

## 多孔玻璃微锥阵列超快激光加工工艺研究(特邀)

陆子杰<sup>1</sup>, 罗国虎<sup>1</sup>, 王岱荪<sup>1</sup>, 张开<sup>2</sup>, 朱康武<sup>2</sup>, 胡永祥<sup>1\*</sup><sup>1</sup>上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240;<sup>2</sup>上海航天控制技术研究所, 上海 201109

**摘要** 采用脉宽为 8 ps 的超快激光器, 结合高速相机原位观测, 研究了超快激光作用 G5 级多孔玻璃过程中的材料去除行为。研究表明: 在超快激光作用下, 多孔玻璃材料出现剥离去除现象, 加工过程中有大量粒径为几十微米的颗粒飞溅, 材料去除效率约为 K9 玻璃的 16.2 倍。分析了扫描策略和加工余量对多孔玻璃微锥阵列形貌特征的影响, 实现了高一致性和大锥顶锐度微锥阵列加工, 平均锥顶尺寸达到 20  $\mu\text{m}$ 。组装后的电喷雾推力器能够在 3 kV 电压下获得单个发射极 90  $\mu\text{N}$  的推力。

**关键词** 激光技术; 多孔玻璃; 超快激光; 微锥阵列; 电喷雾发射极

中图分类号 TH162 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230805

## 1 引言

基于多孔介质材料发射极的离子液电喷雾推力器具有工质被动供给、结构简单、质量轻、高比冲、束流自中和等优势<sup>[1]</sup>, 已被应用于微纳卫星的微推进系统<sup>[2]</sup>。微锥阵列是电喷雾推力器发射极的核心, 尖端的强电场使离子液电离、蒸发和加速。微锥高度和锥顶尺寸是影响微锥尖端电场的关键几何参数, 其加工精度关系到推力器的可靠性<sup>[3]</sup>。为提高尖端电场, 需要微锥具有大高径比, 并具有尽可能小的尖端曲率半径。此外, 单个微锥产生的推力通常在几十纳牛, 实际应用中通常需要制备由数百甚至上千个微锥组成的发射极, 并通过多个发射极并联工作的方式提高总推力<sup>[4]</sup>。因此, 微锥阵列的大面积高效高一致性制备是提升发射极性能的关键。

目前常见的发射极微锥阵列加工方法有电火花线切割、掩模电化学加工等工艺。其中, 放电加工类的工艺只适用于多孔镍、多孔不锈钢等金属材料。Liu 等<sup>[5]</sup>利用电火花线切割和电化学蚀刻两步制备了多孔不锈钢发射极微锥阵列, 尖端曲率半径范围为 4.5~18.4  $\mu\text{m}$ , 微锥数量密度为 676 / $\text{cm}^2$ 。Courtney 等<sup>[6]</sup>利用电化学蚀刻多孔镍, 先制造出内凹的凸台, 再通过移除掩模, 制造出高度为 150~170  $\mu\text{m}$ 、尖端曲率半径为 5~20  $\mu\text{m}$ 、微锥密度为 480/ $\text{cm}^2$  的发射极微锥阵列。然而, 在多孔金属材质的发射极工作过程中, 尖端的强电场环境容易使金属发生电蚀, 导致尖端变钝、微锥高度下降<sup>[7]</sup>, 这将显著降低推力器的性能, 缩短推力器的

寿命。

近年来, 通过粉末烧结或相分离法生产的多孔硼硅酸盐玻璃因具有极强的耐电化学腐蚀性能, 逐步替代多孔金属成为电喷雾推力器的离子液发射极材料<sup>[8-10]</sup>。粉末烧结法成本低廉, 较大孔径使材料具有较小的流动阻力<sup>[11]</sup>, 但材料均匀性差, 导致加工较困难; 相分离法可得到几十纳米的孔径, 材料均匀性好, 易于加工, 但成本高且流动阻力较大。由于多孔玻璃不导电, 无法采用电火花等电加工工艺加工。因此, Natisin 等<sup>[8]</sup>利用特制的锥台状铣刀数控机床(CNC)加工出周期为 576  $\mu\text{m}$ 、平均高度为 300  $\mu\text{m}$  的 P5 级多孔硼硅酸盐玻璃(孔径为 1.0~1.6  $\mu\text{m}$ )微锥阵列, 尖端曲率半径为 10~20  $\mu\text{m}$ 。尽管 CNC 加工具有设备成本低的优势<sup>[8]</sup>, 但由于多孔玻璃材料脆性高, 机械加工过程中的切削力易导致微锥顶部崩碎, 难以实现大锥顶锐度微锥加工, 且刀具尺寸限制也使 CNC 加工难以制造高密度微锥阵列。

激光作为特殊的能量场, 加工精度高<sup>[12]</sup>、材料适用范围广, 在多孔玻璃微锥加工领域中逐渐得到应用。Coffman 等<sup>[9]</sup>利用纳秒激光加工由粉末烧结制备的多孔玻璃, 制造了发射极微锥阵列, 微锥高度为 150~250  $\mu\text{m}$ , 尖端曲率半径在 30  $\mu\text{m}$  以下, 但纳秒激光热影响区域大, 不利于多孔玻璃发射极的高分辨率低损伤加工。Yang 等<sup>[10]</sup>以相分离法制备的孔径为 25 nm 的多孔玻璃为原料, 利用超快激光按不同图案逐层扫描, 制备了发射极微锥阵列。然而, 目前利用超快激光加工由粉末烧结制备的多孔玻璃来制备发射极的研究鲜

收稿日期: 2023-05-08; 修回日期: 2023-06-11; 录用日期: 2023-07-04; 网络首发日期: 2023-07-18

基金项目: 上海市优秀学术带头人(青年)项目(23XD1421700)

通信作者: \*huyx@situ.edu.cn

有报道。由于该类多孔玻璃中的颗粒粒径与尖端尺寸相当,加工微锥时需要低损伤去除颗粒,但该材料的超快激光去除特性尚未得到系统研究。因此,需要探索该多孔玻璃的超快激光去除行为,实现微锥阵列的超快激光高一致性加工。

针对多孔玻璃发射极微锥难加工问题,本文首先以致密的K9玻璃为对照组,研究了多孔玻璃的超快激光去除行为,并通过高速观测证实了多孔玻璃超快激光加工中易崩碎的特性。基于该特性探究了不同扫描策略和加工余量对微锥阵列几何特征的影响,并提出了加工高一致性微锥阵列的工艺方法。最后,利用该工艺在超快激光加工平台上一体化加工了多孔玻璃发射极单元,并进行了推力测试。

## 2 实验系统与方法

多孔玻璃材料的超快激光加工系统示意图及去除过程原位观测平台实物图分别如图1(a)、(b)所示。加工系统中的皮秒激光器输出脉宽为8 ps的高斯光束,单脉冲能量( $E$ )的范围为2.5~125.0  $\mu\text{J}$ ,中心波长为1030 nm,最高重复频率为400 kHz。脉冲激光束通过振镜和场镜后聚焦在样品表面上,焦平面处的光斑

直径( $D$ )为20  $\mu\text{m}$ 。激光平均能流密度( $F$ )的计算式为

$$F = \frac{4E}{\pi D^2} \quad (1)$$

将多孔玻璃置于可进行对焦的光学位移台上,在空气环境中进行加工,碎屑被吸尘装置收集。为了探明多孔玻璃的超快激光去除行为,采用高速相机(帧率为10000~20000 frame/s)实时观测多孔玻璃和K9玻璃的材料去除过程。

