

高温合金激光环切打孔技术

钱晓忠^{1, 2}, 张丽^{1*}, 任乃飞¹

¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013;

²无锡职业技术学院, 江苏 无锡 214121

摘要 采用控制变量法对 GH4037 高温合金进行了激光环切打孔实验, 得到了脉冲能量、离焦量、环切速度、环切圈数对小孔锥度和上下孔径的影响规律。结果表明, 脉冲能量和离焦量对小孔孔径和锥度的影响较大, 而环切速度和环切圈数主要影响小孔的形貌。离焦量的绝对值越大, 热影响区、上孔径和锥度也越大; 增加环切圈数及适当的环切速度 (3~6 mm/min) 有助于提升小孔的质量, 使孔口堆积物减少, 且孔的圆度较好。

关键词 激光技术; 激光环切; GH4037 高温合金; 环切速度; 环切圈数

中图分类号 TN24 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.011402

Technology in Laser Trepanning of Superalloys

Qian Xiaozhong^{1, 2}, Zhang Li¹, Ren Naifei¹

¹ School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

² Wuxi Institute of Technology, Wuxi, Jiangsu 214121, China

Abstract The parameter control method is utilized to carry out the experimental investigation on laser trepanning of GH4037 superalloy and the trend in the effects of pulse energy, defocusing amount, trepanning velocity, and trepanning times on the hole taper and entry-exit-hole diameter is achieved. The results indicate that the pulse energy and defocusing amount obviously influence the hole diameter and taper angle, while the trepanning velocity and trepanning times mainly influence the hole morphology. The larger the defocusing amount is, the larger the heat-affected zone, entry hole diameter, and taper angle are. Increasing trepanning times and selecting appropriate trepanning velocity (3–6 mm/min) are helpful to improve the hole quality, reduce the accumulations around hole aperture, and improve the hole roundness.

Key words laser technique; laser trepanning; GH4037 superalloy; trepanning velocity; trepanning times

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 160.390

1 引言

在航空航天领域, 燃气涡轮的重要性居于发动机三大关键部件之首, 航空发动机性能的好坏由燃气涡轮直接决定。在涡轮工作叶片、导向叶片、燃烧室等部件上加工气膜冷却孔, 是降低表面温度、增加涡轮前温度、提高发动机推重比的有效途径。使用气膜冷却技术的单个叶片需要加工数十至数百个气膜孔, 孔径一般在 0.25~1.25 mm 之间, 气膜孔阵空间分布复杂, 加工精度要求高。在高品质微孔加工领域, 传统加工方法有其固有的局限性: 电火花腐蚀加工不能用于非导电材料; 电化学方法打孔效率极低、材料局限性大; 机械钻孔方法加工硬质材料难度大、成本高, 且加工的小孔深径比较小。而激光打孔具有效率高、速度快、成本低、适用范围广等优点, 且几乎不受材料限制^[1-3]。近年来, 对激光打孔的研究侧重于打孔工艺与质量及数值模拟, 打孔工艺优化措施和参数影响的规律相继被提出^[4-6]。

收稿日期: 2016-08-19; **收到修改稿日期:** 2016-09-26; **网络出版日期:** 2016-12-28

基金项目: 国家 973 计划(2011CB013004)、江苏省高校自然科学基金项目(11KJA460003, 15KJD460002)、江苏省科技支撑计划(BE2015037)、江苏省高校“青蓝工程”资助、江苏省“六大人才高峰”项目(2013-ZBZZ-025)

作者简介: 钱晓忠(1973—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事激光先进制造和智能制造数据融合方面的研究。

