

DOI: 10.11918/202301045

氯盐与硫酸盐复合侵蚀下钢筋混凝土锈裂行为

俞小彤^{1,2}, 常西栋¹, 周文涛¹, 廖迎娣^{1,2}, 陈 达^{1,2}

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 南京 210098; 2. 海岸灾害及防护教育部重点实验室(河海大学), 南京 210098)

摘要: 为评估海洋、盐湖等环境中钢筋混凝土结构耐久性, 通过试验与理论相结合探究氯盐与硫酸盐复合侵蚀下钢筋混凝土锈裂特性。通电腐蚀 5% (质量分数) NaCl、5% NaCl + 5% Na₂SO₄ 溶液中钢筋混凝土试件, 对比分析混凝土表面形貌、钢筋锈蚀特征。设计伴随的混凝土腐蚀试验, 类比保护层腐蚀劣化, 分析混凝土力学性能。结果表明: 硫酸盐的存在改变胀裂前混凝土形貌, 使得单一氯盐侵蚀下的“白须”消失, 表面粉化并出现盐结晶, 延长胀裂时间; 复合侵蚀下钢筋锈蚀率低于单一氯盐侵蚀, 二者均显著低于法拉第定律理论值; 锈胀裂缝宽度与钢筋锈蚀率线性相关, 硫酸盐的存在增大裂缝随钢筋锈蚀发展的速率; 通电环境中, 受腐蚀混凝土的抗压强度先升高后降低, 劈裂抗拉强度不断降低。提出受腐蚀混凝土的抗拉强度演化经验公式。在经典锈胀模型的基础上考虑锈蚀产物对裂缝的填充作用, 并将硫酸盐的影响考虑至混凝土抗拉强度、钢筋腐蚀电流密度中, 建立复合侵蚀下钢筋混凝土胀裂时间预测模型, 并验证了模型的有效性。

关键词: 氯盐-硫酸盐侵蚀; 混凝土腐蚀; 锈胀力; 胀裂时间

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)02-0151-10

Corrosion-induced cover cracking of reinforced concrete under combined chloride and sulfate attack

YU Xiaotong^{1,2}, CHANG Xidong¹, ZHOU Wentao¹, LIAO Yingdi^{1,2}, CHEN Da^{1,2}

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of Coastal Disaster and Protection (Hohai University), Ministry of Education, Nanjing 210098, China)

Abstract: To evaluate the durability of reinforced concrete structures in marine, salt lakes, etc., this paper explored the characteristics of corrosion-induced cover cracking under combined chloride and sulfate attack by experimental and theoretical analysis. The reinforced concrete specimens were exposed to 5% NaCl, 5% NaCl + 5% Na₂SO₄ solutions with electric field for degradation acceleration. The visual appearance of concrete and corrosion of reinforcement under different conditions were compared. Moreover, an accompanied experiment for concrete deterioration was designed in analogy to the cover deterioration, and the mechanical properties of concrete were analyzed. The results showed that in presence of sulfate, the concrete cover appearance altered before cracking; the "white whiskers" under the single chloride solution disappeared while efflorescence existed on the surface of the concrete with sulfate crystallization. Furthermore, the presence of sulfate also extended the time before corrosion-induced cracking. The corrosion level of the reinforcement under the combined attack was lower than that under the single chloride attack, and both were much lower than the predicted value by Faraday's law. The crack width was linearly correlated with the corrosion level, and the presence of sulfates increased the development of crack width with the corrosion level. Under the electric field, the compressive strength of concrete increased at first and then decreased, while the tensile splitting strength reduced with exposure time. An empirical formula for the tensile strength of deteriorated concrete was proposed. The effect of filling rust products in the cracks was taken into account based on the classic model for corrosion-induced cover cracking. In addition, the effect of sulfate was considered in the tensile strength of concrete and corrosion current density. On these bases, a time prediction model for corrosion-induced cracking of reinforced concrete under combined attack was established, and the validity of the model was verified.

Keywords: combined sulfate-chloride attack; concrete deterioration; corrosion expansive pressure; corrosion-induced cover cracking time

收稿日期: 2023-01-13; 录用日期: 2023-04-08; 网络首发日期: 2023-07-06

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/23.1235.T.20230705.1107.002.html>

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20220981); 中国博士后科学基金(2021M701048); 江苏省卓越博士后计划(2022ZB183)

作者简介: 俞小彤(1993—), 女, 助理研究员; 陈 达(1978—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 陈 达, chenda@hhu.edu.cn

服役于海洋、盐湖等环境中的钢筋混凝土 (reinforced concrete, RC) 结构常年遭受氯盐与硫酸盐复合侵蚀, 腐蚀劣化问题突出。氯离子 (Cl^-) 侵入混凝土内部锈蚀钢筋^[1-2], 硫酸根离子 (SO_4^{2-}) 与水泥水化产物反应生成膨胀性侵蚀产物, 损伤混凝土基体^[3]。尽管复合侵蚀下离子传输, 钢筋、混凝土材料腐蚀研究已有丰富成果^[4], 但 RC 构件/结构劣化特性鲜有报道。

保护层锈胀开裂是 RC 结构性能劣化的关键节点。GB/T 51355—2019《既有混凝土结构耐久性评定标准》给出了一般环境混凝土保护层胀裂时间计算经验公式。基于三阶段锈裂理论^[5], 学者们采用厚壁筒模型, 结合不同的混凝土受拉损伤理论, 对保护层胀裂过程进行理论分析^[6-8]。Liang 等^[8]采用 57 组试验数据验证常用的 7 种厚壁筒模型, 指出假定胀裂时混凝土达到完全塑性状态的 ES (El Maaddawy-Soudki) 模型计算结果最优。然而, 当前研究大多仅考虑钢筋锈蚀, 忽略了混凝土腐蚀劣化对锈裂的影响。Wang 等^[9]发现, 相比单一氯盐侵蚀, 氯盐与硫酸盐复合侵蚀下试件所能承受的最大锈胀力下降, 但胀裂时间增加。这表明 SO_4^{2-} 一方面腐蚀混凝土, 降低最大锈胀力, 促进锈裂; 另一方面影响钢筋锈蚀进程, 延长胀裂时间, 然而混凝土

