

短/超短脉冲激光诱导等离子体微加工研究进展

王兴盛*, 黄宇珂, 沈博, 徐斌, 章剑, 缪洁良

南京农业大学工学院, 江苏 南京 210095

摘要 当高强度短/超短脉冲激光聚焦于靶材表面或介质内部时,若其峰值功率密度超过某一阈值,靶材表面或介质内部会形成等离子体,等离子体与工件相互作用进行材料去除,这一过程称为激光诱导等离子体微加工(LIPMM)。这一加工技术可以高效吸收激光能量,具有损伤小、效率高、应用广等特点,已被广泛应用于微加工领域。为此介绍了 LIPMM 的微加工原理,进一步阐述了以固体为靶材和以液体为介质的 LIPMM 的研究进展,对 LIPMM 未来所面对的问题和发展方向进行了总结和展望。

关键词 激光光学; 微加工; 短/超短脉冲激光; 激光诱导等离子体微加工

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.111405

Advances of Short and Ultrashort Pulse Laser Induced Plasma Micromachining

Wang Xingsheng*, Huang Yuke, Shen Bo, Xu Bin, Zhang Jian, Miao Jieliang

College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China

Abstract When the peak power density of a short or ultrashort pulse laser exceeds the ionization threshold of the solid target or liquid medium, a plasma will be formed on the surface of the target or inside the medium, leading to the remove of the workpiece by the interaction between the plasma and the workpiece, which is called laser induced plasma micromachining(LIPMM). This processing technology is characterized by high absorption of laser energy, low damage, high efficiency and wide application, which has been widely used in the field of micromachining. The machining principle of LIPMM was firstly introduced in this paper, and the new techniques and applications of LIPMM in solid target and liquid medium were then mainly elaborated. The challenges and future trends of the development of LIPMM were finally summarized and prospected.

Key words laser optics; micromachining; short and ultrashort pulse laser; laser induced plasma micromachining

OCIS codes 140.3390; 140.3440; 350.5400

1 引言

随着社会的发展,人类对能源的消耗越来越大。由于微细尺度的零件或系统能够满足低能耗、高效等要求,学术及工业界都对这一领域展现出了极大的兴趣。目前,加工这些产品的方法主要包括精密机械加工^[1-3]、微电火花加工^[4-5]、微细电解加工^[6-7]、光刻技术^[8-9]和激光加工^[10-14]等。自从 20 世纪 60 年代以来,激光加工技术由于尺寸控制能力强、非接触、绿色无污染等特点,成为了加工微结构的有效手

段。但是在加工透明材料或高反射材料时,激光能量无法被有效地吸收,导致加工效率较低。为了解决这一问题,常采用改变加工材料表面性质或改变工艺的方法。其中,激光诱导等离子体微加工(LIPMM)可以提高激光吸收效率,是一种能够实现多材料加工的极具潜力的新工艺。在激光诱导等离子体微加工过程中,短/超短脉冲激光聚焦于靶材表面或介质内部,当激光的峰值功率密度超过某一阈值时,靶材表面/介质内部迅速升温发生气化,气化后的粒子继续吸收能量产生电离,形成高温、高压、

收稿日期: 2020-02-24; 修回日期: 2020-03-21; 录用日期: 2020-03-25

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51705258)、中央高校基本科研业务费(KJQN201843)

* E-mail: xingshengwang@njau.edu.cn

高密度的等离子体；等离子体产生后继续吸收激光能量，导致等离子体自由电子密度增加、温度升高，同时会进一步形成冲击波，热能扩散到目标材料中，通过熔化和气化及冲击波辅助作用实现材料的快速去除。LIPMM 技术不仅拥有激光加工的优势，还能有效地提高加工过程中激光能量的吸收效率，改善热损伤，实现多材料的加工。基于这些优势，激光诱导等离子体微加工开始成为微加工领域的研究热点。

经过十几年的研究，激光诱导等离子体微加工技术的加工工艺已经得到一定的发展，但其加工过程比较复杂，完整的去除机理仍然没有掌握，高精高效产业化应用的认知和所需考虑的因素还在不断地探索中。因此，本文对激光诱导等离子体微加工技术进行了详细的调研，在总结国内外研究现状的基础上，分析了激光诱导等离子体微加工的发展前景及其面临的问题，希望能够推动激光诱导等离子体微加工技术的工业化应用。

2 激光诱导等离子体微加工原理

等离子体是一种电离了的“气体”，通常被称为物质的第四态，主要由自由电子、离子以及中性粒子组成。同时，等离子体也可按温度分为高温等离子体与低温等离子体。激光诱导出的等离子体一般都为低温等离子体。

在激光诱导等离子体微加工过程中，当激光峰值功率密度超过某一阈值时，激光辐照靶材表面或介质内部会升温发生气化，气化后的粒子在激光的作用下会产生电离，形成等离子体。其中，产生电离的主要机制为多光子电离和雪崩电离。对于纯粹的多光子电离，在高强度的激光照射下，激光场中的每个电子吸收多个光子而独立电离，在这期间不需要粒子间的相互作用，是一种非线性光学过程。与多光子电离不同，雪崩电离过程相对较复杂。由多光子电离产生或本身杂质中存在的自由电子，在受到激光强电场的加速下，与靶材或介质中的原子或分子发生碰撞，通过逆韧致吸收，使得自由电子呈指数级增加的过程被称为雪崩电离。对于固体靶材，由于材料及激光脉宽、波长等参数的不同，激光诱导等离子体微加工过程中多光子电离与雪崩电离占据的地位大不相同。大多数情况下，雪崩电离都占据着主导作用，而只有当激光波长较短或光子能量较大时，多光子电离作用才较为显著^[15]。对于液体介质，当纳秒级脉冲激光照射紧密介质时，雪崩电离会

迅速起到主导作用；对于皮秒级脉冲激光，随着脉冲宽度的不断下降，多光子电离会变得越来越重要；而对于 100 fs 的脉冲激光，多光子电离在前期一直处于主导地位，直到接近电离阈值时，雪崩电离才变得重要^[16]。除此之外，对于脉宽小于 40 fs 的可见光来说，多光子电离则会在整个电离过程中起主导作用^[17]。

等离子体产生之后仍会继续吸收激光能量，使得其自由电子密度继续增加，进而使等离子体温度升高。当等离子体与待加工材料相互接触时，等离子体的热能扩散到材料中，使材料迅速升温，通过熔化和气化的方式去除材料，形成凹坑。同时，等离子体产生后继续升温的过程中，粒子自由高速运动会进一步形成冲击波。冲击波产生的机械能会辅助热能去除材料，加速去除材料的排出。通过数控系统移动工件或扫描移动激光光斑，按照一定轨迹叠加单个等离子体加工后形成的凹坑，可以实现复杂微结构的加工。

3 激光诱导固体等离子体微加工

3.1 透明材料后表面加工

日本理化研究所的 Zhang 等^[18]首次提出激光诱导固体等离子体微加工方法(图 1)，加工时激光透过待加工的透明材料，聚焦于透明材料后方的金属靶材诱导产生等离子体，通过形成的等离子体接触透明材料后表面，实现材料去除。实验采用波长为 248 nm 的 KrF 准分子纳秒激光，聚焦于透明材料后方的 304 不锈钢靶材上诱导产生等离子体。同时，加工处于真空环境中，材料与靶材间距保持在 200 μm ，结合相位掩模技术在熔融石英后表面制成了周期为 1.06 μm 的微光栅，加工示意图如图 1 所示。他们简单分析了激光诱导固体等离子体微加工的机理，结果表明，加工过程包含等离子体对材料表面的影响、等离子体加热以及金属薄膜沉积的共同作用，但因为加工过程比较复杂，还需要进一步的研究。这一研究初步证明了激光诱导固体等离子体微加工透明材料的可行性，然而真空环境的严苛要求不利于其实际应用。

