

毛细管等离子体射流技术研究现状及应用前景*

刘克富, 夏胜国, 潘 垣

(华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 毛细管放电等离子体是近年来发展起来的一种新型脉冲高能粒子源, 可以产生高温、高密和高速等离子体射流, 具有推进、发射、加速等功能, 可以加热或引燃化学工质, 具有广泛的应用前景。介绍了毛细管等离子体的基本原理和特点, 综述了国内外研究现状, 对毛细管等离子体应用前景进行了展望, 以期引起我国对这一技术研究的重视, 促进毛细管等离子体技术的发展。

关键词: 毛细管; 等离子体; 电弧放电; 电热化学发射; 废物处理

中图分类号: TM863; O531 **文献标识码:** A

毛细管等离子体发生器是八十年代以来发展起来的一种新型脉冲高能粒子源。放电等离子体在径长比很小(小于 0.1)的所谓“毛细管”结构中产生, 毛细管管壁通常采用碳氢分子材料如聚乙烯等材料制成, 两端安装电极, 其中开口中空的阴极为发射极, 毛细管通常长度为几 cm 到十几 cm, 内径 2~6mm。当毛细管两电极进行高压脉冲放电, 在 ms 脉宽时间内通过几十 kA 的电流, 加热烧蚀毛细管管壁, 产生高温高压高速等离子体射流。毛细管等离子体温度通常为几 eV, 密度在 10^{20}cm^{-3} 以上, 射速可达 10km/s, 压力达到 100MPa 以上, 这种等离子体参数特性具有近似黑体特征。与其它等离子体发生器相比, 其特点是结构简单, 无需特殊真空环境和防爆措施, 在大气条件下即可产生, 因而具有广泛的应用前景。可以作为高速发射器用来发射高速粒子, 可以作为推进器用于小物体推进, 可以作为高温高密等离子体流用于材料表面改性, 还可以作为点火装置, 引燃其它工质。适当改变毛细管结构或毛细管内填料成分, 可以满足不同应用需要, 实现更广泛用途。超短脉冲毛细管放电等离子体在软 X 射线, 激光驱动粒子加速等领域有重要应用。近年来受到各国科学界的重视, 目前美、英、法、德、俄等国研究机构都在积极从事这一领域的研究。

1 理论研究进展

毛细管放电等离子体包含复杂的物理过程, 涉及物理学诸多领域, 如流体力学、磁流体动力学、热力学、等离子体物理、辐射光学等等。建立毛细管放电等离子体理论模型, 预测和描述放电过程中所发生的物理现象, 揭示其物理本质, 是毛细管等离子体研究的重要内容。

当前有多种形式的理论模型从不同角度和侧重点描述了毛细管电弧等离子体发生器工作过程。其中有不考虑放电过程空间变化的零维准稳态模型, 有考虑了毛细管内放电空间变化的一维、二维模型, 以及考虑等离子体各参量随时间变化的非稳态模型。这里主要介绍有代表性的几个模型, 以对毛细管等离子体理论研究发展有一个概貌性认识。

1.1 Loeb-Kaplan 零维准稳态模型^[1]

从放电电路角度来看, 毛细管等离子体可看作一种非线性电阻负载, 特别是在等离子体完全形成阶段, 用集中参数来描述毛细管等离子体, 对于建立电路与毛细管负载关联有显著意义。Loeb-Kaplan 零维准稳态模型用直观而简单的方法描述了毛细管内等离子体性状, 给出了毛细管电阻与输入电流、毛细管长度、截面的函数关系。这一模型是在如下四个假定条件下推导建立起来的: (1) 等离子体具有光学厚度, 可以看作黑体, 等离子体与管壁之间的热交换主要由热辐射引起; (2) 毛细管简化成集中参数形式, 管内压力、温度沿管轴向和径向无空间变化; (3) 等离子体来源于毛细管内衬聚乙烯烧蚀, 且等离子体由部分电离的氢和碳组成; (4) 等离子体电阻由 spitzer 定律给出。由此得出电阻关系方程如下

$$R = 0.22 l^{8/11} a^{-13/11} i^{-6/11} \quad (1)$$

* 收稿日期: 2003-01-11; 修订日期: 2003-03-14

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(59977007)

