

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.04.008

# 对接焊缝初始缺陷对疲劳寿命影响规律研究

赵秋, 唐琨, 黄冠铭, 林铮哲

(福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116)

**摘要:**为研究钢桥面板对接焊缝中表面及内部缺陷对疲劳寿命的影响,文章运用 FRANC3D 与 ABAQUS 软件对等效后的基本焊接构造进行裂纹扩展分析,得到疲劳寿命随初始缺陷参数的变化关系,结果表明表面及内部缺陷在裂纹扩展中裂纹形状逐渐接近半圆形及圆形。不同初始参数对疲劳寿命的影响程度不同,表面及内部缺陷对缺陷形状比、尺寸、方向变化的敏感程度也不同,锁定形状比不变,短轴长增加 3 倍时,含内部缺陷试件的疲劳寿命降幅为 68.9%,短轴长增加 6.5 倍时,含表面缺陷试件的疲劳寿命降幅为 46.45%;锁定短半轴不变,当形状比从 0.1 增至 0.6 时,疲劳寿命平均增幅为 88.7%(表面缺陷)和 90.2%(内部缺陷);锁定尺寸不变,当缺陷植入角度从 30°增至 90°时,疲劳寿命的平均降幅为 59.7%(表面缺陷)和 62.3%(内部缺陷)。

**关键词:**正交异性钢桥面板;对接焊缝;焊接缺陷;疲劳寿命;数值模拟

**中图分类号:**U443.31 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)04-0473-08

## Effect of initial defect of butt weld on fatigue life

ZHAO Qiu, TANG Kun, HUANG Guanming, LIN Zhengzhe

(School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** In order to study the influence of surface and internal defects in the butt weld of the steel bridge deck on the fatigue life, the crack propagation of the equivalent basic welding structure is analyzed using FRANC3D and ABAQUS software, and the relationship between the fatigue life and the initial defect parameters is obtained. The results show that surface and internal defects gradually approach semicircular and circular crack shapes during crack propagation. Different initial parameters have different effects on the fatigue life, and the sensitivity of surface and internal defects to changes in defect aspect ratio, size, and direction is also different. Specifically, when the aspect ratio remains unchanged and the short axis length increases by 3 times, the fatigue life of the specimen with internal defects decreases by 68.9%, and when the short axis length increases by 6.5 times, the fatigue life of the specimen with surface defects decreases by 46.45%; when the short axis length remains unchanged and the aspect ratio increases from 0.1 to 0.6, the average increase in the fatigue life is 88.7%(surface defects) and 90.2%(internal defects); when the size remains the same and the defect implant angle increases from 30° to 90°, the average reduction in the fatigue life is 59.7%(surface defects) and 62.3%(internal defects).

**Key words:** orthotropic steel bridge deck; butt weld; welding defect; fatigue life; numerical simulation

正交异性钢桥面板是一种常见的钢结构,它由不同的钢构件焊接而成,因具有自重小、抗弯及抗风性能好、安装便捷等优点而得到广泛应用<sup>[1]</sup>。

由于正交异性钢桥面板的构造特点,其疲劳损伤常有发生,已经成为大跨度钢桥在运营期间的主要病害之一。疲劳裂纹多起源于焊缝,焊缝是正

收稿日期:2021-11-02;修回日期:2021-12-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478120)

作者简介:赵秋(1976—),男,吉林通榆人,博士,福州大学教授,博士生导师。

交异性钢桥面板结构中最为薄弱的节点,而焊接质量是影响焊接结构疲劳性能的关键因素。焊缝质量评价规范<sup>[2]</sup>中以焊缝中存在的缺陷类别、数量作为质量评价的依据,焊接缺陷会明显减小结构的有效承载面积,在缺陷周围引发应力集中现象,导致裂纹的萌生及扩展。利用各类焊接缺陷检测手段,结合工程实际和相关规范,文献<sup>[3-4]</sup>已对焊接结构中可能存在的各类缺陷进行了较详尽的调研。根据缺陷的性质和特征可将焊接缺陷分为体积型缺陷和面积型缺陷,其中体积型缺陷包括孔穴、固体夹杂;面积型缺陷包括裂纹、未熔合及未焊透。对接焊缝是正交异性钢桥面板中常见的焊缝形式,钢箱梁节段间的对接焊缝通常在施工现场施焊,因而焊接极易产生缺陷。纵肋及顶板对接焊缝主要裂纹扩展形式有 2 种<sup>[5]</sup>:①起源于焊趾位置,沿着加劲肋的板厚延伸;②起源于焊缝中线,沿着焊喉开裂到焊缝表面,裂纹扩展会对钢桥面板的疲劳性能造成严重的影响。

现有焊接结构的疲劳性能评估方法有名义应力法和热点应力法,此类方法虽操作简便,但只能基于构件的宏观受力特性进行评估,无法得到构件在不同焊接缺陷下的具体疲劳性能表现。而以裂纹为研究对象的断裂力学法<sup>[6-8]</sup>很好地填补了这一空白,区别于上述方法其能够跟踪记录并计算裂纹每个扩展步的步长、扩展角、应力强度因子和疲劳寿命等关键信息,从而对缺陷致疲劳行为进行研究,最终建立起缺陷与构件疲劳性能的关系。基于此法对钢桥面板构造细节疲劳性能的研究已有先例,文献<sup>[9]</sup>以纵肋-横隔板连接处为研究对象,建立了疲劳裂纹的三维扩展数值模拟方法,并通过试验验证了所提方法的可行性和有效性,在此基础上对该部位三维疲劳裂纹的扩展特性和疲劳寿命的预测进行了研究;文献<sup>[10-11]</sup>分别以纵肋与顶板、纵肋与横隔板连接细节为对象,建立表面焊接缺陷效应评价方法,探究了不同尺寸初始缺陷的疲劳寿命,但并未研究初始缺陷参数影响钢桥面板对接焊缝疲劳性能的规律,因此本文基于断裂力学并运用有限元软件,研究不同初始参数下缺陷对顶板及纵肋对接焊缝疲劳寿命的影响规律。

