

工业-海岸大气环境下 Q235B 钢材力学性能及时变本构模型研究

姜绍飞^{1,2}, 陈涛¹, 宋华霖^{1,2,5*}, 王威^{1,2}, 林金星³, 管文忠⁴

(1. 福州大学 土木工程学院, 福州 350108; 2. 福州大学 福建省土木工程多灾害防治重点实验室, 福州 350108; 3. 国家知识产权局专利局专利审查协作北京中心福建分中心, 福州 350108; 4. 北京建工集团有限责任公司, 北京 100032; 5. 桂林电子科技大学 建筑与交通工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 为揭示工业-海岸大气环境下 Q235B 钢材力学性能退化规律, 本文开展了腐蚀试件力学性能试验, 并对钢材时变本构模型和加速腐蚀时间相关性模型进行了研究。首先, 通过模拟工业-海岸大气腐蚀环境, 开展不同周期的腐蚀试验并对腐蚀试件进行单调拉伸试验; 其次, 结合试验结果提出工业-海岸大气下 Q235B 钢材的时变本构模型, 建立数值模型并验证其有效性; 最后, 建立试件加速腐蚀时间与实际工业-海岸大气环境服役年限的相关性模型。结果表明, 腐蚀周期的增加使钢材失效模式由延性失效转变为脆性断裂失效; 屈服强度、抗拉强度、弹性模量和断后伸长率与腐蚀周期呈负相关; 数值模型结果与试验应力-应变曲线两者误差小于 6.5%; 实验室加速腐蚀 160 d 等效实际环境服役 54 年。这些结果表明提出的钢材本构和相关性模型可用于工业-海岸大气环境下 Q235B 钢材力学性能的建模和评估。

关键词: 工业-海岸大气环境; 力学性能; 时变本构模型; 腐蚀试验; 加速腐蚀时间; 失效模式; 相关性模型

中图分类号: TU391, P75

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)04-0094-10

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20241012001

Mechanical Properties and Time-Varying Constitutive Model of Q235B Steel under an Industrial-Coastal Atmospheric Environment

JIANG Shaofei^{1,2}, CHEN Tao¹, SONG Hualin^{1,2,5*}, WANG Wei^{1,2},
LIN Jinxing³, GUAN Wenzhong⁴

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory on Multi-Disasters Prevention and Mitigation in Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 3. Fujian Sub-Center, Patent Examination Cooperation Center of the Patent Office, China National Intellectual Property Administration, Fuzhou 350108, China; 4. Beijing Construction Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100032, China; 5. School of Architecture and Transportation Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

*Corresponding author: songhualincn@gmail.com

Abstract: In order to reveal the degradation law of mechanical properties of Q235B steel in an industrial-coastal atmospheric environment, this paper experimentally investigates the mechanical properties of corroded specimens, and develops a time-varying constitutive model and an accelerated corrosion time correlation model. Firstly, by simulating the

收稿日期: 2024-10-12

基金项目: “十四五”国家重点研发计划(2023YFF0906102), 国家自然科学基金(52278295)

作者简介:

姜绍飞(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事结构健康监测与智能运维等方面的研究。E-mail: cejsf@fzu.edu.cn。

通信作者:

宋华霖(1995—), 男, 博士, 副教授, 主要从事结构健康监测与改造加固方面的研究。E-mail: songhualincn@gmail.com。

industrial-coastal atmospheric corrosion environment, corrosion tests with different cycles were conducted and monotonic tensile tests were carried out on the corroded specimens. Secondly, a time-varying constitutive model of Q235B steel in an industrial-coastal atmosphere was proposed based on the experimental results, and a numerical model was developed to verify its effectiveness. Finally, a correlation model between the accelerated corrosion time of the specimens and the actual service life in the industrial-coastal atmospheric environment was established. The results show that the increase of corrosion cycle changes the failure mode of steel from ductile failure to brittle fracture failure. The yield strength, tensile strength, elastic modulus and elongation after fracture are negatively correlated with the corrosion cycle. The error between the numerical model results and the experimental stress-strain curves is less than 6.5%. 160 days of accelerated corrosion in laboratory is equivalent to 54 years of service in the actual environment. These findings indicate that the proposed steel constitutive and correlation models can be used for the modeling and evaluation of Q235B steel in the industrial-coastal atmospheric environment.

Keywords: industrial-coastal atmospheric environment; mechanical property; time-varying constitutive model; corrosion test; accelerated corrosion time; failure mode; correlation model

随着我国“一带一路”倡议与“海洋强国”战略的协同推进,我国海洋工程建设规模达到了前所未有的水平。在此背景下,近岸工业区域的建筑数量也日益增多。钢结构凭借低碳、绿色、环保等优势,被广泛应用于各类工程结构中。然而,暴露在大气环境中的钢结构不可避免会遭受腐蚀作用的影响^[1]。相关研究^[2]表明,钢结构倒塌事故多由钢材腐蚀引发,究其原因,腐蚀会削弱钢材的截面面积,导致其力学性能发生退化。因此,为了预防钢结构灾害事故的发生,明晰大气腐蚀后钢材的力学性能演化规律具有重要意义。

大气腐蚀环境对钢材及钢结构力学性能的退化影响显著。大气腐蚀环境主要包括海洋大气环境和工业大气环境^[3]。在海洋大气环境方面,魏源等^[4]针对海洋大气环境下Q235钢材的力学性能退化规律展开研究,通过试验建立了腐蚀钢材力学时变模型;王皓等^[5]研究了海岸大气环境下焊接钢板力学性能退化规律,建立了考虑腐蚀损伤的焊接钢板本构模型。在工业大气环境方面,杨晓阳等^[6]开展了酸雨环境下Q420B钢材的腐蚀疲劳裂纹扩展研究,分析了酸雨腐蚀后钢材的性能演化特征。汪川等^[7]研究了碳钢与耐候钢在江津工业大气环境中的腐蚀规律,探明了Q235钢和耐候钢在该环境下的腐蚀形貌。受地理条件与人类生产活动的共同影响,沿海工业建筑长期处于高浓度 Cl^- 和 SO_4^{2-} 协同作用的工业-海岸大气复合腐蚀环境中^[8]。对于长期服役于此环境中的钢结构,其环境中的 Cl^- 会使钢结构基体与锈层界面间的 Fe_3O_4 呈强磁性,无法形成致密稳定的锈层,进而引发钢材严重的剥落腐蚀^[9],而 SO_4^{2-} 会溶解腐蚀产物,导致锈层内部形成孔洞^[10],为 O_2 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 进入基体提供通道,二者的协同作用还会降低液层pH值,形成酸的再循环机制^[11],进一步加剧钢结构的腐蚀损伤。值得注意的是,现有研究大多仅考虑海洋大气环境或工业大气环境的单一影响,而二者的耦合作用会显著加速钢材及钢结构的性能指标退化。因此,开展工业-海岸大气环境下

