



建筑材料学报  
*Journal of Building Materials*  
ISSN 1007-9629, CN 31-1764/TU

## 《建筑材料学报》网络首发论文

- 题目： 基于可靠性的恒加速钢筋混凝土试验研究  
作者： 尚明刚，张云升，何忠茂，乔宏霞，冯琼，薛翠真，韩照  
收稿日期： 2021-05-06  
网络首发日期： 2021-08-03  
引用格式： 尚明刚，张云升，何忠茂，乔宏霞，冯琼，薛翠真，韩照. 基于可靠性的恒加速钢筋混凝土试验研究. 建筑材料学报.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20210803.0856.004.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 基于可靠性的恒加速钢筋混凝土试验研究

尚明刚<sup>1</sup>, 张云升<sup>1</sup>, 何忠茂<sup>1, 2</sup>, 乔宏霞<sup>1</sup>, 冯琼<sup>1</sup>, 薛翠真<sup>1</sup>, 韩照<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃兰州 730050; 2. 宁波大学科学技术学院, 浙江宁波 315211)

**摘要:**针对钢筋混凝土在盐渍土环境中腐蚀劣化的问题,选用恒电流加速腐蚀试验,结合石蜡隔离层控制  $\text{Cl}^-$ 迁移路径的试验方法。将一维和二维钢筋混凝土试件作为研究对象,采用极化曲线法(LPR)、 $\text{Cl}^-$ 含量分析法、宏观分析法、SEM 和 EDS 微观分析法等研究双应力钢筋混凝土加速腐蚀规律。建立恒电流加速与  $\text{Cl}^-$ 迁移腐蚀的可靠性双应力劣化模型,实现恒加试验双应力的加速腐蚀劣化机理分析。研究表明:可靠性加速劣化模型推导,一维和二维试件的平均寿命分别为 927 h, 618h, 石蜡层设计能有效隔离腐蚀性离子,实现单一加速应力控制的实验目的;钢筋混凝土在恒加试验中腐蚀劣化主要受恒加电流与  $\text{Cl}^-$ 扩散的双应力交错叠加影响;钢筋混凝土在恶劣环境服役,建议以“前防锈,后防渗”的研究思路探索,即正常服役期间重点关注钢筋锈蚀引起的腐蚀劣化,裂缝出现后重点关注  $\text{Cl}^-$ 扩散引起的腐蚀劣化。

**关键词:** 可靠性; 极化曲线(LPR); 恒加试验; 平均寿命;  $\text{Cl}^-$ 迁移劣化模型

中图分类号 TP319.56 文献标志码 A

## Experimental Study on Constant Double Stress Accelerated Reinforced Concrete Based on Reliability

SHANG Ming-gang<sup>1</sup>, ZHANG Yun-sheng<sup>1</sup>, HE Zhong-mao<sup>1,2</sup>, QIAO Hong-xia<sup>1</sup>,  
FENG Qiong<sup>1</sup>, XUE Cui-zhen<sup>1</sup>, HAN Zhao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. College of Science & Technology Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of corrosion and deterioration of reinforced concrete in the saline soil environment, a constant current accelerated corrosion test is selected, combined with a paraffin isolation layer to control the  $\text{Cl}^-$  migration path of the test method. Taking the one-dimensional and the two-dimensional reinforced concrete specimens as the research object,

收稿日期: 2021-05-06; 修订日期: 2021-07-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51468039, 51868044, 52008196); 兰州理工大学红柳一流学科建设计划资助; 甘肃省青年科技基金项目(20JR5RA440)

第一作者: 尚明刚(1992-), 男, 甘肃宁县人, 兰州理工大学博士研究生, E-mail: minggangshang@163.com

通讯作者: 张云升(1973-), 男, 河北沧州人, 兰州理工大学教授, 长江学者, 博士生导师, 工学博士. Email: zhangyunsheng2011@163.com.

the polarization curve method (LPR), Cl<sup>-</sup> content analysis method, macro analysis method, SEM and EDS micro analysis method are used to study the accelerated corrosion law of the dual-stress reinforced concrete. Establish the reliability double stress deterioration model of constant current acceleration and Cl<sup>-</sup> migration corrosion, and realize the analysis of the accelerated corrosion deterioration mechanism of double stress in the constant stress test. The results have shown that derived from the reliability accelerated deterioration model, the average life of the one-dimensional and the two-dimensional specimens is 927h, 618h, and the paraffin layer design can effectively isolate corrosive ions and achieve the experimental purpose of single accelerated stress control. The corrosion and deterioration of reinforced concrete in the constant stress test is mainly affected by the double stress interlaced superposition of constant current and Cl<sup>-</sup> diffusion. When reinforced concrete is served in a harsh environment, it is recommended to explore the research ideas of "front the anti-corrosion, rear the anti-seepage". During normal service, focus on corrosion deterioration caused by steel corrosion, and focus on corrosion deterioration caused by Cl<sup>-</sup> diffusion after cracks appear.

