

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.118



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# Q550E 高强钢及焊接接头的疲劳裂纹扩展研究

马亚飞,程尔祥,吴显顺,何羽,王磊  
(长沙理工大学土木工程学院,湖南长沙 410114)

**摘要:**焊接构造是钢桥的薄弱部位,在反复车辆荷载作用下,疲劳损伤正逐步成为影响桥梁服役安全的关键问题之一。以 Q550E 高强钢为研究对象,开展母材和对接焊缝接头的静力拉伸和疲劳裂纹扩展试验,建立母材及焊接连接件的疲劳裂纹增长模型,揭示了应力比对高强钢焊接节点疲劳裂纹扩展速率的影响规律;开展基于 FRANC3D 和 ABAQUS 的联合仿真模拟分析,通过敏感性分析明确关键影响参数。结果表明:随着应力比的增大,疲劳裂纹扩展速率参数  $m$  增大、 $\lg C$  减小,应力强度因子门槛值减小;对接焊缝  $m$  值约为母材的 2 倍,对接焊缝裂纹门槛值大于母材,且对应力比更敏感;联合仿真方法可准确预测高强钢焊接接头疲劳寿命,高应力比下试件厚度和初始裂纹深度对疲劳扩展影响显著。

**关键词:**桥梁工程;Q550E 高强钢;焊接接头;疲劳裂纹;有限元分析

**中图分类号:**U448.36;TG407 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2025)01-0142-10

## Fatigue crack growth of Q550E high strength steel and welded joint

MA Yafei, CHENG Erxiang, WU Xianshun, HE Yu, WANG Lei

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, P. R. China)

**Abstract:** Welded detail is the weak part of steel bridges. The fatigue damage of the welded joint is becoming one of key problems affecting the service safety of bridges under repeated vehicle loads. This study conducted static tensile and fatigue crack growth (FCG) tests of the base metal and weld joint of Q550E high strength steel. The FCG models of base metal and welded joint were established, and the effects of stress ratio on the FCG rate of welded joints of high strength steel were revealed. The coupled simulation method of FRANC3D and ABAQUS was performed, and the key influence parameters were determined by sensitivity analysis. The results show that the FCG rate parameter  $m$  increases with the increase of stress ratio. The FCG rate parameter  $\lg C$  and the threshold stress intensity factor range decreases. The parameter  $m$  of butt weld specimen is about twice that of base steel. The threshold stress intensity factor range of weld joint is larger than the base steel and more sensitive to the stress ratio. The developed coupled simulation method can accurately predict the fatigue life of high strength steel welded joints. The specimen thickness and initial crack depth have a significant impact on the fatigue growth under high stress ratio.

**Keywords:** bridge engineering; Q550E high-strength steel; welded joint; fatigue crack; finite element analysis

**收稿日期:**2022-07-25

**基金项目:**国家自然科学基金(52178107);湖南省自然科学基金创新研究群体项目(2020JJ1006);湖南省研究生科研创新项目(CX20210776)

**作者简介:**马亚飞(1984-),男,教授,博士生导师,主要从事桥梁可靠性及耐久性评估研究,E-mail:yafei.ma@csust.edu.cn.

**Received:** 2022-07-25

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 52178107); Science Fund for Creative Research Groups of Hunan Province (No. 2020JJ1006); Hunan Provincial Innovation Foundation for Postgraduates (No. CX20210776)

**Author brief:** MA Yafei (1984-), professor, doctoral supervisor, main research interests: bridge reliability and durability assessment, E-mail:yafei.ma@csust.edu.cn.

高性能钢材具有良好的延性、韧性、可焊性及结构自重轻等优点,在大跨度钢桥中应用广泛<sup>[1]</sup>。随着车辆轴重和交通量不断增长,疲劳损伤正成为影响钢桥服役安全的关键问题之一<sup>[2]</sup>,Point Pleasant 大桥、首尔圣水大桥均因关键钢构件疲劳断裂而发生垮塌<sup>[3-4]</sup>。焊接构造为钢桥薄弱部位,焊缝在加工过程中不可避免存在气泡、夹渣等缺陷。缺陷处往往存在应力集中,疲劳荷载作用下易诱发裂纹萌生。此外,焊接过程会产生残余应力,焊接残余应力在疲劳裂纹增长(Fatigue Crack Growth,FCG)过程中会发生重分布,导致疲劳性能评估过程存在显著不确定性。因此,亟须针对高强钢焊接接头的疲劳裂纹扩展行为开展研究。

现有钢桥设计规范主要采用针对构造细节的名义应力法<sup>[5]</sup>,该方法虽计算简便,但对于新型钢材是否适用仍需进一步校准;基于线弹性断裂力学理论的疲劳寿命评估方法也得到了应用<sup>[6]</sup>,由于疲劳裂纹发展受材料性能、焊接工艺、荷载和环境等因素影响,疲劳寿命预测需明确疲劳裂纹的发展规律。一些学者已开展了不同环境和荷载下的疲劳裂纹扩展试验<sup>[7-8]</sup>。童乐为等<sup>[9]</sup>开展了应力比为0.1时不同类型高强钢的疲劳裂纹扩展试验,指出疲劳裂纹增长速率随钢材强度的增加而逐渐降低。De Jesus等<sup>[10]</sup>发现疲劳寿命与钢材静力强度呈负相关。上述研究表明,不同型号钢材的疲劳裂纹扩展行为存在较大差异。此外,对于焊接连接件,过高的残余应力易诱发氢致裂纹、疲劳断裂等结构性破坏<sup>[11-12]</sup>。白林越等<sup>[13]</sup>引入形状参数、张开比和残余应力等构建了焊接疲劳裂纹扩展模型,分析了焊接残余应力对疲劳裂纹扩展速率的影响。Zong等<sup>[14]</sup>开展了Q345qD母材和焊缝在不同应力比和不同厚度下的疲劳裂纹扩展速率试验,结果表明随应力比增加,疲劳裂纹扩展速率增加,门槛值降低。吴圣川等<sup>[15]</sup>发现焊接残余应力和应力比可改变裂纹前沿应力强度因子幅值,从而影响疲劳裂纹扩展速率。目前,焊接接头疲劳研究多围绕焊接残余应力和焊缝缺陷等内部影响因素开展,已揭示裂纹闭合效应对疲劳裂纹扩展速率的影响,但不同应力比下焊接连接件的疲劳裂纹扩展行为仍需深入。此外,由于大尺度的疲劳试验研究耗时且成本高,数值分析方法已在复杂局部应力分析等方面发挥了重要作用<sup>[16-17]</sup>。然而,疲劳裂纹增长模拟方法仍不完善,张开型裂纹假定与真实裂纹发展可能存在差异,预测精度难以保障。

