

Simulation and Experiment of Femtosecond Laser Pulse Ablation on Turbine Blade Material*

CUI Bo, GONG Jinliang*, WANG Zhiwen

(College of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo Shandong 255000, China)

Abstract: For research on the punching characteristics of the femtosecond pulse in the turbine blade material, a double pulse laser source was used to make an ablating temperature distribution on the Ni-base superalloy turbine blade material and to rewrite the laser source equation team for improving the double temperature equation team for improving the double temperature equation. From the simulation for the process of the ablating turbine blade material by the double pulse laser source, two temperature peaks appeared, that is an electron temperature and crystal lattice temperature on the ablating temperature distribution curve. We confirmed that there two temperature peaks on the ablating temperatures distribution curves obtained in the percussion drilling experiment on the Ni-base superalloy turbine blade material by the double pulse laser source originated from electron and crystal lattice vibration in the blade material. By comparing the result with that of the single pulse laser source, it is found that the temperature of two peaks raised 345 k higher and the equilibrium time prolonged 5 ps longer than the single pulse. The morphology of holes percussion-drilled of the blade material by using femtosecond double pulse laser produced by Ray Corp production U.S.A, with different laser parameters, such as laser pulse width, laser energy, laser frequency, and laser pulse interval were found good quality and efficiency.

Key words: femtosecond laser; superalloy; electron, lattice temperature; impact punching
EEACC: 0550 **doi:** 10.3969/j.issn.1005-9490.2019.02.005

飞秒激光脉冲烧蚀涡轮叶片材料的仿真和实验*

崔波, 宫金良*, 王志文

(山东理工大学机械工程学院, 山东 淄博 255000)

摘要: 为研究飞秒激光脉冲对涡轮叶片材料的冲击打孔特性, 使用双脉冲改写方程的激光光源项, 并对涡轮叶片材料进行数值模拟, 得到了镍基高温合金在飞秒激光双脉冲冲击打孔下的晶格和电子温度。通过对比单脉冲的模拟结果发现: 双脉冲烧蚀情况下, 材料电子和晶格出现2个峰值温度, 且电子和晶格的平衡温度相比单脉冲提高345 k, 平衡时间延长了5 ps, 使用美国 Ray Corp 生产的飞秒脉冲激光器, 对镍基高温合金材料在不同的激光参数下: 激光脉冲宽度、激光能量、激光频率、脉冲间隔对材料的烧蚀进行双脉冲打孔, 得到孔的形貌特征, 并与单脉冲打孔对比发现双脉冲打孔的质量和效率优于单脉冲。

关键词: 飞秒激光; 高温合金; 电子、晶格温度; 冲击打孔

中图分类号: TP212.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2019)02-0291-05

航空燃气涡轮发动机的性能和叶片材料有密切的关系, 近年来燃气涡轮的进口温度一直在升高^[1], 镍基高温合金材料凭借其高强度、抗疲劳性能和在高温、高压下具有抗氧化、抗腐蚀性能, 广泛地应用于航空发动机的涡轮叶片制造过程中^[2]。但是高温镍基合金材料含有金属碳氮化合物和硬点等强化相, 传统的加工方法如电解加工、电火花加工、电子束等^[3]存在加工效率低下、加工精度不高、加工过程中产生微裂纹, 从而影响叶片的使用寿命。

20世纪90年代以来, 飞秒激光凭借其超强、超快的性能和热影响区小等逐渐用于材料的切割、打孔等超精细冷加工^[4]。相比于传统的方法, 飞秒激光加工的微孔具有适用材料范围广、高精度、高效率且加工孔径周围没有熔融区等, 因此利用飞秒激光加工高温合金材料成为理想的加工手段之一^[5]。

在飞秒激光烧蚀金属靶材方面, 人们普遍使用单脉冲来描述脉冲激光和材料作用的机理, 用双温模型来描述电子和晶格的温度变化关系, 给出了单脉冲加

项目来源: 国家自然科学基金项目(61303006); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2012ZZ009)

