

考虑大气腐蚀影响的钢结构剩余抗震性能研究进展

张岳林^{1,2}, 冉翠玲³, 王伟^{1,2}, 顾跃跃³, 方成^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程防灾全国重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;

3. 中国二十二冶集团有限公司, 河北 唐山 064000)

摘要: 对考虑大气腐蚀影响的钢结构剩余抗震性能的现有研究进行综述, 首先探讨了钢在大气环境下腐蚀程度随时间的变化规律, 其次从材料、构件、结构体系 3 个层次梳理了腐蚀对钢结构抗震性能影响的研究现状, 最后针对该领域当前研究的不足进行了详细评述。该领域下一步重点研究方向应包括腐蚀预测新方法、考虑蚀坑分布随机性的建模方法、焊缝腐蚀与焊缝超低周疲劳的交叉学科研究、适合腐蚀结构地震易损性分析的高效建模方法。

关键词: 大气腐蚀; 腐蚀疲劳; 焊缝腐蚀; 超低周疲劳; 抗震性能

中图分类号: TU391

文献标志码: A

Residual Seismic Performance of Steel Structures Considering Influence of Atmospheric Corrosion: A Review

ZHANG Yuelin^{1,2}, RAN Cuiling³, WANG Wei^{1,2}, GU Yueyue³, FANG Cheng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. MCC22 Group Corporation Ltd., Tangshan 064000, China)

Abstract: The aim of this paper is to summarize existing studies with regards to residual seismic performance of steel structures considering atmospheric corrosion. First, the variation laws of corrosion degree of mild steel with time in atmospheric environment is discussed. Then, state-of-the-art about the influence of atmospheric corrosion on seismic behavior of steel structures is reviewed from material, structural member, and structural system. Finally, a detailed review is provided on the limitations of currents studied in this field. A review of the current work indicates that further study should be

focused on new methods of corrosion prediction, modeling method considering corrosion pits distribution randomness, interdisciplinary study on weld corrosion and weld ultra-low cycle fatigue (ULCF), and high-efficiency modeling method suitable for seismic fragility analysis of corroded steel structures.

Keywords: atmospheric corrosion; corrosion fatigue; weld corrosion; ultra-low-cycle fatigue; seismic performance

钢结构具有重量轻、延性好、便于加工和安装等优点, 所以广泛应用于抗震设计中。2001 年, 建设部发布了《钢结构住宅产业化技术导则》^[1], 促进了钢结构在住宅中的应用。2016 年, 中国工程院咨询工作办公室向中共中央办公厅提交了《关于在结构工程中大力推广应用钢结构的建议》, 进一步推动了钢结构在结构工程中的应用。钢结构在土木工程中的典型应用案例不胜枚举, 如上海浦发银行总部办公楼(外框钢结构)、中国钻石交易中心(外框钢结构)、港珠澳大桥(钢桥面板)、中信银行杭州总部大楼(钢结构加支撑)、龙华万科中心(外框钢结构)、上海金融交易广场(外框钢结构加支撑)等。

虽然钢结构在延性等方面具有混凝土结构、木结构等无法比拟的优势, 但钢结构也存在一个严重的问题——腐蚀。据统计, 与腐蚀相关的耗费约占全球 GDP 的 3.4%^[2-4]。尤其是随着我国工业化进程的推进, 大气中的工业污染物会进一步加剧钢结构的腐蚀。尽管涂层防腐技术也在不断向前发展, 但在风吹、日晒、雨淋、外部物体撞击以及建筑主体结构弹塑性变形而造成的拉压等作用下, 涂层的脱落也是不可避免的。有学者形象的指出: “手表上的秒

收稿日期: 2023-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(52078359); 上海市曙光计划(22SG18); 上海市科技创新行动计划(22dz1201700)

第一作者: 张岳林, 博士生, 主要研究方向为钢与轻型结构。E-mail: zhangyuelin@tongji.edu.cn

通信作者: 方成, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为韧性钢结构及智能材料。

E-mail: chengfang@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

针每转过一圈,就有1吨钢腐蚀成铁锈”^[5]。腐蚀普遍发生于大气环境(如桥梁结构)、土壤环境(如管线结构)以及海洋环境(如船舶与海洋结构)中^[6],被称为“金属的癌症”^[5]。我国工业建筑腐蚀是普遍和严重的,据调查,鞍钢的总腐蚀损失已超过1亿元,而宝钢由于腐蚀产生的修复费达数百万元^[7]。腐蚀造成的桥梁构件失效案例也不胜枚举,如:1967年Silver桥第330号眼杆上的初始裂纹在应力腐蚀和腐蚀疲劳的作用下扩展,导致该桥倒塌和46人丧生^[8];1995年5月广州海印大桥南塔边跨西侧15号索突然坠落^[9];2001年11月宜宾小南门大桥因吊杆钢绞线应力腐蚀导致吊杆局部断裂、桥面坍塌^[10]。2013年腐蚀引起某钢结构网架坍塌^[11]。除了工业建筑与桥梁结构,民用建筑也因受腐蚀而必须在寿命期内进行修复,如人民大会堂由于建造初期曾加氯盐作为防冻剂而造成梁柱中钢筋腐蚀严重,于1994年、1995年大修,总修复费上亿元^[7]。

需要注意的是,含腐蚀损伤的钢结构可能位于震区,而由于地震是一个循环加载的过程,所以与连续倒塌相比,腐蚀对钢结构抗震性能的影响可能会更严重,有研究表明:小于2%的腐蚀质量损失可造成钢材失效循环次数降低22%,而3%的腐蚀质量损失可造成失效循环次数降低47%^[12]。对于构件层次,文献[13]的试验结果表明,经过18个月的加速腐蚀后,刚性梁柱节点的屈服承载力和极限承载力分别降低了28.2%和32.1%,而极限位移和累计耗能分别降低了49.4%和70.8%。文献[14]的研究结果表明,当腐蚀造成的质量损失为11.28%时,钢梁的极限承载力、极限位移、延性和总耗能分别降低了18.31%、11.09%、4.17%和28.88%,而当质量损失为8.02%时,钢柱相应指标的退化分别为15.41%、23.41%、10.37%和18.64%。综上所述,研究腐蚀结构的时变抗震性能,不仅可为既有结构的寿命评估与维修加固提供指导,从而避免建筑物倒塌造成的人员伤亡以及不必要的拆除和过度维护造成的巨额经济损失,也可为新建建筑的耐久性设计提供参考。

1 大气腐蚀模型

腐蚀程度随时间的变化函数称为腐蚀模型,腐蚀程度可用腐蚀造成的构件厚度损失、体积损失或重量损失来表示。目前一般通过加速腐蚀的方法来进行结构剩余强度试验,其中建立加速腐蚀与实际

大气环境腐蚀的合理对应关系是准确评估结构耐久性和使用寿命的关键。因此,首先探讨腐蚀模型的研究现状。

1.1 幂函数模型

1974年,Bohnenkamp等^[15]指出:碳钢、低合金钢的腐蚀损失-时间曲线是幂函数的典型曲线图,从此幂函数模型在腐蚀量预测中被广泛使用。其基本形式为

$$C = At^n \quad (1)$$

式中: C 为 t 年后的腐蚀量; A 为1年暴露后的腐蚀量; n 为指数,通常小于1。

两边取对数,得其线性形式为

$$\lg C = \lg A + n \lg t \quad (2)$$

1992年李牧铮和张军^[16]使用该式对耐候钢与碳钢的大气腐蚀规律进行了拟合,指出 $\lg A$ 的取值范围为1.456 5~1.509 6, n 的取值范围为0.324 9~0.375 4;1995年梁彩凤和侯文泰^[17]对06CuPCrNiMo等17种碳钢及低合金钢在北京等7个地区8年大气暴露腐蚀进行了研究,结果表明 n 的取值范围为0.2~1.9, A 的取值范围为18~126 μm ;2001年张全成等^[18]测量了碳钢和耐候钢的腐蚀深度和暴晒时间的双对数关系曲线,对于碳钢,其回归方程为

$$\ln(D_{\text{loss}}) = 3.388 61 + 0.652 33 \ln t \quad (3)$$

对于耐候钢,其回归方程为

$$\begin{cases} \ln(D_{\text{loss}}) = 3.295 84 + 0.754 89 \ln t, t = 1\text{年} \\ \ln(D_{\text{loss}}) = 3.292 21 + 0.295 51 \ln t, t > 1\text{年} \end{cases} \quad (4)$$

