

超短脉冲激光微孔加工(下)——实验探索

赵万芹^{1,2}, 梅雪松³, 王文君³

- (1. 上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620;
2. 上海市激光先进制造技术协同创新中心, 上海 201620;
3. 西安交通大学 机械制造系统国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 自 20 世纪 60 年代激光器被发明以来, 其脉冲宽度被不断压缩至亚皮秒及飞秒量级, 使得激光加工技术进入到了超短脉冲阶段。与其它加工技术相比, 超短脉冲激光微孔加工突破了对尺度和材料的限制, 并具有高精度和自动化等优点。主要论述了超短脉冲激光微孔加工的优势, 如“冷”加工、突破衍射极限的低微米及纳米量级的加工等。介绍了超短脉冲激光微孔加工中的三个经典模型, 包括孔径和阈值关系模型、多脉冲累积模型和单脉冲烧蚀深度模型。简述了超短脉冲激光微孔加工的实验研究现状, 并给出了存在的问题和展望。

关键词: 超短脉冲激光; 微孔加工; 经典模型; 实验探索

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0242001

Ultrashort pulse laser drilling of micro-holes(part 2) —experimental study

Zhao Wanqin^{1,2}, Mei Xuesong³, Wang Wenjun³

- (1. School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;
2. Shanghai Collaborative Innovation Center of Laser Advanced Manufacturing Technology, Shanghai 201620, China;
3. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Since the invention of lasers in the 1960s, the pulse duration has been continuously shortened down to the sub-picosecond and even femtosecond regime. It makes the laser processing technology in the ultrashort pulse laser era. Compared with other methods, the ultrashort pulse laser drilling of micro-hole is independent of the size and materials, and it has the advantages of high precision and automation. The advantages, such as the "cold" processing, breaking the diffraction limit, for ultrashort pulse laser drilling of micro-hole were presented. Three classical models were demonstrated, which were the threshold fluence-hole diameter model, the multi-pulse cumulative model and the single-pulse ablation depth model. The experimental studies for ultrashort pulse laser drilling of micro-hole were analyzed. Furthermore, the challenging issues and prospects were concluded.

Key words: ultrashort pulse laser; micro-hole drilling; classical model; experimental study

收稿日期: 2018-09-05; 修订日期: 2018-10-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB1104602); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT_15R54)

作者简介: 赵万芹(1983-), 女, 讲师, 博士, 主要从事超短脉冲激光微纳精密制造方面的研究。Email: linazhaolinazhao@foxmail.com

0 引言

1960 年 5 月, 第一台人造激光器在美国纽约的 Hughes 研究所诞生^[1]。此后, 激光技术进入到快速的发展阶段, 其脉冲宽度从毫秒、纳秒被进一步压缩到皮秒和飞秒量级。1966 年, DeMaria 等基于激光调 Q 技术在钕玻璃激光器上首次实现了皮秒量级的激光脉冲输出^[2], 1981 年, Fork 等在染料激光器中利用碰撞锁模的方法得到了低于 0.1 ps 的脉冲宽度, 第一次使激光脉冲宽度缩短到了飞秒尺度^[3]。21 世纪初, 脉冲宽度已经被压缩到 4 fs 以下^[4]。

伴随着激光技术的发展, 多种激光加工技术也应运而生, 如以 3D 打印为代表的激光增材制造^[5], 以激光切割和打孔为代表的减材制造^[6], 以及激光熔覆、合金化等表面处理技术^[7]等。其中, 微孔加工是激光加工的一项重要应用, 其优点主要包括: 激光打孔属于非接触式加工, 避免了刀具的损伤, 具有效率高、精度高、钻孔材料范围广、多深径比和易实现自动化等特点。特别是超短脉冲激光, 普遍是指脉冲宽度小于 12 ps 的亚皮秒与飞秒脉冲激光, 基于其极短的脉冲宽度和极高的峰值能量, 几乎能够加工所有材料。进一步地, 超短脉冲激光能够一次性地在多层复合材料上实现微孔的加工, 如航空领域中带陶瓷涂层的镍合金叶片冷却孔的一次性加工^[8], 电子信息领域中由铜和聚酰亚胺复合而成的单/多层柔性电路板上的微盲/通孔加工^[9]等。再者, 超短脉冲激光可以轻松地加工直径微米至纳米、深径比几到几百间的微孔。主要介绍了超短脉冲微孔加工的优势、经典模型以及实验研究的现状。最后, 给出了目前超短脉冲激光微孔加工中存在的问题和展望。

1 超短脉冲激光微孔加工的优势

1.1 超短脉冲激光的“冷”加工

超短脉冲激光照射材料后, 大约在几百飞秒到几皮秒的时间尺度内, 材料内部的电子将重新分布并达到热平衡态^[10]。此后, 能量将电子系统传递给晶格系统, 该传递时间主要由材料的电子-声子耦合强度决定, 且其一般需要花费 1~100 ps 的时长, 该时间长度比电子达到热平衡的时间长很多^[11]。因此, 超短脉冲激光加工可以有效实现电子的加热并产生热电

子气体, 在空间位置上, 其与平衡态下的晶格距离较远, 使得仅激光脉冲能量的很小一部分被转化为热源, 从而实现超短脉冲激光的“冷”加工^[12]。

1.2 热影响区域的抑制

公式(1)为金属被超短脉冲激光烧蚀加热到接近熔点 T_m 时的热扩散深度 l_d ^[13]:

$$l_d = [128/\pi]^{1/8} [DC_i/T_m \gamma^2 C_e']^{1/4} \quad (1)$$

式中: D 为导热系数; C_i 为晶格热容; $C_e' = C_e/T_e$, C_e 为电子热容; T_e 为电子温度; γ 为电子-声子耦合常数。以铜为例, 当铜被超短脉冲激光加热到熔点 $T_m = 1356$ K 时, l_d 为 329 nm, 当激光脉冲宽度大于电子-声子耦合时间时, 激光加工材料中的热扩散深度 l_d 由热扩散系数 k 和脉冲宽度 τ_m 决定, 见公式(2):

$$l_d = \sqrt{k\tau_m} \quad (2)$$

由公式(2)计算出铜在脉冲宽度 10 ns 下的热扩散深度 l_d 约为 1.5 μm ^[13]。即采用超短脉冲激光可以明显减小热扩散深度, 抑制热影响区域的产生。必须指出的是, 单纯的依靠降低脉冲宽度, 即使到极短的飞秒脉宽, 也不能彻底地解决热影响及重铸层等问题^[14]。

1.3 突破衍射极限

激光加工中, 由于衍射规律的限制, 聚焦光斑尺寸不可能小于半个波长。但是, 超短脉冲激光具有极高的峰值能量, 和物质相互作用可诱发多光子吸收, 如图 1 所示^[15], 达到亚衍射极限, 加工尺度可远小于焦斑, 达到亚微米、纳米量级。

