

# 激光与光电子学进展

## 激光在材料去除加工中应用的研究进展

胡晓冬<sup>1,2\*</sup>, 李元龙<sup>1,2</sup>, 白少状<sup>1,2</sup>, 马科<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>浙江工业大学机械工程学院, 浙江 杭州 310023;

<sup>2</sup>特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310023

**摘要** 激光去除材料作为激光在工业生产中的重要应用, 具有非接触、效率高、加工精度高等其他加工技术无法比拟的诸多优势。本文从单一激光束去除材料和激光复合减材技术两个方面进行阐述, 介绍了激光打孔、激光切割、激光烧蚀、激光光刻这四项激光加工技术, 并将其与其他加工技术进行了对比; 此外, 本文还介绍了以激光去除材料为主、多能量场为辅的激光复合技术, 并针对单一激光束去除材料技术难以高效加工沟槽的问题, 介绍了一种电磁场辅助的激光沟槽加工方法。

**关键词** 激光技术; 激光材料加工; 激光打孔; 激光切割; 激光烧蚀; 激光复合制造

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0500008

## Research Progress of Laser Application in Material Removal

Hu Xiaodong<sup>1,2\*</sup>, Li Yuanlong<sup>1,2</sup>, Bai Shaozhuang<sup>1,2</sup>, Ma Ke<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology, Ministry of Education and Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

**Abstract** As an important laser application in industrial production, laser material removal has many advantages, such as no contact, high efficiency, and high processing accuracy. Herein, two aspects of the single-laser-beam removal material and laser hybrid reduction technology were elaborated. Further, four laser processing technologies of laser drilling, laser cutting, laser ablation, and laser lithography were introduced, and these technologies were compared with other processing technologies. The laser composite technology supplemented by the laser removal of materials and multiple energy fields is also introduced. Aiming at the problem of difficulty in efficiently processing grooves using single-laser-beam removal material technology, an electromagnetic-field-assisted laser groove processing method was introduced.

**Key words** laser technique; laser materials processing; laser drilling; laser cutting; laser ablation; laser hybrid manufacturing

**OCIS codes** 140.3390; 140.7090; 140.5960

## 1 引 言

自 1960 年美国科学家梅曼在休斯研究实验室成功研制出世界上第一台红宝石激光器以来, 激光

便被迅速应用到工业、农业、医疗卫生等社会生产的各个领域<sup>[1]</sup>。利用高能量激光束去除材料是激光在工业生产中的重要应用。激光去除材料的常见方法有激光打孔、激光切割、激光烧蚀和激光光刻

收稿日期: 2020-04-29; 修回日期: 2020-06-02; 录用日期: 2020-06-22

基金项目: 国家自然科学基金(51705464)

\*E-mail: hooxoodoo@zjut.edu.cn

等。传统的切削技术具有刀具磨损严重、效率低、精度低等问题,对于一些精度较高的微孔加工以及高硬度材料的加工,传统的切削技术无法胜任,而激光加工则可以实现。在精度要求较高的航空航天领域、超硬材料的加工领域以及对刀具磨损严重的机加工等领域,激光去除材料的方法具有广阔的应用前景。但是,依靠单一激光束进行减材加工仍然存在一些问题,尤其是在沟槽加工方面,因此以激光束为主辅以多能量场的复合减材技术逐渐成为研究热点。因此,本文在归纳激光去除材料发展现状的同时,也介绍了以电磁场辅助激光进行沟槽加工的新技术方案及其原理。

## 2 传统激光去除材料技术

### 2.1 激光打孔

对于高品质微孔的加工,传统方法具有一定的局限性。在常见的微孔加工方法中,电子束和聚焦离子束加工的使用条件苛刻,效率低,设备昂贵;电火花腐蚀只能加工导电材料;电化学打孔效率极低,材料受限;机械钻孔加工较硬材料比较困难,且深径比小<sup>[2]</sup>。激光打孔具有速度快、效率高、成本低、无刀具损耗、可获得较高深径比的微深孔等优点,这使得激光打孔被广泛应用到工业生产中。激光打孔技术可分为复制法(又称冲击打孔)和轮廓迂回法,进一步细分又可分为单脉冲打孔、多脉冲打孔、环切式打孔和螺旋式打孔<sup>[3]</sup>,如图 1 所示。

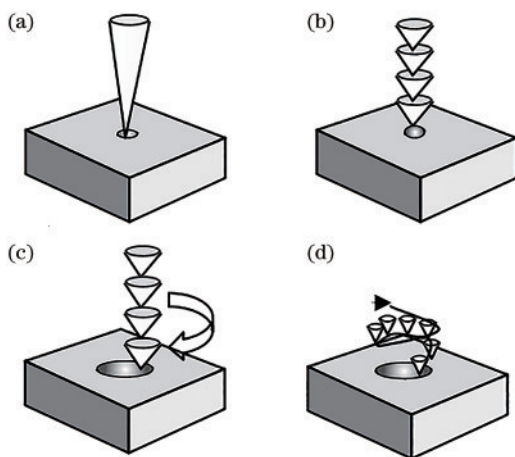


图 1 激光打孔方法示意图<sup>[3]</sup>。(a)复制法(单脉冲);(b)复制法(多脉冲);(c)轮廓迂回法(环切式);(d)轮廓迂回法(螺旋式)  
Fig. 1 Schematics of laser drilling method<sup>[3]</sup>. (a) Copy method (single pulse); (b) copy method (multi-pulse); (c) contour detour (circumferential cut); (d) contour detour (screw-type)