其中, D_{loss} 为腐蚀深度。

萧以德等^[19]通过对17种碳钢、低合金钢16年的腐蚀结果,采用数学分析与处理方法,获得了碳钢和低合金钢在我国典型大气环境下腐蚀速度变化幂函数模型中的 A 值和 n 值,其范围分别为0.019~0.133mm、0.21~1.48。对于重庆和万宁地区的大气腐蚀规律,王成章等^[20]指出,对于不同的钢种, A 的取值范围为50.4~131.4, n 的取值范围为0.37~0.60。2016年Panchenko和Marshakov^[21]使用幂函数模型对碳钢、锌、铜、铝10~17年的腐蚀损失量进行了拟合,其中碳钢 A 和 n 值的取值范围如表1所示。

表1 碳钢 A 和 n 值的取值范围

Tab. 1 Variation of A and n values of carbon steel

大气环境类型	$A/(\text{g}\cdot\text{m}^{-2})$	n
农村	10.5~247.4	0.301~0.761
工业城市	196.2~692.1	0.292~0.528
海洋	200.4~931.4	0.369~0.685
工业城市—海洋	270.4~796.0	0.335~0.613

尽管幂函数模型能大致描述腐蚀量随时间变化的一般趋势,但其常数 A 和 n 也受各种环境因素和材料自身特性的影响。所以,针对具体的腐蚀案例,学者们提出了一些细化或修正的幂函数模型。例如,Feliu等^[22]给出了碳钢指数 n 与环境参数间的关系,为

$$\begin{cases} n = 0.570 + 0.0057P_{\text{Cl}}T + 7.7 \times 10^{-4}D - \\ \quad 1.7 \times 10^{-3}A (R=0.40) \\ n = 0.531 + 0.115M_{\text{AQ}} + 0.00112D - \\ \quad 0.221t_w (R=0.44) \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_{Cl} 为氯污染年度均值; T 为气温年度均值; D 为每年降雨天数; R 为多变量相关系数; M_{AQ} 为海洋大气质量; t_w 为年度湿润时间。而李牧铮等^[23]提出

$$A = K_{\text{steel}} Q_1 \quad (6)$$

式中: K_{steel} 为钢的腐蚀量与腐蚀电量的比例系数; Q_1 为腐蚀电量,其为相对湿度、大气中 SO_2 含量、氯离子含量、 NO_2 含量、大气沉降物中水溶性降尘量、大气湿度、雨水PH值、不同湿润区间累积时间、降雨时间以及凝露时间的函数。1995年汪轩义等^[24]指出碳钢和低合金钢的第1年腐蚀率与 $\lg N$ 呈线性关系,即

$$R = A \lg N + B \quad (7)$$

式中: N 为湿润因子、侵蚀因子与雨水酸度因子之和。2006年萧以德等^[25]给出了各种环境下大气腐蚀发展幂函数的参数与钢的合金元素含量的定量关系。2013年Dong等^[26]指出,幂函数模型中的参数 A 和 n 在大气腐蚀初期受锈的活性或惰性还原成份的影响,而对于长期大气腐蚀,裂纹的萌生、锈层的松动和脱落也会造成 A 和 n 的变化。

1.2 数值幂函数模型

文献[27-28]报导了不完全满足方程(1)的腐蚀损失量。在一定的暴露时间后,该函数是满足的,但一段时间后,结果开始发散,但可以使用斜率比前半段小的另一条直线来拟合(图1)。在双对数坐标系下,可得到双线性曲线,其控制方程为

$$C = C_1 t_p^{n_1 - n_2} t^{n_2} (t \geq t_p) \quad (8)$$

式中: C 为 t 年后的腐蚀损失量; C_1 为第1年的腐蚀损失量; t_p 为前一暴露周期的时间长度(以年为单位),其斜率为 n_1 ; n_2 为第2个周期的斜率。这种奇异行为的一个可能原因可能是随着时间的推移形成了更紧密的锈层,这阻碍了参与腐蚀反应的活性物质的扩散。

McCuen等^[29]提出应通过非线性最小二乘法,使用变量 C 和 t 的实际值直接拟合幂函数模型中的系数 A 和 n ,而不是使用变量的对数,因为对于短暴露

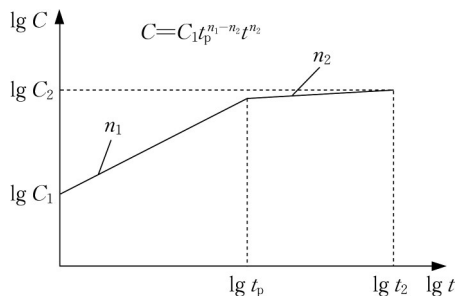


图1 不完全满足幂函数模型($C=At^n$)的耐候钢腐蚀—暴露时间双对数曲线^[28]

Fig. 1 Double logarithmic curve of corrosion exposure time for weathering steel not fully satisfying the power function model^[28]

周期,对数变换赋予腐蚀损失量的权重过大。这消除了总体偏差,对于长暴露周期腐蚀的预测更准确,称为数值幂模型,其与双对数模型有相同的函数形式。为了明确哪种模型预测耐候钢的大气腐蚀最好,有必要参考更多关于暴露时间为10~20年的信息。在这方面,McCuen等^[29]指出需要至少10年暴露时间的腐蚀损失量才能可靠地估计50~100年服役时间后的腐蚀,这与Pourbaix^[30]的观点是相反的,后者认为1~4年的暴露数据足够进行长周期(20~30年)预测。

1.3 幂-线性模型

McCuen等^[29]发现了耐候钢腐蚀损失量体现出不同行为,因此倾向于包括长达3~5年短暴露时间幂函数以及长暴露时间线性函数的组合模型(幂-线性模型)。该模型与发展ISO 9224标准^[31]使用的模型相似,假设了2个不同腐蚀动力学的暴露期。在覆盖前10年暴露的第1个周期中,发展规律为抛物型(平均腐蚀速率为 r_{av}),而在大于10年的第2个周期中,腐蚀行为为线性(稳定状态腐蚀速率为 r_{lin})。

根据ISO 9223^[32]中定义的大气腐蚀性,ISO 9224提供了碳钢和耐候钢在各时间周期中腐蚀值的指导信息。其腐蚀指导值是基于大量暴露场地和服役性能中得到的经验值。在暴露时间至少达到20年,且有更多数据可供分析之前,无法完全回答该规律是否能更好地预测耐候钢腐蚀的问题。McCuen等^[29]使用美国报导的耐候钢大气腐蚀损失量对2个模型(幂函数模型和幂-线性模型)进行了对比,发现使用幂-线性模型比幂模型能对实验数据进行更准确的预测。对于碳素钢和含铜钢数据,其对准确性的提高最大,而对ASTM A-588和A-242钢数据的提高更小。

1.4 双线性模型

Albrecht 和 Hall^[33]对幂—线性模型进行了细化,并基于 ISO 9224 提出了一个新的双线性模型,又称改进的 ISO 9224 模型(见图 2a,图中 C1—C5 对应 ISO-9227 中划分的 5 个腐蚀等级:很低、低、中、高、

很高),对这个新的双线性模型进行了调整,该模型考虑了暴露第 1 年的修正腐蚀速率和随后几年的稳定状态。图 2b 报导了该改进在中等腐蚀性分类 C3 中上下曲线的应用。

