

拉-扭复合疲劳加载作用下薄壁 钢圆管裂纹扩展机理

叶华文^{1,2}, 邓加林¹, 冯志皓¹, 杨 喆¹, 潘威洲¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 西南交通大学 桥梁智能与绿色建造全国重点实验室, 成都 611756)

摘 要: 针对开裂薄壁钢圆管在拉-扭复合疲劳加载作用下的寿命评估问题, 本文进行了裂纹扩展机理的研究。首先, 基于最大周向应力准则和 Paris 公式, 建立拉-扭双轴比例同相循环荷载下预裂薄壁钢圆管的裂纹扩展分析模型; 其次, 基于既有疲劳试验, 联合采用有限元软件 ANSYS 和 FRANC3D 的交互技术, 模拟钢圆管裂纹扩展行为, 验证本文复合型裂纹扩展分析模型; 最后, 基于有限元模型, 对剪-拉应力比、径厚比、初始损伤尺寸等因素进行参数分析。结果表明: 本文所提分析模型可准确预测拉-扭复合疲劳加载作用下薄壁钢圆管(径厚比超过 10)的裂纹扩展行为; 在拉-扭同相比比例疲劳加载情况下, 薄壁钢管复合型裂纹很快退化为张开型(I 型)裂纹, 且裂纹扩展角度由最大名义剪-拉应力比决定; 在最大主拉应力、应力比相同及小范围屈服条件下, 剪-拉应力比和初始损伤长度是影响钢管复合型裂纹扩展行为的主要因素。

关键词: 拉-扭复合疲劳; 薄壁钢圆管; 裂纹扩展; 同相比比例循环加载; 剪-拉应力比

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)10-3253-09

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231432

Fatigue crack propagation mechanism of thin-walled steel circular tube under tension-torsion proportional mixed mode loading

YE Hua-wen^{1,2}, DENG Jia-lin¹, FENG Zhi-hao¹, YANG Zhe¹, PAN Wei-zhou¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. State Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green Construction, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: To address the problem of life assessment for thin-walled cracked steel circular tube under tension-torsion composite fatigue loading, this paper conducts a study on the fatigue crack propagation mechanism. Firstly, based on the maximum circumferential stress criterion and the Paris equation, an analysis model for crack propagation of pre-cracked thin-walled steel circular tube subjected to tension-torsion biaxial proportional in-phase cyclic loading is established. Secondly, based on existing fatigue tests, the interactive techniques of finite element software ANSYS and FRANC3D is jointly used to simulate the crack propagation behavior of steel circular tube, validate this paper's proposed composite crack

收稿日期: 2023-10-29.

基金项目: 全国重点研发计划项目(2023YFB2604400, 2023YFB2604403); 国家自然科学基金项目(52278219); 中国中铁股份有限公司科技研究开发计划项目(2023-专项-02).

作者简介: 叶华文(1982-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 钢桥疲劳行为和新型材料应用. E-mail: hbha2000@163.com

propagation analysis model. Finally, based on the finite element model, parameter analyses are conducted on factors such as shear-to-tensile stress ratio, diameter-to-thickness ratio, and initial damage size. The results demonstrate that this paper's proposed analysis model accurately predicts crack propagation behavior of thin-walled steel circular tube (with diameter-to-thickness ratios exceeding 10) under tension-torsion composite fatigue loading. Under tension-torsion in-phase proportional fatigue loading conditions, the composite cracks in thin-walled steel tubes quickly evolve into opening-mode (Mode I) cracks, with the crack propagation angle determined by the maximum nominal shear-to-tensile stress ratio. The shear-to-tension stress ratio and initial damage length were identified as the primary factors on the composite crack propagation behavior of the steel circular tubes under small-scale yield condition with the identical maximum principal tensile stress and stress ratio.

Key words: tension-torsion composite fatigue; thin-walled steel circular tube; crack propagation; in-phase proportional cyclic loading; shear-to-tension stress ratio

0 引言

钢管结构,尤其是钢圆管,因力学性能和防腐性能优异,广泛应用于高层建筑、大型场馆和大跨桥梁工程中^[1,2]。钢圆管在制造、运输、焊接安装过程中,不可避免会产生缺陷或损伤,这些损伤在服役期多种荷载反复作用下,易导致钢管疲劳开裂,甚至疲劳破坏,影响其服役安全性和耐久性。例如,近年来我国超过 400 座大跨钢管混凝土拱桥,已出现多起钢管构造疲劳开裂事故^[3-5]。目前,国内外学者的研究主要面向新建钢管结构,未考虑潜在初始缺陷,主要采用名义应力法和热点应力法^[6]评估其疲劳性能。而针对含初始损伤的钢管疲劳研究较少,主要采用基于断裂力学的有限元模拟方法^[7,8]进行钢管单向受力条件(轴力和面内弯矩)下断裂参数的分析和评估。实际工程或试验中,钢管的疲劳破坏与复杂应力状态、显著应力集中效应有关,难以用传统的单向应力状态来预测钢管断裂行为。目前,开裂钢管疲劳性能仍有许多要继续研究的课题:①建立在多轴循环加载状态的钢管疲劳裂纹扩展分析机理的研究,包括裂纹萌生部位的预测、扩展速率与路径的确定等;②影响钢管疲劳裂纹扩展行为的各种因素的深入研究;③疲劳裂纹扩展过程中钢管构件及结构整体性能的研究等。因此,开展开裂钢管的疲劳裂纹扩展行为研究,对保证钢管结构安全服役和运营维护具有重要工程意义。

