

# 采用 532 nm 纳秒光纤激光对金属和热障涂层的激光微加工

赖宏坤 齐欢

(上海交通大学密西根学院, 上海 200240)

**摘要** 涡轮叶片上气膜冷却孔的精密制造是一项复杂的技术,特别覆有热障涂层的金属叶片的加工尤为困难。实验采用 532 nm 的镱离子光纤纳秒脉冲激光研究脉冲激光束和陶瓷涂层或金属基材料之间的物理相互作用。通过半经验模型和有限元模型研究了激光与材料的相互作用,并预测了材料消融表面的几何形状。通过建模和实验数据之间的比较,进一步优化加工参数以获得最大的去除效率,并保证最少的由热效应引起的缺陷,如重铸层、边缘突起和微裂纹等。通过改变焦深、扫描模式、光斑半径和功率密度来研究激光与不锈钢、铜、镍铬铁合金 718 和氧化锆热障涂层等材料的相互作用。实验获得了激光能量密度阈值和材料最佳去除效率,并且验证了模拟的结果。

**关键词** 激光技术;激光微加工;气膜冷却孔;热障涂层;纳秒激光

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0803001

## Micromachining of Metals and Thermal Barrier Coatings Using a 532 nm Nanosecond Fiber Laser

Lai Hongkun Qi Huan

(University of Michigan-Shanghai Jiaotong University Joint Institute, Shanghai 200240, China)

**Abstract** Precision manufacturing of the shaped film cooling holes on turbine blades is a challenge, especially when the metal blades are coated with thermal barrier coatings (TBC). A 532 nm nanosecond pulsed ytterbium fiber laser is used to study the physical interactions between pulsed laser beam and metal or ceramic materials. Using a semi-empirical model and finite element model, we study the interaction of laser and material, and predict laser ablation surface geometry. Results are compared between modelling and experimental data. Optimized machining parameters are recommended with the aim of maximum process efficiency and minimum thermal effects such as recast layer, edge protrusions and microcracks. By varying depth of focus, scanning mode, beam diameter and power density, the interaction between laser and stainless steel, copper, TBC and IN718 are investigated. Laser ablation energy density threshold values and the best material removal rate are obtained, and the result of simulation is verified.

**Key words** laser technique; laser micromachining; film cooling hole; thermal barrier coatings; nanosecond fiber laser

**OCIS codes** 140.3390; 140.3615; 140.7300

### 1 引言

涡轮叶片上薄膜冷却孔的精密制造是一项复杂的技术,其中加工涂覆金属叶片与热障涂层(TBC)尤为困难。相比传统的高能量毫秒脉冲激光钻孔或微放电加工(EDM),结合高速振镜扫描仪的高频短脉冲激光微细加工,在加工 TBC 涂层或金属时具有独特的优势<sup>[1]</sup>。采用复合加工过程,即先对

TBC 涂层进行短脉冲激光打孔,再对基体金属采用微细电火花钻孔,往往可以使高品质气膜冷却孔<sup>[2]</sup>。

激光钻孔技术已经发展了十多年,在加工高温合金和陶瓷硬质材料上,具有无刀具磨损、精度高、速度快等优点。早期研究中,激光钻孔所用的 Nd:YAG 激光器能产生毫秒脉冲和高达 15 J 的高脉冲能量<sup>[3-6]</sup>。但长脉冲激光容易引起材料开裂和分