实验所用的多孔玻璃为G5级多孔硼硅酸盐玻璃,其外观如图2(a)所示。利用X射线显微镜(CT)和扫描电子显微镜(SEM)观察其形貌,如图2(b)、(c)所示。该多孔玻璃的平均粒径在50  $\mu\text{m}$ 左右,平均孔径为2~4  $\mu\text{m}$ ,孔隙率约为31%。在超快激光加工前,用砂纸和抛光布对多孔玻璃进行抛光,抛光后面粗糙度( $S_a$ )约为6.60  $\mu\text{m}$ 。为了对比多孔玻璃和致密玻璃的超快激光去除特性差异,采用化学成分相近的K9硼硅酸盐玻璃作为对样品。在超快激光加工完成后,采用扫描电子显微镜观测两种玻璃烧蚀后的微观形貌,采用激光共聚焦显微镜观测两种玻璃的三维形貌特征。

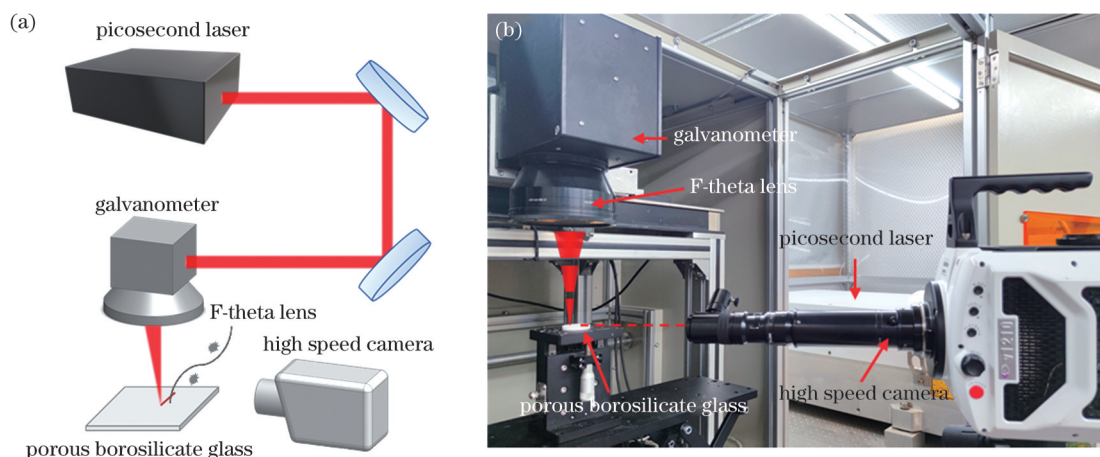


图1 皮秒激光加工原位观测平台。(a)示意图;(b)实际平台

Fig. 1 *In-situ* observation platform for picosecond laser processing. (a) Schematic; (b) actual platform

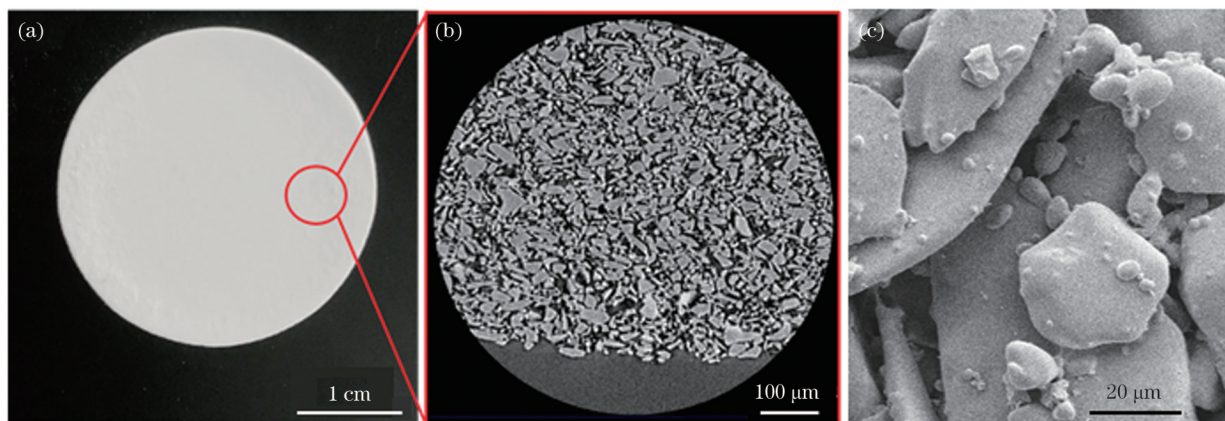


图2 多孔玻璃形态。(a)外观;(b)CT扫描形貌;(c)SEM形貌

Fig. 2 Morphologies of porous glass. (a) Appearance; (b) morphology by CT scanning; (c) SEM morphology

### 3 结果与讨论

#### 3.1 多孔玻璃去除行为

为研究多孔玻璃和致密 K9 玻璃在超快激光脉冲下的材料去除行为,实验选择激光单脉冲能量为  $87.5 \mu\text{J}$  (能流密度为  $27.85 \text{ J/cm}^2$ ), 对应功率密度为  $3.48 \text{ TW/cm}^2$ , 大于 K9 玻璃的烧蚀阈值<sup>[13]</sup>, 每次叩击的时间间隔为  $0.1 \text{ s}$ 。K9 玻璃和 多孔玻璃在不同叩击次数 ( $N$ ) 下的烧蚀形貌如图 3 所示。由图 3(a)~(d) 可知, K9 玻璃在单脉冲叩击时[图 3(a)]的激光去除范围略小于光斑尺寸, 材料去除极少, 且存在裂纹和重熔颗粒。随着叩击次数的增加, K9 玻璃的激光去

除范围逐渐增大, 烧蚀效应逐渐显著, 呈现出多脉冲叩击时的孵化效应<sup>[14]</sup>, 并出现激光诱导周期性表面结构<sup>[15]</sup>。多孔玻璃的材料去除行为与 K9 玻璃的材料去除行为存在显著差异。由图 3(e)~(h) 可知, 多孔玻璃在单脉冲叩击时[图 3(e)]的激光去除范围约为光斑尺寸的 2 倍, 材料去除区域呈明显的凹坑, 且无烧蚀痕迹; 随着叩击次数的增加, 多孔玻璃的激光去除范围基本不变, 在光斑辐照区域逐渐形成深孔。由此可见, 与致密的 K9 玻璃不同, 多孔玻璃在激光作用过程中, 光斑作用范围附近的一定区域产生剥落现象, 导致多孔玻璃的超快激光去除范围是 K9 玻璃的 2 倍左右。