裂纹邻域应力场分析是研究疲劳裂纹扩展行为及预测其寿命的基础。目前,土木工程钢结构

领域主要采用线弹性断裂力学,基于无限大薄平板裂纹尖端应力状态,对裂纹邻域应力场的力学行为进行研究。但钢管为曲面结构,裂纹对其应力影响不同于平板中的裂纹尖端应力场,尤其在复合荷载作用下。现有研究主要集中于单向荷载作用下(轴力和面内弯矩)钢管结构的疲劳行为。例如,童乐为等^[9]、程睿等^[10]通过试验和有限元分析研究轴力作用下 T 型圆管节点的疲劳性能。吴庆雄等^[11]开展轴力加载下钢管混凝土 KK 型节点疲劳模型试验,揭示其热点应力分布规律及疲劳裂纹的萌生、扩展情况。张道明等^[12]分析轴拉作用下钢管裂尖邻域应力场后发现,采用裂尖切面作为应力场作用平面是可行的。实际工程中,钢圆管为闭口截面,主要承受轴力,还会承担扭转荷载。因此,少数学者^[13-15]对拉-扭复合疲劳加载下钢管构件的裂纹萌生和扩展行为进行了试验研究。尽管如此,钢圆管往往处于多轴复合荷载作用,受力复杂,其裂纹扩展行为受多轴荷载比、初始损伤程度、钢管几何尺寸、边界条件等因素的影响,目前仍缺乏相应的扩展行为理论指导。

本文针对钢管构件典型的拉-扭复合疲劳加载作用,首先,基于小范围屈服条件、最大周向应力准则和 Paris 公式,提出了拉-扭复合疲劳加载作用下薄壁钢圆管的裂纹萌生与扩展分析模型。其次,根据既有疲劳试验,联合采用有限元软件 ANSYS 和 FRANC3D 的交互技术,模拟钢圆管裂纹扩展行为,验证本文模型的正确性与有效性。最后,基于数值模拟,对影响钢圆管疲劳裂纹扩展机理的关键参数(如剪-拉应力比、径厚比、初始损伤尺寸等)进行敏感性分析。

1 复合疲劳荷载下钢管裂纹扩展分析模型

为建立复合疲劳荷载下预裂钢管裂纹扩展分析模型,所作基本假定如下:①根据圣维南原理,钢管远端的(距裂纹一定距离)应力场不受裂纹尺寸影响;②忽略初始裂纹宽度;③裂纹扩展过程中,钢管受力始终满足小范围屈服条件(线弹性状态),破坏模式为疲劳断裂;④钢管径厚比超过 10,管厚度方向的应力忽略不计;⑤裂纹扩展准则采用最大周向应力准则,即钢管裂纹沿周向正应力(主拉应力)最大的方向扩展。目前常用的裂纹扩展轨迹预测方法主要有最大周向应力准则、最大能量释放率准则、最小应变能密度准则 3 种,在小范围屈服条件下 3 者是等效的,且最大周向应力准则最常用。

图 1 为拉-扭复合循环荷载下预裂钢管的受力与裂纹扩展分析模型。外径和壁厚分别为 D 和 t 的钢管表面有一道垂直于管轴向、长度为 $2a_0$ 的初始裂纹。在远离裂纹的圆管两端,施加拉-扭同比例疲劳载荷,对应的轴拉应力为 σ 、扭转(周向)剪应力为 τ 。裂尖邻域应力场十分复杂,基于平板 I、II 型裂纹裂尖邻域应力场影响范围较小的特点,在钢管曲表面裂尖邻域构建切平面,在该切平面上建立局部新的极坐标系,代替钢管裂纹尖端曲面柱状坐标系。其中, θ_i 和 a_i 分别为比例复合疲劳荷载下的裂纹扩展分叉角度(裂纹扩展方向与初始方向的顺时针夹角)和长度,此时裂尖邻域应力场可表示为:

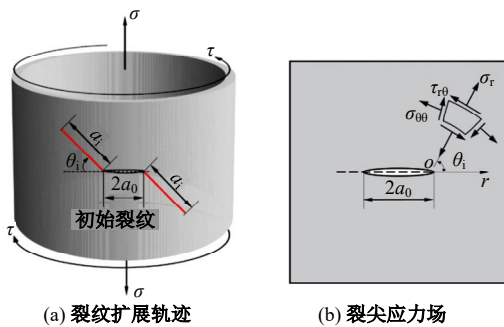


图 1 预裂钢管的受力与裂纹扩展分析模型

Fig. 1 Stress and crack propagation analysis model of pre-cracked steel tubes

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{4\sqrt{4\pi r}} \left[K_I \left(\cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \right) - 3K_{II} \left(\sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] \quad (1)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\cos(\theta/2)}{2\sqrt{2\pi r}} [K_I \sin \theta + K_{II} (3\cos \theta - 1)] \quad (2)$$

式中: r 和 θ 为裂尖极坐标。

复合荷载作用下,钢管裂纹扩展行为一般采用扩展轨迹和速度表征。根据最大周向应力准则,钢管裂纹沿周向正应力(主拉应力)最大的方向扩展,令 $\partial \sigma_{\theta\theta} / \partial \theta = 0, \tau_{r\theta} = 0$, 可得:

$$K_{I\max} \sin \theta + K_{II\max} (3\cos \theta - 1) = 0 \quad (3)$$

根据式(3)可得扩展角 θ_i 为:

$$\theta_i = \begin{cases} 2 \tan^{-1} \left\{ 0.25 \left[\frac{K_{I\max}}{K_{II\max}} - \sqrt{\left(\frac{K_{I\max}}{K_{II\max}} \right)^2 + 8} \right] \right\} & (K_{II\max} \geq 0) \\ 2 \tan^{-1} \left\{ 0.25 \left[\frac{K_{I\max}}{K_{II\max}} + \sqrt{\left(\frac{K_{I\max}}{K_{II\max}} \right)^2 + 8} \right] \right\} & (K_{II\max} < 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $K_{I\max}$ 和 $K_{II\max}$ 分别为疲劳荷载作用下钢管 I、II 型裂纹的最大应力强度因子。