**Key words:** reliability; polarization curve (LPR); constant acceleration test; the average life span; Cl<sup>-</sup> migration deterioration model

可靠性工程是一门新兴的边缘学科，现已广泛应用于化工、机械、材料等领域。<sup>[1]</sup>可靠性是部件、元件、产品或系统在规定的环境、时间、条件无故障地完成功能的概率和能力。<sup>[2]</sup>可靠性预测的结果取决于元部件系统可靠性模型和预测的失效率数据。<sup>[3]</sup>根据《建筑结构可靠度设计统一标准》规定，建筑设计寿命为50-80年。钢筋混凝土寿命周期较长的特点增加了寿命研究难度。大多数学者引入加速寿命试验，杨路峰<sup>[4]</sup>量化了海水飞溅区混凝土暴露的环境效应；Ha Won Song<sup>[5]</sup>和Seung Woo Pack<sup>[6]</sup>研究了暴露在海洋中的混凝土结构的扩散系数和表面氯化物含量；Liu Wei<sup>[7]</sup>探索导致海砂混凝土结构退化的原因。刘启东<sup>[8]</sup>设计人工气候模拟加速结构耐久性退化规律的研究；袁应书<sup>[9]</sup>采用人工气候环境和恒流通电方法对钢筋混凝土梁进行加速腐蚀试验。郑凡<sup>[10]</sup>用XCT技术分析通电加速腐蚀试验过程，尚明刚<sup>[11]</sup>用不同的电流密度对钢筋混凝土进行恒流加速试验，ABOSRRA L<sup>[12]</sup>研究了不同抗压强度的混凝土通电和加速后钢筋的腐蚀。may<sup>[13]</sup>研究了钢筋混凝土圆柱在荷载作用下的受电腐蚀损伤行为。自然暴露腐蚀试验周期长，大多数学者选择通电加速快速获取试样。加速腐蚀法主要采用全浸法、半浸法、内置阴极法和贴面法<sup>[14-15]</sup>等短期跟踪试验过程并获得数据。

针对西部盐渍土地区<sup>[16]</sup>钢筋混凝土寿命问题进行室内模拟加速试验，探索复杂腐蚀性离子服役环境对钢筋混凝土寿命的影响。使用格尔木地区湿盐渍土为导电介质<sup>[17]</sup>，设计石蜡层控制单一加速应力。采集钢筋理论质量损失率为0%、1%、2%、3%、4%、5%、6%时，极化曲线、Cl<sup>-</sup>含量、EDS等技术指标。综合分析盐渍土环境中试件的腐蚀劣化机理；恒电流加速与腐蚀性离子双应力作用对钢筋混凝土腐蚀劣化的影响，探索双应力恒加试验腐蚀劣化规律；建立基于可靠性的钢筋混凝土加速试验腐蚀劣化规律及可靠性模型体系。

# 1 试验

## 1.1 原材料

水泥为 P.O 42.5 级水泥。砂选用兰州某厂机制砂，细度模数为 2.9；石子为 5~25 mm 连续级配机制石，压碎指标 4.4%。拌合用自来水。钢筋牌号 HRB 400，直径 12 mm。从格尔木盐渍土地区取回盐渍土，其易溶盐成分测试见表 1，配合比见表 2。

表 1 格尔木地区盐渍土易溶盐测试结果

Table 1 Test results of soluble salts in salted soil in Golmud area

project soil sample	anion content (mg/kg)				cationic content (mg/kg)			the total (%)
	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	
59	181	15648	81016	5840	397	22887	12.603	

表 2 混凝土配合比

Table 2 concrete mix ratio

cement	water	fine aggregate	the aggregate	water reducing agent
450	158	634	1167	1.5%

## 1.2 试验方案

制备 100mm×100mm×100 mm 钢筋混凝土立方体试件。钢筋长度为 70 mm，埋置于混凝土中心位置，一端露出混凝土上表面 20 mm；另一端距离混凝土底部 50 mm，设置保护层厚度 50 mm。石蜡融化后涂抹混凝土成型面、下表面、左侧面和右侧面，使四个表面形成 0.5mm 石蜡隔离层，室温静置 24h，制成一维试件。高温融化的石蜡涂刷混凝土左侧面和右侧面，使试件两个外表面形成 0.5mm 的石蜡隔离层，室温静置 24h，制成二维试件。随后将试件置于翻拌均匀盐渍土中，湿度为 60% ±5%。采用 PS-3002D-a 恒电流仪进行恒加速试验，如图 1。

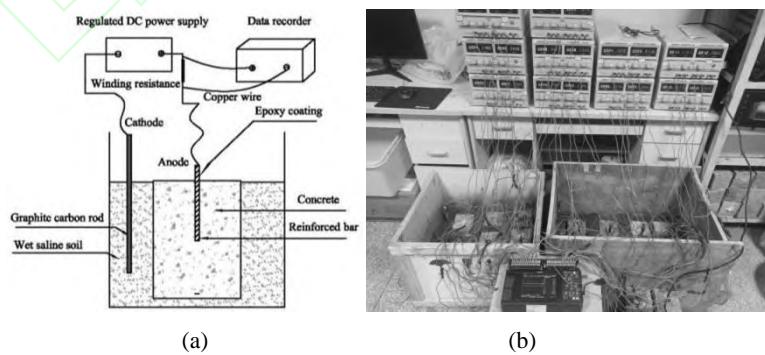


图 1 恒电流加速腐蚀试验：(a)试验示意图;(b)试验现场图

Fig. 1 Constant current accelerated corrosion test :(a) test schematic diagram;(b) Test site drawing

