

基于数字图像相关法的铝合金缺口件局部循环塑性行为研究

赵 询 李 建 葛峻铭 孙 涛 赵 琰 王振明 朱建国

(江苏大学 土木工程与力学学院 结构健康管理研究院, 镇江 212013)

摘要:【目的】针对带缺口铝合金承压容器塑性垮塌失效问题,揭示缺口类型与尺寸对局部循环塑性行为的影响机制,为缺口构件疲劳寿命精准预测提供参考。【方法】首先,制备不同尺寸U形、V形缺口的2024-T4铝合金试样,开展应力控制低周疲劳试验;其次,采用数字图像相关法获取缺口根部全周期应变场数据,分析局部棘轮应变随循环周次的演变规律;然后,结合有限元软件计算应力集中系数等关键参数,建立考虑缺口应力集中系数与根部稳态棘轮应变率的疲劳寿命预测模型;最后,通过断口形貌观测,验证不同缺口疲劳损伤差异的微观机制。【结果】结果表明,U形缺口半径从0.2 mm增至2 mm、V形缺口角度从15°增至150°时,稳态棘轮应变率显著降低,疲劳寿命呈上升趋势;所提预测模型较传统Manson-Coffin模型精度更高,U形、V形缺口的预测均方误差分别降低0.004 48和0.004 51;断口微观特征差异与宏观棘轮应变率及疲劳寿命变化规律一致。

关键词: 数字图像相关; 缺口; 循环塑性; 棘轮应变; 疲劳寿命; 铝合金

中图分类号: TH114; TG111.8 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.07.009

0 引言

压力容器在频繁加-卸压过程中,壳体材料承受交变应力作用^[1]。在交变载荷作用下,疲劳破坏主要发生在压力容器接管根部、开孔凹槽或其他局部结构不连续处。这些部位存在类缺口几何特征,易引发构件应力应变集中和大应力应变梯度,在交变载荷作用下更易萌生疲劳裂纹,最终导致构件在较低载荷下发生疲劳失效断裂。通常认为,压力容器疲劳损坏属于高应变下的低周疲劳问题^[2]。低周疲劳失效以塑性变形或高应力为主要特征,循环载荷引起的棘轮应变累积与疲劳损伤可能同时发生。现有研究已从多维度针对含缺口构件的疲劳损伤演化与疲劳寿命开展系统性分析,以期规避缺口构件发生疲劳失效,降低此类失效引发的各类损失^[3-4]。

缺口件疲劳失效断裂行为与缺口类型密切相关^[5]。Shen等^[6-7]对比V形缺口和U形缺口平分线上的应力分量,基于奇异强度值,得到简化的统一缺口应力评估计算式,减小了缺口尺寸参数对疲劳强度的评价误差。Yan^[8]提出一种基于线弹性应力场的缺口试样断裂局部分析方法,试验验证其具有较高精度。应力集中系数、应力强度因子和应力三轴度是研究缺口疲劳问题的关键参数^{[9]1-48},前两项多用于高周疲劳,

应力三轴度多用于低周弹塑性疲劳;应力集中系数和应力三轴度受缺口类型、尺寸影响明显,应力强度因子主要受控于裂纹几何与外载。Lazzarin等^[10]系统研究不同类型尺寸缺口的应力强度因子,结果表明,不同应力强度因子会导致缺口应力集中系数计算方法存在差异。Boukharouba等^{[11]503-512}认为,名义应力相同时,缺口半径越小,应力强度因子越大,疲劳裂纹越易萌生。Sakane等^{[12]959-968}研究证明,不同缺口半径对应的应力集中系数对疲劳裂纹萌生寿命影响显著。衣海娇等^[14]利用光滑和缺口铝合金试样开展研究,发现断裂应变随应力三轴度增加而减小。李冲等^[15]通过构建不规则裂纹前沿应力强度因子,揭示了缺口部件不规则裂纹的生长规律。

缺口对材料力学性能的影响主要体现为产生应力应变集中,使缺口根部应变率升高。因此,缺口疲劳问题研究需重点关注缺口件循环变形特性及疲劳寿命预测。Taddesse等^[16]基于缺口尖端循环塑性设计的疲劳寿命预测模型,相比其他模型具有更高预测精度。Shen等^[17]考虑缺口塑性变形,构建损伤力学方法,并将其成功应用于缺口试样疲劳寿命评估。循环载荷作用下,缺口根部棘轮应变率升高会加速缺口变形,降低缺口件疲劳寿命。Hatami等^[18]研究不同缺口根部的棘轮应变率,开发了新的硬化规则,用于棘轮

收稿日期: 2024-10-27 修回日期: 2024-12-02

基金项目: 中国博士后基金面上项目(2020M681496); 国家自然科学基金项目(52105149); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX24-3924)

作者简介: 赵询,男,1999年生,贵州毕节人,硕士研究生; 主要研究方向为光测断裂力学; E-mail:3198020028@qq.com。

李建(通信作者),男,1989年生,江苏扬州人,博士,讲师,硕士研究生导师; 主要研究方向为机械结构强度; E-mail:lj66@ujs.edu.cn。

引用格式: 赵询,李建,葛峻铭,等. 基于数字图像相关法的铝合金缺口件局部循环塑性行为研究[J]. 机械强度,2026,48(7):75-84.

Zhao Xun, Li Jian, Ge Junming, et al. Study on local cyclic plastic behavior of aluminum alloy with notched parts based on digital image correlation method[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(7): 75-84.



免费获取

应变评价。Kong等^{[19][131071]}研究发现,采用棘轮应变率可实现疲劳寿命的精准预测。Hatami等^{[20][1549]}评估了缺口试样在应力控制不对称循环下的棘轮响应。上述研究均表明,缺口局部塑性变形累积对缺口试样疲劳寿命具有决定性影响。

疲劳问题研究中,分析循环载荷下的应变累积可明确疲劳失效机制。数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术相比传统应变测试方法,能够记录整个循环过程中的应变变化,常用于测量疲劳过程中的变形及疲劳断裂相关参数^[21-23]。DIC技术可用于确定大应力集中危险区域,预测塑性变形扩展和破坏区域^[24]。Zhao等^[25]研究表明,DIC技术可以对应力集中部位的应变进行精确测量。代巧等^[26]通过理论与试验方法,验证了DIC技术划分裂纹尖端塑性区的有效性。Gonzales等^[27]利用DIC技术获得了裂纹尖端循环塑性区的尺寸及形状。疲劳试验中,DIC技术不仅可消除接触测量设备的影响,实现复杂环境下的疲劳测试,还可记录完整试验过程,试验后可追溯查看全周期应变分布数据^[28]。随着计算机分析模拟软件的开发与普及,DIC试验分析结合模拟计算的研究方法,为缺口疲劳问题研究提供了新思路^[29-30]。

表1 2024-T4铝合金疲劳性能参数

Tab. 1 Fatigue performance parameters of the 2024-T4 aluminum alloy

弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	强度极限 R_m/MPa	屈服强度 R_e/MPa	疲劳强度系数 σ'_f	疲劳强度指数 c	疲劳延性系数 ϵ'_f	疲劳延性指数 d
73 890	0.33	465	373	611	-0.139 5	0.15	-0.74