笔者开展不同应力比下Q550E 高强钢母材及焊接接头的疲劳裂纹扩展试验,明确高强钢疲劳寿

命、疲劳裂纹扩展速率参数和门槛值的变化规律,揭示应力比对高强钢焊接节点疲劳裂纹扩展性能的影响,这对完善高强钢结构桥梁的设计与后期维护有重要意义。在此基础上,开展基于FRANC3D与ABAQUS的联合数值仿真分析,通过敏感性分析明确关键影响参数。

## 1 试验研究

### 1.1 试件设计

试验采用舞阳钢铁有限责任公司生产的Q550E 高强钢,公称厚度为8 mm,实测厚度为8.56 mm,化学成分如表1所示,钢材碳当量为0.4%。对接焊缝设计为V形坡口,采用CO<sub>2</sub>气体保护焊,焊丝为E501T-1L,焊接电压为(30±2)V,焊缝接头几何轮廓如图1所示。

表1 材料化学成分组成

Table 1 Chemical composition of material

						%
C	Si	Mn	P	S	Alt	Cr
0.115	0.270	1.255	0.011	0.002	0.029	0.185
Ni	Cu	Mo	Nb	V	Ti	Fe
0.020	0.030	0.220	0.024	0.003	0.016	均衡

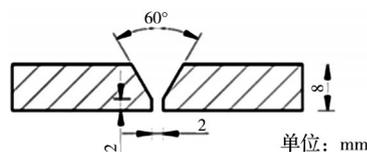


图1 焊缝接头几何轮廓细节

Fig. 1 The geometric details of welded joint

通过静力拉伸和疲劳裂纹扩展试验研究Q550E 高强钢母材及对接焊缝力学性能、疲劳裂纹扩展行为。静力拉伸试验参照《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)<sup>[18]</sup>进行试件取样和制备,共制备6个试件。静力拉伸试件尺寸如图2所示。

Q550E 钢材疲劳裂纹扩展试验依据《金属材料 疲劳试验 疲劳裂纹扩展方法》(GB/T 6398—2017)<sup>[19]</sup>中的标准CT(Compact Tension)试件进行尺寸设计。采用线切割加工得到CT试件及相应的U型夹具与销钉。对接焊缝试件加工过程中,先对Q550E 高强钢母材进行焊接,再对焊接构件进行线切割,最后联合铣床及磨床等设备对试件进行打磨加工,制得试件及相应的U型夹具与销钉。试件尺寸和取样方式如图3所示。图3中B为试件厚度,W为试件宽度, $a_0$ 为试件切口长度。

### 1.2 静力拉伸试验

采用MTS Landmark 电液伺服疲劳试验机进

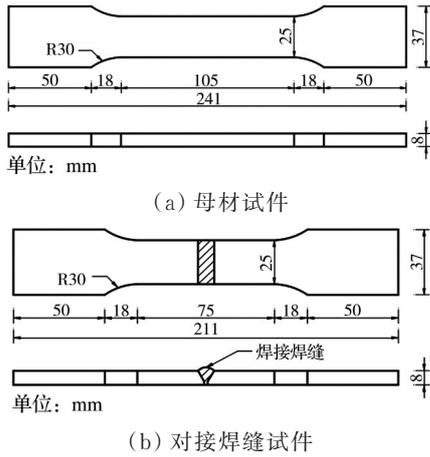
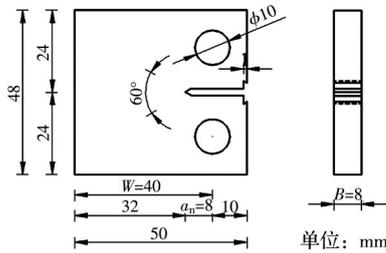
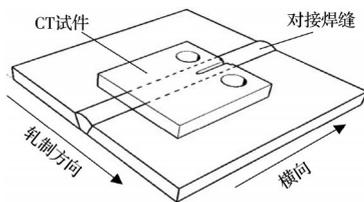


图 2 静力拉伸试验试件尺寸

Fig. 2 The specimen size of static tensile test



(a) 紧凑拉伸试件



(b) 对接焊缝取样

图 3 疲劳裂纹扩展试件

Fig. 3 FCG test specimens

行加载,最大荷载为 250 kN。采用量程为 50 mm 的引伸计测量位移。根据《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)<sup>[18]</sup>,静力拉伸试验采用应变速率控制。不同拉伸阶段采用不同加载速率:钢材屈服前应变速率为  $0.000\ 25\ s^{-1}$ ,屈服后为  $0.006\ 7\ s^{-1}$ 。试件及加载装置如图 4 所示。

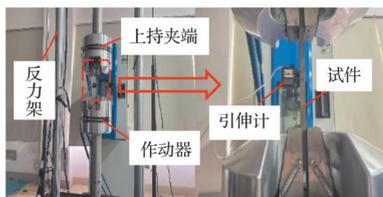
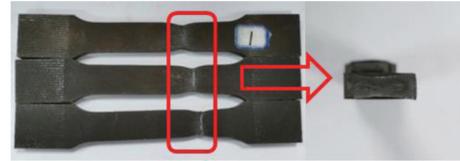


图 4 静力拉伸试验装置

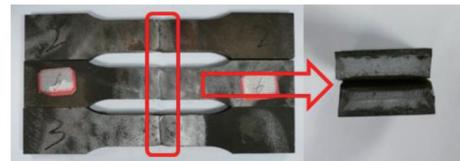
Fig. 4 The device of static tensile test

