

带热障涂层的高温合金飞秒激光旋切打孔

张学谦¹, 邢松龄¹, 刘磊^{1,2}, 李勇^{1,2}, 佟浩^{1,2}, 邹贵生¹

¹清华大学机械工程系, 北京 100084;

²清华大学机械工程系摩擦学国家重点实验室, 北京 100084

摘要 针对燃气轮机叶片气膜孔传统加工方法存在的缺陷, 采用飞秒激光旋切带热障涂层的高温合金加工气膜孔, 获得了无裂纹、无附着残渣及无重铸层的锥孔。结合飞秒激光加工过程中材料的去除机理, 分析得出: 等角速度旋切造成的孔锥度较大; 材料的去除过程为绝热冷却过程, 即与周边材料几乎没有热交换, 未发生基体材料熔化后重新凝固形成重铸层的过程。然而, 在孔的入口发现黑色附着物, 随着加工次数的增加, 逐步覆盖整个入口边缘的部分。试验过程中可收集到含有镍、锆、氧等元素的纳米颗粒, 证明被去除的材料通过液相爆破的方式以纳米颗粒的形式快速离开基体, 从而解释了加工后在孔壁未发现大量附着残渣粘连的原因。相对于低速单层旋切, 高速多层旋切加工效率更高。

关键词 激光制造; 激光加工; 飞秒激光旋切开孔; 热障涂层; 重铸层

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0102013

Trepanning of Supper-Alloy with Thermal Barrier Coating Using Femtosecond Laser

Zhang Xueqian¹, Xing Songling¹, Liu Lei^{1,2}, Li Yong^{1,2}, Tong Hao^{1,2}, Zou Guisheng¹

¹Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

²State Key Laboratory of Tribology, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract To avoid the defects of conventional methods to manufacture gas film holes for gas turbine blades, femtosecond laser is applied to trepanning supper-alloy with thermal barrier coating, and holes without crack extension, attached debris, and recast layer are obtained. Combined with the material removal mechanism of femtosecond laser drilling, it can be obtained through analysis that the taper of holes is larger under trepanning with same angular speed. In addition, the process of material removal is considered as adiabatic cooling, that is, there is nearly no heat exchange between processing material and the surrounding material. Therefore, the process of substrate material melting and re-solidifying to form a recast layer does not happen. However, black attachments are found around the hole entrance, and as the cutting times increase, they gradually cover the entire part of the entrance edge. Nanoparticles with elements nickel, zirconium and oxygen are collected during processing, which proves that the removed material leaves the substrate quickly in nanoparticles through the phase explosion mechanism. This explains why no attached debris is found on the pore wall. Compared with low-speed single layer cutting, high-speed multilayer cutting is much more efficient.

Key words laser manufacturing; laser machining; femtosecond laser trepanning; thermal barrier coating; recast layer

OCIS codes 140.3390; 320.7090; 160.2750

收稿日期: 2016-08-16; 收到修改稿日期: 2016-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(51405258)、清华大学自主科研计划项目(2013Z02-1, 20131089209)、博士点专项科研基金(20130002110009)

作者简介: 张学谦(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事超快激光材料加工方面的研究。

E-mail: zhangxq14@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 邹贵生(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事微纳成形制造与微纳连接及器件、纳米材料制备、焊接冶金与技术等方面的研究。E-mail: zougsh@tsinghua.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

燃气轮机具有重量轻、体积小、启动快、建设周期短、运行防护方便等优点,被广泛应用于发电、航空、海运等领域^[1]。随着燃气轮机技术的发展,燃料燃烧效率提高,进入透平的气体温度相应提高,可高达 1500~1600 °C,这一温度超过透平叶片基体材料高温合金的熔点,因此透平叶片需要用特定方式进行隔热与降温^[2]。目前透平叶片隔热方式是采用热障涂层,即在叶片基体表面涂覆热导率低的陶瓷涂覆层进行隔热^[3]。降温采用的方式为气膜冷却技术,即冷空气通过叶片内部的气体通道和气膜孔到达叶片表面,然后与高温燃气之间形成气膜,从而隔绝叶片同高温燃气的直接接触,实现降温目的。冷却过程中,气膜孔的形状会影响流出气体在叶片表面扩散的形态和速度,进而影响气膜的形成,最终影响气膜冷却的降温效果^[4]。

