

# 飞秒激光旋切不锈钢微孔实验研究

范楠楠<sup>1,2</sup>, 夏振东<sup>1,2</sup>, 孙小燕<sup>1,2</sup>, 胡友旺<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学机电工程学院, 湖南长沙 410083;

2. 中南大学高性能复杂制造国家重点实验室, 湖南长沙 410083)

**摘要:**为了解决飞秒激光高脉冲能量冲击打孔中时存在微裂纹等问题,提出了飞秒激光旋切加工方法。本文利用脉宽为120 fs的飞秒激光,选择0.5 mm厚度的304不锈钢进行旋切打孔实验。实验研究了激光旋切加工中离焦量和光楔的相对偏转角对孔直径的影响,以及激光离焦量对微孔锥度的影响。结果表明,随着离焦量的增大,孔径增大,同时锥度会减小后增加,当离焦量为0时,锥度最小为3.5°;微孔直径随之双光楔相对转角的增大而增大。此外实验发现冲击打孔孔壁出现微裂纹而旋切微孔的孔壁出现了纳米周期性条纹。

**关键词:**飞秒激光;旋切打孔;304 不锈钢

**中图分类号:**TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.10.006

## Experimental study on stainless steel micro-hole trepanned by femtosecond laser

FAN Nan-nan<sup>1,2</sup>, XIA Zhen-dong<sup>1,2</sup>, SUN Xiao-yan<sup>1,2</sup>, HU You-wang<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, Changsha 410083, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of microcracks in high pulse energy femtosecond laser drilling, a trepanning method with femtosecond laser was proposed. The femtosecond laser with pulse width of 120 fs was used to trepan 304 stainless steel with 0.5 mm thickness. The effect of defocusing amount and relative deflection angle of double wedge on the micro-hole diameter and the effect of defocusing amount on the micro-hole conicity are studied by the experiments. The results show that the diameters of micro-holes increases with the increasing of the defocusing amount, but the conicity first decreases and then increases. When the defocusing amount is zero, the minimum conicity is 3.5°. Micro-hole diameter increases with relative deflection angle increase of double wedge. Nanometer periodic stripes are found on the sidewalls of micro-holes trepanned by femtosecond laser, while there are microcracks on the sidewalls of micro-holes through percussion drilling.

**Key words:** femtosecond laser; trepanning; 304 stainless steel

### 1 引言

燃气涡轮是现代先进航空发动机的重要部件之一,燃气涡轮进口温度对发动机的推重比有着重大影响<sup>[1]</sup>。燃气涡轮进口温度每提高100℃,航空发动机的推重比相应能提高大约10%,尽管燃气涡轮

叶片材料不断发展,使涡轮叶片的使用温度有了很大的提高,但是叶片材料的高温性能限制了燃气涡轮进口温度的大幅度提高,因此航空发动机广泛采用气膜孔冷却的方法来增加航空发动机的性能和使用寿命。涡轮叶片上分布着大量不同直径的气膜

**基金项目:**国家973项目(No. 2011CB013000);国家自然科学基金项目(No. 91323301, 51475481, 51475482);教育部新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-12-0548)资助。

**作者简介:**范楠楠(1990-),男,硕士生,研究方向为飞秒激光精密加工。E-mail: fannannan@csu.edu.cn

**收稿日期:**2016-03-04

孔,孔径一般为  $100 \sim 700 \mu\text{m}$ <sup>[2]</sup>。目前的气膜孔的加工主要依靠电火花加工和长脉冲激光加工<sup>[3]</sup>。但这两种方法都存在孔壁重铸层的问题,微裂纹。气膜孔孔壁重铸层和微裂纹对叶片的疲劳寿命有重大影响<sup>[4]</sup>。

20世纪90年代初,飞秒激光开始应用到微孔加工领域。由于飞秒激光具有脉宽超短及高脉峰值功率和精确的烧蚀阈值等特性,使得其能够有效地加工各种材料<sup>[5-6]</sup>。2003年,德国汉诺威激光中心 B. N. Chichkov 团队使用飞秒激光在厚度为 1 mm 的不锈钢板上加工出高质量的微孔,并提出飞秒激光将会是新一代高质量金属微孔加工的主要方法<sup>[7]</sup>。2009年,德国耶拿大学研究员 A. Ancona 等人利用高重频大功率飞秒激光加工金属微孔发现会出现有明显的熔融物从微孔入口喷出,熔融物会严重影响加工精度和质量<sup>[8]</sup>。在以前的实验中,使用飞秒激光冲击打孔仍然存在许多问题。

