

飞秒激光对镍基合金的损伤机制和阈值行为

张 伟¹ 冯 强² 程光华³ 张晓兵¹

¹ 北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024

² 北京科技大学国家材料服役安全科学中心, 北京 100083

³ 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119

摘要 针对飞秒激光加工镍基单晶高温合金材料,在能量密度为 $0\sim 12.8\text{ J/cm}^2$ 和脉冲个数为 $0\sim 8000$ 范围内,对表面损伤和加工侧壁区域进行了显微形貌分析,研究了不同能量密度和脉冲个数情况下的损伤机制,不同损伤机制的损伤阈值和热效应。镍基单晶高温合金经飞秒激光加工后,呈现两种损伤机制,分别为非热熔性损伤和热熔性损伤,单脉冲损伤阈值分别为 0.23 J/cm^2 和 1.21 J/cm^2 ,孕育系数分别为 0.90 和 0.92。在此基础上,建立了损伤机制和损伤阈值与能量密度和脉冲个数的定量关系,实验结果对加工无微裂纹和无再铸层的高质量镍基航空器件的工艺选择有实际指导意义。

关键词 超快光学;飞秒激光;镍基单晶高温合金;损伤机制;损伤阈值

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1232001

Femtosecond Laser-Induced Ablation Regimes and Thresholds in a Nickel-Based Superalloy

Zhang Wei¹ Feng Qiang² Cheng Guanghua³ Zhang Xiaobing¹

¹ *Science and Technology on Power Beam Processes Laboratory, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China*

² *National Center for Materials Service Safety, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China*

³ *State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China*

Abstract Femtosecond laser-induced ablation regimes and ablation thresholds of single-crystal nickel-based superalloy are investigated by means of microstructure on machined surface and trench as a function of laser fluence of $0\sim 12.8\text{ J/cm}^2$ and the number of pulses of $0\sim 8000$. Two distinct ablation regimes (no-melting and melting ablation regime) are observed, dependent on the incident laser fluence. The ablation threshold fluences for these two ablation regimes are determined to be 0.23 J/cm^2 and 1.21 J/cm^2 in the superalloy. And the incubation factors for these two ablation regimes are determined to be 0.90 and 0.92. Furthermore, the relationship between both ablation regimes and ablation thresholds and their parametric dependence is established. The experimental results have practical guiding for processing nickel-based aviation of no recast layer and micro-cracks.

Key words ultrafast optics; femtosecond laser; single-crystal nickel-based superalloy; ablation regime; ablation threshold

OCIS codes 320.7090; 140.3390; 140.6810; 140.7090

1 引 言

飞秒激光具有超短脉冲宽度和超高峰值功率等特性,与长脉冲激光相比,在与材料相互作用过程中,激光吸收机理、能量转移和热扩散等机制发生了

很大改变^[1]。飞秒激光几乎能够对任何材料进行高精密切割,并且能够避免强烈热效应引起的各种加工缺陷^[2-6]。

21 世纪初,飞秒激光开始用于航空发动机涡轮

收稿日期: 2014-06-13; 收到修改稿日期: 2014-07-14

作者简介: 张 伟(1982—),男,博士,工程师,主要从事先进激光微纳加工方面的研究。E-mail: wzhang06@163.com

叶片气膜孔的加工研究。在加工镍基高温合金的研究工作中发现,飞秒激光加工微孔没有出现重铸层和微裂纹等危害性的加工缺陷,加工质量明显优于传统长脉冲激光和电加工方式^[3,7]。然而,对于广泛应用于航空发动机涡轮叶片的镍基单晶高温合金,飞秒激光对其进行加工时的损伤机制和去除机制尚不清晰。目前,研究工作者通过对飞秒激光诱导材料表面损伤形态和阈值行为的研究来深入探讨飞秒激光损伤机制^[3-4,8-11]。与传统长脉冲激光相比,飞秒激光具有确定的损伤阈值。此外,损伤阈值和损伤形态与激光能量密度和脉冲个数密切相关^[12]。然而,迄今为止,飞秒激光对镍基单晶高温合金的损伤形态和损伤阈值与能量密度和脉冲个数的关系研究还非常有限,在上述方面开展研究并建立损伤机制与能量密度和脉冲个数的定量关系,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理论依据,并且对于扩展飞秒激光在航空航天领域的其他应用具有重要的理论指导意义。

