

文章编号:1007-9629(2022)08-0823-07

湿热周浸环境下高强钢对接焊缝的疲劳性能

郭宏超^{1,2,*}, 蔡欣悦¹, 李国强², 王彦博², 刘云贺¹

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要:通过湿热周浸模拟海洋浪溅区腐蚀环境,对 Q690 高强钢对接焊缝开展了疲劳性能试验,分析了腐蚀损伤与焊缝缺陷对其疲劳性能的影响.结果表明:Q690 高强钢对接焊缝具有良好的抗疲劳能力,当腐蚀时间为 100 d 时,试件质量损失率为 8.46%,焊缝区和热影响区的平均腐蚀速率分别为 1.14、1.22 mm/a,疲劳极限减小了 32.7%;锈蚀试件断口裂纹分布呈平行条带状,且随着腐蚀损伤程度的增大,在高应力水平下的疲劳条纹数量减少,损伤累积明显提高.

关键词:Q690 高强钢;对接焊缝;海洋浪溅区;腐蚀疲劳;损伤指数

中图分类号:TU391

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.08.008

Fatigue Performance of Butt Welds of High Strength Steel under the Humid and Hot Immersion Environment

GUO Hongchao^{1,2,*}, CAI Xinyue¹, LI Guoqiang², WANG Yanbo², LIU Yunhe¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Fatigue test of butt welds of Q690 high strength steel was carried out by simulating the corrosion environment in the splash zone through humid and hot immersion environment. The effects of corrosion damage and weld defects on its fatigue properties of high strength steel were analyzed. The results show that the butt welds of Q690 high strength steel has good fatigue resistance. When the corrosion period is 100 days, the mass loss rate of the specimen is 8.46%, the average corrosion rate of the weld zone and the heat affected zone was 1.14 and 1.22 mm/a, and the fatigue limit is reduced by 32.7%. The fracture crack distribution of the rusted specimen crack is in parallel banded. With the increase of corrosion damage degree, the number of fatigue stripes under high stress level decreases and the damage accumulation increases significantly.

Key words: Q690 high strength steel; butt weld; splash zone; corrosion fatigue; damage index

在海洋腐蚀环境与往复荷载耦合作用下,钢结构极易引发腐蚀疲劳问题.相比于母材,接焊缝作为承重构件连接关键区域更易发生断裂失效,其腐蚀疲劳行为是影响工程结构体系耐久性的重要因素^[1-2].Sheng 等^[3]对 HRB500 高强钢筋接头进行了高周疲劳试验,结果表明其极限强度随着钢筋直径的增加而逐渐减小,连接接头相比母材更易发生疲劳破坏.Shiratsuchi 等^[4]通过考虑焊缝残余应力和荷载作用的影响,结合焊缝区和热影响区应力-应变曲线

的差异性,提出了焊接接头疲劳寿命的预测方法.喻宣瑞等^[5]通过盐雾腐蚀试验探究了钢绞线在不同应力幅作用下的腐蚀规律,基于三维 Copula 函数得到其联合分布规律,并提出了蚀坑三维预测模型.俞宣瑞等^[6]还通过模拟钢绞线腐蚀规律,并根据灰度理论定量研究了应力幅对钢绞线腐蚀的影响.Xin 等^[7]通过对 S690 高强度钢板对接焊缝进行有限元分析,并与试验结果进行对比,结果表明考虑残余应力的有限元分析能更好地预测焊缝的疲劳寿命.目前,相关

收稿日期:2021-05-25; 修订日期:2021-09-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978571);陕西省杰出青年科学基金资助项目(2021JC-41);陕西省重点研发计划项目(2022SF-199)

第一作者(通讯作者):郭宏超(1981—),男,甘肃庆阳人,西安理工大学教授,博士生导师,博士. E-mail:ghc-1209@163.com

研究主要集中于酸雨、海洋大气等环境下普通钢材疲劳失效问题,对于锈蚀高强钢力学性能研究较少。

本文通过湿热周浸模拟海洋浪溅区腐蚀环境,对Q690高强钢对接焊缝开展了疲劳性能试验,分析了腐蚀损伤与焊缝缺陷对其疲劳性能的影响,并通过试件宏观与微观断口形貌特征,揭示了其疲劳裂纹扩展变化规律。