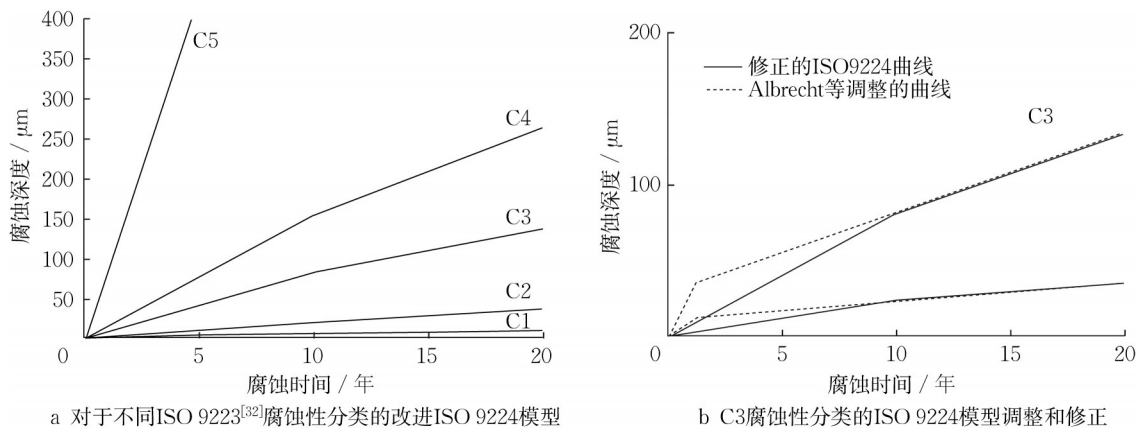


图 2 耐候钢腐蚀—暴露时间的双线性曲线^[33]

Fig. 2 Bilinear curve of corrosion exposure time for weathering steel^[33]

2 腐蚀对钢材力学行为的影响

2.1 母材

2.1.1 单向拉伸性能

通常材性试验的目的是为构件及结构体系仿真提供材性数据。对于腐蚀的构件或体系,在仿真中模拟真实的蚀坑分布由于需要巨大的工作量,所以基本是无法实现的。为此,学者们提出了一种“名义力学性能法”^[34-36],其原理是将腐蚀造成的几何损失等效为材性损失,从而使腐蚀结构抗震性能的有限元预测通过在前处理中简单修改材性(如杨氏模量、屈服强度等)实现。由于极强的可操作性,该方法为目前腐蚀结构抗震性能计算领域的主流研究方法,大量学者进行了结构钢腐蚀后的材性试验,并对质量损失、体积损失、厚度损失等腐蚀指标与其力学性能指标间的关系进行了研究,提出反映二者关系的回归模型,如表 2 所示。

随着研究的深入,学者们逐渐意识到仅使用质量损失、体积损失或厚度损失等简单指标来描述腐蚀板材的剩余力学性能可能并不精确,于是开始致力于开发评价腐蚀试件的更复杂指标。

Kaita 等^[46]对腐蚀钢桥面板的剩余抗拉性能进行了试验研究,试验中共设计了 2 种不同尺寸的腐蚀平板试件,每组试件的腐蚀类型分为全局腐蚀、点腐蚀和局部腐蚀 3 种,得到了腐蚀试件的荷载-位移

曲线后,提出了一个“有效厚度”来评价腐蚀平板的剩余强度,在计算腐蚀平板的屈服荷载和极限荷载时,“有效厚度”的定义分别如式(9)和式(10)所示:

$$F_y = \sigma_y \cdot b \cdot t_{\text{eff}}, t_{\text{eff}} = t_{\text{avg}, \min} \quad (9)$$

$$F_u = \sigma_u \cdot b \cdot t_{\text{eff}}, t_{\text{eff}} = t_0 - 3.3\sigma_{\text{st}} \quad (10)$$

式中: F_y 为屈服荷载; σ_y 为材料屈服强度; b 为板宽; t_{eff} 为提出的“有效厚度”; $t_{\text{avg}, \min}$ 为平均最小厚度; F_u 为极限荷载; σ_u 为材料抗拉强度; t_0 为板材腐蚀前的初始厚度; σ_{st} 为蚀坑分布标准差。2016 年 Xu 等^[47]进行了腐蚀平板试件抗拉性能试验,对试验结果的回归分析表明腐蚀平板的屈服强度、极限强度和断裂应变随腐蚀造成的试件质量损失率的增大而线性减小,在计算腐蚀平板的屈服强度和极限强度时,所用的横截面面积是腐蚀后的剩余横截面面积,这显然比使用腐蚀前的初始横截面面积更合理,但由于腐蚀后的试件不再是标准拉伸试件,所以试验得到的结果是否能反映平板的材性是值得商榷的。Xu 等^[48-49]还对拉伸试验进行了有限元反演,但在仿真分析中使用的蚀坑是规则分布的,这与实际情况有一定的差距。文献[50]中也使用了规则分布的蚀坑,不同的是认为腐蚀后的极限荷载和屈服荷载由腐蚀后的最小横截面面积控制,而不是腐蚀造成的质量损失率,且极限荷载和屈服荷载随最小横截面面积的增大而增大,对于变形能力的控制参数,提出了一个“最大表面粗糙度”指标,并认为变形缩减系数与该指标

表 2 钢材腐蚀指标与各力学性能指标关系的回归模型

Tab. 2 Regression models reflecting the relationship between corrosion indices and each mechanical performance indices of steel material

时间	文献	力学性能回归模型	参数描述
1989年、2004年	[37-38]	$F_u = WT_{ma} f_u$	F_u 为极限承载力, W 为板宽, T_{ma} 为最小横截面的平均厚度, f_u 为钢材腐蚀前的抗拉强度
2010年	[39]	$\delta' = 0.1e^{-1.15x} + 1.38$ $f_y' = 271.9 - 1.79\eta$ $f_u' = 432.8 - 7.85\eta$	δ' 为钢材腐蚀后的伸长率, f_y' 为钢材腐蚀后的屈服强度, f_u' 为钢材腐蚀后的抗拉强度, η 为钢的腐蚀率。
2012年	[40]	$f_y'/f_y = 1 - 0.9852D_w$ $f_u'/f_u = 1 - 0.9732D_w$ $\delta'/\delta = 1 - 1.9873D_w$	f_y, f_y' 分别为钢材腐蚀前、后的屈服强度, f_u, f_u' 分别为钢材腐蚀前、后的抗拉强度, δ, δ' 分别为钢材腐蚀前、后的伸长率, D_w 为质量损失率。
2014年	[41]	$F_u = (-0.0068\rho^2 - 2.3599\rho + 400)Wt_0$ $F_y = (-0.0229\rho^2 + 0.5551\rho + 235)Wt_0$	F_u 为极限承载力, F_y 为屈服承载力, W 为板宽, ρ 为体积损失比, t_0 为腐蚀前厚度。
2015年	[42]	$f_y'/f_y = 1 - 0.810D_w$ $f_u'/f_u = 1 - 0.707D_w$ $\delta'/\delta = 1 - 1.412D_w$ $E_s'/E_s = 1 - 0.932D_w$	E_s, E_s' 分别为钢材腐蚀前、后的弹性模量, D_w 为质量损失率。
2016年	[43]	$f_y'/f_y = 1 - 0.886D_w$ $f_u'/f_u = 1 - 0.92D_w$ $\delta'/\delta = 1 - 1.881D_w$	f_y, f_y' 分别为钢材腐蚀前、后的屈服强度, f_u, f_u' 分别为钢材腐蚀前、后的抗拉强度, δ, δ' 分别为钢材腐蚀前、后的伸长率, D_w 为质量损失率。
2020年	[44]	$f_u' = 400 - 0.0068\rho^2 - 2.3599\rho$ $\delta' = 22 + 0.0015\rho^2 - 0.3505\rho$	f_u' 为钢材腐蚀后的抗拉强度, ρ 为体积损失比, δ' 为钢材腐蚀后的伸长率。
2020年	[45]	$\delta' = -0.0113x + 0.0781$ $E_s' = 4.99x + 145.3$	δ' 为钢材腐蚀后的伸长率, x 为最大腐蚀深度除以平均腐蚀深度, E_s' 为钢材腐蚀后的弹性模量。