图1所示为单边U、V形缺口拉伸试样示意图。

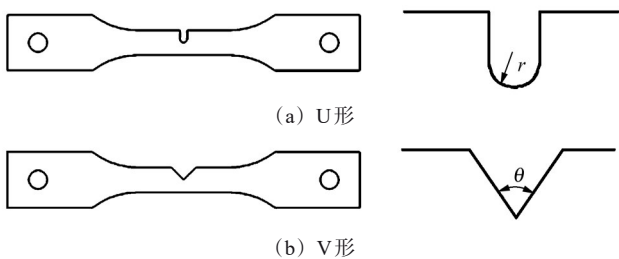


图1 U形与V形缺口形貌示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the U-shape and the V-shape notch morphology

试样有效宽度为4 mm,厚度为缺口深度的1/2(2 mm)。保持缺口深度不变,研究缺口半径和开口角度对局部塑性变形的影响,U形缺口半径范围为0.2~2 mm,V形缺口开口角度范围为15°~150°,具体参数如表2所示。试验设备采用ZDZ-20型疲劳试验机,如图2(a)所示。对铝合金缺口件施加疲劳载荷,加载波形为正弦波,为便于加载和分析,设置载荷比 $R=0$,载荷幅值 $F_a=1\text{ kN}$,加载频率为0.4 Hz。疲劳试验中交变载荷的特征量 F_a 表示为

$$F_a = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{2} \quad (2)$$

Majzoobi等^{[31][32][109095]}从裂纹萌生扩展和疲劳寿命等方面对缺口疲劳问题开展大量工作,但针对缺口根部塑性变形随循环载荷演变规律的研究较少,且缺乏不同缺口类型尺寸下缺口根部棘轮应变率对疲劳寿命影响的系统分析。基于此,本文采用DIC技术获取试样表面应变信息,记录循环载荷下的应变累积过程,分析循环载荷下缺口附近应变的演变行为。综合考虑U、V形缺口半径及开口角度对棘轮变形的影响,根据缺口根部棘轮应变率建立缺口件疲劳寿命预测模型。

1 不同缺口尺寸的U、V形缺口疲劳试验

试验采用2024-T4铝合金,该材料广泛应用于航空航天压力容器封头等部件。不同缺口的疲劳强度参照文献^[33]的方法测量,通过低周疲劳试验获得材料力学参数及不同缺口的疲劳参数,结果如表1所示,上述参数用于低周疲劳寿命预测。Coffin-Manson模型常用于缺口件疲劳寿命预测,表达式为

$$\epsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^c + \epsilon'_f (2N_f)^d \quad (1)$$

式中, ϵ_a 为稳态应变幅; σ'_f 为疲劳强度系数; E 为弹性模量; N_f 为疲劳寿命; c 为疲劳强度指数; ϵ'_f 为疲劳延性系数; d 为疲劳延性指数。

$$R = \frac{F_{\min}}{F_{\max}} \quad (3)$$

式中, $F_{\max}$ 为最大载荷; $F_{\min}$ 为最小载荷。

为降低试验数据离散性,每种缺口尺寸做5次重复试验,选取最接近平均寿命的试验结果进行分析。

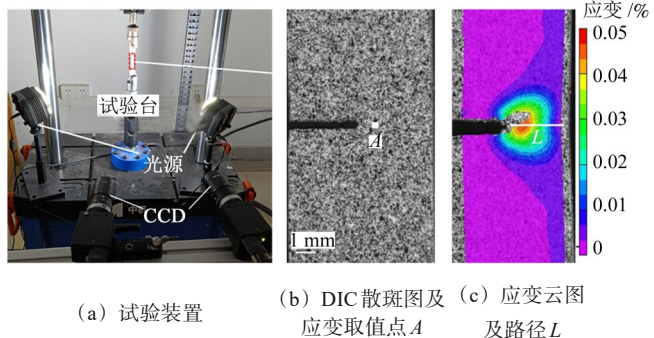


图2 试验装置与试样疲劳分析示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the test setup and the specimen fatigue analysis

表2 U形、V形缺口对应的几何参数

Tab. 2 Geometric parameters corresponding to U-shaped and V-shaped notches

参数	U形缺口圆弧半径 r/mm					V形缺口张角 $\theta/(\text{°})$				
数值	0.2	0.6	1	1.6	2	15	45	90	120	150

疲劳试验过程中,采用Vic-3D DIC设备获取试验

表面位移和应变。试验前对缺口试样进行散斑制作,以获得较高对比度信息,提高试验精度^{[32]109095[34]168-176},散斑试样如图2(b)所示。根据试样尺寸及散斑尺寸,设置DIC计算子区大小为29 pixel(像素),步长设置为7 pixel。在缺口根部选取一点,即图2(b)中距缺口根部0.4 mm的A点(DIC处理图像时会自动去除边界处的非完整子区,因此存在阈值边界,0.4 mm可最大限度消除该区域影响),研究缺口根部应变随全循环周次的演变规律。此外,在缺口前缘选取路径L,研究缺口根部循环应变随距缺口根部距离的变化规律,如图2(c)中所示。

2 结果与讨论

采用DIC方法获得2种类型不同尺寸缺口根部的循环塑性应变。试验中循环应变属于高应变变形,拉格朗日应变可有效计算大应变,因此文中应变均采用拉格朗日应变。首先,分析两种缺口前A点棘轮应变随循环周次的演变规律;其次,给出棘轮应变沿缺口前主应变方向路径L的变化规律;然后,结合缺口局部棘轮应变开展缺口疲劳寿命评估;最后,通过微观形态特征分析,解释缺口局部塑性变形差异的原因。金属材料承受不对称应力循环时易发生棘轮应变,局部棘轮效应在缺口区域尤为显著^{[20]1549}。研究局部棘轮应变,可深入揭示金属在不对称应力循环下的塑性变

形行为,为材料疲劳寿命预测提供支撑。

2.1 缺口局部棘轮应变演化

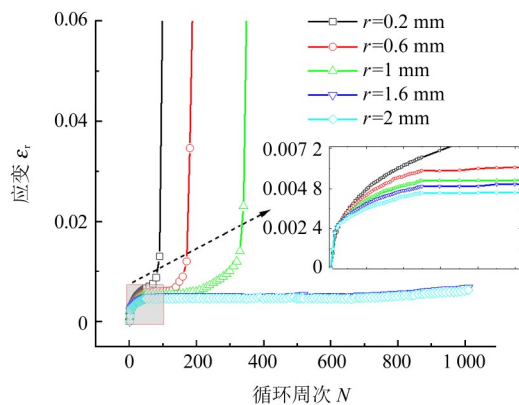
棘轮应变 ε_r 定义为非对称循环载荷下一个周期内最大应变与最小应变的平均值,用于表征疲劳加载过程中的应变累积,表达式如式(4)所示。

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_{y-\max} + \varepsilon_{y-\min}}{2} \quad (4)$$

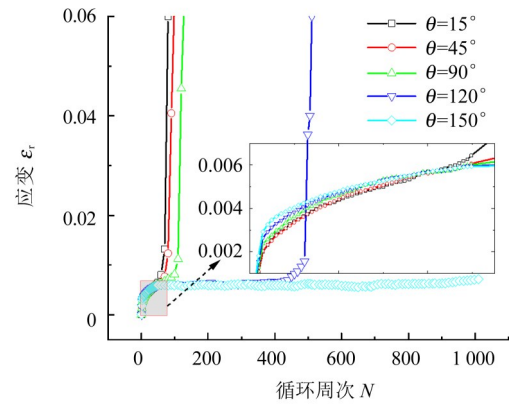
式中, $\varepsilon_{y-\max}$ 、 $\varepsilon_{y-\min}$ 分别为y方向最大、最小应变。