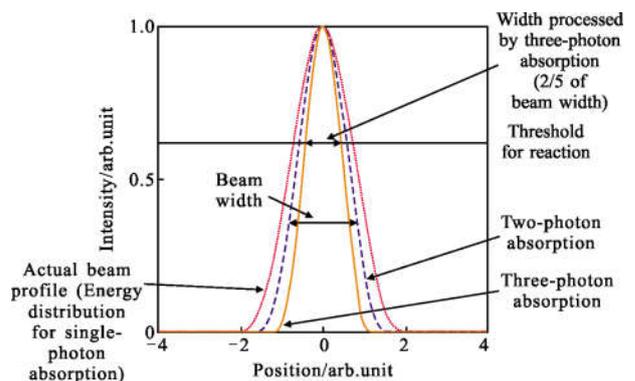


图 1 超短脉冲激光突破光束衍射极限

Fig.1 Beyond the beam diffraction limit based on ultrashort pulse laser

超短脉冲激光具有高斯空间分布的能量曲线, 单光子吸收时材料吸收的能量空间分布与激光能量自身的光束曲线吻合。对于多光子吸收, 随着多光子

吸收数 n 的增加,被吸收的能量分布将变窄, n 光子吸收光斑的有效半径 ω_n 为:

$$\omega_n = \omega_0 / \sqrt{n} \quad (3)$$

式中: ω_0 为聚焦激光束的实际光斑半径。如当激光能量调整至图 1 直实线时达到阈值强度,光斑尺度低至 $2/5\omega_0$ ^[12]。

1.4 多种材料的适应性

超短脉冲激光加工突破了材料自身特性的限制,几乎可以加工任何材料,特别是一些难加工材料,如高硬材料钛/镍合金等,脆性材料陶瓷等,以及处于禁吸收带的透明材料玻璃等。

2 超短脉冲激光微孔加工中的经典模型

2.1 孔径和阈值的关系模型

1982 年,Liu 用脉宽 15~30 ps 的激光在单晶硅上加工微孔,根据烧蚀结果,首次提出了孔径和材料阈值之间的关系,见公式(4)^[16]:

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln(F_0/F_{th}) \quad (4)$$

式中: D 为烧蚀孔的直径; ω_0 为聚焦后的光束半径; F_0 为激光的能量密度; F_{th} 为材料的阈值。

2.2 多脉冲累积模型

1988 年,Yong 等使用短脉冲激光烧蚀单晶金属并建立了多脉冲累积模型用于描述激光脉冲个数和烧蚀阈值间的关系,见公式(5)^[17]:

$$F_{th}(N) = F_{th}(1)N^{S-1} \quad (5)$$

式中: S 是多脉冲累积系数,对于金属材料普遍有 $S=0.8\sim 0.9$ ^[18]。累积行为和孔底部微结构的形成、光束在孔侧壁的多次反射及等离子体吸收和散射等有关。

2.3 单脉冲烧蚀深度模型

1997 年,Nolte 等使用激光能量密度在 $0.1\sim 10\text{ J/cm}^2$ 之间的 150 fs 的超短脉冲激光烧蚀金属铜,第一次发现了和能量密度的对数相关的两种烧蚀机制的存在^[19]。首先,当能量密度小于 0.5 J/cm^2 时,单脉冲烧蚀深度遵循公式(6):

$$L = \alpha^{-1} \ln(\varphi/\varphi_{th}^\alpha) \quad (6)$$

式中: α 为吸收系数; φ_{th}^α 为损伤阈值; φ 为激光能量密度。实验计算铜的阈值为 0.14 J/cm^2 ,光学趋肤深度为 10 nm。随着能量密度增加,第二种对数关系出现,在 Nolte 等的实验中,当能量密度大于 0.7 J/cm^2

时,单脉冲烧蚀深度遵循公式(7):

$$L = l_d \ln(\varphi/\varphi_{th}^l) \quad (7)$$

式中: l_d 为热扩散深度; φ_{th}^l 为另一个更高的损伤阈值,为 0.460 J/cm^2 ,热扩散深度 l_d 为 80 nm。同时,观察烧蚀形貌发现,在第一个阶段的烧蚀内没有明显的熔融残渣,表明其具有较好的加工质量和较高的加工精度,而对于第二种烧蚀状态,熔融物开始出现。同年,Ashkenasi 等采用脉冲宽度 0.2~5 ps 的超短脉冲激光在蓝宝石表面加工微孔,发现在该脉冲宽度区间内的蓝宝石烧蚀均存在两种烧蚀机制,即弱烧蚀和强烧蚀,并通过对烧蚀机理的分析发现弱烧蚀对应于蒸发机制,强烧蚀对应于相爆机制^[20]。

3 超短脉冲激光微孔加工的实验探索

以加工方式为依据,激光微孔加工主要包括激光束与材料间无相对运动的单脉冲加工和多脉冲直冲式加工,和有相对运动的旋切和螺旋加工,如图 2 所示。从左至右,加工精度逐渐增加,加工复杂度也逐渐增加。

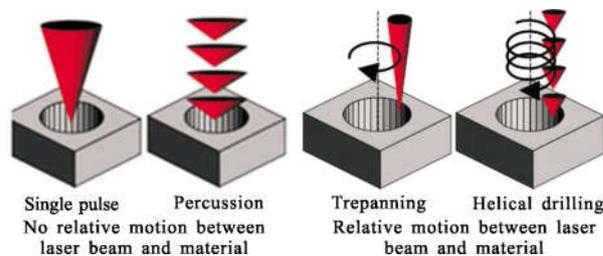


图 2 激光微孔加工方式示意图

Fig.2 Schematic image of processing strategies for laser micro-hole

3.1 多脉冲直冲式微孔加工

与单脉冲微孔加工只有一个脉冲与材料作用相比,多脉冲直冲式微孔加工是通过多个脉冲连续作用于材料从而完成对材料的烧蚀,通过对多种参数的调节,可以加工多种尺寸的微孔。

3.1.1 微孔尺寸

超短脉冲激光多脉冲直冲式加工金属微孔的一个主要特点为“小”,主要是由于其较短的脉冲宽度及加工中独特的突破衍射极限性,可以加工出亚微米及纳米级的高质量孔,如图 3 所示为飞秒激光在不锈钢薄膜、钛薄膜及氧化锌薄膜上加工的低微米级和纳米级的微孔^[21-22]。

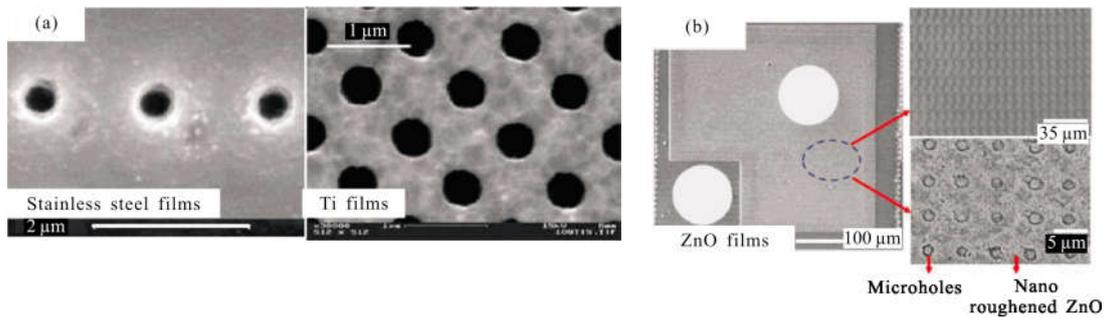


图 3 超短脉冲激光烧蚀金属微小孔电镜图

Fig.3 SEM of holes ablated by ultrashort pulse laser

通过对脉冲数等参数的调节,多脉冲直冲烧蚀可以实现多种深度的盲/通孔加工,且基于加工中无激光束与材料的相对运动,加工效率较高。图 4(a)、(b)为 10 ps 和 170 fs 激光烧蚀不锈钢孔表面电镜图和侧剖金相图,从图中可以看出,仅改变烧蚀脉冲

数,就可以加工出多种深度的微孔^[23]。另外,对比两种脉冲宽度烧蚀下的孔可以发现,即使采用极短脉冲宽度的飞秒激光进行加工,孔口周围依然存在大量的熔融飞溅物,且皮秒超短脉冲激光烧蚀下孔的表面形貌优于飞秒超短脉冲激光烧蚀下孔的表面形貌。