作者简介: 刘克富(1963-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为脉冲功率和等离子体技术应用。

式中: γ 为比例系数, i 为电流 (kA), l 为毛细管长度 (cm), a 为毛细管截面半径 (mm)。该模型中比例系数对于一定材料的毛细管而言,基本上为一常数,可以通过实验加以确定。实验表明对于不同的放电参数和毛细管尺寸的变化很小, 值在 1.1~1.3 之间^[2]。

1.2 Powell-Zeilinski 一维模型^[3]

Powell-Zeilinski 一维模型是在质量、动量和能量守恒方程基础上由二维模型经过简化处理得到的。简化考虑了毛细管内等离子体层各参数在径向变化很小,对于等离子体径向各参量采取空间平均化处理方式,而带来计算的工作量相应减少。

$$\frac{\partial}{\partial t} + w \frac{\partial}{\partial z} + \dot{\gamma}_a = \dot{\gamma}_a \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \dot{\gamma}_a \frac{\partial}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + w \frac{\partial E}{\partial z} + p \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{J^2}{\sigma_a} - \dot{\gamma}_a (E - w^2/2) \quad (4)$$

$$\dot{\gamma}_a = \frac{2 \gamma_b q}{r_b (p_b + \gamma_b E_b)} \quad (5)$$

上述式中, ρ 和 E 分别是等离子体密度、压强和单位内能; w 是等离子体轴向速度分量; J 和 σ 分别是等离子体电流密度和电导率; $\dot{\gamma}_a$ 是管壁消融率,带下标 b 参量表示毛细管管壁边界参量。

除了上述守恒方程,还需要一些辅助方程和边界条件才能唯一确定所有的物理参量。辅助方程一般是气体压强 p 或内能 E 与密度 ρ 和温度 T 之间的关系式以及电导率 σ 的表达式。Powell-Zeilinski 一维模型考虑了非理想等离子体效应,对理想等离子体热力学与输运模型进行修正。该模型与实验结果比较接近。

1.3 Silvestre 两维模型^[4]

Silvestre 两维模型较全面地描述了烧蚀材料从径向转变为轴向流,磁力在磁不稳定性方面所起的作用,压力波对等离子体产生的影响。同时考虑毛细管内非稳定的可压缩的等离子体流是层状辐射和热传导的,具有粘滞流特性,在轴对称条件下,可用 Navier-Stokes 方程描述。其质量、动量和能量守恒方程组可由统一矢量方程给出^[4]。加上其它辅助方程和边界条件可以通过数值方法计算出毛细管内流场,获得等离子体温度、密度、压力轴向和径向速度的空间分布。

2 应用前景

随着毛细管等离子体研究的深入,其应用范围日益开拓,目前已涉及军事、工业、科学技术等诸多领域。按毛细管等离子体生成结构分类,可分为电极消融型、管壁消融型以及工质消耗型三种类型,其应用领域根据毛细管等离子体高温、高密、高速物理特性可分为发射、推进、引燃、喷涂、化学合成以及处理有害化合物。

2.1 电热(化学)发射

由于毛细管等离子体射流具有 10km/s 的射速,人们自然会想到将它用于高速发射。它可以将 mg 重的微粒加速到数 km/s。在空间探测实验中,用来发射微粒子进入空间,模拟空间物体和微尘埃的相互作用^[5]。在热核聚变托克马克实验装置中,它是一种理想的小球发射器,用于冰球加料^[6]。

电热发射分为纯电热发射和电热化学发射,纯电热(Pure ET)发射完全依靠电能产生等离子体,电离工作液体(如水或乙醇)使之气化,提供高压加速弹丸,可以达到 3km/s 以上发射速度,这种发射方法实现实战化的关键是电源小型化技术^[7]。