本文针对飞秒激光加工镍基单晶高温合金 CMSX-4 材料,在不同能量密度 $\Phi(0\sim 12.8\text{ J/cm}^2)$ 和脉冲个数 $N(0\sim 8000)$ 下,对表面损伤形态、侧壁加工形貌以及阈值行为进行了研究,在此基础上探讨了损伤机制和损伤阈值以及它们与能量密度和脉冲个数的定量关系。

2 实验方法

实验采用钛宝石飞秒激光器,激光中心波长为 780 nm,脉冲宽度为 120 fs,重复频率为 1 kHz。激光束呈高斯能量分布,经焦距为 120 mm 透镜聚焦后垂直入射到材料表面。实验过程中,通过偏振片和偏振分光棱镜调节激光束能量,通过快门来控制

作用到材料表面的激光脉冲个数。实验样品固定在三维移动平台上,三维移动平台步进精度为 125 nm。实验均在大气环境下进行。

实验材料为第二代镍基单晶高温合金 CMSX-4,实验样品表面采用传统金相抛光方式处理,最后利用 $0.05\ \mu\text{m}$ 氧化铝粉末抛光处理。实验样品经激光加工后,在无水乙醇中利用超声波清洗 5~10 min。激光加工侧壁显微形貌分析样品使用 1% HF+33% HNO₃+33% CH₃COOH+33% H₂O(体积分数)溶液侵蚀。采用 ZEISS SUPRA 55 型场发射扫描电镜(FE-SEM)的二次电子(SE)模式进行显微形貌和组织观察和成像。实验将通过不同激光参数(能量密度和脉冲个数)作用下表面和纵截面激光损伤区域的微观显微形貌来分析飞秒激光对 CMSX-4 的损伤机制,本文将选取典型损伤区域形貌分析说明。根据不同单脉冲能量和脉冲个数下损伤区域的直径,利用经典损伤阈值计算方法^[12]分析飞秒激光对 CMSX-4 的阈值行为。

3 实验结果

3.1 飞秒激光非热熔性损伤形态

图 1 为镍基合金 CMSX-4 经飞秒激光在 $\Phi=0.57\text{ J/cm}^2$ 、 $N=100$ 辐照后表面典型损伤形貌的扫描电镜图(SEM)。损伤区域呈圆形,与飞秒激光光斑形状一致。损伤区域内没有出现明显的熔化重铸产物,呈非热熔性损伤形貌,如图 1(a)所示。图 1(b)为图 1(a)的实线框放大图,该图显示损伤区域呈现周期性条纹结构形貌。激光诱导的表面周期结构现象与激光参数密切相关,形成机制尚存在一定争议^[11,13-17],这里不作为重点研究内容。

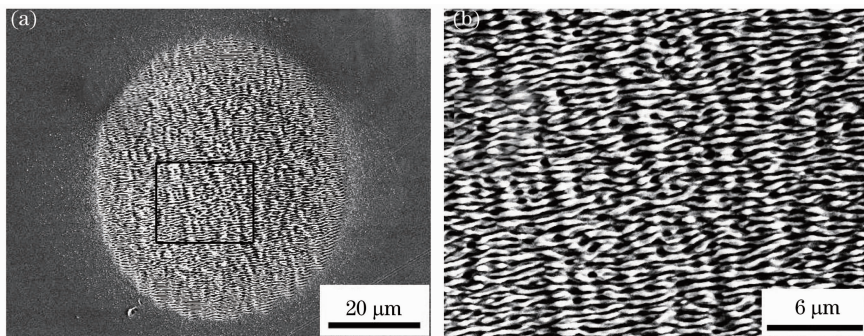


图 1 镍基合金 CMSX-4 经飞秒激光在 $\Phi=0.57\text{ J/cm}^2$ 、 $N=100$ 加工后的扫描电镜图。(a)表面典型损伤形貌;
(b)为(a)实线框放大图

Fig. 1 SEM images of surface of nickel-based superalloy CMSX-4 machined with the number of pulses of 100 at laser fluence of 0.57 J/cm^2 . (a) Typical surface microstructure of laser machining; (b) higher magnification image of framed area in (a)

图2为镍基合金 CMSX-4 经飞秒激光在 $\Phi = 0.57 \text{ J/cm}^2$ 、 $N=8000$ 加工后侧壁典型损伤形貌,图2(b)为图2(a)的实线框放大图。结果显示,镍基高温合金 CMSX-4 经飞秒激光加工后的侧壁边缘轮廓清晰,无明显的熔化重铸物[图2(a)]。图2(b)显示侧壁附近材料微观显微组织结构仍然呈现 γ 和 γ' 两相组织,与基体组织结构一致,无明显熔化重铸区域存在,呈现非热熔性损伤形貌特征。

