

基于DIC的工业纯钛缺口疲劳裂纹萌生及扩展表征*

CHARACTERIZATION OF NOTCH FATIGUE CRACK INITIATION AND PROPAGATION OF INDUSTRIAL PURE TITANIUM BASED ON DIC

包骥乐** 代巧*** 邱睿

(江苏理工学院机械工程学院, 常州 213001)

BAO QiLe DAI Qiao QIU Rui

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

摘要 对工业纯钛缺口试样进行疲劳试验,结合数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术获取试样表面应变场、缺口根部局部应变和疲劳裂纹扩展长度,划分疲劳裂纹萌生与扩展阶段,并对各阶段进行表征。试验结果表明,在疲劳裂纹萌生阶段,基于DIC获得的应变集中系数随缺口半径的减小而增加,与理论应力集中系数具有一致性;当缺口根部循环应变累积至一定程度时萌生微观裂纹,此时载荷增大,局部应变速率急剧增大后短暂减小再增大,直至宏观裂纹出现;当宏观裂纹出现时,采用应力强度因子对TA2疲劳裂纹扩展进行表征,应力强度因子随载荷和裂纹长度的增加而增大。结果表明,基于DIC技术能够对缺口疲劳裂纹萌生及扩展进行表征,能够为钛制设备的安全评定提供依据。

关键词 缺口疲劳 数字图像相关 疲劳裂纹萌生 疲劳裂纹扩展

中图分类号 TH114 TH142.3

Abstract The fatigue test of industrial pure titanium notched specimens was carried out. Combined with digital image correlation (DIC) technology, the surface strain field of the specimen, the local strain at the notch root, and the fatigue crack propagation length were obtained, and the fatigue crack initiation and propagation stages were divided and characterized. The experimental results show that, in the fatigue crack initiation stage, the strain concentration factor obtained by DIC increases as the notch radius decreases, which is consistent with the theoretical stress concentration factor. When the cyclic strain at the notch root accumulates to a certain extent, the micro-cracks initiate. At this time, the increase of load causes the local strain rate to increase sharply, then decrease briefly and increases again until the appearance of macro-cracks. When macro-cracks appear, the fatigue crack propagation of TA2 is characterized by the stress intensity factor, which increases with the increase of load and crack length. The results show that the notch fatigue crack initiation and propagation can be characterized based on DIC technology, which can provide a basis for the safety assessment of titanium equipments.

Key words Notch fatigue; Digital image correlation; Fatigue crack initiation; Fatigue crack growth

Corresponding author: DAI Qiao, E-mail: daiqiao@126.com, Tel: +86-519-86953210

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No.51805230), and the Jiangsu Province Graduate Research and Practice Innovation Project(No. SJCX21_1300).

Manuscript received 20221222, in revised form 20230208.

0 引言

钛因低密度、耐腐蚀等特性成为了超长管材、压力容器等腐蚀环境下工作设备的常用材料^[1]。材料本身或加工过程产生的皱褶、划痕等缺陷,以及结构设计所必要的螺纹、退刀槽、键槽等缺口,致使工程结构上产生应力集中区。当承受交变载荷作用时,疲劳裂纹极易在这些部位萌生并扩展,最终导致结构的突然

断裂。因此缺口往往影响着整个构件的强度和寿命^[2-3]。为了保证钛制设备的安全运行,研究缺口疲劳裂纹的萌生与扩展,并对其进行参数表征,具有重要的工程意义。

缺口使得工程结构产生应力集中现象,而缺口形貌、尺寸影响着局部的应力分布。交变载荷对缺口根部的循环应变累积产生显著影响。KOLASANGIANI K等^[4]对1045钢不同缺口尺寸试样进行疲劳试验,结果

*20221222收到初稿,20230208收到修改稿。国家自然科学基金项目(51805230),江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX21_1300)资助。

**包骥乐,女,1998年生,江苏无锡人,汉族,江苏理工学院硕士研究生,主要研究方向为轻量化设计与分析。

***代巧(通信作者),女,1986年生,四川资中人,汉族,江苏理工学院副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为结构强度及完整性评定。

表明,缺口尺寸越大和平均应力水平越高,局部应变累积越多,局部棘轮效应越明显。LI B C等^[5]研究了缺口形状、尺寸对临界根半径的影响,临界根半径与缺口大小成负相关,缺口较锐时裂纹闭合效应依赖于缺口大小。JAFAR A^[6]研究了缺口的存在与否和几何形状对疲劳寿命的影响,缺口的存在缩短疲劳寿命,U形缺口抗疲劳性能优于V形缺口。张伟等^[7]研究了缺口形状和载荷对疲劳寿命的影响,缺口半径越小、载荷越大,构件疲劳寿命就越短。因此,缺口形状、尺寸和外加载荷会对材料的疲劳寿命、疲劳损伤和疲劳极限等性能产生影响。

