

Q355B钢对接接头气孔缺陷对疲劳寿命影响的 试验研究与数值模拟

熊海江¹, 赵东拂^{1,2,3,4,5}, 刘育民^{6*}, 郝佩远¹, 张菊¹

(1.北京建筑大学土木与交通工程学院,北京 100044; 2.北京建筑大学大型多功能振动台阵实验室,北京 100044; 3.北京建筑大学工程结构与新材料北京市高等学校工程研究中心,北京 100044; 4.北京建筑大学北京节能减排与城乡可持续发展省部共建协同创新中心,北京 100044; 5.北京建筑大学北京未来城市设计高精尖创新中心,北京 100044; 6.中电投工程研究检测评定中心有限公司,北京 100142)

摘要: 焊接过程常伴随着气孔、夹渣、咬边等缺陷的产生,这些缺陷在疲劳荷载作用下容易导致疲劳裂纹的产生和扩展。基于有限元分析软件ABAQUS结合断裂力学分析软件FRANC3D,本文建立了含气孔缺陷的对接接头有限元模型,并在应力集中最大值处植入裂纹,依据断裂力学M积分对含裂纹的模型进行数值模拟,得到了不同初始裂纹长度和焊缝宽度下裂纹尖端的应力强度因子。分析结果显示:裂纹尖端的应力强度因子对初始裂纹长度变化敏感,随初始裂纹长度增加而增加,而裂纹两端的应力强度因子则呈相反趋势;增加焊缝宽度可以显著降低应力强度因子,随着焊缝宽度的增加,应力强度因子的降低趋势逐渐变缓。在此基础上,采用断裂力学Paris公式建立了含气孔缺陷对接接头疲劳寿命预测模型,通过试验验证了该模型的准确性,结果显示:除个别试件外,模型预测结果与试验结果误差低于20%,该模型可以较为准确地预测含气孔缺陷对接接头的疲劳寿命。

关键词: 对接接头; 气孔缺陷; 疲劳寿命; FRANC3D; 断裂力学; 初始裂纹长度; 应力强度因子

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)12-0062-08

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240703001

Experimental Study and Numerical Simulation of the Effect of Porosity Defects on Fatigue Life of Q355B Steel Butt Joints

XIONG Haijiang¹, ZHAO Dongfu^{1,2,3,4,5}, LIU Yumin^{6*}, HAO Peiyuan¹, ZHANG Ju¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Multi-Functional Shaking Tables Laboratory, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Structural Engineering and New Materials, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 4. Beijing Energy Conservation & Sustainable Urban and Rural Development Provincial and Ministry Co-construction Collaboration Innovation Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 5. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 6. C+E Center for Engineering Research Test and Appraisal Co., Ltd., Beijing 100142, China)

*Corresponding author: lymsfjd@163.com

收稿日期: 2024-07-03

作者简介:

熊海江(2000—),男,硕士研究生,主要从事钢结构疲劳方面的研究。E-mail: xionghaijiang1018@163.com。

赵东拂(1967—),男,博士,教授,主要从事结构理论及工程应用和公共安全方面的研究。

通信作者:

刘育民(1979—),男,硕士,正高级工程师,主要从事钢结构抗火性能方面的研究。E-mail: lymsfjd@163.com。

Abstract: The welding process is often accompanied by the generation of defects such as porosity, slag inclusion, undercut, which can easily lead to the generation and expansion of fatigue cracks under fatigue loading. Using finite element software ABAQUS combined with fracture mechanics analysis software FRANC3D, a finite element model of the butt weld joint with porosity defects was established, and a crack was introduced at the location of maximum stress concentration. The numerical simulation of the cracked model was carried out based on the M-integral of fracture mechanics, and the stress intensity factors at the crack tip were obtained under different initial crack lengths and weld widths. The analysis results show that the stress intensity factor at the crack tip is sensitive to the change of the initial crack length and increases with the increase of the length, while the stress intensity factor at the two ends of the crack shows the opposite trend. The increase of the weld width can significantly reduce the stress intensity factor, and this trend gradually slows down with the increase of the weld width. On this basis, the fatigue life prediction model of butt joints with porosity defects was established by using the fracture mechanics Paris formula. The accuracy of the model was verified through the test, and the results showed that, except for some specimens, the error between the predicted and test results was less than 20%. The fatigue life of the butt joints with porosity defects could be predicted accurately.

