

复杂环境中 Q420qD 高性能钢角焊缝十字接头 疲劳性能试验研究

程海根¹, 胡 聪¹, 王文锋¹, 钟亮根²

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 昌九城际铁路股份有限公司, 江西 南昌 330003)

摘 要 目的 研究腐蚀与火灾两环境因素对 Q420qD 高性能钢角焊缝十字接头疲劳性能的影响。方法 进行了三种状况下的十字接头疲劳试验, 建立 95% 存活率 $S-N$ 曲线, 并与现行规范进行比较, 对其疲劳特性及疲劳寿命给予评价。结果 在 95% 存活率下, 十字接头在仅腐蚀处理和腐蚀与火灾处理时的疲劳极限值分别比无处理时的疲劳极限值低 24.85% 和 17.41%。腐蚀后, 疲劳断口裂纹源数量增多; 受 600 °C 火灾温度作用后, 韧窝尺寸相对更大。结论 腐蚀会降低十字接头的疲劳性能, 且当火灾温度达到 600 °C 时, 火灾温度会提高十字接头的疲劳性能。循环次数高于 20 万次以上时, EN 规范、GBJ 规范和 GB 规范设计曲线分别能较好预估无处理、仅腐蚀处理和腐蚀与火灾处理时的角焊缝十字接头疲劳寿命, 且均具有足够的安全储备。腐蚀会增加断口裂纹源数量, 600 °C 火灾温度强化了材料的塑性, 且瞬断前断口形貌特征和疲劳位移变化规律皆与疲劳损伤曲线相吻合。

关键词 腐蚀与火灾; Q420qD 高性能钢; 十字接头; 疲劳极限; 断口形貌; 疲劳损伤

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Experimental Study on Fatigue Performance of Q420qD High Performance Steel Fillet Welded Cross Joint in Complex Environment

CHENG Haigen¹, HU Cong¹, WANG Wenfeng¹, ZHONG Lianggen²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang, China, 330013;
2. Chang-jiucheng Intercity Railway Co. Ltd., Nanchang, China, 330003)

Abstract: In order to study the influence of corrosion and fire on the fatigue performance of Q420qD high performance steel fillet welded cross joint. Fatigue tests of cross joint were carried out under three cases. The $S-N$ curves with the 95% survival rate were established. Compared with the current codes, the fatigue characteristics and fatigue life of the cross joint were evaluated.

收稿日期: 2021-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51968024); 江西省自然科学基金项目(20202BABL204059)

作者简介: 程海根(1971—), 男, 教授, 博士, 主要从事桥梁结构分析、钢结构桥梁腐蚀及疲劳等方面研究。

Under the 95% survival rate, the fatigue limit value of cross joint with corrosion-only treatment and corrosion and fire treatment is 24.85% and 17.41% lower than the fatigue limit value of cross joint without treatment, respectively. After being corroded, the number of fracture cracks increased. After being affected by the fire temperature of 600 °C, the tough nest is relatively larger. Corrosion reduces the fatigue properties of the cross joint, and when the fire temperature reaches 600 °C, the fire temperature will increase the fatigue performance of the cross joint. When the number of cycles is more than 200,000 times, the design curves of EN code, GBJ code and GB code can respectively predict the fatigue life of fillet weld cross joint without treatment, corrosion-only treatment and corrosion and fire treatment, and have sufficient safety reserve. Corrosion will increase the number of broken cracks, and the plasticity of the material is improved by fire temperature of 600 °C. The fracture morphology and fatigue displacement change law before transient fracture are consistent with the fatigue damage curve.

Key words: corrosion and fire; Q420qD high performance steel; cross joint; fatigue limit; fracture morphology; fatigue damage

高性能钢因具有良好的抗疲劳、抗腐蚀性能等优点被广泛使用在跨江、跨海大桥中,如 2011 年投入使用的南京大胜关长江大桥便是首次采用了 Q420qE 新钢种建造的。随着钢桥跨度的不断增加,高性能钢在桥梁工程中的应用研究已成为各国桥梁工程界重点研究方向之一。

目前,钢桥多为焊接结构,在车辆荷载的反复作用下疲劳裂纹主要萌生于焊接接头。王丽等^[1]研究发现 Q500qE 高性能钢两类角焊接接头主要断裂在焊趾位置。钢桥长期服役于大气腐蚀环境中,易在钢材表面形成腐蚀坑,产生应力集中,致使整个结构的承载能力和疲劳性能下降。D. Kang 等^[2]发现相较于空气中,HSB800 高性能钢接头在海水中的腐蚀疲劳裂纹扩展速度更快。R. Rahgozar 等^[3]发现腐蚀坑深度的增加会极大程度降低结构的疲劳性能。火灾产生的高温会导致钢结构桥梁的强度退化及产生塑性变形,给钢桥安全性能带来不利影响。同时,高温可能会降低焊接接头的截面残余应力,提高焊接接头的疲劳性能。W. Wang 等^[4]发现高温作用对 Q460 高性能钢焊接残余应力影响较大,升温温度越高,残余应力降低越大。尹成江等^[5]则发现高温能明显降低焊接结构的残余应力,提高焊接接头的疲劳寿命,且温