3.2 飞秒激光诱导的熔化现象

图3为镍基合金 CMSX-4 经飞秒激光在 $\Phi = 12.8 \text{ J/cm}^2$, 两种脉冲个数条件下加工后的典型形貌。与较低能量密度下飞秒激光非热熔性损伤形貌(图1和图2)相比,在较高能量密度($\Phi = 12.8 \text{ J/cm}^2$)下,表面损伤分为边缘和中间两个区域,两个区域的形貌特征显著不同。边缘损伤区域呈现非热熔性损伤形貌特征,中间损伤区域出现明显的熔化重铸冠状物和溅落物,发生热熔性损伤,如图3(a)所示。图3(b)为典型的侧壁损伤形貌图,可

以看出,熔化重铸物残留在加工侧壁,形成重铸层,厚度为 $3\sim 5 \mu\text{m}$,如图3(b)箭头所示。

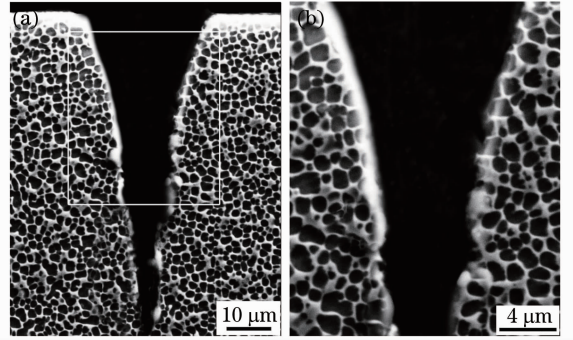


图2 镍基合金 CMSX-4 经飞秒激光在 $\Phi = 0.57 \text{ J/cm}^2$ 、 $N=8000$ 加工后的扫描电镜图。(a)侧壁典型形貌;(b)为(a)实线框放大图

Fig.2 SEM images of trench of nickel-based superalloy CMSX-4 machined with the number of pulses of 8000 at laser fluence of 0.57 J/cm^2 . (a) Typical microstructure of laser machining; (b) higher magnification image of framed area in (a)

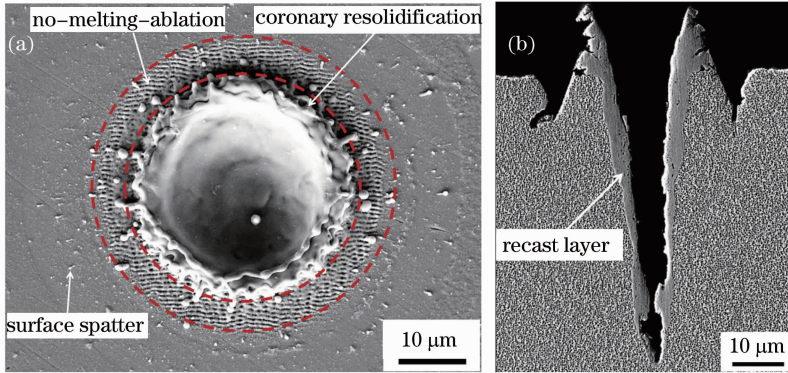


图3 镍基合金 CMSX-4 经飞秒激光在 $\Phi = 12.8 \text{ J/cm}^2$, 不同脉冲个数条件下加工后典型损伤形貌。(a) $N=10$, 表面典型损伤形貌;(b) $N=1000$, 侧壁典型损伤形貌

Fig.3 SEM images of typical microstructure of nickel-based superalloy CMSX-4 machined at laser fluence of 12.8 J/cm^2 . (a) Typical microstructure of laser machining surface with $N=10$; (b) typical microstructure of laser machining trench with $N=1000$

图4为镍基合金 CMSX-4 经飞秒激光在 $N=10$, 不同能量密度条件下加工后表面典型损伤形貌。当能量密度分别为 0.24 J/cm^2 和 0.96 J/cm^2 时,损伤区域均没有出现明显的熔化重铸物,损伤形貌呈现非热熔性损伤特征,如图4(a)和(b)所示。当能量密度分别增加到 1.4 J/cm^2 和 1.73 J/cm^2 时,熔化重铸产物在损伤的中间区域出现,并随着能量密度的增加而加剧。两种能量密度下熔化重铸区域依次呈现初始熔化重铸形貌[见图4(c)]和熔化重铸起皱形貌[见图4(d)]。需要指出的是,在一定脉冲个数下,只有当飞秒激光能量密度高于一定值时辐照区域才能产生损伤,飞秒激光对镍基合金加工表现出

