

堆积方向对激光选区熔化 TC4 合金缺口件局部循环塑性行为的影响

王志强¹, 李建^{2*}, 赵 询², 赵雪同¹, 徐英东³, 唐明扬⁴,
刘 庆³, 葛峻铭², 肖 敏⁵

(1. 上海有色金属工业技术监测中心有限公司, 上海 201804; 2. 江苏大学土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013;
3. 江苏大学能源与动力工程学院, 江苏 镇江 212013; 4. 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013; 5. 江苏大学数学科学学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要:通过数字图像相关技术从宏观塑性变形方面研究了堆积方向对激光选区熔化(SLM)TC4 合金缺口件局部循环塑性行为的影响。结果表明:缺口附近的塑性变形受堆积方向和缺口半径的影响,进而影响缺口件的疲劳寿命。缺口根部的棘轮应变及其应变率随堆积方向改变(0°至 90°)而降低,同时也随缺口半径的增加而降低。与缺口半径相比,棘轮应变及应变率和疲劳寿命对堆积方向敏感性更低。研究结果为 SLM 构件的疲劳设计提供了一定的理论参考。

关键词:TC4; 激光选区熔化; 堆积方向; 缺口件; 循环塑性; 棘轮应变; 疲劳寿命; DIC

中图分类号:TF823,TG665

文献标志码:A

文章编号:1004-7638(2024)04-0068-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.04.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Influence of stacking direction on the local cyclic plastic behavior of selective laser melted TC4 alloy notched parts

Wang Zhiqiang¹, Li Jian^{2*}, Zhao Xun², Zhao Xuetong¹, Xu Yingdong³, Tang Mingyang⁴,
Liu Qing³, Ge Junming², Xiao Min⁵

(1. Shanghai Supervision and Testing Center for Nonferrous Metals Industry Co., Ltd., Shanghai 201804, China; 2. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China; 3. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China; 4. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China; 5. School of Mathematical Sciences, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

Abstract: In this paper the influence of stacking direction on the local cyclic plastic behavior of selective laser melted (SLM) TC4 alloy notched parts had been investigated through digital image correlation technology. The results indicate that the plastic deformation near the root of the notched parts can be influenced by the stacking direction and notch radius, thereby affecting the fatigue life of the notched parts. The ratcheting strain and strain rate near the root of the notch decrease with the change of stack-

收稿日期:2023-12-11

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)。

作者简介:王志强, 1985 年出生, 男, 江苏阜宁人, 学士, 高级工程师, 主要研究方向:金属材料化学分析、性能测试方法等, E-mail: wangzhiqiang@sys.ac.cn; *通讯作者:李建, 1989 年出生, 男, 江苏扬州人, 博士, 讲师, 主要研究方向:结构完整性评估、金属材料 3D 打印、金属材料疲劳与断裂、光测试验力学, E-mail: lj66@ujs.edu.cn。

ing direction (from 0° to 90°), and also decrease with the change of the notch radius. Compared with effect by notch radius, stacking direction cause less influence on the ratchet strain, strain rate and fatigue life. The research results will provide a certain theoretical reference for the fatigue design of SLM parts.

Key words: TC4, selective laser melted, stacking direction, notch, cyclic plasticity, ratcheting strain, fatigue life, DIC

0 引言

激光选区熔化 (SLM) 3D 打印技术广泛应用于医疗、航空航天、汽车制造等各个领域^[1]。较传统铣削制造工艺, SLM 构件不仅可满足工程应用要求, 还可协同结构优化设计, 为难加工、复杂零件的轻质化、高效成型提供了新的途径^[2-3]。TC4 钛合金是一种常用的 3D 打印合金材料, 具有良好力学性能和耐腐蚀性能^[4]。航空航天领域是其主要的应用领域之一, 主要用于制造发动机的风扇和压气机盘及叶片, 以及飞机结构中的梁、接头、隔框等重要承力构件。在工程应用中, 疲劳失效是部件的主要失效模式之一^[5]。航空器材长期运行中许多零构件都会产生交变应力, 引起疲劳损伤, 破坏形式多为疲劳断裂。疲劳和断裂是工程结构最常见的失效模式。疲劳寿命评估主要集中在关键零构件, 如风扇叶片、涡轮叶片、机匣、涡轮盘和叶盘等零构件。这些部位呈现出缺口特征, 在缺口附近容易产生应力集中, 在循环荷载作用下, 缺口附近还会不断产生塑性应变累积, 疲劳裂纹容易萌生于此^[6]。Liao 等^[7]在缺口根部发现了多个裂纹源, 裂纹从缺口根部萌生。Razavi 等^[8]研究发现缺口试样表现出非常低的缺口灵敏度, 但缺口却引起疲劳强度降低, 从而降低结构寿命。包珍强^[9]的研究也得到类似结论, 并且疲劳强度随缺口根部半径的增加而增大。