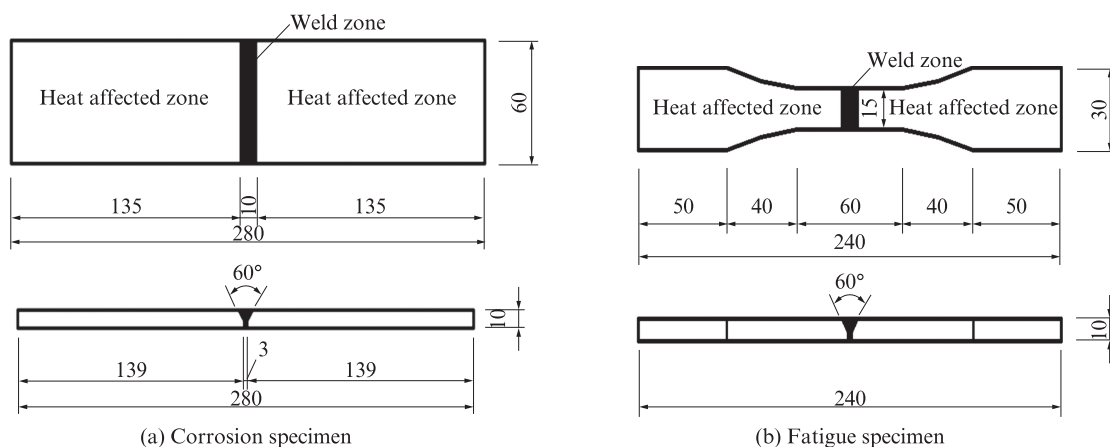


图1 腐蚀试件和疲劳试件的尺寸

Fig. 1 Dimensions of the corrosion and fatigue specimens (size: mm)

1.2 腐蚀试验

通过室内湿热周浸加速腐蚀方案来模拟海洋浪溅区腐蚀环境。首先,将试件浸泡于NaCl溶液(质量浓度为26 g/L, pH值为6~7)水平液面以下10 mm处,液体与室内环境温度保持一致,浸泡时间为6 h;随之将试件取出,放置在室内环境下自然干燥6 h;最后,将试件置于35℃、相对湿度恒定于(95±3)%的湿热箱内养护12 h。每隔2 d后重复上述操作,每隔20 d后取出1批试样。经腐蚀时间 $t=0、20、40、60、100$ d腐蚀后的试件,分别记为BW-0(未腐蚀钢板)、BW-20、BW-40、BW-60、BW-80、BW-100。

1.3 力学试验

为得到疲劳试验所需Q690高强钢对接焊缝力学性能参数,根据GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验》第1部分:室温试验方法,对试件BW-0、BW-60和BW-100进行力学试验,测得的力学性能参数见表1,表中 f_y 、 f_u 、 E_s 、 δ 分别为屈服强度、抗拉强度、弹性模量、断裂伸长率。

1.4 疲劳试验

加载设备为MTS322疲劳试验机,仪器设有压力容积补偿器。根据GB/T 3075—2008《金属材料疲劳试验轴向力控制方法》,选取等幅正弦波的荷载控制方式进行往复加载,频率为30 Hz,应力比 $R=P_{\min}/P_{\max}=0.1$ ($P_{\min}$ 、 $P_{\max}$ 分别为最小荷载、最大荷载)。试验加载

1 试验

1.1 试件设计

Q690D 高强钢,板厚10 mm,采取线切割方式,对接部位采用“V”形坡口焊,选取手工电弧焊,焊条型号为CHE857Cr。腐蚀试件和疲劳试件的尺寸见图1(图中试件可分为热影响区和焊缝区)。

表1 试件BW-0、BW-60和BW-100的力学性能参数

Table 1 Mechanical performance parameters of specimen BW-0, BW-60 and BW-100

Specimen	f_y /MPa	f_u /MPa	E_s /GPa	δ /%
BW-0	726.67	797.17	211	24.34
BW-60	696.33	770.00	210	20.25
BW-100	666.50	744.00	195	18.19

制度示意图见图2(图中 P 为荷载, t' 为加载时间)。各组试件的疲劳试验按照加载系数换算后的应力水平由大到小依次开展,加载应力需结合疲劳强度确定,而初始应力 σ_0 一般为(0.6~0.8) f_y ,最大应力水平为屈服强度的0.7倍;再根据实测结果,重新调整加载系数,以得到不同应力水平下的真实疲劳寿命。若循环200万次尚未失效,疲劳试验机停止加载。

