

# 离子液体电喷雾推力器发射极制造技术现状及展望

李小康<sup>1</sup>, 郭大伟<sup>1\*</sup>, 吴建军<sup>1</sup>, 杨云天<sup>2</sup>, 车碧轩<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073; 2. 中国人民解放军32032部队, 北京 100080)

**摘要:**离子液体电喷雾推力器是目前热点研究的一种静电式微电推进装置,影响该类推力器性能的核心部件之一是发射极,其制造技术已成为离子液体电喷雾推力器研制的关键技术之一。结合离子液体电喷雾推力器工作原理和发展历程,分析了毛细管型、外部浸润型和多孔材料型三类发射极的推进剂运输特点和制造需求;回顾和梳理了三类发射极的典型制造材料与相关制造技术,总结评述了离子刻蚀等不同制造技术的优缺点;针对较为成功的基于多孔材料的超快激光制造技术,从发射极设计、新型材料制备、超快激光与材料作用机理等角度提出了发展建议。

**关键词:**电推进;电喷雾推力器;发射极;制造;离子液体

中图分类号:V439 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2025)01-067-16



## Review and prospect of emitter manufacturing technology for ionic liquid electrospray thruster

LI Xiaokang<sup>1</sup>, GUO Dawei<sup>1\*</sup>, WU Jianjun<sup>1</sup>, YANG Yuntian<sup>2</sup>, CHE Bixuan<sup>1</sup>

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;  
2. The PLA Unit 32032, Beijing 100080, China)

**Abstract:** ILET(ionic liquid electrospray thruster), one of the electrostatic micro-thrusters, has recently become a hot topic for researchers. The emitter is the core component that significantly affects the thruster performance, so its manufacturing is considered as one of the key technologies for the ILET development. Combined with the operating principle and the development history of ILET, the characteristics of propellant transport and manufacturing requirements for all three types of emitters, namely capillary, externally-fed and porous emitters, were analyzed. Based on this, the typical manufacturing materials and related manufacturing technologies were reviewed, while the advantages and disadvantages of different manufacturing technologies such as ion etching were summarized and remarked. For the proven manufacturing method of ultrafast laser ablation based on porous material, the development suggestions including emitter design, novel material fabrication, and study on laser-matter interaction mechanism were given.

**Keywords:** electric propulsion; electrospray thruster; emitter; manufacturing; ionic liquid

随着电子、通信以及微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)技术的进步,通过采用标准模块化、功能软件化等设计思想,研究者不断提高卫星的功能密度,减轻整星质量。其中,质量在1~100 kg的卫星称为微纳卫星<sup>[1]</sup>。由于具有研制周期短、可大规模制造、成本低的显著优势,微纳卫星已经在空间通信、遥感和空间科学实验等领域得到应用。随着人工智能技术的发

展,微纳卫星通过构建集群编队或星座进行网络化自主运行,在实现传统大卫星功能的同时,还能够提升系统的弹性。因此,微纳卫星已成为当今航天器研制的一种新趋势,受到了世界各国航天界的普遍重视。仅2021年一年,发射的微纳卫星就有300颗,占当年航天器发射总数量的16.46%<sup>[2]</sup>。

尽管如此,受微纳卫星平台体积和质量约束,仅有不足5%的微纳卫星拥有推进系统。推进系

收稿日期:2022-08-15

基金项目:国家自然科学基金创新研究群体资助项目(T2221002)

第一作者:李小康(1983—),男,陕西汉中,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:lxk0330@163.com

\*通信作者:郭大伟(1987—),男,吉林榆树人,讲师,博士,Email:guodawei11@nudt.edu.cn

引用格式:李小康,郭大伟,吴建军,等.离子液体电喷雾推力器发射极制造技术现状及展望[J].国防科技大学学报,2025,47(1):67-82.

Citation:LI X K, GUO D W, WU J J, et al. Review and prospect of emitter manufacturing technology for ionic liquid electrospray thruster[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(1): 67-82.

统是实现卫星大气阻力补偿、轨道机动、卫星编队及星座内星间相对位置保持和分布式轨道维护的关键<sup>[3]</sup>。微纳卫星平台体积小、质量轻,携带推进剂有限,因此与之匹配的推进系统应具有结构紧凑、低功耗和高效率的特点。

目前,研究人员已经提出了多种可用于微纳卫星平台的推进系统方案<sup>[4-8]</sup>。其中,电喷雾推进在经历了曲折的发展历程后,从 20 世纪 90 年代开始,在微推进、新材料、离子液体、高性能电源等技术进步的推动下,取得了巨大进展,目前已达到空间应用水平<sup>[9]</sup>。离子液体电喷雾推力器(ionic liquid electrospray thruster, ILET)的工质采用离子液体,其具有高电导率、极低饱和蒸汽压、在真空环境易于存储等特点。相对其他小型化电推进系统,ILET 具有以下优势:

1) 结构紧凑。离子液体可通过毛细作用实现供给,大幅简化推力器供给系统;由于采用纯静电方式加速,工作时不用附加复杂电磁场。

2) 无需中和器。离子液体由阴阳离子组成,通过施加不同极性的工作电压能够分别提取阴、阳离子,可以实现电荷自中和。

3) 比冲高。纯离子模式下比冲可达到 1 000 ~ 8 000 s,且比冲和推力可通过调节工作电压灵活控制。

4) 效率高。离子液体由自由态的阴阳离子构成,无须消耗额外功率用于气体推进剂的电离。

5) 易模块化。ILET 可以在保持高比冲和高效率的情况下,通过增加单位面积上的发射体数量放大推力,从而提高推力密度。

上述特点与微纳卫星平台的需求极为契合。目前该型推力器已完成在轨飞行验证,取得的相关研究成果充分展示了其在微纳卫星上的应用优势。

ILET 中,对推力器性能具有决定性影响的核心部件为发射极<sup>[10-11]</sup>,目前针对其的研究多集中于此。因此,本文从离子液体电喷雾的工作原理出发,综述了 ILET 三种典型发射极的制造技术研究现状并分析了优缺点。同时,着重对热点研究的多孔材料型发射极的制造关键技术进行了详细梳理和分析,并对其发展方向进行了展望,以期 ILET 技术发展提供有益借鉴。

### 1 离子液体电喷雾推力器工作原理

本质上,离子液体电喷雾推力器是一种以离子液体为推进剂、从液体中抽取带电粒子并加速的静电式电推力器,由发射极、提取极和贮箱等组

成,其中发射极包含多个发射体构成的阵列,其主要结构与工作原理如图 1 所示。贮箱中的离子液体推进剂以一定方式输运到各个发射体尖端,在强静电场作用下,沿电场方向伸长并形成被称为“泰勒锥”的稳定锥形结构<sup>[12]</sup>。当泰勒锥表面的电场强度超过某一阈值时,带电粒子(成分可能包含离子、离子和带电液滴、带电液滴)从泰勒锥中被抽取出来,随后在静电场的作用下从提取极的微孔中加速喷出,从而获得推力。根据束流中带电粒子的组分,可以将推力器的工作模式分为液滴模式、液滴-离子混合模式、纯离子模式,如图 2 所示。

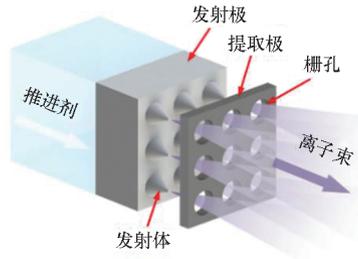


图 1 ILET 主要结构与工作原理

Fig. 1 Main components and operating principle of ILET

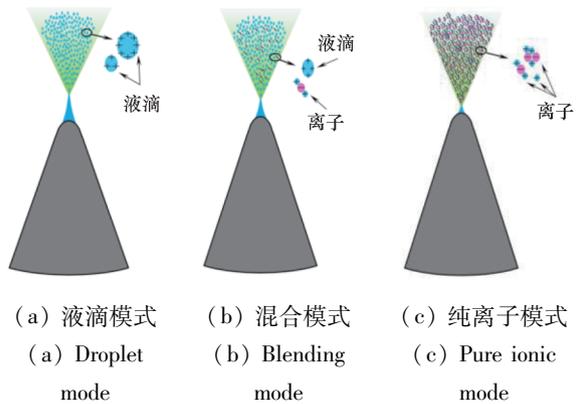


图 2 电喷雾推力器发射模式

Fig. 2 Emission mode of electrospray thruster

早期的电喷雾推力器采用电解质溶液作为工质。Delamora 等基于大量对比实验数据和电流体动力学理论<sup>[13]</sup>,建立了液滴模式下的发射电流与电解质溶液物性及供给流量间的对应关系模型。随后,Gamero-Castaño 首次在实验中发现液滴-离子混合模式<sup>[14]</sup>,并证实了提高电解质溶液的电导率和降低供给流量有利于离子引出。受电解质溶液电导率较低的限制,随着供给流量的继续减小,束流中的离子电流比例增加到一定程度后,带电粒子无法稳定引出。

在此基础上,2003 年 Romero-Sanz 将工质种类转向电导率更高的离子液体<sup>[15]</sup>,通过调节供给

流量,首次实现了液滴-离子混合模式向纯离子模式的转变。然而,由于毛细管发射体的流动通道尺寸较大、流动阻抗较小,难以进一步减小推进剂流量,因此只有少数高电导率的离子液体如1-乙基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐(1-ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate, EMI-BF<sub>4</sub>)才能实现稳定的纯离子引出模式<sup>[16]</sup>。Lozano 对工作在三种模式下的推力器性能进行了理论对比分析,结果表明在相同工作参数下,工作在纯离子模式的推力器比冲更大、效率也更高<sup>[17]</sup>。此后,研制能够稳定工作在纯离子模式的离子液体电喷雾推力器成为重要的研究方向。