## 1 疲劳裂纹扩展原理

断裂力学以初始缺陷作为裂纹扩展的源头,并通过计算裂纹尖端应力强度因子来有效反映裂纹尖端区域的应力场强度,应力强度因子的量纲

为应力 $\times\sqrt{\text{长度}}$ ,常用单位为  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。文献<sup>[12]</sup>推荐的等效应力强度因子幅值更加适用于钢桥面板这类复杂应力场,计算公式为:

$$\Delta K_{\text{eff}} = \sqrt{\Delta K_{\text{I}}^2 + \Delta K_{\text{II}}^2 + \frac{\Delta K_{\text{III}}^2}{1-\nu}} \quad (1)$$

其中: $\Delta K_{\text{I}}$ 、 $\Delta K_{\text{II}}$ 、 $\Delta K_{\text{III}}$ 分别为 I 型、II 型、III 型应力强度因子幅值; $\nu$ 为泊松比。

裂纹扩展过程中存在门槛值  $\Delta K_{\text{th}}$ 及断裂韧性值  $K_{\text{IC}}$ , $\Delta K_{\text{eff}}$ 低于门槛值则无裂纹扩展,高于断裂韧性值则发生快速失稳断裂,而在其间时裂纹稳定扩展,此区域称为 Paris 区,该区域裂纹扩展速率公式可采用修正的 Paris 公式,即

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{\text{eff}})^m \quad (2)$$

其中, $C$ 、 $m$ 为裂纹扩展的关键参数, $C$ 与材料物理特性、荷载模式相关, $m$ 仅与材料有关。

为提高裂纹扩展计算的准确性,将扩展过程分为多个步骤,每一步骤需要计算裂纹扩展的步长及裂纹扩展面方向,其中步长计算公式为:

$$\Delta a_i = \Delta a_{\text{median}} \left( \frac{\Delta K_i}{\Delta K_{\text{median}}} \right)^n \quad (3)$$

其中: $\Delta K_i$ 为  $i$  节点应力强度因子幅值; $\Delta K_{\text{median}}$ 为裂纹尖端应力强度因子幅值中位数; $\Delta a_i$ 为  $i$  节点扩展步长; $\Delta a_{\text{median}}$ 为应力强度因子幅值中位数所对应的扩展步长; $n$ 通常取值为 1。

明确了裂纹扩展步长后,还需对裂纹面扩展方向进行计算,即裂纹面扩展角度  $\theta$  的确定。目前较多采用最大周向拉应力理论进行计算,即

$$\theta = 2\arctan\left(\frac{1 - \sqrt{1 + 8(K_{\text{II}}/K_{\text{I}})^2}}{4K_{\text{II}}/K_{\text{I}}}\right) \quad (4)$$

在实际工程结构中,随着荷载循环次数的增加,疲劳裂纹会从初始缺陷处逐渐开始扩展。基于经典的 Paris 公式,疲劳寿命  $N$  计算公式为:

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \left( \frac{dN}{da} \right) da \Rightarrow N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{1}{C(\Delta K_{\text{eff}})^m} da \quad (5)$$

其中: $a_0$ 、 $a_f$ 分别为初始裂纹尺寸、裂纹扩展结束时长度。

## 2 ABAQUS 与 FRANC3D 联合数值模拟

FRANC3D 软件基于断裂力学理论,能够对工程结构在较复杂的载荷条件以及裂纹形态下进行裂纹扩展分析,FRANC3D 与 ABAQUS 的联合运用在航空、车辆、造船等领域已经成熟应用<sup>[13-16]</sup>。

选择某三点弯曲梁疲劳试验<sup>[17]</sup>,对基于 ABAQUS 与 FRANC3D 所建立的联合评估方法进

行验证。模型参数为:梁长 380 mm,梁高 80 mm,梁宽 10 mm,梁底部两侧支承点距离边缘各 30 mm,在试件底部中点位置开有宽度为 2 mm 的槽口,槽口深度为 15 mm,与水平面间的夹角分别为 60°、75°,槽口根部开有 2 mm 深度的尖锐缺口。

在梁顶部中间加载点施加疲劳荷载,最大荷载  $F_{max}=9$  kN,应力比  $R=0.1$ ,试件材料为低碳钢,故设置材料弹性模量  $E=2.10 \times 10^5$  MPa,泊松比  $\nu=0.3$ ,Paris 裂纹扩展参数分别为  $C=7.5 \times 10^{-12}$ ,  $m=2.75$ ,  $\Delta K_{th}=2$  MPa  $\cdot$  m<sup>1/2</sup>,  $K_c=300$  MPa  $\cdot$  m<sup>1/2</sup>。试验试件及植入缺陷后的有限元模型如图 1 所示。