缺口根部的应力分布受缺口尺寸影响,当缺口尺寸很小时,应变片和引伸计难以测量,而数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术基于计算机视觉和数值计算,可以以非接触、非干涉的光测方法直接测量各种尺度物体表面各载荷作用下的位移场和应变场,进而确定材料的力学参数^[8-9]。KARIMIAN S F等^[10]采用DIC测量了AA7075-T6试样近距离切口的塑性变形。QVALE P等^[11]采用DIC技术对近海锚链不规则腐蚀表面的裂纹萌生和裂纹扩展进行了识别。宋海鹏等^[12]利用DIC研究了预腐蚀2024-T4铝合金在不同应力条件下的应变场演化,直观显示裂纹萌生和扩展的局部特征。蒋玮等^[13]将DIC方法与 J 积分理论相结合,提出了 J 积分新的测量方法。SANCHEZ M

等^[14]将DIC技术与Williams系列方法相结合,获得疲劳裂纹扩展速率随应力强度范围的变化规律。CAO Y G等^[15]基于DIC提出了重构虚拟引伸计并测量裂纹长度的方法。由此可知,可通过DIC技术与理论相结合来识别塑性变形、裂纹萌生和扩展阶段特征以及裂纹长度等信息。

本文对工业纯钛TA2双边U形缺口试样进行多级载荷疲劳试验,结合DIC技术研究其疲劳裂纹萌生与扩展。根据试样缺口根部局部应变随循环载荷、循环次数的变化情况,划分疲劳裂纹萌生与扩展阶段,确定应变集中系数,对裂纹萌生阶段进行表征;分析缺口根部应变场随缺口尺寸、循环载荷、循环次数的变化,研究缺口根部的循环应变累积过程;通过DIC技术获取疲劳裂纹扩展长度,计算应力强度因子,对疲劳裂纹扩展进行表征。

1 TA2缺口疲劳试验

试验材料为工业纯钛TA2,其力学性能参数^[16]:弹性模量 $E=99\ 510\text{ MPa}$,屈服强度 $R_y=158\text{ MPa}$ 。通过线切割对5 mm厚热轧钛板加工双边U形缺口试样,试样结构尺寸如图1所示。试样平行段长度为24 mm,考虑4个缺口半径尺寸,分别为0.2, 0.3, 0.5, 1 mm,缺口深度统一为3 mm。试验前对试样表面进行打磨抛光和喷漆处理,使试样表面覆上一层黑白对比的均匀散斑。

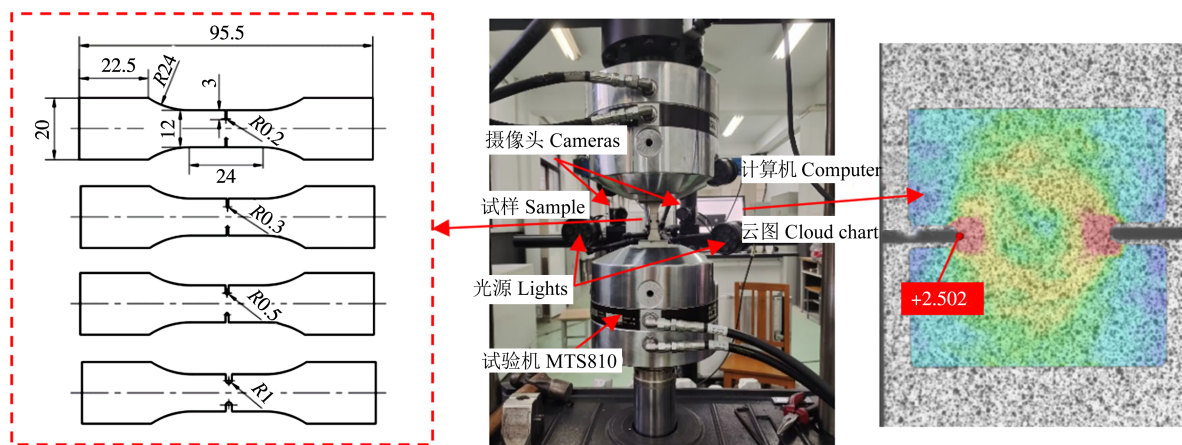


图1 TA2缺口试样、试验设备及DIC测试平台

Fig. 1 TA2 notched specimens, test equipment and DIC test platform

在MTS810试验机上采用力控制拉-拉加载方式进行疲劳试验。疲劳波形采用三角波,加载频率为3 Hz,应力比为0.1,采用多级加载的方式,最大应力从 $0.8R_y$ 开始,每10 000次循环增加 $0.1R_y$,直至试样断裂。加载制度如图2所示。试验参数及结果如表1所示,缺口半径越小,最终断裂时的应力越小,寿命也越短。