图3所示为A点y向棘轮应变随循环周次N的演变曲线。由图3可知,U、V形2种缺口类型的 ε_r 均随循环周次N的增加而增大,表明应变集中程度随循环周次增加逐渐增强,该结论与文献^{[34]168-176}中缺口根部应变的变化规律一致。图3(c)、图3(d)所示为棘轮应变率曲线,由棘轮应变曲线求1阶导数获得,曲线变化趋势呈“U”形。

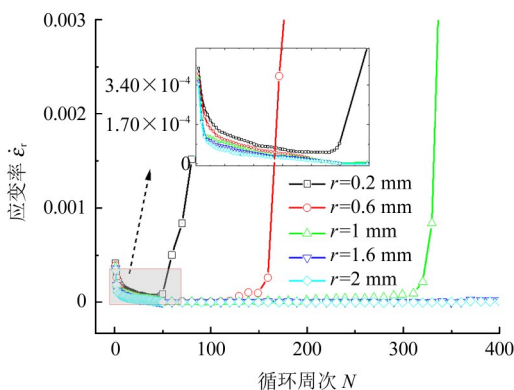
整体来看,2种缺口类型的棘轮应变与应变率在循环载荷下随N的演变可分为3个阶段:第1阶段棘轮应变增长较快,棘轮应变率逐渐减小;第2阶段棘轮应变稳定并缓慢增长,棘轮应变率较小且保持稳态;第3阶段为棘轮循环寿命后期,由于硬化饱和及损伤效应加剧,棘轮应变率逐渐升高,棘轮应变增长迅速。第2阶段在3个阶段中循环周次最长,因此可推断第2阶段的稳态棘轮应变率与缺口件疲劳性能密切相关。



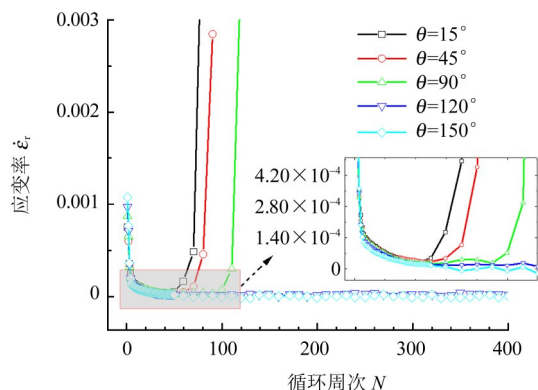
(a) U形缺口 ε_r -N曲线



(b) V形缺口 ε_r -N曲线



(c) U形缺口棘轮应变率随N的变化



(d) V形缺口棘轮应变率随N的变化

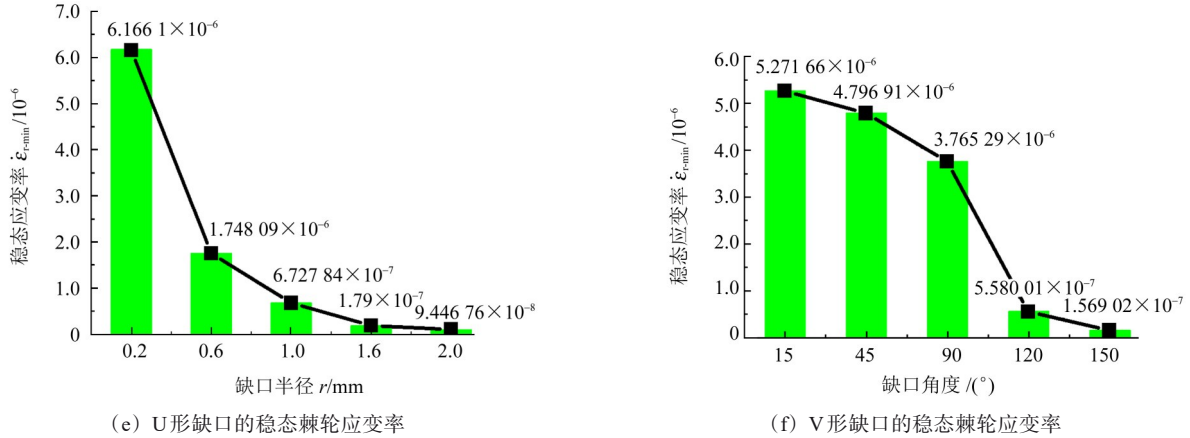


图3 A点y向棘轮应变随循环周次的演变曲线

Fig. 3 Evolution curves of the y-direction ratcheting strain at point A with cycle number

图3(e)、图3(f)所示为2种缺口类型的稳态棘轮应变率。由图3(e)、图3(f)可知,随着缺口半径或缺口角度的增加,稳态棘轮应变率均逐渐减小,且与循环周次呈相反变化趋势,据此可推测第2阶段的稳态棘轮应变率值与 N 存在联系。

对比稳态棘轮应变率随缺口半径及开口角度的变化规律发现,稳态棘轮应变率对U形缺口半径变化更为敏感,受V形缺口开口角度的影响相对较小。产生该现象的原因在于:V形缺口尖锐底部存在显著应力集中效应,而U形缺口底部较宽,在裂纹形成初期能够分散部分应力,从而减缓应变升高。

此外,应力集中系数 K_t 、应力三轴度 η 和应力强度因子 K 是研究缺口疲劳问题的关键因素,直接决定疲劳寿命。采用有限元软件,计算2种缺口类型不同缺口半径及开口角度对应力集中系数、应力三轴度及应力强度因子的影响,结果如图4所示。由图4可知,随着U形缺口半径增加,3个参数均呈先快后慢的减小趋势;相反,随着V形缺口开口角度增加,3个系数呈先慢后快的减小趋势。该变化规律的物理机制为:U形缺口较钝,在裂纹萌生初期具有应力分散作用,仅

当缺口半径较小时,才表现出类似裂纹尖端的应力集中作用;而V形缺口非常尖锐,天然具有类似裂尖的应力集中效应,仅当开口角度较大时,其应力集中效应才会显著降低。上述参数变化规律与文献[9]¹⁻⁴⁸、文献[11]⁵⁰³⁻⁵¹²、文献[13]²⁷⁹⁻²⁸⁴、文献[35]中应力集中系数、应力三轴度及应力强度因子随缺口几何参数的变化趋势一致,且与第2阶段稳态棘轮应变率的变化规律高度相似,进一步证明最小棘轮应变率是决定疲劳寿命的关键因素。