根据文献[16]的计算公式可得:

$$\frac{K_{I\max}}{K_{II\max}} = \frac{\sigma_{\max}}{\tau_{\max}} \quad (5)$$

式中: $\sigma_{\max}$ 和 $\tau_{\max}$ 分别为疲劳荷载作用下钢管的最大名义轴向拉应力和最大名义周向剪应力。

根据式(5),式(4)可表示为:

$$\theta_i = \begin{cases} 2 \tan^{-1} \left\{ 0.25 \left[\frac{\sigma_{\max}}{\tau_{\max}} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\max}}{\tau_{\max}} \right)^2 + 8} \right] \right\} & (K_{II\max} \geq 0) \\ 2 \tan^{-1} \left\{ 0.25 \left[\frac{\sigma_{\max}}{\tau_{\max}} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\max}}{\tau_{\max}} \right)^2 + 8} \right] \right\} & (K_{II\max} < 0) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)表明,裂纹扩展角度由最大名义剪-拉应力比 $\tau_{\max} / \sigma_{\max}$ 决定。对于钢管复合型裂纹扩展速率的计算,采用如下修正的 Paris 公式:

$$\begin{cases} \frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eq})^m \\ \Delta K_{eq} = \sqrt{\Delta K_I^2 + \beta \Delta K_{II}^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: ΔK_I 、 ΔK_{II} 分别为钢管 I、II 型裂纹应力强度因子幅; C 和 m 为与材料相关的常数; ΔK_{eq} 为等效应力强度因子幅; 根据 Forth 公式、Tanaka 公式、Pokluda 公式、Huber-Mises criterion 公式, α 的

取值范围为 $2 \sim 4$, β 的取值范围为 $1.3 \sim 8$, 本文根据最常用的取值情况, 取 $\alpha=2, \beta=3$ 。

2 疲劳试验

2.1 疲劳试验

依托文献[15]中预裂钢圆管的恒幅加载疲劳试验, 试件为中部预制槽型缺口 ($L=14$ mm, 两端为半径 $r=2$ mm 的半圆, 中心孔距 $l=10$ mm) 的圆管, 如图 2(a) 所示。钢管总长 450 mm, 外径 $D=42.4$ mm, 壁厚 $t=2.6$ mm。钢管中间自由段 (裂纹扩展段) 长 146 mm, 两端夹持固定段和荷载施加段长度均为 152 mm。定义坐标系: x 轴为圆管周向, z 轴为圆管轴向, t 轴为圆管厚度方向, o 点在圆管外表面缺口中心。所用钢材为低强度结构钢 S235, 其实测屈服强度为 378 MPa, 弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3。

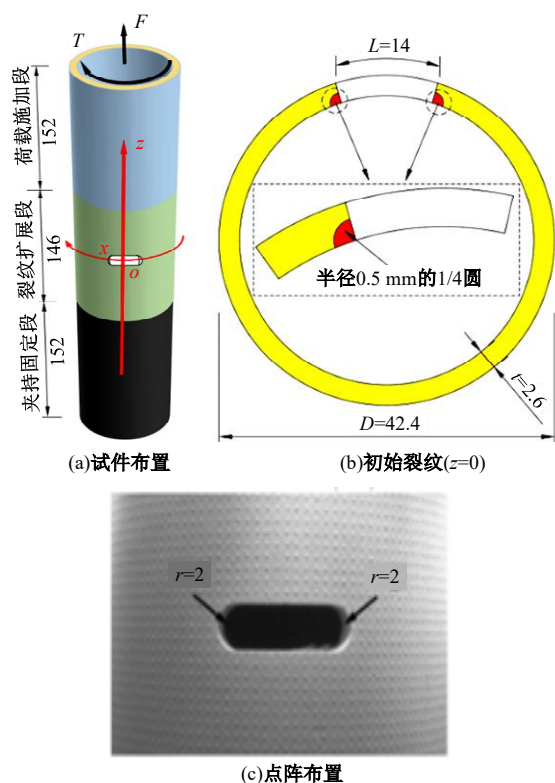


图 2 钢圆管试件 (单位: mm)

Fig. 2 Steel circular tube specimen (unit: mm)

作用于荷载施加段的恒幅疲劳加载工况分为 3 类: ①单轴拉压循环加载, 最大轴拉应力 $F_{\max}=45$ kN, 最大名义轴向拉应力 $\sigma_{\max}=138.4$ MPa, 荷载比 (应力比) 为 -1 ; ②拉-扭双轴比例同相循环加载, 最大轴拉力 $F_{\max}=33$ kN, 最大扭矩 $T_{\max}=382$ N·m, 荷载比 (应力比) 为 -1 , 最大名义轴向拉应力 $\sigma_{\max}=101.5$ MPa, 最大名义周向剪应力

$\tau_{\max}=62.6$ MPa, 最大名义剪-拉应力比 $\tau_{\max}/\sigma_{\max}=0.62$, 最大主拉应力为 131.34 MPa; ③单轴扭转循环加载, 最大扭矩 $T_{\max}=530$ N·m, 最大名义周向剪应力 $\tau_{\max}=82.17$ MPa, 荷载比 (应力比) 为 -1 。试验结果表明, 裂纹萌生于缺口处主拉应力最大位置。为方便后续的裂纹扩展仿真分析, 假定缺口处内壁沿主拉应力方向存在初始裂纹, 其形状为半径 0.5 mm 的 1/4 圆, 如图 2(b) 所示。加载频率为 $0.5 \sim 2$ Hz。为定位裂纹扩展路径, 钢管表面设置了 1 mm $\times$ 1 mm 点阵, 如图 2(c) 所示。

2.2 裂纹扩展分析模型

为模拟拉-扭复合疲劳加载作用下钢圆管的疲劳裂纹扩展行为, 根据图 2 的几何尺寸, 联合采用有限元软件 ANSYS 2020R1 与专业裂纹扩展分析程序 FRANC3D 7.5.5, 进行多尺度交互裂纹扩展数值分析, 如图 3 所示。钢材设定为各向同性的线弹性材料, 其弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3, 屈服强度为 378 MPa。多尺度交互模型包括: ①为裂纹扩展提供应力和边界条件的 ANSYS 整体模型; ②裂纹扩展分析 FRANC3D 子模型。ANSYS 整体模型采用高阶三维 20 节点实体单元 solid186, 如图 3(a) 所示, 包含裂纹扩展段、约束夹持固定段和荷载施加段。其中, 约束夹持固定段采用节点固结, 荷载施加段采用节点力施加扭矩和轴力。为在槽孔处 (试件实际开裂处或最大主拉应力处) 引入穿透初始裂纹, 对钢圆管中间段按 0.5 mm 的网格进行细化, 以提高计算精度。根据应力分布情况, 将 ANSYS 整体模型中可能发生裂纹扩展的区域作为子模型导入裂纹分

