

文章编号:1007-9629(2024)08-0727-06

海洋环境下高强钢及焊缝连接粗糙度参数分析

魏欢欢^{1,2,3}, 汤轶群^{1,2,*}, 张广才¹, 陈晨^{3,4}

(1. 东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 211189; 2. 东南大学 江苏省工程力学分析重点实验室, 江苏 南京 211189; 3. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 4. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要:为研究海洋浪溅区环境下高强钢及焊缝连接的腐蚀形貌特征和时变效应,通过微观扫描测试 Q690 高强钢及焊缝连接表面粗糙度参数,得到表面峰最大高度(S_p)、表面谷最大深度(S_v)、表面轮廓偏斜度(S_{sk})及表面轮廓峭度(S_{ku})随腐蚀时间的演化规律,并进行回归分析与对比.结果表明:通过分析粗糙度参数随腐蚀时间的变化过程,以及对比 Q690 高强钢母材与焊缝连接扫描区域的差异性,能准确地判断其腐蚀程度及特征,从而为海洋环境下国产高强钢损伤评估提供新的途径.

关键词:Q690 高强钢;海洋浪溅区;微观扫描;焊缝连接;粗糙度参数;损伤评估

中图分类号:TU511.3

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.08.008

Research on Roughness Parameters of High Strength Steel and Weld Joint in Marine Environment

WEI Huanhuan^{1,2,3}, TANG Yiqun^{1,2,*}, ZHANG Guangcai¹, CHEN Chen^{3,4}

(1. Key Laboratory of Concrete & Pre-stressed Concrete Structures of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 4. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The surface roughness parameters of Q690 high strength steel and weld joint specimens were assessed through microscopic scanning tests to investigate the dynamic changes in corrosion morphology characteristics of high strength steel (HSS) within the ocean splash zone corrosive environment. These investigations encompassed the analysis of parameters such as the maximum height of surface peaks S_p , the maximum depth of surface valleys S_v , the skewness of surface profiles S_{sk} , and the kurtosis of surface profiles S_{ku} over varying periods of corrosion. Power function regression analyses and comparative assessments were conducted for each of these parameters. The results indicate that considering the differences in the scanning area of base material and weld joint of Q690 high strength steel, the corrosion degrees and characteristics can be accurately determined by analyzing the variation process of roughness parameters with corrosion time, so as to provide a new approach for damage assessment of domestically produced high strength steel in marine environments.

Key words: Q690 high strength steel; ocean splash zone; microscopic scanning; weld joint; roughness parameter; damage assessment

收稿日期:2023-10-08; 修订日期:2023-12-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52008094);江苏省自然科学基金资助项目(SBK2020040);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX23_0273,KYCX24_0367);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2242024k30065)

第一作者:魏欢欢(1996—),男,陕西宝鸡人,东南大学博士生.E-mail:wh0402@seu.edu.cn

通讯作者:汤轶群(1985—),男,江苏连云港人,东南大学副教授,博士生导师,博士.E-mail:yi-qun.tang@seu.edu.cn

在“十四五”规划期间,随着中国钢铁轧制与冶炼水平的提升,以高强钢为主要材料的工程在海洋领域的建造规模取得了大幅提升^[1-3].然而钢材表面容易腐蚀,尤其在焊缝处分布着大量不均匀锈坑,通过传统的实时检测及表面防护手段难以确保结构安全耐久^[4-7],对锈损高强钢进行可靠性评估成为了学术界的重要课题,其中高强钢腐蚀形貌演化规律是关键的科学问题之一.舒贻平等^[8]通过模拟海洋及工业大气环境得到钢材腐蚀微观形貌,结果表明平均腐蚀深度的增长速率随时间呈幂函数上升,蚀坑深度呈正态分布.徐善华等^[9]根据腐蚀Q235钢材实测数据得出采用粗糙度能够反映时变损伤过程.Wan等^[10]研究发现高强钢表面腐蚀损失率大于10%,点蚀与坑蚀的深度比基本不变.Qin等^[11]通过观测钢材及焊缝连接腐蚀微观形貌发现焊缝连接损伤累积更高.Ren等^[12]通过Na₂SO₄溶液对Q355B钢材进行喷雾试验,结果显示腐蚀特征参数服从 χ^2 分布,腐蚀形貌呈单一蚀坑-多阶段蚀坑-单一蚀坑交替变化.Kingkam等^[13]根据微观扫描结果得出,环境温度上升会引起钢材微观晶粒尺寸增大,腐蚀损伤程度提高.