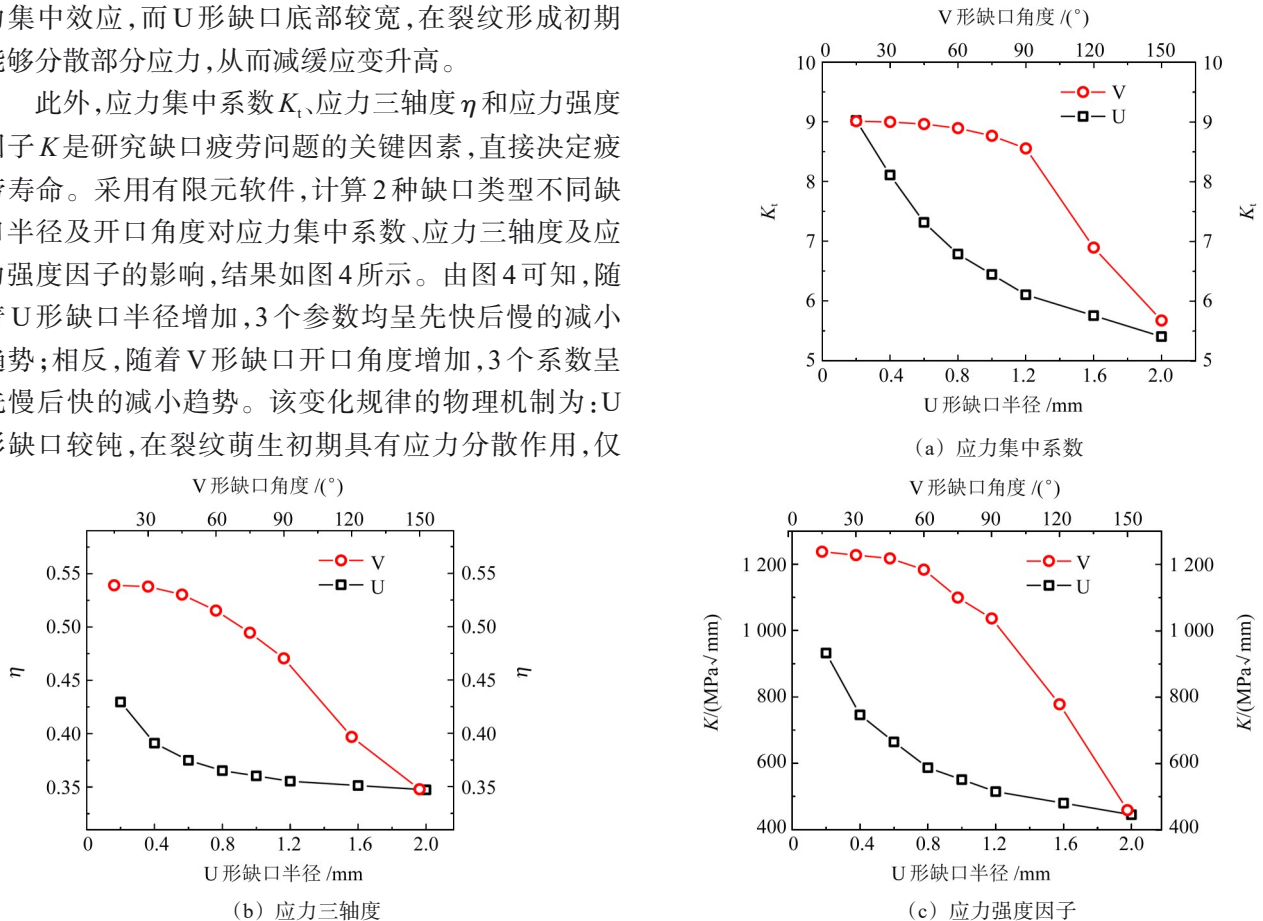


图4 缺口几何参数对3种疲劳关键参量的影响

Fig. 4 Influence of notch geometric parameters on three key fatigue parameters

2.2 U、V形缺口路径 L 的棘轮应变演化

与光滑试样相比,缺口件在疲劳过程中,缺口效应会改变试样的应力、应变状态。缺口附近的应力、应变水平由缺口根部向缺口前缘呈梯度下降,缺口根部的局部应力和局部应变显著高于试样心部^[36-37]。为进一步明确缺口附近不同位置的循环塑性应变随缺口尺寸及循环周次的演变规律,需分析循环应变沿路径 L 的变化特征。

由于不同缺口总寿命差异较大,选取相同循环周

次 $N=40$ 下不同缺口的应变分布;同时选取不同缺口总寿命的 50% 及 90% 时刻,分析应变随循环周次的演变规律。图 5 所示为不同循环周次下 2 种类型缺口棘轮应变沿路径 L 的变化曲线。由图 5 可知,棘轮应变沿路径 L 呈下降趋势,且循环周次 N 越大,下降速率越快,表明随着循环周次增加,缺口根部应变集中程度加剧,应变梯度增大。此外,U形缺口半径越小、V形缺口开口角度越小,棘轮应变沿路径 L 的变化速率越快,应变集中现象越显著,应变梯度越大。

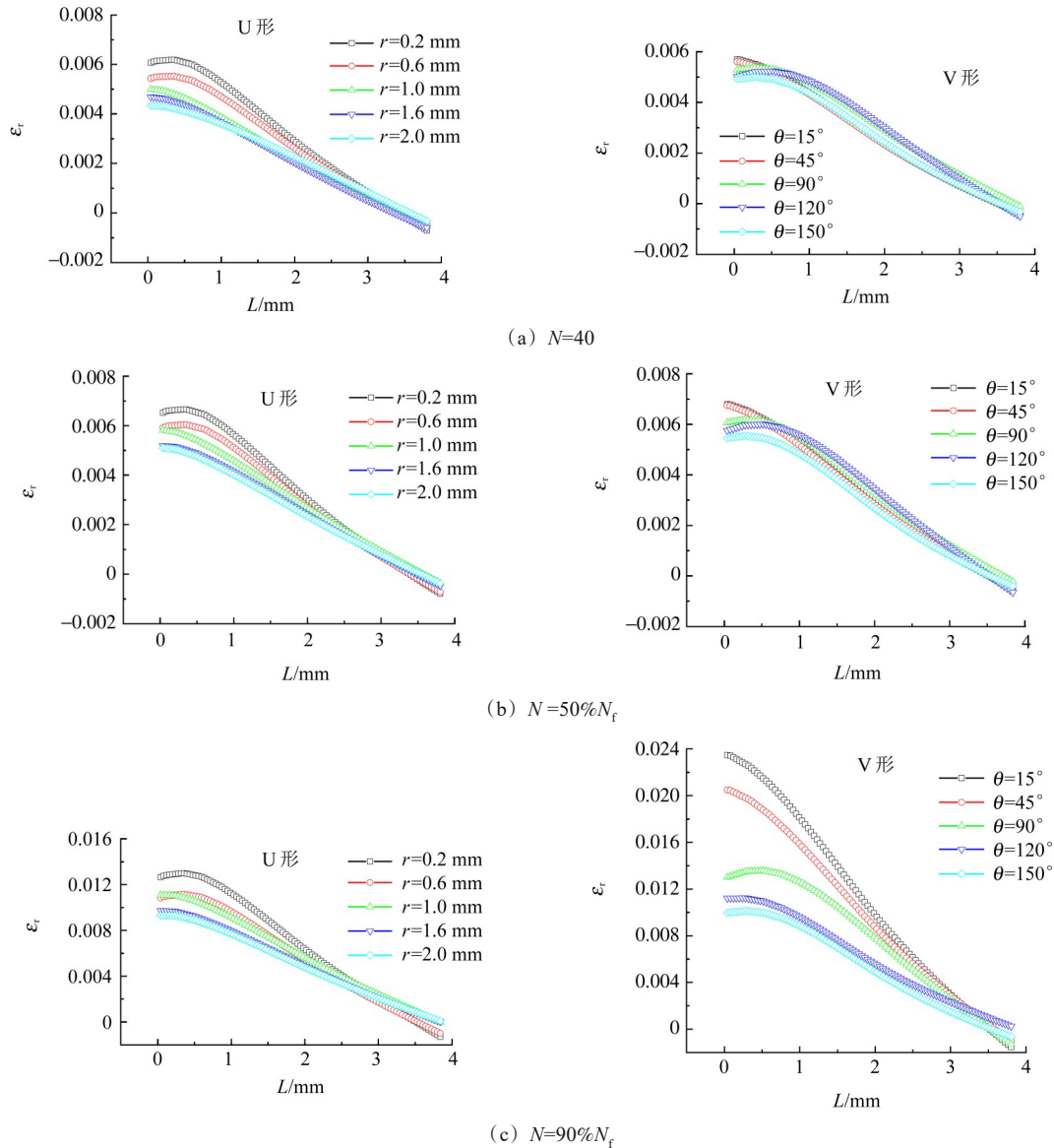


图 5 不同缺口下路径 L 的棘轮应变分布曲线

Fig. 5 Ratcheting strain distribution curves along path L under different notches

