

# 城市污水管道的混凝土腐蚀机理与耐久性设计

赵卓<sup>1</sup>, 元成方<sup>2</sup>, 田丰<sup>2</sup>, 郭稼祥<sup>2</sup>, 张浩华<sup>3</sup>, 马磊磊<sup>3</sup>

(1. 宁波工程学院 建筑与交通工程学院, 浙江 宁波 315211; 2. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 3. 郑州市市政工程管理处, 河南 郑州 450053)

**摘要:** 城市污水管道是重要的基础设施,对城市生态安全、社会生产发展等都起着至关重要的作用。对某市污水管道的混凝土腐蚀情况进行调查分析,在此基础上开展了室内模拟腐蚀试验研究,提出了污水管道混凝土的耐久性设计方法。研究表明:该城市污水管道混凝土腐蚀破坏的主要因素为硫酸盐侵蚀;采用矿物掺合料、聚丙烯纤维对管道混凝土进行改性,能够有效提高管道混凝土在污水腐蚀环境中的耐久性,双掺粉煤灰和矿渣并添加适量聚丙烯纤维(CX组)的效果最佳,与原配比混凝土相比,CX组混凝土的立方体抗压强度和劈裂抗拉强度分别提高了20.7%和16.9%。在试验条件下,水泥基结晶型防水涂料对于管道混凝土耐久性的改善尚不明显。

**关键词:** 污水管道; 混凝土; 腐蚀机理; 耐久性设计

**中图分类号:** TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)05-0073-06

## Corrosion Mechanism and Durability Design of Urban Sewage Concrete Pipeline

ZHAO Zhuo<sup>1</sup>, YUAN Cheng-fang<sup>2</sup>, TIAN Feng<sup>2</sup>, GUO Jia-xiang<sup>2</sup>, ZHANG Hao-hua<sup>3</sup>,  
MA Lei-lei<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, China; 2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Municipal Engineering Management Office of Zhengzhou, Zhengzhou 450053, China)

**Abstract:** Urban sewage pipelines are important infrastructures and are critical to urban ecological security and social production development. Based on the investigation and analysis of the corrosion of sewage concrete pipeline in a city, an indoor corrosion simulation test was carried out, and the durability design method for sewage concrete pipeline was proposed. The research showed that the main factor of corrosion was sulfate erosion. Mineral admixture and polypropylene fiber could effectively improve the durability of pipeline concrete in the corrosive environment. Double mixing fly ash and slag, and adding a certain amount of polypropylene fiber(CX group) was the best practice. In comparison with the original proportion concrete, the cubic compressive strength and splitting tensile strength of concrete in CX group were increased by 20.7% and 16.9%. Under the testing conditions, the effect of cement-based crystalline waterproof coating was unnoticeable.

**Key words:** sewage pipeline; concrete; corrosion mechanism; durability design

基金项目: 河南省重点科技攻关项目(142102310490)

通信作者: 元成方 E-mail: chengfang1102@126.com

城市污水管道是重要的基础设施,对城市生态安全、社会生产发展等都起着至关重要的作用。近年来,随着社会经济的飞速发展和城镇化的不断加快,城市用水量和污水排放量不断增大,污水成分愈加复杂,无疑将加剧管道混凝土的污水腐蚀,由此带来管道耐久性退化、服役寿命缩短等问题。由于污水管道埋藏于地下,其耐久性问题常常被人们忽视,如不加以重视,将会带来巨大的社会经济损失和生态环境污染。因此,开展城市污水管道混凝土腐蚀机理及耐久性设计研究具有重要的现实意义。已有研究报道大多涉及污水管道缺陷检测、健康评价<sup>[1-4]</sup>等内容,针对污水管道混凝土腐蚀机理与耐久性设计的研究相对较少。鉴于此,笔者拟对某市污水管道混凝土腐蚀情况进行调查分析,并在此基础上开展室内模拟腐蚀试验研究,提出污水管道混凝土的耐久性设计方法。

## 1 污水管道混凝土腐蚀机理

### 1.1 污水水质调查分析

为探明污水管道混凝土的腐蚀破坏机理,于2015年7月—8月间多次在某市地下污水管道中提取污水试样进行成分分析,结果(历次采样的峰值浓度)如下:pH值为7.6~8.1,  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、游离 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{NH}_3-\text{N}$ 、COD、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 分别为301、204、56、60、106、211、<0.5、254、59 mg/L。可见,地下污水中含有多种有害离子,如不加以处理,将对生态环境造成不良影响。对于混凝土管道而言,主要有害离子为氯离子和硫酸根离子。

