

飞秒激光微孔加工

夏 博 姜 澜 王素梅* 闫雪亮 刘鹏军

(北京理工大学先进加工技术国防重点学科实验室, 北京 100081)

摘要 飞秒激光具有超快、超强的特性,在微孔加工中有着独特的优势,尤其是针对高品质、大深径比的微孔加工有着不可替代的作用。介绍了超短脉冲激光微孔加工的优势以及研究意义,综述了近十几年来基于超短脉冲激光的微孔加工研究现状,并讨论了材料、激光脉冲参数、加工方式和加工环境等因素对超短脉冲激光微孔加工的影响。指出了现阶段超短脉冲激光微孔加工的应用前景,并总结了超短脉冲激光微孔加工当前所面临的挑战,以及今后的研究重点。

关键词 超快光学;超短脉冲激光;微孔加工;飞秒脉冲;脉冲序列

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0201001

Femtosecond Laser Drilling of Micro-Holes

Xia Bo Jiang Lan Wang Sumei Yan Xueliang Liu Pengjun

(Key Laboratory of Fundamental Science for Advanced Machining,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract With ultrashort pulses and ultra high power densities, femtosecond laser has unique advantages in micro-holes drilling, especially for high-quality and high-aspect-ratio micro-holes. The advantages and study implications of ultrashort pulse laser drilling of micro-holes are introduced. Major progress in femtosecond laser drilling of micro-holes is reviewed. The impacts of materials properties, laser parameters, drilling methods and ambient environments are discussed. In addition, potential applications, key challenges and future research trends are presented.

Key words ultrafast optics; ultrashort pulse laser; micro-hole drilling; femtosecond pulse; pulse train

OCIS codes 320.7090; 320.5540; 260.5950

1 引 言

近些年,超短脉冲激光在精密加工领域备受关注^[1~3]。由于超短脉冲激光脉宽短于绝大多数物理化学过程的特征时间(电子弛豫时间及电子-声子弛豫时间等)^[4,5],使制造过程中调控电子状态以及实现“非热加工”成为可能^[6]。相比于长脉冲激光,飞秒激光加工是一个非线性、非平衡过程^[7],具有阈值效应明显^[8,9]、极小化热影响区^[10,11]、极小化重铸层、可控性高^[12]等特点,在近十几年被广泛应用于微纳制造领域^[13]。例如,飞秒激光可以用来加工光

波导^[14~16]、表面微纳结构^[17]、微流体装置^[18~20]、微传感器^[21~24]、三维光子晶体结构^[25,26]等。飞秒激光微纳制造在生物医疗、新能源、汽车、大飞机等领域,作为制造新方法受到广泛关注。特别对于微纳尺度的高品质孔,相比于传统的加工方法,飞秒激光是一种更加有效的加工手段。

在实际应用中,对于高品质微孔的加工,传统的方法具有一定的局限性。常见的微孔加工方法中电子束加工和聚焦离子束使用条件苛刻、效率低、设备昂贵;电火花腐蚀只能加工导电材料;电化学打孔效

收稿日期: 2012-08-31; **收到修改稿日期:** 2012-10-07

基金项目: 国家 973 计划(2011CB013000)和国家自然科学基金(90923039,51025521)资助课题。

作者简介: 夏 博(1988—),男,博士研究生,主要从事超短脉冲激光微孔加工方面的研究。

E-mail: xiachaoshang@163.com

导师简介: 姜 澜(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事超短脉冲激光微纳制造方面的研究。

E-mail: jianglan@bit.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: wangsumeimei@bit.edu.cn

率极低、材料局限;机械钻孔加工较硬材料困难且直径比小。

相比于传统方法,飞秒激光微孔加工具有材料适应性广、非接触、无污染、高精度、高效率等优点。尤其是针对 $30\ \mu\text{m}$ 以下的微孔,飞秒激光是最理想的加工手段之一。过去的十几年间,飞秒激光微孔加工一直是各机构研究的热点课题,主要有空气或真空中的直接钻孔^[27~29],飞秒激光改性辅助化学腐蚀加工^[30~32],液体辅助飞秒激光三维钻孔^[33~35]等。应用中,要根据微孔结构的质量要求、功能要求和成本等因素,综合选择合适的加工方法。在众多的加工方法中,直接钻孔的方式(即将激光聚焦后,沿激光传播方向进行打孔)使用最广泛,也是最简单最直接的激光微孔加工方式,本文综述了该方法在理论和实验方面的研究进展、应用、存在问题及展望。

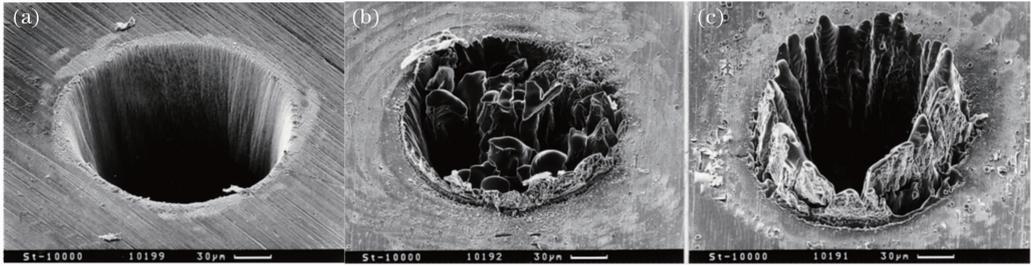


图1 不同脉宽时 $100\ \mu\text{m}$ 的薄层钢材的钻孔结果。(a) 200 fs;(b) 80 ps;(c) 3.3 ns

Fig.1 Drilling results in $100\ \mu\text{m}$ thin layer of steel with different pulse widths. (a) 200 fs; (b) 80 ps; (c) 3.3 ns

微孔是最常见的关键结构之一,由于超短脉冲激光在微孔加工中的优势明显,吸引了众多课题组对这一方向探索和研究。研究重点主要集中在以下4个方面:加工机理研究;激光脉冲参数因素研究;加工运动方式研究;加工环境因素研究。

2.1 激光作用机理研究

飞秒激光与物质的相互作用可以分为两类:1)与金属材料的作用;2)与非金属材料的作用。

金属中存在大量的自由电子,当飞秒激光与金属作用时,金属表面自由电子被瞬时加热,通过电子-电子碰撞,在数飞秒到数十飞秒内重建费米分布。但自由电子质量比离子质量小很多,每次电子-离子的碰撞只能传递很少的能量,脉冲作用时间内晶格的温度几乎不变,所以自由电子的能量传递给晶格需要更长的时间^[41]。Anisimov等^[42]提出的双温模型,被 Qiu等^[43,44]进行改进,并成为当前广泛使用的飞秒激光与金属材料相互作用的模型基础。但其相变机制仍有待进一步研究。

非金属材料本身并不像金属材料那样存在大量的自由电子,所以吸收机理完全不同。在飞秒激光

2 飞秒激光微孔加工研究现状

1985年,Strickland等^[36]第一次使用啁啾放大的方法,得到了高峰值的超短脉冲激光。1991年,Spence等^[37]发明了锁模钛宝石激光器,使飞秒激光器结构变得更加简单稳定。此后,高功率的飞秒激光器逐渐商业化,基于飞秒激光的应用研究日益成为热点。

研究表明,相比长脉冲激光加工的明显熔化现象,飞秒激光应用在微孔加工中具有高精度、极小化重铸^[38]、高可控性和可重复性^[39]的特点。如图1所示,1996年,Chichkov等^[40]在钢、硅、铜的薄层材料进行不同脉宽对比实验,飞秒激光加工的微孔入口质量高,而长脉冲激光加工中热扩散为主导,熔化、重铸明显,这一对比发现引起了广泛的关注。

作用下,强电场光致电离或电子碰撞电离导致雪崩电离的作用下产生大量自由电子,从而使非金属材料表面薄层转变为具有金属特性的吸收等离子体^[45],此后激光-等离子体的相互作用导致材料去除^[5]。