静力拉伸试验分别采用 3 个 Q550E 钢母材和 3 个对接焊缝试件进行重复试验。通过静力拉伸试验获得母材屈服应力、抗拉强度、伸长率、屈强比和

弹性模量等性能指标。通过测量对接焊缝试件的抗拉强度来评价焊缝质量。拉伸试件破坏形貌如图 5 所示。静力拉伸试验结果取平均值,结果如表 2 所示。



(a) 母材拉伸试件



(b) 对接焊缝试件

图 5 拉伸试件破坏形貌

Fig. 5 The failure morphology of tensile specimens

表 2 材料力学性能

Table 2 Mechanical properties of materials

材料	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	伸长率	抗拉强度/MPa	屈强比
母材	215.85	605.14	15.7	700.41	0.86
对接焊缝				709.58	

### 1.3 疲劳裂纹扩展试验

Q550E 高强钢母材及对接焊缝标准 CT 试件的疲劳裂纹扩展试验在 MTS Landmark 电液伺服疲劳试验机上进行,CT 试件如图 6 所示。试验采用计算机自动控制,试验温度为  $(20 \pm 3)^\circ C$ 。荷载波形为正弦波,加载频率为 10 Hz,应力比为循环加载时最小荷载与最大荷载的比值,分别为 0.1、0.2、0.3 和 0.5。试验时通过固定疲劳荷载上限值,调整疲劳荷载下限值来控制应力比。每种工况进行 3 组重复性试验,母材试件与焊接试件编号依据试验类型确定,M 和 Q 分别表示母材和对接焊缝进行疲劳裂纹扩展试验的试件,MT 和 QT 分别代表母材和对接焊缝进行门槛值测定试验的试件。如应力比为 0.1 时母材疲劳裂纹扩展试验的试件编号为  $R=0.1-M1 \sim 3$ ,疲劳裂纹扩展与门槛值测定试验共采用 48 个试件,试件实际尺寸和数量如表 3 所示。通过 COD 引伸计实时测量试件开口位移,采用柔度法计算疲劳裂纹长度。柔度法计算公式可表示为<sup>[19]</sup>

$$a/W = C_0 + C_1 U_x + C_2 U_x^2 + C_3 U_x^3 + C_4 U_x^4 + C_5 U_x^5 \quad (1)$$

式中: $a$ 为疲劳裂纹长度,下同; $C_0 \sim C_5$ 为常数<sup>[19]</sup>; $U_x$ 为试件开口位移函数,可表示为

$$U_x = \left[ \left( \frac{BEV_x}{P} \right)^{\frac{1}{2}} + 1 \right]^{-1} \quad (2)$$

式中: $B$ 为试件厚度; $E$ 为弹性模量; $V_x$ 为开口位移; $P$ 为荷载大小。

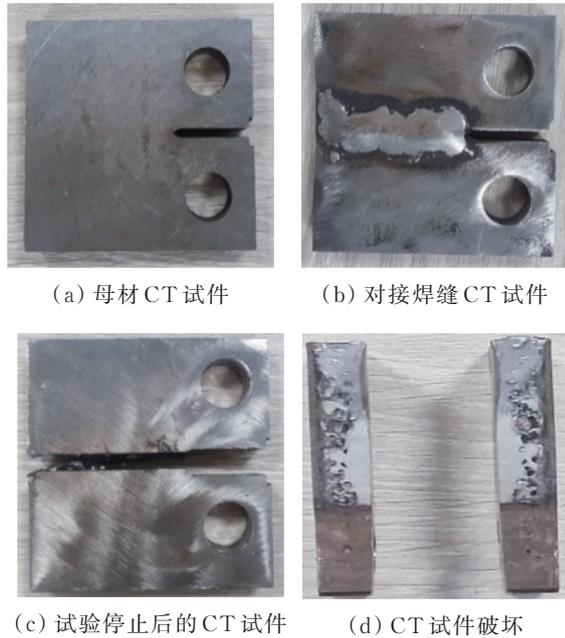


图 6 CT 试件  
Fig. 6 CT specimens

试验开始前,施加约  $0.7F_{max}$  的初始力,通过引伸计测量开口位移,进一步基于柔度法得到试件的裂纹长度。根据已有试验研究<sup>[7,10,14]</sup>,每间隔 5 min 测量一次开口位移,连续两次开口位移测量偏差未超过 0.1 mm 时,停止加载。

在疲劳裂纹扩展试验中,需对试件进行疲劳裂纹预制。试验预制裂纹长度为 1.5 mm。预制裂纹阶段采用降载法,预制结束后进行常幅加载。疲劳裂纹扩展试验采用力控制,不同应力比下最大荷载均为定值。结合预制裂纹试算结果,设定最大荷载为 7 kN。试验装置如图 7 所示。

疲劳裂纹扩展试验结束后,采用五点法和柔度法对裂纹长度进行测定和复核,进而构建 Q550E 高强钢母材和对接焊缝试件的疲劳裂纹扩展寿命曲线( $a-N$  曲线)。采用七点递增多项式法<sup>[20]</sup>和式(3)分别计算疲劳裂纹扩展速率  $da/dN$  和应力强度因

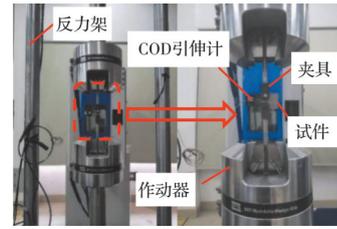


图 7 疲劳裂纹扩展试验装置  
Fig. 7 The device of FCG test

子幅值  $\Delta K$ <sup>[7]</sup>。

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \cdot \frac{2 + \alpha}{(1 - \alpha)^{\frac{3}{2}}} \cdot (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (3)$$

