

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2022.06.038

# 腐蚀环境下外加剂对混凝土耐久性的影响

张爱丽, 郭颜凤, 孙红

(安阳职业技术学院 建筑工程系, 河南 安阳 455000)

**摘要:**为研究腐蚀环境下混凝土的抗压强度、抗折强度和抗侵蚀性能的演变规律。首先,以3%的 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 和 $\text{NaCl}$ 溶液模拟腐蚀环境,然后通过掺入不同含量的聚丙烯纤维分析混凝土在腐蚀环境下的性能变化。试验结果表明:①当聚丙烯纤维的掺量为0~3%时,混凝土的抗压强度和抗折强度逐渐增加,其最大抗压强度和抗折强度在 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 和 $\text{NaCl}$ 溶液中分别为50.2 MPa和48.3 MPa、6.2 MPa和5.8 MPa;而当聚丙烯纤维的掺量为3%~5%时,混凝土的抗压和抗折强度逐渐减小;②随着腐蚀时间的延长,聚丙烯纤维混凝土的抗压强度和抗折强度逐渐降低,在腐蚀14 d后,抗压强度和抗折强度在 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 和 $\text{NaCl}$ 溶液中分别为45.3 MPa和42.6 MPa、5.6 MPa和4.9 MPa;③距离表面30 mm处,不掺入纤维的混凝土的 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度为1.4%, $\text{Cl}^-$ 浓度1.6%;而掺入3%聚丙烯纤维的混凝土的 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度为1.1%, $\text{Cl}^-$ 浓度1.1%。

**关键词:**腐蚀环境;混凝土;聚丙烯纤维;力学性能;耐久性

**中图分类号:** U414 **文献标志码:** A

腐蚀环境下的混凝土耐久性关乎着结构的安全性和适用性,不少研究者通过模拟腐蚀环境来分析混凝土耐久性的影响因素<sup>[1-6]</sup>,于忠等<sup>[7]</sup>研究了混凝土在化工大气环境中的腐蚀机理和性能以及相应的影响因素;张云清等<sup>[8]</sup>采用快冻法研究了高强混凝土在水、5% $\text{MgSO}_4$ 溶液中的抗冻性能;梁咏宁等<sup>[9]</sup>测试了不同腐蚀环境中混凝土抗压、抗折强度随浸泡时间的变化规律。从上述研究成果可以看出:混凝土在不同腐蚀环境下其力学性能(抗压强度、抗折强度),耐久性能(抗冻性能、抗氯离子侵蚀性)均会出现明显的下降。

为了改善腐蚀环境下的混凝土性能,不少专家学者在混凝土中掺入外加材料来提高混凝土的耐腐蚀性<sup>[10-12]</sup>,郭进军等<sup>[13]</sup>得出在混凝土中掺入粉煤灰和聚丙烯纤维进行改性,能够显著提高混凝土的抗腐蚀性能;陈迅捷等<sup>[14]</sup>研究了在一般环境、氯化物环境、冻融氯化物环境中,杂散电流对普通钢筋混凝土和添加适量活性掺合料的耐腐蚀钢筋混凝土腐蚀程度的影响;牛建刚等<sup>[15]</sup>得出粉煤灰混凝土在抵抗二氧化硫腐蚀方面优于普通混凝土。可见,在混凝土中掺入外加材料能够达到力学性能和耐久性能提升的目的。

- \*\*\*\*\*
- [3] 吴正光,陆如洋,蔡冬艳,等. 新型胶粉复合改性沥青混合料及其抗永久变形性能研究[J]. 公路工程,2017,42(2):255-260.
- [4] 赵毅,梁乃兴. 全温域条件下沥青路面永久变形预估方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2018,50(11):122-130.
- [5] 何锐,黄鑫,佘江涛,等. SBS-胶粉-HDPE复合改性沥青制备工艺[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2018,39(2):242-248.
- [6] 张晓亮,陈华鑫,张奔,等. TOR改性废旧小轿车轮胎橡胶沥青混合料路用性能研究[J]. 硅酸盐通报,2018,37(7):2241-2247.
- [7] 翟晓静,张庆宇,曹胜语. ECA-10型沥青混合料动态性能研究[J]. 中外公路,2019,39(4):219-223.
- [8] 徐世法,朱照宏. 高等级道路沥青路面车辙的预估方法[J]. 土木工程学报,1993,26(6):28-36.
- [9] 赵毅,郭志敏,梁乃兴. 沥青混合料永久变形黏弹性力学模型通用性研究[J]. 公路工程,2018,43(2):192-196,200.
- [10] LI Q, NI F, GAO L, et al. Evaluating the Rutting Resistance of Asphalt Mixtures Using an Advanced Repeated Load Permanent Deformation Test under Field Conditions[J]. Construction & Building Materials, 2014, 61(30):241-251.
- [11] 赵毅,梁乃兴. 全温域条件下沥青路面永久变形预估方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2018,50(11):122-130.