度越高焊接接头疲劳寿命提高的幅度越大。

现代钢桥时常服役于复杂恶劣的环境中,单一环境因素(腐蚀或高温等)对高性能桥梁钢疲劳性能的影响研究已不能满足设计需求,此时,复杂环境中高性能桥梁钢疲劳性能研究的重要性越来越显得突出。因此,笔者针对高性能桥梁钢在复杂环境中的疲劳性能,进行三种状态下的 Q420qD 高性能钢角焊缝十字接头疲劳试验,运用 S-N 曲线法对十字接头的疲劳强度进行预测,并基于现行规范对其疲劳性能给予评价,相关研究可为 Q420qD 高性能钢在复杂环境中的应用及抗疲劳设计提供理论基础。

1 试件设计

疲劳试验对象为横向角焊缝十字接头试件,母材采用 16 mm 厚 Q420qD 钢板,交货状态 TMCP,采用全厚度取样的方式。试件具体尺寸见图 1。焊条型号为 E55,力学性能见表 1。焊接时,采用手工电弧焊焊接,焊接参数:电压为 30 V;电流为 200 A;速度为 5 mm/s;热效率为 0.7。焊缝质量满足文献[6]中的相关要求,焊脚尺寸为 6 mm,角焊缝计算长度为 50 mm。Q420qD 钢的化学成分(质量分数):C(0.18%)、Si(0.345%)、Mn(1.48%)、P(0.024%)、S(0.012%)、Ni

(0.0085%)、Cr(0.022%)、Nb(0.005%)、V(0.07%)。E55 焊材的化学成分(质量分数):C(≤0.10%)、Si(≤0.80%)、Mn(≤1.00%)、P(0.025%)、S(0.015%)、Ni(0.50%)、Cr(≤0.30%)、Nb(≤0.20%)、V(≤0.10%)。

2 疲劳试验

2.1 样品制备

2.1.1 加速腐蚀试验

采用通电加速腐蚀试验来获得存在腐蚀坑的角焊缝十字接头试件。通过配置(50±5)g/L的 NaCl 溶液来模拟大气海洋环境,加入 NaOH 控制溶液 pH 在 6.5~7.2。试验前需在角焊缝区域外的试件表面均匀涂抹环氧树脂,以确保腐蚀结果的准确性。另外,为增强密封效果,应在环氧树脂防腐层外再包裹一层电工胶带。试验设备见图 3。

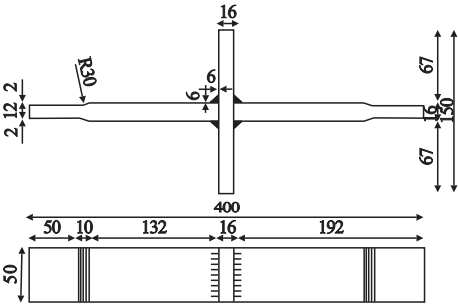


图 1 十字接头试件几何尺寸

Fig. 1 Geometric size of cross joint specimens

表 1 E55 焊条熔敷金属力学性能

Table 1 Mechanical properties of deposited metal of E55 electrode

抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	断后伸长/ %	-30℃冲击功/ V
≥550	≥460	≥17	≥27

根据文献[7]规定,制作 3 根母材静力拉伸试件进行材性试验,试件尺寸见图 2。测得 Q420qD 相应的力学性能参数见表 2。

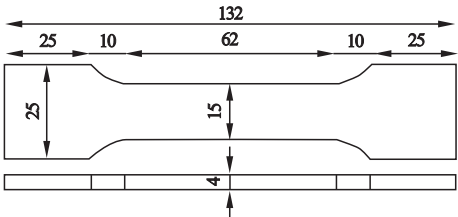


图 2 材性试件几何尺寸

Fig. 2 Geometric size of material property specimens

表 2 材性试验数据

Table 2 Results of material property test MPa

试件编号	屈服强度	极限强度	弹性模量
Q420qD-1	425.803	636.446	2.069×10 ⁵
Q420qD-2	423.535	633.281	2.058×10 ⁵
Q420qD-3	425.172	635.567	2.064×10 ⁵
平均值	424.837	635.098	2.064×10 ⁵