在此基础上，加拿大集成制造研究所的 Li 等^[19]成功地在大气环境中实现了这一加工方法。他们采用波长为 532 nm 的 Nd:YVO₄ 纳秒激光器透过玻璃在空气中照射金属靶形成的等离子体对玻璃后表面进行微加工，靶材与材料间隔在 10 ~ 40 μm 之间。研究发现不同的靶材对加工速率和加

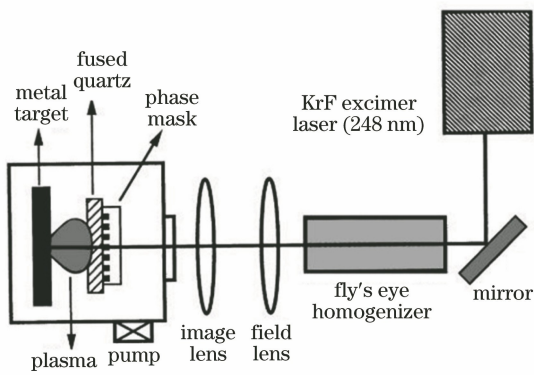


图1 真空中激光诱导固体等离子体微加工
熔融石英后表面示意图^[18]

Fig. 1 Schematic diagram of the rear surface of fused quartz processed by LIPMM in vacuum^[18]

工质量都有影响。此外,他们还对激光直写加工(DLA)和激光诱导固体等离子体微加工玻璃进行了对比,发现利用激光诱导固体等离子体微加工出的微结构表面更加光洁。该技术在加工环境上的突破使加工更为方便,为工业应用提供了机会。同时,工艺参数的研究也促进了激光诱导固体等离子体微加工技术进一步的发展。Rahman等^[20]利用激光诱导固体等离子体微加工技术在钙钠玻璃上加工微坑,激光器采用波长为1064 nm,脉宽为6 ns的Nd:YAG激光,铝为靶材,入射激光能量密度在 $27\sim 870\text{ J/cm}^2$ 的范围内,靶材至材料的距离在 $0\sim 600\text{ }\mu\text{m}$ 的范围内。实验发现,微坑的直径和深度随激光能量密度的增加而增加,并且在高能量密度下达到饱和,同时微坑的直径和深度随靶材到材料距离的增加而线性减小。等离子体参数(电子密度、电子温度)随激光能量密度的变化与微坑尺寸的变化基本一致。这些实验结果有助于更好地理解激光诱导固体等离子体微加工过程,推进该技术的进一步应用。

国内对于激光诱导固体等离子体微加工的研究起步相对较晚,但发展迅速并且取得了不错的成果。华侨大学的Lu等^[21]利用激光诱导固体等离子体微加工在单晶蓝宝石后表面加工微结构。研究采用波长为1064 nm的光纤纳秒激光器,靶材为铜,靶材与材料间距可通过调节支架在 $50\sim 1700\text{ }\mu\text{m}$ 的范围内调节。实验研究了激光参数如激光能量密度、重复频率和靶材与材料距离对激光诱导固体等离子体微加工的影响。邵勇等^[22]利用水辅助激光诱导固体等离子体微加工Pyrex7740玻璃后表面(图2)。实验采用355 nm的紫外激光器,通过真空磁

控溅射技术在玻璃后表面镀制了厚度约500 nm的铜膜。加工时往水槽中注入去离子水,保证水浸没铜层,到达玻璃层一半的位置,其中激光束聚焦于玻璃与铜膜的接触平面。通过控制变量法研究了激光工艺参数对加工深度和加工质量的影响,为激光诱导固体等离子体微加工工艺的优化提供了参考。图2为分别在20 mm/s、200 mm/s、1000 mm/s的激光扫描速度下利用激光诱导固体等离子体微加工Pyrex7740玻璃边缘的对比图,结果表明,在合适的扫描速度下才能产生较为稳定的等离子体,此时加工效果较好。这些研究在一定程度上考虑了不同参数对激光诱导固体等离子体微加工透明材料的影响,为后续的实际应用提供了参考。

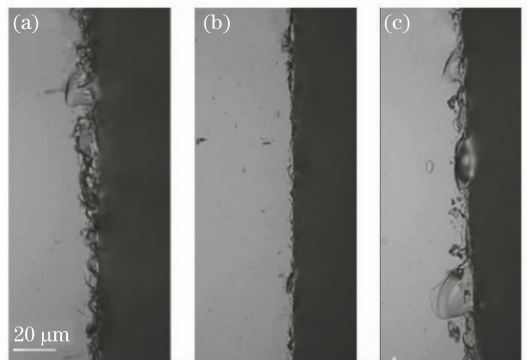


图2 不同激光扫描速度下利用激光诱导固体等离子体微加工Pyrex7740玻璃边缘对比图。(a) $v = 20\text{ mm/s}$; (b) $v = 200\text{ mm/s}$; (c) $v = 1000\text{ mm/s}$ ^[22]

Fig. 2 Comparison diagram of Pyrex7740 glass edges processed by LIPMM at different laser processing speeds. (a) $v = 20\text{ mm/s}$; (b) $v = 200\text{ mm/s}$; (c) $v = 1000\text{ mm/s}$ ^[22]

中山大学的Pan等^[23]将激光诱导固体等离子体微加工与化学腐蚀相结合,在玻璃后表面制备了具有微结构的微流道(图3)。实验采用的激光器为波长1064 nm的纳秒脉冲光纤激光器,靶材为铝碳化硅和铝合金,腐蚀溶液为氢氟酸和硝酸1:1混合的溶液,图3为加工过程示意图。实验探究了化学腐蚀参数和激光工艺参数对微流道几何形貌的影响,成功地在玻璃上制备了微流控系统。同一年,同实验室的Xu等^[24]将激光诱导固体等离子体微加工与电镀相结合,在玻璃表面制备了电流控装置(图4)。实验采用石墨作为靶材,通过微调激光诱导固体等离子体微加工参数,将石墨薄膜或图案选择性溅射涂覆在玻璃表面,原理示意图如图4所示。通过在石墨层上电镀镍层进行加工,成功制备了微加热器芯片和基于液滴的电射流芯片,证明了激光诱

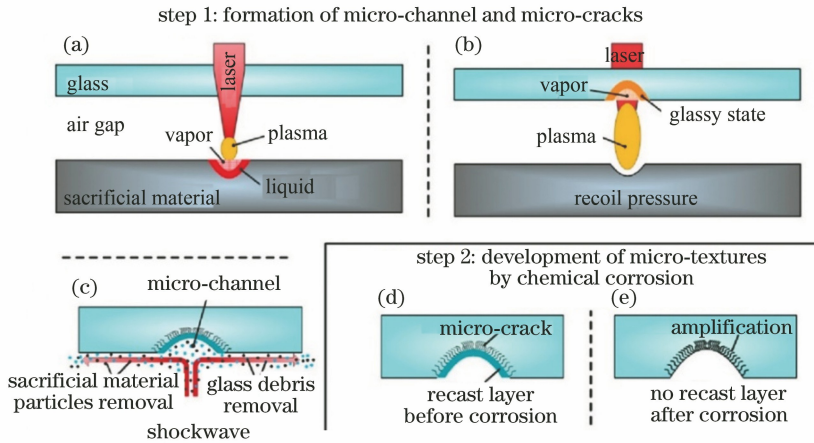


图 3 激光诱导固体等离子体微加工与化学腐蚀相结合在玻璃后表面加工微通道的加工工艺示意图。(a)激光烧蚀靶材表面;(b)等离子体膨胀;(c)材料的去除;(d)化学腐蚀前被重铸层覆盖的微裂纹;(e)化学腐蚀去除重铸层,使微裂纹扩展为微结构^[23]