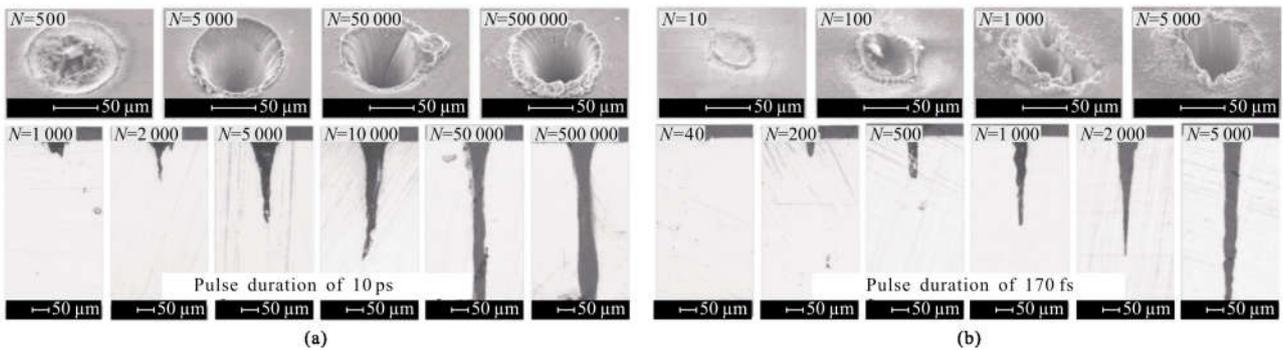
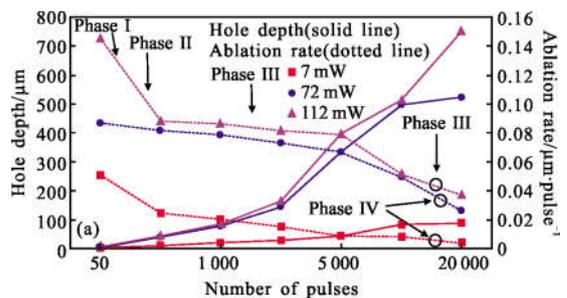


图 4 超短脉冲激光烧蚀不锈钢孔表面电镜图和侧剖金相图

Fig.4 SEM and metallographic images of holes ablated by ultrashort pulse laser in stainless steel

多脉冲直冲微孔加工中微孔深度会随着加工参数的增加最终达到饱和,这一现象已成为激光微孔加工中的一个定论。进一步的,通过对微孔深度进化过程的研究,Dausinger 等建立了一个描述激光烧蚀微孔深度及单脉冲烧蚀率变化的模型,Hirscheegg-model^[24]。具体而言,依据微孔深度和单脉冲烧蚀率的变化,微深孔的进化过程可以分为如下四个阶段:第一阶段:烧蚀开始,单脉冲烧蚀率最高;第二阶段:微孔形成,单脉冲烧蚀率逐渐下降;第三阶段:随着脉冲数的增加,孔深快速增加,深孔逐渐形成,但伴随着单脉冲烧蚀率的缓慢下降或不变;第四阶段:孔深达到饱和,当到达孔底的激光能量低于材料的烧蚀阈值后,烧蚀停止,此时,单脉冲烧蚀率继续下降。该结论在多脉冲宽度(125 fs、8 ps、10 ps、300 ps、9 ns、25 ns、100 ns)、多波长(532、539、800、1 060、1 064、

1 078 nm)及多种材料(不锈钢、金刚石、氮化硅陶瓷、硅和 PMMA)的微深孔烧蚀演变过程中被证实^[25-29]。同时,文中笔者在对皮秒超短脉冲激光多脉冲直冲式金属微孔的加工中发现,存在阶段性饱和和脉冲数/激光能量使得微孔的深度呈假象的阶段性饱和,此后,继续增大加工参数,微孔深度继续增加,如图 5 所示^[30-31],该发现可进一步拓展激光多脉冲直冲式微孔加工的深度。



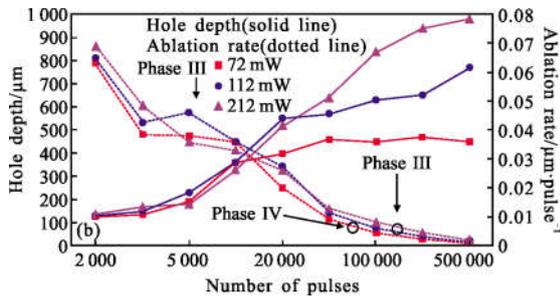
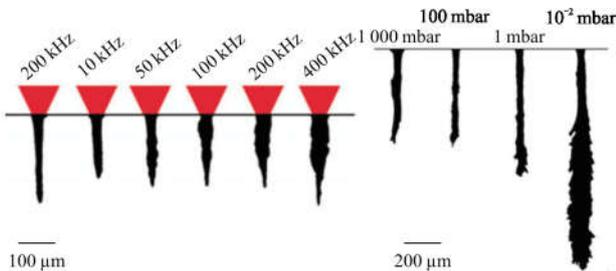


图 5 孔深的阶段性饱和

Fig.5 Stage saturation of the hole deep

3.1.2 微孔形态

形状和形貌是评价孔的质量的重要特征。超短脉冲激光多脉冲直冲式微孔加工中孔的形状受到多种因素的影响,如激光的脉冲宽度、能量、脉冲数、重频及加工环境等。图 6 为 8 ps 激光烧蚀硅片的孔形图^[32]。对于图 6(a),随着重复频率的增加,孔的上半部被拓宽,底部却更窄,同时在孔壁出现局部的凸起现象,即在重复频率相对较小时,孔形较好,圆柱度较高。对于图 6(b),当加工环境为较高真空度时,孔深增加,孔的底部被严重拓宽,并出现了多个小的分叉。



(a) 重复频率对孔形的影响 (b) 真空度对孔形的影响
(a) Effect of repetition rate on hole shape (b) Effect of air pressure on hole shape

图 6 皮秒激光烧蚀硅微孔图

Fig.6 Holes ablated by a picosecond laser in silicon

对于孔形,除了要探索激光参数对烧蚀微孔形状的影响外,还需要研究孔形的演变过程。目前,对于深孔形成过程研究比较有代表性的是 Döring 的研究团队,他们利用 1 060 nm 波长激光充当照明光,由于光子能量低于硅的禁带宽度,因此能够透过加工材料而成像,进而首次实时观测了脉冲宽度 8 ps 激光对 0.5 mm 厚的硅晶片进行多脉冲直冲打孔过程中孔的轮廓和深度的动态变化,如图 7(a)所示^[33]。从

图中可以看出,随着脉冲数的增加,孔深逐渐增加到饱和,其中,当脉冲数相对较少时,孔呈上宽下窄的锥形,当脉冲数较多,孔达到一定深度后,在孔的底部烧蚀方向出现偏离及分叉现象。对于烧蚀中孔的底端形状,通过相同参数下的多次加工发现,小脉冲数下孔底形状的重复性较好,在较大脉冲数下,即孔底部出现偏离及分叉现象后,偏离方向及分叉均表现出多样性和随机性,如图 7(b)所示^[34]。进一步地,对于孔底的偏离可通过降低重复频率即增加脉冲间隔时间^[35]以及辅助以水加工等^[36]方式消除。

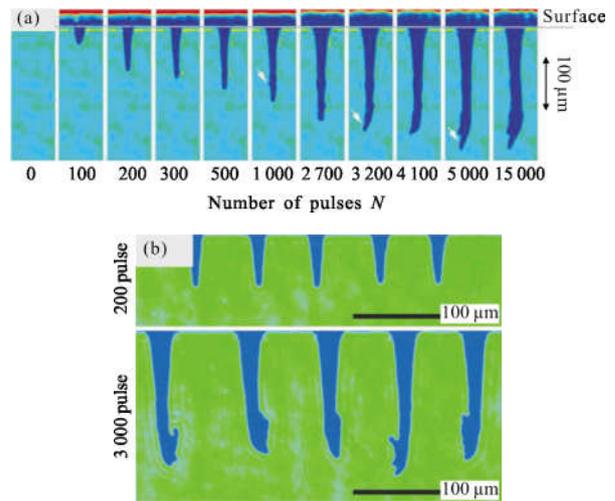


图 7 超短脉冲激光烧蚀硅微孔

Fig.7 Holes ablated by ultrashort pulse laser in silicon

然而,对孔形的研究主要为透明或在特殊情况下能呈透明态的材料,甚至有学者通过保持直冲光束不变,对被加工样品硼硅玻璃进行微移,使得光束在孔内壁发生反射进而实现微小倾斜度孔的加工^[37]。但是,对于金属等非透明材料的研究较少,主要是由于金属微孔检测的困难性。当孔较浅时,可通过共聚焦显微镜和扫描电子显微镜测量孔的形状和表面形貌。当孔较深时,由于微结构检测技术的限制,只能通过侧剖来获得孔的形状。在金属微深孔的进化方面,文中作者通过研磨侧剖的方法进行了系统性的研究,获得了皮秒超短脉冲激光多脉冲直冲式烧蚀金属微孔的进化过程,如图 8 所示^[31]。