腐蚀对锈裂行为的影响尚未量化。因此, 亟需探明受复合侵蚀的钢筋混凝土锈裂特性, 并建立考虑复合侵蚀影响的胀裂模型。

通电加速手段已应用于加速复合盐类侵蚀^[9-10], 本文采用该方法腐蚀单一氯盐、复合氯盐-硫酸盐溶液中钢筋混凝土试件, 探究其锈裂特性。设计伴随的混凝土腐蚀试验, 明确试件保护层性能演化。修正 ES 模型^[6], 在混凝土抗拉强度、钢筋腐蚀电流密度中引入硫酸盐的影响, 建立复合侵蚀下保护层胀裂时间预测模型, 为海洋、盐湖等环境中 RC 结构耐久性评定提供理论依据。

1 试验

1.1 原材料与配合比

水泥采用海螺牌普通硅酸盐水泥 P·O 42.5, 化学组成见表 1。细骨料采用细度模数为 2.9 的天然河砂, II 区中砂; 粗骨料采用粒径 5~20 mm 连续级配碎石; 拌合水采用实验室自来水; 外加剂采用聚羧酸液体高效减水剂, 减水率为 25%; 采用富钢 HRB400 带肋钢筋, 直径 16 mm; 采用宝钛 TA2 纯钛片, 厚 0.1 mm。设计 C40 混凝土, 配合比 (按质量计) 见表 2。

表 1 P·O 42.5 水泥的化学组成

Tab. 1 Chemical composition of cement P·O 42.5

组分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	MgO	Na_2O	K_2O	LOI
w/%	21.35	4.94	2.71	60.16	1.96	0.46	1.00	0.48	3.51

表 2 混凝土配合比

Tab. 2 Concrete mixtures

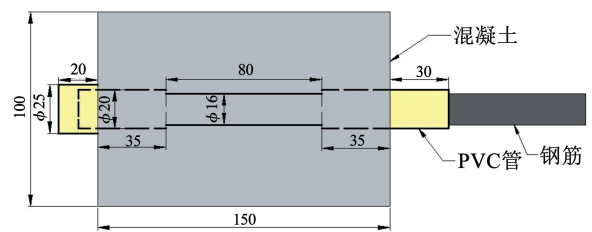
原料	水	水泥	细骨料	粗骨料	减水剂
用量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	205	450	570	1 145	2.25

1.2 试样设计与制备

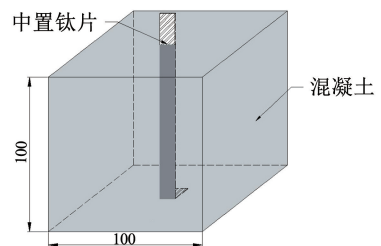
钢筋混凝土试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 150 mm, 如图 1(a) 所示。试件两端设置长 35 mm 无黏区, 通过直径 20 mm 的聚氯乙烯 (PVC) 管实现, 采用环氧树脂 (德益 E-44 型) 涂抹无黏区钢筋。试件上端预留 30 mm 的 PVC 管, 防止腐蚀溶液渗入。室温浇水养护 28 d。养护完成后在试件底端套入直径 25 mm、长 20 mm 的 PVC 管, 灌入环氧树脂密封, 防止溶液渗入。

参考文献[11]制备可通电的混凝土试块, 用于伴随的混凝土腐蚀试验。在 100 mm × 100 mm × 100 mm 混凝土试块中插入宽 10 mm、厚 0.1 mm 钛片作为阳极, 如图 1(b) 所示。同时制备无钛片试样

作为对照样。室温浇水养护 28 d。



(a) 钢筋混凝土试件



(b) 混凝土试块

单位: mm

图 1 试样尺寸

Fig. 1 Dimensions of test samples

1.3 腐蚀试验设计

参考研究常用的腐蚀溶液浓度^[7,12],配制5% (质量分数) NaCl 溶液与5% NaCl + 5% Na₂SO₄ 复合溶液。为避免高电流对腐蚀过程的影响,选取200 μA/cm² 电流密度进行恒电流加速腐蚀试验^[13]。试件在腐蚀溶液中浸泡3 d 至饱水后施加恒电流,将每12个试样并联后接入电源正极,不锈钢棒接入负极,如图2(a)所示。根据法拉第定律,按理论锈蚀率为1%、2%、3% 设定通电时间为6、12、18 d,随后,当试件胀裂及平均裂缝宽度达约0.1、0.2、0.5、1.0 mm 时停止通电。为保证外界离子浓度恒定,腐蚀溶液每6 d 更换一次。

由于存在钢筋,难以通过常规的力学性能测试,为明确保护层的腐蚀劣化,对混凝土试块进行伴随的恒电流腐蚀,电流大小与钢筋混凝土试件相同,如图2(b)所示。氯盐自身对混凝土力学性能无影响^[14],5% NaCl 的掺入对5% Na₂SO₄ 溶液中受腐蚀混凝土的强度影响甚微^[12],考虑到通电环境中氯盐强烈腐蚀钛片,故采用5% Na₂SO₄ 溶液作为腐蚀溶液,通电时间设为6、12、18、24、30 d。



(a) 钢筋混凝土试件腐蚀



(b) 混凝土试块腐蚀

图2 恒电流加速腐蚀试验

Fig.2 Accelerated corrosion test by electric field with constant current

1.4 测试方法

采用HC-CK101型裂缝宽度观测仪对钢筋混凝土试件表面裂缝宽度进行分段量测,精度为

0.02 mm。参考GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》测量钢筋锈蚀率。将试件中钢筋取出,酸洗、称质量、测长,计算单位长度质量,3个试件取均值。通过锈蚀前后单位长度质量变化求得钢筋锈蚀率。根据GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》测量混凝土试块抗压强度与劈裂抗拉强度。采用SYE-2000D电液式压力机进行抗压试验,力控加载速度为0.3 MPa/s。采用SHT4305微机控制电液伺服万能试验机进行劈裂抗拉试验,加载速度为0.05 MPa/s。

2 结果与讨论

2.1 钢筋混凝土试件表现演化

图3展示了钢筋混凝土试件在单一氯盐与复合氯盐-硫酸盐侵蚀环境中表现形貌的演化规律。可以看出,硫酸盐的存在改变试件胀裂前的表现特征,对胀裂后形貌影响不大。由图3(b)可知,在5% NaCl 溶液中通电18 d后,试件表面出现“白须”。NaCl 溶液长期浸泡与通电清水环境中混凝土表面均出现“白须”^[14-15],经X射线衍射分析证实为CaCO₃。这是长期浸泡或通电环境导致大量Ca²⁺溶蚀,与外界CO₂及CO₃²⁻反应生成CaCO₃在混凝土表面沉积所致。由图3(c)可知,锈胀裂缝更易在“白须”聚集处开展,原因可能是Ca²⁺溶蚀导致微结构劣化,在锈胀力作用下更易开裂。