**收稿日期**: 2013-02-01; **收到修改稿日期**: 2013-03-20

**基金项目**: 机械系统与振动国家重点实验室课题(MSV201112)、上海市科学技术委员会浦江人才(12PJ404)

**作者简介**: 赖宏坤(1987—),男,硕士研究生,主要从事纳秒激光材料微加工方面的研究。E-mail: laihongkun@sjtu.edu.cn

**导师简介**: 齐欢(1974—),男,副教授,主要从事激光加工、激光熔覆、自动化控制等方面的研究。

E-mail: huan.qi@sjtu.edu.cn

层,而超短脉冲(皮秒到飞秒)激光可以解决这类问题。Feng 等<sup>[7]</sup>使用掺钛蓝宝石激光器(波长为 780 nm 和脉冲持续时间为 150 fs)进行实验,没有生成传统缺陷(如飞溅、重铸层、微裂纹等)。Das 等<sup>[8]</sup>通过检查孔壁的形状和表面光洁度,也证明了这样的结论。根据他们的研究,飞秒激光加工不产生微裂纹和重铸缺陷,同时发现飞秒脉冲激光也存在一些局限,仍然会在孔周围的热障涂层面层[材料为 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的部分稳定的 ZrO<sub>3</sub>(YSZ)]产生轻微的烧蚀材料损失。虽然利用飞秒激光技术可以形成高品质的孔,但因其成本非常高,加工速度慢<sup>[8]</sup>,工业应用范围有限。与纳秒光纤激光器相比,飞秒激光的成本高十倍之多。但采用纳秒脉冲激光,材料缺陷控制、加工时间及整体成本控制可能会受到影响。

本实验采用纳秒脉冲掺镱光纤激光来研究脉冲激光束和金属或陶瓷材料之间的物理相互作用。通过建立热消融模型以确定在固定脉冲和移动的激光束下消融的材料体积和尺寸。通过建模结果和实验数据之间进行比较,来优化激光加工参数,并保证最少的由热效应引起的缺陷,如重铸层,边缘突起和微裂纹等缺陷,来获得最大加工效率。

## 2 建模和实验方法

### 2.1 传热模型

以有限元模型(FEM)模拟脉冲激光束照射在一个薄材料层的短暂加热过程。在加热过程中,材料被部分熔化和汽化,留下 1 ns 脉冲激光烧蚀后的几何凹坑,如图 1 所示。建立一个尺寸为 120 μm × 5 μm 的二维矩形模型来代表工件。同时,激光从工件的上表面垂直入射,光斑半径为  $w$ 。由于对流和辐射,有部分热量损失。工件其他表面的边界条件被假定为绝热。传热方程为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u}_{\text{trans}} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q, \quad (1)$$

式中  $\rho$  为密度,  $C_p$  为在恒定压力下的比热容,定义一

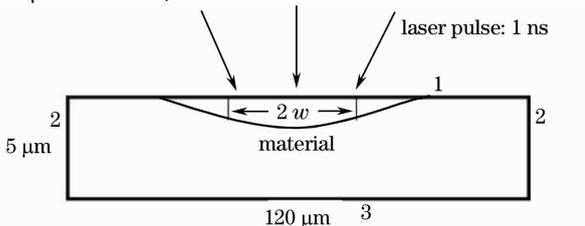


图 1 传热模型

Fig. 1 Heat transfer modeling geometry

个分段温度的函数  $\mathbf{u}_{\text{trans}}$  为固体熔化后涂体速度的单位方向向量;  $k$  为热导率,  $T$  为绝对温度,  $Q$  为热源。为了解释熔化和汽化的潜热,如图 2 所示。其中的潜热被假定在熔化或汽化温度的 100 K 范围内均匀分布。

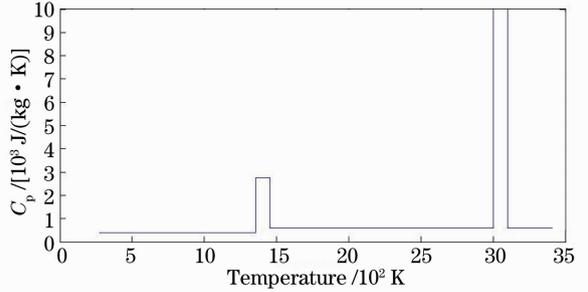


图 2  $C_p$  与温度的分段函数

Fig. 2  $C_p$  as a segment function of temperature

上表面的边界条件可以表示为

$$-\mathbf{n} \cdot (-k \nabla T) = q + h \cdot (T_\infty - T) + \epsilon \sigma (T_{\text{sur}}^4 - T^4), \quad (2)$$