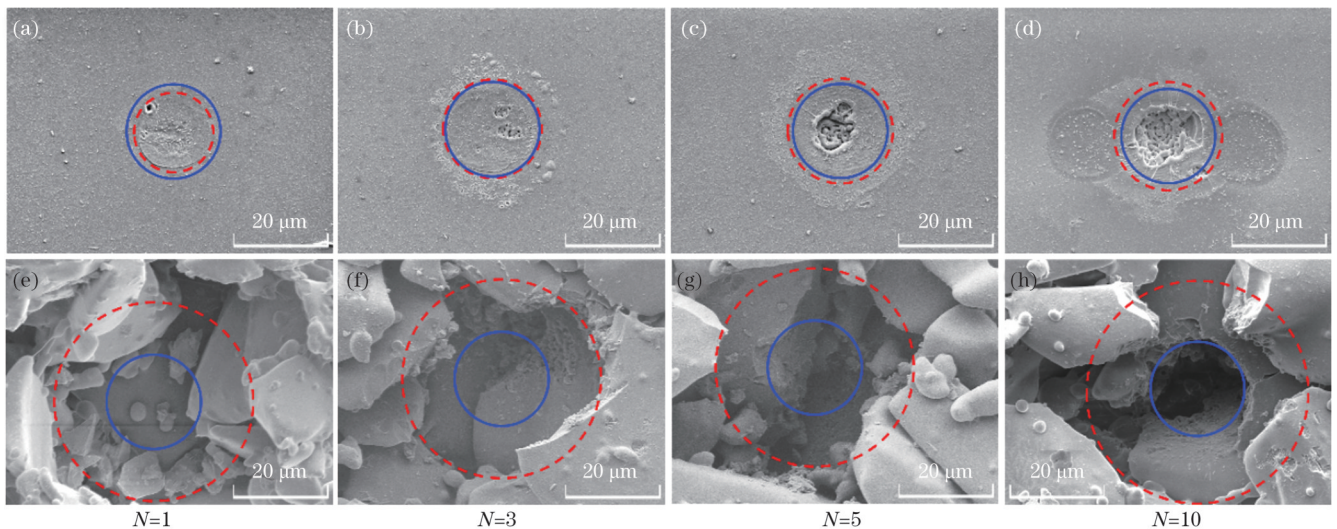


图 3 K9 玻璃和 多孔玻璃在不同脉冲叩击次数下的形貌, 虚线为激光去除范围, 实线为光斑辐照范围。(a)~(d) K9 玻璃; (e)~(h) 多孔玻璃

Fig. 3 Morphologies of K9 glass and porous glass under different  $N$  with laser removal range shown by dashed line and spot irradiation range shown by solid line. (a)~(d) K9 glass; (e)~(h) porous glass

为了量化超快激光作用下两种玻璃的材料去除效率, 在单脉冲能量为  $87.5 \mu\text{J}$  (能流密度为  $27.85 \text{ J/cm}^2$ )、光斑间距  $d=10 \mu\text{m}$  的参数下加工尺寸为  $1.0 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$  凹槽。单次烧蚀的扫描路径如图 4(a) 所示, 多孔玻璃只需重复烧蚀 2 次, 而 K9 玻璃需要重复烧蚀 50 次, 两种玻璃超快激光切槽加工后的几何形貌分别如图 4(b)、(c) 所示。通过激光共聚焦显微镜测量去除凹槽的体积, 除以总脉冲数得到平均单脉冲去除体积 ( $V_s$ )。两种玻璃的平均单脉冲去除体积对比如图 4(d) 所示, 多孔玻璃的平均单脉冲去除体积高达  $4934.0 \mu\text{m}^3$ , 而 K9 玻璃的平均单脉冲去除体积仅为  $304.44 \mu\text{m}^3$ 。因此, 多孔玻璃的去除率是 K9 玻璃的 16.2 倍。多孔玻璃与 K9 玻璃在单脉冲去除体积上的量级差异与图 3 所示的脉冲叩击后的微观形貌差异一致。此外, 进一步分析了两种材料的超快激光加工凹槽的粗糙度, 可看出多孔玻璃的槽侧壁和底面均比 K9 玻璃粗糙。多孔玻璃凹槽的底面粗糙度为  $9.93 \mu\text{m}$ , 大于加工前的表面粗糙度  $6.60 \mu\text{m}$ , 而 K9 玻璃凹槽的底

面较光滑, 面粗糙度为  $1.20 \mu\text{m}$ 。因此, 相比致密 K9 玻璃, 多孔玻璃的超快激光去除效率高, 但去除表面粗糙度大, 表明多孔玻璃的超快激光加工具有与激光烧蚀效应不同的材料去除行为。

#### 3.2 多孔玻璃去除过程观测

为进一步认识多孔玻璃的超快激光材料去除方式, 对多孔玻璃和 K9 玻璃的超快激光材料去除过程进行了原位观测。两种材料均采用相同的激光加工参数进行在焦扫描: 单脉冲能量  $87.5 \mu\text{J}$  (能流密度  $27.85 \text{ J/cm}^2$ ), 激光重复频率  $1 \text{ kHz}$ , 光斑间距  $d=40 \mu\text{m}$ 。激光辐照到材料的时刻为零时刻, 高速相机观测下两种玻璃在烧蚀时的材料去除过程如图 5 所示。在加工多孔玻璃时, 可频繁观测到粒径从十几到几十微米的大块碎屑飞溅, 大块碎屑的粒径与多孔玻璃粒径接近, 如图 5(a)~(c) 所示。在激光辐照的几百微秒时间内, 崩碎现象一直存在。K9 玻璃的透光率高, 在高能流密度的超快激光辐照下, 可观测到激光自聚焦导致的成丝现象<sup>[16]</sup>, 但在图 5(d)~(f) 中均未见大块碎屑飞出, 表明致密

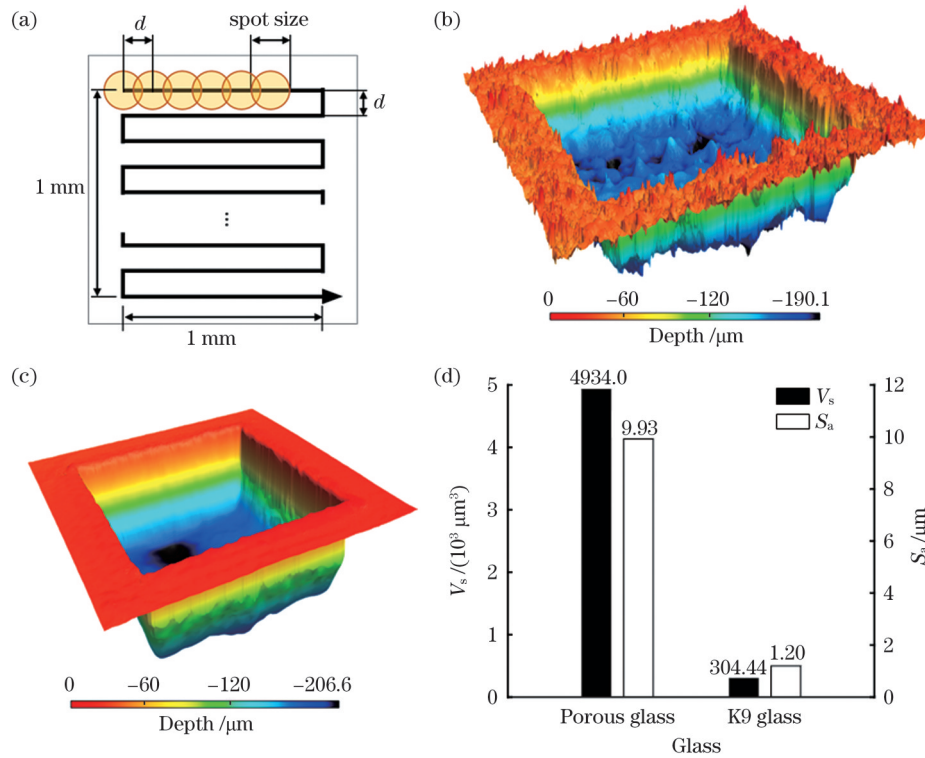


图 4 多孔玻璃和 K9 玻璃的切槽对比。(a) 单次扫描路径示意图; (b) 多孔玻璃烧蚀 2 次后的形貌; (c) K9 玻璃烧蚀 50 次后的形貌; (d) 单脉冲去除体积和去除表面粗糙度  
 Fig. 4 Comparison of groove processing between porous glass and K9 glass. (a) Schematic of single scanning route; (b) morphology of porous glass after two times of ablation; (c) morphology of K9 glass after 50 times of ablation; (d) removal volume by single pulse and surface roughness after processing

