

Q420qENH 焊接接头腐蚀后疲劳性能研究及寿命预测

程海根^{1,2}, 赵小波¹, 邹鹏¹, 龚汉隆¹, 郑尚敏¹

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学山区土木工程安全与韧性全国重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: 为了研究 Q420qENH 焊接接头腐蚀后的疲劳性能, 利用试验和数值模拟的方法, 对 Q420qENH 焊接接头试件进行电解加速腐蚀后的疲劳试验, 建立了热-力耦合有限元模型模拟焊接过程, 通过外加残余应力场和应力集中系数利用 ABAQUS 和 FE-SAFE 软件对焊接接头腐蚀后的疲劳寿命进行预测。结果表明, 试件均在焊趾中部蚀坑处发生断裂, 残余应力表现为拉应力, 且随着疲劳应力幅和腐蚀时间的增加, 试件腐蚀后的疲劳寿命下降显著, 试验与模拟结果相对误差均在 15% 以内。对试验与模拟疲劳数据拟合 S-N 曲线 (存活率 95%), 当循环次数在 200 万次时, 试验与模拟相对误差最大为 4.31%, 误差较小, 预测效果较好。根据《铁路桥梁钢结构设计规范》TB/T 10091-2017, 在对铁路免涂装 Q420qENH 耐候钢进行桥梁设计时, 建议对接接头的疲劳容许应力幅类别调整为 VII 类。

关键词: 数值模拟; 腐蚀疲劳试验; 残余应力; 焊接接头

中图分类号: U446

文献标志码: A

Fatigue Performance Research and Life Prediction For Corroded Q420qENH Welded Joints

Cheng Haigen^{1,2}, Zhao Xiaobo¹, Zou Peng¹, Gong Hanlong¹, Zheng Shangmin¹

(1. East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. National Key Laboratory of Safety and Resilience of Mountainous Civil Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: To investigate the fatigue performance of Q420qENH welded joints after corrosion, electrolytic accelerated corrosion tests and fatigue experiments were conducted on specimens, combined with numerical simulation. A thermal-mechanical coupled finite element model was established to simulate the welding process. The fatigue life of corroded welded joints was predicted using ABAQUS and FE-SAFE by introducing residual stress fields and stress concentration factors. The results show that all specimens fractured at the corrosion pits in the middle of the weld toe. Residual stress presents tensile stress, and the fatigue life of specimens decreases significantly with the increase of fatigue stress amplitude and corrosion time. The relative errors between test and simulation results are within 15%. The S-N curves (95% survival rate) fitted from test and simulation fatigue data show that the maximum relative error at 2 million cycles is 4.31%, indicating small errors and good prediction accuracy. According to the *Code for Design of Steel Structures of Railway Bridges* (TB/T 10091-2017), it is recommended to adjust the fatigue allowable stress amplitude category of butt joints for railway non-painted Q420qENH weathering steel to Category VII in bridge design.

Keywords: Numerical simulation; Corrosion fatigue test; Residual Stress; Welding joints

在中国铁路桥梁中, 钢桥占有重要地位, 其在服役过程中反复承受着列车荷载的作用^[1-2], 而在钢桥建造加工中, 焊接具有减轻结构自重、密封性能好等优点, 是桥梁建设中不可或缺的连接手段^[3-4]。处于海洋环境下的焊接结构钢桥, 在制造过程中存在几何缺陷引起的应力集中和焊接产生的残余应力等初始缺陷, 并且由于遭受海水的侵蚀, 钢材表面会产生蚀坑, 增加了钢桥在荷载反复作用下疲劳开裂风险, 这对钢材的性能有了更高的要求^[5]。而对钢材添加合金元素可以改善其相的组成和结构, 使钢材及其焊接接头

收稿日期: 2025-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51968024)

达到理想的性能^[6]，Q420qENH 作为一种在普通钢基础上添加少量铜、磷、铬、镍等合金元素来改善锈层致密程度、减缓基体腐蚀速率、从而达到“以锈防锈”目的的低合金结构钢，不仅可以提高钢桥的抗腐蚀性能，增加使用寿命，同时可以降低钢材的使用量，使其在钢结构桥梁的建设中应用广泛^[7-8]。

国内外学者对耐候钢腐蚀后的疲劳性能已经开展了一定的研究，姚谏等^[9]通过对腐蚀后 Q355NHD 栓焊节点耐候钢进行疲劳试验，发现栓焊节点疲劳裂纹均在翼缘侧的焊趾处萌生，其疲劳破坏主要由焊缝主导，且耐候钢梁在栓焊节点处的疲劳性能并未由于锈蚀而降低。栓焊与焊接腐蚀后疲劳性能上存在较大的存在区别，腐蚀对栓焊节点的影响较小。而崔坤强等^[10]对中性盐雾腐蚀后的 SMA490BW 耐候钢及不同焊接工艺下的焊接接头进行疲劳试验，研究了 SMA490BW 耐候钢的腐蚀行为。结果发现，随着时间的增加，耐候钢及其焊接接头试件的腐蚀失重先增加后减小，耐候钢的抗腐蚀性能要高于其焊接接头。说明结构焊接时其热影响区由于温度变化导致局部耐腐蚀性的降低，使焊接接头位置成为结构腐蚀后的疲劳薄弱点。Albrecht 等^[11]对腐蚀后的 A588 焊接耐候钢梁进行疲劳试验，结果发现疲劳裂纹主要萌生于蚀坑、翼缘边缘缺陷、焊接缺陷处；焊接钢梁翼缘表面由于腐蚀产生的锈坑导致了试件疲劳强度的降低。这说明焊接产生的初始缺陷与腐蚀存在协同作用，共同影响疲劳裂纹的萌生与开展。李建永等^[12]通过试验与模拟建立了以应力集中系数为基础的表面受损 EH36 钢焊接接头腐蚀疲劳数学模型以此来实现对表面受损接头的腐蚀疲劳寿命预测，为预测结构腐蚀后的疲劳寿命提供了新的思路。

目前，国内外对 Q420qENH 耐候钢的研究主要集中于腐蚀行为和力学性能，而缺乏对其焊接接头腐蚀后疲劳性能的研究。因此，本文对电解加速腐蚀后的 Q420qENH 耐候钢焊接接头进行疲劳试验，建立了热-力耦合有限元模型模拟焊接过程，通过外加残余应力场和应力集中系数利用 ABAQUS 和 FE-SAFE 软件联合对焊接接头腐蚀后的疲劳寿命进行预测，研究了 Q420qENH 耐候钢的腐蚀后疲劳性能，并对其疲劳性能进行评估。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验材料选取 Q420qENH 钢材，焊材采用 SC-81W 焊丝（直径 1.2mm），材料成分含量如表 1 所示。试件设计板厚 10mm，接头形式为对接，采用线切割的方式对试件进行加工。根据 GB/T985.1-2008《焊接推荐坡口规范》将焊接坡口设置为 Y 形，坡口下部垂直高度 2mm，坡口夹角 60°，焊缝余高 2mm，对接两板间距 2mm，焊接方式采用手工电弧焊，设置电流 I 为 240A，电压 U 为 28V，热效率 η 为 0.75，焊接速度 V 为 5mm/s。焊缝分上下两层，每层均采用单道焊，焊缝计算长度为 40mm，试件详细尺寸如图 1 所示。