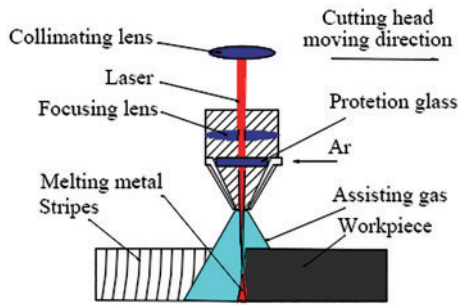
20 世纪 80 年代,英、美等国就开始在飞机制造过程中运用激光打孔技术<sup>[4-5]</sup>。美国的通用公司用激光打孔的方式加工出了孔径为 0.117~1.17 mm、孔深为 15 mm 的微孔,并且能够按照实际要求加工出被加工零件表面与孔轴线具有一定角度的孔<sup>[6]</sup>。激光打孔工艺通常被用于在航空航天部件(如涡轮叶片、导叶和外壳)上快速加工出微小孔。采用激光打孔的优点是无接触打孔,可打高精度孔,重复性好,灵活性高,无碎屑或毛刺问题,生产率高,可实现较大的深径比,适用材料范围广,孔径从 0.2  $\mu\text{m}$  到 1.5 mm 不等<sup>[7]</sup>。

激光打孔是一个复杂的多态多物理场耦合的瞬态过程。为了提高打孔的质量和精度,对激光打孔进行数值模拟以及对打孔工艺进行改进等逐渐成为了研究重点。2009 年,希腊派图拉斯大学的 Salonitis 等<sup>[8]</sup>依据能量守恒原理,基于物质一旦熔融即离开小孔的假设,研究了激光的重复频率和功率密度等对孔深度的影响。2013 年,臧彦楠等<sup>[9]</sup>为了研究激光工艺参数变化对激光打孔结果的影响,建立了基于 ANSYS 生死单元法的激光打孔仿真模型,计算了不同激光工艺参数下的激光打孔温度场,并研究了小孔界面演化过程。2017 年,英国学者 Marimuthu 等<sup>[10]</sup>针对 Nd:YAG 激光在镍基高温合金上打孔时效率不高的问题进行了研究,并采用低峰值功率高频率激光器(准连续光纤激光器)进行了钻孔,结果发现,利用准连续光纤激光器加工的重铸层厚度约为 30  $\mu\text{m}$ ,钻孔速度可达 500 mm/min,可有效提高钻孔速度且不影响钻孔质量。

### 2.2 激光切割

激光切割是将激光束聚焦后照射到工件上,形成高能量密度( $>10^6 \text{ W/cm}^2$ )的焦点光斑,使光斑处的工件材料温度急剧上升,材料熔化甚至气化,同时借助与光束同轴的辅助气体的高速气流吹除熔融材料来形成孔洞,然后通过激光切割头在工件上的移动使工件上形成一条切缝,从而完成切割<sup>[11]</sup>。激光切割示意图如图 2 所示。

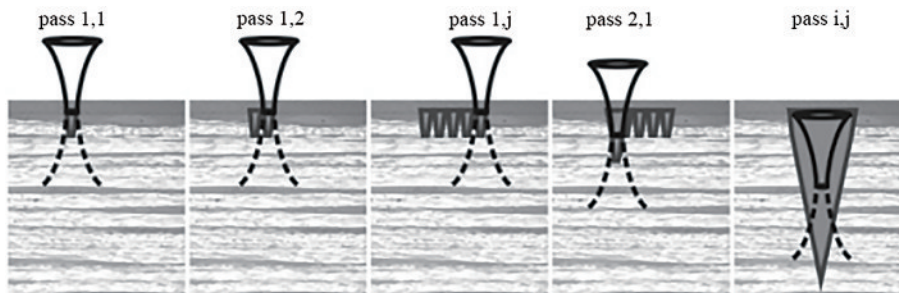
激光切割可实现结构复杂、高硬脆性金属、非金属、陶瓷材料的快速切割<sup>[12]</sup>,具有材料适应性强、非接触式加工、高效自动化等技术优势。电火花切割效率过低,等离子切割过程中的噪声大、烟尘多、辐射大,超高压水切割的成本过高,而激光切割的速度快、切缝小、切割材料表面质量好,不足之处是切割材料的厚度偏低<sup>[13]</sup>。

