

物理学

轴对称等离子体射流的实验研究

郭世杰^{1,2} 夏俊明^{1,2} 霍文青^{1,2} 徐跃民¹(中国科学院空间科学与应用研究中心¹, 北京 100190; 中国科学院大学², 北京 100049)

摘要 等离子体射流具有广泛的应用前景。建立了轴对称等离子体射流的模型,显示层流状态下等离子体射流的长度与流量成正比。采用 Ne、He、Ar 在大气压下用介质阻挡放电的手段得到了等离子体射流,发现层流状态下等离子体射流长度与模型结论一致;但是随着激励电压的升高和气体流量的增大,等离子体射流会发生从辉光放电到丝状放电、从层流到湍流的转捩,射流长度会先增大后减小;工作气体的不同对等离子体射流的性质也有重要影响。

关键词 等离子体射流 介质阻挡放电 层流 湍流

中图分类号 O539; **文献标志码** B

等离子体射流在航空航天和工业生产上有着广泛的应用前景。利用安装在高速近空间飞行器头部的发生器迎向来流方向喷射等离子体射流,通过喷射出的等离子体与弓形脱体激波的相互作用,可以减弱激波或将激波推离飞行器,以减小飞行器波阻,从而实现对流场主动控制的目的^[1,2]。此外,由于等离子体射流的产生不需要真空系统,在工业应用上具有工艺处理速度快、可控性好等特点,所以近年来在材料合成、薄膜制备、定向刻蚀和喷涂及熔融焊接等方面也都有广泛应用^[3]。

等离子体射流可以采用介质阻挡放电手段产生^[4,5],这种放电手段存在丝状放电和均匀辉光放电两种放电形式^[6]。在辉光放电形式下增大射流的长度,有助于提高生产效率。但是等离子体射流既是高速喷射的流体,又是存在大量带电粒子的等离子体,它的长度会受到放电气体种类、放电形式、气体流量等多方面因素的影响。本文旨在建立轴对称管道的等离子体射流模型,并在此基础上设计实验研究等离子体射流的放电形式和流动状态的变化特点,以探索等离子体射流的最佳产生条件。

2013年5月3日收到

第一作者简介:郭世杰,男,安徽阜阳人,硕士研究生。研究方向:等离子体流动控制。E-mail: kdguoshijie@163.com。

1 轴对称管道等离子体射流模型

如图1所示,考虑一段充满等离子体流的均匀圆管。

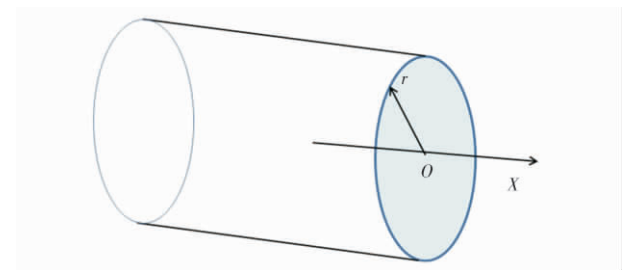


图1 管道等离子体射流模型

假设管道中的等离子体是不可压缩黏性流体,并且保持定常层流状态。均匀圆管半径为 r ,长度为 l ,管道两端的压差为 Δp ,则管道中的等离子体满足不可压缩黏性流体的 Navier-Stokes 方程^[7]。

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 v \quad (1)$$

式(1)中 ρ 为等离子体的密度, $\nu = \mu/\rho$ 是运动学黏性系数, μ 为动力学黏性系数。以管轴为 x 轴,在笛卡尔坐标系下,显然管中等离子体射流的每一点速度都指向 x 轴方向,是 y 和 z 的函数,且有

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

即在管道的整个横截面上,压力是常数。方程

(1) 的 x 分量给出

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (3)$$

式(3)中, v 是轴向速度。于是又可得到 $dp/dx = \text{const}$ 。所以压力梯度可以写成 $-\Delta p/l$ 。这样,管道内等离子体的速度分布即由 $\nabla^2 v = \text{const}$ 形式的二维方程确定; 这个方程必须在管道横截面的周线上 $v = 0$ 的边界条件下求解。

对于如图所示的圆截面,建立极坐标系,由对称性可得 $v = v(r)$ 。利用极坐标下拉普拉斯算子的表达式,得到

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dv}{dr} \right) = -\frac{\Delta p}{\mu l} \quad (4)$$