Fig. 3 Schematic diagram of processing microchannels on the rear surface of glass by LIPMM combined with chemical corrosion. (a) Laser ablation on the sacrificial material surface; (b) plasma expansion; (c) removal of material; (d) micro-cracks covered by recast layer before chemical corrosion; (e) removal of recast layer and amplification of micro-cracks into micro-textures by chemical corrosion^[23]

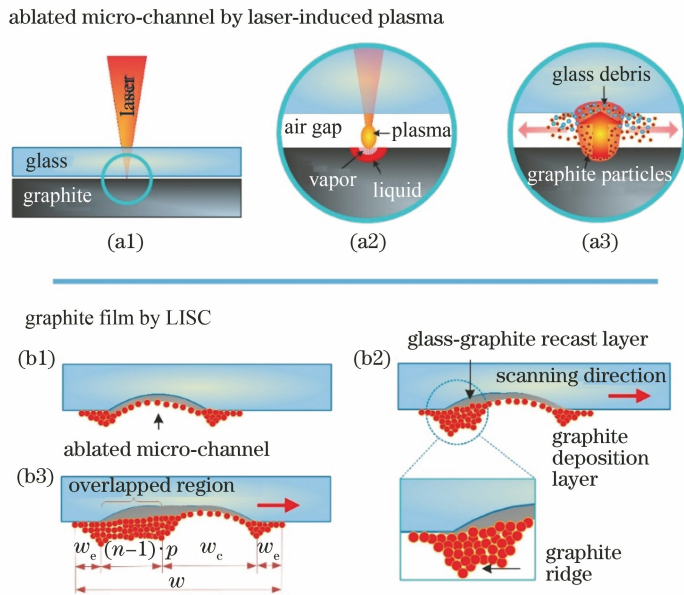


图 4 利用激光诱导固体等离子体微加工在玻璃后表面溅射石墨薄膜的示意图。(a)利用激光诱导等离子体制备的烧蚀微通道;(b)激光溅射形成的石墨薄膜(LISC)^[24]

Fig. 4 Schematic illustration of sputter coating a graphite film on glass by LIPMM. (a) An ablated micro-channel fabricated by laser-induced plasma; (b) graphite film formed by laser-induced sputter coating (LISC)^[24]

导固体等离子体微加工在电流控装置加工中的灵活性和可行性。后续考虑将靶材换为多孔金属块的烧结纳米颗粒,以便于导电金属薄膜直接溅射在玻璃上而无需连续电镀。这些研究将激光诱导等离子体微加工技术与其他辅助技术相结合,成功地将其应用于微流控系统的加工,证明了该技术的应用价值与广泛前景。

采用激光诱导固体等离子体对透明材料后表面

进行微加工时,激光需要穿透透明材料辐射后方的金属靶材产生等离子体,能够有效实现透明材料的微加工,并可以在一定条件下实现镀膜效果。但这种方法只能用于透明材料的后表面加工,对工件材料和工件表面形状具有很大的局限性。

3.2 多材料前表面加工

French等^[25]对激光诱导固体等离子体微加工

透明材料后表面工艺进行了一定的改进,引入了透明薄膜层和靶材薄层。如图 5 所示,透明薄膜层紧贴靶材层(金属或有机材料)置于需要加工材料上方几十微米处,激光通过透明薄膜层辐射靶材薄层产生等离子体。通过激光光束和等离子体的相互作用可在玻璃、聚合物或非透明材料前表面加工出微结构。这种加工方法可实现不同材料的前表面微加工,但加工装置较为复杂,适合加工平面工件。

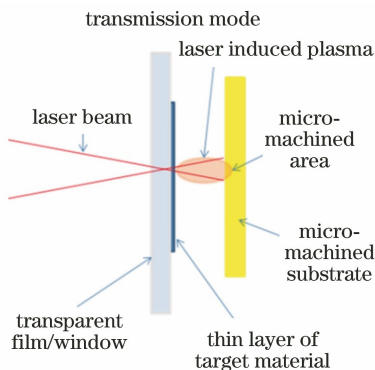


图 5 改进后的激光诱导固体等离子体微加工前表面示意图^[25]

Fig. 5 Schematic diagram of front surface machined by improved LIPMM^[25]

贵州大学光电子技术及应用重点实验室的秦水介等^[26]提出利用激光诱导固体等离子体微加工在熔融石英后表面产生损伤,随后将损伤面朝上,将激光焦点聚焦于损伤处来诱导出等离子体进行加工材料前表面的加工方法。由于损伤后的熔融石英对激光的吸收率较高,所以这一工艺有利于等离子体的产生。研究采用波长为 1064 nm 的 Nd:YAG 纳秒激光进行激光诱导固体等离子体微加工,在石英玻璃上加工出了高质量的复杂三维微通道。同时,研究中还讨论了激光诱导固体等离子体微加工进行钻孔的可行性,加工所得孔的直径在 25~200 μm 之间,内壁的平均粗糙度小于 0.2 μm ,孔的深度超过 4 mm。为了进一步改善加工效果并提高孔的加工深度,同实验室的冯彩玲等^[27]结合波长为 1064 nm 的基频光和波长为 532 nm 的倍频光对石英玻璃进行激光诱导固体等离子体微加工。采用这种方法加工出的微通道侧壁较光滑,且加工深度达到了 8 mm。为了加工出质量更高的微通道,必须对激光诱导固体等离子体微加工过程有更深入的了解。因此,赵麒等^[15]在激光诱导固体等离子体微加工过程中添加了等离子体检测系统,可以在加工过程中自动调整焦点位置,保证加工的稳定性和连续

性。同时,研究中还对微通道的侧壁进行了检测,发现等离子体的冲击会在微通道表面形成起伏的微坑洞,这些研究成果为后续的理论及实验研究提供了一定的基础。同时,这项技术使得各种三维微流控系统的快速制造成为可能,这将在生物医学工程中产生新的应用。

除了加工微结构,激光诱导固体等离子体微加工技术还存在着其他应用。美国伊利诺伊理工大学的 Zhou 等^[28]采用纳秒激光诱导固体等离子体方法进行了钛合金沟槽壁面的去毛刺加工。该研究首先采用激光辐射钛合金沟槽底面诱导产生等离子体,通过产生的等离子体可有效去除壁面的毛刺。但这种方法会对沟槽底面产生一定影响,随后通过在沟槽底面放置牺牲靶材用于产生等离子体,在对沟槽壁面去毛刺的同时有效抑制了等离子体对沟槽底面的影响。不过诱导等离子体产生的牺牲靶材较难放置,特别是在加工盲孔的微槽结构时不容易实现,仍需要进一步优化这一加工技术。

3.3 激光诱导固体等离子体微加工机理研究

自从激光击穿固体现象被发现以来,研究人员就对这一现象进行了大量的理论分析,为激光诱导固体等离子体微加工的机理研究奠定了基础。贵州大学的彭长屏^[29]对等离子体演化过程进行了分析研究,发现等离子体的形状与等离子体的电子密度有很大的关系,且电子密度的大小在激光入射的方向上随距离变化,较高的激光功率密度能有效地提高激光诱导固体等离子体微加工的速度。李世雄等^[30]对激光诱导固体等离子体微加工石英微通道进行了理论分析,得到了等离子体的形成模型,并利用流体力学理论得到了等离子体的温度、速度、压强等参数。普渡大学的 Wu 等^[31]也对等离子体的有关特性进行了研究。研究采用一个结合一维流体力学方程和一个半解析方程的自封闭二阶模型来模拟等离子体在真空环境下的形成与膨胀过程。模拟得到的等离子体前沿位置、等离子体温度与电子数密度和实验测量结果有较好的一致性。此外,对于外在环境为液体的等离子体特性,Wu 等^[32]也对其进行了研究,在建模时考虑了靶材的激光烧蚀、水的蒸发、等离子体的电离和膨胀、等离子体的能量损失、等离子体通过逆韧致辐射吸收激光的效应以及激光的光致电离、反射等大部分物理过程,理论模拟结果与实验结果一致性较好。在此基础上,还对空气、水和真空中的等离子体的早期演化进行了理论研究^[33]。研究发现不同环境下等离子体的温度和