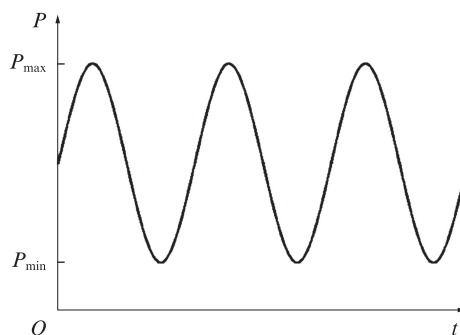


图2 试验加载制度示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test loading system

2 结果与分析

2.1 腐蚀现象及结果分析

不同腐蚀时间试件的形貌图见图3.为研究不同腐蚀时间Q690高强钢对接焊缝试件的腐蚀损伤程度,选取质量损失率 η_s 、平均腐蚀速率 ζ 对其进行定量

测评. η_s 、 ζ 的计算式为:

$$\eta_s = \frac{m_0 - m}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$\zeta = 365 \times \frac{h}{t} \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中: m_0 、 m 分别为腐蚀前、后试件的质量,g; h 为平均腐蚀深度, μm .

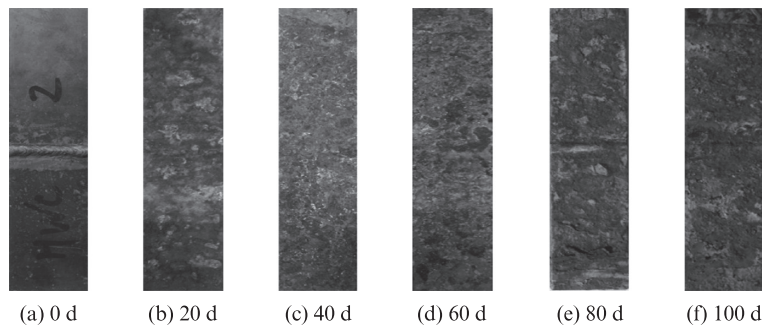
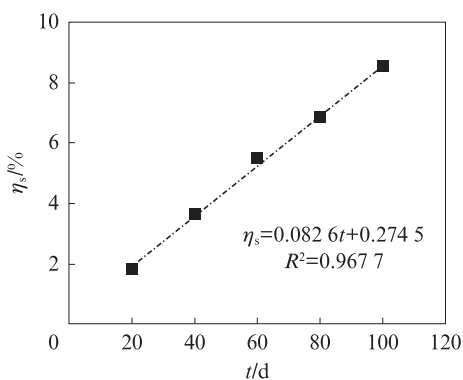


图3 不同腐蚀时间试件的形貌图

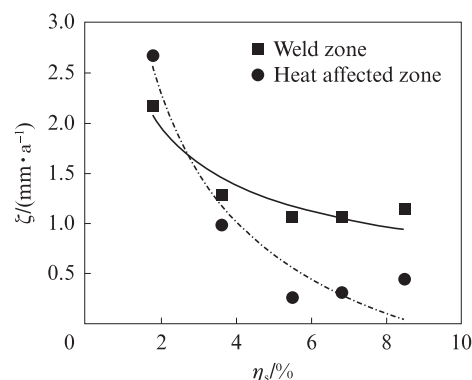
Fig. 3 Morphologies of specimens under different corrosion time

通过计算并拟合可得到 η_s - t 、 ζ - η_s 曲线,结果见图4.由图3、4可见:质量损失率与腐蚀时间呈线性关系,当腐蚀时间为100 d时,试件质量损失率为8.46%;在腐蚀初期,试件表面分布大量锈蚀物,且分布范围极为不均匀;随着腐蚀时间的增加,腐蚀速率随着质量损失率的增大而连续降低,而热影响区的损伤速率先比焊缝区大,后比焊缝区小;腐蚀初期,焊缝区、热影响区均未出现蚀坑,钢材损伤程度相对较轻;腐蚀后期,试件表面生成

较厚的堆积产物,致密锈层对基体内部起到较好的保护功能,腐蚀过程开始沿着两侧水平方向快速拓展,造成蚀坑宽度明显增大.由于高温冷却后,热影响区的晶粒长大,导致其平均腐蚀速率明显增大.当腐蚀时间为100 d时,焊缝区和热影响区的平均腐蚀速率分别为1.14、1.22 mm/a,根据室内模拟海洋浪溅区腐蚀速率的实测结果可知,本文所选方案具有较好的适用性,能够反映实际海洋环境下的钢材腐蚀行为^[8].