积分后,得

$$v = -\frac{\Delta p}{4\mu l} r^2 + a \ln r + b \quad (5)$$

由于在管道中心处速度必须是有限值,所以必须令常数 a 等于 0。常数 b 由 $r = R$ 处 $v = 0$ 的条件确定,这里 R 是管道半径。于是求得

$$v = \frac{\Delta p}{4\mu l} (R^2 - r^2) \quad (6)$$

根据速度表达式(6)可以确定每秒通过管道任一截面的等离子体射流质量 Q (流量)。每秒通过截面上环形面元 $2\pi r dr$ 的质量为 $\rho 2\pi r dr$, 因而

$$Q = 2\pi\rho \int_0^R r v dr \quad (7)$$

利用式(6)得

$$Q = \frac{\pi\Delta p R^4}{8\mu l} \quad (8)$$

所以,流量正比于管径的四次方。在等离子体射流的实验中, Q 可以很容易地用流量计测得。假设等离子体射流从管中喷出后的长度为 $L(r)$, 并且 L 与 v 成正比

$$L = kv \quad (9)$$

k 是一个待定的系数,它具有时间的量纲,可以通过实验测定。它可以理解为等离子体射流从电离产生并喷出圆管后到与周围空气分子碰撞复合致可见辉光消失的这段时间。 k 的大小与放电气体种类、等离子体的电子密度、粒子的碰撞-复合时间等因素都有关系,但是对于单一放电气体和固定的电压和圆管半径,它是一个常数。由式(6)、式(8)、

式(9)可得

$$L = \frac{2kQ}{\pi\rho} \left(\frac{1}{R^2} - \frac{r^2}{R^4} \right) \quad (10)$$

显然 $r = 0$ 时 L 最大,所以等离子体射流的最大长度 L_m 满足

$$L_m = \frac{2kQ}{\pi\rho R^2} \quad (11)$$

从式(10)和式(11)可以看出,层流黏性不可压缩等离子体从圆管中喷出后形成的射流边缘近似抛物面分布,并且其最大长度与管中气体流量 Q 成正比。随着流速的增大,或者当放电形式发生改变,雷诺数增加到临界值,等离子体射流就会发生从层流向湍流的转捩,式(11)将不再成立,等离子体射流的长度也不再与流量成正比。式(11)的结论和上述转捩过程在实验中得到了很好的验证。

2 实验系统

实验采用的大气压等离子体射流装置如图 2 所示。连接 52 kHz 高压交流电源的宽度为 10 mm 的环状金属电极套在石英玻璃管上,距管一端 20 mm; 工作气体(He、Ne、Ar) 经过流量计从另一端进入玻璃管,在电极处发生介质阻挡放电,然后经出口喷出形成等离子体射流。装置放置于大气压室温环境下的暗室内,并以电子倍增 CCD(EMCCD) 记录等离子体射流的形貌(因普通数码相机镜头存在球差,所以这里选用 EMCCD)。激励电压峰值由示波器通过高压探头测量。