从其工作原理可见,发射极是离子液体电喷雾推力器的核心关键部件,其主要作用是离子液体从推进剂贮箱输运至发射体尖端提供通道,并增强其尖端的电场强度,同时为泰勒锥的形成提供锚点。根据推进剂输运到发射体尖端的方式不同,发射体可以分为毛细管型、外部浸润型和多孔材料型,如图3所示。毛细管型发射体由单一的内部毛细流动通道实现离子液体输运,流动阻抗较小,难以实现被动供给和纯离子发射模式;外部浸润型发射体由发射体表面上的半开放性微流动通道运输液体,流动阻抗较大,易于实现纯离子发射模式,但发射电流较小;多孔材料型发射体由其内部相互贯通的毛细通道实现液体输运,易于实现稳定的被动供给,能够实现纯离子发射,并且发射电流高于外部浸润型发射体。

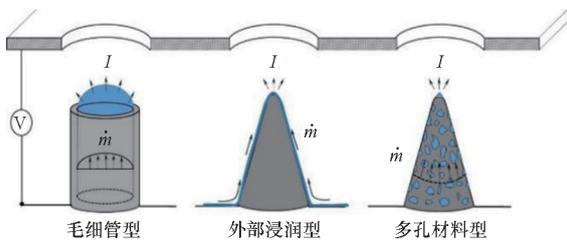


图3 三种典型发射体

Fig. 3 Three typical types of emitter

就发射极制造需求而言,一方面,提高发射体的流动阻抗,不仅有利于实现高比冲的纯离子发射模式,还能抑制推进剂溢出,避免提取极短路问题;另一方面,一般单个发射体所产生的推力仅数十 nN 量级,无法满足微纳卫星实际任务需求,需要提高发射极上多个发射体的阵列密度。

因此,后文述及各类型发射体的制造技术中,均是在保证制造精度的前提下,将提高发射体的流动阻抗、阵列密度和一致性作为目标。

## 2 发射极制造技术现状

### 2.1 毛细管型发射极制造技术

毛细管型发射体构型是 ILET 最早采用的发射极形式。离子液体通过发射体内部的毛细管道向发射体尖端供应。发射体尖端尺寸对于其尖端电场强度具有重要影响,因此制造时需减小其尖端尺寸;此外,由于毛细管内部流动阻抗较小,为实现纯离子发射模式,必须通过提高毛细管的长径比等方式提升流动阻抗。因此,毛细管型发射极制造研究主要围绕在保证毛细管制造精度前提下如何提升毛细管流动阻抗。

#### 2.1.1 硅基材料离子刻蚀技术

发射极精密制造的需求,与半导体工业中芯片加工的技术要求类似。因此2004年,英国南安普顿大学的 Paine 等首先探索了基于硅衬底材料的毛细管型发射极离子刻蚀加工技术,为该型发射极的研制开启了大门<sup>[18]</sup>。这一方法随后逐渐由瑞士洛桑联邦理工学院的研究者发展<sup>[19-23]</sup>,形成了包括毛细管通道的深反应离子刻蚀(deep reactive ion etching, DRIE)、毛细管通道上游推进剂蓄液池刻蚀、发射体外形刻蚀加工的典型制造方法,如图4所示。

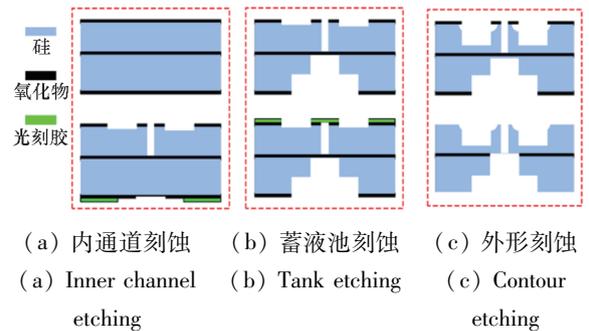


图4 毛细管型发射极离子刻蚀制造步骤<sup>[22]</sup>

Fig. 4 Fabrication steps for the capillary emitters ion etching<sup>[22]</sup>

2009年,Krpoun 等实现了19个阵列式毛细管型发射极的加工<sup>[19-20]</sup>。毛细管间距为250 μm,高度为70 μm,通道直径为24 μm,如图5所示。为了调整毛细管通道内的流动阻抗,Krpoun 将标称5 μm(平均半径为4.74 μm)的石英微球填充至毛细管通道中,通过硅烷化处理固定并形成多孔微通道,采用EMI-BF<sub>4</sub>实现了纯离子发射。然而,这一类微球填充式的毛细管由于受微球直径尺寸分布和填充工艺的影响,各发射体内部产生的多孔通道结构存在较大的差异性,孔隙率介于0.25~0.65,流动阻抗的变化范围接

近 1 000%<sup>[22]</sup>,需要主动调节毛细管上游供给压力才能实现各发射体稳定发射。

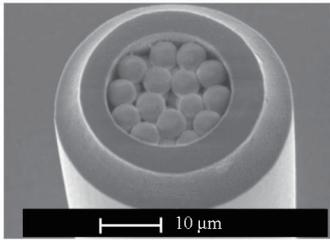
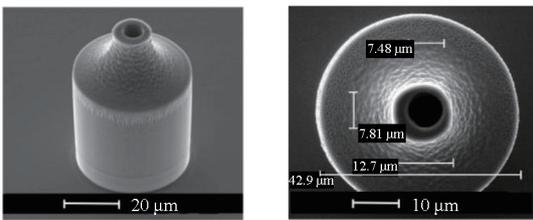


图 5 5 μm 石英微球填充的毛细管发射体<sup>[20]</sup>

Fig. 5 Capillary emitter filled with 5 μm silica microspheres<sup>[20]</sup>

在 Hagen-Poiseuille 流动假设下,毛细管的流动阻抗与其通道内径的四次方成反比、长度成正比。通过减小毛细管内径,可以实现与添加微球颗粒同等的流动阻抗提升效果。Ryan 通过计算发现<sup>[24]</sup>,所需毛细管通道长度约 100 μm,直径约 5 μm。由于大长径比给毛细管刻蚀加工带来了挑战,Dandavino 实际实现的毛细通道长度约 100 μm、内径约 8 μm<sup>[25]</sup>,毛细管阵列密度为 213 个/cm<sup>2</sup>。但其加工精度较差,从扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)照片(见图 6)中可以看到,毛细管出口处存在缺陷。此外,由于长径比不足导致通道内流动阻抗不足,需要采用导电率更高(1.85 S/m)和表面张力更大(41.9 mN/m)的离子液体 EMI-SCN 实现纯离子发射<sup>[26]</sup>。



(a) 内径 8 μm、高 100 μm 的毛细管  
(a) Capillary with an inner diameter of 8 μm and outer height of 100 μm  
(b) 发射体尖端细节  
(b) Detail of the sharpened emitter tip

图 6 文献[25]的毛细管发射体

Fig. 6 Capillary emitter from reference [25]

为了进一步提升电喷雾推力器的推力密度、降低离子提取电压,日本横滨国立大学学者基于双栅 Spindt 型场致发射阴极制造方法<sup>[27-28]</sup>,结合等离子体刻蚀工艺,探索了高阵列密度的纳米毛细管型发射极与提取极一体化集成加工工艺,其制造方法如图 7 所示。

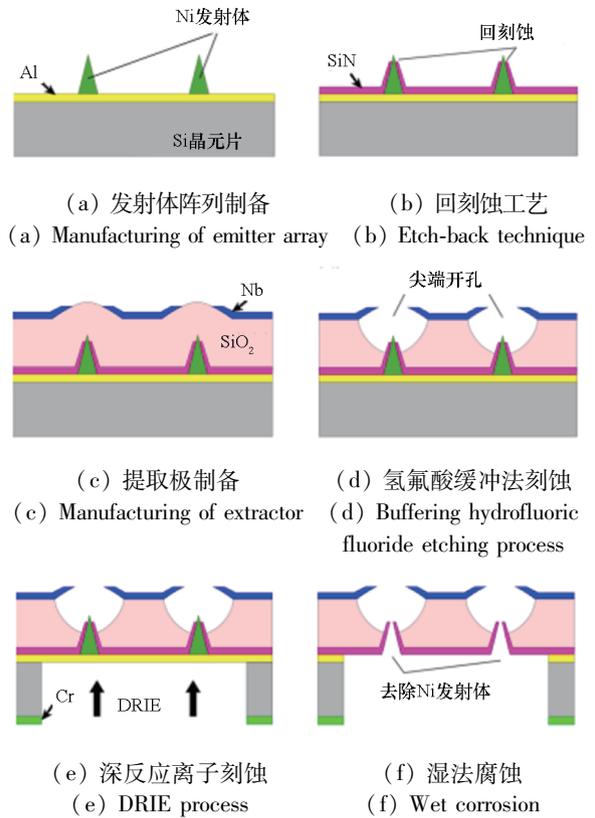
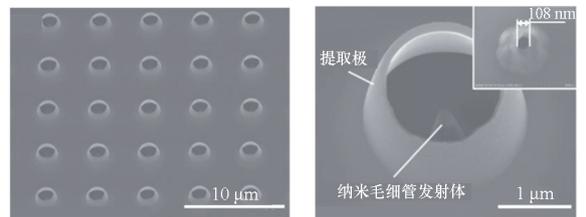


图 7 纳米毛细管阵列发射极加工流程<sup>[28]</sup>

Fig. 7 Fabrication procedure of the nano-capillary emitter array<sup>[28]</sup>

采用该方法,横滨国立大学的研究人员在 300 μm 区域内实现了 5 μm 间距的纳米毛细管阵列发射极加工,毛细管出口直径约 100 nm,底部入口直径约 700 nm,如图 8 所示。针对 1-乙基-3-甲基咪唑二氰胺盐离子液体的发射特性测试结果表明,离子发射启动电压约为 60 V,当工作电压为 75 V 时,相应的发射电流密度约为 43 mA/cm<sup>2</sup>,其发射特性远高于目前传统 ILET 的水平。然而,该种发射极的致命缺陷在于受 Ni 锥和 SiN 层及回刻蚀工艺精度的影响,各发射体形状偏差较大,毛细管出口直径尺寸的标准偏差约为 25%,这势必会导致离子发射时严重的不均匀