此外,随着计算机性能的提高,分子动力学用来模拟飞秒激光高度复杂、非平衡的烧蚀过程,也是当前国内外的热点研究领域之一。分子动力学模拟可以有效地从原子层面解释熔化、剥落、膨胀沸腾等现象^[46]。但该方法忽略了量子效应,因此,需要将量子力学改进的双温模型和分子动力学模拟相结合,分析材料相变机理。

在微孔加工方面,飞秒激光在加工初始阶段,形成坑状结构。随着脉冲数的增多,激光将通过孔壁反射、衍射以及等离子体吸收等多种方式传播至孔底,使得孔深度呈线性增加。然而,孔深逐步增加的过程中,形成的碎屑需要更长的时间从孔中飞出,同时随着微孔深度的增加,激光传播至孔底部的能量不断减小,因此,微孔深度增加变缓,最终达到饱和烧蚀深度,微孔深度不再增加。

Aldana 等^[47]对这一过程进行了理论模拟,通过对飞秒激光电场分布以及激光作用后产生的自由电子密度分布进行了计算,并建立模型,分析了入口的衍射和孔壁反射对微孔加工深度极限的影响,认为随着孔加工的进行,已经形成的微孔结构对后续飞秒激光光场分布进行了影响,激光与物质间相互作用,形成自适应结构,最终使得飞秒激光作用在材料后产生的自由电子密度不足以产生烧蚀作用,进而达到深度饱和。

通过成像系统,Shah 等^[48,49]对微孔加工过程进行了实验观测,初始阶段,加工所形成的等离子体均匀分布,形成均匀的微孔。而随着加工的进行,孔内形成的等离子体充当了飞秒激光向孔底传播的媒介,使得飞秒激光能够继续对微孔进行加工。最后,由于微孔深度增加后,孔内的等离子体分布开始不均匀,并不能充满微孔,且光丝状等离子体不稳定扰动,阻碍了孔深的进一步增加,微孔深度不再增加。

然而,飞秒激光微孔的作用机理涉及材料、光学、物理等多方面因素,是一个从飞秒到毫秒、从纳米到微米的跨尺度的过程,当前仍未出现较为完善的解释。

2.2 激光脉冲参数因素研究

飞秒激光微孔加工是一个综合的作用过程,近十几年,对加工工艺中激光脉冲参数因素的影响有大量的研究,例如:激光脉宽^[50,51]、脉冲通量^[52,53]、偏振方向^[54~56]、激光波长^[57,58]、脉冲个数^[59~61]、聚

焦状态^[62,63]以及重复频率^[64,65]等。这些因素的作用主要体现在空域和时域两大方面。

1) 在空域分布方面

脉冲通量、激光波长、聚焦物镜、偏振方向、材料特性等条件决定了激光焦点处达到阈值的区域。而这个区域的分布,直接影响加工的微孔直径、深度和锥度等。

使用高斯光束的飞秒激光烧蚀材料时,烧蚀面积取决于表面处达到烧蚀阈值的面积。材料阈值一定的情况下,达到阈值通量的面积与脉冲通量的对数呈线性关系^[66,67],即微孔入口直径与脉冲通量直接相关。加工直径较小的孔,适合使用“紧聚焦”的物镜,以便减小入口,例如直径小于 $10\ \mu\text{m}$ 的孔和纳米孔^[68,69]。而一般高深径比微孔,则适合使用“松聚焦”的长焦距物镜^[70],虽然入口有所增大,但激光加工的深度也会大大增加。此外,激光焦点相对于材料的位置,在一定程度上也会影响微孔加工的形貌^[71]。

2) 在时域分布方面

脉宽是影响微孔加工的重要因素,将激光能量压缩至飞秒的时间尺度中,产生了超强功率密度,使得加工机理大不相同,能够得到突破衍射极限的亚微米孔结构,如图 2 所示^[72],图中为聚焦离子束(FIB)和扫描电子显微镜(SEM)相结合的测试系统,以及单脉冲烧蚀玻璃形成的高深径比、亚微米孔结构。

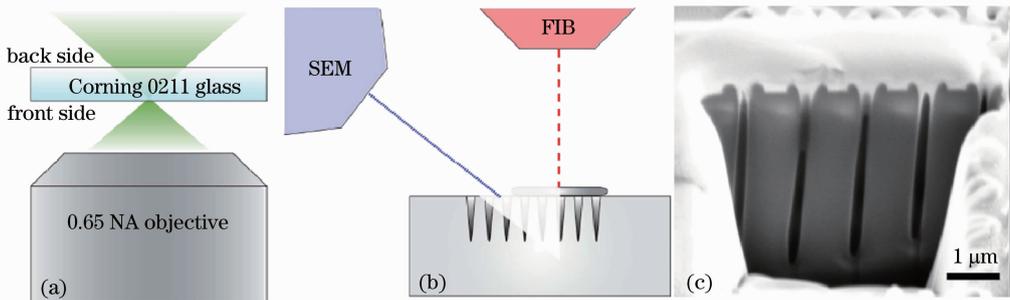


图 2 (a)加工示意图;(b) FIB 和 SEM 相结合的测试系统示意图;(c)纳米孔结构截面 SEM 图

Fig. 2 (a) Schematic diagram of machining geometry; (b) schematic diagram of testing system combines FIB and SEM; (c) SEM micrograph cross section of nano-holes

近年来,随着微孔质量要求及工艺水平的不断提高,大深径比、高精度和高效加工成为趋势。将激光进行时域整形,已成为了当前研究的热点。Herman 等^[49]发现在脆性材料中,通过产生脉冲序列,前序脉冲可以提高材料塑性,后续脉冲通过一定延迟可以更有效地对材料加工,如图 3 所示,从而提高了加工的深径比。

2.3 激光加工方式研究

Dausinger^[67]对飞秒激光金属材料微孔加工工艺进行研究,将激光与材料的相对运动方式分为 4 类,即单脉冲加工、叩击式加工、环切加工和螺旋钻孔。

通过工艺保证一个脉冲和材料作用后,直接形成所需微孔,即所谓的单脉冲加工。这种微孔加工

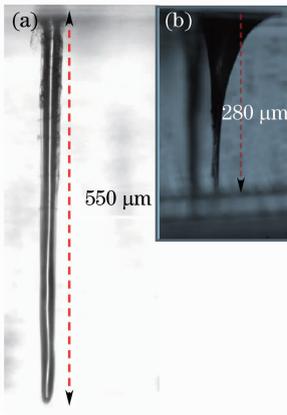


图 3 (a)脉冲序列和(b)非脉冲序列下微孔加工结果光学图像

Fig. 3 Optical image of micro-hole machined in (a) burst mode and (b) non-burst mode

方法效率极高,每秒可形成上千个孔^[73]。工业中常使用单脉冲“飞行模式”打孔,即脉冲激光与材料一定相对运动速度下,每个脉冲可形成一个孔,沿扫描方向上,形成一系列孔结构,如图 4 所示。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。

Jiang 等^[74]研究表明,电介质材料中,单个脉冲烧蚀深度随着通量密度的增大会有所增加,最终出现平底状弹坑结构,由于反射率的增大,烧蚀深度也不再增加。因此,需要多个脉冲的连续作用使得微孔深度不断增加,以达到所需深度,即所谓的叩击式加工,如图 5 所示^[75]。叩击式微孔加工中,激光可以沿孔壁多次反射,类似光波导的方式传至微孔底部^[76],使得后续脉冲可进一步增加烧蚀深度。

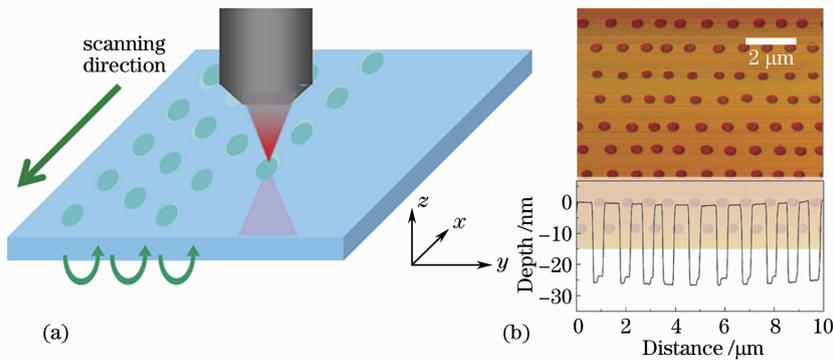


图 4 (a)高速飞秒激光单脉冲打孔示意图;(b)加工结果原子力显微镜

Fig. 4 (a) Schematic diagram of high-speed femtosecond laser drilling with single pulse; (b) atomic force microscope micrograph of fabrication results