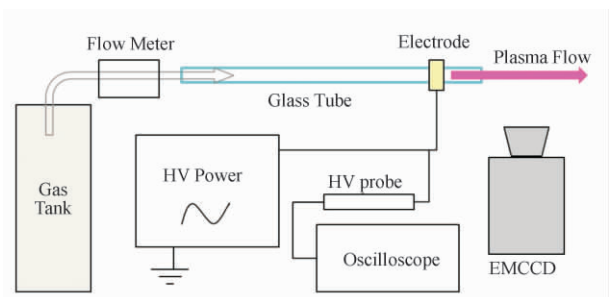


图 2 大气压等离子体射流装置示意图

3 实验结果与讨论

分别改变气体种类、激励电压、气体流量和石英玻璃管的内径(以字母 D 表示),得到不同情况下

等离子体射流长度的变化图(如图 3 ~ 图 5 所示)。

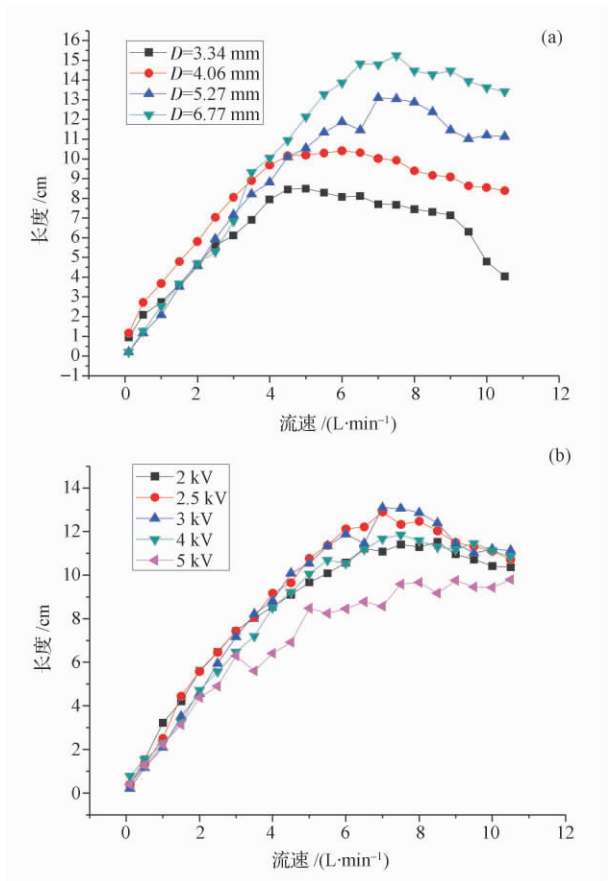


图 3 Ne 等离子体射流实验结果图 (a) 电压为 3 kV; (b) 玻璃管内径 $D = 5.27$ mm

从图 3 (a) 中可以看出,在流速较低的时候,Ne 等离子体射流的长度与流量近似成正比,这与层流等离子体射流模型中式 (11) 的结果相一致。随着流量的增加,Ne 等离子体射流的雷诺数逐渐增大,最终使等离子体射流由层流转捩为湍流,流动状态变得不稳定,因此表现为射流长度减小。此外,从图 3 (a) 中还可以看出,大内径的玻璃管可获得更长的等离子体射流,因为它在较大的气体流速下仍能维持层流状态。

从图 3 (b) 中可以看出不同激励电压对等离子体射流流动状态的影响。当激励电压较低时,等离子体射流处于稳定的辉光放电状态,射流长度较大;当电压逐渐升高时,激励产生的等离子体电子密度增大,同样流速下产生的等离子体射流略长;但是当电压升高至 5 kV 时,可以观察到放电模式从

温和的辉光放电转变为不稳定的丝状放电,此时等离子体射流的放电更加不稳定,因此表现为长度变小。

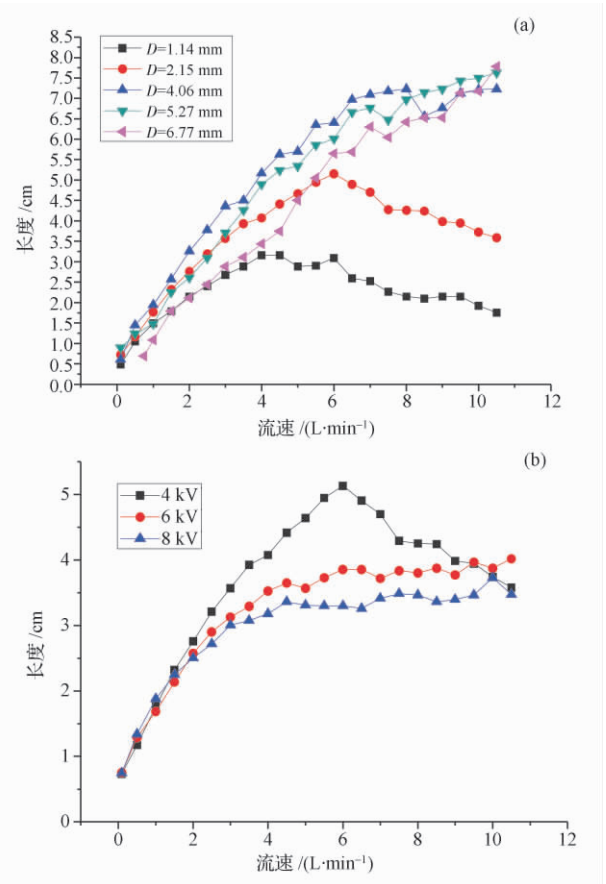


图 4 He 等离子体射流实验结果图 (a) 电压为 4 kV; (b) 玻璃管内径 $D = 2.15$ mm

图 4 和图 5 显示在 He 和 Ar 等离子体射流的实验中也观察到了类似的规律。可以看出,相同条件下 Ne 产生等离子体射流所需要的电压最低,Ar 所需的最高;Ne 等离子体射流所能维持的层流长度最长,性质最稳定,Ar 等离子体射流则最不稳定,而且 Ar 等离子体射流也最容易从辉光放电过渡为不稳定的丝状放电。这是因为等离子体射流的放电模式和流动特性与不同工作气体放电产生的亚稳态粒子数的密度有着密切关系。