收稿日期: 2018-03-23 **修改日期:** 2018-04-17

工的微观图像^[6],但使用飞秒激光双脉冲加工镍基高温合金材料的效率比单脉冲高且加工质量更好。由于双脉冲的作用机理复杂,前后脉冲间隔影响材料的烧蚀情况,目前双脉冲加工的物理图像很少,本文利用激光脉冲间的时间间隔,提出了一种改进的双温模型,使用一维简化双温方程和有限差分法求解^[7],仿真出飞秒激光烧蚀靶材过程中在不同激光能量、不同脉宽、不同脉冲个数等参数下高温镍基合金材料的电子和晶格温度场的分布情况,更好地预测了飞秒激光在高温合金材料的小孔加工过程中所需要的参数。

1 计算模型

1974 年苏联学者: Anisimov S I 依据飞秒激光脉冲和金属的相互作用机理,提出了双温方程,用来描述激光脉冲和金属材料的相互作用情况,具体表达式如下:

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_e \frac{\partial T_e}{\partial x} \right) - g(T_e - T_i) + S(x, t) \quad (1)$$

$$C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = g(T_e - T_i) \quad (2)$$

式中: T_e 和 T_i 为材料的电子温度和晶格温度, C_e 和 C_i 分别为电子和晶格的热容。式(1)的右边第 1 项为激光热传导项, k_e 为电子和晶格的热传导率, 第 2 项为电子和晶格的能量耦合项, g 为电子和晶格的激光能量耦合系数, 第 3 项 S 为激光光源项。式(2)的右边项是激光电子和晶格的能量耦合, 电子热传导率的表达式^[9]为:

$$k_e = \chi \frac{(\mu_e^2 + 0.16)^{5/4} (\mu_e^2 + 0.44) \mu_e}{(\mu_e^2 + 0.092)^{1/2} (\mu_e^2 + \eta \mu_i)} \quad (3)$$

式中: $\mu_e = T_e/T_F$, $\mu_i = T_i/T_F$, $T_F = 7.28 \times 10^4$ K 为镍基高温合金的费米温度, 参数 χ 和 η 是和材料相关的参数, 分别为 $345 \times w \cdot k^{-1} \cdot m^{-1}$ 和 0.156, 脉冲激光束呈高斯分布, 激光光源项表达式^[10]为:

$$S(x, t) = \frac{A\alpha F}{\sqrt{\pi/4 \ln 2} \tau_L} \exp[-4 \ln 2 (t/\tau_L - 2)^2] \exp(-\alpha x) \quad (4)$$

式中: A 为靶材表面的反射率, α 为光在镍基高温合金片中的穿透深度, F 为激光的能流密度, τ_L 为激光脉冲宽度, x 为靶材加工平面的位置。

飞秒激光脉冲作用于材料表面时, 单脉冲激光能量密度达到一定值, 材料才会发生去除, 所以对于同种靶材材料而言, 其烧蚀阈值是确定的, 这是单脉冲模拟得到的结果^[11]。在实际生产应用中单脉冲激光烧蚀靶材的效率值很低, 使用飞秒双脉冲烧蚀材料时, 材料的烧蚀阈值会随着脉冲个数的增大而

减小。所以在双脉冲条件下, 通过合理调整双脉冲之间的时间间隔, 使用较小的激光脉冲能量密度也可以实现靶材的烧蚀, 从而提高加工的效率, 这就是双脉冲累积效应的结果^[12]。

采用双脉冲模拟, 在两个脉冲之间存在时间间隔 dt , 假设第 1 个脉冲到达加工平面, 与材料相互作用完之后, 间隔 dt 时刻后第 2 个脉冲开始烧蚀材料, 就需要对原有的双温方程的光源项进行修正。得到新的双脉冲光源项 $S(x, t)$ 的表达式为:

$$S(x, t) = \frac{A\alpha F}{\sqrt{\pi/4 \ln 2} \tau_L} \exp(-\alpha x) \times \exp[-4 \ln 2 (t/\tau_L - 2)^2 - 4 \ln 2 [(t-dt)/\tau_L - 2]^2] \quad (5)$$