收稿日期:2020-12-16

基金项目:河南省科技攻关计划(重点)项目(编号:132102310334)

作者简介:张爱丽,女,讲师. E-mail:zal1982@sohu.com

该文采用  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  和  $\text{NaCl}$  溶液分别模拟硫酸环境和氯离子环境,分析两种腐蚀环境对混凝土耐久性的影响程度。进一步通过在混凝土中掺入不同含量的聚丙烯纤维<sup>[16-17]</sup>来分析纤维掺量对混凝土力学性能(抗压和抗折强度)及耐久性(抗侵蚀性)的影响,得出最佳的纤维掺量,为高性能混凝土的设计提供经验。

## 1 材料与方法

### 1.1 原材料

(1) 水泥:P. O52. 5R 水泥,其性能见表 1。

表 1 水泥化学组成 %

$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{SO}_3$
21.6	4.92	2.97	63.4	1.95	1.83

(2) 矿渣。

(3) 砂:粒径 0~5 mm,表观密度约 2 634  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(4) 石:粒径 8~12 mm,表观密度约 2 410  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,压碎指标为 5%。

(5) K LW-02JBX 型聚丙烯纤维:长度约 11 mm,直径约 35  $\mu\text{m}$ ,抗拉强度为 520 MPa,密度为 0.89  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,弹性模量为 3.4 GPa,断裂伸长率为 10.2%。

(6) 水:蒸馏水。

根据上述 6 种基本材料,对混凝土进行配制,其配合比如表 2 所示。试验中,需配置出 6 组不同配合比的混凝土试块,每组制备 5 份,共计 30 份混凝土试块。

表 2 混凝土配合比

原材料/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$					聚丙烯纤维/%
水泥	砂	石	水	矿渣	维/%
250	317.5	620	90	60	0~5

### 1.2 试验方法

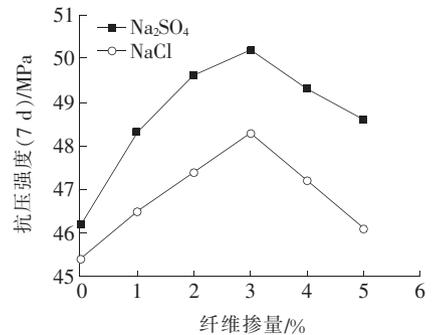
试件制备过程采用干拌法,即先将聚丙烯纤维、砂、石进行搅拌均匀,再将水泥一起搅拌均匀,最后加入水搅拌成型。根据 GB 50164—2011《混凝土质量控制标准》制备 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体混凝土,并对混凝土试件进行标准养护:温度 20  $^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度在 95%以上。为仿真腐蚀环境,将制备成型的混凝土分别放入 3%的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  和  $\text{NaCl}$  溶液中。进一步研究混凝土在腐蚀环境下的抗压强度、抗折强度及抗侵蚀性的变化规律,在混凝土中分别掺入 1%、2%、3%、4%和 5%的聚丙烯纤维,分析混凝土性能变