复合侵蚀下,试件表面并未出现“白须”,而是粉化发白并伴有大量盐结晶,如图3(e)所示。可以推测大量SO₄²⁻在通电作用下侵入混凝土,与溶蚀Ca²⁺反应生成CaSO₄·2H₂O,取代CaCO₃。同时近表层孔隙中存在高浓度Na₂SO₄,水分蒸发后形成Na₂SO₄·10H₂O沉积在混凝土表面。由图3(f)可知,试件表面锈胀裂缝内部出现透明晶体,周围存在显著盐析。

开裂后,有害介质更易侵入,裂缝宽度增加且锈蚀产物溢出,硫酸盐的影响不再显著,如图3(d)、(g)所示。此外,锈蚀产物为红褐色,与自然锈蚀颜色接近,表明采用200 μA/cm² 电流密度是合理的。

图4给出了试件表面平均裂缝宽度的演化规律。可以看出,胀裂时间因硫酸盐的存在有所延长,裂缝开展速率略有降低,Wang等^[9]也得出了相同的结果。通电复合溶液环境中,电流同时迁移SO₄²⁻与Cl⁻,腐蚀效率低于单一氯盐溶液;SO₄²⁻也会阻碍Cl⁻侵入混凝土^[4,14],延缓钢筋锈蚀,进而推迟锈胀裂缝开展。因此,有必要分析SO₄²⁻对钢筋锈蚀特征的影响。

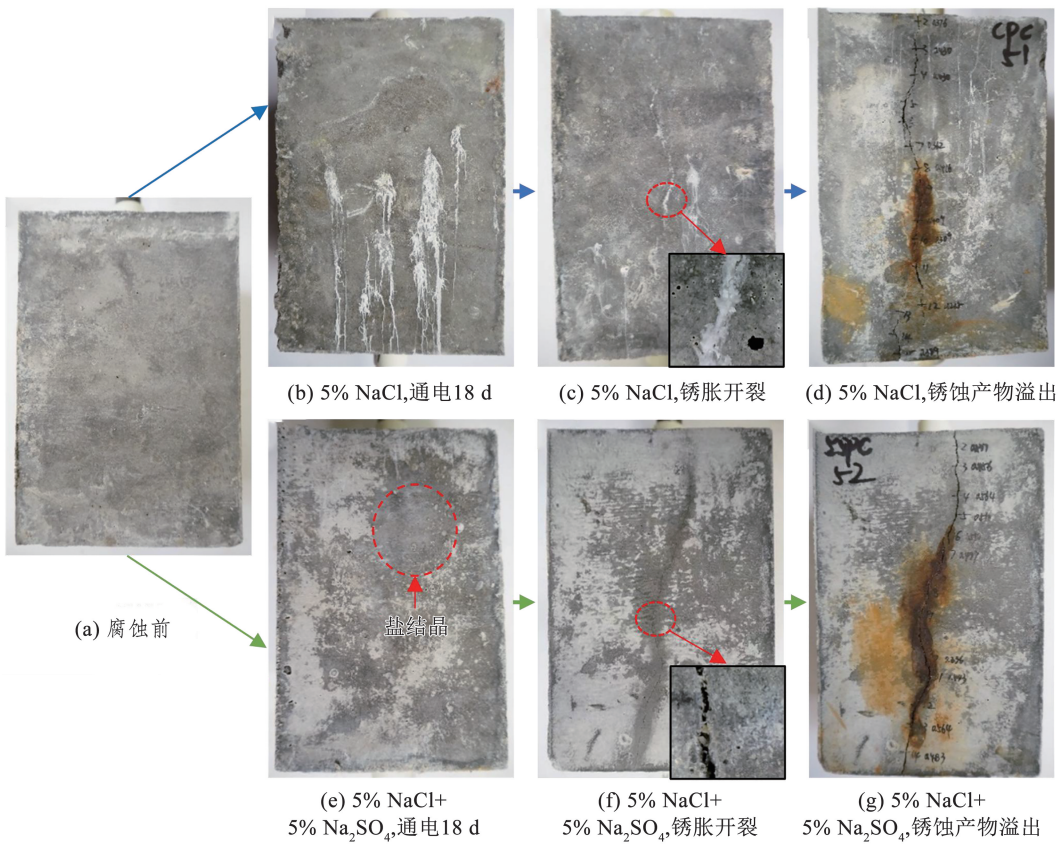


图 3 钢筋混凝土试件表现形貌演化

Fig. 3 Evolution of visual appearance of the reinforced concrete samples

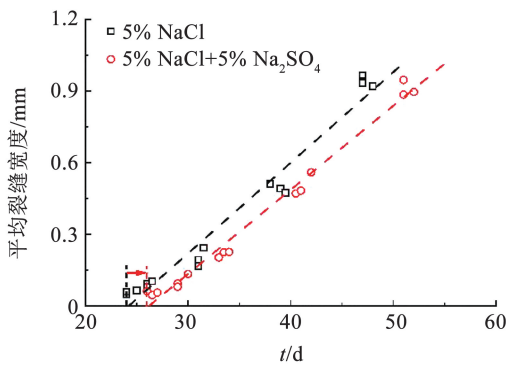


图 4 锈胀裂缝宽度随通电时间的变化

Fig. 4 Evolution of average width of corrosion-induced crack with power-on time

2.2 钢筋锈蚀特征

不同侵蚀环境下钢筋锈蚀形貌见图 5, 钢筋两面均被展示。由图 5(a) ~ (c) 可知, 通电作用引起钢筋环向不均匀锈蚀, 该现象在 Chen 等^[16]的研究中也有报道。锈蚀由横肋顶部逐渐向纵肋发展, 图 5(b) 中钢筋横肋顶部冒出红棕色锈水, 而随着锈蚀发展, 纵肋锈蚀显著, 出现较大的局部锈蚀区域, 如图 5(c) 所示。经统计, 开裂面与纵肋面平行的试件占总胀裂试件 75%, 表明胀裂大多由纵肋处锈蚀

产物累积膨胀引起。对比图 5(a) ~ (c) 和图 5(d) ~ (f) 可知, 通电初期(6 d), 复合盐溶液中钢筋锈蚀较单一氯盐溶液缓慢, 锈迹不明显。但胀裂后, 两种环境中钢筋锈蚀形貌及其演化规律相似。