Q235B钢材力学性能及时变本构模型的研究,对保障工业厂房安全运维具有重要的理论意义与工程实用价值。

为此,本文开展了工业-海岸大气环境下Q235B钢材力学性能退化规律的研究。首先,通过单调拉伸试验研究了腐蚀钢材单调拉伸性能退化规律;其次,提出了工业-海岸大气环境下锈蚀钢材时变本构模型,并通过数值分析验证了其有效性;最后,建立了试件加速腐蚀时间与实际工业-海岸大气环境服役年限的相关性模型。

1 试验概况

1.1 工业-海岸腐蚀试验环境模拟

本研究采用户外喷淋方式来模拟工业-海岸大气环境,设计并制作了一套人造盐雾腐蚀系统,该系统主要由定时电力控制系统、温湿度监测仪和喷淋装置等组成,如图1所示。模拟海岸大气所用电解质溶液为 $0.855\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaCl ^[12],由分析纯 NaCl 在温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 且电导率不高于 $20\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的蒸馏水中溶解而制成;模拟工业大气环境的电解质溶液为 $0.855\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液,由分析纯 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 晶体溶于电导率不超过 $20\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的蒸馏水中配制而成。将上述两种溶液按1:1的比例混合,采用稀盐酸调节pH值,并用酸度计测量溶液的pH值,配制出pH值为5.5的弱酸性腐蚀液,以实现工业-海岸大气环境的模拟。喷淋周期共计320 d,锈蚀周期分别为40 d、80 d、120 d、160 d、240 d和320 d,喷淋方式为每15 min喷淋5 s,单个喷头的喷淋速率为 $0.03\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。所有试件以 45° 倾角放置于置物架上,确保试件表面无积水滞留。

1.2 试件设计与制作

本次试验共设计了7组试件,其中1组为未腐蚀试件,6组为腐蚀试件,每组包括4个平行试件。试件命名方式为S-C000,其中S表示钢管钢材(Steel),C表示腐蚀(Corrosion),数字表示腐蚀周期。试件的尺寸按照《金属

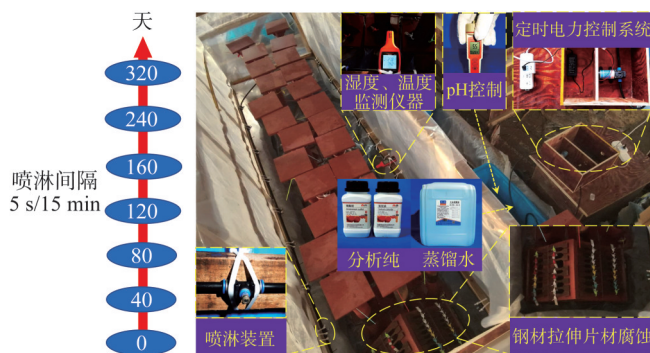


图1 环境模拟装置

Fig. 1 Environmental simulation device

材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)^[13]设计,如图2所示。采用线切割方法切割Q235B无缝圆钢管,圆钢管壁厚为4 mm,外径为89 mm。

达到指定周期后从人工模拟腐蚀环境中将试件取出,并参照《金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除》(GB/T 16545—2015)^[14]对试件进行除锈处理,见图3,具体步骤如下:

(1) 用软毛刷对试件进行轻微地机械清洗,去除其

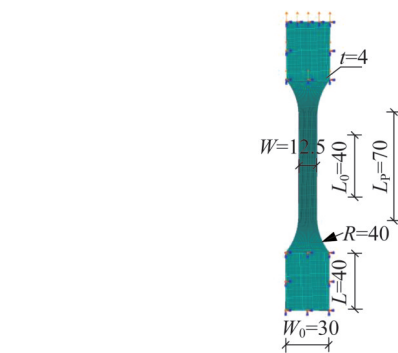


图2 试件尺寸及数值模型(单位:mm)

Fig. 2 Specimen sizes and numerical model (unit: mm)

表面不牢固的腐蚀产物。

(2) 在20~25℃室温下,将腐蚀试件静置于特定的化学溶液(密度为1.19 g·ml⁻¹的500 ml盐酸中加入3.5 g的六次甲基四胺,加电导率不高于20 μS·cm⁻¹的蒸馏水配置而成1 000 ml的溶液)10 min后取出,再使用软毛刷轻除腐蚀产物。

(3) 采用无水乙醇轻拭试件表面,之后使用烘干机烘干,等待试件自然冷却。



图3 试件后处理过程

Fig. 3 Post treatment process of specimens

除锈完成后,在试件的标距段内(40 mm)每隔5 mm做标记线,通过游标卡尺测量左右区域腐蚀前后钢材的厚度,依据厚度的统计结果,计算不同周期钢材的平均残余厚度 $\bar{t}$,表示为:

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (1)$$

式中: t_i 表示各个区域测得的钢材厚度; n 表示区域的个数。

采用失重法测定钢材腐蚀率 R_c ,表示为:

$$R_c = \frac{(W_i - W_c)}{W_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中: W_i 为试件的初始质量; W_c 为试件腐蚀后的质量。

1.3 试验方案

采用100 kN万能材料试验机进行钢材拉伸加载试验,如图4所示。试验加载制度参考规范GB/T 228.1—2010^[13],钢材屈服前的加载速率为1.0 mm·min⁻¹,当试件达到屈服后,加载速率调整至3.0 mm·min⁻¹。试验过程中,采用引伸计监测试件平行段的伸长量,引伸计标距为50 mm,量程为25 mm,在试件中心左右两侧各20 mm处绘制标距线,以便于后续测算试件的断后伸长率。