图 6、图 7 所示分别为 $N=40$ 、总寿命的 50% 及总寿命的 90% 时刻部分缺口的应变云图,能够更清晰地展示缺口根部的应变分布,图中应变为 y 方向拉格朗日竖向正应变。由图 6、图 7 可知,缺口尺寸越小,循环周次增加时高应变区域越集中。图 8、图 9 所示为单调塑性区的变化规律,其中紫色表示最大载荷时的弹性区域,

红色表示最大载荷时的塑性区域,塑性区演化规律进一步验证了上述应变分布特征。

2.3 U、V形缺口的疲劳寿命预测

上述结果表明,最小棘轮应变率的变化规律与 K_t 、 η 、 K 具有一致性,是决定疲劳寿命的重要因素。随着 U 形缺口半径及 V 形缺口角度的增加,最小棘轮应变率

减小,疲劳寿命延长。在此基础上,进一步探讨最小棘轮应变率与疲劳寿命之间的定量关系。文献[19]¹³¹⁰⁷¹中基于最小棘轮应变率的寿命预测模型实现了光滑试样疲劳寿命的精准预测,本节将该方法引入缺口件疲劳寿命预测。

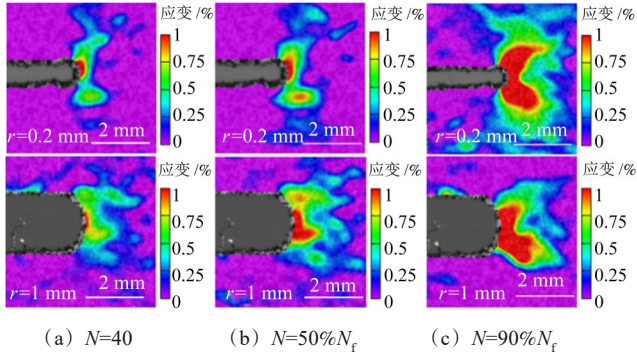


图6 U形缺口 $r=0.2, 1$ mm时缺口根部最大应变云图

Fig. 6 Contour plots of the maximum strain at U-notch root for $r=0.2, 1$ mm

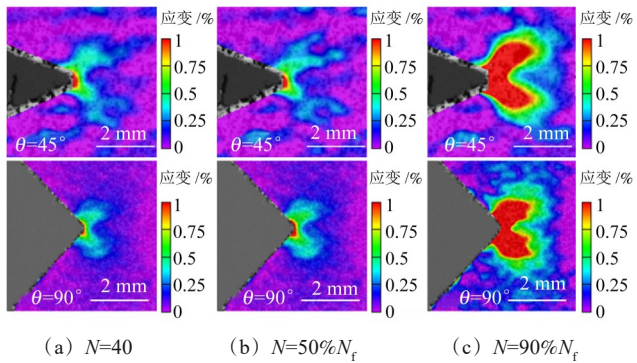


图7 V形缺口 $\theta=45^\circ, 90^\circ$ 时缺口根部最大应变云图

Fig. 7 Contour plots of the maximum strain at V-notch root for $\theta=45^\circ, 90^\circ$

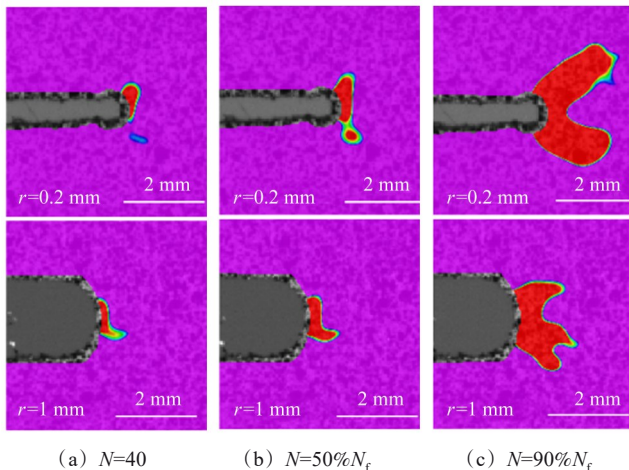


图8 U形缺口 $r=0.2, 1$ mm不同循环周次根部塑性区示意图

Fig. 8 Schematic diagram of plastic zone at U-notch root for $r=0.2$ and 1 mm

图10(a)所示为双对数坐标下U、V形缺口最小棘轮应变率与疲劳寿命的关系拟合曲线。由图10(a)可知,缺口件疲劳寿命 N_f 在对数尺度上随稳态棘轮应变

率的减小而增大。因此,疲劳寿命可表示为稳态棘轮应变率的函数,即

$$N_f = b \dot{\epsilon}_{r-\min}^k \quad (5)$$

式中, b 为与缺口相关的常数; k 为棘轮应变率指数。

所有缺口的加载条件完全一致,因此疲劳寿命差异由缺口的应力、应变集中效应引起。通过拟合缺口系数与棘轮应变率的关系发现,应力集中系数与棘轮应变率在对数尺度上呈现良好的线性关系,为

$$\dot{\epsilon}_{r-\min} = b' K_t^{k'} \quad (6)$$

式中, b' 为与缺口相关的常数; k' 为应力集中指数。

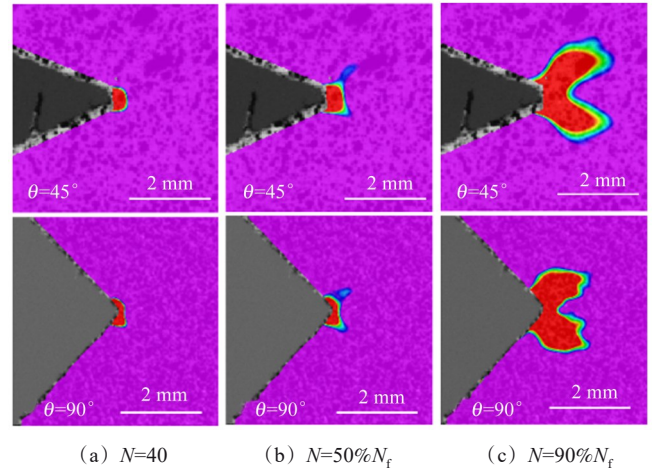
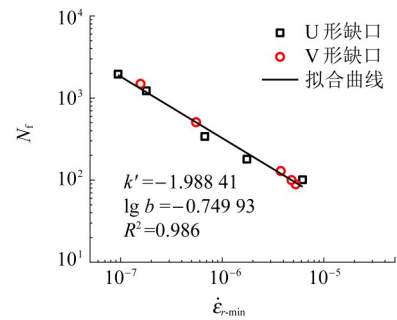
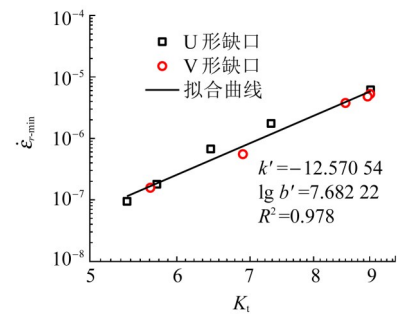


图9 V形缺口 $\theta=45^\circ, 90^\circ$ 不同循环周次根部塑性区示意图

Fig. 9 Schematic diagram of plastic zone at V-notch root for $\theta=45^\circ$ and 90°