化规律。其中,混凝土的抗压强度和抗折强度由万能试验机测试,混凝土的抗侵蚀性能由 ZT-CTH-225FS 仪器测试。

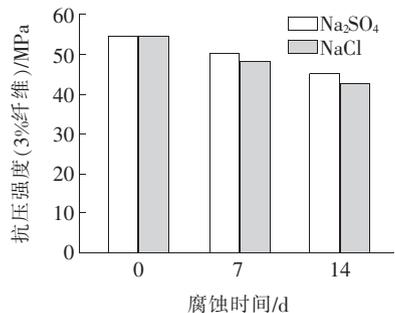
## 2 结果与讨论

### 2.1 抗压强度变化规律

在混凝土中掺入不同含量的聚丙烯纤维,得到混凝土的抗压强度演变关系如图 1 所示。



(a) 聚丙烯纤维掺量与混凝土抗压强度的关系



(b) 腐蚀时间与混凝土抗压强度的关系

图 1 混凝土抗压强度变化规律

由图 1 可知:

(1) 在腐蚀环境下(3%的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  和  $\text{NaCl}$  溶液),随着聚丙烯纤维掺量的增加,混凝土 7 d 抗压强度先增加后降低。当聚丙烯纤维的掺量为 0~3%时,抗压强度逐渐增加,最大抗压强度在  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  和  $\text{NaCl}$  溶液中分别为 50.2 MPa 和 48.3 MPa;而当聚丙烯纤维的掺量为 3%~5%时,混凝土的抗压强度逐渐减小。可知聚丙烯纤维的最佳掺量为 3%。

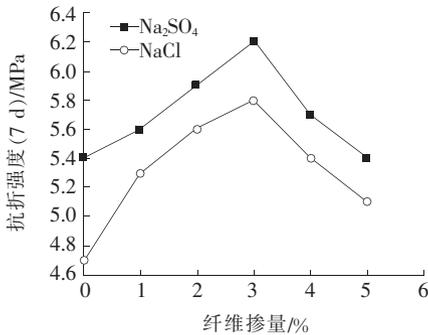
(2) 以掺入 3%的聚丙烯纤维混凝土为例,随着腐蚀时间的延长,聚丙烯纤维混凝土的抗压强度逐渐降低,在腐蚀 14 d 后,抗压强度在  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  和  $\text{NaCl}$  溶液中分别为 45.3 MPa 和 42.6 MPa。可见,  $\text{Cl}^-$  对混凝土的破坏程度要大于  $\text{SO}_4^{2-}$  的影响。

进一步分析图 1 中的演变规律可以得出:① 由于

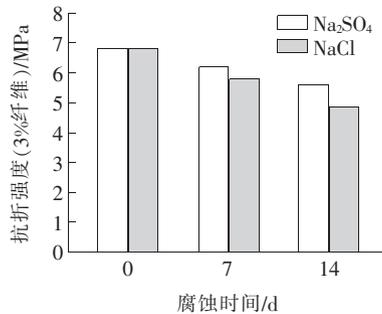
聚丙烯纤维的直径及表面积都很小,能够填充至混凝土中,使得混凝土更加密实,从而提高混凝土的抗压强度;②由于聚丙烯纤维属于纤维类材料,能够与水泥中的化学成分发生反应,从而加快水化过程,即加快C—S—H凝胶的形成<sup>[18]</sup>。这种现象能够使得混凝土在腐蚀环境中较好地抵抗 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Cl}^-$ 的侵蚀,从而提高混凝土的抗侵蚀能力。

## 2.2 抗折强度变化规律

在混凝土中掺入不同含量的聚丙烯纤维,测试混凝土的抗折强度演变关系,结果如图2所示。



(a) 聚丙烯纤维掺量与混凝土抗折强度的关系



(b) 腐蚀时间与混凝土抗折强度的关系

图2 混凝土抗折强度变化规律

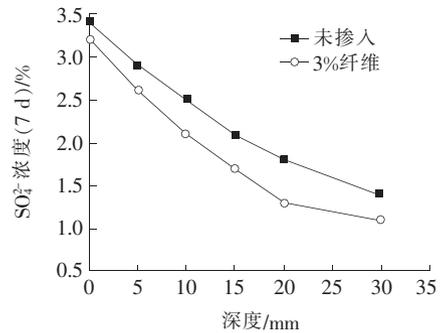
由图2可知:在腐蚀环境下(3%的 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 和 $\text{NaCl}$ 溶液),随着聚丙烯纤维掺量的增加,混凝土7 d抗折强度先增加后降低。当聚丙烯纤维的掺量为0~3%时,混凝土的抗折强度逐渐增加,其最大抗折强度在 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 和 $\text{NaCl}$ 溶液中分别为6.2 MPa和5.8 MPa;而当聚丙烯纤维的掺量为3%~5%时,混凝土的抗折强度逐渐减小。可知聚丙烯纤维的最佳掺量为3%。