式中

$$q = \frac{2(1-R)P_c}{\pi w^2} \exp\left(-2 \frac{x^2}{w^2}\right), \quad (3)$$

式中  $q$  为高斯分布的激光功率密度,  $h$  为表面传热系数,  $T_\infty$  为对流传热的环境温度;  $T_{\text{sur}}$  为辐射传热的环境温度,  $\epsilon$  为材料的发射率,  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数,  $R$  为材料反射率,  $P_c$  为激光峰值功率;  $\mathbf{n}$  表示表面的单位法向量。使用 COMSOL Multiphysics 软件的有限元建模工具来模拟该传热模型。

在该有限元模型中,采用移动网格法来模拟材料表面由于激光烧蚀产生的变化。根据激光打孔过程中的熔化和汽化现象确定速度和方向,该网格在计算域的上表面上进行移动。Semak 等<sup>[9]</sup>根据质量守恒建立的激光打孔模型来计算打孔速度

$$v_d = \frac{1}{2} \times$$

$$\left[ \frac{\rho_m}{\rho_s} \cdot v_v + \sqrt{\left(\frac{\rho_m}{\rho_s} \cdot v_v\right)^2 + 4 \cdot \frac{\alpha_m}{r_1} \cdot \frac{\rho_m}{\rho_s} \cdot v_m} \right], \quad (4)$$

式中  $r_1$  为光斑半径,  $\alpha_m$  为熔体的热扩散率,  $\rho_s$  和  $\rho_m$  分别是固相和液相的密度,  $v_m$  为液相喷射速度,  $v_v$  为气体速度。气体速度  $v_v$  由液相表面温度  $T_s$  确定:

$$v_v = C_0 \exp\left(-\frac{U}{T_s}\right), U = \frac{M_a L_v}{N_a k_b}, \quad (5)$$

式中  $C_0$  为凝聚相的音速,  $M_a$  为原子质量,  $L_v$  为蒸发潜热,  $N_a$  为阿伏伽德罗常数,  $k_b$  为玻尔兹曼常数。考虑到汽化反冲压力的影响,  $v_m$  可以由以下伯努利方

程和饱和蒸气压方程确定：

$$P_r = \frac{\rho_m \cdot v_m^2}{2} = A \cdot B_0 \cdot T_s^{-1/2} \cdot \exp\left(-\frac{U}{T_s}\right), \quad (6)$$

式中  $A$  是常数为 0.55,  $B_0$  为汽化常数,  $T_s$  为表面温度。

## 2.2 实验方法

实验中使用波长为 532 nm 的纳秒脉冲掺镜光纤激光。激光最大功率为 10 W, 平均脉冲宽度为 1 ns, 重复频率为 600 kHz。近高斯分布的激光光束通过扫描振镜, 由焦距为 170 mm 的物镜聚焦。

采用不同的激光参数在 304 不锈钢(SS304)、铜、镍铬铁合金 718(IN718)和钇稳定氧化锆涂覆 IN718 的平板上加工沟槽。在实验中通过改变扫描速度、离焦量、激光的脉冲能量等参数, 确定沟槽的几何形状和加工质量。为获得沟槽的最大材料去除率, 激光应有合适的能量通量和脉冲重叠比。每条槽的深度、宽度和截面面积, 可从显微图片上测出, 如图 3 所示。实验中每条槽测量了至少 3 个截面。

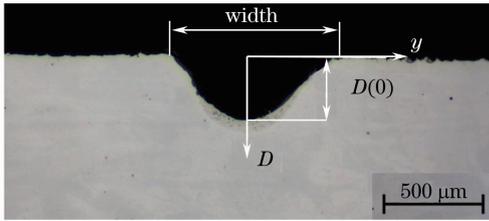


图 3 IN718 板的激光加工沟槽显微截面

Fig. 3 Cross section micrograph of a laser machined trench on IN718 plate

采用基于 Raciukaitis 等<sup>[10-11]</sup>研究的一种半经验模型, 来解释实验数据, 并从中获得优化的材料去除速率。凹槽的几何数据与激光光斑大小、脉冲能量和能量密度呈一定的函数关系。单一脉冲生产的