图 6 展示了钢筋锈蚀率随通电时间的变化。可以看出, 无论是单一还是复合盐溶液, 胀裂前, 钢筋锈蚀率实测值远低于法拉第定律理论值。通电早期, 钝化膜导致钢筋具有高电势, 难以被氧化, 电流主要被水解反应消耗^[17]; 水解导致阳极区碱性降低, 且电场加速 Cl^- 侵入, 钝化膜破损, 钢筋氧化反应开始占主导。但胀裂前, 保护层电阻较大, 电流回路中存在发热损耗^[18], 钢筋锈蚀率随通电时间发展仍较为缓慢。相似的现象在徐港等^[19]的研究中也有报道。胀裂后, 发热损耗大大减少, 且 Cl^- 、 O_2 等极易侵入, 钢筋充分锈蚀, 实测锈蚀率的增长量与理论增长量相近。31 ~ 38 d, 5% NaCl 溶液中钢筋锈蚀率增加了 1.04%, 与理论增加值(1.17%)相近。此外, 5% NaCl + 5% Na_2SO_4 溶液中钢筋锈蚀率低于 5% NaCl 溶液, 胀裂前, SO_4^{2-} 显著抑制钢筋锈蚀; 胀裂后, 钢筋锈蚀主要由外加电流控制, SO_4^{2-} 的影响微弱。

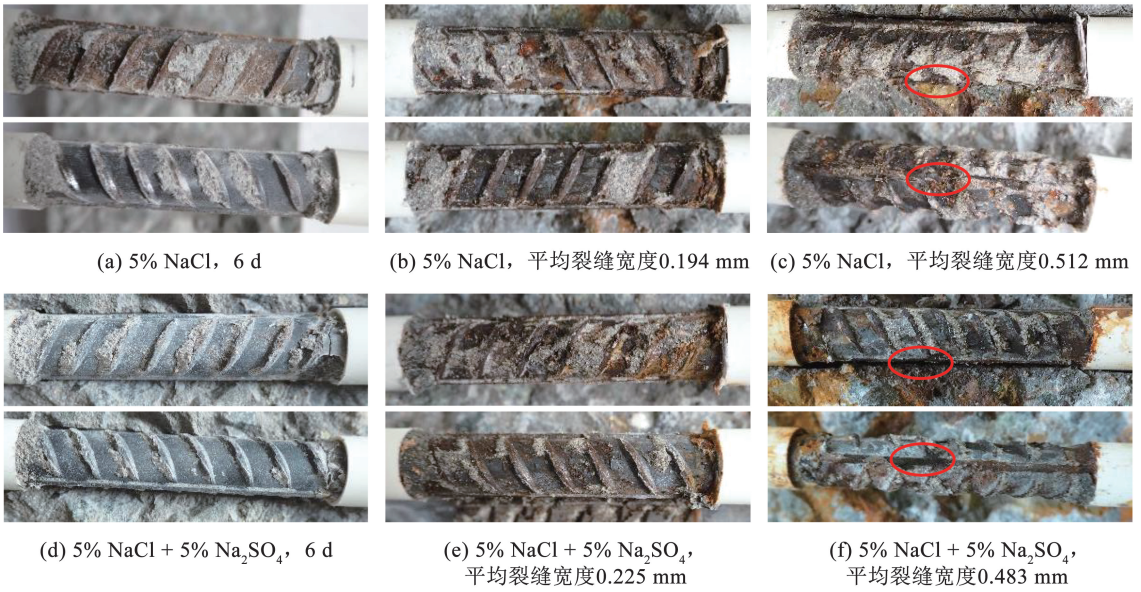


图 5 钢筋锈蚀形貌演化

Fig. 5 Evolution of morphology of corroded reinforcement

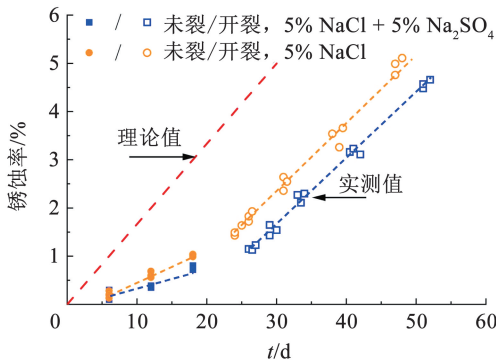


图 6 钢筋锈蚀率随通电时间的变化

Fig. 6 Evolution of corrosion level of reinforcement with power-on time

为准确描述钢筋锈蚀率的发展情况,在法拉第定律的基础上,提出钢筋锈蚀率 η (按质量计) 随时间变化的分段表达式:

$$\eta = \begin{cases} k \frac{4iMt}{\rho_s nDF}, 0 \leq \eta \leq \eta_{cr} \\ \eta_{cr} + \frac{4iM(t - t_{cr})}{\rho_s nDF}, \eta_{cr} < \eta \end{cases} \quad (1)$$

式中: k 为胀裂前通电锈蚀效率,取 $0.1 \sim 0.7$ [17-19], 本研究中,对于 $5\% \text{ NaCl}$ 溶液, $k = 0.62$, 对于 $5\% \text{ Na}_2\text{SO}_4 + 5\% \text{ NaCl}$ 溶液, $k = 0.46$; i 为腐蚀电流密度; M 为铁的摩尔质量; t 为通电时间; ρ_s 为钢筋密度; n 为反应电荷数; F 为法拉第常数; D 为钢筋直径; η_{cr} 为胀裂时钢筋锈蚀率; t_{cr} 为胀裂时间。

通过锈胀裂缝宽度预测 RC 结构内部钢筋锈蚀程度是适用于实际评估的非破损检测方法,学者们对二者的相关性开展研究,线性关系被广泛报道 [20-21]。故运用下式对锈胀裂缝宽度与钢筋锈蚀

率进行分析:

$$w = m\eta + l \quad (2)$$

式中: w 为锈胀裂缝平均宽度; m, l 为参数,与腐蚀环境、保护层厚度等相关。

同时采用文献 [22-23] 数据按上式进行回归分析,结果如图 7 所示。可以看出,线性关系式能够很好地描述裂缝宽度随钢筋锈蚀率的发展,适用于多种腐蚀情况。 SO_4^{2-} 腐蚀混凝土导致裂缝宽度随钢筋锈蚀的发展速率略有增加。由于复合侵蚀的数据有限, SO_4^{2-} 腐蚀混凝土对裂缝开展的影响规律仍需进一步探究。