为在预定时间内得到不同腐蚀程度钢筋混凝土试件,本试验预定钢筋锈蚀理论质量损失率为0%、1%、2%、3%、4%、5%、6%,文献[18]认为恒电流加速腐蚀中电流密度设置不超过 $300 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。根据法拉第定理式<sup>[19]</sup>,可以获得钢筋理论质量损失率每增加1%所需恒电流加速通电时间,见表3。

表3 通电时间对照表

Table 3 Comparison table of power on time

Theoretical mass loss rate /%	1	2	3	4	5	6
T/h	206	412	618	824	1030	1236

采用德国 Zahner E 电化学工作站进行电化学测试,其中参比电极为饱和甘汞电极,辅助电极为箔片,试件中钢筋为工作电极,极化曲线扫描范围为相对自腐蚀电位-200~200 mV,扫描速率为0.334 mV/s,频率为0.33 Hz。采用分析软件对极化曲线拟合得出对应自腐蚀电位( $E_{corr}$ )、腐蚀电流密度( $i_{corr}$ )、腐蚀速率( $C_R$ )等指标进行腐蚀程度的评价。可根据表4中腐蚀电流密度与钢筋瞬时锈蚀状态对应关系<sup>[20]</sup>,初步判断钢筋腐蚀状态。

表4 腐蚀电流密度与钢筋锈蚀程度的关系

Table 4 Relationship between corrosion current density and corrosion degree of reinforcement

$i_{corr}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	$i_{corr} < 0.2$	$0.2 < i_{corr} < 0.5$	$0.5 < i_{corr} < 1.0$	$1.0 < i_{corr} < 10$	$i_{corr} > 10$
the corrosion status	passivation state	low corrosion condition	medium corrosive condition	highly corrosive condition	extremely corrosive condition

### 1.3 技术路线

憎水性材料石蜡对钢筋混凝土表面防护能够在混凝土和外界环境间形成隔离层,通过改变混凝土表面性质来阻止或延缓氯离子等有害物质侵入,延缓混凝土中钢筋锈蚀。<sup>[21]</sup>开展恒加速腐蚀试验,建立基于可靠性的双应力加速腐蚀劣化和寿命预测模型,技术路线如图2。

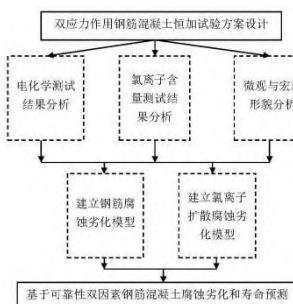


图2 技术路线

Fig. 2 Technical route

## 2 试验结果与分析

### 2.1 石蜡层对恒加试验腐蚀劣化影响的极化曲线谱表征

Stern 和 Geary 等人发展的线性极化法是无损、直接、定量、快速检测混凝土中钢筋锈蚀速率的一种简单方法，根据微极化方程<sup>[22]</sup>，计算自腐蚀电流  $I_{corr}$  的大小。一维和二维试件极化曲线图谱如图 3(a)~(b)，拟合腐蚀电流密度曲线如图 3(c)。

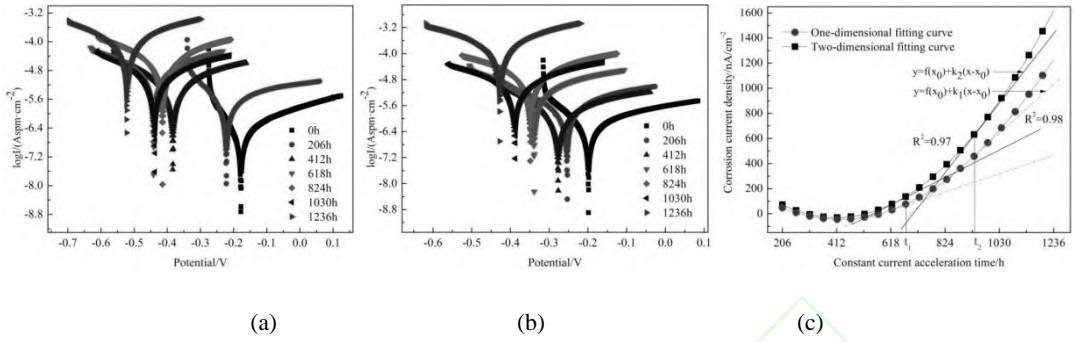


图 3 极化曲线图谱：(a)一维试件;(b)二维试件;(c) 一维和二维试件腐蚀电流密度拟合曲线

Fig. 3 Polarization curves :(a) The one-dimensional specimens;(b) 2D specimens;(c) Fitting curves of corrosion current density of the one-dimensional and the two-dimensional specimens

由图 3(a)可知：恒电流加速 0~1236 h 期间，一维试件横坐标的自腐蚀电位呈负向移动趋势，同时腐蚀电流密度逐渐增大，表明一维钢筋混凝土试件腐蚀逐渐严重；加速 618~824 h 期间，自腐蚀电位出现不规律的正向移动，同时在 824~1030 h 期间，腐蚀电流密度也出现不规律的负向移动，这是腐蚀产物的堆积造成，表明加速腐蚀到一定时间，腐蚀产物的堆积能够延缓腐蚀的发展。图 3(b)中二维试件加速 0~1236 h，横坐标的自腐蚀电位呈负向移动，腐蚀电流密度呈正向移动，表明二维钢筋混凝土试件腐蚀劣化逐渐加速；二维试件的自腐蚀电位没有出现不规律移动，自腐蚀电流密度加速 824~1030 h 时呈不规律的负向移动，与一维试件的不规律移动比较，二维试件的产物堆积对腐蚀的阻碍作用较小。