注: 本文只关注全钢结构, 对混凝土结构中钢筋的力学性能不做总结。

之间的二次函数关系。Zhao等^[51]也认为仅使用腐蚀造成的质量或体积损失来评价腐蚀平板的剩余力学性能是不够精确的, 于是提出了一个综合考虑质量损失率、蚀坑深度等多参数的评价指标, 且在仿真分析中考虑了蚀坑分布随机性。2017年Xu等^[52]对已有预报腐蚀平板试件剩余力学性能的经验公式进行了试验和仿真验证, 结果表明大多数经验公式能够比较准确地预测腐蚀平板的抗拉强度, 但预测变形能力时精度较低, 在仿真分析中, 使用了表面形貌扫描所得到的几何模型来直接建立有限元模型, 因此考虑了蚀坑分布随机性, 这无疑是一大进步。文献[45]在仿真分析中也考虑了蚀坑分布随机性, 经计算, 提出了一个“退化程度(Degree of Degradation, DoD)”指标来评价腐蚀平板的剩余力学性能, 并指出腐蚀平板的屈服强度、极限强度、杨氏模量和断后伸长率随DoD的增大而线性减小, 其中DoD的定义如式(11)所示:

$$D_{oD} = 1 - \frac{V_{\text{corroded}}}{t_0 A} \quad (11)$$

式中: V_{corroded} 为腐蚀试件的总体积; t_0 为板材腐蚀前的初始厚度; A 为横截面面积。总之, 学者们提出了

一系列指标来评价腐蚀平板的剩余拉伸性能, 如“有效厚度”、腐蚀造成的重量损失、腐蚀后的最小横截面面积、最大表面粗糙度、DoD等, 但都没有充分揭示腐蚀造成平板力学性能降低的机理, 为解决这一问题, 文献[53]在研究中开始关注临界等效塑性应变 ϵ_p^I 和应力三轴度随蚀坑形状参数的变化, 并指出 ϵ_p^I 随蚀坑直径 a 和深度 c 的增大而线性减小, 而应力三轴度随 a 和 c 的增大而线性增大。

通过文献综述可以发现, 腐蚀平板剩余强度领域研究的不足或未来的发展趋势主要有以下几个方面: 一是在有限元建模方法方面, 该领域的研究重点正在从简单的规则分布蚀坑向如何使用蚀坑的形貌扫描数据直接生成有限元模型, 从而更真实地反映蚀坑分布转变。二是传统的研究大多聚焦于提出评价腐蚀平板剩余力学性能的经验计算公式, 而缺少腐蚀造成钢板剩余强度降低的机理性研究。三是由于腐蚀后的试件不再是标准拉伸试件, 所以用腐蚀后的试件来计算钢板的材性是不准确的。

2.1.2 滞回性能

由于地震载荷是交变载荷, 所以在对试件进行

单调加载的基础上还需研究其滞回响应和低周疲劳性能。2013年,Appuhamy等^[54]对腐蚀桥梁构件在地震载荷下的剩余强度和耗能能力进行了仿真研究,提出了一个地震载荷下由于腐蚀造成耗能能力减小的预测公式,为

$$e_{\text{EDr}} = 85(1 - \mu)(0.9 - \mu)(0.55 + \mu) \times 100\% \quad (12)$$

式中: e_{EDr} 为能耗减小百分比; μ 为钢板最小剩余厚度与初始厚度之比。2019年Jia等^[55]进行了腐蚀海洋高性能钢在循环载荷下的力学试验研究,结果表明累积腐蚀损伤提高NV-D36钢的极限应力并降低其极限应变;双损伤对NV-D36钢力学性质的影响为2类损伤的耦合;在增幅循环加载下标定的Chaboche模型^[56-59]参数能准确描述NV-D36钢的刚度和峰值应力。文献[60]研究了一般大气环境下腐蚀结构钢的滞回行为和循环本构模型,提出了Chaboche模型中随动强化参数 C_1 和各向同性强化材料参数 Q 、 b 随腐蚀的退化模型,为

$$\begin{cases} C_1/C_{1,0} = 1 + 87D_n^2 \\ Q/Q_0 = 1 - 300D_n^3 \\ b/b_0 = 1 - 240D_n^3 \end{cases} \quad (13)$$

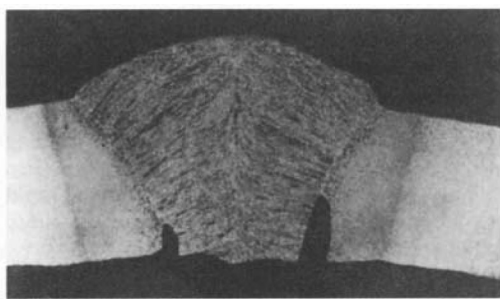
式中: $D_n = 1 - \frac{t_0}{T_{\max}}(1 - \rho)$; T_{\max} 为通过厚度测量得到的腐蚀平板最大剩余厚度。可见,该模型的一大进步在于同时考虑了腐蚀厚度和体积的影响。张岳林等^[61]研究了腐蚀对低合金钢滞回行为的影响,首

先对Q345狗骨式平板试件进行了中性盐雾腐蚀,然后对腐蚀试件进行了 $\pm 1\%$ 和 $\pm 3\%$ 这2个不同应变幅的循环加载。仿真中基于逆向建模技术建立了腐蚀平板试件的几何模型,基于粒子群算法对Q345钢循环塑性本构模型参数进行了标定,基于Bonora模型进行了断裂模拟。试验和仿真结果表明腐蚀对平板试件单圈耗能能力几乎没有影响,对承载力和弹性刚度有一定影响,而对低周疲劳寿命有显著影响,5.73%的质量损失即可造成失效循环次数降低80%。腐蚀造成疲劳寿命降低的机理是蚀坑的存在使试件在循环加载下产生了应力重分布,蚀坑边缘的高应力三轴度和等效塑性应变的迅速积累加速了裂纹的萌生和扩展。

2.2 焊接接头

2.2.1 焊缝腐蚀

由于钢结构通常通过焊接进行连接,而焊接接头通常位于几何突变位置,极易遭受震损威胁,所以只研究母材自身的腐蚀后力学行为是远远不够的,必须关注焊缝的腐蚀。而且,实践表明焊接接头往往比母材更容易发生腐蚀。图3a展示了碳钢焊件热影响区(Heat affected zone, HAZ)优先腐蚀的案例,在大量的含水环境中已经观察到这种现象^[62]。南京长江大桥三桥是中国第一座大跨度钢塔桥,在服役16年后,在桥梁检查过程中发现钢塔横梁角焊缝存在大量腐蚀损伤^[63],如图3b所示。



a 碳钢焊接件在含水环境中服役后热影响区的优先腐蚀^[62]



b 钢桥塔中的角焊缝腐蚀^[63]



c 焊缝区域涂层优先脱落^[64]

图3 焊接区域优先腐蚀案例

Fig. 3 Cases of preferential corrosion in welded zones

焊接接头优先腐蚀的原因主要有两点:首先,由于焊缝形状的不平整,焊缝区域防腐保护层的质量不如母材区域高。其次,焊缝经常位于应力集中位置,当结构遭受荷载(如风致、交通致震动)时,即使焊缝金属未进入塑性变形状态,其相应的涂层也有脱落的风险,由于涂层的延性往往不如金属高(图3c),所以研究焊缝腐蚀有很深的工程价值。另一方

面,焊缝区域的材料组分比母材区域复杂得多,焊接区域及包括母材、焊材,又包括热影响区(Heat affected zone, HAZ)。结果导致焊缝区域的腐蚀特点比母材区域复杂得多,从这个角度出发,研究焊缝腐蚀又有很深的科学价值。