以掺入3%的聚丙烯纤维混凝土为例,随着腐蚀时间的延长,聚丙烯纤维混凝土的抗折强度逐渐降低,在腐蚀14 d后,抗折强度在 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 和 $\text{NaCl}$ 溶液中分别为5.6 MPa和4.9 MPa。可见, $\text{Cl}^-$ 对混凝土的破坏程度要大于 $\text{SO}_4^{2-}$ 的影响。

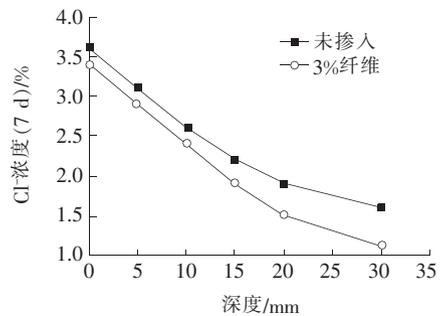
进一步分析图2中的演变规律可知:①因为在混凝土中掺入聚丙烯纤维能够降低混凝土的塑性流动和收缩微裂纹,使混凝土强度得到辅助加强;②聚丙烯纤维能够加快水泥的水化,使得水泥水化产物随时间不断累积,填充于已硬化试件的空隙,降低体系的空隙率,密实试件,从而使强度不断得以发展<sup>[19]</sup>。

## 2.3 抗侵蚀性变化规律

在混凝土中掺入3%含量的聚丙烯纤维,在腐蚀环境下浸泡7 d后测试纤维混凝土的抗侵蚀演变关系,结果如图3所示。



(a)  $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度随深度的变化



(b)  $\text{Cl}^-$ 浓度随深度的变化

图3 混凝土抗侵蚀性能试验结果

由图3可知:距离表面0、10 mm、30 mm时,不掺入纤维的混凝土 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度分别为3.4%、2.5%、1.4%, $\text{Cl}^-$ 浓度分别为3.6%、2.6%、1.6%。而掺入3%的聚丙烯纤维时, $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度分别为3.2%、2.1%、1.1%, $\text{Cl}^-$ 浓度分别为3.4%、2.4%、1.1%。可见,随着混凝土深度的增加, $\text{Cl}^-$ 浓度减少速率逐渐减少,在0~10 mm时 $\text{Cl}^-$ 浓度下降速率最快。

进一步分析图3中的演变规律可知:①因为在混凝土中掺入聚丙烯纤维后能够密实混凝土,从而能够抵抗 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Cl}^-$ 的侵蚀<sup>[20]</sup>;② $\text{Cl}^-$ 对混凝土的破坏程度要大于 $\text{SO}_4^{2-}$ 的影响,这是因为 $\text{Cl}^-$ 的渗透系数比 $\text{SO}_4^{2-}$ 的渗透系数大,而水泥化学成分中自身含有 $\text{SO}_4^{2-}$ ,因此也会减缓 $\text{SO}_4^{2-}$ 的渗透进度<sup>[21]</sup>。

### 3 结论

通过模拟腐蚀环境(3%的 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 和 $\text{NaCl}$ 溶液),掺入不同含量的聚丙烯纤维,分析混凝土的抗压强度、抗折强度和抗侵蚀性的演变关系,得到以下结论:

(1) 当聚丙烯纤维的掺量为0~3%时,混凝土的抗压强度和抗折强度逐渐增加;而当聚丙烯纤维的掺量为3%~5%时,混凝土的抗压强度和抗折强度逐渐减小。因此,聚丙烯纤维的最佳掺量为3%。

(2) 随着腐蚀时间的延长,聚丙烯纤维混凝土的抗压强度和抗折强度均逐渐降低,在腐蚀14 d后,抗压强度在 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 和 $\text{NaCl}$ 溶液中分别为45.3 MPa和42.6 MPa;抗折强度在 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 和 $\text{NaCl}$ 溶液中分别为5.6 MPa和4.9 MPa。可见, $\text{Cl}^-$ 对混凝土的破坏程度要大于 $\text{SO}_4^{2-}$ 的影响。

(3) 掺入3%含量的聚丙烯纤维时,随着混凝土深度的增加, $\text{Cl}^-$ 浓度减少速率逐渐减少,在0~10 mm时 $\text{Cl}^-$ 下降速率最快。

#### 参考文献:

[1] 李涛,王应生.氯腐蚀环境混凝土中钢筋腐蚀速度及腐蚀过程分析[J].工业安全与环保,2010,36(6):61-62.