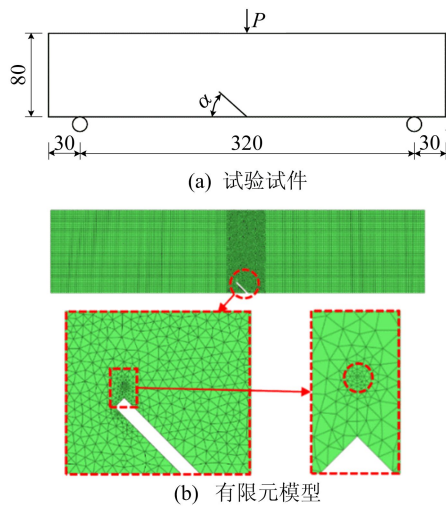


图 1 试件及有限元模型

在 ABAQUS 软件中建立模型,并将“inp”文件导入 FRANC3D 软件,使用 FRANC3D 划分子模型,在槽口根部植入深度为 2 mm 的初始缺陷。

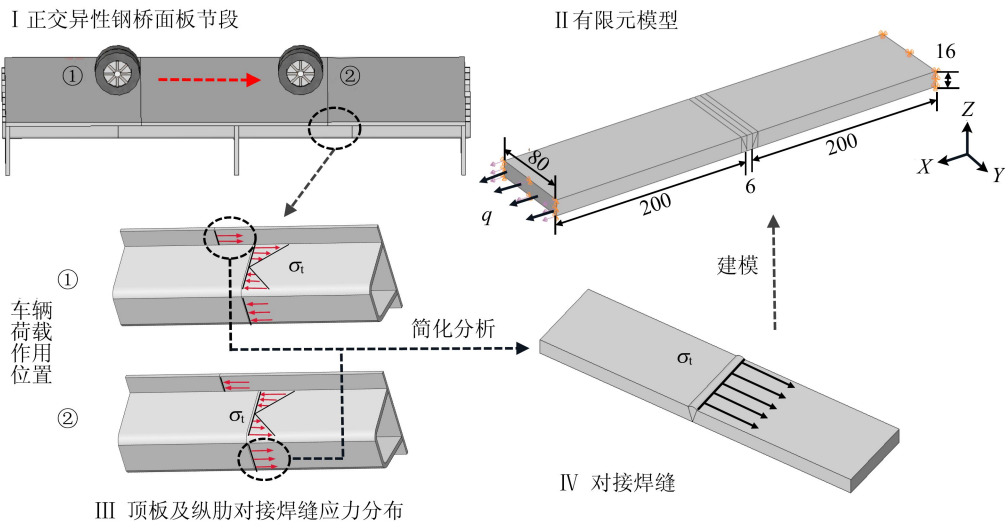


图 3 纵肋对接焊缝疲劳细节受力与等效

通过数值模拟和疲劳试验得到的  $\alpha-N$  曲线对比如图 2 所示。由图 2 可知,模拟值与试验值能较好地吻合,且裂纹扩展试验路径与模拟路径基本一致,因此 ABAQUS 与 FRANC3D 联合评估方法能较好地预测构件的疲劳寿命以及裂纹开裂路径,具有较高的准确性与可靠性。

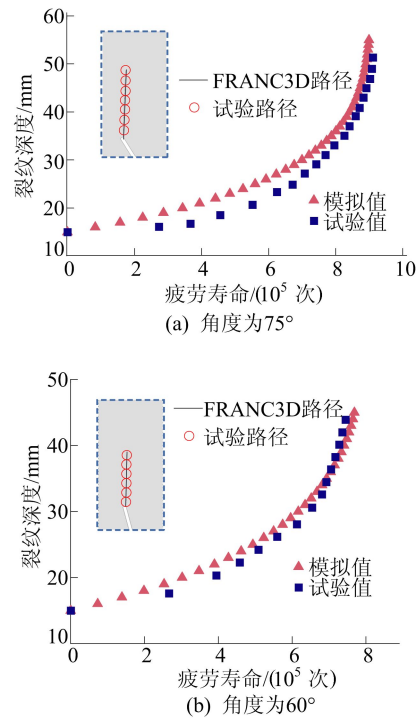


图 2 模拟数据与试验数据对比

### 3 简化分析

#### 3.1 结构简化

纵肋对接焊缝疲劳细节受力与等效如图 3 所示。

纵肋对接焊缝会随着车辆荷载作用位置的变化而循环承受拉压应力,车辆荷载作用在不同位置时,钢桥面板对接焊缝应力分布如图 3 中 III 所示,由图 3 中 III 可知,当车辆荷载作用在图 3 中 I 位置①时,纵肋下翼缘对接焊缝承受压应力,而顶板对接焊缝承受拉应力;作用在图 3 中 I 中位置②时纵肋下翼缘对接焊缝承受拉应力,而顶板对接焊缝承受压应力。根据该细节构造特点以及受力特点,可采用对接焊缝这一基本构造进行等效,如图 3 中 IV 所示。