首先,激光能量对孔形进化的影响是以诱发锥形辐射的激光能量为临界值,见图 8(a),高低激光能量下孔形的演变均分为三个阶段:初始孔形、中间孔形和饱和孔形。其中,初始孔形均呈较浅的弹坑状,

即在初始阶段,激光能量对烧蚀孔形的影响较小。此后,随着脉冲数的增加,低能量下烧蚀的孔呈 V 形,高能量诱发锥形辐射导致烧蚀的孔呈乳突形。最终,孔深饱和,低能量下的饱和孔形为多锥度的漏斗形,高能量下能够获得较大深径比的长通道形孔。第二,脉冲数对孔形进化的影响是以孔深饱和时的饱和脉冲数为临界值分为两个部分,见图 8(b)。第一部分,当加工脉冲数少于饱和脉冲数时,孔从弹坑状到呈现多种锥度,多锥度孔又可以分为中间孔形和饱和孔形,对于前者主要有 V/U 形孔、V/U 形乳突孔和类漏斗形孔,后者有漏斗形孔、圆台形孔和长通道形孔。第二部分,加工脉冲数多于饱和脉冲数时,此时孔深已经饱和,因此孔形在深度上不再发生变化,但是后续脉冲可能使得孔体内被继续烧蚀从而使得孔在横向上被拓宽。第三,波长对孔形的影响主要表现为对孔锥度的影响,见图 8(c)。无论是对于 V 形孔、V 形乳突孔或是漏斗形孔,532 nm 波长对烧蚀微孔形状的影响可以概括为微孔侧壁或微孔上半部侧壁的锥度较大,而 1 064 nm 波长对微孔形状的影响可以概括为微孔侧壁或微孔上半部侧壁的锥度较小。

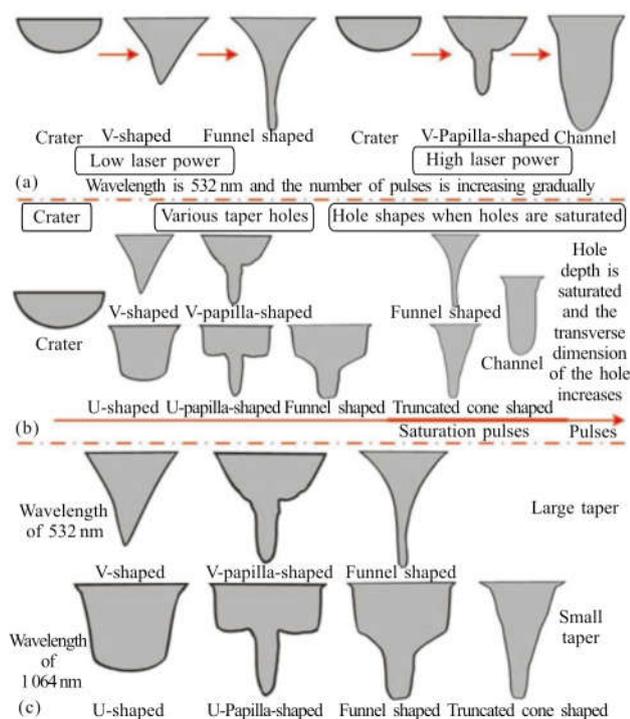


图 8 皮秒超短脉冲激光多脉冲直冲式烧蚀金属微孔的进化图
Fig.8 Images of the percussion drilling process by picoseconds ultrashort pulse laser in metal

3.1.3 直冲加工为基础的微孔复合加工工艺

为了获得高质量高效率的微孔加工,以多脉冲直冲加工为基础,多种加工工艺被探索,如双光复合加工,包括双激光器系统、双波长复合及脉冲序列加工。如姜澜教授的研究团队将飞秒激光器和纳秒激光器结合,利用飞秒激光改变材料表面的特性从而在一定程度上促进了待加工材料对纳秒激光能量的吸收,提高了材料的烧蚀效率,该方法在多种材料,如硅片、铝合金等材料上得到实验验证,如图 9(a)所示,或利用飞秒激光改变材料表面的特性从而使原来纳秒激光无法加工的材料可以通过纳秒激光来烧蚀,如对石英玻璃的双激光烧蚀,如图 9(b)所示^[38-39]。Sugioka 等将脉冲宽度 20 ns 的真空紫外激光器和脉冲宽度 23 ns 的紫外激光器结合烧蚀石英玻璃,研究发现,由于真空紫外激光与材料的相互作用导致材料对紫外激光的吸收率增加,从而能够获得更高的烧蚀效率^[40]。

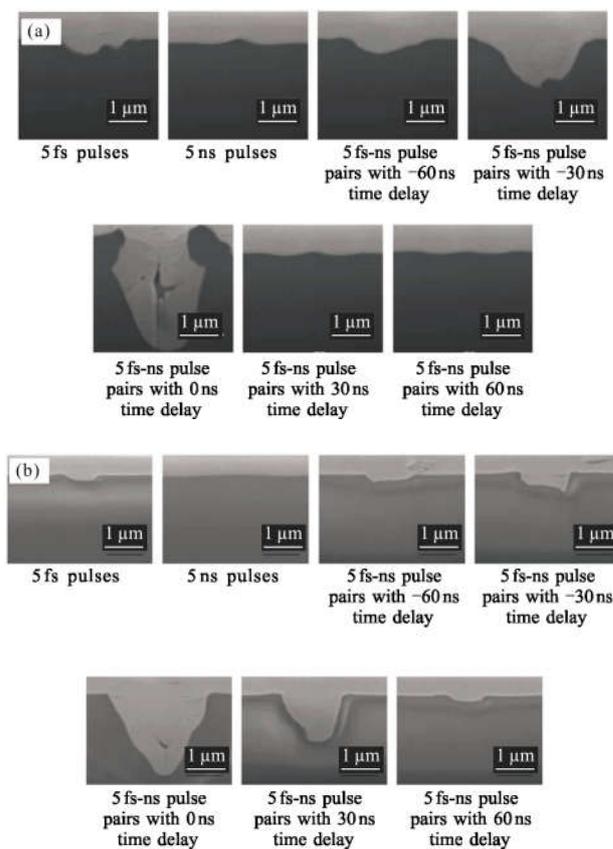
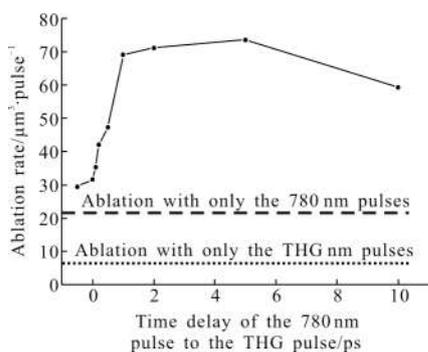


图 9 孔的横截面图(a) 硅片;(b) 石英玻璃
Fig.9 Cross-sectional of holes on (a) silicon wafer; (b) fused silica

