

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.01.016

## 塑性区对增材制造 316L 多轴缺口疲劳影响研究

王英玉, 董星亮, 龚 帅, 姚卫星

(南京航空航天大学飞行器先进设计技术国防重点学科实验室, 南京 210016)

**摘要:** 采用疲劳试验和有限元分析相结合的方法, 研究了选区激光熔化增材制造 316L 不锈钢缺口件在多轴载荷下缺口根部塑性区及其对缺口件疲劳寿命的影响。对增材制造 316L 不锈钢缺口件进行了单轴、比例和 90° 非比例路径下的疲劳试验, 研究了缺口几何尺寸、载荷水平和载荷路径等对缺口根部塑性区的影响, 在此基础上提出了缺口根部塑性区的表征方法, 利用缺口根部最大 von Mises 应力和提出的塑性区影响因子  $f$  构造疲劳损伤参量, 结合光滑件的单轴  $S-N$  曲线预测缺口件的多轴疲劳寿命。试验结果证明本文所提出方法的预测疲劳寿命大多在 3 倍误差分散带以内。

**关键词:** 多轴疲劳; 缺口; 增材制造; 塑性区; 寿命预测

**中图分类号:** V215.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2022)01-0140-10

## Effect of Plastic Region on Multiaxial Notch Fatigue Life of Additive Manufactured 316L

WANG Yingyu, DONG Xingliang, GONG Shuai, YAO Weixing

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-Advanced Design Technology of Flight Vehicle, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The plastic region at the notch root under multiaxial loading and its effect on fatigue life of 316L stainless steel notched specimens manufactured by selective laser melting are studied by means of fatigue tests and finite element analysis. The fatigue tests of 316L stainless steel notched specimens that are additively manufactured are carried out under uniaxial, proportional and 90° non-proportional loading paths. The effects of notch geometry, stress amplitude and loading path on the plastic region at the notch root are studied. Based on this, the characterization methods of plastic regions at the notch root are proposed. The fatigue damage parameters are constructed by using the maximum von Mises stress at the notch root and the proposed plastic region influence factor  $f$ . Finally, the multiaxial fatigue lives of notched specimens are estimated by the proposed method in conjunction with the uniaxial  $S-N$  curve of smooth specimens. The results demonstrate that the majority of the estimated lives by using the proposed method fall within the three-time scatter band.

**Key words:** multiaxial fatigue; notch; additive manufacturing; plastic region; life estimation

增材制造(也称为 3D 打印)是一种新型的、具有巨大发展潜力的先进制造技术,不同于传统的机械加工技术,该技术通过逐层增加材料的方式实现零部件的成型,在加工过程中不受刀具和零部件结

构的限制,能够制造出传统机加工方式难以甚至无法制造的复杂零部件,并可以将材料成型与结构设计优化结合起来,即实现制造和拓扑优化的协同<sup>[1-3]</sup>。随着科学技术的进步和经济社会的发展,

**基金项目:** 国家自然科学基金(51875276)。

**收稿日期:** 2021-02-06; **修订日期:** 2021-05-25

**通信作者:** 王英玉, 女, 副教授, E-mail: yywang@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 王英玉, 董星亮, 龚帅, 等. 塑性区对增材制造 316L 多轴缺口疲劳影响研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(1): 140-149. WANG Yingyu, DONG Xingliang, GONG Shuai, et al. Effect of plastic region on multiaxial notch fatigue life of additive manufactured 316L[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(1): 140-149.

增材制造越来越受到人们的重视,国内外对增材制造技术做了大量的研究,并且在一些领域实现了工程应用。增材制造技术的权威发展报告“Wohlers Report”指出,增材制造技术带来的结构轻量化和结构一体化成型的优势,使其有望在航空航天领域最先得突破应用<sup>[4]</sup>。国内外主要的航空航天企业和科研院所都开展了针对重要零部件的增材制造研究和应用试验。波音、空客、洛克希德·马丁、诺斯罗普·格鲁曼和通用电气等世界著名航空航天企业研发了增材制造的翼梁、翼肋、舱隔板、航空发动机叶片、燃油喷嘴、高压油箱和火箭发动机喷管等零部件产品<sup>[5-9]</sup>。国内的大型航空航天企业和科研院所也研制出了增材制造的飞机加强框、风挡整体窗框、中央翼缘条和球形燃料贮箱等零部件<sup>[9-12]</sup>。

增材制造零部件有别于传统机加工零部件,其加工成形方向、表面粗糙度及内部孔洞等因素均会对其疲劳性能产生影响。针对增材制造材料的疲劳性能,国内外专家学者做了一些研究。Kumar 等<sup>[13]</sup>研究了使用粘合剂喷射打印(Binder jet printing, BJP)和选区激光熔化(Selective laser melting, SLM)制成的 316L 奥氏体不锈钢的显微组织和疲劳强度,并将其与常规制造(Conventionally manufactured, CM)合金进行了对比。Falkowska 等<sup>[14]</sup>针对孔隙率不同的 316L 不锈钢烧结体,提出了一种线性和非线性的疲劳损伤累积模型。其损伤状态变量的增量取决于塑性应变的增量、法向应力的值和损伤状态变量自身的值。该研究发现不同的孔隙率不会影响材料中损伤累积的特性,而只会影响其累积速率。吴剑平<sup>[15]</sup>对选区激光熔化 316L 不锈钢试验件进行了单向拉伸试验以及疲劳裂纹扩展试验,研究了部分工艺参数(成型角度和能量密度)对该材料疲劳裂纹扩展性能的影响。另外一些学者<sup>[16-21]</sup>研究了微观组织和微观缺陷对增材制造金属材料疲劳性能的影响。

在工程实际中,由于载荷的复杂性,结构服役期间通常都受到多轴载荷的作用。另外,由于工程构件中往往存在开口、凹槽、凸台、弯折和分叉等结构不连续处,这使得其即使在承受单向载荷时,结构部分区域也有可能处于多轴应力应变状态。目前,在缺口件的多轴疲劳研究领域还未形成统一的理论,人们从不同的观点出发,提出了各种不同的疲劳寿命预测方法。其中,名义应力法<sup>[22-23]</sup>和局部应力应变法<sup>[24-25]</sup>在工程上应用较多,但由于对缺口效应的考虑不足,导致这两种方法疲劳寿命预测精