由图 3(c)可知：二维试件的腐蚀电流密度变化大于一维试件，表明二维试件的腐蚀程度更严重，腐蚀速率更快。一维和二维试件拟合曲线的切线方程分别为  $k_1 = \frac{y-f(t_0)}{t-t_0}$ ,  $k_2 = \frac{y-f(t_0)}{t-t_0}$ ，其中， $k_1 < k_2$ ,  $t_1 < t_2$ ;  $t$  表示恒电流加速的时间， $k$  表示曲线在  $t$  时刻的斜率， $k$  越大表示此刻腐蚀速率越高。在恒电流加速  $t_1$ 、 $t_2$  时，二维试件的  $k_2$  值均大于一维试件的  $k_1$  值，表明二维试件的腐蚀速率比一维试件快；恒电流从  $t_1$  加速到  $t_2$  时，一维和二维试件的  $k$  值不断增大，表明试件的腐蚀速率逐渐增大，加速时间越长，腐蚀速率越大。

## 2.2 石蜡层对恒加试验腐蚀劣化影响的氯离子含量表征

一维试件氯离子含量拟合如图 4(a); 二维如图 4(b); 石蜡隔离层试件氯离子含量见表 4。

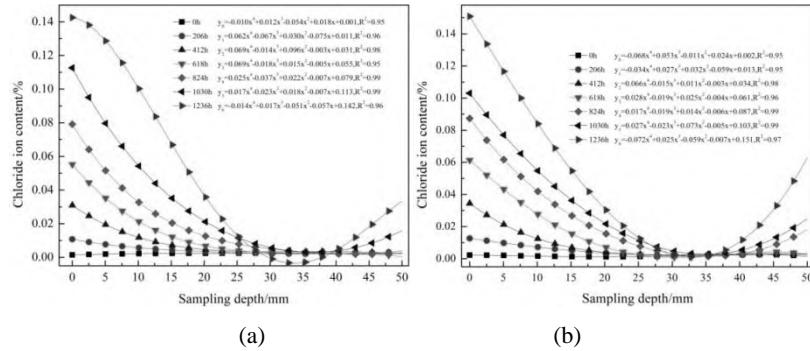


图 4 氯离子含量拟合分布: (a)一维试件深度与氯离子含量关系;(b) 二维试件深度与氯离子含量关系

Fig. 4 Fitting distribution of chloride ion content :(a) Relationship between the depth of one-dimensional specimen and chloride ion content;(b) Relation between two-dimensional specimen depth and chloride ion content

表 5 1236h 石蜡隔离层的混凝土氯离子含量

Table 5 chloride ion content of concrete in paraffin isolation layer at 1236h

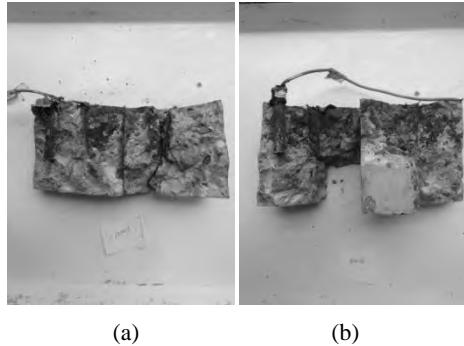
the benchmark /mm	0	5	15	20	25	30	35	40	45	50
the one-dimensional $10^{-3}\%$	1.3	1.8	1.5	1.7	2.1	1.1	1.3	16.5	30.14	38.67
the two-dimensional $10^{-3}\%$	2.4	1.2	1.7	2.1	1.6	1.4	0.5	17.6	38.76	45.21

由图 4(a)可知: 一维试件在 0~30 mm 期间, 加速试件中  $\text{Cl}^-$  的含量由外表面向中心呈逐渐减小的变化趋势, 表明加速试件  $\text{Cl}^-$  的渗透深度与埋置时间呈正比例关系; 30~40 mm 深度,  $\text{Cl}^-$  含量基本趋于稳定, 表明一维试件在 1236 h 时  $\text{Cl}^-$  渗透深度为 30 mm; 40~50 mm 深度, 恒加速 1030 h、1236h 后  $\text{Cl}^-$  含量随深度增加而增大, 一维试件裂缝导致盐渍土中腐蚀性离子渗入钢筋表面, 使钢筋表面腐蚀性离子堆积后外渗。由图 4(b)可知: 二维试件 0~50 mm 期间, 氯离子含量变化规律与一维试件试验结果类似, 渗透深度为 30mm。一维和二维试件 40~50 mm 深度, 二维试件氯离子含量较一维试件大, 这是因为二维试件暴露在盐渍土中的裂缝较多, 表明相同加速条件下, 二维试件的腐蚀程度更大。

由表 5 可知: 深度 0~30 mm 的氯离子含量基本没有变化, 表明石蜡隔离层对腐蚀性氯离子的隔离有效; 深度 35~50 mm 氯离子含量随混凝土厚度增加而增大, 沿裂缝渗入的氯离子反向渗透, 使近钢筋端混凝土氯离子含量大。结合图 4 认为, 氯离子反向渗透的叠加作用能够加快腐蚀进程, 提高腐蚀速率。

### 2.3 石蜡层对恒加试验劣化规律的宏观形貌对比分析

恒加速 1236 h 后一维和二维典型试件破裂后宏观形貌如图 5; 一维和二维微观形貌 6~7。



(a) (b)

