

# 激光微孔加工技术及应用\*

杨立军,孔宪俊,王 扬,丁 焯,张宏志,迟关心

(哈尔滨工业大学机电工程学院,哈尔滨 150001)

[摘要] 随着高端、精密装备的飞速发展,人们对高质量、大深径比微孔的需求越来越紧迫。基于此,介绍了飞秒激光与水导激光两种加工微孔的技术,首先探讨了两种微孔加工技术的原理并且回顾了两种微孔加工技术的研究现状;然后着重讨论了激光工艺参数、打孔方式、加工环境(真空、气体、液体、化学环境)、激光与水束光纤耦合对于高质量微孔加工的影响;最后总结了两种微孔加工技术在航空航天领域的应用以及当前面临的问题。

关键词:飞秒激光;水导激光;微孔;加工

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.19.032



杨立军

博士后,博导,哈尔滨工业大学机电工程学院航空宇航制造工程系党支部书记,中国光学工程学会委员,承担国家自然科学基金、863计划、国防基础科研、重大专项、国家教改课题等项目多项,主要科研方向为激光微细加工、激光微纳制造、激光复合加工及板材激光诱导成形技术等。获黑龙江省科学技术自然科学二等奖2项,授权发明专利5项,发表学术论文60余篇,其中SCI/EI检索50余篇。

\*基金项目:国家863项目(2015AA042702);国家自然科学基金面上项目(51275122);国家自然科学基金面上项目(51275117)。

我国经济经历了数10年高速发展后,正努力从制造大国向制造强国转变,不能仅靠低端的制造技术以及大量的人力物力,一定要大力发展高端制造业。激光制造技术不仅能够极大地提高生产效率而且绿色环保,能够进行大量的精密加工制造。

自从人们提出先进制造技术以来,激光微孔加工技术发展极为迅速,一方面激光技术的快速发展促进了超短脉冲激光在微孔加工中的应用,如皮秒、飞秒激光器的出现,大大提高了激光微孔加工的精度,同时减小了激光加工后材料的热影响区,特别是飞秒激光器技术的发展,为微孔加工提供了新的工业应用选择;另一方面,新型工艺技术的发展为激光微孔加工技术提供了新的思路,如激光与水射流复合去除技术即水导激光微细加工技术,由于具有加工后不存在热影响区,排渣渣更干净,加工更大的深度以及精度高、成本低等优点<sup>[1-3]</sup>,被广泛应用在微孔的精密加工领域。这些精密微孔加工技术引起了各国研究者的极大关注,在不远的将来一定会在我国国防、航空航天

等领域发挥无可替代的作用。

## 飞秒激光微孔加工

飞秒激光具有超快、高峰值功率的特性,几乎可以加工所有材料<sup>[4]</sup>,飞秒激光与材料的相互作用按照材料属性可以分为其与金属材料的相互作用和与非金属材料的相互作用:当飞秒激光照射到金属材料表面时,金属中包含的大量自由电子在飞秒量级时间内被激光光子加热,部分区域达到气化温度被气化,但是在作用时间内晶格的温度来不及发生显著变化,对周围材料的影响极小,因此飞秒激光与金属材料的作用属于冷加工范畴,能够减轻或避免长脉冲激光加工带来的加工质量问题(如热影响区、微裂纹等);当飞秒激光照射到非金属材料表面时,非金属材料本身不存在大量的自由电子,但是激光超强电场会使非金属材料产生大量自由电子<sup>[5-7]</sup>,此后发生飞秒激光与类似金属材料等离子体的相互作用,激发电子成“气”后原子之间的结合力丧失,从而使材料去除。飞秒激光作用时材料内能量传递如图1所示,

现阶段飞秒激光微孔加工方式主要有空气中直接打孔<sup>[8-9]</sup>、液体中辅助打孔<sup>[10-11]</sup>以及飞秒激光与电解腐蚀复合加工<sup>[12-13]</sup>等方法,其中激光空气中直接打孔由于操作简单而被广泛应用。

关于飞秒激光微孔加工的物理机制,目前研究学者们还没有形成广泛的共识,但是通过双温模型的解析和分析已经得到了一些研究成果。1974年,Anisimov等<sup>[14]</sup>首次提出双温模型方程,用于分析超短脉冲激光与金属材料的相互作用,并指出在超短脉冲作用金属材料时存在电子和晶格系统的不平衡。Jiang等<sup>[15-16]</sup>改进了双温方程,在计算电子密度和分布时采用冲击电离和光子电离的方式进行,量化处理电子比热及热扩散时间后,对材料烧蚀阈值及加工深度的预测更加准确。Karim等<sup>[17]</sup>利用激光辐照材料激发的电子热化、电子-声子耦合传递及电子热平衡的连续模型及经典分子动力学对激光作用金属Cr进行了仿真模拟,揭示了飞秒激光辐照金属Cr表面时,材料发生了熔化、再结晶、相变、爆炸破碎及喷射等一系列的微观机制变化。