气膜孔的加工需要穿透叶片表面的陶瓷涂层、连接陶瓷涂层和叶片金属基体之间的中间连接层,最终穿过叶片基体。传统加工气膜孔的方法有脉冲激光加工、电火花加工和电解液加工等,然而在加工过程中,材料内部产生的热应力会导致热障涂层本身及中间接触界面产生裂纹、金属液滴附着在孔壁形成附着残渣及熔化的金属重新凝固产生重铸层等问题^[5-7]。并且重铸层内部容易产生微裂纹,叶片基体同重铸层接触的位置在服役过程中也容易产生裂纹^[8]。加工过程中产生的热裂纹以及由于重铸层而产生的裂纹在服役过程中由于热循环产生的热应力会进一步扩展形成宏观可见的裂纹,最终造成热障涂层剥落,影响叶片的使用寿命^[9-10]。因此气膜孔加工需要加工精度高且加工应力小的加工方法。

飞秒激光加工可以在材料实现局部热平衡之前完成能量沉积,因而热影响区小,不会引起较大的热变形与热应力,可以有效避免加工过程中产生的裂纹和重铸层^[11-12]。相对于长脉冲激光,同样的输出功率条件下飞秒激光可以达到较大的单脉冲能量,并在较短时间内实现较大的能量输入。目前飞秒激光已被大量应用于超精密加工、特殊材料的切割与熔融焊接、微细加工等多个领域^[11]。

近些年来,国内外研究人员对飞秒激光加工带热障涂层的高温合金进行了一系列的研究,取得了相应成果^[13-16]。但是对于裂纹、残渣及重铸层等缺陷的控制仍需要加强,对于飞秒激光加工过程中材料去除过程对加工结果的影响缺乏进一步解释。基于此,利用飞秒激光对带涂覆层的高温合金材料进行了旋切制孔的研究,分析了工艺参数对孔形的影响,并结合飞秒激光加工过程中的材料去除机理对加工得到的孔进行了分析。

2 试验方法

2.1 材 料

试验过程中采用带热障涂层的高温合金来模拟燃气轮机叶片,基体采用镍基高温合金 IN738,热障涂层采用氧化钇质量分数为 7% 的氧化钇增强氧化锆粉末,采用大气等离子喷涂方式喷涂,涂覆厚度约为 400 μm ,采用金属合金作为中间连接层,连接层厚度约为 100 μm ,喷涂后在真空环境内加热到 1080 °C 后保温 4 h 进行热处理。

2.2 试验装置及方法

激光器使用美国相干公司(Coherent, Inc.)生产的 Libra 系列商用飞秒激光器,最大输出功率为 4 W,脉冲宽度为 50 fs,脉冲频率为 1 kHz。试验光路如图 1 所示。激光经扩束后光斑直径加倍,由焦距为 1000 mm 的聚焦透镜聚焦到试样,电动旋转台旋转试样来实现环切,通过 X-Y-Z 三轴平移台实现直线移动。光路中,使用扩束装置可以扩大光斑直径,改变光斑能量分布,并压缩光束的发散角^[17]。

试验过程中采用低速 $[45(^{\circ})/\text{s}]$ 单层旋切和高速 $[90(^{\circ})/\text{s}]$ 多层旋切两种加工方式,前者共加工一次,去

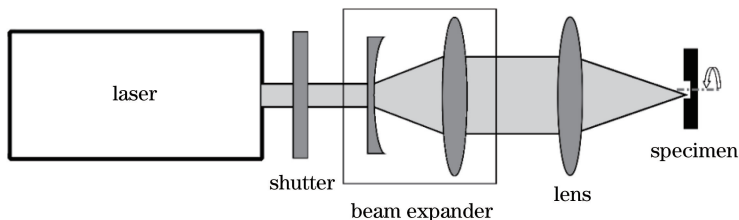


图 1 飞秒激光加工装置示意图

Fig. 1 Schematic of femtosecond laser drilling device

除了一层材料,后者则通过加工多次来去除多层材料。每一层材料的去除均通过等角速度加工一系列同心圆来进行,不同的工艺参数加工同心圆的次数不同。试验在大气环境中进行,无吹气辅助装置。试验中采用镀银铜块收集加工过程中喷射的颗粒,在扫描电子显微镜(SEM)下对其进行形貌观察与能谱分析。