与(4)相比, 增加了脉冲间隔时间 dt , 从而使双温模型适用于双脉冲激光烧蚀靶材。初始条件和边界条件设置如下所示:

$$T_{i,0} = T_0 = 300 \text{ K}, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

$$T_{n,j} = 300 \text{ K}, \quad (j = 0, 1, 2, \dots, t)$$

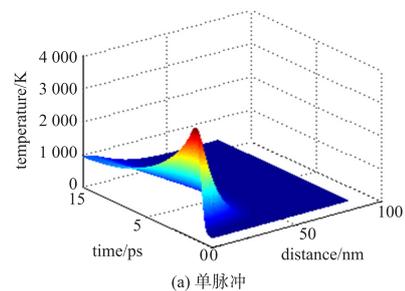
模拟的飞秒激光器是实验室自己搭建的美国 Ray tium Corp 生产的泵浦 KGW 晶体超快激光器。其参数为激光能量密度 $F = 150 \text{ J/m}^2$; 脉宽: $\tau_L = 150 \text{ fs}$; 波长为 1030 nm 。差分计算时: 时间差分步长为 0.1 fs , 空间差分步长为 1 nm , 每 0.1 fs 计算一次, 每 1 nm 分为一层。Ni 基高温合金的参数见表 1。

表 1 镍基高温合金的参数^[13]

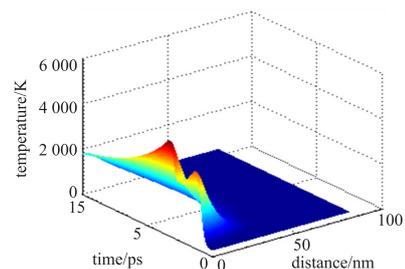
$C_e/(J/(m^3 \cdot K))$	$C_i/(J/(m^3 \cdot K))$	$g/(W/(m^3 \cdot K))$	A	α/m^{-1}
67.5	4.1×10^6	46.44×10^{17}	0.49	2.4×10^{-8}

2 计算结果与分析

图 1(a) 所示为单脉冲条件下对高温镍基合金材



(a) 单脉冲



(b) 双脉冲

图 1 单脉冲和双脉冲下的温度分布

料的电子温度烧蚀分布,发现电子的烧蚀深度随着时间演进的规律。材料电子在脉冲开始后 6 ps 时达到峰值温度,此时脉冲已经结束其电子峰值温度值为 1 879 K。图 1(b)为相同参数下使用双脉冲对镍基高温合金材料的烧蚀情况,二个脉冲之间相差时间间隔为 2 ps,与图 1(a)对比发现材料电子存在 2 个递增的峰值温度;后一个峰值温度是在前一个脉冲基础上的,使得电子第 2 个峰值温度递增了 1 251 K。所以说相同的参数下双脉冲金属材料升高电子温度的材料烧蚀率更高。

从图 1 还可以得到脉冲间隔小于电子声子耦合即电子运动与晶格振动的耦合,作用时间:脉冲间隔为 3 ps < 7 ps,这样就可以合理调整 2 个脉冲之间的时间间隔使电子快速达到峰值温度,第 1 个脉冲烧蚀完毕后电子还没来得及通过电声耦合作用传递给材料的晶格系统,第 2 个脉冲就开始烧蚀产生了脉冲的能量累积效应。所以图 2 所示双脉冲下晶格的温度高于单脉冲 377 K,随着能量传递到材料深度,脉冲完成烧蚀。

图 3(a)和图 3(b)是其他参数相同的情况下,改变脉冲个数情况下对材料进行的烧蚀。得到了不同脉冲情况下电子和晶格的温度曲线。图 3(a)所示单脉冲作用完材料表面 3 ps 时间后电子达到最高温度为 3 377 K,脉冲照射完毕,电子通过能量耦合作用把脉冲能量传递给晶格,经过 6 ps 时间,二者的温度达到平衡。设置双脉冲情况下时间间隔为