除了缺口本身的影响之外, 3D 打印的堆积方向对材料的力学性能包括疲劳性能的影响不容忽视。堆积方向的不同决定了 3D 打印材料力学行为的各向异性, 同样缺口件疲劳性能也呈现出各向异性, 与堆积方向有关。Qian 等^[10]研究显示堆积方向对初始裂纹源的萌生没有影响, 但疲劳性能随堆积方向 (0° 至 90°) 不同而降低。然而, Sun 等^[11]通过改变堆积方向设计了 TC4 样品的拉伸和疲劳测试, 结果表明, 堆积方向对疲劳性能有影响, 但对疲劳裂纹扩展速率影响不大。Rans 等^[12]研究了 SLM 钛合金薄板堆积方向的影响, 结果显示柱状晶取向对其抗裂纹扩展性没有明显影响。Edwards 等^[13]讨论了堆积方

向对 TC4 断裂韧性和疲劳裂纹扩展的影响, 发现堆积方向对断裂韧性有一定影响, 但不同堆积方向的裂纹扩展基本没有差异。上述研究表明堆积方向对裂纹萌生以及疲劳裂纹扩展没有较大影响, 但却对疲劳性能产生影响。由于缺口件疲劳性能取决于局部循环变形, 因此, 探明堆积方向对 3D 打印缺口件局部循环变形行为的影响能够更深入了解疲劳损伤的演变规律, 从而了解堆积方向是如何影响疲劳性能的。然而, 目前国内外对这方面的研究较少, 因此有必要开展堆积方向对缺口局部循环变形影响的研究。

数字图像相关技术 (Digital Image Correlation, DIC) 作为一种非接触实时位移应变测量方法, 常被用来测量疲劳过程中的变形与疲劳断裂相关的参数^[14-16]。代巧^[17]等利用 DIC 技术和 Irwin 模型建立了疲劳裂纹尖端循环应变场的试验划分方法, 并通过划分循环塑性区、单调塑性区和弹性区验证了 DIC 试验划分裂纹尖端塑性区的有效性。Gonzales^[18]等利用高分辨率 DIC 获得了裂纹尖端的循环塑性区尺寸及形状。虽然国内外研究人员利用 DIC 技术对疲劳和裂纹的问题作了较多研究, 但对缺口件局部循环塑性行为的研究却较少。另外, 对于 3D 打印材料的研究主要集中在堆积方向对强度性能、裂纹扩展的影响等方面。因此结合 DIC 研究 3D 打印钛合金缺口件的循环塑性行为很有必要。

笔者利用 DIC 测量技术研究了 SLM 钛合金缺口件局部循环塑性行为, 研究了堆积方向对缺口局部循环塑性行为的影响。探讨缺口半径及堆积方向对缺口附近棘轮应变和应变幅值的影响, 以及最终对疲劳寿命的影响。该研究为 SLM 构件的疲劳设计提供了合理的理论依据。

1 试验过程

试验使用的材料 TC4 钛合金是一种中等强度的 α - β 型两相钛合金, 其化学成分如表 1 所示。3D 打印采取激光选区熔化技术 (SLM), 设备型号为 EOS M290。原材料为球形粉末, 材料粒径分布为 $15 \sim 53 \mu\text{m}$ 。成形时主要工艺参数为: 激光功率

340 W, 扫描间距 0.12 mm, 层厚 60 μm , 扫描速度 1 250 mm/s。为了消除打印过程中的残余应力, 打印结束后接着进行 800 $^{\circ}\text{C}$ 、保温 2 h、随炉冷却热处理。金相组织如图 1 所示, 组织结构主要为少量的 β 晶(图中黑色)、部分细长针状 α' 晶(图中白色针状)以及部分 α 晶(图中白色板条状)。除此之外, 材料内部还存在少量未熔透和孔隙缺陷。参考 Qian 等人^[10]的研究, 与加载方向平行度为 0° , 试验设置了三

种不同的堆积方向(D1 0° 、D2 45° 、D3 90°)打印出初始样品, 而后进行机械加工, 制造出表面光滑平整的单边 U 型缺口试样, 如图 2 所示, 缺口半径分别为 0.2、1.2 mm。试验设备采用 ZDZ-20 疲劳试验机, 如图 3(a) 所示, 试验温度为室温。对 TC4 钛合金缺口件进行疲劳加载, 加载波形为正弦波, 缺口净截面名义应力为 450 MPa, 载荷比为 0.1, 加载频率为 0.4 Hz。