(a) η_s - t



(b) ζ - η_s

图4 η_s - t 、 ζ - η_s 拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of η_s - t and ζ - η_s

2.2 疲劳试验结果分析

对试件BW-0、BW-60、BW-100进行疲劳试验,其最大应力水平 $S_{\max}$ 与循环次数 N 的关系式为^[9]:

$$S_{\max}^{\beta} N = C \quad (3)$$

式中: β 、 C 为焊接试件的疲劳系数.

对式(3)进行对数变换,并考虑95%置信率后,得到:

$$\lg S_{\max} = a \lg N + b - 1.645\sigma \quad (4)$$

式中: a 、 b 分别为 $\lg S_{\max}$ - $\lg N$ 曲线的待定参数; σ 为标准误差.

根据 GB50017—2017《钢结构设计标准》,选取容许应力法确定结构最大应力水平 $S_{\max}$; 根据 ANSI/AISC 360-16 《Specification for structural steel buildings》,由试件的疲劳类别也可得出 $S_{\max}$. 采用 95% 置信率、GB50017—2017 和 ANSI/AISC 360-16 规范对 $S_{\max}$ - N 的试验数据进行拟合,结果见图 5,其拟合曲线的关系式见表 2. 由图 5 可见:当 $S_{\max}$ 较小时,试件 BW-100 的试验结果与拟合曲线存在差异性,但是试验数据点基本符合拟合曲线的变化趋势,表明 Q690 高强钢具有较好的安全储备;随着腐蚀周期的持续增加,拟合曲线与 95% 置信率曲线间距逐渐增大,腐蚀损伤造成试验数据与曲线偏离度增大.

$N=200$ 万次时,试件的最大应力水平见表 3. 由图 5 与表 3 可见:腐蚀后的 Q690 高强钢对接焊缝试验 $S_{\max}$ - N 曲线均位于规范曲线上方;考虑 95% 置信率后,未腐蚀试件 BW-0 的最大应力水平分别是 GB50017—2017、ANSI/AISC 360-16 规范理论值的

1.89、2.35 倍;Q690 高强钢对接焊缝在 200 万次疲劳极限范围内保持良好的力学特性;试件 BW-100 的最大应力水平比 BW-0 减小了 32.7%,其曲线与 GB50017—2017 规范设计曲线合拢效果较好,且最大应力水平比 ANSI/AISC 360-16 规范对应的未腐蚀时最大允许限值偏高 58.39%, $S_{\max}$ 富余度较高.

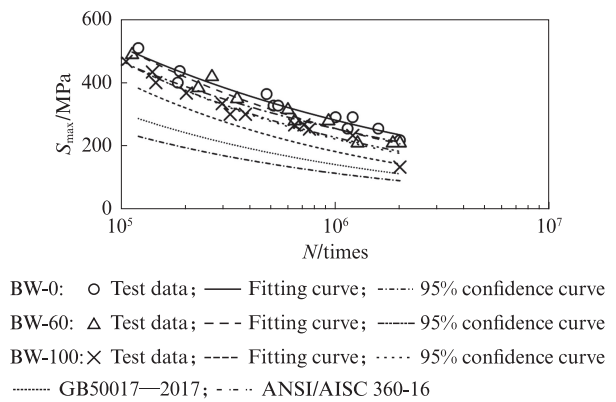


图 5 试件的 $S_{\max}$ - N 的关系曲线
Fig. 5 Relationship curves of $S_{\max}$ - N of specimens

表 2 $S_{\max}$ - N 拟合曲线的关系式
Table 2 Relationship of $S_{\max}$ - N fitting curves

