工艺参数对激光选区熔化成形钛合金裂纹尖端循环塑性行为的影响

刘 庆[1,2] 李 建[1] 孙 涛[1] 邓 晗[1] 陈思瀚[2] 张嘉迪[2] 唐明扬[3]
(1. 江苏大学 土木工程与力学学院, 镇江 212013)
(2. 江苏大学 能源与动力工程学院, 镇江 212013)
(3. 江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

摘要:【目的】为了研究增材制造钛合金的疲劳裂纹塑性行为并揭示不同因素对其的影响机制,探究工艺参数对激光选区熔化成形钛合金裂纹尖端循环塑性行为的影响。【方法】采用有限元方法分析裂纹尖端附近的应力-应变场和塑性区,对比研究打印速率和激光功率两种工艺参数下裂纹尖端局部应力、塑性应变、应变能的演化规律。【结果】结果表明,两种工艺参数对应力-应变场的影响主要集中于裂纹尖端附近,且不同位置处的塑性应变和局部应力比随循环次数增加的变化趋势略有不同。不同工艺参数对弹性应变能的影响较小,但对塑性应变能的影响显著。打印速率越高、激光功率越低时,塑性区尺寸与塑性应变能越大;体积能量密度增大则会导致塑性区尺寸和塑性应变能不断减小。试验验证了有限元分析结果的可靠性。研究结果为增材制造钛合金抗疲劳性能的优化提供了依据。

关键词: 钛合金; 激光选区熔化; 裂尖; 工艺参数; 激光功率; 打印速率
中图分类号: TH114; TG115.5 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.10.008

0 引言

激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术作为一种增材制造技术,因能够制备复杂的零件而广泛应用于成形钛合金,相比于传统工艺有着更加优异的强度,但塑性较差[1]。钛合金具备良好的比强度、抗腐蚀性,以及优异的断裂韧性和抗疲劳性能等,因此,在航空航天领域和生物医学领域得到大量使用[2]。其中,钛合金粉具有密度低、强度高、耐腐蚀、无磁等特点,是3D打印的关键原材料[3]。但增材制造钛合金的优势因其较差的疲劳性能而大打折扣[4]。在结构部件所有的机械故障中,疲劳失效占比达90%以上,且3D打印成形的钛合金构件疲劳性能明显弱于传统锻造件。材料在发生疲劳断裂前通常无明显的宏观塑性变形,极易造成灾难性后果,引起巨大的社会危害和经济损失[5]。在循环载荷作用下,金属材料的疲劳损伤表现为不可逆,且是一个逐步累积的动态平衡过程[6]。裂纹尖端的塑性变形会对裂纹扩展产生决定性的作用。因此,对增材制造钛合金的疲劳裂纹塑性行为进行研究具有重要意义。

裂尖塑性变形区域可以分成循环塑性区和单调塑性区2个区域,其中循环塑性区位于裂尖最内侧,只有该区域才存在循环塑性变形和应力-应变迟滞回线;循环塑性区外是单调塑性区,其只在单调加载过程中发生塑性变形[7]。不同应力状态下,塑性区的形状和大小不同。塑性变形区的形状和大小会对裂纹结构的断裂和疲劳行为产生显著影响,体现在影响材料抵抗裂纹扩展的能力,塑性屈服区越大,材料的韧性越大[8]。

激光功率P及打印速率v等工艺参数对加工制件具有重要的影响:激光功率影响加工质量与精度、加工效率、材料适应性及热影响区和残余应力等;打印速率对抗拉强度和断裂伸长率等力学性能有影响。贾莉等[9]采用遗传算法实现了扫描速率、激光功率、层厚3项工艺参数的组合优化,显著提高了激光选区熔化3D打印成形件的整体质量。王俊飞等[10]研究了激光功率、扫描速率等对激光选区熔化成形TC4钛合金薄壁件变形与残余应力的影响。冯恩昊等[11]探究了工艺参数对激光选区熔化成形TC4钛合金表面粗糙度、力学性能的影响。

体积能量密度E_v与激光功率P、铺层厚度t、扫描速度v、扫描间距h有关。体积能量密度E_v越大,能量输入越高[12],其表达式为

$$E_v = P/(vht) \tag{1}$$

在层厚和扫描间距不变的情况下,体积能量密度

收稿日期: 2024-11-25 修回日期: 2025-02-17
基金项目: 国家自然科学基金项目(52105149); 中国博士后基金面上项目(2020M681496); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX24-3924)
作者简介: 刘庆,女,2003年生,湖南怀化人,在读硕士研究生; 主要研究方向为金属材料3D打印、低碳设计; E-mail:2640235216@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: 刘庆,李建,孙涛,等. 工艺参数对激光选区熔化成形钛合金裂纹尖端循环塑性行为的影响[J]. 机械强度,2026,48(10):62-73.
Liu Qing, Li Jian, Sun Tao, et al. Effect of process parameters on cyclic plastic behavior at crack tip of selective laser melting forming titanium alloy[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(10): 62-73.

免费获取

与激光功率成正比，与打印速率成反比。Cepeda-Jiménez 等[13]通过电子背散射衍射（Electron Back Scattered Diffraction, EBSD）和 X 射线衍射（X-Ray Diffraction, XRD）分析体积能量密度 E_v 对激光粉末床融合（Laser Powder Bed Fusion, LPBF）处理的 TC4 钛合金显微组织、织构和维氏硬度的影响。研究表明，体积能量密度是表征具有随机织构和高密度的 TC4 钛合金的一个关键参数。Jang 等[14]通过改变 SLM 工艺条件之间的体积能量密度，分析了 TC4 钛合金经增材制造后的微观组织及准静态和动态力学性能，发现控制体积能量密度可获得比传统锻造 TC4 钛合金更好的动态疲劳性能。

然而，关于打印速率和激光功率这 2 个工艺参数对增材制造带裂纹结构的 TC4 钛合金工件在疲劳载荷下的裂尖局部循环塑性行为的研究较少。本文主要利用有限元方法分析裂纹尖端附近的应力-应变场和塑性区，探究激光功率和打印速率这 2 个工艺参数对激光选区熔化成形钛合金裂纹尖端局部循环塑性行为的影响。

1　有限元分析

本文所选用的材料是一种中等强度的 α-β 型两相 TC4 钛合金。其中，β 型两相 TC4 合金中含有 6% 的稳定元素 Al，含有 4% 的稳定元素 V，化学成分如表 1 所示。

表 1　3D 打印 TC4 钛合金的化学成分（质量分数）

Tab. 1　Chemical composition of the 3D printed TC4 titanium alloy (mass fraction)　%

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

原材料为粒径分布为 15~53 μm 球形粉末。除打印速率和激光功率外，成形时其他的主要工艺参数为：扫描间距 h=0. 12 mm，层厚 t=60 μm。打印结束后，在 800 ℃下保温 2 h，并随炉冷却热处理，以消除残余应力。选用的钛合金 CT 试件如图 1 所示，尺寸参数为 B=5 mm、W=25 mm、裂纹长度 a_0=13 mm，设计了 5 种不同激光功率和打印速率。3D 打印 CT 试样的工艺参数如表 2 所示。

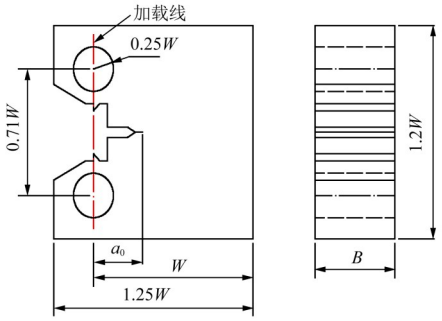


图 1　CT 试样模型

Fig. 1　Model of the CT specimen

表 2　3D 打印 CT 试样的工艺参数

Tab. 2　Process parameters of the 3D-printed CT specimens

序号	载荷比 R	最大载荷 F_{max}/N	激光功率 P/W	打印速率 v/(mm/s)	体积能量密度 E_v/(J/mm^3)
1	0.1	2 307	340	800	59
2	0.1	2 307	340	1 700	27
3	0.1	2 307	340	1 250	38
4	0.1	2 307	240	1 250	26
5	0.1	2 307	440	1 250	48

本文对 5 种具有不同工艺参数的材料进行力学性能测试，获取材料参数。将获取的材料参数输入到 Abaqus 软件中，建立带裂纹的 CT 试件模型，从而实现对 5 种具有不同工艺参数的 CT 试件的裂尖力学行为的分析。该过程使用 Chaboche 材料本构模型进行分析，Chaboche 模型是一种将随动强化与等向强化准则组合的有限元（Finite Element, FE）模型，适用于循环塑性行为的分析，能够较好地预测包辛格效应、棘轮和材料强化等现象[15]，其详细的力学本构模型见文献[16-17]。表 3 所示为材料通过单轴疲劳试验获得的 Chaboche 模型参数。表 3 中，σ_0 为图 2 中初始等效塑性应变下的等效屈服应力，C_k、γ_k 为随动强化参数。图 2 所示为材料等效应力-等效塑性应变曲线。由图 2 可知，随着循环塑性应变的不断累积，材料发生了明显的循环硬化现象。图 3 所示为采用连续的 4 节点平面应变单元（CPE4）划分的有限元网格。图 3 中，缺口附近网格被细化，以捕捉应力-应变梯度。采用增强的沙漏控制，以防止出现沙漏模式[18]。