表 1 Q420qENH 与焊材成分含量

Tab.1 420qENH and welding consumables composition content

材料类别	化学成分（质量分数/%）								
	Mn	Cr	Ni	Cu	Alb	Si	C	P	S
母材 Q420qENH	1.36	0.4~0.7	0.3~0.4	0.25~0.5	0.033	0.25	0.06	0.01	0.002
焊材 SC-81W	0.5~1.3	0.45~0.47	0.3~0.8	0.3~0.75	1.8	0.2~0.8	0.12	0.03	0.03

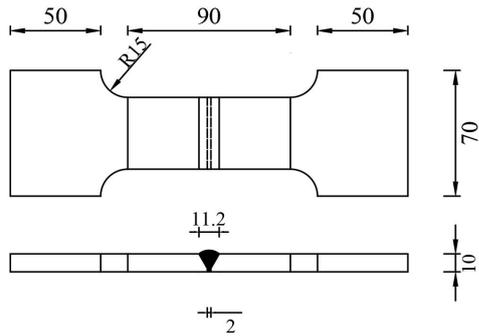


图 1 试件详细尺寸图

Fig.1 Detailed dimensions of the specimen

1.2 电解加速腐蚀试验

腐蚀试验采用电解加速腐蚀的方法来模拟实际自然海洋大气环境的电化学腐蚀。Q420qENH 耐候钢试件作为阳极通过导线与恒流电源正极连接，负极固定在与试件腐蚀面积接近的不锈钢片惰性电极上，以防阴极与阳极面积不平衡对腐蚀的影响。腐蚀介质为 3.5% 的 NaCl 溶液，pH 值控制在 6.8-7.2 范围。腐蚀周期设定为 4h、8h、14h，共三组，每组设置六个试件，其中预留两个试件备用，共计 18 个试件。试验时对试件夹头位置涂环氧树脂做防腐处理，后将试件完全浸没于腐蚀介质中，达到腐蚀周期后将试件取出干燥备用，电解加速腐蚀试验与除锈后试件，如图 2 所示。



图 2 电解加速腐蚀试验图

Fig.2 Electrolytic Accelerated Corrosion Test Diagram

将试件的腐蚀后质量损失、腐蚀深度及腐蚀速率记录如表 2 所示。质量损失、质量损失百分比和腐蚀深度均随着腐蚀周期的增加而增大，而腐蚀速率则相反，随着腐蚀周期的增加而减小，这是因为钢材在腐蚀后，在焊趾表面会形成锈层，导致了腐蚀效果的减弱，降低了腐蚀速率。

表 2 腐蚀量与腐蚀速率

Tab.2 Corrosion volume and corrosion rate

腐蚀周期(t/h)	质量损失 ($\Delta W/g$)	质量损失百分比 $W_p/\%$	腐蚀深度 $D/\mu m$	腐蚀速率 $V(\mu m/h)$
4	14.01	2.70	72.80	18.20
8	26.93	5.25	139.91	17.49
14	41.83	8.11	217.34	15.52

1.3 疲劳试验

疲劳试验采用型号为 HPS60-A-03-HE 的 250KN 电液伺服动静万能试验机进行加载，焊接接头平行工作段宽度 $W=40\text{mm}$ ，厚度 $T=10\text{mm}$ 。本试验采用载荷控制的方法，试验频率设置为 15Hz ，应力比 $R=0.1$ 。设置位移、载荷与疲劳周期数作为测试条件，当试件位移达到 6mm 、当载荷超过最大加载力的 15% 或是疲劳周期数超过 2000000 次时停止试验。疲劳试验共 12 个试件，分为三组，四个疲劳应力幅，具体参数如表 3 所示。

表 3 疲劳试验参数设置

Tab.3 Parameter settings for fatigue experiment parameters

试件编号	加载疲劳应力幅 $\Delta S/\text{MPa}$	最大力 F_{max}/kN	最小力 F_{min}/kN	平均力 F_{m}/kN	振动力 F_{a}/kN
1	306	136	13.6	74.8	61.2
2	288	128	12.8	70.4	57.6
3	270	120	12	66	54
4	252	112	11.2	61.6	50.4

在疲劳试验中所有试件均发生断裂，且断裂位置均位于焊趾处。由图 3 (a) 和 (b) 可以看出，焊接接头试件腐蚀后，在焊趾区域，疲劳源区存在多个不同位置的裂纹源。在疲劳荷载的作用下，这些裂纹扩展形成一个半椭圆形的主裂纹或边缘穿透裂纹，直至发生断裂失效。疲劳扩展区域呈现出平直且光滑的特征，贝纹线标记清晰可见。与此相反，瞬时断裂区域则显得较为粗糙，其主要是因为断口截面的最大应力超过了 Q420qENH 耐候钢的极限强度，导致了脆性断裂现象的发生。