E-mail: xzhqian@163.com

* 通信联系人。E-mail: 1484919757@qq.com

按照激光作用方式的不同,将激光打孔分为三种^[7]:冲击法、环切法和螺旋法。目前,关于激光环切打孔已有不少研究。Willach等^[8]采用Nd:YAG激光器对2~4 mm厚的涡轮材料进行了激光环切打孔实验,孔径为200 μm,建立了热传导和相变的近似模型,并将仿真结果与实验结果进行了对比。韩国研究人员在厚度接近200 μm的材料上开展了激光冲击和回转打孔的对比实验,发现不断地变换激光加工的方位能获得更好的微孔质量,以及脉冲能量对微孔质量影响大。Ashkenasi等^[9]介绍了柏林激光技术和医学技术(LMTB)公司的环切打孔系统在工业中的应用,该系统可以实现直径为50~1000 μm的不同锥形通孔的加工。Yilbas等^[10]对钛合金进行激光环切打孔时,模拟了切割区域的温度和应力场,发现预估的残余应力与利用X射线衍射技术获得的数据吻合很好。Choudhury等^[11]对5 mm厚的丙烯腈丁二烯苯乙烯(ABS)和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)两种高分子材料进行了不同孔径的环切打孔实验,得出小孔圆度和锥度最优时的脉冲能量、辅助气体压力、环切速度和离焦量的组合,并分析了两种材料最优打孔参数的差异。孙瑞峰等^[12]利用皮秒脉冲激光器以环切法在厚度不同的高温合金上加工微孔,发现不同厚度的样品上孔壁的再铸层厚度不同,再铸层与加工过程中产生的等离子密切相关。段文强等^[7]利用激光环切打孔技术在镍基合金等材料上进行了打孔实验,得到环切路径、环切速度和环切圈数对小孔重铸层的影响规律。Zhou等^[13]研究了高温合金激光环切打孔的孔质量特征,在孔入口和出口处发现了大量的熔融堆积物,孔壁出现微裂纹和15~30 μm厚的重铸层。本文研究了脉冲能量、离焦量、环切圈数以及环切速度对微孔质量的影响规律,该研究结果为高温合金激光环切打孔提供了一定的参考。

2 实验材料设备及方法

实验选取直径为30 mm,厚度为3 mm的高温合金GH4037圆片材料为激光打孔的实验材料。采用德国德玛吉森机精公司生产的LASERTEC 80 PowerDrill三维固体激光加工中心。激光器型号为FLS352A-307,最大平均功率为300 W,最大峰值功率为20 kW,最大脉冲能量为50 J,脉冲宽度为0.1~20 ms,脉冲频率为0.1~500 Hz,光斑直径为0.3~1 mm,波长为1064 nm。该三维固体激光加工中心能够使用冲击打孔的方式加工较厚的材料,广泛应用于航空领域。该加工中心主要由毫秒脉冲Nd:YAG激光器、光学系统以及定位系统组成,结构示意图如图1所示。孔形貌的观察与测量采用日本奥林巴斯公司的BX51M光学显微镜。使用检测装置直接测量孔的锥度比较困难,可以利用上下孔径和孔深度近似地计算出微孔的锥度。小孔锥度计算示意图如图2所示,其中 α 为孔的锥度, D_1 为上孔径直径, D_2 为下孔径直径, h 为孔深。小孔锥度计算公式为

$$\alpha = 2\arctan\left(\frac{D_1 - D_2}{2h}\right) \quad (1)$$

实验时各参数的选择如表1所示,选用的辅助气体为氮气,预设孔径为0.3 mm,采用单因素法进行激光

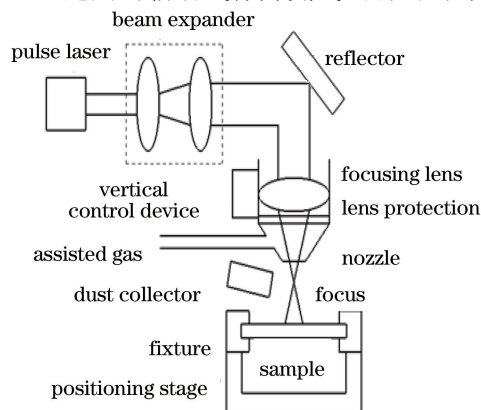


图1 毫秒脉冲激光打孔系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of millisecond pulsed laser drilling system

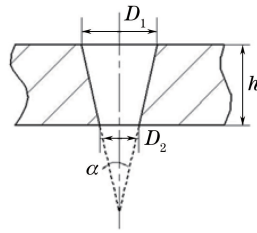


图2 小孔锥度计算示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calculating taper angle of taper hole