Specimen	Fitting curve	95% confidence curve	GB50017—2017	ANSI/AISC360-16
BW-0	$S_{\max}=10\,427.98N^{-0.261\,7}$	$S_{\max}=9\,447.13N^{-0.261\,7}$	$S_{\max}=14\,111.36N^{-0.333\,3}$	$S_{\max}=8\,035.78N^{-0.333\,3}$
BW-60	$S_{\max}=19\,002.03N^{-0.312\,7}$	$S_{\max}=17\,052.97N^{-0.312\,7}$		
BW-100	$S_{\max}=26\,952.56N^{-0.349\,7}$	$S_{\max}=22\,808.67N^{-0.349\,7}$		

表 3 试件的最大应力水平
Table 3 $S_{\max}$ of specimens ($N=2\,000\,000$ times)

Specimen	Fitting curve	95% confidence curve	GB50017—2017	ANSI/AISC 360-16
BW-0	234.00	211.99	112.00	90.13
BW-60	203.45	182.59		
BW-100	168.71	142.76		

2.3 断口分析

2.3.1 断口宏观形式

当金属材料失效后,断口位置残留服役期间各阶段的裂纹扩展形态,能够反映材料微观组织结构、外界环境等与力学性能的变化关系.疲劳断口由裂纹萌生阶段、裂纹稳定扩展阶段、裂纹快速扩展至失效阶段 3 个部分组成^[10].试件断口宏观对比图见图 6. 由图 6 可见:试件断口与初始截面尺寸大致相等,无明显颈缩现象;试件瞬断前的破坏面平直光滑,无明显凹陷异常形貌分布,由此可知初始裂纹向基体内部以平缓路径逐渐延伸;裂纹扩展面与端部持力方向保持垂直,在循环交替载荷作用下,使得扩展裂纹

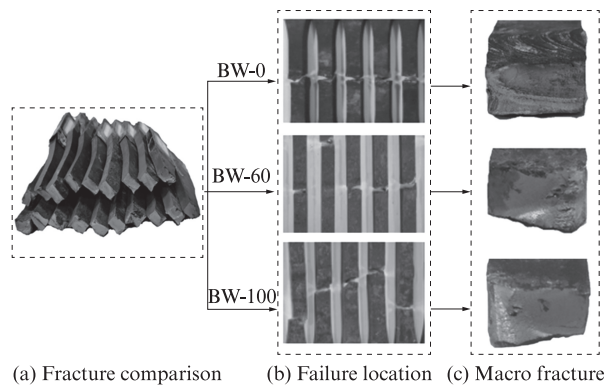


图 6 试件断口宏观对比图
Fig. 6 Macro comparison diagrams of specimen fractures

快速张拉与闭合,平面失效区域遗留较多的疲劳条带;由于受到裂纹稳定扩展阶段疲劳拉力的影响,在断口边缘处产生呈棱状撕裂的剪切唇,试件有效截面最大应力已经超过最大限值.对于未腐蚀试件 BW-0,其疲劳失效发生在焊缝连接处,而高温焊接工艺引起材料软化,导致热影响区微观组织发生变化,材质硬度低于母材区,疲劳性能变差,容易发生疲劳失效.

2.3.2 断口微观分析

试件断口微观扫描图见图7.由图7可见,对试件BW-0:失效断口主要由裂纹源区、裂纹扩展区和瞬断区组成;裂纹源区表面较为平整,可清晰看到河流状散射条纹,方向指向于材料内部焊缝连接缺陷及边缘蚀坑处,焊缝区裂纹扩展方式与热影响区具有明显差异;裂纹扩展区有大量的疲劳条纹,裂纹分布呈平行条带状,伴有微解理与二次裂纹生成,这是由对接焊缝试件的微观结构不均匀造成的;瞬断区内填充分布大量韧窝,在裂纹快速扩展至失效阶段,断口不易发生相对滑移现象.在试件疲劳总寿命中,瞬

断过程极短,因此无法直观察觉,即试件会快速发生疲劳断裂.

随着腐蚀损伤程度的增加,试件BW-60、BW-100在高应力水平下的疲劳条纹数量减少,损伤累积明显提高;瞬断区的韧窝数量明显减少,分布范围差异性提高,并且各组断口微观扫描结果均未发现尺寸偏大的韧窝分布.在循环加载时,不均匀腐蚀损伤与高温熔焊会引起试件表面局部区域的内应力增大,导致其整体塑性变差,疲劳寿命降低.Q690高强钢对接焊缝的失效机理与焊接尺寸、加工工艺及腐蚀环境等因素有关.