本文使用脉冲宽度 120 fs、中心波长 800 nm、频率 1 kHz 的飞秒激光,利用旋切系统对不锈钢进行了微孔加工。然后对旋切微孔工艺及孔壁形貌进行了实验研究。通过实验发现使用旋切可以有效解决微孔孔壁微裂纹的问题。

## 2 实验装置与实验方法

实验采用美国光谱物理公司生产的掺钛蓝宝石固体飞秒激光器。实验装置示意图如图 1 所示。飞秒激光放大器输出线偏振飞秒激光(800 nm, 120 fs, 1 kHz)。光路中加入光闸用来调节激光脉冲数。实验使用中性衰减片来调节激光能量使入射激光以合适的能量辐照到金属表面。飞秒激光的初始偏振方向通过格兰棱镜来确定,在光路加入一片零级 1/4 波片用于改变入射激光的偏振态,旋转波片至合适的角度时,以获得圆偏振光。圆偏振光经过调焦系统进入四光楔光束扫描系统。光束扫描模块由控制系统、四光楔模块、聚集镜模块三部分组成。整个旋光系统主要由高速旋转电机带动一个偏转模块及横向位移模块的同步高速转动,实现对激光加工光束轨迹的控制,让进入模块内的飞秒激光经过一系列偏移后实现旋切功能。最后通过一个透镜( $f = 100 \text{ mm}$ )飞秒激光聚焦照射到固定在三维移动平台的目标靶板上,其中靶板是经过机械抛光的不锈钢 304 金属

片,规格为  $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 。按照上述方案进行实验后,将加工形成的样品浸入到丙酮中进行超声清洗,然后将样品剖开使用扫描电子显微镜观察微孔孔壁的微观形貌。

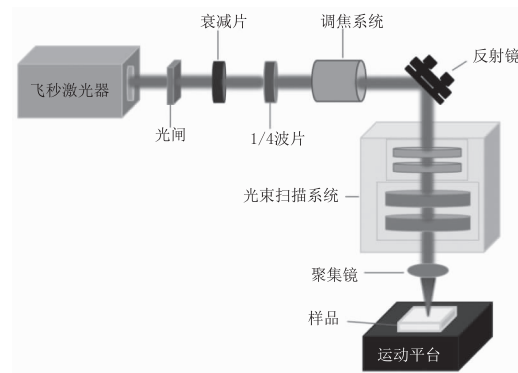


图 1 飞秒激光加工系统

Fig. 1 Femtosecond laser processing system

## 3 实验结果与分析

### 3.1 离焦量对金属的对旋切微孔直径的影响

激光打孔中,加工样品上表面与聚焦透镜焦点之间的距离称为离焦量。焦平面在工件上表面上方称为正离焦,焦平面在工件上表面下方称为负离焦。图 2 为离焦量示意图,分别为负离焦、聚焦和正离焦,其中 a 为飞秒激光;b 为聚焦透镜;c 为样品。

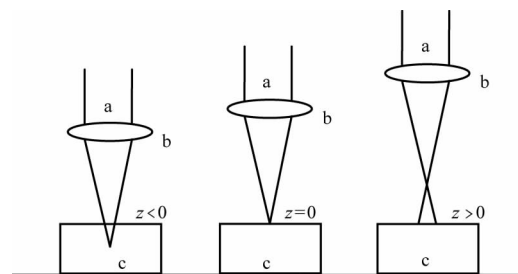


图 2 离焦量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the defocusing amount

从图 3 中可以看出,采用负离焦得到的孔径较大,采用正离焦可以得到孔径较小的小孔。采用负离焦时,随着离焦量的增加,小孔上、下孔径会逐渐增大;采用正离焦时,随着离焦量的增加,小孔上、下孔径会逐渐减小。从图 3 可以看出,当其他参数不变以及正离焦时,减小离焦量可以获得较大的孔径。由于离焦量对入口和出口孔径都有较大的影响,因此,有必要对锥度与离焦量的关系进行分析。

