

# 飞秒激光能量密度对镍基合金重铸层和加工效率的影响

张 伟, 张晓兵, 蔡 敏, 纪 亮

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;  
2. 高能束流加工技术国防科技重点实验室, 北京 100024)

[摘要] 以航空发动机叶片制孔为导向, 结合飞秒激光对单晶镍基高温合金材料的非热熔性损伤阈值( $\Phi_{th1}$ )和热熔性损伤阈值( $\Phi_{th2}$ )特征, 研究了飞秒激光能量密度( $0 < \Phi < 44.2 \text{ J/cm}^2$ )对制孔重铸层和加工效率的影响规律。研究表明: 在  $\Phi_{th1} < \Phi < \Phi_{th2}$  时, 镍基合金经飞秒激光加工后加工侧壁没有出现明显的重铸物; 在  $\Phi > \Phi_{th2}$  时, 加工侧壁开始出现重铸物, 并随着能量密度的增加, 重铸层厚度增大。在试验结果的基础上, 建立了飞秒激光单脉冲加工深度与能量密度的定量关系。能量密度越高, 飞秒激光单脉冲加工深度越大, 加工效率越高。

关键词: 飞秒激光; 镍基合金; 激光能量密度; 重铸层; 加工效率

## Effect of Femtosecond Laser Fluence on Recast Layer and Machining Time in Nickel-Based Superalloy

ZHANG Wei, ZHANG Xiaobing, CAI Min, JI Liang

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;  
2. National Key Laboratory of Science and Technology on Power Beam Processes, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] The effect of femtosecond laser fluence ( $0 < \Phi < 44.2 \text{ J/cm}^2$ ) on recast layer and machining efficiency were investigated with the no-melting ablation threshold ( $\Phi_{th1}$ ) and melting ablation threshold ( $\Phi_{th2}$ ) in a single-crystal nickel-based superalloy. For the laser fluence range ( $\Phi_{th1} < \Phi < \Phi_{th2}$ ), there are no indications of conventional laser-induced recast layers in laser-machined area of nickel-base superalloy. For the laser fluence  $\Phi > \Phi_{th2}$ , recast layers appeared gradually and increased with increasing laser fluence. The relationship between ablation depth for single pulse and laser fluence is established. The larger ablation rate is associated with higher laser fluence.

Keywords: Femtosecond laser; Nickel-base superalloy; Laser fluence; Recast layer; Machining efficiency

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.18.062

小孔加工是激光加工应用中最早实用化的激光加工技术,也是激光加工的主要应用领域之一。现代航空发动机叶片上包含了大量直径在 0.3~1mm 之间的冷却小孔,加工这些冷却孔需要占用相当多的生产时间和成本。国外已经将激光加工技术引入到航空发动机涡轮叶片冷却孔的制造,并证明这是一种经济高效率的加工方法。但目前应用的毫秒激光、纳秒激光等长脉冲激光制孔方式由于存在强烈的热效应,将不可避免地在加工区域产生重铸层、微裂纹、热影响区等加工缺陷,这些缺陷将成为影响叶片服役寿命的重大隐患<sup>[1-5]</sup>。

20 世纪 90 年代,超短脉冲飞秒激光器得到商业化应用,为高质量的材料加工提供了新的有效工具<sup>[6-10]</sup>。

飞秒激光微加工技术作为一项高新材料加工技术,以其超高精度和超低附带损伤的特性迅速成为材料微加工领域的前沿性研究方向,具有广阔的应用前景<sup>[11-15]</sup>。21 世纪初,飞秒激光开始用于航空发动机涡轮叶片气膜孔的加工研究<sup>[15]</sup>。