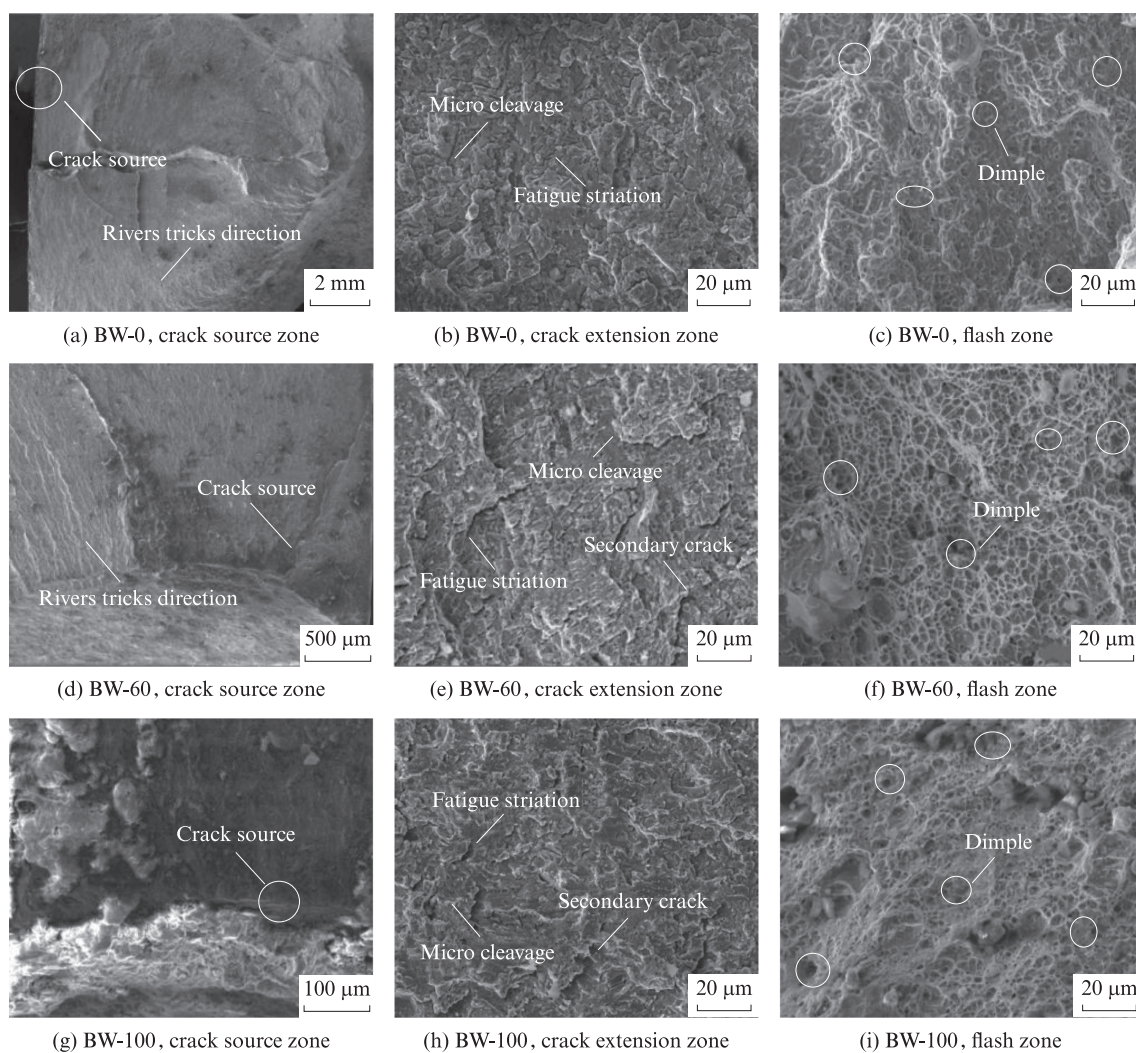


图7 试件断口微观扫描图

Fig. 7 Micro fracture scanning images of specimens

3 损伤分析

腐蚀疲劳损伤^[11]是指在腐蚀介质和循环载荷作用下,材料内部萌生细微裂纹,当损伤累积达到一定量后引起材料力学性能降低的过程.根据文献

[15-16],得到腐蚀试件损伤变量 D 的演化方程^[12]:

$$D = 1 - \left(1 - \frac{N}{N_f}\right)^{\frac{1}{\beta+2}} \quad (5)$$

式中: β 为材料参数; N_f 为疲劳寿命.