式中: $\alpha = a/W, a/W > 0.2$ 。

当  $da/dN$  趋近于零时,对应的应力强度因子称为门槛值  $\Delta K_{th}$ 。疲劳裂纹门槛值测定流程如下:预制 1.5 mm 疲劳裂纹,采用降  $K$  法进行试验,疲劳裂纹扩展速率达  $1 \times 10^{-7}$  时停止试验<sup>[19]</sup>。根据预制裂纹试算结果,初始  $K$  值为  $20.5 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ ,降  $K$  梯度为 1.5%。试验过程中,观察  $\Delta K$  值变化,同时计算相应的疲劳裂纹扩展速率  $da/dN$ 。在得到每个试件至少 5 个有效  $da/dN - \Delta K$  数据点的基础上,基于单试件数据法<sup>[2]</sup>和七点递增多项式法,在 4 个应力比 0.1、0.2、0.3 和 0.5 下对每组试件单独进行拟合计算,确定每个试件的疲劳裂纹扩展速率参数  $C$  和  $m$ ,根据拟合计算结果,取  $da/dN = 10^{-7} \text{ mm/周}$  计算对应的  $\Delta K$  值为疲劳裂纹扩展门槛值  $\Delta K_{th}$ <sup>[19]</sup>。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 疲劳裂纹扩展寿命曲线

按应力比 0.1、0.2、0.3 和 0.5 进行分组试验,每组 3 个试件,母材和对接焊缝共 12 组,共计 24 个试件。对这些试件进行疲劳裂纹扩展试验,可得到不同应力比下的  $a-N$  曲线和材料疲劳寿命。图 8 为 4 种应力比下对接焊缝裂纹初始扩展段的  $a-N$  曲线。图 8 中  $a$  为裂纹长度,由试验时 COD 引伸计所测得的开口位移和式(1)、式(2)计算所得, $N$  为疲劳循环加载次数。由图 8 可知,曲线均呈非单调增加,当应力比为 0.1 和 0.2 时,疲劳裂纹增长过程中存

表 3 CT 试件实际尺寸与数量

Table 3 Actual size and quantity of CT test specimens

材料	试验类型	编号	名义厚度/mm	试件长度/mm	试件宽度/mm	切口长 $a_0$ /mm	数量
母材	裂纹扩展	R-Mi	8	50	48	8	12
	门槛值	R-MTi	8	50	48	8	12
对接焊缝	裂纹扩展	R-Qi	8	50	48	8	12
	门槛值	R-QTi	8	50	48	8	12

在波动;应力比为 0.3 和 0.5 时,裂纹扩展曲线先快速上升,然后缓慢下降。此外,在应力比为 0.1、0.2、0.3 和 0.5 时,疲劳裂纹增长曲线下下降梯度最大值分别为 0.001 7、0.001 1、0.001 0、0.000 8 mm/次。下降梯度受加载初期的裂纹闭合效应影响,即:荷载作用下,在疲劳裂纹扩展尖端附近存在一个残余塑性变形区,使裂纹张开位移减小,裂纹面间提前接触,导致疲劳裂纹扩展的驱动力降低<sup>[15]</sup>。由此可见,随应力比增大,由荷载引起的塑性区裂纹尖端接触应力减小,即裂纹闭合效应减小。

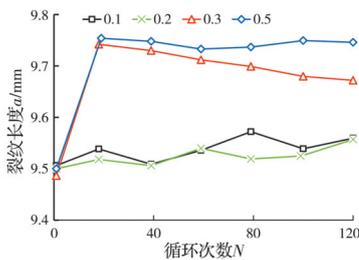


图 8 对接焊缝裂纹初始扩展段的  $a-N$  曲线

Fig. 8  $a-N$  curves at initial stage of butt weld FCG

图 9 为不同应力比下材料的  $a-N$  曲线,其中, M 和 Q 分别表示母材试件和对接焊缝试件,如 0.1-M 表示应力比为 0.1 时母材试件的  $a-N$  曲线。由图 9 和表 4 可知,焊接试件疲劳裂纹增长缓于母材,不同应力比下对接焊缝试件疲劳寿命较母材分别增长了 23.11%、26.53%、7.79% 和 7.48%。上述结果表明应力比较低(未超过 0.2)时,焊缝疲劳寿命增

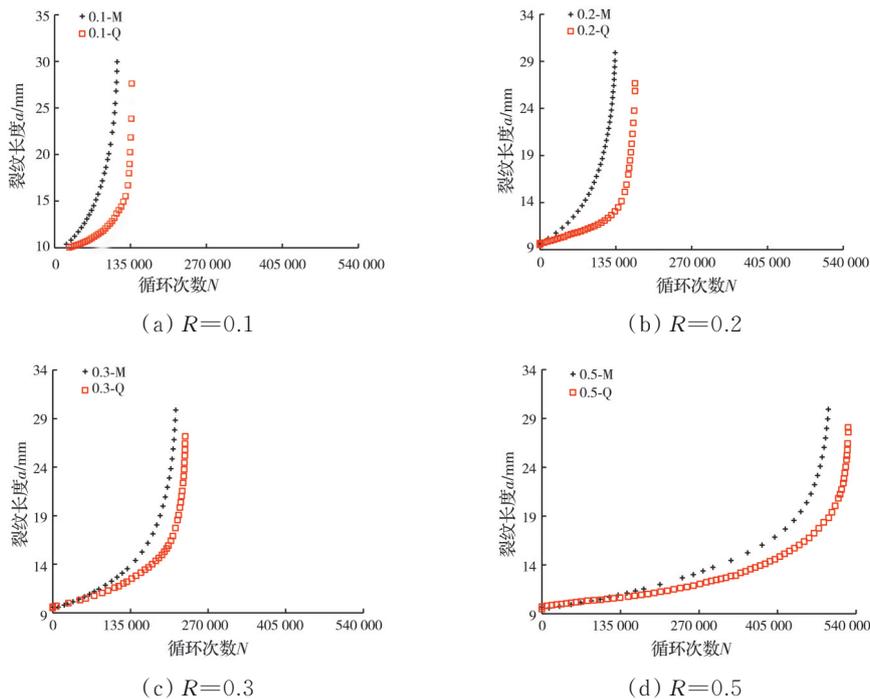


图 9 不同应力比下的  $a-N$  曲线

Fig. 9 The  $a-N$  curves under different stress ratios

幅较大,随应力比增大,焊缝疲劳寿命增幅减小。

表 4 不同应力比下材料疲劳寿命

Table 4 Fatigue life of material under different stress ratios

材料	疲劳寿命/次			
	R=0.1	R=0.2	R=0.3	R=0.5
母材	111 280	134 010	213 608	489 824
对接焊缝	137 000	169 557	230 255	526 448
增幅/%	23.11	26.53	7.79	7.48