### 1.2 污水管道混凝土腐蚀特征分析

为进一步明确污水管道混凝土腐蚀劣化的主导因素,从某市拆除的老旧污水管道上取一段样品,如图1所示。从污水管道混凝土中提取水泥石,加工制成SEM试验所需试样,采用JSM-7500F型扫描电子显微镜对试样的微观形貌及成分进行分析,结果如图2所示。

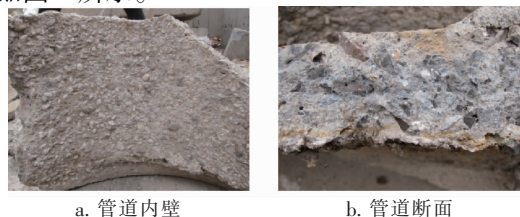


图1 老旧污水管道照片

Fig. 1 Photos of old sewage pipeline

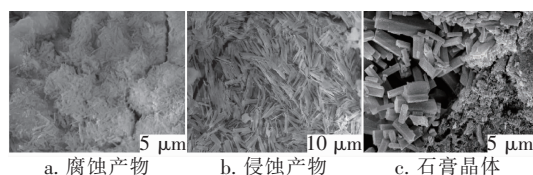


图2 污水管道混凝土水泥石微观形貌

Fig. 2 Micro-morphology of concrete cement stone of sewage pipeline

由图2可见,混凝土中的水化产物与污水中的侵蚀性离子发生反应生成膨胀性产物,且主要分布在混凝土内部的孔隙、缝隙处以及界面区。腐蚀产物的聚集及膨胀应力的增大,使混凝土中微裂纹增多[见图2(a)],浆体和骨料界面的黏结性降低,混凝土将出现酥松并剥落。混凝土孔隙中的针状晶体数量较多且侵蚀产物个体较大[见图2(b)]。混凝土受侵蚀后,其孔隙中可见大量的短柱状侵蚀产物交错分布,在孔隙边缘伴有微裂缝出现,混凝土中砂浆和骨料界面区(ITZ)同样可以观测到大量的短柱状晶体,这种短柱状晶体为石膏[见图2(c)],和钙矾石一样,均为混凝土在硫酸盐侵蚀过程中的典型侵蚀产物。

综上可知:引起地下污水管道混凝土腐蚀、耐久性退化的主要因素为硫酸盐侵蚀。

## 2 污水管道混凝土耐久性设计研究

污水管道的生产通常采用普通混凝土,针对污水管道混凝土腐蚀特点进行的耐久性设计相对欠缺。研究表明:矿物掺合料对混凝土抗硫酸盐侵蚀性能具有改善作用<sup>[5-6]</sup>,而工程纤维可抑制混凝土早期收缩开裂以及膨胀应力引起的微裂缝,提高混凝土的抗渗性<sup>[7-8]</sup>。此外,防水涂料亦可提高混凝土的抗渗性<sup>[9-10]</sup>,进而改善其耐腐蚀性。因此,本研究采用粉煤灰和矿渣、耐腐蚀性好的聚丙烯纤维、环保且耐酸碱的水泥基渗透结晶型防水涂料对传统管道混凝土开展耐久性设计试验研究。

### 2.1 混凝土配合比设计

试验基准配合比来自河南某水泥制品有限公司生产的污水管混凝土,具体如下:水泥为304 kg/m<sup>3</sup>、水为140 kg/m<sup>3</sup>、河砂为644 kg/m<sup>3</sup>、石屑(粒径为0~5 mm的骨料)为161 kg/m<sup>3</sup>、碎石为1207 kg/m<sup>3</sup>。混凝土设计强度等级为C40,水胶比为0.46,砂率为40%,坍落度要求为干浆,采用辊压成型。

此次试验所使用的原材料与实际污水管混凝土

相同,水泥为 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥,粗骨料采用粒径为 5 ~ 20 mm 的碎石,细骨料采用细度模数为 2.8 的河砂以及粒径为 0 ~ 5 mm 的石屑。矿物掺合料为 I 级粉煤灰和 S95 级矿渣,纤维为聚丙烯束状单丝纤维(直径为 0.048 mm、长度为 19 mm、抗拉强度为 350 MPa、弹性模量为 3 600 MPa、极限延