吴雪峰<sup>[18]</sup>等基于超短脉冲与材料作用的一维双温模型,并利用有限差分方法进行分析,得到材料表层电子与晶格温度随时间变化规律,并从温度角度分析飞秒激光加工弹簧钢65Mn与K24高温合金非热熔性本质,并探讨了飞秒激光的烧蚀阈值和

液相爆破理论。Povarnitsyn等<sup>[19]</sup>分别利用耦合双温模型的流体力学模型和分子动力学模型对飞秒激光烧蚀金属材料过程进行仿真,指出分子动力学仿真能够精确地描绘烧蚀时亚稳态液体金属内成核现象及气液混合的动态生成过程,为理解飞秒激光烧蚀金属材料提供有效的模拟仿真。刘璇等<sup>[20]</sup>利用分子动力学对飞秒激光烧蚀金属Ni进行模拟仿真,研究了飞秒激光辐照下金属Ni的熔化及蚀除动力学过程。

激光加工工艺参数对于加工质量、效率、成本等有重要的影响。因此,各国学者对加工工艺参数展开了深入的研究,并且取得了一系列创新性的研究成果。研究的工艺参数主要有激光脉宽<sup>[21]</sup>、激光波长<sup>[22-23]</sup>、激光能量<sup>[24-25]</sup>、脉冲个数<sup>[26-27]</sup>等。其中脉冲能量、脉冲个数、打孔方式以及材料特性等条件直接影响加工微孔的尺寸精度以及形状精度。

此外,脉宽决定了单个脉冲与材料作用的时间,也是影响微孔加工的重要因素。随着微孔质量要求的不断提高,将激光进行时域整形以提高微孔的深径比,已成为了学者们研究重点。通常随着脉冲宽度降低,热效应减小,加工精度被极大提高。但随着脉宽的进一步减小,飞秒激光的非线性效应也给微孔加工带来了一定的负面效果,一定程度上制约了微孔的加工。

不仅激光加工工艺参数对于激

光微孔加工有重要影响,激光加工微孔方式也会对加工微孔的类型、尺寸有很大影响。激光加工微孔方式<sup>[28]</sup>主要分为单脉冲加工、多脉冲加工、环切加工和螺旋打孔4类。单脉冲加工是飞秒激光发射单个脉冲打在加工材料,直接形成所需微孔,这种微孔加工方法效率极高,每秒可形成上千个孔<sup>[29]</sup>。但单个脉冲去除量有限,适合加工较薄材料或深度较小的盲孔。对于深度较大孔或是反射率较大的加工材料,利用单脉冲激光难以加工出质量可靠的微孔。因此,需要多个脉冲的连续作用才能使得微孔深度不断增加,即所谓的多脉冲加工<sup>[30-31]</sup>。将微孔加工与激光线切割结合<sup>[32-33]</sup>后形成环切加工。另外,螺旋打孔是将环切加工与深度方向的进给运动相结合,能够加工出直径较大的深孔。飞秒激光脉冲序列也被证明可以有效地加工非金属材料的高深径比微孔。

近年来,随着飞秒激光加工微孔研究的深入,各国研究者发现飞秒激光加工环境(如真空、气体、液体、化学环境等)对于微孔加工质量、效率等有较大影响。2008年,Wynne分别在真空环境及空气环境中进行飞秒激光对铜材料的打孔试验,结果表明真空环境能有效提高加工质量,加工效果如图2所示,在真空环境下,孔周围无明显残渣和热影响区<sup>[34-36]</sup>。但是Kamlage等<sup>[37]</sup>在使用飞秒激光加工微细孔时发现,即使不需要真空

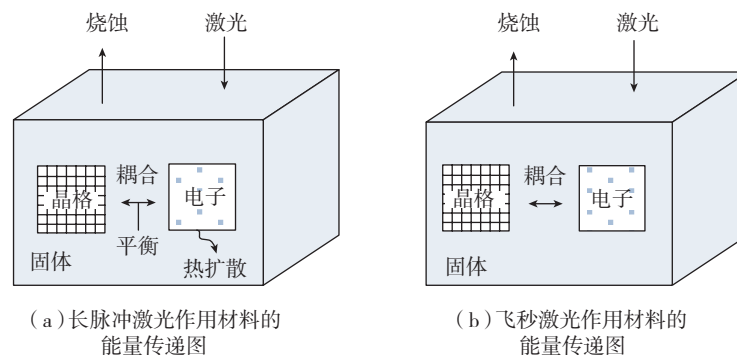
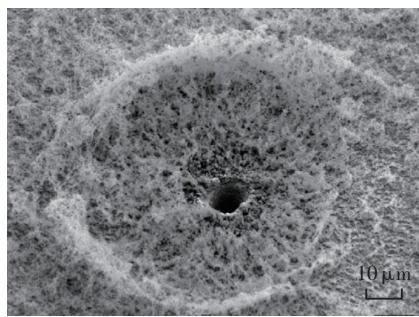