表 1 3D 打印钛合金化学成分
Table 1 Chemical composition of 3D printed titanium alloy

Ti	Al	V	Fe	Si	C	N	O	H
余量	5.86	4.18	0.04	0.03	0.013	0.005 4	0.099	0.001 1

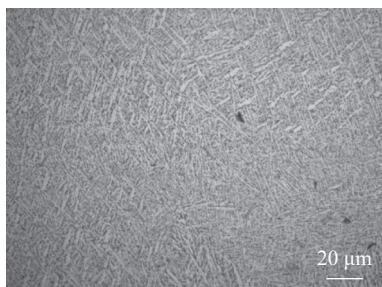


图 1 TC4 钛合金金相组织
Fig. 1 Metallographic structure of TC4

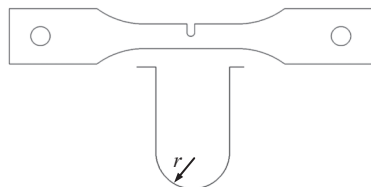
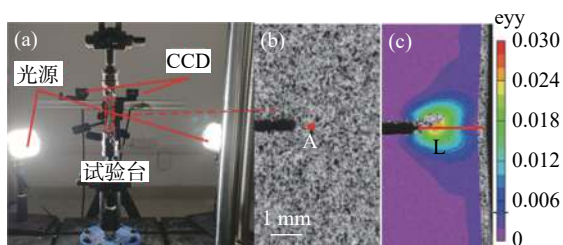


图 2 U 型缺口试样示意 ($r=0.2$ 、1.2 mm)
Fig. 2 Schematic diagram of U-shaped notch specimen ($r=0.2$ 、1.2 mm)



(a) 疲劳试验设备; (b) DIC 测试散斑试样; (c) 应变云图
图 3 疲劳试验装置及试件应变云图

Fig. 3 Experimental setup and strain cloud diagram of specimens

疲劳试验过程中, 采用 Vic-3D DIC 设备获取试样表面位移场和应变场。试验前需对 TC4 试件进行散斑制作, 首先以哑光白漆为底色覆盖试件表面,

再用哑光黑漆喷洒黑色散斑颗粒, 散斑颗粒要求大小分布均匀, 以获得较高的对比度信息, 散斑试样如图 3(b) 所示。研究发现散斑、感兴趣区域及子区大小均会影响测量结果的精度^[19-20]。Fazzini 等人^[19]的研究结果表明散斑点过少及过度曝光会导致测量误差增加 2 到 10 倍, 本研究利用哑光喷漆防止相机采集图像时斑点曝光过度, 减小信噪误差。开始加载前, 采用 Vic-Snap 软件, pointgrey 相机 pentax75 $\times$ 镜头拍摄 15~30 组标定板图像来标定两台相机的内部参数及外部空间位置, 标定完成后装载试件拍摄一组试件图像作为原始参考图像后即可进行疲劳加载, 同时采集加载图片, 采集频率为 10 Hz。试验完成后利用 Vic-3D 软件分析试件的应变场, 在后处理分析过程中选取适当的感兴趣区域, 划分适当的子区及步长能提高计算结果的精确度, 子区步长大小参考 Mokhtarishirazabad 等人^[21]的经验。为了实现研究目的, 在距离缺口根部 $d=0.6$ mm 处取一点 A, 见图 3(b), 研究点 A 处的循环应变随循环周次的演变规律。其次, 在缺口前缘取路径 L, 如图 3(c) 所示, 研究循环应变随缺口根部距离的变化。

2 结果及讨论

2.1 结果

为定量分析缺口件在循环载荷下缺口局部的棘轮应变 (ε_r) 与应变幅值 (ε_a), 在缺口根部取路径 L, 测量路径上的 ε_r 及 ε_a , 分析缺口根部应变随远离缺口根部的演化规律。不同缺口半径时, 三种堆积方向钛合金缺口件的 ε_r 及 ε_a 随循环周次 N 的演化结果及部分应变云图如图 4、5 所示。棘轮应变 ε_r 及

应变幅值 ε_a 的计算公式如式(1)、(2)所示。

$$\varepsilon_a = \frac{\varepsilon_{y\max} - \varepsilon_{y\min}}{2} \quad (2)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_{y\max} + \varepsilon_{y\min}}{2} \quad (1)$$