图 2 激光切割示意图<sup>[11]</sup>Fig. 2 Laser cutting schematic<sup>[11]</sup>

20 世纪 70 年代,国外学者首次将激光切割应用于切割纸箱板冲压模具。随着激光切割技术的不断发展,激光切割被逐渐扩展到金属板材的切割<sup>[14-15]</sup>。我国对激光切割的研究起步于 20 世纪 70 年代,80 年代沿海地区的一些城市引进了激光切割系统,主要用于雕刻、打印等行业。90 年代初期,加工参数可自动设置的性能卓越的激光切割系统问世<sup>[16]</sup>。21 世纪初期,美国在激光切割方面实现了很大突破,500 W 的 CO<sub>2</sub> 激光切割设备可以以 50~300 cm/min 的切割速度成功切割厚度为 1.0~2.5 mm 的金属板材。目前,激光切割技术领域的权威企业有宙斯、悍马、嘉宝等。

随着切割技术的发展,切割系统创新、切割过程数值模拟、切割效率提高等成为了研究热点。刘

涵茜<sup>[17]</sup>设计的基于 PROFINET 的 KUKA 机器人三维激光切割系统有效解决了三维异形零件在切割加工应用上的难题。印度学者 Chaki 等<sup>[18]</sup>提出了一种人工神经网络(ANN)和非支配排序遗传算法(NSGAI)相结合的集成模型,并将该模型用于 Nd:YAG 脉冲激光切割铝合金过程中的质量特性预测和优化上;他们将切割速度、脉冲能量和脉冲宽度视为可控制的输入参数,将表面粗糙度和材料去除率作为输出,用以生成模型数据;实验验证表明,优化后的输出结果误差小于 1%。大连理工大学的于冬洋等<sup>[19]</sup>对单层碳纤维复合材料激光多向切割的温度场进行了模拟,与实验结果相比,数值模拟结果中表面碳纤维烧蚀宽度的平均误差为 10.66%,热影响区宽度的平均误差为 13.09%。华中科技大学的张威等<sup>[20]</sup>采用 1 kW 光纤激光器对 2 mm 厚铝锂合金进行了切割实验,通过优化切割工艺最终获得了良好的切割质量。为了解决碳纤维增强复合材料(CFRP)激光切割时厚度受限的问题,德国学者 Herzog 等<sup>[21]</sup>通过扩大切口宽度使激光束平行于切割的几何形状移动以及多次分层次切割,达到了增大切割厚度的目的;实验验证后可知此方法所能达到的最大切割厚度可达 12.7 mm,较其他方法的 6 mm 切割厚度有了很大进步。该方法的切割示意图如图 3 所示。

图 3 激光束平行切割示意图<sup>[21]</sup>Fig. 3 Laser beam parallel cutting diagram<sup>[21]</sup>

激光去除材料的效率和速度与所用激光的功率、离焦量、辅助气压等工艺参数有关。华中科技大学的沈义平等<sup>[22]</sup>采用 YLS-10000 型连续多模光纤激光器对厚度为 8 mm 的 2219-T87 铝合金板材进行了切割实验,以研究工艺参数对工件表面质量的影响,结果发现:随着切割速度从 1.0 m/min 增大到 2.4 m/min,挂渣高度先减小后增加。实验验证结果表明:当激光功率为 5.4 kW,切割速度为 1.6~2 m/min,离焦量为 -4~-3 mm,辅助气压为

1100~1500 kPa 时,能得到挂渣少且表面条纹较细的切缝;而当辅助气压增大至 1900 kPa 时,切缝表面质量最优。沙特学者 Janković 等<sup>[23]</sup>采用 DOMINO-Evoluzione CO<sub>2</sub> 激光切割机对 3 mm 厚 AlMg<sub>3</sub> 铝合金进行了切割实验,最大切割速度可达 3.5 m/min;当激光器功率为 4 kW,切割速度为 3.23 m/min,辅助气体压力为 6 bar(1 bar=100 kPa)时,所获得的切割表面的粗糙度最小。值得注意的是,激光切割时也会存在一些不足,如切割后会存



在挂渣现象,难以进行盲槽或者沟槽的加工等。

### 2.3 激光烧蚀

激光烧蚀也是激光去除材料方法中的一种较为普遍的方法。按照激光的脉宽来分,脉冲激光烧

蚀的发展大致经历了三个阶段:纳秒激光烧蚀、皮秒激光烧蚀和飞秒激光烧蚀<sup>[24]</sup>。纳秒、皮秒、飞秒激光烧蚀去除材料的效果图分别如图 4(a)、(b)、(c)所示。

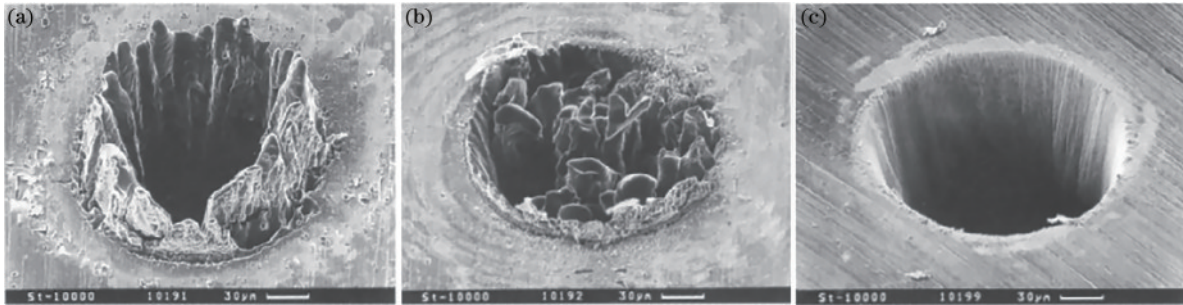


图 4 激光烧蚀效果图<sup>[24]</sup>。(a)纳秒激光;(b)皮秒激光;(c)飞秒激光

Fig. 4 Laser ablation effect images<sup>[24]</sup>. (a) Nanosecond laser; (b) picosecond laser; (c) femtosecond laser