(a) 5 μm 间距发射体阵列  
(a) 5 μm pitch emitter array  
(b) 发射体与提取极细节  
(b) Detail of one set of an emitter and extractor

图 8 文献[28]中纳米毛细管发射体阵列

Fig. 8 Nano-capillary emitter arrays from reference [28]

性。此外,发射极与提取极间距较小,尽管极大地减小了启动工作电压,但增加了因离子液体溢出带来的短路失效风险。

### 2.1.2 光致结构聚合物材料光刻技术

因与现有光刻技术的兼容性,光致结构聚合物成为发射体制造技术的另一种材料选择。按照制造技术的维度,可分为二维平面光刻技术和三维微光刻技术。

#### (1) 二维平面光刻技术

二维平面光刻技术源自现有较为成熟的半导体加工领域,采用SU-8光刻胶等易产生光化学反应的物质作为基础材料,通过曝光、显影等步骤实现发射体的精密制造(如图9所示),并且可以通过适当的多层堆叠,实现提取极支撑结构等零件的一体化加工<sup>[29]</sup>。

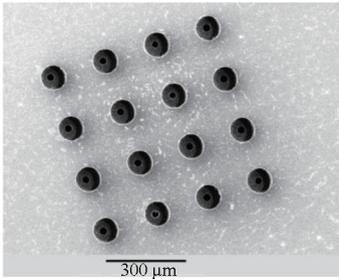


图9 二维平面光刻制造的4×4阵列式发射极<sup>[29]</sup>

Fig. 9 A four by four emitter array made by 2D planar photolithography<sup>[29]</sup>

#### (2) 三维微光刻技术

三维微光刻技术又称微立体光刻技术、双光子光刻技术,是阵列式毛细管型发射极加工的一种新尝试<sup>[30-31]</sup>,其工作原理如图10所示。尽管单个近红外光子的能量无法在光刻胶中触发光化学反应,但激光经显微光学镜组聚焦后,在焦点周围的小体积元中可达到极高强度以致发生双光子

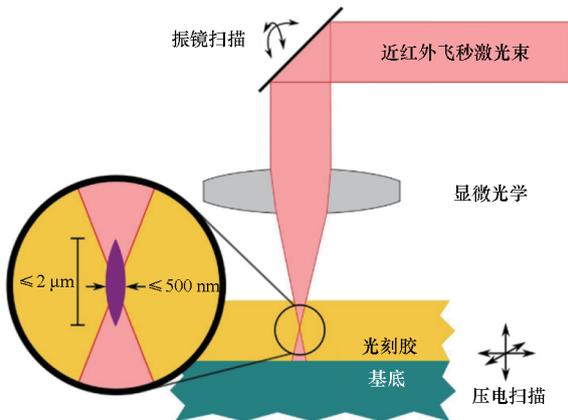


图10 双光子光刻工作原理<sup>[31]</sup>

Fig. 10 Principle of two-photon lithography<sup>[31]</sup>

过程,而两个光子结合起来的能量足以触发光化学反应。作用体积元的纵向尺寸仅约 $2 \mu\text{m}$ ,横向尺寸则小于激光波长(约 $500 \text{ nm}$ ),因此通过激光焦点在光刻胶内进行三维扫描,能够创建高精度的三维结构。

基于微光刻技术,德国吉森大学开展了毛细管型发射体加工<sup>[31]</sup>,通过对比分析不同孔径发射体的发射特性实验测量结果,总结得出毛细管的直径应在 $10 \mu\text{m}$ 左右,高度不小于 $30 \mu\text{m}$ 。研究者采用商用设备实现了直径 $10 \mu\text{m}$ 、高度为 $50 \mu\text{m}$ 的发射体阵列加工,如图11所示。相对于硅基材料的离子刻蚀加工,三维微光刻技术极大地提高了毛细管构型的设计和加工的灵活性,能够实现通道壁面微结构定制化加工,改善其润湿性。但是该种方法的加工效率低,并且难以实现大幅面的高精度发射体阵列加工。

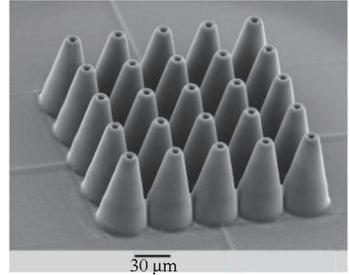


图11 三维微光刻加工的5×5阵列式发射极<sup>[31]</sup>

Fig. 11 A five by five emitter array made by 3D microlithography<sup>[31]</sup>

总体而言,目前的制造技术能够按照毛细管型发射体阻抗需求,实现阵列式发射极加工。但其不足之处在于:第一,现有各种毛细管型发射体制造技术仍然不同程度地存在阻抗不足、加工效率较低等缺陷;第二,由于毛细管型发射体只具有单一的流动通道,存在堵塞失效的风险;第三,受毛细管通道的润湿性影响,推进剂从贮箱至发射体尖端运输的过程中无法全程依靠毛细作用实现被动供给,因此需要增加与之相适应的推进剂贮供系统,增加了系统的复杂度。

## 2.2 外部浸润型发射极制造技术

对于采用外部浸润型发射极的ILET,离子液体直接覆盖在发射体的外表面,基于液体表面张力实现被动供给。其运输性能高度依赖于发射体外表面的微观形貌,并对发射特性具有重要影响。因此,该类型发射极制造必须充分考虑其表面微通道的结构特性和连续性,以保证离子液体向发射体尖端的稳定运输。同时,对于高密度发射体阵列,还要确保各发射体的制造的一致性。

### 2.2.1 离子刻蚀及表面改进技术

目前对于外部浸润型发射极,主要的制造手段是采用离子刻蚀技术,在硅材料上进行发射体阵列加工,其工艺流程与毛细管型刻蚀技术近似。但由于硅表面对离子液体的润湿性较差,为了实现推进剂向发射体尖端的稳定供给,发射体加工完成后还需进行表面粗糙化处理,以改善离子液体的运输特性<sup>[32]</sup>。

美国麻省理工学院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT) 研究了火山式、铅笔式和刃口式外部浸润型发射体阵列制造技术<sup>[33-35]</sup>,采用基于离子刻蚀方法的黑硅表面处理工艺,在发射体表面形成纵横交替的纳米微通道结构,并探索优化了黑硅工艺参数和反应时间,将发射体与  $\text{EMI-BF}_4$  的接触角由未处理的原始硅的  $27^\circ$  减小到  $0.5^\circ$ ,极大地增加了发射体的润湿性。图 12 展示了两种 MIT 制造的发射体阵列。

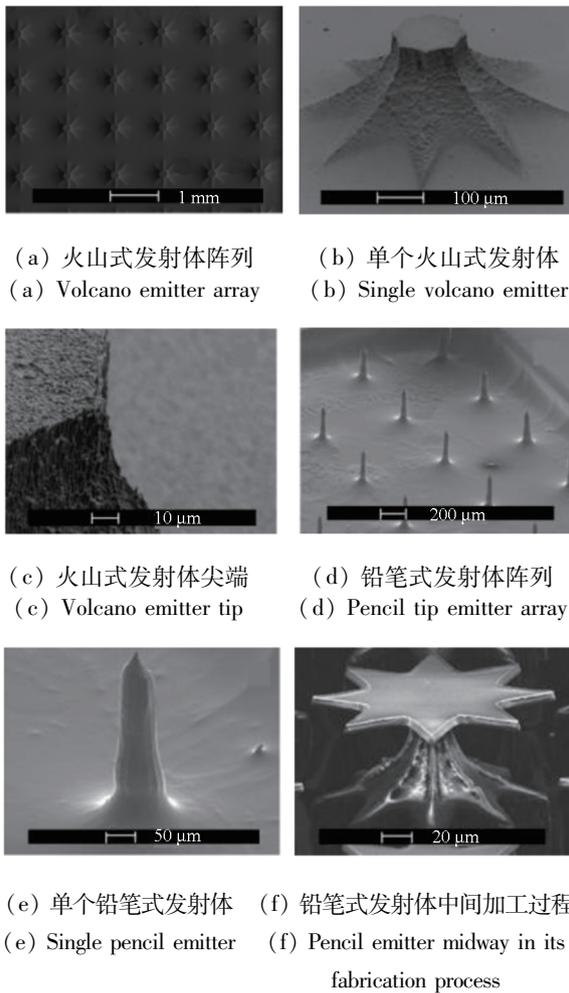
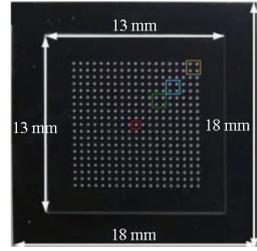


图 12 MIT 制造的外部浸润型发射体阵列<sup>[35]</sup>

Fig. 12 Externally-fed emitter array made by MIT<sup>[35]</sup>

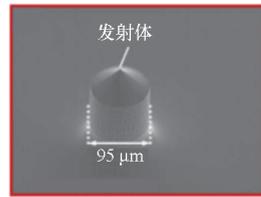
采用类似的刻蚀制造方法,日本横滨国立大学进行了锥形阵列式发射体的制造加工,通过优

化刻蚀步骤,将各向同性蚀刻工艺分为两步,最终获得了较为均匀一致的发射体尖端曲率半径。图 13 展示了该研究团队制造的发射体阵列照片<sup>[36]</sup>。