迄今为止,学者们从宏观形貌分析、失重率等方面研究了普通钢材的表面损伤^[14-15],尚未考虑腐蚀损伤对国产高强钢及焊缝连接微观形貌多尺度时变效应的影响.本文通过湿热周期浸润试验及微观扫描测试^[16-17],得到腐蚀Q690高强钢母材及对接焊缝扫描区域的表面粗糙度参数,建立其与腐蚀时间的定量关系,讨论微观形貌差异及影响因素,为进一步开展海洋环境下高强钢力学性能退化分析提供科学基础.

1 表面粗糙度理论

表面粗糙度是指由波峰、波谷和波距等组成的几何形貌参数,具体可以根据微观形貌的高度分布、数据统计与极值分布,来讨论蚀坑尺寸、深度及其扩展变化规律,并以此表征腐蚀形貌规律^[18].另外,研究发现,采用表面粗糙度分析时具有统计性良好和误差可控等优点,并且能够准确掌握不同阶段的微观形貌特征,因此其在实际工程腐蚀检测结果分析中具有较强的适用性^[19-21].鉴于实际海洋环境相对复杂,服役构件表面形貌分布大多呈现随机性、多样性及不确定性,故在金属材料微观腐蚀研究领域通过引入表面峰最大高度(S_p)、表面谷最大深度(S_v)、表面轮廓偏斜度(S_{sk})及表面轮廓峭度(S_{ku}),来研究不同腐蚀周期试件的微观形貌发展过程及其变化规律,其计算表达式如式(1)~(6)所示.腐蚀形貌示意

图如图1所示.试件的腐蚀粗糙程度可以通过 S_{sk} 与 S_{ku} 联合表征.当表面轮廓偏斜度 $S_{sk}=0$ 时,基准面的尖峰呈对称分布;当 $S_{sk}<0$ 时,在低于基准面一侧有尖峰;当 $S_{sk}>0$ 时,在高于基准面一侧分布有尖峰.表面轮廓峭度 S_{ku} 指表面峰谷间轮廓曲线的倾斜度大小,表征尖峰物的陡峭程度或者腐蚀表面的高低起伏程度.当 $S_{ku}\geq 3$ 时,试件表面尖峰较多,同时高低落差相对较大;当 $S_{ku}<3$ 时,试件表面趋于平缓,局部呈现较多的谷状腐蚀物.

$$S_p = \max_{(x,y) \in D} |z(x,y)| \quad (1)$$

$$S_v = \max_{(x,y) \in D} |-z(x,y)| \quad (2)$$

$$S_z = S_p + S_v \quad (3)$$

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[\frac{1}{A} \iint_D z^3(x,y) dx dy \right] \approx \frac{1}{S_q^3} \left[\frac{1}{MN} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N z^3(x_i, y_j) \right] \quad (4)$$

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} z^4(x,y) p(z) dx dy \right] \approx \frac{1}{S_q^4} \left[\frac{1}{MN} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N z^4(x_i, y_j) \right] \quad (5)$$

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{l_x l_y} \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} z^2(x,y) dx dy} \approx \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N z^2(x_i, y_j)} \quad (6)$$

式中: $z(x,y)$ 为残存表面轮廓函数; D 为测定区间的坐标; S_z 为表面最大高度,取 S_p 与 S_v 的代数和; S_q 为表面均方根偏差值; A 为测定区间的面积; M 、 N 与 l_x 、 l_y 分别为扫描区域 x 、 y 方向的离散样本数量及扫描长度; $p(z)$ 为任意位置深度相关函数.