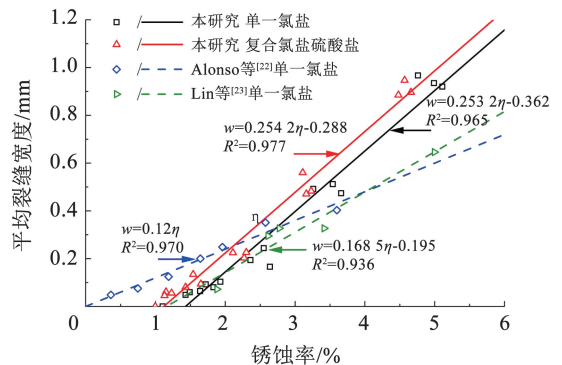


图 7 锈胀裂缝宽度与锈蚀率的线性关系

Fig. 7 Linear relationship between average width of crack and corrosion level of reinforcement

2.3 混凝土性能演化

2.3.1 表观形貌

通电 $5\% \text{ Na}_2\text{SO}_4$ 溶液环境中,混凝土试块表观形貌如图 8 所示。可以看出,通电作用显著加快硫

酸盐损伤混凝土。通电 12 d 后,混凝土表面出现显著盐析,如图 8(b)所示。随着腐蚀程度增加,大量 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 沉积,导致表面粉化发白,且局部裂缝

开展,如图 8(c)所示。结合图 3 可知,通电作用下,5% Na_2SO_4 溶液中混凝土表面观形貌演化与复合溶液情况相近,均展现了显著的硫酸盐腐蚀特征。

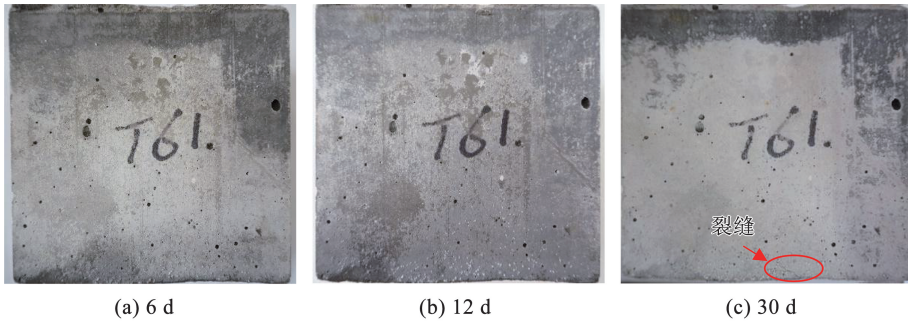


图 8 混凝土试块表面观形貌演化

Fig. 8 Evolution of visual appearance of concrete samples

2.3.2 力学性能

图 9 给出了混凝土试块破坏形态。可以看出,中置一定尺寸的钛片对混凝土力学破坏形态无影响,抗压破坏呈现典型的“锥形模式”压缩破坏;劈裂抗拉破坏中,劈裂裂缝位于荷载作用线上,近乎直线。

表 3 给出了通电环境中受硫酸盐腐蚀混凝土的抗压强度与劈裂抗拉强度演化。可以看出,中置钛片不影响混凝土试块的抗压与劈裂抗拉强度。硫酸盐通电作用下,受腐蚀混凝土抗压强度先增长后降低,劈裂抗拉强度呈下降趋势,与硫酸盐长期浸泡下的演化规律相同^[24-25]。

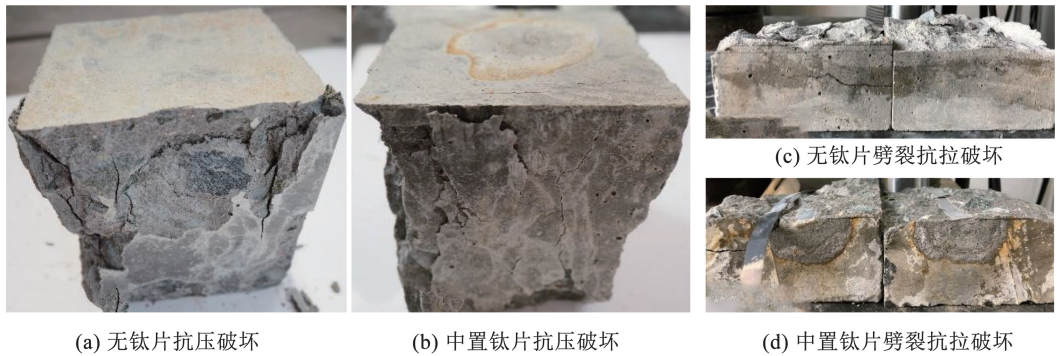


图 9 中置钛片对混凝土破坏形态的影响

Fig. 9 Effect of the central titanium sheet on the failure mode of concrete

表 3 通电作用下受硫酸盐腐蚀混凝土的抗压与劈裂抗拉强度

Tab. 3 Compressive strength and tensile splitting strength of concrete under sulfate attack with electric field

组别	侵蚀时间/d	抗压强度/MPa				劈裂抗拉强度/MPa			
		1	2	3	均值	1	2	3	均值
无钛片	0	48.44	46.46	42.89	45.93	5.10	4.70	4.61	4.80
	0	47.65	41.66	45.37	44.89	4.87	4.87	4.66	4.80
	6	42.83	50.95	47.21	47.00	4.77	4.87	4.54	4.73
中置钛片	12	44.28	53.95	47.71	48.65	4.75	4.37	4.58	4.57
	18	46.71	47.45	45.11	46.42	4.61	4.25	4.36	4.41
	24	44.45	45.76	41.41	43.87	4.08	4.35	4.23	4.22
	30	38.08	41.03	42.44	40.52	4.27	4.07	4.04	4.12

硫酸盐腐蚀是由外向内的过程,混凝土截面不均匀腐蚀,试验获得的劈裂抗拉强度由截面均匀腐蚀假定得到,反映受腐蚀截面整体抗拉能力的变化。

混凝土抗拉强度决定了保护层所能提供的最大锈胀力。本文的胀裂模型假定胀裂时混凝土截面拉应力均达到其抗拉强度(3.2 节),此时,最大锈胀力来源

于截面整体抗拉能力。故此处假定混凝土沿截面均匀腐蚀,获得混凝土抗拉强度演化规律,支撑后续的胀裂分析。

定义混凝土腐蚀程度

$$\alpha = \frac{f_{t,sp}(t)}{f_{t,sp0}} \quad (3)$$

式中: $f_{t,sp}(t)$ 为腐蚀 t d后混凝土劈裂抗拉强度, $f_{t,sp0}$ 为未腐蚀混凝土劈裂抗拉强度。

结合文献[25]和本文数据,提出经验公式描述腐蚀程度演化,即

$$\alpha = at^2 + bt^{1.5} + 1 \quad (4)$$

式中 a 、 b 为参数,与混凝土配比、腐蚀环境等相关。对表3中劈裂抗拉强度数据回归分析得到 $a = 1.67 \times 10^{-4}$, $b = -1.79 \times 10^{-3}$,相关系数 R^2 为0.996。