Keywords: butt joint; porosity defect; fatigue life; FRANC3D; fracture mechanics; initial crack length; stress intensity factor

在工程结构中,焊接是一种被广泛应用的连接方式,常用于建筑、航空、桥梁等领域。由于焊接接头形成过程的特殊性,焊接接头往往是结构中的薄弱环节,容易成为裂纹和疲劳损伤的起始点^[1]。因此,对焊接结构的疲劳性能进行深入研究,不仅是保障结构安全性的需要,也是提高结构经济性和可靠性的关键。

目前,各国规范^[2-4]均采用基于S-N曲线的名义应力法来评估钢结构疲劳寿命。这些方法通过统计不同应力水平下的疲劳寿命数据绘制S-N曲线,为工程设计提供指导。然而,这一方法在准确评估疲劳寿命方面存在诸多问题。首先,随着钢结构研究的推进与工程实践的演变,不断涌现出新的连接方法和节点形式。而现有的设计规范中缺乏此类新型节点形式的设计方法,故而通常需要开展足尺疲劳试验来验证其疲劳性能。然而,这类试验成本较高且结果代表性不足。有限的试验数量无法提供可靠的S-N设计曲线,且试件与实际结构在边界条件和应力分布上存在差异,难以确保构造的绝对安全性。其次,基于S-N曲线的评估方法需要确定结构的荷载历史^[5],对于许多既有钢结构,其荷载历史已无法确定,因此无法评估这些结构的剩余疲劳寿命。断裂力学方法为现有结构疲劳寿命评估方法所面临的困难提供了一种新的思路。相比于基于S-N曲线的评估方法,断裂力学方法能够更全面地考虑材料的断裂行为和裂纹扩展机制,从而避免了基于S-N曲线评估方法对于连接形式和荷载历史的依赖。

近年来,断裂力学在疲劳寿命评估领域的应用研究取得了显著成果,主要集中在对于新型材料和裂纹扩展机理的深入研究。一些学者^[6-8]针对新型材料的断裂力学性能进行了试验研究,测定了这些材料的裂纹扩展速率,并分析了温度、应力比等因素对裂纹扩展性能的影响。对于含缺陷对接接头疲劳性能的研究,GAJDOS等^[9]利用电火花方法在焊缝中制造裂纹缺陷,通过试验

确定裂纹位置对对接接头疲劳寿命的影响,使用断裂力学方法计算了裂纹从表面小裂纹到断裂的疲劳寿命。NIRAULA等^[10]探讨了激光MAG混合对接接头中局部焊缝几何参数对疲劳强度的影响,揭示了焊缝缺口几何参数在疲劳裂纹扩展中的关键作用。但目前针对内部气孔缺陷的对接接头的疲劳寿命研究较少,这类缺陷一旦在焊接过程中形成,会在气孔周围产生显著的应力集中,严重影响焊接结构的力学性能。

本文采用试验研究和有限元模拟的方法,基于断裂力学理论,使用ABAQUS和FRANC3D联合建模,分析了含气孔缺陷的对接接头在不同焊缝宽度和不同初始裂纹长度情况下的应力强度因子。随后,基于Paris公式建立裂纹疲劳寿命预测模型,通过试验验证了有限元分析结果和疲劳寿命预测模型的准确性。

1 试验概况

1.1 试件设计

为了研究含气孔缺陷对接接头的疲劳性能,并分析不同应力水平下不同焊缝宽度对疲劳寿命的影响,本文设计了尺寸为280 mm×50 mm×20 mm(长×宽×厚)的骨形试样,试样焊缝宽度分别为20 mm、25 mm和30 mm,详细参数如图1所示。试件由大焊板切割而成,采用气体保护焊进行焊接,焊接电压为30±2 V,层间温度控制在150℃以内。焊接前,使用线切割机在焊接板上切出所需坡口,并清理坡口以防止在焊接过程中形成不可控缺陷。在焊接过程中,采用了机械钻孔与焊接相结合的技术,精确控制气孔缺陷。具体而言,当焊接进行至中部区域时,使用高精度钻头在指定位置进行钻孔操作,所预制缺陷的气孔体积约为12 mm³,呈椭球形,几何尺寸为长轴约1.7 mm、短轴约1.3 mm(图2)。钻孔完成后,立即进行补焊,确保气孔缺陷完全封闭在焊缝内部。焊接完成后,使用铣床将试样铣平,去除上下余高,并使

用打磨机将试样表面打磨平整,使平行段表面粗糙度低于 $0.2\ \mu\text{m}$ 。为减少疲劳试验中的应力集中现象,进一步将试样四周棱角磨为圆角,保持其余表面的粗糙度在 $10\ \mu\text{m}$ 以下。为验证气孔缺陷的形成效果,采用X射线无损检测技术,对焊缝内部气孔的几何形状及位置进行确认,确保其与设计预期一致。同时,确保焊缝质量(除预制气孔缺陷外)符合一级焊缝质量标准。

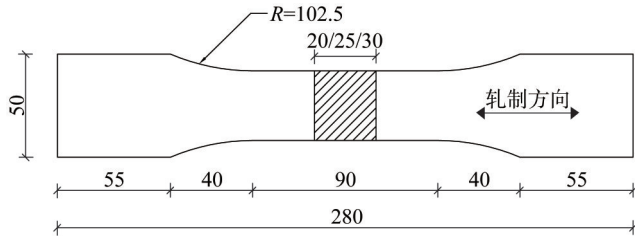


图1 对接接头试样几何参数(单位:mm)

Fig. 1 Geometric parameters of butt joint specimen (unit:mm)

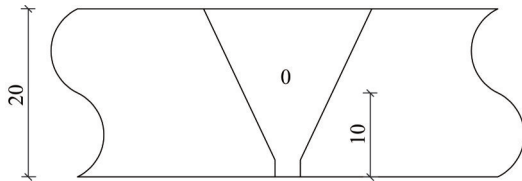


图2 缺陷位置示意图(单位:mm)