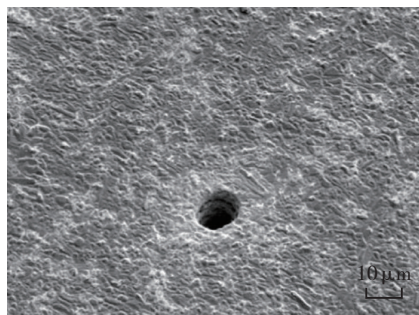
图1 不同脉宽激光作用时材料内能量传递示意图

Fig.1 Diagram of energy flow in materials under different pulse width laser

环境及后处理,仍能加工出高质量的微孔。图3即为他们研究团队在厚为1mm的不锈钢板加工的通孔结



(a) 空气环境



(b) 真空环境

图2 150fs激光微孔入口显微照片

Fig.2 Entrance micrograph of a laser drilling with a pulse length of 150fs

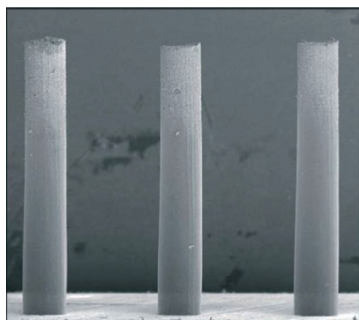
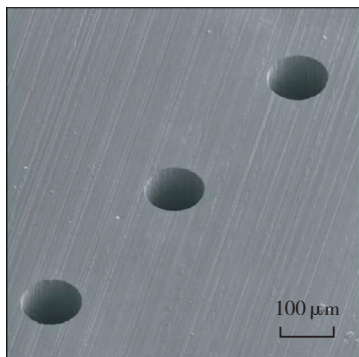


图3 飞秒激光深孔加工1mm厚不锈钢薄片  
Fig.3 Femtosecond laser drilling 1mm thick stainless steel sheet

构。

Rodden等<sup>[38]</sup>在金属钛上加工微孔,并对其中气体辅助作用进行了分析,研究表明,气体对微孔形貌的影响十分重要,尤其盲孔和通孔之间的差别更大。2004年,Hwang等<sup>[39]</sup>在液体辅助的基础上,利用超声辅助方式,加速烧蚀产物从微孔内部排出的效率。该方法可大大提高所加工微孔的质量,同时提高加工效率达30 μm/s。

此外,飞秒激光通过微爆炸可在透明介质中形成空腔结构<sup>[40-41]</sup>,与常规微孔结构不同,这是一种通过挤压成形且不涉及排屑的微孔方法。利用在介质材料中“紧聚焦”激光出现的球差现象<sup>[42]</sup>,Kongsuwan等<sup>[43]</sup>在石英玻璃上获得了空腔结构。与利用球差形成空腔结构不同,Toratani等<sup>[44]</sup>发现飞秒激光自聚焦现象在空腔状微孔结构的形成中起到了重要作用,加工出200nm的空腔结构。

### 激光与水射流复合打孔技术

激光与水射流复合去除技术是激光与微细水射流的有益结合,简称水导激光微细加工技术,原理如图4所示,它是将高能激光束耦合进微细水射流,水射流作为光纤使激光在水束内形成全反射,实现在水射流的传播,并由水射流将激光引导到工件表面而对工件进行加工蚀除。该复合去除技术与干激光去除相比,具有很多优点,如切割后材料不存在热影响区,熔渣排除更干净,切割更深,切割精度高,具有很高的重复性,加工成本低等。

1993年,瑞士Richerzhagen<sup>[45]</sup>深入研究液束导光现象并将这种技术成功用于材料加工,并在瑞士洛桑成立Synova公司,致力于水导激光切割系统的研发制造,目前研发的系统已经成功应用于Si、GaAs、InP、微细加工等领域。此后其他国家开始关注并相继开展了水导激光加工技

术的探索,目前除瑞士外,主要有美、中、德、英等国家对该技术进行了深入的研究。在国内关于水导激光加工技术的研究起步较晚,2007年,哈尔滨工业大学Li等<sup>[46]</sup>率先成功地开展了该方向的研究,对相关理论和加工工艺进行了深入的分析,图5为初期试验装置,耦合装置直接与激光头连接。不久,厦门大学詹才娟<sup>[47]</sup>

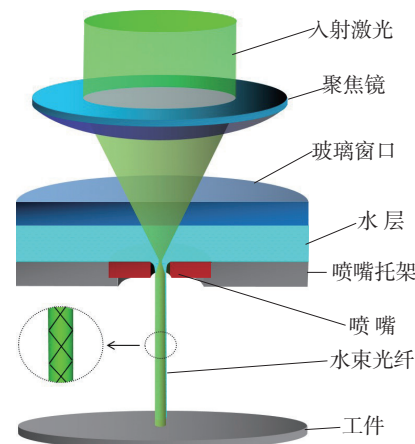
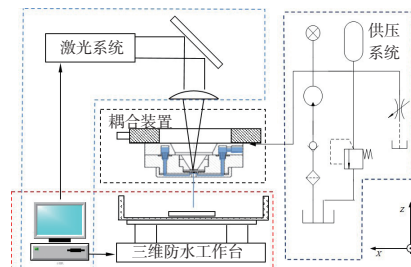
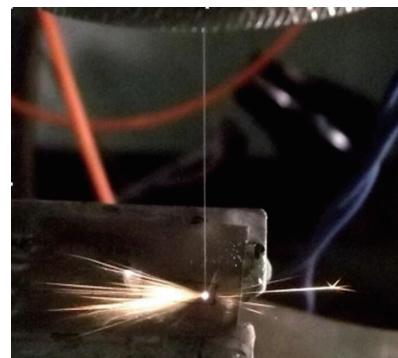