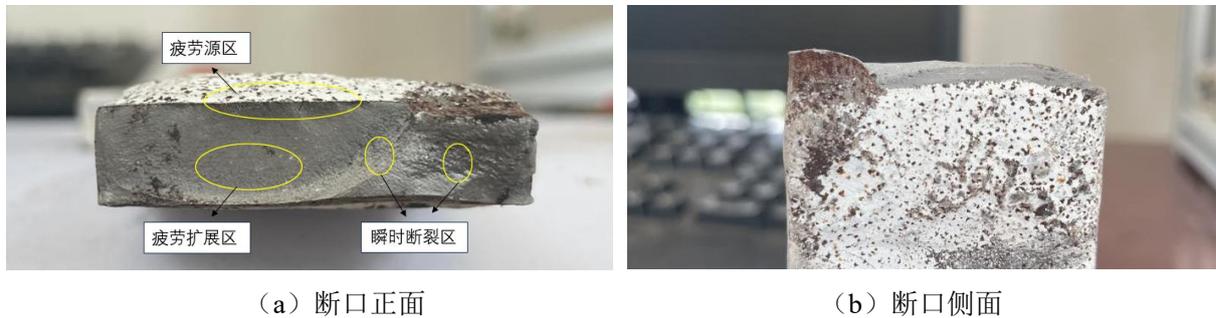


图 3 试件疲劳断口宏观形貌

Fig.3 Macroscopic morphology of specimen fatigue fracture

试件的疲劳寿命结果如表 4 所示，从表中可以看出，试件的疲劳寿命随着腐蚀周期和疲劳应力幅增大而逐渐减小。在相同腐蚀周期内，焊接接头试件的疲劳寿命随着疲劳应力幅的增加而减小，且下降程度逐渐放缓，减小幅度均在 10% 以内；在相同疲劳应力幅下，随着腐蚀时间的增加，试件的疲劳寿命在 4h 与 8h 下差别最大，各应力幅下差别分别达到 32.11% 、 32.52% 、 38.66% 和 42.25% ，这主要是因为 Q420qENH 耐候钢焊接接头没有与母材相同的耐腐蚀性能，因此在焊趾附近的蚀坑较远离焊趾位置的大小及个数均要大，所产生的应力集中效应也更加恶劣，从而加剧了焊接接头的疲劳失效。腐蚀时间增加到 14h 后，与腐蚀 8h 相比，疲劳寿命下降不明显，这是因为钢材在腐蚀后，焊趾表面形成的锈层降低了腐蚀速率，使焊趾处蚀坑数量的增加变缓。

表 4 试验疲劳寿命结果

Tab.4 Experimental fatigue life results

腐蚀周期/h	疲劳应力幅 ΔS /Mpa	试验疲劳寿命/次	断裂部位
4	306	199427	焊趾
	288	216070	焊趾
	270	231795	焊趾
	252	243047	焊趾
8	306	150961	焊趾
	288	163035	焊趾
	270	167163	焊趾
	252	170856	焊趾
14	306	141815	焊趾
	288	154129	焊趾
	270	159429	焊趾
	252	162825	焊趾

2 仿真模拟

2.1 有限元模型建立

参照试验中焊接接头腐蚀工作段的尺寸设计，使用 ABAQUS 通用有限元模拟软件建立焊接有限元模型，如图 4 所示。由于模型体积较小，在进行网格敏感性验证时，发现将网格大小对于残余应力结果的影响很小，根据模型尺寸全局采用 1.25mm 大小网格进行划分，划分得到 24832 个单元 28479 个节点；为了模拟试件在实际焊接时的边界状态，试件的边界条件：两块板边界条件对称，焊缝处 $X=Z=0$ ，沿厚度方向边一点 $X=Y=Z=0$ ，该边上另一点 $Z=0$ 。

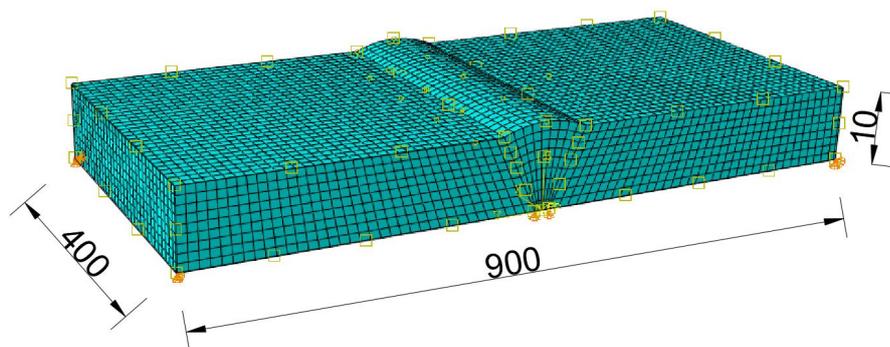


图 4 有限元模型

Fig.4 Finite element model

2.2 参数设置

模拟采用 Q420qENH 为材料，由于现有资料对该材料的热物理性质研究较少，通过查询欧洲钢结构设计规范 EC3^[13] 和 EC4^[14] 得到 Q420qENH 的性能参数如表 5 所示。

表 5 材料性能参数表

Tab.5 Material Performance Parameter Table

温度/°C	比热容/(J/(kg·K))	热膨胀系数/ $10^{-5}K^{-1}$	屈服强度/MPa	弹性模量/MPa	导热系数/(W/(m·K))
20	439.80	0	470	206	53.33
100	487.62	1.248	470	206	50.67
200	529.76	1.288	470	185.4	47.34
300	564.74	1.328	470	164.8	44.01
400	605.88	1.368	470	144.2	40.68
500	666.50	1.408	366.6	123.6	37.35
600	759.92	1.448	220.9	63.86	34.02
700	1008.15	1.488	108.1	26.78	30.69
800	803.26	1.410	51.7	18.54	27.36
900	650.44	1.340	28.2	13.91	27.3
1000	650	1.408	18.8	9.27	27.3
1100	650	1.462	9.4	4.635	27.3

焊接接头的热源通过载荷的形式加载到模型上,通过 ABAQUS 子程序施加热源载荷,并设置 Step-cool 分析步取消激活热源来模拟焊接结束后的冷却阶段。为了能使模拟结果尽可能地与实际相对应,本文采用的热源模型如图 5 所示。

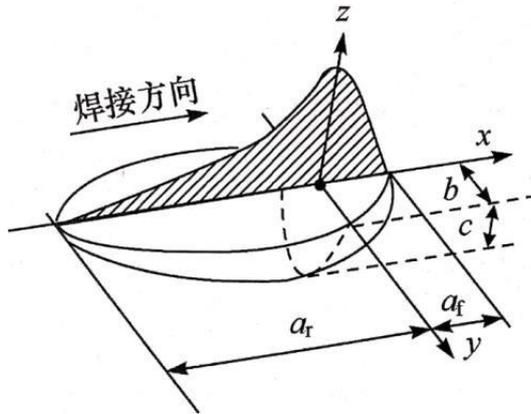
图 5 双椭球热源模型^[15]

Fig.5 Double ellipsoid heat source model

双椭球热源模型前半部分为一个 1/4 椭球,后半部分为另一个 1/4 椭球,热流密度公式 (1)、(2) 如下:

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_f Q)}{a_f b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), x \geq 0 \quad (1)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_r Q)}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_r^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), x < 0 \quad (2)$$