3 试验结果与讨论

在相同的激光能量及聚焦条件下,随着每个同心圆加工次数的增加,圆孔的孔径没有发生明显变化,深度则随着加工次数的增加而加深,如图 2 所示。相对于低速旋切单层加工,采用高速旋切多层加工时,在孔径和锥度方面均无明显区别,但是加工深度明显提高。相关研究分析,采用高速多次加工可以分散激光脉冲能量,使其分散在更大面积的被加工材料上,热影响区更小,同时可以避免后续脉冲受到之前脉冲所引起的等离子体的干扰,因而加工效率较高^[18-19]。

由图 2(b)中可以看出,当孔深度约为 500 μm ,不同加工方式得到的结果并没有较大区别,这是由于这个深度范围内被去除的材料主要是作为热障涂层的陶瓷材料和作为中间连接层的金属合金;但当孔深度超过 500 μm 时,不同加工方式得到的孔深度开始有了较大的差别,分析认为这是由于激光在加工完表面涂层和中间连接层时,已开始加工基体金属。而激光加工不同加工材料的效率在加工孔深度方面的影响,需要进一步研究探讨。

此外,由图 3 可见,不同的加工方式和不同的加工参数,孔壁锥度并没有明显区别。分析原因认为,锥度主要与聚焦光斑的能量分布有关,当采用旋切方式进行加工时,锥度还与激光光束同材料的相对角度相关。在相关的工艺试验中已经证明,通过控制二者的相对角度,可以有效控制旋切加工过程中孔的锥度^[20]。

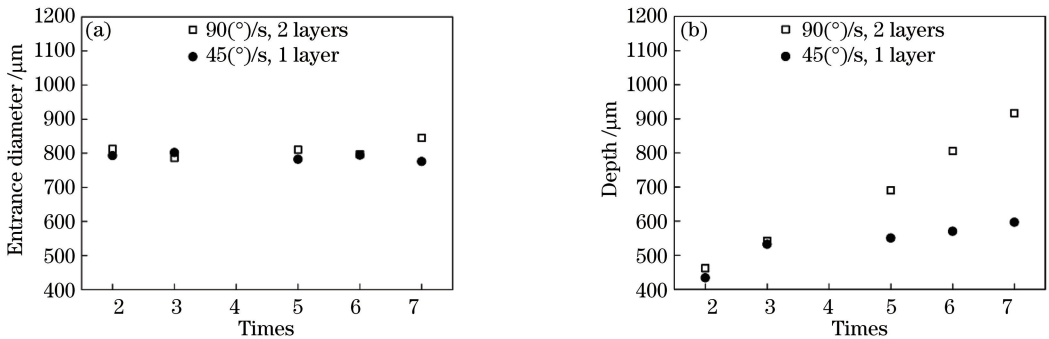


图 2 不同参数下加工得到的结果。(a)孔入口直径;(b)盲孔深度

Fig. 2 Results of trepanning with different parameters. (a) Entrance diameter; (b) depth of blind hole

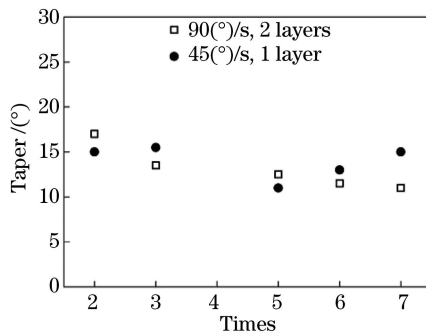


图 3 不同参数下加工得到的孔壁锥度

Fig. 3 Tapers of the wall with different trepanning parameters

通过优化工艺参数,使用高速旋切去除热障涂层和中间连接层,并且加工过程中加大同心圆的密度,得到的加工孔如图 4 所示。由图 4(a)可见,在孔入口处存在附着残渣;由图 4(b)及 4(d)可见,在涂层层与连接层均未发现裂纹;虽然连接层同金属基体之间由于喷涂过程中结合不紧密造成间隙,但在孔加工过程中并未出现增大现象,如图 4(d)所示。此外,由图 4(c)和 4(d)可见,观察加工所获得的孔的截面及孔壁,均未发

