

焊接缺陷对接头疲劳寿命影响及评估方法研究

李晓峰¹ 郑雨涵² 张岱霖² 张强^{2,3} 王帅^{2,3}

(1. 大连交通大学 机械工程学院, 大连 116028)

[2. 大连交通大学 詹天佑学院(中车学院), 大连 116028]

(3. 中国中车齐齐哈尔车辆有限公司 技术中心, 齐齐哈尔 161002)

摘要:【目的】焊接缺陷是影响焊接质量和结构性能的关键因素。通过试验和数值模拟探讨了焊接缺陷对Q450NQR1高强度耐候钢焊接接头疲劳寿命的影响及其评估方法。【方法】首先,制备含有不同缺陷的十字接头和对接接头试件,使用超声波检测法对试件缺陷进行定量分析,确保试件有效性;然后,对试件进行疲劳试验,基于英国标准BS7608:2014中的 $S-N$ 曲线,分析不同缺陷类型十字焊接接头抗疲劳性能影响规律;最后,基于试件疲劳试验,提出一种含不同焊接缺陷接头的等效建模方法。【结果】结果表明,不同缺陷类型对十字焊接接头疲劳寿命的影响程度为咬边缺陷>错位缺陷>气孔缺陷,其对应的接头抗疲劳等级分别为F级、E级、D级,使用焊接缺陷等效建模法得到不同缺陷对应的等效初始裂纹值,并使用最小二乘法得到不同缺陷尺寸与等效初始裂纹尺寸的拟合结果,研究成果可为含缺陷的钢焊接结构疲劳寿命评估提供参考。

关键词: Q450NQR1 钢; 焊接接头; 初始缺陷; 疲劳试验; 等效裂纹

中图分类号: U270.1 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.05.008

0 引言

我国铁路货车转向架、车体及相关部件多采用钢焊接结构,其主要采用的钢铁材料为Q450NQR1^[1],但在焊接过程中往往会产生各种难以避免的焊接缺陷。由于受焊缝设计、焊接操作、母材焊接性能等因素的影响,在焊缝内部易产生未融合、未焊透、气孔等焊接缺陷,在焊缝表面易产生咬边、裂纹等焊接缺陷^[2]。结构焊接处极易产生应力集中的现象,即使在设计阶段考虑了应力集中的影响,对其进行良好的设计,焊接连接处也极有可能发生失效^[3]。在铁路运输中,疲劳失效的概率高达70%~90%^[4]。正因如此,开展了含不同焊接缺陷的钢焊接接头疲劳试验,研究缺陷对钢焊接接头疲劳性能的影响,并应用到铁路货车焊接结构上,有助于提高我国铁路车辆的设计技术、生产质量和行车安全性,为企业节约生产成本,增强其竞争能力。

鉴于此,国内外学者对焊接结构的疲劳性能及评估方法进行了一定的研究,并获得了一些成果。CHEN等^[5]提出了一种基于内部缺陷和表面缺陷的疲劳寿命综合预测方法,得到了内部缺陷和表面缺陷相结合的集成缺陷模型,并通过试验验证了该方法的准

确性。JAVAHERI等^[6]引入了一种数值方法预测焊接接头的疲劳寿命,并通过试验进行了验证,获得了有效的 $S-N$ 曲线,并对 $S-N$ 曲线进行统计分析,计算了不同百分比下标本的存活率,并在此基础上推荐了新的疲劳等级分类。赵佳伟等^[7]基于Rupp等效结构应力法和疲劳试验数据,建立了一种用于焊点寿命预测的 $S-N$ 曲线,该成果对于工程上评估焊点的疲劳寿命具有参考价值。缪素菲等^[8]对存在焊接缺陷的铝合金板架的寿命进行了计算,研究结果表明,在焊缝端部缺陷位置产生裂纹,裂纹不断扩展,最终令纵骨腹板产生疲劳断裂。叶智伟等^[9]设计了一种包含顶板纵肋焊接接头的局部试验模型,对理想、未焊透和带有咬边缺陷的3组双面焊试件进行疲劳试验,分析了各组试件的疲劳破坏模型及疲劳性能。

许多学者针对咬边缺陷做了进一步的研究。KURTULMUS等^[10]制作了无缺陷的低碳钢对接接头,并在热影响区人工钻出长度、根部半径和深度各不相同的凹槽来模拟咬边缺陷,对其进行拉伸试验,通过试验结果,计算各试件的静应力集中系数,确定了咬边缺陷几何形状对应力集中因子的影响。STEIMBREGER等^[11]对横向受力对接接头进行了数

收稿日期: 2024-08-23 修回日期: 2024-10-17

基金项目: 中国中车科研项目(2021CHA014)

作者简介: 李晓峰,男,1972年生,黑龙江齐齐哈尔人,博士,教授;主要研究方向为车辆CAE关键技术; E-mail: lixiaofeng2007@126.com。

引用格式: 李晓峰,郑雨涵,张岱霖,等. 焊接缺陷对接头疲劳寿命影响及评估方法研究[J]. 机械强度, 2026, 48(5): 66-74.

LI Xiaofeng, ZHENG Yuhan, ZHANG Dailin, et al. Research on the influence of welding defects on the fatigue life of welded joints and evaluation methods[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(5): 66-74.



免费获取

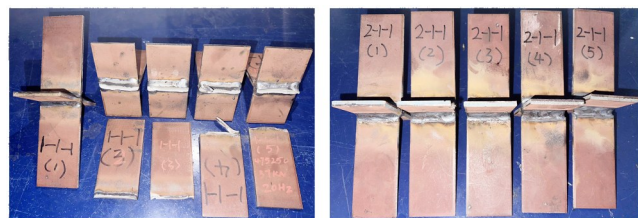
值模拟,基于断裂力学,对咬边几何形状进行研究,研究表明,咬边深度是影响带咬边缺陷焊接构件疲劳行为的主要变量。