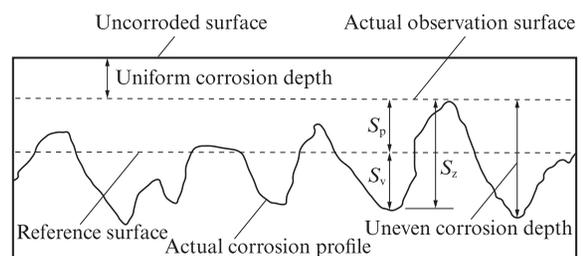


图1 腐蚀形貌示意图

Fig. 1 Schematic diagram of corrosion morphology

2 试验部分

2.1 加速腐蚀试验

根据GB/T 2975—1998《钢材力学性能及工艺

性能试验取样规定》,试验选用武汉钢铁公司同一批次生产的板厚为10 mm的Q690低合金高强度钢材,焊条型号为CHE857Cr. 首先将热机械控制工艺(TMCP)高强钢及焊接钢板按照尺寸280 mm×60 mm分别进行线切割,再按照加速腐蚀方案将其划分为6组(腐蚀时间 t 分别为0、20、40、60、80、100 d),每组4根平行试件. 鉴于海洋浪溅区高温、干湿交替等环境特征,通过盐水周期浸润-湿热循环加速腐蚀来模拟实际海洋浪溅区环境^[22],腐蚀液选用

质量浓度为26 g/L的氯化钠溶液,pH值介于6~7,湿热养护箱内的温度为35℃,相对湿度为95%±3%.

加速腐蚀试验具体步骤为:盐水浸泡6 h、室内晾晒6 h、湿热养护12 h,以此往复循环上述操作过程. 每20 d后取出1组试件,并对表面进行除锈、烘干备用,将未腐蚀试件($t=0$ d)作为对照组. Q690钢材与焊条的化学组成如表1所示,焊接工艺参数如表2所示,焊条熔敷金属的力学性能如表3所示.

表1 Q690钢材与焊条的化学组成

Table 1 Chemical compositions (by mass) of Q690 steel and electrode

Material	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	V
CHE857Cr	≤0.150	≥1.000	≤0.600	≤0.035	≤0.035	≤1.100	≥0.500	—	≥0.050
Q690	0.070	1.610	0.150	0.007	0.002	0.010	0.002	—	0.003

Unit: %

表2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters

Diameter/mm	Current/A	Voltage/V	Welding speed/(cm·min ⁻¹)
4.0	130-170	22-26	15-25

表3 焊条熔敷金属的力学性能

Table 3 Mechanical properties of deposited metal

Welding rod	Yield strength/MPa	Ultimate strength/MPa	Elongation/%	-30℃ impact energy/J
CHE857Cr	≥740	≥830	≥12	≥27

2.2 粗糙度参数采集

试验在西安理工大学现代分析测试中心完成,测试设备采用日本OLYMPUS公司研发的激光共聚焦显微镜. 首先以腐蚀试件中心为基准点(扫描尺寸为40 mm×90 mm,扫描范围为30 mm×30 mm),对其表面各微元分别进行单独扫描成像;然后通过

图像拼接叠加得到整个扫描区域的微观形貌图;最后采集任意位置的表面粗糙度参数. 由于微观腐蚀形貌分布存在随机性^[23-24],因此需要对试件正、反面分别进行观察并记录测试数据. 腐蚀60 d试件的三维微观形貌对比如图2所示,其中BCS和WCS分别表示Q690高强钢母材及焊缝连接区.