目前,针对航空发动机高压涡轮叶片的镍基单晶高温合金材料的加工研究工作中发现:飞秒激光能量密度与其损伤材料机制密切相关。不同飞秒激光能量密度下镍基单晶高温合金呈现两种损伤机制(非热熔性损伤和热熔性损伤),单脉冲非热熔性损伤阈值( $\Phi_{th1}$ )和热熔性损伤阈值( $\Phi_{th2}$ )分别为  $0.23 \text{ J/cm}^2$  和  $1.21 \text{ J/cm}^2$ <sup>[16]</sup>。飞秒激光加工小孔没有出现危害性的加工缺陷,加工质

量明显优于传统长脉冲激光和电加工方式<sup>[17]</sup>,但到目前为止,对于加工质量重要的表征因素——重铸层,有关飞秒激光加工过程中其影响因素和形貌特征的研究还非常有限。目前,已有研究结果表明,飞秒激光热效应和加工效率与能量密度相关,而加工效率是飞秒激光微加工技术能够实现工业化应用的关键因素之一<sup>[18-19]</sup>。深入系统地开展飞秒激光加工过程中重铸层和加工效率的影响因素研究,并建立影响因素与重铸层和加工效率的关系,能够为飞秒激光用于航空发动机涡轮叶片气膜孔的制造提供工艺优化依据。

本文在飞秒激光对镍基单晶高温合金损伤机制和阈值行为研究结果的基础上,深入系统地研究了飞秒激光能量密度( $0 < \Phi < 44.2 \text{ J/cm}^2$ )对重铸层和加工效率的影响规律,并建立了飞秒激光单脉冲加工深度与能量密度的定量关系。

## 1 试验方法

试验采用航空发动机高压涡轮叶片材料——镍基单晶高温合金(原子百分含量 Ni 68.4%、Al 13.8%、Ta 2.7%、Re 1.6%、W 1.9 Co 7.3%、Cr 3.3%)。试样尺寸为直

径 10mm、厚度 0.5mm 的圆片,表面经过磨抛处理。飞秒激光加工系统如图 1 所示,包括飞秒激光器(脉冲宽度 120fs,波长 780nm,重复频率 1kHz)、光路传输和控制单元(多级波片、偏振分光棱镜、全反镜、数值孔径为 0.14 和 0.25 的聚焦物镜等)、三维移动平台(步进精度 125nm)。为了简化试验和分析过程,采用扫描划线加工方式分析能量密度对重铸层的影响,扫描速率均设置为  $360 \mu\text{m/s}$ ,加工区域每个点脉冲个数  $N$  为 500 个,加工后试样经超声清洗表面。为了表征孔壁重铸层,对加工试样进行切割,镶样机热镶后,对纵截面进行磨抛和侵蚀处理。采用扫描电镜(Scanning Electron Microspace, SEM)进行显微形貌和组织观测,采用原子力显微镜(Atomic Force Microspace, AFM)进行微纳米级加工深度测量。

## 2 试验结果

### 2.1 能量密度对重铸层的影响

图 2 为镍基合金经飞秒激光在  $N=500$  和不同能量密度加工后纵截面典型加工形貌。当能量密度为  $0.88 \text{ J/cm}^2$  时(约为镍基合金非热熔性损伤阈值  $\Phi_{th1}$  的 4 倍,