对 0.5 mm 的 304 不锈钢进行锥度计算和比较,测得的不同离焦量条件下的微孔锥度变化曲

线如图4所示。孔出现锥形主要是与激光的发散角、输出光斑、扩散倍率、聚焦镜焦距等参数有关。激光的入射角度同样会影响加工材料对飞秒激光脉冲能量的吸收。当飞秒激光脉冲垂直照射材料时,激光的反射小,因而材料吸收率越高,当激光束入射角越大,激光的反射也越大,材料的吸收率就会减小,即著名的菲涅尔效应<sup>[9]</sup>。所以材料的表面微纳结构会影响材料对激光脉冲能量的吸收。在飞秒激光打孔过程中,微孔形成的过程中,激光辐射强度的分布会发生变化。这种效应会导致锥度的形成。当激光辐照微孔时,微孔的孔壁不能吸收激光脉冲全部能量,烧蚀率会逐渐下降,当材料吸收的能量密度低于材料的烧蚀阈值,烧蚀过程结束。

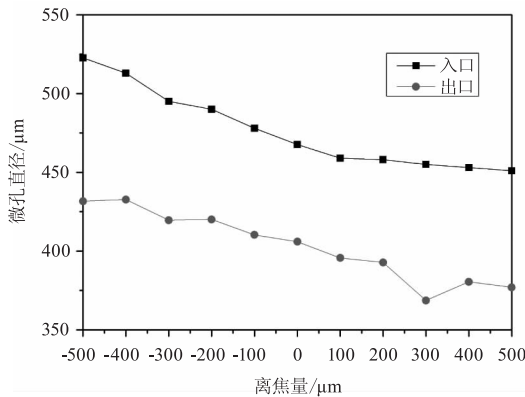


图3 离焦量与孔径的关系

Fig. 3 Graph showing the influence of defocusing amount on the hole diameter

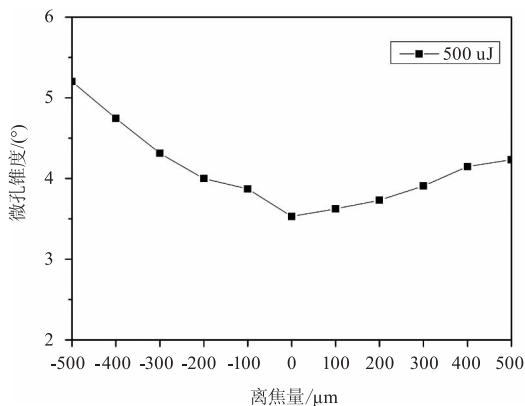


图4 离焦量与孔锥度的关系

Fig. 4 Graph showing the influence of defocusing amount on the conicity

### 3.2 光楔的相对偏转角对旋切微孔直径的影响

光楔是指折射棱角 $\alpha$ 很小的棱镜,当光线进入光楔时光线会发生折射现象,光线的入射角和出射角之间的夹角为偏转角,偏转角取决于光楔材

料的折射率 $n$ 和光楔折射棱角 $\alpha$ 。当光楔加工完成后,其偏转角就已确定。光路引导系统广泛使用光楔来实现光束小角度偏摆。当采用两块相互靠近的折射率相同、折射棱角相等的光楔组成的光路引导系统即双光楔系统时,除了可实现单个光楔的功能外,两个光楔之间的相对运动可以新的用途,例如,双光楔的等效折射棱角可以在单个光楔折射棱角的0到2倍范围内变化,当两光楔主截面平行且同向放置时,能产生的最大偏向角即两光楔偏向角之和;当某一个光楔绕光轴旋转 $180^\circ$ 时,双光楔系统产生的偏向角为 $0^\circ$ ,当双光楔处于其他任意位置时,所产生的偏向角在介于0到2倍范围内。这一特性可以应用于高精度激光微孔加工光路控制<sup>[10]</sup>。在微孔加工中,飞秒激光通过双光楔系统后经过聚焦镜聚焦,微孔直径与两个光楔之间的相对偏角相关。

$$d = K \cos \frac{\beta}{2} \quad (1)$$

式中, $\beta$ 为两个光楔的相对偏转角; $K$ 由系统所采用的光楔的棱角 $\alpha$ 、折射率 $n$ 、聚焦镜焦距 $f$ 所决定。

单脉冲能量为 $500 \mu\text{J}$ 的飞秒激光通过双光楔系统时,采用不同的相对偏转角激光加工金属片所形成微孔入口直径关系如图5所示。

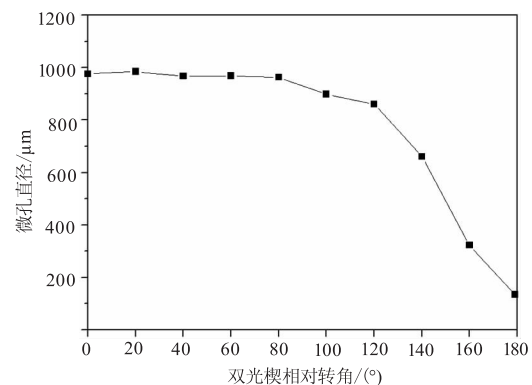


图5 双光楔相对转角与微孔直径的关系

Fig. 5 Graph showing the influence of relative deflection angle of double wedge on the micro-hole diameter