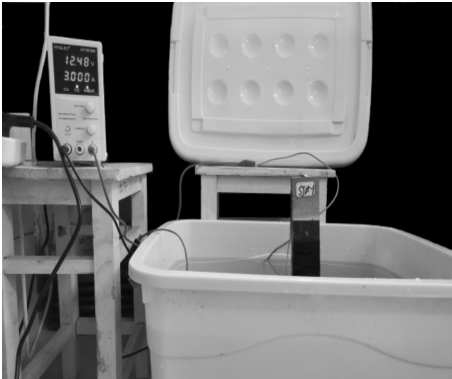


图 3 试验设备

Fig. 3 The equipment of test

海洋大气环境下的钢桥容易出现点蚀,采用平均腐蚀深度 D 来评定点蚀损伤,表达式为

$$D = \lambda t_F^\xi \tag{1}$$

式中: D 为平均腐蚀坑深度,mm; t_F 为腐蚀时间,a; λ 和 ξ 均为常数。

文献[8]给出了全世界多个国家海洋大气腐蚀深度参数取值,取均值作为幂函数中的参数,即 $\lambda = 0.062$, $\xi = 0.862$ 。依据式(1)得出钢桥焊接接头在海洋大气环境下服役 10 a 的平均腐蚀坑深度为 0.45 mm。再利用平均腐蚀坑深度计算式及法拉第定律求出通电腐蚀时的电流及时间关系式(2)。腐蚀试验中始终控制电流 $I = 3\text{ A}$,当 $T = 1.92\text{ h}$ 时,角焊缝的理论平均腐蚀坑深度为 0.45 mm。

$$IT = DS_0\rho Fn/M. \tag{2}$$

式中: S_0 为角焊缝有效截面积, mm^2 ; ρ 为焊缝材质密度, g/cm^3 ; I 为腐蚀电流, A ; T 为腐蚀所需时间, s ; M 为物质的摩尔质量, g/mol ; F 为法拉第恒量, $F = 9.62 \times 10^4 \text{ C}/\text{mol}$; n 为电子数, 取 $n = 2$ 。

腐蚀试验结束时,用小苏打与白醋混合使用除去焊缝表面的腐蚀产物,并用无水乙醇清洗干净。此时,可以清晰地看到在焊缝表面存在大量深浅不一的腐蚀坑(见图4)。

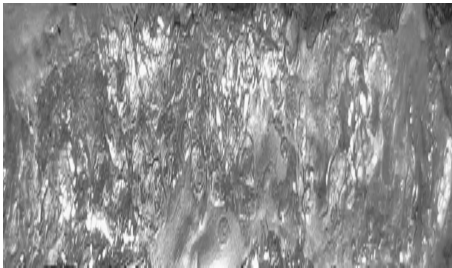


图4 腐蚀坑分布
Fig. 4 Distribution of corrosion pits

表3 角焊缝试件平均腐蚀深度

Table 3 Average corrosion depth of fillet weld specimens									
试件编号	m_0/g	m_1/g	$\Delta m/\text{g}$	D/mm	试件编号	m_0/g	m_1/g	$\Delta m/\text{g}$	D/mm
SJ6-1	3 187.0	3 181.3	5.7	0.43	SJ11-1	3 190.9	3 185.1	5.8	0.44
SJ6-2	3 178.9	3 173.0	5.9	0.44	SJ11-2	3 202.9	3 196.8	6.1	0.46
SJ7-1	3 206.1	3 200.2	5.9	0.44	SJ12-1	3 186.4	3 180.7	5.7	0.43
SJ7-2	3 198.3	3 192.0	6.3	0.47	SJ12-2	3 188.0	3 181.8	6.2	0.47
SJ8-1	3 176.4	3 170.6	5.8	0.44	SJ13-1	3 194.2	3 188.3	5.9	0.44
SJ8-2	3 251.5	3 245.7	5.8	0.44	SJ13-2	3 219.2	3 213.1	6.1	0.46
SJ9-1	3 189.5	3 183.4	6.1	0.46	SJ14-1	3 178.4	3 172.6	5.8	0.44
SJ9-2	3 221.3	3 215.5	5.8	0.44	SJ14-2	3 188.9	3 182.9	6.0	0.45
SJ10-1	3 210.4	3 204.4	6.0	0.45	SJ15-1	3 197.6	3 191.8	5.8	0.44
SJ10-2	3 197.5	3 191.8	5.7	0.43	SJ15-2	3 213.7	3 207.6	6.1	0.46

载能力。所以当温度到达 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 时,继续保温 1 h 后停止加热,使试件在电阻炉内自然降温。

$T_{\text{Ht}} = 345 \lg(8t_{\text{H}} + 1) + T_{\text{Ht0}}$. (3)
式中: T_{Ht} 为火灾发展到 t_{H} 时刻的环境温度, $^\circ\text{C}$; T_{Ht0} 为火灾发生时的环境温度, 本次试验取 $T_{\text{Ht0}} = 20\text{ }^\circ\text{C}$; t_{H} 为火灾持续时间, min 。

将晾干后的十字接头试件进行称重,并计算出每根试件的平均腐蚀深度和总体均值腐蚀深度,结果见表3。由表可知,每根试件的平均腐蚀深度存在差异性,可能是因为电解过程中产生的腐蚀产物附着在焊缝部位影响了溶液中离子的交换速率。十字接头的均值腐蚀坑深度为 0.44 mm ,与理论公式计算结果相差甚微,表明此次通电加速腐蚀试验结果的精确度较高。