Ne、He、Ar 三种气体形成的等离子体射流发生转捩的条件不同,还因为流体的黏性与流体的微观结构有关。等离子体射流的电离过程会形成大量的离子和电子,从而改变了流体的组分,因而也改

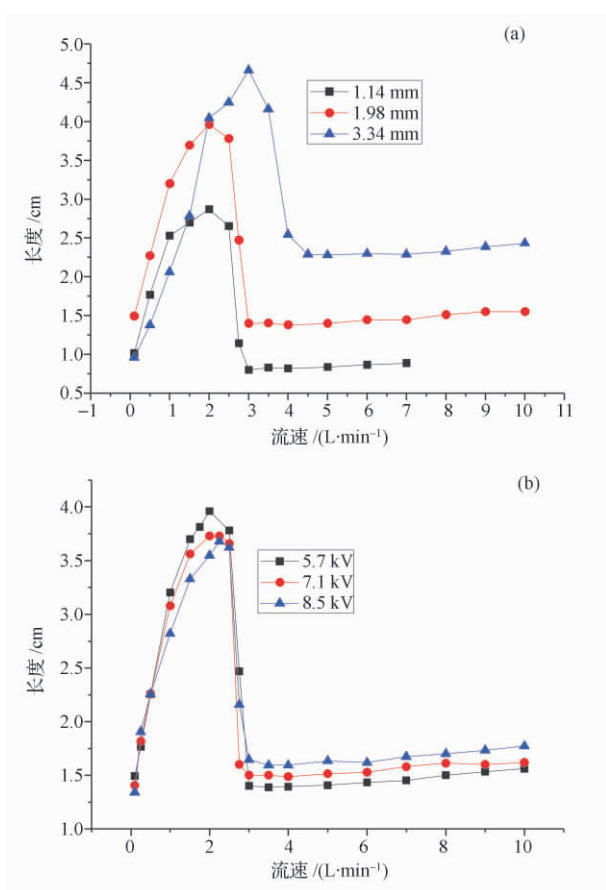


图5 Ar 等离子体射流实验结果图 (a) 电压为 5.6 kV;
(b) 玻璃管内径 $D = 1.98$ mm

变了流体的黏性。等离子体射流中频繁的带电粒子和中性粒子的撞击还会造成等离子体射流的温度比普通气体高,而热对流和黏性的扩散都将使流场的涡量发生变化,涡量的输运和其他不稳定性的发展就会造成流场向湍流过渡。

4 结论

实验结果显示,等离子体射流的流动状态与复杂的气体电离和击穿过程以及流动状态的转捩有关,所以对于等离子体的应用研究而言,为得到最

好的流动控制或工业生产效果,必须在未来的实验中继续探索最佳的放电气体、激励电压、喷管口径和气体流速。在工业生产中,人们都希望得到放电性质稳定、温度密度均匀、工作面积较大的等离子体,从而实现连续和可重复的工业生产。但是在本实验中可以看到,等离子体射流的长度并不简单地随激励电压和流速的增加而增加,长度最大的等离子体射流是采用 Ne 为工作气体,在电压为 3 kV、玻璃管内径为 6.77 mm、气体流速为 7.5 L/min 时得到的。可以认为进一步增大石英玻璃管的内径有望得到更长的等离子体射流,将于未来在增大等离子体射流长度方面做进一步的探索。