度较差。临界距离法<sup>[26-27]</sup>和应力场强法<sup>[28]</sup>精度较高,但计算过程复杂,不便于工程应用。

最近几年,国内外一些学者在前人研究成果的基础上提出了新的缺口件多轴疲劳寿命预测方法。Gallo 等<sup>[29]</sup>对具有不同理论应力集中系数的 316L 不锈钢缺口圆棒试件进行了多轴疲劳试验后发现,疲劳裂纹由缺口尖端萌生并沿径向扩展。基于此发现,通过考虑缺口尖端附近的应变梯度和最大有效应变变程,提出了一种新的寿命预测模型。Liao 等<sup>[30]</sup>将临界面法和临界距离法结合起来,提出了新的缺口件多轴疲劳寿命预测方法,通过对比疲劳寿命预测结果发现,将临界距离定义为与疲劳寿命相关的函数可以获得更高的疲劳寿命预测精度。Luo 等<sup>[31]</sup>将临界面法和临界距离法组合运用于拉扭多轴载荷下薄壁开孔缺口件的疲劳寿命预测,较为准确地预测了疲劳裂纹的萌生位置和扩展方向,但该方法的寿命预测精度仍有待提高。钟波等<sup>[32]</sup>针对缺口效应引起的应力梯度提出了等效应力梯度因子,并在此基础上提出了一种新的考虑应力梯度影响的多轴缺口件疲劳寿命预测方法。谭晶莹等<sup>[33]</sup>根据剪应力随距缺口根部距离的变化趋势确定有效损伤距离,采用体积法进行寿命预测,并获得了较高的预测精度。Razavi 等<sup>[34]</sup>、Branco 等<sup>[35]</sup>和 Meneghetti 等<sup>[36]</sup>将缺口根部附近特定区域内应变能密度特征值作为疲劳损伤参量,结合主寿命曲线预测缺口件的多轴疲劳寿命。

目前,国内外对增材制造材料疲劳寿命分析的公开报道较少,而对多轴载荷下增材制造金属缺口件的疲劳寿命分析研究更是鲜有报道。在开展材料内部孔洞对增材制造金属材料疲劳性能影响研究<sup>[16-17]</sup>的同时,希望从不同角度深入研究增材制造金属材料疲劳性能。因此,本文从宏观力学角度,开展了增材制造 316L 不锈钢光滑件和缺口件的单轴和多轴疲劳试验及弹塑性有限元分析,研究了缺口根部塑性区与缺口几何尺寸、载荷水平和载荷路径的关系,在此基础上提出了缺口根部塑性区的表征方法,并对缺口根部塑性区与疲劳寿命的关系进行了研究。

## 1 缺口件多轴疲劳试验

### 1.1 试验件材料与设计

#### 1.1.1 试验件设计

试验件分为光滑试验件和缺口试验件,其中,缺口试验件又分为 V 形缺口试验件、R2 缺口试验件和 R5 缺口试验件,各种试验件的形状和尺寸如图 1 所示。

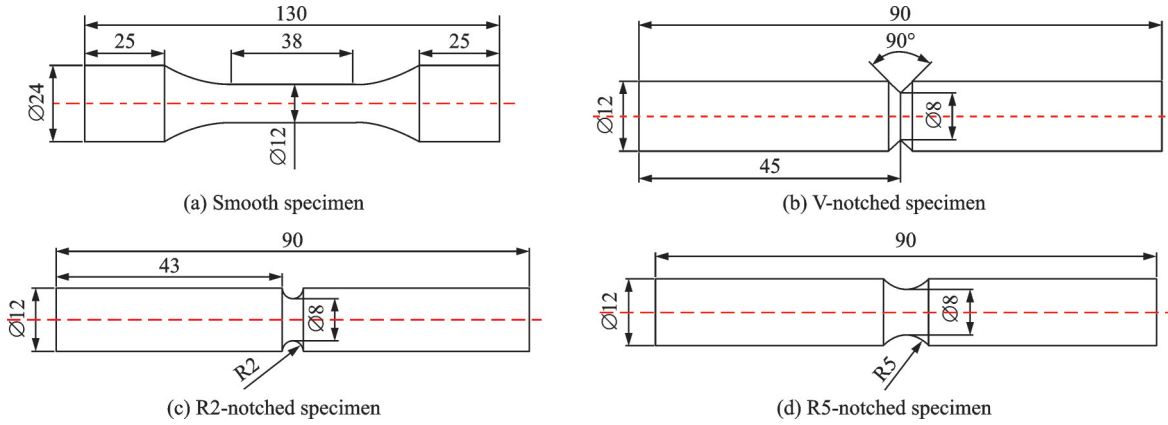


图1 试验件几何形状与尺寸

Fig.1 Geometry and dimensions of specimens

1.1.2 试验件材料

试验件的材料是316L不锈钢,采用选区激光熔化技术制备,使用450 W的激光功率和1 500~2 000 mm/s的扫描速度熔化样品粉末,扫描间距为0.05 mm,成型方向为试验件的长轴线方向,如图2所示。在选区激光熔化成型之后对试验件进行退火处理,退火温度为490 °C,时间为6 h,采用氩气冷却。最后通过机加工获得所需的试验件外形并将试验段表面抛光至表面粗糙度为0.05 μm的镜面。对光滑试验件进行准静态单向拉伸试验,获得了该材料在室温下的拉伸应力-应变曲线和基本机械性能数据,如图3和表1所示。

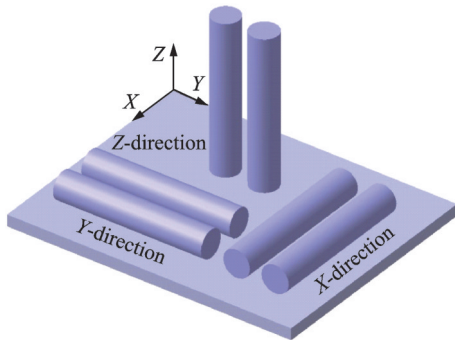


图2 试验件成型方向示意图

Fig.2 Schematic of specimen orientations

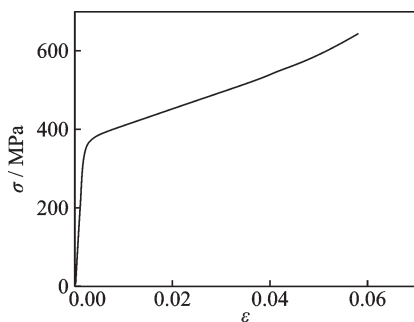


图3 选区激光熔化316L不锈钢在室温下的拉伸应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve of selective laser melting 316L stainless steel under tensile at room temperature

