

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.039



开放科学(资源服务)标识码OSID:



防腐层局部失效模式下钢材锈蚀行为 对力学性能的影响

牛凯¹, 张亮¹, 徐尉豪¹, 周妍², 杨阳², 王俊彦², 王鹏凯²

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 郑州 450052; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 针对防腐层局部失效模式下的Q355B钢材, 探讨钢材锈蚀行为及其对力学性能的影响。设计点状腐蚀、带状腐蚀、面状腐蚀3种典型防腐层局部失效模式下的标准试件。基于电化学试验测量钢材在防腐层局部失效模式下的锈蚀速率, 并分析钢材的锈蚀形态及分布特征; 基于试验现象分析锈蚀的起始点、扩展路径及形态变化; 基于腐蚀表面形貌分析了防腐层局部失效模式下的腐蚀路径及机理。基于钢材拉伸试验分析防腐层局部失效模式下钢材的弹性模量、屈服强度、抗拉强度、极限应变和断后伸长率, 结果表明, 防腐层局部失效模式下钢材的弹性模量、屈服强度、抗拉强度折减系数与平均腐蚀率呈线性负相关关系; 极限应变和断后伸长率折减系数与平均腐蚀率呈非线性相关关系。

关键词: 钢材锈蚀; 局部腐蚀; 防腐层失效; 力学性能

中图分类号: TU511.3 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(XXXX)XX-0001-12

Effect of corrosion behavior on mechanical properties of steel under local failure mode of anti-corrosion coating

NIU Kai¹, ZHANG Liang¹, XU Weihao¹, ZHOU Yan², YANG Yang²,
WANG Junyan², WANG Pengkai²

(1. State Grid Henan Electric Power Company Economic and Technological Research Institute, Zhengzhou 450052, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: This paper focuses on the corrosion behavior of Q355B steel and its impact on mechanical properties under the local failure modes of anti-corrosion coating. Standard specimens in three typical local failure modes of anti-corrosion coating, namely pitting corrosion, banded corrosion, and surface corrosion, were designed. Based on electrochemical tests, the rusting rate of the steel under the local failure modes of anti-corrosion coating was measured, and the rusting morphology and distribution characteristics of the steel were analyzed. The starting points, propagation paths, and morphological changes of local rusting were analyzed based on the test results, and the corrosion paths and mechanisms under the local failure modes of anti-corrosion coating were revealed through the corrosion surface morphology. The elastic modulus, yield point, yield strength, tensile

收稿日期: 2024-11-07

基金项目: 国网河南经研院生产合作项目(SGHAYJOOSJJS2400114)

作者简介: 牛凯(1989-), 男, 高级工程师, 主要从事输电线路结构设计研究, E-mail: niukai0391@foxmail.com。

Received: 2024-11-07

Foundation items: State Grid Henan Economic Research Institute Production Cooperation Project (No. SGHAYJOOSJJS-2400114)

Author brief: NIU Kai (1989-), senior engineer, main research interest: structural design of transmission lines, E-mail: niukai0391@foxmail.com.

strength, ultimate strain, and elongation after fracture of the steel under the local failure modes of anti-corrosion coating were analyzed through the steel tensile tests. The results indicate that, the reduction coefficients of the elastic modulus, yield strength, and tensile strength of the steel under the local failure modes of anti-corrosion coating have a linear negative correlation with the average corrosion rate; the reduction coefficients of the ultimate strain and elongation after fracture have a nonlinear correlation with the average corrosion rate.

Keywords: corrosion of steel; local corrosion; failure of anti-corrosion coating; mechanical property

工程中服役的钢结构长期暴露在各种环境条件下,表面防腐层易出现起泡、开裂、剥离等现象,这类防腐层的局部失效是钢材锈蚀的主要原因。钢材的局部锈蚀可能导致结构力学性能退化,进而引发工程事故。

钢结构局部腐蚀的形成机理复杂多样,受环境因素、材料性质、应力状态等多重因素影响。Andisheh 等^[1]指出,腐蚀坑的形成与钢材表面的化学活性、应力状态等因素有关。由于蚀坑存在随机性,难以通过传统方法对局部腐蚀进行准确的预测和分析。为了获得局部腐蚀的钢材,研究人员采用不同的腐蚀方式来制备模拟点蚀或局部腐蚀的试件,如机械加工^[2-3]、电化学腐蚀^[4-7]、交替浸泡^[8]和人工盐雾腐蚀^[9-10]等。李安邦等^[11]采用盒宽变换法编程计算了锈蚀表面分形维数,研究结果显示,锈蚀钢板的表面形貌具有分形特征。

材料的腐蚀速率并非稳定不变,而是随时间有动态变化。腐蚀产物对基体具有一定的保护作用,能够延缓腐蚀失重速率。Kainuma 等^[12]指出,腐蚀产物在钢材表面的沉积会形成阻抗层,导致腐蚀速率随时间逐渐降低。李伟光等^[13]开展了土壤埋藏试验,通过电化学测试证明长周期下带锈试件的腐蚀速率低于除锈试件,腐蚀产物内部结构存在较多缺陷和裂纹。

材料性能研究表明^[14-16],腐蚀会导致钢材截面积减小、表面粗糙度增加。Ren 等^[17]通过单调拉伸试验和有限元分析,发现腐蚀坑的存在会导致钢材在拉伸过程中出现应力集中现象,进而削弱其承载能力和延性。此外,腐蚀还会引起钢材内部微观结构的改变,如晶粒细化、位错密度增加等,材料微观层面的变化进一步影响其力学性能。在微小缺陷增多和应力集中效应的联合作用下,钢材的塑性变形能力下降,表现为断后伸长率减小^[18-19]。部分研究发现^[20-21],腐蚀初期的微小缺陷和应力集中效应会使得屈服强度略有增加。然而,随着腐蚀的进一步加剧,钢材内部的组织结构劣化严重,屈服强度大幅下降。防腐涂层的应用是抑制钢材腐蚀的有效手段,但涂层一旦出现损伤,却可能诱发更严重的局部腐蚀,导致结构出现损伤效应,甚至丧失

耐久性^[22]。局部腐蚀的位置是影响结构残余承载力的重要因素,Wang 等^[23]对比了圆管不同部位腐蚀对力学性能的影响,发现圆管中部的腐蚀对结构最不利。

目前针对防腐层局部失效模式下的钢材锈蚀行为及力学性能研究较少,并且着重单一缺陷的锈蚀钢材研究,但实际工程中防腐层往往同时存在多处失效的情况,并且防腐层局部失效模式下的钢材锈蚀行为及力学性能变化影响结构的整体安全。笔者对 3 种防腐层局部失效模式下的 Q355B 钢材试件进行通电加速腐蚀试验,分析点状腐蚀、带状腐蚀和面状腐蚀的形态差异。通过拉伸试验分析 3 种防腐层局部失效模式对力学性能指标的影响差异,并提出力学性能退化模型。