2.1.2 火灾高温试验

从腐蚀试验中取 10 根试件,将之置于智能箱式高温电阻炉中,设定目标温度后进行升温,升温段在 ISO-834 标准升温曲线(见式(3))内取点进行分段式加热。在高温作用下,钢材的屈服强度、弹性模量等力学参数会随着温度的升高而大幅降低。当温度超过 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 时,表面无防火层的钢材基本失去承

2.2 试验设备及方法

疲劳试验在 MTS Landmark 电液伺服万能试验机上进行,采用力控制加载,加载波形为等幅 Sine 波,并采用 PVC 补偿。应力比 $R = 0.1$,为一次循环过程中最小应力 S_{min} 与最大应力 S_{max} 的比值,即 $R = S_{\text{min}}/S_{\text{max}}$ 。根据文献[16]要求设置 5 个应力幅 ΔS , $\Delta S = S_{\text{max}} - S_{\text{min}}$ 。每次试验时,需要输入参数: F_{m} 、

F_a 和 f 值。其中 F_m 为平均力, $F_m = (F_{\max} + F_{\min})/2$; F_a 为振动力, $F_a = (F_{\max} - F_{\min})/2$, F_{\max} 和 F_{\min} 分别为试验加载过程中的最大力和最小力; f 为加载频率, $f \in [10, 15]$, Hz。试

验时, 系统会自动记录加载循环次数和每次加载结束时的疲劳位移值, 试验过程中若发生异常、断裂或循环次数达到 200 万次, 则停止试验。十字接头的疲劳试验数据见表 4。

表 4 三种状态下十字接头疲劳试验数据

Table 4 Fatigue test data of cross joint under three cases

试件 编号	ΔS / MPa	F_m / kN	F_a / kN	N / 次	破坏 形式	试件 编号	ΔS / MPa	F_m / kN	F_a / kN	N / 次	破坏 形式
SJ1-1	96	24.89	20.36	1 491 575	焊趾断裂	SJ8-2	143	33.23	27.19	261 473	焊趾断裂
SJ1-2	96	24.89	20.36	1 472 863	焊趾断裂	SJ9-1	167	38.60	31.59	151 277	焊趾断裂
SJ2-1	119	30.85	25.24	866 294	焊趾断裂	SJ9-2	167	38.81	31.75	110 013	焊趾断裂
SJ2-2	119	30.85	25.24	882 499	焊趾断裂	SJ10-1	191	44.27	36.22	75 179	焊趾断裂
SJ3-1	143	37.08	30.33	529 826	焊趾断裂	SJ10-2	191	44.50	36.41	81 278	焊趾断裂
SJ3-2	143	37.08	30.33	545 400	焊趾断裂	SJ11-1	96	22.31	18.25	886 604	焊趾断裂
SJ4-1	167	43.30	35.43	316 157	焊趾断裂	SJ11-2	96	22.19	18.16	860 041	焊趾断裂
SJ4-2	167	43.30	35.43	291 409	焊趾断裂	SJ12-1	119	27.73	22.69	508 322	焊趾断裂
SJ5-1	191	49.52	40.52	203 963	焊趾断裂	SJ12-2	119	27.44	22.45	499 182	焊趾断裂
SJ5-2	191	49.52	40.52	167 907	焊根断裂	SJ13-1	143	33.23	27.19	289 932	焊趾断裂
SJ6-1	96	22.37	18.30	629 946	焊趾断裂	SJ13-2	143	33.06	27.05	287 118	焊趾断裂
SJ6-2	96	22.31	18.25	534 395	焊趾断裂	SJ14-1	167	38.81	31.75	195 033	焊趾断裂
SJ7-1	119	27.65	22.63	335 833	焊趾断裂	SJ14-2	167	38.71	31.67	149 899	焊趾断裂
SJ7-2	119	27.44	22.45	271 230	焊趾断裂	SJ15-1	191	44.39	36.32	119 715	焊趾断裂
SJ8-1	143	33.23	27.19	177 625	焊根断裂	SJ15-2	191	44.15	36.12	101 769	焊趾断裂

注: SJ1 ~ SJ5 均为无处理试件; SJ6 ~ SJ10 均为仅腐蚀处理试件; SJ11 ~ SJ15 均为腐蚀与火灾处理试件, 后文将无处理试件、仅腐蚀处理试件和腐蚀与火灾处理试件分别定义为样品 1、样品 2 和样品 3。

3 试验结果与分析

3.1 S-N 曲线

S - N 曲线在工程中常用的是转化的幂函数形式, 即: $C = S^m N$ 。两边取对数, 再整理后变形得: $\lg N = a - m \lg S$, a 和 m 为拟合参数。

根据表 4 中的疲劳试验数据, 采用最小二乘法进行三种状态下角焊缝疲劳寿命 N 与应力幅 S 的拟合, 根据文献[10], 取拟合曲线 $m = 3$, 得到三种状态下角焊缝 S - N 曲线对数线性表达式, 结果见表 5。其中, 95% 存活率拟合公式 = 试验数据回归公式 - 2 倍 $\lg N$ 的标准差值。