文献[9]对高强钢 Q550D 母材进行了疲劳裂纹扩展试验,应力比  $R=0.1$ , 试验进行了 3 组。图 10 为相同应力比下 Q550E 和 Q550D 母材疲劳裂纹扩展试验结果的对比。图中 0.1-M 为本文中 Q550E 的试验结果, Q550D-X 为文献[9]中 3 组母材的试验结果。由图 10 可知,两种材料的疲劳裂纹扩展速率曲线均呈指数式平滑上升,疲劳加载开始出现的偏差主要是由初始裂纹长度设置不同造成的。

2.2 疲劳裂纹扩展速率

基于疲劳寿命曲线,可进一步得到疲劳裂纹增长速率  $da/dN$  及相应的应力强度因子幅值  $\Delta K$ 。不同应力比下母材与对接焊缝  $da/dN-\Delta K$  曲线如图 11 所示。采用 Paris 公式描述不同应力比下母材和对接焊缝的疲劳裂纹扩展速率<sup>[21]</sup>,即

$$da/dN = C(\Delta K)^m \tag{4}$$

式中: $a$  为疲劳裂纹长度; $N$  为荷载循环次数; $C$  和  $m$  为材料疲劳裂纹扩展的无量纲常数。

对式(4)两边分别取对数,则

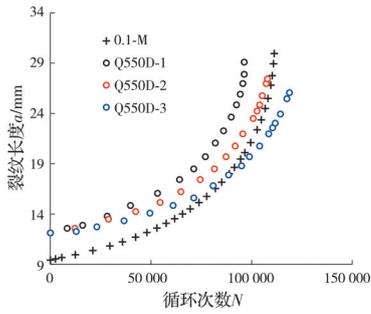


图 10 Q550E 和 Q500D<sup>[9]</sup> 高强钢母材试验结果对比

Fig. 10 Comparison of Q550E and Q500D high-strength steel base metal test results

$$\lg \frac{da}{dN} = \lg C + m \lg \Delta K \quad (5)$$

拟合得到的疲劳裂纹扩展速率参数  $m$  和  $\lg C$  如表 5 所示。由式(5)可知,  $m$  和  $\lg C$  值分别为  $da/dN-\Delta K$  线性段斜率和截距。由表 5 可知, 随应力比增大, 疲劳裂纹扩展速率参数  $m$  增大,  $\lg C$  减小。相同应力比下, 焊缝处疲劳裂纹扩展速率参数  $m$  约为母材的 2 倍。

图 12 为不同应力比下近门槛值区的疲劳裂纹增长速率曲线。由图 12 可知, 随应力比增大, 母材与对接焊缝近门槛值区疲劳裂纹扩展速率曲线向左平移, 表明随应力比增大, 近门槛值区的应力强度因子幅值减小。由表 5 可知, 当应力比由 0.1 增大至 0.5 时, 母材裂纹扩展门槛值  $\Delta K_{th}$  由 6.37  $\text{MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$  减小至 5.15  $\text{MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$ , 降幅为

表 5 疲劳裂纹扩展参数

Table 5 The model parameter of FCG

材料	应力比	疲劳裂纹扩展参数		
		$\lg C$	$m$	$\Delta K_{th}/(\text{MPa}\cdot\text{mm}^{1/2})$
母材	0.1	-9.81	2.13	6.37
	0.2	-9.78	2.14	5.99
	0.3	-10.35	2.32	5.69
	0.5	-10.45	2.54	5.15
对接焊缝	0.1	-13.12	4.26	16.04
	0.2	-13.13	4.36	14.41
	0.3	-13.59	4.82	13.82
	0.5	-13.71	5.03	10.73

19.2%; 对接焊缝试件裂纹扩展门槛值  $\Delta K_{th}$  由 16.04  $\text{MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$  减小至 10.73  $\text{MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$ , 降幅为 33.1%, 这表明对接焊缝疲劳裂纹扩展门槛值对应力比的变化更敏感。

### 3 有限元仿真分析

#### 3.1 有限元模型

基于有限元软件 FRANC3D 与 ABAQUS 对 Q550E 母材和对接焊缝试件的疲劳裂纹扩展行为进行分析, 如图 13(a) 所示。采用 ABAQUS 建立 CT 试件的有限元分析模型, 材料参数基于静力拉伸试验结果, 边界及荷载条件如图 13(b) 所示。单元网格划分选用 C3D20R 单元, 网格尺寸为 2 mm; 对关键部位如切口和圆孔处进行网格加密, 加密处