依据 GB 50661—2011 中表 8.2.2、表 8.3.2 及表 A.0.3 拟定焊缝外观尺寸,初始缺陷形态如图 3 中 II 所示,采用 ABAQUS 中实体单元 (C3D8R) 建模,材料采用 Q345qD 钢材,弹性模量为  $2.06 \times 10^5$  MPa,泊松比为 0.3,为便于分析将焊缝和熔合区材性与母材保持一致。边界条件设置为约束母材一端 X、Y、Z 方向的位移,约束另一端 Y、Z 方向的位移。依据 JTG D64—2015 附录 C 中表 C.0.3 的构造细节①,得到磨平余高后焊缝对应的细节类别值为 110 MPa。采用 ABAQUS 模块 Load 中的荷载类型 Pressure,设置荷载最小值为 12.2 MPa,荷载最大值为 122.2 MPa,此时应力比为 0.1,由此得到的焊缝处名义应力幅值正好与规范细节类别值 110 MPa 一致。

### 3.2 缺陷简化

在断裂力学分析中,各类缺陷评定文献较多,文献[18-20]建议引入半椭圆形和椭圆形分别作为表面和内部面积型初始缺陷形态,如图 4 所示。

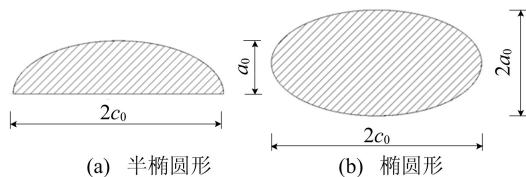


图 4 初始缺陷形态

图 4 中:  $a_0$  为椭圆短半轴长度,即初始裂纹尺寸;  $c_0$  为椭圆长半轴长度。裂纹扩展研究中还需确定临界裂纹尺寸  $a_c$ ,当裂纹扩展达到临界尺寸时表明此时结构已发生疲劳破坏。文献[20]建议将板件厚度的  $1/2 \sim 2/3$  作为临界裂纹尺寸,因此本文取板厚的  $1/2$  为临界值。

## 4 表面缺陷

### 4.1 表面疲劳开裂过程

采用 ABAQUS 与 FRANC3D 联合数值模拟

方法进行疲劳计算,根据有限元建模所采用的 Q345qD 钢材,并参考文献[12]中给出的空气中钢材的疲劳裂纹扩展速率参数值,即  $m=2.88$ 、 $C=8.32 \times 10^{-12}$ ; IIW 推荐钢材裂纹扩展参数为  $m=3$ 、 $C=1.65 \times 10^{-11}$ ; 文献[21]综合考虑应力比的影响,当钢材板厚为 23.5 mm 时,  $m=2.67$ 、 $C=1.45 \times 10^{-11}$ ; 文献[22]指出 Q345 试件受 3 点弯曲荷载作用,在应力比为 0.1 时,其裂纹扩展参数为  $m=4$ 、 $C=3.25 \times 10^{-12}$ 。上述文献表明裂纹扩展参数因制作质量、板厚、应力比的不同有一定的差异,但参数取值在一定范围内。折中取值拟定本文的裂纹扩展关键参数为  $m=3$ 、 $C=8.32 \times 10^{-12}$ 。参考国际焊接学会推荐的门槛值,即  $\Delta K_{th} = 2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,断裂韧性值设置为  $K_c = 300 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

以半椭圆形作为初始缺陷形态,尺寸取为短半轴值  $a_0 = 0.20$  mm,长半轴值  $c_0 = 1.00$  mm,缺陷形状比  $a_0/c_0$  为 0.2,并垂直于构件表面在焊趾线中点处植入该缺陷。参考现有断裂力学算例,为较大程度兼顾计算精度及效率,将每个裂纹扩展步长和裂尖单元环半径分别控制在当前裂纹特征尺寸的 20% 和 10%,如当引入缺陷的深度为 0.20 mm 时,对应裂纹扩展尺寸为 0.04 mm,裂尖单元环半径为 0.02 mm。以此类推,因此裂纹扩展步和裂尖单元环半径两者的绝对值将随着裂纹尺寸的增大而增加。

疲劳裂纹扩展历程及扩展过程中其形状比变化如图 5 所示。

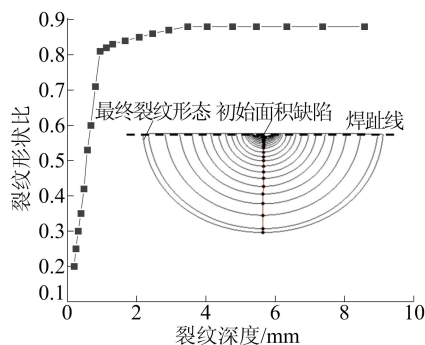


图 5 疲劳裂纹扩展形态及裂纹形状比变化

图 5 中,每一道椭圆弧线或圆弧线都代表着裂纹扩展至该处的形态,而线之间的距离即为每一步裂纹的扩展步长;随着裂纹的扩展,其形态由初始的半椭圆形逐渐演变为接近半圆形。由图 5 可知,随着裂纹深度  $a$  的增加,裂纹形状比呈现先快速增大后趋于稳定的趋势,并最终稳定值约为

0.88。  $\alpha-N$  曲线如图 6 所示,由图 6 可知,疲劳寿命变化趋势先缓慢后加快,当裂纹深度  $a$  扩展到临界值(板件厚度的 1/2)时,疲劳寿命为  $259 \times 10^4$  次。