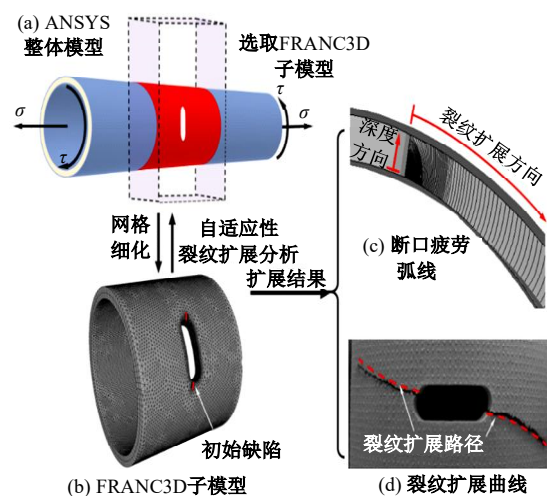


图 3 裂纹扩展分析有限元模型

Fig. 3 Finite element simulation of crack propagation analysis

析软件 FRANC3D,在槽孔内壁最大主拉应力处插入半径 0.5 mm 的 1/4 圆形初始角裂纹,如图 3(b)所示,子模型轴向总长 0.5 m。FRANC3D 自动迭代调用 ANSYS 计算结果完成应力计算,得到裂尖邻域应力场与位移场。然后采用 M-积分计算应力强度因子和扩展公式(见式(7),取 $\alpha=2, \beta=3$),实现疲劳裂纹扩展分析,如图 3(c)(d)所示。当等效应力强度因子幅达到疲劳断裂韧性或最大名义应力大于钢材屈服应力时,疲劳扩展停止。裂纹扩展速率计算采用式(7),应力比为 -1,扩展准则采用最大周向应力准则,根据文献[17], C 和 m 分别取 2.17×10^{-13} (单位:MPa, mm)和 3.0。当应力强度因子最大值达到断裂韧性值 K_{IC} 时,裂纹扩展终止,基于文献[15]试验结果,取断裂韧性值 $K_{IC}=2\ 000\text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$ 。

2.3 钢管应力与裂纹扩展分析

如图 4 和图 5 所示,为分析开裂前钢管的应力

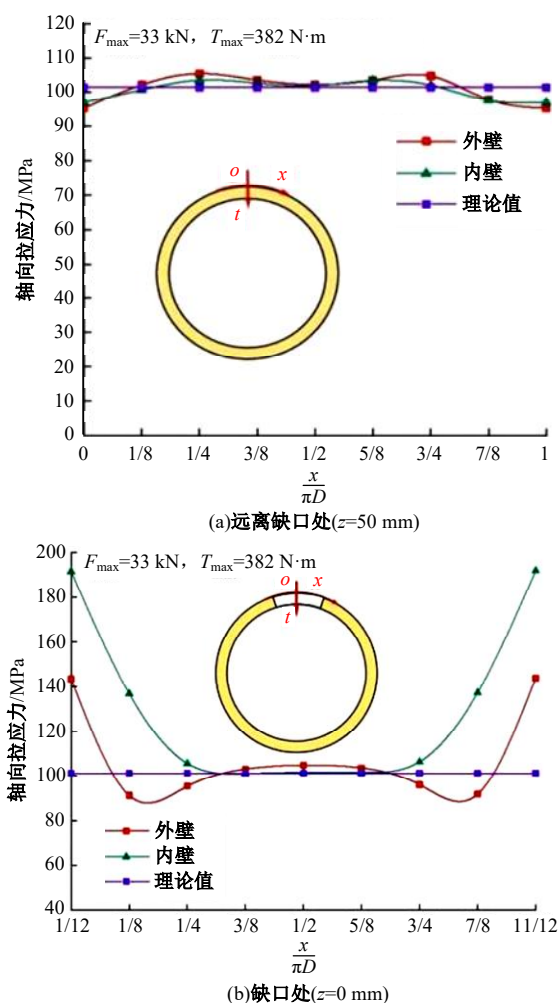


图 4 周向最大拉应力分布

Fig. 4 Distribution of circumferential maximum tensile stress

状态,分别在槽型缺口区($z=0\text{ mm}$)和远离槽型缺口区($z=50\text{ mm}$)提取钢管周向内外壁的轴向拉应力、径向及周向剪应力的有限元值和理论值。图 6 为缺口处的主拉应力分布。分析可知,钢管所受应力主要是轴向拉应力和周向剪应力,径向剪应力很小,可忽略不计。在远离槽型缺口区($z=50\text{ mm}$),应力有限元值和名义应力理论值吻合度较高,这表明有限元模型能合理反映试件的疲劳应力分布。而在槽型缺口区($z=0\text{ mm}$)存在明显的应力集中现象,且钢管内壁的主拉应力大于外壁,导致内壁先萌生疲劳裂纹。