为获取TA2缺口试样疲劳过程的表面应变场变化规律,搭建DIC应变测量系统试验平台(图1)。通过高速相机拍摄试验过程中表面散斑的位置变化,再用后处理软件计算表面位移和应变。在试验过程中,DIC拍摄频率为87 Hz,以一定循环次数为间隔,记录试样表面变化。为了获得高精度的应变计算结果,本文通过优质的试样表面散斑质量,合理的后处理参数

设置,以及良好的拍摄质量等措施,在缺口前缘附近获得了较好的应变场分布结果(图1)。

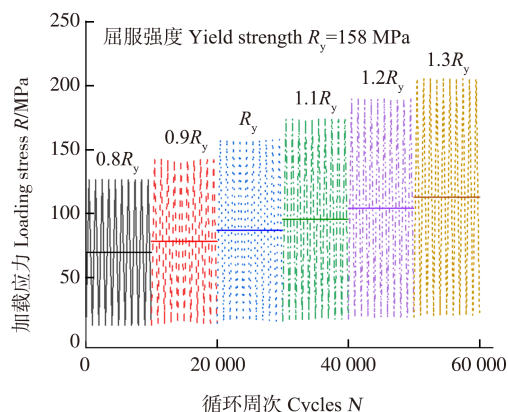


图2 加载制度

Fig. 2 Loading regime

表1 TA2缺口疲劳试验参数及结果

Tab. 1 Parameters and results of TA2 notch fatigue test

试样号 Number	缺口半径 Notch radius ρ /mm	断裂时最大应力 Maximum stress at fracture $R_{c\max}$ /MPa	循环周次 Cycles N
1	0.2	173.8	39 230
2	0.3	173.8	41 236
3	0.5	189.6	45 890
4	1	205.4	57 250

2 结果与讨论

2.1 TA2缺口试样应变集中表征

2.1.1 基于DIC技术获取的局部应变

构件截面发生变化,应力和应变局部增大的现象称为应力或应变集中。通过DIC技术获取循环载荷下试样缺口根部的局部应变,用于观察缺口根部的应变集中现象。为了获得缺口边缘处的最大应变,本文通过试样前处理、测试与后处理方法来保障DIC技术在缺口前缘的应变计算精度。由DIC技术获得的最大局部应变接近缺口半径切点位置(图1)。各试样每个循环内最大载荷对应局部应变 $\varepsilon_{\max}$ 随循环次数的变化如图3所示。

由图3可以看出局部应变随循环次数、载荷的演化过程,以及缺口半径尺寸的影响。加载的前10 000次循环内,各试样的局部应变值基本没有变化,此时 $0.8R_y$ 的载荷值较小,试样整体处于弹性变形状态,仅缺口根部小部分区域发生塑性变形,且应变值较小,因此缺口根部的循环塑性应变累积缓慢。当载荷增大时,局部应变值增大,然后随循环次数的增加缓慢增大。这是由于在缺口根部应力集中,应力增大致使材料产生塑性变形,在循环载荷作用下产生应变累

积,局部应变值不断增大。在30 000次循环,载荷由 R_y 增大至 $1.1R_y$ 时,缺口半径为0.2、0.3、0.5 mm的试样,局部应变值快速增大,且缺口半径越小局部应变值的增加速度越快,缺口半径为1 mm的试样在50 000次循环,载荷由 $1.2R_y$ 增大至 $1.3R_y$ 时,局部应变值快速增大。同时局部应变值与缺口半径尺寸有关,缺口半径尺寸越小,局部应变值越大,应变集中程度越高。

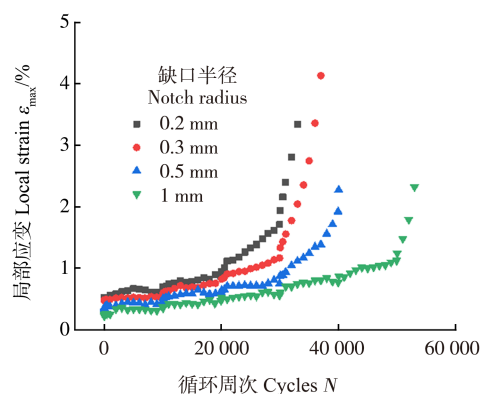


图3 TA2缺口试样局部应变随循环次数的变化

Fig. 3 Variation of the local strain of TA2 notched specimens with the cycle number