表 5 S-N 曲线对数线性表达式

Table 5 Logarithmic linear expression of S-N curve

类型	试验数据回归公式	95% 存活率拟合公式
样品 1	$\lg N = 12.153 - 3 \lg \Delta S$	$\lg N = 11.476 - 3 \lg \Delta S$
样品 2	$\lg N = 11.746 - 3 \lg \Delta S$	$\lg N = 11.104 - 3 \lg \Delta S$
样品 3	$\lg N = 11.907 - 3 \lg \Delta S$	$\lg N = 11.227 - 3 \lg \Delta S$

各国钢结构规范中有关于焊接接头在空气中的 S - N 参考曲线, 但均未含海水腐蚀或火灾处理等情况下焊接接头的 S - N 参考曲线, 而各国船级社规范对焊接接头在空气中或海水中自由腐蚀的 S - N 参考曲线均有说明; 对于火灾处理的焊接接头 S - N 参考曲线暂时没有相关规范说明。因此, 文中基于各国钢结构设计规范和各国船级社规范来对腐

蚀与火灾处理后的焊接接头 $S-N$ 曲线给予评价。各国规范中无腐蚀和腐蚀状态下的十字接头 $S-N$ 参考曲线分别见表 6 和表 7。

表 6 无腐蚀状态下 $S-N$ 曲线规范公式
Table 6 Specification formula of $S-N$ curve under corrosion free

类型	规范	公式
大气环境 (无腐蚀)	文献[11]	$[\Delta\sigma] = \left(\frac{0.72 \times 10^{12}}{N} \right)^{1/3}$
	文献[12]	$F_{SR} = \left(\frac{14.4 \times 10^{11}}{n_{SR}} \right)^{0.333}$
	文献[13]	$\lg N = 12.010 - 3 \lg \Delta\sigma$
	文献[14]	$N = 4.30 \times 10^{11} \times S^{-3}$
	文献[10]	$\lg N = 11.699 - 3 \lg \Delta\sigma$
	文献[15]	$\lg N = 11.398 - 3 \lg \Delta\sigma$

Table 7 Specification formula of $S-N$ curves under corrosion		
类型	规范	公式
海水腐蚀	文献[14]	$N = 1.43 \times 10^{11} \times S^{-3}$
	文献[15]	$\lg N = 10.921 - 3 \lg \Delta\sigma$
	文献[16]	$\lg N = 11.155 - 3 \lg \Delta\sigma$
	文献[17]	$\lg N = 11.261 - 3 \lg \Delta\sigma$

为便于比较,将样品 1、样品 2、样品 3 拟合 $S-N$ 曲线、95% 存活率下拟合曲线和各国规范 $S-N$ 疲劳曲线绘于图 5,并在图中给出角焊缝在相应条件下的 200 万次循环疲劳极限值。

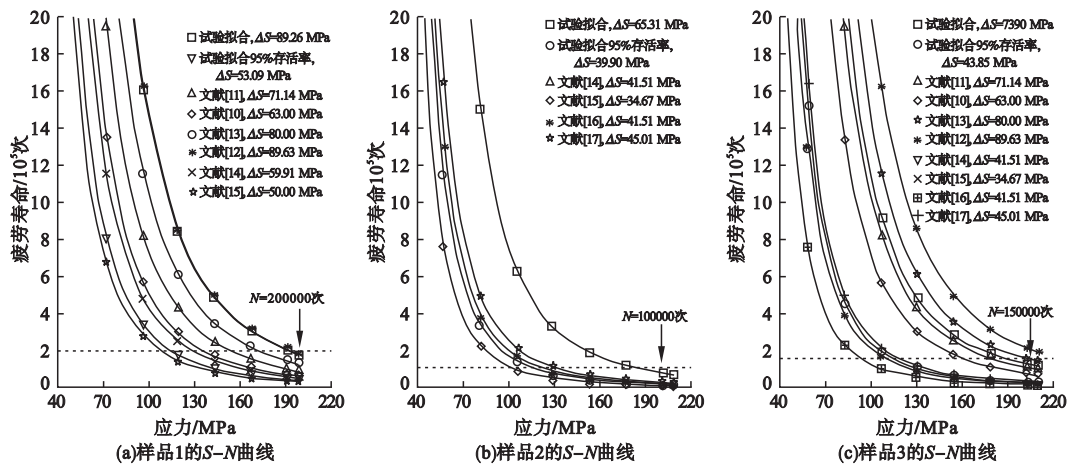


图 5 $S-N$ 曲线比较

Fig. 5 Comparison of $S-N$ curves

由图 5 可知:

(1) 样品 2 和样品 3 的试验疲劳极限值分别比样品 1 的试验疲劳极限值低了 26.83% 和 17.21%, 表明腐蚀会降低十字接头的疲劳性能;当火灾温度达到 600 ℃ 时,火灾会提高十字接头的疲劳性能。