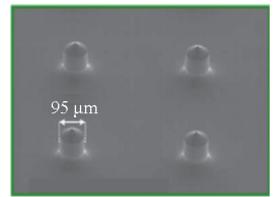
(a) 发射体阵列照片

(a) Image of emitter array



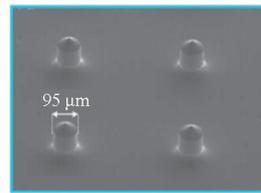
(b) 中心处发射体

(b) Center emitter



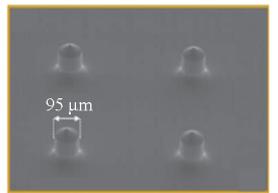
(c) 距离中心 2.12 mm 的 4 个发射体

(c) Four emitters at distances 2.12 mm from the center of the array



(d) 距离中心 3.54 mm 的 4 个发射体

(d) Four emitters at distances 3.54 mm from the center of the array



(e) 距离中心 5.66 mm 的 4 个发射体

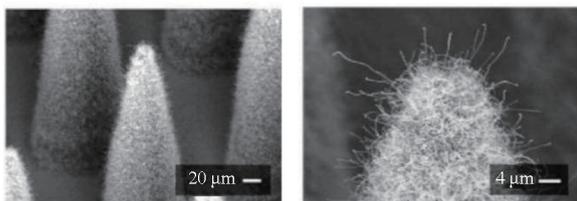
(e) Four emitters at distances 5.66 mm from the center of the array

图 13 日本横滨国立大学制造的 361 个发射体阵列<sup>[36]</sup>

Fig. 13 A fabricated chip with 361 emitters made by Yokohama National University in Japan<sup>[36]</sup>

离子刻蚀方法产生的黑硅薄层特性难以通过工艺参数进行调控,导致其作为芯吸层厚度有限,限制了发射体推进剂运输能力。作为另一种方案,Hill 等采用等离子体增强化学气相沉积方法<sup>[37]</sup>,通过在硅发射体表面生长碳纳米管 (carbon nanotube, CNT) 产生多孔微通道 (如图 14 所示),提升了发射体表面推进剂的运输能力。通过优选 CNT 直径和调控生长密度,能够实现 CNT 层的孔隙率调控,进而实现流动阻抗调

节;产生的 CNT 芯吸层厚度远大于黑硅工艺获得的层厚,有利于提升推进剂的供给流量;同时,该方法为保形生长,并不破坏发射体原有构型。不足之处是采用该方法生长的 CNT 附着性较差,在电场力的作用下容易发生脱落。研究人员在离子发射特性实验后的提取极表面和离子束流接收板上均观测到了脱落的碳纳米管,并且伴有明显的 CNT 刻蚀痕迹。在实际的推力器应用中,随着推力器工作时间的增加,将面临提取极侵蚀以及发射体供给特性降级等问题,对推力器性能和寿命将产生较大的负面影响。

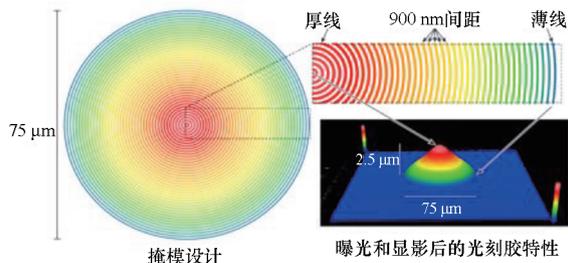


(a) 生长碳纳米管的发射体 (b) 发射体尖端细节  
(a) Emitter coated with CNTs (b) Detail of the emitter tip

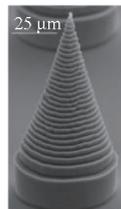
图 14 具有碳纳米管层的发射极与其尖端的特写图片<sup>[37]</sup>

Fig. 14 A emitters array coated with CNTs, along with close-up images of an emitter tip<sup>[37]</sup>

MIT 的研究人员基于 3D 灰度光刻方法(3D grayscale photolithography),探索了实心锥形硅基发射体阵列的加工技术<sup>[38]</sup>,如图 15 所示。采用该方法可以获得较高的发射体阵列密度和加工一致性。但是,采用该方法加工的发射体表面具有台阶状的表面微观结构。若采用传统的等离子体反应刻蚀黑硅方法,难以对发射体表面实现一致且各向均匀的表面处理,并且推进剂在向尖端输运过程中容易驻留在台阶相接处,影响推进剂供给的连续性。为解决该表面后处理问题,Siegel 探索了金属辅助化学刻蚀的黑硅工艺<sup>[39]</sup>,得到的阵列式发射极如图 16 所示。其通过控制刻蚀时间、溶剂浓度、纳米颗粒催化剂沉积,在发射体表面实现了具有较好空间均匀性的纹理结构,并验



(a) 3D 灰度光刻制造技术原理  
(a) Principle of the 3D grayscale lithography manufacturing technology



(b) 刻蚀后的 Si 特性  
(b) Properties of Si after etching

图 15 3D 灰度光刻方法<sup>[38]</sup>

Fig. 15 The 3D grayscale lithography<sup>[38]</sup>

证了其润湿性。但是在实际离子发射特性实验中,发现离子发射过程并不稳定,出现了发射电流急剧衰减的情况,初步分析有可能是发射体的流动阻抗过大,导致离子液体供给不稳定。

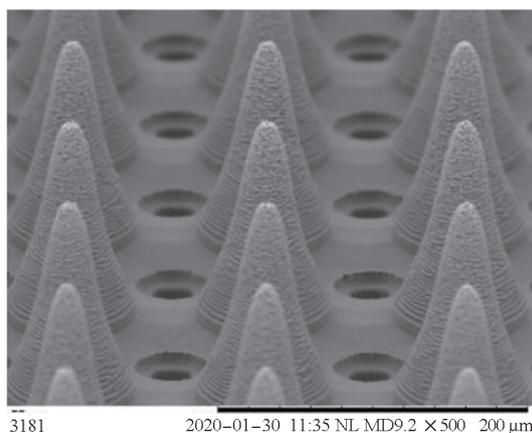


图 16 3D 灰度光刻技术获得的阵列式发射极<sup>[39]</sup>

Fig. 16 Emitter array formed by 3D grayscale photolithography<sup>[39]</sup>

### 2.2.2 增材制造技术

MIT 的 Máximo 对阵列式锥形发射体的增材制造技术进行了研究<sup>[40]</sup>,采用黏合剂喷射成型技术和光固化技术,分别实现了 316L 不锈钢和 FunToDo 工业混合树脂(FunToDo industrial blend resin, FTD-IB)材料的发射极阵列制造。发射体表面采用水热法将氧化锌纳米线(zinc oxide nanowire, ZnONW)生长在其表面形成绒状线丛,产生具有亚微米量级的多孔通道芯吸层,为推进剂输运提供流动通道。所制造的发射体如图 17 所示,316L 材料和工业混合树脂材料均可明显观察到发射体表面的绒状线丛。发射体阵列采用 EMI-BF<sub>4</sub> 实现了纯离子发射。

受 3D 打印技术加工原理以及相应设备精度制约,不锈钢发射体加工完成后需进行电化学抛光,去除表面杂质并进行尖端锐化。此外,3D 打印无法实现大幅面的高精度加工,导致发射体尖



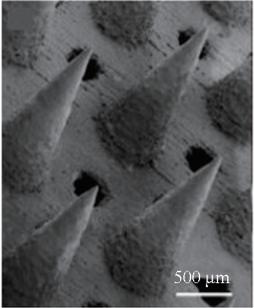
(a) 3D 打印 316L 不锈钢发射极

(a) 3D-printed emitters made of stainless steel 316L



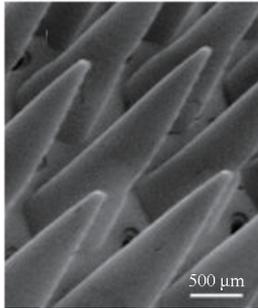
(b) 3D 打印 FTD-IB 发射极

(b) 3D-printed emitters made of FTD-IB



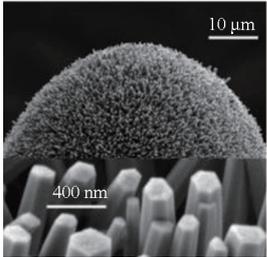
(c) 发射体阵列 SEM 照片 (316 L)

(c) SEM image of emitter array (316L)



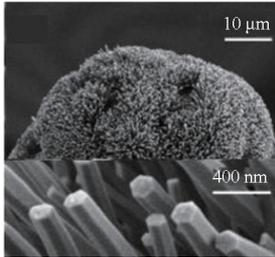
(d) 发射体阵列 SEM 照片 (FTD-IB)

(d) SEM image of emitter array (FTD-IB)



(e) 发射体尖端及 ZnONW 涂层 SEM 照片 (316L)

(e) SEM image of an emitter tip and the coated ZnONW forest (316L)



(f) 发射体尖端及 ZnONW 涂层 SEM 照片 (FTD-IB)

(f) SEM image of an emitter tip and the coated ZnONW forest (FTD-IB)

图 17 增材制造的外部浸润型发射体<sup>[40]</sup>

Fig. 17 Additively manufactured externally-fed emitters<sup>[40]</sup>

端尺寸偏大,因此推力器正常工作所需的电压过高。

综上所述,外部浸润型发射体阵列的制造工艺相对成熟,并且通过多种表面后处理方法,在其表面形成具有半开放性特征的推进剂输运芯吸层,从而实现推进剂的被动供给,同时可以消除毛细管型发射体的堵塞问题。但其不足之处在于:首先,芯吸层的输运特性不仅与表面后处理工艺

紧密相关,而且受发射体的几何外形和表面微结构影响,仍需进一步优化;其次,与毛细管型发射体一样,基于该型发射极的电喷雾装置作为实际推力器使用,还面临着推进剂从推进剂贮箱向发射体底部均匀供给的难题。

### 2.3 多孔材料型发射极制造技术

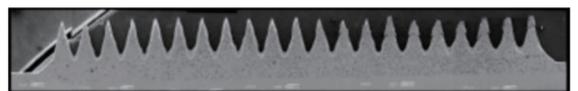
多孔材料型发射体在其内部具有相互贯通的毛细微通道,能够避免毛细管型发射体存在的流动通道易堵塞问题;同时相对于外部浸润型发射体,其可以提供较大的供给流量以获得较大发射电流,是目前最具实际应用前景的发射极,也是 ILET 的热点研究方向。然而,发射体尖端形貌影响该处局部电场分布和强度,进而影响发射起始电压和泰勒锥锚点位置。因此,多孔材料型发射体要求具有较高的加工精度,同时为保证发射均匀,各发射体要具有较高的一致性。但是,由于多孔材料结构的特殊性,高精度、高阵列密度发射极制造技术尚未成熟。MIT 对该型发射极进行了系统性研究,在阵列式发射极制造方面做了许多开创性研究。