表 3　Chaboche 模型参数

Tab. 3　Parameters of the Chaboche model

序号	σ_0/MPa	C_1/MPa	γ_1	C_2/MPa	γ_2
1	847.87	868 303	5 501	2 611	18
2	809.72	637 592	4 136	2 504	17
3	825.41	737 450	5 102	3 230	22
4	794.57	664 450	4 282	2 451	17
5	836.73	876 261	5 773	2 396	13

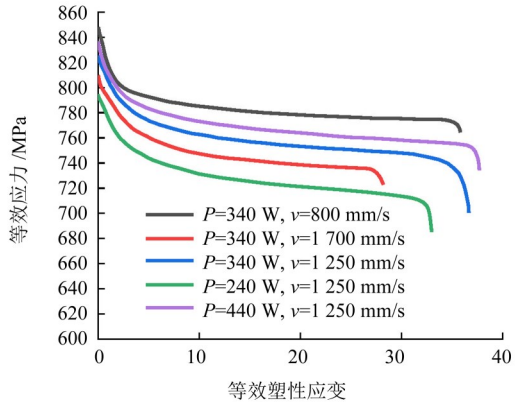


图 2　等效应力-等效塑性应变曲线

Fig. 2　Equivalent stress-equivalent plastic strain curves

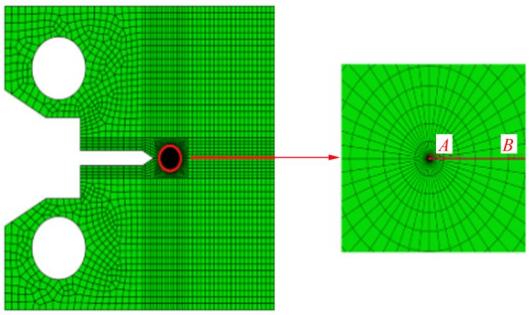


图3 有限元网格划分模型

Fig. 3 Finite element meshing model

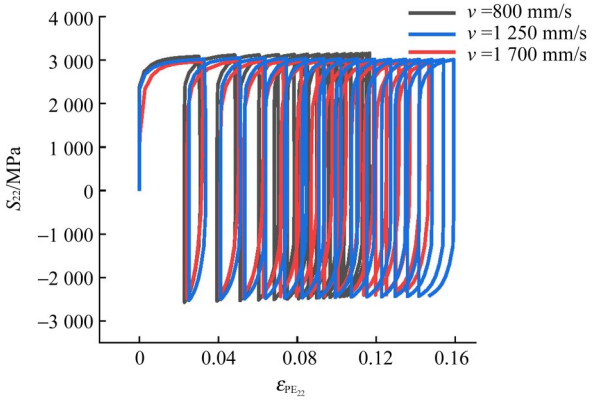
2 结果与讨论

2.1 裂尖附近局部应力-应变场

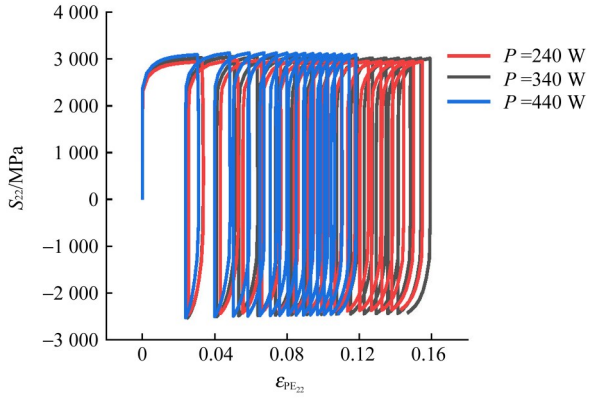
2.1.1 随循环周次的演变

为了分析裂尖附近的应力-应变场，在裂尖循环塑性区内取裂纹扩展方向延长线上的点A和点B，A、B点位于划分的网格节点处(图3)。测得A、B点分别距离裂纹尖端0.94、5.05 μm。利用应力-应变迟滞回线能很好地研究裂尖应力-应变场。准确获得裂尖附近局部应力-应变响应是开展材料塑性行为研究的前提[19]。图4、图5所示分别为A、B点处累积循环加载15次的应力-塑性应变迟滞回线。其中，S_{22}为沿加载方向的应力，$\varepsilon_{PE_{22}}$为沿加载方向的塑性应变。由图4、图5可知，应力沿着加载方向显示一定程度的收缩，说明在循环加载过程中会发生应变演化，并由于塑性应变不断积累而发生棘轮变形。但对比图4、图5发现，A、B两点处的结果随打印速率和激光功率变化的趋势并不完全相同。B点处塑性应变随着打印速率的增大或打印功率的减小而增大；而A点处打印速率最大的一组及打印功率最小的一组的塑性应变并不是最大的。A、B两点处相同的特征是在低打印速率和高激光功率(v = 800 mm·s^{-1}，P = 440 W)下累积的塑性应变总是最小的。总的来看，随着体积能量密度的增大，累积的塑性应变虽然不是完全单调递减，但基本上呈减小的趋势。

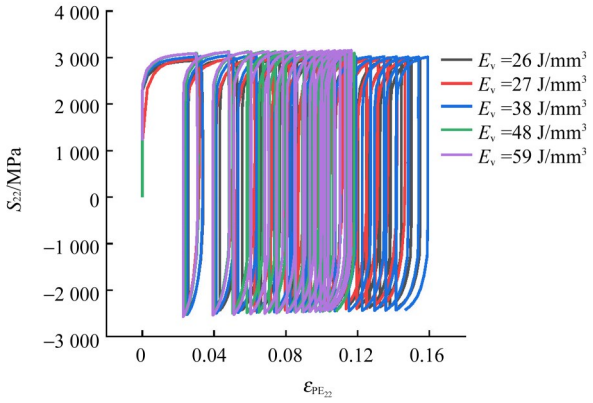
图6、图7所示分别为A、B点处不同工艺参数下沿加载方向的塑性应变-循环周次曲线。由图6、图7可知，随着循环次数的增加，在不同工艺参数下，A、B点处的塑性应变均得到不同程度的提升。



(a) P=340 W



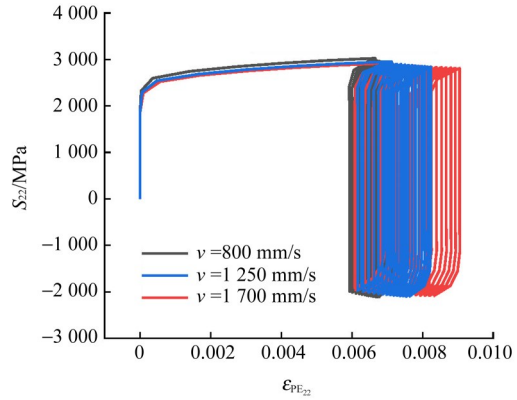
(b) v=1 250 mm/s



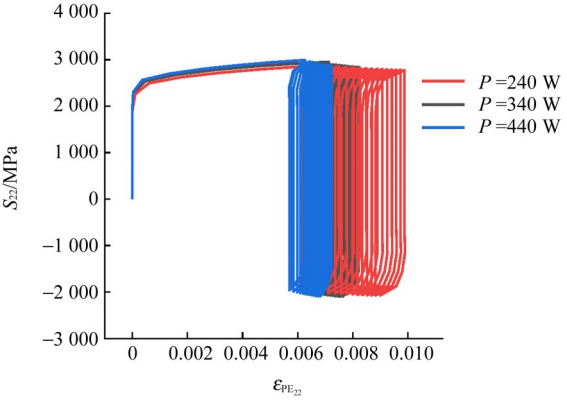
(c) 不同体积能量密度

图4 A点处不同工艺参数下沿加载方向的应力-塑性应变迟滞回线

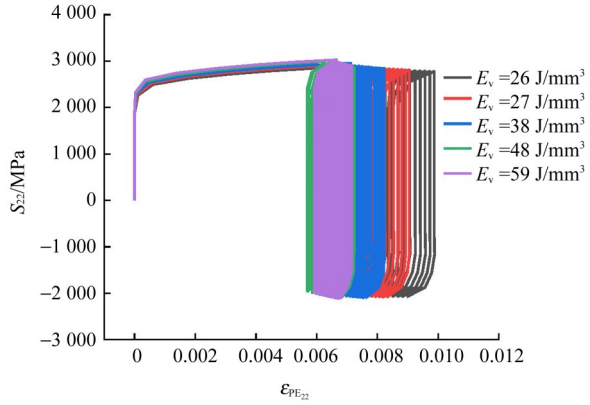
Fig. 4 Stress-plastic strain hysteresis loops in loading direction under different process parameters at point A