其中： q_f 、 q_r 为热流密度； a_f 、 a_r 、 b 、 c 为双椭球热源各轴大小； f_f 为前半椭球能量分配系数； f_r 为后半椭球能量分配系数；满足 $f_f + f_r = 2$ ； $Q = \eta IU$ ，设置与试验相同的焊接参数。根据实际焊接构件的熔深，熔宽结合 Goldak 等^[6] 的建议将实际构件熔宽的 1/2 作为 b 的取值； c 取实际熔深；前 1/4 椭球长度 a_f 为熔宽的一半，即 $a_f = b$ ；后 1/4 椭球长度 a_r 为熔宽值的 2 倍，即 $a_r = 4a_f = 4b$ ，以简化计算。在焊接热源校核时，发现熔池与实际吻合较好，但焊缝中心温度过高，远超钢材熔点 1500°C ，为减少中心温度过高而影响力学结果失真，因此双椭球热源模型参数选择与对应熔池尺寸相当，具体参数如表 6 所示。

表 6 双椭球热源模型形状参数

Tab.6 Shape parameters of the double ellipsoid heat source model

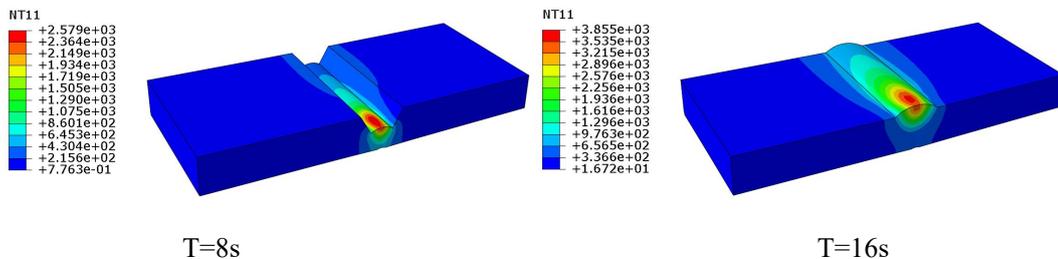
	b/mm	c/mm	a_r/mm	a_f/mm	F1	F2
第一层	5	7	5	10	0.6667	1.3333
第二层	5.6	7	5	10	0.6667	1.3333

3 模拟结果分析

3.1 温度场分析

焊接传热过程以及瞬态温度场的分析是焊接过程应力应变场和残余应力研究的前期。在焊接时，由于不同区域的温度不同，导致各区域的力学性能也不同，而焊接热循环的最高温度影响着母材区、热影响区和焊缝区的分布^[17]。

经过 ABAQUS 计算所得的模型温度云图如图 6 所示。其中第一道焊缝焊接时间为 0~8s，各阶段焊接完成后的温度相差并不大，热源沿着 X 轴移动，后面拖尾即为双椭球热源的后 1/4 椭球，前 1/4 椭球移动过后温度开始逐渐降低，温度最高点均在焊接热源中心点处。焊接温度呈现由中间向两边，由高变低的趋势进行扩散，扩散形状与双椭球形状类似。第二道焊缝焊接时间为 8~16s，其扩散形式及效果与第一道较为相似，唯一的不同是第二道焊缝焊接结束时的温度较 $T=8\text{s}$ 时高。经过 16s 后，进入冷却阶段，焊接试件的温度的变化较大，降低程度也较为明显。 $T=49\text{s}$ 左右，温度降低至 3000°C 左右，焊接构件的温度扩散至焊缝热影响区内。 $T=3200\text{s}$ 后，试件温度接近于室温 20°C 。



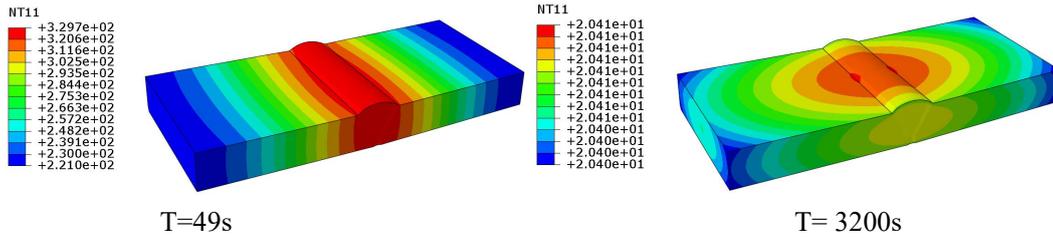


图 6 各时间节点温度场云图

Fig.6 Temperature field cloud at each time node

在第一与第二道焊缝中央各分段的中点位置分别取 A1、A2、A3、A4、A21、A22、A23、A24 八个温度提取点。各节点的热循环曲线及最高温度如图 7 所示，各节点的温度上升速度较快，达到最大值后温度迅速下降。其中位于第一道焊缝处的 A1、A2、A3、A4 四点分别在第 10s、12s、14s、16s 出现极小值点后，温度又持续上升，随后下降。第一道焊缝出现两个温度峰值，其达到第二个温度峰值的时间与第二道焊缝各温度提取点达到最高温度所对应的时间一致。导致这一现象的原因是第一道焊缝在 8s 时焊接完成，之后紧接着开始焊接第二道焊缝，焊接时热量传递到第一道焊缝表面，从而导致其二次升温。

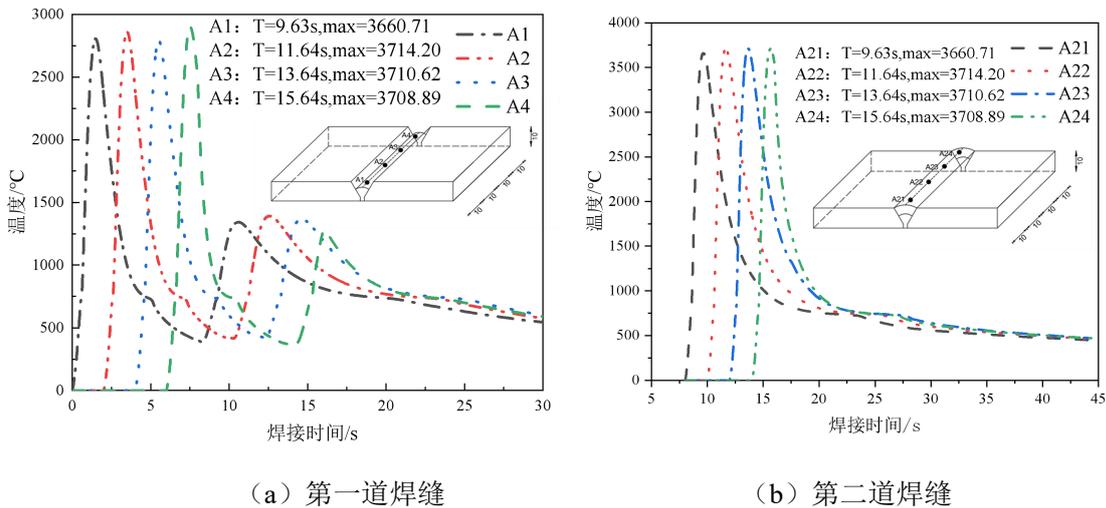


图 7 焊缝节点热循环曲线

Fig.7 Heat cycle curve of weld node

3.2 应力场分析

焊接时高度集中的瞬时热输入会导致试件各区域不均匀的膨胀，之后的快速冷却各区域收缩会使焊后结构中出现较高的焊接残余应力，该残余应力会超过材料本身的屈服强度影响结构件的焊接成型以及服役过程中的疲劳寿命^[18]。对于有外载荷的结构，焊接残余应力的存在会缩短裂纹的萌生期使得裂纹扩展速率显著提高，从而降低焊接结构的疲劳寿命。残余应力对疲劳裂纹作用最显著的阶段和部位位于裂纹萌生区以及表面应力集中处^[19]。