1 防腐层局部失效试验

1.1 防腐层失效模式分析

钢材的防腐层在特定环境下会失效,包括物理磨损、化学侵蚀等因素的单项作用或者多项联合作用^[24-25]。物理磨损中包括防腐层与基材黏合力不足导致的剥落现象,周围环境应力对涂层完整性的破坏。化学侵蚀中包括周围环境对防腐层的侵蚀作用,防腐层材料老化、降解导致的性能下降。钢材表面如果存在小孔、微裂缝、划痕等小损伤,热裂纹等自身缺陷,损伤和缺陷处容易聚集腐蚀介质和氧化剂,从而形成点腐蚀。如果钢结构所处潮湿、酸性或碱性环境或有其他腐蚀介质的环境中,部分腐蚀介质中的氧化剂会加速钢材表面的腐蚀速率,并诱导点状腐蚀的产生。钢结构工程在运输或者施工的工程场景中,因外部多种环境应力的作用,可能对表面防腐层造成碰撞、刮擦、机械损伤等带状划痕,进而诱导带状腐蚀的产生。当钢材暴露在含有腐蚀性物质的广泛区域,钢材表面会受到全面的腐蚀作用,进而诱导面状腐蚀的产生。因此,点状腐蚀、带状腐蚀和面状腐蚀为 3 种典型的钢材防腐层局部失效模式。

1.2 腐蚀试验设计

试验共设计制作了 12 组 8 mm 厚的 Q355B 钢材标准试件,试件的位置和制备符合 GB/T 2975—

2018^[26]的要求。试件的几何尺寸按照规范 GB/T 228.1—2021^[27]设计,具体尺寸如图 1 所示。

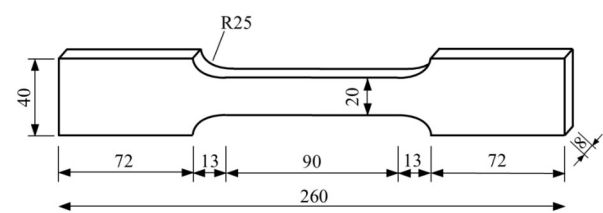


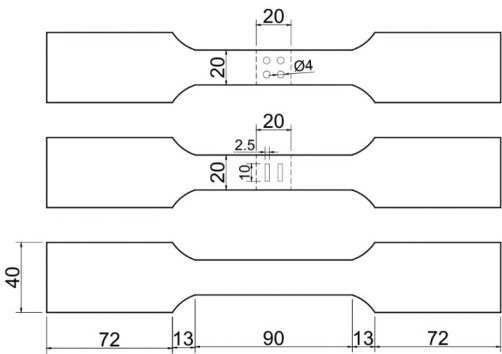
图 1 试件几何尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Geometric dimension of the specimen (unit: mm)

试件的化学成分如表 1 所示,钢材的化学成分和力学性能符合 GB/T 1591—2018^[28]的要求。

试件选用氟碳漆作为防腐涂层,夹持端各预留 30 mm 的裸露部分缠绕导线。防腐层的平均厚度约为 250 μm ,连续性良好,经测试无漏点,达到绝缘效果。试验中试验段为试件的平行段部分,长 90 mm。为了研究防腐层局部失效模式对钢材锈蚀的影响,在试件试验段中部 20 mm $\times$ 20 mm 的区域内均匀布置两种不同的缺陷,如图 2 所示。两种缺陷的面积等同,圆孔缺陷为点状腐蚀失效模式,直径为 4 mm。矩形缺陷为带状腐蚀失效模式,长 10 mm、宽 2.5 mm。同时,无涂层试件作为对照试件,为防腐层面状腐蚀失效模式。

腐蚀试验采用全浸泡通电加速腐蚀法,设置不同的腐蚀周期,在无外加应力条件下进行,以获取不同锈蚀程度的钢材试件。试验分 12 个工况进行,



(a) 防腐层失效模式示意图(单位:mm)



(b) 防腐层失效模式试件图

图 2 防腐层局部失效试件

Fig. 2 Specimens with local failure of anti-corrosion coating

每个工况有 3 个试件,共有 36 个试件。通电加速腐蚀试验工况及试件编号见表 2。

表 1 Q355B 钢材的化学成分

Table 1 Chemical composition of Q355B steel

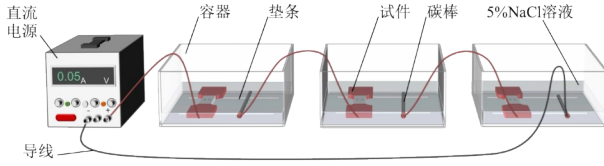
%											
C	Si	Mn	P	S	Ti	Cr	Ni	Cu	Al	N	C _{eq}
0.16	0.10	0.50	0.015	0.004	0.05	0.03	0.01	0.02	0.024	0.002 7	0.25

表 2 通电加速腐蚀试验工况

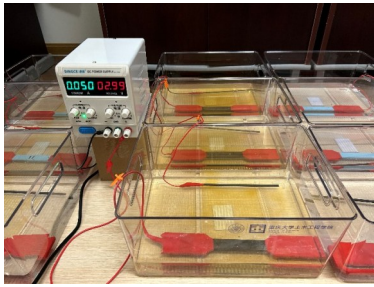
Table 2 Test condition of electric accelerated corrosion

工况	缺陷类型	缺陷尺寸及数量	通电时间/h	试件编号
工况 1	圆孔	D=4.0 mm, 4 个	0	T0-R-1、T0-R-2、T0-R-3
工况 2	圆孔	D=4.0 mm, 4 个	96	T1-R-1、T1-R-2、T1-R-3
工况 3	圆孔	D=4.0 mm, 4 个	192	T2-R-1、T2-R-2、T2-R-3
工况 4	圆孔	D=4.0 mm, 4 个	384	T3-R-1、T3-R-2、T3-R-3
工况 5	矩形	10.0 mm $\times$ 2.5 mm, 2 个	0	T0-B-1、T0-B-2、T0-B-3
工况 6	矩形	10.0 mm $\times$ 2.5 mm, 2 个	96	T1-B-1、T1-B-2、T1-B-3
工况 7	矩形	10.0 mm $\times$ 2.5 mm, 2 个	192	T2-B-1、T2-B-2、T2-B-3
工况 8	矩形	10.0 mm $\times$ 2.5 mm, 2 个	384	T3-B-1、T3-B-2、T3-B-3
工况 9	无涂层		0	T0-S-1、T0-S-2、T0-S-3
工况 10	无涂层		96	T1-S-1、T1-S-2、T1-S-3
工况 11	无涂层		192	T2-S-1、T2-S-2、T2-S-3
工况 12	无涂层		384	T3-S-1、T3-S-2、T3-S-3

调制 5% 的 NaCl 溶液作为腐蚀介质,将试件和碳棒完全浸入溶液中,浸泡 3 d 后开始通电。每组 3 个平行试件采用串联方式接入电源,通电加速腐蚀装置如图 3 所示。每 7 d 更换一次试验溶液,确保腐蚀介质的浓度稳定。