(a) P=340 W



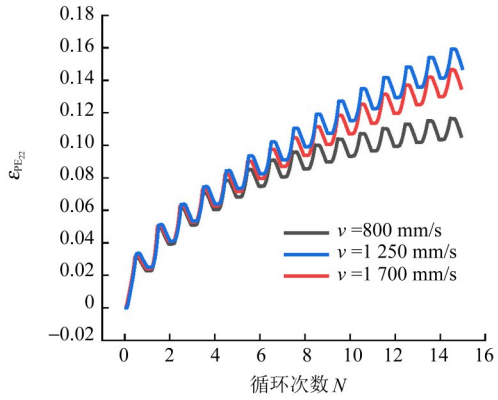
(b) v=1 250 mm/s



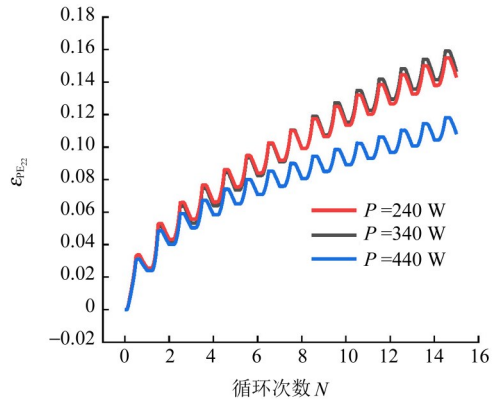
（c）不同体积能量密度

图 5　*B* 点处不同工艺参数下沿加载方向的应力-塑性应变迟滞回线

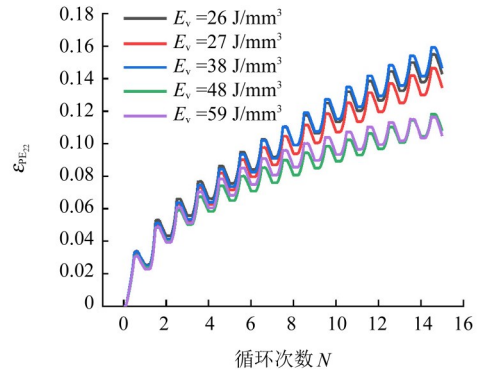
Fig. 5　Stress-plastic strain hysteresis loops in loading direction under different process parameters at point *B*



（a）*P*=340 W



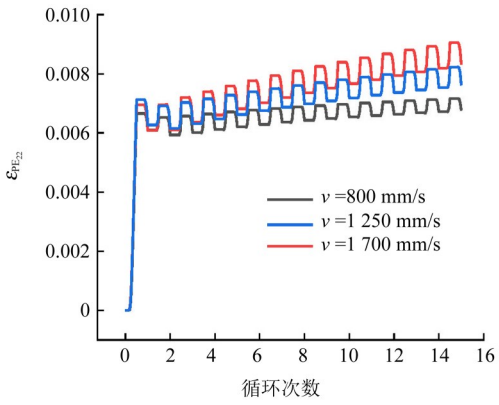
（b）v=1 250 mm·s^{-1}



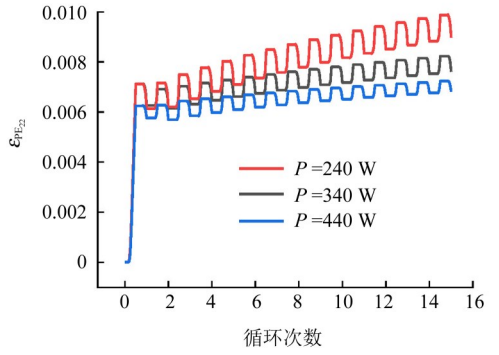
（c）不同体积能量密度

图 6　*A* 点处不同工艺参数下加载方向的塑性应变-循环周次曲线

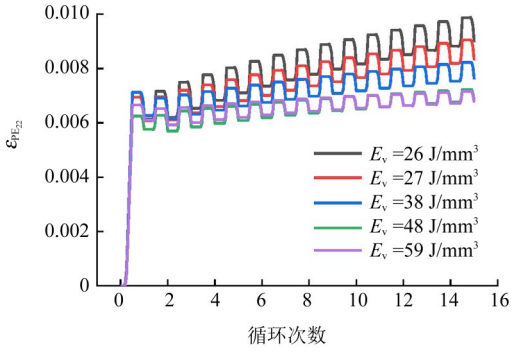
Fig. 6　Plastic strain-cycle curves in loading direction under different process parameters at point *A*



（a）*P*=340 W



（b）v=1 250 mm/s



（c）不同体积能量密度

图 7　*B* 点处不同工艺参数下加载方向的塑性应变-循环周次曲线

Fig. 7　Plastic strain-cycle curves in loading direction under different process parameters at point *B*

图 8、图 9 所示分别为 *A*、*B* 两点的应力幅随循环周次的变化结果；图 10、图 11 所示分别为 *A*、*B* 两点的局部应力比随循环周次的变化结果。局部应力比 R_L、应力幅 σ_a 的计算式分别为

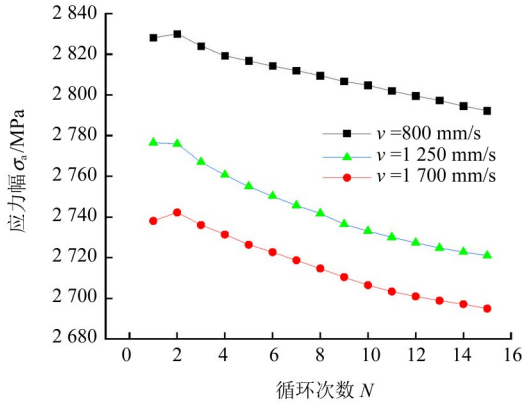
$$R_L = \frac{S_{22\,min}}{S_{22\,max}} \tag{2}$$

$$\sigma_a = \frac{S_{22\,max} - S_{22\,min}}{2} \tag{3}$$

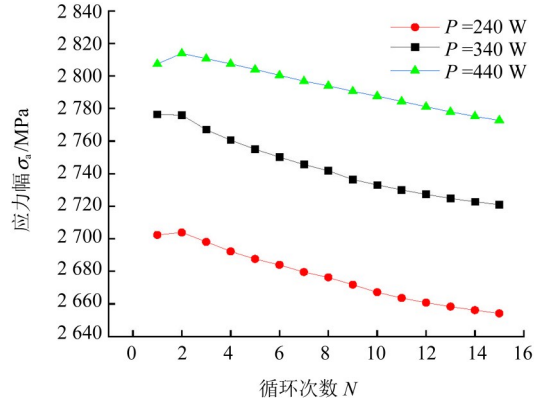
式中，$S_{22\,max}$、$S_{22\,min}$ 分别为某周次循环载荷中加载方向的最大、最小应力。

由图 8、图 9 可知，随着循环周次的增加，各工艺参数下的应力幅均先上升、再缓慢下降，有趋于稳定的倾向。且随着打印速率的增加、激光功率的减小及体积能量密度的降低，应力幅不断减小。由图 10、图 11

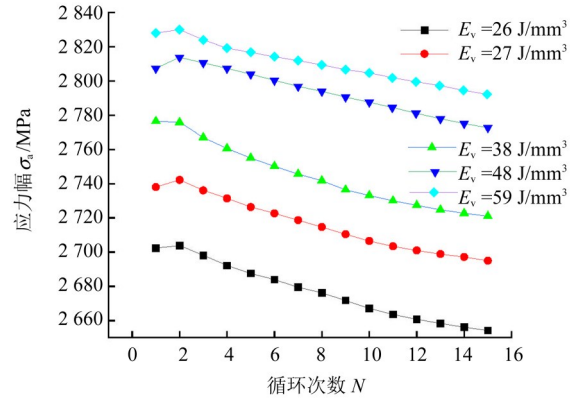
可知，局部应力比都是负数，这是因为在卸载过程中，裂尖周边线弹性区逐渐恢复，裂尖附近因受到挤压而被迫产生了相反方向的塑性变形，并产生一定程度的压应力。总体上看，随着体积能量密度的增大，应力比呈增大趋势。但A、B两点的局部应力比的变化情况相反，A点处局部应力比的绝对值在第1次循环时很大，随着循环的进行有逐渐减小的趋势，B处则相反，且A点处开始的局部应力比的绝对值远大于B处。局部应力比能反映平均的应力水平，这说明A处的平均应力水平大于B处，A点的混乱程度更大。相比之下，B点更能反映出整体的情况。