伸率 $\geq 15\%$ 、熔点为 160  $^{\circ}\text{C}$ 、燃点为 580  $^{\circ}\text{C}$ 、相对密度为 0.91),拌和及养护用水为符合国家标准普通自来水,涂料为水泥基渗透结晶型防水涂料(初凝时间 $\geq 20$  min、终凝时间 $\leq 24$  h、7 d 抗折强度 $\geq 2.8$  MPa、7 d 断裂伸长率 $\geq 12\%$ 、安定性合格、湿基面黏结强度为 1 MPa)。试验用混凝土配合比见表 1。

表 1 试验用混凝土配合比

Tab. 1 Mix proportion of concrete for test

 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 

项 目	水泥	粉煤灰	矿渣	水	砂子	石屑	碎石	纤维	涂料
Y	304	0	0	140	644	161	1 207	0	0
Y-T	304	0	0	140	644	161	1 207	0	1.4 ~ 1.7
C	199	45	60	140	644	161	1 207	0	0
X	304	0	0	140	644	161	1 207	0.9	0
CX	199	45	60	140	644	161	1 207	0.9	0

注: Y 为原配比混凝土,Y-T 为刷涂层的原配比混凝土,C 为添加矿物掺合料的混凝土,X 为添加纤维的混凝土,CX 为同时添加矿物掺合料和纤维的混凝土。

按设计配合比浇筑混凝土试块(边长为 100 mm 的立方体试块),标准养护 28 d。对于需刷涂层的混凝土,在混凝土试块养护到期后,在试块表面刷一层水泥基渗透结晶型防水涂料,涂抹厚度为 $(1.0 \pm 0.05)$  mm。

## 2.2 人工配制污水

为模拟实际污水成分并加快腐蚀试验速度,基于前期调查分析结果和有关文献报道<sup>[11]</sup>,配制模拟污水时,将硫酸盐浓度设置为 10%,其他介质离子浓度根据腐蚀试验的需要进行了适当提高。配制模拟污水时所用的化学试剂有  $\text{MgCl}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,人工配制污水的水质如下:pH 值为 8,  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  分别为 300、67 605、750、600、100 mg/L。

## 2.3 试验方法

污水管道混凝土腐蚀是一个复杂的物理化学过程,其材料性能的劣化往往是多种因素耦合作用的结果。在实际环境中,管道内壁中间区域往往是腐蚀最为严重的区域。这是由于管道中的污水流量时刻变化,管道内壁会遭受干湿循环作用。因此,试验将采取干湿循环的浸泡制度来模拟污水管道的实际工况。

在混凝土硫酸盐腐蚀试验中,部分研究人员采用了浸烘循环的试验制度<sup>[12-13]</sup>,这种方法虽然能够加速腐蚀,但高温干燥会对混凝土劣化及腐蚀产物生成产生影响。因此,本试验将采用自然浸泡 7 d + 自然晾晒 8 d,15 d 为一个周期来进行循环。

测试内容包括:混凝土表观质量、立方体抗压强度、劈裂抗拉强度、质量损失率。测试时间分别为养护 28 d 后的初始指标以及干湿循环 2、4、6、8 个月后的指标。力学性能试验参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)的相关规定进行。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 表观质量

各组试块干湿循环 8 个月后的表观质量如图 3 所示。可以看出,Y 组混凝土表观受损相对严重,其表面局部已出现疏松、翘皮、剥落、坑蚀等现象,两面交界的棱角处残破不全;Y-T 组混凝土表观较为完好,局部涂层轻微脱落;C、X 两组混凝土试块棱角出现轻微膨胀开裂、掉角等现象,但整体相对完好;CX 组混凝土表面无明显变化,混凝土角部出现轻微掉角现象,整体形态完好。

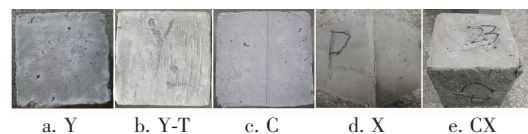


图 3 试块干湿循环 8 个月后的表观质量

Fig. 3 Apparent morphology of test block after 8 months of dry and wet cycle

### 3.2 立方体抗压强度

混凝土立方体抗压强度试验结果如表 2 所示,混凝土抗压强度经时曲线如图 4 所示。在整个试验周期内,除 CX 组外,其余各组混凝土抗压强度总体



上表现出先增大后下降的趋势,原因在于:①混凝土内部持续进行的水化反应使混凝土密实度提高;②腐蚀产物对混凝土孔隙的填充增强了混凝土的密实性;③随着腐蚀产物的聚集及膨胀应力的增大,混凝土中微裂纹逐渐增多,导致混凝土强度下降。

