

# 高 峰 值 功 率 自 准 直 脉 冲 Nd:YAG 激 光 加 工 无 锥 度 直 孔 研 究

姜 梦 华 李 强 雷 旬 王 金 国 惠 勇 凌

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要** 利用改进的脉冲 Nd:YAG 激光器,对激光冲击打孔加工无锥度直孔进行了实验研究。在优化激光脉冲峰值功率和脉冲能量、辅助气压参数的基础上,通过比较实验证明,能量递增组合脉冲是实现无锥度直孔加工的有效方式,增加脉冲组合中脉冲的个数可加工出负锥度的孔;激光焦点位置是影响孔锥度的重要因素,焦点位于材料表面上方 1.1~1.7 mm 有利于减小锥度。在厚度为 1.5,3.0 mm 的镍基高温合金材料上,获得孔径分别为 480,510  $\mu\text{m}$  的直孔,重复打孔孔径误差约 30  $\mu\text{m}$ ,孔锥度 $<1\%$ 。给出了可适用于激光冲击打孔的直孔加工方法和脉冲激光器,并可用于其他材料的加工。

**关键词** 激光技术;激光冲击打孔;孔锥度;脉冲 Nd:YAG 激光器;热效应

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.1003004

## Study on Producing Non-Tapered Holes with Adaptively Collimating High Peak Power Pulsed Nd:YAG Laser

Jiang Menghua Li Qiang Lei Hong Wang Jinguo Hui Yongling

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** Experiments of laser percussion drilling are carried out on nickel-based superalloy using a modified pulsed Nd:YAG laser. Peak power, pulse energy and assist gas pressure are optimized experimentally. Experimental results demonstrate that a pulse combination with increasing pulse energy is an effective method to produce non-tapered holes. Even negative taper holes can be produced through increasing the number of pulses in the pulse combination. Focal position is an important factor that affects the taper of holes, and 1.1~1.7 mm above the surface of the sample helps reducing the taper of holes. Non-tapered holes with diameter of 480 and 510  $\mu\text{m}$  are drilled on nickel-based superalloy with thickness of 1.5 and 3.0 mm. Variation of hole diameter is about 30  $\mu\text{m}$ , and hole taper is less than 1%. A feasible method of producing parallel holes and an applied Nd:YAG laser have been presented for laser percussion drilling, may also be used on other materials.

**Key words** laser technique; laser percussion drilling; hole taper; pulsed Nd:YAG laser; thermal lens effect

**OCIS codes** 140.3530; 140.3538; 140.6810; 350.3390; 350.3850

## 1 引 言

激光打孔加工效率高,可以实现高纵横比加工,在航空航天、汽车行业等有广泛的应用需求,例如可应用在航空发动机气膜冷却、机翼空气动力学性能改善等方面<sup>[1~3]</sup>。目前激光打孔方式主要有旋切法

和激光冲击打孔两种,旋切法是以激光束在工件表面沿圆周移动或者旋转工件实现圆孔加工<sup>[4]</sup>;激光冲击打孔直接以聚焦激光束照射工件加工圆孔,加工耗时少,效率高,但加工的孔有一定的锥度。打孔质量的指标包括:孔锥度、孔圆度、再铸层、微裂纹

收稿日期: 2011-04-01; 收到修改稿日期: 2011-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(61040065)和北京市自然科学基金(4112005)资助课题。

作者简介: 姜梦华(1981—),男,博士研究生,主要从事高功率固体激光技术方面的研究。

E-mail: jmenghua@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 李强(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事高功率固体激光技术与加工系统等方面的研究。

E-mail: ncltq@bjut.edu.cn

等。孔锥度是激光打孔的关键指标,航空气膜冷却孔对孔锥度要求高,要求无锥度的直孔,孔的锥度不仅影响气流特性,甚至影响零件的使用寿命<sup>[5]</sup>。

国内外围绕激光冲击打孔减小孔锥度的研究,主要通过改变工艺参数、脉冲时间形状减小孔锥度<sup>[6~9]</sup>。其中,通过控制脉冲时间形状减小孔锥度,孔锥度仅能控制在 15%~20%<sup>[10]</sup>。本文利用改进的脉冲 Nd:YAG 激光器,研究了脉冲组合方式、峰值功率、脉冲能量、激光焦点位置、组合脉冲个数、加工透镜焦距等因素对孔锥度的影响,实现了不同厚度的镍基高温合金材料直孔及负锥度孔加工。