（a）P=340 W



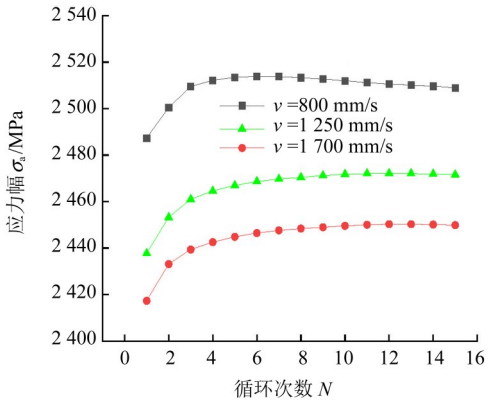
（b）v=1 250 mm/s



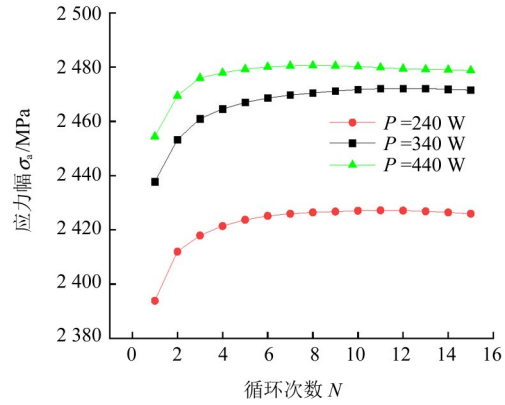
（c）不同体积能量密度

图8 A点处不同工艺参数下加载方向的应力幅-循环周次曲线

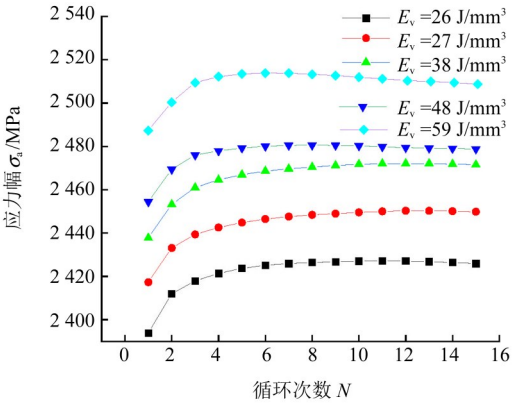
Fig. 8 Stress amplitude-cycle curves in loading direction under different process parameters at point A



（a）P=340 W



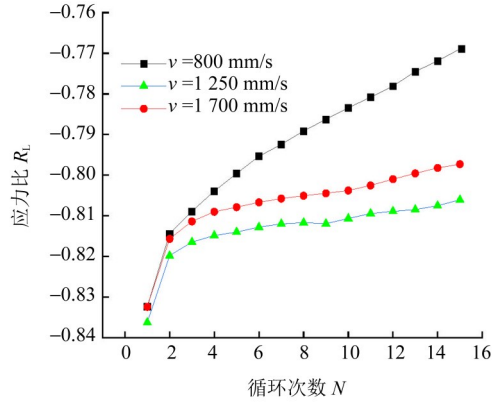
（b）v=1 250 mm/s



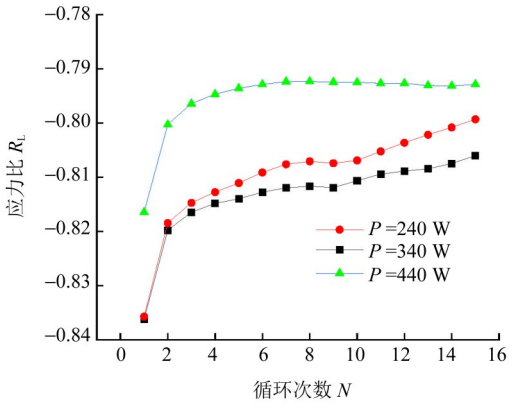
（c）不同体积能量密度

图9 B点处不同工艺参数下加载方向的应力幅-循环周次曲线

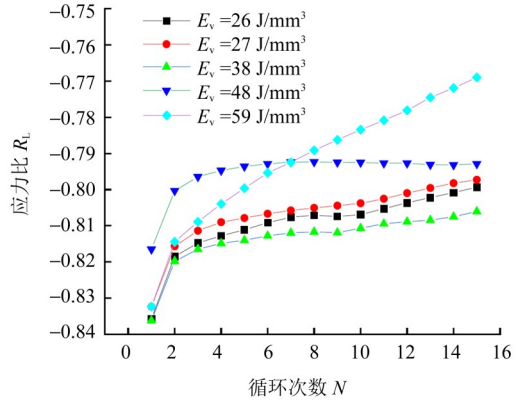
Fig. 9 Stress amplitude-cycle curves in loading direction under different process parameters at point B



（a）P=340 W



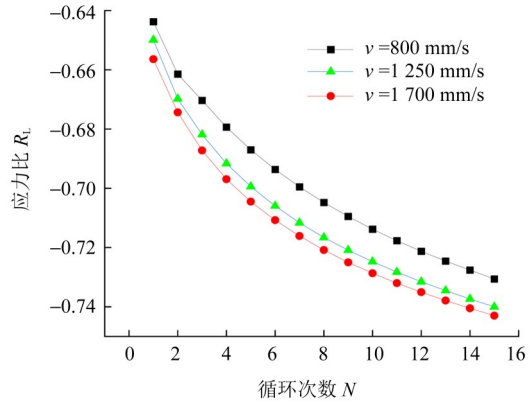
（b）v=1 250 mm/s



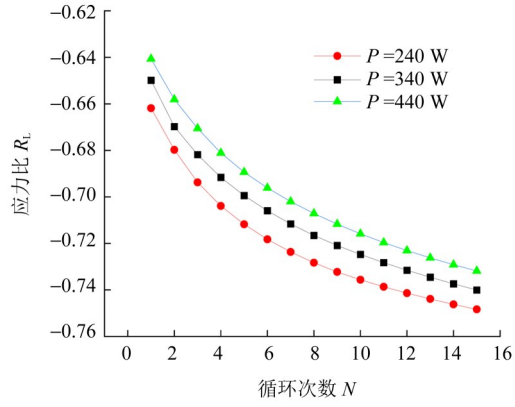
（c）不同体积能量密度

图 10　A 点处不同工艺参数下加载方向的局部应力比-循环周次曲线

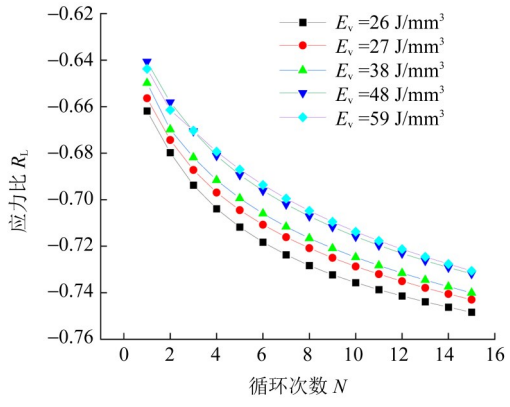
Fig. 10　Local stress ratio-cycle curves in loading direction under different process parameters at point A



（a）P=340 W



（b）v=1 250 mm/s



（c）不同体积能量密度

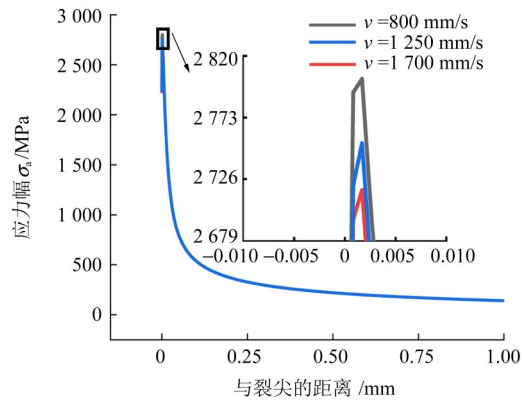
图 11　B 点处不同工艺参数下加载方向的局部应力比-循环周次曲线

Fig. 11　Local stress ratio-cycle curves in loading direction under different process parameters at point B

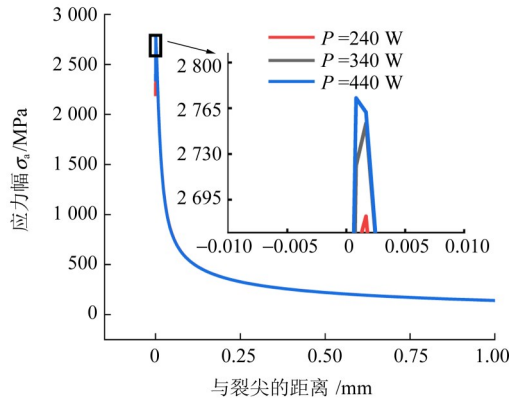
2.1.2　随与裂尖距离的演变

为定量分析CT试样在循环载荷下裂尖附近的应力比与应变幅值，在裂纹扩展方向延长线上取路径L，并放大路径上A、B点的具体情况进行对比，分析裂尖附近应力幅、应力比及循环应变随与裂尖距离的演化规律。