图5 试件破裂后宏观形貌: (a)一维试件锈蚀产物及锈蚀钢筋;(b) 二维试件锈蚀产物及锈蚀钢筋

Fig. 5 Macro morphology of specimen after fracture :(a) one-dimensional specimen corrosion products and corroded steel bars;(b) corrosion products of 2D specimens and corroded steel bars

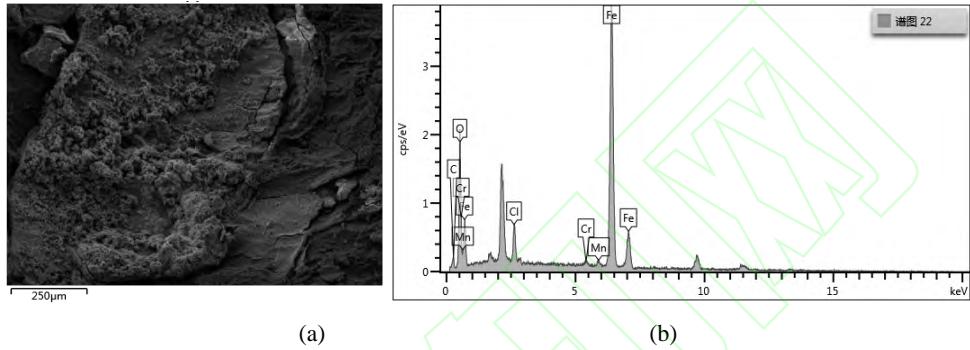


图6 一维典型试件: (a)微观形貌图;(b)EDS 能谱图

Fig. 6 Ten one-dimensional typical specimens :(a) Microscopic morphology;(b) EDS spectrum diagram

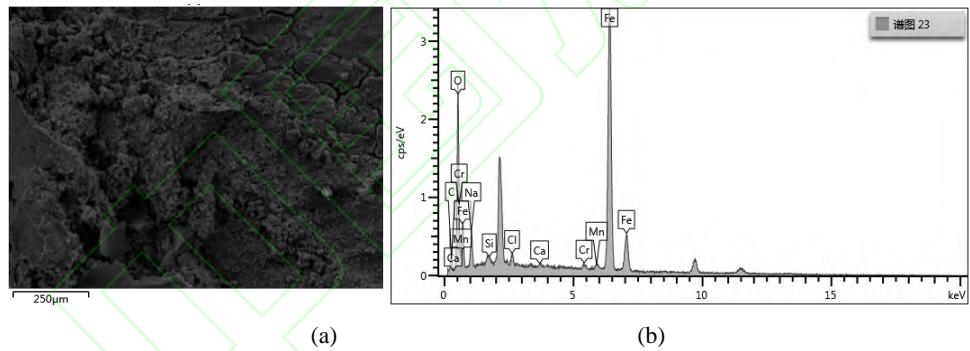


图7 二维典型试件: (a)微观形貌图;(b)EDS 能谱图

Fig. 7 The two-dimensional typical specimens :(a) microscopic morphology;(b) EDS spectrum diagram

由图5可知: 恒加速1236h试件均产生大量铁红色锈蚀产物, 一维和二维试件腐蚀劣化的初始面均为上表面, 腐蚀产物均由内向外扩散, 表明一维和二维试件的加速腐蚀劣化机理近似, 均为内部钢筋锈蚀引起试件出现结构性破坏。二维典型试件的铁红色锈蚀产物渗透面积大于一维典型试件, 表明同等条件多渗透面试件腐蚀劣化更严重。钢筋作为加速试验两电极系统中的阳极, 发生腐蚀劣化机理如式(1)~(4)<sup>[24]</sup>; 氧气不充足部分氧化的化学反应式(5):

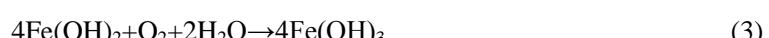




图 6(a)与图 7(a)均为扫描电镜放大  $250\mu\text{m}$  锈蚀钢筋表面形貌, 二者表面均有不同程度的龟状裂纹, 且表面有凹凸不平的块状松散物以及大小和深度不规则的孔洞, 因为钢筋锈蚀过程是点蚀到面试, 表明一维和二维典型试件中钢筋均锈蚀, 有效截面面积均减小。图 6(b)与图 7(b)为典型锈蚀钢筋的 EDS 测试结果, 含有不同程度 O 和 Cl 元素, 表明钢筋表面已经发生铁氧化反应, 盐渍土中氯离子已渗至钢筋表面。氯离子引起钢筋锈蚀机理如式(6)~(8)<sup>[24]</sup>:



综上所述, 钢筋混凝土腐蚀劣化主要是锈蚀钢筋产生体积膨胀的产物, 不断增多堆积产生负向内应力。随锈蚀产物的堆积负向内应力逐渐增大, 造成混凝土胀裂后不断产生放射状裂缝, 而不断扩展的裂缝也为盐渍土中腐蚀性离子的高速浸入提供更为有利的正向扩散条件, 使腐蚀性离子沿出现裂缝试件的薄弱区域大量快速渗至钢筋表面, 与恒电流应力叠加作用提高腐蚀劣化效率。分析认为, 引起腐蚀劣化加速应力一个是恒电流应力引起钢筋的氧化反应, 另一个是腐蚀性氯离子与钝化膜已破坏的锈蚀钢筋化学反应, 加速氯离子加速应力的发挥。