### 3.3 激光能量对旋切微孔质量的影响

在激光与材料相互作用机理的模型中,人们通常考虑的是理想情况下单脉冲作用时间内的加工过程,而脉冲分布以及连续脉冲叠加作用的影响往往被忽略。由于飞秒激光脉冲在时空上为高斯分布,

单个脉冲周期上下两端都会大于弛豫时间,发生烧蚀作用时就会产生热传递,虽然热传递十分微弱,但是多个连续脉冲的累积效应不能忽略造成热效应区;在空间上两端的能量密度尚达不到材料烧蚀阈值,无法去除材料,其能量会不断累积,部分能量转化成热量. 对于连续多个脉冲打孔而言,材料只能在第一个脉冲作用时间内维持冷加工状态,激光脉冲结束后,材料的温度会上升,从而引起热烧蚀;另外,烧蚀加工过程中产生的等离子体也会吸收后续激光脉冲的能量,导致位孔内的温度骤升,带来热烧蚀过程。

图 6(a) 是单脉冲能量为 600  $\mu\text{J}$  时,飞秒脉冲激光冲孔效果图,SEM 显示微孔孔壁依然存在微裂纹等热效应作用区,说明简单地使用飞秒脉冲激光烧蚀加工还达不到绝对意义上的“冷加工”,因此,分析飞秒脉冲激光加工过程中热影响的原因有重要意义<sup>[11]</sup>。因此,在实际加工应用中要采取新方法、新工艺来充分发挥飞秒脉冲激光的优势,减小烧蚀加工过程中热累积现象。图 6(b) 是单脉冲能量为 600  $\mu\text{J}$  时,飞秒脉冲激光旋切打孔效果图,SEM 显示微孔孔壁已经没有微裂纹,微孔孔壁上出现了纳米周期性条纹(LIPSS)。旋切打孔的加工区呈半敞开式,利于烧蚀物的排出,因而孔的表面质量好。冲击打孔和旋切打孔在材料去除机制上的差别在于孔周围的热累积作用<sup>[12]</sup>。相较于冲击打孔过程中热量比较难释放,旋切打孔时光束相对于加工样品以一定速度进行扫描,使得激光并非是完全重复的在某一处加工,这很大程度上减小了热累积作用,增加了热量的释放。

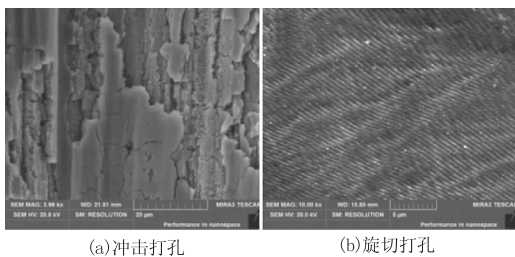


图 6 单脉冲能量为 600  $\mu\text{J}$  时飞秒激光加工微孔孔壁的形貌

Fig. 6 SEM images of sidewalls of micro-holes processing by femtosecond laser percussion drilling

用扫描电镜附带的 Oxford X - Max20 能谱系统测试旋切打孔孔壁和样品元素成分如图 7 所示。其中,图中标记点 A 处测得的氧元素质量分数为

1.56%, 标记点 B 处测得的氧元素质量分数为 2.70%。由表 1 可知:烧蚀表面含有氧元素含量增加。这是可能是由于在试验在大气中进行,金属被飞秒激光烧蚀后产生大量等离子体,等离子体速度高,会喷射出去并蒸发在大气当中,而很多一直在加工表面附近的纳米粒子和空气中氧气分子在高速碰撞中发生一定的氧化反应后冷却后沉积在表面导致氧元素的增加。