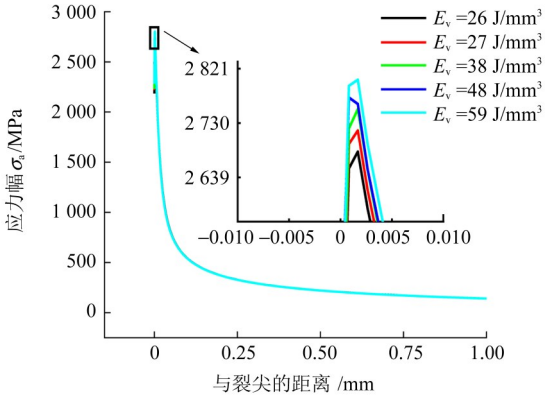
图 12 所示为应力幅在路径L上的变化情况。由图 12 可知，在裂尖周围应力幅很大，随着与裂尖距离的增大，应力幅总体表现出由大到小的趋势。这说明在裂纹尖端出现了应力集中现象，构件的疲劳失效通常发生在应力集中区域。低打印速率和高激光功率（v = 800 mm/s、P = 440 W）下的应力集中现象更为明显，应力幅更大；体积能量密度越大，应力幅越大。但随着与裂尖距离的增加，工艺参数对应力幅的影响减小。图 13 所示为循环应力比在路径L上的变化情况。由图 13 可知，在裂纹尖端，循环应力比与载荷比（R=0.1）的数值并不相同；随着与裂尖距离的增加，循环应力比总体呈现由负到正，先增加，出现拐点后减小，最终和载荷比相同并稳定的趋势。这说明在循环加载的谷值区域，裂纹尖端周围会产生一定的压应力。此外，不同打印速率、激光功率及体积能量密度对于路径上循环应力比的影响不大，差异几乎趋近于零。



（a）P=340 W



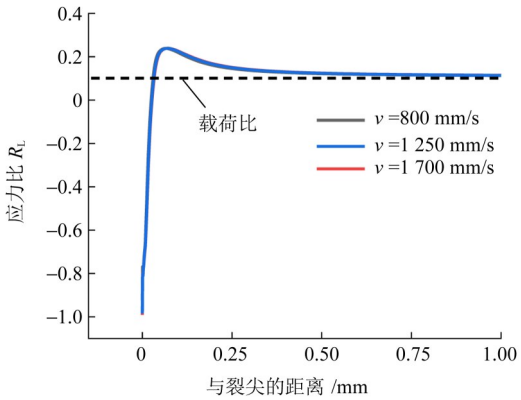
（b）v=1 250 mm/s



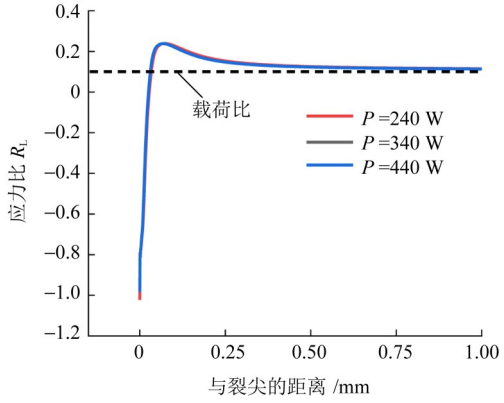
（c）不同体积能量密度

图 12 不同工艺参数下第 15 次循环应力幅-与裂纹尖端距离曲线

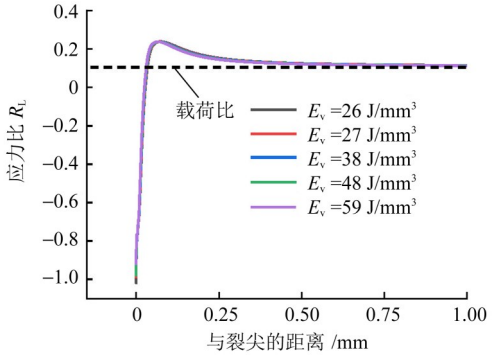
Fig. 12 Stress amplitude-distance from crack tip curves at the 15th cycle under different process parameters



（a）P=340 W



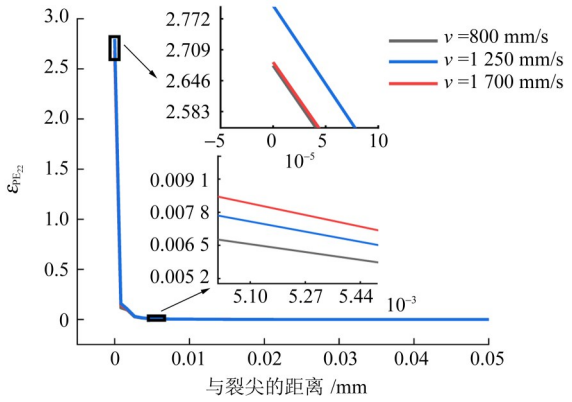
（b）v=1 250 mm/s



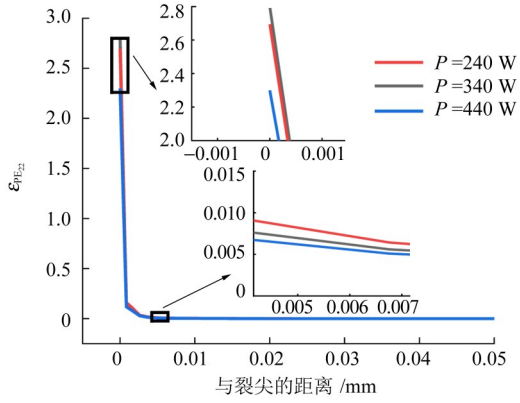
（c）不同体积能量密度

图 13 不同工艺参数下第 15 次循环应力比-与裂纹尖端距离曲线

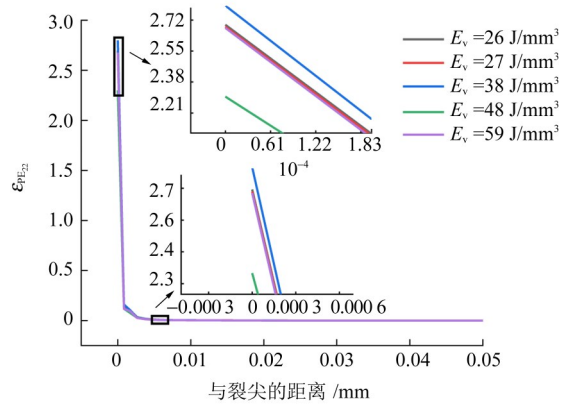
Fig. 13 Stress ratio-distance from crack tip curves at the 15th cycle under different process parameters



（a）P=340 W



（b）v=1 250 mm/s



（c）不同体积能量密度

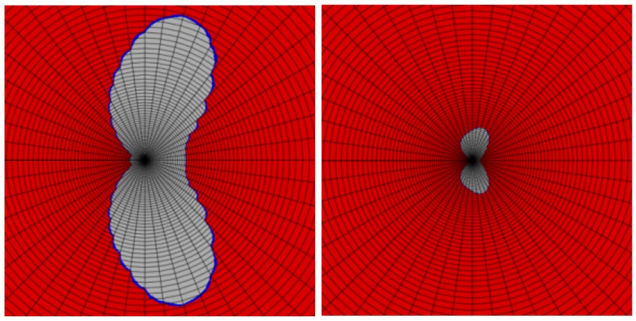
图 14 不同工艺参数下第 15 次循环峰值塑性应变-与裂纹尖端距离曲线

Fig. 14 Peak plastic strain-distance from crack tip curves at the 15th cycle under different process parameters

图 14 所示为在第 15 次循环峰值点裂尖塑性应变在路径 L 上的变化趋势。在裂尖附近，由于应力集中，塑性应变较大；塑性应变随着与裂尖距离的增加而减小，出现拐点后趋于零。随着与裂尖距离的增加，不同工艺参数下的塑性应变之间的差值减小，最终都变为零。

2.2　裂尖塑性区

裂尖塑性区的存在有助于减缓裂纹的进一步扩展，直接影响裂纹扩展的速率[20]。塑性区可以由裂尖等效塑性应变确定。其中，单调塑性区位于加载峰值处等效塑性应变大于 10^{-5} 的区域内[21]183-191；循环塑性区位于卸载过程中峰值与谷值处等效塑性应变的差值大于 10^{-5} 的区域内[22]2815-2822。图 15 为单调塑性区和循环塑性区示意图，其中，P = 340 W、v = 1 250 mm/s。由图 15 可知，塑性区呈蝴蝶形状。对于纯 I 型裂纹，塑性区的尺寸取水平方向塑性区的长度，由图 15(a)可知，单调塑性区尺寸远大于循环塑性区，这与文献[21]183-191的结论相同。其他工艺参数下的塑性区形状与此一样，尺寸略有差别。