2015年马宏驰等^[65]研究了E690钢焊接接头在模拟海洋大气环境中大的腐蚀特点,结果表明更低

的强度、更大的负电势、更高的电流密度使临界热影响区(Inter-critical heat affected zone, ICHAZ)更容易发生应力腐蚀。2022年Song等^[66]研究了G390NH钢焊接接头在模拟大气环境中的腐蚀特点,结果表明在腐蚀初期,腐蚀过程的主要影响因素是微观组织缺陷。随着腐蚀过程的进行,电势差的影响开始超过微观组织,成为控制腐蚀过程的决定性因素。根据电势的大小,腐蚀发生的有限顺序为焊材→母材→热影响区。2023年Li等^[67]开展了Q690qE钢在模拟海洋环境中的腐蚀疲劳试验,截面形貌观察结果表明粗晶热影响区(Coarse-grained heat affected zone, CGHAZ)发生了沟槽腐蚀,其原因是粗晶热影响区Ni含量较低,导致CGHAZ和焊材之间产生外电势差,从而使CGHAZ作为微电流腐蚀的阳极优先腐蚀。Gu等^[68]研究了Q345钢焊接接头的腐蚀特点,其中打底焊使用了脉冲钨惰性气体(P-TIG)焊、盖面焊使用了埋弧焊(SAW)。在氢氟酸环境中放置100h后,只打底的接头未见明显腐蚀,而使用SAW盖面的接头出现了很多蚀坑,这是因为使用SAW盖面后焊接接头的微观组织发生了变化。

通过文献综述可以发现,在多种环境中已观察到焊接区域的优先腐蚀。通常,影响焊缝腐蚀的因素主要分为3类:一类是材料自身的属性,如材料的微观组织和不同区域的电势。一类是焊接工艺参数,如焊接电流、电压、坡口形式、预热、后热温度、周边环境湿度、湿度,甚至是焊接现场风速。一类是腐蚀环境特点,显然相同的焊接接头在一般大气环境、工业大气环境、海洋大气环境中的腐蚀特点是不尽相同的。如此众多的影响因素使焊缝腐蚀的研究极其复杂,很难得出具有普遍适用性的结论。针对某种特定的场景,仍需进行新的深入研究。

2.2.2 焊接接头的循环塑性及超低周疲劳行为

在探讨腐蚀焊缝的抗震性能之前,需要对焊缝自身的循环塑性及超低周疲劳行为进行研究。对于结构钢焊接接头的低周疲劳行为,Shi等^[69]发现Q460C钢焊接接头焊材的循环硬化程度比母材更高,而焊材的延性较差。Veerababu等^[70]认为92号钢焊接接头焊材的循环软化水平与母材类似,在低应变幅下,焊材的失效循环次数比母材低,而在高应变幅下,2种材料的疲劳寿命相似。Guo等^[71]发现CrNiMoV钢焊接接头焊材的循环软化程度比母材大,而焊材的疲劳性能比母材差,另外,随着应变幅的增大,失效位置从母材区域向焊材中心转移。Ban

等^[72]发现316L和Q235B钢焊接接头焊材的各向同性和随动强化水平比母材大。Zhang和Zeng^[73]认为对于Q355B钢焊接接头,当应变幅较大时,疲劳断裂更容易出现在焊材区域。

尽管学者们已经逐渐意识到焊接接头循环塑性及超低周疲劳行为研究的重要性,但该领域的研究仍然存在以下几个方面的问题:一是与母材相比,焊接接头的研究仍然只处于起步阶段,对于母材,已经有了很多共识性的结论,如在滞回加载下,低屈服点钢容易表现出循环软化,碳钢及低合金钢容易表现出循环稳定,而不锈钢容易表现出循环硬化。然而,焊接接头尚无此类普适性结论。其次,焊接接头加工过程中涉及到各种影响因素,如焊接方法和焊材类型,这些因素如何影响焊接接头的力学性能需要进行进一步研究。第三,评价焊接接头滞回行为的指标仍然不足,例如,现有规范中一般只对焊接接头的强度、硬度、冲击韧性等基本指标进行规定,而很少考虑耗能能力、失效循环次数等反映抗震性能的指标。第四,由于焊缝区域材料的高度非线性,其有限元(finite element, FE)建模非常复杂,因此仍然缺乏对焊接接头滞回性能的数值分析。

总之,焊缝腐蚀特点和焊接接头滞回性能属于2个不同的研究领域,前者属于材料学科研究范畴,后者属于地震工程学研究范畴,虽然学者们在2个领域均进行了广泛研究,但鲜有研究将两者结合起来。2个领域的交叉学科研究应作为下一步的重要研究方向。

3 构件层次的研究

在构件层面,学者们进行了试验和有限元分析,以表征腐蚀钢构件的承载力和变形能力的退化。郑山锁等^[42]分析了不同锈蚀率及加载制度对钢框架节点试件荷载-位移曲线、骨架曲线、刚度和承载力退化、变形能力、滞回耗能等的影响,研究了不同锈蚀程度、加载方式、加载循环次数及轴压比对钢框架柱的荷载-位移滞回曲线、骨架曲线、强度和刚度退化、变形能力、滞回耗能等力学性能的影响^[74]。结果表明:当利用人工气候环境加速锈蚀2 880h后,钢框架柱耗能能力降幅将近18%^[75]。

Wang等^[13, 76]进行了4个不同腐蚀损伤程度退化节点试件的非线性循环加载试验,以评估其滞回行为及失效模式的变化。试验结果表明腐蚀节点的承载力和刚度随梁柱截面面积的损失而减小,而严重

蚀坑在焊接区域的存在加速了腐蚀梁翼缘的脆性断裂失效,导致延性和总耗能的严重退化。另外,进行了一系列参数数值模拟,以分析不同腐蚀参数对节点抗震性能的影响。分析结果表明,可以从梁翼缘腐蚀和柱腹板腐蚀中选择较大的值来估计现有节点的剩余极限承载力,而梁翼缘的点蚀损伤和均匀腐蚀可以被视为影响变形能力和耗能能力退化程度的主要因素。定量分析结果表明当暴露时间为18个月(腐蚀深度和最大蚀坑深度为2.13mm和1.48mm)时,梁柱节点的屈服和极限弯矩减小了28.2%和32.1%,总转角和总耗能减小了49.4%和70.8%。王友德等^[77]研究了锈蚀钢柱在地震作用下的损伤过程、破坏形态及性能退化规律,结果表明:锈蚀导致柱脚塑性范围更加集中,并加快屈曲发展,从而引起承载力、刚度、延性和耗能能力显著退化,且较大的轴压比进一步加快钢柱破坏过程。

从试验角度来讲,腐蚀构件抗震性能的拟静力试验方法与不腐蚀构件并无明显区别,但需要指出的是,当前的腐蚀梁柱试验往往是将柱端固定在台座或反力架上,这相当于认为柱端的边界条件是固支,但在实际的地震响应下,柱中心截面处于反弯点位置,所以在以后的试验中需对此进行改进,如通过应用球铰等手段模拟柱端的转动。从仿真角度来讲,目前在仿真中很少考虑焊接残余应力或初挠度等初始缺陷,这或许会使计算精度有一定的损失。但更重要的问题存在于“名义力学性能法”的机理缺陷,虽然这种方法具有极强的可操作性,但该方法由于无法考虑局部蚀坑的影响,所以若实际破坏发生在局部蚀坑处,则仿真结果由于未考虑局部腐蚀而可能会产生致命性误差。下一步的工作应重点考虑开发考虑蚀坑分布随机性的腐蚀构件简化几何建模方法。

4 结构体系层次的研究

传统的腐蚀结构抗震性能研究对象多为钢筋混凝土结构^[78-81],且多为材料和构件层次的研究。近年来,郑山锁等开始关注腐蚀钢框架的抗震性能,并取得了可观的研究成果。2014年,郑山锁等^[82]进行了考虑锈蚀的钢结构地震易损性分析,结果表明初始服役与服役60年的结构的失效概率在中等破坏、严重破坏及毁坏状态最大降幅分别将近10%、30%、50%;2015年王晓飞^[83]对2根锈蚀程度不同(分别为未锈蚀、严重锈蚀)的空间钢框架结构模型进行地震