表2 混凝土立方体抗压强度

Tab.2 Cubic compressive strength of concrete MPa

项 目	干湿循环时间/月				
	0	2	4	6	8
Y	52.6	57.0	55.9	56.7	54.6
Y-T	53.6	56.7	58.4	55.4	53.0
C	50.2	60.7	65.8	64.6	63.5
X	47.7	56.6	57.7	60.2	57.8
CX	49.4	59.8	59.7	64.0	65.9

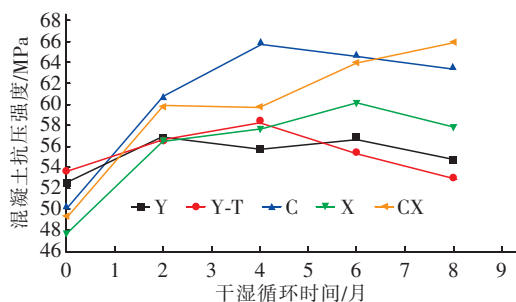


图4 混凝土抗压强度经时曲线

Fig.4 Time-dependent curve of compressive strength of concrete

C组混凝土的峰值强度最大,除上述原因外,还由于该组混凝土使用了粉煤灰和矿渣部分取代水泥,掺合料的二次水化效应和物理填充效应起到了积极作用,同时水泥用量的降低减少了参与硫酸盐腐蚀反应的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,延缓和减轻了混凝土受腐蚀的程度。CX组混凝土同时掺加了矿物掺合料以及聚丙烯纤维,纤维的掺入必然带来更多的界面,对混凝土的抗压强度产生一定的负效应,然而当混凝土遭受硫酸盐侵蚀将产生膨胀裂缝时,均匀乱向分布的聚丙烯纤维可以有效抑制裂缝的产生和发展,此时对混凝土的抗压强度产生正效应。以干湿循环8个月的试验结果为例,C、X、CX组混凝土的立方体抗压强度分别约为原配比混凝土的1.16、1.06和1.21倍。涂有水泥基渗透结晶型防水涂料的Y-T组混凝土表现不佳,与Y组混凝土相比,并没有明显差异。

### 3.3 劈裂抗拉强度

混凝土劈裂抗拉强度试验结果如表3所示,混

凝土劈裂抗拉强度经时曲线如图5所示。

表3 混凝土劈裂抗拉强度

Tab.3 Splitting tensile strength of concrete MPa

项 目	干湿循环时间/月				
	0	2	4	6	8
Y	3.17	3.41	3.49	3.46	3.37
Y-T	3.30	3.43	3.52	3.56	3.57
C	3.31	3.43	3.52	3.54	3.72
X	3.41	3.50	3.54	3.61	3.80
CX	3.65	3.70	3.73	3.86	3.94

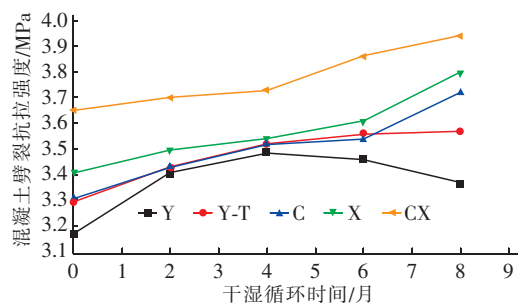


图5 混凝土劈裂抗拉强度经时曲线

Fig.5 Time-dependent curve of splitting tensile strength of concrete

由图5可见,Y组混凝土劈裂抗拉强度呈先上升后快速下降的趋势,Y-T组混凝土劈裂抗拉强度先是缓慢增长而后趋于稳定,这与其他3组的劈裂抗拉强度经时变化规律有明显不同。而C、X、CX组混凝土劈裂抗拉强度值均大于同龄期的另外两组混凝土,且在8个月的试验过程中始终呈上升趋势。其中,CX组的强度最高,X组次之。一方面,聚丙烯纤维对混凝土的劈裂抗拉强度起到了增强效果;另一方面,二次水化反应使得活性掺合料颗粒与水泥水化产物之间的联结不断加强,对促进水泥基材料强度增长,尤其是抗拉强度的增长,起到了重要作用。以干湿循环8个月的试验结果为例,C、X、CX组混凝土的劈裂抗拉强度分别约为原配比混凝土的1.10、1.13和1.17倍。