当前大多由混凝土劈裂抗拉强度推求其抗拉强度 f_t , $f_t = \alpha f_{t,sp}$, A 为经验系数,欧洲模型规范^[26]推荐取为0.9,故受腐蚀混凝土抗拉强度 $f_t(t)$ 演化的经验公式为

$$f_t(t) = \alpha A f_{t,sp0} = 0.9(at^2 + bt^{1.5} + 1)f_{t,sp0} \quad (5)$$

3 胀裂时间预测模型

3.1 锈胀力计算模型

本文重点关注混凝土腐蚀对钢筋混凝土锈裂行为的影响,且采用通电加速腐蚀试验,故采用均匀锈蚀假定,并在ES模型^[6]基础上考虑锈蚀产物对裂缝的填充作用,建立锈胀力计算模型。图10给出了保护层胀裂过程示意。需要注意的是,自然锈蚀钢筋呈现非均匀特性,均匀锈蚀模型的实际应用仍有一定的局限性。

在锈胀力 q 作用下,钢筋周边混凝土的径向位移 δ_c 为

$$\delta_c = Kq \quad (6)$$

式中 K 为混凝土孔洞的径向柔度系数。

钢筋混凝土界面处为多孔区,待锈蚀产物填充完该区域后产生锈胀力。根据弹性力学厚壁圆筒内部径向位移与内压关系,可得

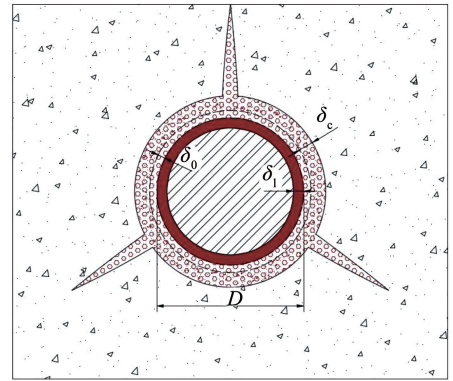
$$K = \frac{(\phi + 1 + \nu)(D + 2\delta_0)}{2E_{ef}} \quad (7)$$

$$\phi = \frac{(c + D)^2}{2c(c + D + 2\delta_0)} \quad (8)$$

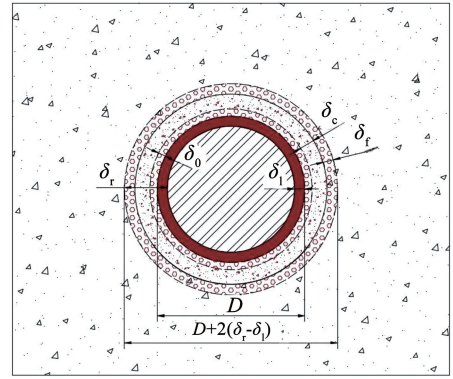
式中: c 为混凝土保护层厚度; D 为钢筋直径; δ_0 为多孔区厚度; ν 为混凝土泊松比; E_{ef} 为混凝土有效弹性模量, $E_{ef} = E_c / (1 + \varphi_{cr})$; E_c 为混凝土弹性模量; φ_{cr} 为混凝土蠕变系数。

ES模型未考虑裂缝扩展过程中锈蚀产物填充裂缝的情况。文献[7]指出不应忽视这一过程,并

将裂缝面积以三角形计算。因此,假定锈蚀产物完全填充锈胀裂缝,裂缝为等腰三角形,其顶点位于开裂前沿,将填充裂缝的锈蚀产物体积折算为锈蚀产物厚度引入至ES模型中,如图10所示。



(a) 锈蚀产物胀裂混凝土



(b) 简化锈层

图10 混凝土保护层胀裂

Fig. 10 Corrosion-induced cracking of concrete cover

已知柔度系数,还需确定混凝土径向位移 δ_c ,忽略锈蚀产物压缩变形的影响^[5-7],由变形协调可得

$$\delta_c = \delta_r - \delta_1 - \delta_0 - \delta_r \quad (9)$$

式中: δ_r 为锈蚀产物厚度, δ_r 为锈蚀产物填充裂缝折算的厚度, δ_1 为钢筋锈蚀损失厚度。

内部开裂混凝土切向应变为 $\varepsilon_\theta = 2\delta_c/D$,裂缝总宽度 $W = \pi D \varepsilon_\theta$,近似得到裂缝体积 $\Delta V_c = Wc/2$,则

$$\delta_r = \frac{\Delta V_c}{\pi D} = \frac{Wc}{2\pi D} = \frac{c}{D} \delta_c \quad (10)$$

如图10(b)所示,将单位长度体积的改变以直径的变化来表示,即

$$\frac{m_r}{\rho_r} - \frac{m_1}{\rho_s} = \frac{\pi}{4} \{ [D + 2(\delta_r - \delta_1)]^2 - D^2 \} \quad (11)$$

式中: m_r 为单位长度钢筋锈蚀产物质量; m_1 为单位长度钢筋质量; ρ_r 为铁锈密度, ρ_s 为钢筋密度, $\rho_r = 0.5\rho_s$; $m_1 = \gamma m_r$, γ 为铁与铁锈的摩尔质量比(0.523 ~ 0.622),选取均值0.573,可得

$$\delta_c = \left(\frac{\eta D}{160} - \delta_0 \right) \frac{D}{c + D} \quad (12)$$

则锈胀力与锈蚀率的关系为

$$q = \frac{\eta E_{ef} D^2}{80(1 + \nu + \phi)(D + 2\delta_0)(c + D)} - \frac{2\delta_0 E_{ef} D}{(1 + \nu + \phi)(D + 2\delta_0)(c + D)} \quad (13)$$

3.2 考虑硫酸盐影响的胀裂时间预测模型

假定胀裂时刻混凝土完全进入塑性状态,即混凝土截面上的环向拉应力均达到 f_t 时,保护层开裂。此时,最大锈胀力为

$$q_{max} = f_t \frac{2c}{D} \quad (14)$$

将式(14)代入式(13),得保护层胀裂控制方程

$$\frac{\eta E_{ef} D^2}{80(1 + \nu + \phi)(D + 2\delta_0)(c + D)} - \frac{2\delta_0 E_{ef} D}{(1 + \nu + \phi)(D + 2\delta_0)(c + D)} = \frac{2c}{D} f_t \quad (15)$$