(a) 试验示意图



(b) 试验现场布置

图 3 通电加速腐蚀试验装置

Fig. 3 Test device of electric accelerated corrosion

已有研究表明^[29],通电腐蚀的电流密度应控制在 $1.0 \sim 2.0 \text{ mA/cm}^2$,试验电流密度选为 1.0 mA/cm^2 ,满足规范要求。试验中设计锈蚀率为 5%、10%、20%,根据法拉第电流定律,按式(1)得到通电时间为 96 h、192 h、384 h。达到预设通电时间时取出试件,按照规范 GB/T 16545—2015^[30],对试件上的腐蚀产物进行酸洗处理后用蒸馏水反复冲洗,并烘干进行后续试验。

$$\Delta m = \frac{MIt}{ZF} \quad (1)$$

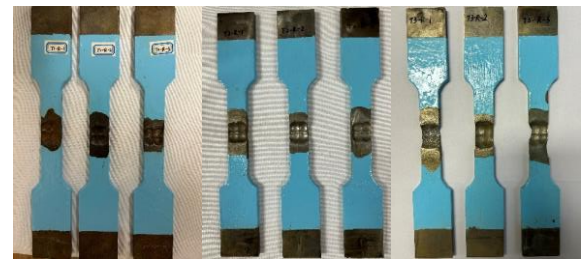
式中: Δm 为试件试验段质量损失,g; M 为铁的摩尔质量,取 56.0 g/mol ; I 为电流,A; t 为通电时间,s; F 为法拉第常数,取值为 96485 C/mol ; Z 为铁的化学价,取值为 2。

2 钢材的锈蚀行为

2.1 试件锈蚀形态

经过通电加速腐蚀试验的试件形态如图 4 所示。设置初始失效防腐层处的钢材锈蚀最为严重,周围出现较均匀的浅层锈蚀现象。3 种不同防腐层失效模式下,钢材的锈蚀行为存在显著差异。腐蚀初期,相邻锈坑尚未相交,点状腐蚀的锈坑形状为圆形,带状腐蚀的锈坑形状近似为椭圆形。随着锈坑不断扩展,邻近锈坑交界处宽度减小,锈坑相邻侧边由弧形逐渐演变为直线。出现该现象的原因

是两个锈坑的共同边界无法按原有弧形特征扩展,首先重叠的区域在前进方向的腐蚀受阻,弧形两侧则持续前进直至形成直线边界。由图 4(b)可知,直线边界的厚度逐渐减小,腐蚀 384 h 后带状腐蚀交界处已不明显,相邻锈坑趋于平整,出现“锈坑融合”迹象。因此,点状腐蚀先呈现以 4 个锈坑边界相交点为顶点的扇形锈坑,接触到试件边缘后逐渐转化为孤立边弧形、三边直线的四边形。而带状腐蚀随锈坑的融合在局部表面形成冠形锈坑,锈坑相交的边界呈直线,孤立边同样呈弧形。面状腐蚀未见明显锈坑,部分试件局部有不规则突出,多见于试验段两端。



腐蚀 96 h 腐蚀 192 h 腐蚀 384 h

(a) 圆孔型缺陷(点状腐蚀)



腐蚀 96 h 腐蚀 192 h 腐蚀 384 h

(b) 矩形缺陷(带状腐蚀)



腐蚀 96 h 腐蚀 192 h 腐蚀 384 h

(c) 无涂层试件(面状腐蚀)

图 4 腐蚀试件形态

Fig. 4 Morphologies of corroded specimen

试验过程中,试件防腐层局部失效后,钢材表面迅速出现锈斑并扩展。腐蚀前期,局部腐蚀的起始点位于防腐层失效处,沿深度和直径方向延伸。随着腐蚀时间的增长,防腐层失效范围逐渐扩展,推测其原因为浸泡过程中缺陷附近的防腐层发生起泡、剥离和开裂等情况,如图 5 所示。试验发现,

锈坑的发展及防腐涂层的失效并不是规则均匀的。点状腐蚀周围出现了纵向开裂裂缝,推测其原因为防腐层进水后开始膨胀,试件纵向的防腐层失效速度大于横向的失效速度,防腐层受到横向拉力,且涂层破损处易产生应力集中,进而导致纵向裂缝。



图5 防腐层起泡、开裂、剥离形态

Fig. 5 Morphologies of blistering, cracking and peeling of anti-corrosion coating

在腐蚀达到一定时间时,锈蚀产物在初始缺陷及防腐层剥离处堆积,如图6(a)所示。锈蚀产物的堆积缓解了基体的锈蚀速率,同时会改变原有的锈蚀扩展路径,使锈坑底部曲率降低。但是当钢材表面存在点蚀蚀孔时,孔内外自动构成了一个腐蚀原电池,腐蚀产物堵塞孔口,使孔内介质的酸性持续增强,对点蚀的快速发展起到了促进作用。腐蚀后期,腐蚀产物开始剥落,沉积在容器底部,如图6(b)所示。此时点蚀的蚀孔暴露,基材表面重新接触腐蚀介质,腐蚀速率加快,锈蚀进入加剧阶段,大幅度削减了试件的局部厚度。



(a) 堆积



(b) 剥落

图6 腐蚀产物堆积与剥落

Fig. 6 Accumulation and spalling of corrosion product

2.2 试件腐蚀率

钢结构的锈蚀程度一般由平均腐蚀率表征,即质量腐蚀率。腐蚀前,用电子天平将称出试件的初始质量,并计算得到单位体积质量,根据平行试验段(标距 90 mm)的体积占比得到试验段腐蚀前的质量。将烘干后的试件称重,根据式(2)得到平行

试验段的质量腐蚀率,其在数值上等于试验段的平均截面腐蚀率,进而得到试件腐蚀后的平均截面积,试验结果如表3所示。由表3可知,不同腐蚀模式下的钢材在相同的腐蚀周期内质量腐蚀率略有差距,平均截面损失率随腐蚀时间同步增长。腐蚀时间为 96、192 h 时,点状腐蚀质量腐蚀率最低,带状腐蚀稍大,面状腐蚀最高。腐蚀时间为 384 h 时,点状腐蚀质量腐蚀率最高,平均为 18.3%,带状腐蚀和面状腐蚀趋于一致,平均为 17.9%。

$$\eta_m = \frac{m_0 - m_1}{m_s} = \frac{A_0 - A_{ave}}{A_0} \tag{2}$$

式中: m_0 为试件腐蚀前的初始质量; m_1 为试件腐蚀后的剩余质量; m_s 为试验段腐蚀前的质量,通过腐蚀前试件单位体积质量计算得到; A_0 为试件腐蚀前的初始横截面积; A_{ave} 为试件腐蚀后的平均横截面积。

表3 腐蚀试件质量腐蚀率

Table 3 Mass corrosion rate of corroded specimen			
试件	A_0/mm^2	η_m	A_{ave}/mm^2
T1-R-1	157.61	0.041	151.10
T1-R-2	155.96	0.039	149.91
T1-R-3	155.90	0.041	149.44
T2-R-1	155.22	0.090	141.31
T2-R-2	159.95	0.088	145.95
T2-R-3	156.76	0.090	142.60
T3-R-1	155.23	0.182	126.93
T3-R-2	154.60	0.180	126.71
T3-R-3	156.83	0.186	127.73
T1-B-1	150.39	0.048	143.10
T1-B-2	149.07	0.047	142.06
T1-B-3	146.47	0.048	139.45
T2-B-1	159.90	0.105	143.08
T2-B-2	155.54	0.099	140.19
T2-B-3	152.29	0.099	137.18
T3-B-1	153.27	0.178	126.01
T3-B-2	156.93	0.180	128.64
T3-B-3	156.47	0.179	128.53
T1-S-1	156.34	0.057	147.37
T1-S-2	154.09	0.057	145.31
T1-S-3	154.92	0.057	146.04
T2-S-1	151.47	0.109	135.01
T2-S-2	152.24	0.109	135.69
T2-S-3	150.77	0.110	134.21
T3-S-1	152.97	0.177	125.95
T3-S-2	153.00	0.178	125.82
T3-S-3	155.03	0.179	127.28