电热化学(ETC)发射是利用电能产生的高温高能的等离子体射流,点燃和加热化学工质,并控制其燃烧过程,提高化学工质产生热气体效率,借助热气体的膨胀做功推进弹丸。控制电功率输入可以调节等离子体产生的数量和持续时间,从而控制等离子体与化学工质的相互作用,可展宽压力曲线(平台效应),获得较大的出膛速度。它需要的电能不多,但可以使弹丸出膛速度达到 2km/s 以上。电热化学炮是对常规火炮的重大革新,图 1 为电热化学炮结构示意图。目前,世界上有许多国家都积极进行电热化学炮的研究,美国、以色列 1996 年就已开始电热化学炮的靶场试验^[8]。

2.2 有害化合物的处理^[9]

石油化工、塑料、油漆涂料、杀虫剂等制造工业都要产生一些有害的有机化合物。分解它们能耗很大,并且

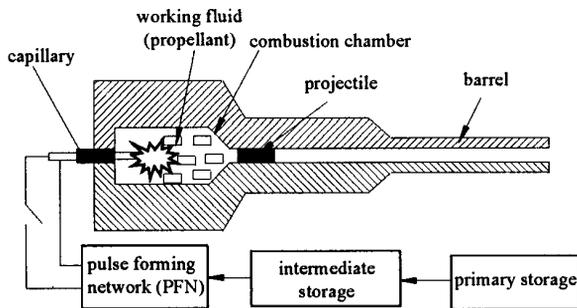


Fig. 1 Schematic drawing of ETC

图1 电热化学枪结构示意图

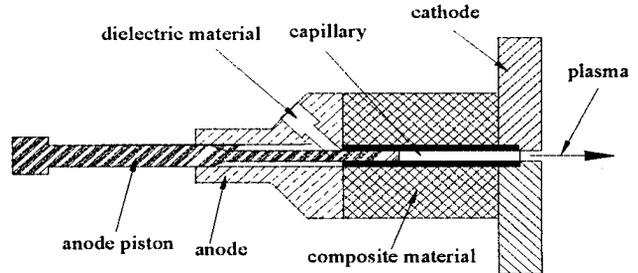


Fig. 2 Schematic drawing of plasma injector for hazardous waste treatment

图2 用于处理废物的等离子体枪示意图

会产生有害的环境污染。将毛细管等离子体发射技术应用于有害有机化合物的分解是一种新的设想,最近,以色列、德国、法国和比利时四国正在共同开发这种有害废物处理的新技术。由于毛细管放电产生的高密高速等离子体射流携带有极为可观的动量,它在被处理流体中处于流体的不稳定态,相互之间作用面积大,辐射热传递的效率一般比其他同类技术条件下要高几个数量级。

这项新技术的关键是毛细管等离子体枪设计,图2为毛细管等离子体枪示意图。由于分解的需要,要求它能产生的等离子体射流具有高密度($0.1 \sim 1 \text{ mg/cm}^3$)、大功率($0.01 \sim 1 \text{ GW}$)、高能量($0.01 \sim 1 \text{ MJ}$)和高速度($10 \sim 20 \text{ km/s}$)。要达到实用的标准,等离子体枪要能每秒钟喷射一次,每次放电能量为 30 kJ ,放电时间为 0.3 ms ,使用寿命要达到连续喷射 10^5 次。为了延长毛细管的使用寿命,采用高密的聚乙烯材料,并且每次放电前利用活塞式阳极向毛细管内补偿其质量损失。利用毛细管等离子体枪处理有害有机化合物是一种有效的易于控制的光解技术。与其他同类技术相比,处理费用要少 $40\% \sim 50\%$,被处理材料通常是卤素化合物、亚磷化合物以及放射性废物等。