#### 2.3.1 多孔金属发射极制造技术

##### (1) 电化学刻蚀

2007 年,Legge 等采用电化学刻蚀方法<sup>[41]</sup>,在多孔钨片(孔径为 0.5 ~ 2 μm,孔隙率为 0.30)上实现了一维片状发射体阵列加工,发射体尖端半径 10 ~ 30 μm。采用 EMI-BF<sub>4</sub> 作为推进剂实现了被动供给模式下的纯离子发射,发射电流可达到数十 μA,每一发射体 1 ~ 1.5 μA<sup>[42]</sup>(如图 18 所示)。但尝试增加发射体阵列密度时,加工的一致性和均匀性难以保持,各发射体的加工差异变得显著。Legge 的尝试及相关研究成果促进了后续对多孔材料发射极制造方法的探索。

一维片状发射极在进行推力器集成时,发射极单元间的支撑和装卡结构限制了发射体阵列密度的进一步提升。这一现实问题促使研究者继续探索适合于实现高发射体阵列密度的二维阵列式



(a) 发射体间距 958 μm,密度为 1 tips/mm

(a) Emitter spacing of 958 μm and density of 1 tips/mm



(b) 发射体间距 730 μm,密度为 1.33 tips/mm

(b) Emitter spacing of 730 μm and density of 1.33 tips/mm



(c) 发射体间距 500 μm,密度为 2 tips/mm  
(c) Emitter spacing of 500 μm and density of 2 tips/mm

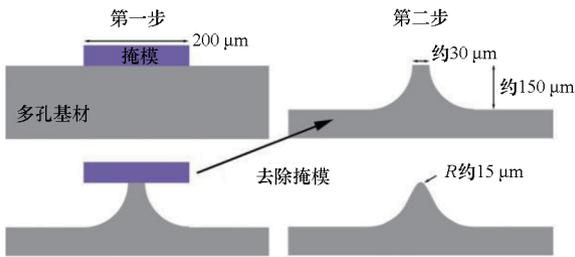
图 18 具有不同发射体阵列密度的一维发射极阵列<sup>[42]</sup>

Fig. 18 Linear emitter arrays with different linear packing densities<sup>[42]</sup>

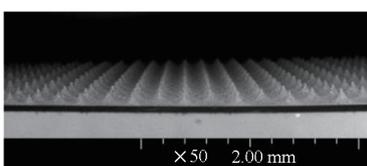
发射极制造方法。Courtney 等对 Legge 的化学刻蚀方案进行了改进<sup>[43]</sup>,采用干式掩模技术,在孔径 0.5 μm 的多孔钨板上实现了二维发射体阵列加工。其发射体尖端半径约 15 μm,高度 150 ~ 200 μm,纯离子发射模式下的单个发射体发射电流在数百 nA 到 1 μA 间。电化学刻蚀多孔钨时,所使用的碱性电解液与掩模材料存在相容性问题,导致可选择的高分辨率干式抗蚀剂种类有限,因此多孔钨发射极中各发射体的加工精度和一致性不高。

相较而言,与酸性电解液相容的高精度抗蚀剂可选择的种类更多。为进一步提高发射体的电化学刻蚀加工精度,Courtney 将多孔钨材料更换为可在酸性电解液中刻蚀的多孔镍<sup>[44-45]</sup>,在孔径 5 μm 的多孔镍板上实现了 480 个间距为 450 μm 的二维发射体阵列加工(见图 19)。发射体高度为 150 ~ 170 μm,发射体尖端半径为 5 ~ 20 μm。

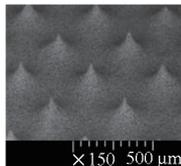
尽管如此,受湿式加工方法自身机理制约,发射体加工分辨率为 10 μm 量级,缺乏良好的一致性和空间均匀性,并且加工重复性较差。



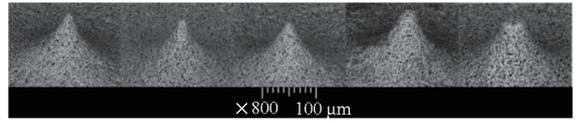
(a) 制造流程  
(a) Manufacturing process



(b) 发射体阵列 SEM 照片  
(b) SEM image of emitter array



(c) 发射体阵列局部 SEM 照片  
(c) SEM image of local emitter array



(d) 单个发射体 SEM 照片  
(d) SEM image of an emitter

图 19 基于电化学刻蚀法制造的阵列式发射极<sup>[45]</sup>

Fig. 19 Emitter array formed by electrochemical etching process<sup>[45]</sup>

(2) 电火花加工

上海交通大学康小明课题组针对多孔金属楔形发射极开展了加工工艺研究<sup>[46-47]</sup>。制造时先采用电火花线切割的方法进行阵列式发射极构型初加工;由于电火花线切割过程产生的熔融物易堵塞发射体表面的孔道,因此需采用电化学抛光方法对其进行后处理。与电化学刻蚀加工类似,电化学抛光过程存在潜在的加工一致性和可重复性问题。

2.3.2 烧结式非金属发射极制造技术

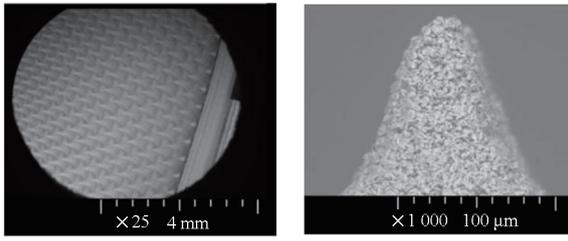
多孔金属材料涉及电化学刻蚀或电化学抛光等湿法制造技术,发射体阵列的总体制造效果受到一定制约,因此研究者开始转而考虑其他类型的多孔材料。

Coffman 等通过分析多孔材料发射体中离子液体的阻抗和发射电流<sup>[48]</sup>,发现由离子液体所引起的电势差为 mV 量级,因此发射极基材的导电性并不是必需的。这一认识为选择与高精度干式加工方法相容的多孔材料提供了理论依据,使得多孔材料的选项拓展到陶瓷、玻璃等非导电材料范围。

(1) 超快激光加工

陶瓷或玻璃材料的微观结构极适合干式的激光加工。超快激光具有脉冲能量低和脉冲宽度窄的特点,与材料相互作用的时间尺度远小于材料的热扩散速度。根据材料性质,调制激光能量密度和脉冲频率等参量能够实现无热影响的“冷加工”效果;通过对激光焦点扫描间距和扫描时间等工艺参量进行优化设计,能够实现与等离子体刻蚀加工精度相当的 3D 微结构。

Coffman 等针对粉末烧结的多孔硼硅酸盐玻璃(孔径 1 ~ 2 μm),采用纳秒激光在其上实现了 480 个发射体的二维阵列加工,如图 20 所示<sup>[48]</sup>。发射体间距为 0.45 mm,高度为 150 ~ 250 μm,尖端曲率半径约 30 μm,采用 EMI-BF<sub>4</sub> 测试的总离子发射电流约 150 μA,推力约 12.5 μN。



(a) 硼硅酸盐玻璃多孔材料发射体阵列  
(b) 单个发射体的特写放大  
(a) Emitter array made of borosilicate glass porous material  
(b) Close up magnification of a single emitter

图 20 纳秒激光加工的硼硅酸盐玻璃发射体阵列<sup>[48]</sup>  
Fig.20 Borosilicate emitter array manufactured by nanosecond laser ablation<sup>[48]</sup>

上海交通大学的陆子杰等<sup>[49]</sup>通过对比分析不同扫描方法和加工余量对微锥阵列几何特性的影响,优化了加工工艺,使得微锥顶部的平均尺寸能够减小到 20 μm,成功制备了微锥密度为 2 174 个/cm<sup>2</sup> 的大面积发射极微锥阵列,如图 21 所示。此外,将微锥加工技术应用于发射极的一体化加工,制备了 6 个相同的发射极。将这些发射极集成到电喷雾推力器中,在 3.0 kV 的工作电压下,单个发射极产生的推力约为 90 μN。

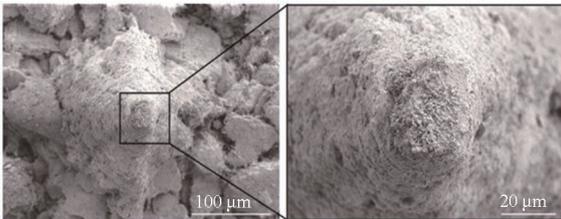
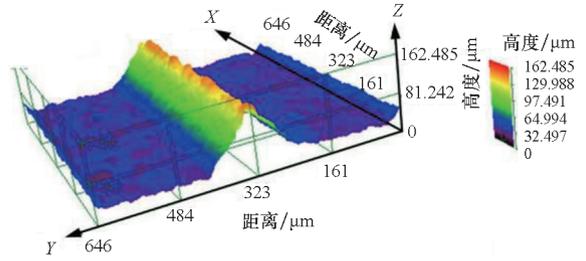


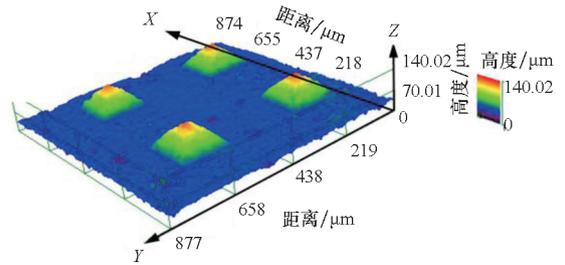
图 21 微锥锥顶形貌的 SEM 图<sup>[49]</sup>  
Fig.21 SEM images of top morphology of microcone<sup>[49]</sup>