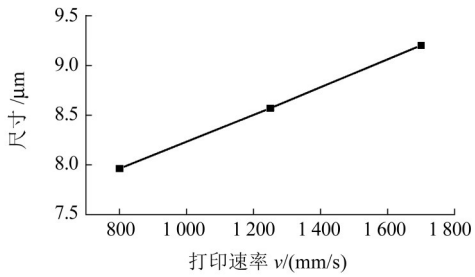


（a）单调塑性区　　（b）循环塑性区

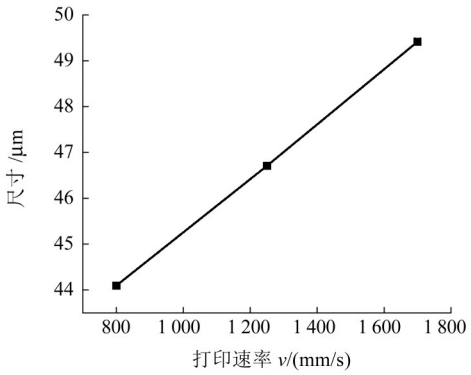
图 15　单调塑性区与循环塑性区形貌

Fig. 15　Morphologies of monotonic plastic region and cyclic plastic region

图 16~图 18 所示分别为塑性区尺寸随不同工艺参数的变化曲线。由图 16~图 18 可知，打印速率的增加导致塑性区尺寸的增加，而激光功率对其的影响则相反。体积能量密度对塑性区尺寸的影响受 2 种工艺参数的共同影响。随着体积能量密度的增大，塑性区的尺寸不断减小。



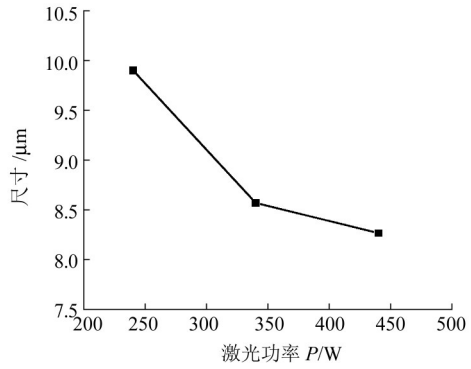
（a）循环塑性区



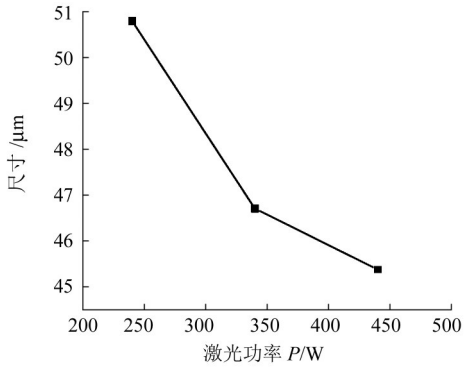
（b）单调塑性区

图 16　塑性区尺寸-打印速率曲线（P=340 W）

Fig. 16　Plastic region size-printing speed curves (P=340 W)



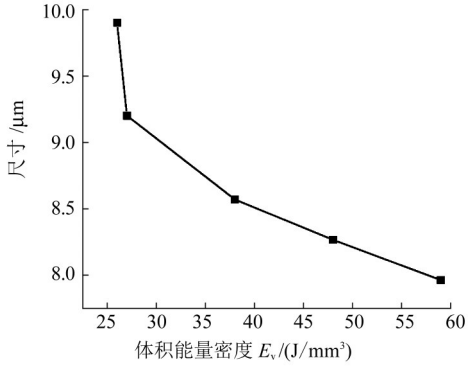
（a）循环塑性区



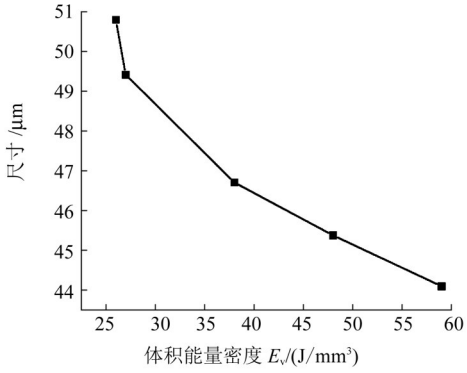
（b）单调塑性区

图 17　塑性区尺寸-激光功率曲线（v=1 250 mm/s）

Fig. 17　Plastic region size-laser power curves (v=1 250 mm/s)



（a）循环塑性区



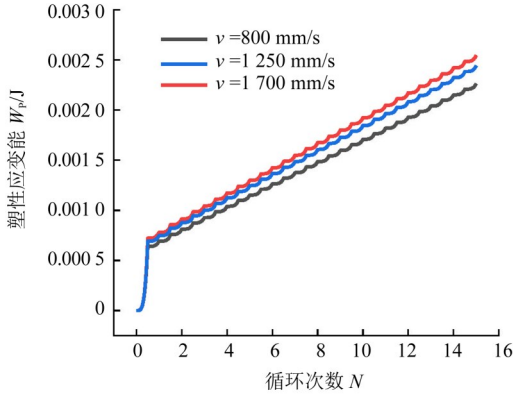
（b）单调塑性区

图 18 塑性区尺寸-体积能量密度曲线

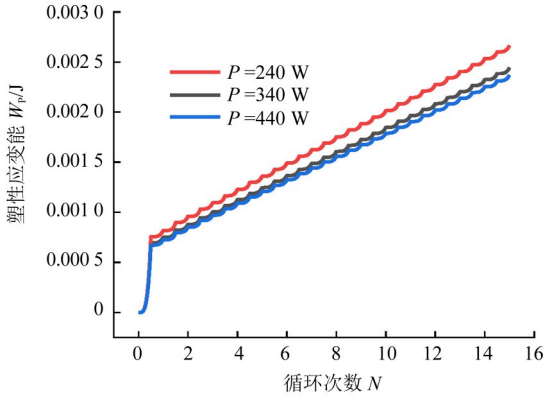
Fig. 18 Plastic region size-volume energy density curves

2.3 应变能

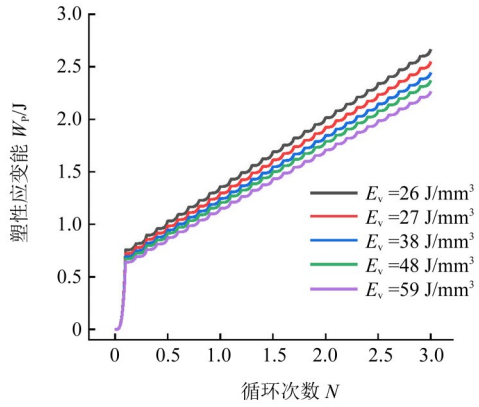
图 19、图 20 所示分别为对 CT 试样整体的塑性应变能、弹性应变能的分析结果。对比二者数值可知，在整个过程中，即使塑性应变能随着循环周次的增加不断增大，弹性应变能仍占主导。并且不同工艺参数对弹性应变能的影响很小，但对塑性应变能的影响较大。塑性应变能总体随着循环周次的增加而增加。在相同循环次数下，低打印速率（v = 800 mm/s）和高激光功率（P = 440 W）下的塑性应变能最小；高打印速率（v = 1 700 mm/s）和低激光功率（P = 240 W）下的最大。体积能量密度越大，塑性应变能越小，且随着循环次数的增加，影响更为显著。



（a）P=340 W



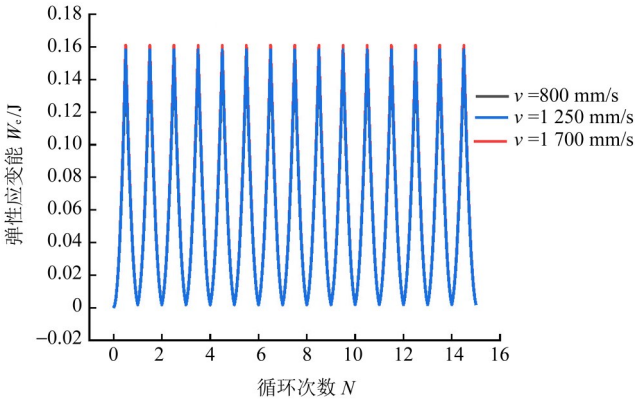
（b）v=1 250 mm/s



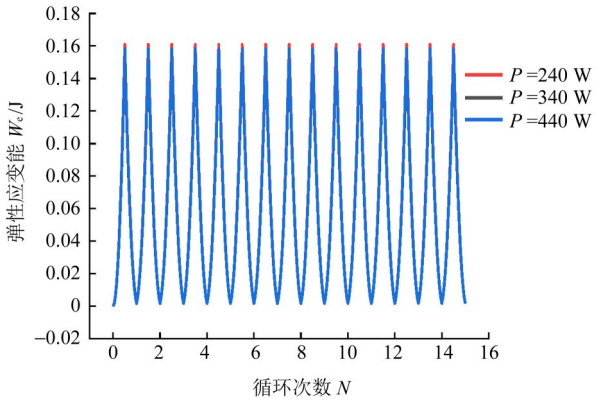
（c）不同体积能量密度

图 19 塑性应变能-循环周次曲线

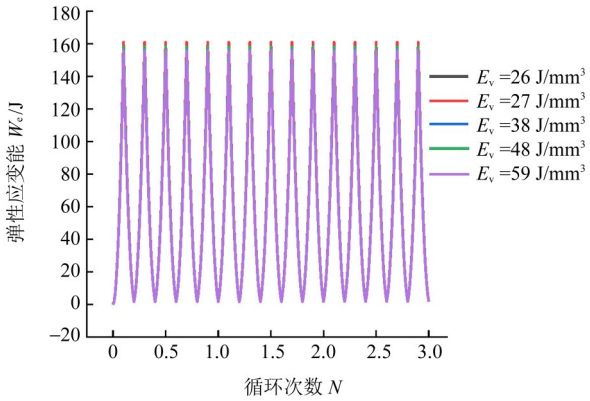
Fig. 19 Plastic strain energy-cycle curves