图4 水导激光加工技术原理图

Fig.4 Schematic diagram of water-jet guided laser machining



(a) 加工系统



(b) 加工状态

图5 激光与水射流复合加工系统和加工状态

Fig.5 System of water-jet guided laser and the drilling process

和江苏大学也针对该技术进行了不同程度的探索。总体来说,国内的研究尚处于试验性阶段,相关技术和设备都有待完善。

激光与水束光纤的耦合是水导激光加工最为关键的部分,现阶段较成熟的激光束处理方案是瑞士 Synova 公司提出的用光纤将激光束从激光器中引出,再经双透镜聚焦进行耦合,适用于多种场合。国内哈工大的试验装置是将高斯激光准直后经过聚焦凸透镜直接耦合进射流腔体的喷孔位置,结构简单并实用<sup>[48]</sup>。厦门大学叶瑞芳等<sup>[49]</sup>用轴棱锥镜对高斯激光进行聚焦,实现无衍射光束与水射流的耦合。此外,激光在水中的散射也会导致激光强度的改变,当激光功率高于相应阈值时,会相继发生受激布里渊散射、受激拉曼散射和受激热散射等非线性光学过程,继而影响激光与水束的耦合加工。Kray 等<sup>[50]</sup>对激光耦合进入水束后的非线性受激拉曼散射现象进行了研究,发现大功率密度的激光非线性受激拉曼散射现象明显高于小功率密度的激光,且水束光纤的受激拉曼散射阈值远远小于普通光纤。瑞士的 Richerzhagen<sup>[51]</sup>等针对温度变化引起的水折射率改变,研究了静水中的激光传播热散焦现象,建立了相关数学模型。

关于水导激光加工理论方面的研究较少。2002年, Yang 等<sup>[52]</sup>对水导激光刻蚀硅片进行了数学建模,综合考虑了激光能量输入、水射流的冷却以及材料熔化和去除。与试验结果有较好的一致性。2007年,哈尔滨工业大学 Wang 等<sup>[53-54]</sup>对水导激光加工进行了数学建模并用 ANSYS 有限元软件对不同材料打孔进行了仿真分析,数值仿真和试验结果的对比取得了很好的一致性。2011年,江苏大学詹才娟等<sup>[55]</sup>用有限体积法对水导激光加工硅材料的过程建立了传热模型,对打孔过程中材料熔池

内部的液体流动和热传导进行了数值模拟和分析,通过数值模拟提出水导激光双脉冲打孔工艺。

各国学者对于水导激光加工微孔的试验方面进行了大量的研究,并且取得了很好的研究成果。2004年, Yang 等<sup>[56]</sup>用水导激光加工方法对硅晶圆片进行切割和打孔试验,避免了传统加工在边缘产生的微裂纹、碎屑和毛刺,而高的切割效率和切割形状的灵活性更突出了水导激光加工的优势。哈工大王扬等<sup>[57]</sup>对 TC4 薄板进行了水导激光打孔工艺试验研究,结果表明水导激光打孔的入口和出口边缘熔渣堆积很少,没有明显的烧伤的痕迹,孔的圆度和通透性都较理想,如图 6 示。Wagner 等<sup>[58]</sup>分别用水导激光与传统激光对  $150\mu\text{m}$  厚的不锈钢进行微孔加工,结果表明,相同加工效率下,水导激光加工产生的热影响区更小,加工后孔边缘没有毛刺且没有烧伤痕迹,质量明显好于传统激光加工出的微孔。

### 飞秒激光与激光水射流复合加工在航空航天领域的应用

在航空航天领域,航空发动机被誉为“工业制造中的明珠”,其性能

的好坏主要受制于航空发动机涡轮叶片的质量,而涡轮叶片需要长时间工作在高温的环境中,为了延长发动机的使用寿命,必须对叶片进行冷却,叶片冷却一般需要大量的气膜孔来实现,而这些气膜孔孔径很小,位置精度要求很高<sup>[59]</sup>,且多为斜孔和不规则孔<sup>[60]</sup>,给加工制造带来了很大的困难。

目前,叶片气膜孔的加工方法主要有传统的纳秒激光加工和电火花加工。传统纳秒激光打孔效率高,打孔费用低,但加工后不可避免地会产生再铸层甚至微裂纹,小孔下方端口有熔瘤堆积,磨粒流难以去除。电火花加工的缺点是电极制作和修复困难,生产效率低,同时也会产生再铸层。电火花与电解复合加工虽能够去除热影响区,但存在加工效率较低,加工精度不容易控制等问题。