缺口根部局部应变的变化与疲劳裂纹萌生有关。加载初期试样缺口根部应变场由应变集中主导,随着循环载荷作用缺口根部应变不断累积,致使缺口根部萌生微观裂纹,由于裂纹尖端奇异性,局部应变值不断增大;随着循环载荷持续作用,微观裂纹发生扩展,从而形成宏观裂纹。结合各试样DIC结果发现,当缺口根部循环应变累积至一定值时,局部应变值快速增大。基于此,将TA2缺口试样的疲劳过程划分为裂纹萌生阶段和裂纹扩展阶段,局部应变值的快速增加代表裂纹扩展阶段的开始。由图3可以看出,各试样裂纹萌生所需的循环次数随着缺口半径尺寸的增加而增大,对应的循环载荷也更大。

2.1.2 应变集中系数的表征

如前所述,在疲劳裂纹萌生阶段,试样缺口根部的应变场由应变集中主导,因此考虑采用应变集中系数来表征。应变集中系数 K_ε 表示局部应变与名义应变之比^[17]:

$$K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\text{net}}} \quad (1)$$

在弹性变形状态下,缺口截面名义应变 ε_{net} 由名义应力 σ_{net} 确定^[18], $\varepsilon_{\text{net}} = \sigma_{\text{net}}/E$ 。由于TA2缺口疲劳试验采用多级加载方式,前10 000次循环内的最大载荷为 $0.8R_y$,小于材料屈服强度,试样整体处于弹性变形状态。根据载荷、材料参数确定最大载荷对应的截面

名义应变为 0.127%。

根据图 3 中 TA2 缺口疲劳试验前 10 000 次循环内各试样局部应变的平均值, 获得各缺口尺寸对应的应变集中系数 K_ε , 用于表征缺口试样的应变集中, 如图 4 所示。应变集中系数 K_ε 与缺口半径 ρ 的关系满足:

$$K_\varepsilon = 2.75\rho^{-0.3779} \quad (2)$$

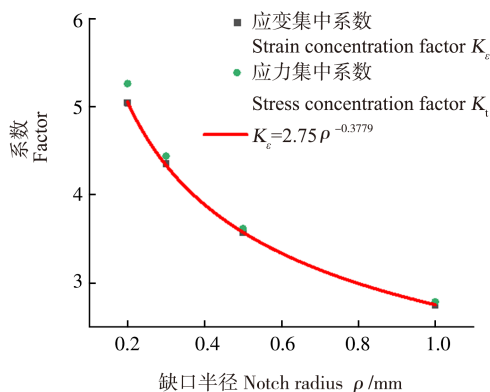


图 4 基于 DIC 的 K_ε 与理论 K_t 的对比

Fig. 4 Comparison between K_ε based on DIC and theoretical K_t

在结构设计过程中, 通常采用应力集中系数来反映缺口部位的应力集中程度。当净截面所受应力小于屈服强度, 可近似为弹性变形, 应力集中系数与应变集中系数相等^[19]。为了验证采用 DIC 技术获取的应变集中系数的有效性, 对各试样的应力集中系数进行

分析。根据应力集中系数手册, 双边 U 形缺口试样的 K_t 计算式如下^[20]:

$$K_t = (0.78 + 2.243 \sqrt{\frac{a}{\rho}}) (1 - \frac{2a}{w}) [0.993 + 0.18(\frac{2a}{w}) - 1.06(\frac{2a}{w})^2 + 1.71(\frac{2a}{w})^3] \quad (3)$$

式中, a 为缺口深度; w 为板宽。根据各试样尺寸, 计算获得 K_t 随缺口半径的变化 (图 4)。由图 4 可知, 通过 DIC 技术获得的应变集中系数 K_ε 与理论应力集中系数 K_t 基本接近, 随缺口半径的变化趋势一致。当缺口半径较小时, 采用 DIC 技术获得的 K_ε 略小于理论 K_t , 这是由缺口半径越小, 应力集中的范围越小, 采用 DIC 技术难以跟踪到缺口根部的最大应变造成的, 偏差在 5% 以内, 满足工程应用。因此, 采用 DIC 技术获取的应变集中系数能够有效表征缺口疲劳裂纹萌生阶段的应力集中状态。

2.2 缺口根部的循环应变累积

疲劳裂纹的萌生与缺口根部的塑性应变累积密切相关。为了分析缺口根部的应变累积过程, 对 TA2 疲劳裂纹萌生阶段的应变云图进行对比, 如图 5 所示。由图 5 可以看出, 各试样的应变分布及应变值随循环次数、缺口半径的变化而变化。同一缺口半径下, 随着循环次数的增加、载荷的增大, 缺口根部应变值不断增大, 塑性变形区域不断扩大, 反映了循环载荷作