对于单一氯盐侵蚀,混凝土抗拉强度不变,可由式(15)求解胀裂时钢筋锈蚀率,得到胀裂时间。但复合侵蚀下,硫酸盐的存在改变混凝土抗拉强度,影响钢筋锈蚀发展,故将式(15)表达为腐蚀时间控制的方程

$$\int_{t-t_i}^t i(t) dt - \frac{c(1 + \nu + \phi)(D + 2\delta_0)(c + D)}{69\eta\rho_s} - \frac{E_{ef} D^2}{E_{ef} D^2} f_t(t) = \delta_0 \quad (16)$$

式中: $i(t)$ 为钢筋腐蚀电流密度, t_i 为钢筋开始锈蚀时间。

式(16)也适用于单一氯盐侵蚀环境。为了验证模型,采用本研究及文献[5,7,27-29]数据验证,模型参数及计算结果如表4所示。其他模型参数为定值: $\nu=0.18, \delta_0=20 \mu\text{m}, \phi_{cr}=2.35$ 。需要说明的是:

1)由于文献大多采用通电加速钢筋锈蚀试验手段,可忽略 t_i 。Liu 和 Weyers^[5]在试件中掺加氯盐诱发钢筋锈蚀,后置于野外环境,也可忽略 t_i 。

2)对于单一氯盐环境, $f_t(t) = f_{t0}$ 。由于保护层混凝土力学性能难以获得,采用伴随腐蚀的混凝土试块抗拉强度进行验证, $f_t(t)$ 按式(5)计算,从而反映保护层混凝土腐蚀劣化的影响。

3)由于胀裂前钢筋锈蚀率远低于法拉第定律理论值,参考文献[28],并根据式(1)修正腐蚀电流密度。分别采用单一、复合盐环境中的钢筋腐蚀电流密度修正值以反映硫酸盐的影响。

表 4 混凝土胀裂时间试验值与预测值对比

Tab. 4 Prediction and test values of time to cover cracking

文献	侵蚀环境						胀裂时间/h		
	腐蚀溶液	腐蚀电流密度/ ($\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)	D/mm	c/mm	E_c/GPa	f_t/MPa	试验值	预测值	胀裂时间 误差/%
[7]	5% NaCl	100	16	29.5	24.4	3.7	194.7	223.1	14.6
		150	16	29.5	24.4	3.7	116.0	148.8	28.2
		100	16	19.5	24.4	3.7	155.7	150.0	-3.6
[27]	5% NaCl		16	25	32.7 ^a	4.55	223.1	177.1	-20.1
		100	16	50	32.7 ^a	4.55	490.3	412.1	-16.1
			20	50	29.3 ^a	3.94	402.8	400.5	-0.5
[28]	5% NaCl	1 150 ^c	12.7	31.8	26.8 ^a	3.5 ^b	21.9	21.0	-4.2
		1 450 ^c	19	31.8	26.8 ^a	3.5 ^b	13.9	14.1	1.3
		2 580 ^c	25.4	31.8	26.8 ^a	3.5 ^b	7.1	7.3	2.5
[29]	2% NaCl	120	21	27.5	32.0 ^a	5.0 ^b	288	243	-15.6
		80	21	65.7	32.0 ^a	5.0 ^b	504	485	-3.8
[5]	内掺氯盐后 野外暴露	3.75	16	27	25.2 ^a	3.15 ^b	6 307.2	4 730.4	-25.0
		2.41	16	48	25.2 ^a	3.15 ^b	16 118.4	14 696.6	-8.8
		1.79	16	70	25.2 ^a	3.15 ^b	31 010.4	35 023.6	12.9
本文	5% NaCl	62.1 ^c	16	42	30.2 ^a	4.32	567.0	530.6	-7.8
	5% NaCl + 5% Na ₂ SO ₄	46.0 ^c	16	42	30.2 ^a	式(2)	624	647.0	3.7

注:a)无实测值时, E_c 按文献[7]计算;b)无实测值时, $f_t = 1/10 f_c, f_c$ 为混凝土立方体抗压强度标准值;c)腐蚀电流密度修正值。

由表4可知,模型预测值与试验值符合良好。本研究将锈蚀产物对裂缝的填充作用引入ES模型,并将硫酸盐的影响考虑至混凝土抗拉强度、钢筋腐蚀电流密度中,可以准确预测复合侵蚀下混凝土胀裂时刻。值得一提的是,Wang等^[9]采用数字图像相关法计算钢筋锈胀力,发现3% NaCl + 5% Na₂SO₄溶液作用下,试件胀裂时最大锈胀力较3% NaCl溶液下降11.1%。根据胀裂时间与式(5),本研究中复合侵蚀下胀裂时混凝土抗拉强度为3.81 MPa,再由式(14)可知最大锈胀力较单一氯盐侵蚀环境下降了11.8%,与文献[9]相近。这表明伴随腐蚀试验中混凝土腐蚀程度可以表征保护层的腐蚀损伤,基于该试验得到的混凝土抗拉强度演化规律可以用于计算胀裂时间,反映复合侵蚀下保护层损伤对锈裂行为的影响。

4 结 论

1) 复合侵蚀下,硫酸盐的存在改变混凝土胀裂前表现观貌,使得单一氯盐环境下的“白须”消失,表面粉化发白且出现盐结晶。

2) 硫酸盐的存在不影响复合侵蚀下钢筋锈蚀形貌,但在胀裂前显著降低钢筋锈蚀率,从而延长混凝土保护层胀裂时间。锈胀裂缝宽度与钢筋锈蚀率线性相关,受硫酸盐腐蚀混凝土增大了裂缝随锈蚀发展速率。

3) 为明确复合侵蚀下硫酸盐对混凝土保护层的劣化作用,设计伴随的混凝土腐蚀试验。基于混凝土劈裂抗拉强度演化,提出腐蚀程度指标,建立受腐蚀混凝土的抗拉强度演化经验公式。复合侵蚀降低混凝土抗拉性能,将加剧RC结构长期性能的劣化。

4) 在经典ES锈胀模型中考虑锈蚀产物对裂缝的填充作用,并将硫酸盐的影响考虑至混凝土抗拉强度、钢筋腐蚀电流密度中,建立复合侵蚀下保护层胀裂时间预测模型,准确描述钢筋混凝土锈裂特征。

参考文献

[1] LIU Qingfeng, CAI Yuxin, PENG Hui, et al. A numerical study on chloride transport in alkali-activated fly ash/slag concretes [J]. *Cement and Concrete Research*, 2023, 166: 107094. DOI: 10.1016/j.cemconres.2023.107094