2.3 热喷涂和材料表面处理

毛细管等离子体喷枪也是一种极有前途的高性能喷涂设备,以色列的 S. Wald^[10]和俄罗斯的 E. Y. Shcolnikov^[11]等作了这方面的研究。这种喷涂设备与电热化学枪的结构一样,毛细管等离子体喷枪作为引燃系统,药筒内则装有推进药剂和涂料粉末。一旦推进药剂被点燃,产生的燃气将携带涂料粉沿枪管向喷涂基底喷射。电热化学喷枪具有很强的可控性,可靠而迅速地地点燃推进药剂并使它完全燃烧,在几百 μs 时间内使燃气压强上升到几百 MPa ,从而获得燃气的高速度;适当选取枪管的长度以得到合适的加速时间。理论和初步的实验显示被加速粉末的最终可达 1 km/s 的高速度。因而能形成硬度大、附着力大的高质量均匀涂层。由于燃气的高密度,一次喷射可以加速三到五倍于同类技术的涂料粉数量,获得高吞吐率。试验显示,一次喷射可产生厚度约为 $200 \mu\text{m}$ 的涂层,其硬度和附着力经检测均达到相当高的水平。

脉冲高能密度等离子体射流作用于金属材料表面,并与材料相互作用,使得表面形成一层与基体性质和结构不同的薄膜材料,得到改性表面。德国 M. Rott 等人对此作了较为深入的研究,处理的材料是金属和合金^[12]。采用的毛细管内径 4 mm ,长 40 mm ,开口端是一内径 6 mm 长 60 mm 的钢制枪管。由于高的能量沉积,样品表面层几 μm 范围温度在短时间内上升到很高甚至熔化,又迅速冷却凝固。极高的冷却速度(约 10^6 K/s)形成硬化薄膜。这种薄膜具有极高的硬度且耐磨程度大大提高。

2.4 电热化学合成技术^[13]

毛细管等离子体发生器产生消融高温等离子体射流,可以射入大气压下的室温气体,使得射流中的等离子体和过量的冷气体混合,生成物能很快地降温,形成纳米微粒。这是生成新物质特别是纳米结构新材料的一条新途径。这种现象称为电热化学合成(Electrothermal Chemical Synthesis)。目前用于电热化学合成的毛细管等离子体发生器的结构和电热枪相似,其几何结构、组成材料和工作条件的选取都是以提高阴极材料的汽化而尽量抑制管壁的消融为目的。放电时电弧将集中在阴极的尖端,阴极内部被加热至接近熔化温度,管壁材料是耐消融的如陶瓷等,并且毛细管半径稍大,长度稍小。通常因生成的材料不同,要求采用不同的消融电极材料,如电极是金属材料如铝、钛等,可生成纳米结晶的陶瓷;石墨电极可生成一系列新的碳素材料,特别是 C_{60} , C_{70} , C_{84} 等碳素多面体原子簇。图3是一种成功的生成碳等离子体毛细管。其主要优点是结构简单,反应物生成率高。目前电热化学合成技术还处于初始阶段,有待于进一步改进。

3 结 语

毛细管放电产生的等离子体射流具有独特的优势,是其它气体放电装置或等离子体发生器产生的等离子体所不具有的。其发生器结构简单,维护方便;改变毛细管内填料成分,可以实现广泛用途,有很强的适应性。对于需要产生高能、高速、高密度等离子体射流的应用领域,它是一种合理的选择。可以预见,随着研究的深入,毛细管等离子体射流技术将会开拓出更多的应用前景。提高毛细管等离子体发生器使用寿命,优化结构设计,是应用中需要认真解决的课题。现有的理论模型也需要进一步地完善,以适应不同的应用要求,提供更准确的理论指导。