综上所述,以上研究尚未综合对比不同缺陷类型对焊接接头疲劳强度的影响程度,也未定义其抗疲劳性能等级,针对咬边缺陷的研究,以上学者提出咬边深度是影响带咬边缺陷结构疲劳行为的主要变量,但尚未进行定量研究。针对以上局限性,本研究以疲劳试验为基础,给出不同缺陷类型对十字型焊接接头疲劳强度影响规律,对比英国 BS 7608:2014 标准^[12]中的 S-N 曲线,得到不同缺陷类型十字型焊接接头的抗疲劳等级,并基于等效裂纹法定量评估含咬边缺陷和气孔缺陷焊接接头的疲劳性能,给出不同咬边深度和气孔量的焊接接头对应的等效初始裂纹值。今后,对含有类似缺陷的结构可以省去长周期的试验过程,直接通过等效初始裂纹值预测其疲劳寿命,可以有效缩短评估周期,大大提高评估效率。

1 基于疲劳试验的缺陷影响分析

1.1 试件制备

根据铁路货车焊接结构的特点,选取 2 种典型常用的接头形式:对接接头和十字型接头^[13],使用尺寸为 100 mm×50 mm×5 mm 的 Q450NQR1 型高强度耐候钢板,按照实际生产中可能出现的典型缺陷进行加工处理,制作一批含不同缺陷的对接接头和十字型接头,采用气体保护焊法制作焊接接头,保护气体为 80% Ar+20% CO₂,焊接材料为 TH550-NQ-Ⅱ,加工时,以特殊焊接工艺在试件焊缝附近形成气孔、咬边及错位缺陷。部分试件实物如图 1 所示,基本尺寸如图 2 所示。

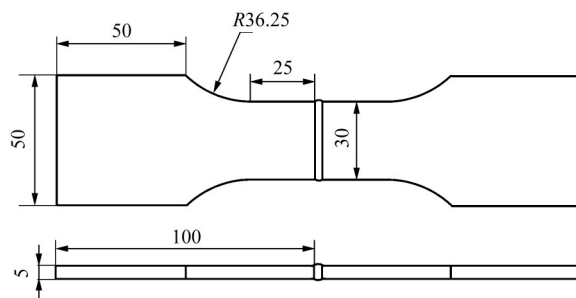


(e) 2-2-1 含不同咬边缺陷对接接头

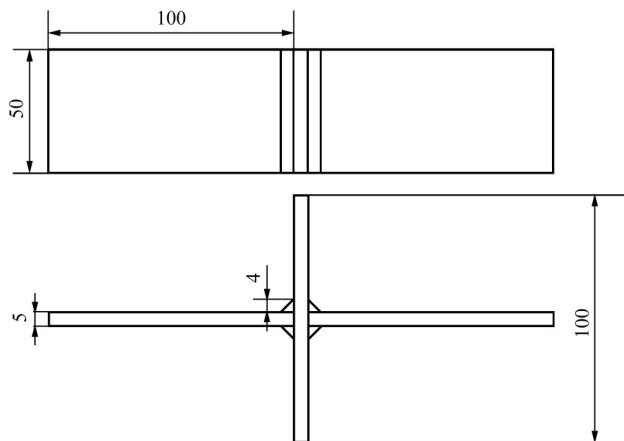
(f) 4-2-1 含不同气孔缺陷十字接头

图 1 试件实物图

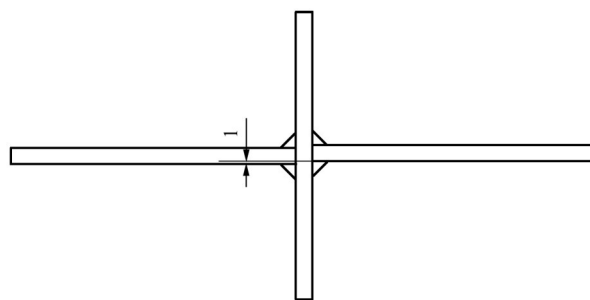
Fig. 1 Physical specimens



(a) 对接接头尺寸



(b) 十字接头尺寸



(c) 错位 1 mm 缺陷十字接头

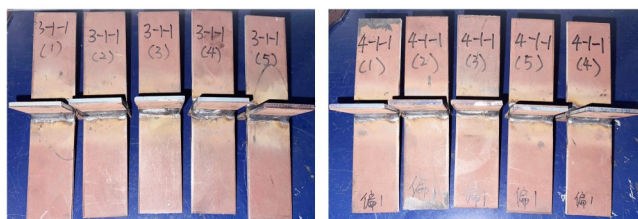
图 2 试件尺寸

Fig. 2 Specimen size

1.2 试件探伤

1.2.1 相控阵探伤仪

超声波检测方法是指使用频率大于 20 000 Hz 的声波——超声波,来探测样件的声学特征和内部结构,通过超声波转化的电信号判断材料内部的缺陷位置、



(a) 1-1-1 无缺陷十字接头

(b) 2-1-1 含咬边缺陷十字接头



(c) 3-1-1 含气孔缺陷十字接头

(d) 4-1-1 含错位 1 mm 缺陷十字接头

形状、大小等信息^[14]。超声相控阵一维线阵扇形检测模型图如图3所示。在该模型的计算中,将线性换能器发射的声波假定为柱面波,传播介质为弹性介质^[15]。

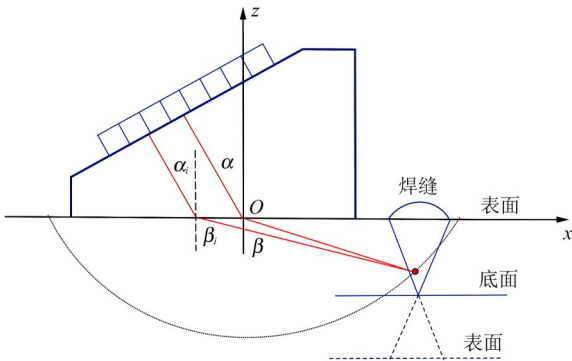


图3 超声相控阵一维线阵扇形检测模型

Fig. 3 Ultrasonic phased array one-dimensional linear array sector detection model

为了证明第1.1节制备试件的缺陷与预设缺陷的一致性,保证疲劳试验的有效性,采用超声波检测方法对制备试件的表面及内部缺陷进行检测。使用Omniscan X3相控阵探伤仪作为检测设备(图4),探头选用A31,楔块选用A31-N55s(图5),所选用的探头楔块表面形状与被检试件表面曲率相匹配。首先清理扫查区母材,确保其表面无锈蚀、氧化皮、油污及其他外部杂质,根据试件参数输入焊缝信息,选用主要成分为二氧化硅的耦合剂H-2 Q7700002均匀抹在试件