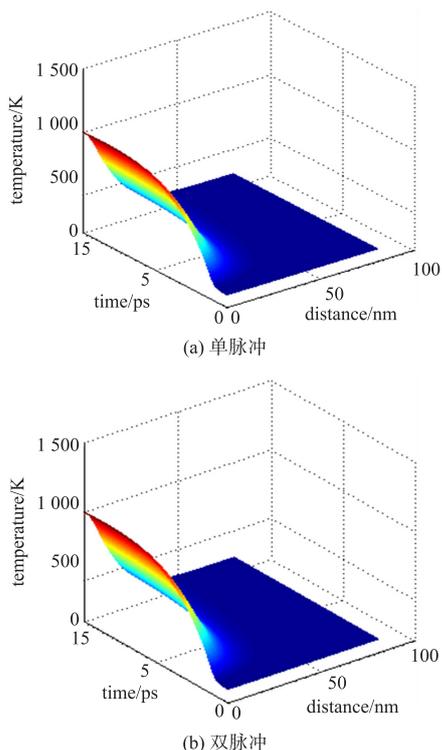


图 2 单脉冲和双脉冲下晶格温度分布

3 ps,第 1 个脉冲结束后电子完成了能量传递,第 2 个脉冲到达材料表面进行烧蚀,最后电子和晶格系统在 12 ps 后达到平衡状态,从图中可以看出系统的平衡温度由 1 332 K 提高到 1 677 K,温度提高了 345 K,平衡时间延长了 5 ps。通过控制平衡时间完成了对材料的烧蚀。

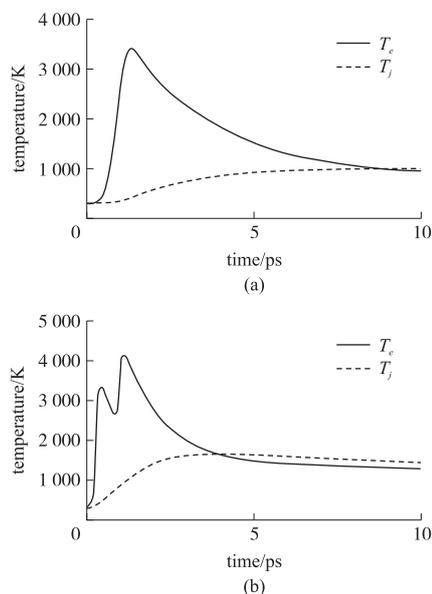


图 3 不同脉冲个数下电子和晶格温度曲线

图 4 为相同参数下改变了脉冲宽度,选择在 150 ps ~ 300 ps 脉冲宽度进行烧蚀。从图 4(a)可以看出随着脉宽的增加电子峰值温度在递增,从 4 665 K 增加到 5 347 K,效果不明显。但是改变了电子温度的峰值时间。对后续电子能量传递时间延长。但是相对于材料的热传递时间,脉冲宽度的改变影响比较微弱,脉宽不同时,在双脉冲的条件下,脉宽主要影响电子温度和达到峰值温度的时间。