其中 $\varepsilon_{y\max}$ 及 $\varepsilon_{y\min}$ 分别为某循环周次中加载方向最大应变及最小应变。

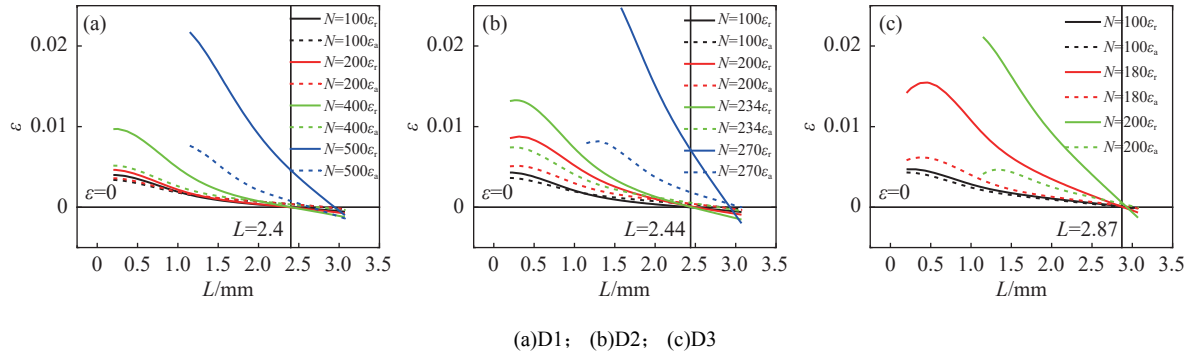


图4 缺口半径 $r=0.2$ mm, D1、D2、D3 堆积方向的棘轮应变 (ε_r) 及应变幅值 (ε_a) 随循环周次 (N) 变化曲线

Fig. 4 The curves of ratcheting strain (ε_r) and strain amplitude (ε_a) in D1, D2, and D3 stacking directions variation with cycle number (N) under notch radius $r=0.2$ mm

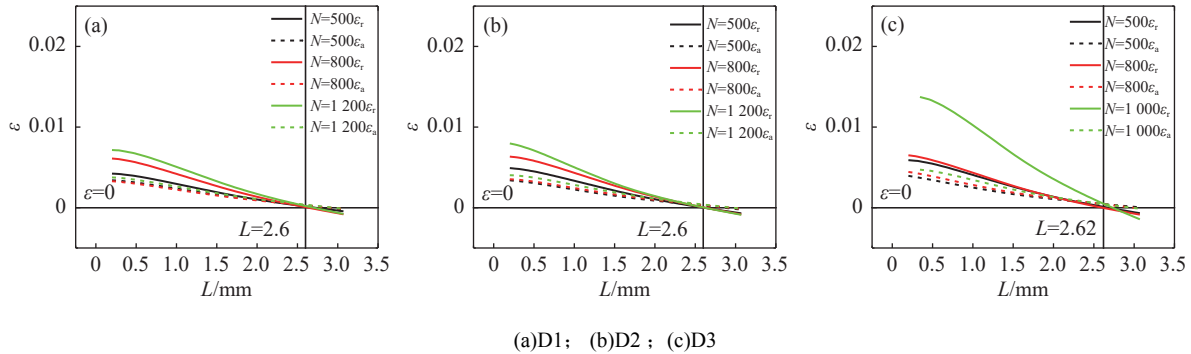


图5 缺口半径 $r=1.2$ mm, D1、D2、D3 堆积方向的棘轮应变 (ε_r) 及应变幅值 (ε_a) 随循环周次 (N) 变化曲线

Fig. 5 The curves of ratcheting strain (ε_r) and strain amplitude (ε_a) in D1, D2 and D3 stacking directions variation with cycle number (N) under notch radius $r=1.2$ mm

从图4可以看出缺口根部位置由于堆积方向的差异导致不同堆积方向的 ε_r 不同,这也导致最终的疲劳失效循环周次不同。从不同堆积方向 ε_r 随循环周次的演变规律也可以发现,路径 L 上应变率随堆积方向变化呈增长趋势。不难推测,该趋势会直接导致材料的最终寿命产生差异。另外,不同堆积方向的 ε_a 均随着 N 的增加而变大,表明试样发生了循环软化作用,不同堆积方向的循环软化效果无明显差异。其中图4中 D1 堆积方向 $N=500$ 、D2 堆积方向 $N=270$ 和 D3 堆积方向 $N=200$ 的应变曲线由于缺口根部裂纹扩展,导致 L 路径上存在裂纹的地方难以被搜索到像素信息,不能分析包含裂纹张开的大变形,因此 ε_r 和 ε_a 曲线只显示 L 路径后半部分。

从图5可以看出 1.2 mm 半径缺口在三种堆积方向下随循环周次的增加, ε_r 的增长较缓。随循环周次的演化规律与 0.2 mm 缺口半径试件相似。1.2 mm 缺口半径 ε_r 沿路径 L 的变化率较 0.2 mm 缺口半径小, ε_r 沿路径 L 变化近似线性减小。 ε_a 随