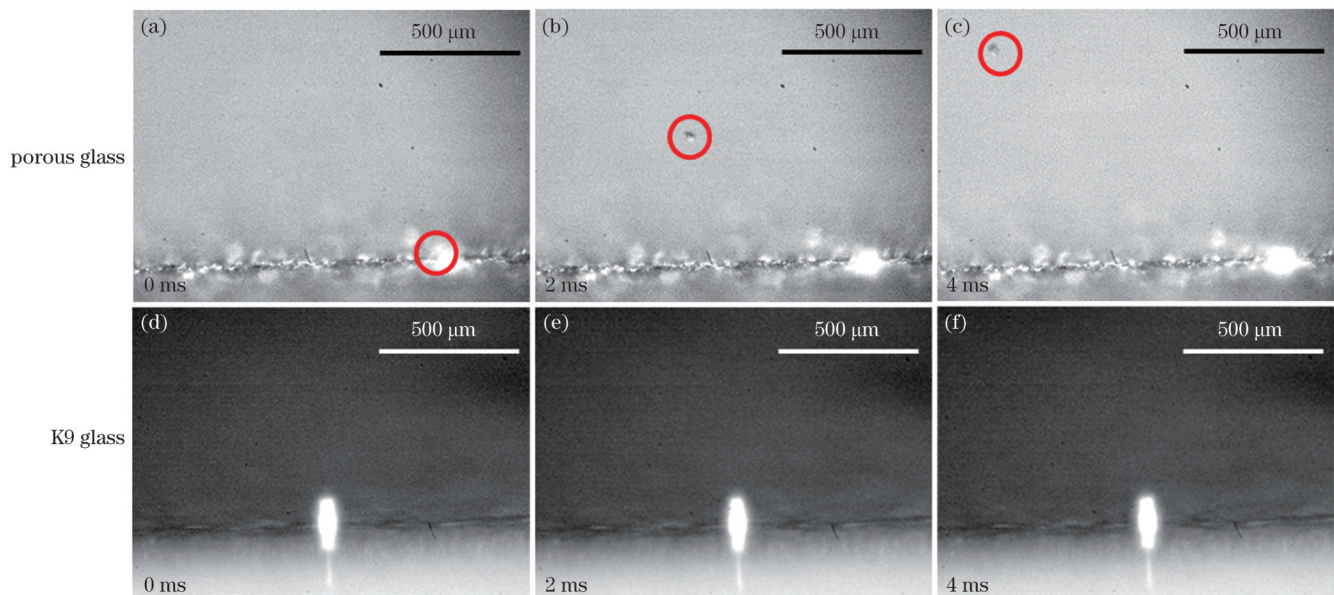


图 5 不同时刻下多孔玻璃和 K9 玻璃的超快激光加工。(a)(d) 0 ms; (b)(e) 2 ms; (c)(f) 4 ms  
 Fig. 5 Ultrafast laser processing of porous glass and K9 glass under different moments. (a)(d) 0 ms; (b)(e) 2 ms; (c)(f) 4 ms

K9 玻璃的材料去除主要是以烧蚀气化的形式进行的, 与图 3(a) 所示的烧蚀形貌吻合。

综合两种材料的去除率及原位观测的加工过程, 推测出多孔玻璃和致密玻璃的超快激光去除机制, 如图 6 所示。多孔玻璃的烧结过程导致颗粒界面处的强度低于致密玻璃, 且颗粒与颗粒间的接触面积较

小, 使多孔玻璃易在激光诱导下发生颗粒剥落, 形成图 6(a) 所示的崩碎现象。崩碎可能是皮秒激光脉冲诱导的热应力波<sup>[17-19]</sup>以及激光在多孔玻璃内部的反射对结合面处的作用引起的, 材料的孔隙率可能是影响去除范围的重要因素。而致密 K9 玻璃材质均匀、结合力更强, 不易崩碎, 因此材料的去除形式以烧蚀

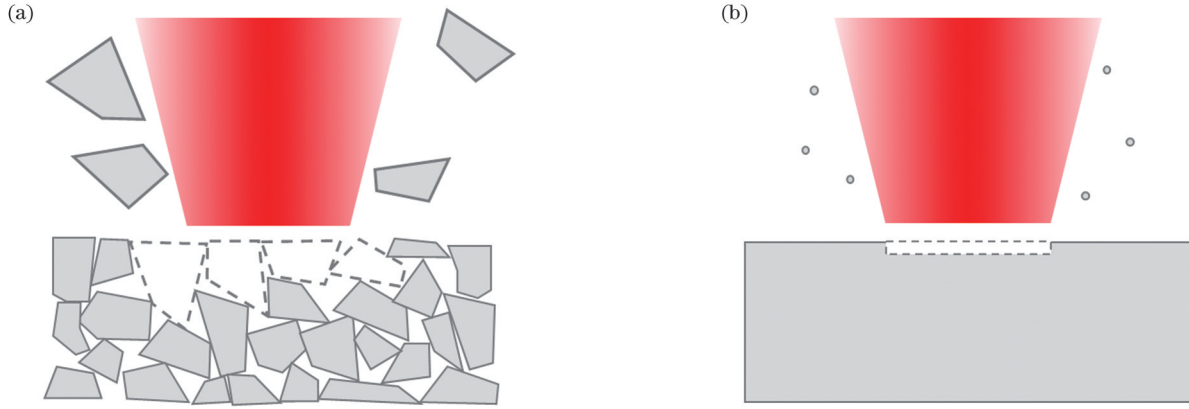


图 6 多孔玻璃和致密玻璃的超快激光去除机制。(a)激光诱导颗粒剥落;(b)激光烧蚀

Fig. 6 Removal mechanisms of porous glass and dense glass by ultrafast laser. (a) Laser-induced particle spalling; (b) laser ablation

为主,如图 6(b)所示。多孔玻璃激光诱导颗粒剥落的去除机制使材料的去除效率得到显著提升,但也会引起加工分辨率不足的问题,需要合适的加工工艺进行弥补。

### 3.3 多孔玻璃微锥阵列加工

多孔玻璃易崩碎的特性使得发射极微锥阵列加工时需要留出较大的加工余量,通过合适的加工工艺,实现高一致性微锥阵列的高效大面积制备。参考 Chen 等<sup>[20]</sup>制造金字塔形微锥的工艺,本文采用纵横交错扫描的方式,加工周期为  $p=0.5\text{ mm}$  的  $8\times 8$  微锥阵列,图 7(a)为微锥阵列的几何参数示意图。进行对比的两种扫描策略分别如图 7(b)、(c)所示。两者的扫描图案相同,但图 7(b)所示的第一种扫描策略采用恒定的进给方向,而图 7(c)所示的第二种扫描

策略采用由微锥边缘向中心进给的方式。根据图 3 所示的多孔玻璃的激光去除范围,理论加工余量 ( $D_{th}$ ) 和实际锥顶尺寸 ( $D_{act}$ ) 之间会有  $40\sim 60\text{ }\mu\text{m}$  的差距,需要提前补偿。采用的激光加工参数如下:单脉冲能量从  $8.75\text{ }\mu\text{J}$  开始,以  $4.375\text{ }\mu\text{J}$  的步长递增至  $35\text{ }\mu\text{J}$ ,每个能量下纵横交错扫描各 30 次,激光重复频率为  $40\text{ kHz}$ ,振镜扫描速度为  $800\text{ mm/s}$ ,相邻扫描路径的间距为  $10\text{ }\mu\text{m}$ 。在上述激光重复频率和振镜扫描速度下,微锥阵列底面无显著重熔层覆盖,较好保持了材料结构特性。加工该微锥阵列所需的总扫描次数为纵横各 210 次,所需时间约为 2 h。在扫描图案和激光加工参数均相同的情况下,对比了不同扫描策略和加工余量对微锥阵列锥顶尺寸均值和锥高 ( $H$ ) 的标准差的影响。