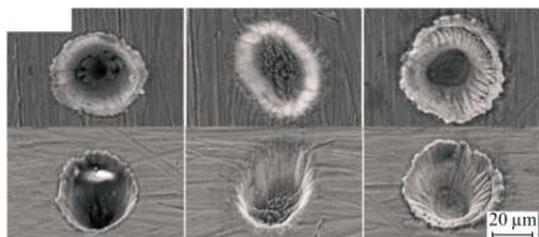
双波长复合加工中,在合理的双波延时或双波

聚焦面相对距离下,可增加烧蚀体积^[41-43],如Masanao 等利用波长 260 nm 和 780 nm 的飞秒激光高效率地去除电子器件中半导体上的绝缘层材料钙钠玻璃,该材料对 260 nm 的飞秒激光呈线性吸收,对 780 nm 的飞秒激光为三光子吸收,通过对两波长延时之间的调整,可以获得高效率的材料去除率,见图 10(a)^[42]。另外,文中作者的研究表明,双波长复合加工可以调控微孔的形状、优化微孔的形貌,如图 10(b)所示^[44]。



(a) 单波长和双波长复合加工钙钠玻璃烧蚀体积对比图

(a) Ablation volume from single-and double-wavelength drilling in soda lime glass



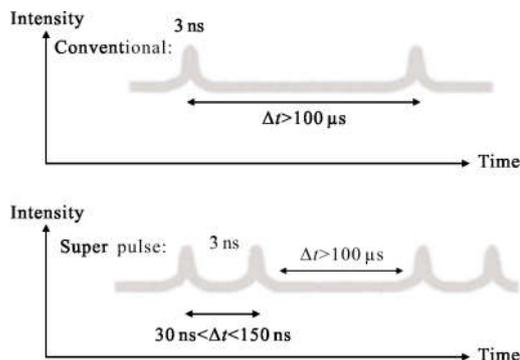
(b) 超短脉冲激光烧蚀不锈钢微孔电镜图和横截面轮廓图

(b) SEM images and cross-section profiles of holes ablated by ultrashort pulse laser in stainless steel

图 10 单波长和双波长复合加工对比图

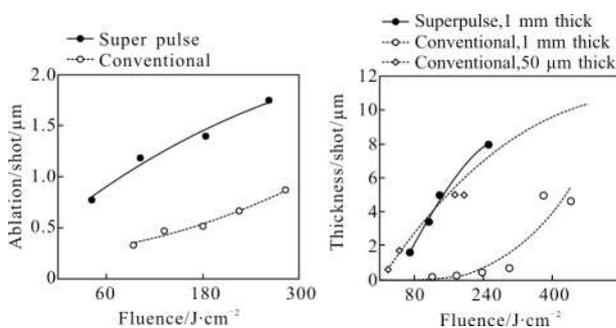
Fig.10 Comparison between the single-and double-wavelength drilling

脉冲序列是通过脉冲调控使得在一个脉冲区间内具有多个脉冲发生,从而形成脉冲链或脉冲序列,如图 11(a)所示。Forsman 等的研究表明,通过脉冲序列加工可以明显的提高激光单脉冲去除深度,见图 11(b)^[45]。同时,姜澜研究团队以双温模型为基础,通过理论验证了脉冲序列在加工金薄膜上的优势^[46]。



(a) 脉冲序列示意图

(a) Schematic image of pulse train



(b) 脉冲激光与脉冲序列加工对比图

(b) Comparison between the pulse laser drilling and pulse train drilling

图 11 脉冲激光和脉冲序列

Fig.11 Pulse laser and pulse train

3.2 旋切和螺旋微孔加工

旋切是指材料相对于激光束以圆形的轨迹运动,螺旋加工不仅需要材料以圆形轨迹运动,同时材料在激光的入射方向上也相对激光运动。与多脉冲直冲孔加工相比,旋切和螺旋加工的特点主要表现为“精”和“变”。对于“精”,主要是基于超短脉冲激光自身的“冷”加工特性以及旋切和螺旋微孔加工中更优异的热扩散性能等。然而,由于材料与激光束之间的相对运动,因此加工孔径较大,但是,可以增加烧蚀微孔的深度。

图 12(a)~(b)为 750 fs 激光旋切加工不锈钢通孔^[47],从图中可以看出,当加工深度较浅时,孔口周围几乎无喷溅物,孔的侧壁光滑细致,见图 12(a),但当旋切深度增加后,孔口周围有少量的喷溅物,侧壁也变得较粗糙,见图 12(b)。皮秒激光螺旋加工也能够加工出高质量微孔,如图 12(c)所示为皮秒激光在 25 μm 厚的钢箔上螺旋加工的直径 30 μm 的通孔,

图 12(d)为皮秒激光在 100 μm 厚钢表面螺旋加工的直径 100 μm 通孔^[48],从图中可以看出,孔的表面和侧壁质量均较好。同时,旋切和螺旋加工下的孔也有一定的锥度,如图 12(a)~(b)中通孔的入口直径分别为 400 μm 和 290 μm,而出口直径分别为 300 μm 和 150 μm。

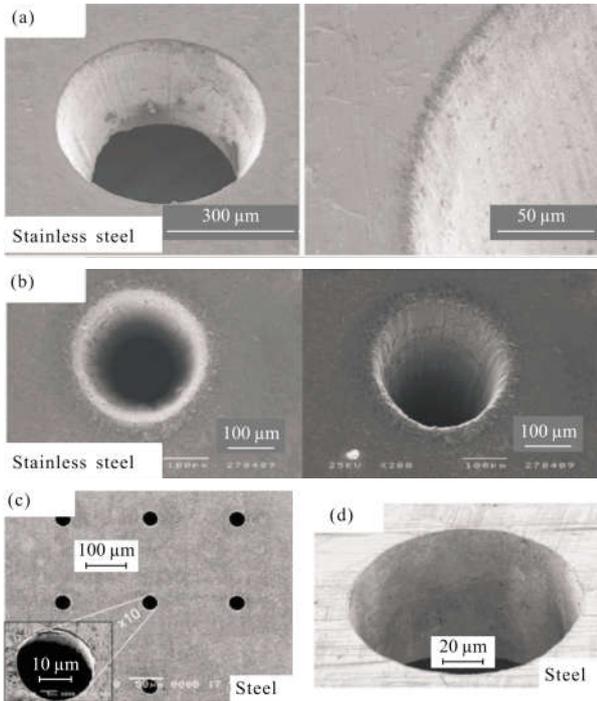
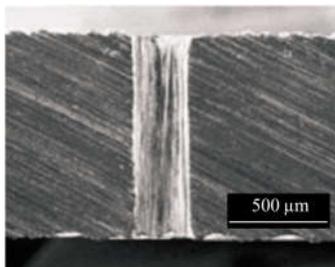


图 12 超短脉冲激光旋切和螺旋加工金属表面通孔

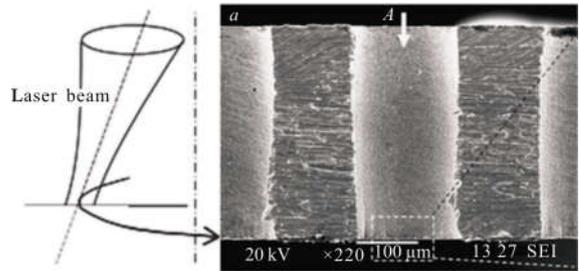
Fig.12 Trepanning and helical drilling by ultrashort pulse laser in metals

为了改善超短脉冲激光旋切和螺旋加工微孔的锥度,一方面可以调整激光的加工参数,如激光能量、光斑直径、加工圈数和进给量等,如图 13(a)所示为通过参数优化后获得的圆柱度较好的通孔^[49]。另一方面,可以通过工艺来调整微孔的锥度,如对于透明材料可以选择从底部开始加工来调控微孔的锥度^[50],或采用倾斜光束加工的方式调控微孔的锥度,如图 13(b)为 800 fs 激光通过倾斜旋切的方式加工的高质量圆柱度较好的通孔^[51]。