表1 选区激光熔化316L不锈钢的机械性能

Table 1 Mechanical properties of selective laser melting 316L stainless steel

E/GPa	$\sigma_y$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\nu$
190.8	380	642	0.3

1.2 试验方法和结果

1.2.1 试验介绍

所有试验均在MTS 809拉扭电液伺服疲劳试验机上进行,试验环境为室温和空气,疲劳寿命定义为试验件断裂时对应的载荷循环数。单轴疲劳试验采用轴向力控制,多轴疲劳试验采用轴向力和扭矩同时控制。试验件标距段的轴向应力幅值和表面剪应力幅值依据以下3个等式计算

$$\sigma_a = \frac{F}{\pi r^2} \tag{1}$$

$$\tau_a = \frac{2M}{\pi r^3} \tag{2}$$

$$\lambda = \frac{\sigma_a}{\tau_a} = \sqrt{3} \tag{3}$$

式中: $\sigma_a$ 为标距段的轴向应力幅值, $\tau_a$ 为标距段的表面剪应力幅值, $F$ 为施加在试验件上的轴向力, $M$ 为施加在试验件上的扭矩, $r$ 为光滑试验件标距段的平均半径(或者缺口试验件缺口处最小横截面的半径), $\lambda$ 为轴向应力幅值和剪应力幅值的比值。疲劳试验载荷波形为等幅正弦波,应力比 $R=-1$ ,平均应力为零,试验中任一时刻的瞬时加载应力表达式为

$$\sigma(t) = \sigma_a \sin \omega t \tag{4}$$

$$\tau(t) = \tau_a \sin(\omega t - \varphi) \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} \tag{5}$$

$$\sigma_{eq}(t) = \sqrt{[\sigma(t)]^2 + 3[\tau(t)]^2} \tag{6}$$

式中: $\sigma(t)$ 和 $\tau(t)$ 分别为瞬时轴向应力和瞬时表面剪应力, $\omega$ 为加载角频率, $t$ 为试验时间, $\varphi$ 为在试验件上加载的轴向应力和剪应力波形之间的相位差, $\sigma_{eq}(t)$ 为任一时刻试验件上加载的 von Mises 当量

应力。

根据研究目的,选取疲劳试验加载路径如图 4 所示。

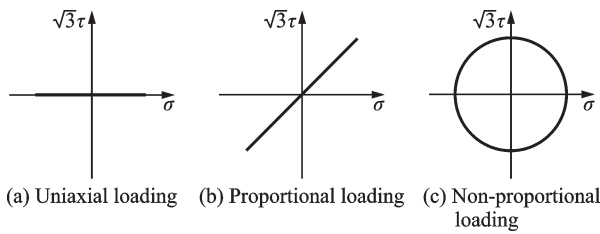


图 4 疲劳试验加载路径

Fig.4 Stress loading paths

### 1.2.2 疲劳试验结果

单轴疲劳试验结果如图 5 所示,多轴疲劳试验结果如图 6 所示。在单轴和多轴载荷下,各结构形式试件的疲劳寿命均随着载荷幅值的提高而减小。在多轴载荷下,拉应力幅值一定时,缺口试验件的疲劳寿命随着缺口半径增大而增大。

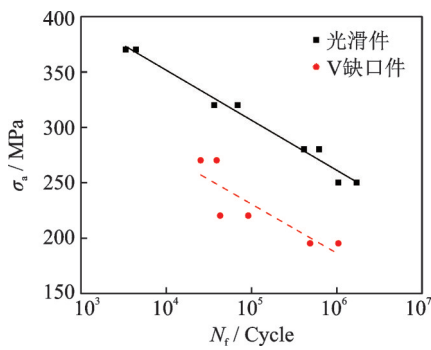
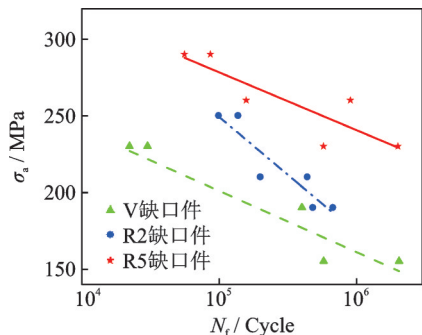
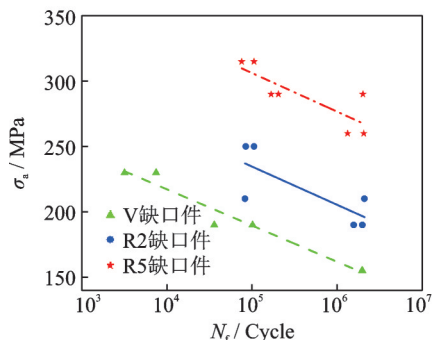


图 5 单轴疲劳试验结果

Fig.5 Uniaxial fatigue test results



(a) Fatigue test results under proportional loading



(b) Fatigue test results under non-proportional loading

图 6 缺口件多轴疲劳试验结果

Fig.6 Multiaxial fatigue test results of notched specimens

## 2 弹塑性有限元分析

对光滑件、V 缺口件、R2 缺口件和 R5 缺口件进行了弹塑性有限元分析,为了避免文章繁冗,以 V 缺口件为例进行阐述。

### 2.1 有限元建模

由于试验件是旋转体,为了提高计算精度和计算效率,采用轴对称有限元分析方法。有限元分析采用 ABAQUS 软件,选择含扭转的轴对称四边形单元 CGAX4R,为了提高缺口根部应力应变分析的精度,将缺口根部径向 1 mm 细化为 400 个单元,对该 V 缺口件的二维模型划分网格,得到节点数为 22 820,单元数为 22 140,网格划分结果如图 7 所示。