(a) $\dot{\epsilon}_{r-\min} - N_f$



(b) $\dot{\epsilon}_{r-\min} - K_t$

图10 棘轮应变率与疲劳寿命、应力集中系数的拟合曲线

Fig. 10 Fitting curves of the ratcheting strain rate vs the fatigue life and the stress concentration factor

图 10(b)所示为双对数坐标下 $\dot{\varepsilon}_{r-\min}$ 与 K_t 的关系曲线。由图 10(b)可知,棘轮应变率在对数尺度上随应力集中系数的增加而增大。结合式(5)、式(6),疲劳寿命预测模型可采用应力集中系数,表示为

$$N_f = b \dot{\varepsilon}_{r-\min}^k = b(b' K_t^{k'})^k \quad (7)$$

为验证疲劳寿命预测模型的准确性,将半寿命处的稳态应变幅值 ε_a 代入 Manson-Coffin 模型[式(1)]计算疲劳寿命,试验疲劳寿命数据与模型预测数据的对比如图 11 所示。由图 11 可知,基于棘轮应变率预测的疲劳对数寿命(N_f^{Pre})与 Manson-Coffin 预测的疲劳寿命(N_f^{Pre})均落在 1.5 倍分散带之内。

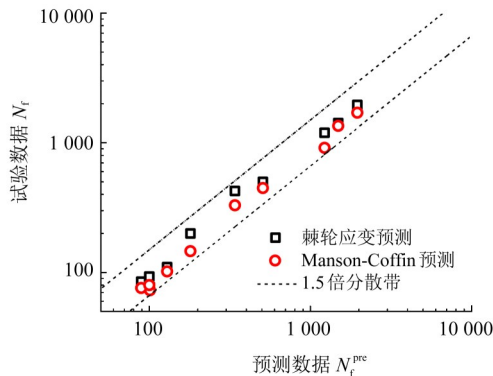


图 11 疲劳寿命预测值与试验值对比

Fig. 11 Comparison of predicted and tested fatigue life

表 3、表 4 分别列出了 2 种缺口类型不同寿命预测模型的预测结果。

表 3 U 形缺口件疲劳寿命与预测值

缺口半径/mm	最小棘轮应变率 $\dot{\varepsilon}_{r-\min}$	应变幅值 ε_a	试验值 N_f	棘轮应变率预测 N_f^{Pre}	Manson-Coffin 预测 N_f^{Pre}
0.2	6.166×10^{-6}	0.007 1	101	77	73
0.6	1.748×10^{-6}	0.006 1	180	200	146
1.0	6.727×10^{-7}	0.004 8	340	425	330
1.6	1.790×10^{-7}	0.003 8	1 224	1 195	914
2.0	9.446×10^{-8}	0.003 4	1 956	1 960	1 707

表 4 V 形缺口件疲劳寿命与预测值

缺口角度/(°)	最小棘轮应变率 $\dot{\varepsilon}_{r-\min}$	应变幅值 ε_a	试验值 N_f	棘轮应变率预测 N_f^{Pre}	Manson-Coffin 预测 N_f^{Pre}
15	5.271×10^{-6}	0.007 0	89	85	76
45	4.796×10^{-6}	0.007 1	100	93	80
90	3.765×10^{-6}	0.006 5	129	110	102
120	5.520×10^{-7}	0.004 5	507	500	448
150	1.569×10^{-7}	0.003 6	1 489	1 420	1 350

为对比 2 种模型对缺口件疲劳寿命的预测误差,采用文献[38]中的方法,定义预测寿命对数与试验寿

命对数之差 δ 为预测误差,如式(8)所示,该方法可通过 δ 的大小直接比较模型预测精度。

$$\delta = \lg N_f^{\text{Pre}} - \lg N_f \quad (8)$$

采用均方差(Mean Square Error, MSE)评估 2 种寿命预测方法的精确度,计算方法如式(9)所示。不同模型预测寿命的均方差值如表 5 所示。由表 5 可知,最小棘轮应变率模型对 U、V 形 2 种缺口的预测均方差值均较小,偏离试验值的程度更低。与 Manson-Coffin 模型相比,U、V 形缺口的预测均方误差分别降低 0.004 48 和 0.004 51,表明该模型具有更好的预测稳定性。

$$E_{\text{MSE}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2 \quad (9)$$

式中, δ_i 为每个缺口尺寸的试验预测误差; n 为总试验次数。

2.4 不同缺口尺寸的断口形貌微观分析

DIC 技术仅能测量试样表面宏观变形,因此需进一步分析不同缺口类型、尺寸的微观特征。图 12 所示为 U、V 形缺口不同尺寸的断口微观形貌。由图 12 可知,裂纹源区①处断口微观特征以疲劳辉纹等准解理特征为主;裂纹扩展区②处存在大量韧窝、二次裂纹;瞬断区③处主要为撕裂棱和韧窝。进一步观察发现,U 形缺口尺寸对断口微观特征影响较大。如图 12(a)中, $r=0.2$ mm 试样的裂纹扩展区主要特征为撕裂棱、韧窝和二次裂纹;而图 12(b)中, $r=1.0$ mm 试样的裂纹扩展区以疲劳辉纹和韧窝为主。

表 5 不同模型疲劳寿命预测均方差

缺口类型	均方差值	
	最小棘轮应变率模型	Manson-Coffin 模型
U 形	0.005 10	0.009 58
V 形	0.001 33	0.005 84

上述特征表明, $r=1.0$ mm 试样的裂纹扩展以循环塑性变形为主,而 $r=0.2$ mm 试样以单调撕裂为主,宏观上表现为塑性变形差异,进而导致疲劳寿命不同。V 形缺口 $\theta=45^\circ$ 和 $\theta=90^\circ$ 两种尺寸的断口微观特征无明显差异,表明两种尺寸的局部塑性变形程度相近,因此疲劳寿命差异较小。该结论与前文疲劳寿命试验结果($\theta=45^\circ$ 的疲劳寿命为 100 次, $\theta=90^\circ$ 的疲劳寿命为 129 次)一致。上述微观特征结果也进一步解释了图 3(e)、图 3(f)中最小棘轮应变率及图 4 中应力集中系数、应力强度因子、应力三轴度随缺口类型、尺寸的变化规律。