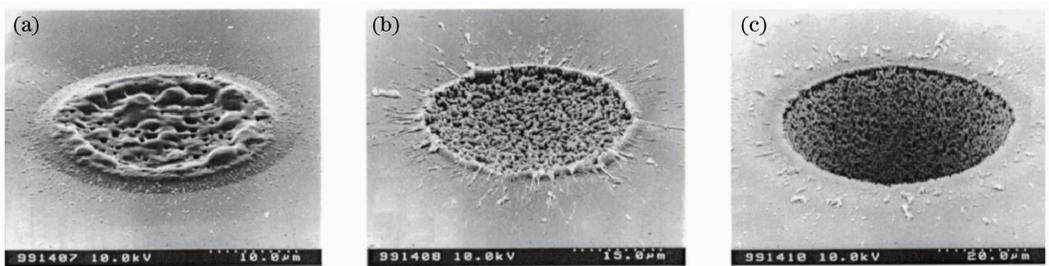


图 5 不同脉冲个数的激光(150 fs,800 nm,3.0 J/cm²)对聚碳酸酯材料微孔加工的 SEM 图。(a) 1;(b) 5;(c) 100

Fig. 5 SEM micrograph of pdy carbonate surfaces after laser treatment (150 fs, 800 nm, 3.0 J/cm²) with different pulse numbers. (a) 1; (b) 5; (c) 100

飞秒激光加工热影响区小、加工质量高,将激光线切割与微孔加工方面进行结合^[77],即形成环切加工。图 6 为高质量环切形成的微孔结构^[78],其可重复性高。另外,螺旋钻孔的加工方式是在环切基础上增加了深度方向的运动,适合加工直径较大的深孔。

2.4 加工环境因素研究

飞秒激光微孔加工是一个多因素、非平衡的复

杂作用过程,加工环境是不可忽视的重要影响因素。研究表明,真空、气体^[79]、液体等环境对微孔加工有很大影响。

由于飞秒激光具有超短脉宽、超强功率密度的特点,聚焦后的飞秒激光很容易达到空气的电离阈值(约 10^{14} W/cm²)^[70],且其强电场引起的克尔效应使激光发生自聚焦现象。在空气中进行加工时,超过电离阈值的高功率密度容易电离空气产生大量自

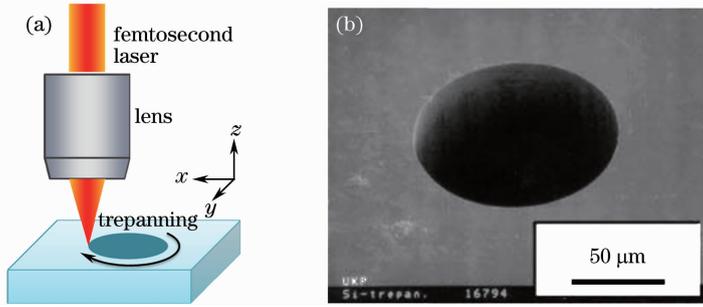


图 6 (a)硅材料上环切微孔加工示意图;(b) SEM 图

Fig. 6 (a) Schematic diagram of micro hole formed by trepanning in Si substrate; (b) SEM micrograph

由电子,自由电子密度大于 10^{18} cm^{-3} 时,形成空气电离等离子体,使得激光被等离子体散焦,在与克尔效应引起的自聚焦相互平衡下形成一系列热点,即所谓的光丝现象^[80~82]。然而光丝状态的激光光束在传播中并不稳定,在一定距离后会产生发散,从而使得飞秒激光在加工深孔时,出现孔型弯曲的现象和烧蚀饱和的现象^[48],进而可以影响孔形锥度、入口直径和出口直径的大小。

Kamlage 等^[83]对金属加工进行研究,发现在空气环境中加工时,出口直径随着激光重复频率的增加而增大。这是由于随着重复频率的增加金属碎屑

和颗粒不能充分喷出,而这些碎屑减小了空气电离的阈值,并产生空气电离等离子体,造成光丝现象。残留在孔内的碎屑和等离子体对孔壁再次作用,加上激光的扰动和发散,使得出口直径有所增加。而入口直径则随重复频率增加而减小,直到和真空条件下的大小相同,如图 7(a),(b)所示。这是由于金属材料 and 空气被急剧加热,气体密度降低,在入口处创造出准真空的环境,提高了入口质量并减小了锥度。在空气环境下得以加工出高品质微孔,如图 7(c)所示,尤其是对直径和锥度较好的控制,展现了飞秒激光微孔加工在工业领域的应用前景。

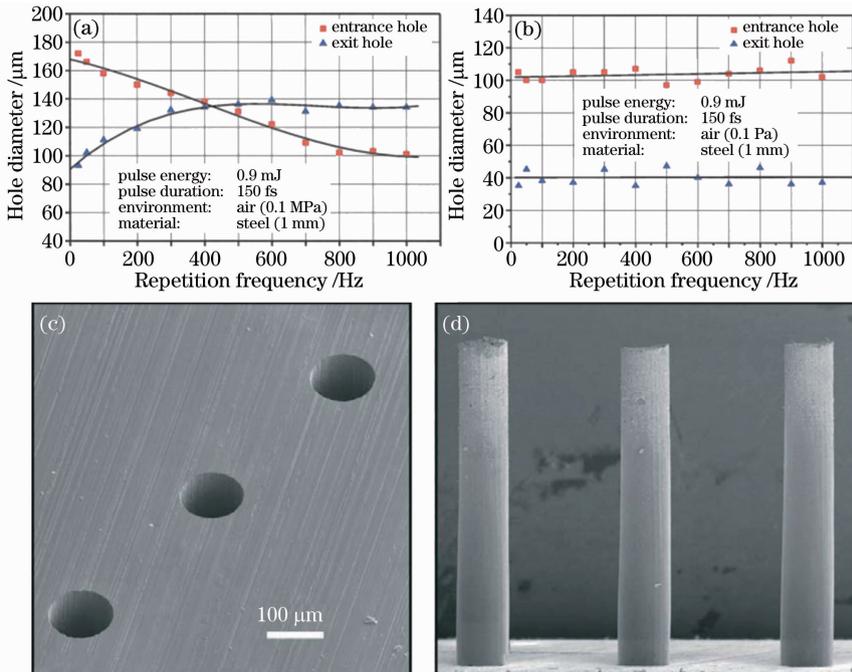


图 7 (a)空气环境和(b)真空环境下相同激光能量时,重复频率对出入口直径的影响;不锈钢材料上空气环境加工直径 $100 \mu\text{m}$ 高品质微孔的(c) SEM 图和(d) 孔型复制结构

Fig. 7 Influence of repetition frequency on diameters of entrance and exit holes fabricated in (a) air and (b) vacuum with same laser energy; (c) SEM image of high-quality micro-holes with diameter of $100 \mu\text{m}$ drilled in stainless steel in air and (d) their replicas