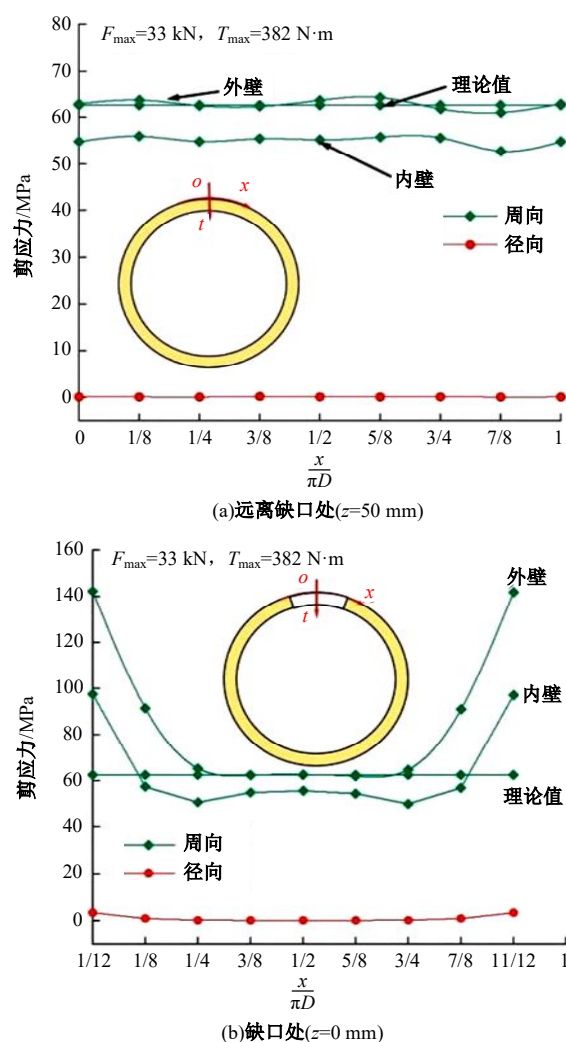


图 5 周向和径向最大剪应力分布

Fig. 5 Distribution of circumferential and radial maximum shear stress

由于文献[15]只提供了裂纹扩展轨迹图片,未给出具体实测值,因此本文采用图像软件提取了实测值。对于不同方向的裂纹扩展轨迹,统一采用各裂纹在周向 x 轴和轴向 z 轴的增量 $|\Delta x|$ 和 $|\Delta z|$ 表征,裂纹扩展长度 a 通过增量 $|\Delta x|$ 和 $|\Delta z|$ 计算得

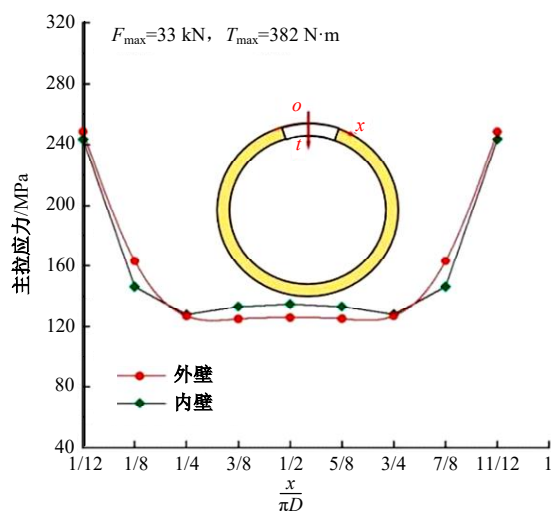


图 6 缺口处最大主拉应力分布

Fig. 6 Distribution of maximum principal tensile stress at notch

到。图 7 对比了疲劳裂纹扩展轨迹的实测值和有限元预测值,各裂纹扩展轨迹基本相同,但由于裂

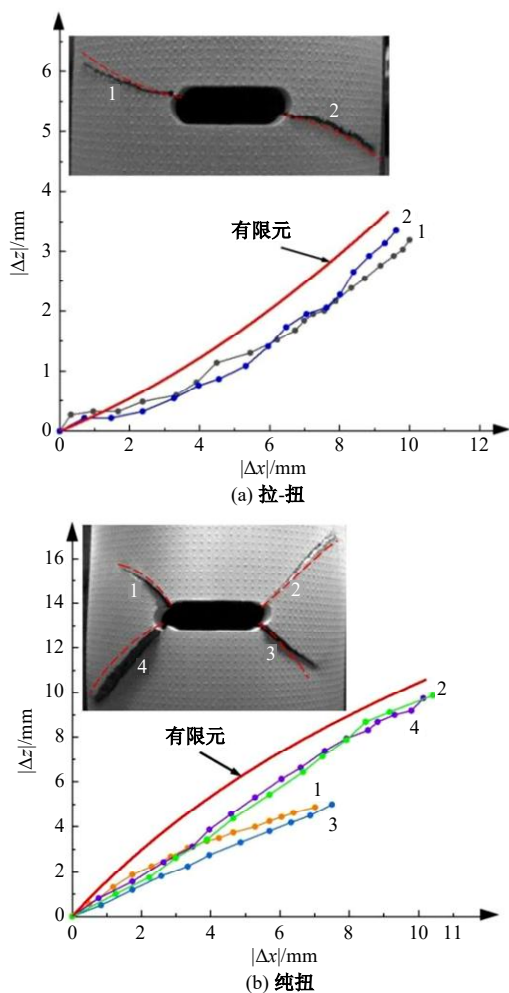


图 7 裂纹扩展轨迹比较

Fig. 7 Comparison of crack propagation rajectories

纹扩展受材料、荷载等多方面因素影响,离散性很大,因此预测值与实测值有一定差异。图 8 为同一试件多条裂纹扩展情况对比,可见即使在同一条件下,实际裂纹扩展轨迹也有差异。这可能是由于数值模拟难以充分考虑多裂纹相互耦合作用、裂纹面接触摩擦、裂纹闭合效应等因素所致。总体而言,有限元模型预测的裂纹扩展轨迹与实测结果吻合较好,证明其能够合理、准确地预测试件疲劳裂纹扩展行为。综合应力分布和裂纹扩展分析的对比较,进一步证明有限元模型既能合理反映试验模型的疲劳应力状态,又能准确预测裂纹扩展情况。