纳秒激光器具有性能稳定可靠、维护简单和寿命长等优势。以脉宽为  $10^{-9} \sim 10^{-10}$  s 的激光作为光源的纳秒激光烧蚀是脉冲激光烧蚀的初级阶段。早在 1987 年, Dijkkamp 等<sup>[24]</sup>就利用纳秒激光烧蚀技术成功沉积出了高质量的高温超导薄膜。纳秒激光去除材料通过熔化、蒸发和气化过程的反冲压力使液相材料向外膨胀,因此加工位置边缘存在“冠状物”。与皮秒、飞秒激光器相比,纳秒激光器具有加工效率高、稳定性好、价格低等优势。皮秒激光烧蚀以脉宽为  $10^{-11} \sim 10^{-12}$  s 的激光作为光源<sup>[25]</sup>。纳秒激光烧蚀出现不久后便出现了皮秒激光烧蚀。与飞秒激光相比,皮秒激光的脉冲宽度较大,与材料的作用时间也相应变长,所以加工精度略差,边沿可能会产生毛刺,但是皮秒激光器比飞秒激光器便宜,而且比纳秒激光器的加工精度高。皮秒激光烧蚀所集中的峰值能量密度足以达到材料烧蚀的临界点,并且避免了热扩散的发生。这一特性使得皮秒激光烧蚀通常被用来制备微纳米结构。在荷叶和鲨鱼皮抗生物污垢特性的启发下, Sun 等<sup>[26]</sup>使用波长为 515 nm、脉宽为 10 ps 的激光器在  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  的 AISI304 不锈钢上制备了具有可控制的周期性结构超疏水表面(SHS),结果发现,与裸露的不锈钢板相比,带有 SHS 的不锈钢样品具有显著的抗生物污垢的作用,微生物附着面积比的平均值降低了近 50%。这说明该 SHS 表面在抑制船舶设备的生物污垢方面具有广阔的应用前景。飞秒激光烧蚀以脉宽为  $10^{-15}$  s 的激光作为光源,当激光脉冲达到飞秒量级时,在光束聚焦后能量往往可以达到  $10^{18} \text{ W/cm}^2$  以上,损伤阈值基本不变且很

精确<sup>[27]</sup>。20 世纪 90 年代初,飞秒激光技术开始应用。1996 年,德国学者 Chichkov 等<sup>[28]</sup>利用 0.2~5000 ps 的钛宝石激光脉冲对金属靶材进行了烧蚀实验,并利用双温方程在不同的激光脉冲间隔内对双温方程进行约化,求得了解析解,定量地揭示了飞秒激光烧蚀材料时的较长脉冲具有精确的规则形状。飞秒激光烧蚀去除材料快速、精确,且不会对周围材料产生明显的热影响,因此采用飞秒激光进行材料的快速去除,然后用精确的聚焦离子束进行最终处理成为快速制备微机械样品的一个新的研究方向。奥地利学者 Pfeifenberger 等<sup>[29]</sup>采用以上技术并通过优化切割路径,在  $25 \mu\text{m}$ 、 $50 \mu\text{m}$  和  $100 \mu\text{m}$  厚的冷轧钨箔上加工出了几百微米的悬臂梁,并在 0.5 h 内加工出了 100 个尺寸为  $420 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$  的悬臂梁样品阵列。悬臂梁样品阵列的效果图如图 5 所示,展示出了该技术快速制备样品的能力。