2 试验结果及分析

2.1 腐蚀前后的钢材厚度及形貌

图5为钢材腐蚀前后的厚度。由图可以看出,随着



图4 试验装置
Fig. 4 Test setup

腐蚀周期的增加,腐蚀后钢材的厚度逐渐减小,由图 5a) 中的 3.9 mm 逐步减小到图 5f) 中的 3.1 mm。具体来说,较未腐蚀前钢材的厚度,腐蚀周期为 40 d、80 d、120 d、160 d、240 d 和 320 d 时钢材厚度的减小率均值分别为 2.09%、6.8%、8.97%、9.87%、18.10% 和 19.59%,其具体厚度数值见表 1。此外,对于腐蚀周期大的试件,其表面的粗糙度更大,如图 5d) 右侧测试区域腐蚀后形貌,具体表现为钢材表面呈现显著的凹凸不平,这也是造成钢材力学性能下降的主要原因。

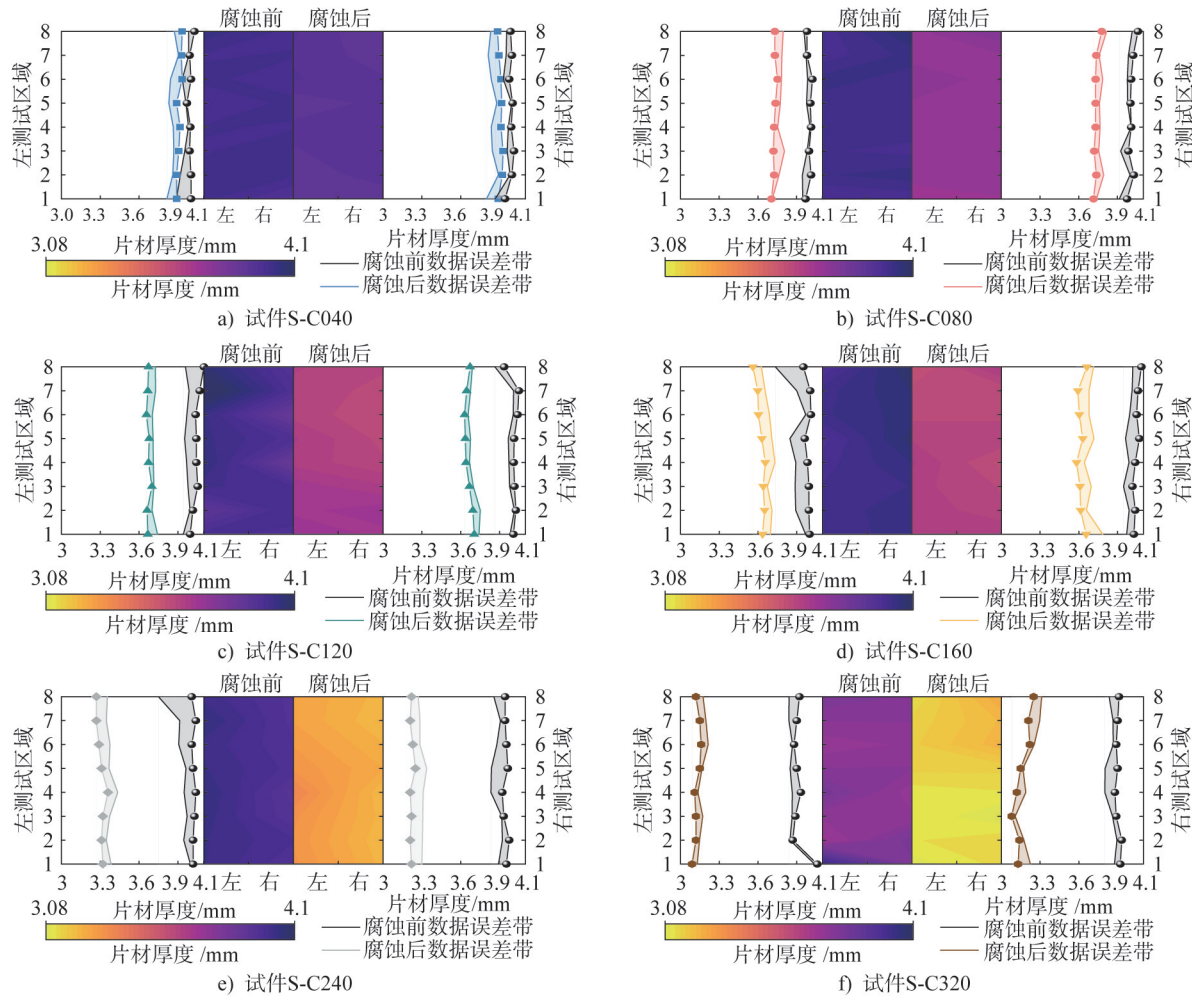


图5 腐蚀前后钢材的厚度
Fig. 5 Thicknesses of steel before and after corrosion

图 6 为不同腐蚀周期钢材的局部形貌,腐蚀环境导致钢材表面金属逐渐溶解、氧化或脱落,但形成的锈蚀是不均匀的,产生大小不同和深度不同的锈坑,随着腐蚀周期的增大,锈坑数量增多,锈坑的分布密度增大,且锈坑的深度和大小均有所增加。

2.2 失效模式

图 7 为不同腐蚀周期拉伸试验的试件失效形貌,由

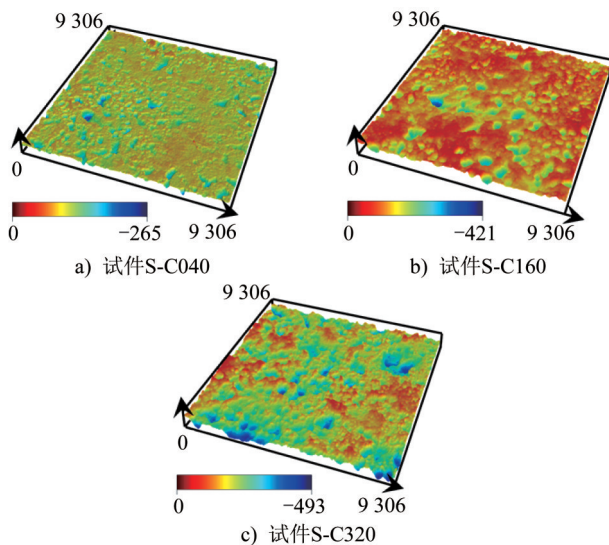
图可以看出,未腐蚀的试件呈现出显著的颈缩现象,失效模式为延性破坏,其断裂形态呈现锯齿状,如图 7a) 所示;腐蚀周期为 40 d 和 80 d 的试件断裂形态为斜断口,拉伸过程中屈服阶段和颈缩阶段缩短,断后伸长率较未腐蚀构件下降了 5%,如图 7b)~c) 所示;当腐蚀周期超过 120 d 后,试件断裂形态变为平断口,这主要是由于腐蚀作用导致试件的颈缩量显著减小,钢材的延性进一步降低,破坏模式转化为脆性破坏,如图 7d)~g) 所示。