密度大不相同。水中等离子体的特性是温度相对较低、密度和电子相关强度很高。真空中等离子体的特性则正好相反。不仅如此,由于之前仅集中于纳秒激光下的研究,所以后续还对飞秒激光下等离子体的特性进行了理论分析^[34]。模型结合了双温方程及流体动力学方程,发现相同条件下飞秒脉冲诱导出的等离子体产生的反冲压力比纳秒脉冲诱导出的大。

为了推进激光诱导固体等离子体微加工的发展,研究人员对于等离子体与材料相互作用的机理进行了研究。李世雄等^[35]对等离子体与物质相互作用的移动损伤模型进行了修正,并对微通道特征进行了分析,模型结果与实验结果基本一致。不仅如此,研究还发现激光诱导固体等离子体微加工过程中的等离子体屏蔽效应能够避免热裂纹的产生^[36]。赵麒^[15]将激光击穿与等离子体微加工相结合,采用流体力学的方法对等离子体运动过程进行了数值模拟;利用有限元法对激光诱导固体等离子体微加工过程中的温度、应力进行了计算,对不同加工参数下熔石英的表面形貌进行了仿真研究;同时利用激光支持爆轰波模型计算了等离子体对熔石英表面的冲击,为今后的实际加工提供了参考。Wu等^[37]利用有限差分法同时求解双温热传导方程、激光传播方程和自由电子速率方程,对高通量下的超短脉冲激光烧蚀半导体和介质进行了理论分析。这些研究结果为后续的研究和实际应用提供了有力的理论支撑。

4 激光诱导液体等离子体微加工

4.1 传统激光诱导液体等离子体微加工

上述研究发现,激光诱导固体等离子体对后面进行微加工时基材必须为透明材料,对前表面进行微加工时装置或工艺一般会复杂化,一定程度上限制了激光诱导等离子体微加工的应用。为了解决这个问题,美国西北大学的 Pallav 等^[38]提出激光诱导液体等离子体微加工的方案,实验所用激光器为 532 nm 的皮秒脉冲激光器。研究发现,在激光诱导液体等离子体微加工过程中,等离子体在工件上方的液体介质中产生,然后爆炸性地扩张,产生热能和冲击波,从而去除材料。该研究初步证明了激光诱导液体等离子体微加工的可行性。

随后,Pallav 等^[39-40]对比研究了激光诱导液体等离子体微加工与激光直写加工、微电火花加工在不锈钢上加工微通道的能力。实验证明激光诱导液

体等离子体微加工能够制备出性能更好(侧壁垂直、轮廓均匀、深径比大、热影响区小以及材料去除率高)的微通道。Saxena 等^[41]在金属、聚合物以及透光、反光和具有粗糙表面的材料上成功加工微通道,证明了激光诱导液体等离子体微加工具有多材料应用性能。与激光直写加工相比,激光诱导液体等离子体微加工在去除材料时的机制(热能和机械能的相同作用),以及局部高温等离子体的存在导致了空间和时间上的高热梯度,这就使得一些难加工材料能够被有效地加工。不过,该研究仅仅表征了激光诱导液体等离子体微加工方法进行多材料加工的能力,而对于工艺参数没有进一步的分析。

在此基础上,许多研究人员进一步研究了激光诱导液体等离子体微加工工艺参数对不同材料加工结果的影响。Xing 等^[42]使用激光直写加工和激光诱导液体等离子体微加工在聚晶金刚石表面加工了微通道,研究了激光工艺参数对微通道几何形状和材料去除率的影响。实验结果证明,与激光直写加工相比,在高频率及高激光功率的条件下,激光诱导液体等离子体微加工的加工效率更高。Bhandari 等^[43]利用脉宽为 8 ps、波长为 532 nm 的 Nd:YVO₄ 激光器,在 Ti-6Al-4V 表面加工了微通道。实验中应用单次和多次扫描来对比激光直写加工和激光诱导液体等离子体微加工的区别,结果表明激光诱导液体等离子体微加工可以显著地提高微通道的深径比。当然随着扫描次数的增多,激光诱导液体等离子体微加工的加工深度也会趋于饱和。Wang 等^[44]使用激光直写加工和激光诱导液体等离子体微加工在陶瓷表面加工了微通道,图 6 为这两种加工方法在脉冲能量为 1.2 μJ 和 7.5 μJ 下加工出的微通道的扫描电子显微镜(SEM)图像。实验结果证明,与激光直写加工相比,利用激光诱导液体等离子体微加工能获得表面形貌较好、深径比较高的微通道。同时,实验还研究了激光脉冲能量、扫描速度和频率等激光参数对加工特性的影响。这些研究有助于更好的理解激光诱导液体等离子体微加工过程,促进其进一步的应用。图 7 为激光诱导液体等离子体微加工的原理图^[41]。

4.2 改进的激光诱导液体等离子体微加工

为了提高激光诱导液体等离子体微加工的效率,学者们还开发了许多不同的工艺。Saxena 等^[45]将激光束聚焦在含盐的蒸馏水中,以此来诱导出等离子体。实验采用 532 nm 波长的皮秒脉冲激光器,将商用型纯试剂级的 NaCl 通过搅拌溶解于蒸

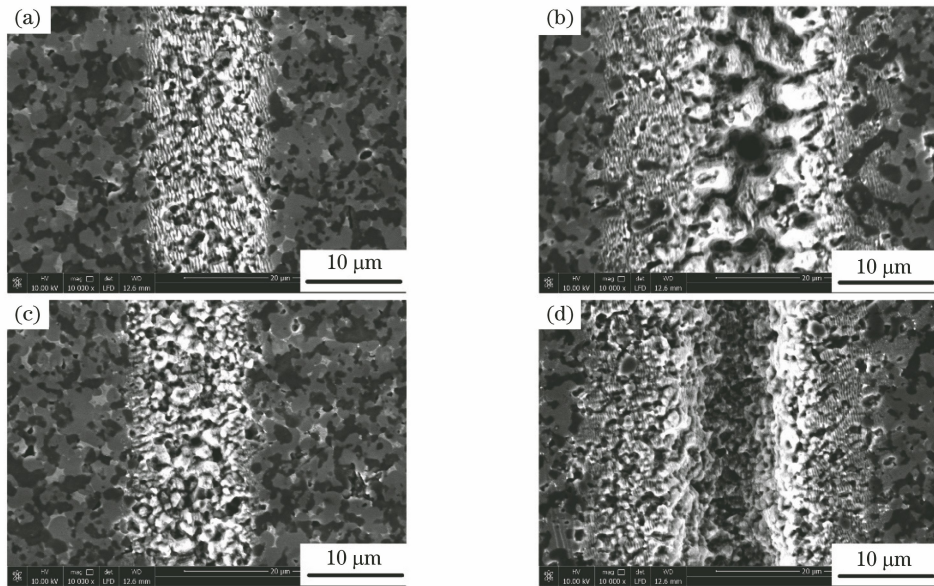


图6 使用两种加工方法在两种脉冲能量下在氧化铝陶瓷上加工的微通道的SEM图像。(a)激光直写加工,1.2 μJ ;(b)激光直写加工,7.5 μJ ;(c)激光诱导液体等离子体微加工,1.2 μJ ;(d)激光诱导液体等离子体微加工,7.5 μJ ^[44]

Fig. 6 SEM images of micro-channels created on Al_2O_3 ceramic using two processes with two pulse energies.