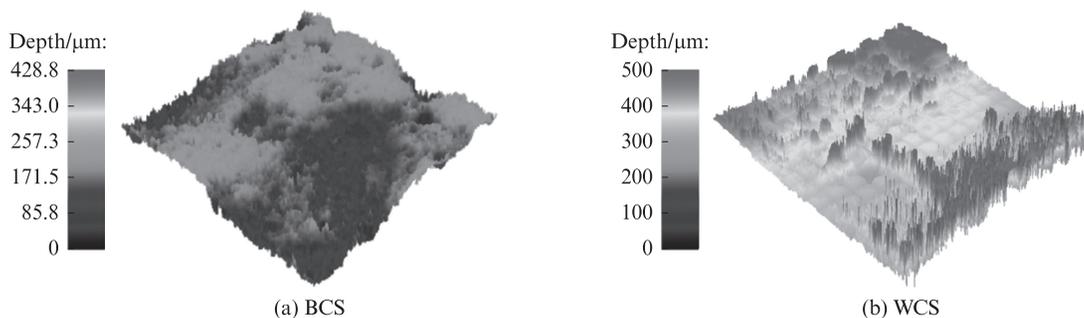


图2 腐蚀60 d试件的三维形貌图

Fig. 2 3D morphology of the corroded specimen after 60 d

3 结果与分析

3.1 粗糙度参数与腐蚀时间的关系

通过粗糙度参数统计结果,得到Q690高强钢母材及焊缝连接区扫描区域的粗糙度参数与腐蚀时间

的拟合曲线,如图3、4所示. 由图3、4可知:表面粗糙度参数随腐蚀时间延长呈幂函数增大;在腐蚀初期,BCS表面峰最大高度 S_p 及表面谷最大深度 S_v 偏差较小,WCS则恰好与之相反;随着腐蚀时间的增加,BCS表面 S_p-t 与 S_v-t 拟合曲线的差异逐渐增大,而

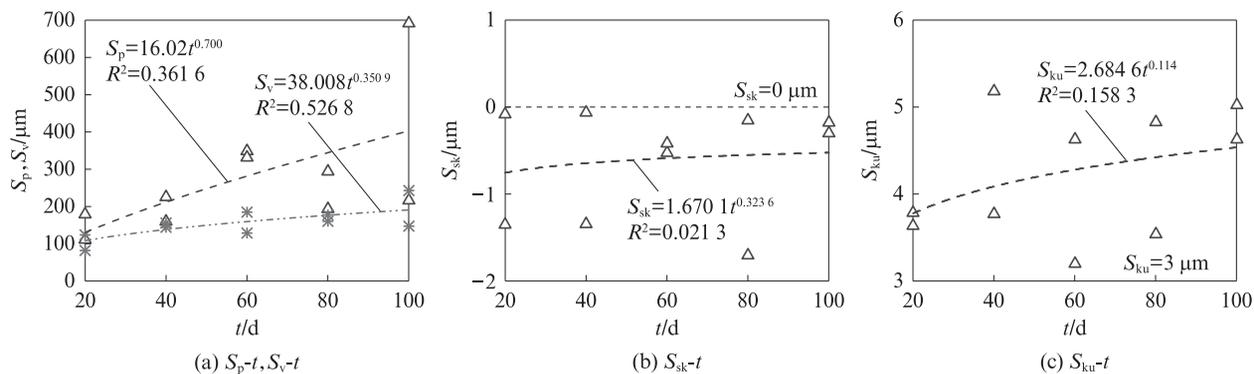


图3 Q690高强钢母材的粗糙度参数

Fig. 3 Roughness parameters of Q690 high strength steel

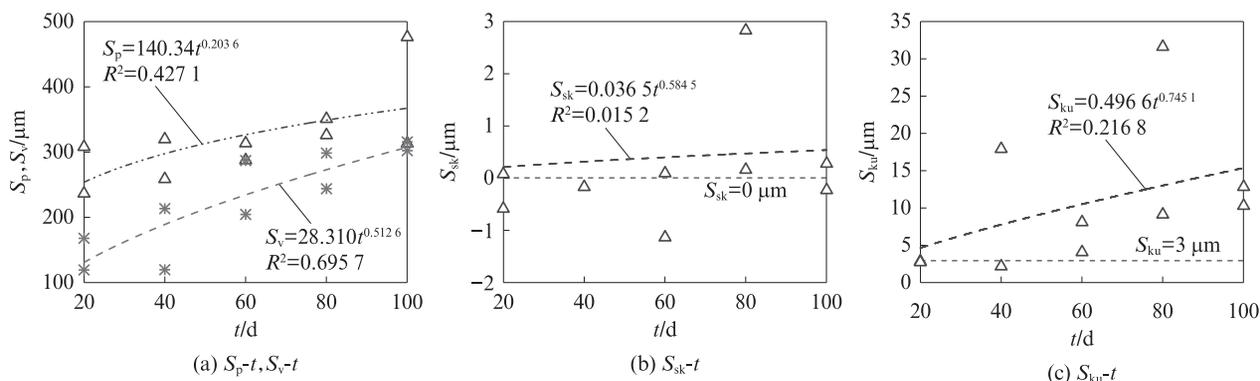


图4 Q690高强钢焊缝连接区的粗糙度参数

Fig. 4 Roughness parameters of weld joint of Q690 high strength steel

WCS表面 S_p-t 与 S_v-t 拟合曲线逐渐靠拢.在腐蚀初期BCS表面各区域均沿着厚度方向发生点蚀;在腐蚀后期,点蚀形貌几乎同时向坑蚀状快速转变,此时微观形貌的差异性相比腐蚀初期更为复杂,最终导致蚀坑的纵向尺寸差距显著增大.而WCS表面在腐蚀初期的点蚀形貌首先聚集在焊缝热影响区,随着腐蚀时间的增加,焊缝区的腐蚀损伤程度快速递增,同时热影响区的点蚀形貌逐渐过渡到坑蚀状,因此在加速腐蚀后期,WCS表面的蚀坑形貌一般会呈现出水平方向较宽且纵深较浅.