## 2 高 峰 值 功 率 自 准 直 脉 冲 Nd:YAG 激 光 器

采用激光冲击打孔方式加工直孔,对激光脉冲有较高的要求,为保证一定的气化熔化比,减少再铸层中的微裂纹,要求激光脉冲峰值功率高,一般要求 16~20 kW<sup>[11]</sup>;为提高加工速度和效率,在高峰值功率条件下,要求尽可能高的激光脉冲能量;同时为实现组合脉冲打孔,要求不同功率下光束具有稳定的束腰大小和发散角,而普通的脉冲激光器束腰和发散角随输出功率变化,难以达到要求。

针对这些要求,通过改进激光器设计方案,采用振荡-放大结构,利用放大级晶体棒的热效应自适应补偿输出光束的发散特性,使振荡级与放大级晶体棒的热焦距在较宽范围内匹配,实现不同功率下输出光束束腰大小稳定、自准直。

激光器结构示意图如图 1 所示。

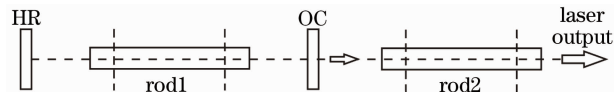


图 1 激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic setup of the laser

晶体棒 1、全反镜(HR)、输出耦合镜(OC)构成振荡级谐振腔,谐振腔采用对称平平腔结构,这种结构具有大的模体积,并且激光器稳定工作范围大。放置在腔外的激光棒 2 作为放大级。

振荡级和放大级采用标准化单腔模块,双氙灯抽运陶瓷漫反射腔, Nd:YAG 晶体棒尺寸为  $\phi 8 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ ,掺杂原子数分数为 1%,分别对棒 1、棒 2 的抽运功率进行控制,使整个抽运范围内棒 2 热焦距等于棒 1 的 2 倍<sup>[12,13]</sup>。振荡级谐振腔腔长  $L=640 \text{ mm}$ ,腔镜透射率  $T=70\%$ 。

测量输出光强分布如图 2 所示,不同输出功率

下的束腰大小如图 3 所示。

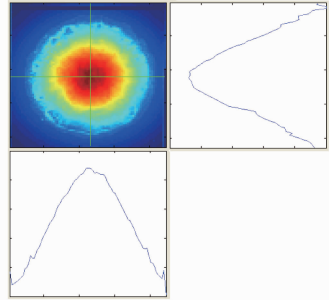


图 2 激光光束强度分布

Fig. 2 Experimentally measured intensity distribution of output laser beam

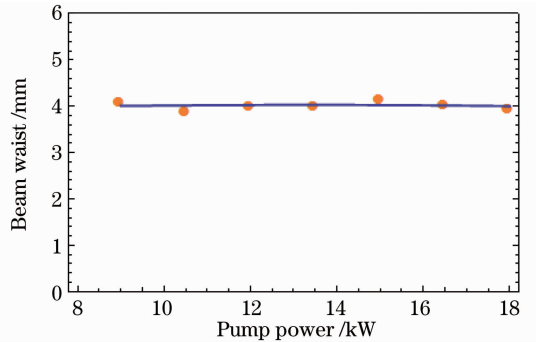


图 3 不同抽运功率下激光器输出光束的束腰大小  
Fig. 3 Experimentally measured beam waist of output laser beam with different pump powers

改变激光器运行参数(脉冲宽度、脉冲频率、工作电压等),可以实现不同峰值功率、脉冲能量的激光输出,激光器性能参数如表 1 所示。

表 1 激光器性能参数

Table 1 Performance data of the laser

Pulse energy / J	Peak power / kW	Pulse width / ms	Average power / W
0~20	0~20	0.3~1.0	0~700

## 3 孔 锥 度 影 响 因 素 的 实 验 研 究 及 结 果 分 析

对厚度为 1.5, 3.0 mm 的镍基高温合金材料进行了激光冲击打孔实验,通过实验研究脉冲组合方式、峰值功率和脉冲能量、激光焦点位置、组合脉冲个数、加工透镜焦距等因素对孔锥度的影响。由于激光器抽运源工作参数限制,在最高峰值功率 20 kW 时,脉冲频率  $\leq 20 \text{ Hz}$ ,因而实验中脉冲频率设置为 20 Hz。

