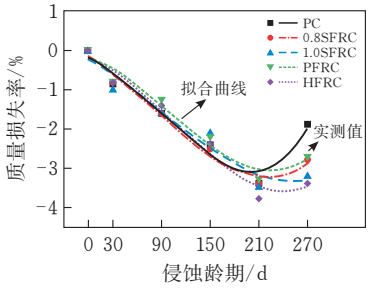
由表 3 可知，质量损失率和相对动弹性模量三次项回归模型相关系数 R_M^2 和 R_E^2 均在 0.95 以上，且图 7a 及图 7b 中实测值与预测值较为吻合，拟合效果良好。

质量损失率从宏观层面上对纤维混凝土破坏时的剥落程度进行评价，而相对动弹性模量则是对纤维混凝土的内部损伤程度进行评估，若将两种指标配合使用，可弱化单一指标对混凝土损伤状态评价的局限性，所得到的评价结果更为合理。在硫酸盐侵蚀条件下，参考《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》[18]，(GB/T50082－2009)，当混凝土质量损失率达到 5%时或者相对动弹模损失率超过 40%时，视为混凝土的耐久性失效，且依据相关研究[33-35]，建立的双指标损伤模型：

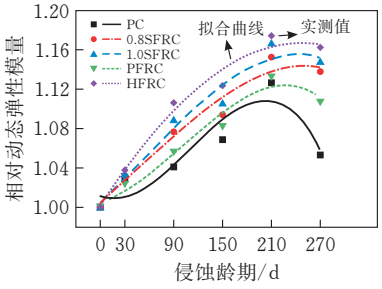
$$\Omega = 1 \pm \frac{0.05 - M_l}{0.05} \cdot \frac{E_r - 0.6}{0.6} \tag{7}$$

式中，Ω 为混凝土的损伤度，当 $\Omega=0$ 时，混凝土未发生损伤；当 $\Omega>0$ 时，混凝土开始损伤；当 $\Omega<0$ 时，混凝土未损伤且状态良好；混凝土试件的失效准则为 $\Omega>1$。当 $M_l>5\%$ 且 $E_r<60\%$ 时取“+”，其余情况取“−”。

将式(7)与式(5)、(6)相结合得硫酸盐侵蚀下的寿命预测模型，该模型采用的质量损失率和相对动弹性模量这两种评价参数均可以通过无损检测技术获得，此外，该模型具有全面、简便和精确等特点，可为类似工况下纤维混凝土寿命的预测提供参考。



(a)质量损失率



(b)相对动弹性模量

图 7　三次多项式回归拟合曲线

4　结论

1)在硫酸盐侵蚀条件下，试件的质量、相对动弹性模量、抗压强度、抗折强度随着侵蚀龄期呈现先上升后下降的趋势，且在 210 d 时达到各参数指标的峰值。

2)1.0 SFRC 耐侵蚀性能优于 0.8 SFRC。270 d 时，1.0 SFRC 较 0.8 SFRC 的相对动弹模提升 8%。

3)钢纤维和聚丙烯纤维混合掺入混凝土中对耐硫酸盐侵蚀性能的改善效果优于单掺钢纤维。210～270 d 时，HFRC 的抗压强度和抗折强度损失率较 1.0 SFRC 分别下降了 62.77%和 56.69%。

4)基于试验结果，通过三次多项式回归分析建立了质量损失率和相对动弹模的计算方程，预测精度在合理范围内，并结合双指标侵蚀损伤模型，引入一种损伤状态指标 Ω，可为硫酸盐侵蚀纤维混凝土的寿命及损伤状态预测提供参考。

[参　考　文　献]

[1] LIAO K X，ZHANG Y P，ZHANG W P，et al. Modeling constitutive relationship of sulfate-attacked concrete[J]. Construction and Building Materials，2020，260:119902.

[2] 胡文龙，刘赞群，裴敏.引气剂对硫铝酸盐水泥混凝土硫酸盐结晶破坏的影响[J].材料导报，2019，33(S1)：239-243.

[3] 郭进军，杨梦，陈红莉，等.干湿循环下改性混凝土硫酸盐腐蚀的断裂性能试验研究[J].水利学报，2018，49(04)：419-427.

[4] 郑毅，王爱国，刘开伟，等.不同地聚物砂浆抗硫酸盐侵蚀性能及其机理分析[J].建筑材料学报，2021，24(06)：1224-1233.

[5] ZHANG Z，WANG Q，CHEN H，et al. Influence of the initial moist curing time on the sulfate attack resistance of concretes with different binders[J]. Construction & Building Materials，2017，144(JUL.30)：541-551.

[6] 郝晓玉，王卓.粉煤灰对再生混凝土抗硫酸盐侵蚀及界面过渡区微观性能影响研究[J].混凝土，2021，12：94-96.

[7] 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.

[8] 张广泰，张路杨，陈勇，等.荷载−硫酸盐共同作用下纤维混凝土柱受压性能[J].湖南大学学报(自然科学版)，2022，49(01)：102-112.

[9] MENG C，LI W，CAI L，et al. Experimental research on durability of high-performance synthetic fibers reinforced concrete：Resistance to sulfate attack and freezing-thawing[J]. Construction and Building Materials，2020，262(14)：120055.

[10] 苏丽，牛荻涛，黄大观，等.海洋环境中玄武岩/聚丙烯纤维增强混凝土氯离子扩散性能[J].建筑材料学报，2022，25(01)：44-53.