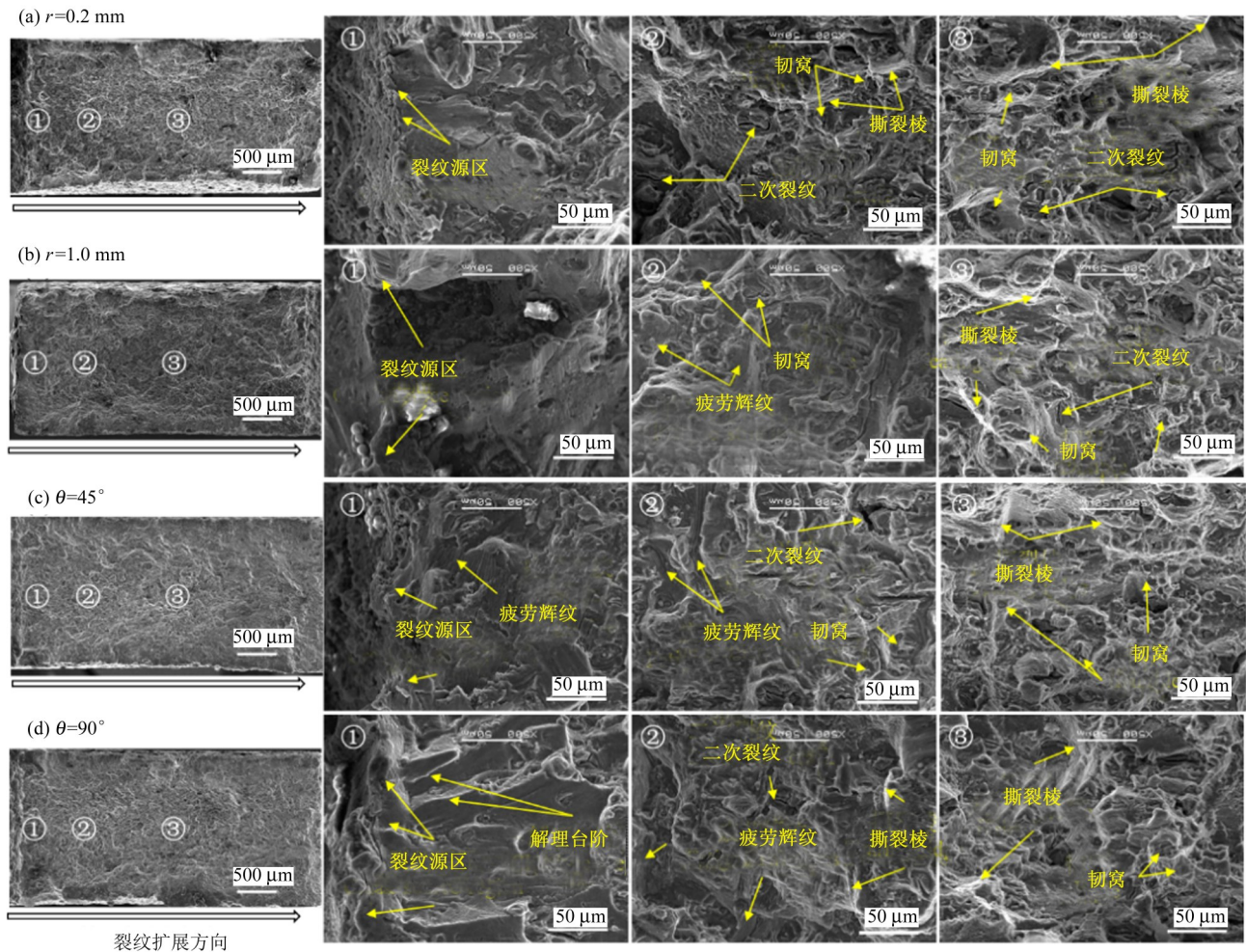


图 12 不同几何参数缺口的断口形貌

Fig. 12 Fracture morphologies of notches with different geometric parameters

3 结论

采用 DIC 技术开展铝合金缺口件根部塑性演变行为研究,结合试验与理论,分析不同缺口根部的棘轮演变特性,并通过微观特征观测分析不同缺口尺寸的损伤机制,得出如下主要结论:

1) V 形缺口尖锐根部的应力集中效应与 U 形缺口在裂纹萌生初期的应力分散作用,导致缺口根部棘轮应变与棘轮应变率受缺口尺寸的影响存在差异,进而影响缺口件整体疲劳寿命。最小棘轮应变率的变化规律与 K_t 、 η 、 K 之间具有一致性。当 U 形缺口半径从 0.2 mm 增至 2 mm、V 形缺口角度从 15° 增至 150° 时,最小棘轮应变率减小,疲劳寿命增加。

2) 循环载荷作用下,缺口根部发生应变累积,导致局部变形逐渐增大。缺口半径或开口角度增大,会降低缺口根部应变集中程度,并减缓应变沿缺口前路径 L 的衰减速率。

3) 通过分析不同缺口的棘轮应变率,建立了缺口件

疲劳寿命与应力集中系数的定量关系。提出考虑缺口棘轮应变率及应力集中系数的疲劳寿命预测模型,相比传统的 Manson-Coffin 模型,该模型预测值更接近试验值,U 形、V 形缺口的预测均方误差分别降低 0.004 48 和 0.004 51。断口形貌微观特征观测分析,进一步解释了不同缺口棘轮应变率和疲劳寿命的差异机制。

参考文献 (References)

- [1] 郑津洋,王振宇,陆群杰,等. 奥氏体不锈钢深冷容器疲劳设计曲线探讨[J]. 压力容器,2021,38(5):26-34.
Zheng Jinyang, Wang Zhenyu, Lu Qunjie, et al. Discussion on design fatigue curves of austenitic stainless steels for cryogenic pressure vessels[J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(5): 26-34. (In Chinese)
- [2] Wei E, Postberg B, Nicak T, et al. Simulation of ratcheting and low cycle fatigue[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2004, 81(3):235-242.
- [3] 刘小刚,于盛吉,许磊. 高温合金电子束焊接头缺口疲劳寿命预测[J]. 航空动力学报,2023,38(5):1210-1216.
Liu Xiaogang, Yu Shengji, Xu Lei. Fatigue life prediction of