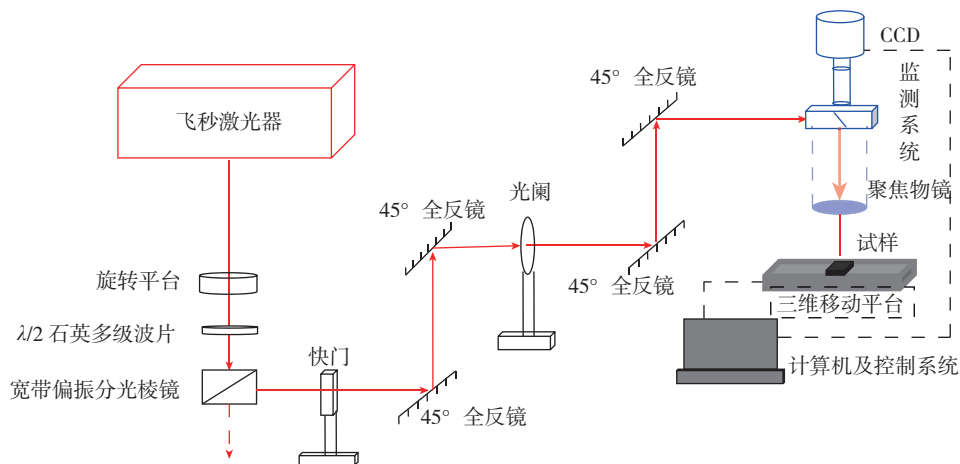


图1 飞秒激光加工系统示意图

Fig.1 Sketch of the experimental setup for laser micromachining

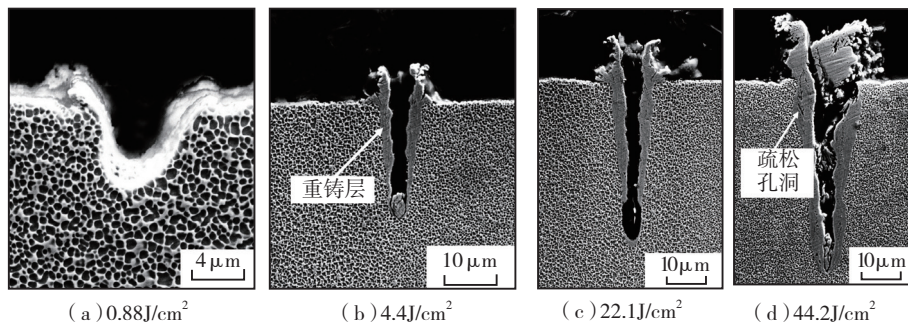


图2 镍基合金经飞秒激光在  $N=500$  和不同能量密度加工后纵截面典型加工形貌

Fig.2 SEM images of a trench machined by a femtosecond laser in nickel-based superalloy with  $N=500$  laser pulses at different laser fluence

小于热溶性损伤阈值  $\Phi_{th2}$ <sup>[6]</sup>),加工侧壁没有产生明显的熔化重铸物,加工区域附近仍然呈现与基体相似的  $\gamma$  和  $\gamma'$  两相组织,无热影响区,加工深度约为  $7.6\mu\text{m}$ ,见图 2 (a)。当能量密度为  $4.4\text{J}/\text{cm}^2$  时(约为镍基合金热溶性损伤阈值  $\Phi_{th2}$  的 3.6 倍<sup>[6]</sup>),加工侧壁出现明显的熔化重铸物,见图 2 (b)箭头所指处,重铸层厚度约为  $2.3\mu\text{m}$ 。重铸层附近基体  $\gamma$  和  $\gamma'$  没有明显的形貌变化,重铸层与基体之间不存在热影响区,加工深度约为  $23.3\mu\text{m}$ 。当能量密度分别为  $22.1\text{J}/\text{cm}^2$  和  $44.2\text{J}/\text{cm}^2$  时,侧壁重铸层中存在较多的疏松孔洞,如图 2 (c)~(d) 所示,重铸层厚度分别为  $3.6\sim 4.8\mu\text{m}$ ,重铸层附近基体  $\gamma$  和  $\gamma'$  依然没有明显的形貌变化,重铸层与基体之间不存在热影响区。

图 3 为镍基合金经飞秒激光在  $N=500$  加工后重铸层厚度与能量密度的关系。结果显示:在能量密度高于镍基合金非热溶性损伤阈值( $0.23\text{J}/\text{cm}^2$ ) 低于热溶性损伤阈值( $1.21\text{J}/\text{cm}^2$ )<sup>[16]</sup> 时,没有明显重铸层存在。当能量密度高于热溶性损伤阈值时,重铸层开始出现,并随着能量密度的增加而不断增加,能量从  $1.21\text{J}/\text{cm}^2$  增加到  $44.2\text{J}/\text{cm}^2$ ,重铸层厚度从  $0.2\mu\text{m}$  增加到  $4.8\mu\text{m}$ 。