在加工质量方面,Wynne 等^[84]发现飞秒激光在金属上打孔时,真空环境中制得的孔结构较锐利清

晰,而空气中结构则比较平滑。另外,也有研究表明,碎屑在真空环境下易排出,因此,材料重铸层

小^[85]。如图 8 所示,空气中碎屑堆积在入口周围,而真空中入口干净^[68]。

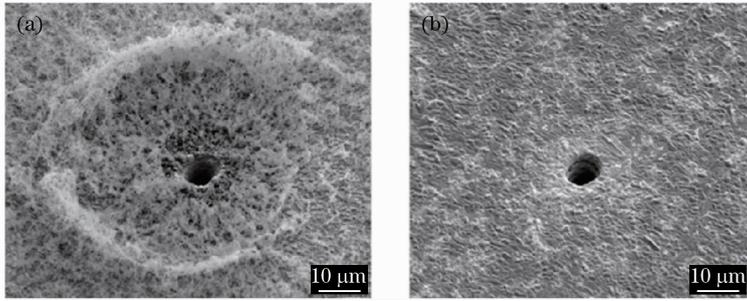


图 8 铜材料微孔入口 SEM 图。(a)空气环境;(b)真空环境

Fig. 8 SEM micrographs of micro-hole fabricated in (a) air and (b) vacuum in copper substrate

在飞秒激光微孔加工时,为了避免空气电离所带来的负面影响,除了真空环境之外,还可以使用在加工材料表面覆盖一定厚度液体的辅助方法。液体可以有效地带走加工所产生的碎屑,提高加工质量。Kaakkunen 等^[86]发现,相同能量下辅助水膜的厚度越小加工效率越高。Jiao 等^[87]通过挥发性液体获得了更薄的液膜,提高水膜辅助效果。但液体辅助微孔加工方法中仍有许多问题尚未解决,例如激光能量被水吸收而损失、液体和气泡对激光光束的散射等。

3 超短脉冲激光微孔加工的应用前景

激光微纳制造是制造技术的前沿和重要生长点之一,为我国航空航天、能源、国防、汽车、生物、医疗等领域提供重要的制造技术支撑。激光微孔制造是突破上述领域许多核心部件制造技术瓶颈的理想方法。如航空航天燃气涡轮叶片上的气膜微孔、惯性约束聚变(ICF)点火工程中的点火靶充气微孔、高灵敏度传感器微孔结构、发动机喷油嘴微孔等,如图 9 所示。

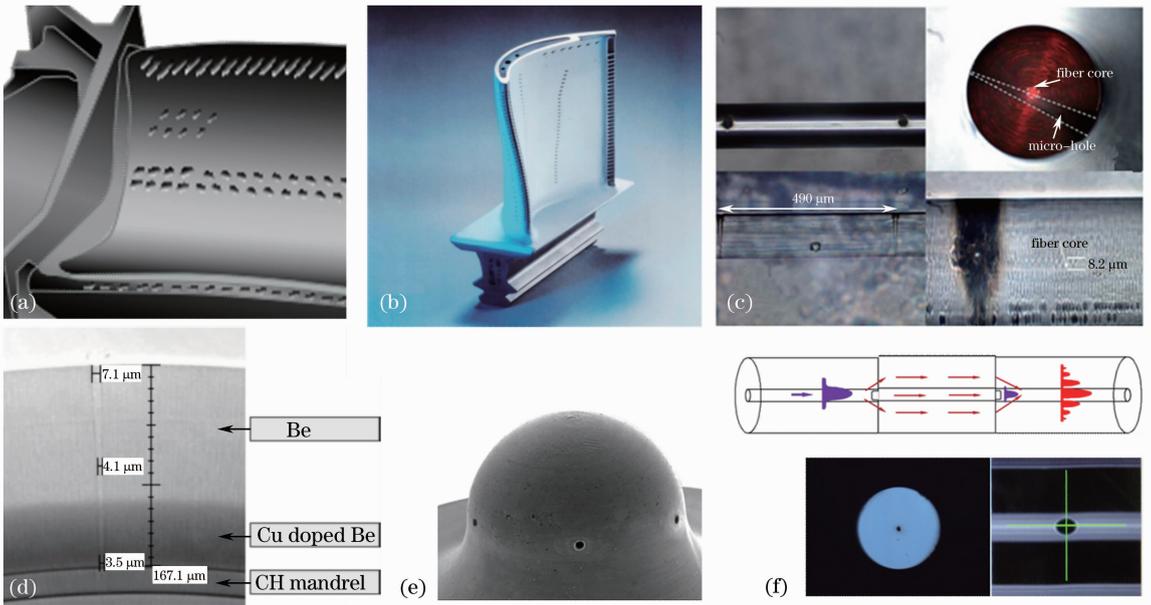


图 9 (a),(b)燃气轮机叶片气膜微孔;(c)光纤布拉格光栅传感器微孔;(d)用于惯性约束聚变的靶球微孔;

(e)发动机喷油嘴微孔;(f) 马赫-曾德尔干涉仪传感器微孔

Fig. 9 (a), (b) Air film micro-holes on gas turbine blades; (c) micro-holes on fiber Bragg grating sensor; (d) micro-holes on spherical target for inertial confinement fusion; (e) micro-holes on fuel injector nozzles; (f) micro-holes on fiber Mach-Zehnder interferometer

3.1 微孔加工在航空燃气涡轮叶片上的应用前景

在航空航天领域,燃气涡轮是发动机的三大关

键部件之首,其性能直接决定了航空发动机的整体性能。然而航空发动机涡轮叶片工作温度至少为

1400 ℃,因此,对燃气轮机高温部件,尤其是叶片必须采用冷却技术。

叶片冷却一般通过大量不同直径的气膜孔来实现,孔径通常为 100~700 μm。图 9(a)和(b)中所示为 SGT5-8000H 燃气轮机叶片,其空间分布复杂,且位精度要求高^[88,89],多为斜孔,角度多变15°~90°^[90,91],为提高冷却效率,开孔形状往往成扇形或矩形^[92]。这些要求大大增加了制造的难度。目前涡轮叶片打孔的主流方法是高速电火花,但工具电极制作困难,易变形损耗,被加工材料必须为导电材料,加工速度较慢,控制系统复杂,排屑困难,不易散热,容易出现微裂纹和较厚的重铸层,不适合大批量生产。

此外,由于现在叶片表面通常需覆盖一层热障涂层,一般为氧化锆或者陶瓷材料,采用传统电火花方法加工微孔十分困难,是高性能叶片制造的世界性挑战。未来的涡轮叶片趋向于采用非金属材料,更无法采用电火花加工。而飞秒激光钻孔具有材料适应性广、非接触加工、无机械应变、无大面积热应变、定位精度高、适合加工复杂孔型、可加工高精度群孔、可实现极小化重铸层、极小化微裂纹等特点,是一种当前最有效的加工技术,也是未来涡轮叶片制孔不可替代的技术。

3.2 微孔加工在点火工程靶球上的应用前景

在新能源领域,聚变核能是人类最理想的洁净能源之一,该工程中的点火靶充气微孔结构制造是最关键环节之一。微靶材料为铜铍合金(或玻璃、陶瓷、聚苯乙烯塑料),壁厚从数微米至数百微米,需在球壳上加工出直径数微米至十几微米的微孔(通孔或沉孔)。对微孔尺寸、圆度、锥度、深径比、位置精度、重铸层厚度、腔内加工残留物以及内外表面粗糙度等参数的要求都很高。在大深径比、特殊材料、高品质等要求下,电火花、聚焦离子束、扫描探针等微孔加工均不适用。

Forsman 小组^[93]使用短脉冲激光在铜铍合金微球上加工出大深径比小孔,如图 9(d)所示。而飞秒激光在精度、可控性、材料适应性和复杂三维结构方面有更强的加工能力,是点火靶微结构最理想的加工工具之一。

3.3 微孔加工的其他应用前景

在工业应用中,汽车发动机技术是车辆的最关键技术之一,而作为动力源的供油系统,最关键的部位是喷油嘴,其微孔的加工质量直接影响发动机的燃油效率。传统的喷油嘴电火花加工已普遍被纳秒

激光所取代,图 9(e)所示为喷油嘴局部放大图,其微孔由纳秒激光进行加工。随着激光器成本的下降,当前皮秒激光已经开始逐渐代替纳秒激光器在工业中使用^[94]。

此外,在许多微器件的制造中,飞秒激光以其高精度、高质量的加工能力,为微器件中孔结构的制造披荆斩棘^[95]。例如:飞秒激光在光纤上加工微孔,制作高灵敏度布拉格光栅传感器^[96],如图 9(c)所示;飞秒激光在光纤上加工微孔,熔接制作马赫-曾德尔(MZI)干涉仪传感器^[22],如图 9(f)所示。