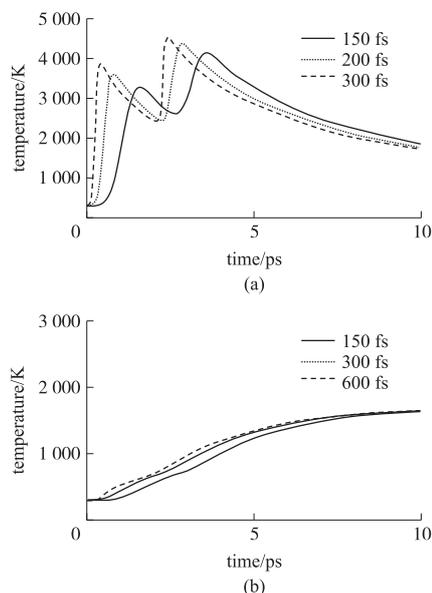


图 4 不同脉宽下电子和晶格的温度曲线

从图 5(a) 电子的温度曲线看出, 激光能量从 150 J/m^2 一直增加到 300 J/m^2 , 第 2 个脉冲影响了电子和晶格的温度攀升区间。连续二个脉冲之后, 电子的温升达到最高值 $3\ 883 \text{ K}$, 由此可见电子温升效果明显。但图 5(b) 看晶格的温度攀升没有那么明显, 造成的原因可能是: 由于第 1 个脉冲产生等离子气体会部分屏蔽掉第 2 个脉冲能量的关系^[14], 造成了晶格在第 2 个脉冲下温升不明显, 从而影响了晶格最终平衡温度。可见在脉冲能量累积效应的影响下, 双脉冲之间的间隔 dt 会影响靶材的电子温度和晶格温度, 决定了靶材的烧蚀速率和烧蚀精度。如果合理地控制飞秒激光的加工参数, 可以对涡轮叶片材料进行高精度加工。

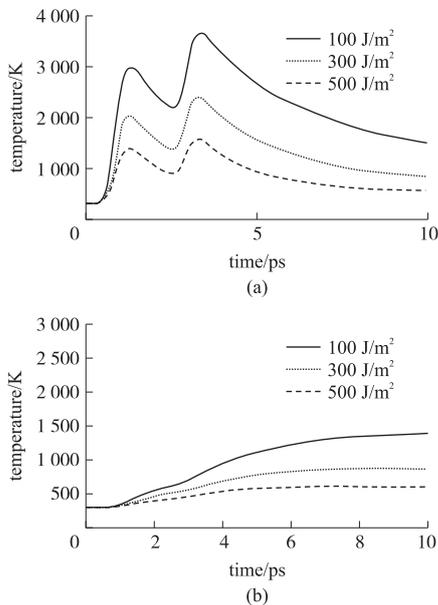


图 5 不同激光能量下电子和晶格的温度曲线

3 测量实验与结果

实验材料选用表 1 的镍基高温合金, 激光加工系统选用美国 Ray Corp 生产的泵浦 KGW 晶体超快激光器。其参数选择为激光能量密度 $F = 150 \text{ J/m}^2$; 脉宽: $\tau_L = 150 \text{ fs}$; 波长为 $1\ 030 \text{ nm}$ 。使用 CCD 系统进行对焦, 光电快门控制脉冲个数, 精度为 1 ms , 根据实验要求, 激光脉冲能量可以用衰减片进行衰减^[15]。采用不同激光脉冲能量和脉冲个数在镍基高温合金材料的样品上用单脉冲和双脉冲冲击打孔, 使用 $1\ 000\times$ 显微镜测得不同参数条件下微孔形貌, 如图 6 和图 7 所示。

从图 6(a) 和图 7(a) 可以看出, 单脉冲和双脉冲之间都采用脉冲能量为 $10 \mu\text{J}$, 20 个脉冲烧蚀材料时, 单脉冲在材料激光光斑中心位置没有烧穿, 只是得到了熔融的图像, 而双脉冲则冲击产生了直径为 $20.18 \mu\text{m}$ 的小孔, 且有飞溅物, 对于图 6(b)、图 6(c)、图 6(d) 所