(2) 样品 1 的疲劳极限值比文献[11]、文献[13]和文献[10]理论设计值分别高了 25.47%、11.58% 和 41.68%, 与文献[12]理论设计值相当。相对而言,文献[13]设计曲线能较好地预估其疲劳寿命,且具有足够的安全储备,但在循环次数低于 20 万次时,需要更多的疲劳试验数据作为支撑。

(3) 样品 2 的疲劳极限值高于各国船级社规范理论计算值,主要原因是因为各国规范计算公式均未考虑焊接接头在所处环境中的腐蚀时间。

(4) 样品 3 的疲劳极限值与文献[11]理论计算值相差不大;在 95% 存活率下的拟合曲线与文献[17]设计曲线吻合度较好。

3.2 断口分析

3.2.1 宏观分析

断口形貌具有典型的疲劳断口特征:瞬断面粗糙,呈撕裂状;瞬断前,断面光滑平坦(见图 6)。疲劳断口包含裂纹源区、裂纹扩展区和断裂区。裂纹源区作为疲劳破坏的初

始点,断面平整光滑,并向四周缓慢辐射扩展粒。裂纹扩展区断面呈现外凸波纹线。根据波纹线间距,明显看出靠近裂纹源附近裂纹扩展速度快于远离裂纹源的区域。瞬断区表

面粗糙、不平坦且与主断面存在一定的倾斜角度。随着裂纹扩展,构件有效截面被削弱,当某处应力达到极限强度时,十字接头瞬时断裂。

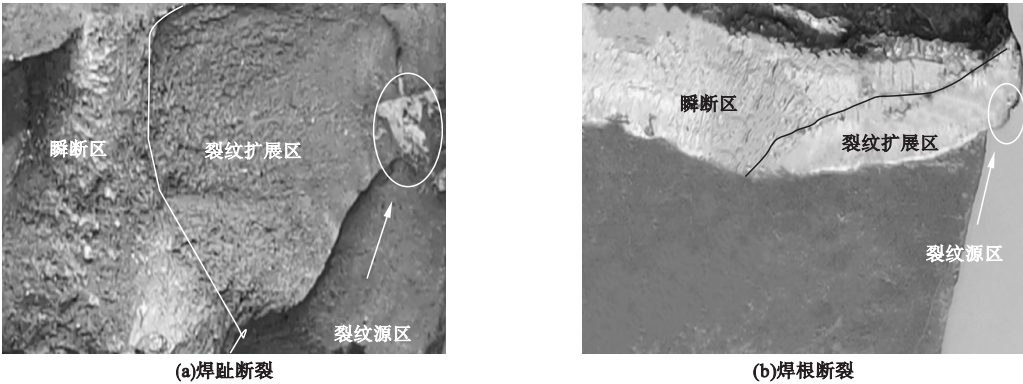


图 6 十字接头疲劳断口宏观形貌

Fig. 6 Macroscopic morphology of fatigue fracture surface of cross joint

3.2.2 微观分析

图 7 为十字接头疲劳断口微观形貌。由图可知,裂纹源区的裂纹由核心向四周扩展;