[2] 蒋正武,赵楠,袁政成.地下水强酸盐复合腐蚀环境下耐腐蚀混凝土的制备[J].商品混凝土,2015(10):41-45.

[3] 余红发,孙伟,张云升,等.在冻融或腐蚀环境下混凝土使用寿命预测方法I:损伤演化方程与损伤失效模式[J].硅酸盐学报,2008,36(S1):128-135.

[4] 贡金鑫,王海超,李金波.腐蚀环境中荷载作用对钢筋混凝土梁腐蚀的影响[J].东南大学学报(自然科学版),2005,35(3):421-426.

[5] 陈志城,包亦望.酸环境腐蚀对混凝土接触变形和损伤的影响[J].建筑材料学报,2001,4(3):244-249.

[6] 贡金鑫,赵国藩.腐蚀环境下钢筋混凝土结构疲劳可靠度的分析方法[J].土木工程学报,2000,33(6):50-63.

[7] 于忠,胡蔚儒.化工大气环境中混凝土的腐蚀机理及性能研究[J].混凝土,2000(8):10-15.

[8] 张云清,余红发,孙伟,等. $\text{MgSO}_4$ 腐蚀环境作用下混凝土的抗冻性[J].建筑材料学报,2011,14(5):698-702.

[9] 梁咏宁,黄君一,林旭健,等.氯盐对受硫酸盐腐蚀混凝土性能的影响[J].福州大学学报(自然科学版),2011,39(6):947-951.

[10] 马昆林,谢友均,龙广成.氯盐环境下桥梁混凝土结构的腐蚀行为及破坏机理[J].建筑科学与工程学报,2008,25(3):32-36.

[11] 张建仁,王华,彭建新,等.多因素腐蚀环境下混凝土结构的初锈时间模型及其可靠度分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2012,9(1):34-40.

[12] 高扬,王小惠,王菁,等.疲劳荷载和环境腐蚀作用下环氧涂层钢筋混凝土试件的耐久性研究[J].四川建筑科学研究,2015,41(6):24-30.

[13] 郭进军,韩菊红,卢燕,等.混合腐蚀环境下改性混凝土的力学性能[J].建筑材料学报,2013,16(2):330-334.

[14] 陈迅捷,欧阳幼玲,钱文勋,等.不同环境中杂散电流对钢筋混凝土腐蚀影响[J].水利水运工程学报,2014(2):33-37.

[15] 牛建刚,胡伟勋,杨鹏飞.二氧化硫腐蚀对混凝土性能影响试验研究[J].硅酸盐通报,2016,35(1):44-51.

[16] 蔡绍祥,马茜茜,王新洲,等.基于洋麻纤维/聚丙烯/橡胶板的复合板材制备工艺研究[J].林产工业,2018,45(12):10-15.

[17] 王立多,赵梓年.聚丙烯/亚麻纤维复合材料的性能研究[J].林产工业,2009,36(3):14-16.

[18] 高桂海,熊梅,钱波.不同外掺纤维增强排水沥青混合料性能研究[J].中外公路,2019,39(6):182-187.

[19] 武越锋,马昆林,黄正华,等.酸性环境对不同材料组成混凝土侵蚀深度的试验研究[J].中外公路,2019,39(4):224-228.

[20] 熊辉,刘洪辉.掺钢纤维和矿渣的高性能再生混凝土性能研究[J].中外公路,2020,40(1):206-211.

[21] 张洪亮,王黎,赵金东.盐渍土地区混凝土结构的耐硫酸盐腐蚀研究[J].中外公路,2016,36(3):317-321.