一定的阈值现象。非热熔性和热熔性损伤区域面积均随着能量密度的增加而增大。

3.3 飞秒激光损伤直径和阈值行为

改变飞秒激光单脉冲能量和脉冲个数,测量不同单脉冲能量和脉冲个数下损伤区域的直径,分析损伤直径与单脉冲能量和脉冲个数的关系。根据高斯光束单脉冲能量与损伤直径之间的关系^[9,12],对损伤直径的平方值与单脉冲能量值作图,如图5所示。其中,图5(a)两组数据分别代表非热熔性和热熔性损伤区域直径与单脉冲能量之间的关系,图5(b)为图5(a)的虚线框放大图,表示热熔性损伤

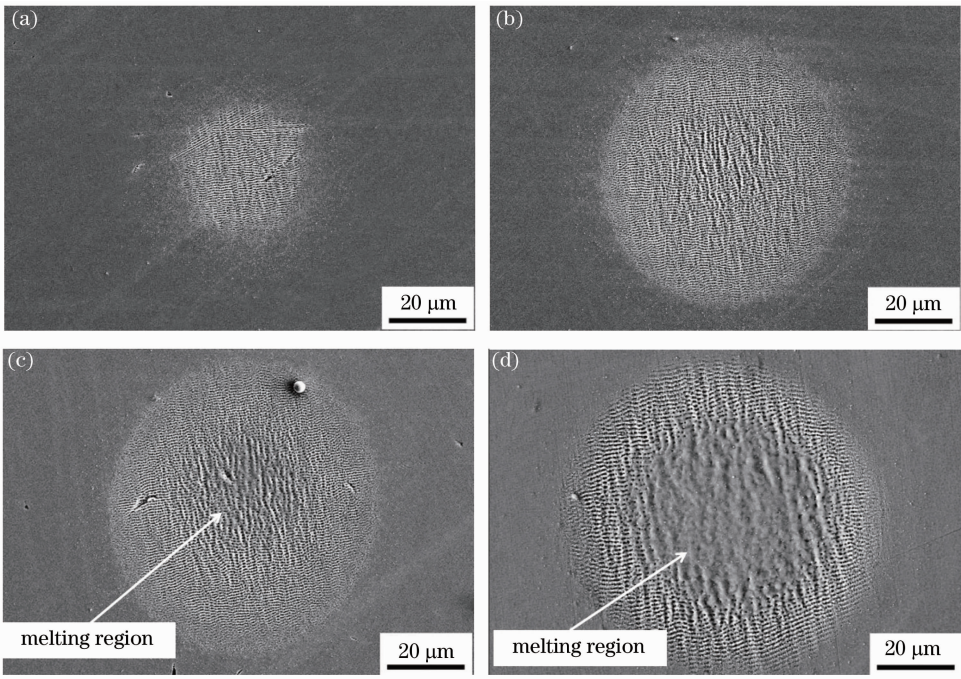


图 4 镍基合金 CMSX-4 经飞秒激光在 $N=10$, 不同能量密度条件下加工后表面典型形貌。(a) $\Phi=0.24 \text{ J/cm}^2$; (b) $\Phi=0.96 \text{ J/cm}^2$; (c) $\Phi=1.4 \text{ J/cm}^2$; (d) $\Phi=1.73 \text{ J/cm}^2$

Fig. 4 SEM images of typical microstructure of nickel-based superalloy CMSX-4 machined with the number of laser pulses of 10. (a) $\Phi=0.24 \text{ J/cm}^2$; (b) $\Phi=0.96 \text{ J/cm}^2$; (c) $\Phi=1.4 \text{ J/cm}^2$; (d) $\Phi=1.73 \text{ J/cm}^2$