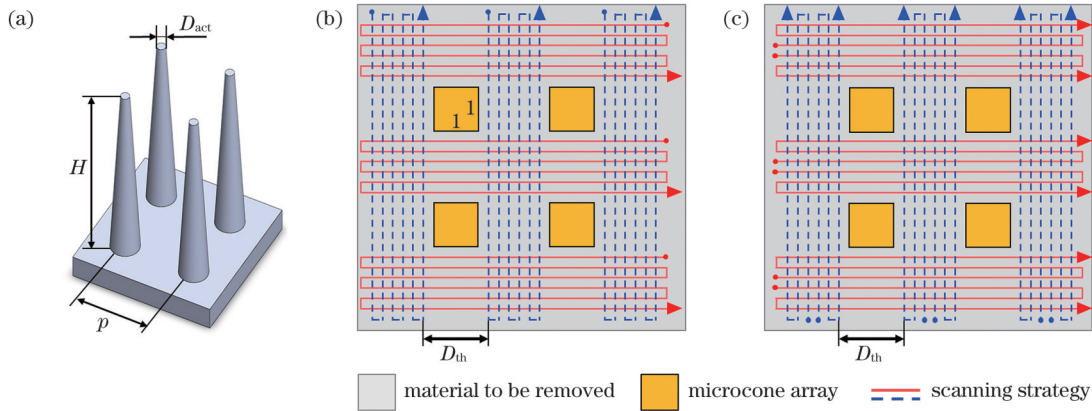


图 7 微锥阵列加工示意图。(a)微锥阵列几何特征;(b)采用恒定进给方向的扫描策略;(c)由微锥边缘向中心进给的扫描策略

Fig. 7 Schematics of microcone array machining. (a) Geometric features of microcone array; (b) scanning strategy with constant feeding direction; (c) scanning strategy with feeding from edge of microcone to center

在采用恒定进给方向的扫描策略下,统计了  $D_{th}$  为  $140、120、100\text{ }\mu\text{m}$  时的锥顶尺寸和高度偏差分布。微锥阵列的局部典型形貌 ( $D_{th}=100\text{ }\mu\text{m}$ ) 如图 8(a) 所示,不同  $D_{th}$  下的锥顶尺寸和锥高相对于平均值的偏差分布如图 8(b) 所示,椭圆的两轴长度对应的区间分别为各参数下锥顶尺寸和锥高偏差的 90% 置信区间 ( $\pm 1.649$  倍标准差)。由于高斯光斑的能量

密度的分布特性及微锥对光路的阻挡,最终加工出略内凹的大高径比微锥。然而,在恒定进给方向下加工的微锥阵列存在锥顶局部崩碎的现象。可能的原因如下:激光初始扫描图 7(b) 所示的区域 1 时,激光直接作用于未被充分烧蚀且裂纹未充分扩展的多孔玻璃颗粒,导致锥顶部分受较大冲击,造成局部崩碎。尽管锥顶局部崩碎可以额外地减小锥顶尺寸,

但崩碎情况不一致,导致实际锥顶位置偏离理论位置 20~40  $\mu\text{m}$ ,无法保证微锥阵列的一致性。随着  $D_{\text{th}}$  的减小,锥高标准差的增长先慢后快,崩碎概率逐渐上升。当  $D_{\text{th}}=100 \mu\text{m}$  时锥顶尺寸和锥高偏差的

离散程度大,表明微锥一致性由于  $D_{\text{th}}$  过小而显著降低。因此,该扫描策略下的最小加工余量约为 100  $\mu\text{m}$ ,对应的平均锥顶尺寸为 35.5  $\mu\text{m}$ ,锥高标准差为 43.1  $\mu\text{m}$ 。

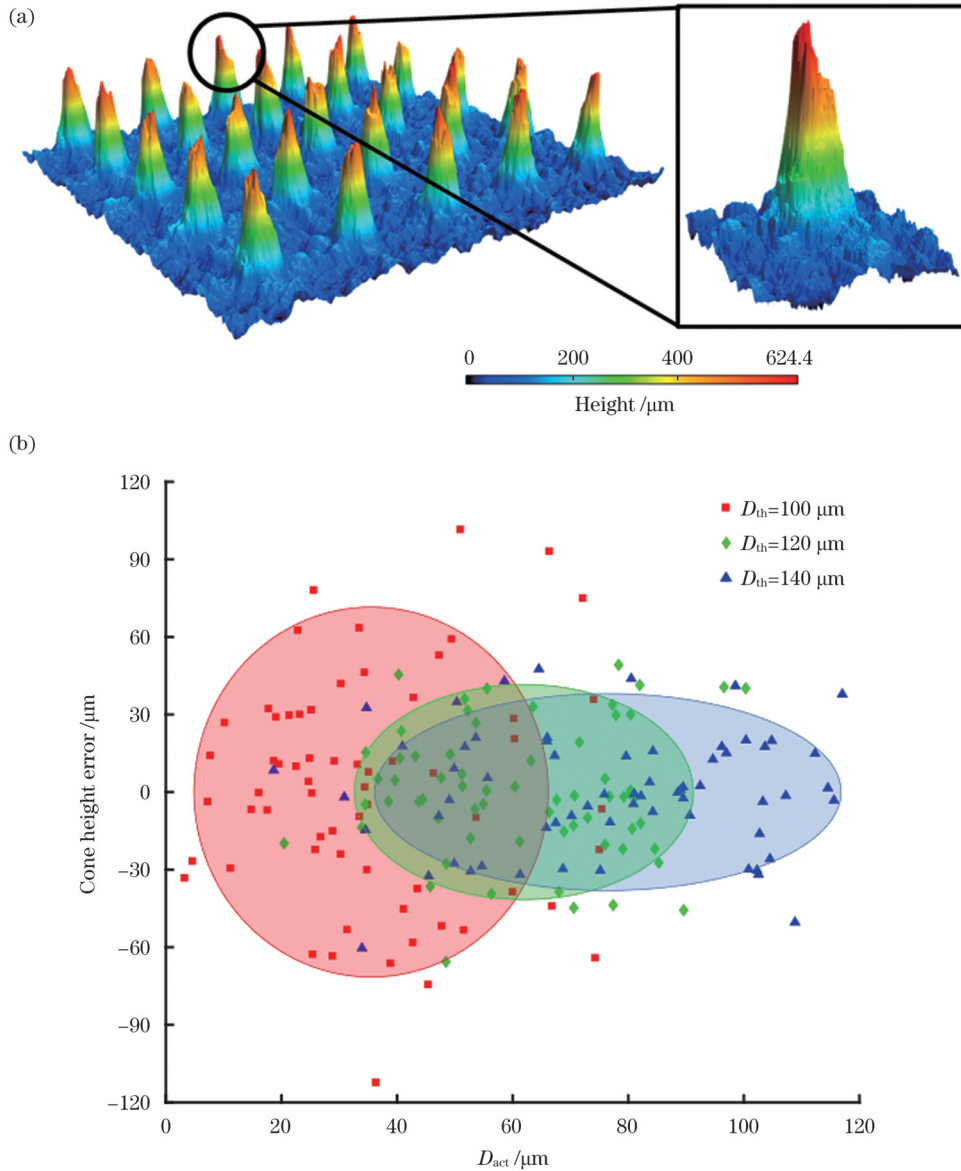


图 8 在恒定进给方向下加工的微锥阵列。(a)  $D_{\text{th}}=100 \mu\text{m}$  时微锥阵列的局部三维形貌;(b) 不同加工余量下的锥顶尺寸和锥高偏差统计