环切打孔研究。实验中脉冲能量分别取 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 J, 离焦量分别取 -2, -1, -0.5, 0, 0.5, 1 mm, 环切速度分别取 3, 6, 18, 30, 42, 54 mm/min, 环切次数分别取 2, 3, 4, 5, 6, 7。环切打孔是将打孔技术与切割技术结合在一起。首先利用冲击打孔打出一个初始孔, 然后通过光束在工件上的几个越来越大的环形轨道中移动或者旋转工件, 将初始孔扩大到所需孔径, 如图 3 所示。环切路径如图 4 所示, 激光以圆心为起点, 通过冲击方式钻出一个小孔, 再沿半径方向向预设孔边移动, 开始环切, 完成加工后激光光束又回到圆心位置。这种加工路径可以避免孔边缘缺口的产生。

表1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

Pulse width /ms	Repetition frequency /Hz	Beam expanding ratio	Assisted gas pressure /(10^5 Pa)
0.6	50	5	3

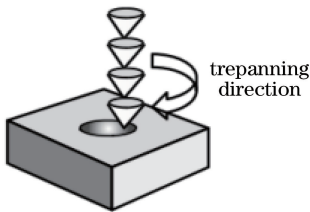


图3 环切式激光打孔

Fig. 3 Laser trepanning

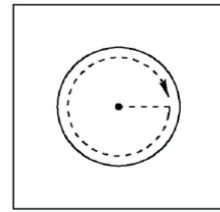


图4 激光环切路径

Fig. 4 Laser trepanning path

3 实验结果及分析

3.1 脉冲能量对小孔质量的影响

在环切打孔时, 激光光束沿着环切路径移动, 材料会发生熔化及气化, 使得实际的孔径会大于预设孔径。孔出口处的热影响区较大, 产生的孔口堆积物和飞溅熔渣较多, 小孔的出入口孔径均随脉冲能量的增加而增加且增速有减缓的趋势, 如图 5 所示, 这可能是导致实际的小孔孔径和预设孔径(300 μm)有一定差距的原因之一。采用毫秒脉宽的长脉冲 Nd:YAG 激光器进行环切打孔时, 小孔的锥度较小, 并且为负锥度结构, 如图 6 所示。当脉冲能量在 1.5~2.5 J 时, 得到的孔锥度较小。当脉冲能量增加时, 焦距处的激光能量密度

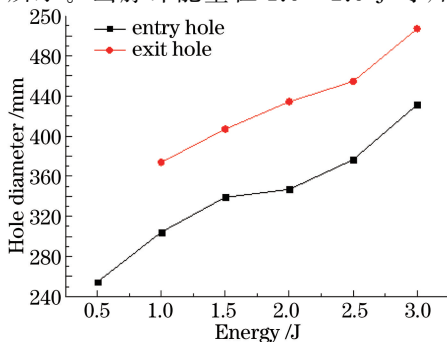


图5 脉冲能量对微孔孔径的影响

Fig. 5 Effect of pulse energy on micro-hole diameter

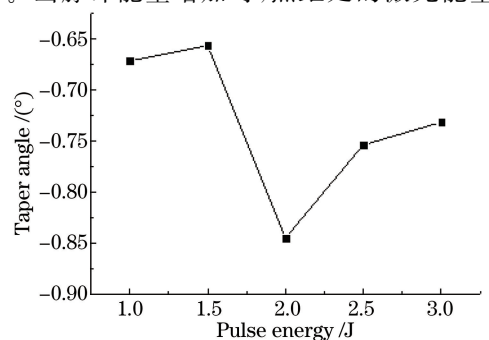


图6 脉冲能量对微孔锥度的影响

Fig. 6 Effect of pulse energy on micro-hole taper angle

随之增加,能量的增加导致熔化和蒸发加剧,生成的气相物质也越来越多。由于孔内气压不平衡,在蒸汽压作用下液态熔融状物会由孔底高速向外喷射,因此出入口孔径随着脉冲能量的增大而增大,出口孔处的热影响区相对较大,产生的孔口堆积物和飞溅的熔化物比较多。孔径增加的速度变慢是由于脉冲能量越高,形成等离子体的可能性就越大,等离子体会阻挡激光脉冲,进而影响材料对热量的吸收。