感谢清华大学工程物理系蒲以康教授和李庆博士对本实验的指导。

参 考 文 献

- 1 Suzen Y B, Huang P G, Jacob J D. Numerical simulations of plasma based flow control applications. 35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit; Toronto, Ontario, Canada: AIAA, 2005: 1—11
- 2 孙宗祥. 等离子体减阻技术的研究进展. 力学进展, 2003; 33 (1): 87—94
- 3 Pfender E. Thermal plasma technology: Where do we stand and where are we going? Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1999; 19(1): 1—31
- 4 Koinuma H, Ohkubo H, Hashimoto T, *et al.* Development and application of a microbeam plasma generator. APPI Phys Lett, 1992; 60 (7): 816—817
- 5 Yoshiki H, Taniguchi K, Horiike Y. Localized removal of a photoresist by atmospheric pressure micro-plasma jet using RF corona discharge. APPI Phys Lett, 2002; 41(9): 5797—5798
- 6 Guikema J, Miller N, Niehof J, *et al.* Spontaneous pattern formation in an effectively one-dimensional dielectric-barrier discharge system. Phys Rev Lett, 2000; 85(18): 3817—3820
- 7 庄礼贤, 尹协远, 马晖扬. 流体力学. 第2版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009

(下转第 6995 页)

- ment planning utilizing template-guided reformatting computed tomography. Dentomaxillfac Radiol 2000; 29(1) : 46—51
- 2 王晓波, 束 嫻, 周建玲, 等. 种植外科引导模板的计算机辅助设计实验研究. 口腔颌面修复学杂志, 2009; 10(2) : 92—94
 - 3 刘丽娜, 杨 敏, 哈斯·巴根, 等. 牙种植定位导向模板的计算机辅助设计和制作. 中国组织工程研究, 2012; 16(4) : 665—668
 - 4 刘云峰, 徐俊华, 董星涛, 等. 实现精确种牙的现代设计与制造技术. 机械工程学报, 2010; 46(5) : 150—157
 - 5 侯光辉, 唐 平, 陈松龄, 等. 一种牙种植三维数字化定位导板的生成算法. 计算机工程 2012; 38(7) : 284—289
 - 6 陈晓军. “数学医学”的若干关键技术研究—医学图像处理、计算机辅助手术规划、个性化医疗辅助 CAD/CAM、与手术导航. 上海: 上海交通大学 2008
 - 7 林泽明, 何炳蔚, 陈 江, 等. 基于配准技术的微创牙种植导向模板的制作方法及应用. 华西口腔医学杂志, 2012; 30(4) : 402—406
 - 8 甄 鑫, 周凌宏, 王卓宇, 等. Delaunay 三角剖分在放射治疗计划轮廓线重建中的应用. 仪器仪表学报 2007; 28(8) : 1518—1521

Design of Virtual Dental Implant Guide Template Based on Characteristics of Surface and ICP Registration and Fusion

LIANG Ying-peng¹, TANG Ping¹, CHEN Song-ling², JIANG Xiao-ping³, XIA Qian¹, LI Fang¹

(School of Automation, Guangdong University of Technology¹, Guangzhou 510006, P. R. China;

The Stomatology Department, The First Affiliated Hospital, SUN Yat-sen University², Guangzhou 510120, P. R. China;

The Hospital of Guangdong University of Technology³, Guangzhou 510006, P. R. China)

[Abstract] According to plant guide production efficiency and low precision, using the method of normal surface features and ICP algorithm, registration and fusion of dental model reconstructing by Delaunay algorithm and the CT segmentation model, are determined by fitting the surface of implant position and virtual guide through the relevant information of virtual craniofacial structure, completed the design and produce STL data implant guide. The experimental results show that the guide more convenient and accurate.

[Key words] 3D reconstruction registration fusion ICP curvature planting guide

(上接第 6978 页)

Experimental Study on the Axial Symmetry Plasma Jets

GUO Shi-jie^{1,2}, XIA Jun-ming^{1,2}, HUO Wen-qing^{1,2}, XU Yue-min¹

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences¹, Beijing 100190, P. R. China;

University of Chinese Academy of Sciences², Beijing 100049, P. R. China)

[Abstract] The potential application of atmospheric pressure plasma jets has attracted extensive interests recently. The mathematical model of axial symmetry plasma jets has been established, and it shows that the length of plasma jets is directly proportional to the flow rate when the plasma jets are in laminar mode. Effects of supplying voltage, gas flow rate, internal diameter of the quartz tube and different kinds of working gas (helium, neon and argon) on the atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma jets have been investigated in the experiment. It is found that the length of plasma jets is identical to the result of the mathematical model when the jets are in laminar mode. However, the transitions from glow discharges to filamentary discharges and from the laminar mode to the turbulent mode have also been observed when the supplying voltage/flow rate increased, both of which have lead to the decrease of the plasma jets' length. The composition of the working gas also has important effect on the transitions.

[Key words] plasma jets dielectric barrier discharges laminar flow turbulent flow