模拟振动台试验。据本文作者所知,这是目前国内首次也是唯一一次进行腐蚀钢框架结构的振动台试验。2017年郑山锁等^[84]进行了酸性大气环境下多龄期平面钢框架结构抗震性能试验研究,结果表明加速腐蚀时间1440h钢框架的极限荷载和极限位移、屈服荷载和屈服位移以及延性系数较未锈蚀试件分别下降了约16.4%、28.9%、14.7%、15.4%及16.1%。为了研究腐蚀钢框架在氯盐环境中的抗震性能,Zhang等^[85]对4个钢框架结构进行了加速腐蚀试验和侧向低周加载试验。首先观察了测试钢框架的失效过程和机理,分析了梁端和柱脚潜在塑性铰截面的应变发展,并详细研究了腐蚀程度对滞回曲线、承载力、刚度退化、延性和耗能能力的影响。试验结果表明当腐蚀水平较低时,所有试件表现出混合屈服耗散机制,其中塑性铰出现的顺序为从梁端到柱脚,再到梁端。然而,腐蚀水平的增加有加速塑性铰形成和恶化结构损伤程度的倾向。另外,随着腐蚀程度的增加,侧向承载能力降低,刚度退化加剧,延性和耗能能力减小。基于试验数据,初步确定了腐蚀钢框架的结构性能水平和性能指标量化阈值。然后使用ABAQUS软件建立了采用腐蚀钢材时变本构模型和三轴度相关的失效准则的有限元模型,最后通过对比数值和试验结果验证了有限元模型的有效性。研究结果为在役钢框架结构在氯化物环境下的抗震性能评估奠定了试验和理论基础。

由于结构体系层次的试验需要投入大量的人力、物力、财力,所以目前的研究相当匮乏,仅见郑山锁教授团队进行了上述几项研究。出于经济性考虑,今后的一个研究思路是在材料和构件层次对有限元建模方法进行验证,再将验证好的建模方法用于结构体系层次的分析,从而节省结构体系试验。在具体的有限元建模技术方面,目前大多采用精细化建模,这显然要付出很大的计算代价,尤其是进行易损性分析时需要进行大量的计算,下一步应重点关注如何简化模型,如使用OpenSees等体系分析程序进行建模。另外,与构件建模类似,在结构体系中应考虑蚀坑分布随机性的影响。

5 评述与讨论

(1)我国材料自然环境腐蚀试验始于20世纪50年代末^[6],取得了丰硕成果^[19]。根据现有腐蚀损失量,基本可以使用幂函数模型对传统钢的大气腐蚀规律进行预测。然而,对于新型钢,由于尚无腐蚀历

史数据,所以无法使用传统腐蚀模型进行预测。因此,应继续开发多变量灰色模型、机器学习等高精度腐蚀预测新技术。

(2)对于材料层面,继续研究腐蚀母材的剩余力学性能已不再具有重大意义,这一方面是由于该方向的研究已日渐成熟,另一方面是由于腐蚀和断裂往往优先发生在焊接接头,而非母材自身。因此,下一步应重点关注焊缝腐蚀和焊缝疲劳交叉学科研究,这不仅是研究难点,也是工程急需。

(3)对于构件层面,使用“名义力学性能法”将腐蚀造成的几何损失等效为材性损失仍是当前的主流建模方法。然而,由于该方法不能考虑局部蚀坑的影响,所以不具有普适性。下一步应重点关注考虑蚀坑分布的建模方法开发。事实上,蚀坑分布规律在材料层次已有不少研究,今后需将已有蚀坑分布特点应用在构件的几何建模上,这不仅能提高建模精度,也能提高蚀坑分布数据利用率。

(4)对于结构体系层面,由于需要巨大的时间和经济成本,因此不建议进行过多的加速腐蚀和振动台试验,而可以重点关注仿真方法的开发,在仿真中需注意对模型进行合理的简化,尤其是在腐蚀结构地震易损性分析中,由于需要较大的工作量,所以建模和计算效率至关重要。同时,在建模中也要考虑蚀坑分布的影响。

作者贡献声明:

张岳林:文献收集,初稿撰写,总结归纳,分析。

冉翠玲:文献收集,初稿撰写,总结归纳,分析。

王伟:指导,润色,资助。

顾跃跃:文献收集,初稿撰写,总结归纳,分析。

方成:指导,润色,资助。

参考文献:

- [1] 蔡长庚. 建设部印发《钢结构住宅建筑产业化技术导则》[J]. 工程建设与设计, 2002(4):13.
CAI Changeng The Ministry of Construction has issued the "Technical Guidelines for the Industrialization of Steel Structure Residential Buildings" [J]. Engineering Construction and Design, 2002 (4): 13
- [2] KOCH G. Trends in oil and gas corrosion research and technologies [M]. Dublin: Woodhead Publishing, 2017.
- [3] HOU B, LI X, MA X, *et al.* The cost of corrosion in China [J]. npj Materials Degradation, 2017, 1(1): 4.
- [4] KOCH G, VARNEY J, THOMPSON N, *et al.* International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study [R]. Huston: NACE International, 2016.
- [5] 沈慧. 手表上的秒针每转过一圈,就有1吨钢腐蚀成铁锈——腐蚀,身边的破坏者 [J]. 表面工程与再制造, 2019, 19 (108): 24.
SHEN Hui. Every second hand on a watch rotates, 1 ton of steel corrodes into rust - corrosion, the vandals around us [J]. Surface Engineering and Remanufacturing, 2019, 19 (108): 24.
- [6] 曹楚南. 中国材料的自然环境腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
CAO Chunan. Natural environmental corrosion of materials in China [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [7] 柯伟, 杨武. 腐蚀科学技术的应用和失效案例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
KE Wei, YANG Wu. Application and failure cases of corrosion science and technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [8] WITCHER T R. From disaster to prevention: The Silver Bridge[J]. Civil Engineering, 2017, 87(11): 44.
- [9] 王力力, 易伟建. 斜拉索的腐蚀案例与分析[J]. 中南公路工程, 2007, 32(1): 93.
WANG Lili, YI Weijian. Corrosion cases and analysis of stay cables [J]. Zhongnan Highway Engineering, 2007, 32 (1): 93.
- [10] 魏建东. 宜宾小南门大桥的抢修加固与恢复工程[J]. 公路, 2003(4): 34.
WEI Jiandong. Emergency repair, reinforcement, and restoration of the Xiaonanmen Bridge in Yibin [J]. Highway, 2003 (4): 34.
- [11] 杨旭, 雷宏刚, 葛雯, 等. 腐蚀引起的某钢结构网架坍塌事故分析[C]//全国建筑物鉴定与加固技术委员会, 2016: 614-620.
YANG Xu, LEI Honggang, GE Tan, *et al.* Analysis of a steel structure grid collapse accident caused by corrosion [C]// National Technical Committee for Building Appraisal and Reinforcement, 2016: 614-620.
- [12] APOSTOLOPOULOS C A, Papadopoulos M P. Tensile and low cycle fatigue behavior of corroded reinforcing steel bars S400 [J]. Construction and Building Materials, 2007 (21): 855.
- [13] WANG H, WANG Y, ZHANG Z, *et al.* Cyclic behavior and hysteresis model of beam-column joint under salt spray corrosion environment [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021 (183): 106737.
- [14] ZHANG X, ZHENG S, ZHAO X. Experimental and numerical investigations into seismic behavior of corroded steel frame beams and columns in offshore atmospheric environment [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023 (201): 107757.
- [15] BOHNENKAMP K, BURGMANN G, SCHWENK W. Corrosion atmospherique de l'acier doux, Exposition de l'acier aux intemperies[J]. Galvano-Organo, 1974 (445): 587.
- [16] 李牧铮, 张军. 耐候钢与碳钢大气腐蚀规律的分析研究[J].