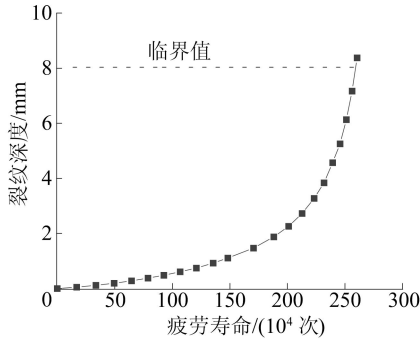


图 6 表面缺陷  $\alpha-N$  曲线

#### 4.2 表面缺陷形状比的影响

依据上述缺陷评定文献[18-20],仍以半椭圆形作为初始缺陷形态,并垂直于构件表面在焊趾线中点处植入该缺陷。文献[12]建议缺陷形状比  $a_0/c_0$  取值为 0.2,因此分别取缺陷形状比  $a_0/c_0$  为 0.1、0.2、0.4、0.6 进行分析。为确保裂纹能正常开裂,取缺陷深度方向尺寸短半轴值  $a_0$  分别为 0.20、0.40、0.60 mm。各组缺陷植入时裂纹短轴方向应力强度因子  $K_I$  随形状比变化如图 7a 所示,疲劳寿命随形状比变化如图 7b 所示。

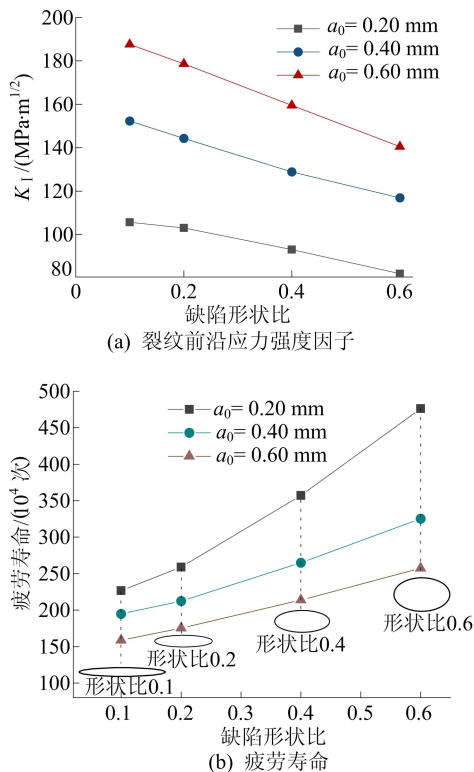


图 7 不同形状比的表面缺陷

由图 7a 可知,应力强度因子随不同形状比缺陷的变化趋势相同,即随形状比的增加而减少,并随着短半轴长度的增加而增加,不同短半轴长度间存在明显的梯度;由图 7b 可知,疲劳寿命随着缺陷形状比的增大而增加,且各缺陷变化规律及幅度基本一致,锁定初始缺陷短轴  $a_0$  不变,缺陷形状比从 0.10 增大到 0.60,则长半轴  $c_0$  分别由 2.00、4.00、6.00 mm 变换到 0.33、0.67、1.00 mm,寿命总增加幅度约为 67.1%~110.2%,可见疲劳寿命对于缺陷形状比较为敏感,并且疲劳寿命长短与植入缺陷时裂纹前沿短轴方向应力强度因子大小之间负相关。

#### 4.3 表面缺陷尺寸的影响

仍以半椭圆形作为初始缺陷形态,分别取焊趾中点与边缘点这两处代表性点位进行植入。钢桥的焊接缺陷尺寸普遍较大,因此锁定缺陷形状比  $a_0/c_0 = 0.2$  不变,依次选定短半轴值  $a_0$  为 0.20、0.35、0.50、1.00、1.50 mm,则对应长半轴值  $c_0$  分别为 1.00、1.75、2.50、5.00、7.50 mm。不同缺陷尺寸的疲劳寿命及缺陷植入时裂纹短轴方向的应力强度因子如图 8 所示。由图 8 可知,中点及边缘点处缺陷应力强度因子随尺寸的增加而增加,且两处应力强度因子大小基本一致;中点及边缘点处缺陷疲劳寿命随着缺陷尺寸的增加而减少,中点处减少幅度约为 45.8%,边缘点处减少幅度约为 47.1%。由此可知缺陷尺寸对疲劳性能具有明显影响,规律为缺陷尺寸越大对应疲劳寿命越小,并且中点及边缘点处变化规律及幅度基本一致。与 4.2 节相同,植入缺陷时短轴方向应力强度因子越大其疲劳寿命越短。

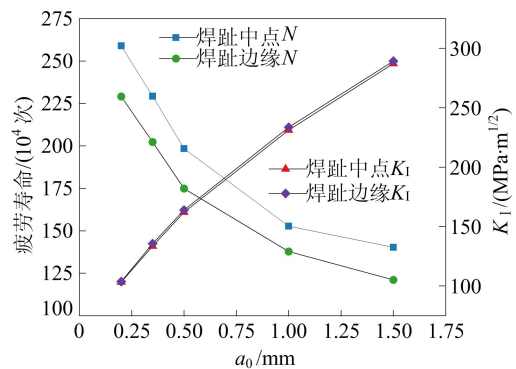


图 8 基于表面缺陷尺寸变化的疲劳寿命

#### 4.4 表面缺陷方向的影响

以半椭圆形作为初始缺陷形态,尺寸取短半轴值  $a_0 = 0.20$  mm、长半轴值  $c_0 = 1.00$  mm,即缺

陷形状比  $a_0/c_0$  取值为 0.2。分别取焊趾中点与边缘点这两处代表性点位,以缺陷平面与植入处表面的夹角度数为研究参数,通过试算发现当角度小于  $30^\circ$  时裂纹基本不扩展,因此设置  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  这 4 个角度参数。不同缺陷方向的疲劳寿命及缺陷植入时裂纹短轴方向的应力强度因子如图 9 所示。