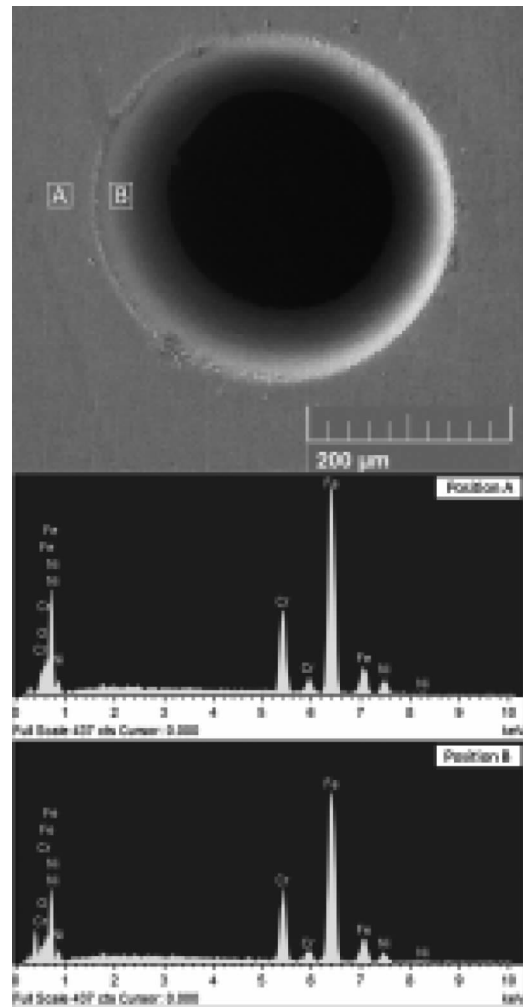


图 7 不锈钢微孔烧蚀形貌图与样品和孔壁能谱分析  
Fig. 7 SEM image and EDS analysis comparison between the sidewall of the micro-hole(position A) and the stainless steel(position B)

表 1 图 7 中样品和孔壁元素成分比较

Tab. 1 Element composition (wt%) between the sidewall of the micro-hole(position A) and the stainless steel(position B) shown in Fig. 7

元素	Fe	Cr	Ni	O
图 7 中 A 点	74.18	17.32	5.80	2.70
图 7 中 B 点	73.73	17.64	7.07	1.56

用不同脉冲能量的飞秒激光加工不锈钢金属片,所得微孔入口、出口端两者的表面形貌如图8所示。由图8可以看出未抛光处理的样品微孔入口、出口表面都比较光滑,在微孔入口端没有明显的残渣堆积,微孔出口端不存在残屑。此外,由图8还可

以看出,随着激光能量增加,微孔直径呈增大趋势,但增幅较小。这是由于激光能量服从高斯分布,所以增大激光脉冲能量时,激光作用于加工样品上的焦斑的直径增大,所以微孔直径随能量密度增加而略有增大。

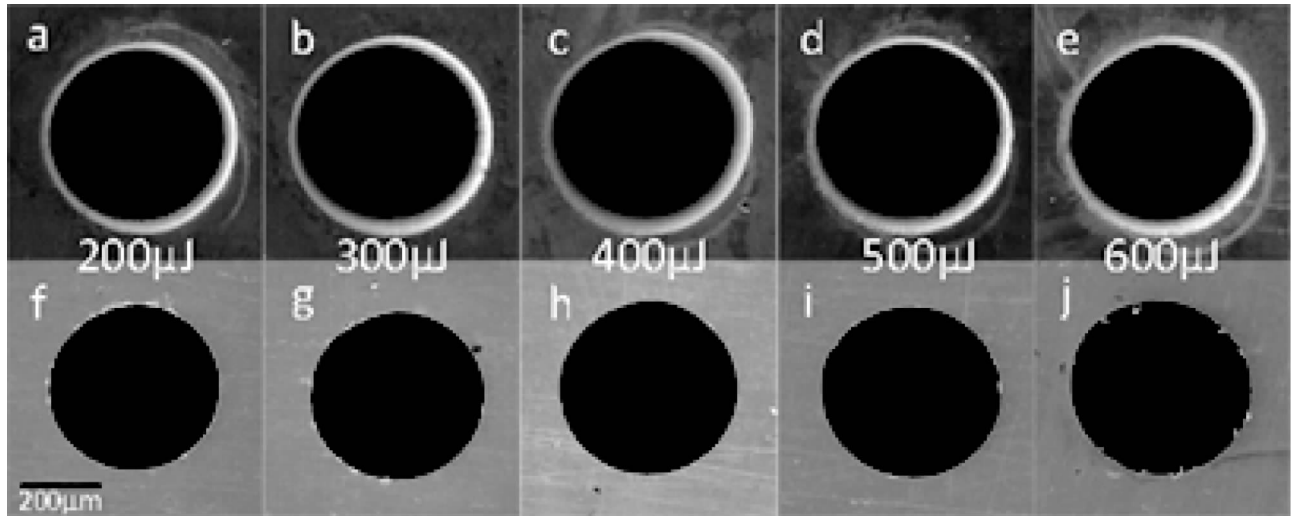


图8 不同单脉冲能量的激光加工微孔的SEM形貌

(a)(b)(c)(d)(e)(f)为入口形貌;(f)(g)(h)(i)(j)为出口形貌。

Fig. 8 SEM micrographs of micro-holes drilled with different single pulse energy.