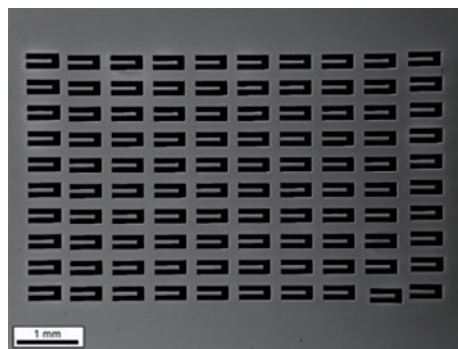


图 5 悬臂梁加工结果图<sup>[29]</sup>

Fig. 5 Cantilever beam rendering<sup>[29]</sup>

### 2.4 激光光刻

光刻技术是制备半导体器件的关键技术之一。

随着半导体工业的发展,集成电路的特征尺寸越来越小,这对光刻技术的发展提出了更高的要求。激光光刻可分为激光投影式光刻和激光无掩模光刻技术。

Zhang 等<sup>[30]</sup>将 MHC (metal hydrazone complex) 薄膜作为激光热光刻图案化材料,在其上直接写入了纳米级分辨图案。他们以能发出 405 nm 波长光的 GaN 二极管作为激光源,以数值孔径为 0.90 的物镜作为聚焦透镜的激光写入装置,在聚焦光斑实际直径约为 600 nm 的情况下,成功地获得了最小特征尺寸约为 78 nm 的图案。该图案的大小仅为书写点大小的 1/8 左右。与以往的工作相比,上述方法只需一步就能在空气中大面积、高速地制备出纳米级分辨图形,而不需要任何其他过程,为直接形成纳米级分辨图形提供了一种简单有效的方法。斯洛伐克学者 Durisova 等<sup>[31]</sup>探索了基于直接激光写入和聚焦离子束技术(FIB)的激光光刻技术在 IP-Dip 光刻胶中制备光学表面的应用,他们通过改变光刻过程中的扫描速度和激光功率这两个主要参数,获得了不同表面质量的样品;他们用 XEI 软件对扫描面积为  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$  的原子力显微镜形貌数据进行分析后发现:在 0.015 m/s-36.9 mW、0.015 m/s-33.825 mW、0.01 m/s-30.75 mW、0.02 m/s-36.9 mW 和 0.02 m/s-39.975 mW 的扫描速度和激光功率组合下,样品的表面质量较好,表面粗糙度参数  $s_q$  的值小于 2 nm。采用 FIB 后,样品的表面粗糙度显著改善, $s_q$  的值达到了 1 nm 左右,远小于 Rayleigh 标准。沙特国王科技大学学者 Zhang 等<sup>[32]</sup>开发了一种简单的基于木质素的激光光刻技术(如图 6 所示),该技术采用简单的一步式  $\text{CO}_2$  激光辐照将木质素膜直接转化为 3D 激光划片的石墨烯(LSG)电极。此步骤之后是水剥离工艺,以去除未暴露的木质素,从而生成具有设计电极图案的 3D 石墨烯。

采用木质素激光光刻技术制得的 LSG 电极是分层多孔的,其电导率高达 66.2 S/cm,并具有较高的比表面积( $338.3\ \text{m}^2/\text{g}$ )。这些特性意味着这种电极可以直接用作微型超级电容器(MSC)电极,而无需黏合剂和集电器。采用木质素激光光刻技术制造的 MSC 具有良好的电化学性能,即高的面电容( $25.1\ \text{mF}/\text{cm}^2$ )、高的体积能量密度( $\approx 1\ \text{mW}\cdot\text{h}/\text{cm}^3$ )和高的体积功率密度( $\approx 2\ \text{W}/\text{cm}^3$ )。此技术为大规模生产片上微型超级电容器、传感器和柔性电子产品等提供了机遇。

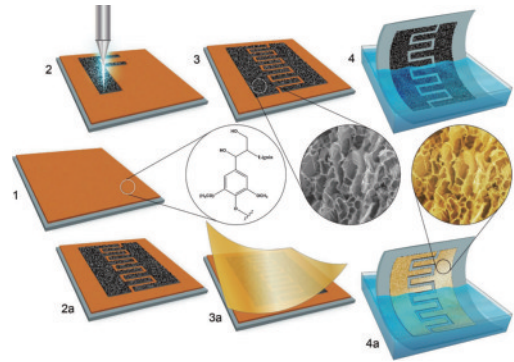


图 6 木质素激光光刻技术示意图<sup>[32]</sup>

Fig. 6 Schematic of lignin laser lithography technique<sup>[32]</sup>

### 3 多能量场复合减材与沟槽加工技术

激光与材料相互作用过程中的物理过程十分复杂,依靠单一激光束的减材方法很容易出现一些问题。如:激光打孔时残留物在加工表面凝固形成再铸层,且凝固过程中会产生残余热应力,孔壁材料在此应力作用下会产生微裂纹;铝合金的高热导率及其氧化物的高黏度,使得其在进行激光切割时存在切割效率低、挂渣厚、切割质量差等问题。而仅仅从加工工艺的角度进行优化是无法很好地解决以上问题的。多能场复合激光去除材料的技术正在逐步兴起,目前常用的能场有电磁场、热场、振动场等。其中,电磁场对于激光加工有装置简单、效果明显、调控方式明显等优势。所查资料显示,很多科研人员选择了将激光加工技术与多种能量相结合的复合加工技术,如:Lu 等<sup>[33]</sup>通过实验分别研究了基体材料为 304 不锈钢时,不加电磁场、加稳态磁场、加旋转磁场、加稳态电磁场和旋转电磁场对激光打孔的影响。结果表明,当采用纳秒激光打孔时,施加稳态电磁场时产生的孔深度更大,飞溅更少,有利于提高孔质量。加工过程中不锈钢的飞溅图如图 7 所示。