### 3 钢筋混凝土可靠性加速腐蚀劣化寿命模型分析

#### 3.1 建立恒电流应力的加速腐蚀劣化模型

假定钢筋混凝土试件寿命符合正态分布, 则用恒电流应力加速寿命试验统计分布, 分为一维和二维组。选取应力水平相同且高于正常腐蚀环境下的应力水平, 进行寿命失效试验。

利用正态分布的密度函数、分布函数、失效函数<sup>[24]</sup>, 将失效率作为评价可靠性的特征量。设随机变量T表示钢筋混凝土寿命, 具有已知均值 $\mu$ 与方差 $\sigma$ 的正态分布, 其大小为n、截尾数为r的截尾样本前r个最小观测值依序为 $t_1 \leq t_2 \dots \leq t_r$ ,  $r < n$ 。概率分布和密度函数分别为 $F(x)$ 和 $f(x)$ 。定义 $h(x) = \frac{f(x)}{1-F(x)}$ 为加速t小时的失效率, 则 $1-F(t)$ 是加速t小时的可靠性, 记作 $R(t)$ <sup>[23]</sup>。

$$R_i(t) = P(y_i(t) \leq \emptyset) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\Psi_2 - \Psi_1)}} \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} \int_{-\infty}^{\bar{x}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx d\Psi \quad (9)$$

式中,  $i=1$  时  $R_i(t) = P(y_i(t) \leq \emptyset)$  表某时间点相对腐蚀评价参数小于阈值,  $x$  为广义积分项,  $\Psi$  相对腐蚀评价参数,  $\bar{x} = \frac{y_{i(t)} - \bar{\mu}_i}{\hat{\sigma}_i}$ 。

$h(x)$  是加速时间x的函数,  $h(x)dx$  表示寿命为x的试件在区间( $x$ ,  $x+dx$ )内将失效的概率:

$$h(x) \approx \frac{P(x) - P(x+dx)}{dx \cdot P(x)} \approx \frac{\left(\frac{n(x)}{n} - \frac{n(x+dx)}{n}\right)}{dx \cdot \frac{n(x)}{n}} = \frac{n(x) - n(x+dx)}{dx \cdot n(x)} \quad (10)$$

再利用逆幂律模型，将加速寿命试验中电应力（恒电流）作为加速应力，随加速时间延长亦能促使钢筋混凝土试件提前失效。试件的平均寿命与应力有如下关系

$$\epsilon = BA^{-n} \quad (11)$$

式中： $\epsilon$ 表示平均寿命；B为常数；n为一个与激活能有关的正常数；A为应力，取电流。

对式(11)两边取对数，将逆幂律模型线性化，其中a=lnA,b=-n,a,b为待定系数，V>0。

$$\ln \epsilon = a + b \ln V \quad (12)$$

假定钢筋混凝土试件处于中等腐蚀状态极限为寿命阈值，根据表4对应腐蚀电流密度阈值为 $1 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。结合式(12)，计算其恒电流应力作用下的腐蚀评价参数见表6。

$$\Psi_1 = 1 - \frac{i_{corr}}{i_m} \quad (13)$$

式中 $\Psi_1$ 为某时间点试件在恒电流应力作用下的寿命评价参数， $i_{corr}$ 为某时间点腐蚀电流密度， $i_m$ 为中等腐蚀阀值。 $\Psi_1 < 0$ ，试件寿命终止； $0 \leq \Psi_1 < 1$ ，试件出现劣化且可继续服役。

### 3.2 建立氯离子互扩散的加速腐蚀劣化模型

有浓度差的空间扩散叫互扩散。参考 GB50082 中氯离子扩散系数计算方法，设计钢筋混凝土恒加试验的氯离子扩散模型<sup>[25]</sup>。石蜡层的防护性能由于应力作用随时间降低，氯离子扩散系数也随时间变化。建立表面处理后混凝土氯离子扩散系数的性能退化模型<sup>[24]</sup>

$$D(t) = D_0 \cdot g(t) \quad (14)$$

式中， $D(t)$ 时刻t的氯离子扩散系数， $D_0$ 是初始状态时的扩散系数， $g(t)$ 为退化系数。

氯离子引起钢筋锈蚀可划分为三个阶段，氯离子通过混凝土保护层到达钢筋表面积累至临界浓度为第一阶段；钢筋开始锈蚀引起体积膨胀、微裂纹产生、钢筋截面损失和粘结强度的损失为第二阶段；混凝土保护层因钢筋锈蚀开裂到混凝土失效为第三阶段。依据《混凝土结构设计规范》与《混凝土质量控制标准》中规定，设定钢筋表面氯离子含量达到0.06%为试件寿命阈值。氯离子应力的腐蚀评价参数见表6。

$$\Psi_2 = 1 - \frac{C_i}{0.06\%} \quad (15)$$

式中 $C_i$ 为某时间点试件中氯离子含量(%)，0.06%为试件寿命极限的阈值。 $\Psi_2 < 0$ ，试件寿命终止； $0 \leq \Psi_2 < 1$ ，试件出现劣化且可继续服役。