焊缝处,探头在焊缝边缘沿平行焊缝的方向进行线性扫查,扫查速度规定小于100 mm/s。

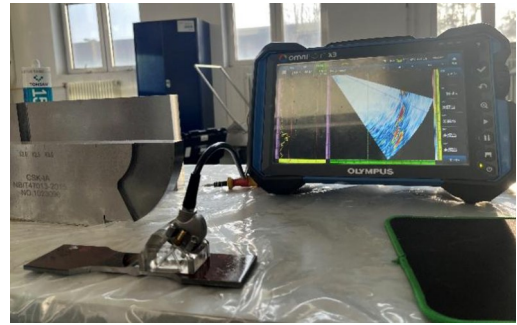


图4 Omniscan X3相控阵探伤仪设备

Fig. 4 Omniscan X3 phased array flaw detector equipment

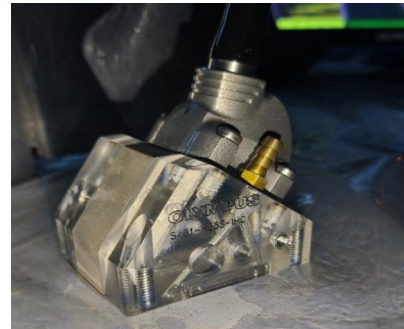
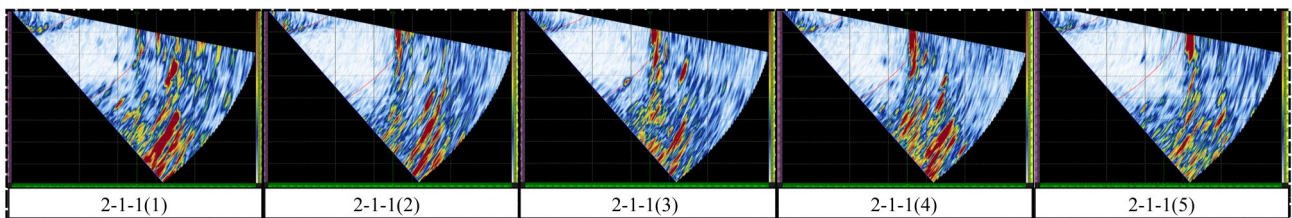


图5 探头和楔块

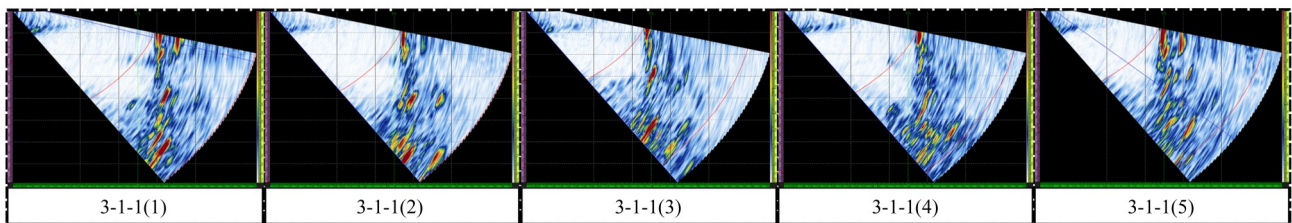
Fig. 5 Probe and wedge

1.2.2 探伤结果

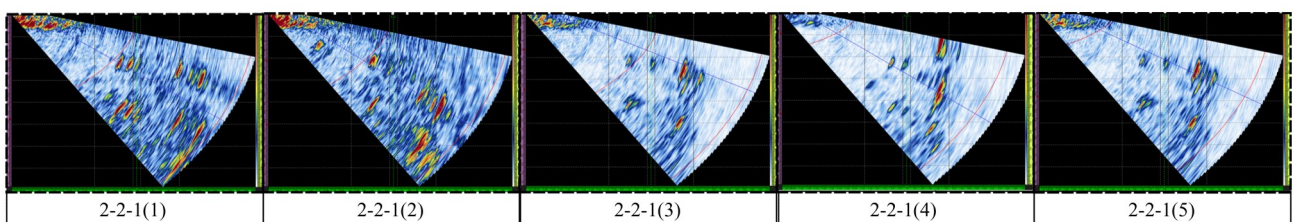
上述含有缺陷的接头经超声波相控阵检测后的结果显示,如图6所示。



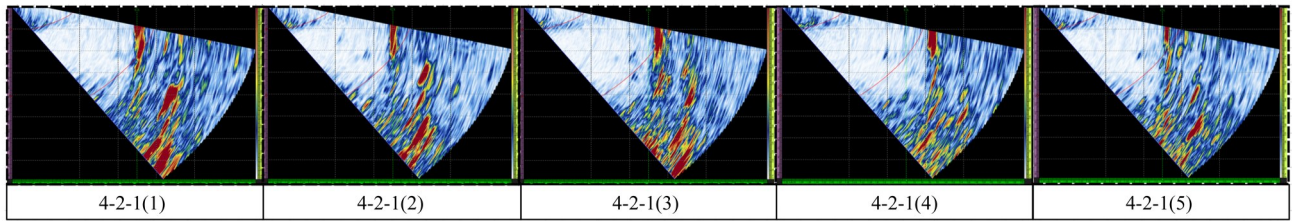
(a) 含咬边缺陷十字接头(2-1-1)



(b) 含气孔缺陷十字接头(3-1-1)



(c) 含不同咬边深度缺陷对接接头(2-2-1)



(d) 含不同气孔缺陷十字接头(4-2-1)

图 6 超声波探伤结果

Fig. 6 Ultrasonic testing results

由图 6 可知,2-1-1 组十字接头的咬边缺陷深度均在 (1.2 ± 0.1) mm 内,与楔块前沿的距离均在 (6.5 ± 0.5) mm 内;3-1-1 组十字接头试件气孔缺陷均在深度 (1.50 ± 0.5) mm 内,与楔块前沿的距离均在 (9.0 ± 1) mm 范围内,即可认为这组试件缺陷具有一致性;1-1-1 组无缺陷十字接头和 4-1-1 组错位 1 mm 十字接头默认与同组试件完全一致。2-2-1 组对接接头试件除咬边深度以外其余特征完全一致,4-2-1 组十字接头试件具有不同位置 and 不同半径的气孔缺陷,根据超声波探伤仪参数栏显示,具体缺陷参数如表 1、表 2 所示。探伤试验标定的缺陷尺寸说明,试验试件实际存在的缺陷与预设的缺陷具有一致性,所有缺陷尺寸均符合标准 ISO 5817:2023^[16] 中焊接缺陷 D 级的要求,确保不同类型缺陷在尺寸上的可比性,可以保证后续试验研究结果有效。