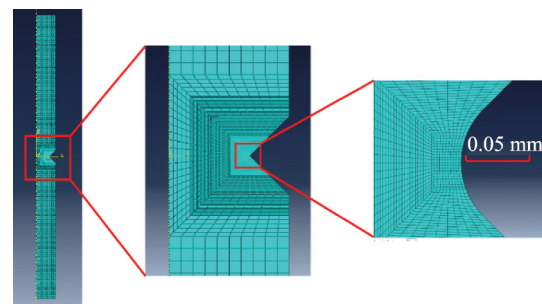


图 7 V 缺口件的网格划分

Fig.7 Meshes of the V-notched specimen

将准静态拉伸试验获得的应力-应变曲线输入有限元模型,选用多线性随动强化模型和 von Mises 屈服准则,以便于准确模拟材料的应力应变状态。对应于疲劳试验的加载方式,将试验件有限元模型的一端固定,在另一端施加拉-扭循环载荷。最后,利用 ABAQUS 求解器进行有限元计算。

### 2.2 有限元分析结果

对输出的结果进行后处理即可得到该有限元模型上各单元和各节点在某些特定循环数下的应力应变数据,如图 8 所示。由有限元分析结果可

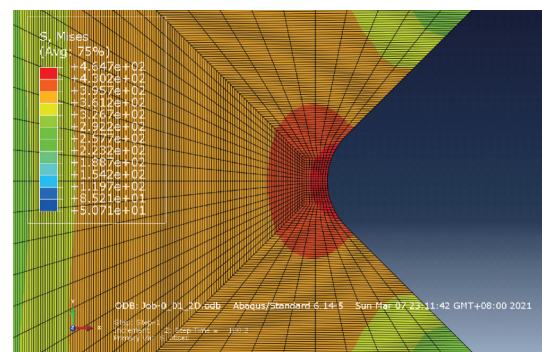


图 8 弹塑性有限元分析结果示例

Fig.8 Example of elasto-plastic finite element analysis results

知,在所研究的90°非比例载荷下,V缺口件在3级载荷水平时均存在塑性区,R2缺口件和R5缺口件在3级载荷水平时均不存在塑性区,因而无法研究其塑性区与载荷和缺口的变化关系,故本文未列出R2缺口件和R5缺口件在90°非比例载荷下的塑性区图像。

(1) 缺口几何尺寸对塑性区影响

在相同轴向应力幅值 $\sigma_a$ 的比例加载下,对不同类型缺口件的弹塑性有限元分析结果进行比较,如图9所示。V缺口的塑性区形状受缺口的影响较大,塑性区呈现出不规则的几何形状,R2缺口和R5缺口则由于缺口根部曲率较小,缺口效应较弱,其塑性区边界接近圆弧形。在较高的载荷水平下,R5缺口塑性区最大,R2缺口塑性区次之,V缺口的塑性区最小;随着载荷水平的降低,3种缺口的塑性区面积逐渐接近,随着载荷水平的进一步降低,R5缺口和R2缺口的塑性区迅速减小或消失,三者的塑性区面积大小顺序对调。

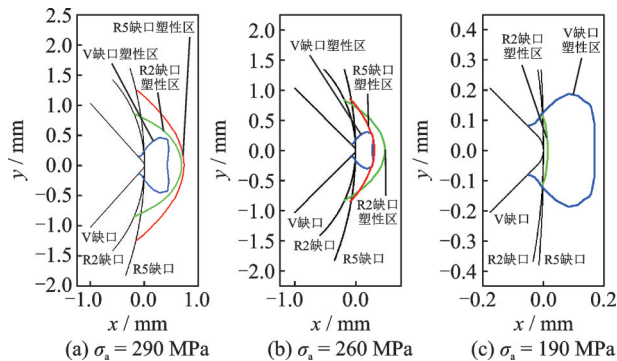


图9 缺口几何尺寸对塑性区影响对比( $\varphi=0^\circ$ )  
Fig.9 Comparison of influence of notch geometry on plastic region ( $\varphi=0^\circ$ )

(2) 载荷水平对塑性区影响

图10为在不同轴向应力幅 $\sigma_a$ 的比例加载下,各类型缺口塑性区比较结果。各类型缺口塑性区随着载荷水平的提高而增大,在此过程中,基本保持了其在各类型缺口下的形状特征。载荷水平较低时,V缺口的塑性区相对较大,R2缺口和R5缺口的塑性区较小,甚至没有塑性区,此时,V缺口塑性区面积最大,R2缺口次之,R5缺口的塑性区面积最小。随着载荷水平的提高,V缺口的塑性区面积增长较慢,R2缺口次之,R5缺口的塑性区面积增长最快,在较高的载荷水平下,R5缺口的塑性区面积最大,R2缺口居中,而V缺口塑性区面积最小。此外,在非比例加载时,缺口附近塑性区的面积小于同水平试验载荷下的比例加载情况。非比

例加载下,缺口附近塑性区的其他特征与比例加载时相同或接近。

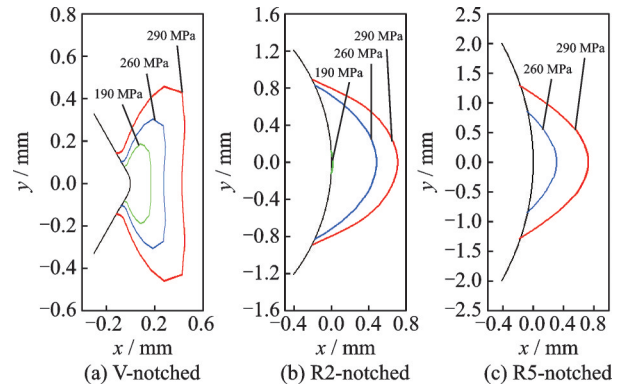


图10 载荷水平对缺口塑性区的影响( $\varphi=0^\circ$ )  
Fig.10 Comparison of influence of stress amplitude on plastic region ( $\varphi=0^\circ$ )