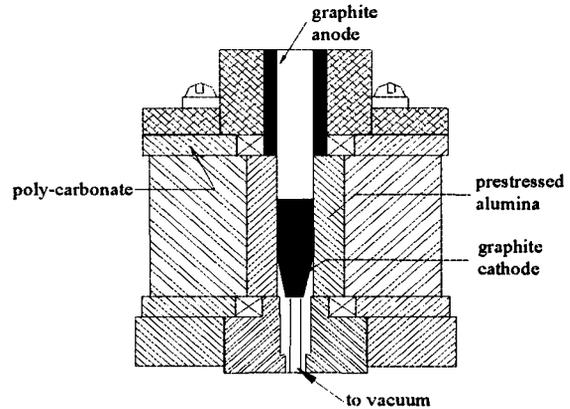


Fig. 3 Design diagram of carbon plasma

图 3 碳等离子体毛细管枪

参考文献:

- [1] Loeb A, Kaplan Z. A theoretical model for the physical processes in the confined high pressure discharges of electrothermal launchers[J]. *IEEE Trans Magnetics*, 1989, 25:342—346.
- [2] 刘克富. 全补偿脉冲发电机及其系统——高功率小型化电炮脉冲电源[D]. 武汉:华中科技大学,1999. (Liu K F. All-compensated pulsed alternator and system—high power compact electro-gun pulsed power supply. Doctor dissertation. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 1999)
- [3] Powell J D, Zielinski A E. Theory and experiment for an ablating capillary discharge and application to electrothermal-chemical guns[R]. BRL-3355, 1992.
- [4] Silvestre N, Hensel D, Darea K. Numerical investigation of electric arcs in cylindrical tubes[A]. Proceeding of the 3rd European on electromagnetic launch technology[C] London, 1991.
- [5] Salge J G H, Weise T H G G, Braunsberger U E, et al. Mass acceleration by plasma pulse[J]. *IEEE Trans Magnetics*, 1993, 29(1):597.
- [6] Rott M. The LRT/ TUM small caliber electrothermal accelerator[J]. *IEEE Trans Magnetics*, 1993, 29(1):597—602.
- [7] McNab I R. Pulsed power for electric guns[J]. *IEEE Trans Magnetics*, 1997, 33(1):453—460.
- [8] Kaplan Z, Melnik D, Sudai M, et al. A field study of a hypervelocity solid propellant electrothermal 105mm launcher[J]. *IEEE Trans Magnetics*, 1995, 31(1):425—430.
- [9] Wald S, Bokryvailo A, Appelbaum G, et al. Hazardous waste treatment and recovery of valuable products with a thermal pulsed-plasma technology[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2000, 28(5):1576—1580.
- [10] Wald S, Appelbaum G, Alimi R, et al. Hard coatings of metals and ceramics with a new electrothermal-chemical gun technology[J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 1999, 171—177.
- [11] Shochnikov E Y, Chebotarev A V, Ignatovitch A E, et al. Flow dynamics and microparticles acceleration in the electrothermal launcher[J]. *IEEE Trans Magnetics*, 1999, 35(1):240—244.
- [12] Rott M, Igenbergs E. New monopulse plasma generation and acceleration facility for surface treatment[J]. *IEEE Trans Magnetics*, 2001, 37(1):232—237.
- [13] Peterson D R. Design and operation of the electro-gun and electro-thermal gun for producing metal and carbon plasma jets[J]. *IEEE Trans Magnetics*, 1997, 33(1):373—378.

Research status quo and application prospect of capillary plasma jet technique

LIU Ke-fu, XIA Sheng-guo, PAN Yuan

(College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Capillary discharge plasma is a new type of high pulsed energy particle source which is recently developed. Plasma jets with high temperature, high density and hypervelocity can be produced by high voltage discharge between two electrodes of a capillary. It can be used for projection of microparticle, acceleration of powder material and ignition and heating of chemical propellant. Such a technique has wide applications in industry, science and national defense. This paper presents the basic theory and characteristics of capillary plasma jets and introduced the research status quo and its applications so that this technology can be paid attention to by people and developed in our country.

Key words: Capillary; Plasma; Discharge arc; Electrothermal launch; Waste treatment