### 2.2 能量密度对加工效率的影响

图 4 总结了镍基合金飞秒激光单脉冲加工深度与能量密度的关系。结果显示:以镍基合金非热溶性和热溶性损伤阈值为分界点,飞秒激光单脉冲加工深度与能量密度之间呈现两种不同的关系。第一种关系存在于非热溶性损伤阈值 ( $\Phi_{th1}$ ) 与热溶性损伤阈值 ( $\Phi_{th2}$ ) 之间,如图 4 箭头所指处所示,飞秒激光单脉冲加工深度在  $20\sim 50\text{nm}$  之间,加工深度与能量密度呈线性关系。随着能量密度的增加,单脉冲加工深度增加速率缓慢;第二种关系存在于热溶性损伤阈值 ( $\Phi_{th2}$ ) 以上,如图 4 箭头所指处所示,加工深度与能量密度仍呈线性关系,与第一种关系相比,随着能量密度的增加,单脉冲加工深度增加速率较快。

双温模型描述了飞秒激光与材料交互作用时处于非平衡态的电子和晶格的温度变化过程,并指出飞秒激光加工深度  $S$  与能量密度  $\Phi$  之间存在如下的关系式<sup>[20]</sup>:

$$S=(1/\alpha)\ln(\Phi/\Phi_{th}), \quad (1)$$

式中,  $1/\alpha$  为激光穿透深度,  $\Phi_{th}$  为损伤阈值。根据式(1)和图 4 的试验结果分别对加工深度和能量密度的两种关系线性拟合,结果得出:在第一种关系下,  $1/\alpha$  和  $\Phi_{th}$  分别为  $14\text{nm}$  和  $0.2\text{J}/\text{cm}^2$ ;在第二种关系下,  $1/\alpha$  和  $\Phi_{th}$  分别为  $144\text{nm}$  和  $1.2\text{J}/\text{cm}^2$ 。两种关系下  $\Phi_{th}$  的两个数值分别与单脉冲非热溶性损伤阈值 ( $0.23\text{J}/\text{cm}^2$ ) 和热溶性损伤阈值 ( $1.21\text{J}/\text{cm}^2$ ) 基本一致,证明了试验结果的合理性。因此,非热溶性和热溶性损伤下,飞秒激光单脉冲

加工深度与能量密度的关系为:

$$S_1=14\ln(\Phi/200) \quad (\Phi_{th1}<\Phi<\Phi_{th2}) \quad (2)$$

$$S_2=144\ln(\Phi/1200) \quad (\Phi>\Phi_{th2}) \quad (3)$$

在以上飞秒激光单脉冲加工深度与能量密度关系的基础上,试验在热溶性损伤条件下对厚度为  $500\mu\text{m}$  的样品进行直径为  $500\mu\text{m}$  的微孔加工,进一步研究能

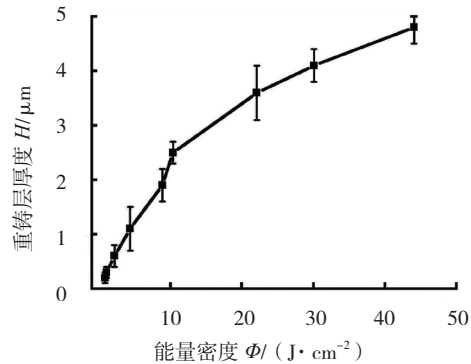


图3 镍基合金经飞秒激光在  $N=500$  加工后重铸层厚度与能量密度关系

Fig.3 Recast layer as a function of the laser fluence at the constant pulse number  $N=500$  in nickel-based superalloy