3 力学性能退化规律

3.1 单调拉伸试验

拉伸试验加载设备采用重庆大学岩土实验室

的 INSTRON 材料试验 1342 系统,最大静荷载 250 kN,最大位移量程 ± 50 mm。根据规范 GB/T 228.1—2021^[27]进行试验。为了获得断后伸长率,在试样上绘制原始标距 80 mm。引伸计标距 50 mm,测定锈蚀最严重区域的应变值。试件屈服前的加载速率设定为 0.75 mm/min,屈服后加载速率按 2% 的速度增加至 4.00 mm/min,直至试件失效破坏。拉伸试验设备及加载过程如图 7 所示。



图 7 INSTRON 材料试验 1342 系统
Fig. 7 INSTRON Material test 1342 system

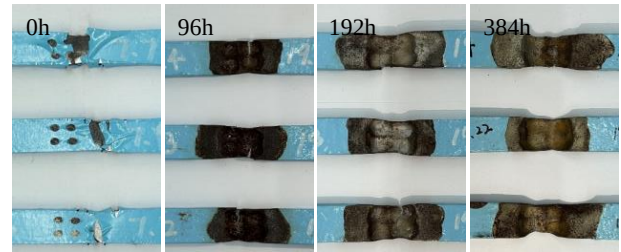
3 种防腐层局部失效模式的试件断裂后的破坏形式如图 8 所示。由图 8 可知,腐蚀试件受拉时应力集中在锈坑最深的位置,断裂路径沿最薄弱横截面发展。点状腐蚀的断裂路径跨越多个锈坑,呈现折线趋势,带状腐蚀沿某一锈坑轴向断裂,路径更为平直。面状腐蚀由于横截面均匀性较好,断裂路径均表现出随机性,腐蚀后断裂位置靠近平行段端部。随着锈坑融合程度加深,单一锈坑纵截面曲线最低处逐渐向相邻锈坑方向移动,断裂位置向交界处移动。带状腐蚀 384 h 后断裂位置接近锈坑交界边缘,此时相邻锈坑融合为一个大锈坑。

由图 8(d)可知,在横截面不均匀性较大的因素作用下,拉伸时试件由于偏心会出现朝向锈坑深度方向的弯曲。未腐蚀的试件具有良好的延性,断裂的颈缩现象相较于腐蚀试件更明显。随着锈蚀程度的加重,试件伸长率逐渐减小,试件断口形状由锯齿状转变为较平整的面,延性逐渐降低,破坏模式演变为突然发生的脆性破坏。

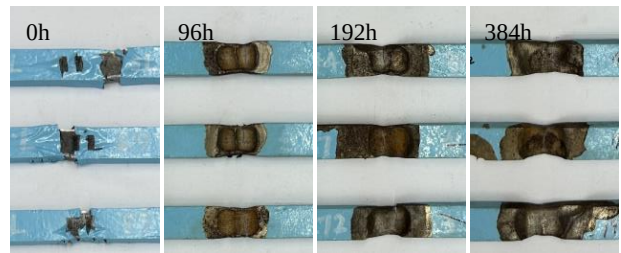
3.2 应力-应变曲线

通过拉伸试验获得试件的荷载和位移,结合试件腐蚀后的平均截面积可以计算名义应力 σ_s ,应变由引伸计测得。每种腐蚀模式的试件在不同腐蚀时间下的应力-应变曲线如图 9 所示。

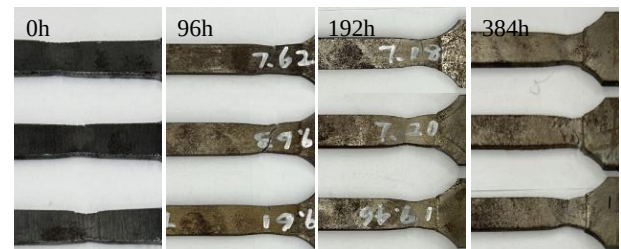
由图 9 可知,与面状腐蚀模式相比,点状腐蚀和带状腐蚀钢材的应力-应变曲线变化显著,具体表现在以下方面:



(a) 点状腐蚀断裂试件



(b) 带状腐蚀断裂试件



(c) 面状腐蚀断裂试件



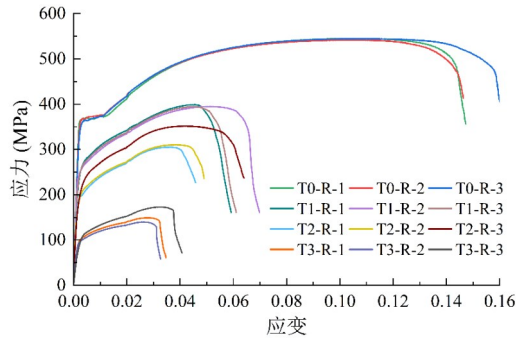
(d) 拉伸试件在偏心作用下的弯曲特征

图 8 拉伸试件破坏形式

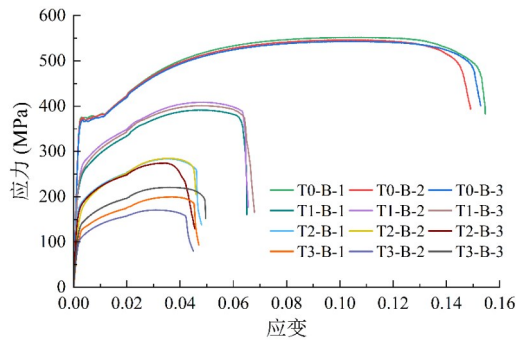
Fig. 8 Failure modes of tensile specimen

1) 在 3 种防腐层局部失效模式下,随着锈蚀程度的增加,试件的承载能力明显降低,抗拉极限强度下降。在加速腐蚀 384 h 后,点状腐蚀的平均极限强度由 544.1 MPa 降低至 154.0 MPa,带状腐蚀的平均极限强度由 547.2 MPa 降低至 197.0 MPa,均下降了 70% 左右。面状腐蚀在加速腐蚀 384 h 后由 547.3 MPa 的极限强度降低到 453.0 MPa 的极限强度,下降了 17%,仍具有较高强度。

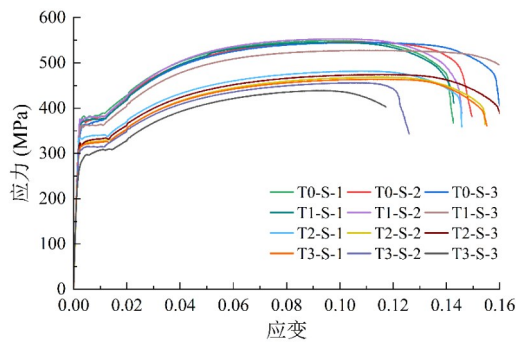
2) 随着锈蚀程度的增加,腐蚀试件的屈服强度下降,点状腐蚀和带状腐蚀屈服平台的长度显著缩短,面状腐蚀则不明显。对于点状腐蚀和带状腐蚀而言,腐蚀率达到 5% 之后屈服平台已经完全消失,如图 9(a)、(b)所示。