Wang 等<sup>[34]</sup>采用超声振动辅助毫秒脉冲 Nd:YAG 激光进行了冲击钻孔实验,并将钻孔结果与未进行超声辅助的结果进行了对比。结果表明:超声振动不仅可以提高孔的深度和宽度,提高打孔效率,还可以减小钻孔锥度,提高微孔热影响区的硬度以及降低孔壁的表面粗糙度。澳大利亚学者 Wang 等<sup>[35]</sup>提出了激光水刀加工氮化硅陶瓷的新工艺方法,该方法采用激光对目标材料进行加热软化,然后用水刀将材料去除。此外,水刀还可以充当冷却剂,可有效减轻材料的热损伤,其原理如图 8 所示。



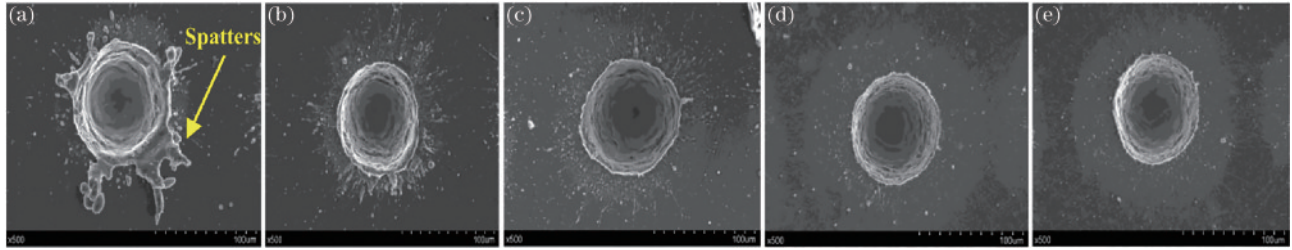


图 7 不锈钢飞溅图<sup>[33]</sup>。(a)无电磁场;(b)稳态磁场;(c)旋转磁场;(d)稳态电磁场;(e)旋转电磁场

Fig. 7 Stainless steel splash illustration<sup>[33]</sup>. (a) No electromagnetic field; (b) steady magnetic field; (c) rotating magnetic field; (d) steady electromagnetic field; (e) rotating electromagnetic field

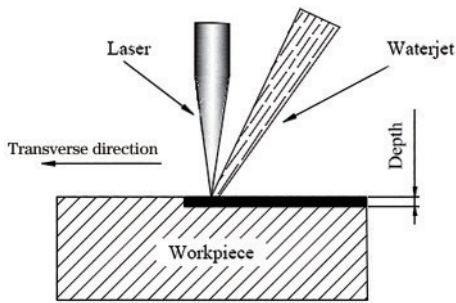


图 8 激光水刀的原理图<sup>[35]</sup>

Fig. 8 Laser waterjet schematic<sup>[35]</sup>

电磁复合场辅助激光去除材料沟槽成形技术是一种新颖的激光去除材料方法,与传统的激光打孔和激光切割等激光去除材料方法相比,该方法能够高效连续地进行盲槽的加工。与传统的铣削加工相比,该方法具有效率高和无刀具磨损等优点,在航空航天零部件加工、精密加工等方面具有广阔的应用前景。在沟槽的加工方面,由于去除材料作用机理的限制,单一的激光难以在板材上进行高效率的沟槽加工。基于复合加工技术的优势,浙江工业大学<sup>[36]</sup>提出了利用电磁场辅助激光进行沟槽加工的方法,该方法的加工原理如下:高能激光束在机械臂的控制下辐照在工件材料表面,辐照区域温度瞬间升高,当温度达到工件材料的熔点时,辐照区域变成熔融态。外加的稳态磁场和电场会产生一个定向的方向向上的洛伦兹力,当该洛伦兹力大于熔融区域材料的重力和表面张力等阻力之和时,熔融区域内的熔融物就会通过沟槽上部排出,从而达到了电磁复合场辅助激光去除材料沟槽成形的效果。在实验中,白少状<sup>[36]</sup>通过控制激光器的功率和扫描速度来调整热输入的大小,进而控制熔融区域材料的熔化速度;通过控制磁场强度和电场强度来控制洛伦兹力的大小,进而控制熔融区域内熔融物的排出速度;通过各个因素的共同控制,达到沟槽形貌稳定可控的目的。电磁场辅助激光沟槽加

工装置示意图如图 9 所示。

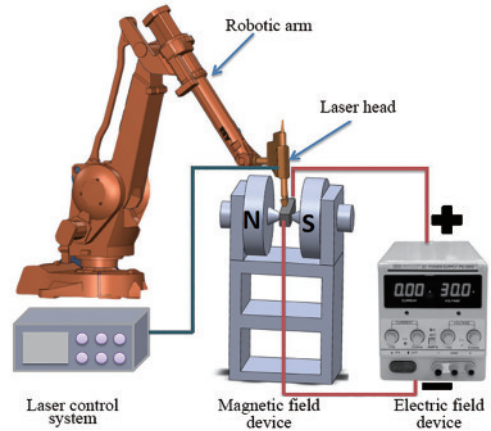


图 9 电磁场辅助激光沟槽加工装置示意图<sup>[36]</sup>

Fig. 9 Schematic of electromagnetic field assisted laser groove processing device<sup>[36]</sup>