(a) DLA, 1.2 μJ ; (b) DLA, 7.5 μJ ; (c) LIPMM, 1.2 μJ ; (d) LIPMM, 7.5 μJ ^[44]

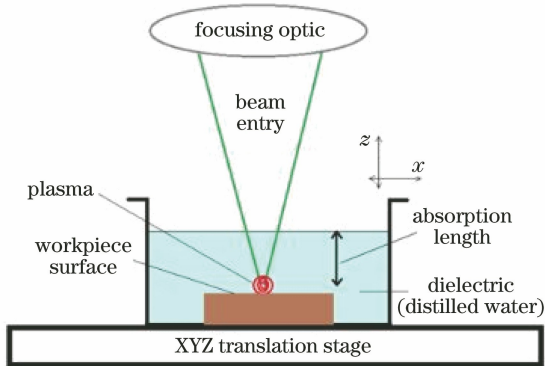


图7 激光诱导液体等离子体微加工原理图^[41]

Fig. 7 Schematics of the LIPMM process^[41]

馏水中,浓度在1~35 g/mL之间。在不同盐度水平下,通过实验确定了等离子体产生的阈值强度,并对等离子体的通量进行了定性分析和比较。此外,使用不同盐浓度的水溶液在铝制工件上加工微通道,并测量通道的深度,宽度和材料去除率。结果表明,与蒸馏水相比,在含盐的蒸馏水中进行激光诱导液体等离子体微加工能获得更高的材料去除率。这主要是因为盐溶液中游离离子的存在使得等离子体能量密度增加,除此之外,靶材中光学衰减系数的增加也有利于去除材料。在最佳的工艺参数下,材料去除率能提高97%。

此外,研究人员发现磁场对激光诱导液体等离子体微加工也有很大的改进作用,于是他们尝试将

磁场应用于激光诱导液体等离子体微加工中。Saxena等^[46]在激光诱导液体等离子体微加工过程中使用表面磁场为5400 Gs(1 Gs = 10^{-4} T)的稀土永磁体施加单向磁场,研究发现,单向磁场的存在有效地增加了等离子体的能量密度,同时导致了加工效率的提高。Wolff等^[47]研究了不同磁场配置对激光诱导液体等离子体微加工的作用,观察了磁场对等离子体产生的影响,实验结果证明较大的磁场强度能够更有效地挤压或拉伸等离子体,导致加工的微通道深径比较大。2019年,Tang等^[48]利用互斥磁场辅助激光诱导液体等离子体微加工对单晶硅进行加工,实验加工示意图如图8所示。实验结果表明,与激光直写加工相比,激光诱导液体等离子体微加工能够改善单晶硅的加工质量,减小加工区内的重铸层和热影响区。同时,互斥磁场能够有效地调节激光诱导液体等离子体微加工过程,减小微通道宽度,获得较高质量的光滑表面。此外,理论分析还表明,磁场中的洛伦兹力会限制等离子体的流动。而且,磁场强度越大,等离子体中电子与离子的碰撞也随之增加,这就使得离子的能量增强,有利于激光诱导液体等离子体微加工过程中材料的去除。同时,洛伦兹力能够减缓等离子体的膨胀,使得激光诱导液体等离子体微加工过程更加稳定。互斥磁场辅助激光诱导液体等离子体微加工产生的微通道如图9所示,微通道宽度为11.23 μm ,表面较为光滑。

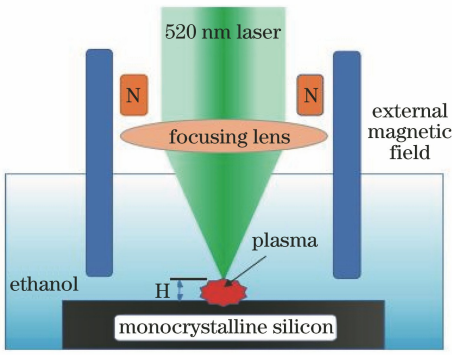


图 8 互斥磁场辅助激光诱导液体等离子体微加工示意图^[48]

Fig. 8 Schematic of LIPMM assisted by repulsive magnetic field^[48]

由此可见,由互斥磁场辅助的激光诱导等离子体微加工具有优良的微加工潜力。通过适当的磁场配置,有望获得高质量的微通道或微孔等结构,这能够被广泛应用到各种微系统的制造。

研究人员还通过光学系统将点状等离子体修改为线性等离子体,从而能够以更快的速度加工微通道。Malhotra 等^[49]将聚焦透镜与圆柱形凸透镜同轴安装,此时光束以直线的形式聚焦。光学装置及等离子体形状如图 10 所示。实验结果表明,与传统的激光诱导液体等离子体微加工相比,线性等离子体加工在保持多材料性能的同时大大缩短了加工时间。在以相同的参数加工 6 mm×6 mm 的大面积微纹理时,使用线性等离子体加工比传统的激光诱导液体等离子体微加工缩短了 84% 的加工时间。在 Saxena 等^[50]的研究中,利用线性等离子体加工提高了大约 20 倍的加工效率。激光参数对微通道的深度和通道有重要影响,随着脉冲频率的变化,微通道横截面剖面由 V 型变为 U 型,随着激光功率的增大,微通道变长,热影响区变明显。实验研究证明,由于生产率的提高,该工艺能够用于大面积微纹理的制备。

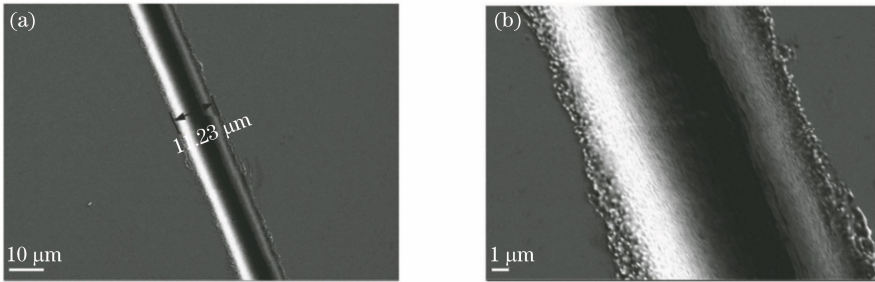


图 9 微通道示意图。(a)互斥磁场辅助激光诱导液体等离子体微加工的沟槽;(b)放大后的形貌^[48]

Fig. 9 Schematic diagram of the microchannel. (a) A groove produced by repulsive magnetic field assisted LIPMM; (b) magnified image^[48]

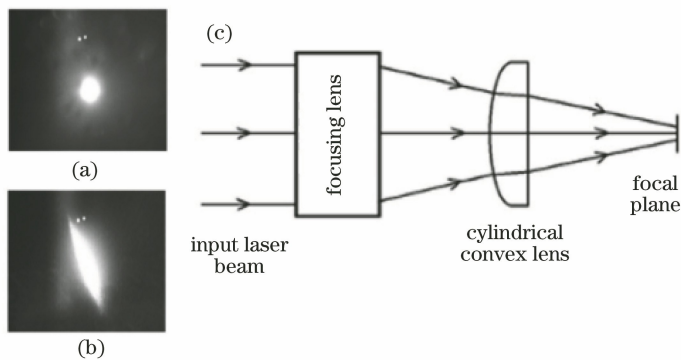


图 10 光学装置及等离子体形状。(a)点状等离子体的 CCD 图;(b)用于产生线性等离子体的光学装置;

(c)线性等离子体的 CCD 图^[49]