表1 腐蚀前后钢材的厚度

Table 1 Thicknesses of steel before and after corrosion

周期		40 d	80 d	120 d	160 d	240 d	320 d	
左側	前	t/mm	4.00	4.00	4.04	3.99	4.02	3.92
		S_{D}	0.05	0.03	0.08	0.10	0.10	0.04
	后	$\bar{t}/\text{mm}$	3.91	3.73	3.67	3.62	3.31	3.13
		S_{D}	0.05	0.04	0.04	0.06	0.07	0.04
右側	前	t/mm	3.99	4.01	4.01	4.05	3.95	3.90
		S_{D}	0.04	0.01	0.04	0.06	0.07	0.05
	后	$\bar{t}/\text{mm}$	3.91	3.74	3.66	3.62	3.22	3.16
		S_{D}	0.07	0.04	0.03	0.08	0.08	0.05

注: t 表示试件腐蚀前平均厚度; $\bar{t}$ 表示试件腐蚀后平均厚度; S_D 表示标准差。厚度指标均为4个平行试件试验结果的平均值。

图6 腐蚀钢材局部形貌(单位: μm)Fig. 6 Local morphology of corroded steel (unit: μm)

2.3 名义应力-应变

图8为不同腐蚀周期试件的名义应力-应变曲线。由图可以看出,未腐蚀试件的名义应力-应变曲线有明显的弹性阶段、屈服阶段、强化阶段和颈缩阶段。随着腐蚀周期的增加,试件的名义应力-应变曲线发生了显著的变化。主要体现在以下方面:

(1) 随着腐蚀周期的增加,试件的屈服强度与腐蚀率呈负相关。同时,屈服平台段也会逐渐缩短,最终完全消失。这说明工业-海岸大气腐蚀环境会导致钢材的延性降低。

(2) 随着腐蚀周期的增加,强化段随着腐蚀率的增加而逐渐变短,极限应变值也逐渐降低,试件的颈缩现象明显减弱。这是由于腐蚀后试件表面的粗糙度增大,应力集中效应愈发显著,致使试件破坏形式逐渐向脆性断

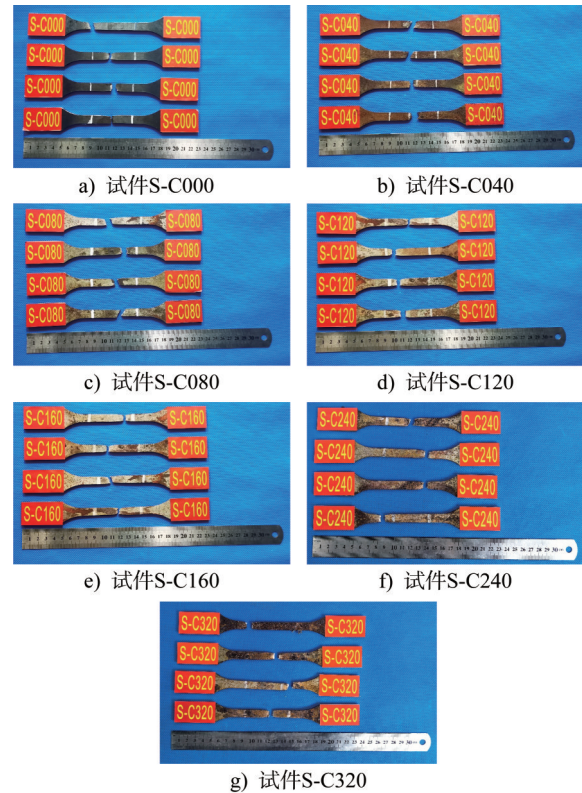


图7 钢材试件拉伸断后形貌

Fig. 7 Morphology of steel specimens after tensile fracture

裂转变,延性随之下降。

2.4 力学性能指标

根据不同试件的名义应力-应变曲线提取其相应的力学性能指标,结果如表2所示。可以得到如下结论:

(1) 屈服强度:随着腐蚀周期的增加,试件的屈服强度存在下降的趋势。具体来说,较未腐蚀试件,腐蚀周期为40 d、80 d、120 d、160 d、240 d和320 d的钢材屈服强度分别下降了4.93%、6.54%、10.75%、14.38%、15.93%和21.59%。

(2) 抗拉强度:随着腐蚀周期的增加,试件的抗拉强度逐渐下降。具体来说,较未腐蚀试件,腐蚀周期为40 d、80 d、120 d、160 d、240 d和320 d的钢材抗拉强度分别下降了4.10%、7.32%、12.12%、15.50%、17.01%和20.17%。

(3) 弹性模量:随着腐蚀周期的增加,试件的弹性模量逐渐降低。具体来说,较未腐蚀试件,腐蚀周期为40 d、80 d、120 d、160 d、240 d和320 d的钢材弹性模量分别下降了5.93%、9.00%、12.36%、14.34%、17.45%和20.41%。