现附着残渣及重铸层。

目前对于飞秒激光加工过程中材料去除机理的相关研究表明,飞秒激光加工过程中能量传递的过程不同于普通的脉冲激光加工,加工过程中能量的传递可以用“双温模型”来描述,即激光同被照射材料之间的能量传递和后者同周边材料的热交换为两个分离的过程^[21]。由于激光对材料作用的时间很短,在作用的过程中被加工材料同周边材料之间的能量传递很少,因此材料在被激光照射升温后,发生的是同周边材料热传递很少的“绝热冷却”。冷却的具体过程取决于升温后的材料所处状态在热力相图的位置。当激光能量密度较高时,被照射区域表层材料以原子蒸气的方式离开基体;当激光能量密度较低时,表层材料未形成原子蒸气,以压力破裂的方式高速脱离基体材料,而表层下的基体材料,其温度不足以产生破裂,但是进入亚稳态状态,形成气泡后破裂,其去除过程即液相爆破。飞秒激光加工过程中大部分材料都通过液相爆破的方式以蒸气和液体混合物的形式快速离开基体,其基本尺度为亚微米级甚至纳米级。受到影响的最深层材料,烧蚀并未发生,其由于受到脉冲照射的影响很小,会以相变或者应力导致层状剥落的方式反应^[22-25],因此,被加工后的材料表面不会存在大量熔化后重新凝固的组织所形成的重铸层。另外,整个加工过程中材料均被激光照射,材料同周围材料热交换很少,材料的主导去除方式是一种“冷加工方式”。试验使用的飞秒激光脉冲宽度为 50 fs,所引起的热影响区很小,在孔加工过程中被加工材料与周边材料的热交换不足以造成足够的热应变而产生裂纹。

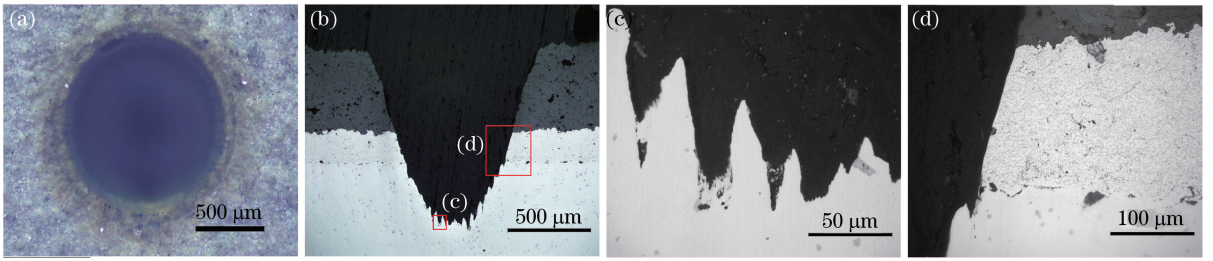


图 4 焦距为 1000 mm 飞秒激光旋切打孔结果。(a)孔入口图;(b)截面图;(c)入口附近孔壁界面,未发现附着残渣及重铸层;
(d)在涂覆层与连接层、连接层与高温合金基体之间的连接界面均未发现裂纹拓展

Fig. 4 Machining results of hole drilled by femtosecond laser with focal length of 1000 mm. (a) Entrance; (b) cross section; (c) cross section of entrance, no spatter and recast layer found; (d) interface between ceramic and bonding layer, interface between bonding layer and metal, no crack extending found

在使用低速单层去除方式去除材料时,不同的加工参数得到的结果中,孔入口的附着物形态不同,如图 5 所示。在加工次数较少时,大部分被去除的材料都是陶瓷材料,孔入口边缘未发现黑色附着物。由于采用等角速度旋切,孔中心被去除的材料较多,已经加工到金属基体部分,但是并未在孔入口处形成附着物,只有孔边缘的一部分发生附着物的沉积,如图 5(a)所示。随着加工次数的增加,孔入口处的被沉积的面积开始增加,最终整个孔入口周围都存在黑色沉积物,如图 5(d)所示。由图 5 可看到,孔的内壁在热障涂层部分仍有一层黑色的沉积物存在,但是由观察结果分析,结合之前并未形成在光镜下可见的附着残渣和重铸层,也即并未形成大尺度的堆积。

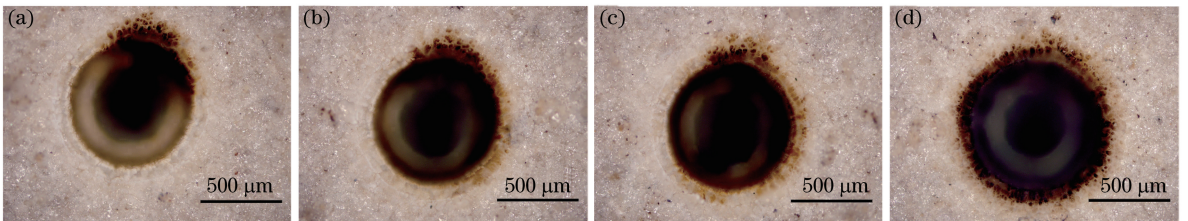


图 5 低速单层旋切,不同次数加工得到的入口形貌。(a)加工 3 次;(b)加工 5 次;(c)加工 6 次;(d)加工 7 次

Fig. 5 Entrance holes under single layer trepanning with a low speed and different trepanning times.