裂纹扩展区含有许多向前凸出的弧形疲劳条带;瞬断区含有许多大小不等的圆形或椭圆形韧窝。由于裂纹源不同或者裂纹扩展

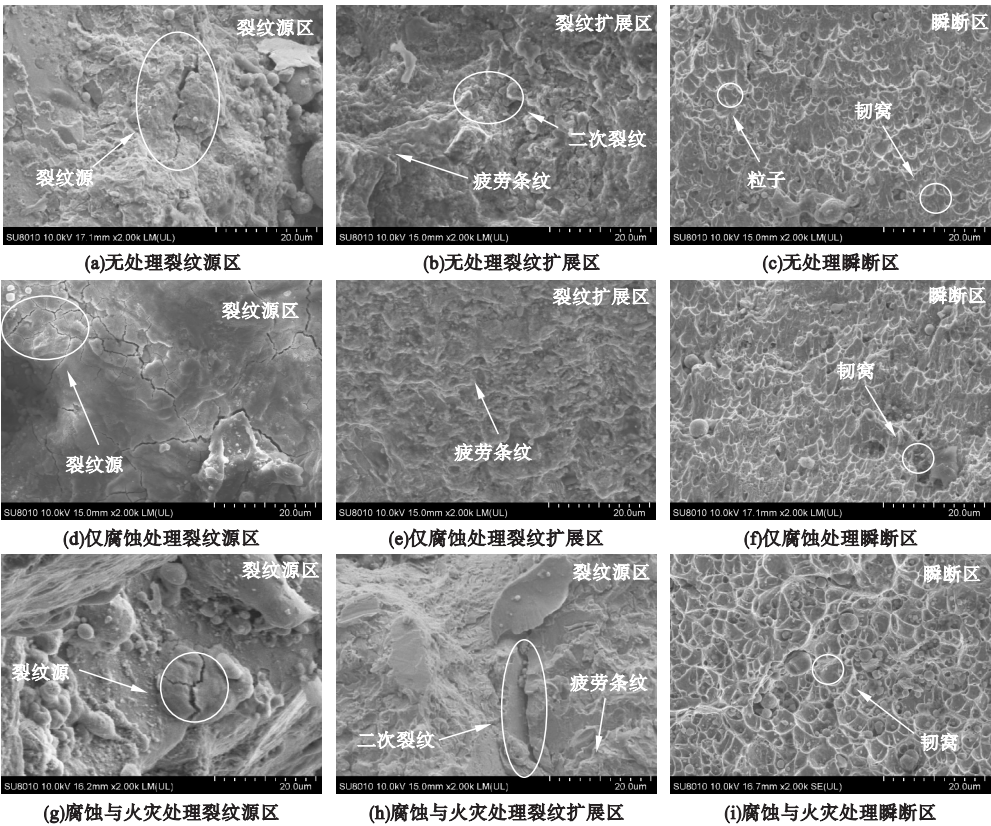


图 7 十字接头疲劳断口微观形貌

Fig. 7 Fatigue fracture morphology of cross joint

速率不同,部分断口可以观察到二次裂纹,且同一断口处疲劳条带的间距随着裂纹扩展速率增大而增大。瞬断区有些韧窝中间包含夹杂物或粒子,表明材料断裂为韧性断裂,并且韧窝的存在说明材料在扩展过程中不易发生滑移,快速扩展阶段进行得不充分,占疲劳寿命的比例极小。受腐蚀影响,试件断口含有多个裂纹源。火灾高温作用后,试件断口处存在与断口成一定角度的二次裂纹,韧窝数量减小但韧窝尺寸相对更大,表明 600 ℃ 火灾温度强化了材料的塑性。

3.3 损伤分析

图 8 为试件 SJ4-2 的疲劳位移曲线。图中 δ 为试件位移变化量, N_n 和 N_f 分别为试件的循环次数和疲劳寿命。由图可知,试件位移变化包含两个阶段;第 I 阶段为裂纹稳态扩展阶段,位移变化量小,约占整个疲劳寿命的 90%;第 II 阶段为裂纹失稳扩展阶段,位移增长速率明显加快。随着裂纹逐渐扩展,试件的有效承载截面迅速变小。在外部载荷作用下,当截面应力大于材料极限强度时,发生瞬时断裂。瞬时断裂阶段在疲劳寿命中占比极小,表明裂纹失稳扩展阶段进行的不充分。

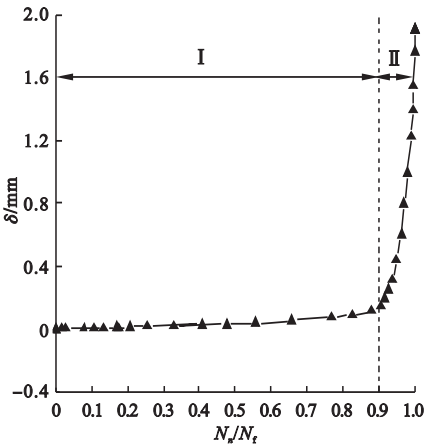


图 8 疲劳位移曲线

Fig. 8 Fracture morphology of cross joint

在损伤力学中,损伤作为一个内变量,用来表示金属材料的劣化,用此内变量和载荷等参数来构成金属材料的本构方程和演变方

程来描述金属材料的劣化过程,因此,可将损伤用于预测金属材料的剩余寿命。对于高周疲劳,假设在一个应力循环中损伤变量保持不变,由应力循环中所引起的疲劳累计损伤 D_f 为

$$N_f = \frac{(\beta + 1) (S_{\max}^{\beta+1} - S_{\min}^{\beta+1})^{-1}}{2B(\beta + 2)} \tag{4}$$

$$D_f = 1 - \left(1 - \frac{N_n}{N_f}\right)^{\frac{1}{(\beta+2)}} \tag{5}$$

式中: B 和 β 皆为材料常数。由疲劳试验拟合结果得 $\beta = 2$, 根据式(5)绘制试件疲劳损伤曲线如图 9 所示。

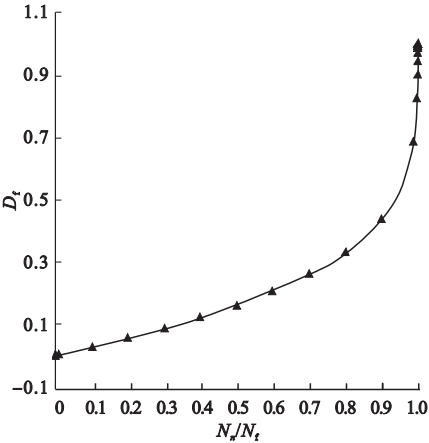


图 9 疲劳损伤曲线

Fig. 9 Fatigue displacement curve

由图 9 可知,随着 N_n/N_f 逐渐增大,疲劳损伤程度也越来越大,且损伤增长率也持续增加,这符合高倍镜下观察到的微观断口疲劳条带间距逐渐增大的现象。当 $0 < N_n/N_f < 0.9$ 时,为裂纹扩展阶段,十字接头断裂前 D_f 值约为 0.45, 累计损伤较大;当 $0.9 \leq N_n/N_f < 1.0$ 时,十字接头 D_f 值增大速率明显加快,为瞬断阶段,这与图 8 中疲劳位移曲线在第 II 阶段的位移变化特征相符,表明理论结果与试验结果一致。