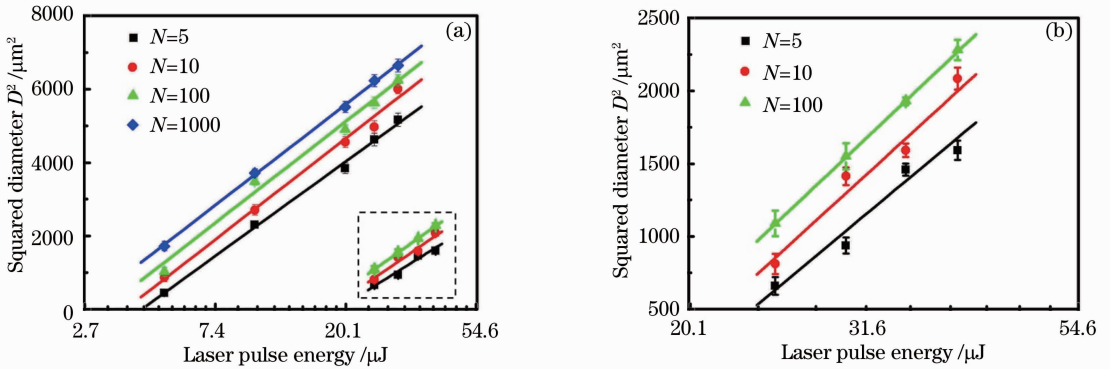


图 5 (a) 镍基合金 CMSX-4 经飞秒激光在不同脉冲个数条件下加工后损伤直径与单脉冲能量之间关系; (b) 为(a)虚线框放大图

Fig. 5 (a) Squared diameter D^2 of ablated craters as a function of applied laser energy at different number of pulses; (b) higher magnification image of framed area in (a)

区域直径与单脉冲能量之间的关系。结果显示,在脉冲个数为 5、10、100、1000 时,飞秒激光对镍基合金 CMSX-4 的非热熔性和热熔性损伤直径平方值与单脉冲能量的自然对数值均呈现较好的线性关系[见图 5(a)],且热熔性损伤线性拟合直线[图 5(b)]与非热熔性损伤线性拟合直线几乎具有相同的斜率。

根据经典损伤阈值计算方法^[12]和图 5 的线性拟合结果计算镍基合金 CMSX-4 经飞秒激光在不同脉冲个数下的非热熔性损伤阈值 Φ_{th1} 、热熔性损伤阈值 Φ_{th2} 以及相对应的聚焦光束高斯半径 ω_0 , 计

算结果见表 1 所示,结果显示, Φ_{th1} 和 Φ_{th2} 均随着脉冲个数的增加而逐渐降低。不同脉冲个数下的 Φ_{th2} 均明显高于 Φ_{th1} , 而聚焦光束的高斯半径为 $(36.3 \pm 0.4) \mu\text{m}$, 波动不大, 证明实验数据的合理性。

根据表 1 中损伤阈值作图绘制飞秒激光脉冲个数 N 和其对应的累积损伤阈值 $N * \Phi_{th}(N)$ 之间的关系, 如图 6 所示。通过线性拟合得到镍基合金 CMSX-4 的非热熔性和热熔性损伤孕育系数分别为 $\xi_1 = 0.90$ 和 $\xi_2 = 0.92$, 单脉冲损伤阈值分别为 $\Phi_{th1}(1) = 0.23 \text{ J/cm}^2$ 和 $\Phi_{th2}(1) = 1.21 \text{ J/cm}^2$ 。非

热熔性损伤阈值 Φ_{th1} 和热熔性损伤阈值 Φ_{th2} 与脉冲个数的定量关系为

$$\Phi_{th1}(N) = 0.23N^{-0.1}, \quad (1)$$

$$\Phi_{th2}(N) = 1.21N^{-0.08}. \quad (2)$$

表 1 镍基合金 CMSX-4 经飞秒激光在不同脉冲个数下的非热熔性和热熔性损伤阈值和光束高斯半径

Table 1 Measured ablation thresholds and Gaussian beam radius for no-melting and melting regimes in different femtosecond laser pulses

N	$\omega_0/\mu\text{m}$	$\Phi_{th1}/(\text{J}\cdot\text{cm}^{-2})$	$\Phi_{th2}/(\text{J}\cdot\text{cm}^{-2})$
5	35.8	0.21	1.08
10	36.6	0.19	0.97
20	36.2	0.18	0.95
50	36.4	0.17	0.88
100	36.7	0.15	0.79
1000	36.0	0.12	—

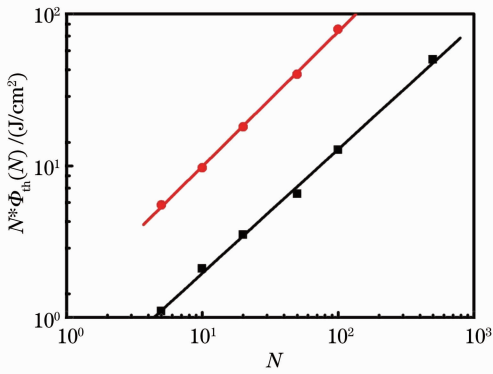


图 6 飞秒激光脉冲个数 N 和其对应的累积损伤阈值之间的关系

Fig. 6 Plot of accumulated damage threshold versus number of femtosecond laser pulses