Fig. 10 Optical device and plasma shape. (a) CCD image of spot plasma; (b) optical arrangement for creating line plasma; (c) CCD image of line plasma^[49]

在上述研究中,激光诱导液体等离子体微加工均采用静止水层,即将工件放置在静水中,激光聚焦于工件上方的水层中产生等离子体,虽然这样的装置使用起来较为方便,但静止水层也存在一些缺

点,限制了激光诱导液体等离子体微加工效果。比如说,机械平台的快速移动会引起水层的晃动,导致入射激光强度的变化,使形成的等离子体不稳定。因此,需要较低的扫描速度来保证静水层的稳定性。

此外,在激光诱导液体等离子体微加工过程中会产生大量的烧蚀碎片和气泡,影响激光在水中的传播。因此,在这种情况下激光诱导液体等离子体微加工需要较低的重复频率,来保证有足够的时间来去除等离子体产生间隔中生成的烧蚀碎片和气泡,使加工区域较为光滑。为了解决这些问题,Wang等^[51]在激光诱导液体等离子体微加工过程中引入了流动水层,示意图如图11所示。实验采用Nd:YVO₄皮秒激光器,其脉宽为10 ps,波长为532 nm,工件材料选用AISI304不锈钢。研究采用单因素实验,比较了采用静止水(S-LIPMM)和流动水(F-LIPMM)进行激光诱导液体等离子体微加工加工的加工特性,研究了激光工艺参数对微通道几何特性、加工稳定性、热影响和材料去除率的影响。实验结果表明,在相同的激光参数下,F-LIPMM可以加工出热影

响更小、表面更光滑、深径比更高、材料去除率更高的微通道。同时,在F-LIPMM过程中,可以应用高扫描速度和频率而不影响加工质量,这能够提高加工效率。之后,Wang等^[52]采用响应曲面法,研究了水速、激光脉冲能量、频率和扫描速度等工艺参数对微通道宽度、深度、材料去除率和热影响区响应的影响。图12为在水速7.5 m/s、脉冲能量15 μ J、频率6 kHz、扫描速度3 mm/s下利用F-LIPMM在不锈钢表面加工的微通道图像。此时微通道宽度约19.8 μ m,深度约10 μ m。同时还利用Design-expert软件建立了加工宽度、深度、材料去除率和热影响的回归模型,模型的预测结果与实验结果相符,模型较为准确。在这基础上,利用优化后的工艺参数加工了网格状沟槽,沟槽底部和侧壁都较为光滑,热影响区较小。

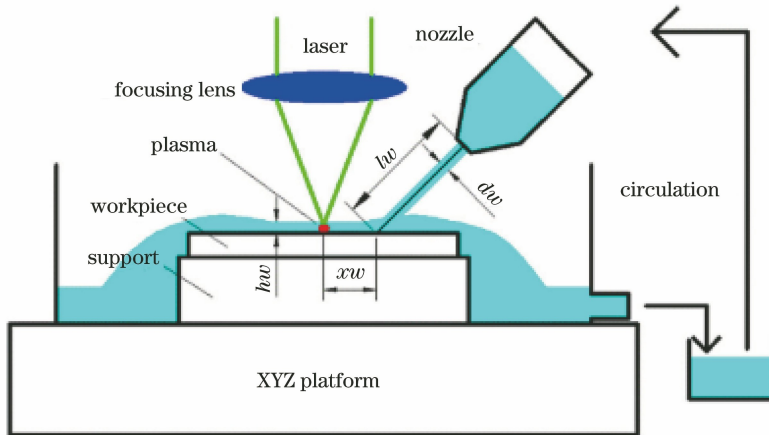


图11 引入流动水层的激光诱导液体等离子体微加工示意图^[51]

Fig. 11 Schematic of LIPMM using flowing water layer^[51]

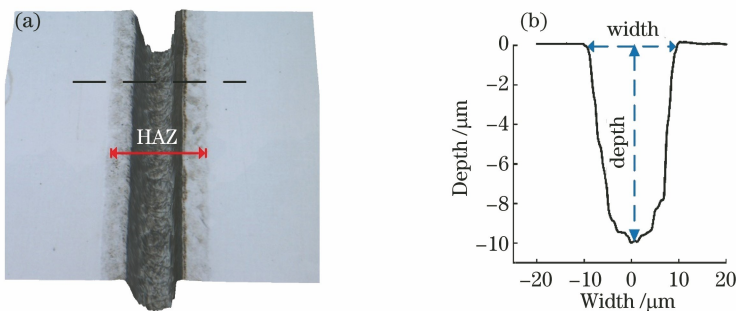


图12 引入流动水层的激光诱导液体等离子体微加工的微通道图像。(a)表面形貌;(b)横截面剖面^[52]

Fig. 12 Images of micro-channels created by F-LIPMM. (a) Surface morphology; (b) cross-sectional profile^[52]

4.3 激光诱导液体等离子体微加工机理研究

过去已有很多学者对激光在水中的光学击穿作了研究。1995年,Kennedy等^[53]将水视为无定型半导体,结合固体的雪崩击穿模型和晶体的多光子电离模型,提出了水下光学击穿的一阶模型,在纳秒-

飞秒范围内实验和理论结果都结合得较好。1999年,Noack等^[17]研究了自由电子的速率问题,预测了自由电子的演化过程,计算了等离子体电子密度的变化、等离子体的吸收系数以及能量密度等问题,理论研究与实验结果结合得较好。同时,还对实验

研究中发现的脉冲持续时间与等离子体传输存在的复杂的依赖性进行了解释。随后, Ehteshami 等^[54]通过修改速率方程, 将雪崩电离、多光子电离和电子损耗相结合, 建立了等离子体的时空模型。该模型的结果可以作为其他模型的输入, 如计算等离子体形成后的机械效应的流体动力学模型。

尽管这些研究建立了在蒸馏水或生物组织中诱导等离子体的时空模型, 但是迄今为止, 将等离子体演化与材料的微加工相结合的研究非常有限。为了进一步开发并改进激光诱导液体等离子体微加工工艺, Saxena 等^[55]建立了激光诱导液体等离子体微加工时等离子体在时空分布下的三维轴对称模型, 预测了在聚焦区域内等离子体的能量密度、吸收系数和激光强度的分布。该模型的结果能够作为激光诱导液体等离子体微加工中的热力学模型的输入来预测材料的去除。Jiao 等^[56]提出了一种考虑自由电子速率方程和超快辐射传输的二维轴对称数值模型来研究等离子体对材料的去除作用, 讨论了电离能和关键自由电子密度对材料烧蚀阈值的影响。此模型能够预测等离子体形成后的动态形状, 也能够准确地描述吸收和散射效应。此外, Jiao 等^[57]假设等离子体电子密度不小于关键电子密度时材料去除, 通过对模型与实验测定的烧蚀直径进行比较, 验证了理论模型。Wang 等^[58]建立了一个考虑雪崩电离、多光子电离、复合和扩散损耗效应的轴对称模型, 用以模拟蒸馏水中不同脉冲能量下等离子体的时空分布。在理论模拟和实验研究的基础上, 研究了脉冲能量对激光诱导液体等离子体微加工的聚焦过程和加工几何形状的影响。研究发现脉冲能量对激光聚焦过程中聚焦距离的变化影响很小。脉冲能量对加工深度的影响较大, 但对加工宽度的影响较小。但目前还没有完整的激光诱导液体等离子体形成、等离子体演变及等离子体去除加工材料的微加工机理模型, 需要进一步地研究, 为激光诱导液体等离子体微加工的发展提供有力的帮助。

5 结束语

以固体为靶材的激光诱导等离子体微加工已被广泛地用于透明材料的微加工, 研究人员通过研究不同波长、靶材与基材间距以及激光参数对激光诱导固体等离子体微加工的影响来观察其加工效果。与此同时, 一些理论分析也支撑着激光诱导固体等离子体微加工的进一步发展。如何将理论与实际系统地结合起来是激光诱导固体等离子体微加工前进