Fig. 8 Microcone array machined under constant feeding direction. (a) Local 3D morphology of microcone array when  $D_{\text{th}}=100 \mu\text{m}$ ; (b) statistics of cone apex size and cone height error under different machining allowances

在由微锥边缘向中心进给的扫描策略下,统计了  $D_{\text{th}}$  为 120、100、80、60  $\mu\text{m}$  时的锥顶尺寸和高度偏差分布。微锥阵列的局部典型形貌 ( $D_{\text{th}}=100 \mu\text{m}$ ) 如图 9(a) 所示,不同  $D_{\text{th}}$  下的锥顶尺寸和锥高相对于平均值的偏差分布如图 9(b) 所示。该加工策略可有效抑制锥顶的局部崩碎现象,无明显的锥顶偏心现象,且在相同  $D_{\text{th}}$  下  $D_{\text{act}}$  和  $H$  的一致性均好于恒定进给方向的扫描策略。当  $D_{\text{th}}=60 \mu\text{m}$  时,锥顶平均尺寸为 20  $\mu\text{m}$ ,锥高平均值为 550  $\mu\text{m}$ ,标准差为 35.6  $\mu\text{m}$ ,微锥上半部分的半

顶角小于  $10^\circ$ 。此加工余量下断锥率为 3/64,且均出现在阵列边缘,可能与多孔玻璃磨抛得不够平整或局部烧结强度不足有关。

当  $D_{\text{th}}=60 \mu\text{m}$  时,采用由微锥边缘向中心进给的横纵交错扫描策略加工微锥,对该微锥进行 SEM 观测,微锥尖端的俯视图如图 10 所示。实际锥顶尺寸  $D_{\text{act}}$  (约为 20  $\mu\text{m}$ ) 基本等于加工余量  $D_{\text{th}}$  和图 3(e)~(h) 所示的激光去除范围的直径 (约为 40  $\mu\text{m}$ ) 之差,证明了根据激光去除范围选择加工余量的可行性。继续减

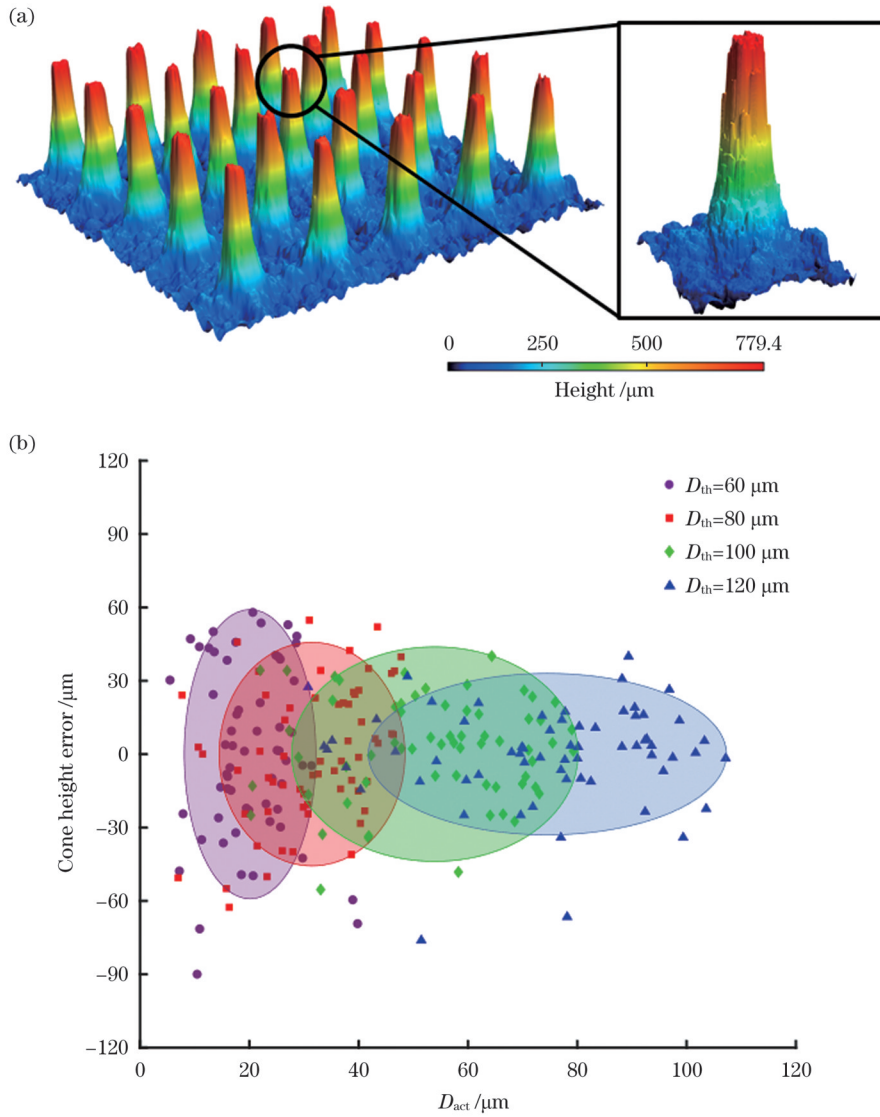


图 9 在由微锥边缘向中心进给的扫描策略下加工的微锥阵列。(a)  $D_{th}=100\ \mu\text{m}$  时微锥阵列的局部三维形貌; (b) 不同加工余量下的锥顶尺寸和锥高偏差统计

Fig. 9 Microcone array machined under scanning strategy with feeding from edge of microcone to center. (a) Local 3D morphology of microcone array when  $D_{th}=100\ \mu\text{m}$ ; (b) statistics of cone apex size and cone height error under different machining allowances

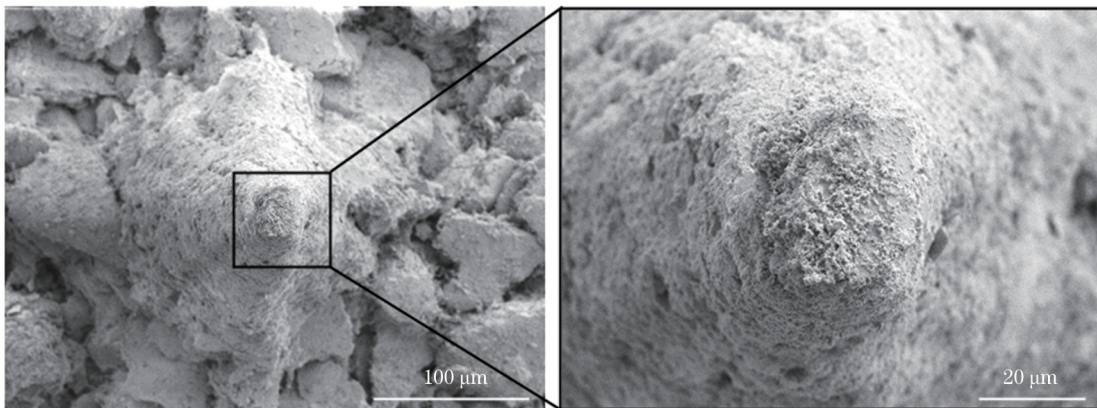


图 10 微锥锥顶形貌的 SEM 图

Fig. 10 SEM images of top morphology of microcone

小加工余量将导致更大的断锥概率, 综合上述实验结果, 采取由微锥边缘向中心进给的纵横交错扫描策略,

选择加工余量  $D_{th}=60\ \mu\text{m}$ , 进行发射极微锥阵列的加工。

### 3.4 多孔玻璃微锥阵列的发射性能测试

基于多孔玻璃微锥阵列的超快激光高一致性加工工艺,在图 1(b)所示的超快激光振镜加工平台上,一体化加工了发射极单元,其几何结构如图 11(a)所示,微锥阵列两个方向上的周期分别为  $200\ \mu\text{m}$  和  $230\ \mu\text{m}$ ,共有 1836 个微锥,数量密度为  $2174/\text{cm}^2$ 。除微锥阵列外,还有台阶、微槽、进液孔等特征。利用超快激光先分步加工其他特征,最后加工微锥阵列,制备的发射极实物如图