3.2 离焦量对小孔质量的影响

离焦量 f 为 $-0.5, 0, 0.5$ mm 时的微孔形貌如图 7 所示。由图可见,小孔入口处较整洁,孔口堆积物和飞溅熔渣少,圆度较好,小孔出口面的热影响区比入口面大,且当离焦量的绝对值较大时,热影响区也越大。最小锥度 0 对应的离焦量约为 -0.67 mm,此时的焦点位置为最佳,这与辛凤兰^[14]的研究结果一致,即当金属厚度大于 1 mm 时,最佳焦点位置为负离焦状态。入口孔径和锥度随离焦量绝对值的增大而增大,如图 8、9 所示。这是因为当离焦量的绝对值增大时,激光束在材料聚焦处的光斑直径变大,能量密度变小,孔壁的熔化更加明显,液相物质增多,蒸汽压变小,导致孔径和热影响区范围增大,孔口堆积物和飞溅熔渣增多,锥度增大。

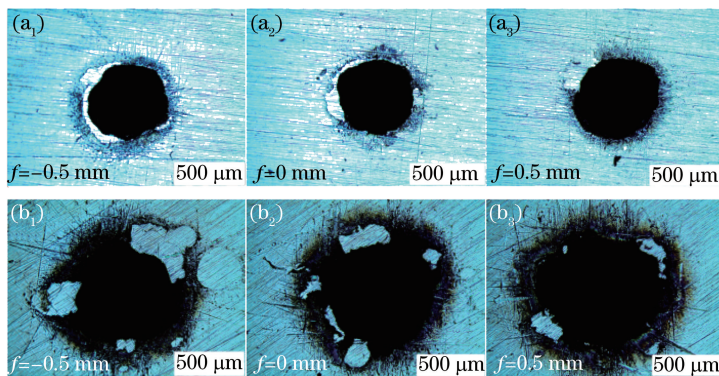


图 7 微孔形貌。(a₁)(a₂)(a₃)入口;(b₁)(b₂)(b₃)出口

Fig. 7 Micro-hole morphology. (a₁)(a₂)(a₃)Entry holes; (b₁)(b₂)(b₃) exit holes

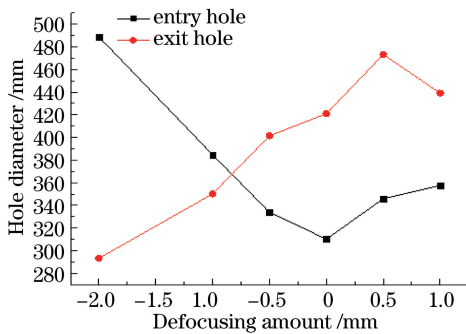


图 8 离焦量对微孔孔径的影响

Fig. 8 Effect of defocusing amount on micro-hole diameter

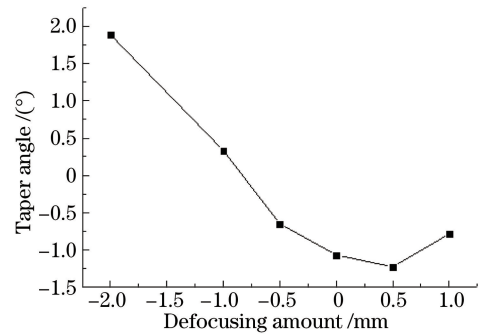


图 9 离焦量对微孔锥度的影响

Fig. 9 Effect of defocusing amount on micro-hole taper angle

3.3 环切圈数对小孔质量的影响

环切圈数越大,孔口堆积物和飞溅熔渣就越少,试样反面的热影响区比正面大。增加环切圈数相当于在焦点处对材料多次施加脉冲能量,使得材料在同一位置多次接收光束照射,能量吸收更加均匀,有助于修复上一轮的孔壁缺陷,提高小孔的圆度,孔口堆积物和飞溅熔渣减少。而试样反面的热影响区比正面大是因为激光在孔打穿时便停止发出脉冲,这样反面孔口接收光束的时间小于上孔口的时间。环切圈数对微孔孔径和锥度的影响如图 10、11 所示,环切圈数变化时,小孔的孔径变化不明显,小孔的锥度较小,变化范围在 $0^\circ \sim -1^\circ$ 之间。