焊接完成，在室温下冷却 3200s 后，试件温度无限接近于 20℃，此时的焊接构件由于热胀冷缩所产生的拉伸和压缩的残余应力分布也较为稳定。如图 8 所示，其中 S11 与 S22 分别表示横向和纵向残余应力，各方向的残余应力分布集中分布于焊趾及其热影响区，可以看出纵向残余应力在焊趾和焊缝处均表现出中间受拉两边受压的情况，最大拉应力达到 573.9Mpa，最大压应力达到 549.6Mpa，而横向残余应力在焊趾及

热影响区域主要表现为压应力，在焊缝处主要表现为拉应力。在疲劳试验中，由于疲劳荷载是沿纵向加载，残余应力在纵向表现为中间受拉两边受压，焊接试件的疲劳断裂源区位于残余应力表现为拉应力所在的焊趾中部，瞬时断裂区则位于残余应力表现为压应力的焊趾边缘，纵向残余拉应力的存在使得试件在纵向加载的疲劳寿命有所降低。所以对于典型的疲劳细节，残余拉应力的存在降低了焊接试件的疲劳寿命，在实际中应尽量降低或消除残余拉应力来提高试件的疲劳寿命。

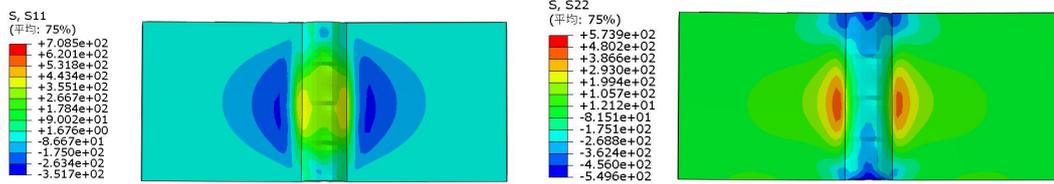
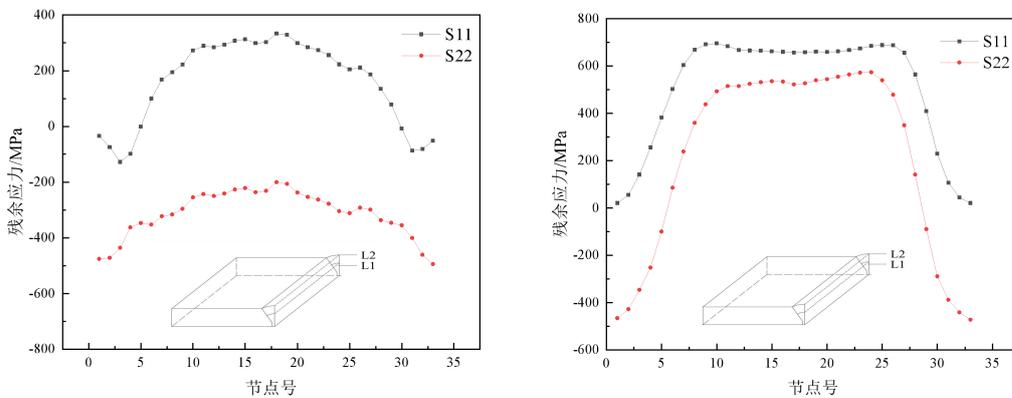


图 8 横向和纵向残余应力分布云图

Fig.8 Cloud diagram of residual stress distribution after cooling

取焊缝两道焊缝表面中部两条路径 L1、L2，S11（横向）、S22（纵向）方向的残余应力做对比分析，路径选择及各节点不同方向的残余应力曲线如图 9 所示。从图中可以看出，焊缝中部各条路径的横向和纵向的残余应力变化趋势较为相似，均表现为先增后减的倒 U 形。其中 L1 路径即第一道焊缝表面，横向残余应力在焊缝两端最大达到 313.37Mpa，表现为拉应力，中间最大达到 127.67Mpa，表现为压应力；纵向残余应力最大达到 494.24Mpa，整体表现为压应力。L2 路径即第二道焊缝表面，横向残余应力最大达到 695.63Mpa，整体表现为拉应力；纵向残余应力在两端最大达到 466.05Mpa，表现为压应力，焊缝中间最大达到 535.47Mpa，表现为拉应力。



(a)L1 路径

(b)L2 路径

图 9 各路径残余应力变化曲线

Fig.9 Variation curve of residual stress in each path

3.3 腐蚀模拟结果分析

本文通过对焊接后的有限元模型在蚀坑处杀死单元来模拟腐蚀效果。对于钢材来说，密度一般取为 7.85g/cm^3 ，在已知密度与体积的前提下，可知该体积下钢材的质量，其表达式为：

$$m = \rho V \quad (3)$$

由于焊接构件的断裂位置一般处于焊趾处，因此取焊趾处作为蚀坑的布置区域，该区域的腐蚀质量为

每 mm^3 损失量与该区域体积的乘积。在腐蚀后，产生的蚀坑所对应焊接过程的单元并不存在，所以为模拟焊接试件腐蚀后的残余应力重分布现象，采用生死单元技术，将蚀坑所处单元杀死。此时焊趾处第一排单元大小为 $1.1\text{mm} \times 1.25\text{mm} \times 1\text{mm}$ ，其单个单元质量为 0.0108g ，因此蚀坑数量为：

$$n = \frac{\text{区域损失量}}{\text{单个单元质量}} \times 2 \quad (4)$$

根据实验得到的试件每 mm^3 腐蚀量和焊接有限元模型单元的质量，可以得到不同腐蚀周期下的蚀坑数量，如表 7 所示。试件随着腐蚀周期的增加，在焊缝处的蚀坑数量也随之增加。

表 7 蚀坑计算数据

Tab.7 Erosion pit calculation

腐蚀周期/h	腐蚀量/g	试件体积/ mm^3	每 mm^3 损失量/g	蚀坑数量/个
4	9.94		0.000276	3
8	24.24	36000	0.000673	6
14	38.45		0.001068	9