图 11(b)所示。将 6 个相同的发射极与其他部件装配成尺寸为  $86.0\ \text{mm} \times 86.0\ \text{mm} \times 34.5\ \text{mm}$  的离子液电喷雾推力器,并在地面真空罐内进行了性能测试。离子液工质采用 1-乙基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐(EMI-BF<sub>4</sub>)<sup>[21]</sup>,发射极微锥尖端和提取极的轴向间距为  $1\ \text{mm}$ 。图 11(c)展示了推力器外形及其中一个发射极点火时的情况。该推力器的起始工作电压约为  $1.8\ \text{kV}$ ,在工作电压为  $3.0\ \text{kV}$  时,测得单个发射极的推力约为  $90\ \mu\text{N}$ 。

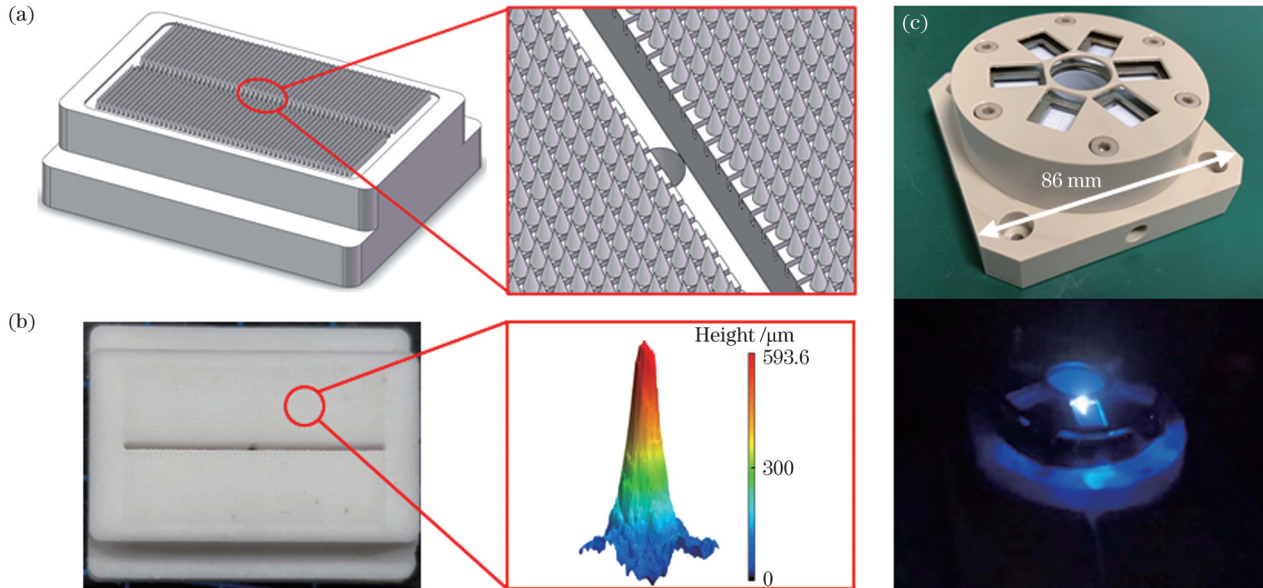


图 11 发射极的制造、装配及测试。(a)发射极的几何结构;(b)发射极加工实物图及典型微锥的三维形貌;(c)电喷雾推力器外形及工作情况

Fig. 11 Fabrication, assemblage and test of emitter. (a) Geometric structure of emitter; (b) physical image of machined emitter and 3D morphology of typical microcone; (c) appearance of electro-spray thruster and its working situation

## 4 结 论

开展了多孔玻璃发射极微锥阵列的超快激光加工工艺研究。通过对比脉冲叩击下多孔玻璃和 K9 玻璃的形貌、平均单脉冲去除体积和加工过程,研究了多孔玻璃在超快激光加工中的颗粒剥落行为。对比了不同扫描策略和加工余量下微锥阵列的几何特征,得到了使锥顶平均尺寸减小至  $20\ \mu\text{m}$  的加工工艺,制备了微锥密度为  $2174/\text{cm}^2$  的大面积发射极微锥阵列。将微锥加工工艺应用于发射极一体化加工,制备了 6 个相同的发射极。将它们组装成离子液电喷雾推力器,在  $3.0\ \text{kV}$  的工作电压下测得单个发射极的推力约为  $90\ \mu\text{N}$ ,证明了多孔玻璃发射极超快激光一体化加工的可行性。然而,多孔玻璃颗粒剥落去除的详细机制还需要后续研究。激光在颗粒间的反射和激光诱导的热应力可能是引起颗粒剥落的因素。此外,目前在较小加工余量下加工微锥阵列时会出现少量的断锥,使得该扫描策略下的平均锥顶尺寸难以进一步减小。提升锥顶加工分辨率并抑制断锥的方法仍需进一步探究。

## 参 考 文 献

- [1] 刘欣宇, 康小明, 贺伟国, 等. 离子液体电喷雾推力器的关键技术及展望[J]. 宇航学报, 2019, 40(9): 977-986.  
Liu X Y, Kang X M, He W G, et al. Key technologies and prospect of ionic liquid electro-spray thruster[J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(9): 977-986.
- [2] Demmons N R, Lamarre N, Ziemer J K, et al. Electro-spray thruster propellant feed system for a gravity wave observatory mission[C]//Proceedings of the 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, July 25-27, 2016, Salt Lake City, UT, Virginia: AIAA Press, 2016: 4739.
- [3] 于达仁, 牛翔, 王泰卜, 等. 面向空间引力波探测任务的微推进技术研究进展[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021, 60(S1): 194-212.  
Yu D R, Niu X, Wang T B, et al. The developments of micro propulsion technology based on space gravitational wave detection task[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2021, 60(S1): 194-212.
- [4] 范益朋, 夏广庆, 韩亚杰, 等. 离子液体微推进技术研究进展[J]. 航空动力学报, 2020, 35(6): 1275-1285.  
Fan Y P, Xia G Q, Han Y J, et al. Research progress of ionic liquid micropropulsion technology[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(6): 1275-1285.
- [5] Liu X Y, He W G, Kang X M, et al. Fabrication of porous emitters for ionic liquid ion source by wire electrical discharge machining combined with electrochemical etching[J]. The Review of Scientific Instruments, 2019, 90(12): 123304.
- [6] Courtney D G, Li H Q, Lozano P C. Electrochemical