北京理工大学的 Chen 等采用飞秒激光,针对商用的粉末烧结式多孔硼硅酸盐玻璃(Duran Por 5,孔径 1 ~ 1.6 μm),开展了楔形和四棱锥形发射体加工工艺研究<sup>[50]</sup>。共聚焦显微检测结果显示,在发射体尖端存在凹痕,如图 22 所示。加拿大皇家军事学院的 Little 等也采用飞秒激光加工方法,在 Por 5 玻璃上实现了条状发射体加工<sup>[51]</sup>,但在扫描电镜检测照片中可以观测到絮状熔融物沉积。

激光烧蚀过程产生的絮状沉积物会改变发射体表面微观形貌,引起非理想的发射点,造成提取极侵蚀;同时,容易造成推进剂的局部聚积,产生更严重的短路问题。为消除此类影响,需清除包裹在发射体表面的碎屑和絮状气化沉积物,常采



(a) 楔形结构  
(a) Wedge-shaped structure

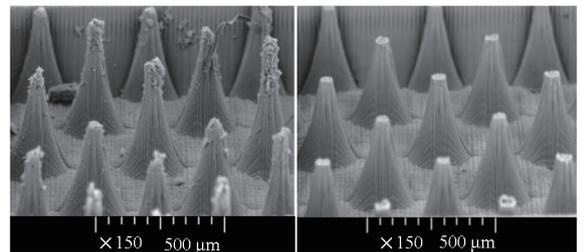


(b) 四棱锥形结构  
(b) Pyramid structure

图 22 飞秒激光制造的楔形和四棱锥形发射体三维图<sup>[50]</sup>

Fig.22 3D morphology of wedge-shaped and pyramid emitters fabricated by femtosecond laser<sup>[50]</sup>

用超声清洗和酸浸方法对激光后的发射体进行后处理。Kristinsson 实验对比了两种方法的作用效果<sup>[52]</sup>,超声清洗能够有效去除发射体间的碎屑沉积(如图 23 所示),而酸浸方法对于去除絮状沉积物更为有效,但酸浸处理时间和溶液浓度等对发射体表面形貌具有重要影响。



(a) 超声清洗前  
(b) 超声清洗后  
(a) Before ultrasonic cleaning (b) After ultrasonic cleaning

图 23 发射极超声清洗前后对比<sup>[52]</sup>

Fig.23 Comparison of before and after ultrasonic cleaning<sup>[52]</sup>

(2) 机械加工

超快激光加工对制造设备有较高要求。鉴于机械加工方法对设备要求低、设备容易获得,Courtney 等基于数控机械铣削研究了发射极制造方法<sup>[53-54]</sup>,其加工流程如图 24 所示。为了提高推力密度和加工效率,发射体采用楔形构型,通过设计专用的切削刀具,在 Por 5 玻璃上实现了一

维阵列式发射极加工,验证了传统机械切削方法的可行性。

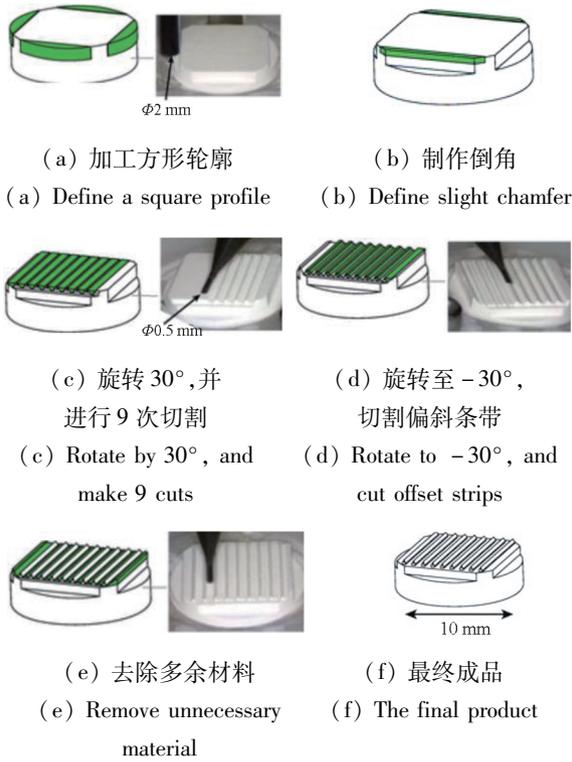


图 24 多孔楔形发射极机械加工流程<sup>[53]</sup>  
Fig. 24 Porous wedge-shaped emitters mechanical processing<sup>[53]</sup>

随后,英国南安普顿大学、美国空军实验室基于 Por 5 多孔玻璃开展了锥形阵列式发射极机械制造研究<sup>[55-57]</sup>,如图 25 所示。然而,受加工刀具尺寸制约,难以实现与 MIT 激光加工相当的发射体阵列密度。国内方面,北京理工大学开展了锥形阵列式发射极机械制造研究<sup>[58]</sup>;西北工业大学陈茂林团队围绕多孔氧化铝陶瓷材料和 Por 5 多孔玻璃,亦开展了楔形发射极加工和相应的推力器集成测试研究<sup>[59-60]</sup>。



图 25 南安普顿大学制造的锥形阵列式发射极<sup>[55]</sup>  
Fig. 25 Cone-shaped emitters array machined by University of Southampton<sup>[55]</sup>

由于粉末烧结型多孔材料自身特性,颗粒间结合强度低,表现出硬脆和松散易碎的组织结构特性,在超快激光加工和机械切削加工中均出现发射体尖端烧结颗粒的整体剥落,导致

发射体结构及尖端形貌一致性差,影响其发射性能。

从推进性能的角度而言,粉末烧结式多孔材料由于孔隙分布不均,各个发射体发射的离子束流存在较大的差异。Guerra-Garcia 等对超快激光加工的粉末烧结型多孔玻璃发射极开展了束流特性实验测量研究<sup>[61]</sup>,发现各发射体的发射启动电压存在差异,并且束电流具有非均匀分布的特性。Chen 等与 Courtney 等在机械切削的条状楔形发射极上也观测到了启动电压差异和离子电流密度的非均匀分布现象<sup>[62-63]</sup>。推力器处于额定工作电压时,启动电压低的发射体发射电流必然大于平均值,并有可能在发射体尖端附近产生二次发射点,引起束流偏离理想状态从而造成过喷雾,进而引发寿命问题<sup>[64]</sup>。

因此,从可加工性和发射性能角度看,基于粉末烧结的多孔材料并不是发射极理想基材。

### 2.3.3 新型多孔材料探索

提升多孔材料的可加工性和孔隙的均匀性是提升多孔材料发射极品质的有效方法,因此研究者们进一步探索了新型的发射体基体材料,包括碳干凝胶(carbon xerogel)、热分相式多孔玻璃等。

MIT 的研究人员探索了碳干凝胶多孔材料激光制造技术<sup>[65-66]</sup>,实现了亚微米到数十微米孔径尺寸可调制的一体化骨架多孔材料,并验证其具有良好的激光可加工性,如图 26 所示。

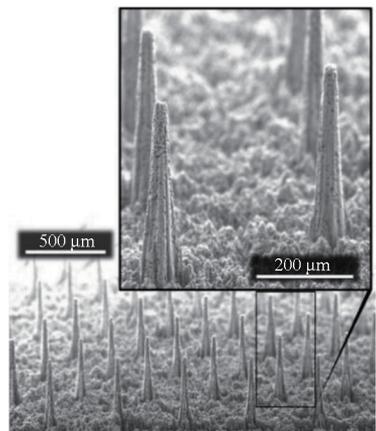
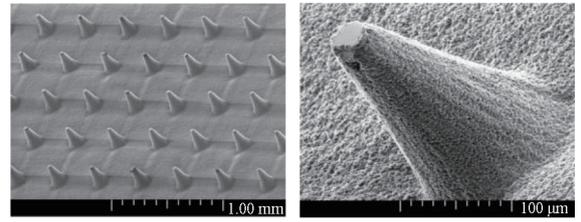


图 26 基于碳干凝胶制造的阵列式发射极<sup>[66]</sup>  
Fig. 26 Emitter array based on carbon xerogel<sup>[66]</sup>

针对碳气凝胶(carbon aerogel)、商用玻璃 Varapo100、粉末烧结的硼硅酸盐玻璃和熔融石英四种多孔材料,Kristinsson 详细研究了激光烧蚀制造中激光能量、焦点直径、激光加工路径等 15 个激光和加工工艺参数以及材料种类、孔径的材

料参数对发射极加工质量的影响<sup>[52]</sup>。通过不同材料对比,发现相对于玻璃基材料,碳气凝胶加工后在发射体表面未观测到明显的碎屑和絮状沉积物。

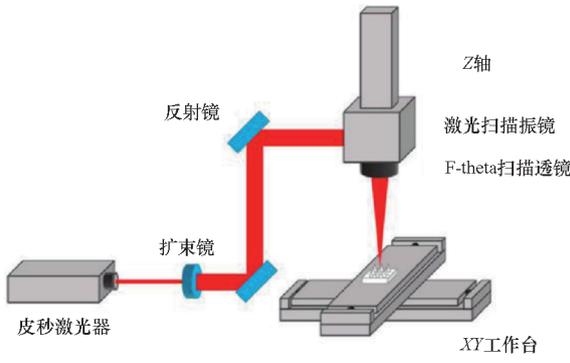
国内方面,国防科技大学与华中科技大学联合开展了多孔材料制备工艺和发射极超快激光加工研究<sup>[67]</sup>。基于热分相多孔材料制备工艺,实现了孔径尺寸可调制的一体化骨架多孔硼硅酸盐玻璃制备;并采用皮秒脉宽激光实现了优于  $\pm 5 \mu\text{m}$  精度的平顶锥形发射体加工(如图 27 所示)。制造的发射体高度  $200 \mu\text{m}$ ,间距  $0.45 \text{ mm}$ 。与常用的 Por 5 玻璃相比,新材料展现了良好的可加工特性。