凹坑体积可由以下经验公式确定

$$V = \frac{\pi\omega^2 d_0}{4} \left( \ln \frac{2E_p}{\pi\omega^2 F_c} \right)^2, \quad (7)$$

式中  $d_0$  为代表有效吸收深度的比例参数,  $\omega$  为激光光斑半径,  $F_c$  为功率密度阈值,  $E_p$  为激光脉冲能量。当光斑半径到达一个特定的值  $\omega_{\max}$ , 单一脉冲的消融体积最大。

考虑到多个连续的激光脉冲加工时, 当激光沿着正  $x$  方向上移动, 连续两个脉冲的中心之间距离可以表示为  $\Delta x$ 。激光脉冲在相同位置累积能量并影响加工沟槽的形状。假设不同脉冲之间的位移远小于光斑半径, 在沟槽中心线深度( $y=0$  时)为

$$D(0) = \frac{4\omega d_0}{3\Delta x} \left( \ln \frac{F_0}{F_c} \right)^{3/2}, \quad (8)$$

式中  $F_0$  是激光峰值能量密度,  $F_0 = 2E_p/\pi\omega^2$ 。给定脉冲频率时材料的去除速率为

$$\frac{dV}{dt} = fA\Delta x = f \frac{d_0 \pi}{6} \ln \frac{F_0}{F_c} \left( \frac{3\omega^2}{2} \ln \frac{F_0}{F_c} - \Delta x^2 \right). \quad (9)$$

蒸发速率也被其他材料特性所影响, 如吸收深度和烧蚀阈值等。然而, 脉冲能量和重复频率是确定激光烧蚀效率的主要因素。

## 3 结果与讨论

实验研究了激光能量密度和沟槽的关系。通过改变激光脉冲能量和离焦量, 可以得到不同的激光能量密度。图 4 说明了沟槽深度与能量密度的关系。根据(8)式, 作出最佳拟合曲线。由此可以得到 SS304 的特征参数:  $d_0 = 2.03 \mu\text{m}$ ,  $F_c = 0.2065 \text{ J/cm}^2$ , IN718 的特征参数:  $d_0 = 0.372 \mu\text{m}$ ,  $F_c = 0.022 \text{ J/cm}^2$ 。 $d_0$  和  $F_c$  的值可以用来计算(9)式中的体积去除率。

通过比较实验数据、经验公式和有限元模型的

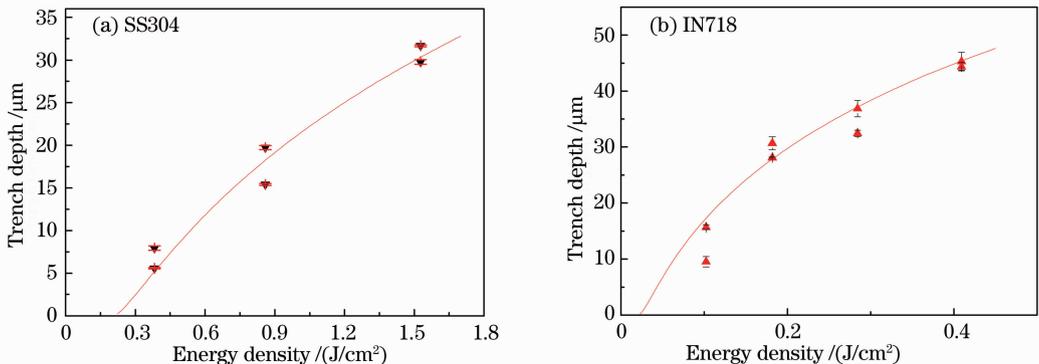


图 4 扫描速度为 4 mm/s 时, 两次激光扫描条件下, 沟槽深度与激光能量密度的关系

Fig. 4 Trench depth as a function of energy density for machining by twice laser scanning at 4 mm/s

结果,可以得到体积去除率和光斑半径关系,如图 5 所示。由铜和 SS304 的实验结果可得,在改变光斑半径过程中,体积去除率存在最大值。沟槽体积去除率的实验数据符合(9)式的变化趋势,且有限元模型的预测去除率也遵循同样的趋势。两种材料的实验和经验数据中最大体积去除率所对应的光斑半