(a) 3 times; (b) 5 times; (c) 6 times; (d) 7 times

加工过程中在孔入口附近收集喷射出的颗粒,在 SEM 下观察,得到结果如图 6 所示。由图 6(a)、(b)、(c)可看出,加工时喷射出的颗粒尺度远小于 1 μm,呈球状,尺寸并不均匀。通过能谱(EDS)分析发现,主要

元素为锆、镍、氧,如图 6(d)所示。结果表明:加工过程中,飞秒激光作用于材料,纳米颗粒形成。分析认为一部分颗粒是金属基体喷射离开基体后形成的颗粒,另外的颗粒可能是氧化锆涂层被加工产生的纳米颗粒。

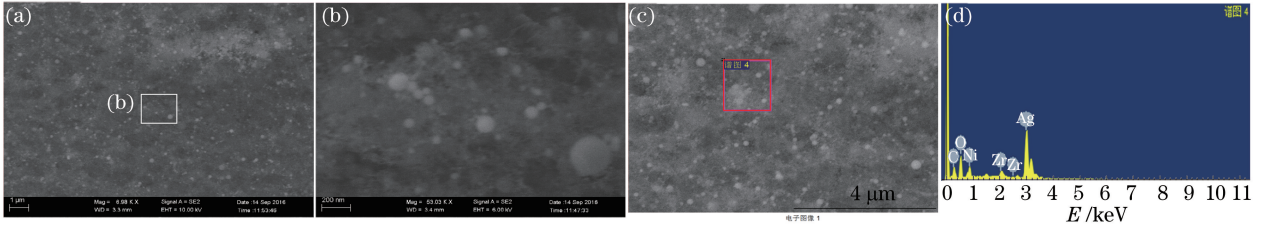


图 6 (a)(b)(c)收集到颗粒的 SEM 图;(d)所选区域颗粒和 Ag 基体的 EDS 图

Fig. 6 (a)(b)(c) SEM micrographs of particles collected during processing;

(d) EDS of particles and Ag base of the chosen area

在常规的长脉冲激光加工过程中,材料的去除机制主要是材料熔化后通过液滴喷射方式离开被加工区域。液滴直径的尺度从亚微米级到百微米级,喷射速度相应从百米每秒到米每秒^[26-27]。被去除材料周围由于发生热传递而熔化但是不足以形成喷射的熔融体,加工结束后重新凝固形成重铸层^[28]。同时,被去除材料以高速离开材料表面,飞行过程中同基体材料发生粘连,形成附着残渣^[29]。而本试验采用了飞秒激光加工技术,加工过程中造成的热影响区很小,没有形成裂纹拓展;材料去除形成的颗粒尺度更小,为亚微米或者纳米级,以喷射的方式离开材料基体,加工过程中未发生大尺度的堆积,因而未形成光镜下可见的重铸层和附着残渣。另外,颗粒喷射流离开孔进入开放环境后,快速分散并与孔入口周围发生接触,形成如图 4(a)所示的黑色区域。因此,相对于长脉冲加工,飞秒激光加工具有一定的优势。

4 结 论

通过飞秒激光旋切加工带涂覆层的高温合金,得到了无附着残渣、无裂纹、无光镜下可见重铸层的锥孔。相对于低速单层旋切加工而言,高速多层旋切加工具备更高的材料去除效率,但两种加工方法得到孔的锥度没有很大差别。在孔的入口发现黑色附着物,且不同加工参数下残渣的附着位置不同,随着加工次数的增加,逐步覆盖整个入口边缘部位。加工过程中在孔入口附近收集到含有镍、锆、氧等元素的纳米颗粒,证实存在纳米颗粒的喷射。相对于普通脉冲激光而言,飞秒激光加工气膜孔可以避免裂纹、重铸层、附着残渣等缺陷,得到形状精度更高的孔。