表 1 含不同咬边深度缺陷对接接头缺陷参数

Tab. 1 Defect parameters of butt joints with different undercut depth defects

试件编号	咬边深度/mm	咬边距离/mm
2-2-1(1)	0.44	6.50
2-2-1(2)	1.08	6.03
2-2-1(3)	1.75	6.86
2-2-1(4)	2.63	6.57
2-2-1(5)	3.70	6.07

1.3 试验方法及载荷

本次试验参照 GB/T 13816—1992^[17] 分别对各组试件进行脉动拉伸疲劳试验,施加不同载荷以获得试件失效的循环次数。疲劳试验设备为 SDZ0100 型电液伺服动静疲劳试验机,如图 7 所示。焊接试件拥有良好的中心线对中性能,用上、下夹具将试样垂直夹持,保证试件被疲劳试验机夹持后不再受到额外弯矩,将拉伸载荷方向与焊缝垂直,采用上拉伸方式,即底端固定、上端施加载荷,直到试件断裂为止。

表 2 含不同气孔缺陷十字接头缺陷参数

Tab. 2 Defect parameters of cross joints with different porosity defects

试件编号	气孔深度/mm	气孔半径/mm	距离/mm
4-2-1(1)	0~1	0.8~1.2	10.55
4-2-1(2)		1.2~1.6	9.80
4-2-1(3)		1.6~2.0	11.34
4-2-1(4)	1~2	0.8~1.2	12.24
4-2-1(5)		1.2~1.6	11.28
4-2-1(6)		1.6~2.0	10.98
4-2-1(7)	2~3	0.8~1.2	11.14
4-2-1(8)		1.2~1.6	10.57
4-2-1(9)		1.6~2.0	12.50

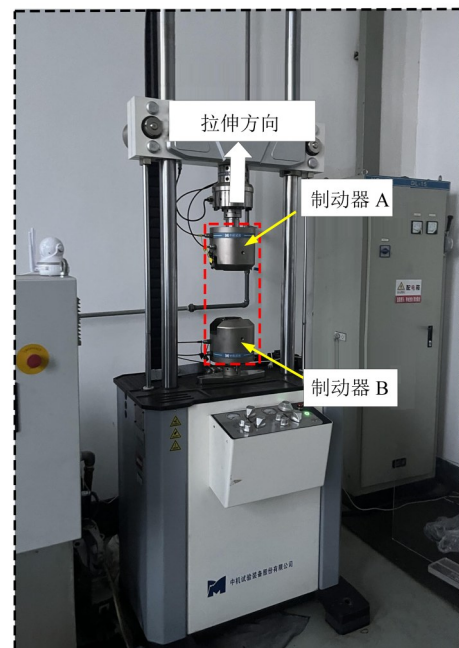


图 7 拉伸疲劳试验机

Fig. 7 Testing machine of the tensile fatigue

1.4 试验及分析结果

1.4.1 不同缺陷类型试件试验结果

对 4 组十字接头进行试验,得到不同载荷水平下的疲劳寿命,表 3 所示为不同载荷下十字接头试件的试验结果。其中, $\Delta\sigma = \Delta F/A$, $\Delta\sigma$ 为应力变化范围, ΔF 为载荷变化范围,十字接头横截面积 $A = 250 \text{ mm}^2$; N

为试件断裂时发生循环的次数,即试件疲劳寿命。

表3 十字接头试件试验结果
Tab. 3 Cross joints test results

试件编号	载荷变化范围 $\Delta F/\text{N}$	应力变化范围 $\Delta\sigma/\text{MPa}$	试验疲劳寿命 $N/10^4$
1-1-1(1)	1 752.22~17 522.22	63.08	未断
1-1-1(2)	2 347.22~23 472.22	84.1	未断
1-1-1(3)	3 169.72~31 697.22	114.11	654.4
1-1-1(4)	3 502.22~35 022.22	126.08	596.6
1-1-1(5)	4 079.72~40 797.2	146.87	321.0
2-1-1(1)	1 752.22~17 522.22	63.08	605.6
2-1-1(2)	2 347.22~23 472.22	84.1	335.2
2-1-1(3)	3 169.72~31 697.22	114.11	125.9
2-1-1(4)	3 502.22~35 022.22	126.08	80.3
2-1-1(5)	4 079.72~40 797.2	146.87	41.9
3-1-1(1)	1 752.22~17 522.22	63.08	未断
3-1-1(2)	2 347.22~23 472.22	84.1	687.1
3-1-1(3)	3 169.72~31 697.22	114.11	331.4
3-1-1(4)	3 502.22~35 022.22	126.08	287.4
3-1-1(5)	4 079.72~40 797.2	146.87	157.0
4-1-1(1)	1 752.22~17 522.22	63.08	未断
4-1-1(2)	2 347.22~23 472.22	84.1	484.2
4-1-1(3)	3 169.72~31 697.22	114.11	257.0
4-1-1(4)	3 502.22~35 022.22	126.08	211.5
4-1-1(5)	4 079.72~40 797.2	146.87	101.5

将上述试验结果绘制到 BS 7608:2014 标准给定的中值 $S-N$ 曲线中,如图 8 所示。含有初始缺陷的试件寿命比不含缺陷的试件有明显降低。不同类型缺陷对十字接头疲劳寿命的影响程度由大到小依次为:咬边缺陷>错位缺陷>气孔缺陷。无缺陷、含咬边缺陷、含错位缺陷、含气孔缺陷的十字接头的抗疲劳等级分别为 C 级、F 级、E 级、D 级。