试件的应力腐蚀寿命 t_c -最大应力水平(t_c - $S_{\max}$)

曲线和最大应力水平-损伤变量($S_{\max}$ - D)曲线见图8, 试件的应力腐蚀门槛值 σ_{th} 和材料参数 β 见表4. 由图8和表4可知:当 $S_{\max}$ 较小时,未腐蚀试件BW-0的应力腐蚀寿命相对较大;随着 $S_{\max}$ 的增大,各试件应力腐蚀寿命随之降低,且曲线逐渐靠拢;当 $S_{\max}=500$ MPa时,试件BW-0的 t_c - $S_{\max}$ 曲线与试件BW-60、BW-100基本重合,腐蚀损伤对试件应力腐蚀寿命影响不明显;与试件BW-0相比,试件BW-100的应力腐蚀门槛值 σ_{th} 降低了33.10%,且试件BW-100的 t_c - $S_{\max}$ 曲线斜率在低 $S_{\max}$ 下较大,由此可见,在低 $S_{\max}$ 下,试件能够在短期内发生断裂失效;Q690高强钢对接焊缝的损伤变量与 $S_{\max}$ 呈负相关,腐蚀疲劳损伤引起试件截面的有效尺寸减小,裂纹稳定扩展阶段结束后,将

迅速进入失效状态.因此,试件的裂纹快速延伸至断裂过程具有瞬时性,裂纹稳定扩展阶段不易察觉.当 $S_{\max}$ 偏低时,各组试件的实测数据结果与 $S_{\max}$ - D 拟合曲线存在明显偏差,这是因为在高温加工过程中,材料微观组织发生改变,冷却后的晶体较为粗大,热影响区和焊缝区含有初始损伤缺陷,在低 $S_{\max}$ 下,未腐蚀的连接部位能够引起试件脆性断裂.另外,相比焊缝缺陷而言,钢材的实测最大应力水平受腐蚀损伤累积影响更大.处于交替往复荷载作用时,扩展裂纹可以通过腐蚀试件各区域的微观晶粒分界面向内延伸,导致材料疲劳性能快速衰退,最终发生沿晶破坏.上述损伤现象对于结构安全性极为不利.

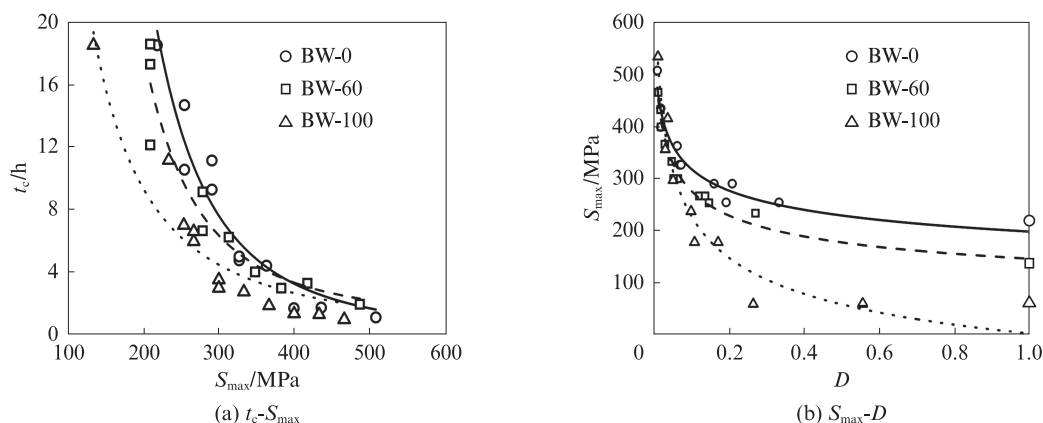


图8 试件的应力腐蚀寿命-最大应力水平曲线和最大应力水平-损伤变量曲线

Fig. 8 Curves of t_c - $S_{\max}$ and $S_{\max}$ - D of specimens

表4 试件的应力腐蚀门槛 σ_{th} 和材料参数 β
Table 4 σ_{th} and β of specimens

Specimen	σ_{th} /MPa	β
BW-0	207.30	2.821 2
BW-60	180.72	2.198 0
BW-100	138.74	1.859 6

4 结论

(1)Q690高强钢对接焊缝试件的质量损失率与腐蚀周期呈线性增长关系,由于质量损失增加,导致试件的力学性能明显退化,焊缝区、热影响区的平均腐蚀速率逐渐降低.