孔的锥度定义为

$$r_{\text{taper}} = \frac{d_{\text{entrance}} - d_{\text{exit}}}{2h} \times 100\%, \quad (1)$$

式中  $d_{\text{entrance}}$  表示材料上表面孔的直径;  $d_{\text{exit}}$  表示材料下表面孔的直径;  $h$  表示材料厚度。

激光冲击打孔通常使用氧气作为加工辅助气体,与氮气、压缩空气相比,氧气更有利于材料的去除。Kuhn 等<sup>[14]</sup>认为较低的辅助气体气压利于直孔加工,高辅助气体气压会抑制后续材料飞出,辅助气体气压在 0.1 MPa 时孔的质量最好。但在实验中发现,辅助气压过低不利于保护加工镜片的溅射伤害,这在工业应用中是特别需要关注的问题。综合考虑上述因素,设置辅助气体气压为 0.3 MPa。

### 3.1 脉冲组合方式的影响

为研究脉冲组合方式对孔锥度的影响,实验中比较了 3 种组合方式:单一能量脉冲组合、能量递增脉冲组合、能量递减脉冲组合,3 种脉冲组合示意图如图 4 所示。

实验中加工材料为镍基高温合金,厚度 1.5 mm;加工孔径要求为 0.5 mm;加工参数设置

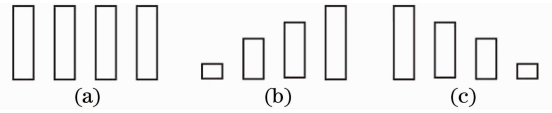


图 4 组合脉冲示意图。(a)单一能量脉冲组合; (b)能量递增脉冲组合;(c)能量递减脉冲组合

Fig. 4 Schematic of pulse combinations. (a) Pulse combination of same energies; (b) pulse combination of linearly increasing energies; (c) pulse combination of linearly decreasing energies

为:聚焦透镜焦距 100 mm,焦点位于材料表面上方 1.5 mm;加工辅助气体为氧气,气压 0.3 MPa;加工头喷嘴孔径 1.5 mm,喷嘴距离材料表面 3 mm<sup>[15]</sup>。采用脉冲宽度 0.5 ms、重复频率 20 Hz、最高能量 10 J 的激光脉冲,按图 4 的组合方式分别进行冲击打孔实验,每个脉冲组合包含 4 个脉冲,能量递增脉冲组合中脉冲能量按 20% 递增,能量递减脉冲组合中脉冲能量按 20% 递减。实验结果如图 5 所示。

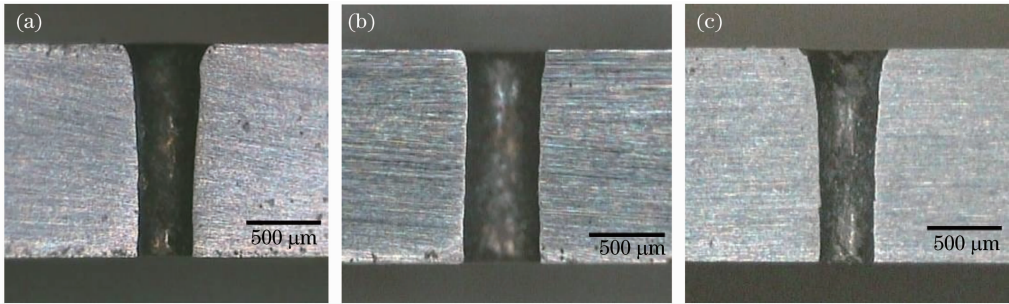


图 5 不同脉冲组合打孔截面图。(a)单一能量脉冲组合;(b)能量递增脉冲组合;(c)能量递减脉冲组合

Fig. 5 Holes drilled by different pulse combinations. (a) Pulse combination of same energy; (b) pulse combination of linearly increasing energy; (c) pulse combination of linearly decreasing energy