电磁场辅助激光沟槽加工可大致分为四个过程:工件材料温度升高、工件材料熔化、洛伦兹力将熔融物排出和基体材料冷却。其原理如图 10 所示。

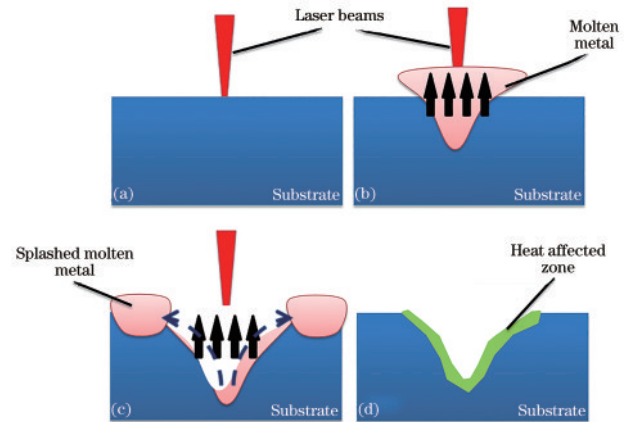


图 10 沟槽成形物理过程示意图<sup>[36]</sup>。(a)材料升温;(b)材料熔化;(c)熔融物排出;(d)基体材料冷却

Fig. 10 Schematic of physical process of groove forming<sup>[36]</sup>. (a) Material temperature rise; (b) material melting; (c) melt discharge; (d) base material cooling

## 4 结束语

经过几十年的技术积累和沉淀,激光去除材料技术得到了长远的发展,在国民经济中占有重要地位。为了使我国的激光去除材料技术发挥更大作用,应从以下几个方面进行深入研究:

1)提高激光去除材料系统的自动化和智能化,可将超短脉冲激光器与五轴或七轴数控精密激光打孔机床结合,进一步实现超高质量微孔加工的工业化,以满足工业上对超高质量微孔的需求。

2)加大对以激光去除材料为主多能量场辅助的激光复合制造技术的研究,尤其是在沟槽加工方面对电磁场辅助加工的协同作用机理以及加工过程中的建模与仿真等进行深入研究。

### 参 考 文 献

- [1] Wei C, Ma Y P, Han Y, et al. Femtosecond laser processing of ultrahard materials[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(19): 190003.  
魏超, 马玉平, 韩源, 等. 飞秒激光加工超硬材料的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(19): 190003.
- [2] Xia B, Jiang L, Wang S M, et al. Femtosecond laser drilling of micro-holes [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(2): 0201001.  
夏博, 姜澜, 王素梅, 等. 飞秒激光微孔加工[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0201001.
- [3] Wang Q Q. Numerical simulation and experimental study of laser drilling on SUS304 stainless steel[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018: 1-2.  
王琪琪. SUS304 不锈钢激光打孔数值模拟及实验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018: 1-2.
- [4] Chen Z. Laser precision process technology and it's applications[J]. *New Technology & New Process*, 2002(8): 27-29.  
陈章. 激光精密加工技术及其应用[J]. *新技术新工艺*, 2002(8): 27-29.
- [5] Zuo T C, Chen H, Zhang D Y, et al. Application of laser manufacturing technology in aviation industry [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2008, 51(21): 32-34.  
左铁钊, 陈虹, 张冬云, 等. 激光制造技术在航空领域中的应用[J]. *航空制造技术*, 2008, 51(21): 32-34.
- [6] Thawari G, Sundar J K S, Sundararajan G, et al. Influence of process parameters during pulsed Nd: YAG laser cutting of nickel-base superalloys [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 170(1/2): 229-239.
- [7] Singh P, Pramanik A, Basak A K, et al. Developments of non-conventional drilling methods—a review [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106(5/6): 2133-2166.
- [8] Salonitis K, Stournaras A, Stavropoulos P, et al. Thermal modeling of the material removal rate and surface roughness for die-sinking EDM [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 40(3/4): 316-323.
- [9] Zang Y N, Ni X W, Chen Y B. Simulation of long pulsed laser drilling on metal based on birth and death method of ANSYS [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(6): 0603005.  
臧彦楠, 倪晓武, 陈彦北. 基于 ANSYS 生死单元法的长脉冲激光金属打孔仿真[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0603005.
- [10] Marimuthu S, Antar M, Dunleavey J, et al. An experimental study on quasi-CW fibre laser drilling of nickel superalloy [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 94: 119-127.
- [11] Zhang H. Study of laser cutting process for aluminum alloy plate [D]. Hanzhong: Shaanxi University of Technology, 2016: 13-14.  
张晖. 铝合金薄板激光切割工艺研究[D]. 汉中: 陕西理工学院, 2016: 13-14.
- [12] Wang H J, Li Y L, Li P. Orthogonal experiment on laser cutting of AZ31B magnesium aluminum alloys [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 101405.  
王洪建, 李永亮, 李平. 激光切割 AZ31B 镁铝合金正交实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(10): 101405.
- [13] Xia Z Q, Xiao H M. Research status and process advantages of high precision new cutting technologies [J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2013, 35(8): 63-67.  
夏志全, 肖海明. 高精度切割新技术的研究现状[J]. *武汉工程大学学报*, 2013, 35(8): 63-67.
- [14] Jiang H H. Development and forecast of the laser processing technology application [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2001(4): 1-12.  
江海河. 激光加工技术应用的发展及展望[J]. *光电子技术与信息*, 2001(4): 1-12.
- [15] Chen T. Optimization research of quality control and parameters of laser cutting [D]. Shenyang: Shenyang