循环周次增加变大,缺口试样也发生了循环软化。不过相比之下,0.2 mm 缺口半径的软化更为严重。

图6、7对比了 $N=200$ 时,不同堆积方向和缺口半径对缺口件 ε_r 、 ε_a 值的影响。图6显示在同等的 L 下, D3、D2、D1 三种堆积方向缺口根部的 ε_r 、 ε_a 值依次减小。同时, ε_r 、 ε_a 沿路径 L 随远离缺口根部距离的增加而减小, D3 堆积方向的变化率最快, D2 次之, D1 最小。图7显示缺口半径小的 ε_r 、 ε_a 沿路径 L 的变化率较快。不难推断,小半径缺口由于应力集中程度更高,缺口附近的应变更大,又因为远离缺口根部的位置受缺口影响较小,因此缺口半径越小,沿路径 L 的应变变化率越大。总的来看,在同等的 L 下,缺口根部应变随堆积方向增加而增大,而堆积方向对路径 L 末端的应变影响较小,图8的应变云图可以定性表明此结论。云图显示不同堆积方向的缺口件缺口附近的应变差别较大,远离缺口的的位置差别较小。且 0.2 mm 的缺口根部附近应变明显大于 1.2 mm 的缺口。

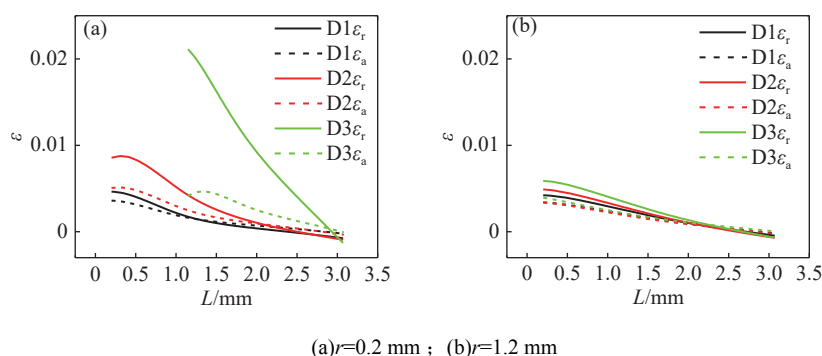


图6 $N=200$ 次时, 两种缺口半径不同堆积方向的棘轮应变 (ε_r) 和应变幅值 (ε_a)

Fig. 6 Ratcheting strain (ε_r) and strain amplitude (ε_a) of two different notch radii with different stacking directions at $N=200$ cycles

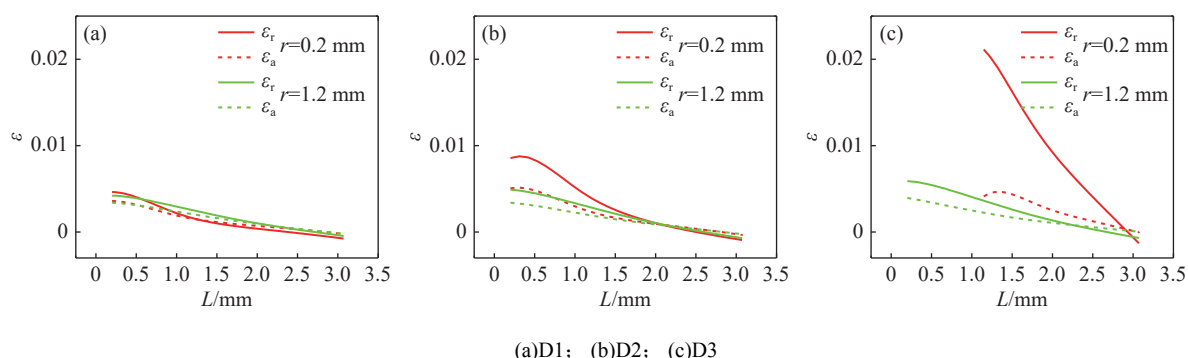


图7 $N=200$ 次时, 三种堆积方向不同缺口半径的棘轮应变 (ε_r) 和应变幅值 (ε_a)

Fig. 7 Ratcheting strain (ε_r) and strain amplitude (ε_a) of different notch radii in three stacking directions with $N=200$ cycles