(4) 断后伸长率:断后伸长率定义为断裂时标距段的伸长量与原始标距长度的比值。断后伸长率与腐蚀周

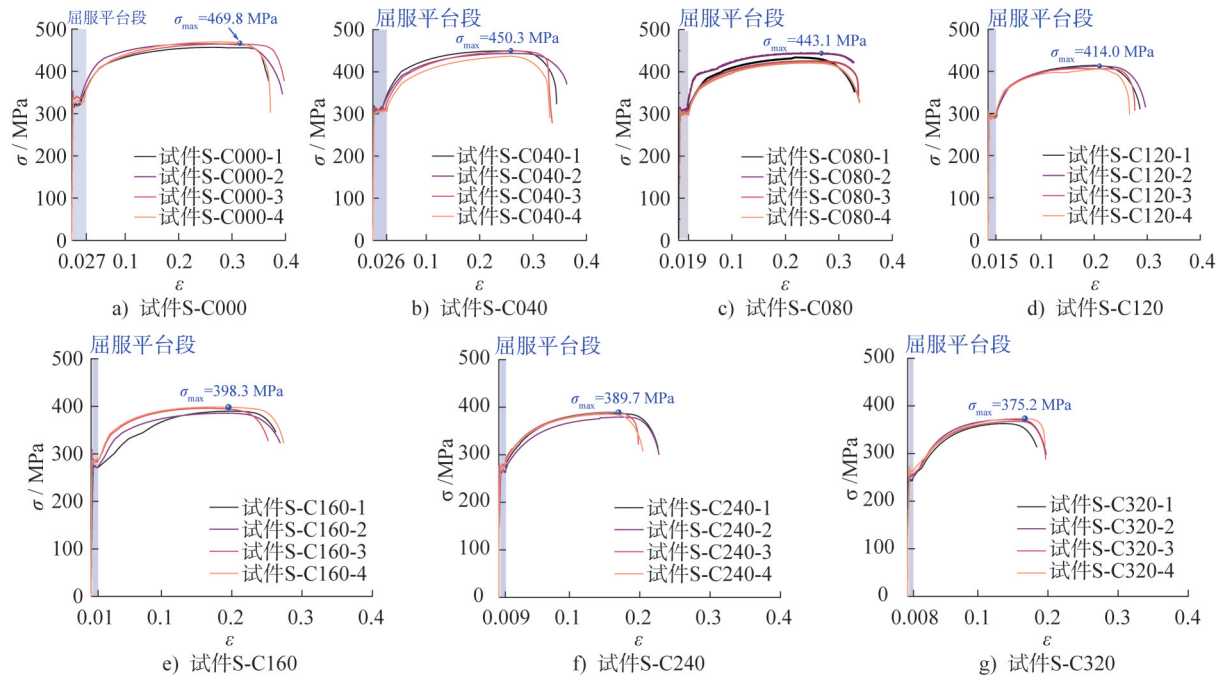


图8 名义应力-应变曲线

Fig. 8 Nominal stress-strain curves

表2 腐蚀钢材力学性能

Table 2 Mechanical properties of corroded steel

性能参数	周期						
	0 d	40 d	80 d	120 d	160 d	240 d	320 d
$R_c/\%$	—	6.4	8.7	12.5	14.2	16.9	20.3
S_D	—	0.87	0.45	0.32	1.05	1.12	0.83
f_y/MPa	323.3	307.3	302.1	288.5	276.8	271.8	253.5
S_D	9.47	2.81	3.11	3.67	5.82	6.26	6.78
f_u/MPa	464.2	445.1	430.2	407.9	392.2	385.2	370.5
S_D	5.42	6.18	10.03	6.22	5.93	3.80	3.56
$\delta_c/\%$	33.1	28.9	27.2	25.6	23.1	19.2	15.6
S_D	1.97	2.07	3.30	1.26	0.54	0.59	1.33
$E/\times 10^5 \text{ MPa}$	2.02	1.90	1.84	1.77	1.73	1.67	1.61
S_D	0.11	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04	0.03
K_{SI}	12.03	11.92	10.57	9.55	8.78	7.88	8.70
S_D	1.49	1.53	0.90	1.05	1.23	1.57	0.92
K_P	120.90	120.90	115.40	110.10	108.70	120.40	130.40
S_D	7.48	5.47	8.14	5.07	6.54	9.36	2.80
K_F	135.56	131.60	124.10	118.40	118.40	116.00	111.90
S_D	6.83	5.17	6.72	8.83	9.09	4.78	2.32

注： R_c 表示腐蚀率； f_y 表示屈服强度； f_u 表示抗拉强度； δ_c 表示断后伸长率； E 表示弹性模量； K_{SI} 表示强化阶段初始应变与屈服应变比值； K_P 表示峰值应变与屈服应变比值； K_F 表示抗拉强度与屈服强度比值。力学性能指标均为4个平行试件试验结果的平均值。

期呈显著负相关。具体来说,较未腐蚀试件,腐蚀周期为40 d、80 d、120 d、160 d、240 d和320 d的钢材断后伸长率分别下降了12.61%、17.82%、22.66%、30.29%、41.92%和54.23%。

腐蚀试件在单调拉伸试验过程中其力学性能指标下降的原因如下:腐蚀环境会使钢材表面金属逐渐发生溶解、氧化与剥落,且锈蚀过程呈非均匀性,进而形成尺寸与深度各异的锈坑。在单调拉伸过程中,钢材表面的粗糙度增大,使其表面与加载夹具间的摩擦力增大;同时,锈坑区域易产生应力集中,钢材在这些薄弱部位最先产生裂纹。随着裂纹不断扩展,截面无法继续承受荷载,最终发生破坏,钢材的延性降低、抵抗变形能力减弱,应力-应变曲线中屈服段与颈缩段缩短,力学性能指标发生退化。

为方便表征试件在受到腐蚀后力学性能降低的程度,定义钢材力学性能下降指标 S_{DR} ,其计算如下式:

$$S_{DR} = \left(1 - \frac{f}{f_0}\right) \times 100\% \quad (3)$$

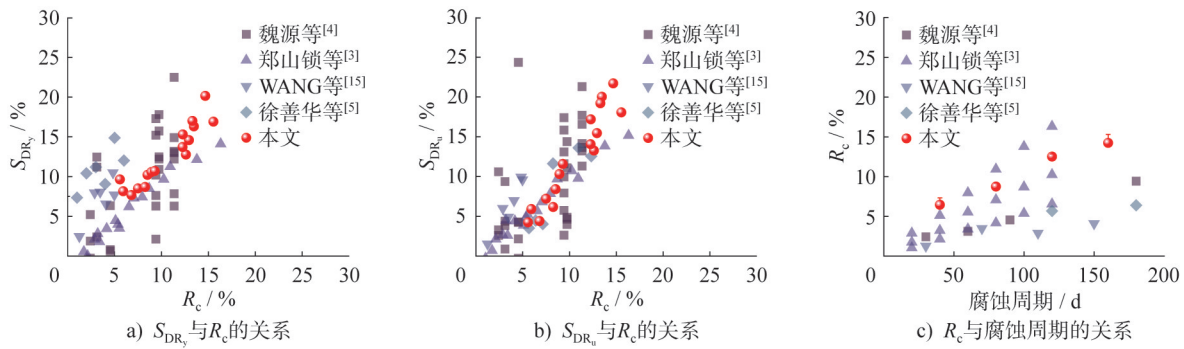


图9 不同大气腐蚀条件下力学性能对比

Fig. 9 Comparison of mechanical properties under different atmospheric corrosion conditions