4 挑战与展望

随着飞秒激光器技术以及飞秒激光制造工艺的不断成熟,飞秒激光微孔加工技术在工业领域逐渐取代部分传统加工技术。然而,现阶段飞秒激光微孔制造仍然面临很大挑战,主要体现在理论研究和工程技术两个方面。

4.1 理论研究方面

1) 飞秒激光与材料相互作用机理

飞秒激光与物质的作用是一个超快、非线性、非平衡态的复杂过程。目前,飞秒激光和物质的作用机理仍然没有统一的定论。其作用过程从理论上可分为:激光吸收、材料相变和等离子体膨胀辐射三部分^[97]。目前比较认可的激光光束的吸收原理包括加热、激励、雪崩电离、多光子电离和隧道电离。随后,通过电子与声子的相互作用的材料去除过程,也可能有多种相变机理,包括溶化、蒸发、汽化、临界点相分离、库仑爆炸、静电剥离等。最后是激光诱导的等离子体的膨胀与辐射。随着加工参数和材料的变化,不同的作用机理起主导作用,这也是亟需解决的难题。

面对这一挑战,只有通过实验与理论相结合,不断通过直接或间接的方法去进行研究分析,逐步完善理论模型,进而能够准确、完整地描述这一复杂作用过程。

2) 多尺度模型的建立

飞秒激光微孔加工是一个多尺度过程,空间上从纳米量级到微米量级,时间上从飞秒量级到毫秒量级。如何描述这一多尺度、非平衡过程面临很大的挑战。如何将等离子体量子模型、改进的双温模型^[44]以及等离子体的膨胀和辐射等多模型进行有机的整合,更是建立多尺度模型的核心。Jiang 等^[97]提出飞秒微/纳加工的飞秒激光与物质作用的多尺度理论模型,进一步揭示超快、非线性、非平衡

的激光与物质作用机理,如图 10 所示。

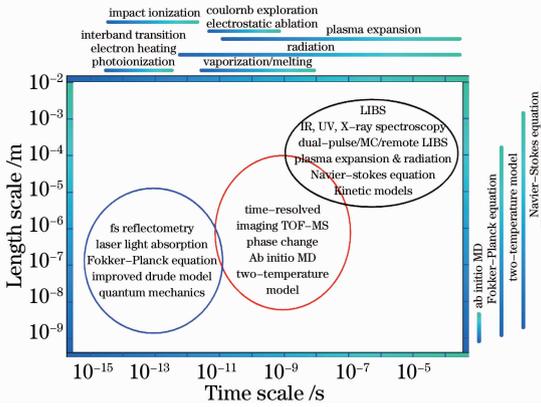


图 10 超短脉冲激光加工的多尺度量子建模

Fig. 10 Multi-scale model of ultrafast laser fabrication

目前虽然有些模型用来描述微孔加工的过程,但均限定在极小变化区域中,并且经过多方简化^[98~100]。比如不考虑孵化效应所建立的模型,通过对激光电场分布和自由电子密度分布的计算,研究入口的衍射和孔壁反射对微孔加工深度极限的影响^[47,101]。目前,尚无模型能够完整描述整个微孔加工过程,这已经成为制约激光微孔加工的瓶颈问题,同样也是激光微纳制造领域所面临的极大挑战。因此,理论方面亟需建立一个多尺度模型来解释加工中出现的各种实验现象,并为加工工艺研究提供有力的支撑,更全面地掌控制造过程,以寻找更多的飞秒激光制孔新方法。

4.2 工艺及工程方面

1) 微孔品质和尺寸等要求不断提高

一般情况下,由于设计的要求,微孔结构在能够满足功能要求的前提下,尽可能地减小尺寸是增加结构稳定性的有效手段。随着新器件、新结构的不断出现,以及制造水平的不断提高,微孔的尺寸要求不断减小,由微米量级减小到亚微米量级,甚至纳米量级。如何加工出高深径比的微纳米孔成为近年来研究的热点。同时,品质要求也不断提高,包括形状、圆度、锥度、深径比、位置精度、加工区重铸层厚度、微裂纹及内外表面粗糙度等。另外,在微孔加工实际应用中,不同尺度下很难同时兼顾加工精度和效率,制约了飞秒激光微孔加工的发展进程。

面对这些挑战,必须寻找新的制造思路和方法,开拓飞秒激光在微孔加工中的应用,为微孔的极端制造工艺提供有力支撑。例如:通过双光子吸收突破衍射极限形成亚微米孔^[102]、通过微光丝作用在电介质上形成高深径比亚微米孔结构^[103],进一步缩小制造的尺度极限。

此外,Jiang 等^[104~106]通过脉冲序列技术实现电子状态的调控,控制光子的吸收、电子激发、自由电子密度分布等,延长了能量吸收时间,从而能避免电子过热,也可以瞬间改变材料的局部特性,更大地提高微纳加工的精度、效率和可重复性^[107]。通过控制加工中的相变机理,抑制融化和重铸,提高微孔加工质量,是飞秒激光微孔加工研究的热点,同时也是理论和实验研究所面临的新挑战。

2) 飞秒激光微孔加工多种工艺的共同发展

近年来,在材料表面飞秒激光直接微孔加工技术发展的同时,飞秒激光由于其非线性吸收的特性,也被广泛应用于透明材料内部的三维微孔结构制造。

一方面,通过液体辅助,飞秒激光在透明介质后表面直接烧蚀加工微孔。液体易将加工产生的碎屑清除,且激光在传播过程中并不会受所形成微孔和等离子体的影响。该方法克服了沿激光传播方向飞秒激光直接微孔加工所带来的缺点,可以形成锥度极小的深孔。此外,通过超声辅助^[108]、光束整形^[32]等方式,可以达到更好的加工效果。

另一方面,飞秒激光辅助湿法刻蚀也是当前研究热点之一。首先利用飞秒激光在透明介质内部实现改性处理,接着使用化学方法进行刻蚀,改性过的区域刻蚀速率会远远超过未改性的区域,最终得到三维微结构^[109]。激光在材料内部改性区域长度受限很小,且化学湿法刻蚀过程中并不会产生碎屑阻塞微孔的现象,因此可大大提高所加工微孔的深径比。通过合理设计扫描路径、能量、辅助结构等可以加工出任意长度且直径均匀的微孔^[110],同时,湿法刻蚀又是众多加工中后处理方法之一,因此可大大提高加工后结构表面光洁度,形成大深径比高质量微孔。

各种工艺有其独特的优势,也有一定的局限性,例如上述工艺仅限于透明材料,对于特殊功能结构的微孔加工湿法刻蚀对结构的损害也是需要考虑的因素之一。因此,需要多种工艺方法共同发展,才能面对不同的需求选择合适且高效的工艺方法进行加工,也是飞秒激光微孔加工研究的重点之一。

3) 飞秒激光微孔加工工程化和集成化

当前,飞秒激光微孔加工的机理和工艺仍未完全掌握,尚未形成完整的微孔加工系统。而微孔在尺寸和品质上的要求,以及其在各重要领域中应用,促使飞秒激光不得不进行系统集成化、技术工程化。近年来,飞秒激光器的输出功率不断提高,产品一体

化、小型化是发展的必然趋势,系统集成化的进程步伐不断加快。

除此之外,如何能够形成一套完整的微孔加工工艺是激光微孔加工系统中核心问题之一。利用螺旋加工工艺,纳秒激光已经成功应用到微孔加工系统中,通过不同微孔尺寸、形貌等要求,向系统定制激光参数进行加工,达到了集成化的目的^[11]。然而,飞秒激光具有超快特性,各加工参数的作用呈非线性,导致各因素之间无法使用简单的关系进行耦合,且各因素相关性较大,使得飞秒激光的加工工艺成为制约其发展和应用的瓶颈问题。而现有的研究缺乏对各因素间关系的整合,缺少一套成熟工艺准则为微孔加工提供优化方案。