焊接接头试件腐蚀后蚀坑对 Q420qENH 耐候钢焊接接头疲劳寿命的削减作用，可以通过应力集中系数 K_t 表示，应力集中系数表达式为：

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nom}}} \quad (5)$$

其中： K_t 热点应力集中系数； σ_{\max} -单轴拉伸焊接接头处最大应力； σ_{nom} -净截面名义应力； σ_{\max} 、 σ_{nom} 的计算通过在 ABAQUS 中一端固定，然后在另一端施加 200MPa 的方式得到，腐蚀时间为 14h ，蚀坑为 9 个的应力集中系数计算云图如图 10 所示。图中位于两侧的钢板应力分布均匀，而位于焊趾的蚀坑处，则出现应力集中现象，焊缝处由于截面积较大，所以应力较小。通过式 5 可以计算蚀坑数量为 3、6、9 个的对接接口试件的应力集中系数分别为 1.236、1.266、1.282。可以看出随着蚀坑数量的增加，焊趾截面处截面积减小，以及由于蚀坑引起的几何不连续，导致应力集中现象的加剧，使焊接接头试件单轴拉伸的应力集中系数也随之增大，与实际相符合。

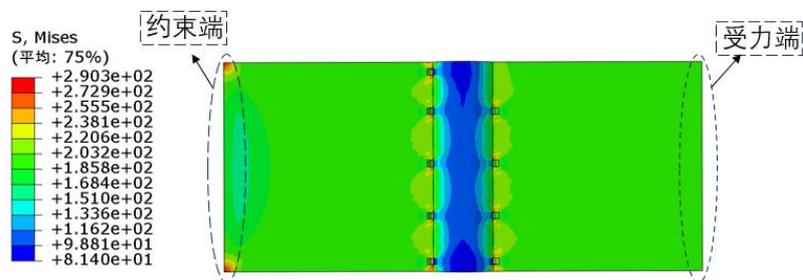


图 10 腐蚀时间为 14h 时应力集中系数计算云图

Fig.10 Stress cloud calculated by stress concentration factor for corrosion time of 14h

3.4 疲劳寿命模拟结果分析

本文通过 ABAQUS 与 FE-SAFE 软件联合预测焊接接头试件腐蚀后的疲劳寿命，其中焊接残余应力场通过 ABAQUS 对模型设置预定义场实现，疲劳荷载的施加选择固定一侧表面，后再另一侧施加疲劳荷载，

疲劳荷载选择与试验相同的四个应力幅施加。由于疲劳荷载是沿纵向加载，因此选取纵向残余应力进行对比分析，以腐蚀时间 14h，蚀坑 9 个，施加疲劳载荷 300Mpa 为例，施加效果如图 11 所示。疲劳荷载加载前，整体受力情况与有限元模拟焊后整体残余应力场分布相同，为了模拟实际情况在构件焊接后的腐蚀作用，在模型的焊趾处杀死九个单元，并将应力场删除。疲劳荷载加载后，纵向残余应力整体分布发生了较大的改变，位于焊趾处的最大残余拉应力值由 573.9Mpa 增大到 650.9Mpa，残余拉应力的分布范围也较加载前有所变大，由焊缝转移至焊趾以及热影响区域。

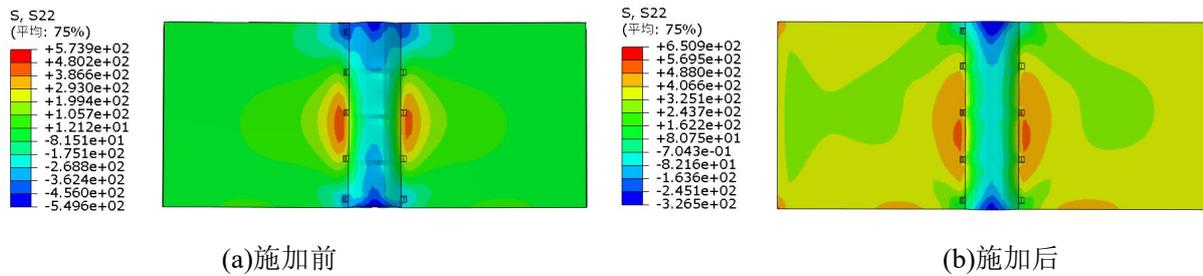


图 11 疲劳荷载施加前后横向和纵向残余应力图

Fig.11 Stress diagram before and after fatigue load application

将 ABAQUS 施加疲劳荷载后的静力分析结果导入 FE-SAFE 软件设定相关疲劳分析参数进行分析，其中载荷采用正弦波载荷谱，应力比 $R=0.1$ ，选择 Morrow 算法，设置对应的应力集中系数 K_t ，即可计算得到试件的疲劳寿命。Morrow 算法作为一种考虑平均应力修正的应变-疲劳寿命预测方法，可以较好的预测试件在低周疲劳和高周疲劳交界区的疲劳寿命。最后将 FE-SAFE 疲劳分析结果导入到 ABAQUS 中即可得到试件疲劳寿命分布云图，以腐蚀周期 14h，9 个蚀坑为例，如图 12 所示。从图中可以看到，试件的疲劳寿命薄弱处主要分布在焊趾的蚀坑附近，与试验中疲劳断口分析结论相同。

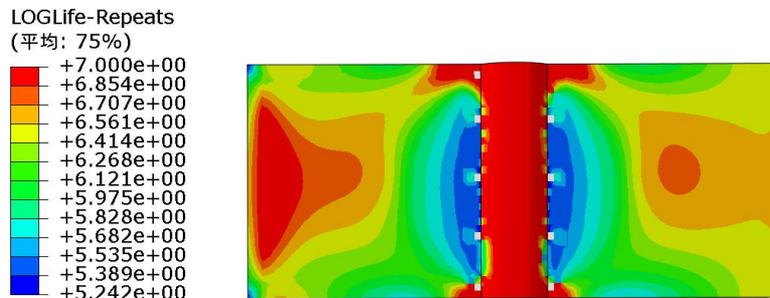


图 12 腐蚀 14h 疲劳寿命分布云图

Fig.12 Cloud diagram of fatigue life distribution after corrosion for 14 hours

最后将把不同腐蚀时间和疲劳应力幅下试验和模拟疲劳寿命结果整理得到如表 8 所示，表中随着腐蚀周期与疲劳应力幅的增加，试验与模拟得到的焊接接头疲劳寿命均减小，且数值模拟得到疲劳寿命值普遍高于试验值，所以对于中长期疲劳寿命而言，数值模拟分析计算值偏保守。试验与模拟疲劳寿命结果相对误差均在 15%以内，误差最大 14.02%，最小 0.86%，误差较小。这说明通过外加残余应力场和应力集中系数利用 ABAQUS 和 FE-SAFE 软件可以较好的预测焊后腐蚀试件的疲劳寿命。