3 腐蚀钢材时变本构模型

3.1 时变本构模型的建立

由前文试件的拉伸试验可知,随着腐蚀周期的增加,试件出现力学性能退化的现象。根据拉伸试验数据计算 K_{SI} (强化阶段初始应变与屈服应变比值)、 K_P (峰值应变与屈服应变比值)和 K_F (抗拉强度与屈服强度比值),见表2。分别将 K_{SI} 、 K_P 和 K_F 对腐蚀周期 T 进行拟合,结果见图(4)~(6)和图10:

$$K_{SI} = 13.085 - 5.332e^{\left[-0.5\left(\frac{T-239.835}{126.163}\right)^2\right]} \quad (4)$$

$$K_P = 132.786 - 4380.311e^{\left[-2\left(\frac{T-136.506}{191.336}\right)^2\right]} \quad (5)$$

$$K_F = 172.116T^{-0.074} \quad (6)$$

由图10可知,随着腐蚀周期的增加,Q235B钢试件的 K_{SI} 和 K_P 先减小后增大,整体呈高斯分布函数变化;而 K_F 随着腐蚀周期的增加而逐渐下降,呈幂函数变化。 K_{SI} 、 K_P 和 K_F 的拟合函数与试验计算值较为接近,因此拟合函数可在一定程度上为工业-海岸环境腐蚀下Q235B钢材的 K_{SI} 、 K_P 和 K_F 取值提供参考。

式中: f 为腐蚀钢材强度; f_0 为未腐蚀钢材强度。

图9为不同大气腐蚀条件下钢材力学性能对比。郑山锁^[3]、魏源等^[4]、徐善华等^[5]、WANG等^[15]分别研究了大气环境腐蚀下、近海大气环境腐蚀下、盐雾环境暴露腐蚀下、海洋大气环境腐蚀下钢材的力学性能。由图可知,相同锈蚀率条件下,工业-海岸大气环境下片材屈服强度 S_{DR_y} 和抗拉强度 S_{DR_u} 基本上较其他环境下片材屈服强度 S_{DR_y} 和抗拉强度 S_{DR_u} 的高,即相应的力学指标较其它环境下相应的力学指标更低。相同腐蚀周期下,工业-海岸大气环境下片材的锈蚀率也明显高于其他腐蚀环境下片材的锈蚀率。这表明工业-海岸大气环境较海岸大气环境对钢材力学性能降低的程度更大。

基于 K_{SI} 、 K_P 和 K_F ,得到腐蚀钢材时变本构模型^[16],见下式:

$$\sigma = \begin{cases} E\epsilon & 0 \leq \epsilon < \epsilon_y \\ f_y & \epsilon_y \leq \epsilon < K_{SI}\epsilon_y \\ f_y + \frac{(f_u - f_y) \sqrt{(K_P - K_{SI})^2 \epsilon_y^2 - (\epsilon - K_P \epsilon_y)^2}}{(K_F - K_{SI})\epsilon_y} & K_{SI}\epsilon_y \leq \epsilon \leq K_F \epsilon_y \end{cases} \quad (7)$$

式中: σ 为腐蚀钢材应力; ϵ 为腐蚀钢材应变; ϵ_y 为腐蚀钢材屈服应变。

推导的时变本构模型可分为三个阶段,即弹性阶段、屈服阶段和强化阶段,与其它大气环境下的本构模型^[16]相比,工业-海岸大气环境下本构模型的屈服和强化阶段缩短更明显,这表明工业-海岸大气环境对钢材本构有着显著影响。将其与试验的应力-应变曲线进行比较,发现两者的吻合情况较好,两者误差小于9.8%;说明此模型可以较好地反映不同腐蚀周期下钢材力学性能的退化,对于工业-海岸环境下Q235B钢的腐蚀设计具有一定的指导意义。

3.2 时变本构模型验证

不同腐蚀周期的应力-应变曲线直接反映钢材力学性能的退化。本节基于建立的时变本构模型,对工业-海岸环境腐蚀下的 Q235B 钢试件进行数值模拟分析,并与试验结果进行对比。

3.2.1 数值模型

采用有限元软件 ABAQUS 对腐蚀 Q235B 钢试件建

模,如图 2 所示,数值模型为 C3D8R 实体单元,其尺寸、边界条件和约束方式与试验中保持一致,模型的一端保持固定,在其另一端通过施加位移的方式模拟拉伸。在保证模拟结果具有足够计算精度下,同时为提高运算的效率,数值模型的网格密度取 1 mm。钢材的本构模型采用第 3 节中的式(7)。