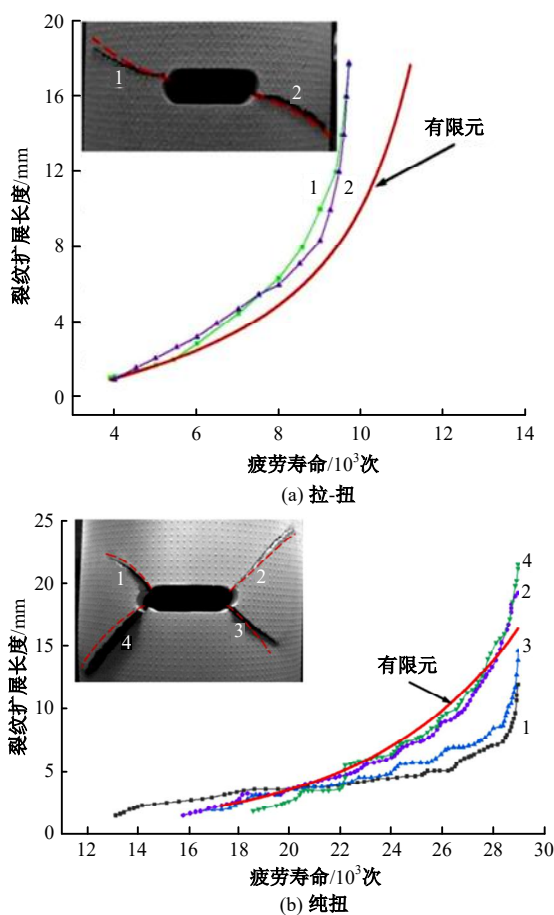


图 8 疲劳裂纹扩展对比

Fig. 8 Comparison of fatigue crack propagation

图 9 为拉-扭和纯扭两种工况下钢管 3 种类型应力强度因子随裂纹扩展长度 a 增加的变化趋势,其中 a_i 为裂纹扩展初始长度, a_f 为裂纹扩展终止时的临界长度。结果表明,在拉-扭比例同相循环加载下,钢管缺口处内壁裂纹萌生后,Ⅰ型裂纹成为主导,Ⅱ型和Ⅲ型裂纹应力强度因子很快衰减到 0,可忽略不计。

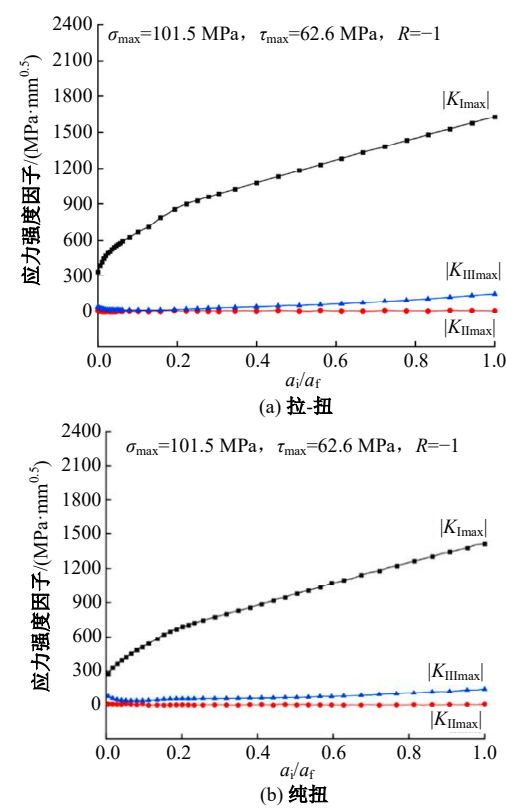


图 9 裂纹扩展过程中应力强度因子变化
Fig. 9 Variation of stress intensity factors during crack propagation

3 钢管裂纹扩展机理分析

损伤钢管管的裂纹扩展行为除受最大主拉应力和应力比影响外,还可能受最大剪-拉应力比 $\tau_{\max}/\sigma_{\max}$ 、初始损伤总长度 L 、圆管径厚比 D/t 等因素影响。为探究这些参数对钢管疲劳裂纹扩展行为的影响,仍以图 3 所示试验模型为基础,采用有限元模型对裂纹扩展轨迹和疲劳寿命进行参数分析。在有限元模型中,钢管长度取 450 mm,外径 $D=42.4$ mm,槽型缺口形状与试件相同,施加比例同相轴拉和扭转循环荷载,荷载比均为 -1 ,名义最大主拉应力恒定为 131.34 MPa。根据对称性原理,只选取多裂纹中的一条进行分析,钢材断裂韧性值均为 $K_{IC}=2\,000\text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$ 。

根据钢管结构规范和实际小直径结构用薄壁钢管的应用情况,各项设计参数的基准值和取值范围如表 1 所示。参数分析时,研究参数在取值范围内变化,其余设计参数均取基准值。在分析初始损伤几何尺寸的影响时,以缺口总长度 L 与圆管圆周 πD 之比 $L/(\pi D)$ 表征初始损伤程度,保持外径 $D(D=42.4\text{ mm})$ 不变,只改变总长度 L ;在分析圆管径厚比 D/t 的影响时,保持厚度($t=$

2.6 mm)和 $L/(\pi D)$ 不变,只改变外径 D 。采用正则化的疲劳寿命 (N_i/N_f) 表征各因素的影响效应,其中 N_i 和 N_f 分别为变化参数和基准参数对应的疲劳寿命。

表 1 裂纹扩展分析的关键参数		
Table 1 Key parameters for crack propagation analysis		
关键参数	基准值	研究范围
最大剪-拉应力比 $\tau_{\max}/\sigma_{\max}$	0.62	$\tau_{\max}=0$ (轴拉)、0.62、1.0、 $\sigma_{\max}=0$ (纯扭)
初始损伤长度 $L/(\pi D)$	0.105 ($D=42.4\text{ mm}$, $L=14\text{ mm}$)	0.03、0.105、0.21
钢管径厚比 D/t	16 ($t=2.6\text{ mm}$)	10、16、20

3.1 最大名义剪-拉应力比

图 10 分别分析了不同最大名义剪-拉应力比 $\tau_{\max}/\sigma_{\max}$ 对裂纹扩展轨迹和疲劳寿命的影响。结果表明,最大名义剪-拉应力比对裂纹扩展轨迹影响显著,对疲劳寿命也有一定影响。其中, $\tau_{\max}=0$ 对应轴拉工况, $\sigma_{\max}=0$ 对应纯扭工况。拉-扭工况下剪应力的比重越大,疲劳寿命越低,纯扭工况