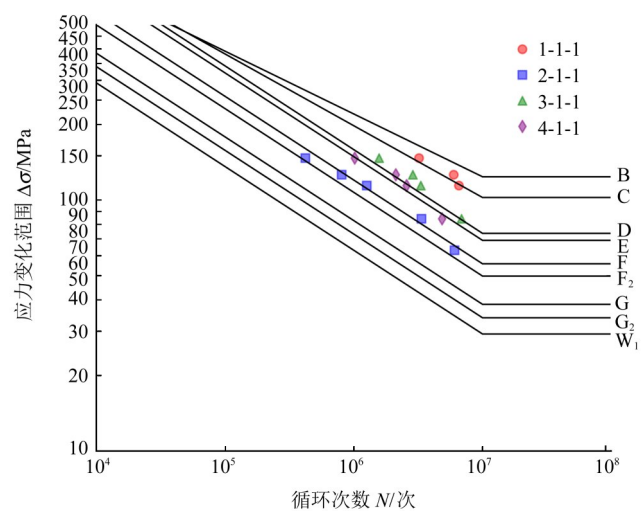


图8 BS 7608:2014标准中的 $S-N$ 曲线下的接头试验数据

Fig. 8 Test data of joints in $S-N$ curve of BS 7608:2014 standard

1. 4. 2 不同咬边深度对接接头试件试验结果

为进一步评估含不同咬边深度缺陷和不同气孔量焊接接头的疲劳寿命,在相同的应力变化范围内,对焊接接头进行疲劳试验,得到不同咬边深度和不同气孔量的焊接接头疲劳寿命。2-2-1 组规定载荷范围为 3 725. 5~37 255. 0 N 进行疲劳拉伸试验,试验结果如表 4 所示,其中变化率为随着咬边深度的增加,疲劳寿命的减少量与无缺陷试件疲劳寿命的比值。对接接头横截面积为 150 mm²。由试验结果可以发现,当试件含有咬边缺陷时,其疲劳寿命大大降低。当咬边深度为 0. 44 mm 时,疲劳寿命降低了 20. 2%;当咬边深度达到 1. 08 mm 时,疲劳寿命下降了 66. 5%;而咬边深度大于 1. 08 mm 时,疲劳寿命下降比例却没有增大。由此可见,咬边缺陷的存在显著降低了钢材焊接接头的疲劳寿命,随着咬边尺寸的增加,疲劳寿命的降低程度未存在明显的线性规律。

表4 含不同咬边深度缺陷对接接头试件试验结果
Tab. 4 Test results of butt joints with different undercut depth defects

试件编号	咬边深度/ mm	应力变化范围 $\Delta\sigma/\text{MPa}$	试验疲劳 寿命/ 10^4	变化率/%
2-2-1(1)	0	223.53	75.8	0
2-2-1(2)	0.44	223.53	60.5	-20.2
2-2-1(3)	1.08	223.53	25.4	-66.5
2-2-1(4)	1.75	223.53	28.8	-62.0
2-2-1(5)	2.63	223.53	32.7	-56.9
2-2-1(6)	3.70	223.53	25.6	-66.2

1. 4. 3 不同气孔量十字接头试件试验结果

4-2-1 组十字接头试件规定载荷范围为 3 502. 22~35 022. 22 N 进行疲劳拉伸试验,试验结果如表 5 所示。十字接头横截面积为 250 mm²。气孔缺陷为一种体积缺陷,试验结果表明,气孔缺陷对试件疲劳寿命有一定的影响,这是由于气孔的存在使截面产生空洞,导致截面尺寸变小,成为应力集中的起源,裂纹由此产生。同时还可以看出,当气孔位于表面附近时,试件疲劳寿命下降程度高达 60%~80%,而内部气孔缺陷对试件疲劳寿命的影响程度在 50% 左右,说明气孔位置越接近试件表面,气孔缺陷对试件疲劳强度的影响越大。而气孔尺寸增加后,试件疲劳强度的变化程度不明显,这说明气孔的位置对结构寿命的影响较大,而气孔的尺寸对其影响较小,位于表面或表层下气孔对试件疲劳强度的影响最明显。

表 5 含不同气孔缺陷十字接头试件试验结果
Tab. 5 Test results of cross joints with different porosity defects

试件编号	气孔深度/mm	气孔半径/mm	应力变化范围 $\Delta\sigma$ /MPa	试验疲劳寿命/ 10^4	变化率/%
1-1-1(4)	0	0	126.08	596.6	0
3-2-1(1)	0~1	0.8~1.2	126.08	187.2	-68.6
3-2-1(2)		1.2~1.6	126.08	165.4	-72.2
3-2-1(3)		1.6~2.0	126.08	154.9	-74.0
3-2-1(4)	1~2	0.8~1.2	126.08	288.4	-51.7
3-2-1(5)		1.2~1.6	126.08	267.4	-55.2
3-2-1(6)		1.6~2.0	126.08	256.1	-57.1
3-2-1(7)	2~3	0.8~1.2	126.08	273.7	-54.1
3-2-1(8)		1.2~1.6	126.08	261.5	-56.2
3-2-1(9)		1.6~2.0	126.08	252.3	-57.8

2 含焊接缺陷接头的等效建模法

2.1 等效结构应力

焊缝焊趾的应力集中程度很大,该处裂纹的萌生和形成几乎可以忽略,因此,焊接结构的疲劳寿命即可等于裂纹的扩展寿命^[18]。等效结构应力以断裂力学理论为基础,考虑了焊趾缺口、焊接接头板厚、载荷及应力集中对接头疲劳寿命的影响,对 Paris 公式进行推导,公式中积分下限为焊缝初始裂纹的长度,积分上限为板材的厚度,当裂纹逐渐扩展穿透板厚时,板材将断裂,此时的寿命即为其疲劳寿命 N 。基于 ASME BPVC VIII. 2—2023 标准^[19],与焊接接头类型无关的预测焊接结构焊缝疲劳寿命的计算式为

$$\Delta S_s = C_d N^h \quad (1)$$

其中,等效结构应力的计算式为

$$\Delta S_s = \frac{\Delta \sigma_s}{t^{(2-m)/2m} I(r)^{1/m}} \quad (2)$$

$$N = \int_{a_i/t \rightarrow 0}^{a/t=1} \frac{td(a/t)}{C(M_{kn})^n(\Delta K)^m} = \frac{1}{C} t^{1-\frac{m}{2}} (\Delta \sigma_s)^{-m} I(r) \quad (3)$$