(a) 参数优化

(a) Optimization of parameters



(b) 工艺调控

(b) Adjustment of technology

图 13 飞秒激光旋切加工低锥度通孔

Fig.13 Small taper holes ablated by femtosecond laser trepanning processing

此外,旋切和螺旋加工中,通过激光束和材料之间的相对运动,还可以实现多形状的孔加工。如图 14 所示为 Zhang 等使用脉冲宽度 10 ps 的激光通过螺旋加工的方法在不锈钢上加工出的各种形状的孔,如三角形、长方形等,拓展了激光微加工技术的应用^[52]。

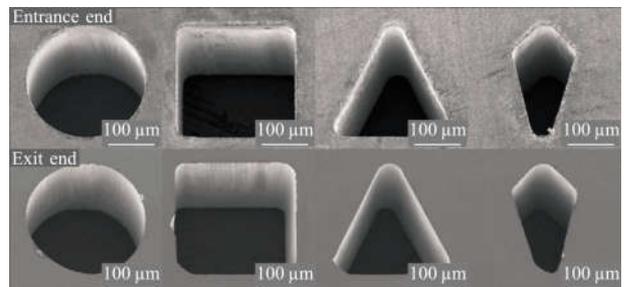


图 14 多种形状孔的入口和出口电镜图

Fig.14 SEM images of the inlets and outlets with diverse shapes

经过多年研究,超短脉冲激光微孔加工已被应用到实际工业中,有代表性的如德国博世公司利用脉冲宽度 5 ps 的激光螺旋加工发动机喷嘴微孔,如图 15(a)^[53]所示。德国 Lumera Laser 公司利用自行生产的脉冲宽度 10 ps 的激光在 1 mm 厚镍基材料上实现了直径 400 μm、倾角 60°的冷却孔加工,如图 15(b)所示^[54],材料表面质量良好,无重铸层。同时,高功率、具有优越光束质量并传递精确脉冲能量的工业级封装的 10 ps 激光加工系统已经实现^[55],如图 15(c)所示为该工业激光器在铝表面加工的直径 170 μm 和深 50 μm 的孔,孔口及内部均无熔融和残渣,孔表面粗糙度明显低于材料表层。

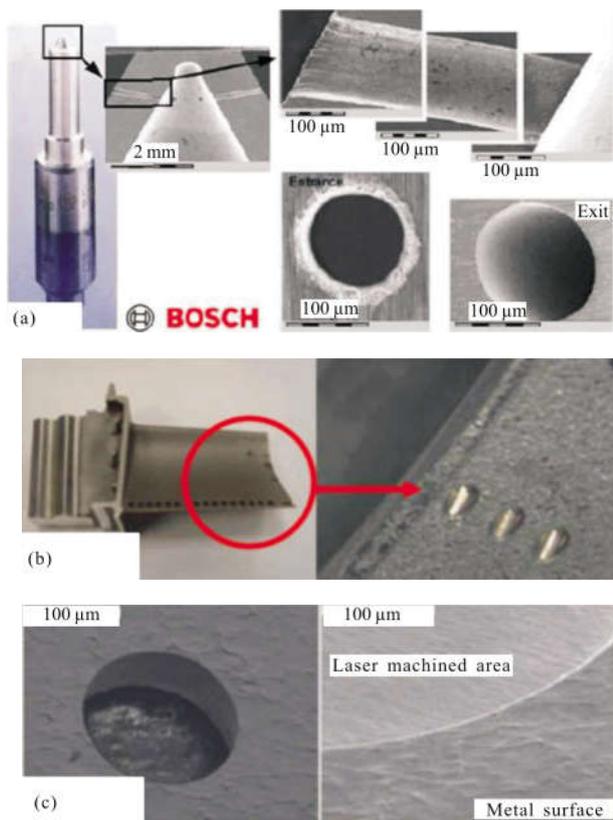


图 15 超短脉冲激光旋切和螺旋加工实例

Fig.15 Ultrashort pulse laser trepanning and helical drilling in metals

总之，超短脉冲激光旋切和螺旋微孔加工的特点可以概括为“精”和“变”，能够加工出高质量的微孔，孔口几乎无毛刺物，孔壁光滑细致。同时，通过激光束和材料之间的相对运动，还可以加工出多种形态的微结构，拓展了超短脉冲激光微加工的应用。但是，由于激光束与材料之间的相对运动，所以加工系统复杂，加工效率相对低，且加工孔径普遍较大，很难加工直径小于 $30\ \mu\text{m}$ 的孔^[55]。

3.3 皮秒和飞秒超短脉冲激光微孔加工的对比

2004 年的 SPIE 光学会议，Breitling 等提出对于金属的微孔烧蚀，使用同为超短脉冲激光的皮秒激光更具有优势^[53]。Breitling 等首先从超短脉冲激光烧蚀金属的双温模型推算出，对于金属的精密加工，激光的脉冲宽度应小于材料的电子-声子热化时间，而金属材料的电子-声子弛豫时间普遍在 $10^{-12}\sim 10^{-11}\ \text{s}$ ，同时，电子-声子间的热化开始，故 $1\sim 10\ \text{ps}$ 是金属精确加工的最优脉宽。此后，进一步降低脉冲宽度并不能获得更加精确的烧蚀，且烧蚀效率随着脉冲宽度

的降低明显下降。另外，当脉冲宽度在飞秒量级时，较高的聚焦激光能量普遍会诱发多种强烈的非线性光学效应并严重影响烧蚀微孔的形状及形貌，如图 16 所示。而当脉冲宽度处于同为超短脉冲的亚皮秒量级时，热效应较小，非线性效应也较飞秒激光有一定的改善，因此，皮秒超短脉冲激光金属加工的精度较高。

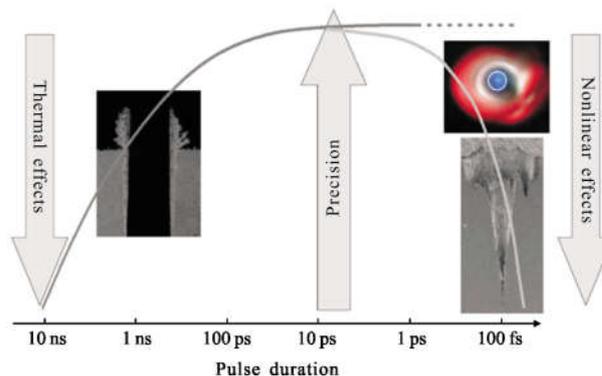
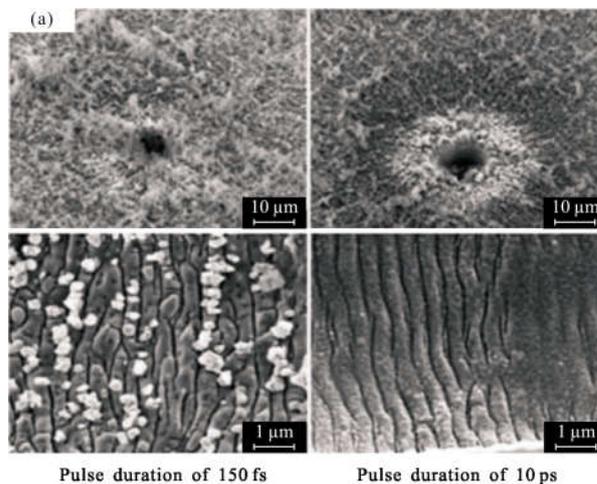


图 16 金属的精确烧蚀与激光脉冲宽度关系的示意图

Fig.16 Schematic illustration of the achievable the precision level in drilling of metals versus laser-pulse duration