随着飞秒激光技术的快速发展,飞秒激光加工叶片气膜孔正逐步替代纳秒和电火花加工气膜孔,如图 7 所示,为哈工大杨立军等利用飞秒激光在镍基高温合金 K24 加工出的微孔,微孔的出口入口处不仅圆度高,而且孔壁无热影响区。2008年,美国空军将飞秒激光加工的方法应用

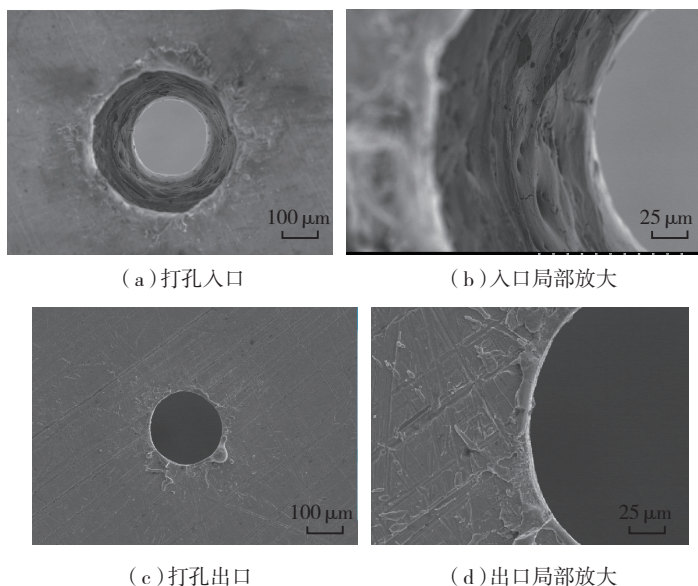
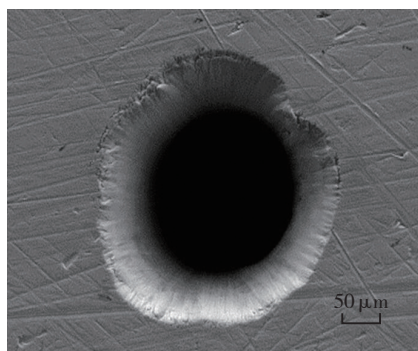
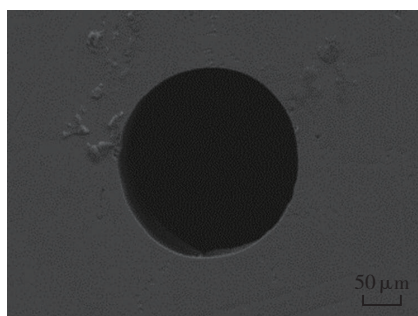


图6 水导激光打孔典型形貌及放大

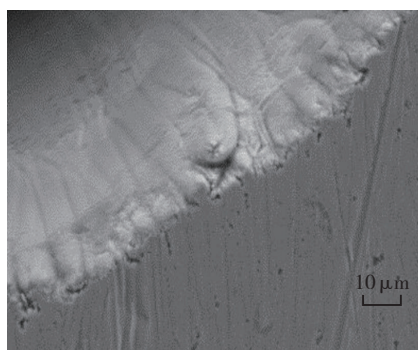
Fig.6 Typical morphology of drilling with water-jet guided laser and enlarged view



(a) 入口形貌



(b) 出口形貌

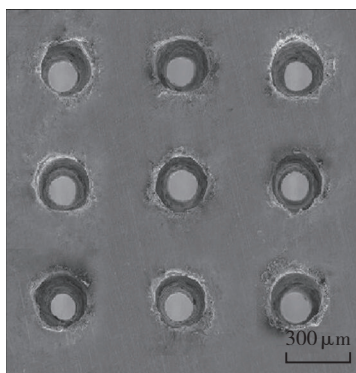


(c) 入口局部放大

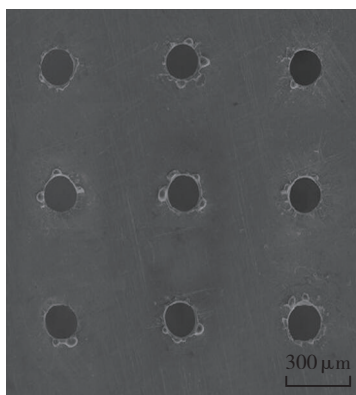
图7 飞秒激光加工K24高温合金进出口及进口局部形貌

Fig.7 Entrance and exit topography of femtosecond laser drilling super alloy K24

于航空发动机核心部件的加工,尤其是应用飞秒激光加工气膜孔,这一新技术大大提高了飞机发动机的综合性能并延长了使用寿命。此后,德国、新加坡、日本、中国等国都认识到了这一技术在未来超精细加工领域的应用前景,相继出台了支持该技术发展的相关举措。激光复合水射流加工技术目前大量应用在微细加工中,在机械方面主要针对PCD、CBN、陶瓷、钛合金等难加工材料的加工。图8为哈工大王扬、杨立军等利用激光