[2] MENG Zhaozheng, LIU Qingfeng, XIA Jin, et al. Mechanical-transport-chemical modeling of electrochemical repair methods for corrosion-induced cracking in marine concrete [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2022, 37(14): 1854. DOI: 10.1111/mice.12827

[3] 李镜培, 李林, 陈浩华, 等. 腐蚀环境中混凝土桩基耐久性研究进展 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(12): 1

LI Jingpei, LI Lin, CHEN Haohua, et al. Advances in concrete pile durability in corrosive environment [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(12): 1. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201708027

[4] ZHANG Chenglin, CHEN Weikang, MU Song, et al. Numerical investigation of external sulfate attack and its effect on chloride binding and diffusion in concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 285: 122806. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122806

[5] LIU Y, WEYERS R E. Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures [J]. *ACI Materials Journal*, 1998, 95(6): 675

[6] MAADDAWY T, SOUDKI K. A model for prediction of time from corrosion initiation to corrosion cracking [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2007, 29(3): 168. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.11.004

[7] LU Chunhua, JIN Weiliang, LIU Ronggui. Reinforcement corrosion-induced cover cracking and its time prediction for reinforced concrete structures [J]. *Corrosion Science*, 2011, 53(4): 1337. DOI: 10.1016/j.corsci.2010.12.026

[8] LIANG Yongqin, WANG Licheng. Prediction of corrosion-induced cracking of concrete cover: a critical review for thick-walled cylinder models [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 213: 107688. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107688

[9] WANG Xiaoxian, LIU Jiaping, JIN Zuquan, et al. Real-time strain monitoring of reinforced concrete under the attacks of sulphate and chloride ions based on XCT and DIC methods [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 125: 104314. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104314

[10] 孟祥晖, 冯琼, 张云升, 等. 盐渍土环境下钢筋混凝土腐蚀劣化行为及竞争失效分析 [J]. *材料导报*, 2023, 37(14): 22010281

MENG Xianghui, FENG Qiong, ZHANG Yunsheng, et al. Analysis of corrosion-induced deterioration behavior and competing failure of reinforced concrete in saline soil environment [J]. *Materials Reports*, 2023, 37(14): 22010281. DOI: 10.11896/cldb.22010281

[11] 俞小彤, 於宪刚, 赵亚州, 等. 一种研究硫酸盐侵蚀下混凝土性能劣化的加速试验装置: 202011049881.8 [P]. 2021-01-05

YU Xiaotong, YU Xiangang, ZHAO Yazhou, et al. An acceleration equipment for study on the concrete deterioration under sulfate attack: 202011049881.8 [P]. 2021-01-05

[12] 王建. 硫酸盐与氯盐对水泥基材料侵蚀的研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015

WANG Jian. Research on the mechanical of sulphate and chloride attack to cement based material [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2015

[13] HONG Shuxian, SHI Guiyun, ZHENG Fan, et al. Characterization of the corrosion profiles of reinforcement with different impressed current densities by X-ray micro-computed tomography [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 109: 103583. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103583

[14] 李琳琳. 不同机制下硫酸盐对混凝土的腐蚀及氯盐抑制机理的研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016

LI Linlin. Study on the sulfate corrosion of concrete under different conditions and inhibition mechanism of chloride [D]. Xuzhou:

- China University of Mining and Technology, 2016
- [15] 李高年. 杂散电流与硫酸盐耦合作用下水泥基材料的劣化机理 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021
LI Gaonian. Degradation mechanism of cement-based materials exposed to the coupling effects of stray current and sulfate [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021
- [16] CHEN E, TANG Shengwen, LEUNG C K Y. Corrosion-induced cracking in reinforced concrete due to chloride contamination and ingress [J]. *ACI Materials Journal*, 2019, 116(5): 99. DOI: 10.14359/51716831
- [17] HONG Sunxian, ZHENG Fan, SHI Guiyun, et al. Determination of impressed current efficiency during accelerated corrosion of reinforcement [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 108: 103536. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103536
- [18] FENG Weiping, DONG Zhijun, LIU Wei, et al. An experimental study on the influence of applied voltage on current efficiency of rebars with a modified accelerated corrosion test [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 122: 104120. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104120
- [19] 徐港, 张瑞, 彭艳周, 等. 保护层胀裂前钢筋通电锈蚀特性影响因素研究 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(3): 127
XU Gang, ZHANG Rui, PENG Yanzhou, et al. Study on influence factors of corroded characteristics of reinforcing bars under galvanostatic accelerated corrosion before concrete cover cracking [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 45(3): 127. DOI: 10.13245/j.hust.170323
- [20] BENENATO A, FERRACUTI B, IMPERATORE S, et al. Corrosion level estimation by means of the surface crack width [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 342: 128010. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128010
- [21] ZHAO Yuxi, YU Jiang, HU Bingyan, et al. Crack shape and rust distribution in corrosion induced cracking concrete [J]. *Corrosion Science*, 2012, 55: 385. DOI: 10.1016/j.corsci.2011.11.002
- [22] ALONSO C, ANDRADE C, RODRIGUEZ J, et al. Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion [J]. *Materials and Structures*, 1998, 31(7): 435. DOI: 10.1007/BF02480466
- [23] LIN Hongwei, ZHAO Yuxi, OZBOLT J, et al. Bond strength evaluation of corroded steel bars via the surface crack width induced by reinforcement corrosion [J]. *Engineering Structures*, 2017, 152: 506. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.08.051
- [24] 梁咏宁, 袁迎曙. 硫酸盐腐蚀后混凝土单轴受压本构关系 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, 40(4): 532
LIANG Yongning, YUAN Yingshu. Constitutive relation of sulfate attacked concrete under uniaxial compression [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2008, 40(4): 532
- [25] 张璇. 硫酸盐侵蚀环境下混凝土断裂性能试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019
ZHANG Xuan. Experiment study on fracture behaviors of concrete exposed to different sulfate environment [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019
- [26] CEB-FIP. FIB model code for concrete structures 2010 [S]. Lausanne: [s. n.], 2013
- [27] VU K, STEWART M G, MULLARD J. Corrosion-induced cracking: experimental data and predictive models [J]. *ACI Structural Journal*, 2005, 102(5): 719
- [28] RASHEEDUZZAFAR B, AL-SAADOUN S S, AL-GAHTANI A S. Corrosion cracking in relation to bar diameter, cover, and concrete quality [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1992, 4(4): 327
- [29] TORRES-ACOSTA A A, SAGUES A A. Concrete cracking by localized steel corrosion-geometric effects [J]. *ACI Materials Journal*, 2004, 101(6): 501

(编辑 刘彤)