根据(1)式和(2)式,镍基合金 CMSX-4 经飞秒激光加工后损伤特征与能量密度和脉冲个数的关系

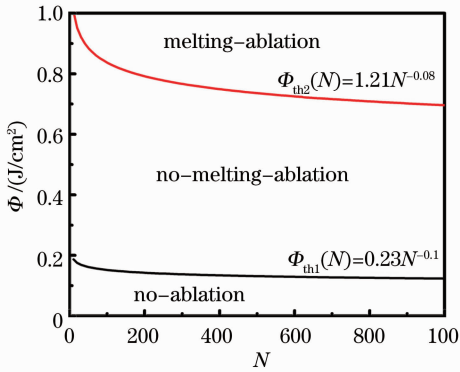


图 7 镍基合金 CMSX-4 经飞秒激光辐照后损伤特征与能量密度和脉冲个数的关系

Fig. 7 Dependence of feature of ablated area as a function of laser fluence Φ and the number of pulses N on CMSX-4

如图 7 所示。该图分为 3 个区域,分别为无损伤区域、非热熔性损伤区域和热熔性损伤区域。3 个区域之间存在明显的分界线,由能量密度和脉冲个数共同决定,分别用(1)式和(2)式表示。

利用(1)式和(2)式以及 ω_0 值^[3],可以分别得到非热熔性损伤直径 D_1 和热熔性损伤直径 D_2 与能量密度和脉冲个数的定量关系为

$$D_1(N) = \left[2592 \ln \left(\frac{\Phi}{0.23N^{-0.1}} \right) \right]^{1/2}, \quad (3)$$

$$D_2(N) = \left[2592 \ln \left(\frac{\Phi}{1.21N^{-0.08}} \right) \right]^{1/2}. \quad (4)$$

4 分析讨论

激光加工镍基高温合金的损伤形貌和规律与材料的损伤机制密切相关,并受激光参数的影响。材料的损伤机制依赖于材料本身性能以及辐照激光特性。经典理论认为材料与激光交互作用过程包括^[18-19]:1)材料表面对辐照激光的吸收;2)吸收的能量在材料内部的再分布;3)材料辐照区域在高能作用下的相变与去除。材料核外电子吸收激光能量后,将以热能的形式通过电子与晶格以及晶格与晶格的耦合作用实现能量的重新分布。典型的电子与晶格的耦合(热扩散)时间为 $1.5 \sim 3 \text{ ps}$ ^[20]。

飞秒激光,其单个脉冲持续时间在飞秒级 (10^{-15} s),远远小于热扩散时间 ($1.5 \sim 3 \text{ ps}$),即脉冲作用期间飞秒激光能量还没有以热能的形式进行扩散。材料辐照区域瞬间得到极高的能量后,温度急剧上升,并将远远超过材料的熔化和气化温度,材料发生高度电离,处于前所未有的高温、高压和高密度的等离子体状态。此时,材料内部原有的束缚力已不足以遏制高密度离子、电子气的迅速膨胀,使得作用区域内的材料以等离子体向外喷发的形式得以去除。通过控制注入的飞秒激光能量密度,可以使等离子体的喷发几乎带走原有全部热量,作用区域内的温度获得骤然下降,大致恢复到飞秒激光作用前的温度状态。在这一过程中,严格限制了热效应的产生,材料发生非热熔性损伤。

实验结果表明,镍基合金 CMSX-4 经飞秒激光在能量密度为 $0 \sim 0.61 \text{ J/cm}^2$ 和脉冲个数为 $0 \sim 8000$ 条件下辐照后,损伤区域没有产生明显的熔化重铸物,呈现非热熔性损伤形貌(见图 1 和图 2)。飞秒激光同样能够实现对镍基合金 CMSX-4 的非热熔性损伤。利用这一特性,飞秒激光用于镍基合金的微纳加工过程可以实现相对意义上的“冷”加