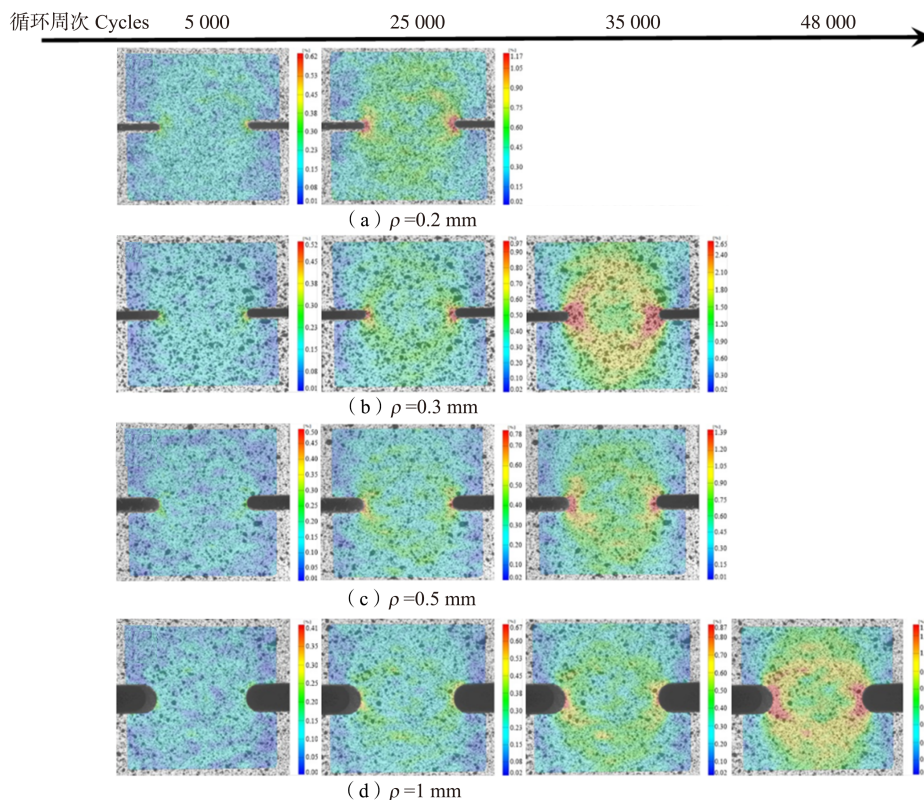


图 5 TA2 缺口根部循环应变累积过程

Fig. 5 Cyclic strain accumulation process at the notch root of TA2

用下应变累积过程。对比不同缺口尺寸试样应变分布云图发现,相同循环次数相同应力水平时,缺口半径越小,局部应变值越大,应变集中程度越高,这与应变集中系数的分析结果一致。

为了进一步分析TA2缺口试样循环加载过程中缺口根部的应变累积过程,对图3中的应变求导,获得各试样局部应变速率随循环次数的变化,如图6所示。由图6可以看出,加载初期各试样的局部应变速率既不随循环次数变化,也不随应力水平变化;当30 000次循环时,应力增大至 $1.1R_y$,缺口半径分别为0.2、0.3的试样的局部应变速率急剧增大,随后经历一个短暂的减小过程后不断增大,而缺口半径分别为0.5、1 mm的试样的局部应变速率基本保持不变;当40 000次循环时,应力增大至 $1.2R_y$,缺口半径为0.5 mm的试样,局部应变速率急剧增大后短暂减小再增大,而缺口半径为1 mm的试样的局部应变速率依然保持不变;当50 000次循环时,应力增大至 $1.3R_y$,缺口半径为1 mm的试样的局部应变速率增大,但未出现减小再增大的过程。缺口半径分别为0.2、0.3、0.5 mm的试样在一定循环时,因应力水平增加而出现局部应变速率急剧增大后短暂减小再增大的现象,其原因在于试样已萌生微裂纹,载荷的增大使裂纹尖端钝化,限制了微裂纹的扩展,一定循环后微裂纹继续扩展,从而形成宏观裂纹,这与第2.1节中的分析结果一致。缺口半径为1 mm的试样的局部应变速率急剧增大后未出现减小再增大的过程,其原因在于前期加载过程中缺口根部应变值偏小,塑性应变累积量不足,未萌生微裂纹,而此时的应力水平已达到 $1.3R_y$,缺口根部启裂偏向于韧性开裂。