(a) 点状腐蚀试件应力-应变曲线



(b) 带状腐蚀试件应力-应变曲线



(c) 面状腐蚀试件应力-应变曲线

图9 试件应力-应变曲线

Fig. 9 Stress-strain curves

3)随着锈蚀程度的增加,应力-应变曲线的强化阶段变短,颈缩阶段逐渐变得不明显直至完全消失。试件的断后伸长率随之降低,韧性和延展性劣化,点状腐蚀和带状腐蚀的试件名义应力和应变退化严重。点状腐蚀和带状腐蚀的极限应变在腐蚀96 h时受腐蚀影响大幅降低,腐蚀192 h至384 h期间下降幅度减小,甚至出现略微增大情况,而面状腐蚀的极限应变受腐蚀影响不大。

由应力-应变曲线得到试件的机械性能如表4所示。对于没有屈服平台的试件,取0.2%残余应变对应的应力作为屈服强度。用游标卡尺测量初始标距的断后间距,计算得到断后伸长率。规范GB/T 50011—2010的规定^[31],结构钢应具有明显的

屈服平台,屈服强度与极限强度之比不应超过0.85,伸长率不应小于20%。不同腐蚀模式下的屈服比均满足要求,极限强度、屈服强度、弹性模量和断后伸长率则呈下降趋势,腐蚀后的钢材断后伸长率不能满足规范要求。

3.3 力学性能退化模型

拉伸试验表明,腐蚀钢材的承载力、强度及延展性等关键力学性能指标均随锈蚀程度的增加而退化。不同的腐蚀模式下力学性能的退化效果各异,因此,以力学性能的折减系数为研究对象,建立各项力学性能指标在平均腐蚀率作用下的退化模型。

1)抗拉极限承载力退化模型

腐蚀钢材的极限承载力随平均腐蚀率的增长而降低,抗拉极限承载力的折减系数 R_q 定义为腐蚀钢抗拉极限承载力与未腐蚀钢抗拉极限承载力的比值。通过线性拟合得到 R_q 与平均腐蚀率 η_m 之间的关系,如图10所示。

由图10可知,相比于面状腐蚀模式,点状腐蚀和带状腐蚀的试件承载力退化更加明显。式(3)为点状腐蚀、带状腐蚀和面状腐蚀钢材的抗拉极限承载力计算模型,数据拟合优度(R^2)分别为0.943和0.922,均与试验结果拟合良好。

$$R_q = \frac{F_c}{F_u} = \begin{cases} 1 - 3.894\eta_m, & \text{点状腐蚀、带状腐蚀} \\ 1 - 1.900\eta_m, & \text{面状腐蚀} \end{cases} \quad (3)$$

式中: R_q 为腐蚀钢的抗拉极限承载力折减系数; F_c 为腐蚀钢的抗拉极限承载力; F_u 为未腐蚀钢的抗拉极限承载力平均值; η_m 为钢的平均腐蚀率。

2)极限强度退化模型

极限强度折减系数 R_u 定义为腐蚀钢极限强度与未腐蚀钢极限强度的比值。极限强度折减系数 R_u 和平均腐蚀率 η_m 之间的关系如图11所示。

由图11可知,点状腐蚀和带状腐蚀的钢材极限强度退化规律基本一致,与承载力退化模型相似,点状腐蚀、带状腐蚀的极限强度衰退速率大于面状腐蚀。在腐蚀率达到10%时,面状腐蚀仍有超过80%的剩余强度,而点状腐蚀和带状腐蚀的钢材极限强度衰减至50%。通过线性拟合,得到3种腐蚀模式下极限强度退化的公式,见式(4)。

$$R_u = \frac{f_c}{f_u} = \begin{cases} 1 - 3.623\eta_m, & \text{点状腐蚀、带状腐蚀} \\ 1 - 1.121\eta_m, & \text{面状腐蚀} \end{cases} \quad (4)$$

式中: R_u 为腐蚀钢的极限强度折减系数; f_c 为腐蚀钢的极限强度; f_u 为未腐蚀钢的极限强度平均值; η_m 为

表 4 试件的机械性能
Table 4 Mechanical properties of specimens

试件	平均腐蚀率	极限承载力/ kN	极限强度/ MPa	屈服强度/ MPa	弹性模量/GPa	极限应 变/%	断后伸长 率/%	屈强比
T0-R-1	0	84.382	545.42	366.90	198.10	10.74	20.53	0.67
T0-R-2	0	83.395	541.88	366.89	192.47	10.80	20.88	0.68
T0-R-3	0	83.839	544.93	363.70	190.86	10.89	23.16	0.67
T1-R-1	0.041	60.272	398.87	270.20	156.18	4.54	7.65	0.68
T1-R-2	0.039	59.185	394.80	260.46	192.93	5.15	9.66	0.66
T1-R-3	0.041	58.989	394.73	266.29	167.48	4.51	8.41	0.67
T2-R-1	0.090	43.135	305.25	199.63	155.96	3.53	6.51	0.65
T2-R-2	0.088	45.308	310.44	209.04	146.19	3.82	6.29	0.67
T2-R-3	0.090	50.162	351.78	228.12	130.36	4.24	7.29	0.65
T3-R-1	0.182	18.934	149.18	105.36	74.20	2.72	4.16	0.71
T3-R-2	0.180	17.702	139.70	101.03	69.68	2.64	2.88	0.72
T3-R-3	0.186	22.097	173.00	114.89	48.47	3.29	4.24	0.66
T0-B-1	0	85.602	552.14	372.53	205.15	10.34	20.13	0.67
T0-B-2	0	83.656	546.38	368.56	204.63	10.49	22.33	0.67
T0-B-3	0	83.380	543.18	366.12	197.73	10.59	21.33	0.67
T1-B-1	0.048	56.058	391.72	253.02	163.24	4.85	9.00	0.65
T1-B-2	0.047	58.082	408.87	274.90	160.76	4.88	8.45	0.67
T1-B-3	0.048	55.955	401.25	259.75	164.40	4.81	9.28	0.65
T2-B-1	0.105	40.610	283.83	189.97	136.67	3.52	5.38	0.67
T2-B-2	0.099	39.929	284.83	182.32	94.47	3.60	5.26	0.64
T2-B-3	0.099	37.632	274.32	186.96	122.20	3.40	5.33	0.68
T3-B-1	0.178	25.156	199.64	132.13	63.83	3.58	4.13	0.66
T3-B-2	0.180	21.956	170.68	114.87	66.02	3.07	4.73	0.67
T3-B-3	0.179	28.375	220.77	146.13	77.73	3.62	5.02	0.66
T0-S-1	0	82.581	549.30	377.82	196.69	9.49	21.08	0.69
T0-S-2	0	83.661	547.66	368.20	205.25	10.48	22.69	0.67
T0-S-3	0	83.733	544.92	363.64	190.17	10.34	21.83	0.67
T1-S-1	0.057	80.364	545.32	364.74	191.66	10.10	20.63	0.67
T1-S-2	0.057	80.394	553.26	370.50	194.92	10.09	20.31	0.67
T1-S-3	0.057	77.065	527.68	357.61	189.59	10.30	21.80	0.68
T2-S-1	0.109	65.076	482.00	331.59	202.62	10.18	18.99	0.69
T2-S-2	0.109	63.590	468.63	328.84	182.16	9.96	19.33	0.70
T2-S-3	0.110	63.671	474.42	315.50	201.66	10.21	20.06	0.67
T3-S-1	0.177	58.449	464.05	323.56	203.57	10.03	17.23	0.70
T3-S-2	0.178	57.402	456.23	313.77	180.50	10.14	16.29	0.69
T3-S-3	0.179	55.857	438.86	307.12	202.26	9.87	15.95	0.70