比较图 5 的打孔结果,尽管对参数进行了优化设置,但单一能量脉冲组合和能量递减脉冲组合加工出的孔锥度比较明显,分别为 6.7% 和 7.0%,而能量递增脉冲组合加工出的孔锥度很小,为 0.33%,近似为直孔。这是由于其初始脉冲能量较低,使材料上表面孔径小,随着后续脉冲能量逐渐增加,孔的深度加深,熔化飞出的金属材料侵蚀上一个脉冲加工出的孔壁,将之前的孔径扩大,最后,材料被击穿,熔化的金属材料由下表面飞出。与其他两种组合脉冲相比,能量递增的组合脉冲由下表面出孔排出熔渣更多。因而,加工出的孔锥度更小。

为研究能量递增脉冲组合对不同厚度材料的打孔效果,对 3 mm 镍基高温合金材料进行了激光冲击打孔。加工参数设置为:激光焦点位于材料表面上方 1.5 mm,辅助气体气压为 0.3 MPa;喷嘴距离材料表面 3 mm;脉冲频率 20 Hz,脉冲宽度 0.6 ms,

每个脉冲组合包含 8 个脉冲,脉冲能量按 10% 递增,最高脉冲能量 12 J。在此加工参数下获得小锥度的直孔,孔锥度 0.33%,打孔结果如图 6 所示。结果表明,能量递增脉冲组合是加工无锥度直孔的有效方式,随着材料厚度增加,需增加组合脉冲个数和组合脉冲能量。

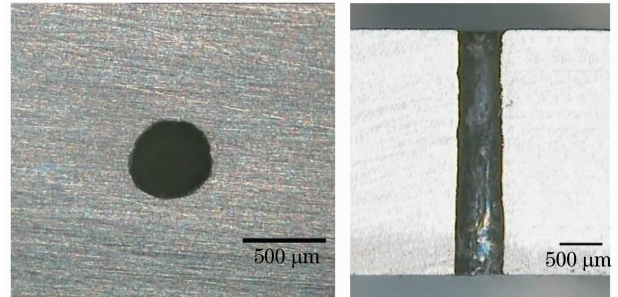


图 6 3 mm 厚材料的激光冲击打孔

Fig. 6 Holes of 3 mm sample

### 3.2 峰值功率和脉冲能量的影响

为研究峰值功率和脉冲能量的影响,分别进行不同峰值功率和脉冲能量的激光打孔实验,实验中加工材料厚度 1.5 mm,其他加工参数设置为:聚焦透镜焦距 100 mm,焦点位于材料表面上方 1.5 mm;辅助气体气压为 0.3 MPa;加工头喷嘴孔径 1.5 mm,喷嘴距离材料表面 3 mm;脉冲频率 20 Hz,能量递增脉冲组合,每个脉冲组合包含 4 个脉冲,脉冲能量按 20% 递增。

#### 3.2.1 不同峰值功率对孔锥度的影响

最高脉冲能量设置为 8 J 不变,改变脉冲宽度和激光器工作电压实现不同峰值功率激光输出。每组参数进行 3 次打孔,平均入孔孔径和锥度如表 2 所示。由表 2 可以发现,当激光脉冲峰值功率高于 16 kW 时,气化融化比高,易于减小加工孔的锥度,孔锥度 < 1%。

#### 3.2.2 不同脉冲能量对孔锥度的影响

最高峰值功率设置为 16 kW 不变,只改变脉冲宽度实现不同脉冲能量激光输出。每组参数进行 3 次打孔,平均入孔孔径和锥度如表 3 所示。由打孔结果可知,在高峰值功率条件下,较低的脉冲能量可减小加工孔径的大小,而不影响孔的锥度。

表 2 不同峰值功率下的打孔结果

Table 2 Experiments of different peak powers and the results

Pulse width /ms	Peak power /kW	Average entrance diameter /mm	Average hole taper /%
1.0	8.00	0.42	2.67
0.9	8.89	0.42	2.67
0.8	10.00	0.43	2.33
0.7	11.43	0.42	2.00
0.6	13.33	0.44	2.00
0.5	16.00	0.44	0
0.4	20.00	0.45	0.33