工,大大减弱甚至消除传统长脉冲激光和电加工中热效应带来的诸多负面影响。

4.1 飞秒激光对镍基合金的损伤阈值

与传统长脉冲激光相比,飞秒激光具有极高的峰值功率,焦点位置的功率密度大于 10^{15} W/cm²,所产生的电场强度可与原子内部的库伦束缚场相比拟。此时,传统的电子线性共振吸收机制已经不能解释飞秒激光诱导下电子受激的动力学过程,光子吸收的非线性特征将显得更加重要^[1]。飞秒激光与材料交互作用过程主要以多光子非线性吸收为主,当能量密度足够大时,受束缚的电子将直接电离产生自由电子作为种子电子。这些种子电子密度会非常高,足以诱导产生雪崩电离,导致材料的损伤。这一过程摆脱了材料自身种子电子的限制,因此,飞秒激光对材料的损伤具有固定的阈值。

此外,在低于单脉冲损伤阈值条件下,初始激光脉冲的作用将导致材料表面电子处于激发状态,使得后续脉冲更易诱导等离子体的产生,从而充分吸收激光能量导致材料不可逆的损伤,即孕育效应。这是损伤阈值随着脉冲个数增加而减小的主要原因。

利用飞秒激光对材料损伤具有固定的损伤阈值以及损伤直径与激光参数具有确定的定量关系这一特性,使飞秒激光能够实现超精细、高精度以及高再现性的材料微纳加工。

4.2 飞秒激光对镍基高温合金的热熔性损伤机制

近年来,随着研究的不断深入,在飞秒激光加工材料的非热熔性损伤特征的基础上,热熔性损伤现象亦被发现^[8,21]。2004年,Bonse等^[21]用飞秒激光(130 fs、800 nm)加工单晶硅表面,利用光学显微镜、原子力显微镜、激光扫描显微镜以及拉曼光谱等显微分析技术研究加工表面晶体结构、损伤形貌和光学性能的变化规律。结果表明,损伤分为3个区域,分别为多晶化、非晶化以及熔化重铸损伤区域。2007年,Ma等^[8]研究发现用飞秒激光(150 fs、780 nm)在能量密度为 $0\sim 160$ J/cm² 条件下加工镍基合金,损伤区域呈现两种显著不同的形貌,分别为边缘非热熔性损伤形貌和中间热熔性损伤形貌,并且指出熔化现象的产生与能量密度密切相关。

针对飞秒激光诱导材料产生热熔性损伤的物理机制,Bulgakova等^[22]提出了液相爆炸理论。材料被激光辐照,表面温度迅速升高,达到熔点后很快进入液态,并且温度会继续升高。此时处于过热的液体如有足够的时间进入液相-气相的平衡状态,将为

熔化、沸腾、气化的过程。Bulgakova等^[22]认为飞秒激光与材料交互作用过程中仍然存在热扩散以及由于热扩散产生的熔化液体。飞秒激光作用下,材料表面温度迅速增加,然而表面蒸汽压力增加相对缓慢。当液体的温度超过气-液平衡温度时,将进入过热状态,温度继续增加超过与表面压力相应的气化温度,液体进入亚稳状态。升温速率越快,越接近旋节熔线,处于亚稳态的时间越短。当温度超过临界温度 T_c 时,产生液相爆炸,飞秒激光辐照区域的材料将以液体和蒸汽液滴的形式喷射。

飞秒激光加工材料过程中,能量密度是影响损伤机制的一个重要因素。当能量密度高于临界值时,辐照表面等离子体的喷发将不能带走全部的能量,剩余能量残留在作用区域。此时,电子的热传导行为将无法被忽视^[19]。热电子随着能量密度的增加而快速增加,导致能量以热能的形式在材料内部传递。此外,相比较低的能量密度,在材料损伤过程中,较高的能量密度将诱导产生更高温度和压力的表面等离子体。这些因素均能够诱导产生足够强烈的热效应,使飞秒激光损伤区域产生熔化现象,进而出现熔化重铸物(熔化重铸冠状物、表面溅落物及侧壁重铸层),如图3所示。

5 结 论

镍基单晶高温合金 CMSX-4 经飞秒激光在能量密度为 $0\sim 12.8$ J/cm² 以及脉冲个数为 $0\sim 8000$ 条件下加工后,呈现出两种损伤机制,分别为非热熔性损伤和热熔性损伤。非热熔性损伤下,损伤区域无熔化重铸物和表面溅落物出现。热熔性损伤下,损伤区域呈熔化重铸冠状物、表面溅落物以及侧壁重铸层等典型的热熔性损伤形貌。非热熔性和热熔性单脉冲损伤阈值分别为 0.23 J/cm² 和 1.21 J/cm²,孕育系数分别为 0.90 和 0.92 。在此基础上,建立了非热熔性和热熔性损伤阈值与脉冲个数的定量关系以及损伤直径与能量密度和脉冲个数的定量关系。