Fig. 2 Defect location diagram (unit:mm)

对接接头的母材采用Q355B低合金高强度结构钢,焊丝选用 $\Phi 1.2\ \text{mm}$ 的ER50-6,其化学成分和力学性能如表1、表2所示。

1.2 加载装置

疲劳试验使用QBG-250高频疲劳试验机,加载装置和固定后的试样如图3所示。在加载前,预热试验机以确保试验过程中的稳定性。固定试样时,确保试验轴线与加载方向一致,夹紧力适中,既不损伤试样也不滑脱。通过软件控制试验应力水平(由最大应力 σ_{\max} 和最小应力 σ_{\min} 所决定,当给定应力比 R 时,其应力水平由最大应力表示),试验中分别选取160 MPa、180 MPa、200 MPa和220 MPa为最大应力,采用应力比 $R=-1$ 的恒定振幅正弦加载方法,应力轴平行于钢材的轧制方向。为了

提高试验效率并控制试件温度以保证结果的准确性,试验机采用自适应频率为 $140\pm 5\ \text{Hz}$ 的恒定振幅正弦加载方法,以便在达到足够的疲劳循环次数的同时避免试样过热对疲劳性能的影响。

1.3 试验结果

试件表面温度在试验机启动后快速升高,随后一直保持温热状态,试件断裂后,断裂面温度明显高于表面温度。其原因是对接接头表面与周围环境之间的热交换达到平衡后,试样表面温度便趋于稳定,而裂纹断面之间的相互挤压和摩擦导致对接接头断裂面的温度高于试样表面温度。表3为疲劳试验的结果,从试验结果中可以看出:应力水平与循环次数之间呈负相关关系。当应力水平从160 MPa提高到220 MPa后,试件疲劳寿命的数量级从 10^6 下降到 10^4 。

试件断裂后,从其断裂面可以看出,气孔缺陷与断裂面处于同一平面,如图4所示。气孔周围有明显的应力集中现象,裂纹在气孔边缘处产生并向四周延伸。其中一条裂纹长度最长,颜色最深,是疲劳扩展的主裂纹,即图中红色圆圈所圈出的裂纹。由于材料内部微观组织结构的影响,裂纹扩展路径略微曲折。断裂面分为三个区域:气孔缺陷周围的深灰色区域、左上角的光滑区域和其余的粗糙区域。这些区域分别对应疲劳扩展源区、疲劳扩展区和瞬断区。疲劳扩展区的光滑表面源于裂纹在交变荷载下的反复开合与研磨作用,该过程导致了其微观形貌的平滑化。瞬断区的断口形貌与静力拉伸破坏的断口形貌相似^[11],其原因是随着疲劳裂纹的扩展,对接接头试样的有效面积逐渐减小,直至剩余截面无法继续承受疲劳荷载,试样在高应力水平下快速失稳,并在极短的时间内发生疲劳破坏。

2 有限元分析

2.1 ABAQUS静力分析

采用有限元分析软件ABAQUS结合断裂力学分析软件FRANC3D进行裂纹扩展数值模拟,模型由对接接头整体模型和含裂纹缺陷的子模型组成。使用ABAQUS建立包含材料参数、网格模型、边界条件和荷载的有限元模型,静力分析结果如图5所示。从静力分析结果中可以观察到,气孔缺陷周围存在显著的应力集

表1 钢材和焊丝的化学成分

Table 1 Chemical composition of steel and wire

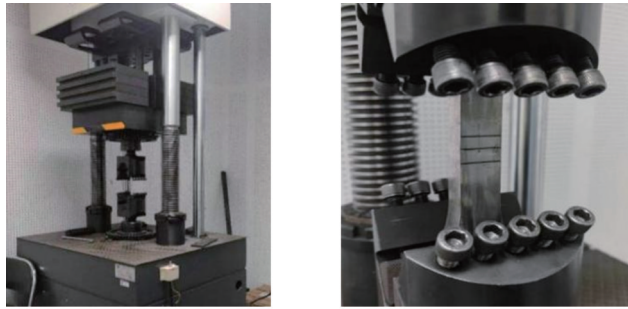
%

材料牌号	C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu	Ni	Nb	V	Mo
Q355B	0.160	1.410	0.210	0.013	0.018	0.200	0.320	0.221	0.012	—	—
ER50-6	0.090	1.620	0.860	0.015	0.012	0.020	0.120	0.010	—	0.010	0.020