参 考 文 献

- [1] 李孝堂, 侯凌云, 杨 敏. 现代燃气轮机技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2006: 1-4.
- [2] Lane C. The development of a 2D ultrasonic array inspection for single crystal turbine blades [M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2014: 1-12.
- [3] Pature N P, Gell M, Jordan E H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications[J]. Science, 2002, 296 (5566): 280-284.
- [4] Ramesh S, Ramirez D G, Ekkad S V, *et al.* Analysis of film cooling performance of advanced tripod hole geometries with and without manufacturing features[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 94: 9-19.
- [5] Zhu Hainan, Qi Yunxia. Development of machining technology gas holes on turbine blades [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(13): 71-74.
朱海南, 齐歆霞. 涡轮叶片气膜孔加工技术及其发展[J]. 航空制造技术, 2011(13): 71-74.
- [6] Beck T. Laser drilling in gas turbine blades[J]. Laser Technik Journal, 2011, 8(3): 40-43.
- [7] Sezer H K, Li L, Schmidt M, *et al.* Effect of beam angle on HAZ, recast and oxide layer characteristics in laser drilling of TBC nickel superalloys[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(15): 1972-1982.
- [8] 陈甲琪, 周立江. 涡轮叶片电加工孔重熔层控制及去除方法[J]. 电加工与模具, 2012(2): 61-62.
- [9] Liu D, Seraffon M, Flewitt P E J, *et al.* Effect of substrate curvature on residual stresses and failure modes of an air plasma sprayed thermal barrier coating system [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2013, 33(15): 3345-

3357.

- [10] Rickerby D S, Winstone M R. Coatings for gas turbines[J]. *Materials & Manufacturing Processes*, 1992, 7(4): 495-526.
- [11] Schulz W, Eppelt U, Poprawe R. Review on laser drilling I. Fundamentals, modeling, and simulation[J]. *Journal of Laser Applications*, 2013, 25(1): 012006.
- [12] Chichkov B N, Momma C, Nolte S, *et al.* Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. *Applied Physics A*, 1996, 63(2): 109-115.
- [13] 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): 5661-5668.
- [14] Feng Q, Picard Y N, McDonald J P, *et al.* Femtosecond laser machining of single-crystal superalloys through thermal barrier coatings[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 430(1): 203-207.
- [15] Das D K, McDonald J P, Yalisove S M, *et al.* Femtosecond pulsed laser damage characteristics of 7% Y_2O_3 -ZrO₂ thermal barrier coating[J]. *Applied Physics A*, 2008, 91(3): 421-428.
- [16] Haini J, Xiaojun Y, Wei Z, *et al.* Femtosecond laser pulses for drilling the shaped micro-hole of turbine blades[J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(4): 044202.
- [17] Laskin A, Laskin V. Beam shaping to provide round and square-shaped beams in optical systems of high-power lasers [C]. *SPIE*, 2016, 9834: 98340B.
- [18] Wang X C, Li Z L, Chen T, *et al.* 355 nm DPSS UV laser cutting of FR4 and BT/epoxy-based PCB substrates[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2008, 46(5): 404-409.
- [19] Wang X C, Zheng H Y, Chu P L, *et al.* Femtosecond laser drilling of alumina ceramic substrates[J]. *Applied Physics A*, 2010, 101(2): 271-278.
- [20] Ashkenasi D, Kaszemeikat T, Mueller N, *et al.* Laser trepanning for industrial applications[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 323-331.
- [21] Chen J K, Tzou D Y, Beraun J E. A semiclassical two-temperature model for ultrafast laser heating[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, 49(1): 307-316.
- [22] Cheng C, Xu X. Mechanisms of decomposition of metal during femtosecond laser ablation[J]. *Physical Review B*, 2005, 72(16): 165415.
- [23] Amoruso S, Bruzzese R, Wang X, *et al.* Propagation of a femtosecond pulsed laser ablation plume into a background atmosphere[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(4): 041503.
- [24] Povarnitsyn M E, Itina T E, Sentis M, *et al.* Material decomposition mechanisms in femtosecond laser interactions with metals[J]. *Physical Review B*, 2007, 75(23): 235414.
- [25] 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.
- [26] Zhou Y, Wu B, Tao S, *et al.* Physical mechanism of silicon ablation with long nanosecond laser pulses at 1064 nm through time-resolved observation[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(7): 2886-2890.
- [27] Voisey K T, Kudesia S S, Rodden W S O, *et al.* Melt ejection during laser drilling of metals[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 356(1): 414-424.
- [28] Voisey K T, Clyne T W. Laser drilling of cooling holes through plasma sprayed thermal barrier coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004, 176(3): 296-306.
- [29] 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 Technology*, 2001, 118(1-3): 179-186.