过程中亟待解决的难点, 除此之外, 将激光诱导固体等离子体微加工与其他辅助技术相结合也是必然的发展趋势。

以液体为靶材的激光诱导等离子体微加工没有加工材料的限制, 目前国内外对其研究多集中在改变激光参数、实验条件来改善加工效率、加工质量等方面, 在激光诱导液体等离子体微加工机理的研究上还不够深入。激光诱导液体等离子体微加工的研究仍处于起步阶段, 一些关键的问题需要尽快解决。如等离子体是如何吸收激光能量的, 等离子体和工件相互作用如何全面地解释, 外部物理场对激光诱导液体等离子体微加工有哪些影响等。因此, 为了将激光诱导液体等离子体微加工更好地应用于实际加工, 我们需要对这些问题进行进一步的研究。

随着微结构在国防、医疗、生物工程等领域的应用范围日益扩大, 人们对材料和材料加工能力的要求也越来越高。激光诱导等离子体微加工能够有效地提高材料对激光能量的吸收率, 这对于那些使用激光难以加工的材料, 如透明材料、高反射性材料来说, 使用激光诱导等离子体进行微加工就成为了一种较好的加工方法。同时, 对于那些易于激光加工的材料, 使用激光诱导等离子体微加工进行加工也能提高加工效率及加工质量。因此, 激光诱导等离子体微加工作为一种具有多材料应用性能的微加工技术, 有着很大的应用前景和提升空间。由于这些优势, 激光诱导等离子体微加工在表面改性, 如改善摩擦、黏附、亲水及疏水等性能, 以及微流控、微机电系统等的加工中, 都展现出了强大的潜力。

总之, 虽然目前激光诱导等离子体微加工的加工机理没有得到完善的解释, 但是相信随着研究人员的努力, 激光诱导等离子体微加工将不断拓宽应用领域, 满足微加工日益严苛的要求, 促进生产力的快速发展。

参 考 文 献

- [1] Reichenbach I G, Bohley M, Sousa F J P, et al. Micromachining of PMMA: manufacturing of burr-free structures with single-edge ultra-small micro end mills [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(9/10/11/12): 3665-3677.
- [2] Xue B, Geng Y Q, Yan Y D, et al. Rapid prototyping of microfluidic chip with burr-free PMMA microchannel fabricated by revolving tip-based micro-cutting [J]. Journal of Materials

- Processing Technology, 2020, 277: 116468.
- [3] Zhu Z W, To S, Tong Z, et al. Modulated diamond cutting for the generation of complicated micro/nanofluidic channels [J]. Precision Engineering, 2019, 56: 136-142.
- [4] He Z R, Jie X H, Lian W Q. Fabrication of hierarchical micro/nano structure surface on copper by EDM and its hydrophobicity [J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(1): 144-149.
何照荣, 揭晓华, 连玮琦. 电火花加工制备铜基微纳层次结构及其疏水性能 [J]. 材料工程, 2020, 48(1): 144-149.
- [5] Zhao J S, Wang W F, Lü Y M, et al. Research on precision EDM technology for closed integral component of difficult-to-cut material [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(3): 22-27.
赵建社, 汪文峰, 吕焱明, 等. 难加工材料闭式整体构件精密电火花加工技术研究 [J]. 航空制造技术, 2017(3): 22-27.
- [6] Wei Z. Present status of development of micro-electrolysis technology [J]. Machinery, 2018, 56(4): 55-59, 74.
魏曾. 微细电解加工技术发展现状 [J]. 机械制造, 2018, 56(4): 55-59, 74.
- [7] Wang Z Q, Zhong H, Li Y, et al. Micro ECM for injection mold manufacturing of microfluidic chips [J]. Electromachining & Mould, 2019(6): 33-36, 60.
王志强, 钟昊, 李勇, 等. 微流控芯片注塑模具的微细电解加工 [J]. 电加工与模具, 2019(6): 33-36, 60.
- [8] He L W, Luo L, Meng G, et al. Recent progress of novel photolithography technologies [J]. Laser Technology, 2019, 43(1): 30-37.
何立文, 罗乐, 孟钢, 等. 新型光刻技术研究进展 [J]. 激光技术, 2019, 43(1): 30-37.
- [9] Zhu S H, Luo W H, Zeng W B, et al. Preparation of free-standing micropatterned keratin films by soft lithography [J]. Acta Chimica Sinica, 2019, 77(6): 533-538.
朱水洪, 罗文昊, 曾文斌, 等. 软光刻法制备具有表面微结构的角蛋白膜 [J]. 化学学报, 2019, 77(6): 533-538.
- [10] Wang X S, Han P D, Giovannini M, et al. Modeling of machined depth in laser surface texturing of medical needles [J]. Precision Engineering, 2017, 47: 10-18.
- [11] Wang X S, Xu B, Chen Y F, et al. Fabrication of micro/nano-hierarchical structures for droplet manipulation via velocity-controlled picosecond laser surface texturing [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 122: 319-327.
- [12] Shi Y, Xu B, Wu D, et al. Research progress on fabrication of functional microfluidic chips using femtosecond laser direct writing technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1000001.
史杨, 许兵, 吴东, 等. 飞秒激光直写技术制备功能化微流控芯片研究进展 [J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1000001.
- [13] Zhu S J, Zhang Z Y, Chu S L, et al. Research and application of massive micropores water-assisted picosecond laser processing technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0302002.
朱帅杰, 张朝阳, 储松林, 等. 海量微孔水辅助法皮秒激光加工技术的研究及应用 [J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0302002.
- [14] Zhang Z B, Hua Y Q, Ye Y X, et al. Fabrication of superhydrophobic nickel-aluminum bronze alloy surfaces based on picosecond laser pulses [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0302013.
章泽斌, 花银群, 叶云霞, 等. 基于皮秒激光的超疏水镍铝青铜合金表面的制备 [J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0302013.
- [15] Zhao Q. Research on fabrication method of fused silica microchannel in microfluidic chip [D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
赵麒. 微流控芯片中熔石英微通道形成方法的研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- [16] Li M, Zhang H C, Shen Z H, et al. Physical analyses of optical breakdown and plasma formation in water induced by laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(11): 1610-1614.
李明, 张宏超, 沈中华, 等. 激光导致水击穿和等离子体形成过程的物理分析 [J]. 光子学报, 2005, 34(11): 1610-1614.
- [17] Noack J, Vogel A. Laser-induced plasma formation in water at nanosecond to femtosecond time scales: calculation of thresholds, absorption coefficients, and energy density [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1999, 35(8): 1156-1167.
- [18] Zhang J, Sugioka K, Midorikawa K. Direct fabrication of microgratings in fused quartz by laser-induced plasma-assisted ablation with a KrF excimer laser [J]. Optics Letters, 1998, 23(18): 1486-1488.
- [19] Li C D, Nikumb S. Optical quality micromachining