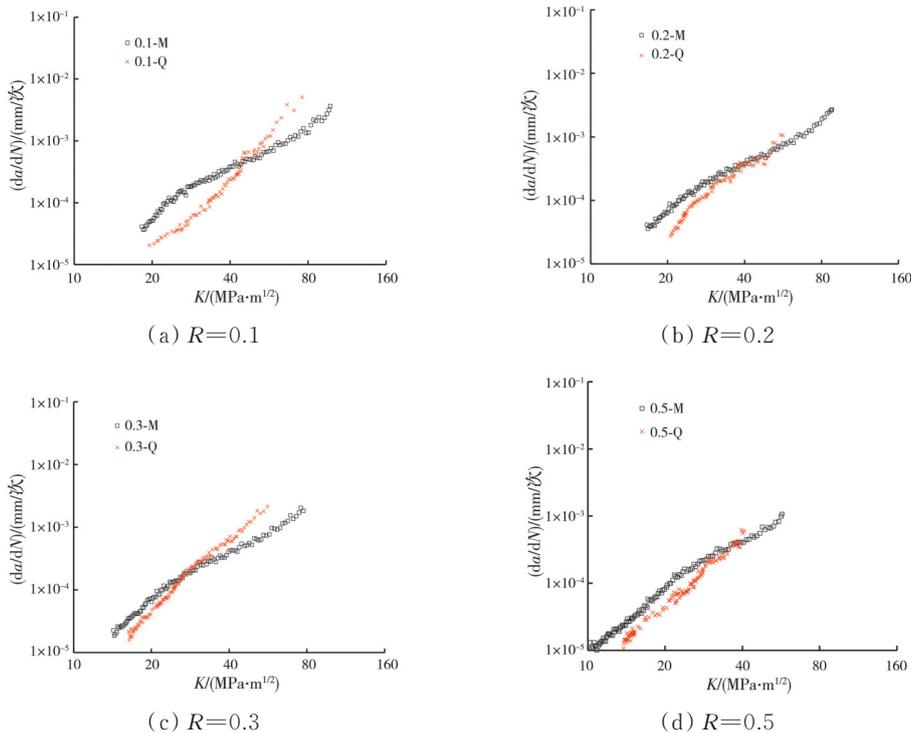


图 11 不同应力比下疲劳裂纹增长速率曲线

Fig. 11 FCG rate curves under different stress ratios

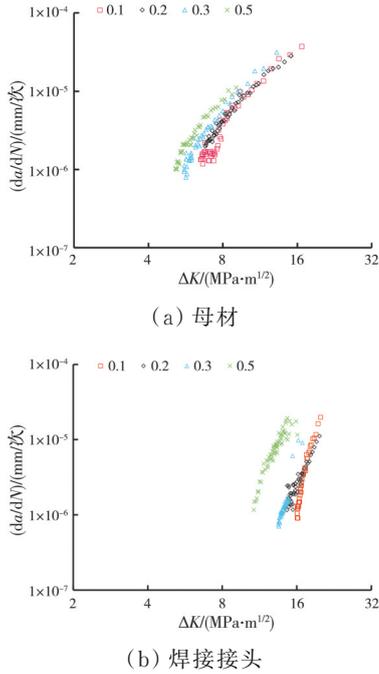


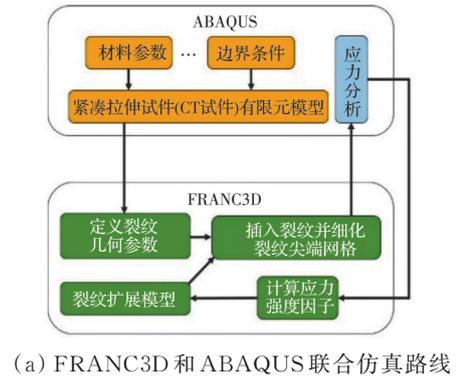
图 12 不同应力比下近门槛值区疲劳裂纹增长速率曲线  
**Fig. 12 FCG rate curves near threshold values under different stress ratios**

网格尺寸为 0.1 mm。在 FRANC3D 中导入建立的有限元模型,将深度为 1.5 mm 的半椭圆形初始裂纹插入 CT 试件切口处,对裂纹尖端网格进行重构和细化。借助 ABAQUS 对 FRANC3D 带裂纹的有限元模型进行应力分析,得到裂纹前沿应力强度因子,如图 13(c) 所示。基于裂纹前沿应力强度因子,在 FRANC3D 内采用 Paris 公式构建裂纹扩展模型,设置裂纹扩展加载波形和应力比,输入试验参数  $C$ 、 $m$ 、 $\Delta K_{th}$  和  $K_C$ 。其中,  $K_C$  为材料的断裂韧性,指材料阻止裂纹扩展的能力,即材料发生不稳定断裂时,材料显示的阻抗值,取值为试验结束时的应力强度因子。当裂纹前沿应力强度因子达  $K_C$  时,计算结束。

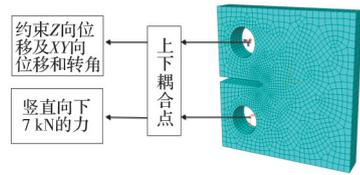
**3.2 仿真结果**

图 14 为不同应力比下裂纹前沿应力强度因子幅值。由图 14 可知,半椭圆形裂纹两侧边界应力强度因子小于中间区段,且应力强度因子幅值随应力比增大而减小。图 15 为不同应力比下应力强度因子幅值变化规律。由图 15 可知,随疲劳裂纹长度增长,裂纹尖端应力强度因子幅值增大,且增长速率逐渐增大。有限元计算结果与实测值吻合较好,最大误差为 7.0%。上述结果表明提出的有限元联合仿真方法能有效表征钢材疲劳裂纹增长过程中裂纹尖端的应力状态。

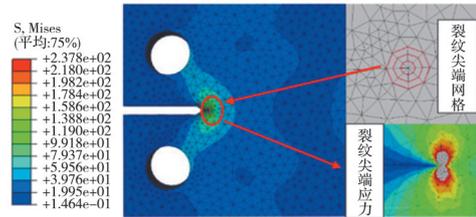
图 16 为有限元仿真计算与试验结果的对比,图中 M 和 FEM-M 分别表示母材试验结果和有限元计



(a) FRANC3D 和 ABAQUS 联合仿真路线



(b) ABAQUS 有限元模型



(c) 初始裂纹尖端应力云图

图 13 疲劳裂纹扩展有限元模拟  
**Fig. 13 Finite element simulation of FCG**

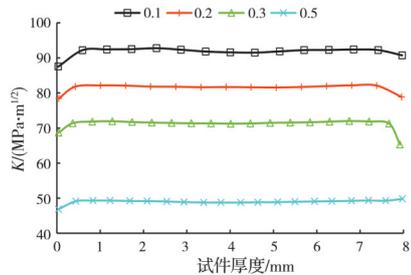


图 14 疲劳裂纹前沿应力强度因子幅值

**Fig. 14 Stress intensity factor of fatigue crack tip**

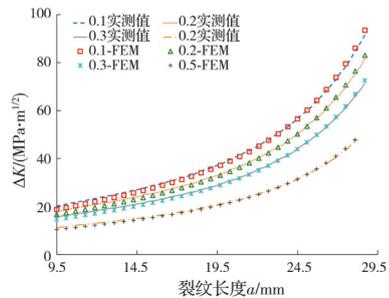


图 15 不同应力比下应力强度因子幅值

**Fig. 15 Stress intensity factor under different stress ratios**

算结果。有限元分析采用的是理想弹塑性本构模型,而试件在实际加工中,存在原材料组成和加工制造误差,导致有限元仿真计算与试验结果有一定

差异。由图 16 可知,不同应力比下母材与焊接试件的  $a-N$  曲线有限元计算结果均与试验值吻合较好,疲劳寿命预测最大误差分别为 5.0% 和 1.2%。这进一步证明了提出的 ABAQUS 和 FRANC3D 联合仿真方法对 Q550E 高强钢母材及对接焊缝疲劳裂纹扩展分析的可行性,可用于基于材料疲劳裂纹增长分析的疲劳寿命评估。