(3) 载荷路径

按疲劳试验载荷的施加方案,选取3级载荷,每一级载荷又分为不同的相位差,对V缺口件进行弹塑性有限元分析,得到缺口纵剖面的塑性区如图11所示。在同一载荷水平下,随着相位差增大,塑性区面积减小,尤其是相位差大于60°时,随着相位差进一步增大,缺口塑性区的面积迅速减小,相位差为90°时,缺口塑性区的面积最小。此外,相位差较小时缺口塑性区边界的形状不规则,随着相位差增大,缺口塑性区的边界逐渐接近圆弧。

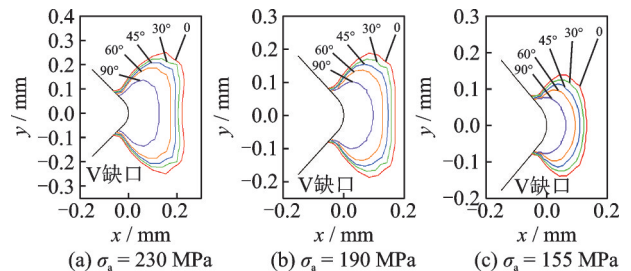


图11 相位差对缺口塑性区的影响  
Fig.11 Comparison of influence of phase lag of loading on plastic region

3 缺口根部塑性区表征方法

本节基于缺口几何尺寸、载荷水平和载荷路径对 von Mises 屈服准则下的缺口附近塑性区的影响,提出了缺口塑性区的表征方法。

在同一名义应力的作用下,缺口件的疲劳寿命通常小于光滑件的疲劳寿命,这是由于缺口效应使得缺口根部应力较大,且局部应力应变场复杂,较大的应力和较复杂的应力场则容易导致缺口根部出现塑性区,塑性区内不可逆的塑性应变加速了材

料的疲劳损伤累积并最终导致材料疲劳断裂。因而,缺口塑性区的面积是反映缺口件疲劳损伤的重要参数之一。

利用完全弹性有限元分析方法求得本文研究的缺口件单轴拉伸时的理论应力集中系数如表 2 所示。通过对更多具有不同理论应力集中系数的缺口件进行多轴加载下的弹塑性有限元分析,可得各缺口件开始出现塑性区时的临界拉应力幅值  $\sigma_{a,c}$  (单位:MPa)与理论应力集中系数  $K_T$  的关系,如表 3 和图 12 所示,得到关于临界拉应力幅值  $\sigma_{a,c}$  与理论应力集中系数  $K_T$  和拉扭载荷相位差  $\varphi$  的函数关系式为

$$\sigma_{a,c} = (6.925K_T^2 - 83.446K_T + 306.09) \arcsin[(\pi + \varphi)/2] \quad (7)$$

表 2 单轴拉伸下的理论应力集中系数

Table 2 Theoretical stress concentration factors under uniaxial tension

缺口类型	V 缺口	R2 缺口	R5 缺口
$K_T$	6.96	1.77	1.35

表 3 多轴载荷下缺口应力集中系数与对应的临界拉应力幅值

Table 3 Stress concentration factors of notches and corresponding critical tensile stresses amplitude under multiaxial fatigue loading

$K_T$	1.35	1.77	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	6.96
$\sigma_{a,c}/\text{MPa}$ ( $\varphi = 0^\circ$ )	219.7	180.3	166.2	116.3	88.6	70.8	64.1	60.0
$\sigma_{a,c}/\text{MPa}$ ( $\varphi = 90^\circ$ )	317.7	269.2	253.9	186.0	135.7	109.1	94.6	85.3

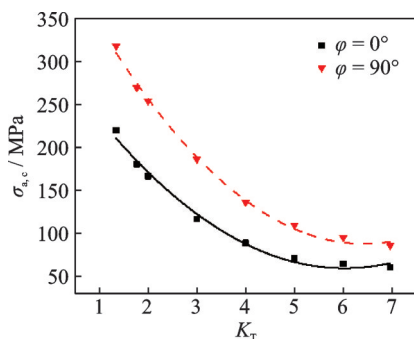


图 12 多轴载荷下临界拉应力幅值  $\sigma_{a,c}$  与理论应力集中系数  $K_T$  关系曲线

Fig.12 Relationship curve of critical tensile stress amplitude  $\sigma_{a,c}$  and the theoretical stress concentration factor  $K_T$  under multiaxial fatigue loading

由对缺口塑性区的研究可知,缺口塑性区的形状和面积随着缺口几何尺寸、载荷水平以及载荷路

径而变化,且其形状和面积变化对疲劳损伤的影响难以直接衡量。考虑到随着载荷水平的降低,缺口塑性区的实际形状逐渐趋于半圆形;另外,由于疲劳裂纹总是从缺口根部萌生,随后沿着径向正半轴扩展,因此,在  $x$  轴的负半轴区域内,随着与缺口根部距离增大,该区域的应力应变状态对缺口疲劳损伤累积的影响迅速减小。假设疲劳破坏区是以缺口根部为圆心的圆或椭圆<sup>[28]</sup>,为了便于研究,忽略  $x$  轴负半轴区域,假设缺口的表征塑性区是以缺口根部  $O$  点为圆心,以  $R_p$  为半径的半圆,如图 13 所示。缺口表征塑性区面积为

$$S_p = \frac{1}{2} \pi R_p^2 \quad (8)$$

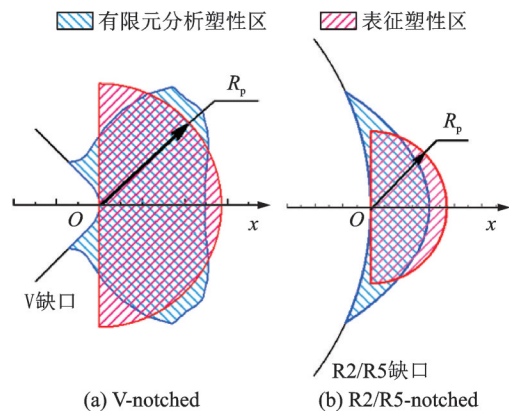


图 13 缺口的表征塑性区示意图

Fig.13 Schematic diagram of characterization plastic region at notch

缺口表征塑性区半径  $R_p$  (单位:mm)为轴向应力幅值  $\sigma_a$  (单位:MPa)、拉扭载荷相位差  $\varphi$  和缺口件理论应力集中系数  $K_T$  的函数,考虑式(7)和式(8),通过考察载荷水平、载荷路径和缺口理论应力集中系数对缺口根部塑性区面积的影响,并结合有限元分析获得的缺口根部塑性区面积数据进行拟合,得到该函数的解析式如下

$$R_p = f(\sigma_a, \varphi, K_T) = 16 \times 10^{-4} \{(\sigma_a - \sigma_{a,c}) \sin [(\pi + \varphi)/2]\}^{-0.078K_T + 1.52} \quad (9)$$