- electron beam welding joint of superalloy[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2023, 38(5): 1210-1216. (In Chinese)
- [4] 廖家鹏. 核级奥氏体合金高温高压水微动及缺口疲劳行为研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018: 69-94.
- Liao Jiapeng. Fretting fatigue and notch fatigue of nuclear-grade austenitic alloys in high-temperature pressurized water[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018: 69-94. (In Chinese)
- [5] Gómez F J, Elices M. A fracture criterion for blunted V-notched samples [J]. *International Journal of Fracture*, 2004, 127 (3) : 239-264.
- [6] Shen W, Qiu Y, Yan R J, et al. A simplified method for evaluating singular stress field and fatigue strength of U-shaped notch [J]. *Marine Structures*, 2020, 72: 102770.
- [7] Shen W, Qiu Y, Hu Y Y, et al. A simplified method for evaluating singular stress field of V-shaped and U-shaped notches with different opening angle [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 210: 107352.
- [8] Yan X Q. A local approach for fracture analysis of V-Notch specimens under Mode-I loading [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, 274: 108753.
- [9] Berto F, Lazzarin P. Recent developments in brittle and quasi-brittle failure assessment of engineering materials by means of local approaches [J]. *Materials Science and Engineering; R: Reports*, 2014, 75: 1-48.
- [10] Lazzarin P, Filippi S. A generalized stress intensity factor to be applied to rounded V-shaped notches [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2006, 43(9): 2461-2478.
- [11] Boukharouba T, Tamine T, Niu L, et al. The use of notch stress intensity factor as a fatigue crack initiation parameter [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1995, 52(3): 503-512.
- [12] Sakane M, Zhang S D, Kim T. Notch effect on multiaxial low cycle fatigue[J]. *International Journal of Fatigue*, 2011, 33(8): 959-968.
- [13] Sakane M, Ohnami M. Notch effect in low-cycle fatigue at elevated temperatures: life prediction from crack initiation and propagation considerations [J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1986, 108(4): 279-284.
- [14] 衣海娇, 甄莹, 曹宇光, 等. 6061-T6 铝合金断裂应变与应力三轴度关系研究[J]. *机械强度*, 2020, 42(3): 551-558.
- Yi Haijiao, Zhen Ying, Cao Yuguang, et al. Research on the relationship between fracture strain and triaxiality of 6061-T6 aluminum alloy [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2020, 42(3): 551-558. (In Chinese)
- [15] 李冲, 高鹏, 谢里阳. 缺口部件极端不规则裂纹前沿生长规律研究[J]. *机械强度*, 2024, 46(5): 1236-1242.
- Li Chong, Gao Peng, Xie Liyang. Research on the growth law of extreme irregular crack front in notched components [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2024, 46(5): 1236-1242. (In Chinese)
- [16] Tadesse A T, Zhu S P, Liao D, et al. Cyclic plastic zone-based notch analysis and damage evolution model for fatigue life prediction of metals [J]. *Materials & Design*, 2020, 191: 108639.
- [17] Shen F, Voyiadjis G Z, Hu W, et al. Analysis on the fatigue damage evolution of notched specimens with consideration of cyclic plasticity [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2015, 38(10): 1194-1208.
- [18] Hatami F, Varvani-Farahani A. Accumulation of plastic strain at notch root of steel specimens undergoing asymmetric fatigue cycles: analysis and simulation [J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2023, 16(6): 2153.
- [19] Kong W W, Nian T J, Yuan C. Development of a new ratcheting fatigue life prediction model of a nickel-based superalloy based on ratcheting strain rate [J]. *Materials Letters*, 2022, 308: 131071.
- [20] Hatami F, Varvani-Farahani A. Local ratcheting at the notch region of non-press-fitted and press-fitted Al₇₀₇₅-T6 samples undergoing asymmetric stress cycles [J]. *Metals*, 2023, 13(9): 1549.
- [21] 包骐乐, 代巧, 邱睿. 基于 DIC 的工业纯钛缺口疲劳裂纹萌生及扩展表征[J]. *机械强度*, 2024, 46(5): 1258-1264.
- Bao Qile, Dai Qiao, Qiu Rui. Characterization of notch fatigue crack initiation and propagation of industrial pure titanium based on DIC [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2024, 46(5): 1258-1264. (In Chinese)
- [22] Koko A, Earp P, Wigger T, et al. J-integral analysis: an EDXD and DIC comparative study for a fatigue crack [J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 134: 105474.
- [23] Zhu Z H, Luo S H, Feng Q S, et al. A hybrid DIC-EFG method for strain field characterization and stress intensity factor evaluation of a fatigue crack [J]. *Measurement*, 2020, 154: 107498.
- [24] Romanowicz P J, Szybiński B, Wygoda M. Application of DIC method in the analysis of stress concentration and plastic zone development problems [J]. *Materials*, 2020, 13(16): 3460.
- [25] Zhao T J, Le V T, Goo N S. Global-local deformation measurement of stress concentration structures using a multi-digital image correlation system [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2020, 34(4): 1655-1665.
- [26] 代巧, 何爵亨, 周金宇, 等. 基于 DIC 与 Irwin 模型的工业纯钛疲劳裂纹尖端循环应变场表征[J]. *稀有金属材料与工程*, 2021, 50(8): 2815-2822.
- Dai Qiao, He Jueheng, Zhou Jinyu, et al. Characterization of cycle strain field of commercial pure titanium at fatigue crack tip based on DIC and Irwin model [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2021, 50(8): 2815-2822. (In Chinese)
- [27] Gonzales G L G, González J A O, Antunes F V, et al. Experimental determination of the reversed plastic zone size around fatigue crack using digital image correlation [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023, 125: 103901.
- [28] Hebert J, Khonsari M. The application of digital image correlation (DIC) in fatigue experimentation: a review [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2023, 46(4): 1256-1299.
- [29] Taylor D, Wang G. The validation of some methods of notch fatigue analysis [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials &*

- Structures, 2000, 23(5):387-394.
- [30] 金丹, 田大将, 李江华, 等. 缺口半径对疲劳寿命影响的有限元分析[J]. 航空动力学报, 2015, 30(7):1618-1623.
- Jin Dan, Tian Dajiang, Li Jianghua, et al. Finite element analysis for the effect of notched radius on fatigue life [J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(7):1618-1623. (In Chinese)
- [31] Majzoobi G H, Daemi N. The effects of notch geometry on fatigue life using notch sensitivity factor [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2010, 63(2):547-552.
- [32] Zhu S P, He J C, Liao D, et al. The effect of notch size on critical distance and fatigue life predictions[J]. Materials & Design, 2020, 196:109095.
- [33] 徐颖, 杨涛, 王学民, 等. 基于三维空间矢量应力场强法的 SiCp/Al 复合材料缺口疲劳强度预测[J]. 航空动力学报, 2024, 39(4):116-124.
- Xu Ying, Yang Tao, Wang Xuemin, et al. Notched fatigue strength prediction of SiCp/Al composites based on the three-dimensional space vector stress field intensity method[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(4):116-124. (In Chinese)
- [34] 陈亚军, 徐鹏达, 王付胜, 等. 基于 DIC 的铝合金薄壁缺口件多轴疲劳行为[J]. 材料工程, 2021, 49(1):168-176.
- Chen Yajun, Xu Pengda, Wang Fusheng, et al. Multiaxial fatigue behavior of aluminum alloy thin-walled notched specimens based on DIC [J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(1):168-176. (In Chinese)
- [35] Noda N A, Takase Y. Stress concentration formula useful for all notch shape in a round bar (comparison between torsion, tension and bending) [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(2):151-163.
- [36] Zappalorto M, Lazzarin P. Strain energy-based evaluations of plastic notch stress intensity factors at pointed V-notches under tension[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(15):2691-2706.
- [37] Joadder B, Shit J, Acharyya S, et al. Fatigue failure of notched specimen: a strain-life approach [J]. Materials Sciences and Applications, 2011, 2(12):1730-1740.
- [38] Ince A, Glinka G. A modification of morrow and Smith-Watson-Topper mean stress correction models [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2011, 34(11):854-867.

Study on local cyclic plastic behavior of aluminum alloy with notched parts based on digital image correlation method

ZHAO Xun LI Jian GE Junming SUN Tao ZHAO Yan WANG Zhenming ZHU Jianguo

(Institute of Structural Health Monitoring, Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: [Objective] Plastic collapse failure frequently occurs in notched aluminum alloy pressure vessels. The influence mechanism of notch type and size on local cyclic plastic behavior was revealed to provide reference for accurate fatigue life prediction of notched components. [Methods] Firstly, 2024-T4 aluminum alloy specimens with U-shaped and V-shaped notches of different sizes were fabricated, and stress-controlled low-cycle fatigue tests were carried out. Secondly, full-cycle strain field data at the notch root were obtained by digital image correlation method, and the evolution law of local ratcheting strain with cycle number was analyzed. Then, key parameters such as stress concentration factor were calculated by finite element software, and a fatigue life prediction model considering notch stress concentration factor and root steady-state ratcheting strain rate was established. Finally, the microscopic mechanism of fatigue damage differences among different notches was verified by fracture morphology observation. [Results] The results show that the steady-state ratcheting strain rate decreases significantly and the fatigue life increases when the radius of U-shaped notch increases from 0.2 mm to 2 mm and the angle of V-shaped notch increases from 15° to 150°. The proposed prediction model has higher accuracy than the traditional Manson-Coffin model, and the mean square errors of prediction for U-shaped and V-shaped notches are reduced by 0.004 48 and 0.004 51, respectively. The differences in fracture microscopic characteristics are consistent with the variation laws of macroscopic ratcheting strain rate and fatigue life.

Key words: Digital image correlation; Notch; Cyclic plasticity; Ratcheting strain; Fatigue life; Aluminum alloy

Corresponding author: LI Jian, E-mail: lj66@ujs.edu.cn

Fund: China Postdoctoral Science Foundation (2020M681496); National Natural Science Foundation of China (52105149); Jiangsu Graduate Research and Practice Innovation Program (KYCX24-3924)

Received: 2024-10-27 Revised: 2024-12-02

(编辑: 李凯阳)