### 4 耐久性机理分析

本次试验从干湿循环6个月的混凝土试块中钻取直径为15 mm、高为15 mm的圆柱体试样,采用Micro XCT-400型试验机开展XCT试验研究,使用Avizo软件对混凝土试样XCT扫描图像进行三维重构,如图6所示。可以发现,经重构后的图形准确地还原了混凝土试样的实际情况,未出现错层现象,还原程度较高。从图像中不仅可以清晰地看出骨料的

分布情况,还可观察到试样表面的孔隙。为进一步了解混凝土试样的内部信息,还需对三维重构图进行更具体的分解和定量计算。

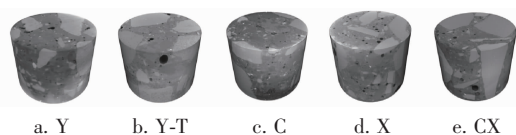


图6 混凝土试块的三维重构

Fig. 6 Three-dimensional reconstruction of concrete

X、CX 混凝土试样内部的纤维分布如图7所示。可见,聚丙烯纤维在混凝土中分散性较好,呈三维杂乱分布,没有出现集束现象,这一特点保证聚丙烯纤维能较好地发挥增强、阻裂作用,提高混凝土材料在污水腐蚀环境中的耐久性。同时,聚丙烯纤维自身也具有较好的耐腐蚀性,较之钢纤维,更适用于腐蚀环境。

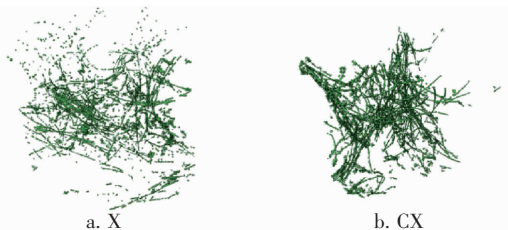


图7 聚丙烯纤维空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of polypropylene fiber

各组试样内部孔隙结构分布如图8所示。不难看出,C组混凝土试样中的孔隙分布均匀且孔径较小,可见活性掺合料的二次水化效应和物理填充效应对水泥基材料的孔隙结构起到了优化作用。

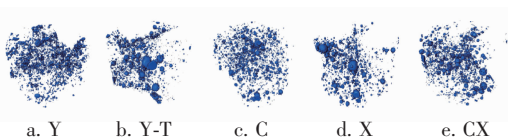


图8 孔结构空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of pore structure

由于取样的随机性,样品中骨料体积占比在23.1%~58.7%不等,因此造成了各样品中水泥石体积占比的差异。为了消除这一差异,将孔体积百分比换算为孔隙在水泥石中的体积占比,分别为1.655%(Y)、3.01%(Y-T)、1.487%(C)、2.763%(X)、2.295%(CX)。可以看出,C组混凝土试样的孔体积百分比最小,添加聚丙烯纤维后,水泥石中的孔隙将会增多。Y-T组混凝土试样的孔隙结构相对

较差,孔径偏大且孔体积百分比比较高,这与力学性能试验结果一致。综上,适量的矿物掺合料对混凝土孔隙结构的改善效果最佳,而水泥结晶型防水涂料的效果较差。

## 5 结论

对某市污水管道混凝土腐蚀情况进行了调查分析,并在此基础上开展了室内模拟腐蚀试验研究,提出了污水管道混凝土的耐久性设计方法。主要结论如下:①该市污水管道混凝土腐蚀破坏的主要因素为硫酸盐侵蚀;②采用矿物掺合料、聚丙烯纤维对管道混凝土进行改性,能够有效提高管道混凝土在污水腐蚀环境中的耐久性,双掺粉煤灰和矿渣并添加适量聚丙烯纤维的效果最佳,较之原配比混凝土,CX组混凝土的立方体抗压强度和劈裂抗拉强度分别提高了20.7%和16.9%;③在该试验条件下,水泥基结晶型防水涂料对于管道混凝土耐久性的改善尚不明显。