径在相同的范围内。然而,材料去除速率的模拟结果相对较小,这可能是由于未考虑实际加工过程中的热累积效应。以固定的速度扫描时,小的光斑半径往往产生高的能量密度,导致窄深沟槽,但去除材料的体积是有限的。大的光斑半径产生低能量密度,并导致材料去除率较小。

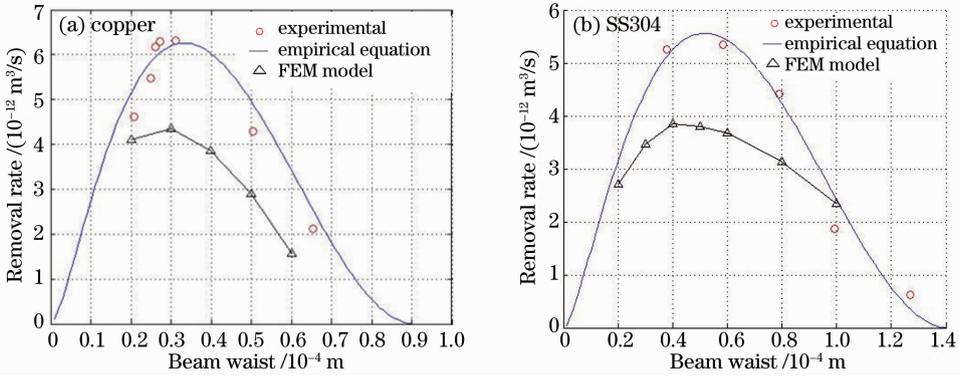


图 5 体积去除速率与光斑半径的关系

Fig. 5 Relationship between material volume removal rate plotted and beam waist

SS304、铜、IN718 和 TBC 的体积去除率和激光功率的关系如图 6 所示。可以看到,铜和 SS304 拥有最低的体积去除率,而 TBC 最易于加工。一般地,随着功率的增加,体积去除率增加。与 TBC 和 IN718 相比,SS304 和铜的体积去除率与激光功率的比例关系更为明显。然而,加工 TBC 时激光功率达 7 W,才能使体积去除率达到最大值,而对于 IN718,激光功率需要 9 W。

离焦量的情况下。在单个沟槽加工时,小离焦的结果总是形成突起和重铸层,因为激光能量密度高,在深而窄的沟槽中材料大量熔化喷出后形成突起。此外,单沟槽由于锥形壁限制了最大深度,这导致激光吸收率较低。对于去除大块体积时,进行相邻沟槽之间的激光重叠扫描,可获得较高的体积去除率和较低的表面粗糙度。

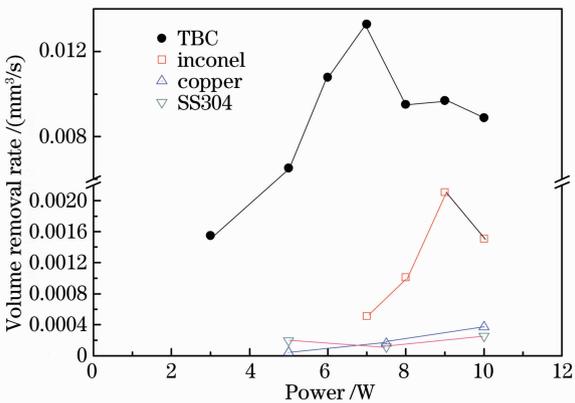


图 6 4 种材料的体积去除率随激光功率的变化

Fig. 6 Material volume removal rate plotted versus laser power for four materials

实验中通过激光扫描矩形(1 mm×2 mm)去除大块体积,来研究光栅扫描参数。给定扫描速度和重复次数,对深度和表面粗糙度进行了测定。图 7 所示为栅格线间距(偏移)对体积去除率[图 7(a)]和表面粗糙度[图 7(b)]的影响。IN718 的最大体积去除速率发生在间距为 20 μm 时,并且体积去除率不随间距发生显著改变。但是,对于 TBC,体积去除率随着栅格线间距的增加而增加。