钢的平均腐蚀率。

3)屈服强度退化模型

屈服强度折减系数 R_y 定义为腐蚀钢屈服强度与未腐蚀钢屈服强度的比值。腐蚀钢材的屈服强度退化模型如图 12 所示。

由图 12 可知,屈服强度受点状腐蚀和带状局部腐蚀的影响较明显。推测其原因为,面状腐蚀会导致钢材表面不平整,减少几何尺寸,但是对材料本身的强度没有影响。但点状和带状腐蚀试件在局部区域的厚度大大减少,且横截面范围内变化不一,应力发展差异大,因此屈服强度受点状和带状

腐蚀的影响较明显。式(5)表现了点状腐蚀、带状腐蚀和面状腐蚀对钢材屈服强度的不同影响。

$$R_y = \frac{f_{yc}}{f_y} = \begin{cases} 1 - 3.597\eta_m, & \text{点状腐蚀、带状腐蚀} \\ 1 - 0.914\eta_m, & \text{面状腐蚀} \end{cases} \quad (5)$$

式中: R_y 为腐蚀钢的屈服强度折减系数; f_{yc} 为腐蚀钢的屈服强度; f_y 为未腐蚀钢的屈服强度平均值; η_m 为钢的平均腐蚀率。

4)弹性模量退化模型

根据规范 GB/T 228.1—2021^[27],基于弹性阶段

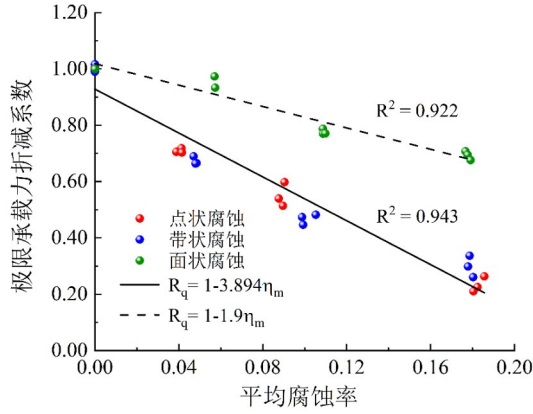


图 10 极限承载力退化模型

Fig. 10 Degradation model of ultimate bearing capacity

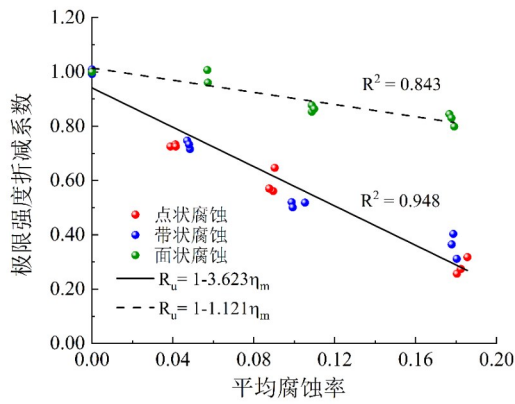


图 11 极限强度退化模型

Fig. 11 Degradation model of ultimate strength

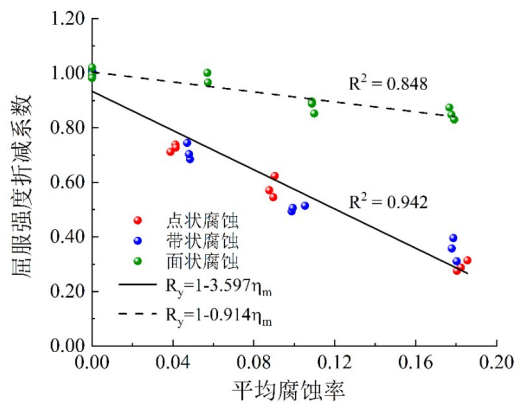


图 12 屈服强度退化模型

Fig. 12 Degradation model of yield strength

应力与应变的比值拟合得到腐蚀钢材的弹性模量。弹性模量折减系数 R_E 定义为腐蚀钢弹性模量与未腐蚀钢弹性模量的比值。腐蚀钢材的弹性模量退化模型如图 13 所示。

面状腐蚀模式下,钢材的弹性模量几乎不变,可视为 $R_E=1$ 。点状腐蚀和带状腐蚀钢材的弹性模量,随平均腐蚀率呈线性降低。钢材的弹性模量折减系数如式(6)所示。

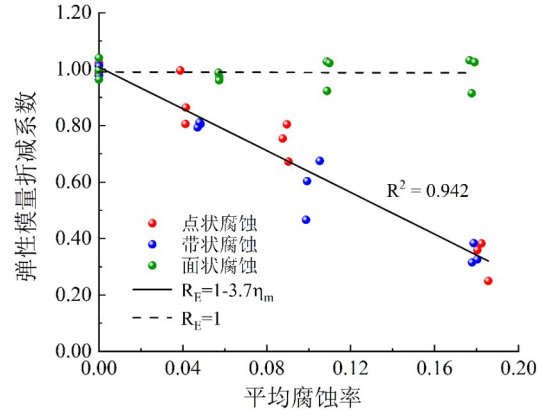


图 13 弹性模量退化模型

Fig. 13 Degradation model of elastic modulus

$$R_E = \frac{E_c}{E} = \begin{cases} 1 - 3.700\eta_m, & \text{点状腐蚀、带状腐蚀} \\ 1, & \text{面状腐蚀} \end{cases} \quad (6)$$

式中: R_E 为腐蚀钢的弹性模量折减系数; E_c 为腐蚀钢的弹性模量; E 为未腐蚀钢的弹性模量平均值; η_m 为钢的平均腐蚀率。

5) 极限应变退化模型

极限应变为应力-应变曲线中最大应力对应的应变。极限应变折减系数 R_ϵ 定义为腐蚀钢极限应变与未腐蚀钢极限应变的比值。3 种腐蚀模式下的极限应变折减系数 R_ϵ 和平均腐蚀率 η_m 的关系如图 14 所示。

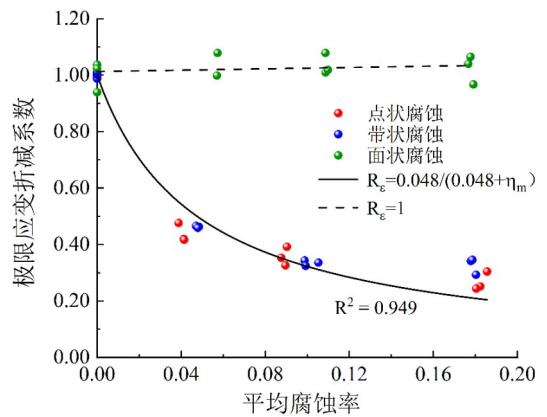


图 14 极限应变退化模型

Fig. 14 Degradation model of ultimate strain

由图 14 可知,随着屈服平台的缩减和消失,腐蚀钢材提前进入强化阶段,极限应变随之降低,表明钢材抵抗塑性变形的能力下降。面状腐蚀钢材的极限应变变化不明显,点状腐蚀和带状腐蚀钢的极限应变受腐蚀影响大。点状腐蚀和带状腐蚀平均腐蚀率由 4.4% 增长至 18.1%,极限应变折减系数由 0.45 下降至 0.30,退化了 33.3%。通过非线性