式中, $\Delta \sigma_s$ 为结构应力; t 为板的厚度; a 为初始裂纹深度; C_d 、 h 均为主 S - N 曲线试验常数,由 ASME 标准提供; m 为固定值,3.6; C 为材料常数; M_{kn} 为焊趾缺口导致的应力强度因子放大系数; ΔK 为应力强度因子范围; $I(r)$ 为载荷弯曲比 r 的无量纲函数,反映了载荷模式的影响。假如没有缺陷或缺陷可以忽略不计,该值默认为接近 0。标准 ASME BPVC VIII. 2—2023 规定 $I(r)^{1/m}$ 公式中 a/t 的范围为 $a/t \leq 0.1$,有学者认为 $a/t \leq 0.2$ 即可,因为 ASME 标准给出的规定值偏向保守,当裂纹尺寸更大时, $I(r)$ 公式应该重新定义。

2.2 缺陷等效建模方法

针对在疲劳评估过程中难以模拟模型焊接缺陷的问题,基于等效裂纹法提出一种可代替含不同焊接缺陷模型的等效建模方法。等效裂纹法是基于式(3)的一个逆过程,以数值仿真为基础,通过调节 a/t 使拟合的疲劳寿命与试验的疲劳寿命相等,反求出初始裂纹长度,取不同的 a/t 值相当于对应不同的焊接缺陷,说明 N 与 a 之间存在隐式的非线性关系。因此认为,与 N 对应的 a 即为与该缺陷对应的等效初始裂纹值,可以将焊接缺陷用等效初始裂纹值定义,进而将等效初始裂纹值输入到被评估结构的无缺陷有限元模型中,即可计算出具有缺陷结构的疲劳寿命。等效初始裂纹值的计算流程如图 9 所示。

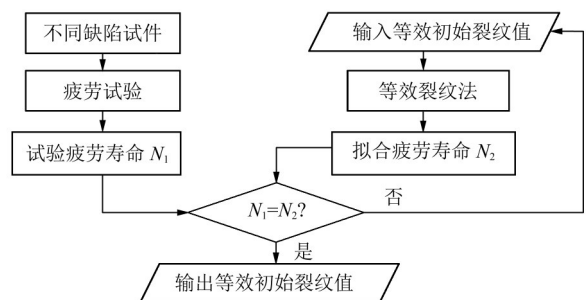


图 9 等效初始裂纹值计算流程

Fig. 9 Calculation process of the equivalent initial crack value

2.3 仿真分析结果

2.3.1 含不同咬边深度对接接头

按照试验的对接接头尺寸进行精确的有限元建模,以 8 节点六面体单元为主,6 节点五面体单元为辅进行有限元网格划分,单元长度为 0.3 mm,网格数量为 188 802,节点数量为 202 032,采用与试验相同的约束及加载方式计算该模型的疲劳寿命,仿真结果如图 10 所示。使用 Weld-Fatigue 软件,选用置信度为

50% 的 $S-N$ 曲线计算, 调节 a/t 精确至小数点后 3 位, 将调试好的等效初始裂纹值加入到有限元模型中, 计算出与试验疲劳寿命相等的拟合疲劳寿命, 计算结果如表 6 所示, 其中定义相对咬边深度为咬边深度与板厚的比值。由表 6 可知, 当拟合结果与试验结果一致性较高时, 例如 2-2-1(1) 试件, 得到 a/t 值为 0.013, 试件板厚为 5 mm, 可以计算 $a = 0.065$ mm, 即可认为相对咬边深度为 0.088 mm 的咬边缺陷的对接接头其等效初始裂纹值为 0.065 mm。

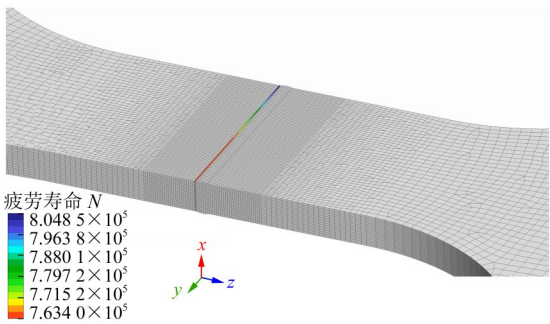


图 10 对接接头仿真结果

Fig. 10 Simulation result of butt joints

表 6 含不同咬边深度缺陷对接接头拟合疲劳寿命及调试参数 a/t

Tab. 6 Fitted fatigue life and debugging parameter a/t of butt joints with different undercut depth defects

试件编号	咬边深度/mm	相对咬边深度/mm	试验疲劳寿命/ 10^4	a/t	拟合疲劳寿命/ 10^4
2-2-1(1)	0.44	0.088	60.5	0.013	60.5
2-2-1(2)	1.08	0.216	25.4	0.072	25.4
2-2-1(3)	1.75	0.350	28.8	0.062	28.6
2-2-1(4)	2.63	0.526	32.7	0.052	32.6
2-2-1(5)	3.70	0.740	25.6	0.071	25.7

2.3.2 含不同气孔量十字接头

按照试验的十字接头尺寸进行精确的有限元建模, 以 8 节点六面体单元为主, 6 节点五面体单元为辅进行有限元网格划分, 单元长度为 0.3 mm, 网格数量为 300 757, 节点数量为 330 090, 采用与试验相同的约束及加载方式计算该模型的疲劳寿命, 仿真结果如图 11 所示。得到参数 a/t 的值, 计算结果如表 7 所示。

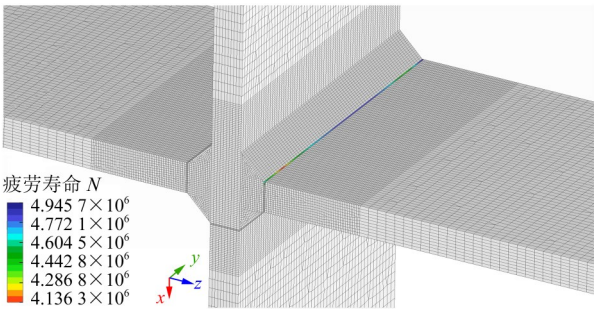


图 11 十字接头仿真结果

Fig. 11 Simulation results of cross joints

表 7 含不同气孔缺陷十字接头拟合疲劳寿命及调试参数 a/t

Tab. 7 Fitting fatigue life and debugging parameter a/t of cross joints with different porosity defects