由图3、4还可见,BCS、WCS表面的轮廓偏斜度 $S_{sk}-t$ 及轮廓峭度 $S_{ku}-t$ 拟合曲线增幅均随着腐蚀时间 t 的增加明显变缓.这说明凹陷的蚀坑侧表面坡度减小,腐蚀损伤沿板厚方向的发展速率在逐渐降低,从而验证了试件的表面腐蚀点状微观形貌向坑状的演变规律.

3.2 粗糙度参数对比分析

对比图3、4不同腐蚀周期下BCS、WCS表面的粗糙度参数可知:在腐蚀初期,BCS表面粗糙度参数的增幅要比WCS偏高,而WCS的 S_p 、 S_v 均明显大于BCS,说明腐蚀损伤对于焊缝连接区的性能影响相比Q690高强钢母材区更大,即焊缝连接区在环境侵

蚀作用下更易产生错综复杂的锈坑分布;随着腐蚀时间的增加,粗糙度参数增大,当腐蚀60 d时,BCS表面 S_p-t 拟合曲线存在明显的拐点,WCS表面 S_p-t 拟合曲线则较为平缓.由此可知,在腐蚀初期BCS表面主要以点蚀形貌分布为主,并无坑蚀产生,当腐蚀时间增加时,表面由点蚀形貌逐渐向坑蚀转变.而WCS表面在加速腐蚀过程中,在点蚀形貌产生的同时会存在少量的坑蚀状物.这说明在焊缝连接区,腐蚀行为从点蚀向坑蚀转变的现象并没有BCS明显.在腐蚀后期,BCS拟合曲线变化趋势存在较大落差,而WCS拟合曲线相对平稳增长,此时BCS表面的腐蚀产物质地更为疏松,并存在显著的腐蚀剥落行为,由此可知腐蚀行为将会继续沿着试件的板厚方向扩展,从而导致粗糙度参数差异性进一步提升.上述分析过程与笔者根据微观形貌扫描测试现象所得到的结论基本吻合^[16-17].

BCS、WCS表面 $S_{ku}-t$ 拟合曲线始终位于 $S_{ku}=3\mu\text{m}$ 上侧,说明BCS、WCS表面均分布着大量呈“峰状”的腐蚀形貌,并且表面的轮廓曲线斜率普遍较高.在加速腐蚀时BCS表面 S_{sk} 、 S_{ku} 平稳增加,而WCS起伏落差较大,说明不同腐蚀阶段的WCS表面形貌变化差异相比BCS更为明显.当腐蚀60 d时,WCS表

面轮廓偏斜度 $S_{sk} < 0$, 其余周期观测的结果均为正值. 而BCS表面 $S_{sk}-t$ 拟合曲线始终位于 $S_{sk}=0 \mu\text{m}$ 下侧, 说明在加速试验过程中, BCS表面主要沿深度方向发生侵蚀, 产生了较多的凹陷点状腐蚀形貌. 这是由于高温焊接过程的热输入, 导致WCS热影响区、焊缝区微观晶粒组织及结构发生变化, 经过熔焊冷却期后, 连接区域存在初始残余应力, 因此在应力-环境腐蚀耦合效应作用下, WCS比BCS表面更容易产生凹陷针状点蚀物, 同时WCS表面分布着较多的“凸峰”状形貌, 由此可知焊接区域腐蚀损伤量值偏大, 表面粗糙程度十分复杂. 当腐蚀100 d以后, WCS表面微观形貌沿着板厚方向的起伏落差比BCS显著.