面对飞秒激光微孔加工工艺技术的挑战,仍需要大量基础性和规律性的研究,尤其是各因素相互关系的研究。在近年内,针对微孔加工尺寸、微裂纹、重铸、锥度等要求,通过实验和理论相结合,形成完整的飞秒激光微孔加工系统,是飞秒激光微孔加工技术应用的重点发展方向。

5 结 论

飞秒激光微纳加工在许多领域都有广泛的应用,是目前国内外极端制造领域的热点研究问题。飞秒激光能够在绝大多数材料基底上加工出高品质的微孔,尤其是直径较小的高深径比孔,充分展示出了飞秒激光在微孔制造方面的优势。随着飞秒激光技术越来越成熟,尤其是千瓦级大功率飞秒激光器的出现,飞秒激光微孔加工方面的研究日益深入,其应用也越来越广。

在许多微孔加工的应用中,制造的要求逐渐提高。飞秒激光在非金属材料上的强阈值效应和多光子吸收,使得飞秒激光能够突破衍射极限,加工出高深径比微纳小孔。而且,飞秒激光的超快特性决定,其脉宽短于绝大多数物理特征时间,使之加工出的微孔具有极小化重铸层、极小化热影响区、无微裂纹、可重复性高等高品质特点,这也促使高深径比微孔加工成为可能。飞秒激光微孔制造是推动制造业发展和进步的关键技术之一,极端尺寸、极高质量也正是飞秒激光微孔制造发展的必然趋势。

然而,当前飞秒激光微孔加工仍面临许多挑战。在近年内,围绕着多尺度新模型的建立、电子状态调控等新方法的探索、工艺和工程的逐步完善等重点问题,飞秒激光微孔加工将会出现重大突破。

参 考 文 献

- 1 R. Gattass, E. Mazur. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. *Nat. Photon.*, 2008, **2**(4): 219~225
- 2 J. X. Gong, X. Zhao, Q. Xing *et al.*. Femtosecond laser-induced cell fusion [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(9): 093901
- 3 S. Kawata, H. B. Sun, T. Tanaka *et al.*. Finer features for functional microdevices-micromachines can be created with higher resolution using two-photon absorption [J]. *Nature*, 2001, **412**(6848): 697~698
- 4 S. S. Mao, F. Quéré, S. Guizard *et al.*. Dynamics of femtosecond laser interactions with dielectrics[J]. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. & Process.*, 2004, **79**(7): 1695~1709
- 5 L. Jiang, H. L. Tsai. Prediction of crater shape in femtosecond laser ablation of dielectrics[J]. *Appl. Phys. D*, 2004, **37**(10): 1492~1496
- 6 X. Li, C. Wang, L. Jiang *et al.*. Transient localized material properties changes by ultrafast laser-pulse manipulation of electron dynamics in micro/nano manufacturing [C]. San Francisco, Mater. Res. Soc. Spring Meeting, 2011, **1365**: 3~8
- 7 C. B. Schaffer, A. Brodeur, E. Mazur. Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses [J]. *Meas. Sci. & Technol.*, 2001, **12**(21): 1784~1794
- 8 N. Sanner, O. Utéza, B. Bussiere *et al.*. Measurement of femtosecond laser-induced damage and ablation thresholds in dielectrics[J]. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. & Process.*, 2009, **94**(4): 889~897
- 9 A. P. Joglekar, H. Liu, G. J. Spooner *et al.*. A study of the deterministic character of optical damage by femtosecond laser pulses and applications to nanomachining[J]. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, 2003, **77**(1): 25~30
- 10 R. Le Harzic, N. Huot, E. Audouard *et al.*. Comparison of heat-affected zones due to nanosecond and femtosecond laser pulses using transmission electronic microscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(21): 3886~3888
- 11 S. Nolte, C. Momma, H. Jacobs *et al.*. Ablation of metals by ultrashort laser pulses[J]. *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.*, 1997, **14**(10): 2716~2722
- 12 W. Kautek, J. Kruger, M. Lenzner *et al.*. Laser ablation of dielectrics with pulse durations between 20 fs and 3 ps [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(21): 3146~3148
- 13 Zhong Minlin, Fan Peixun. Applications of laser nano manufacturing technologies [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0601001
钟敏霖, 范培迅. 激光纳米制造技术的应用[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0601001
- 14 K. M. Davis, J. Kruger, M. Lenzner *et al.*. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(21): 1729~1731
- 15 S. Eaton, H. Zhang, P. R. Herman *et al.*. Heat accumulation effects in femtosecond laser-written waveguides with variable repetition rate [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(12): 4708~4716
- 16 G. Della Valle, R. Osellame, P. Laporta *et al.*. Micromachining of photonic devices by femtosecond laser pulses [J]. *J. Optics A: Pure Appl. Opt.*, 2009, **11**(1): 013001
- 17 Zhou Kan, Feng Donghai, Li Xia *et al.*. Periodic nanoripples and photoluminescence on ZnO:Al film induced by femtosecond laser pulses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0816002
周 侃, 冯东海, 李 霞等. 飞秒激光诱导 ZnO:Al 薄膜周期结构及其光致发光特性 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0816002
- 18 V. Maselli, J. R. Grenier, S. Ho *et al.*. Femtosecond laser written optofluidic sensor: Bragg grating waveguide evanescent