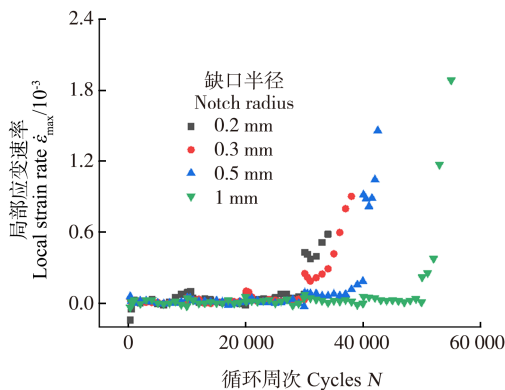


图6 TA2缺口试样局部应变速率演化

Fig. 6 Local strain rate evolution of TA2 notched specimens

2.3 TA2缺口疲劳裂纹扩展表征

2.3.1 缺口疲劳裂纹扩展表征参量

在第2.1节中,用应变集中系数对裂纹萌生阶段缺口根部的应力集中现象进行表征。当裂纹出现时,

由于裂纹尖端奇异性,需要合适的断裂参量来表征。断裂力学认为,裂纹失稳扩展现象的本质是裂纹尖端区释放的能量能够满足形成裂纹面所需的能量,一般用应力强度因子作为判裂准则,计算式如下^[21]:

$$K = F\sigma\sqrt{\pi l} \quad (4)$$

式中, σ 为远场应力; l 为裂纹长度; F 为修正系数,它的确定需要对每个特定的缺口轮廓和加载条件进行广泛的数值计算,不适用于工程应用。为此KUJAWSKI D^{[22]953-965}考虑缺口应力集中的影响,结合远场应力 σ 、应力集中系数 K_t 以及缺口形状因子 Q ,建立了缺口深度为 a 、裂纹长度为 l 的应力强度因子的计算式,用于表征循环加载过程的应力场:

$$K = Qf \frac{K_t \sigma}{2} \left[\left(1 + 2 \frac{l}{\rho}\right)^{-1/2} + \left(1 + 2 \frac{l}{\rho}\right)^{-3/2} \right] \sqrt{\pi l} \quad (5)$$

式中,对于穿透裂纹, $Q=1.122$; f 为修正因子,当 $l/\rho < 0.2$ 时约为1,当 $l/\rho > 0.2$ 时, $f = 1 + \frac{\tan(\pi/2K_t)}{2.8} \left(\frac{l}{\rho} - 0.2\right)$ 。而对于长裂纹,裂纹尖端受缺口应力集中影响较小,可以近似认为^{[22]953-965}

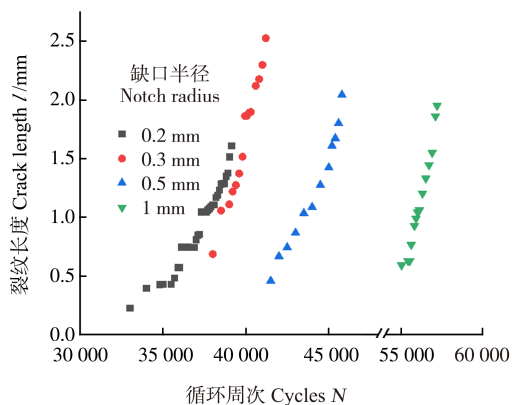
$$K = 1.122\sigma\sqrt{\pi(a+l)} \quad (6)$$

2.3.2 TA2缺口疲劳裂纹

裂纹长度是疲劳裂纹表征的关键。本文通过DIC技术,参考文献[23]获取的裂纹长度。首先根据TA2缺口疲劳试验结果,通过DIC后处理软件在散斑图初步识别裂纹尖端;然后在裂纹尖端前后1 mm范围内,排布间隔为0.04 mm的虚拟引伸计;再通过引伸计张量变化的2阶导,将应变变化率的最大值处确定为精确的裂纹尖端位置;最后以裂纹尖端至缺口根部的距离为裂纹长度。借此获取各TA2缺口试样单边裂纹长度随循环次数的变化,如图7(a)所示。图7(a)中,各试样启裂时对应循环与第2.1节分析结果一致,缺口半径越小,对应的启裂循环载荷及循环次数越小。由于采用多级载荷的加载方式,各试样裂纹扩展过程所对应的载荷不同,缺口半径分别为0.2、0.5、1 mm的试样,分别在 $1.1R_y$ 、 $1.2R_y$ 、 $1.3R_y$ 载荷区间内进行疲劳裂纹扩展,缺口半径为0.3 mm试样的疲劳裂纹扩展过程涵盖了 $1.1R_y$ 、 $1.2R_y$ 两个载荷区间。