- of glass with focused laser-produced metal plasma etching in the atmosphere[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(13): 2383.
- [20] Rahman T U, Rehman Z U, Ullah S, et al. Laser-induced plasma-assisted ablation (LIPAA) of glass: Effects of the laser fluence on plasma parameters and crater morphology[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 120: 105768.
- [21] Lu X Z, Jiang F, Lei T P, et al. Laser-induced-plasma-assisted ablation and metallization on C-plane single crystal sapphire (c-Al₂O₃) [J]. *Micromachines*, 2017, 8(10): 300.
- [22] Shao Y, Sun S F, Liao H P, et al. Process study on laser induced plasma etching of Pyrex7740 glass[J]. *Applied Laser*, 2017, 37(5): 704-708.
邵勇, 孙树峰, 廖慧鹏, 等. 激光诱导等离子体刻蚀 Pyrex7740 玻璃工艺研究[J]. *应用激光*, 2017, 37(5): 704-708.
- [23] Pan C F, Chen K Y, Liu B, et al. Fabrication of micro-texture channel on glass by laser-induced plasma-assisted ablation and chemical corrosion for microfluidic devices [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 240: 314-323.
- [24] Xu S J, Liu B, Pan C F, et al. Ultrafast fabrication of micro-channels and graphite patterns on glass by nanosecond laser-induced plasma-assisted ablation (LIPAA) for electrofluidic devices [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 247: 204-213.
- [25] French P W, Rosowski A, Murphy M, et al. Laser induced micro plasma processing of polymer substrates for biomedical implant applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9657: 96570H.
- [26] Qin S J, Li W J. Micromachining of complex channel systems in 3D quartz substrates using Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 2002, 74(6): 773-777.
- [27] Feng C L, Wang H X, Qin S J. Research of the fabrication of micro channels in a fused silica substrate using laser-induced plasma [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(4): 433-435, 451.
冯彩玲, 王海旭, 秦水介. 激光诱导等离子体加工石英微通道的研究[J]. *激光技术*, 2010, 34(4): 433-435, 451.
- [28] Zhou Y, Gao Y B, Wu B X, et al. Deburring effect of plasma produced by nanosecond laser ablation[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2014, 136(2): 024501.
- [29] Peng C P. Study on laser machining micro channels on quartz[D]. Guiyang: Guizhou University, 2007.
彭长屏. 激光加工石英微通道技术的研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2007.
- [30] Li S X, Bai Z C, Huang Z, et al. Study on the machining mechanism of fabrication of micro channels in fused silica substrates by laser-induced plasma[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(11): 346-353.
李世雄, 白忠臣, 黄政, 等. 激光诱导等离子体加工石英微通道机理研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(11): 346-353.
- [31] Wu B X, Shin Y C. A simple two-stage model for the formation and expansion of the plasma induced by high intensity nanosecond laser metal ablation in vacuum[J]. *Physics Letters A*, 2007, 371(1/2): 128-134.
- [32] Wu B X, Shin Y C. A self-closed thermal model for laser shock peening under the water confinement regime configuration and comparisons to experiments [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(11): 113517.
- [33] Wu B X. High-intensity nanosecond-pulsed laser-induced plasma in air, water, and vacuum: a comparative study of the early-stage evolution using a physics-based predictive model [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(10): 101104.
- [34] Wu B X, Tao S, Lei S T. Numerical modeling of laser shock peening with femtosecond laser pulses and comparisons to experiments [J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(13): 4376-4382.
- [35] Li S X, Bai Z C, Huang Z, et al. Breakdown model of micro channels fabrication in fused silica substrates by laser-induced plasma[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(9): 969-973.
李世雄, 白忠臣, 黄政, 等. 激光诱导等离子体加工石英微通道的损伤模型[J]. *激光与红外*, 2011, 41(9): 969-973.
- [36] Li S X, Bai Z C, Qin S J. Research on the fabrication of micro channels in fused silica substrates by nanosecond laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(4): 041401.
李世雄, 白忠臣, 秦水介. 纳秒激光加工石英微通道的实验与理论研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(4): 041401.
- [37] Wu B X, Shin Y C. A simplified predictive model for high-fluence ultra-short pulsed laser ablation of semiconductors and dielectrics [J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(9): 4996-5002.

- [38] Pallav K, Ehmann K F. Feasibility of laser induced plasma micro-machining (LIP-MM) [M] // Precision Assembly Technologies and Systems. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010: 73-80.
- [39] Pallav K, Han P, Ramkumar J, et al. Comparative assessment of the laser induced plasma micromachining and the micro-EDM processes [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014, 136(1): 011001.
- [40] Pallav K, Saxena I, Ehmann K F. Comparative assessment of the laser-induced plasma micromachining and the ultrashort pulsed laser ablation processes [J]. Journal of Micro and Nano-Manufacturing, 2014, 2(3): 031001. .
- [41] Saxena I, Ehmann K F. Multimaterial capability of laser induced plasma micromachining [J]. Journal of Micro and Nano-Manufacturing, 2014, 2(3):031005.
- [42] Xing Y Q, Zhang K D, Huang P, et al. Assessment machining of micro-channel textures on PCD by laser-induced plasma and ultra-short pulsed laser ablation [J]. Optics & Laser Technology, 2020, 125: 106057.
- [43] Bhandari S, Murnal M, Cao J, et al. Comparative experimental investigation of micro-channel fabrication in Ti alloys by laser ablation and laser-induced plasma micro-machining [J]. Procedia Manufacturing, 2019, 34: 418-423.
- [44] Wang X S, Huang Y K, Xing Y Q, et al. Fabrication of micro-channels on Al_2O_3/TiC ceramics using picosecond laser induced plasma micromachining [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 44: 102-112.
- [45] Saxena I, Ehmann K, Cao J. High throughput microfabrication using laser induced plasma in saline aqueous medium [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 217: 77-87.
- [46] Saxena I, Wolff S, Cao J. Unidirectional magnetic field assisted laser induced plasma micro-machining [J]. Manufacturing Letters, 2015, 3: 1-4.
- [47] Wolff S, Saxena I. A preliminary study on the effect of external magnetic fields on Laser-Induced Plasma Micromachining (LIPMM) [J]. Manufacturing Letters, 2014, 2(2): 54-59.
- [48] Tang H W, Qiu P, Cao R X, et al. Repulsive magnetic field - assisted laser-induced plasma micromachining for high-quality microfabrication [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(5/6/7/8): 2223-2229.
- [49] Malhotra R, Saxena I, Ehmann K, et al. Laser-induced plasma micro-machining (LIPMM) for enhanced productivity and flexibility in laser-based micro-machining processes [J]. CIRP Annals, 2013, 62(1): 211-214.
- [50] Saxena I, Malhotra R, Ehmann K, et al. High-speed fabrication of microchannels using line-based laser induced plasma micromachining [C] // Proceedings of the 8th International Conference on Micro Manufacturing University of Victoria, Victoria, BC, Canada, March 25-28, 2013:473.
- [51] Wang X S, Huang Y K, Xu B, et al. Comparative assessment of picosecond laser induced plasma micromachining using still and flowing water [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 119: 105623.
- [52] Wang X S, Huang Y K, Wang X W, et al. Experimental investigation and optimization of laser induced plasma micromachining using flowing water [J]. Optics & Laser Technology, 2020, 126: 106067.
- [53] Kennedy P K. A first-order model for computation of laser-induced breakdown thresholds in ocular and aqueous media. I. Theory [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1995, 31(12): 2241-2249.
- [54] Ehteshami M Z, Salehi M R, Abiri E. Development of a numerical model to characterize laser-induced plasmas in aqueous media [J]. Journal of Optics, 2017, 19(9): 095401.
- [55] Saxena I, Ehmann K, Cao J. Laser-induced plasma in aqueous media: numerical simulation and experimental validation of spatial and temporal profiles [J]. Applied Optics, 2014, 53(35): 8283-8294.
- [56] Jiao J, Guo Z. Modeling of ultrashort pulsed laser ablation in water and biological tissues in cylindrical coordinates [J]. Applied Physics B, 2011, 103(1): 195-205.
- [57] Jiao J, Guo Z X. Analysis of plasma-mediated ablation in aqueous tissue [J]. Applied Surface Science, 2012, 258(17): 6266-6271.
- [58] Wang X S, Ma C B, Li C Y, et al. Influence of pulse energy on machining characteristics in laser induced plasma micro-machining [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 262: 85-94.