上述结论被大量学者通过实验验证，如图 17(a) 所示为 $150\ \text{fs}$ 和 $10\ \text{ps}$ 激光烧蚀金属铜电镜图，从图中可以看出， $10\ \text{ps}$ 激光烧蚀下能获得与 $150\ \text{fs}$ 激光烧蚀下相似的高质量孔，然而，皮秒超短脉冲激光的加工效率明显高于飞秒超短脉冲激光的烧蚀^[56]。当采用较高的重复频率时，皮秒超短脉冲激光烧蚀下的孔也能够与飞秒超短脉冲激光相媲美，如图 17(b) 所示，当重复频率为 $100\ \text{kHz}$ 时，脉冲宽度为 $800\ \text{fs}$ 、 $6\ \text{ps}$ 、 $19\ \text{ps}$ 时激光烧蚀孔周围均有少量的熔融飞溅物，



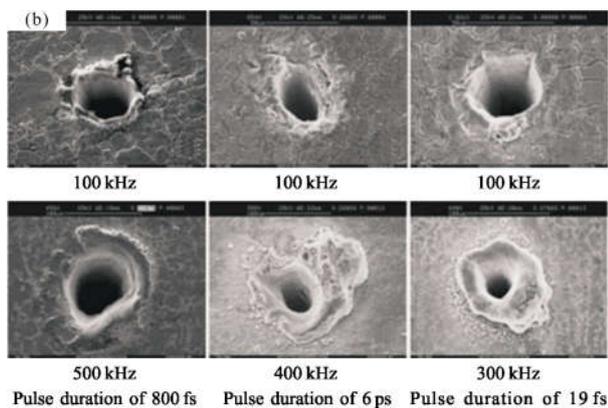


图 17 (a) 超短脉冲激光烧蚀铜孔和孔中心电镜图;(b) 高重复频率下脉冲激光烧蚀不锈钢孔电镜图

Fig.17 (a) SEM images taken from the holes and middle of holes in Cu drilled by ultrashort pulse laser; (b) SEM images of holes in stainless steel drilled by pulse laser with high repetition rate

随着重复频率的增加,19 ps 激光烧蚀孔口周围毛刺物明显增加,而对于 800 fs 和 6 ps 的超短脉冲激光烧蚀,微孔周围毛刺物没有明显的增加^[57]。

4 问题和展望

4.1 问题

虽然超短脉冲激光特别是皮秒超短脉冲激光已经在实际工业中被应用,但是,超短脉冲激光的微孔加工仍存在一些问题,如图 18 所示。

(1) 皮秒和飞秒超短脉冲激光金属微孔加工

上文的分析表明,对于金属材料上的微孔加工,使用同为超短脉冲激光的亚皮秒激光加工更具优势。因此,探讨皮秒超短脉冲激光的金属微孔加工更有应用价值。但是,与飞秒超短脉冲激光相比,皮秒超短脉冲激光微结构加工的研究相对较少。

(2) 微孔加工方式

目前应用到实际工业中的超短脉冲激光微孔加工主要是旋切和螺旋加工。但是,由于旋切和螺旋加工中激光束与材料的相对运动使得其不能加工较小孔径的微孔,且加工效率也受到光束和材料间相对运动的限制。同时,多脉冲直冲式加工由于无光束和材料间的相对运动,能够加工较小直径的微孔且加工效率较高。因此,探索多脉冲直冲式微孔加工具有较大的应用潜力。

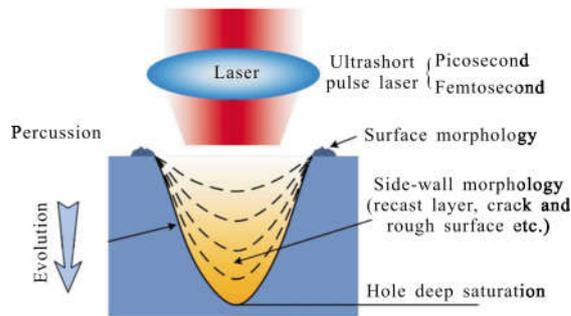


图 18 超短脉冲激光加工微孔中存在的问题

Fig.18 Problems in hole drilling by ultrashort pulse laser

(3) 超短脉冲激光烧蚀金属深孔的进化研究

深孔烧蚀进化的研究具有重要的意义,一方面可以明确各种孔形的形成过程,进而探讨各种物理机制等对烧蚀过程的影响,另一方面,对于孔的进化的研究可以在一定程度上指导深孔的理论探索。但是,对于金属等不透明材料无法实时探测深孔的烧蚀过程,再者,深孔的检测技术限制了对超短脉冲激光烧蚀金属等不透明材料微深孔的进化过程的研究,使其成为微深孔加工中的一个问题和难点。

4.2 展望

虽然超短脉冲激光微孔特别是微深孔加工还存在许多问题,然而,随着理论及实验研究的深入,特别是微孔的进化过程的研究和探索,可以进一步明确超短脉冲激光微孔烧蚀的形成机理,精确调控进而加工出多种形态的微孔,进一步拓展超短脉冲激光微加工的应用。再者,随着激光技术的发展,特别是激光能量和重复频率的提升,结合多种加工设备,如扫描振镜等,可以以更短的时间内加工出更深的孔,提高超短脉冲激光微深孔的加工深度和效率。

总之,研究的目的在于实际的工业化应用。相信随着研究的深入,超短脉冲激光微孔加工将被应用在更加广泛的行业和领域中,特别是普通加工方法不能实现或不能精确实现的加工,如高硬性、脆性材料的加工,低微米、纳米级加工,微纳米直径下的大深径比微孔加工等,在微纳米高精制造方面贡献自己的力量。

参考文献:

[1] Maiman T H. Stimulated optical radiation in ruby [J]. *Nature*, 1969, 187(4736): 134-136.