表 3 不同脉冲能量下的打孔结果

Table 3 Experiments of different pulse energies and the results

Pulse width /ms	Pulse energy /J	Average entrance diameter /mm	Average hole taper /%
0.4	6.4	0.42	0.33
0.5	8.0	0.44	0
0.6	9.6	0.47	-0.33
0.7	11.2	0.51	0.33
0.8	12.8	0.55	0.67

### 3.3 激光焦点位置的影响

为研究激光焦点位置对孔锥度的影响,改变焦

点位置进行激光打孔。实验中加工材料厚度 1.5 mm,其他加工参数设置为:聚焦透镜焦距 100 mm;辅助气体气压为 0.3 MPa;加工头喷嘴孔径 1.5 mm,喷嘴距离材料表面 3 mm;脉冲宽度 0.5 ms,脉冲频率 20 Hz,能量递增脉冲组合,每个脉冲组合包含 4 个脉冲,脉冲能量按 20% 递增,最高脉冲能量 10 J。每个焦点位置进行 3 次打孔,入孔、出孔平均直径和孔锥度随焦点位置变化如表 4 所示。表中焦点位置的零点表示焦点位于材料表面,焦点位置位于材料表面上方为正值,位于材料表面下方为负值。

表 4 平均入射孔径和孔锥度与激光焦点位置的关系

Table 4 Average entrance diameter and hole taper versus focal position

Focal position /mm	Average entrance diameter /mm	Average exit diameter /mm	Average hole taper /%
-0.1	0.44	0.25	6.33
0.1	0.41	0.30	3.67
0.3	0.40	0.35	1.67
0.5	0.40	0.36	1.33
0.7	0.41	0.38	1.00
0.9	0.43	0.40	1.00
1.1	0.45	0.43	0.67
1.3	0.47	0.45	0.67
1.5	0.48	0.49	-0.33
1.7	0.54	0.52	0.67
1.9	0.60	0.53	2.33
2.1	0.65	0.55	3.33
2.3	0.68	0.54	4.67

由表 4 可以发现,激光焦点位于材料表面上方 1.1~1.7 mm 时孔锥度很小 (< 1%)。这是因为激光焦点位于材料表面上方时,脉冲能量大多用于气化材料,产生的融化材料少,加工过程关系可表示为<sup>[16]</sup>

$$C = \frac{mv}{E_{\text{optical}} + E_{\text{thermal}} + mv^2/2}. \quad (2)$$

式中  $C$  表示加工过程效率;  $E_{\text{optical}}$  表示光学过程能量,例如反射、吸收和散射;  $E_{\text{thermal}}$  表示热过程能量;  $m$  和  $v$  分别表示喷射物质量和速度。

这时动能项小,激光能量产生的冲量大,过程效率提高,利于材料的去除,使出孔孔径变大。而焦点位于材料表面下方时,产生的融化材料较多,使出孔孔径变小。因而,激光焦点位于材料表面上方的合适位置(1.1~1.7 mm),加工出的孔近似为直孔。

### 3.4 组合脉冲个数的影响

采用不同组合脉冲个数进行打孔,进一步研究

能量递增脉冲组合中脉冲个数对冲击打孔的影响。实验中加工材料厚度 1.5 mm,其他加工参数设置为:聚焦透镜焦距 100 mm,焦点位于材料表面上方 1.5 mm;辅助气体气压为 0.3 MPa;加工头喷嘴孔径 1.5 mm,喷嘴距离材料表面 3 mm;脉冲宽度 0.6 ms,脉冲频率 20 Hz,组合中脉冲个数依次设置为 1~8 个脉冲,初始脉冲能量 5 J,脉冲能量以 1 J 递增,最高脉冲能量 12 J。

入孔和出孔直径随脉冲个数的变化如图 7 所示。从图中可以看出,前两个脉冲组合未打穿材料,材料上表面的孔径小于打孔完成后的最终孔径。进一步增加脉冲个数,材料被打穿,上表面入孔和下表面出孔同时扩大,在打穿材料后,继续增加的激光脉冲对出孔孔径影响比入孔孔径明显,直到孔径大小不随脉冲个数增加而增加。