虽然栅格线间距的增加可能会导致体积去除率的增加,但是表面粗糙度也相应地增加。如图 7(b)所示,TBC 加工后的线性轮廓粗糙度大于 IN718。图 8 是 IN718 激光单方向的光栅扫描后的表面形貌三维显微镜测定,1 mm×2 mm 区域粗糙度  $R_a = 5.96 \mu\text{m}$ 。图 9 表示经过优化加工参数后纳秒脉冲光纤激光在 TBC 涂层上加工的 45°气膜冷却孔,测得的区域粗糙度  $R_a = 7.32 \mu\text{m}$ 。

对于大块体积去除实验,体积去除率与激光功率的关系与单一沟槽的加工稍有不同,特别是在小

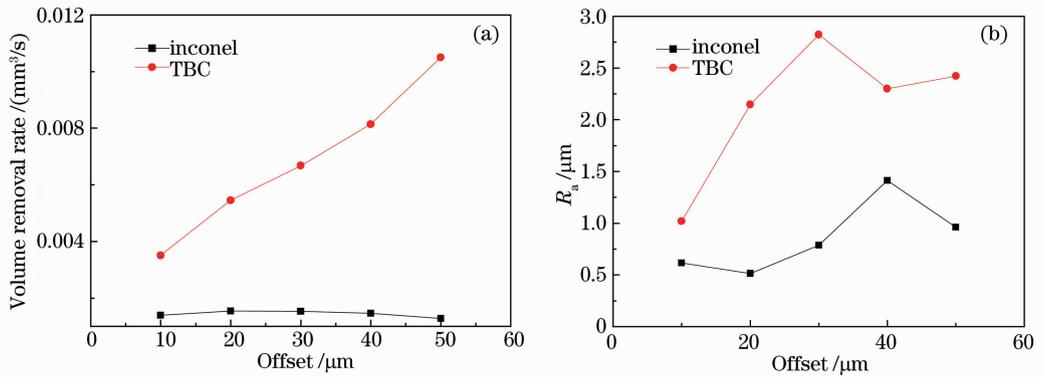


图 7 (a) 大块体积去除时体积去除率和(b) 加工后表面粗糙度与扫描线的偏移量的关系  
Fig. 7 Relationships between (a) bulk material removal rate and (b) machined surface roughness and scanning line offset

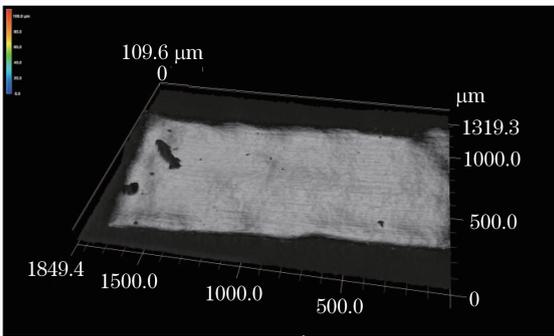


图 8 IN718 激光光栅扫描后的三维显微镜测定表面形貌 ( $R_a = 5.96 \mu\text{m}$ )

Fig. 8 Surface morphology of IN718 machined by laser raster scanning measured by three-dimensional microscope ( $R_a = 5.96 \mu\text{m}$ )

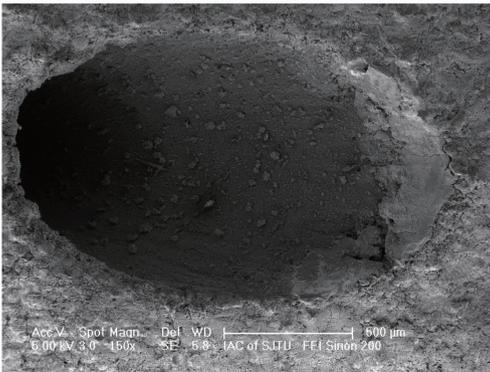


图 9 1 ns 光纤激光在 TBC 涂层上加工的 45° 气膜冷却孔 ( $R_a = 7.32 \mu\text{m}$ )