参 考 文 献

- 1 S K Sundaram, E Mazur. Inducing and probing non-thermal transitions in semiconductors using femtosecond laser pulses [J]. *Nature Materials*, 2002, 1(4): 217-224.
- 2 D K Das, T M Pollock. Femtosecond laser machining of cooling holes in thermal barrier coated CMSX4 superalloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(15): 5661-5668.
- 3 Q Feng, Y N Picard, H Liu, *et al.*. Femtosecond laser micromachining of a single-crystal superalloy [J]. *Scripta Materialia*, 2005, 53(5): 511-516.
- 4 Q Feng, Y N Picard, J P McDonald, *et al.*. Femtosecond laser

- machining of single-crystal superalloys through thermal barrier coatings [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 430(1-2): 203-207.
- 5 R R Gattass, E Mazur. Femtosecond laser micromachining in transparent materials [J]. *Nat Photon*, 2008, 2(4): 219-225.
- 6 N H Rizvi. Femtosecond laser micromachining: Current status and applications [J]. *Piken Review*, 2003, 50: 107-112.
- 7 W Zhang, G Cheng, Q Feng, *et al.*. Femtosecond laser machining characteristics in a single-crystal superalloy [J]. *Rare Metals*, 2011, 30(1): 639-642.
- 8 S Ma, J P McDonald, B Tryon, *et al.*. Femtosecond laser ablation regimes in a single-crystal superalloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2007, 38A(13): 2349-2357.
- 9 N Semaltianos, W Perrie, P French, *et al.*. Femtosecond laser ablation characteristics of nickel-based superalloy C263 [J]. *Appl Phys A*, 2009, 94(4): 999-1009.
- 10 W Zhang, G Cheng, Q Feng, *et al.*. Abrupt transition from wavelength structure to subwavelength structure in a single-crystal superalloy induced by femtosecond laser [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(9): 4321-4324.
- 11 W Zhang, G Cheng, Q Feng. Unclassical ripple patterns in single-crystal silicon produced by femtosecond laser irradiation [J]. *Applied Surface Science*, 2012, 263: 436-439.
- 12 J Bonse, P Rudolph, J Kruger, *et al.*. Femtosecond pulse laser processing of TiN on silicon [J]. *Applied Surface Science*, 2000, 154-155: 659-663.
- 13 Luo Xinmin, Han Guangtian, Yang Kun, *et al.*. Thermo-induced regression of microstructure of laser-shocked surface modification of 304 austenitic stainless steel [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0203006.
罗新民, 韩光田, 杨 坤, 等. 304 奥氏体不锈钢激光冲击表面改性组织热致回归的微观机制[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0203006.
- 14 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): 0532001.
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): 0532001.
- 15 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): 120002.
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): 120002.
- 16 Chen Chao, Yang Xianhui, Wang Chuang, *et al.*. High-order tilted fiber Bragg gratings carved with femtosecond laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0506001.
陈 超, 杨先辉, 王 闯, 等. 飞秒激光刻写高阶倾斜光纤 Bragg 光栅[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0506001.
- 17 A Borowiec, H K Haugen. Femtosecond laser micromachining of grooves in indium phosphide [J]. *Appl Phys A*, 2004, 79(3): 521-529.
- 18 B N Chichkov, C Momma, S Nolte, *et al.*. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids [J]. *Appl Phys*, 1996, 63(2): 109-115.
- 19 S Nolte, C Momma, H Jacobs, *et al.*. Ablation of metals by ultrashort laser pulses [J]. *Physics A*, 2004, 79(3): 521-529.
- 20 K Dou, E T Knobbe, R L Parkhill, *et al.*. Femtosecond study of surface structure and composition and time-resolved spectroscopy in metals [J]. *Appl Phys A*, 2003, 79(3): 303-307.
- 21 J Bonse, K W Brzezinka, A J Meixner. Modifying single-crystalline silicon by femtosecond laser pulses: an analysis by micro Raman spectroscopy, scanning laser microscopy and atomic force microscopy [J]. *Applied Surface Science*, 2004, 221(1-4): 215-230.
- 22 N M Bulgakova, A V Bulgakov. Pulsed laser ablation of solids: Transition from normal vaporization to phase explosion [J]. *Appl Phys A*, 2001, 73(2): 199-208.

栏目编辑：张 雁