（a）P=340 W



（b）v=1 250 mm/s



（c）不同体积能量密度

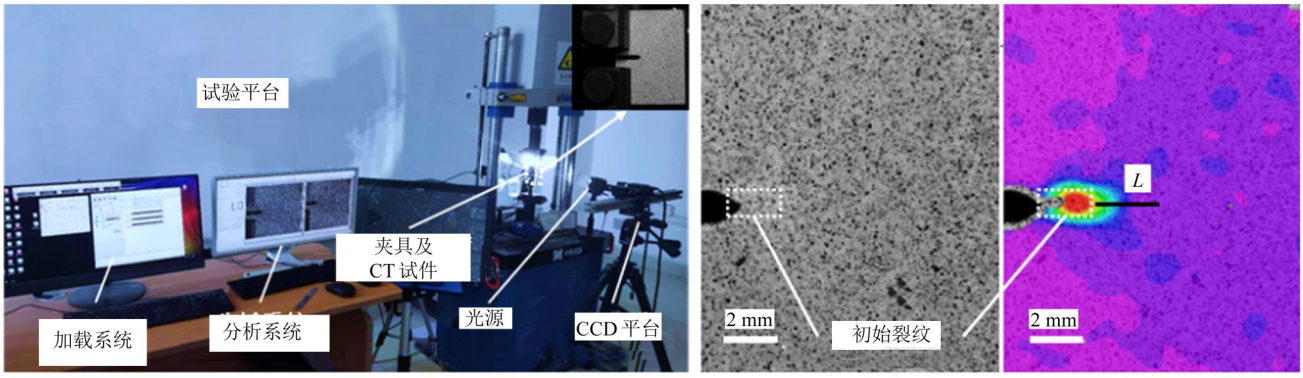
图 20 弹性应变能-循环周次曲线

Fig. 20 Elastic strain energy-cycle curves

3　试验研究

为了证明有限元分析结果的可靠性，本文借助试验手段分别测量试样表面局部变形、疲劳裂纹扩展寿命及裂纹扩展速率。首先，采用数字图像相关（Digital Image Correlation, DIC）技术测量疲劳加载过程中的局部变形，分析不同激光功率对其局部应变的影响。该技术利用试件表面的灰度信息获得应变和位移，由于具有非接触、实时等优点，广泛应用于疲劳试验中[22]2815-2822[23]。试验装置如图 21 所示。取裂纹延长线上的路径 L，由图 21(c)可知，路径 L 上裂尖根部区域出现明显的应力集中现象。打印材料用固定的扫描速率 v = 1 250 mm/s 下的 3 种不同激光功率 P = 440、340、240 W。

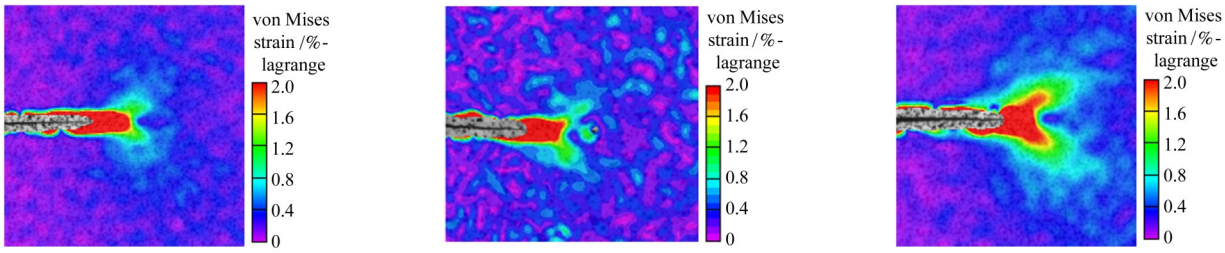
图 22 为加载峰值处的应变云图。由图 22 可知，3 种激光功率下的应变水平存在差异，P = 240 W 的裂尖变形程度最高。P = 440 W 的最低。由于 DIC 分析只能得到总的应变，须结合材料的拉伸应力-应变曲线才能得到塑性应变。材料在 3 种激光功率下的真实拉伸应力-应变曲线如图 23 所示，DIC 结果与有限元分析结果的对比如图 24 所示。由图 24 可知，3 种激光功率下塑性应变的 DIC 结果与有限元分析结果随与裂尖距离的变化趋势一致，然而裂尖附近 DIC 结果普遍高于有限元分析结果。其主要原因是 DIC 结果更偏向于平面应力状态，平面应力状态下的裂尖塑性区明显大于平面应变状态。由以上分析可知，试验结果验证了有限元分析结果的可靠性。



（a）试验装置　　（b）DIC 散斑图　　（c）应变云图及路径 L

图 21　试验装置及 DIC 测量图

Fig. 21　Test setup and DIC measurement images



（a）P=440 W　　（b）P=340 W　　（c）P=240 W

图 22　峰值载荷处的应变云图

Fig. 22　Strain contour plots at peak load

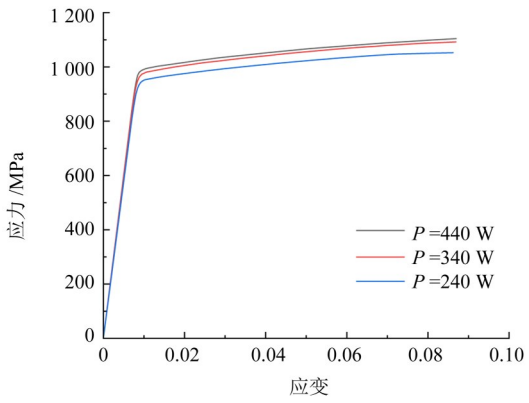
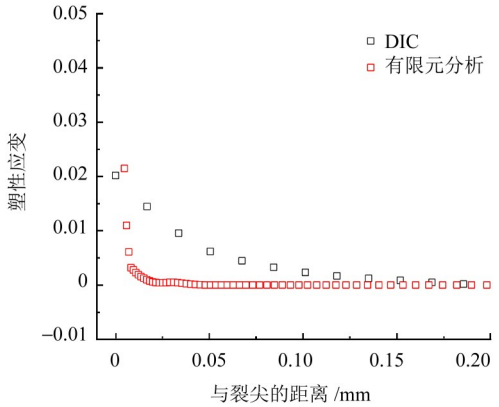
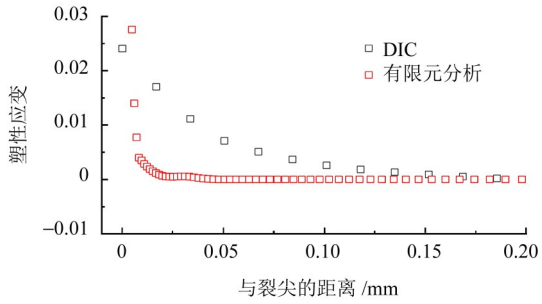


图 23　拉伸应力-应变曲线

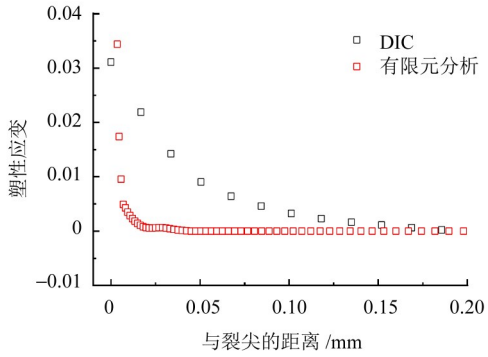
Fig. 23　Tensile stress-strain curves



（a）P=440 W



（b）P=340 W



（c）P=240 W

图 24 塑性应变 DIC 测试与有限元仿真结果对比

Fig. 24 Comparison between DIC test and finite element simulation results of plastic strain