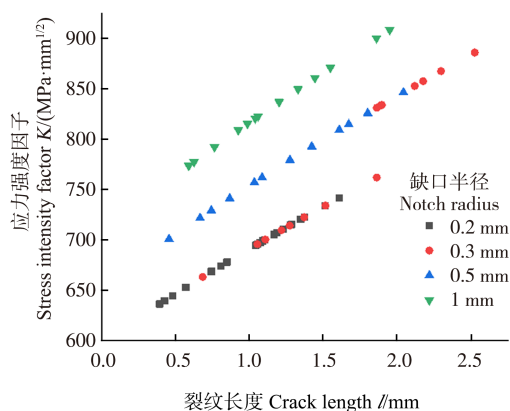
由于DIC技术能够识别的宏观裂纹超过0.25 mm,为穿透长裂纹^[24],将各试样的裂纹尺寸、载荷条件代入式(6),获得各试样应力强度因子 K 与裂纹长度 l 的关系,如图7(b)所示。由图7(b)可以看出,各试样的 K 随裂纹长度的增加而增大。由前述分析可知,各试样的疲劳裂纹扩展过程对应的载荷不同。由图7(b)看出,各试样裂纹长度相同时,对应的 K 随试样缺口半径的变化,实质上是随载荷的增大而增大。进一步对

缺口半径为0.3 mm的试样的 K 变化规律进行分析,发现当载荷为 $1.1R_y$ 时,其 K 与缺口半径为0.2 mm的试样一致;当载荷增大到 $1.3R_y$ 时,其 K 与缺口半径为0.5 mm试样一致。因此, K 反映了不同裂纹长度下试样的应力状态,能够用于TA2疲劳裂纹扩展过程的表征。



(a) 裂纹长度随循环周次的变化

(a) Variation of crack length with the cycle



(b) 应力强度因子与裂纹长度关系

(b) Relations between the stress intensity factor and the crack length

图7 TA2缺口疲劳裂纹扩展规律

Fig. 7 Propagation law of TA2 notch fatigue crack

3 结论

本文对工业纯钛TA2缺口试样进行力控制的疲劳试验,结合DIC技术对缺口附近的应变状态进行表征,获取局部应变(速率);将疲劳过程划分为疲劳裂纹萌生阶段与疲劳裂纹扩展阶段,分别采用应变集中系数、缺口根部循环应变累积和应力强度因子对各阶段进行表征,得出如下结论:

1) 基于DIC技术获取TA2缺口试样的局部应变,结果表明,局部应变随缺口尺寸的减小而增大,随着载荷、循环次数的增加,缺口根部循环应变不断累积,局部应变值不断增大。根据DIC技术获得的局部应变确定的应变集中系数,随着缺口半径的减小而增大。

采用应变集中系数表征TA2缺口试样疲劳裂纹萌生阶段的应力状态,并借助理论应力集中系数验证了基于DIC技术获取应变集中系数的有效性。

2) 通过DIC应变云图分析了TA缺口根部的循环应变累积过程。加载初期,相同载荷下试样的缺口半径越小,缺口根部应变值越大,然而各试样的应变速率在裂纹萌生阶段基本一致;当缺口半径较小时,缺口根部循环应变累积至一定程度时萌生微观裂纹,此时载荷增大,局部应变速率急剧增大后短暂减小再增大,直至宏观裂纹出现;缺口半径较大时,前期的循环应变累积量不足以萌生裂纹,当载荷增大至 $1.3R_y$ 时韧性开裂。

3) 基于DIC技术获取TA2缺口疲劳裂纹长度,试样缺口的半径越小,出现裂纹时的载荷和循环次数越小,各试样的试验结果反映了不同载荷下疲劳裂纹扩展规律;采用应力强度因子对各试样的应力状态进行表征,结果表明,应力强度因子随裂纹长度和载荷的增加而增大,能够用来表征TA2疲劳裂纹扩展。

参考文献(References)

- [1] ZHAN Z X. Experiments and numerical simulations for the fatigue behavior of a novel TA2-TA15 titanium alloy fabricated by laser melting deposition[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 121: 20-29.
- [2] HE J C, ZHU S P, TADDESSE A T, et al. Evaluation of critical distance, highly stressed volume, and weakest-link methods in notch fatigue analysis[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 162: 106950.
- [3] 徐友坤, 鲁连涛, 曾东方, 等. 基于临界距离法的含表面缺陷车轴试样疲劳强度预测[J]. 机械强度, 2022, 44(4): 825-830.
XU YouKun, LU LianTao, ZENG DongFang, et al. Fatigue strength prediction of railway axle specimen with surface notch by tcd[J]. 2022, 44(4): 825-830 (In Chinese).
- [4] KOLASANGIANI K, FARHANGDOOST K, SHARIATI M, et al. Ratcheting assessment of notched steel samples subjected to asymmetric loading cycles through coupled kinematic hardening-Neuber rules[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 144: 24-32.
- [5] LI B C, JIANG C, NOGUCHI H, et al. Revealing the mechanism of critical root radius in notch fatigue limit based on crack closure concept[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 130: 105261.
- [6] JAFAR A. Fatigue failure prediction of U-notched ZK60 magnesium samples using the strain energy density approach[J]. Metals, 2021, 11(1): 1-14.
- [7] 张伟, 胡明敏. 变幅载荷作用下缺口试件的疲劳寿命预测方法[J]. 机械强度, 2016, 38(6): 1325-1329.
ZHANG Wei, HU MingMin. A new method to estimate finite life of notched components under variable amplitude fatigue loading[J]. Journal of Mechanical Strength, 2016, 38(6): 1325-1329 (In Chinese).