- probing of microfluidic channel [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(14): 11719~11729
- 19 R. An, M. D. Hoffman, M. A. Donoghue *et al.*. Water-assisted femtosecond laser machining of electro-spray nozzles on glass microfluidic devices[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(19): 15206~15211
- 20 H. B. Sun, S. Matsuo, H. Misawa. Three-dimensional photonic crystal structures achieved with two-photon-absorption photopolymerization of resin[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(6): 786~788
- 21 T. Wei, Y. K. Han, Y. J. Li *et al.*. Miniaturized fiber inline Fabry-Perot interferometer fabricated with a femtosecond laser [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(6): 536~538
- 22 L. Jiang, L. J. Zhao, S. M. Wang *et al.*. Femtosecond laser fabricated all-optical fiber sensors with ultrahigh refractive index sensitivity: modeling and experiment[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(18): 17591~17598
- 23 L. Jiang, J. P. Yang, S. Wang *et al.*. Fiber Mach-Zehnder interferometer based on microcavities for high temperature sensing with high sensitivity[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(19): 3753~3755
- 24 Cheng Jie, Yang Minghong, Wang Min *et al.*. Mach-Zehnder interference hydrogen sensor based on femtosecond laser processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0706001
成洁, 杨明红, 王 闵等. 基于飞秒激光加工的马赫-曾德尔干涉气传感器[J]. *光学学报*, 2012, **32**(7): 0706001
- 25 R. R. Gattass, L. R. Cerami, E. Mazur *et al.*. Micromachining of bulk glass with bursts of femtosecond laser pulses at variable repetition rates[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(12): 5279~5284
- 26 M. Deubel, G. Von Freymann, M. Wegener *et al.*. Direct laser writing of three-dimensional photonic-crystal templates for telecommunications [J]. *Nature Materials*, 2004, **3**(7): 444~447
- 27 K. K. C. Lee, P. R. Herman, T. Shoa *et al.*. Microstructuring of polypyrrole by maskless direct femtosecond laser ablation[J]. *Advanced Materials*, 2012, **24**(9): 1243~1246
- 28 S. Bruneau, J. Hermann, G. Dumitru *et al.*. Ultra-fast laser ablation applied to deep-drilling of metals [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2005, **248**(1-4): 299~303
- 29 C. S. Nielsen, P. Balling. Deep drilling of metals with ultrashort laser pulses: a two-stage process [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **99**(9): 093101
- 30 S. Kiyama, S. Matsuo, S. Hashimoto *et al.*. Examination of etching agent and etching mechanism on femtosecond laser microfabrication of channels inside vitreous silica substrates[J]. *J. Phys. Chem. C*, 2009, **113**(27): 11560~11566
- 31 F. Venturini, W. Navarrini, G. Resnati *et al.*. Selective iterative etching of fused silica with gaseous hydrofluoric acid [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2010, **114**(43): 18712~18716
- 32 F. He, Y. Cheng, Z. Xu *et al.*. Direct fabrication of homogeneous microfluidic channels embedded in fused silica using a femtosecond laser [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(3): 282~284
- 33 Y. Li, K. Itoh, W. Watanabe *et al.*. Three-dimensional hole drilling of silica glass from the rear surface with femtosecond laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(23): 1912~1914
- 34 Z. Wu, H. Jiang, Z. Zhang *et al.*. Morphological investigation at the front and rear surfaces of fused silica processed with femtosecond laser pulses in air [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(22): 1244~1249
- 35 M. K. Bhuyan, F. Courvoisier, P. A. Lacourt *et al.*. High aspect ratio taper - free microchannel fabrication using femtosecond Bessel beams [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(2): 566~574
- 36 D. Strickland, G. Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Opt. Commun.*, 1985, **55**(6): 447~449
- 37 D. E. Spence, P. N. Kean, W. Sibbett. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(1): 42~44
- 38 P. P. Pronko, S. K. Dutta, J. Squier *et al.*. Machining of sub-micron holes using a femtosecond laser at 800 nm [J]. *Opt. Commun.*, 1995, **114**(1-2): 106~110
- 39 H. Varel, D. Ashkenasi, A. Rosenfeld *et al.*. Micromachining of quartz with ultrashort laser pulses [J]. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. & Process.*, 1997, **65**(4-5): 367~373
- 40 B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte *et al.*. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids [J]. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. & Process.*, 1996, **63**(2): 109~115
- 41 B. Rethfeld, A. Kaiser, M. Vicanek *et al.*. Femtosecond laser-induced heating of electron gas in aluminium [J]. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. & Process.*, 1999, **69**(7): 109~112
- 42 S. I. Anisimov, B. L. Kapeliovich, T. L. Perel'man. Electron emission from metal surfaces exposed to ultrashort laser pulses [J]. *Sov Phys JETP*, 1974, **39**: 375~377
- 43 T. Q. Qiu, C. L. Tien. Short-pulse laser heating on metals [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1992, **35**(3): 719~726
- 44 L. Jiang, H. L. Tsai. Improved two-temperature model and its application in ultrashort laser heating of metal films [J]. *ASME J. Heat Transfer*, 2005, **127**(10): 1167~1173
- 45 A. Kaiser, B. Rethfeld, M. Vicanek *et al.*. Microscopic processes in dielectrics under irradiation by subpicosecond laser pulses [J]. *Phys. Rev. B*, 2000, **61**(17): 11437~11450
- 46 L. V. Zhigilei, Z. Lin, D. S. Ivanov. Atomistic modeling of short pulse laser ablation of metals; connections between melting, spallation, and phase explosion [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2009, **113**(27): 11892-11906
- 47 J. R. V. de Aldana, C. Méndez, L. Roso *et al.*. Propagation of ablation channels with multiple femtosecond laser pulses in dielectrics: numerical simulations and experiments [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2005, **38**(16): 2764~2768
- 48 L. Shah, O. G. Kosareva, A. A. Koltun. Self-focusing during femtosecond micromachining of silicate glasses [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, **40**(1): 57~68
- 49 D. Esser, S. Rezaei, J. Z. Li *et al.*. Time dynamics of burst-train filamentation assisted femtosecond laser machining in glasses [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(25): 25632~25642
- 50 C. Y. Chien, M. C. Gupta. Pulse width effect in ultrafast laser processing of materials [J]. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. & Process.*, 2005, **81**(6): 1257~1263
- 51 T. V. Kononenko, S. M. Klimentov, S. V. Garnov *et al.*. Hole formation process in laser deep drilling with short and ultrashort pulses [C]. *SPIE*, 2002, **4426**: 108~112
- 52 X. Zhu, A. Y. Naumov, D. M. Villeneuve *et al.*. Influence of laser parameters and material properties on micro drilling with femtosecond laser pulses [J]. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. & Process.*, 1999, **69**(7): S367~S371
- 53 S. S. Wellershoff, J. Hohlfeld, J. Güdde *et al.*. The role of electron-phonon coupling in femtosecond laser damage of metals [J]. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. & Process.*, 1999, **69**(7): S99~S107
- 54 H. K. Tonshoff, C. Momma, A. Ostendorf *et al.*. Microdrilling of metals with ultrashort laser pulses [J]. *J. Laser Applications*, 2000, **12**(1): 23~27
- 55 S. Nolte, C. Momma, G. Kamlage *et al.*. Polarization effects in ultrashort-pulse laser drilling [J]. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. & Process.*, 1999, **68**(5): 563~567
- 56 P. S. Banks, M. D. Feit, A. M. Rubenchik *et al.*. Material effects in ultra-short pulse laser drilling of metals [J]. *Appl.*