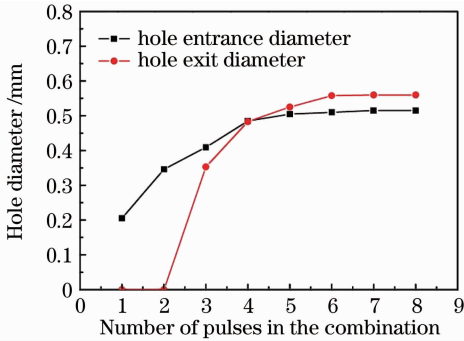


图 7 材料上下表面孔径大小随组合脉冲个数的变化

Fig. 7 Hole entrance and exit diameter versus number of pulses in the combination

实验结果表明,通过控制脉冲个数,不仅可以实现直孔加工,还可以实现入孔小、出孔大的负锥度孔加工。图 8 为采用 6 个脉冲的脉冲组合加工出的负锥度孔。

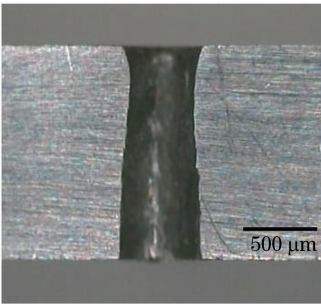


图 8 负锥度孔

Fig. 8 Hole of negative taper

### 3.5 加工透镜焦距的影响

加工透镜焦距是激光加工中的重要参数,影响聚焦光斑大小、激光功率密度、光束发散角、束腰长度,进而影响加工效果。为研究透镜焦距对孔锥度

的影响,分别使用了焦距为 80,100,120 mm 的 3 种聚焦透镜进行打孔,实验中加工材料厚度 1.5 mm,其他加工参数设置为:辅助气体气压为 0.3 MPa;加工头喷嘴孔径 1.5 mm,喷嘴距离材料表面 3 mm;脉冲宽度 0.5 ms;脉冲频率 20 Hz;能量递增脉冲组合,每个脉冲组合包含 4 个脉冲,脉冲能量按 20% 递增,最高脉冲能量 10 J。打孔结果如表 5 所示。

表 5 不同焦距透镜的激光冲击打孔参数和结果

Table 5 Experiments of different focal lengths and the results

	$F=80$ mm	$F=100$ mm	$F=120$ mm
Focal position above surface /mm	1.2	1.5	1.7
Average entrance diameter /mm	0.43	0.48	0.57
Average exit diameter /mm	0.42	0.48	0.57
Hole taper /%	0.33	0	0

对于上述 3 种不同焦距的加工透镜,透镜焦距主要影响孔径大小,而不影响孔的锥度,选择合适的焦点位置都可以实现无锥度打孔。在航空发动机气膜冷却打孔中,通常要求孔径在 0.5~0.8 mm,因而可选择焦距为 100 mm 和 120 mm 的加工聚焦镜。

## 4 重复打孔稳定性研究

为研究重复打孔精度和孔径误差范围,对 1.5 mm 镍基高温合金材料进行了重复打孔,加工参数设置为:聚焦透镜焦距 100 mm,焦点位于材料表面上方 1.5 mm;辅助气体气压为 0.3 MPa;加工头喷嘴孔径 1.5 mm,喷嘴距离材料表面 3 mm;脉冲宽度 0.5 ms,脉冲频率 20 Hz,能量递增脉冲组合,每个脉冲组合包含 4 个脉冲,脉冲能量按 20% 递增,最高

表 6 多次打孔的入孔孔径和锥度

Table 6 Experiment of hole variation

	Entrance diameter /mm	Exit diameter /mm	Hole taper /%
1	0.46	0.45	0.33
2	0.47	0.45	0.67
3	0.49	0.48	0.33
4	0.48	0.49	-0.33
5	0.47	0.46	0.33
6	0.51	0.50	0.33
7	0.47	0.48	-0.33
8	0.46	0.46	0
9	0.49	0.50	-0.33
10	0.47	0.49	-0.67
Average	0.477	0.476	—

脉冲能量10 J。任意选取其中的 10 个孔,测量其孔径和孔锥度如表 6 所示。材料上表面孔径最大 0.51 mm,最小 0.46 mm,入孔孔径变化范围  $\pm 33 \mu\text{m}$ ,变化量  $\pm 7\%$ ;下表面出孔孔径最大 0.50 mm,最小 0.45 mm,出孔孔径变化范围  $\pm 26 \mu\text{m}$ ,变化量  $\pm 5\%$ ;锥度变化  $< 1\%$ 。孔径和锥