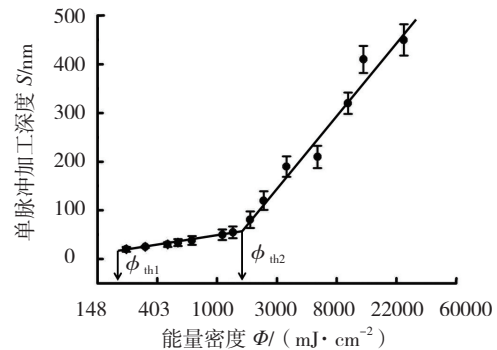


图4 镍基合金飞秒激光单脉冲加工深度与能量密度的关系

Fig.4 Ablation depth for single pulse as a function of the laser fluence in Ni-based superalloy

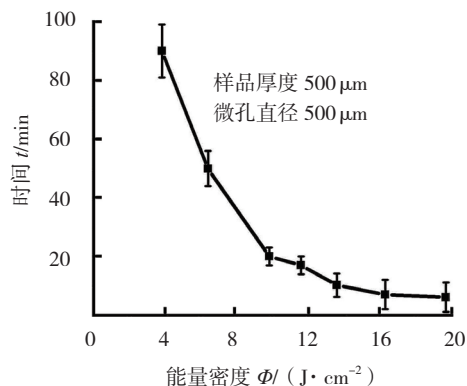


图5 镍基合金经飞秒激光加工单个微孔时间与能量密度的关系

Fig.5 Machining time for single hole as a function of the laser fluence in nickel-based superalloy

量密度对加工效率的影响。图 5 为镍基合金经飞秒激光加工单个微孔时间与能量密度的关系。结果显示:随着能量密度的增加,加工单个微孔所用的时间逐渐降低,能量密度从  $3.9\text{J}/\text{cm}^2$  增加到  $19.6\text{J}/\text{cm}^2$ , 单个微孔的穿透时间从 90min 下降到 6min, 这一规律与飞秒激光单脉冲加工深度与能量密度关系规律一致。

### 3 分析讨论

能量密度是影响飞秒激光加工的一个重要参数<sup>[16-19]</sup>。飞秒激光具有两种损伤方式,分别为非热熔性损伤和热熔性损伤,与能量密度密切相关。由固定的热熔性损伤阈值把两种损伤严格的分开。在飞秒激光热熔性损伤下,随着能量密度的增加,加工侧壁重铸层厚度增加(见图 2~3)。飞秒激光在较高的能量密度下将导致重铸层以及重铸层中疏松孔洞等加工缺陷的存在,从而导致加工质量的降低(见图 2)。

本文在试验结果的基础上得到了非热熔性和热熔性损伤下飞秒激光单脉冲加工深度与能量密度的定量关系式(2)~(3)。首先,在非热熔性损伤下( $\Phi_{th1} < \Phi < \Phi_{th2}$ ),飞秒激光单脉冲加工深度在 20~50nm 之间,并且随着能量密度的增加,单脉冲加工深度增加较缓慢,此时飞秒激光加工效率较低。在热熔性损伤下( $\Phi > \Phi_{th2}$ ),飞秒激光单脉冲加工深度在 50nm 以上,并且随着能量密度的增加,飞秒激光单脉冲加工深度增加较快,与非热熔性损伤下飞秒激光加工效率相比,热熔性损伤下加工效率高。能量密度对微孔加工时间的影响研究进一步证明了热熔性损伤机制下能量密度与加工效率的直接关系,即随着能量密度的增加,加工单个微孔所用的时间逐渐降低,能量密度从  $3.9\text{J}/\text{cm}^2$  增加到  $19.6\text{J}/\text{cm}^2$ , 穿透时间从 90min 下降到 6min。从微孔加工效率而言,本文认为提高能量密度是提高加工效率的有效方法。