(a)(b)(c)(d)(e)entry holes;(f)(g)(h)(i)(j) exit holes.

#### 4 结论

本文对304不锈钢的飞秒激光旋切加工进行了实验研究。首先分析了离焦量对微孔直径以及锥度的影响,实验表明离焦量的增加会导致微孔入口和出口直径的减小,但减小的程度不同,实验中微孔入口直径最大为522 μm,最小为451 μm;微孔出口直径最大为431 μm,最小为377 μm。微孔的锥度随离焦量的增加先减小后增加,实际锥度最小可达到3.5°。然后在旋切实验中,可以通过改变双光楔的相对偏角来加工所需尺寸的微孔。通过对冲击打孔和旋切打孔孔壁的比较,发现旋切可以很好地减少大能量飞秒激光加工微孔时出现的微裂纹。

#### 参考文献:

- [1] Low D K Y, Li L, Corfe A G. Characteristics of spatter formation under the effects of different laser parameters during laser drilling[J]. Journal of Materials Processing Tech. ,2001,118(1):179-186.
- [2] Ghoreishi M, Nakhjavani O B. Optimisation of effective

factors in geometrical specifications of laser percussion drilled holes[J]. Journal of Materials Processing Technology. ,2008,196(1-3):303-310.

- [3] Zhang H, Zhou M, Wang Y, 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.
- [4] Das D K, Pollock T M. Femtosecond laser machining of cooling holes in thermal barrier coated CMSX4 superalloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(15-16):5661-5668.
- [5] GU Li, SUN Huilai, YU Kai, et al. Research progress of micro-nanofabrication by femtosecond laser[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(1):14-18. (in Chinese)  
顾理,孙会来,于楷,等. 飞秒激光微加工的研究进展[J]. 激光与红外, 2013, 43(1):14-18.
- [6] WANG Haofang, DENG Guiling, YUE Haoming, et al. Research on processing rules of constant elasticity alloy by femtosecond laser ablation[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(11):1309-1313. (in Chinese)

- 王豪放,邓圭玲,岳浩铭,等.飞秒激光烧蚀加工恒弹性合金的规律研究[J].激光与红外,2015,45(11):1309-1313.
- [7] Kamlage G, Bauer T, Ostendorf A, et al. Deep drilling of metals by femtosecond laser pulses[J]. Applied Physics A., 2003, 77(2):307-310.
- [8] Ancona A, Doring S, Jauregui C, et al. Femtosecond and picosecond laser drilling of metals at high repetition rates and average powers[J]. Optical Letter, 2009, 34(21):3304-3306.
- [9] TAN Xianfeng, YANG Junhua, GENG Yanqing. Experimental research on the relationship of the defocus and size of holes in laser drilling[J]. Applied Laser, 2011, 31(3):244-247. (in Chinese)  
谭险峰,杨俊华,耿艳青.激光打孔中离焦量与小孔尺寸关系的实验研究[J].应用激光,2011,31(3):244-247.
- [10] GUO Yunzeng, YANG Xiaojun, YANG Xiaojun, et al. Simulation study of rotating double optical wedge vectoring optics path based on Matlab[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(3):856-860. (in Chinese)  
郭云曾,杨小军,杨小君,等.旋转双光楔光路引导系统 Matlab 仿真研究[J].红外与激光工程,2014,43(3):856-860.
- [11] ZHAO Hualong, ZHOU Renkui, ZHAO Hongyan, et al. A forming method for improving surface integrity of film cooling holes[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(3):649-655. (in Chinese)  
赵华龙,周仁魁,赵鸿雁,等.一种提高表面完整性的气膜孔成形方法[J].航空动力学报,2015,30(3):649-655.
- [12] 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. (in Chinese)  
段文强,王恪典,董霞,等.激光旋切法加工高质量微孔工艺与理论研究[J].西安交通大学学报,2015,49(3):95-103.