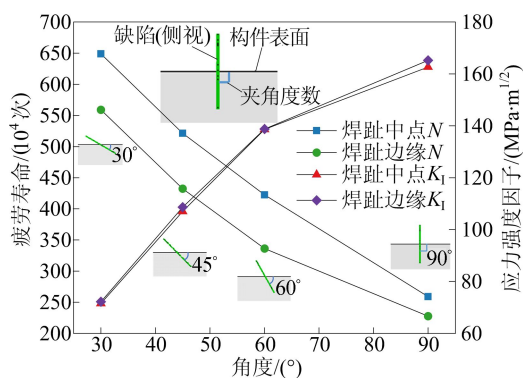


图 9 基于表缺陷方向变化的疲劳寿命

由图 9 可知,中点及边缘点处缺陷应力强度因子随植入角度的增加而增加,且两处应力强度因子大小基本一致;中点及边缘点处缺陷疲劳寿命随着植入角度的增加而减少,中点处减少幅度约为 60.1%,边缘点处减少幅度约为 59.3%。由此可知,缺陷方向对疲劳性能具有明显影响,规律为植入角度越大对应疲劳寿命越小,并且中点及边缘点处变化规律及幅度基本一致。因为该方向角度的变化范围为  $0^\circ \sim 90^\circ$ ,所以从分析结果可知,对疲劳性能最不利的缺陷角度为  $90^\circ$ 。本节得到的疲劳寿命随缺陷方向变化规律与文献[23]提出的理论相似,即材料构件的疲劳性能与垂直于最大拉应力平面上的缺陷投影面积成正相关。

## 5 内部缺陷

### 5.1 内部疲劳开裂过程

由于内部缺陷较表面缺陷更不易开裂<sup>[10]</sup>,为获得更好的裂纹计算结果,依据缺陷评定文献[18-20],此处将初始缺陷尺寸取为短半轴值  $a_0 = 0.50$  mm,长半轴值  $c_0 = 2.50$  mm,形态为椭圆形。在焊趾处横截面的中点植入该内部缺陷,缺陷平面与构件表面垂直。裂纹扩展时每个扩展步长及裂尖单元环半径的设置原则同表面缺陷,裂纹扩展参数仍同表面缺陷分析一致。疲劳裂纹扩展形态及裂纹形状比变化如图 10 所示,随着裂纹的扩展,其形态由初始的椭圆形逐

渐演变为接近圆形;随着裂纹深度的增加,裂纹形状比呈现先快速增大后逐渐稳定的趋势,最终值约为 0.80。由此可得,裂纹垂直深度方向(缺陷长轴方向)扩展尺寸为 10.0 mm(该尺寸与板厚比值为 0.63)。 $a-N$  曲线如图 11 所示,疲劳寿命变化趋势为先缓慢后加快;当裂纹深度  $a$  扩展到临界值(板件厚度的 1/2,为 8.0 mm)时,疲劳寿命为  $2\ 017 \times 10^3$  次。

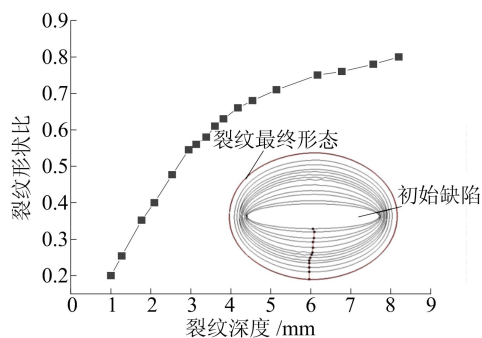


图 10 疲劳裂纹扩展形态及裂纹形状比变化

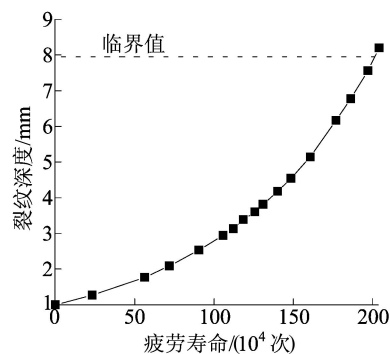


图 11 内部缺陷  $a-N$  曲线

### 5.2 内部缺陷形状比的影响

以椭圆形作为初始缺陷形态,缺陷的植入位置同 5.1 节。参考 4.2 节取缺陷形状比  $a_0/c_0$  为 0.1、0.2、0.4、0.6 进行分析。为确保裂纹能正常开裂,取缺陷深度方向尺寸短半轴值  $a_0$  分别为 0.50、0.60、0.70 mm。各组缺陷裂纹前沿短轴方向应力强度因子  $K_I$  随形状比的变化如图 12a 所示,各组缺陷随形状比变化的疲劳寿命如图 12b 所示。由图 12a 可知,应力强度因子随不同形状比缺陷的变化趋势相同,即随形状比的增加而减少,与表面缺陷一致;由图 12b 可知,疲劳寿命随着缺陷形状比的增大而增加,且各缺陷变化规律基本一致,锁定初始缺陷短半轴  $a_0$  不变,当缺陷形状比从 0.10 增大到 0.60,疲劳寿命总增加幅度为 77.2%~103.1%,可见疲劳寿命对于缺陷形状比较为敏感。