4 结论

利用有限元方法，分析了打印速率、激光功率 2 个工艺参数及体积能量密度对激光选区熔化成形钛合金裂纹尖端循环塑性行为的影响，得出以下主要结论：

1）2 个工艺参数对应力-应变场的影响主要集中于裂尖附近。对于裂尖单个点来说，趋势略有不同。B 点处的变化比较规律，在该点处体积能量密度越小，塑性应变越大，应力幅和应力比越小。

2）打印速率的增加会导致塑性区尺寸的增加，而激光功率对其的影响则相反，体积能量密度对塑性区尺寸的影响受上述 2 个工艺参数的共同影响。随着体积能量密度的增大，塑性区的尺寸不断减小。

3）不同工艺参数对弹性应变能的影响很小，但对塑性应变能的影响较大。

参考文献（References）

[1] 姚碧波，彭钰洋，黎振华，等. 选区激光熔化成形 Ti-6Al-4V 钛合金的研究进展[J]. 材料热处理学报，2024，45(8)：27-40.
Yao Bibo，Peng Yuyang，Li Zhenhua，et al. Research progress on selective laser melting forming of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment，2024，45(8)：27-40.（In Chinese）

[2] 唐伟清，罗军明，陈宇海，等. TC4 钛合金表面激光冲击强化-微弧氧化涂层的组织和性能[J]. 材料热处理学报，2023，44(3)：144-151.
Tang Weiqing，Luo Junming，Chen Yuhai，et al. Microstructure and properties of laser shock strengthened micro arc oxidation coating on TC4 titanium alloy surface[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment，2023，44(3)：144-151.（In Chinese）

[3] 张思源，张鑫，王彦军，等. 3D 打印 SLM 工艺用球形钛合金粉制备工艺及性能研究[J]. 有色金属工程，2021，11(4)：8-12.
Zhang Siyuan，Zhang Xin，Wang Yanjun，et al. Study on technology and properties of spherical titanium alloy powder for 3D printing SLM process[J]. Nonferrous Metals Engineering，2021，11(4)：8-12.（In Chinese）

[4] Qu Z，Zhang Z J，Liu R，et al. High fatigue resistance in a titanium alloy via near-void-free 3D printing[J]. Nature，2024，626(8001)：999-1004.

[5] 李军. 弹塑性状态下复合型疲劳裂纹扩展研究[D]. 北京：北京理工大学，2014：1-71.
Li Jun. Study on mixed-mode fatigue crack propagation in elastic-plastic state[D]. Beijing：Beijing Institute of Technology，2014：1-71.（In Chinese）

[6] 刘宗晖，陈荣，米栋，等. 基于近场动力学的钛合金 TC4 材料疲劳裂纹扩展建模[J]. 机械强度，2024，46(6)：1465-1473.
Liu Zonghui，Chen Rong，Mi Dong，et al. Modeling of fatigue crack propagation in titanium alloy TC4 material based on the peridynamic theory[J]. Journal of Mechanical Strength，2024，46(6)：1465-1473.（In Chinese）

[7] Vormwald M. Effect of cyclic plastic strain on fatigue crack growth[J]. International Journal of Fatigue，2016，82：80-88.

[8] 文阳阳. 裂纹尖端塑性区对断裂行为的影响[D]. 上海：上海交通大学，2018：1-83.
Wen Yangyang. Effect of plastic zone at crack tip on fracture behavior[D]. Shanghai：Shanghai Jiao Tong University，2018：1-83.（In Chinese）

[9] 贾莉，吴龙. 影响激光选区熔化 3D 打印质量的工艺参数优化研究[J]. 激光杂志，2021，42(5)：166-170.
Jia Li，Wu Long. Study on optimisation of process parameters that affect thequality of 3D printing with laser melting selection[J]. Laser Journal，2021，42(5)：166-170.（In Chinese）

[10] 王俊飞，袁军堂，汪振华，等. 激光选区熔化成形 TC4 钛合金薄壁件变形与残余应力[J]. 激光技术，2019，43(3)：411-416.
Wang Junfei，Yuan Juntang，Wang Zhenhua，et al. Deformation and residual stress of TC4 titanium alloy thin-wall parts by selective laser melting[J]. Laser Technology，2019，43(3)：411-416.（In Chinese）

[11] 冯恩昊，王小齐，韩潇，等. 激光选区熔化 Ti_6Al_4V 合金的工艺参数优化[J]. 粉末冶金技术，2022，40(6)：555-563.
Feng Enhao，Wang Xiaoqi，Han Xiao，et al. Process parameters optimization of Ti_6Al_4V fabricated by selective laser melting[J]. Powder Metallurgy Technology，2022，40(6)：555-563.（In Chinese）

[12] 杜雷鸣. SLM 工艺参数及应力比对 Ti-6Al-4V 高周和超高周疲劳行为的影响[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2020：1-74.
Du Leiming. Effects of SLM process parameters and stress ratio on high cycle and ultra-high cycle fatigue behavior of Ti-6Al-4V[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2020：1-74.（In Chinese）

[13] Cepeda-Jiménez C M，Potenza F，Magalini E，et al. Effect of energy density on the microstructure and texture evolution of Ti-6Al-4V manufactured by laser powder bed fusion[J]. Materials

Characterization，2020，163：110238.

[14] Jang J H，Choi Y，Jung K H，et al. Effect of energy density on quasi-static and dynamic mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy additive-manufactured by selective laser melting[J]. Journal of Materials Science，2022，57(38)：18014-18024.

[15] 宋建，阎琨. 基于Chaboche模型的3D打印GH3536材料本构参数拟合研究[J]. 塑性工程学报，2023，30(10)：167-173.
Song Jian，Yan Kun. Study on constitutive parameter fitting of 3D printed GH3536 material based on Chaboche model[J]. Journal of Plasticity Engineering，2023，30(10)：167-173.（In Chinese）

[16] Li J，Su C Y，Lu L，et al. Investigation on fatigue crack growth behavior for commercial pure titanium at different crack tip plastic deformed levels[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics，2019，100：1-13.

[17] Li J，Zhang P，Lu L，et al. Effect of pre-strain on fatigue crack growth behavior for commercial pure titanium at ambient temperature[J]. International Journal of Fatigue，2018，117：27-38.

[18] 齐威. ABAQUS 6.14超级学习手册[M]. 北京：人民邮电出版社，2016：1-661.
Qi Wei. ABAQUS 6.14 super learning manual[M]. Beijing：Posts & Telecom Press，2016：1-661.（In Chinese）

[19] 瞿开城，罗会亮，阚前华，等. 考虑棘轮行为的U75V缺口圆棒局部应力-应变分析[J]. 固体力学学报，2024，45(3)：352-362.
Qu Kaicheng，Luo Huiliang，Kan Qianhua，et al. Numerical analysis on the local stress-strain response of U75V notched bar considering ratchetting[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics，2024，45(3)：352-362.（In Chinese）

[20] 滕项铭，冯森林. 裂纹尖端疲劳塑性区研究[J]. 力学季刊，2011，32(3)：418-426.
Teng Xiangming，Feng Miaolin. Research on cyclic plastic zone near crack tip[J]. Chinese Quarterly of Mechanics，2011，32(3)：418-426.（In Chinese）

[21] Paul S K. Numerical models of plastic zones and associated deformations for a stationary crack in a C(T) specimen loaded at different R-ratios[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics，2016，84：183-191.

[22] 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）

[23] Gómez Gonzales G L，Ortiz González J A，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.

Effect of process parameters on cyclic plastic behavior at crack tip of selective laser melting forming titanium alloy

LIU Qing[1,2]　**LI Jian**[1]　**SUN Tao**[1]　**DENG Han**[1]　**CHEN Sihan**[2]　**ZHANG Jiadi**[2]　**TANG Mingyang**[3]

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

(2. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

(3. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: [Objective] To study the fatigue crack plastic behavior of additively manufactured titanium alloys and reveal the influence mechanisms of different factors, the effect of process parameters on the cyclic plastic behavior at the crack tip of selective laser melting (SLM) formed titanium alloys is explored. [Methods] The stress-strain field and plastic zone near the crack tip were analyzed using the finite element method. The evolution laws of local stress, plastic strain, and strain energy at the crack tip under two process parameters, printing speed and laser power, were comparatively investigated. [Results] The results show that the influence of the two process parameters on the stress-strain field is primarily concentrated near the crack tip, and the evolution trends of plastic strain and local stress ratio with increasing cycle numbers vary slightly at different locations. Different process parameters exert minimal influence on the elastic strain energy but significantly affect the plastic strain energy. Higher printing speed and lower laser power result in larger plastic zone size and greater plastic strain energy. Additionally, an increase in energy density leads to a continuous decrease in both the plastic zone size and plastic strain energy. The reliability of the finite element analysis results is verified by tests, providing a basis for optimizing the fatigue resistance of additively manufactured titanium alloys.

Key words: Titanium alloy; Selective laser melting; Crack tip; Process parameter; Laser power; Printing speed

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

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

Received: 2024-11-25　　Revised: 2025-02-17　　（编辑：李立）