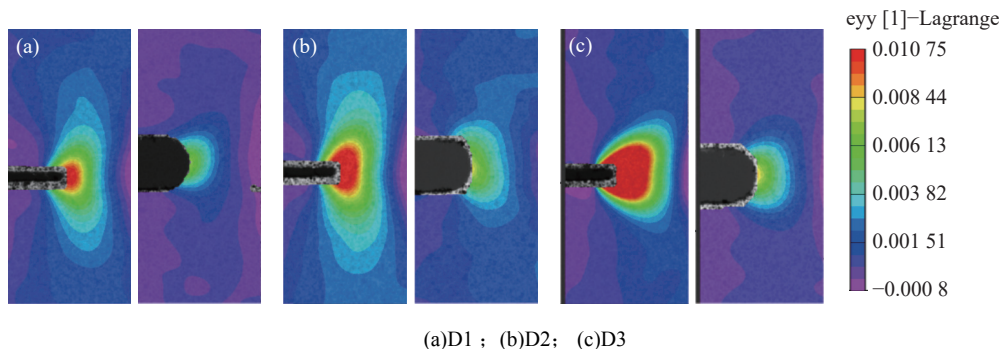


图8 $N=200$ 次时, 两种缺口半径 D1、D2、D3 堆积方向的应变云图

Fig. 8 Strain cloud maps of stacking direction for D1, D2, and D3 with $N=200$ cycles

沿路径 L 的应变结果表明棘轮应变与应变幅值随循环周次的增加, 其演变规律类似。接下来研究缺口根部某点应变随着循环周次的影响, 只对棘轮应变分析。而且棘轮变形会严重影响金属构件的寿命及安全, 棘轮应变及应变率决定了构件的疲劳寿命^[22]。图 9、10 研究了不同堆积方向及缺口半径的缺口试样 A 点的棘轮应变随循环周次变化结果。从图 9 可以看出, D3 堆积方向的棘轮应变增长最快, 应变率最大, 循环次数最少; D1 堆积方向的棘轮应变增长最慢, 应变率最小, 循环次数最多; D2 结果处于 D1、D3 之间。从图 10 中可以看出, 0.2 mm 半径

缺口随循环周次的棘轮应变增长快, 应变率较大, 循环次数较少; 1.2 mm 半径缺口随循环周次的棘轮应变增长慢, 应变率较小, 循环次数较多。

总的来看, 在同等 N 和堆积方向下, 缺口半径越大, 棘轮变形越小, 棘轮应变及应变率越小, 其疲劳寿命越长。在同等 N 和缺口半径下, D3 堆积方向的棘轮变形最明显, 棘轮应变及应变率最大, 疲劳寿命越短; D2 次之; D1 堆积方向棘轮变形最小, 棘轮应变及应变率最小, 疲劳寿命越长。由此可见, 缺口根部附近棘轮应变及应变率确实是影响缺口件疲劳寿命的重要因素。这与文献中的研究结论不谋而

合,也证明了 DIC 分析结果的可靠性。表 2 详细列出了不同缺口半径及堆积方向的疲劳寿命。从表中可以看到,堆积方向和缺口半径对疲劳寿命均有影响。D1 堆积方向的缺口寿命是 D3 堆积方向的 2

倍左右,而 1.2 mm 半径缺口件的疲劳寿命是 0.2 mm 的 3 倍以上,并且可推断随着缺口半径尺寸相差更大,疲劳寿命的差别会更大。因此相比于堆积方向,疲劳寿命对缺口的敏感性更大。

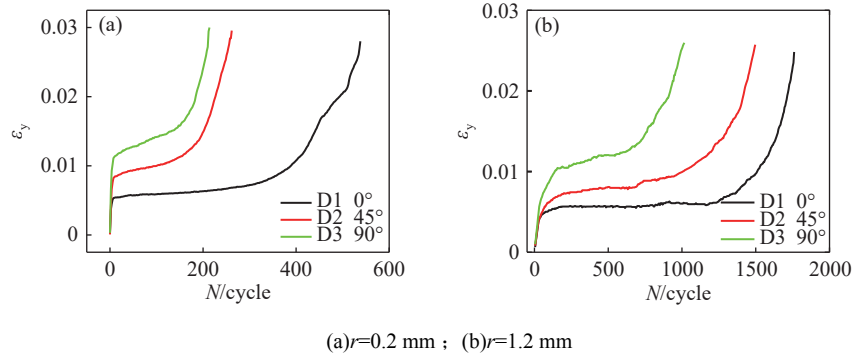


图 9 距离缺口根部 $d=0.6$ mm 处 (A 点) 不同堆积方向棘轮应变 (ϵ_y) 随循环周次 (N) 的变化
Fig. 9 Ratcheting strain (ϵ_y) in different stacking directions at a distance of $d=0.6$ mm from the root of the notch (point A) Changes with cycle number (N)