结合有限元分析缺口塑性区面积  $S_{p,r}$ ,对各缺口和载荷下的表征塑性区面积  $S_p$  进行误差分析,如表 4 所示。定义有限元分析缺口塑性区面积与表征塑性区面积之间的误差为

$$e = \frac{S_p - S_{p,r}}{S_{p,r}} \times 100\% \quad (10)$$

$|e| < 5\%$ ,误差在允许范围内。

表4 表征塑性区面积误差分析

Table 4 Error analysis on area of characterization plastic region

缺口类型	相位差 $\varphi/$ (°)	轴向应力幅值 $\sigma_a/$ MPa	有限元分析塑性区面积 $S_{p,r}/$ ( $10^{-4} \cdot \text{mm}^2$ )	表征塑性区面积 $S_p/$ ( $10^{-4} \cdot \text{mm}^2$ )	$e/$ %
V ( $K_T=6.96$ )	0	230.0	928.5	910.7	-1.9
		190.0	557.9	537.7	-3.6
		155.0	276.2	290.0	5.0
	90	230.0	324.1	337.7	4.2
		190.0	170.6	178.9	4.9
R2 ( $K_T=1.77$ )	0	250.0	4 898.3	5 041.0	2.9
R5 ( $K_T=1.35$ )	0	210.0	508.0	482.5	-5.0
		190.0	24.0	22.8	-5.0
		290.0	11 528.6	11 170.1	-3.1
		260.0	3 292.0	3 196.4	-2.9
		230.0	306.6	321.0	4.7

#### 4 寿命预测与验证

缺口根部存在应力集中、应力梯度等现象,这些因素共同对缺口构件的疲劳性能产生影响。目前对于缺口件,尤其是增材制造缺口件在多轴载荷下的疲劳寿命预测还没有一个得到普遍认同的方法。本节利用表征塑性区和临界塑性区面积的比值以及缺口根部最大 von Mises 应力构造疲劳损伤参量,结合光滑件的单轴 S-N 曲线来预测缺口件的多轴疲劳寿命。

在循环载荷作用下,塑性应变反映出材料已发生不可逆损伤,因此,塑性区的大小和形状对材料的疲劳损伤具有重要影响。实际的塑性区往往呈不规则形状,这导致材料内部塑性区边界附近的应力应变场变得异常复杂,也使得塑性区对缺口疲劳寿命的影响难以直接衡量。由于塑性应变伴随着变形协调现象,对于相同的缺口件有限元模型,弹塑性计算得到的缺口根部最大应力可能远远小于完全弹性计算得到的最大应力。另外,控制缺口疲劳寿命的是缺口根部附近的某一局部区域,而不仅仅是缺口根部的最大应力点,故而考虑利用缺口根部塑性区的大小和形状特征来修正缺口根部的最大 von Mises 应力,并将修正后的 von Mises 应力作为疲劳损伤参量来预测缺口件的多轴疲劳寿命。为了表征缺口根部塑性区的特征,并建立缺口根部塑性区与疲劳损伤间的联系,提出临界塑性区的概念。

基于前文所述的表征塑性区,临界塑性区也设定为半圆,且与表征塑性区同圆心,如图 14 所示。

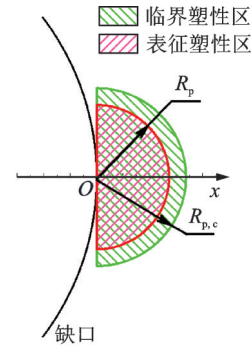


图14 表征塑性区与临界塑性区示意图

Fig.14 Schematic diagram of critical plastic region and characterization plastic region

定义缺口根部塑性区边界上任意两点  $P(x_i, y_i)$  和  $Q(x_j, y_j)$ , 临界塑性区的半径  $R_{p,c}$  为坐标  $(x_i, y_i)$  和  $(x_j, y_j)$  的函数, 由于锐缺口 (V 缺口) 和钝缺口 (R2/R5 缺口) 的塑性区外形特征不同, 该函数的解析式分别为

$$\begin{cases} R_{p,c} = \max(\sqrt{x_i^2 + y_i^2}) & \text{V缺口} \\ R_{p,c} = \max(\sqrt{|x_i \cdot y_j|}) & \text{R2/R5缺口} \end{cases} \quad (11)$$

临界塑性区的面积为

$$S_{p,c} = \frac{1}{2} \pi R_{p,c}^2 \quad (12)$$

定义并推导出缺口塑性区影响因子为

$$\begin{cases} f = S_p/S_{p,c} = 1.02^{-2\sqrt{K_T} - \frac{10}{\sqrt{K_T}} a} \\ \alpha = (\sigma_a/\sigma_{a,c}) \sin[(\pi + \varphi)/2] \end{cases} \quad (13)$$

在本文研究的中高周疲劳寿命范围内, V 缺口件始终存在塑性区, 而 R2 和 R5 缺口件在  $90^\circ$  非比例载荷下其缺口根部出现了无塑性区的情况, 此时虽然其缺口根部不存在塑性区, 但仍然采用式 (13) 计算其缺口根部最大 von Mises 应力的修正因子  $f$ 。定义疲劳损伤参量为

$$\sigma_{\text{Mises}}^* = f \sigma_{\text{Mises}} \quad (14)$$

式中:  $\sigma_{\text{Mises}}^*$  为修正的 von Mises 应力,  $\sigma_{\text{Mises}}$  为缺口根部的最大 von Mises 应力。

用 Basquin 公式来描述本文光滑件单轴疲劳试验获得的 S-N 曲线, 如下

$$S_a = \sigma'_f (2N)^b \quad (15)$$

式中:  $S_a$  为应力幅值,  $N$  为疲劳寿命,  $\sigma'_f$  为疲劳强度系数,  $b$  为试验常数, 相关参数取值如表 5 所示。将  $\sigma_{\text{Mises}}^*$  作为应力幅值代入式 (15) 即可得到各缺口件在多轴载荷下的疲劳寿命预测结果, 如图 15 所示。