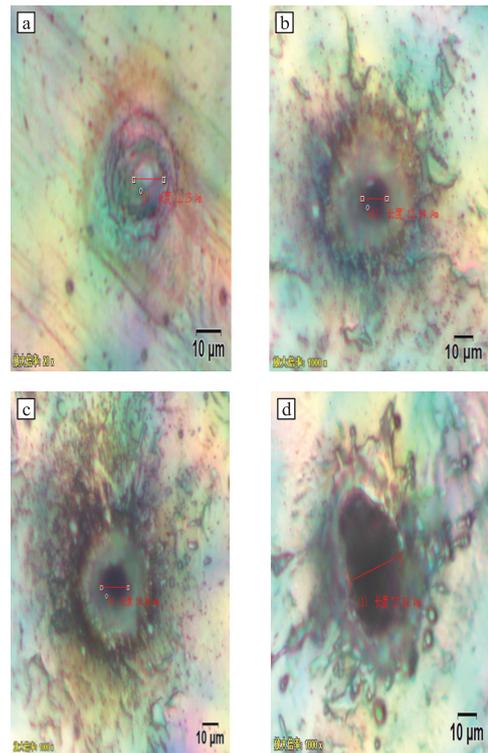


图 6 单脉冲冲击打孔

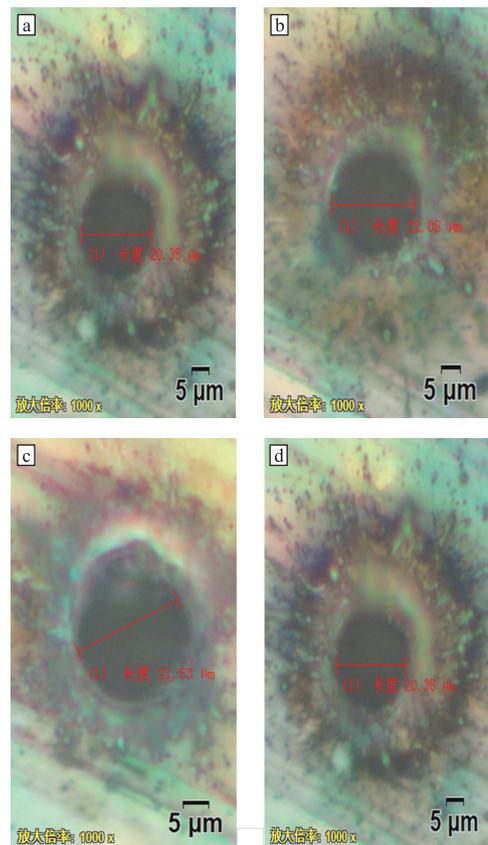


图 7 激光双脉冲冲击打孔

示, 增加脉冲个数从 20 个脉冲增加到 80 脉冲, 单脉冲烧蚀小孔的直径在增大, 增加脉冲能量达到 $80 \mu\text{J}$ 时出现了明显的烧穿现象, 且孔径增加到 $27.61 \mu\text{m}$, 图 7(b)、图 7(c) 所示双脉冲烧蚀脉冲间隔为 2 ps , 增

加脉冲具体个数发现孔径在增大,且飞溅物增多,最后增大脉冲能量到 40 μJ 时发现孔的直径减小了 1.73 μm ,可能的原因此时脉冲个数下降到 40 个脉冲,脉冲的能量累积效应减弱,对比发现双脉冲的加工效果由于脉冲能量累积效应比单脉冲要好。

4 结论

本文根据飞秒激光双脉冲能量累积效应,通过引入双脉冲的时间间隔 dt 改写了双温方程,提高飞秒激光烧蚀镍基高温合金的精度。应用该模型对飞秒激光双脉冲烧蚀镍基高温合金情况进行了数值模拟,在模拟中,发现双脉冲能量累积效应、激光能量密度和加工脉冲个数是影响靶材电子和晶格最后平衡温度的主要参数。讨论了飞秒激光双脉冲作用下材料电子和晶格的峰值温度,最后两者的平衡温度为从单个脉冲的 992 K 提高到 1 989 K,平衡温度升高了 997 K、平衡时间延长了 5 ps。在实验中发现,激光脉冲个数和激光脉冲能量是影响小孔烧蚀直径和孔形貌的主要因素,随着对靶材烧蚀深度的增加,电子和晶格的温度指数级下降,使得靶材的热传导深度只有几十纳米,由于电子和晶格的固溶效应和等离子体的屏蔽效应未充分考虑^[16],以后的工作中要继续完善双温方程,使之更好的指导飞秒激光烧蚀高温合金材料。