(2)根据高强钢对接焊缝的最大应力水平-循环次数($S_{\max}$ - N)曲线,考虑95%置信率后,腐蚀周期为100 d试件的 $S_{\max}$ - N 曲线与GB50017—2017规范设计曲线吻合,疲劳极限大于ANSI/AISC 360规范对应的未腐蚀时最大允许限值,相比规范值偏高58.39%.

(3)随着最大应力水平的增长,不同腐蚀周期下

试件的应力腐蚀寿命逐渐降低,腐蚀时间为100 d的试件应力腐蚀门槛值 σ_{th} 比未腐蚀试件下降了33.10%.损伤变量与应力水平呈负相关,腐蚀损伤在一定程度上对试件力学性能退化影响更大.

(4)Q690高强钢对接焊缝瞬断区的断口形貌与损伤分析结果一致,在该区域内分布有大量韧窝,在裂纹快速扩展至失效阶段,断口不易发生相对滑移,试件会快速发生疲劳断裂.

参考文献:

- [1] GKATZOGIANNIS S, WEINERT J, ENGELHARDT I, et al. Correlation of laboratory and real marine corrosion for the investigation of corrosion fatigue behaviour of steel components [J]. International Journal of Fatigue, 2019, 126:90-102.
- [2] 郭宏超, 王金怀, 刘云贺, 等. Q690D高强钢焊接连接疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(9):1-9.
GUO Hongchao, WAN Jinhui, LIU Yunhe, et al. Experimental study on fatigue properties of welded joint of Q690D high strength steel [J]. Journal of Civil Engineering, 2018, 51(9):1-9. (in

- Chinese)
- [3] SHENG X W, ZHENG W Q, YANG Y. Tensile and high-cycle fatigue performance of HRB500 high-strength steel rebars joined by flash butt welding[J]. Construction and Building Materials, 2020, 241:118037.
- [4] SHIRATSUCHI T, OSAWA N. Fatigue life prediction for 9%Ni steel butt welded joints [J]. International Journal of Fatigue, 2021, 142:105925.
- [5] 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)
- [6] 喻宣瑞,姚国文,钟浩,等. 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研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6): 1315-1321.
- YU Xuanrui, YAO Guowen, ZHONG Hao, et al. Study on corrosion characteristics and mechanical properties of steel strands under the coupling effect of alternating load and chloride environment[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6): 1315-1321. (in Chinese)
- [7] XIN H H, CORREIA J A F O, VELJKOVIC M, et al. Residual stress effects on fatigue life prediction using hardness measurements for butt-welded joints made of high strength steels [J]. International Journal of Fatigue, 2021, 147:106175.
- [8] 侯保荣. 海洋钢结构浪花飞溅区腐蚀防护技术[J]. 中国材料进展, 2014, 33(1):26-31.
- HOU Baorong. Anti-corrosion technology to steel structure in splash zone [J]. Materials China, 2014, 33(1):26-31. (in Chinese)
- [9] 方钊. 高层钢结构梁柱焊接节点风致疲劳寿命预测研究[D]. 南京:东南大学, 2019.
- FANG Zhao. Study on wind-induced fatigue life prediction of beam column welded joints in high-rise steel structures [D]. Nanjing:Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [10] 黄学伟,葛建舟,赵军,等.Q690D 高强钢基于连续损伤模型的断裂破坏预测分析[J]. 工程力学, 2020, 37(2):230-240.
- HUANG Xuewei, GE Jianzhou, ZHAO Jun, et al. Fracture prediction analysis of Q690D high strength steel based on continuum damage model [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(2):230-240. (in Chinese)
- [11] HAN Z Y, HUANG X G, CAO Y G, et al. A nonlinear cumulative evolution model for corrosion fatigue damage [J]. Journal of Zhejiang University Science-A, 2014, 15(6):447-453.
- [12] GUO H C, WAN J H, LIU Y H, et al. Experimental study on fatigue performance of high strength steel welded joints [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 131:45-54.