- Phys. A: Mater. Sci. & Process., 1999, **69**(7): S377~S380
- 57 S. Zoppel, M. Farsari, R. Merz *et al.*. Laser micro machining of 3C-SiC single crystals [J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, **83**(4-9): 1400~1402
- 58 M. Kraus, S. Collmer, S. Sommer *et al.*. Microdrilling in steel with frequency-doubled ultrashort pulsed laser radiation[J]. *J. Laser Micro/Nanoengineering*, 2008, **3**(3): 129~134
- 59 D. Ashkenasi, M. Lorenz, R. Stoian *et al.*. Surface damage threshold and structuring of dielectrics using femtosecond laser pulses; the role of incubation[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 1999, **150**(1-4): 101~106
- 60 Y. Dong, P. Molian. Femtosecond pulsed laser ablation of 3C-SiC thin film on silicon[J]. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. & Process.*, 2003, **77**(6): 839~846
- 61 X. Zhu, D. M. Villeneuve, A. Y. Naumov *et al.*. Experimental study of drilling sub-10 μm holes in thin metal foils with femtosecond laser pulses[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 1999, **152**(3-4): 138~148
- 62 J. B. Ashcom, R. R. Gattass, C. B. Schaffer *et al.*. Numerical aperture dependence of damage and supercontinuum generation from femtosecond laser pulses in bulk fused silica[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(11): 2317~2322
- 63 A. Ruf, P. Berger, F. Dausinger *et al.*. Analytical investigations on geometrical influences on laser drilling[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2001, **34**(18): 2918~2925
- 64 A. Ancona, S. Döring, C. Jauregui *et al.*. Femtosecond and picosecond laser drilling of metals at high repetition rates and average powers[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(21): 3304~3306
- 65 A. Ancona, F. Röser, K. Rademaker *et al.*. High speed laser drilling of metals using a high repetition rate, high average power ultrafast fiber CPA system[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(12): 8958~8968
- 66 S. Baudach, J. Bonse, W. Kautek. Ablation experiments on polyimide with femtosecond laser pulses[J]. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. & Process.*, 1999, **69**(7): S395~S398
- 67 F. Dausinger. Femtosecond technology for precision manufacturing; fundamental and technical aspects[C]. *SPIE*, 2003, **4830**: 471~478
- 68 A. Weck, T. H. R. Crawford, D. S. Wilkinson *et al.*. Laser drilling of high aspect ratio holes in copper with femtosecond, picosecond and nanosecond pulses[J]. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. & Process.*, 2008, **90**(3): 537~543
- 69 Y. V. White, X. X. Li, Z. Sikorski *et al.*. Single-pulse ultrafast-laser machining of high aspect nano-holes at the surface of SiO₂[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(19): 14411~14420
- 70 L. Shah, J. Tawney, M. Richardson *et al.*. Femtosecond laser deep hole drilling of silicate glasses in air[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2001, **183**(3-4): 151~164
- 71 A. Ostendorf, G. Kamlage, B. N. Chichkov *et al.*. Precise deep drilling of metals by femtosecond laser pulses[J]. *Riken Rev.*, 2003, (50): 87~89
- 72 J. F. Herbstman, A. J. Hunt. High-aspect ratio nanochannel formation by single femtosecond laser pulses[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(16): 16840~16848
- 73 S. Nakashima, K. Sugioka, K. Midorikawa. Enhancement of resolution and quality of nano-hole structure on GaN substrates using the second-harmonic beam of near-infrared femtosecond laser[J]. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. & Process.*, 2010, **101**(3): 475~481
- 74 L. Jiang, H. L. Tsai. Plasma modeling for ultrashort pulse laser ablation of dielectrics[J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100**(2): 023116
- 75 S. Baudach, J. Bonse, J. Krüger *et al.*. Ultrashort pulse laser ablation of polycarbonate and polymethylmethacrylate [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2000, **154-155**(1-4): 555~560
- 76 S. Tao, B. Wu, S. Lei. Study of laser beam propagation in microholes and the effect on femtosecond laser micromachining [J]. *J. Appl. Phys.*, 2011, **109**(12): 123506
- 77 S. Nikumb, Q. Chen, C. Li *et al.*. Precision glass machining, drilling and profile cutting by short pulse lasers[J]. *Thin Solid Films*, 2005, **477**(1): 216~221
- 78 N. Bärsch, K. Körber, A. Ostendorf *et al.*. Ablation and cutting of planar silicon devices using femtosecond laser pulses [J]. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. & Process.*, 2003, **77**(2): 237~242
- 79 W. S. O. Rodden, S. S. Kudesia, D. P. Hand *et al.*. The use of 'assist' gas in the precision laser drilling of titanium [C]. Dearborn: ICALEO 2000; Proceedings of the Laser Materials Processing Conference, 2000, **89**: B41~B50
- 80 L. Sudrie, A. Couairon, M. Franco *et al.*. Femtosecond laser-induced damage and filamentary propagation in fused silica[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(18): 186601
- 81 A. Couairon, A. Mysyrowicz. Femtosecond filamentation in transparent media [J]. *Physics Reports*, 2007, **441** (2-4): 47~189
- 82 V. P. Kandidov, O. G. Kosareva, A. A. Koltun. Nonlinear-optical transformation of a high-power femtosecond laser pulse in air[J]. *Quantum Electron.*, 2003, **33**(1): 69~75
- 83 G. Kamlage, T. Bauer, A. Ostendorf *et al.*. Deep drilling of metals by femtosecond laser pulses[J]. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. & Process.*, 2003, **77**(2): 307~310
- 84 A. E. Wynne, B. C. Stuart. Rate dependence of short-pulse laser ablation of metals in air and vacuum[J]. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. & Process.*, 2003, **76**(3): 373~378
- 85 S. Juodkakis, H. Okuno, N. Kujime *et al.*. Hole drilling in stainless steel and silicon by femtosecond pulses at low pressure [J]. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. & Process.*, 2004, **79**(4): 1555~1559
- 86 J. J. Kaakkunen, M. Silvennoinen, K. Paivasaari *et al.*. Water-assisted femtosecond laser pulse ablation of high aspect ratio holes[J]. *Physics Procedia*, 2011, **12**: 89~93
- 87 L. Jiao, E. Ng, L. Wee *et al.*. Role of volatile liquids in debris and hole taper angle reduction during femtosecond laser drilling of silicon[J]. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. & Process.*, 2011, **104**(4): 1081~1084
- 88 R. S. Bunker. A review of shaped hole turbine film-cooling technology[J]. *J. Heat Transfer*, 2005, **127**(4): 441~453
- 89 S. Baheri, S. P. A. Tabrizi, B. A. Jubran. Film cooling effectiveness from trenched shaped and compound holes [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2008, **44**(8): 989~998
- 90 T. Beck. Laser drilling in gas turbine blades[J]. *Laser Technik J.*, 2011, **8**(3): 40~43
- 91 C. Y. Yeo, S. C. Tam, S. Jana *et al.*. A technical review of the laser drilling of aerospace materials[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 1994, **42**(1): 15~49
- 92 W. F. Colban, K. A. Thole, D. Bogard. A film-cooling correlation for shaped holes on a flat-plate surface [J]. *J. Turbomachinery*, 2011, **133**(1): 011002
- 93 A. C. Forsman, E. H. Lundgren, A. L. Dodell *et al.*. Double-pulse format for improved laser drilling[OL]. www.photonics.com/Article.aspx? AID=30704,[2012-11-5]
- 94 I. Miyamoto. Laser materials processing in Japan[J]. *Laser Technik J.*, 2008, **5**(3): 16~20
- 95 D. N. Wang. Micro-engineered optical fiber sensors fabricated by femtosecond laser micromachining[C]. Monterey: Micro and Nano-Engineered Sensors, Optical Sensor, 2012. STU4F
- 96 M. Yang, D. N. Wang, C. R. Liao. Micro-holes integrated fiber Bragg grating for simultaneous and independent refractive index and temperature measurement[C]. IEEE Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), 2010.

649~650

- 97 Wang Guobiao. Overview Nano-Manufacturing Frontiers[M]. Beijing: Science Press, 2009
王国彪. 纳米制造前沿综述[M]. 北京: 科学出版社, 2009
- 98 S. Döring, S. Richter, A. Tünnermann *et al.*. Evolution of hole depth and shape in ultrashort pulse deep drilling in silicon [J]. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. & Process.*, 2011, **105**(1): 69~76
- 99 M. Kraus, M. A. Ahmed, A. Michalowski *et al.*. Microdrilling in steel using ultrashort pulsed laser beams with radial and azimuthal polarization[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(21): 22305~22313
- 100 A. Michalowski, D. Walter, F. Dausinger *et al.*. Melt dynamics and hole formation during drilling with ultrashort pulses[J]. *J. Laser Micro/Nanoengineering*, 2008, **3**(3): 211~215
- 101 J. R. V. d. Aldana, C. Méndez, L. Roso. Saturation of ablation channels micro-machined in fused silica with many femtosecond laser pulses [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(3): 1329~1338
- 102 W. Xiong, Y. S. Zhou, X. N. He *et al.*. Simultaneous additive and subtractive three-dimensional nanofabrication using integrated two-photon polymerization and multiphoton ablation [J]. *Light: Science & Applications*, 2012, **1**(4): e6
- 103 S. I. Kudryashov, G. Mourou, A. Joglekar *et al.*. Nanochannels fabricated by high-intensity femtosecond laser pulses on dielectric surfaces[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(14): 141111
- 104 C. Wang, L. Jiang, F. Wang *et al.*. First-principles electron dynamics control simulation of diamond under femtosecond laser pulse train irradiation[J]. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2012, **24**(27): 275801
- 105 C. Wang, L. Jiang, F. Wang *et al.*. First-principles calculations of the electron dynamics during femtosecond laser pulse train material interactions [J]. *Phys. Lett. A*, 2011, **375**: 3200~3204
- 106 L. Jiang, P. J. Liu, X. L. Yan *et al.*. High throughput rear surface drilling of microchannels in glass based on electron dynamics control by femtosecond pulse trains [J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(14): 2781~2783
- 107 R. Stoian, M. Boyle, A. Thoss *et al.*. Laser ablation of dielectrics with temporally shaped femtosecond pulses [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(3): 353~355
- 108 D. J. Hwang, T. Y. Choi, C. P. Grigoropoulos. Liquid-assisted femtosecond laser drilling of straight and three-dimensional microchannels in glass [J]. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. & Process.*, 2004, **79**(3): 605~612
- 109 V. Maselli, R. Osellame, G. Cerullo *et al.*. Fabrication of long microchannels with circular cross section using astigmatically shaped femtosecond laser pulses and chemical etching [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(19): 191107
- 110 S. He, F. Chen, K. Liu *et al.*. Fabrication of three-dimensional helical microchannels with arbitrary length and uniform diameter inside fused silica [J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(18): 3825~3827
- 111 D. Ashkenasi, N. Mueller, T. Kaszemeikat *et al.*. Advanced laser micro machining using a novel trepanning system [J]. *J. Laser Micro/Nanoengineering*, 2011, **6**(1): 1~5

栏目编辑: 宋梅梅