## 参考文献:

- [1] 李若晗. 城市污水管道检测、评价与影响因素研究[D]. 北京:清华大学,2016.  
Li Ruohan. A Study of Urban Sewer Inspection, Assessment and Related Factors[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016 (in Chinese).
- [2] 林明波. 福州市某片区污水管道健康状况检测与分析[J]. 中国给水排水, 2014, 30(9): 96-98.  
Lin Mingbo. Health inspection and analysis of sewer system in an area of Fuzhou City[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(9): 96-98 (in Chinese).
- [3] 罗同顺, 左剑恶, 千里里, 等. 基于模糊综合评判模型的污水管道缺陷量化评价方法[J]. 环境科学学报, 2011, 31(10): 2204-2209.  
Luo Tongshun, Zuo Jian'e, Gan Lili, et al. Quantitative evaluation method for sewer defects based on fuzzy comprehensive evaluation model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(10): 2204-2209 (in Chinese).
- [4] 颜文涛, 陈朝晖, 何强, 等. 城市污水管道预报健康度评价模型及其应用研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(7): 97-101.  
Yan Wentao, Chen Zhaohui, He Qiang, et al. Study on assessment model for predictive health degree of municipal sewer systems and its application[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(7): 97-101 (in Chinese).

- Chinese).
- [5] 李华,孙伟,左晓宝. 矿物掺合料改善水泥基材料抗硫酸盐侵蚀性能的微观分析[J]. 硅酸盐学报,2012,40(8):1119-1126.
- Li Hua, Sun Wei, Zuo Xiaobao. Effect of mineral admixtures on sulfate attack resistance of cement-based materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012,40(8):1119-1126(in Chinese).
- [6] 刘俊,牛荻涛,宋华. 掺合料对混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响[J]. 混凝土,2014(3):79-83.
- Liu Jun, Niu Ditao, Song Hua. Influences brought by admixtures to the sulfate corrosion of concrete [J]. Concrete,2014(3):79-83(in Chinese).
- [7] 唐伟东,赵卓,陈自豪,等. 纤维混凝土早期抗裂及力学性能试验研究[J]. 河南科学,2017,35(4):606-610.
- Tang Weidong, Zhao Zhuo, Chen Zihao, et al. Test of the early crack resistance and mechanical properties of fiber reinforced concrete[J]. Henan Science, 2017, 35(4): 606-610(in Chinese).
- [8] 元成方,赵卓,应凌云. 纤维混凝土电阻率与氯离子扩散系数相关性试验研究[J]. 硅酸盐通报,2015,34(5):1205-1209.
- Yuan Chengfang, Zhao Zhuo, Ying Lingyun. Experimental study on correlation between chloride ion diffusion coefficient and electrical resistivity of fiber reinforced concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(5): 1205-1209(in Chinese).
- [9] 孙学志. 滢透结晶型涂料对普通混凝土抗渗性能的影响[J]. 新型建筑材料,2011,38(4):53-55.
- Sun Xuezhi. The influence of capillary crystalline coating on the anti-permeability of ordinary concrete[J]. New Building Materials, 2011, 38(4): 53-55(in Chinese).
- [10] 陆春奇,谢宇晨,翁兴中,等. 表面涂层混凝土防水防渗研究[J]. 中外公路,2018,38(1):306-308.
- Lu Chunqi, Xie Yuchen, Weng Xingzhong, et al. Study on waterproof and anti-seepage of surface coating concrete [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018,38(1):306-308(in Chinese).
- [11] 姜磊. 硫酸盐侵蚀环境下混凝土劣化规律研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2014.
- Jiang Lei. Study on Deterioration of Concrete under Sulfate Attack [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014(in Chinese).
- [12] 金祖权,赵铁军,孙伟. 硫酸盐对混凝土腐蚀研究[J]. 工业建筑,2008,38(3):90-93.
- Jin Zuquan, Zhao Tiejun, Sun Wei. Study on damage to concretes attacked by sulfates [J]. Industrial Construction, 2008, 38(3): 90-93(in Chinese).
- [13] 苏卿,陈艾荣,赵铁军. 硫酸盐浸烘腐蚀淡化海砂混凝土的试验研究[J]. 四川建筑科学研究,2013,39(4):239-242.
- Su Qing, Chen Airong, Zhao Tiejun. Study the corrosion of dry-wetting sulfates on washed sea sand concrete[J]. Sichuan Building Science, 2013, 39(4): 239-242(in Chinese).



作者简介:赵卓(1971-),男,河南郑州人,博士,教授,主要从事工程材料及结构耐久性研究。

E-mail:zzhuo\_99@163.com

收稿日期:2019-07-12