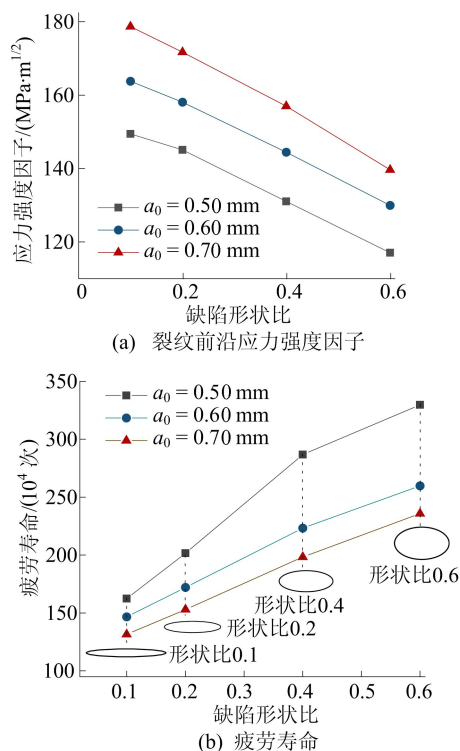


图 12 不同形状比的内部缺陷

### 5.3 内部缺陷尺寸的影响

以椭圆形作为初始缺陷形态。将缺陷植入焊趾线截面的中点位置,锁定缺陷形状比  $a_0/c_0 = 0.2$  不变,依次选定  $a_0$  值为 0.50、0.70、1.00、1.50、2.00 mm,则对应  $c_0$  值分别为 2.50、3.50、5.00、7.50、10.00 mm。不同缺陷尺寸的疲劳寿命及缺陷植入时裂纹短轴方向的应力强度因子如图 13 所示。

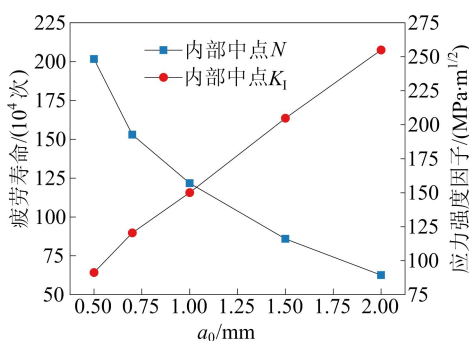


图 13 基于内部缺陷尺寸变化的疲劳寿命

由图 13 可知,应力强度因子随缺陷尺寸的增加而增加,疲劳寿命随缺陷尺寸的增加而减少,减少幅度约为 68.9%;将疲劳寿命差值除以尺寸差值,得到疲劳寿命随尺寸变化的平均速率为  $92.7 \times 10^4$  次/mm。由此可知,缺陷尺寸对疲劳性能具有明显影响,规律为尺寸越大对应疲劳寿

命越小。另外,通过表面缺陷尺寸影响分析结果对比可得,同等缺陷深度尺寸下,内部缺陷比表面缺陷的疲劳寿命增加约 24.3%,可见内部缺陷对构件疲劳性能的危害程度相较于表面缺陷更小。

### 5.4 内部缺陷方向的影响

以椭圆形作为初始缺陷形态,尺寸取短半轴值  $a_0 = 0.50$  mm,长半轴值  $c_0 = 2.50$  mm。将缺陷植入沿焊趾线截面的中点位置,以缺陷平面与构件顶面(或底面)的夹角度数为研究参数,设置  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  这 4 个角度参数。不同缺陷方向的疲劳寿命及缺陷植入时裂纹短轴方向的应力强度因子如图 14 所示。

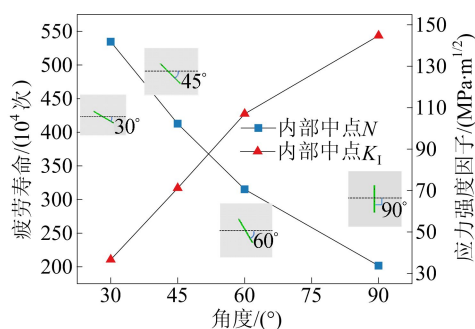


图 14 基于内部缺陷方向变化的疲劳寿命

图 14 中,植入角度为  $30^\circ$  时应力强度因子低于门槛值并未开裂,此处的疲劳寿命为降低门槛值后得到的。由图 14 可知,中点处缺陷应力强度因子随植入角度的增加而增加,总增加幅度为疲劳寿命随着夹角度数的增加而减少,总减少幅度约为 62.3%。由此可知缺陷方向对疲劳性能具有明显影响,规律为夹角度数越大对应疲劳寿命越小,且对疲劳性能最不利的缺陷角度为  $90^\circ$ ,同时中点及边缘点处变化规律及幅度基本一致。

## 6 结 论

本文对正交异性钢桥面板中的纵肋及顶板对接焊缝进行了结构等效与受力分析,得到了该细节的基本焊接构造及对应受力状态。随后分析了关于表面与内部缺陷的疲劳开裂特性,并分别基于形状比、方向、尺寸等缺陷参数进行疲劳寿命变化规律分析。具体结论如下:

- (1) 基于断裂力学理论建立的 ABAQUS 与 FRANC3D 联合评估方法能够较为准确地模拟出裂纹扩展深度与疲劳寿命之间的关系曲线,适用于含缺陷构件的疲劳性能评估。
- (2) 表面缺陷在裂纹扩展过程中的形态由初