### 3.3 参数敏感性分析

基于有限元仿真分析结果,对试件厚度、初始裂纹形状(椭圆形裂纹短轴与长轴之比)和初始裂

纹深度等参数进行分析,探究不同参数对应力比变化的敏感性。图 17 分别为应力比为 0.1 和 0.5 下的参数敏感性分析结果。由图 17 可知,试件厚度增大对试件疲劳寿命增幅显著,初始裂纹形状变化对疲劳寿命增幅影响较小,初始裂纹深度与试件疲劳寿命呈负相关。同时,试件厚度和初始裂纹深度在高应力比下对疲劳寿命的影响更为显著。上述分析结果表明,试件厚度和初始裂纹深度为疲劳寿命的关键影响因素,且这两种参数在高应力比时敏感性更高。

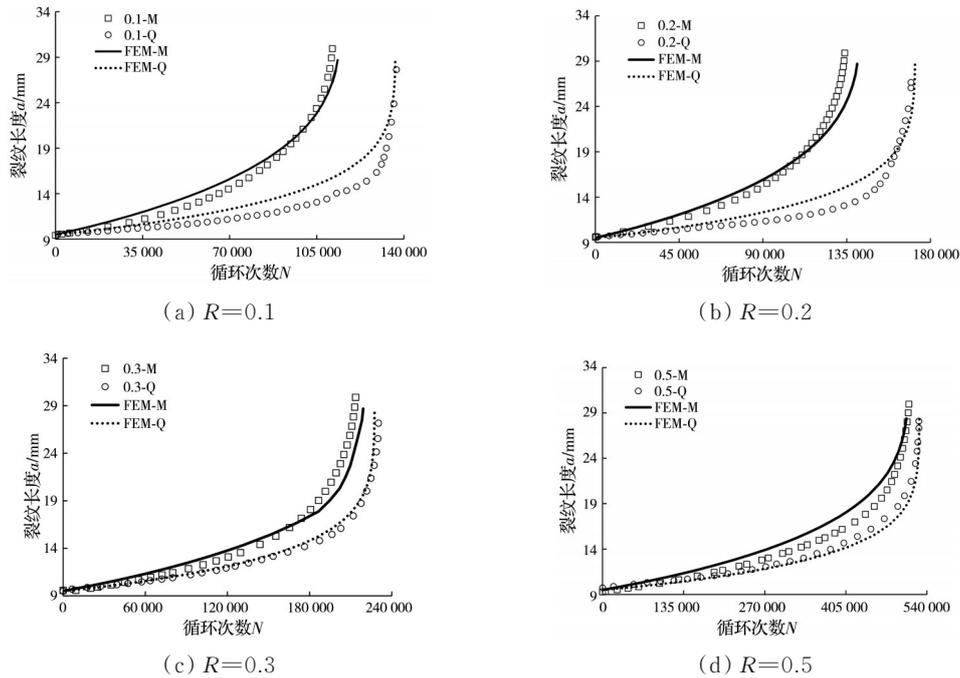


图 16 疲劳裂纹增长有限元分析结果

Fig. 16 Finite element analysis results of FCG

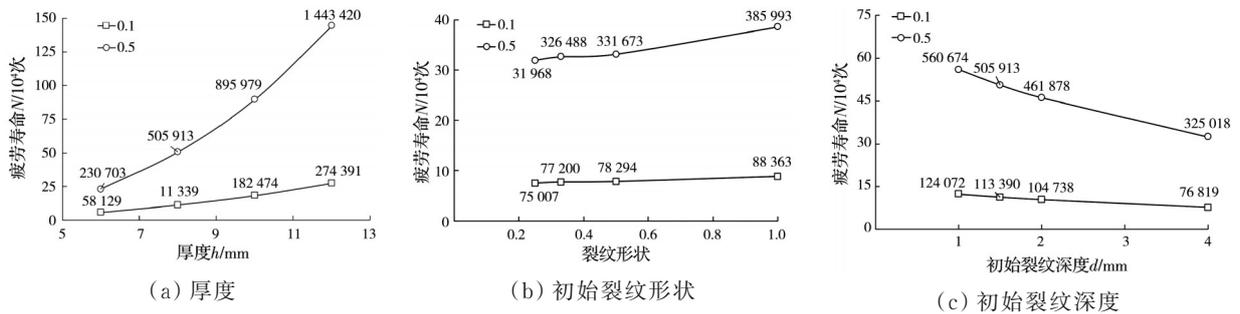


图 17 参数敏感性分析结果

Fig. 17 The analysis results of parameter sensitivity

## 4 结论

以 Q550E 高强钢母材及焊接接头为研究对象,开展了材料静力拉伸和疲劳裂纹扩展试验,并采用有限元方法模拟了疲劳裂纹增长过程。主要结论如下:

- 1) Q550E 高强钢焊接试件疲劳寿命大于母材,不同应力比下对接焊缝试件疲劳寿命较母材分别增长了 23.11%、26.53%、7.79% 和 7.48%。
- 2) 随应力比增大,疲劳裂纹扩展速率参数  $m$  增大、 $\lg C$  减小,应力强度因子门槛值减小;相同应力比下,对接焊缝  $m$  值约为母材的 2 倍;对接焊缝裂纹