4 结论

(1) 对Q690高强钢及焊缝连接表面进行微观扫描测试, 获取不同腐蚀周期下的粗糙度参数(表面峰最大高度 S_p 、表面谷最大深度 S_v 、表面轮廓偏斜度 S_{sk} 及表面轮廓峭度 S_{sm}), 建立了粗糙度参数与腐蚀时间的定量关系. 随着腐蚀时间的增加, 粗糙度参数呈幂函数增长, 高强钢及焊缝连接表面腐蚀过程由不均匀腐蚀向全面腐蚀过渡, 并且前者变化更加明显.

(2) 在腐蚀初期, 高强钢及焊缝连接表面腐蚀形态均为点蚀, 焊缝连接处分布少量坑状形貌. 随着腐蚀时间的增加, 高强钢表面存在显著的腐蚀发展演变过程, 但是在腐蚀后期时, 焊缝连接表面微观形貌尺度要比高强钢更复杂.

(3) 在加速腐蚀过程中, 焊缝连接表面比高强钢形貌演变速率更快, 最终产生更多的不规则腐蚀形貌. 这是因为焊接工艺及热影响区的残余应力使得焊缝连接表面沿厚度方向的形貌起伏差异显著.

(4) 采用表面粗糙度理论能够较好地反映高强钢在模拟海洋浪溅区环境下的腐蚀损伤. 鉴于试验方案所选择的腐蚀周期较短, 扫描试件数量偏少, 因此对于Q690高强钢及焊缝连接的时变腐蚀损伤及微观形貌表征有待进一步研究.

参考文献:

- [1] 喻宣瑞, 姚国文, 钟浩, 等. 交变荷载和氯盐环境耦合作用下钢绞线的腐蚀特征及力学性能[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6): 1315-1321.
YU Xuanrui, YAO Guowen, ZHONG Hao, et al. Corrosion characteristics and mechanical properties of steel strands under coupling effect of alternating load and chloride salt environment [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6): 1315-1321. (in Chinese)
- [2] 魏欢欢, 贾鹏孝, 郑东东, 等. 腐蚀环境中高强钢力学性能的研究进展[J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(5): 51-56.
WEI Huanhuan, JIA Pengxiao, ZHENG Dongdong, et al. Research progress on mechanical properties of high strength steel in corrosive environment [J]. Corrosion & Protection, 2023, 44(5): 51-56. (in Chinese)
- [3] 魏欢欢, 陈晨, 郑东东, 等. 海洋腐蚀环境下高强度钢材研究现状及发展趋势[J]. 人民珠江, 2023, 44(8): 82-92.
WEI Huanhuan, CHEN Chen, ZHENG Dongdong, et al. Research status and development trend of high strength steel in marine corrosive environment [J]. Pearl River, 2023, 44(8): 82-92. (in Chinese)
- [4] PASTORCIC D, VUKELIC G, IVOSEVIC S. Welded steel in marine environment—Experimental and numerical study of mechanical properties degradation [J]. Materials Today Communication, 2023, 34: 105280.
- [5] BHANDARI J, KHAN F, ABBASSI R, et al. Modelling of pitting corrosion in marine and offshore steel structures—A technical review [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 37: 39-62.
- [6] 常安乐, 宋诗哲. 模拟海洋环境浪花飞溅区的金属构筑物腐蚀监测[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(3): 247-250.
CHANG Anle, SONG Shizhe. A preliminary on corrosion monitoring and detecting of metal structure in simulated sea splash zone [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2012, 32(3): 247-250. (in Chinese)
- [7] 郭宏超, 魏欢欢, 杨迪雄, 等. 海洋腐蚀环境下Q690高强钢材疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(5): 36-45.
GUO Hongchao, WEI Huanhuan, YANG Dixiong, et al. Experimental research on fatigue performance of Q690 high strength steel in marine corrosive environment [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(5): 36-45. (in Chinese)
- [8] 舒赣平, 陈尧, 卢瑞华, 等. 模拟海洋与工业大气环境下结构钢腐蚀行为[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2022, 54(4): 475-481, 490.
SHU Ganping, CHEN Rao, LU Ruihua, et al. Corrosion behavior of structural steel in simulated marine and industrial atmosphere environment [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2022, 54(4): 475-481, 490. (in Chinese)
- [9] 徐善华, 何羽玲, 秦广冲, 等. 钢材锈蚀率与表面三维粗糙度参数的关系[J]. 材料科学与工程学报, 2016, 34(2): 292-295.
XU Shanhua, HE Yuling, QIN Guangchong, et al. Relationship between steel corrosion ratio and 3D surface roughness parameters [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2016, 34(2): 292-295. (in Chinese)
- [10] WAN S P, ZHOU H J, LI L X, et al. Degradation of artificially corroded galvanized high-strength steel wires: Corrosion morphology and mechanical behavior [J]. Construction and Building Materials, 2022, 346: 128387.
- [11] QIN H, TANG Y C, LIANG P. Effect of heat input on