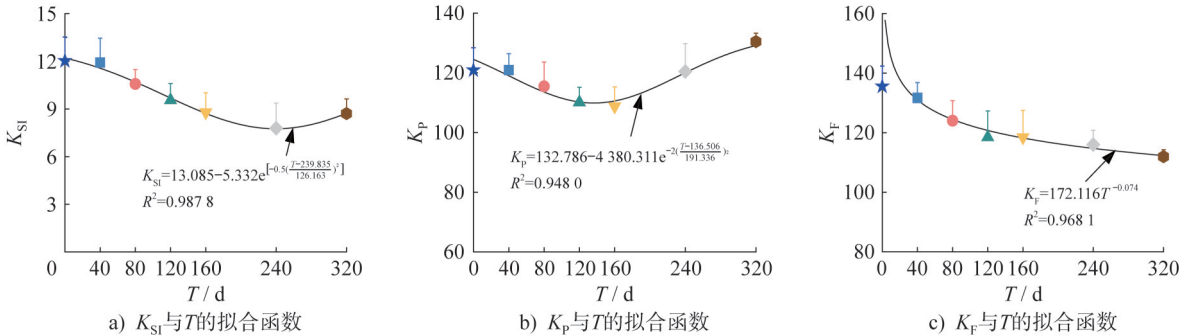


图 10 K 值与 T 的关系曲线
Fig. 10 Relationship curves between K and T

3.2.2 模型验证

图 11 为试验应力-应变曲线与有限元模拟结果对比。由图可以看出,模拟结果略大于试验结果,两者误差小于 6.5%,其原因为有限元模拟中未考虑 Q235B 钢试件

的材料初始缺陷,以及试验中钢材试件在加载过程中受力不对称。总体来说,本文建立的时变本构模型可以较为准确地反映工业-海岸环境腐蚀下 Q235B 钢的力学性能退化。

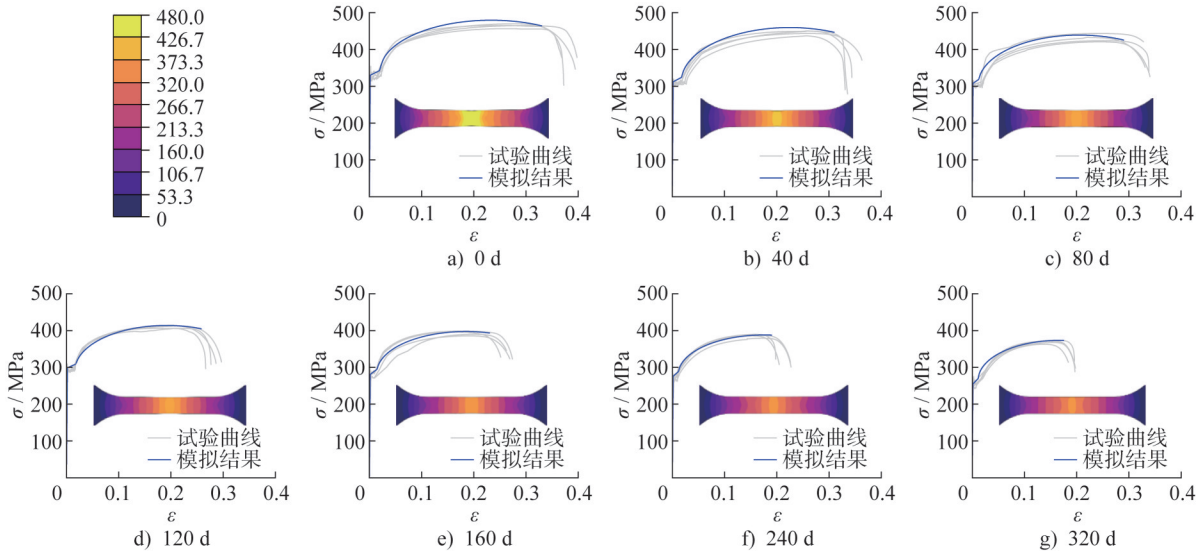


图 11 本构模型模拟结果与试验曲线对比
Fig. 11 Comparison between the simulation results from the constitutive model and test results

4 钢材室内外腐蚀时间相关性模型

为研究本文盐雾试验模拟的工业-海岸大气环境与实际的工业-海岸大气环境的相关性,选取与该环境最为

接近的青岛地区作为研究对象。通过在国家材料腐蚀与防护科学数据中心进行查询,依据环境试验站的大气气象及环境污染物含量数据,将碳钢在青岛地区的腐蚀拟

合参数取为0.055和0.61,因此碳钢在青岛地区大气暴露环境下的腐蚀深度预测模型^[17]可表示为:

$$D_{qd} = 0.055 T_{qd}^{0.61} \quad (8)$$

式中: D_{qd} 为碳钢在青岛地区大气暴露环境下的腐蚀深度; T_{qd} 为大气暴露时间。

参考先前关于锈蚀深度与腐蚀周期关系的研究^[17],室内试验模拟工业-海岸大气环境下碳钢腐蚀深度的预测模型为:

$$d = 0.0826 T_e^{0.3992} \quad (9)$$

式中: d 为室内试验模拟工业-海岸大气环境下碳钢腐蚀深度; T_e 为室内试验模拟工业-海岸大气环境下碳钢腐蚀周期。

将室内试验模拟工业-海岸大气环境下碳钢腐蚀深度等于碳钢在青岛地区大气暴露环境下的腐蚀深度,即 $d = D_{qd}$,则:

$$0.0826 T_e^{0.3992} = 0.055 T^{0.61} \quad (10)$$

由此可建立工业-海岸大气环境下室内外腐蚀时间相关性模型,见式(11),绘制其关系曲线见图12。

$$T = 1.9489 T_e^{0.6545} \quad (11)$$

采用上述公式,可由加速盐雾腐蚀试验周期推算出碳钢在青岛地区室外大气环境下的对应腐蚀时间,并在此基础上预测工业-海岸大气环境中钢材的腐蚀状态与力学性能退化规律。基于相关性模型可知,本文开展的160 d加速腐蚀试验等效于实际环境中服役54年,已超过荷载规范规定的建筑正常使用年限50年。结合时变本构模型,由相关性模型建立的加速腐蚀时间与实际服役年限对应关系,可为工业-海岸环境下Q235B钢材及钢结构的设计与安全运维提供更可靠的理论依据。

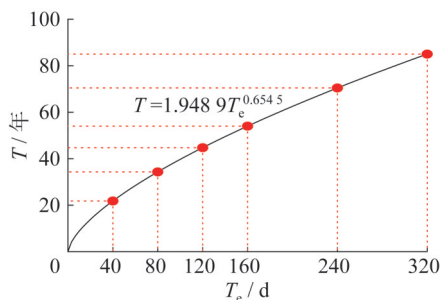


图12 相关性模型

Fig. 12 Correlation model

5 结论

(1) 随腐蚀周期的延长,钢材力学性能指标显著下降,失效模式由延性向脆性转变。与未腐蚀试件相比,腐蚀周期为320 d的试件屈服强度、抗拉强度、弹性模量分别下降了21.59%、20.17%、20.41%,而断后伸长率降幅达54.23%。此外,相较于单一海岸大气环境,工业-海岸

复合大气环境对钢材力学性能的劣化作用更为显著。

(2) 提出了工业-海岸环境下腐蚀钢材时变本构模型,模型模拟结果与试验曲线的误差小于6.5%,表明该模型可较准确地反映工业-海岸腐蚀环境下Q235B钢的力学性能退化规律。

(3) 建立了钢材室内加速腐蚀与室外实际腐蚀时间的相关性模型,根据模型可知本文160 d加速腐蚀试验等效于实际环境中服役54年,超出建筑结构50年正常使用年限要求。结合时变本构模型,该相关性模型可为工业-海岸环境下Q235B钢材及钢结构的工程设计与安全运维提供支撑。