- micromachining on porous nickel for arrays of electrospray ion emitters[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2013, 22(2): 471-482.
- [7] Briker N, Lozano P C. The role of upstream distal electrodes in mitigating electrochemical degradation of ionic liquid ion sources[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(19): 193504.
- [8] Natisin M R, Zamora H L, McGehee W A, et al. Fabrication and characterization of a fully conventionally machined, high-performance porous-media electrospray thruster[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2020, 30(11): 115021.
- [9] Coffman C, Perna L, Li H Q, et al. On the manufacturing and emission characteristics of a novel borosilicate electrospray source [C]//49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, July 14-17, 2013, San Jose, CA, USA. Virginia: AIAA Press, 2013: 4035.
- [10] Yang Y T, Guo D W, Li X K, et al. Development and characterization of a novel porous-media borosilicate glass ion sources for electrospray thruster[J]. *Aerospace*, 2021, 8(10): 297.
- [11] Ma C Y, Bull T, Ryan C N. Plume composition measurements of a high-emission-density electrospray thruster[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2021, 37(6): 816-831.
- [12] 曾凡严, 周广福, 王攸, 等. 飞秒激光切割复杂形状石英器件的试验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(7): 0714002.
- Zeng F Y, Zhou G F, Wang Y, et al. Experimental study on femtosecond laser cutting quartz devices with complex shapes[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(7): 0714002.
- [13] Xu S Z, Yao C Z, Dou H Q, et al. An investigation on 800 nm femtosecond laser ablation of K9 glass in air and vacuum[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 406: 91-98.
- [14] Machado L M, Samad R E, Freitas A Z, et al. Microchannels direct machining using the femtosecond smooth ablation method[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 67-75.
- [15] 于潇涵, 亓东峰, 周文举, 等. 超快激光制备硫系玻璃表面周期性纳米结构[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(15): 1516019.
- Yu X H, Qi D F, Zhou W J, et al. Fabrication of periodic nanostructures on the surface of chalcogenide glass using ultrafast laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(15): 1516019.
- [16] Couairon A, Mysyrowicz A. Femtosecond filamentation in transparent media[J]. *Physics Reports*, 2007, 441(2/3/4): 47-189.
- [17] Sakakura M, Shimotsuma Y, Miura K. Observation of stress wave and thermal stress in ultrashort pulse laser bulk processing inside glass[J]. *Journal of Laser Micro*, 2017, 12(2): 159-164.
- [18] Hu H F, Wang X L, Zhang N, et al. Shock induced phenomena in high fluence femtosecond laser ablation of silica glass[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7843: 78430U.
- [19] 姜玺阳, 王飞飞, 周伟, 等. 飞秒激光与材料相互作用中的超快动力学[J]. *中国激光*, 2022, 49(22): 2200001.
- Jiang X Y, Wang F F, Zhou W, et al. Ultrafast dynamics in the interaction between femtosecond laser and materials[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(22): 2200001.
- [20] Chen Y, Niu B. Femtosecond laser fabrication of porous ceramics for electrospray thruster emitter[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11885: 118850E.
- [21] Courtney D, Dandavino S, Shea H. Performance and applications of ionic electrospray micro-propulsion prototypes[C]//Proceedings of the AIAA SPACE 2015 Conference and Exposition, August 31, 2015, Pasadena, California. Virginia: AIAA Press, 2015: 4672.

## Study on Ultrafast Laser Processing Technology of Porous Glass Microcone Array (Invited)

Lu Zijie<sup>1</sup>, Luo Guohu<sup>1</sup>, Wang Daisun<sup>1</sup>, Zhang Kai<sup>2</sup>, Zhu Kangwu<sup>2</sup>, Hu Yongxiang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;*

<sup>2</sup>*Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China*

### Abstract

**Objective** The ionic liquid electrospray thruster, characterized by its high specific impulse, compact size, controllable thrust, and self-neutralizing beam, is effectively utilized in attitude control and orbit modification of micro and nano satellites. The emitter, which is comprised of a microcone array, serves as a critical component of the thrusters. A passive supply of ionic liquid is realized by employing sintered porous glass as the emitter material. This type of glass offers superior resistance to electrical corrosion than porous metal, thereby enhancing the thruster's lifespan. However, processing porous glass presents a challenge due to its inherent brittleness. The ultrafast laser, notable for its low thermal impact and excellent adaptability to various materials, offers a viable solution to this issue by enabling minimal-damage processing of the porous glass. However, the fabrication of porous glass emitters using ultrafast lasers is not extensively reported, necessitating further investigation into the machining process and resultant performance. In this study, the ultrafast laser machining process for producing high-precision, uniform, and densely arranged porous glass microcone arrays is examined. The outcomes of this research will pave the way for the feasible production of porous glass emitters for ionic liquid electrospray thrusters.

**Methods** In this study, G5 grade porous borosilicate glass is employed, and it is processed via ultrafast laser with a pulse width of 8 ps. First, the material removal behavior of porous glass is examined. The morphology differences between porous glass and K9 glass after laser pulse are compared via scanning electron microscopy, and their average material volumes removed by single laser pulse are measured via laser confocal microscopy. Subsequently, an *in-situ* high-speed camera is used to observe the material removal behavior of porous glass and K9 glass. This enabled an in-depth analysis of the material removal mechanism of porous glass. Furthermore, the ultrafast laser machining process of porous glass microcone array is examined. The effects of scanning strategy and machining allowance on the geometric features of microcone array are analyzed, and a microcone array with good uniformity and high sharpness is fabricated. Finally, porous glass emitters are manufactured using an ultrafast laser. These emitters served as the

foundation for the assembly and testing of an electrospray thruster.

**Results and Discussions** According to the morphology after several laser pulses, the diameter of the material removal range for porous glass is approximately twice the spot size, and the average volume of porous glass removed by single laser pulse is approximately 16.2 times that of dense K9 glass (Fig. 4). An *in-situ* observation reveals a large quantity of debris eject from the porous glass during laser processing. The diameter of this debris is similar to that of a porous glass particle (approximately 50  $\mu\text{m}$ ), a phenomenon not observed when processing K9 glass (Fig. 5). Therefore, the material removal mechanism for porous glass involves laser-induced particle spalling, which differs from that of K9 glass, where ablation is dominant (Fig. 6). Furthermore, factors influencing the geometric features of the microcone array are investigated. It is determined that the apex size and height uniformity of the microcone array decrease with the reduction in machining allowance (Figs. 8 and 9). Local spalling at the apex of cones can be suppressed by adopting a scanning strategy with feeding from the edge to the center of the microcone, resulting in better uniformity (Fig. 9). In the final stage of the study, porous glass emitters with various geometric features are manufactured using an ultrafast laser. Each emitter comprises 1836 microcones, with a density of up to 2174/cm<sup>2</sup> (Fig. 11).

**Conclusions** In this study, the ultrafast laser machining process of porous glass emitter microcone array is examined. By comparing the morphology after ablation, average material volume removed by single laser pulse, and *in-situ* observation, it is verified that sintered porous glass exhibits the material removal behavior of ultrafast laser induced particle spalling. Next, the ultrafast laser machining process of porous glass microcone array with high sharpness and good uniformity is examined. Porous glass microcone array, with an average apex size of 20  $\mu\text{m}$ , can be fabricated using the scanning strategy with feeding from the edge to the center of the microcone and machining allowance of 60  $\mu\text{m}$ . Based on this processing technology, porous glass emitters are fabricated. During testing, each emitter demonstrates a measured thrust of 90  $\mu\text{N}$  under a 3.0-kV condition.

**Key words** laser technique; porous glass; ultrafast laser; microcone array; electrospray emitter