- microstructure and corrosion behavior of high strength low alloy steel welds[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2021, 16:210449.
- [12] REN S B, KONG C, GU Y, et al. Measurement pitting morphology characteristic of corroded steel surface and fractal reconstruction model[J]. *Measurement*, 2022, 190:110678.
- [13] KINGKAM W, ZHAO C Z, LI H, et al. Hot deformation and corrosion resistance of high-strength low-alloy steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica(English Letters)*, 2019, 32(4):495-505.
- [14] 贾晨, 邵永松, 郭兰慧, 等. 建筑结构用钢的大气腐蚀模型研究综述[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(8):1-9.
JIA Chen, SHAO Yongsong, GUO Lanhui, et al. A review of atmospheric corrosion models of building structural steel[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(8):1-9. (in Chinese)
- [15] SANTA-CRUZ L A, MACHADO G, VICENTE A A, et al. Effect of high anodic polarization on the passive layer properties of superduplex stainless steel friction stir welds at different chloride electrolyte pH values and temperatures[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2019, 26(6):710-721.
- [16] 魏欢欢, 雷天奇, 郑东东, 等. Q690 高强钢对接焊缝加速腐蚀试验研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2022, 42(4):675-680.
WEI Huanhuan, LEI Tianqi, ZHENG Dongdong, et al. Corrosion characteristics of butt welds of Q690 high strength steel in laboratory test as an environmental simulation of ocean splash zone[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2022, 42(4):675-680. (in Chinese)
- [17] 魏欢欢, 郑东东, 陈晨, 等. Q690 高强钢在模拟海洋浪溅区环境下耐蚀性能研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2023, 43(1):186-190.
WEI Huanhuan, ZHENG Dongdong, CHEN Chen, et al. Corrosion resistance of Q690 high strength steel in simulated corrosive environment of ocean splash zone[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2023, 43(1):186-190. (in Chinese)
- [18] 刘洪涛, 靳晶, 曹守范, 等. 干摩擦磨损过程中表面粗糙度的定量描述[J]. *材料研究学报*, 2011, 25(5):483-488.
LIU Hongtao, JIN Jing, CAO Shoufan, et al. The quantitative analysis of surface roughness in the dry friction[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2011, 25(5):483-488. (in Chinese)
- [19] 郭宏超, 李彤宇, 王德法, 等. 海洋环境下锈蚀高强度钢材滞回性能[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(4):781-787.
GUO Hongchao, LI Tongyu, WANG Defa, et al. Hysteretic properties of corroded high strength steel in marine environment[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(4):781-787. (in Chinese)
- [20] 喻宣瑞, 姚国文, 蒋一星, 等. 基于三维 Copula 函数的蚀坑预测模型[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(5):1082-1088.
YU Xuanrui, YAO Guowen, JIANG Yixing, et al. Pit prediction model based on three-dimensional copula function[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(5):1082-1088. (in Chinese)
- [21] GATHIMBA N, KITANE Y, YOSHIDA T, et al. Surface roughness characteristics of corroded steel pipe piles exposed to marine environment[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 203:267-281.
- [22] 侯保荣. 我的海洋浪花飞溅区腐蚀情缘[J]. *海洋科学*, 2020, 44(7):179-193.
HOU Baorong. My passion for the corrosion protection of ocean splash zone[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(7):179-193. (in Chinese)
- [23] WANG Y D, ZHOU X D, WANG H, et al. Stochastic constitutive model of structural steel based on random field of corrosion depth[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 16:e00972.
- [24] TIAN H Y, CUI Z Y, MA H, et al. Corrosion evolution and stress corrosion cracking behavior of a low carbon bainite steel in the marine environments: Effect of the marine zones[J]. *Corrosion Science*, 2022, 206:110490.