表2 钢材和焊丝的力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel and wire

材料牌号	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	断后伸长 率/%	冲击功/J
Q355B	355	≥470	≥22	≥34
ER50-6	460	≥420	≥22	≥27



a) 疲劳试验机 b) 试样固定

图3 加载装置与固定后试样

Fig. 3 Loading setup and fixed specimen

表3 疲劳试验结果

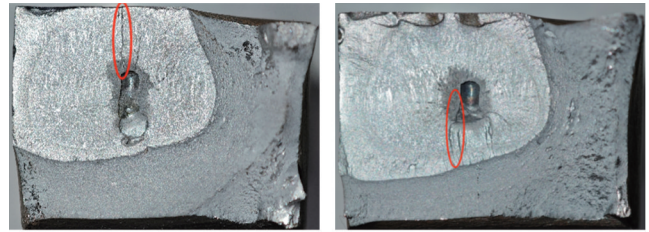
Table 3 Fatigue test results

应力水平/MPa	试件编号	疲劳寿命/次数
160	S-160-20	2 000 000(未断裂)
	S-160-25	2 000 000(未断裂)
180	S-180-20	315 000
	S-180-25	93 800
	S-180-30	229 000
200	S-200-20	75 000
	S-200-25	161 400
	S-200-30	218 100
220	S-220-20	45 700
	S-220-25	67 100
	S-220-30	88 300

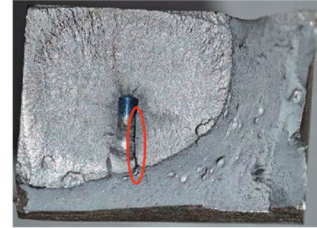
注:试件编号中前面数字代表试验的应力水平值,后面数字代表焊缝宽度。

中现象,最大值为473 MPa,对该部分建立单元集合,并将其导入到FRANC3D中,在应力集中最大值处植入裂纹。裂纹植入后,对裂纹尖端的网格进行加密处理,来提高分析结果的准确性,裂纹植入位置如图6所示。

在裂纹扩展模拟过程中,通过计算裂纹尖端的应力强度因子,预测裂纹的扩展趋势,并评估其对结构疲劳寿命的影响。裂纹扩展路径如图7所示,当应力水平为180 MPa、焊缝宽度为20 mm时,裂纹尖端的应力强度因子 K_I 随裂纹扩展的变化曲线如图8所示。从图8中可以



a) 焊缝宽度20 mm b) 焊缝宽度25 mm



c) 焊缝宽度30 mm

图4 对接接头疲劳试验破坏断面

Fig. 4 Damage section of butt joint fatigue test

看出,裂纹尖端的应力强度因子 K_I 随着裂纹的扩展逐渐增大。这表明,随着裂纹扩展,尖端的应力集中效应增强。特别是在试件断裂前, K_I 的增长速率显著加快,这标志着裂纹已进入失稳扩展阶段。

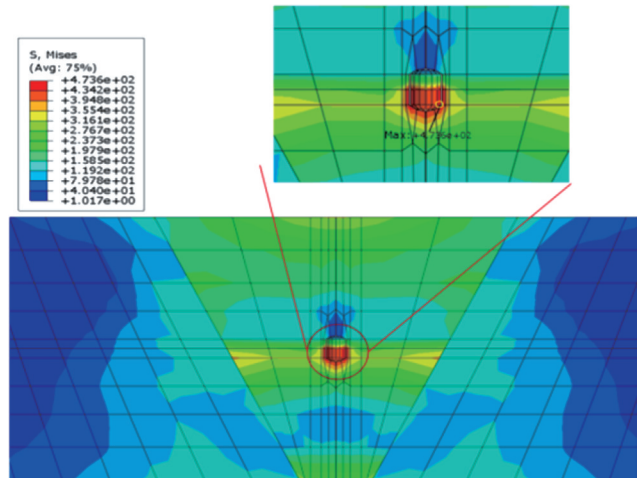


图5 静力分析应力云图(单位:MPa)

Fig. 5 Static analysis stress contour (unit:MPa)

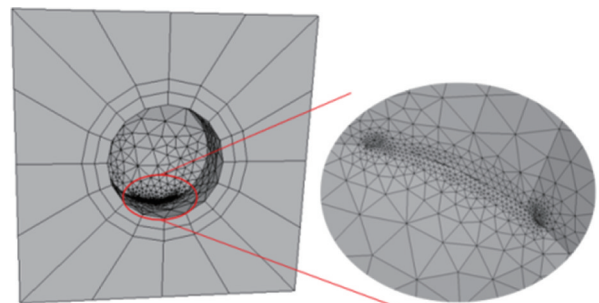


图6 植入裂纹后网格加密

Fig. 6 Mesh refinement after crack implantation

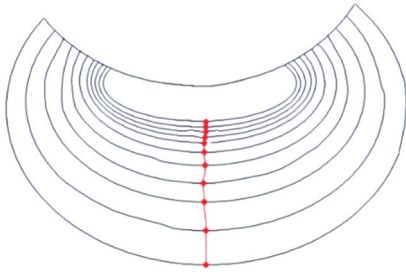


图7 裂纹扩展路径

Fig. 7 Crack expansion path

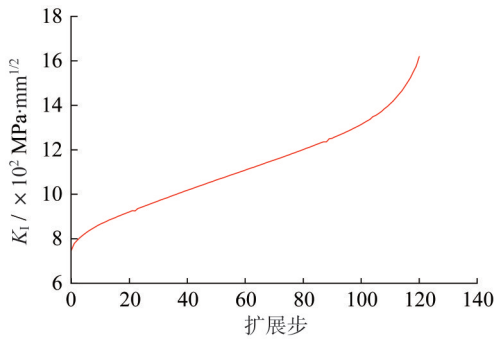
图8 裂纹尖端应力强度因子 K_I 随裂纹扩展变化曲线

Fig. 8 Variation curve of crack tip stress intensity factor with crack expansion

2.2 应力强度因子

应力强度因子是用于描述裂纹尖端应力场强度的参数,应力强度因子的数值越大,则裂纹尖端附近的应力就越大,裂纹扩展的可能性就越高。应力强度因子通常用 K 表示,并根据裂纹发展的模式^[12]分为 K_I (模式I,张开模式)、 K_{II} (模式II,滑移模式)、 K_{III} (模式III,撕裂模式),应力强度因子的通用表达式为:

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

式中: σ 为远场应力; a 是裂纹长度; Y 为考虑不同裂纹发展模式的几何修正因子。

使用FRANC3D生成含裂纹的网格模型后,调用ABAQUS求解器计算裂纹附近的应力分布和位移场,然

后导入FRANC3D软件中计算出裂纹尖端应力强度因子 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} ,FRANC3D软件提供了两种计算应力强度因子的方法^[13]:M积分法和位移相关法。位移相关法较易理解和实施,但精度不高,通常用于检查零部件使用中是否健康,不适合裂纹疲劳分析。M积分法是FRANC3D的默认计算方法,它通过路径独立的积分形式,提供了一种有效计算能量释放率和预测裂纹扩展的方法,其数值上与J积分类似,能够提供更高的求解精度。采用M积分法进行裂纹疲劳分析,其表达式^[14]如下:

$$\overline{M}^{(1,2)} = \int_{\Gamma} \left(\sigma_{ij}^{(1)} \frac{\partial u_i^{(2)}}{\partial x_1} + \sigma_{ij}^{(2)} \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x_1} \right) \frac{\partial q}{\partial x_j} ds - \int_{\Gamma} (W^{1,2} \delta_{ij}) \frac{\partial q}{\partial x_j} ds \quad (2)$$

$$W^{1,2} = \sigma_{ij}^{(1)} \varepsilon_{ij}^{(2)} = \sigma_{ij}^{(2)} \varepsilon_{ij}^{(1)}$$

式中: Γ 为围绕裂纹尖端的积分回路; σ_{ij} 表示应力张量; u_i 表示位移矢量分量; x_i 表示坐标变量; q 是一个权重函数,用于确保积分路径无关性; W 是相互作用应变能密度; ε_{ij} 表示应变张量分量; δ 是克罗内克符号,当 $i=j$ 时为1,否则为0;下标 i 和 j 是张量索引,用于表示应力、应变和位移张量的分量。

M积分与应力强度因子关系为:

$$\overline{M}^{(1,2)} = \frac{1-\nu^2}{E} K_I^{(1)} K_I^{(2)} + \frac{1-\nu^2}{E} K_{II}^{(1)} K_{II}^{(2)} + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^{(1)} K_{III}^{(2)} \quad (3)$$

式中: ν 是泊松比, E 是杨氏模量

使用FRANC3D软件对应力水平为180 MPa、焊缝宽度为20 mm的对接接头裂纹尖端应力强度因子求解,结果如图9所示。从图中可以看出, K_I 最大,为762.1 MPa·mm^{1/2},而 K_{II} 和 K_{III} 远小于 K_I ,这是因为在焊接过程引入的热循环会在材料中产生不均匀的温度场和应力场,这种情况下产生的应力通常垂直于可能形成的裂纹面,从而导致焊缝区域存在较大的残余拉应力。由于 K_{II} 、 K_{III} 的应力强度因子较小,对疲劳寿命的影响远小于 K_I ,后文不再给出 K_{II} 和 K_{III} 的大小。

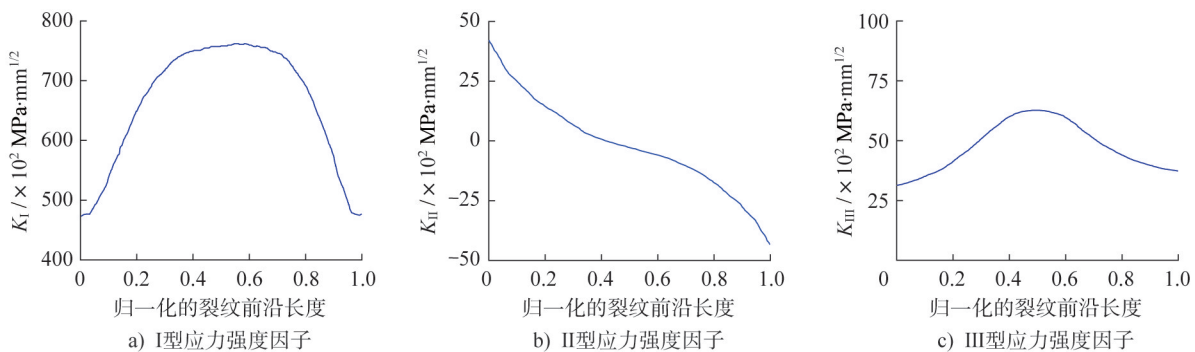


图9 三种应力强度因子求解结果

Fig. 9 Results of three stress intensity factors

2.3 不同裂纹长度的影响

当应力水平为180 MPa、焊缝宽度为20 mm不变时,改变椭圆初始裂纹长轴半径 $a=0.25、0.50、0.75、1.00$ mm,短轴半径 $b=0.4a$ 。图10给出了不同初始裂纹长度的应力强度因子 K_I 在裂纹前沿相对位置的大小,即半椭圆形裂纹前沿上的裂纹点到起始点的弧长与整个弧长的比值。