度变化量小,近似为直孔,达到实际应用要求。

孔的形貌如图 9、10 所示。可以发现,部分孔边缘圆度有变化,这是由于材料融化飞出的过程中,侵蚀孔边缘所造成的,在激光冲击打孔中很容易出现,通常控制在一定范围之内(例如 0.05 mm)就可以达到工艺要求。

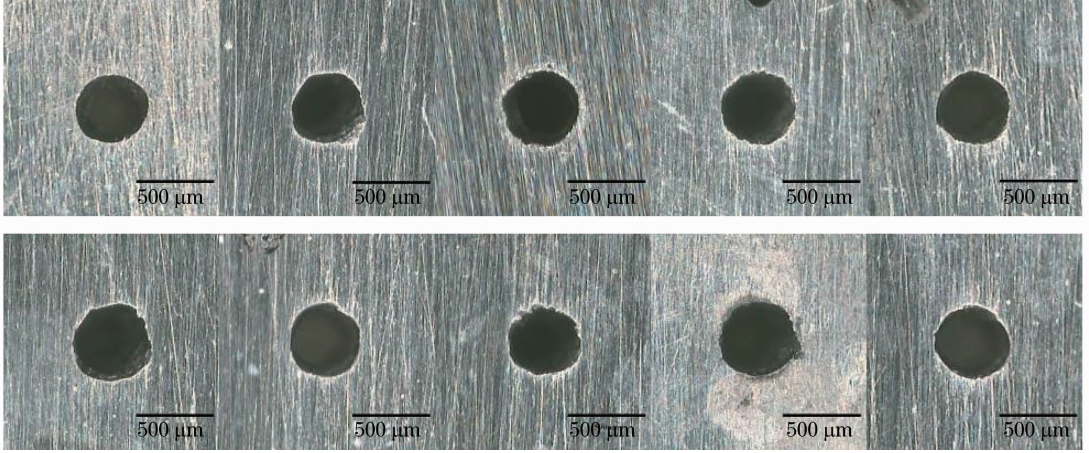


图 9 材料上表面入孔

Fig. 9 Entrance holes of the material surface

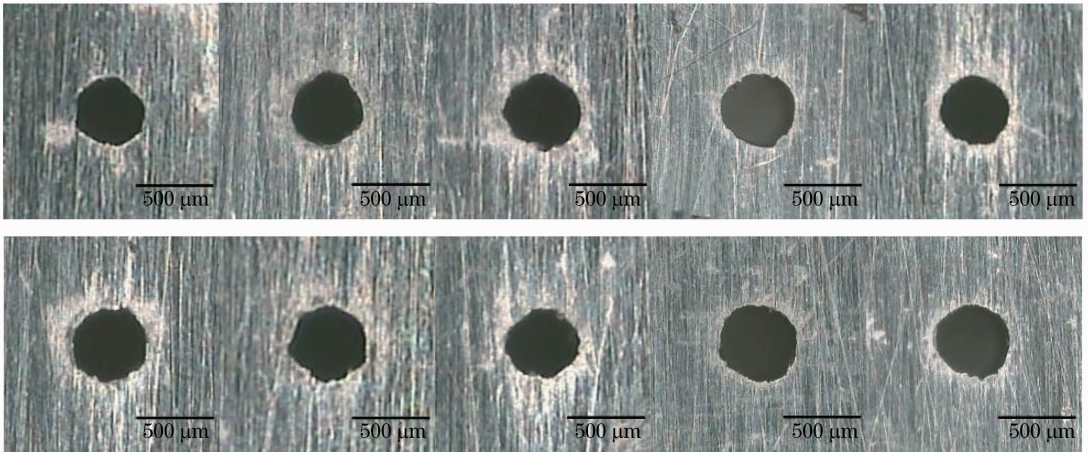


图 10 材料下表面出孔

Fig. 10 Exit holes of the material surface

## 5 结 论

通过实验研究了激光冲击打孔的几种因素对孔锥度的影响,研究表明,脉冲组合方式、激光焦点位置、组合脉冲个数是影响孔锥度的主要因素;采用能量递增的组合脉冲,激光焦点位于材料表面上方 1.1~1.7 mm,通过控制脉冲组合个数,不仅可以实现直孔加工,而且能实现负锥度孔的加工。在高峰值功率条件下,采用较低的脉冲能量或者较短焦距的加工透镜可实现较小的加工孔径而不影响锥度。