试件编号	气孔深度/mm	气孔相对深度/mm	气孔半径/mm	试验疲劳寿命/ 10^4	a/t	拟合疲劳寿命/ 10^4
4-2-1(1)			0.8~1.2	187.2	0.048	186.6
4-2-1(2)	0~1	0~0.2	1.2~1.6	165.4	0.057	165.2
4-2-1(3)			1.6~2.0	154.9	0.062	155.1
4-2-1(4)			0.8~1.2	288.4	0.020	289.3
4-2-1(5)	1~2	0.2~0.4	1.2~1.6	267.4	0.025	265.6
4-2-1(6)			1.6~2.0	256.1	0.027	256.9
4-2-1(7)			0.8~1.2	273.7	0.023	274.7
4-2-1(8)	2~3	0.4~0.6	1.2~1.6	261.5	0.026	261.2
4-2-1(9)			1.6~2.0	252.3	0.028	252.7

由表 7 可知, 可以看出当拟合疲劳寿命结果与试验结果一致性较高时, 例如 4-2-1(1) 试件, 得到 a/t 值为 0.048, 此时 $a = 0.24$ mm, 即可认为含半径为 0.8~1.2 mm 内的表面气孔缺陷的十字接头的等效初始裂纹

值为 0.24 mm。

2.4 不同缺陷尺寸与等效初始裂纹尺寸的拟合结果

通过上述仿真与试验结果对应, 可以得到不同缺陷对应的不同等效初始裂纹值, 利用最小二乘法拟合

出缺陷尺寸与等效初始裂纹尺寸之间的近似关系,结果如图12、图13所示,其中气孔相对深度和气孔半径取中间值。该结果可为含有相同缺陷疲劳试件寿命预测提供参考。

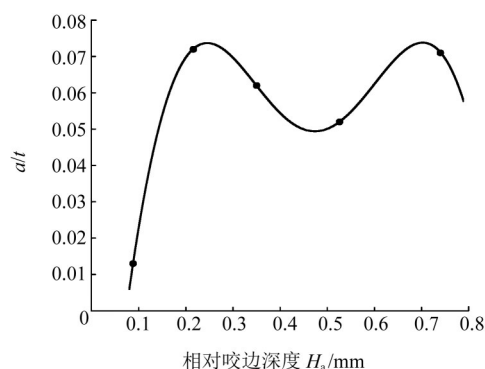


图12 咬边缺陷拟合结果

Fig. 12 Fitting result for undercut defects

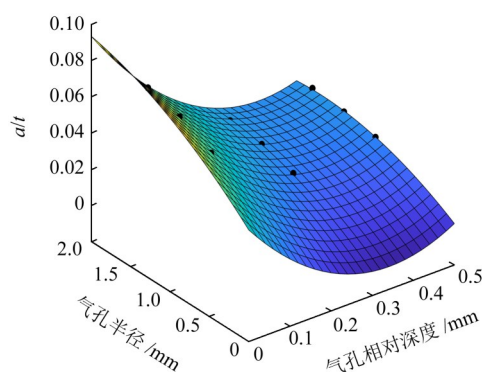


图13 气孔缺陷拟合结果

Fig. 13 Fitting results for porosity defects

3 结论

通过对含有不同焊接缺陷的十字接头和对接接头的试验及仿真的研究,得到如下结论:

1)对于钢焊接结构来说,评估其疲劳寿命时,应充分考虑到焊接缺陷的影响。不同缺陷对焊接接头疲劳寿命的影响程度由大到小依次为:咬边缺陷>错位缺陷>气孔缺陷。对比BS 7608:2014标准置信度为50%的S-N曲线,其对应的接头抗疲劳等级分别为F级、E级、D级。

2)随着载荷的增加,含咬边缺陷的试件疲劳寿命降低的速率明显高于其他缺陷。这是由于咬边缺陷存在于结构表面,在其根部会形成一个尖锐的凹陷,导致裂纹在试样表面迅速产生并蔓延,形成高度应力集中区域,随着加载幅值的增大,加速疲劳寿命的降低。气孔缺陷是一种体积缺陷,它的存在减小了横截面积尺寸,成为疲劳裂纹的起裂点,气孔的位置对结构寿命的影响较大,而气孔的尺寸对其影响较小,位于表面或表层下的气孔对试件疲劳强度的影响最

明显。

3)基于等效裂纹法提出了一种含不同焊接缺陷接头的等效建模方法,并以该方法对含不同咬边深度缺陷和不同气孔缺陷2个试验实例进行计算,得到了其对应的等效初始裂纹值,并使用最小二乘法拟合得到不同缺陷尺寸与等效裂纹尺寸之间的近似关系。在工程应用中存在许多无法模拟的焊接缺陷,可以利用该方法对其疲劳寿命进行评估。

参考文献(References)