门槛值大于母材,且对应力比变化更敏感。

3)通过试验数据与有限元结果对比,验证了 FRANC3D 与 ABAQUS 联合仿真方法对 Q550E 高强钢母材及对接焊缝疲劳裂纹扩展研究的可行性。

4)试件厚度和初始裂纹深度是影响高强钢疲劳裂纹扩展的关键参数。实际 Q550E 高强钢结构设计中,可适当降低应力比提高应力强度因子门槛值,或在高应力比情况下,通过增加材料厚度或控制初始裂纹深度,以延长材料疲劳寿命。

笔者主要研究了 Q550E 高强钢母材及对接焊缝的疲劳裂纹扩展特征,对焊接接头本构关系曲线、试件尺寸效应及焊接残余应力的影响仍需深入。此外,分析仅围绕材料层面,针对构件和结构层面的数值仿真仍需日后进一步研究。

## 参考文献

- [1] 施刚, 班慧勇, 石永久, 等. 高强度钢材钢结构研究进展综述[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 1-13.  
SHI G, BAN H Y, SHI Y J, et al. Overview of research progress for high strength steel structures [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 1-13. (in Chinese)
- [2] ZONG L, SHI G, WANG Y Q, et al. Experimental investigation and numerical simulation on fatigue crack behavior of bridge steel WNQ570 base metal and butt weld [J]. Construction and Building Materials, 2015, 77: 419-429.
- [3] MOAN T, ENGESVIK K M. Discussion of "Fatigue reliability: Introduction" by The Committee on Fatigue and Fracture Reliability of the Committee on Structural Safety and Reliability of the Structural Division (January, 1982) [J]. Journal of Structural Engineering, 1984, 110(1): 195-196.
- [4] FISHER J. Fatigue and fracture of steel bridges [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1980, 102(1): 20-25.
- [5] YE X W, SU Y H, HAN J P. A state-of-the-art review on fatigue life assessment of steel bridges [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014(3):1-13.
- [6] 王天鹏, 张建仁, 肖宏彬. 低温环境下桥梁用结构钢疲劳寿命估算方法[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(1): 64-71.  
WANG T P, ZHANG J R, XIAO H B. Estimation of fatigue life of structural steel for bridge at low temperature [J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(1): 64-71. (in Chinese)
- [7] 郭忠照, 马亚飞, 王磊, 等. HRB400 钢筋材料疲劳裂纹扩展性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(7): 112-120.  
GUO Z Z, MA Y F, WANG L, et al. Experimental study on fatigue crack growth behavior of HRB400 reinforcing bar [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(7): 112-120. (in Chinese)
- [8] HE W T, WANG C Z, DENG J L, et al. Effect of single tensile overload on fatigue crack growth behavior based on plastically dissipated energy and critical distance theory [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 223: 106744.
- [9] 童乐为, 任珍珍, 景爽, 等. 高强度结构钢系列的疲劳裂纹扩展速率试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(12): 191-201, 212.  
TONG L W, REN Z Z, JING S, et al. Experimental study on fatigue crack growth rate of high strength structural steel series [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(12): 191-201, 212. (in Chinese)
- [10] DE JESUS A M P, MATOS R, FONTOURA B, et al. A comparison of the fatigue behavior between S355 and S690 steel grades [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 79: 140-150.
- [11] 顾颖, 冯倩, 任松波, 等. 焊接残余应力对对接接头疲劳裂纹扩展的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(10): 2752-2760.  
GU Y, FENG Q, REN S B, et al. Effects of welding residual stresses on fatigue crack growth behavior of butt joint [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(10): 2752-2760. (in Chinese)
- [12] 熊志亮, 王苹, 孟金奎, 等. 铝合金 CT 试样焊接残余应力重分布分析[J]. 焊接学报, 2021, 42(1): 65-69, 101.  
XIONG Z L, WANG P, MENG J K, et al. Redistribution analysis of welding residual stress of aluminum alloy CT specimen [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(1): 65-69, 101. (in Chinese)
- [13] 白林越, 邵飞, 高磊, 等. 基于多因素的焊接结构疲劳裂纹扩展速率分析[J]. 计算力学学报, 2020, 37(3): 349-354.  
BAIL Y, SHAO F, GAO L, et al. Analysis on growth rate of fatigue crack of welded structures based on multi-factor [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2020, 37(3): 349-354. (in Chinese)
- [14] ZONG L, SHI G, WANG Y Q, et al. Experimental investigation on fatigue crack behavior of bridge steel Q345qD base metal and butt weld [J]. Materials & Design (1980-2015), 2015, 66: 196-208.
- [15] 吴圣川, 李存海, 张文, 等. 金属材料疲劳裂纹扩展机制及模型的研究进展[J]. 固体力学学报, 2019, 40(6): 489-538.  
WU S C, LI C H, ZHANG W, et al. Recent research progress on mechanisms and models of fatigue crack growth for metallic materials [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2019, 40(6): 489-538. (in Chinese)
- [16] ZHU Z W, XING Z, LI J, et al. Fatigue damage

- investigation on diaphragm cutout detail on orthotropic bridge deck based on field measurement and FEM [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 157: 107106.
- [17] NOSE M, AMANO H, OKADA H, et al. Computational crack propagation analysis with consideration of weld residual stresses [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, 182: 708-731.
- [18] 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法: GB/T 228.1—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.  
Metallic materials - tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [19] 金属材料 疲劳试验 疲劳裂纹扩展方法: GB/T 6398—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.  
Metallic materials - fatigue testing - fatigue crack growth method: GB/T 6398—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [20] 贾法勇, 霍立兴, 张玉凤, 等. 疲劳裂纹扩展速率两种数据处理方法的比较 [J]. *机械强度*, 2003, 25(5): 568-571.  
JIA F Y, HUO L X, ZHANG Y F, et al. Comparison with two data processing methods on fatigue crack growth rate [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2003, 25(5): 568-571. (in Chinese)
- [21] PARIS P, ERDOGAN F. A critical analysis of crack propagation laws [J]. *Journal of Basic Engineering*, 1963, 85: 528-533.

(编辑 王秀玲)