综上,本文提出的工业-海岸腐蚀环境下室内外腐蚀时间相关性模型是基于腐蚀深度指标得到的,钢材腐蚀受温度、湿度等多种环境因素共同影响,相关机理有待在后续研究中进一步深入探讨。

参考文献:

- [1] PASTORCIC D, VUKELIC G, IVOSEVIC S. Welded steel in marine environment-Experimental and numerical study of mechanical properties degradation [J]. Materials Today Communications, 2023, 34: 105280. DOI:10.1016/j.mtcomm.2022.105280.
- [2] LI R, WANG H, MIAO C Q, et al. Experimental and numerical study on the degradation law of mechanical properties of stress-corrosion steel wire for bridge cables [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 212: 108294. DOI:10.1016/j.jcsr.2023.108294.
- [3] 曹琛, 郑山锁, 胡卫兵, 等. 大气环境腐蚀下钢结构力学性能研究综述 [J]. 材料导报, 2020, 34(11): 162-170. DOI: 10.11896/cldb.19040242.
- CAO Chen, ZHENG Shansuo, HU Weibing, et al. Review of research on mechanical properties of steel structure under atmospheric environment corrosion [J]. Materials Review, 2020, 34(11): 162-170. DOI: 10.11896/cldb.19040242. (in Chinese)
- [4] 魏源, 吴兆旗, 王鑫涛, 等. 近海大气环境下腐蚀Q235钢材力学性能退化规律及时变模型研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(4): 60-66. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2021.04.010.
- WEI Yuan, WU Zhaoqi, WANG Xintao, et al. Degradation law and time-varying model of mechanical properties of corroded Q235 steel in offshore atmospheric environment [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2021, 19(4): 60-66. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2021.04.010. (in Chinese)
- [5] 王皓, 徐善华. 单调及循环荷载作用下锈蚀焊接钢板力学性能退化研究 [J]. 土木工程学报, 2022, 55(11): 10-25. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.21101029.
- WANG Hao, XU Shanhua. Study on mechanical property

- degradation laws of corroded welded steel plates under monotonic and cyclic loading [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022, 55 (11): 10-25. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.21101029. (in Chinese)
- [6] 杨晓阳, 范文亮, 李正良, 等. 酸雨环境下Q420B钢材腐蚀疲劳裂纹扩展试验与模型研究[J]. *土木工程学报*, 2023, 56(2): 1-11. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.21111142.
- YANG Xiaoyang, FAN Wenliang, LI Zhengliang, et al. Experimental and model study on corrosion fatigue crack propagation of Q420B steel in acid rain condition [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2023, 56 (2): 1-11. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.21111142. (in Chinese)
- [7] 汪川, 曹公旺, 潘辰, 等. 碳钢、耐候钢在3种典型大气环境中的腐蚀规律研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2016, 36(1): 39-46. DOI: 10.11902/1005.4537.2015.010.
- WANG Chuan, CAO Gongwang, PAN Chen, et al. Atmospheric corrosion of carbon steel and weathering steel in three environments [J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2016, 36 (1): 39-46. DOI: 10.11902/1005.4537.2015.010. (in Chinese)
- [8] 郭明晓, 潘晨, 王振尧, 等. 碳钢在模拟海洋工业大气环境中初期腐蚀行为研究[J]. *金属学报*, 2018, 54(1): 65-75. DOI: 10.11900/0412.1961.2017.00142.
- GUO Mingxiao, PAN Chen, WANG Zhenyao, et al. A study on the initial corrosion behavior of carbon steel exposed to a simulated coastal-industrial atmosphere [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54 (1): 65-75. DOI: 10.11900/0412.1961.2017.00142. (in Chinese)
- [9] ZHANG J L, LI G, YU D H, et al. Framework for seismic risk analysis of engineering structures considering the coupling damage from multi-environmental factors [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2024, 150(10): 04024147. DOI: 10.1061/jsendh.steng-13340.
- [10] SAHA J K. Corrosion of construction steels in marine and industrial environment: Frontier work in atmospheric corrosion [M]. New Delhi: Springer New Delhi, 2013: 13.
- [11] 陈文娟, 郝龙, 董俊华, 等. 模拟工业-海岸大气中SO₂对Q235B钢腐蚀行为的影响[J]. *金属学报*, 2014, 50(7): 802-810. DOI: 10.3724/SP.J.1037.2013.00738.
- CHEN Wenjuan, HAO Long, DONG Junhua, et al. Effect of SO₂ on corrosion evolution of Q235B steel in simulated coastal industrial atmosphere [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2014, 50 (7): 802-810. DOI: 10.3724/SP. J. 1037.2013.00738. (in Chinese)
- [12] 姜绍飞, 林金星, 宋华霖, 等. 基于多物理场耦合的大气环境下碳钢点蚀演化及速率预测模型[J]. *材料导报*, 2024, 38(19): 235-241. DOI: 10.11896/cldb.23060012.
- JIANG Shaofei, LIN Jinxing, SONG Hualin, et al. Evolution and rate prediction model of pitting of carbon steel in atmospheric environment based on multiphysical fields [J]. *Materials Reports*, 2024, 38 (19): 235-241. DOI: 10.11896/cldb.23060012. (in Chinese)
- [13] GB/T 228.1—2010 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法[S].
- GB/T 228.1—2010 Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S]. (in Chinese)
- [14] GB/T 16545—2015 金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除[S].
- GB/T 16545—2015 Corrosion of metals and alloys—Removal of corrosion products from corrosion test specimens [S]. (in Chinese)
- [15] WANG Y D, CHANG C, XU S H, et al. Probabilistic constitutive model for corroded structural steel with stochastic pits under monotonic tension [J]. *Engineering Structures*, 2024, 304: 117599. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.117599.
- [16] ESMAEILI A. Behavior of reinforced concrete columns under variable axial loads [J]. *ACI Structural Journal*, 2004, 101(1): 124-132.
- [17] 林金星. 工业-海岸环境下腐蚀圆钢管虚拟孪生体的建模方法及性能演化[D]. 福州: 福州大学, 2024.
- LIN Jinxing. Modeling method and performance evolution of virtual twin model for corroded circular steel tubes in industrial-coastal atmosphere [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2024. (in Chinese)