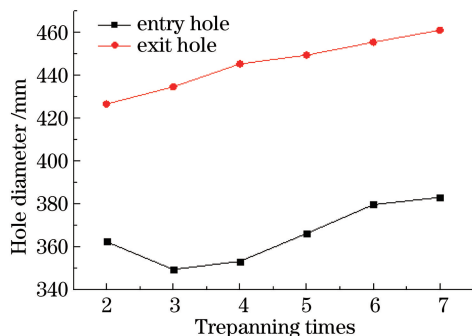


图 10 环切圈数对微孔孔径的影响

Fig. 10 Effect of trepanning times on micro-hole diameter

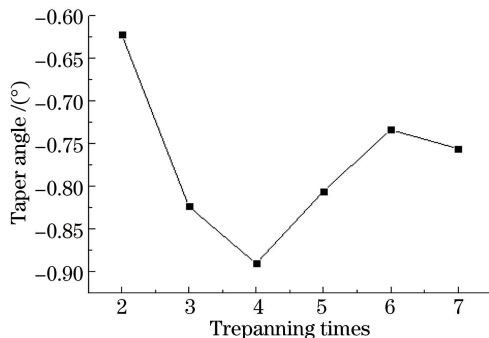


图 11 环切圈数对微孔锥度的影响

Fig. 11 Effect of trepanning times on micro-hole taper angle

3.4 环切速度对小孔质量的影响

环切速度过大时(42 mm/min 和 54 mm/min),试样反面孔口堆积物和飞溅的熔化物变多,且小孔的圆度受到一定影响。这是因为环切速度的加快导致了工作台的抖动加剧,圆度受到影响,每次激光束照射时材料吸收的热量不足,进而导致多次烧蚀,使得孔口堆积和飞溅的熔化物变多,特别是试样反面更加明显。根据形貌图发现,当环切速度在 3~6 mm/min 时,孔口堆积和飞溅的熔化物少,孔的圆度较好。环切速度对微孔孔径和锥度的影响如图 12、13 所示。由图可以发现,环切速度不同时,小孔的孔径变化不明显,小孔锥度为负且较小,变化也不大。

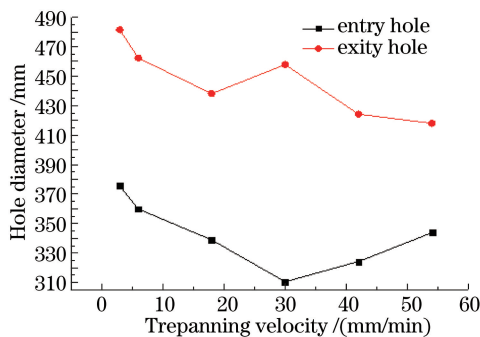


图 12 环切速度对微孔孔径的影响

Fig. 12 Effect of trepanning velocity on micro-hole diameter

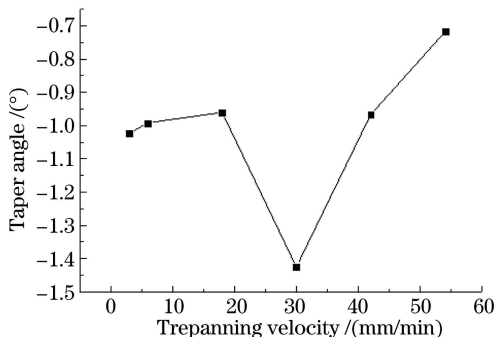


图 13 环切速度对微孔锥度的影响

Fig. 13 Effect of trepanning velocity on micro-hole taper angle

4 结 论

采用控制变量法对 GH4037 高温合金进行了激光环切打孔实验,得到以下结论。

1) 利用激光环切打孔时,出入口孔径随着脉冲能量的增大而增大;离焦量的绝对值越大,入口孔径和锥度也随之增加;环切圈数和环切速度对小孔孔径基本没有影响。

2) 小孔出口处堆积和飞溅的熔化物较多,且其热影响区比孔入口处的大。

3) 对于高温合金 GH4037 材料的激光环切打孔,要加工出高质量(孔口堆积物、飞溅熔化物较少,热影响区较小,圆度好)的小孔,推荐参数选择范围为:能量 1.5~2.5 J,离焦量 -0.5~0.5 mm,环切速度 3~6 mm/min。更多的环切圈数有利于加工出质量更好的小孔,但要考虑成本和加工时间。