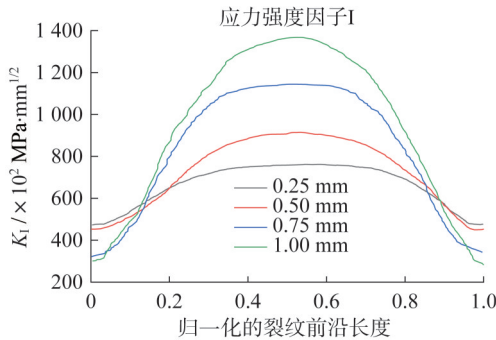


图10 不同初始裂纹长轴半径下的对接接头 K_I 沿裂纹前沿相对位置的大小

Fig. 10 Magnitude of the relative position of butt joint K_I along the crack leading edge with different initial crack long-axis radius

从图中可以看出,裂纹应力强度因子中间大两端小,裂纹中间前沿应力强度因子随初始裂纹长度的增加而增大,在长轴半径 a 分别为0.25 mm、0.50 mm、0.75 mm和1.00 mm的情况下,最大应力强度因子 K_I 分别为762.1 MPa·mm^{1/2}、914.9 MPa·mm^{1/2}、1144.4 MPa·mm^{1/2}、1367.9 MPa·mm^{1/2}。相反地,裂纹两端的应力强度因子随着初始裂纹长度的增加而减少,但减少的幅度远小于中间部分应力强度因子的增加幅度。

2.4 不同焊缝宽度的影响

在研究焊缝宽度对应力强度因子 K_I 的影响时,保持初始裂纹长轴半径0.25 mm不变,焊缝宽度取20 mm、25 mm、30 mm,重新建立一系列的有限元模型进行计算分析,计算结果如图11所示。

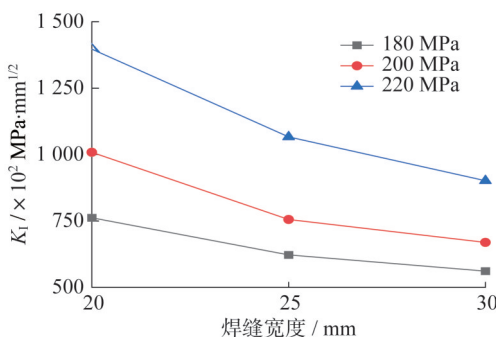


图11 不同焊缝宽度下 K_I 随应力水平变化

Fig. 11 Variation of K_I with stress level under different weld widths

从图中可以观察到,随着焊缝宽度的增加, K_I 显著减小。这种现象是因为焊缝宽度的增加导致焊缝区域内应力重新分布,裂纹尖端的应力集中效应减弱。具体来说,增加焊缝宽度增强了焊接区域的整体刚度,从而降低了裂纹尖端的应力集中程度^[15]。此外,疲劳加载的应力水平对 K_I 的影响是显著的,在更高的应力水平(220 MPa)下, K_I 的值整体较高,这表明高应力水平下裂纹的扩展趋势更大。值得注意的是, K_I 在所有应力水平下都随焊缝宽度的增加而降低,变化趋势具有一致性,但随着焊缝宽度的增加,其下降的速率有所减缓。

3 疲劳寿命分析

3.1 疲劳裂纹扩展模型

常见的疲劳裂纹扩展模型^[16-18]有Paris定律、Forman定律、Walker模型、NASGRO方程、基于蒙特卡洛方法的裂纹扩展概率模型。Paris定律是描述材料疲劳裂纹扩展行为最基本也是应用最广泛的模型之一,其形式简单,具有广泛的适用性,经过数十年的研究和实践,Paris定律已被广泛验证。其他模型如Forman定律、Walker模型和NASGRO方程等,通过引入额外的参数或修正项来克服Paris定律的局限性,但其本质是Paris定律的拓展。

Paris定律揭示了裂纹在材料中扩展的动力学过程,建立了应力强度因子范围与裂纹扩展速率之间的幂律关系,为疲劳寿命的预测提供了一种量化方法,其基本形式^[19]为:

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (4)$$

式中: da/dN 为裂纹增长率; C 和 m 是材料相关的常数。 ΔK 表示应力强度因子变化范围,由最大和最小应力强度因子的差值给出:

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (5)$$

可以得到疲劳寿命 N 的表达式:

$$N = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C(\Delta K)^m} da \quad (6)$$