表 6 钢筋混凝土相对腐蚀评价参数

Table 6 relative corrosion evaluation parameters of reinforced concrete

theoretical mass loss rate /%		0	1	2	3	4	5	6
$\Psi_1$	the one-dimensional	0.994	0.846	0.537	0.198	0.046	0.012	0.005

	the two-dimensional	0.991	0.769	0.458	0.243	0.025	0.023	0.008
$\Psi_2$	the one-dimensional	0.998	0.872	0.498	0.118	0.076	0.047	0.002
	the two-dimensional	0.991	0.811	0.376	0.082	0.043	0.022	0.007

### 3.3 基于可靠性的双应力加速腐蚀劣化寿命模型分析

利用Matlab软件将表6中参数 $\Psi_1$ 和 $\Psi_2$ 拟合, 得到恒电流与氯离子双应力可靠性分布如图8。

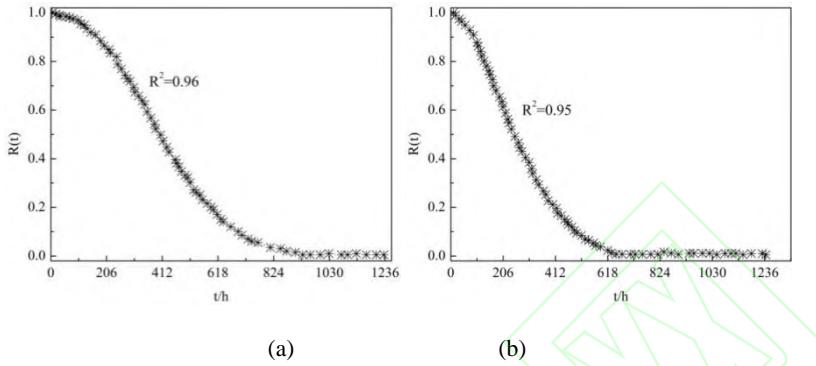


图 8 可靠性分布: (a)一维试件;(b) 二维试件

Fig. 8 Reliability distribution :(a) The one-dimensional specimen;(b) The two-dimensional specimens

由图 8 可知: 一维和二维加速试件的平均寿命为 927h、618h, 表明石蜡层能够显著延长加速试验试件平均寿命, 同时降低加速试验加速效率。混凝土表面性质被石蜡层改变阻止、延缓氯离子等侵入, 有效减小了氯离子扩散系数, 增加钢筋表面氯离子含量达到临界阈值时间。根据 $\Psi_1$ 和 $\Psi_2$ 变化规律分析, 加速试验劣化以石蜡层对氯离子应力的抵消作用为主, 恒电流应力作用的抵消为辅。因为混凝土表面性质改变影响氯离子的正向扩散作用, 氯离子加速应力发挥的关键是钢筋表面达到临界阈值后发生化学反应, 显著降低了氯离子加速应力输出值。而恒电流应力的输出值由恒电流仪持续稳定输出, 石蜡层无法直接影响输出值, 间接减小恒电流加速应力的作用效率。因石蜡层混凝土表面导电性能较低, 在回路电路系统中减小电流传输效能, 同时错失恒电流与氯离子双加速应力叠加发挥最佳腐蚀效率的时机。恒电流加速产生致密锈蚀产物, 近似钢筋外表面形成保护层, 阻碍氯离子发挥加速应力。

## 4 结论

(1)可靠性加速腐蚀劣化寿命模型推导, 一维和二维试件平均寿命分别为 927h、618h, 表明石蜡层设计不仅可以减小腐蚀性离子渗入, 作为控制单一变量因素的方法, 而且可以用于盐渍土地区混凝土结构的外防护。

(2)加速试验劣化顺序为: 恒电流加速应力产生裂缝, 裂缝加速氯离子加速应力作用的发挥, 二者叠加作用提升钢筋混凝土加速效率。

(3) 可靠性加速寿命模型与试验结果相似, 表明可靠性理论在加速试验数据处理中的适用性, 揭示加速试验腐蚀劣化规律, 定量分析不同种类和大小加速应力对加速劣化规律的影响程度。