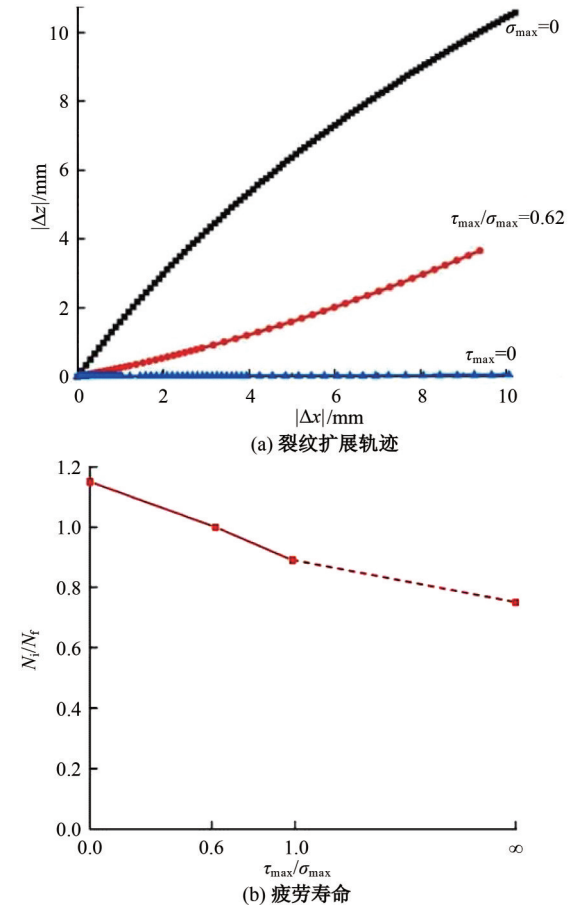


图 10 最大名义剪-拉应力比的影响
Fig. 10 Effect of ratio of maximum tension-to-shear stress

下的疲劳寿命仅为轴拉工况的 60%,其原因可能是纯扭工况下钢管出现裂纹的数量最多,造成局部刚度折减更严重,且裂纹间存在耦合作用,使得疲劳寿命降低。

3.2 初始损伤尺寸

图 11 分别分析了初始损伤长度对裂纹扩展轨迹和疲劳寿命的影响。结果表明,初始损伤长度对疲劳寿命影响显著,对裂纹扩展轨迹影响较小。初始损伤长度的增长显著降低了疲劳寿命,其主要原因是裂纹扩展驱动力和速率随初始损伤长度增加而快速增加,如式(7)所示。

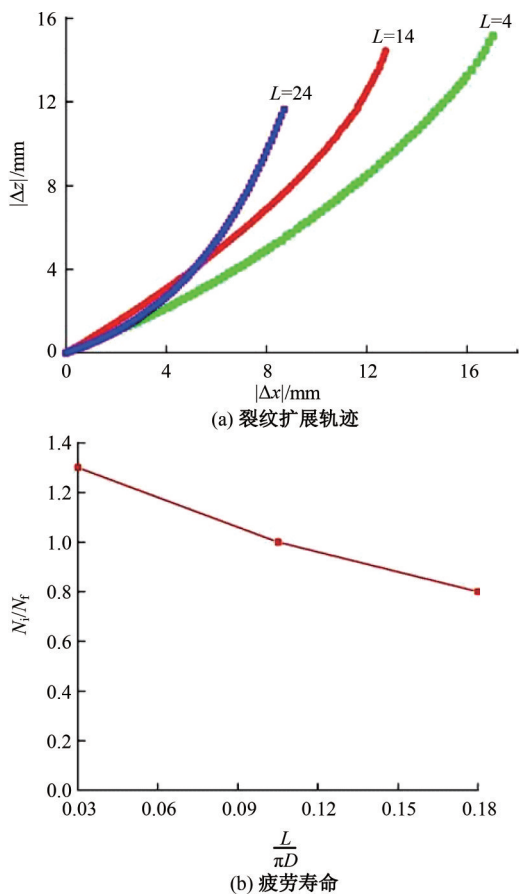


图 11 初始损伤长度的影响

Fig. 11 Effect of initial damage length

3.3 钢管径厚比

图 12 分析了钢管径厚比 D/t 对裂纹扩展轨迹和疲劳寿命的影响。结果表明,径厚比对疲劳寿命影响显著,对裂纹扩展轨迹影响很小。径厚比越大,钢管曲面效应的影响越小,其受力状态越接近平板。图 12(a)表明,对于径厚比超过 10 的薄壁圆管,采用图 1 所示模型可较准确地预测裂纹扩展轨迹。在壁厚和初始损伤长度 L 相同、外径 D 不同的情况下,钢管的疲劳寿命随外径增加