- [1] 何春雨,余伟,唐荻. 铁路货车车体用钢的现状与研究发展趋势[J]. 热加工工艺,2020,49(16):15-20.
HE Chunyu, YU Wei, TANG Di. Current situation and research development trend of railway wagon body steel[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(16): 15-20. (In Chinese)
- [2] 马思群,谷理想,袁永文,等. 焊接缺陷对动车组铝合金车体疲劳寿命影响研究[J]. 铁道学报,2014,36(2):42-48.
MA Siqun, GU Lixiang, YUAN Yongwen, et al. Research on influence of welding defects on fatigue life of EMU aluminum-alloy car body[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(2): 42-48. (In Chinese)
- [3] 李晓峰,张浩森,安云驰. 轨道交通车辆车体关键焊缝抗疲劳设计及疲劳强度研究[J]. 城市轨道交通研究,2022,25(3):11-14.
LI Xiaofeng, ZHANG Haosen, AN Yunchi. Anti-fatigue design and fatigue strength study on key welds of rail transit vehicle body[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(3): 11-14. (In Chinese)
- [4] XU X Y, XIE L Y, ZHOU S, et al. Effect of welding defects on fatigue properties of SWA490BW steel cruciform welded joints[J]. Materials, 2023, 16(13): 4751.
- [5] CHEN H, YAO S H, YANG Y L, et al. Fatigue life prediction of aluminum alloys based on surface and internal defects[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, 32(19): 8687-8699.
- [6] JAVAHERI E, HEMMESI K, TEMPEL P, et al. Fatigue assessment of the welded joints containing process relevant imperfections[J]. Welding in the World, 2019, 63(2): 249-261.
- [7] 赵佳伟,陶友瑞,裴佳星,等. SUS304不锈钢点焊接头疲劳寿命研究[J]. 机械强度,2023,45(4):1005-1010.
ZHAO Jiawei, TAO Yourui, PEI Jiaxing, et al. Study on fatigue life of SUS304 stainless steel spot welded joints[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(4): 1005-1010. (In Chinese)
- [8] 缪素菲,刘敬喜,刘元丹,等. 焊接缺陷对铝合金板架疲劳寿命影响的试验分析[J]. 中国舰船研究,2019,14(1):95-101.
MIAO Sufei, LIU Jingxi, LIU Yuandan, et al. Test analysis on influence of welding defects on fatigue life of aluminum alloy plate frames[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(1): 95-101. (In Chinese)
- [9] 叶智伟,钟振华,姜旭. 考虑初始缺陷的顶板纵肋细节疲劳试验研究[C]//2023世界交通运输大会(WTC2023)论文集(上册). 武汉:世界交通运输大会执委会,2023:732-737.
YE Zhiwei, ZHONG Zhenhua, JIANG Xu. Research on detailed fatigue test of longitudinal roof rib considering initial defects[C]//

- Proceedings of the 2023 World Transport Congress (WTC2023) (Volume 1). Wuhan: Executive Committee of World Conference on Transport, 2023: 732-737. (In Chinese)
- [10] KURTULMUŞ M, DOĞAN E. The effects of undercut geometry on the static stress concentration factor of welds [J]. *Emerging Materials Research*, 2021, 10(3): 272-277.
- [11] STEIMBREGER C, CHAPETTI M D. Fatigue strength assessment of butt-welded joints with undercuts [J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 105: 296-304.
- [12] BSI. Fatigue design and assessment of steel structures: BS 7608: 2014[S]. England: BSI, 2014: 41-42.
- [13] 兆文忠, 李向伟, 董平沙. 焊接结构抗疲劳设计理论与方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 208.
- ZHAO Wenzhong, LI Xiangwei, DONG Pingsha. Theory and method of fatigue resistance design of welded structures[M]. Beijing: China Machine Press, 2017: 208. (In Chinese)
- [14] 黄伟. 钢板无损检测中超声探伤技术的应用分析[J]. *冶金管理*, 2023(6): 58-63.
- HUANG Wei. Application analysis of ultrasonic flaw detection technology in nondestructive testing of steel plates[J]. *China Steel Focus*, 2023(6): 58-63. (In Chinese)
- [15] 王哲, 王泽湘, 李权, 等. Q235/304 不锈钢异种钢焊接接头超声相控阵检测研究[J]. *机电工程技术*, 2024, 53(8): 66-70.
- WANG Zhe, WANG Zexiang, LI Quan, et al. Study on ultrasonic phased array inspection of Q235/304 stainless steel dissimilar welded joints [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2024, 53(8): 66-70. (In Chinese)
- [16] International Organization for Standardization. Welding fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) quality levels for imperfections: ISO 5847: 2023[S]. Geneva: ISO, 2023: 16-18.
- [17] 全国焊接及相关工艺标准化技术委员会. 焊接接头脉动拉伸疲劳试验方法: GB/T 13816—1992[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992: 190-198.
- National Technical Committee for Standardization of Welding and Allied Processes. Test method for pulsed tensile fatigue of welded joints: GB/T 13816—1992[S]. Beijing: Standards Press of China, 1992: 190-198. (In Chinese)
- [18] 罗友红, 吴晓, 丁正男, 等. 基于等效裂纹法的桥(门)式起重机箱形梁疲劳寿命估算[J]. *机械强度*, 2018, 40(1): 200-204.
- LUO Youhong, WU Xiao, DING Zhengnan, et al. Fatigue life prediction of box girder of bridge based on equivalent crack approach [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2018, 40(1): 200-204. (In Chinese)
- [19] ASME. Boiler and pressure vessel code: ASME BPVC VIII. 2—2023[S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2023: 177-182.

Research on the influence of welding defects on the fatigue life of welded joints and evaluation methods

LI Xiaofeng¹ ZHENG Yuhan² ZHANG Dailin² ZHANG Qiang^{2,3} WANG Shuai^{2,3}

(1. College of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

[2. Zhan Tianyou College (CRRC College), Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China]

(3. Department of Technical Center, CRRC Qiqihar Rolling Stock Co., Ltd., Qiqihar 161002, China)

Abstract: [Objective] Welding defects are the key factors which affect the welding quality and structural property. In this research, the influence and evaluation method on the fatigue life of welded joints with welding defects, which was Q450NQR1 high strength weathering steel, were discussed through tests and numerical simulation. [Methods] Firstly, cross joint and butt joint specimens with different defects were prepared, and the defects of the specimens were quantitatively analyzed by ultrasonic detection method in order to ensure the effectiveness of the test specimens. Secondly, fatigue tests were carried out. The influence regularity of the anti-fatigue performance of cross welded joints with different types of defects was analyzed based on the *S-N* curve of BS 7608:2014 standard. Finally, based on the tests, an equivalent modeling method for joints with different welding defects was proposed. [Results] The results show that the influence degree of different types of defects on the fatigue life of cross welded joints is as follows: undercut defect > misalignment defect > porosity defect, and the levels of anti-fatigue are F, E and D. The equivalent initial crack values of different defects were obtained by using the equivalent modeling method of welding defects. And the fitting results of different defect sizes and equivalent initial crack sizes were obtained by least square method. The research results can provide references for the fatigue life evaluation of steel welded structures with defects.

Key words: Q450NQR1 steel; Welded joint; Initial defect; Fatigue test; Equivalent crack

Corresponding author: LI Xiaofeng, E-mail:lixiaofeng2007@126.com

Fund: CRRC Research Project (2021CHA014)

Received: 2024-08-23 Revised: 2024-10-17

(编辑: 刘欢欢)