(a) 打孔入口



(b) 打孔出口

图8 激光水射流复合加工的TC4薄板微孔阵列

Fig.8 Drilling array for TC4 sheet using water-jet guided laser

水射流加工TC4薄板打孔阵列和微纳沟槽结构,加工出的微孔入口和出口不仅熔渣少,而且没有热影响区,在电子方面主要应用在加工半导体材料,如Si、GaAs、InP等,在不远的将来有望应用在航空发动机核心部件的精密加工等领域。

### 结束语

随着国内外先进制造领域的不断发展,人们对微细孔加工技术的要求越来越高。飞秒激光与激光水射流复合加工技术在材料的精密微细加工上有着巨大的优势,能够加工出没有热影响区、精度高、深径比大的微细孔。因此飞秒激光加工与激光水射流复合加工被广泛应用于航空发动机涡轮叶片等零件的微孔加工。当前,飞秒激光与激光水射流复合加工仍面临诸多挑战,学者们围绕着激

光与材料相互作用的物理机制、数学模型,激光与水射流耦合机理,加工工艺参数优化及激光设备集成化、小型化等问题进行了深入的研究,在不远的将来飞秒激光加工与激光水射流复合技术的应用将越来越广泛。

### 参考文献

- [1] 曹凤国. 激光加工[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.  
CAO Fengguo. Laser machining[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.
- [2] 钟敏霖, 刘文今. 国际激光材料加工研究的主导领域与热点[J]. 中国激光, 2008, 35(11):1653-1659.  
ZHONG Minlin, LIU Wenjin. The dominant area and hot spot in the research of the laser material processing[J]. Chines Journal of Lasers, 2008, 35(11): 1653-1659.
- [3] 张国顺. 现代激光制造技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 1-10.  
ZHANG Guoshun. Modern laser manufacture technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 1-10.
- [4] 阎吉祥. 激光原理技术及应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006:268-269.  
YAN Jixiang. The principle of laser technology and its application[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006:268-269.
- [5] 袁根福. 激光加工技术的应用与发展现状[J]. 安徽建筑大学学报, 2004, 12(1):30-34.  
YUAN Genfu. The application of laser processing technology and the development situation[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry, 2004, 12(1):30-34.
- [6] 关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 1998.  
GUAN Zhenzhong. Laser processing technology handbook[M]. Beijing: China Metrology Press, 1998.
- [7] 夏博, 姜澜, 王素梅, 等. 飞秒激光微孔加工[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 1-12.  
XIA Bo, JIANG Lan, WANG Sumei, et al. Femtosecond drilling micro holes[J]. China Laser, 2013, 40(2):1-12.
- [8] SPENCE D E, KEAN P N, SIBBETT W. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti: sapphire laser[J]. Optics Letters, 1991, 16(1): 42-44.
- [9] GATTASS R, MAZUR E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J].