由图 15 可以看出, 基于缺口塑性区影响因子的疲劳寿命预测方法的预测效果较好, 预测结果大

表 5 Basquin 公式的参数取值  
Table 5 Parameter values of Basquin formula

材料	$\sigma_f/\text{MPa}$	$b$
选区激光熔化 316L 不锈钢	659.0	-0.063 66

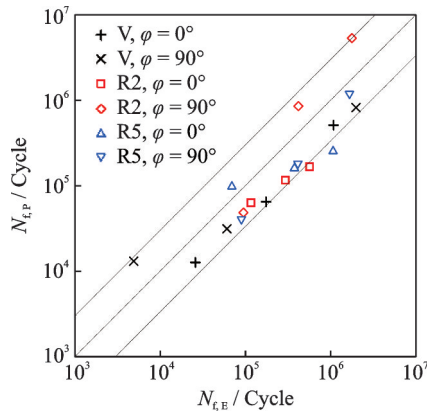


图 15 预测寿命与实验寿命对比图

Fig.15 Comparison of experimental and predicted fatigue lives

多在 3 倍误差带以内。在较低的载荷水平下,预测结果偏于安全,这表明当应力水平较低时,此方法对缺口塑性区影响因子  $f$  和疲劳损伤参量的计算结果略微偏大,导致预测寿命偏小。相对而言,V 缺口件的疲劳寿命预测效果最好,预测结果全部位于 3 倍误差带内,与 V 缺口件的疲劳寿命预测效果相比,该方法对 R2 缺口件和 R5 缺口件的疲劳寿命预测效果稍差,个别预测结果偏于保守,但仍然在 3 倍误差带附近。分析造成该方法对不同类型缺口件疲劳寿命预测精度不同的原因如下:

(1)与 R2 缺口和 R5 缺口相比,V 缺口的应力集中系数较大,缺口塑性区的应力集中更严重,这导致其缺口根部塑性区和最大 von Mises 应力点对疲劳寿命的影响更为明显。

(2)疲劳试验固有的分散性带来的误差。

## 5 结 论

(1)开展了选区激光熔化 316L 不锈钢光滑件和缺口件的单轴和多轴疲劳试验。在单轴和多轴载荷下,各结构形式试件的疲劳寿命均随着载荷幅值的提高而减小。在多轴载荷下,拉应力幅值一定时,缺口试验件的疲劳寿命随着缺口半径增大而增大。

(2)基于有限元分析,研究了缺口几何尺寸、载荷水平及载荷路径对缺口根部塑性区的影响。发现在较高的载荷水平下,缺口根部塑性区面积随着缺口根部半径减小而减小;随着载荷水平的降低,3 种缺口的塑性区面积逐渐接近;随着载荷水

平的进一步降低,R5 缺口和 R2 缺口的塑性区迅速减小或消失,V 型缺口根部塑性区最大。

(3)对缺口根部塑性区进行表征,定义了缺口塑性区影响因子  $f$ ,应用缺口塑性区影响因子和缺口根部最大 von Mises 应力构建缺口疲劳损伤控制参量,并结合光滑件的单轴 S-N 曲线预测缺口件在多轴载荷下的疲劳寿命。经试验验证,该疲劳寿命预测方法具有较高的预测精度。

## 参考文献:

- [1] WANG C, QIAN X. Simultaneous optimization of build orientation and topology for additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2020, 34: 101246.
- [2] ALCISTO J, ENRIQUEZ A, GARCIA H, et al. Tensile properties and microstructures of laser-formed Ti-6Al-4V[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2011, 20(2): 203-212.
- [3] FRAZIER W E. Metal additive manufacturing: A review[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6): 1917-1928.
- [4] CAMPBELL I, DIEGEL O, KOWEN J, et al. Wohlers report 2018: 3D printing and additive manufacturing state of the industry: Annual worldwide progress report [M]. Colorado, USA: Wohlers Associates, 2018.
- [5] 陈国庆, 树西, 张秉刚, 等. 国内外电子束熔丝沉积增材制造技术发展现状[J]. 焊接学报, 2018, 39(8): 123-128.  
CHEN Guoqing, SHU Xi, ZHANG Binggang, et al. State-of-arts of electron beam freeform fabrication technology[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(8): 123-128.
- [6] 田彩兰, 陈济轮, 董鹏, 等. 国外电弧增材制造技术的研究现状及展望[J]. 航天制造技术, 2015, 33(2): 57-60.  
TIAN Cailan, CHEN Jilun, DONG Peng, et al. Current state and future development of the wire arc additive manufacture technology abroad[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015, 33(2): 57-60.
- [7] 朱忠良, 赵凯, 郭立杰, 等. 大型金属构件增材制造技术在航空航天制造中的应用及其发展趋势[J]. 电焊机, 2020, 50(1): 1-14.  
ZHU Zhongliang, ZHAO Kai, GUO Lijie, et al. Application and development trend of additive manufacturing technology of large-scale metal component in aerospace manufacturing[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(1): 1-14.
- [8] 张红梅, 顾冬冬. 激光增材制造镍基高温合金构件形性调控及在航空航天中的应用[J]. 电加工与模具, 2020, 55(6): 1-10.