- [8] 曹广龙,陈亮,任明法,等. 基于DIC方法的铝合金焊接接头拉伸性能研究[J]. 机械强度,2019,41(3):588-593.
CAO GuangLong, CHEN Liang, REN MingFa, et al. Study on tensile properties of aluminum alloy welding joint using DIC method [J]. Journal of Mechanical Strength, 2019, 41 (3) : 588-593 (In Chinese).
- [9] DONG Y L, PAN B. A review of speckle pattern fabrication and assessment for digital image correlation [J]. Experimental Mechanics, 2017, 57(8): 1161-1181.
- [10] KARIMIAN S F, BRUCK H A, MODARRES M. Thermodynamic entropy to detect fatigue crack initiation using digital image correlation, and effect of overload spectrums [J]. International Journal of Fatigue, 2019, 129: 105256.
- [11] QVALE P, ZARANDI E P, ÅS S K, et al. Digital image correlation for continuous mapping of fatigue crack initiation sites on corroded surface from offshore mooring chain [J]. International Journal of Fatigue, 2021, 151: 106350.
- [12] 宋海鹏,刘长春. 基于数字图像相关的预腐蚀 2024-T4 铝合金疲劳开裂实验研究[J]. 航空材料学报,2020,40(2): 43-52.
SONG HaiPeng, LIU ChangChun. Experimental study on fatigue cracking in pre-corroded aluminum alloy 2024-T4 via digital image correlation [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(2): 43-52 (In Chinese).
- [13] 蒋玮,蒋险峰,黄裕龙. 基于数字图像相关的 J 积分测量方法[J]. 机械强度,2018,40(3): 687-694.
JIANG Wei, JIANG XianFeng, HUANG YuLong. A J -integral measurement method based on digital image correlation [J]. Journal of Mechanical Strength, 2018, 40(3): 687-694 (In Chinese).
- [14] SÁNCHEZ M, MALLOR C, CANALES M, et al. Digital image correlation parameters optimized for the characterization of fatigue crack growth life [J]. Measurement, 2021, 174: 109082.
- [15] CAO Y G, JIAO Z H, ZHEN Y, et al. A reconstruction method to determine crack length based on virtual extensometers [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 264: 108337.
- [16] 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).
- [17] YANG Z, KIM C B, CHO C, et al. The concentration of stress and strain in finite thickness elastic plate containing a circular hole [J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45 (3/4): 713-731.
- [18] GUO W, GUO W L. Formulation of three-dimensional stress and strain fields at elliptical holes in finite thickness plates [J]. Acta Mechanica Sinica, 2019, 32(4): 393-430.
- [19] 张进. 应变率对金属孔板应力应变集中影响的研究[D]. 无锡:江南大学,2019: 6-19.
ZHANG Jin. Study on the effect of strain rate on stress and strain concentration of metal orifice plate [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019: 6-19(In Chinese).
- [20] PILKEY W D, PILKEY D F, BI Z M. Peterson's stress concentration factors [M]. 4th ed. Manhattan: John Wiley & Sons, 2020: 89-117.
- [21] YOSHIDA S. Deformation and fracture of solid-state materials [M]. New York: Springer-Verlag New York, 2016: 219-221.
- [22] KUJAWSKI D. Estimations of stress intensity factors for small cracks at notches [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1991, 14(10): 953-965.
- [23] 黄心畏,单晓锋,高红俐,等. 基于边缘检测和数字图像相关法的疲劳裂纹长度测量方法[J]. 兵工学报,2022,43(4): 940-951.
HUANG XinWei, SHAN XiaoFeng, GAO HongLi, et al. Fatigue crack length measurement method based on edge detection and DIC [J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(4): 940-951 (In Chinese).
- [24] WITKIN D B, PATEL D N, BEAN G E. Notched fatigue testing of Inconel 718 prepared by selective laser melting [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2019, 42 (1): 166-177.