参考文献:

- [1] 倪晓昌,王清月. 飞秒. 皮秒激光烧蚀金属表面的有限差分热分析[J]. 中国激光,2004,31(3):277-280.
- [2] 王永善,贺志荣,王启,等. Ti-Ni 形状记忆合金性能及应用研究进展[J]. 热加工工艺,2009,38(20):18-21.
- [3] Petrini L, Migliavacca F. Biomedical Applications of Shape Memory Alloys[J]. Journal of Metallurgy,2011,2011(1):501483.
- [4] Balling P, Schou J. Femtosecond-Laser Ablation Dynamics of Dielectrics: Basics and Applications for Thin Films[J]. Reports on Progress in Physics,2013,76(3):036502.
- [5] Amoruso S, Bruzzese R, Wang X, et al. Femtosecond Laser Ablation of Nickel in Vacuum[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2007,40(2):331.
- [6] 陈安民,姜远飞,刘航,等. 双温方程用于飞秒激光烧蚀金属的模拟分析[J]. 激光与红外,2012,42(8):847-851.
- [7] 邵俊峰,郭劲,王挺峰,等. 飞秒双脉冲激光照射金属薄膜的热行为[J]. 强激光与粒子束,2014,26(9):92-97.
- [8] Amoruso S, Bruzzese R, Wang X, et al. Femtosecond Laser Ablation of Nickel in Vacuum[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2007,40(2):331.
- [9] Roberts T V, Lawless M, Bali S J, et al. Femtosecond Laser Ablation of Memory Alloys[J]. Journal of Physics D: Applied Physics. D: Applied Physics,2013,17(2):331.

- [10] Roberts T V, Lawless M, Bali S J, et al. Femtosecond Laser Ablation of Memory Alloys[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2013,17(2):331.
- [11] Ni X, Sun Q, Wang C, et al. Pulse Incubation Effect on Interaction of Femtosecond Laser and Au Film[J]. Nanotechnology and Precision Engineering,2009,6:010.
- [12] Roberts T V, Lawless M, Bali S J, et al. Femtosecond Laser Ablation of Memory Alloys[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2013,17(2):331.
- [13] MARK. Optical Properties of Solids[M]. Oxford: Oxford University Press,2010.
- [14] Amoruso S, Bruzzese R, Wang X, et al. Femtosecond Laser Ablation of Nickel in Vacuum[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2007,40(2):331.
- [15] 夏博,姜澜,王素梅,等. 飞秒激光打孔研究. 飞秒激光微孔加工[J]. 中国激光,2013(2):1-12.
- [16] 吴伟辉,杨永强,肖冬明,等. 激光选区熔化成型可控超轻结构化零件的孔隙生成效果[J]. 光学精密工程,2017,25(6):1547-1556.
- [17] 刘源,叶潇,郝勇,等. 多脉冲异面交会对接转移轨道的优化[J]. 光学精密工程,2017,25(4):987-998.
- [18] 闫岸如,杨恬恬,王燕灵,等. 变能量激光选区熔化 IN718 镍基超合金的成形工艺及高温机械性能[J]. 光学精密工程,2015,23(6):1695-1704.



崔波(1986-),男,山东淄博人,2015年于山东理工大学研究生在读,现为山东理工大学机械工程学院学生,主要从事机械电子、激光自动化加工研究,853381652@qq.com;



宫金良(1976-),男,河北泊头人,博士,副教授,2006年于燕山大学获得博士学位,现为山东理工大学机械工程学院副教授,主要从事机器人及激光加工等方面的研究,2662642254@qq.com;



王志文(1988-),男,山东临沂人,讲师,2016年于大连理工大学获得博士学位,现为山东理工大学机械工程学院机械电子工程系讲师,主要从事激光微纳制造、自动控制等方面的研究,295695673@qq.com。