表 8 疲劳寿命结果

Tab.8 fatigue life results

腐蚀时间 (h)	疲劳应力幅 ΔS /Mpa	试验疲劳寿命/次	模拟疲劳寿命/次	相对误差/%
----------	-----------------------	----------	----------	--------

	306	199427	212152	5.99
4	288	216070	220427	1.97
	270	231795	229817	0.86
	252	243047	240529	1.04
	306	150961	173935	13.20
8	288	163035	180299	9.57
	270	167163	187523	10.85
	252	170856	195811	12.74
	306	141815	164940	14.02
14	288	154129	170945	9.83
	270	159429	177765	10.31
	252	162825	185582	12.26

3.5 疲劳性能评估

对试验和模拟得到疲劳数据进行 S-N 曲线拟合，常用的是 Basquin 模型^[20] 的幂函数曲线：

$$C = S^m N \quad (6)$$

两边取对数得到：

$$m \lg S + \lg N = \lg C \quad (7)$$

即：

$$\lg N = \lg C - m \lg S \quad (8)$$

由于同一变量试验数据较少，根据国际焊接协会标准(IIW 规范)，当疲劳寿命小于 10^7 周次时， m 取 3。Basquin 公式模型是在存活率为 50% 的基础上所得到的，即中值疲劳 S-N 曲线。在实际工程中，直接使用存活率 50% 数据过于危险，因此，在保证安全的情况下，求得存活率较高的 S-N 曲线，对于材料的安全寿命预测研究有着重要意义。考虑疲劳数据的离散性，取以 95% 保证率的 S-N 曲线为设计曲线。95% 保证率曲线由下式得到：

$$\lg C = \overline{\lg C} - ks \quad (9)$$

$$\overline{\lg C} = \frac{\sum \lg C_i}{n} \quad (10)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\overline{\lg C} - \lg C_i)^2}{n-1}} \quad (11)$$

$$k = 1.645 * (1 + 1/\sqrt{n}) \quad (12)$$

其中 $\lg C$ 为各组数据代入所得对数值；应力幅及其对应的疲劳寿命对数关系式由式 (7) 所示， i 为数据对序号； s 为 $\lg C_i$ 的标准差； k 为特征值，与试件数量 n 相关。计算得到试验与模拟 S-N 曲线表达式如表

9 中所示:

表 9 m=3 时 S-N 曲线对数线性表达式

Tab.9 Log-linear expression for S-N curve at m=3

数据类型	试件类型	95%保证率对数线性表达式
试验	4	$lg N = 12.502 - 3 lg \Delta \sigma$
	8	$lg N = 12.330 - 3 lg \Delta \sigma$
	14	$lg N = 12.313 - 3 lg \Delta \sigma$
模拟	4	$lg N = 12.476 - 3 lg \Delta \sigma$
	8	$lg N = 12.385 - 3 lg \Delta \sigma$
	14	$lg N = 12.361 - 3 lg \Delta \sigma$

取 200 万次循环而不发生疲劳破坏的最大应力作为焊接接头的疲劳极限强度，通过表 9 计算 Q420qENH 焊接接头试件腐蚀后在 m=3 时的疲劳强度如表 10 所示，表中试验与模拟在 200 万次循环下疲劳极限强度相对误差最大为 4.31%，误差较小。综上，通过外加残余应力场和应力集中系数利用 ABAQUS 和 FE-SAFE 软件可以对焊接接头腐蚀后的疲劳寿命进行预测，且效果较好。

利用《铁路桥梁钢结构设计规范》TB/T10091-2017 对 Q420qENH 焊接接头试件进行疲劳性能评估发现，随着腐蚀时间的增加，试验与模拟得到疲劳强度均小于规范条例 3.2.7 中对于横向对接焊缝（类别 III）疲劳容许应力幅的要求，且规范在疲劳验算中仅设置损伤修正系数来考虑疲劳损伤，并未考虑腐蚀损伤对结构疲劳寿命的影响。而对于腐蚀对结构的影响，规范则通过防腐蚀设计与增加板厚来考虑。因此在采用铁路免涂装 Q420qENH 耐候钢进行桥梁设计的过程中，建议将对接接头的疲劳容许应力幅类别调整为 VII 类。

表 10 200 万次 95%保证率下疲劳强度

Tab.10 Fatigue strength at 95% guarantee for 2 million cycles

腐蚀时间	试验	模拟	相对误差	疲劳容许应力幅/MPa (类别 III)	疲劳容许应力幅/MPa (类别 VII)
4	116.69	114.37	1.99		
8	102.25	106.66	4.31	121.7	99.9
14	100.92	104.71	3.76		

4 结论

本文通过对 Q420qENH 焊接接头进行腐蚀后疲劳试验，并利用仿真模拟对其焊接温度场、应力场的进行分析，最后通过外加残余应力场和应力集中系数利用 ABAQUS 和 FE-SAFE 软件联合对焊接接头腐蚀后的疲劳寿命进行预测，得到以下结论：

1) 电解加速腐蚀试验中，腐蚀量均随着腐蚀周期的增加而增大，而腐蚀速率则相反，随着腐蚀周期的增加而减小。疲劳试验中，在疲劳荷载的作用下，试件疲劳断裂位置均位于焊趾处。在相同的腐蚀周期内，随着疲劳应力幅的增大，试件疲劳寿命逐渐减小；同一疲劳应力幅下，随着腐蚀时间的增加，试件的疲劳寿命在 4h 与 8h 下差别最大，达到 42.25%。腐蚀时间增加到 14h 后，与腐蚀 8h 相比，疲劳寿命下降

不明显。

2) 使用 ABAQUS 与 FE-SAFE 对焊接接头进行腐蚀后的疲劳寿命模拟。随着腐蚀时间和疲劳应力幅的增加, 焊接接头试件疲劳寿命均减小。试件的疲劳寿命薄弱处主要分布在焊趾的蚀坑附近, 残余应力表现为拉应力。疲劳寿命薄弱处主要分布在焊趾的蚀坑附近, 与试验中疲劳断口分析结论相同。