性拟合,得到点状和带状局部腐蚀钢的极限应变退化模型。钢材的极限应变折减系数和平均腐蚀率的关系如式(7)所示。

$$R_{\epsilon} = \frac{\epsilon_c}{\epsilon} = \begin{cases} \frac{0.048}{0.048 + \eta_m}, & \text{点状腐蚀、带状腐蚀} \\ 1, & \text{面状腐蚀} \end{cases} \quad (7)$$

式中: R_{ϵ} 为腐蚀钢材的极限应变折减系数; ϵ_c 为腐蚀钢材的极限应变; ϵ 为未腐蚀钢材的极限应变平均值; η_m 为钢材的平均腐蚀率。

6) 断后伸长率退化模型

断后伸长率在防腐层局部失效模式下降低反映了腐蚀钢材的延展性劣化。断后伸长率折减系数 R_{δ} 定义为腐蚀钢伸长率与未腐蚀钢伸长率的比值。3种腐蚀模式下的断后伸长率折减系数 R_{δ} 和平均腐蚀率 η_m 关系如图15所示。

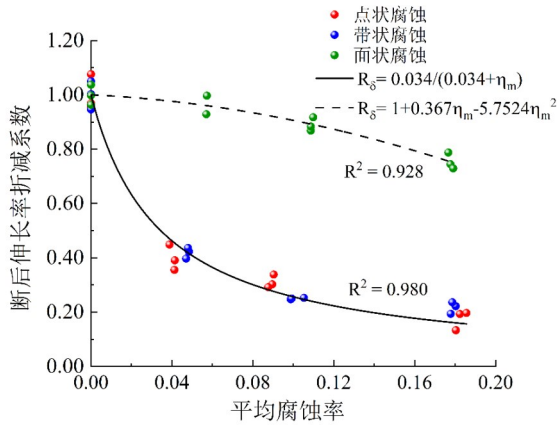


图15 断后伸长率退化模型

Fig. 15 Degradation model of elongation after fracture

由图15可知,点状腐蚀、带状腐蚀钢材的断后伸长率退化趋势与面状腐蚀不同。随着平均腐蚀率的提高,点状腐蚀、带状腐蚀模式下,钢材的断后伸长率退化速度远远超出面状腐蚀,退化模型见式(8)。点状腐蚀、带状腐蚀的钢材断后伸长率退化速度由快变慢,面状腐蚀的钢材断后伸长率退化速度由慢变快。点状腐蚀、带状腐蚀钢材断后伸长率在0%~5%腐蚀率范围内衰减严重,腐蚀率达5%时断后伸长率退化至40%,表明这两种局部腐蚀对钢材的塑性和韧性影响显著。在局部腐蚀因素的作用下,钢材可能从延性断裂转为脆性断裂。

$$R_{\delta} = \frac{\delta_c}{\delta} = \begin{cases} \frac{0.034}{0.034 + \eta_m}, & \text{点状腐蚀、带状腐蚀} \\ 1 + 0.367\eta_m - 5.752\eta_m^2, & \text{面状腐蚀} \end{cases} \quad (8)$$

式中: R_{δ} 为腐蚀钢材的断后伸长率折减系数; δ_c 为腐蚀钢材的断后伸长率; δ 为未腐蚀钢材的断后伸长

率平均值; η_m 为钢材的平均腐蚀率。

提出钢材力学退化模型适用于点状腐蚀、带状腐蚀及面状腐蚀3种防腐层局部失效下的Q355B钢材力学性能退化的量化评价,也可为其他局部缺陷(如缝隙腐蚀)Q355B钢材的力学性能研究提供参考。研究过程中未考虑服役应力对腐蚀行为的耦合作用。因此式(3)~式(8)适用于无外加应力的工况下Q355B钢材,推广至其他材料或含应力腐蚀场景时需重新标定参数。

4 结论

针对工程中钢材锈蚀对结构安全性的影响,通过通电加速腐蚀试验和拉伸试验,得到点状腐蚀、带状腐蚀和面状腐蚀对钢材力学性能的影响,建立了Q355B钢板防腐层局部失效模式下的力学性能退化模型。得到如下结论:

1) 识别不同环境条件下防腐层局部失效后钢材腐蚀的具体模式,主要为点状腐蚀、带状腐蚀、面状腐蚀等。防腐层起泡后易发生点状腐蚀,防腐层剥离后易发生带状腐蚀,大面积防腐层脱落后易发生面状腐蚀。

2) 钢材的锈蚀路径由防腐层局部失效处开始,起初向每一个锈坑边缘较均匀扩展,随着浸泡与腐蚀时间延长,防腐层局部失效范围增大(起泡、开裂、剥离),对金属基体不再起到保护作用,并且受到腐蚀产物堆积的影响,锈蚀路径逐渐不规则。新的锈坑产生,锈蚀路径随之增多,可能与原有锈蚀路径相交,相互影响。

3) 防腐层局部失效导致腐蚀形态发生变化。随着锈蚀程度的增加,点状腐蚀的锈坑由分散的圆形向一个圆形边界融合,沿轴向的截面厚度不均匀性最明显;带状腐蚀的锈坑呈冠状,沿轴向的截面厚度不均匀性较明显;面状腐蚀基本呈表面统一削减,沿轴向的截面厚度无明显变化。随着锈蚀程度增高,相邻锈坑有融合迹象,试件破坏时的断裂位置因此向交界处移动。

4) 理论上,3种腐蚀模式下的平均腐蚀速率一致,随腐蚀时间线性增长。但不同的防腐层失效模式下,锈蚀钢板最小截面及其对应的最大截面腐蚀率不同,其对力学性能的影响尚不明确,且研究未涉及截面不均匀性分析,对局部腐蚀的评估不足,可以针对腐蚀形貌、蚀坑扩展规律及蚀坑曲线拟合参数等进行进一步研究。另外,得到的力学性能退化模型适用于无应力工况,不适用于承受服役应力的钢结构腐蚀状态。

5) 防腐层局部失效模式下,Q355B钢材的力学

性能由于锈蚀作用而降低。随着锈蚀程度的提高,极限承载力和极限强度线性退化;屈服强度逐渐下降;点状腐蚀和带状腐蚀的弹性模量逐渐减小,面状腐蚀的弹性模量无明显变化。点状腐蚀和带状腐蚀的断后伸长率退化程度较面状腐蚀更严重;点状腐蚀和带状腐蚀的屈服平台消失,失去变形能力;点状腐蚀和带状腐蚀的极限应变退化显著,面状腐蚀的极限应变退化不明显。