式中: a_f 为临界裂纹长度; a_i 为初始裂纹长度。

3.2 疲劳寿命

将有限元模拟中获得的应力强度因子代入Paris定律中,计算裂纹扩展速率。通过迭代计算^[20],确定从初始裂纹长度到最终断裂裂纹长度的裂纹扩展过程,计算流程见图12。综合考虑材料特性来评估不同焊缝宽度的试件在不同应力水平下的疲劳寿命。目前,国内对于Q355B钢在裂纹扩展速率方面的材料参数数据较少,为了计算疲劳寿命,选取与Q355B钢性能相似的S355钢的材料参数^[21], C 、 m 分别取3和 1.125×10^{-13} 。

最终得到试件在裂纹稳定扩展阶段的疲劳寿命 $S-N$ 曲线,如图13所示。大多数试件的预测寿命与实际寿命

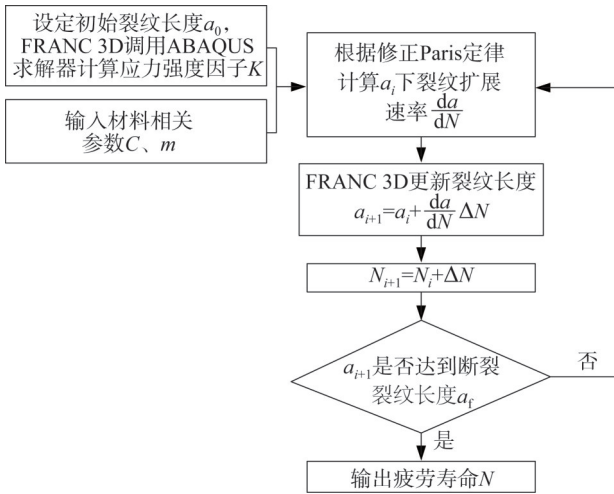


图 12 疲劳寿命计算流程图

Fig. 12 Flowchart for fatigue life calculation

误差在 20% 以下,考虑到疲劳问题的高度离散性,所提出的 S-N 曲线与实际试验结果吻合良好。

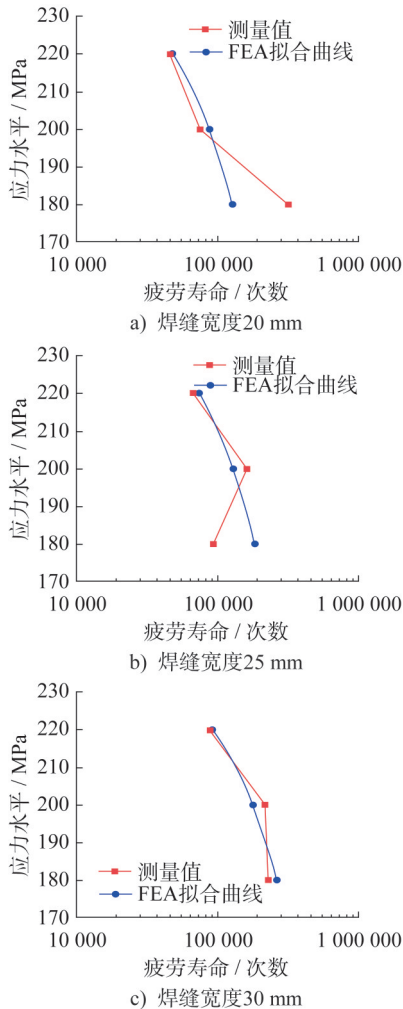


图 13 有限元分析的 S-N 曲线与实测值对比

Fig. 13 Comparison of S-N curves between finite element analysis and measured value

4 结论

本文采用有限元软件 ABAQUS 结合 FRANC3D 软件计算得到 Q355B 钢对接接头裂纹扩展的应力强度因子,分析了不同条件下的裂纹与应力强度因子之间的关系。主要结论如下:

(1) 焊接接头气孔缺陷周围存在显著的应力集中现象,疲劳裂纹从气孔边缘产生并向四周扩展。试件断裂截面分为两个部分:光滑部分对应疲劳稳定扩展阶段,而粗糙部分是由于疲劳失稳导致试件在极短时间内快速断裂。

(2) 初始裂纹长度对裂纹尖端的应力强度因子影响较为明显,裂纹尖端的应力强度因子随初始裂纹长度增加而增大,裂纹两端的应力强度因子则相反。

(3) 增加焊缝宽度可以显著降低应力强度因子,随着焊缝宽度的增加,应力强度因子的降低趋势逐渐变缓。这一现象表明,在初期增加焊缝宽度可以有效地提高结构的抗疲劳性能。然而,继续增加焊缝宽度,虽然仍然能降低应力强度因子,但效果逐渐减弱。

(4) 基于断裂力学理论,通过联合使用 ABAQUS 和 FRANC3D 建模,可以有效预测复杂焊接结构的疲劳寿命。对于含初始气孔缺陷的对接接头疲劳寿命预测,大多数试件的预测寿命与实际寿命的误差在 20% 以内,考虑到疲劳问题的高度离散性,本文所拟合出的 S-N 曲线能够有效用于含气孔缺陷对接接头的疲劳寿命评估。

参考文献:

- [1] BRAUN M, FISCHER C, BAUMGARTNER J, et al. Fatigue crack initiation and propagation relation of notched specimens with welded joint characteristics[J].Metals, 2022, 12(4):615.DOI:10.3390/met12040615.
- [2] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of Steel Structures—Part 1-9: Fatigue; EN 1993-1-9 [S]. Brussels:European Committee for Standardization, 2005.
- [3] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications[S]. Washington, D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2017.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2017. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People’s Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China. Standard for Design of Steel Structures; GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [5] 王春生, 陈艾荣, 陈惟珍. 铆接钢桥剩余寿命与使用安全评估实例[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(4):

- 461-466.
- WANG Chunsheng, CHEN Airong, CHEN Weizhen. Assessment methods of remaining fatigue life and service safety of riveted steel bridges[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(4): 461-466. (in Chinese)
- [6] 夏日, 郑小梅, 杨旭峰, 等. 粉末高温合金FGH4095的蠕变疲劳裂纹扩展行为研究[J/OL]. 应用力学学报, 2024: 1-8. (2024-04-28). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=YYLX20240424001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- XIA Ri, ZHENG Xiaomei, YANG Xufeng, et al. Study on creep-fatigue crack growth behavior of sintered metallurgy superalloy FGH4095 [J/OL]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2024: 1-8. (2024-04-28). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=YYLX20240424001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese)
- [7] 张弛, 周文龙, 王敏涓, 等. SiC_t/TC17复合材料的疲劳断裂机理研究[J]. 材料科学与工艺, 2025, 33(4): 14-21. DOI: 10.11951/j.issn.1005-0299.20240011.
- ZHANG Chi, ZHOU Wenlong, WANG Minjuan, et al. Study on fatigue fracture mechanism of SiC_t/TC17 composites[J]. Materials Science and Technology, 2025, 33(4): 14-21. DOI: 10.11951/j.issn.1005-0299.20240011. (in Chinese)
- [8] CHOI J, LEE H, LEE H, et al. A methodology to predict the fatigue life under multi-axial loading of carbon fiber-reinforced polymer composites considering anisotropic mechanical behavior [J]. Materials, 2023, 16(5): 1952. DOI: 10.3390/ma16051952.
- [9] GAJDOS L, SPERL M. Fracture mechanics based analysis of the fatigue life of defective welded joints [J]. Materials Transactions, 2020, 61(5): 926-934. DOI: 10.2320/matertrans.mt-m2019258.
- [10] NIRAULA A, REMES H, LEHTO P. Local weld geometry-based characterization of fatigue strength in laser-MAG hybrid welded joints[J]. Welding in the World, 2023, 67(6): 1527-1544. DOI: 10.1007/s40194-023-01488-5.
- [11] KRUPP U. Fatigue crack propagation in metals and alloys[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [12] 王大鹏, 王景春, 张先萌, 等. 考虑列车荷载的隧道衬砌裂缝疲劳扩展可靠性分析[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(6): 95-102.
- WANG Dapeng, WANG Jingchun, ZHANG Xianmeng, et al. Reliability analysis on fatigue propagation of tunnel lining cracks considering train load [J]. China Railway Science, 2023, 44(6): 95-102. (in Chinese)
- [13] ZHANG M, ZHANG F, XU B S. Numerical simulation of crack propagation of Brazilian disk with central crack under composite fracture criterion using in tight reservoir development [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2019, 28(10): 7530-7536.
- [14] 程靳, 赵树山. 断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- CHENG Jin, ZHAO Shushan. Fracture mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [15] ZHANG Y-H, LONDON T, DEBONO D. Magnification factor mk and its parametric solutions for fatigue crack growth assessment of flaws at weld root toes in girth welds [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2020, 142: 011605. DOI: 10.1115/1.4044652.
- [16] MALLOR C, CALVO S, NUNEZ J L, et al. Full second-order approach for expected value and variance prediction of probabilistic fatigue crack growth life [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 133: 105454. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105454.
- [17] VASSEUR J, LEFEBVRE F, VASIUKOV D, et al. Methodology of fatigue life assessment on components with porosity clusters [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, 108: 102619. DOI: 10.1016/j.tafmec.2020.102619.
- [18] GUO K M, YAN H, HUANG D W, et al. Active learning-based KNN-Monte Carlo simulation on the probabilistic fracture assessment of cracked structures [J]. International Journal of Fatigue, 2022, 154: 106533. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106533.
- [19] PARIS P, ERDOGAN F. A critical analysis of crack propagation laws [J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85(4): 528-533. DOI: 10.1115/1.3656900.
- [20] 肖顺, 童乐为. H形钢梁疲劳裂纹扩展过程数值模拟[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(6): 101-108. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.06.011.
- XIAO Shun, TONG Lewei. Numerical simulation of fatigue crack propagation process of H-steel beams [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(6): 101-108. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.06.011. (in Chinese)
- [21] XIN H H, VELJKOVIC M. Residual stress effects on fatigue crack growth rate of mild steel S355 exposed to air and seawater environments [J]. Materials & Design, 2020, 193: 108732. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108732.