### 4 结论

飞秒激光对镍基合金加工过程中,能量密度与重铸层厚度和加工效率密切相关:在  $\Phi_{th1} < \Phi < \Phi_{th2}$  时,镍基合金经飞秒激光加工后加工侧壁没有出现明显的重铸物;在  $\Phi > \Phi_{th2}$  时,加工侧壁开始出现重铸物。随着能量密度的增加,重铸层厚度增大。能量密度越高,飞秒激光单脉冲加工深度越大,加工效率越高。在试验结果的基础上,建立了飞秒激光单脉冲加工深度与能量密度的定量关系。

#### 参考文献

[1] YEO C Y, TAM S C, JANA S, et al. A technical review of the laser drilling of aerospace materials[J]. Journal of Materials Processing

Technology, 1994, 42(1): 15-49.

[2] MCDONALD J P, DAS D K, NEES J A, et al. Approaching non-destructive surface chemical analysis of CMSX-4 superalloy with double-pulsed laser induced breakdown spectroscopy[J]. Spectrochimica Acta Part B, 2008, 63(9): 561-565.

[3] DAS D K, MCDONALD J P, YALISOVE S M, et al. Femtosecond pulsed laser damage characteristics of 7%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> thermal barrier coating[J]. Applied Physics A, 2008, 91(3): 421-428.

[4] 张晓兵, 孙瑞峰. 二次法激光加工小孔技术[J]. 航空学报, 2014, 35(3): 894-900.

ZHANG Xiaobing, SUN Ruifeng. Sequential laser drilling technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(3): 894-900.

[5] 郭文渊, 王茂才, 张晓兵. 镍基超合金激光打孔再铸层及其控制研究进展[J]. 激光杂志, 2003, 24(4): 1-3.

GUO Wenyuan, WANG Maocai, ZHANG Xiaobing. Recast layer former by laser drilling in Ni-based alloys and progress on its control[J]. Laser Journal, 2003, 24(4): 1-3.

[6] CHICHKOV B N, MOMMA C, NOLTE S, et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. Applied Physics, 1996, 63(2): 109-115.

[7] LIU X, DU D, MOUROU G. Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses[J]. Quantum Electronics, 1997, 33(10): 1706-1716.

[8] MARUO H. Overview of laser materials processing in Japan[C]// Processing LAMP '92. Nagaoka, 1992.

[9] DAS D K, MCDONALD J P, YALISOVE S M, et al. Depth-profiling study of a thermal barrier coated superalloy using femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Spectrochimica Acta Part B, 2008, 63(1): 27-36.

[10] MCDONALD J P, MA S, POLLOCK T M, et al. Femtosecond pulsed laser ablation dynamics and ablation morphology of nickel based superalloy CMSX-4[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(4): 1-7.

[11] SUNDARAM S K, MAZUR E. Inducing and probing non-thermal transitions in semiconductors using femtosecond laser pulses[J]. Nature Materials, 2002, 1(4): 217-224.

[12] 李冬娟, 林灵, 吕百达, 等. 低重复频率飞秒激光在石英玻璃内写入的 II 类波导的偏振依赖导光性研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 239-244.

LI Dongjuan, LIN Ling, LÜ Baida, et al. Polarization-dependent optical guiding in low repetition frequency femtosecond laser photowritten type II fused silica waveguides[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 239-244.

[13] FENG Q, PICARD Y N, LIU H, et al. Femtosecond laser micromachining of a single-crystal superalloy[J]. Scripta Materialia, 2005, 53(5) 511-516.

[14] 戴晔, 邱建荣. 单光束飞秒激光诱导石英玻璃内部纳米光栅的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(12): 7-26.

DAI Ye, QIU Jianrong. Research progress of single beam femtosecond laser direct writing self-organized nanogratings in fused silica[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(12):7-26.

[15] FENG Q, PICARD Y N, MCDONALD J P, et al. Femtosecond laser machining of single-crystal superalloys through thermal barrier coatings[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 430(12): 203-207.

(下转第 78 页)