而增加,其原因是相对初始损伤 $L/(\pi D)$ 减小了,疲劳裂纹扩展寿命提高了,如图 12(b)所示。

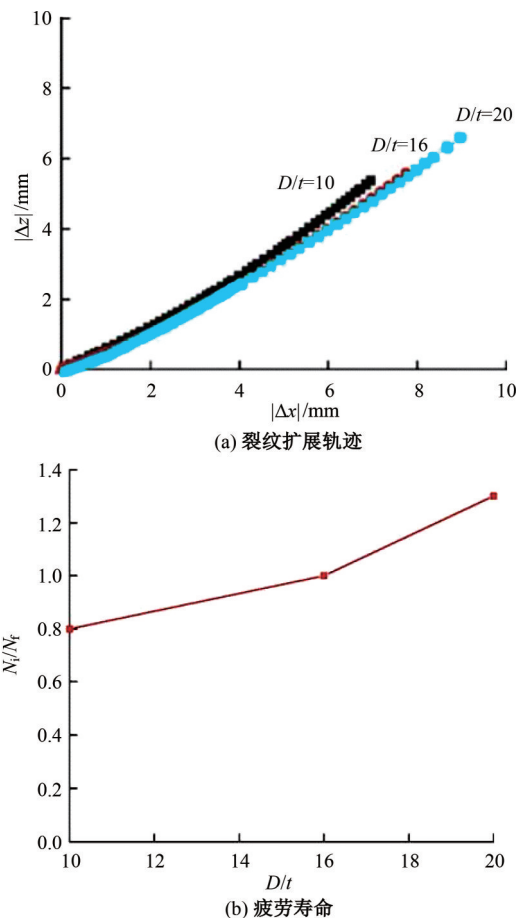


图 12 径厚比的影响

Fig. 12 Effect of diameter-to-thickness ratios

4 结 论

(1)对于小范围屈服条件下径厚比超过 10 的薄壁钢圆管,基于最大周向应力准则和 Paris 公式提出的复合型裂纹扩展分析模型,可准确预测拉-扭复合疲劳加载作用下的裂纹萌生与扩展行为。

(2)在拉-扭同比例疲劳加载作用下,薄壁钢管复合型裂纹很快退化为张开型(I型)裂纹,且裂纹扩展角度由最大名义剪-拉应力比决定。

(3)参数分析结果表明,在最大主拉应力、应力比相同及小范围屈服条件下,剪-拉应力比和初始损伤长度是影响薄壁钢管裂纹扩展轨迹和扩展速度的主要因素。

参考文献:

- [1] 陈以一, 王伟, 周锋. 钢管结构:新需求驱动的形式拓展和性能提升[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(3): 1-20.

- Chen Yi-yi, Wang Wei, Zhou Feng. Steel tubular structures: configuration innovation and performance improvement driven by new requirements[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(3): 1-20.
- [2] 韩林海, 牟廷敏, 王法承, 等. 钢管混凝土混合结构设计原理及其在桥梁工程中的应用[J]. 土木工程学报, 2020, 53(5): 1-24.
- Han Lin-hai, Mu Ting-min, Wang Fa-cheng, et al. Design theory of CFST (concrete-filled steel tubular) mixed structures and its applications in bridge engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(5): 1-24.
- [3] 秦荣, 谢肖礼, 彭文立, 等. 钢管混凝土拱桥钢管开裂事故分析[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 74-77.
- Qin Rong, Xie Xiao-li, Peng Wen-li, et al. Analysis for cracking accidents of concrete-filled-steel-tube arch bridge[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 74-77.
- [4] 黄汉辉, 陈康明, 吴庆雄, 等. 某中承式钢管混凝土桁式拱肋节点疲劳开裂分析[J]. 工程力学, 2017, 34(增刊1): 167-173.
- Huang Han-hui, Chen Kang-ming, Wu Qing-xiong, et al. Study on fatigue cracking of joint in a half-through CFST truss arch rib joint[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(Sup. 1): 167-173.
- [5] Wang Q, Nakamura S, Chen B C, et al. Fatigue damage of a half-through concrete-filled steel tubular trussed arch bridge in China[C]//Proceedings of the World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics. Wrocław, Poland, 2015: 1169-1182.
- [6] 姜磊, 刘永健, 王康宁. 焊接管节点结构形式发展及疲劳性能对比[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(3): 180-191.
- Jiang lei, Liu Yong-jian, Wang Kang-ning. Development of welded tubular joints and comparison of fatigue behaviour[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(3): 180-191.
- [7] 廖芳芳, 王伟, 李文超, 等. 钢结构节点断裂的研究现状[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(1): 67-75.
- Liao Fang-fang, Wang Wei, Li Wen-chao, et al. Review on research status of connection fracture of steel structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(1): 67-75.
- [8] Wang Y, Wang W, Zhang B, et al. A review on mixed mode fracture of metals[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020: No. 107126.
- [9] 童乐为, 顾敏, 朱俊, 等. 基于断裂力学的圆钢管混凝土 T 型焊接节点疲劳寿命预测[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 331-336, 354.
- Tong Le-wei, Gu Ming, Zhu Jun, et al. Prediction of fatigue life for welded t-joints of concrete-filled circular hollow sections based on fracture mechanics[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4): 331-336, 354.
- [10] 程睿, 陈阳, 崔佳, 等. 支管在轴向荷载作用下 Q460C 高强度 T 型圆管节点疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(4): 57-63, 124.
- Cheng Rui, Chen Yang, Cui Jia, et al. Experimental study on fatigue behavior of Q460C high strength steel welded tubular T-joints under axial loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(4): 57-63, 124.
- [11] 吴庆雄, 罗健平, 杨益伦, 等. 钢管混凝土 KK 型节点疲劳性能试验[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(1): 100-116.
- Wu Qing-xiong, Luo Jian-ping, Yang Yi-lun, et al. Fatigue performance test of KK-type joints of concrete-filled steel tubes[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 24(1): 100-116.
- [12] 张道明, 梁力. 轴向拉伸钢管 I 型裂纹尖端的应力场[J]. 力学与实践, 2015, 37(4): 513-517, 507.
- Zhang Dao-ming, Liang Li. The stress field at mode I crack tip on steel pipe under axial tension[J]. Mechanics in Engineering, 2015, 37(4): 513-517, 507.
- [13] Fu G, Yang W, Li C Q. Stress intensity factors for mixed mode fracture induced by inclined cracks in pipes under axial tension and bending[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2017, 89: 100-109.
- [14] Tanaka K, Takahashi H, Akiniwa Y. Fatigue crack propagation from a hole in tubular specimens under axial and torsional loading[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(4): 324-334.
- [15] Hos Y, Freire J, Vormwald M. Measurements of strain fields around crack tips under proportional and non-proportional mixed-mode fatigue loading[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 89: 87-98.
- [16] 中国航空研究院. 应力强度因子手册[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [17] ASTM. Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates: ASTM E647-11[Z]. West Conshohocken, PA: ASTM, 2011.