Fig. 9 45° film cooling hole machined on TBC coating by 1 ns pulsed fiber laser ( $R_a = 7.32 \mu\text{m}$ )

## 4 结 论

以使用工业级的纳秒脉冲光纤激光在多层陶瓷/金属(TBC 涂层的高温合金)上进行精密激光微加工为目标,建立了数值模拟和实验方法,以

SS304、铜、IN718 和 TBC 涂层为样品,研究了激光参数和加工几何尺寸的关系。对激光加工参数在最大材料去除率和加工质量方面进行了优化。测量了沟槽的宽度、深度和横截面轮廓,来研究能量密度、离焦量、光斑半径的影响,得出以下结论:

- 1) 沟槽深度与激光的峰值能量密度成对数关系;
- 2) 加工 SS304 和铜的体积去除率达到最大值时,激光光斑半径分别为  $30 \mu\text{m}$  和  $50 \mu\text{m}$ 。体积去除率和光斑半径的关系在有限元模型与实验结果中遵循相同的变化趋势;

- 3) 经过激光扫描后,IN718 的加工表面粗糙度  $R_a = 5.96 \mu\text{m}$ , TBC 涂层表面的粗糙度  $R_a = 7.32 \mu\text{m}$ 。

致谢 感谢丁佳怡、邵欣央、蔡迅捷、王近知、许涛、李冉、黄逸川在采集实验结果数据上的帮助。

## 参 考 文 献

- 1 D K Das, T M Pollock. Femtosecond laser machining of cooling holes in thermal barrier coated CMSX4 superalloy[J]. J Mater Proc Tech, 2009, 209(15-16): 5661-5668.
- 2 M Naeem, M Wakeham. Laser percussion drilling of coated and uncoated aerospace materials with a high beam quality and high peak power lamp pumped pulsed Nd: YAG laser[C]. Proceedings of ICALAO, 2010: 111-120.
- 3 A Corcoran, L Sexton, B Seaman, et al.. The laser drilling of multi-layer aerospace material systems[J]. J Mater Proc Tech, 2002, 123(1): 100-106.
- 4 H K Sezer, L Li, S Leigh. Twin gas jet-assisted laser drilling through thermal barrier-coated nickel alloy substrates [J]. International J Machine Tools & Manufacture, 2009, 49(14): 1126-1135.
- 5 H K Sezer, L Li, M Schimdt, et al.. Effect of beam angle on HAZ, recast and oxide layer characteristics in laser drilling of TBC nickel superalloys[J]. International J Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(15): 1972-1982.
- 6 H K Sezer, A J Pinkerton, Lin Li, et al.. An investigation into delamination mechanism in inclined laser drilling of thermal barrier coated aerospace superalloys[J]. J Laser Application, 2005, 17(4): 225-234.
- 7 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, 2006, 430(1-2): 203-207.

8 D K Das, T M Pollock. Femtosecond laser machining of cooling holes in thermal barrier coated CMSX4 superalloy[J]. J Materials Processing Technology, 2009, 209(15-16): 5661-5668.  
 9 V Semak, A. Matsunawa. The role of recoil pressure in energy balance during laser materials processing[J]. J Phys D: Appl Phys, 1997, 30(18): 2541-2552.

10 G Raciukaitis, M Brikas, M Gedvilas. Efficiency aspects in processing of metals with high-repetition-rate ultra-short-pulse lasers[C]. Proceedings of ICALEO, 2008. 176-184.  
 11 J Furmanski, A M Rubenchik, M D Shirik. Deterministic processing of alumina with ultrashort laser pulses[J]. J Appl Phys, 2007, 102(7): 073112.