- 腐蚀科学与防护技术, 1992, 4(3): 174.
- LI Muzheng, ZHANG Jun. Analysis and research on atmospheric corrosion law of weathering steel and carbon steel [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1992, 4 (3): 174.
- [17] 梁彩凤, 侯文泰. 碳钢及低合金钢8年大气暴露腐蚀研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1995, 7(3): 183.
- LIANG Caifeng, HOU Wentai. A study on atmospheric exposure corrosion of carbon steel and low alloy steel for 8 years [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1995, 7 (3): 183.
- [18] 张全成, 吴建生, 陈家光, 等. 近海大气中耐候钢和碳钢抗腐蚀性能的研究[J]. 材料科学与工程, 2001, 19(2): 12.
- ZHANG Quancheng, WU Jiansheng, CHEN Jianguang, *et al.* A study on the corrosion resistance of weathering resistant steel and carbon steel in the offshore atmosphere [J]. Materials Science and Engineering, 2001, 19 (2): 12.
- [19] 萧以德, 张三平, 曹献龙, 等. 我国大气腐蚀研究进展[J]. 装备环境工程, 2005, 2(5): 3.
- XIAO Yide, ZHANG Sanping, CAO Xianlong, *et al.* Research progress on atmospheric corrosion in China [J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2 (5): 3.
- [20] 王成章, 汪学华, 秦晓洲. 碳钢及低合金钢在重庆和万宁地区大气腐蚀规律研究[J]. 装备环境工程, 2006, 3(2): 23.
- WANG Chengzhang, WANG Xuehua, QIN Xiaozhou. Research on atmospheric corrosion laws of carbon steel and low alloy steel in Chongqing and Wanning regions [J] Equipment Environmental Engineering, 2006, 3 (2): 23.
- [21] PANCHENKO Y M, MARSHAKOV A I. Long-term prediction of metal corrosion losses in atmosphere using a power-linear function[J]. Corrosion Science, 2016 (109): 217.
- [22] FELIU S, MORCILLO M. The prediction of atmospheric corrosion from meteorological and pollution parameters—II. Long-term forecasts [J]. Corrosion Science, 1993(3):415.
- [23] 李壮铮, 张军, 祁凤玉. 环境因子与大气腐蚀关系的数学模型和大气腐蚀预测[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1993, 13(1): 10.
- LI Muzheng, ZHANG Jun, QI Fengyu. Mathematical model and atmospheric corrosion prediction of the relationship between environmental factors and atmospheric corrosion [J] Chinese Journal of Corrosion and Protection, 1993, 13 (1): 10.
- [24] 汪轩义, 王光雍, 屈祖玉, 等. 环境因素对碳钢和低合金钢大气腐蚀的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1995, 15(2): 124.
- WANG Xuanyi, WANG Guangyong, QU Zuyu, *et al.* The influence of environmental factors on atmospheric corrosion of carbon steel and low alloy steel [J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 1995, 15 (2): 124.
- [25] 萧以德, 张三平, 曹献龙, 等. 我国大气腐蚀研究进展(续2) [J]. 装备环境工程, 2006, 3(1): 16.
- XIAO Yide, ZHANG Sanping, CAO Xianlong, *et al.* Research progress on atmospheric corrosion in China (continued 2) [J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3 (1): 16.
- [26] DONG J, KE W. Fitting and evolution of atmospheric corrosion of low alloy steels under wet/dry cyclic corrosion test [M]// Proceedings of the 8th Pacific Rim International Congress on Advanced Materials and Processing. [s.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2013.
- [27] WANG J H, WEI F I, CHANG Y S, *et al.* The corrosion mechanisms of carbon steel and weathering steel in SO₂ polluted atmospheres [J]. Materials Chemistry and Physics, 1997 (47): 1.
- [28] MORCILLO M, FELIU S, SIMANCAS J. Deviation from bilogarithmic law for atmospheric corrosion of steel[J]. British Corrosion Journal, 1993 (28): 50.
- [29] McCUEN R H, ALBRECHT P, CHENG J G. A new approach to power-model regression of corrosion penetration data [C]//Corrosion Forms and Control for Infrastructure. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1992: 46 - 76.
- [30] Morcillo M, Chico B, Diaz I, *et al.* Atmospheric corrosion data of weathering steels. A review [J]. Corrosion Science, 2013 (77): 6.
- [31] International Standards Organization. Corrosion of Metals and Alloys - Corrosivity of Atmospheres - Guiding Values for the Corrosivity Categories: ISO 9224 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1992.
- [32] International Standard Organization. Corrosion of Metals and Alloys. Classification of Corrosivity of Atmospheres: ISO 9223 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1991.
- [33] ALBRECHT P, HALL T T. Atmospheric corrosion resistance of structural steels[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003 (15): 2.
- [34] 孙乐彬. 近海大气环境下在役钢框架结构地震损伤性能及易损性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- SUN Lebin. Research on seismic damage performance and vulnerability of in-service steel frame structures in offshore atmospheric environment [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015
- [35] 程洋. 酸性大气环境下锈蚀钢框架结构抗震性能及地震易损性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- CHENG Yang. Research on seismic performance and seismic vulnerability of corroded steel frame structures in acidic atmospheric environments [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015
- [36] 左英. 抗震性能研究及地震易损性分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- ZUO Ying. Research on seismic performance and seismic vulnerability analysis [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017
- [37] MATSUMOTO M, SHIRAI Y, NAKAMURA I, *et al.* A proposal of effective thickness estimation method of corroded steel member [J]. Bridge Foundation Engineering, 1989, 23 (12):19.