3) 试验与模拟得到的疲劳寿命结果相对误差均在 15% 以内, 结果可靠。后对该结果拟合 S-N 曲线(95%), 当循环次数在 200 万次时, 相对误差为 4.31%, 预测效果较好。试验与模拟得到 Q420qENH 焊接接头试件腐蚀后的疲劳强度均小于《铁路桥梁钢结构设计规范》中对横向对接焊缝的疲劳容许应力幅要求。因此, 在对铁路免涂装 Q420qENH 耐候钢进行桥梁设计时, 建议将对接接头的疲劳容许应力幅类别调整为 VII 类。

参考文献

- [1] 邓扬, 丁幼亮, 李爱群. 钢箱梁焊接细节基于长期监测数据的疲劳可靠性评估: 疲劳可靠度指标[J]. 土木工程学报, 2012, 45(03): 86-92+181.
DENG Y, DING Y L, LI A Q. Fatigue reliability assessment for welded details of steel box girders using long-term monitoring data: fatigue reliability indices [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(03): 86-92+181.
- [2] 戴胜勇, 陈克坚, 张志勇, 等. 铁路无涂装耐候钢桥梁关键技术及应用示范[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(06): 57-61.
DAI S Y, CHEN K J, ZHANG Z Y, et al. Key Technology and Application Demonstration of Railway Uncoated Weather-resistant Steel Bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 40(06): 57-61.
- [3] 张宇, 郑凯锋, 衡俊霖, 等. 耐候钢和高性能钢焊接接头腐蚀疲劳性能研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(07): 171-178.
ZHANG Y, ZHENG K F, HENG J L, et al. Study on Corrosion Fatigue Performance of Welded Joints of Weathering Steel and High Performance Steel[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(07): 171-178.
- [4] 苏翰, 赵力国, 吴建明, 等. 腐蚀 Q345qDNH 耐候钢对接焊缝疲劳性能研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(S2).
SU H, ZHAO L G, WU J M, et al. Study on fatigue behavior of corroded butt welded joints made of weathering steel Q345qDNH[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(S2): 473-481.
- [5] KUNZ L, LUKÁŠ P, KLUSÁK J. Fatigue Strength of Weathering Steel[J]. Medziagotyra, 2012, 18(1): 18-22.
- [6] 刘德佳, 扎学安, 李斌, 等. 高熵合金应用于焊接领域的研究现状[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(03): 1-16.
LIU D J, ZHA X A, LI B, et al. Research on Application of High Entropy Alloy in Welding Field[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(03): 1-16
- [7] 何雪, 康泽州, 严基, 等. 海洋环境下耐候钢十字非传力焊接接头腐蚀疲劳性能试验研究[J]. 世界桥梁, 2023, 51(03): 96-104.
HE X, KANG Z Z, YAN J, et al. Experimental Study of Corrosion Fatigue Performance of Non-Load-Carrying Cruciform Fillet Welds in Marine Environment[J]. World Bridges, 2023, 51(03): 96-104.
- [8] Morcillo M, Díaz I, Chico B, et al. Weathering steels: From empirical development to scientific design. A review[J]. Corrosion Science, 2014, 83: 6-31.
- [9] 姚谏, 竹昱宾, 张玉玲, 等. 腐蚀后耐候钢梁栓焊节点的疲劳性能试验研究[J]. 空间结构, 2021, 27(01): 60-66.
YAO J, ZHU Y B, ZHANG Y L, et al. Experimental study on fatigue behavior of corroded weathering steel bolt welded joints[J]. Spatial Structures, 2021, 27(01): 60-66.
- [10] 崔坤强, 吴向阳, 张志毅, 等. SMA490BW 耐候钢及其焊接接头的盐雾腐蚀行为[J]. 热加工工艺, 2018, 47(13): 68-71.
CUI K Q, WU X Y, ZHANG Z Y, et al. Salt Fog Corrosion Behavior of SMA490BW Weathering Steel and Its Welded Joints [J]. Hot Working Technology, 2018, 47(13): 68-71.
- [11] Albrecht P, Lenwari A. Fatigue Strength of Weathered A588 Steel Beams[J]. Journal of Bridge Engineering, 2009, 14(6): 436-443.
- [12] 李建永, 毕晓健, 郭连京, 等. EH36 钢焊接接头腐蚀疲劳性能研究及寿命预测[J]. 焊接技术, 2024, 53(06): 19-22.
LI J Y, BI X J, GUO L, et al. Research on corrosion fatigue performance and life prediction of EH36 steel welded joint[J]. Welding Technology, 2024, 53(06): 19-22.

-
- [13] EN 1993-1-8, Eurocode 3: Design of steel structures[S].
- [14] EN 1994-1-1, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures[S]
- [15] 李智钟,周建平,许燕,等.基于Sysweld的T形管焊接件温度及应力应变场数值模拟分析[J].焊接学报,2016,37(04):77-80+94+132.
LI Z Z, ZHOU J P, XU Y, et al. Numerical simulation analysis on T-shaped pipe weldments temperature and stress-strain field based on SYSWELD[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(04): 77-80+94+132.
- [16] JOHNGOLDAK, ADITYACHAKRAVARTI, MALCOLMBIBBY. A new finite element model for welding heat sources[J]. Metallurgical Transactions B,1984,15(2):299-305.
- [17] 丛家慧,高嘉元,周松,等.TC4 激光焊接热力耦合数值模拟及力学性能分析[J].焊接学报,2024,45(06):77-88+96.
CONG J H,GAO J Y,ZHOU S, et al. Thermodynamic coupling numerical simulation and mechanical properties analysis of TC4 laser welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(06): 77-88+96.
- [18] 董家琦,叶聪,李艳青.大厚度Ti62A钛合金板真空电子束焊接残余应力数值模拟与试验研究[J].中国造船,2025,66(02):124-132.
DONG J Y,YE C,LI Y Q, et al. Numerical Simulation and Experimental Study on Residual Stress in Thick Ti62A Titanium Alloy Plates via Vacuum Electron Beam Welding[J]. Shipbuilding of China, 2025, 66(02): 124-132.
- [19] 张锦洲,刘文家,姬世青,等.残余应力作用下的焊接接头疲劳裂纹扩展与寿命预测[J].科学技术与工程,2024,24(35):14976-14983.
ZHANG J Z, LIU W J, JI S Q, et al. Fatigue Crack Propagation and Life Prediction of Welded Joints under Residual Stress [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(35): 14976-14983.
- [20] Haiying W ,Honggang L ,Y. C F .Comparison on mechanisms of high-cycle fatigue performance of structural steel exposed to urban industrial atmosphere and laboratory simulated corrosive environment based on infrared thermography[J].International Journal of Fatigue,2021,145



通信作者: 程海根 (1971—), 男, 教授, 硕士生导师, 工学博士, 主要从事桥梁结构分析、钢结构桥梁腐蚀及疲劳性能方面研究。E-mail: Bridge407@126.com。