栏目编辑:宋梅梅

## 115 W、20 ps 全光纤结构超短脉冲掺铥光纤激光器

近几年,随着光纤激光技术的飞速发展与日益急迫的应用需求,2.0  $\mu\text{m}$  超短脉冲掺铥光纤激光器的研究取得了较大的进展和突破。比如,被动锁模掺铥光纤振荡器输出最窄脉冲宽度达到了 119 fs;最高单脉冲能量达到了 8.75 nJ;超短脉冲掺铥光纤放大器最高输出单脉冲能量达到了 156  $\mu\text{J}$ ;2.0  $\mu\text{m}$  超短脉冲掺铥光纤激光器也从原来的空间结构开始向全光纤结构转变,以及从实验演示逐步向工业实际应用转变,这既归因于新型增益光纤(掺铥石英光纤、铥钬共掺石英光纤以及掺铥石英玻璃光纤等)、新型色散补偿元件(啁啾布拉格光栅、小芯径色散补偿光纤以及空心光子晶体光纤等)、以及新型锁模材料和器件(半导体可饱和吸收镜、碳纳米管、石墨烯以及氧化石墨烯可饱和吸收体等)的出现,也归因于超短脉冲光纤激光产生及放大技术的进一步成熟。

最近,本课题组研制出基于全光纤主振荡功率放大(MOPA)结构的皮秒脉冲掺铥光纤激光器平均输出功率为 115 W。实验结构原理如图 1(a)所示,该高功率皮秒脉冲掺铥光纤激光器由种子源和三级掺铥光纤放大器组成。激光种子源的最大平均

输出功率为 25 mW,重复频率为 480 MHz,脉冲宽度约为 22 ps,激光中心波长为 1963 nm,3 dB 光谱带宽为 0.25 nm。进行功率放大前种子源的输出功率被两级掺铥光纤放大器放大了 4.5 W,掺铥光纤功率放大器主要包括多模半导体激光器、抽运合束器、双包层掺铥光纤、抽运剥离器等。其中,25/400  $\mu\text{m}$ 的大芯径双包层掺铥光纤作为增益介质,中心波长为 793 nm 的高功率多模半导体激光器作为抽运源,抽运源总的最大输出功率为 200 W。如图 1(b)所示,最后一级掺铥光纤功率放大器的平均输出功率与抽运功率几乎呈线性增加,在抽运功率增加到 195.5 W 时,最大平均输出功率达到了 115 W,相应的激光斜率效率为 60%。如图 1(c)所示,激光脉冲宽度为 20 ps,相应的峰值功率为 12 kW,激光中心波长为 1963 nm。实验结果表明,2.0  $\mu\text{m}$  超短脉冲掺铥光纤激光器可以实现百瓦级高平均功率输出,该百瓦级皮秒脉冲掺铥光纤激光器可作为理想的抽运源抽运非线性光学晶体、中红外拉曼光纤、中红外高非线性光纤以实现高功率的中红外(2.0~5.0  $\mu\text{m}$ )激光输出。

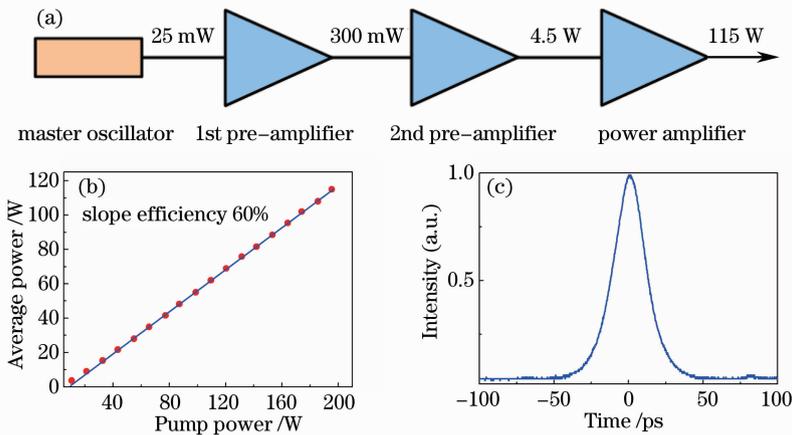


图 1 (a) 实验装置图; (b) 平均输出功率; (c) 激光脉冲宽度

Fig. 1 (a) Schematic setup of fiber laser; (b) average output power; (c) pulse width of laser

刘 江 刘 昆 谭方舟 王 璞\*

(北京工业大学激光工程研究院, 国家产学研激光技术中心, 北京 100124)

\* E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn

收稿日期: 2013-05-06; 收到修改稿日期: 2013-05-15