- Nature Photonics, 2008, 2(4): 219–225.
- [10] HE F, CHENG Y, XU Z, et al. Direct fabrication of homogeneous microfluidic channels embedded in fused silica using a femtosecond laser[J]. Optics Letters, 2010, 35(3): 282–284.
- [11] EGASHIRA K, MIZUTANI K, NAGAO T. Ultrasonic vibration drilling of microholes in glass[J]. CIRP Annals–Manufacturing Technology, 2002, 51(1): 339–342.
- [12] HAN M S, MIN B K, LEE S J. Geometric improvement of electrochemical discharge micro-drilling using an ultrasonic-vibrated electrolyte[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, 19(6): 065004–65011(8).
- [13] ZHENG H Y, HUANG H. Ultrasonic vibration-assisted femtosecond laser machining of microholes[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007, 17(8): N58–N61.
- [14] ANISIMOV S I, KAPELIOVICH B L, PERELMAN T L. Emission of electrons from the surface of metals induced by ultrashort laser pulses[J]. Zh. Eksp. Teor. Fiz, 1974, 66(2): 776–781.
- [15] JIANG L, TSAI H L. Plasma modeling for ultrashort pulse laser ablation of dielectrics[J]. J. Appl. Phys., 2006, 100(2): 023116–023116–7.
- [16] PERRIE W, GILL M, ROBINSON G, et al. Femtosecond laser micro-structuring of aluminum under helium[J]. Appl. Surf. Sci., 2004, 230(1–4): 50–59.
- [17] KARIM E T, LIN Z, ZHIGILEI L V, et al. Molecular dynamics study of femtosecond laser interactions with Cr targets[C]// American Institute of Physics. AIP Conference Proceedings, 2012, 1464(1): 280–293.
- [18] 吴雪峰. 飞秒激光烧蚀金属的理论及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- WU Xuefeng. Femtosecond laser ablation of metal theory and experimental study[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [19] POVARNITSYN M E, FOKIN V B, LEVASHOV P R. Microscopic and macroscopic modeling of femtosecond laser ablation of metals[J]. Applied Surface Science, 2015, 357: 1150–1156.
- [20] 刘璇, 王扬. 超短激光烧蚀金属机制的分子动力学研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(4): 500–504.
- LIU Xuan, WANG Yang. Ultrashort laser removal metal mechanism of molecular dynamics research[J]. Strong Laser and Particle Beams, 2005, 17(4): 500–504.
- [21] CHENG J, LIU C, SHANG S, et al. A review of ultrafast laser materials micromachining[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 46: 88–102.
- [22] WANG W, CHEN J, LI D, et al. Modelling and optimisation of a femtosecond laser micro-machining process for micro-hole array products[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(5–8): 1293–1303.
- [23] SHIRAISHI M, GOYA K, SEKI A, et al. An LSPR fiber optic sensor based on in-line micro-holes fabricated by a second harmonic 400-nm femtosecond laser[C]//SPIE OPTO. International Society for Optics and Photonics, 2016.
- [24] KHUAT V, MA Y, SI J, et al. Fabrication of through holes in silicon carbide using femtosecond laser irradiation and acid etching[J]. Applied Surface Science, 2014, 289: 529–532.
- [25] 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.
- [26] HUANG H, YANG L M, LIU J. Micro-hole drilling and cutting using femtosecond fiber laser[J]. Optical Engineering, 2014, 53(5): 688–696.
- [27] LIU S, WU J, LUO M, et al. Investigation of impact of photonic crystal fiber structure modified by femtosecond laser micromachining on long period gratings' sensing characteristics[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 77: 79–84.
- [28] DAUSINGER F. Femtosecond technology for precision manufacturing: fundamental and technical aspects[C]// SPIE. Third International Symposium on Laser Precision Microfabrication, International Society for Optics and Photonics. LAMP 2002: International Congress on Laser Advanced Materials Processing, Osaka, Japan, 2003: 471–478.
- [29] NAKASHIMA S, SUGIOKA K, MIDORIKAWA K. Enhancement of resolution and quality of nano-hole structure on GaN substrates using the second-harmonic beam of near-infrared femtosecond laser[J]. Applied Physics A, 2010, 101(3): 475–481.
- [30] BAUDACH S, BONSE J, Krüger J, et al. Ultrashort pulse laser ablation of polycarbonate and polymethylmethacrylate[J]. Applied Surface Science, 2000, 154–155: 555–560.
- [31] TAO S, WU B, LEI S. Study of laser beam propagation in microholes and the effect on femtosecond laser micromachining[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(12): 123506–123506–6.
- [32] NIKUMB S, CHEN Q, LI C, et al. Precision glass machining, drilling and profile cutting by short pulse lasers[J]. Thin Solid Films, 2005, 477(1): 216–221.
- [33] BÄRSCH N, KÖRBER K, OSTENDORF A, et al. Ablation and cutting of planar silicon devices using femtosecond laser pulses[J]. Applied Physics A, 2003, 77(2): 237–242.
- [34] WYNNE A E, STUART B C. Rate dependence of short-pulse laser ablation of metals in air and vacuum [J]. Appl. Phys. A: Mater. Sci, 2003, 76(3): 373–378.
- [35] JUKODKAZIS S, OKUNO H, KUJIME N, et al. Hole drilling in stainless steel and silicon by femtosecond pulses at low pressure [J]. Appl. Phys. A: Mater. Sci, 2004, 79(4): 1555–1559.
- [36] WECK A, R. CRAWFORD T H, WILKINSON D S, et al. Laser drilling of high aspect ratio holes in copper with femtosecond, picosecond and nanosecond pulses[J]. Appl. Phys. A: Mater. Sci, 2008, 90(3): 537–543.
- [37] 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.
- [38] RODDEN W S O, KUDESIA S S, HAND D P, et al. Use of “assist” gas in the laser drilling of titanium[J]. Journal of Laser Applications, 2001, 13(5): 204–208.
- [39] HWANG D J, CHOI T Y, GRIGOROPOULOS C P. Liquid-assisted femtosecond laser drilling of straight and three-dimensional microchannels in glass[J]. Applied Physics A, 2004, 79(3): 605–612.
- [40] GLEZER E N, MAZUR E. Ultrafast-laser driven micro-explosions in transparent materials[J]. Applied Physics Letters, 1997, 71(7): 882–884.
- [41] JUODKAZIS S, MISAWA H, HASHIMOTO T, et al. Laser-induced microexplosion confined in a bulk of silica: Formation of nanovoids[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(20): 201909–201909–3.
- [42] SUN Q, JIANG H, LIU Y, et al. Effect of spherical aberration on the propagation of a