参考文献

- [1] ANDISHEH K, SCOTT A, PALERMO A. Modeling the influence of pitting corrosion on the mechanical properties of steel reinforcement: Modeling the influence of pitting corrosion [J]. *Materials and Corrosion*, 2016, 67(11): 1220-1234.
- [2] AHN J H, JEON S H, JEONG Y S, et al. Evaluation of residual compressive strength and behavior of corrosion-damaged carbon steel tubular members [J]. *Materials*, 2018, 11(7): 1254.
- [3] LIU Y F, MIAO Z W, YUAN H, et al. Experimental study of tensile behaviour of rebars with simulated pitting corrosion [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 445: 137952.
- [4] IMPERATORE S, RINALDI Z, DRAGO C. Degradation relationships for the mechanical properties of corroded steel rebars [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 148: 219-230.
- [5] VANAMA R K, RAMAKRISHNAN B. Improved degradation relations for the tensile properties of naturally and artificially corroded steel rebars [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 249: 118706.
- [6] 白杨, 刘沿东, 贺彤, 等. 热轧工艺对含 Sn 铁素体不锈钢力学性能和耐腐蚀性能的影响[J]. *材料工程*, 2023, 51(11): 161-170.
BAI Y, LIU Y D, HE T, et al. Effects of hot rolling process on mechanical properties and corrosion resistance of Sn-containing ferritic stainless steel [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2023, 51(11): 161-170. (in Chinese)
- [7] CAO H F, LYU Z D, DONG W, et al. Corrosion experimental research on local damage of epoxy-coated steel bars in concrete under marine environment [J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 8: 821716.
- [8] CALERO J, et al. Wet/dry accelerated laboratory test to simulate the formation of multilayered rust on carbon steel in marine atmospheres [J]. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 2017, 52(3): 178-187.
- [9] HUANG H J, JIA C, GUO L H. Effect of local corrosion on tensile behavior of steel plates [J]. *Structures*, 2022, 43: 977-989.
- [10] GUO Q, WU Z Y, XING Y, et al. Corrosion evolution and mechanical property deterioration of Q355NH weathering steel in long-term neutral salt spray environment [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134193.
- [11] 李安邦, 徐善华. 中性盐雾加速腐蚀钢结构表面形貌分形维数表征[J]. *材料导报*, 2019, 33(20): 3502-3507.
LI A B, XU S H. Characterization of surface morphology of neutral salt-spray accelerated corrosion steel structure by fractal dimension [J]. *Materials Reports*, 2019, 33(20): 3502-3507. (in Chinese)
- [12] KAINUMA S, YANG M Y, XIE J J, et al. Time-dependent prediction on the localized corrosion of steel structure using spatial statistical simulation [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2021, 21(3): 987-1003.
- [13] 李伟光, 肖盼, 刘溢, 等. Q235 钢在某地区土壤环境中的长期腐蚀行为[J]. *表面技术*, 2024, 53(18): 67-77.
LI W G, XIAO P, LIU Y, et al. Long-term corrosion behavior of Q235 steel in some soil environment [J]. *Surface Technology*, 2024, 53(18): 67-77. (in Chinese)
- [14] 何宝睿, 刘小娟, 苏龙辉, 等. 不均匀锈蚀钢筋截面分布特征与拉伸数值模拟[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(2): 186-192.
HE B R, LIU X J, SU L H, et al. Cross-section distribution feature and tensile numerical simulation of non-uniform corroded steel bars [J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2024, 45(2): 186-192. (in Chinese)
- [15] WANG F, XUE X Y, HUA J M, et al. Non-uniform corrosion influences on mechanical performances of stainless-clad bimetallic steel bars [J]. *Marine Structures*, 2022, 86: 103276.
- [16] 徐善华, 宋翠梅, 李晗. 模拟海洋和一般大气环境下锈蚀钢材表面形貌差异研究[J]. *材料导报*, 2021, 35(2): 2125-2132.
XU S H, SONG C M, LI H. Difference in surface characteristics of corroded steel under simulated marine and general atmosphere environment [J]. *Materials Reports*, 2021, 35(2): 2125-2132. (in Chinese)
- [17] REN S B, GU Y, KONG C, et al. Effects of the corrosion pitting parameters on the mechanical properties of corroded steel [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 272: 121941.
- [18] 贾晨, 邵永松, 郭兰慧. 腐蚀损伤 Q690E 钢板单调拉伸性能与滞回性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2024, 45(4): 177-188.
JIA C, SHAO Y S, GUO L H. Monotonic tensile behavior and hysteretic behavior of Q690E steel plate with corrosion damage [J]. *Journal of Building Structures*, 2024, 45(4): 177-188. (in Chinese)

- [19] 肖林, 黄雅茜, 卫星, 等. 钢-混组合桥梁栓钉腐蚀疲劳失效及力学性能退化机理试验研究[J]. 中国铁道科学, 2024, 45(2): 48-58.
- XIAO L, HUANG Y X, WEI X, et al. Experimental research on corrosion-fatigue failure and properties degradation mechanism of stud in steel-concrete composite bridges [J]. China Railway Science, 2024, 45(2): 48-58. (in Chinese)
- [20] WANG F, YUE J W, WANG W Z, et al. Unified fatigue life calculation of Q355B-16 mm steel notched plates considering crack initiation [J]. Construction and Building Materials, 2024, 437: 136972.
- [21] SI Q, DING Y, ZONG L, et al. Low cycle fatigue properties of corroded Q355B steel [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2024, 36(1).
- [22] 杨英, 王芳, 巫业栋, 等. 不同循环周期 Cr/NiCrN 多层涂层腐蚀磨损行为[J]. 表面技术, 2021, 50(10): 301-308, 383.
- YANG Y, WANG F, WU Y D, et al. The corrosive wear behavior of Cr/NiCrN multilayer coatings with various cycle periods [J]. Surface Technology, 2021, 50 (10): 301-308, 383. (in Chinese)
- [23] WANG H J, ZHANG Z W, QIAN H L, et al. Effect of local corrosion on the axial compression behavior of circular steel tubes [J]. Engineering Structures, 2020, 224: 111205.
- [24] LAZORENKO G, KASPRZHITSKII A, NAZDRACHEVA T. Anti-corrosion coatings for protection of steel railway structures exposed to atmospheric environments: A review [J]. Construction and Building Materials, 2021, 288: 123115.
- [25] 郝负洪, 宣姣羽, 马思晗, 等. 区域特殊环境对钢结构涂层基本力学性能影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24 (4): 794-799.
- HAO Y H, XUAN J Y, MA S H, et al. Influence of regional special environment on the basic mechanical properties of steel structure coating [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4): 794-799. (in Chinese)
- [26] 钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T 2975—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- Steel and steel products—Location and preparation of samples and test pieces for mechanical testing: GB/T 2975—2018 [S]. Beijing: Standard Press of China, 2018. (in Chinese)
- [27] 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- Metallic materials—Tensile testing: Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [28] 低合金高强度结构钢: GB/T 1591—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- High strength low alloy structural steels: GB/T 1591—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018. (in Chinese)
- [29] 袁迎曙, 章鑫森, 姬永生. 人工气候与恒电流通电法加速锈蚀钢筋混凝土梁的结构性能比较研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 42-46.
- YUAN Y S, ZHANG X S, JI Y S. A comparative study on structural behavior of deteriorated reinforced concrete beam under two different environments [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 42-46. (in Chinese)
- [30] 金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除: GB/T 16545—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- Corrosion of metals and alloys—Removal of corrosion products from corrosion test specimens: GB/T 16545—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese)
- [31] 建筑抗震设计标准: GB/T 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Code for seismic design of buildings: GB/T 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)

(编辑 XXX)