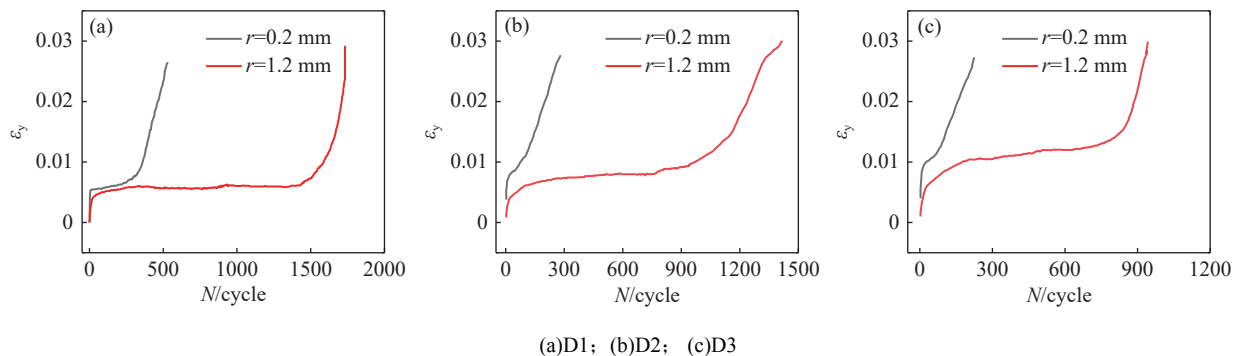


图 10 距离缺口根部 $d=0.6$ mm 处 (A 点) 不同缺口半径棘轮应变 (ϵ_y) 随循环周次 (N) 的变化
Fig. 10 Ratcheting strain (ϵ_y) at different notch radii at $d=0.6$ mm from the root of the notch (point A) changes with cycle number (N)

表 2 两种缺口半径不同堆积方向试样的疲劳寿命
Table 2 Fatigue life of two different notch radii with different stacking directions

缺口半径 r /mm	堆积方向/($^\circ$)	寿命 N /周次
0.2	D1 0°	538
	D2 45°	290
	D3 90°	215
1.2	D1 0°	1 790
	D2 45°	1 650
	D3 90°	1 040

2.2 讨论

本文结果是基于 DIC 分析得出的。但是 DIC 不能分析循环作用后期缺口根部产生宏观裂纹的区域,为研究缺口根部应变随整个循环周次的演变,选择距缺口 0.6 mm 的点(裂纹扩展到此处后,循环次数已经达到疲劳寿命的 99% 以上)。DIC 无法计算

沿缺口边缘阈值区域^[23],因此路径 L 从缺口根部 0.2 mm 开始。通过 DIC 获得的应变包含了弹塑性应变,但塑性应变占据主导地位,可以作为评价缺口件低周疲劳性能的参数。

从宏观方面看,堆积方向改变了材料疲劳性能。采用 DIC 分析技术从宏观方面分析缺口附近的表面应变是局部应变的平均状态,能够从宏观方面分析缺口根部附近局部的疲劳损伤演变规律。其中棘轮应变的演变表明了疲劳载荷下循环塑性变形的累积。研究表明,即使在相同的平均应力及应力幅值下,不同缺口以及堆积方向的材料棘轮应变也不一致,表明不同缺口应力集中程度不同,并且堆积方向会对材料的应力状态产生影响,进而影响应变及寿命。同理,应变幅值表明不同缺口、堆积方向的材料由于应力状态不同而导致循环软化也不一

致。这些结论证明了堆积方向导致材料整体的宏观疲劳性能不同,进而改变了缺口处宏观循环塑性变形,最终影响缺口件的疲劳性能。研究发现,3D 打印钛合金材料的内部微观结构决定了裂纹的萌生方式^[24],所以更为准确地了解 3D 打印钛合金缺口件疲劳损伤的演变规律,进而了解疲劳裂纹萌生和扩展的原因离不开微观方面的深入分析。宏观和微观方面的结合能够更深刻揭示 3D 打印钛合金缺口件的局部循环塑性行为。根据图 1 的金相组织,不难推测 β 晶、细长针状 α' 晶以及 α 晶的取向随着堆积方向的改变也会有所差异,不同堆积方向的材料的微观组织影响了缺口处的循环变形。此外,少量的缺陷的取向也会受到堆积方向的影响,从而也会对缺口处的循环变形产生影响。后续的研究将会着重考虑缺陷的大小和方向、柱状晶的取向和大小、 α 晶的形状和大小等微观因素,深入研究堆积方向对

SLM 钛合金缺口件局部循环塑性行为的影响。

3 结论

通过 DIC 方法研究了 SLM 钛合金缺口件局部循环塑性行为,对缺口附近局部应变场进行了详细地分析,深入了解了堆积方向对缺口件应变场演变的影响。主要结论总结如下:

1)堆积方向对缺口根部的棘轮应变及应变幅值影响较大,对远离缺口根部的位置影响较小。

2)缺口根部应变随着循环周次增加而变大。随着循环周次增加,缺口局部的变形逐渐增大,并沿 L 向远离缺口方向延伸。

3)缺口根部 A 点的棘轮应变及应变率随堆积方向改变而增加。相同缺口半径时,疲劳寿命随棘轮应变及其应变率的增加而降低。相比于堆积方向,缺口半径对疲劳寿命的影响更大。

参考文献

- [1] Zhang Saibo, Zhao Junsong, Li Xiaohai, *et al.* Application and development prospect of metal 3D printing technology[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2022(11): 207-210.
(张赛博, 赵俊淞, 李小海, 等. 金属 3D 打印技术的应用与发展前景 [J]. 装备制造技术, 2022(11): 207-210.)
- [2] 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.
(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.)
- [3] Zhao Yong, Lin Feng, Tian Yinjun. Research on 3D printing manufacturing of TC4 components for solid rocket engines[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(12): 276-284.
(赵勇, 林峰, 田银俊. 固体火箭发动机 TC4 构件的 3D 打印制造研究 [J]. 推进技术, 2022, 43(12): 276-284.)
- [4] Qi Zhao, Wang Bin, Zhang Peng, *et al.* Effect of stress ratio on the steady-state fatigue crack expansion rate of defective selected laser melted TC4 alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2023, 59(10): 1411-1418.
(戚钊, 王斌, 张鹏, 等. 应力比对含缺陷选区激光熔化 TC4 合金稳态疲劳裂纹扩展速率的影响 [J]. 金属学报, 2023, 59(10): 1411-1418.)
- [5] Zhan Z X. Fatigue life calculation for TC4-TC11 titanium alloy specimens fabricated by laser melting deposition[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2018, 96: 114-122.
- [6] Wang Yanrong, Li Hongxin, Yuan Shanhu, *et al.* Notched fatigue life prediction method considering stress gradient[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(6): 1208-1214.
(王延荣, 李宏新, 袁善虎, 等. 考虑应力梯度的缺口疲劳寿命预测方法 [J]. 航空动力学报, 2013, 28(6): 1208-1214.)
- [7] Liao D, Gao J W, Zhu S P, *et al.* Fatigue behaviour of EA4T notched specimens: experiments and predictions using the theory of critical distance[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 286: 109269.
- [8] Razavi S M J, Ferro P, Berto F. Fatigue assessment of Ti-6Al-4V circular notched specimens produced by selective laser melting[J]. Metals, 2017, 7(8): 291.
- [9] Bao Zhenqiang. Effect of notch geometry to the high cycle fatigue strength of TC4 and prediction[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
(包珍强. 缺口对 TC4 高循环疲劳强度的影响及预测方法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.)
- [10] Qian G, Li Y, Paolino D S, *et al.* Very-high-cycle fatigue behavior of Ti-6Al-4V manufactured by selective laser melting: Effect of build orientation[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 136: 105628.

- [11] Sun W, Huang W, Zhang W, *et al.* Effects of build direction on tensile and fatigue performance of selective laser melting Ti6Al4V titanium alloy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 130: 105260.
- [12] Rans C, Michielssen J, Walker M, *et al.* Beyond the orthogonal: On the influence of build orientation on fatigue crack growth in SLM Ti-6Al-4V[J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 116: 344-354.
- [13] Edwards P, Ramulu M. Effect of build direction on the fracture toughness and fatigue crack growth in selective laser melted Ti-6Al-4V[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2015, 38(10): 1228-1236.
- [14] Shuai J G, Zhao J Q, Lei L P. Simple crack tip and stress intensity factor determination method for model I crack using digital image correlation[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 122: 103621.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Dai Qiao, He Jueheng, Zhou Jinyu, *et al.* Characterization of cyclic strain field at the fatigue crack tip of industrial pure titanium based on DIC and Irwin models[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2021, 50(8): 2815-2822.
(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.)
- [18] 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.
- [19] Fazzini M, Mistou S, Dalverny O, *et al.* Study of image characteristics on digital image correlation error assessment[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(3): 335-339.
- [20] Sun Y F, Pang J H L. Study of optimal subset size in digital image correlation of speckle pattern images[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(9): 967-974.
- [21] Mokhtarishirazabad M, Lopez Crespo P, Moreno B, *et al.* Evaluation of crack-tip fields from DIC data: A parametric study[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 89: 11-19.
- [22] Kong W, Nian T, 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.
- [23] Yosibash Z, Mendelovich V, Gilad I, *et al.* Can the finite fracture mechanics coupled criterion be applied to V-notch tips of a quasi-brittle steel alloy[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, 269: 108513.
- [24] Zhang P, He A N, Liu F, *et al.* Evaluation of low cycle fatigue performance of selective laser melted titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. *Metals*, 2019, 9(10): 1041.