- tightly focused femtosecond laser pulse inside fused silica[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2005, 7(11): 655-659.
- [43] KONGSUWAN P, WANG H, YAO Y L. Single step channeling in glass interior by femtosecond laser[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 112(2): 1-9.
- [44] TORATANI E, KAMATA M, OBARA M. Self-fabrication of void array in fused silica by femtosecond laser processing[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(17): 171103-171103-3.
- [45] RICHERZHAGEN B. Entwicklung und konstruktion eines systems zurübertragung von laserenergie für die laserzahnbehandlung[M]. Switzerland : EcolePolytechnique de Lausanne, 1994:45-74.
- [46] LI L J, WANG Y, YANG L, et al. Experimental research on water-jet guided laser processing[C]//SPIE. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2007(6595):251-256.
- [47] 詹才娟. 微水射流导引激光精密打孔过程的传热与流动分析[D]. 镇江: 江苏大学, 2009:41-52.
- ZHAN Caijuan. The heat transfer and flow analysis in water jet guided laser drilling[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009:41-52.
- [48] 李灵, 杨立军, 王扬, 等. 水导激光微细加工中激光与水束光纤耦合技术[J]. 光学精密工程, 2008(16):1614-1621.
- LI ling, YANG Lijun, WANG Yang, et al. Laser and water fiber coupling technology[J]. Optical Precision Engineering, 2008(16):1614-1621.
- [49] 叶瑞芳, 沈阳, 王磊, 等. 新型水导引激光耦合系统研究[J]. 厦门大学学报, 2009,48(3): 369-372.
- YE Ruifang, SHEN Yang, WANG Lei, et al. The research on the new water guiding laser coupling system[J]. Journal of Xiamen University, 2009,48(3): 369-372.
- [50] KRAY D, HOPMAN S, SPIEGEL A, et al. Study on the edge isolation of industrial silicon solar cells with waterjet-guided laser[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2007, 91(17): 1638-1644.
- [51] RICHERZHAGEN B, Delacrétaz G, Salathé R P. Complete model to simulate the thermal defocusing of a laser beam focused in water[J]. Optical Engineering, 1996, 35(7):2058-2066.
- [52] YANG X, XU Z, LENG Y, et al. Multiterawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification[J]. Optics Letters, 2002,27(13): 1135-1137.
- [53] WANG Y, LI L, YANG L, et al. Simulation and experimental research on water-jet guided laser cutting silicon wafer[C]//IEEE Xplore. Proceedings of 2008 International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging. ICEPT-HDP 2008, 2008:25-29.
- [54] YANG L J, WANG M L, WANG Y, et al. Numerical simulation on the temperature field of water-jet guided laser micromachining[J]. Advanced Materials Research, 2009,69-70:333-337.
- [55] 詹才娟, 李昌烽, 潘永琛, 等. 微水射流导引激光精密打孔过程的流动分析[J]. 力学季刊, 2011, 32(2): 159-165.
- ZHAN Caijun, LI Changfeng, PAN Yongchen, et al. The flow analysis of micro water jet guided laser precision punching process[J]. Mechanics Quarterly, 2011, 32(2): 159-165.
- [56] YANG L J, WANG M L, WANG Y, et al. Numerical and experimental research on water-jet guided laser micromachining[J]. Materials Science Forum, 2009,626-627 :297-302.
- [57] 王扬, 李春奇, 杨立军, 等. 非常规激光加工技术的研究[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 448-454.
- WANG Yang, LI Chunqi, YANG Lijun, et al. The research on unconventional laser processing technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011,40(3): 448-454.
- [58] WAGNER F R, BOILLATA C, BUCHILLY J M, et al. High-speed cutting of thin materials with a Q-switched laser in a water-jet vs. conventional laser cutting with a free running laser[C]//Proceedings of SPIE, 2003(4977) :70-71.
- [59] 张志强, 宋文兴, 陆海鹰. 热障涂层在航空发动机涡轮叶片上的应用研究[J]. 航空发动机, 2011,37(2): 38-42.
- ZHANG Zhiqiang, SONG Wenxing, LU Haiying. The thermal barrier coating application research in gas turbine engine[J]. Aircraft Engine, 2011, 37(2): 38-42.
- [60] 李广超, 朱惠人, 廖乃冰, 等. 带单排气膜孔的叶片前缘气膜冷却换热实验[J]. 推进技术, 2008,29(3): 290-294.
- LI Guangcao, ZHU Hui ren, LIAO Naibing, et al. The heat transfer experiment of the blade leading edge with holes cooling[J]. Propulsion Technology, 2008,29(3): 290-294.

## Laser Micro-Holes Machining Technology and Its Application

YANG Lijun, KONG Xianjun, WANG Yang, DING Ye, ZHANG Hongzhi, CHI Guanxin

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**[ABSTRACT]** With rapid development of high quality and sophisticated equipment, the demand of high quality, high depth/radius ratio micro-holes is more and more urgent. Femtosecond laser and water-jet guided laser drilling technologies are introduced. Firstly, the principles of two kinds of micro-holes machining technologies are discussed and two kinds of micro-holes drilling technology research status are reviewed; Then, the effects of processing mode, laser process parameters, processing environment (vacuum, gas, liquid, chemical environment) and laser beam coupling with water on the micro-hole drilling quality are discussed; Finally, aerospace application of two kinds of micro-hole machining technologies and current problems which we face are summed up.

**Keywords:** Femtosecond laser; Water-jet guided laser; Mirco-hole; Machining

(责编 玲犀)