[11] 张广泰，田虎学，李宝元，等.钢−聚丙烯混杂纤维混凝土的抗盐冻性能[J].材料导报，2018，32(14)：2396-2399.

[12] 龚飞. 耐碱短切玄武岩纤维混凝土的力学及耐久性试验研究[D].南京：东南大学，2018：53-59.

[13] 徐超. 纤维混杂效应对混凝土复合材料的力学及耐久性能的影响[J]. 功能材料，2021，52(1)：202-207.

[14] 于剑桥，乔宏霞，朱飞飞，等.西部盐雾腐蚀环境下基于Wiener模型的纤维混凝土损伤劣化研究[J].水资源与水工程学报，2021，32(04)：185-193.

[15] 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(06)：895-898.

[16] 谈亚文，杨哲，李丹，等.硫酸盐腐蚀对混杂纤维混凝土弯曲韧性的影响研究[J].硅酸盐通报，2017，36(08)：2756-2762.

[17] GB/T50080-2016,普通混凝土拌合物性能试验方法标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
[18] GB/T50082-2009,普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
[19] CECE13:2009,纤维混凝土结构技术规程[S].北京:中国计划出版社,2009.
[20] GB/T50081-2019,混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
[21] 严如.不同尺度聚丙烯纤维混凝土抗硫酸盐侵蚀试验研究[D].重庆:重庆大学,2021.
[22] 高润东,赵顺波,李庆斌,等.干湿循环作用下混凝土硫酸盐侵蚀劣化机理试验研究[J].土木工程学报,2010,43(02):48-54.
[23] 于本田,夏俊英,杨斌,等.川藏铁路石灰石粉-水泥基材料抗低温硫酸盐侵蚀研究[J].工程科学与技术,2022,54(04):1-11.
[24] 汤建华,贾飞,潘慧敏,等.矿物掺合料粒度分布对喷射混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响[J].混凝土,2022(06):61-66.
[25] 徐倩,周太全,华渊,等.玉磨铁路早龄期混凝土抗硫酸盐侵蚀试验研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(01):151-160.
[26] 胡杰,徐礼华,邓方茜,等.聚丙烯纤维增强水泥基复合材料界面过渡区的纳米力学性能[J].硅酸盐学报,2016,44(02):268-278.
[27] 池寅,尹从儒,徐礼华,等.钢-聚丙烯混杂纤维增强超高性能混凝土单轴循环受压力学性能[J].硅酸盐学报,2021,49(11):2331-2345.
[28] 孔祥清,高化东,刚建明,等.钢-聚丙烯混杂纤维再生混凝土弯曲韧性研究[J].硅酸盐通报,2018,37(09):2729-2736.
[29] 余寿文,冯西桥.损伤力学[M]. 北京:清华大学出版社,1997.78-80.
[30] MARDANI-AGHABAGLOU A, SEZER G I, RAMYAR K . Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point[J]. Construction & Building Materials, 2014, 70(15):17-25.
[31] 徐存东,李智睿,李欣达,等.盐冻循环下混凝土结构的寿命预测[J].混凝土,2021(11):29-32.
[32] 李智睿,徐存东,李振,等.冻融循环下玄武岩纤维混凝土的力学性能研究[J].石河子大学学报(自然科学版),2022,40(01):55-60.
[33] 慕儒.冻融循环与外部弯曲应力、盐溶液复合作用下混凝土的耐久性与寿命预测[D].南京:东南大学,2000.
[34] 商冉.钢纤维陶粒混凝土力学性能与耐久性研究[D].北京:中国地质大学(北京),2018.
[35] 乔宏霞,周茗如,朱彦鹏,等.盐渍土地区混凝土耐久性评价参数的设计和选取[J].工业建筑,2010,40(06):27-30.

Study on Sulfate Corrosion Resistance of Steel Polypropylene Hybrid Fiber Reinforced Concrete

XIA Dongtao[1], Itry Samira[1], WU Chen[1], LI Xinyi[2]

(1 *School of Civil Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*;
2 *Hubei Communications Investment Beijing-Hong Kong-Macao Expressway Reconstruction and Expansion Project Management Co., Ltd, Wuhan* 430104, *China*)

Abstract: To investigate the sulfate attack resistance of steel polypropylene hybrid fiber reinforced concrete, five groups of fiber reinforced concrete specimens were prepared, and the patterns of physical and strength indexes were analyzed when the specimens were immersed in 5% Na_2SO_4 solution for 30 d, 90 d, 150 d, 210 d and 270 d, respectively, by changing the amount of fibers and the way of fiber incorporation. The results showed that the mass, relative dynamic elastic modulus, compressive strength and flexural strength of the specimens all increased to the peak at 210 d and then decreased, and the fastest decrease in performance was observed after 210 d for the specimens without fiber concrete. The compressive and flexural strength loss rates (the rate of decrease in strength at 270 d of erosion compared to 210 d) for steel polypropylene hybrid fiber reinforced concrete were reduced by 62.77% and 56.69%, respectively, compared to steel fiber concrete. Steel polypropylene hybrid fiber reinforced concrete has the best performance indicators and the least amount of damage. Finally, the calculation equations of mass loss rate and relative dynamic elastic modulus are established by using polynomial regression analysis method. A double index erosion damage model is developed, the correlation coefficients of the regression models were all greater than 0.95, which can provide a reference for the life prediction and engineering design of fiber reinforced concrete in sulfate environment.

Keywords: Hybrid fiber reinforced concrete; Sulfate attack; Mechanical properties; Life prediction

[责任编校:裴 琴]