- [38] NAKAI T, MATSUSHITA H, YAMAMOTO N, *et al.* Effect of pitting corrosion on local strength of hold frames of bulk carriers 1st report[J]. *Marine Structures*, 2004 (17): 403.
- [39] 陈露. 锈蚀后钢材材料性能退化研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- CHEN Lu. Research on the degradation of steel material properties after corrosion [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010.
- [40] 史炜洲, 童乐为, 陈以一, 等. 腐蚀对钢材和钢梁受力性能影响的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(7): 53.
- SHI Weizhou, TONG Lewei, CHEN Yiyi, *et al.* Experimental study on the effect of corrosion on the mechanical properties of steel and steel beams [J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33 (7): 53.
- [41] GARBATOV Y, GUEDES SOARES C, PARUNOV J, *et al.* Tensile strength assessment of corroded small scale specimens[J]. *Corrosion Science*, 2014 (85): 296.
- [42] 郑山锁, 王晓飞, 孙龙飞, 等. 酸性大气环境下多龄期钢框架节点抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36 (10): 20.
- ZHENG Shansuo, WANG Xiaofei, SUN Longfei, *et al.* Experimental study on seismic performance of multi age steel frame joints in acidic atmospheric environments [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36 (10): 20.
- [43] 徐善华, 王皓, 苏磊. 中性盐雾腐蚀环境中Q235钢板力学性能的退化规律[J]. *机械工程材料*, 2016, 40(5): 86.
- XU Shanhua, WANG Hao, SU Lei. The degradation law of mechanical properties of Q235 steel plate in neutral salt spray corrosion environment [J]. *Mechanical Engineering Materials*, 2016, 40 (5): 86.
- [44] JIA C, SHAO Y, GUO L, LIU Y. Mechanical properties of corroded high strength low alloy steel plate [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020 (172): 106160.
- [45] WOLOSZYK K, GARBATOV Y. Random field modelling of mechanical behaviour of corroded thin steel plate specimens[J]. *Engineering Structures*, 2020 (212): 110544.
- [46] KAITA T, APPUHAMY J M R S, ITOGAWA K, *et al.* Experimental study on remaining strength estimation of corroded wide steel plates under tensile force [J]. *Procedia Engineering*, 2011(14): 2707.
- [47] QIN G C, XU S H, YAO D Q, *et al.* Study on the degradation of mechanical properties of corroded steel plates based on surface topography[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016 (125): 205.
- [48] XU S, WANG H, LI A, *et al.* Effects of corrosion on surface characterization and mechanical properties of butt-welded joints [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016(126): 50.
- [49] WANG H, XU S, WANG Y, *et al.* Effect of pitting degradation on ductile fracture initiation of steel butt-welded joints [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018 (148): 436.
- [50] SHENG J, XIA J. Effect of simulated pitting corrosion on the tensile properties of steel [J]. *Construction and Building Materials*, 2017 (131): 90.
- [51] ZHAO Z, ZHANG H, XIAN L, *et al.* Tensile strength of Q345 steel with random pitting corrosion based on numerical analysis[J]. *Thin - Walled Structures*, 2020 (148): 106579.
- [52] WANG Y, XU S, WANG H, *et al.* Predicting the residual strength and deformability of corroded steel plate [J]. *Construction and Building Materials*, 2017(152): 777.
- [53] REN S, 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.
- [54] APPUHAMY J M R S, OHGA M, CHUN P, *et al.* Numerical Investigation of Residual Strength and Energy Dissipation Capacities of Corroded Bridge Members Under Earthquake Loading [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2013, 17(2):171.
- [55] JIA Z, YANG Y, HE Z, *et al.* Mechanical test study on corroded marine high performance steel under cyclic loading[J]. *Applied Ocean Research*, 2019 (93): 101942.
- [56] CHABOCHE J L, ROUSSELIER G. On the plastic and viscoplastic constitutive equations—part I: rules developed with internal variable concept [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1983, 105(2): 153.
- [57] CHABOCHE J L. Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity[J]. *International Journal of Plasticity*, 1986, 2 (2):149.
- [58] CHABOCHE J L. Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity[J]. *International Journal of Plasticity*, 1989(5):247.
- [59] CHABOCHE J L. Unified Constitutive Laws of Plastic Deformation[M]. Chatillon: Academic Press, Inc, 1996.
- [60] WANG Y, SHI T, ZHANG H, *et al.* Hysteretic behavior and cyclic constitutive model of corroded structural steel under general atmospheric environment[J]. *Construction and Building Materials*, 2021 (270): 121474.
- [61] ZHANG Y, FANG C, WANG W. Experimental and numerical study on cyclic behavior of corroded Q345 steel[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2022 (196): 107369.
- [62] GOOCH T G and HART P H M. Review of Welding Practices for Carbon Steel Deaerator Vessels [J]. *Materials performance*, 1986, 12(25): 30.
- [63] JIANG C, XIONG W, CAI C S, *et al.* Fatigue assessment of fillet weld in steel bridge towers considering corrosion effects [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023 (143): 106901.
- [64] ZHANG Y, WANG W, HUO H, *et al.* Influence of corrosion on ultra-low cycle fatigue performance of steel butt-welded joints with various welding methods [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2024(215): 108561.
- [65] MA H C, LIU Z Y, DU C W, *et al.* Stress corrosion cracking of E690 steel as a welded joint in a simulated marine atmosphere containing sulphur dioxide [J]. *Corrosion Science*, 2015(100): 62.

- [66] SONG J, LI Z, XIAO K, *et al.* Study on the local corrosion behaviour and mechanism of bogie steel welded joints [J]. Corrosion Science, 2022(208): 110709.
- [67] LI Q, YAO Q, SUN L, *et al.* Effect of micro-galvanic corrosion on corrosion fatigue cracking of the weld joint of high strength bridge steel [J]. International Journal of Fatigue, 2023 (170): 107568.
- [68] GU Y, LU N, XU Y, *et al.* Microstructure characteristics of Q345R-steel welded joints and their corrosion behavior in a hydrofluoric acid environment [J]. Journal of Nuclear Materials, 2023(574): 154214.
- [69] SHI G, WANG M, WANG Y, *et al.* Cyclic behavior of 460 MPa high strength structural steel and welded connection under earthquake loading [J]. Advances in Structural Engineering, 2013,16(3): 451.
- [70] VEERABABU J, GOYAL S, SANDHYA R, *et al.* Low cycle fatigue behaviour of Grade 92 steel weld joints [J]. International Journal of Fatigue, 2017 (105): 60.
- [71] GUO S J, WANG R Z, CHEN H, *et al.* A comparative study on the cyclic plasticity and fatigue failure behavior of different subzones in CrNiMoV steel welded joint [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019(150): 66.
- [72] BAN H, ZHU J, SHI G. Cyclic loading tests on welded connections of stainless-clad bimetallic steel and modelling [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020(171): 106140.
- [73] ZHANG W, ZENG L. Experimental investigation and low-cycle fatigue life prediction of welded Q355B steel [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021 (178): 106497.
- [74] 郑山锁,王晓飞,韩言召,等.酸性大气环境下多龄期钢框架柱抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2015,48(8):47.
ZHENG Shansuo, WANG Xiaofei, HAN Yanzhao, *et al.* Experimental study on seismic performance of multi age steel frame columns in acidic atmospheric environments [J]. Journal of Civil Engineering, 2015,48 (8): 47.
- [75] 郑山锁,张晓辉,王晓飞,等.近海大气环境下多龄期钢框架柱抗震性能的试验研究[J].土木工程学报,2016,49(4):69.
ZHENG Shansuo, ZHANG Xiaohui, WANG Xiaofei, *et al.* Experimental study on seismic performance of multi age steel frame columns in offshore atmospheric environments [J]. Journal of Civil Engineering, 2016,49 (4): 69.
- [76] WANG H, XU S, LI A, *et al.* Experimental and numerical investigation on seismic performance of corroded welded steel connections [J]. Engineering Structures, 2018 (174): 10.
- [77] 王友德,史涛,徐善华,等.一般大气环境锈蚀钢柱抗震性能试验与数值分析[J].土木工程学报,2021,54(6):62.
WANG Youde, SHI Tao, XU Shanhua, *et al.* Experimental and numerical analysis of seismic performance of corroded steel columns in general atmospheric environments [J]. Journal of Civil Engineering, 2021,54 (6): 62.
- [78] ZHANG X, LI B. Damage characteristics and assessment of corroded RC beam-column joint under cyclic loading based on acoustic emission monitoring [J]. Engineering Structures, 2020 (205): 110090.
- [79] ZHANG X, LI B. Seismic performance of exterior reinforced concrete beam-column joint with corroded reinforcement [J]. Engineering Structures, 2021 (228): 111556.
- [80] SHANG Z, ZHENG S, ZHENG H, *et al.* Seismic behavior and damage evolution of corroded RC columns designed for bending failure in an artificial climate [J]. Structures, 2022 (38): 184.
- [81] DANGWAL S, SINGH H. Behavior of corrosion damaged non-seismically and seismically detailed reinforced concrete beam-column sub-assemblages under cyclic loading [J]. Engineering Failure Analysis, 2023 (146): 107135.
- [82] 郑山锁,田进,韩言召,等.考虑锈蚀的钢结构地震易损性分析[J].地震工程学报,2014,36(1):1.
ZHENG Shansuo, TIAN Jin, HAN Yanzhao, *et al.* Seismic vulnerability analysis of steel structures considering corrosion [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2014,36 (1): 1.
- [83] 王晓飞.酸性大气环境下多龄期钢框架结构抗震性能及优化设计方法研究[D].西安:西安建筑科技大学,2015.
WANG Xiaofei Research on seismic performance and optimization design methods of multi age steel frame structures in acidic atmospheric environments [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [84] 郑山锁,左英,张晓辉,等.酸性大气环境下多龄期平面钢框架结构抗震性能试验研究[J].工程力学,2017,34(9): 73.
ZHENG Shansuo, ZUO Ying, ZHANG Xiaohui, *et al.* Experimental study on seismic performance of multi age planar steel frame structures in acidic atmospheric environments [J]. Engineering Mechanics, 2017,34 (9): 73.
- [85] ZHANG X, ZHENG S, ZHAO X. Experimental and numerical study on seismic performance of corroded steel frames in chloride environment [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020 (171): 106164.