4 结 论

(1) 十字接头试件在无处理、腐蚀与火灾处理和仅腐蚀处理时的疲劳寿命依次减少,表明腐蚀会降低十字接头的疲劳性能,且

当火灾温度达到 600 ℃ 时,火灾会提高十字接头的疲劳性能。

(2) 对于十字接头试件,使用 EN 规范设计曲线能够较好地预估无处理时的疲劳寿命;仅腐蚀处理时的 95% 存活率拟合曲线与 ABS 规范、CCS 规范设计曲线相差不大;使用 GB 规范设计曲线可较好地预估腐蚀与火灾处理时的疲劳寿命。

(3) 腐蚀会增加疲劳断口处的裂纹源数量,600 ℃ 火灾温度作用后,瞬断区韧窝尺寸相对更大,材料的塑性得到增强。损伤分析结果与疲劳位移曲线变化规律基本一致,且符合瞬断区断口微观形貌特征。

参考文献

- [1] 王丽,赵欣欣,荣峤,等. 高性能桥梁钢典型焊接接头疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报,2016,49(6):61-66.
(WANG Li, ZHAO Xinxin, RONG Qiao, et al. Experimental study on fatigue performance of typical welded joints of high performance steel [J]. Acta civil engineering, 2016, 49(6): 61-66.)
- [2] KANG D, LEE J, KIM T. Corrosion fatigue crack propagation in a heat affected zone of high-performance steel in an underwater sea environment [J]. Engineering failure analysis, 2011, 18(2): 557-563.
- [3] RAHGOZAR R, SHARIFI Y. Remaining fatigue life of corroded steel structural members [J]. Advances in structural engineering, 2011, 14(5): 881-890.
- [4] WANG W, QIN S, KODUR V, et al. Experimental study on evolution of residual stress in welded box-sections after high temperature exposure [J]. Advanced steel construction, 2018, 14(1): 73-89.
- [5] 尹成江,宋天民,李万丽. 高温焊接对 1.25Cr0.5Mo 焊接构件疲劳寿命的影响[J]. 焊接学报,2015,36(4):106-108.
(YIN Chengjiang, SONG Tianmin, LI Wanli. Effect of high-temperature welding on fatigue life of 1.25Cr0.5Mo steel joint [J]. Acta welding sinica, 2015, 36(4): 106-108.)
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构焊接规范:GB 50661—2011 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for welding of steel structures:GB 50661—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.)
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方

法:GB/T 228.1—2010 [S]. 北京:中国标准出版社,2010.

(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Metallic materials—tensile testing—part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1—2010 [S]. Beijing: China Standards Press, 2010.)

- [8] 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 Chu'nan. Natural environmental corrosion of materials in China [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.)

- [9] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢结构桥梁设计规范:JTG D64—2015 [S]. 北京:人民交通出版社,2015.

(Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway steel bridge: JTG D64—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.)

- [10] HOBACHER A. Recommendations for fatigue design of welded joints and components [S]. New York: Welding Research Council New York, 2016.

- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准:GB 50017—2017 [S]. 北京:中国计划出版社,2017.

(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of steel structure: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Planning Press, 2017.)

- [12] American Institute of Steel Construction. Specification for structural steel buildings: ANSI/AISC 360—10 [S]. Chicago: AISC, 2010.

- [13] European Committee for Standardization. Eurocode 3: design of steel structures part 1-9: fatigue: EN 1993-1-9 [S]. Brussels: CEN, 2005.

- [14] American Bureau of Shipping. Commentary on the guide for the fatigue assessment of offshore structures: ABS 115 NOTICE 1-2013 [S]. Houston: ABS, 2013.

- [15] Det Norske Veritas. Fatigue design of offshore steel structures: DNV-GL-RP-0005 [S]. Norway: DNV, 2014.

- [16] 中国船级社. 海洋工程结构物疲劳强度评估指南[M]. 北京:人民交通出版社,2013.

(China Classification Society. Guide lines for fatigue strength assessment of offshore engineering structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2013.)

- [17] 中国人民解放军总装备部. 水面舰艇结构设计计算方法:GJB/Z 119—99 [S]. 北京:中国人民解放军总装备部,1999.

(General Equipment Department of PLA. Method for structural design and strength calculation of naval surface ships: GJB/Z 119—99 [S]. Beijing: General Equipment Department of PLA, 1999.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)