- [2] Zhang G T. Study on LiF:F₂--crystal Q-switch characteristics [J]. *Laser Journal*, 1987, 8(6): 358–361.
- [3] Fork R L, Greene B I, Shank C V. Generation of optical pulses shorter than 0.1 psec by colliding pulse mode-locking [J]. *Applied Physics Letters*, 1981, 38(9): 671–672.
- [4] Hentschel M, Kienberger R, Spielmann C, et al. Attosecond metrology[J]. *Nature*, 2001, 414(6863): 509–513.
- [5] Yang Jing, Gong Cheng, Zhao Jiayu, et al. Fabrication of terahertz device by 3D printing technology [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 77–85. (in Chinese)
- [6] Zhang Junzhan, Wang Yuqian, Zhang Ying, et al. Effect of feeding speed on micro-hole drilling in TiC ceramic by femtosecond laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(6): 1565–1571. (in Chinese)
- [7] Wang Yanfang, Li Hao, Shi Zhiqiang, et al. Laser cladding Fe-based solid solution alloy coating with high corrosion resistance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 1(8): 0806001. (in Chinese)
- [8] Zhang Y, Wang Y, Zhang J, et al. Micromachining features of TiC ceramic by femtosecond pulsed laser [J]. *Ceramics International*, 2015, 41(5): 6525–6533.
- [9] Luzius S, Sailer M, Siebert C, et al. PCB drilling with high power picosecond lasers [J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 723–726.
- [10] Fann W S, Storz R, Tom H W, et al. Electron thermalization in gold [J]. *Physical Review B Condensed Matter*, 1992, 46(20): 13592.
- [11] Wellershoff S S, Hohlfield J, Güdde J, et al. The role of electron-phonon coupling in femtosecond laser damage of metals[J]. *Applied Physics A*, 1999, 69(1): S99–S107.
- [12] Kojisugioka, Ya Cheng. Ultrafast Laser Processing: From Micro-to Nanoscale[M]. Singapore: Pan Stanford Pub, 2013: 225–261.
- [13] Corkum P B, Brunel F, Sherman N K, et al. Thermal response of metals to ultrashort-pulse laser excitation [J]. *Physical Review Letters*, 1988, 61(25): 2886.
- [14] Breitling D, Dausinger F H. Precise drilling of steel with ultrashort pulsed solid state lasers [C]//Laser Processing of Advanced Materials and Laser Microtechnologies, 2003: 271–279.
- [15] Wang Xinlin. Femtosecond laser ablation of metallic materials and fabrication of micro-components [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [16] Liu J M. Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes [J]. *Optics Letters*, 1982, 7(5): 196.
- [17] Yong J, Becker M F, Walser R M. Laser-induced damage on single-crystal metal surfaces [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1988, 5(3): 648–659.
- [18] Raciukaitis G, Gedvilas M. Accumulation effects in laser ablation of metals with high-repetition-rate lasers [C]//SPIE, 2008, 7005: 70052L.
- [19] Nolte S, Momma C, Jacobs H, et al. Ablation of metals by ultrashort laser pulses [J]. *Journal of the Optical Society of America B Optical Physics*, 1997, 14(10): 2716–2722.
- [20] Ashkenasi D, Rosenfeld A, Varel H, et al. Laser processing of sapphire with picosecond and sub-picosecond pulses [J]. *Applied Surface Science*, 1997, 120(1–2): 65–80.
- [21] Klein-Wiele J H, Bekesi J, Simon P. Sub-micron patterning of solid materials with ultraviolet femtosecond pulses [J]. *Applied Physics A*, 2004, 79(4–6): 775–778.
- [22] Zang Zhigang, Zeng Xiaofeng, Du Jihe, et al. Femtosecond laser direct writing of microholes on roughened ZnO for output power enhancement of InGaN light-emitting diodes[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(15): 3463.
- [23] Leitz K H, Redlingshöfer B, Reg Y, et al. Metal ablation with short and ultrashort laser pulses [J]. *Physics Procedia*, 2011, 12(1): 230–238.
- [24] Dausinger F, Lichtner F, Lubatschowski H. Femtosecond Technical and Medical Applications [M]. Berlin: Springer, 2004.
- [25] Dausinger F. Precise drilling with short-pulsed lasers [C]// SPIE, 2000, 3888: 180–187.
- [26] Kononenko T V, Klimentov S M, Konov V I, et al. Propagation of short-pulsed laser radiation and stages of ablative deep-channel formation [C]//SPIE, 2001, 4274(4274): 248.
- [27] Kononenko T V, Konov V I, Garnov S V, et al. Dynamics of deep short pulse laser drilling: ablative stages and light propagation[J]. *Laser Physics*, 2001, 11(3): 343.
- [28] Garnov S V, Breitling D, Dausinger F. Hole formation process in laser deep drilling with short and ultrashort pulses [C]//SPIE, 2002, 4426(4426): 108.
- [29] Döring S, Richter S, Nolte S, et al. In-situ observation of the hole formation during deep drilling with ultrashort laser pulses[C]//SPIE, 2011, 7925(1): 330–338.
- [30] Zhao W, Wang W, Jiang G, et al. Ablation and morphological evolution of micro-holes in stainless steel with picosecond laser pulses[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 80(9–12): 1713–1720.

- [31] Zhao Wanqin. Studies on technologies and applications in micro-hole percussion drilling of picosecond ultrashort pulse laser of metals [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [32] Döring S, Richter S, Ullsperger T, et al. Influence of ambient pressure on the hole formation process in ultrashort pulse laser deep drilling [C]//SPIE LASE, 2013, 8611: 86111D.
- [33] Döring S, Richter S, Nolte S, et al. In situ imaging of hole shape evolution in ultrashort pulse laser drilling [J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 20395–20400.
- [34] Döring S, Richter S, Tünnermann A, et al. Evolution of hole depth and shape in ultrashort pulse deep drilling in silicon [J]. *Applied Physics A*, 2011, 105(1): 69–74.
- [35] Xia Bo. Mechanism and online observation of high-aspect-ratio, high-quality microholes drilling with femtosecond laser [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [36] Kaakkunen J J J, Silvennoinen M, Paivasaari K, et al. Water-assisted femtosecond laser pulse ablation of high aspect ratio holes[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12(1): 89–93.
- [37] Hidai H, Kuroki Y, Matsusaka S, et al. Curved drilling via inner hole laser reflection [J]. *Precision Engineering*, 2016, 46: 96–103.
- [38] Lin C H, Rao Z H, Jiang L, et al. Investigations of femtosecond-nanosecond dual-beam laser ablation of dielectrics[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(14): 2490–2492.
- [39] Lin C H, Rao Z H, Jiang L, et al. Enhancement of ablation efficiency by a femto/nano-second dual-beam micromachining system[C]//SPIE LASE, 2010: 7585.
- [40] Sugioka K, Midorikawa K. VUV-UV multiwavelength excitation process for high-quality ablation of fused silica [C]//SPIE, 2013, 8777: 04.
- [41] Tan B, Venkatkrishnan K, Sivakumar N R, et al. Laser drilling of thick material using femtosecond pulse with a focus of dual-frequency beam [J]. *Optics & Laser Technology*, 2003, 35(3): 199–202.
- [42] Kamata M, Tsujikawa S, Sumiyoshi T, et al. Dual wavelength femtosecond laser materials processing [C]//Lasers and Electro-Optics, CLEO 2007, 2007: 1–2.
- [43] Zoppel S, Zehetner J, Reider G A. Two color laser ablation: Enhanced yield, improved machining [J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(19): 7692–7695.
- [44] Zhao W, Wang W, Mei X, et al. Investigations of morphological features of picosecond dual-wavelength laser ablation of stainless steel [J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 58(6): 94–99.
- [45] Forsman A C, Banks P S, Perry M D, et al. Doublepulse machining as a techniques for the enhancement of material removal rates in laser machining of metals [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(3): 474–477.
- [46] Jiang L, Tsai H L. Modeling of ultrashort laser pulse-train processing of metal thin films [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2007, 50(17–18): 3461–3470.
- [47] Huang H, Yang L M, Liu J. Micro-hole drilling with femtosecond fiber laser[C]//SPIE, 2013, 8607: 86070K.
- [48] Nebel A, Herrmann T, Henrich B, et al. Fast micromachining using picosecond lasers[C]//SPIE, 2005: 5706.
- [49] Kling R, Mottay E. Metal microdrilling combining high power femtosecond laser and trepanning head [C]//SPIE, 2013, 8608: 86080F.
- [50] Lee H M, Choi J H, Moon S J. Determining the machining parameters for femtosecond laser helical drilling of aluminosilicate glass substrate [J]. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*, 2017, 18(7): 923–930.
- [51] Romoli L, Vallini R. Experimental study on the development of a micro-drilling cycle using ultrashort laser pulses [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2016, 78: 121–131.
- [52] Zhang H, Di J, Ming Z, et al. An investigation on the hole quality during picosecond laser helical drilling of stainless steel 304[J]. *Applied Physics A*, 2015, 119(2): 1–8.
- [53] Breiting D, Dausinger F. Fundamental aspects in machining of metals with short and ultrashort laser pulses [C]//SPIE, 2004, 5339: 49–63.
- [54] Knappe R, Weis A, Nebel A. Scaling ablation rates for picosecond lasers using burst micromachining [C]//SPIE, 2010, 7585: 75850H.
- [55] Klimt B. Micromachining with industrial picosecond lasers[J]. *Laser Technik Journal*, 2007, 4(1): 40–43.
- [56] Weck A, Crawford T H R, Wilkinson D S, et al. Laser drilling of high aspect ratio holes in copper with femtosecond, picosecond and nanosecond pulses [J]. *Applied Physics A*, 2008, 90(3): 537–543.
- [57] Ancona A, Röser F, Limpert J, et al. Ultrashort pulse laser drilling of metals using a high-repetition rate high average power fiber CPA system[C]//SPIE, 2009, 7203: 720311.