(b) 发射体阵列的 SEM 图像  
(c) 单发射体的 SEM 特写图像  
(b) SEM image of the emitter array  
(c) Close-up SEM image of an emitter

图 27 基于热分相多孔硼硅酸盐玻璃制造的阵列式发射极<sup>[67]</sup>

Fig. 27 Emitter array made of phase-separation porous borosilicate glass<sup>[67]</sup>



(a) 皮秒激光制造方法

(a) Manufacturing method by picosecond laser

### 3 结论

各类发射极制造技术的对比见表 1。综合看来,发射极的构型以及基础材料均制约着制造技术。同时,制造技术、发射极构型和基础材料三者共同影响发射极工作特性和推力器推进性能。相对于毛细管型和外部浸润型发射极,多孔材料型发射极由于更易于实现推进剂从贮箱到发射极的被动供给,整个推进系统更容易实现紧凑的设计,因此 ILET 工程化研究多围绕多孔材料型发射极

表 1 各种发射极制造技术对比

Tab. 1 Comparison of various emitter manufacturing technologies

制造技术	实现的发射极形式	基础材料	优点	缺点
离子刻蚀 <sup>[25,35]</sup>	毛细管型、外部浸润型	硅	制造精度高,发射体阵列密度较高	主要适用于硅基材料,外部浸润型需特殊的表面处理
光刻技术 <sup>[30-31]</sup>	毛细管型	光刻胶等	可实现高精度三维结构定制	仅适用于特殊的光刻胶材料,加工效率低
增材制造 <sup>[40]</sup>	外部浸润型	不锈钢、树脂	制造灵活	制造精度低,需表面处理,无法大幅度制造
电化学刻蚀 <sup>[41,44-45]</sup>	多孔材料型	多孔金属	制造成本低、效率较高	存在一致性问题,加工重复性不高
电火花制造 <sup>[46]</sup>	多孔材料型	多孔金属	制造成本低、效率较高	精度不高,存在一致性问题,需后续表面处理
数控机床 <sup>[53,55,59]</sup>	多孔材料型	多孔烧结玻璃等	制造成本低、效率高	精度不高,存在一致性问题
超快激光 <sup>[48,52,66-67]</sup>	多孔材料型	多孔玻璃、碳干凝胶、碳气凝胶等	制造精度高,适用多种材料	需消除制造过程对发射体表面的影响

展开。目前,超快激光加工已证实能够获得超过亚微米加工精度的微结构,在多孔玻璃等非金属材料发射极的制造加工方面展现了巨大优势。尽管如此,现有的多孔材料型发射极制造技术仍存在相应的问题亟待解决。

1) 推力器推力密度受限于发射体的阵列密度,还有较大提升空间。目前已达到的推力密度与栅极离子型推力器相比小一个数量级。尽管在理论上可以通过提高发射体阵列密度相应地提高推力密度,但目前实际的发射体阵列密度典型值为 $480 \text{ 个}/\text{cm}^2$ 。这主要是由于现阶段对多孔材料型发射体几何构型、材料孔径等参数对离子提取和加速的影响机制还不够清晰,因此需增大提取极的孔径来降低因加工缺陷和材料孔径分布不均等导致的非理想发射造成的束流拦截,致使发射体阵列密度无法达到或接近超快激光技术的理论加工极限。

2) 多孔材料型发射极加工精度和质量需要进一步提高,以保证发射极发射电流的均匀性。目前基于现有的制造技术与多孔材料,发射体尖端崩碎问题时有发生,发射体形貌精度、一致性等尚需进一步提高。此外还存在激光烧蚀加工过程产生的气化产物在发射体表面沉积附着的问题。

根据多孔材料离子液体电喷雾推力器发展情况与发射极制造现状,结合作者团队研究积累和思考,认为应从以下方面对多孔材料发射极制造技术展开更深的研究:

1) 基于多孔材料孔道参数的发射极设计理论。发射极的设计直接影响其后续的制造技术。现阶段,多孔材料型发射极设计的主要参考依据是推进剂供给的沿程流动阻抗,即通过多孔材料的宏观渗透系数和发射极几何结构参数计算其流动阻抗,确保其大于某一临界值以实现纯离子发射模式<sup>[68-69]</sup>。实际上,发射体尖端的几何构型和孔道参数对于离子液体局部供给状态和电场分布具有重要影响,是决定离子发射特性的关键因素。这一点在现有的发射极设计时并未给予充分考虑。此外,发射体的几何构型还影响激光加工轨迹规划和材料去除量等制造工艺参数,进而影响发射极的制造精度。因此,应进一步完善多孔材料型发射极设计理论,明确多孔材料参数对发射特性和推进性能的影响机制,为优化多孔材料孔道参数和材料制备提供指导。

2) 新型多孔材料制备。多孔材料结构强度是决定超快激光加工精度的关键因素,而孔径分

布均匀性、孔径尺寸则影响离子液体的运输和离子发射。因此,提升多孔材料型发射极加工精度的可行途径之一是探索孔径尺寸可定制的高强度多孔材料制备工艺,如热分相玻璃这类具有一体化网络结构的多孔材料。

3) 完善超快激光与多孔材料作用机理。相较于密实材料,多孔材料由孔道边界构成的网络结构极为脆弱,在激光的作用下极易发生崩碎。因此,需开展超快激光作用于多孔材料的机理研究,明确激光参数、工艺参数、材料参数等对发射极制造精度的影响,同时探索抑制加工过程中气化产物沉积或后处理去除工艺。

4) 此外,一体化网络结构多孔材料制备与粉末烧结型多孔材料不同,包含去相成孔过程,因此可根据去相成孔前后的材料性质差异,探索多孔材料制备与激光加工相融合的制造技术,如采用超快激光对去相成孔前的密实材料进行发射极预成型,再对预成型的发射极进行保形去相成孔,以消除激光加工过程对发射体表面孔道结构的不利影响。

## 参考文献 (References)

- [1] 田立成,王润福,王尚民. 小微纳卫星微小型电推进系统应用展望[J]. 真空, 2023, 60(5): 29-36.  
TIAN L C, WANG R F, WANG S M. Prospect of the micro-electric propulsion system application for the nano-satellite[J]. Vacuum, 2023, 60(5): 29-36. (in Chinese)
- [2] 付郁. 2021 年全球航天发射统计分析[J]. 国际太空, 2022(2): 10-14.  
FU Y. Statistical analysis of global space launch in 2021[J]. Space International, 2022(2): 10-14. (in Chinese)
- [3] O'REILLY D, HERDRICH G, KAVANAGH D F. Electric propulsion methods for small satellites: a review [J]. Aerospace, 2021, 8(1): 22.
- [4] 杭观荣,许嘉鑫,徐伟峰,等. 微功率电推进技术研究现状与展望[J]. 中国航天, 2023(11): 66-73.  
HANG G R, XU J X, XU W F, et al. Research status and prospect of micro-power electric propulsion technology [J]. Aerospace China, 2023(11): 66-73. (in Chinese)
- [5] KREJCI D, LOZANO P. Space propulsion technology for small spacecraft [J]. Proceedings of the IEEE, 2018, 106(3): 362-378.
- [6] LEVCHENKO I, BAZAKA K, DING Y J, et al. Space micropropulsion systems for cubesats and small satellites: from proximate targets to furthestmost frontiers[J]. Applied Physics Reviews, 2018, 5(1): 011104.
- [7] DALE E, JORNS B, GALLIMORE A. Future directions for electric propulsion research [J]. Aerospace, 2020, 7(9): 120.