- ZHANG Hongmei, GU Dongdong. Laser additive manufacturing of nickel-based superalloys and its structure-performance control and aerospace applications [J]. *Electromachining and Mould*, 2020, 55(6): 1-10.
- [9] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 32-55.
- GU Dongdong, ZHANG Hongmei, CHEN Hongyu, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 32-55.
- [10] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造:若干材料基础问题[J]. *航空学报*, 2014, 35(10): 2690-2698.
- WANG Huaming. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance large metallic components[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(10): 2690-2698.
- [11] 黄卫东. 材料3D打印技术的研究进展[J]. *新型工业化*, 2016, 6(3): 53-70.
- HUANG Weidong. Research progress of 3D printing technology for materials[J]. *The Journal of New Industrialization*, 2016, 6(3): 53-70.
- [12] 李权, 王福德, 王国庆, 等. 航空航天轻质金属材料电弧熔丝增材制造技术[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(3): 74-82.
- LI Quan, WANG Fude, WANG Guoqing, et al. Wire and arc additive manufacturing of lightweight metal components in aeronautics and astronautics[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(3): 74-82.
- [13] KUMAR P, JAYARAJ R, SURYAWANSHI J, et al. Fatigue strength of additively manufactured 316L austenitic stainless steel[J]. *Acta Materialia*, 2020, 199: 225-239.
- [14] FALKOWSKA A, SEWERYN A, SZUSTA J. Predicting the fatigue strength and life of 316L steel sinters of varying porosity for implants in a uniaxial loading state[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 200: 146-165.
- [15] 吴剑平. 选区激光熔化316L不锈钢疲劳裂纹扩展研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
- WU Jianping. Study on fatigue crack growth of 316L stainless steel by selective laser melting (SLM) [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.
- [16] WANG Y, SU Z. Effect of micro-defects on fatigue lifetime of additive manufactured 316L stainless steel under multiaxial loading[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2021, 111: 102849.
- [17] 苏振李. 缺陷对增材制造316L不锈钢疲劳性能影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
- SU Zhenli. Research on effect of defects on the fatigue performance of additive manufactured 316L stainless steel[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [18] ANDREAU O, PESSARD E, KOUTIRI I, et al. Influence of the position and size of various deterministic defects on the high cycle fatigue resistance of a 316L steel manufactured by laser powder bed fusion[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 143: 105930.
- [19] RAZAVI S M J, FERRO P, BERTO F, et al. Fatigue strength of blunt V-notched specimens produced by selective laser melting of Ti-6Al-4V[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2018, 97: 376-384.
- [20] 万华亮, 王奇志. 增材制造铝镁合金AlSi10Mg的疲劳性能研究[J]. *强度与环境*, 2019, 46(3): 20-26.
- WAN Hualiang, WANG Qizhi. Research on the fatigue behavior of additive manufacture materials of Al-Si10Mg[J]. *Structure and Environment Engineering*, 2019, 46(3): 20-26.
- [21] 钦兰云, 吴佳宝, 王伟, 等. 激光增材制造Ti-6Al-2Mo-2Sn-2Zr-2Cr-2V钛合金组织与疲劳性能研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 102-111.
- QIN Lanyun, WU Jiabao, WANG Wei, et al. Microstructures and fatigue properties of Ti-6Al-2Mo-2Sn-2Zr-2Cr-2V titanium alloy fabricated using laser deposition manufacturing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 102-111.
- [22] GOUGH H J, POLLARD H V. Properties of some materials for cast crankshafts, with special reference to combined stresses[J]. *Proceedings of the Institution of Automobile Engineers*, 1936, 31(1): 821-893.
- [23] 吴文涛, 王英玉. 一种新的多轴缺口疲劳寿命预测方法[J]. *飞机设计*, 2015, 35(4): 41-46.
- WU Wentao, WANG Yingyu. A new method for multi-axis notch fatigue life prediction[J]. *Aircraft Design*, 2015, 35(4): 41-46.
- [24] MOLSKI K, GLINKA G. A method of elastic-plastic stress and strain calculation at a notch root[J]. *Materials Science and Engineering*, 1981, 50(1): 93-100.
- [25] 邱宝象, 王效贵, 高增梁. 基于AF类循环塑性理论的多轴局部应力应变法[J]. *机械强度*, 2011, 33(4): 590-596.
- QIU Baoxiang, WANG Xiaogui, GAO Zengliang. Multiaxial local stress-strain approach based on AF type cyclic plasticity theory[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2011, 33(4): 590-596.
- [26] TANAKA K. Engineering formulae for fatigue strength reduction due to crack-like notches[J]. *International Journal of Fracture*, 1983, 22(2): R39-R46.

- [27] TAYLOR D. Geometrical effects in fatigue: A unifying theoretical model[J]. *International Journal of Fatigue*, 1999, 21(5): 413-420.
- [28] 姚卫星. 金属材料疲劳行为的应力场强法描述[J]. *固体力学学报*, 1997, 18(1): 38-48.  
YAO Weixing. The description for fatigue behaviours of metals by stress field intensity approach[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 1997, 18(1): 38-48.
- [29] GALLO P, BRESSAN S, MORISHITA T, et al. Analysis of multiaxial low cycle fatigue of notched specimens for type 316L stainless steel under non-proportional loading[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2017, 89: 79-89.
- [30] LIAO D, ZHU S, QIAN G. Multiaxial fatigue analysis of notched components using combined critical plane and critical distance approach[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 160: 38-50.
- [31] LUO P, YAO W, LI P. A notch critical plane approach of multiaxial fatigue life prediction for metallic notched specimens[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2019, 42(4): 854-870.
- [32] 钟波, 王延荣, 魏大盛. 考虑应力梯度影响的多轴缺口疲劳寿命预测[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(11): 2602-2610.  
ZHONG Bo, WANG Yanrong, WEI Dasheng. Multi-axial notch fatigue life prediction based on stress gradient effect[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(11): 2602-2610.
- [33] 谭晶莹, 李江华, 孙然, 等. 基于体积法的缺口件多轴疲劳寿命预测[J]. *应用力学学报*, 2016, 33(4): 726-730.  
TAN Jingying, LI Jianghua, SUN Ran, et al. Fatigue life prediction for notched specimen based on the volume approach under multiaxial loading[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2016, 33(4): 726-730.
- [34] RAZAVI S M J, PERON M, TORGERSEN J, et al. 40CrMoV13.9 notched specimens under multiaxial fatigue: An overview of recent results[J]. *Fracture and Structural Integrity*, 2017, 11(41): 440-446.
- [35] BRANCO R, PRATES P A, COSTA J D, et al. New methodology of fatigue life evaluation for multiaxially loaded notched components based on two uniaxial strain-controlled tests[J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 111: 308-320.
- [36] MENEGHETTI G, CAMPAGNOLO A, BERTO F, et al. Notched Ti-6Al-4V titanium bars under multiaxial fatigue: Synthesis of crack initiation life based on the averaged strain energy density[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2018, 96: 509-533.

(编辑:陈珺)