始的半椭圆形逐渐演变为接近半圆形;内部缺陷在裂纹形态由初始的椭圆形逐渐演变为接近圆形。

(3) 含不同形状比及角度初始缺陷的试件在疲劳寿命上出现了显著的差异。锁定短半轴长度,当形状比从 0.1 增加至 0.6 时,疲劳寿命平均增加幅度分别为 88.7%(表面缺陷)和 90.2%(内部缺陷);锁定缺陷尺寸不变,当缺陷植入角度从 30°增大到 90°时,平均减少幅度为 59.7%(表面缺陷)和 62.3%(内部缺陷)。

(4) 含内部缺陷或表面缺陷试件的疲劳寿命对初始缺陷尺寸变化的敏感程度不同。对于表面缺陷,锁定形状比  $a_0/c_0=0.2$  不变,依次选定短半轴值  $a_0$  为 0.20、0.35、0.50、1.00、1.50 mm,疲劳寿命减少幅度约为 46.5%,对于内部缺陷,同样锁定形状比  $a_0/c_0=0.2$ ,短半轴值  $a_0$  分别取为 0.50、0.70、1.00、1.50、2.00 mm,疲劳寿命减少幅度约为 68.9%。

(5) 植入不同缺陷后获得的裂纹短轴方向应力强度因子大小可在一定程度上反映疲劳寿命的差别,应力强度因子越小疲劳寿命越大;反之亦然。

### [参 考 文 献]

- [1] 张清华,卜一之,李乔. 正交异性钢桥面板疲劳问题的研究进展[J]. 中国公路学报,2017,30(3):14-30,39.
- [2] 哈尔滨焊接研究所. 钢的弧焊接头 缺陷质量分级指南: GB/T 19418—2003[S]. 北京:中国标准出版社,2003:1-6.
- [3] 陈伯鑫. 焊接工程缺欠分析与对策[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [4] 李亚江. 焊接缺陷分析与对策[M]. 北京:化学工业出版社,2018.
- [5] 吉伯海,朱伟,傅中秋,等. 正交异性钢桥面板 U 肋对接焊缝疲劳寿命评估[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2015,34(1):16-21.
- [6] PARIS P C, ERDOGAN F. A critical analysis of crack propagation laws [J]. Journal of Fluids Engineering, 1963, 85(4):528-533.
- [7] FISHER J W. Fatigue and fracture in steel bridge, case studies[M]. New York: John Wiley & Sons,1984.
- [8] 王春生. 铆接钢桥剩余寿命与安全评估[M]. 上海:同济大学出版社,2007.
- [9] 刘益铭,张清华,崔闯,等. 正交异性钢桥面板三维疲劳裂纹扩展数值模拟方法[J]. 中国公路学报,2016,29(7):89-95.
- [10] 黄云,张清华,郭亚文,等. 钢桥面板纵肋与横隔板焊接细节表面缺陷及疲劳效应研究[J]. 工程力学,2019,36(3):203-213,223.
- [11] 黄云,张清华,余佳,等. 钢桥面板与纵肋焊缝疲劳评估及裂纹扩展研究[J]. 西南交通大学学报,2019,54(2):260-268.
- [12] British Standard Institution. Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures; BS 7910:2019 [S]. London: BSI Standards Limited, 2019: 300-350.
- [13] 宗亮. 基于断裂力学的钢桥疲劳裂纹扩展与寿命评估方法研究[D]. 北京:清华大学,2015.
- [14] 艾书民,于明,成晓鸣,等. 基于 Franc3D 软件的三维裂纹扩展分析与应用[J]. 机械强度,2018,40(1):251-254.
- [15] DELKHOSH E, KHURSHID M, BARSOU M I, et al. Fracture mechanics and fatigue life assessment of box-shaped welded structures; FEM analysis and parametric design[J]. Welding in the World,2020,64(9):1535-1551.
- [16] 张淞,徐铁柱,甘进,等. 含缺陷船体纵骨节点疲劳裂纹扩展寿命评估[J]. 中国造船,2020,61(1):29-40.
- [17] HE W T, LIU J G, XIE D. Probabilistic life assessment on fatigue crack growth in mixed-mode by coupling of Kriging model and finite element analysis[J]. Engineering Fracture Mechanics,2015,139:56-77.
- [18] British Standard Institution. Guide to fatigue design and assessment of steel products; BS 7608:2014[S]. London: BSI Standards Limited,2014:100-120.
- [19] HOBBAACHER A F. Recommendations for fatigue design of welded joints and components[M]. Switzerland: Springer International Publishing,2016.
- [20] RADAJ D, SONSINO C M, FRICKE W. Fatigue assessment of welded joints by local approaches[M]. Cambridge: Woodhead Publishing,2006.
- [21] 宗亮,施刚,王元清,等. Q345qD 桥梁钢疲劳裂纹扩展速率试验研究[J]. 中国铁道科学,2015,36(3):37-44.
- [22] 李红英,张希旺. Q345 钢断裂韧性和裂纹扩展速率研究[J]. 热加工工艺,2007(24):49-51.
- [23] KAMAYA M, MIYOKAWA E, KIKUCHI M. Growth prediction of two interacting surface cracks of dissimilar sizes[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 77(16): 3120-3131.

(责任编辑 张 镗)