在厚度为 1.5 mm 和 3.0 mm 的镍基高温合金材料上,分别获得了孔径为 480,510  $\mu\text{m}$  的直孔,重复打孔孔径误差约 30  $\mu\text{m}$ ,孔锥度  $< 1\%$ 。

为激光冲击打孔给出了一种实用的直孔加工方法和打孔用脉冲激光器。

## 参 考 文 献

- 1 G. Overton, S. G. Anderson. Laser Marketplace 2009: Photonics enters a period of high anxiety[J]. *Laser Focus World*, 2009, 45(1): 54~78
- 2 A. Giering, M. Beck, J. Bahnmueller. Laser drilling of aerospace and automotive components[C]. Proc. of ICALEO'99, 1999:

C80-87

- 3 卢飞星. 激光加工在工业制造业中的市场分析[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(9): 24~28
- 4 Chen Genyu, Mei Lifang, Zhang Mingjun *et al.*. Application and research of laser processing automobile body manufacturing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(9): 17~23  
陈根余, 梅丽芳, 张明军等. 激光焊接、切割在汽车制造中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(9): 17~23
- 5 P. J. Dismile, C. W. Fox, C. P. Lee *et al.*. An experimental investigation of the airflow characteristics of laser drilled holes [J]. *J. Laser Applications*, 1998, **10**(2): 78~84
- 6 K. Hamoudi Walid, G. Kasheed Bassam. Parameters affecting Nd:YAG laser drilling of metals[J]. *International Journal for Joining of Materials*, 1995, **7**(2-3): 63~69
- 7 B. S. Yilbas. Parametric study to improve laser hole drilling process[J]. *J. Mat. Proc. Technol.*, 1997, **70**(1-3): 264~273
- 8 D. K. Y. Low, L. Li, A. G. Corfe *et al.*. Taper control during laser percussion drilling of NIMONIC alloy using sequential pulse delivery pattern control (PSPDPC)[C]. ICALEO, 1999. 11~19
- 9 P. W. French, M. Naem, M. Sharp *et al.*. Investigation into the influence of pulse shaping on drilling efficiency[C]. ICALEO 2006, **599**: 310~316
- 10 L. Li, D. K. Y. Low, M. Ghoreshi *et al.*. Hole taper characterization and control in laser percussion drilling[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2002, **51**(1): 153~156
- 11 A. Corcoran, L. Sexton, B. Seaman *et al.*. The laser drilling of multi-layer aerospace material systems[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, **123**(1): 100~106
- 12 Li Qiang, Jiang Menghua, Lei Hong *et al.*. High-power laser processing system for industry application[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1847~1852  
李强, 姜梦华, 雷旬等. 工业用大功率固体激光加工系统[J]. 中国激光, 2008, **35**(11): 1847~1852
- 13 Li Qiang, Wang Zhimin, Wang Zhiyong *et al.*. Thermal lens focal length measurement of high power lamp pumped CW Nd:YAG laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9): 1117~1120  
李强, 王志敏, 王智勇等. 大功率连续 Nd:YAG 激光器热透镜焦距测量[J]. 中国激光, 2004, **31**(9): 1117~1120
- 14 A. Kuhn, P. French, D. P. Hand *et al.*. Preparation of fiber optics for the delivery of high-energy high-beam-quality Nd:YAG laser pulses[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(33): 6136~6143
- 15 Dang Dongxian, Sheng Xiaojun, Hu Jun *et al.*. Effect of standoff distance on flow field of assist gas in cutting slot in laser cutting [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2625~2631  
党东显, 盛晓军, 胡俊等. 喷嘴工件距对激光切缝中气体流场的影响[J]. 中国激光, 2010, **37**(10): 2625~2631
- 16 M. Bass, M. A. Nassar, R. T. Swimm. Impulse coupling to aluminum resulting from Nd: glass laser irradiation induced material removal [J]. *J. Appl. Phys.*, 1987, **61**(3): 1137~1144