- University of Technology, 2014: 3-5.
- 陈涛. 激光切割工件质量控制及参数优化研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014: 3-5.
- [16] Marimuthu S, Dunleavy J, Liu Y, et al. Laser cutting of aluminium-alumina metal matrix composite [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 117: 251-259.
- [17] Liu H Q. Design of three-dimensional laser cutting system for KUKA robot based on PROFINET [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2019, 48(11): 43-46.
- 刘涵茜. 基于 PROFINET 的 KUKA 机器人三维激光切割系统设计 [J]. *机电工程技术*, 2019, 48(11): 43-46.
- [18] Chaki S, Bathe R N, Ghosal S, et al. Multi-objective optimisation of pulsed Nd:YAG laser cutting process using integrated ANN-NSGAI model [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2018, 29(1): 175-190.
- [19] Yu D Y, Wang X Y. Temperature field simulation of single-layer carbon fiber reinforced plastics in multi-directional laser cutting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 111409.
- 于冬洋, 王续跃. 单层碳纤维复合材料激光多向切割的温度场模拟 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 111409.
- [20] Zhang W, Li G Z, Wang C M, et al. Process optimization and design of fiber laser cutting aluminium-lithium alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0203003.
- 张威, 李国柱, 王春明, 等. 铝锂合金光纤激光切割的工艺优化与设计 [J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0203003.
- [21] Herzog D, Schmidt-Lehr M, Oberlander M, et al. Laser cutting of carbon fibre reinforced plastics of high thickness [J]. *Materials & Design*, 2016, 92: 742-749.
- [22] Shen Y P, Chen C, Gao M, et al. Technological characteristics in fiber laser cutting of medium-thickness aluminum alloy sheet [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0102008.
- 沈义平, 陈聪, 高明, 等. 光纤激光切割中厚铝合金板工艺特性研究 [J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0102008.
- [23] Janković P, Madić M, Radovanović M, et al. Optimization of surface roughness from different aspects in high-power CO<sub>2</sub> laser cutting of AA5754 aluminum alloy [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, 44(12): 10245-10256.
- [24] Dijkkamp D, Venkatesan T, Wu, X D, et al. Preparation of Y-Ba-Cu oxide superconductor thin-films using pulsed laser evaporation from high  $T_c$  bulk material [J]. *Applied Physics Letters*, 1987, 51(8): 619-621.
- [25] Zhu X N, Bao W X. Fundamentals of ultrashort pulse laser and its applications [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1200001.
- 朱晓农, 包文霞. 超短脉冲激光及其相关应用的一些基本知识 [J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1200001.
- [26] Sun K, Yang H, Xue W, et al. Anti-biofouling superhydrophobic surface fabricated by picosecond laser texturing of stainless steel [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 436: 263-267.
- [27] Qiao L L, Chu W, Wang Z, et al. Three-dimensional microfabrication by shaped femtosecond laser pulses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0126012.
- 乔玲玲, 储蔚, 王哲, 等. 基于整形飞秒激光脉冲的三维微纳制备 [J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0126012.
- [28] 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.
- [29] Pfeifenberger M J, Mangang M, Wurster S, et al. The use of femtosecond laser ablation as a novel tool for rapid micro-mechanical sample preparation [J]. *Materials & Design*, 2017, 121: 109-118.
- [30] Zhang K, Chen Z M, Geng Y Y, et al. Nanoscale-resolved patterning on metal hydrazone complex thin films using diode-based maskless laser writing in the visible light regime [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(5): 051401-051405.
- [31] Durisova J, Pudis D, Goraus M, et al. IP-Dip photoresist surfaces for photonic applications prepared by laser lithography and studied by AFM [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 461: 108-112.
- [32] Zhang W L, Lei Y J, Ming F W, et al. Lignin laser lithography: a direct-write method for fabricating 3D graphene electrodes for microsupercapacitors [J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8(27): 1801840.
- [33] Lu Y, Sun G F, Wen D P, et al. Effects of applying electric and magnetic fields on laser drilling [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 84(9/10/11/12): 2293-2300.
- [34] Wang H X, Zhu S K, Xu G X, et al. Influence of ultrasonic vibration on percussion drilling performance for millisecond pulsed Nd:YAG laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 104: 133-139.
- [35] Wang L, Huang C Z, Wang J, et al. An



- experimental investigation on laser assisted waterjet micro-milling of silicon nitride ceramics[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(5): 5636-5645.
- [36] Bai S Z. Study of laser cutting groove forming under an electro-magnetic composite field[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020: 13-18.
- 白少状. 电磁复合场辅助激光去除材料沟槽成型技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020: 13-18.