## 参考文献

- [1] 宋述芳, 吕震宙, 王燕萍. 可靠性工程基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2018.
- SONG Shufang, LU Zhenzhou, WANG Yanping. Reliability Engineering Basis [M]. Xi 'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2018.
- [2] 郭永基. 可靠性工程原理[M]. 北京: 可靠性工程原理, 2002.
- GUO Yongji. Principles of Reliability Engineering [M]. Beijing: Principles of Reliability Engineering, 2002.
- [3] 胡昌寿. 可靠性工程设计、试验、分析、管理[M]. 北京: 宇航出版社, 1989.
- HU Changshou. Reliability Engineering Design, Test, Analysis and Management [M]. Beijing: Astronautical Press, 1989.
- [4] 杨绿峰, 陈昌, 余波. 海洋浪溅区混凝土的多因素时变环境作用模型[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(11): 1566-1573.
- YANG Lvfeng, CHEN Chang, YU Bo. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(11): 1566-1573.
- [5] SONG, Ha-Won; LEE, Chang-Hong; Ann, Ki Yong. Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments[J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(2): 113-121.
- [6] PACK, Seung-Woo; JUNG, Min-Sun; SONG, Ha-Won. Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment[J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(2): 302-312.
- [7] Liu, Wei; Li, Yongqiang; Tang, Luping. Modelling analysis of chloride redistribution in sea-sand concrete exposed to atmospheric environment[J]. Construction and Building Materials, 2021, 274: 121962.
- [8] 刘奇东, 刘荣桂, 姜慧等. 海洋干湿交替区混凝土结构的人工气候模拟加速试验设计[J]. 混凝土, 2013(11): 50-52+67.
- LIU Qidong, LIU Ronggui, JIANG Hui et al. Accelerated test design of artificial climate simulation for concrete structures in ocean dry-wet alternating zone [J]. Concrete, 2013(11): 50-52+67.
- [9] 袁迎曙, 章鑫森, 姬永生. 人工气候与恒电流通电法加速腐蚀钢筋混凝土梁的结构性能比较研究[J]. 土木工程学报, 2006(03): 42-46.
- YUAN Yingshu, ZHANG Xinsen, JI Yongsheng. Comparative Study on Structure and Performance of Reinforced Concrete Beams Accelerated by Artificial Climate and Constant Current Current [J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 2006(03): 42-46.
- [10] 郑帆, 史桂昀, 董必钦等. 钢筋混凝土通电加速锈蚀行为可视化表征[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(08): 1081-1086.
- ZHENG Fan, SHI Gui-Yun, DONG Bi-Qin et al. Visualized characterization of accelerated corrosion behavior of reinforced concrete during electric connection [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46(08): 1081-1086.
- [11] 尚明刚, 何忠茂, 乔宏霞等. 基于恒电流密度的钢筋混凝土加速腐蚀试验研究[J]. 材料导报, 2020, 34(22): 22058-22064.
- SHANG Minggang, HE Zhongmao, QIAO Hongxia et al. Experimental study on accelerated corrosion of reinforced concrete based on constant current density [J]. Materials Review, 2020, 34(22): 22058-22064.
- [12] ABOSRRA L, ASHOUR A F, YOUSEFFI M. Corrosion of steel reinforcement in concrete of different compressive strengths[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(10): 3915-3925.
- [13] MA Y, CHE Y, GONG J x. Behavior of corrosion damaged circular reinforced concrete columns under cyclic loading[J]. Construction and Building Materials, 2012, 29(29): 548-556.

- [14] VUK A T, STEWART M G. Predicting the likelihood and extent of reinforced concrete corrosion-induced cracking[J]. Journal of Structural Engineering, 2005,131(11):1681-1689.
- [15] 干伟忠,金伟良,高明赞.混凝土中钢筋加速腐蚀试验适用性研究[J].建筑结构学报,2011,32(02):41-47.
- GAN Weizhong, JIN Weiliang, GAO Mingzan. Research on the Applicability of Accelerated Corrosion Test of Reinforcement in Concrete [J]. Journal of Building Structures,2011,32(02):41-47.
- [16]包卫星. 内陆盐渍土工程性质与公路工程分类研究[D].长安大学, 2009.
- BAO Weixing. Study on engineering properties of inland saline soil and classification of highway engineering [D]. Chang 'an University, 2009.
- [17] 冯琼,乔宏霞,朱彬荣等.湿盐砂环境下钢筋混凝土加速锈蚀试验研究 [J].建筑材料学报,2018,21(04):568-575.
- FENG Qiong, QIAO Hongxia, ZHU Binrong, etc.Experimental study on accelerated corrosion of reinforced concrete in wet salt sand environment [J]. Journal of Building Materials,2018,21(04):568-575.
- [18] 王鹏辉,乔宏霞,冯琼等.氯氧镁水泥混凝土中涂层钢筋的耐久性退化研究 [J].建筑材料学报,2020,23(03):563-571.
- WANG Penghui, QIAO Hongxia, FENG Qiong, et al.Study on Durability Degradation of Coated Reinforcement in Magnesium Chloride Cement Concrete. Journal of Building Materials,2020,23(03):563-571.
- [19]王风平, 康万利, 敬和民.腐蚀电化学原理、方法及应用[M].北京: 化学工业出版社, 2008.
- WANG Fengping, KANG Wanli, JING Hemin.Corrosion Electrochemistry Principle, Method and Application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [20]陈克凡,乔宏霞,王鹏辉等.氯氧镁水泥钢筋混凝土通电锈蚀的断裂性能分析 [J].建筑材料学报,2020,23(03):557-562.
- CHEN Kefan, QIAO Hongxia, WANG Penghui et al.Journal of Building Materials,2020,23(03):557-562.
- [21]赵铁军.渗透型涂料表面处理与混凝土耐久性[M].北京: 科学出版社, 2009.
- ZHAO Tiejun. Surface Treatment of Permeable Coatings and Durability of Concrete [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [22]胡茂圃.腐蚀电化学[M].北京: 冶金工业出版社, 1991:260.
- HU Maopu. Corrosion Electrochemistry [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1991:260.
- [23]赵宇.可靠性数据分析[M].北京: 国防工业出版社, 2011.
- ZHAO Yu. Reliability Data Analysis [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [24]潘金生, 全健民, 田民波.材料科学基础[M].北京: 清华大学工业出版社, 2011.
- PAN Jinsheng, TONG Jianmin, TIAN Minbo.Fundamentals of Materials Science [M]. Beijing: Tsinghua University Industry Press, 2011.
- [25]SCHUEREMANS L, Van GEMERT D. Evaluation of the water repellent treatment, applied as chloride barrier on a quay-wall at zeebrugge harbor[C]//Proccdings of Hydrophobe II .Zurich,1998:91~106.