- [8] MILLER S, WALKER M L R, AGOLLI J, et al. Survey and performance evaluation of small-satellite propulsion technologies[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2021, 58(1): 222–231.
- [9] 杭观荣, 李林, 郭曼丽, 等. 国外电喷推进技术与趋势[J]. *飞控与探测*, 2022, 5(4): 1–11.  
HANG G R, LI L, GUO M L, et al. Development and trends of foreign electro-spray propulsion technology [J]. *Flight Control & Detection*, 2022, 5(4): 1–11. (in Chinese)
- [10] 杨云天, 李小康, 郭大伟, 等. 离子液体静电喷雾推力器研究进展及关键技术[J]. *宇航学报*, 2021, 42(12): 1579–1589.  
YANG Y T, LI X K, GUO D W, et al. Review of research and key technologies on ionic liquid electro-spray thruster[J]. *Journal of Astronautics*, 2021, 42(12): 1579–1589. (in Chinese)
- [11] 雪佳强, 郭宁, 孟伟, 等. 离子电喷雾推力器束电流数学模型与敏感性分析[J]. *火箭推进*, 2024, 50(2): 77–87.  
XUE J Q, GUO N, MENG W, et al. Mathematical model and sensitivity analysis of beam current for ion electro-spray thruster[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2024, 50(2): 77–87. (in Chinese)
- [12] TAYLOR G I. Disintegration of water drops in an electric field[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1964, 280(1382): 383–397.
- [13] DELAMORA J F, LOSCERTALES I G. The current emitted by highly conducting Taylor cones [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1994, 260: 155–184.
- [14] GAMERO-CASTAÑO M, FERNÁNDEZ DE LA MORA J. Direct measurement of ion evaporation kinetics from electrified liquid surfaces [J]. *Journal of Chemical Physics*, 2000, 113(2): 815–832.
- [15] ROMERO-SANZ I, BOCANEGRA R, FERNANDEZ DE LA MORA J, et al. Source of heavy molecular ions based on Taylor cones of ionic liquids operating in the pure ion evaporation regime [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94(5): 3599–3605.
- [16] GRUSTAN-GUTIERREZ E, GAMERO-CASTAÑO M. Microfabricated electro-spray thruster array with high hydraulic resistance channels [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2017, 33(4): 984–991.
- [17] LOZANO P C. Studies on the ion-droplet mixed regime in colloid thrusters [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [18] PAINE M D, GABRIEL S, SCHABMUELLER C G J, et al. Realisation of very high voltage electrode-nozzle systems for MEMS [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004, 114(1): 112–117.
- [19] KRPOUN R, SMITH K L, STARK J P W, et al. Tailoring the hydraulic impedance of out-of-plane micromachined electro-spray sources with integrated electrodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(16): 163502.
- [20] KRPOUN R, SHEA H R. Integrated out-of-plane nanoelectrospray thruster arrays for spacecraft propulsion [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19(4): 045019.
- [21] ATAMAN C, DANDAVINO S, SHEA H. Wafer-level integrated electro-spray emitters for a pumpless microthruster system operating in high efficiency ion-mode [C]// *Proceedings of the IEEE 25th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, 2012: 1293–1296.
- [22] DANDAVINO S, ATAMAN C, CHAKRABORTY S, et al. Progress towards a miniaturized electro-spray thruster for flexible propulsion of small spacecraft [C]// *Proceedings of the 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2012.
- [23] DANDAVINO S, ATAMAN C, RYAN C N, et al. Microfabricated electro-spray emitter arrays with integrated extractor and accelerator electrodes for the propulsion of small spacecraft [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2014, 24(7): 075011.
- [24] RYAN C, STARK J P W, ATAMAN C, et al. MicroThrust MEMS electro-spray emitters integrated microfabrication and test results [C]// *Proceedings of AAF-ESA-CNES Space Propulsion*, 2012.
- [25] DANDAVINO S, ATAMAN C, CHAKRABORTY S, et al. Design and fabrication of the thruster heads for the MicroThrust MEMS electro-spray propulsion system [C]// *Proceedings of the 33rd International Electric Propulsion Conference*, 2013.
- [26] RYAN C, DAYKIN-ILIOPOULOS A, STARK J, et al. Experimental progress towards the MicroThrust MEMS electro-spray electric propulsion system [C]// *Proceedings of the 33rd International Electric Propulsion Conference*, 2013.
- [27] INOUE N, NAGAO M, MURAKAMI K, et al. Fabrication of a high-density emitter array for electro-spray thrusters using field emitter array process [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2019, 58(SE): SEEG04.
- [28] SUZUKI K, NAGAO M, LIU Y X, et al. Fabrication of nano-capillary emitter arrays for ionic liquid electro-spray thrusters [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2021 (SC), 60: SCCF07.
- [29] HENNING T, HUH N K, BECKER F, et al. Electro-spray from arrays of miniaturised all-photopolymer emitters [C]// *Proceedings of the 35th International Electric Propulsion Conference*, 2017.
- [30] HENNING T, HUH N K, ISBERNER L W, et al. Miniaturized electro-spray thrusters [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(2): 214–218.
- [31] KUNZE F L, HENNING T, KLAR P J. Taking internally wetted capillary electro-spray emitters to the sub-ten-micrometer scale with 3D microlithography [J]. *AIP Advances*, 2021, 11(10): 105315.
- [32] XUE S W, DUAN L, KANG Q. Fabrication of externally wetted emitter for ionic liquid electro-spray thruster by low-speed wire cutting combined with electrochemical etching [J]. *AIP Advances*, 2021, 11(11): 115023.

- [33] GASSEND B, VELASQUEZ-GARCIA L F, AKINWANDE A I, et al. A microfabricated planar electro spray array ionic liquid ion source with integrated extractor [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2009, 18(3): 679–694.
- [34] GASSEND B, VELASQUEZ-GARCIA L, LOZANO P, et al. A microfabricated electro spray thruster using ridge emitters and ceramic-ball extractor location [C]//*Proceedings of the 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2006.
- [35] VELASQUEZ-GARCIA L F, AKINWANDE A I, MARTINEZ-SANCHEZ M. A planar array of micro-fabricated electro spray emitters for thruster applications [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006, 15(5): 1272–1280.
- [36] TACHIBANA F, TSUCHIYA T, TAKAO Y. Uniform needle-emitter arrays for ionic liquid electro spray thrusters with precise thrust control [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2021, 60(SC): SCCL06.
- [37] HILL F A, HEUBEL E V, DE LEON P P, et al. High-throughput ionic liquid ion sources using arrays of microfabricated electro spray emitters with integrated extractor grid and carbon nanotube flow control structures [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2014, 23(5): 1237–1248.
- [38] SMITH M A, BERRY S, PARAMESWARAN L, et al. Design, simulation, and fabrication of three-dimensional microsystem components using grayscale photolithography [J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2019, 18(4): 043507.
- [39] SIEGEL N W. Silicon wafer integration of ion electro spray thrusters [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Department of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [40] MÁXIMO D V M, VELÁSQUEZ-GARCÍA L F. Additively manufactured electrohydrodynamic ionic liquid pure-ion sources for nanosatellite propulsion [J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 36: 101719.
- [41] LEGGE R S, Jr, LOZANO P, MARTÍNEZ-SÁNCHEZ M. Fabrication and characterization of porous metal emitters for electro spray thrusters [C]//*Proceedings of the 30th International Electric Propulsion Conference*, 2007.
- [42] LEGGE R S, LOZANO P C. Electro spray propulsion based on emitters microfabricated in porous metals [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2011, 27(2): 485–495.
- [43] COURTNEY D G, LOZANO P. Characterization of conical ionic liquid ion sources for 2-D electro spray thruster arrays on porous substrates [J]. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, 2010, 8(ists27): Pb\_73–Pb\_78.
- [44] COURTNEY D G, LI H Q, MAQUEO P D G, et al. On the validation of porous nickel as substrate material for electro spray ion propulsion [C]//*Proceedings of the 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2010.
- [45] COURTNEY D G, LI H Q, LOZANO P C. Electrochemical micromachining on porous nickel for arrays of electro spray ion emitters [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2013, 22(2): 471–482.
- [46] LIU X Y, KANG X M, DENG H W, et al. Energy properties and spatial plume profile of ionic liquid ion sources based on an array of porous metal strips [J]. *Plasma Science and Technology*, 2021, 23(12): 125502.
- [47] 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]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(12): 123304.
- [48] COFFMAN C, PERNA L, LI H Q, et al. On the manufacturing and emission characteristics of dielectric electro spray sources [C]//*Proceedings of the 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2013.
- [49] 陆子杰, 罗国虎, 王岱菝, 等. 多孔玻璃微锥阵列超快激光加工工艺研究(特邀) [J]. *中国激光*, 2024, 51(4): 342–351.
- [49] LU Z J, LUO G H, WANG D S, et al. Study on ultrafast laser processing technology of porous glass microcone array (invited) [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(4): 342–351. (in Chinese)
- [50] CHEN Y, NIU B. Femtosecond laser fabrication of porous ceramics for electro spray thruster emitter [C]//*Proceedings of the International Conference on Laser, Optics and Optoelectronic Technology (LOPET 2021)*, 2021.
- [51] LITTLE B, JUGROOT M. Bimodal propulsion system for small spacecraft: design, fabrication, and performance characterization [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2020, 57(4): 707–719.
- [52] KRISTINSSON B Ö. On the design of electro spray emitters and their microfluidic behavior [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Department of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [53] COURTNEY D G, DANDAVINO S, SHEA H. Comparing direct and indirect thrust measurements from passively fed ionic electro spray thrusters [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2016, 32(2): 392–407.
- [54] COURTNEY D G, SHEA H. Influences of porous reservoir Laplace pressure on emissions from passively fed ionic liquid electro spray sources [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(10): 103504.
- [55] MA C Y, BULL T, RYAN C N. Plume composition measurements of a high-emission-density electro spray thruster [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2021, 37(6): 816–831.
- [56] NATISIN M R, ZAMORA H L, MCGEHEE W A, et al. Fabrication and characterization of a fully conventionally machined, high-performance porous-media electro spray thruster [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2020, 30(11): 115021.
- [57] NATISIN M R, ZAMORA H L, HOLLEY Z A, et al. Efficiency mechanisms in porous-media electro spray thrusters [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2021, 37(5): 650–659.

- [58] GUO Y T, LI S P, WU Z W, et al. Study on performance of ionic liquid electrospray thruster in atmospheric and vacuum environment [C]//Proceedings of the 36th International Electric Propulsion Conference, 2019.
- [59] CHEN C, CHEN M L, ZHOU H H. Characterization of an ionic liquid electrospray thruster with a porous ceramic emitter[J]. *Plasma Science and Technology*, 2020, 22(9): 094009.
- [60] JIA H W, CHEN M L, LIU X H, et al. Experimental study of a porous electrospray thruster with different number of emitter-strips [J]. *Plasma Science and Technology*, 2021, 23(10): 104003.
- [61] GUERRA-GARCIA C, KREJCI D, LOZANO P. Spatial uniformity of the current emitted by an array of passively fed electrospray porous emitters [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(11): 115503.
- [62] CHEN C, CHEN M L, FAN W, et al. Effects of non-uniform operation of emission sites on characteristics of a porous electrospray thruster [J]. *Acta Astronautica*, 2021, 178: 192–202.
- [63] COURTNEY D G, WOOD Z, FEDKIW T. Reconstructing electrospray plume current spatial distributions using computed tomography [C]//Proceedings of the 36th International Electric Propulsion Conference, 2019.
- [64] THUPPUL A, WRIGHT P L, COLLINS A L, et al. Lifetime considerations for electrospray thrusters [J]. *Aerospace*, 2020, 7(8): 108.
- [65] ROJAS-HERRERA J, LOZANO P C. Mitigation of anomalous expansion of carbon xerogels and controllability of mean-pore-size by changes in mold geometry [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2017, 458: 22–27.
- [66] ROJAS-HERRERA J, JIVANESCU I, FREEMAN D, et al. Porous materials for ion-electrospray spacecraft microengines[J]. *Journal of Nanomechanics and Micromechanics*, 2017, 7(3): 04017006.
- [67] 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.
- [68] WRIGHT P L, WIRZ R E. Multiplexed electrospray emission on a porous wedge [J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(1): 012003.
- [69] MARTINEZ C S P. Engineering ionic liquid ion sources for ion beam applications[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Department of Aeronautics and Astronautics, 2016.