参 考 文 献

[1] Guo Wenyuan, Wang Maocai, Zhang Xiaobing. Recast layer formed by laser drilling of Ni-based superalloys and progress on its control[J]. Laser Journal, 2003, 24(4): 1-3.

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.

- [2] Xia Zhendong, Fan Nannan, Sun Xiaoyan. Research on processing rules of femtosecond laser drilling for Ti-Ni alloys [J]. Science & Technology Vision, 2016(12): 48-50.
夏振东, 范楠楠, 孙小燕. Ti-Ni 合金飞秒激光打孔规律研究 [J]. 科技视界, 2016(12): 48-50.
- [3] Rong L R. The laser microhole processing technology and its applications in space navigation field [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2009, 45(6): 30-33.
- [4] Luo Yao, Pang Shengyong, Zhou Jianxin, *et al.* Numerical simulation of recast layer formation in nanosecond pulse laser drilling on nickel-based high-temperature alloy [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0403007.
罗 焱, 庞盛永, 周建新, 等. 镍基高温合金纳秒激光脉冲制孔再铸层形成过程数值模拟 [J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403007.
- [5] Wang Yuqian, Zhang Junzhan, Liu Yongsheng, *et al.* Effect of femtosecond laser parameters on TiC ceramic micro-hole drilling [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1003010.
王禹茜, 张军战, 刘永胜, 等. 飞秒激光工艺参数对加工 TiC 陶瓷微孔的影响 [J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1003010.
- [6] Ren Naifei, Zhang Wen, Wang Houxiao, *et al.* Process optimization for pulsed laser drilling of 20Cr13 sheets based on orthogonal experiments [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 031410.
任乃飞, 张 文, 王后孝, 等. 基于正交实验的 20Cr13 板材脉冲激光打孔工艺优化 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 031410.
- [7] Duan Wenqiang, Wang Kedian, Dong Xia, *et al.* Study on machining of high-quality micro-holes by laser trepan drilling [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(3): 95-103, 112.
段文强, 王恪典, 董 霞, 等. 激光旋切法加工高质量微小孔工艺与理论研究 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(3): 95-103, 112.
- [8] Willach J, Michel J, Horn A, *et al.* Approximate model for laser trepanning with microsecond Nd:YAG laser radiation [J]. Applied Physics A, 2004, 79(4-6): 1157-1159.
- [9] Ashkenasi D, Kaszemeikat T, Mueller N, *et al.* Laser trepanning for industrial applications [J]. Physics Procedia, 2011, 12(1): 323-331.
- [10] Yilbas B S, Akhtar S S, Karatas C. Laser trepanning of a small diameter hole in titanium alloy: Temperature and stress fields [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(7): 1296-1304.
- [11] Choudhury I A, Chong W C, Vahid G. Hole qualities in laser trepanning of polymeric materials [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2012, 50(50): 1297-1305.
- [12] Sun Ruifeng, Zhang Xiaobing, Cao Wenbin, *et al.* Characteristic of hole wall trepanning by picosecond laser in superalloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(S2): 128-131.
孙瑞峰, 张晓兵, 曹文斌, 等. 高温合金皮秒激光旋切制孔孔壁特征研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(S2): 128-131.
- [13] Zhou M, Zhang H Y, Wang Y L, *et al.* Development of a quantitative method for the characterization of hole quality during laser trepan drilling of high-temperature alloy [J]. Applied Physics A, 2016, 122(2): 1-11.
- [14] Xin Fenglan. Research on the laser drilling of high quality [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006.
辛凤兰. 高质量激光打孔技术的研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2006.