

霍尔推力器羽流离子能量实验研究

张乾鹏, 康小录, 余水淋
(上海空间推进研究所, 上海 200233)

摘 要: 霍尔推力器羽流中的离子能量分布情况对于评估推力器羽流影响, 优化推力器在航天器上的布局具有重要意义。本文使用阻滞势分析器对霍尔推力器羽流的离子能量分布进行了实验研究, 获得了推力器在不同工况下羽流场中关注位置的离子能量分布状况。实验结果表明: 霍尔推力器羽流离子主要由电荷交换碰撞产生的低能量离子和高能量源离子组成; 高能量源离子的分布在推力器轴线达到最大值, 低能量离子的分布随着与推力器轴线夹角的减小呈先增后减态势; 随着霍尔推力器放电电压的提高, 羽流源离子能量分布会相应向高能量方向偏移。

关键词: 霍尔推力器; 羽流; 离子能量; RPA

中图分类号: V439

文献标识码: A

文章编号: (2010) 03-0010-06

Experimental investigations of ion energy distribution in the plasma exhaust plume of a hall thruster

Zhang Qianpeng, Kang Xiaolu, Yu Shuilin

(Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 200233, China)

Abstract: The ion energy distribution in the plasma exhaust plume of a hall thruster is important to evaluate the influence of the hall thruster plume and optimize the thruster position on the spacecraft. Retarding potential analyzer (RPA) had been used to measure the ion energy distribution at a certain location downstream of the low-power hall thruster at various status. These experimental results indicate that the hall thruster plume is comprised of both low energy charge exchange (CEX) and high energy source ions. The high energy ions distribution is mostly at the center line of the thruster, the low energy ion distribution firstly increases and then decreases along with the decrease of angle between the analyzer and axes of thruster. When increasing thruster discharge voltage, the ion energy distribution will move to the direction of high energy.

Key words: hall thruster; plume; ion energy; RPA

收稿日期: 2010-02-01; 修回日期: 2010-03-19。

作者简介: 张乾鹏 (1985—), 男, 硕士, 研究领域为空间电推进技术。

析器外等离子体德拜长度; V 为两栅极之间的电势差, 这里取为 25V, 因为栅极 2 加有 -25V 偏置, 而栅极 3 偏置为 0V 时, 空间电荷效应的影响是最大的。根据 Langmuir 探针诊断得到的电子温度和等离子体密度计算得到所需的鞘层厚度为 0.917mm, 实验使用的阻滞势分析器栅极 2 和栅极 3 之间的距离为 0.7mm。

$$x_s = 1.02\lambda_D \left(\frac{eV}{T_e} \right)^{3/4} \quad (1)$$

随着离子阻滞栅极电势的增加, 阻滞势分析器的收集电流会逐渐减小。通过改变离子阻滞栅极的电势并且记录相应的收集电流值, 可以得到阻滞势分析器的电流-电势曲线, 通过对得到的伏安曲线进行处理便可得到离子能量分布。

收集电流通过式 (2) 可以用离子的速度分布表达^[3]:

$$I(V) = A_c q_i n_i \int_{u(V)}^{\infty} u_i f(u_i) du_i \quad (2)$$

式中, A_c 表示收集极有效收集面积; q_i 是离子所带的电量; n_i 是离子数密度; V 是离子阻滞栅极电势; u_i 是离子速度; $f(u_i)$ 是离子速度分布函数, 离子速度 u_i 可以表述为

$$u_i = \sqrt{\frac{2q_i V}{m_i}} \quad (3)$$

式中, m_i 是离子质量, 两边求微分得到:

$$du_i = \sqrt{\frac{q_i}{2m_i}} \frac{1}{\sqrt{V}} dV = dV \quad (4)$$

将 (3) ~ (4) 式带入 (2) 式并变换变量, 得到收集电流为:

$$I(V) = A_c q_i n_i \int_V^{\infty} \sqrt{\frac{2q_i V'}{m_i}} \sqrt{\frac{q_i}{2m_i}} \frac{1}{\sqrt{V'}} f(V') dV' \quad (5)$$

简化并且方程两边对阻滞栅极电势 V 微分得:

$$\frac{dI}{dV} = \frac{q_i n_i A_c}{m_i} f(V) \quad (7)$$

式中, $f(V)$ 为离子能量分布。从上面的分析可知, 只要得到相应电压下的 dI/dV 分布情况, 就可获得离子能量的分布状况。

2 实验结果与分析

图 4 为 RPA 诊断的角度位置示意图, 图中标示出了角度的定义, 下文提及的角度皆参照该图的定义。实验时, RPA 距推力器出口距离为 33.5cm。两个测试点的测试结果如图 5 和图 6 所示。

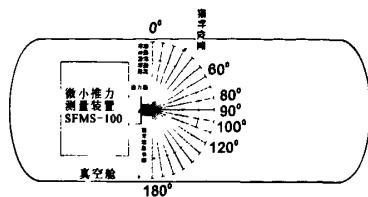
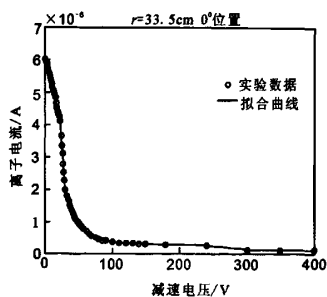
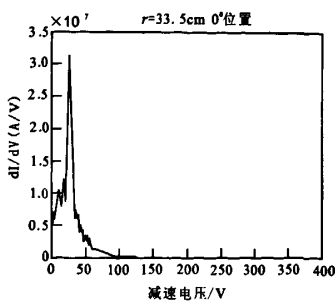


图 4 RPA 诊断位置示意图

Fig.4 Schematic of the RPA diagnostic position



(a) 电流-阻滞电势曲线



(b) 分布曲线

图 5 测试点 1 测试结果

Fig.5 Experimental result of position 1

实验得到霍尔推力器阳极电压为 300V 时, 霍尔推力器各角度的离子能量分布曲线如图 7 所示。

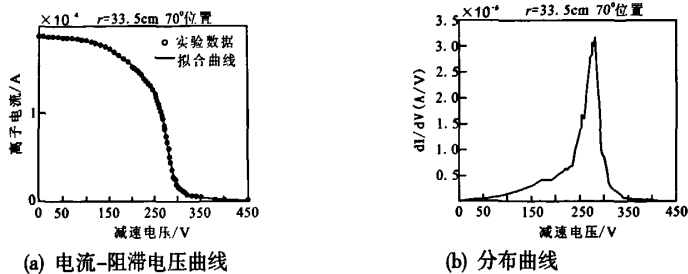


图 6 测试点 2 测试结果
Fig.6 Experimental result of position 2

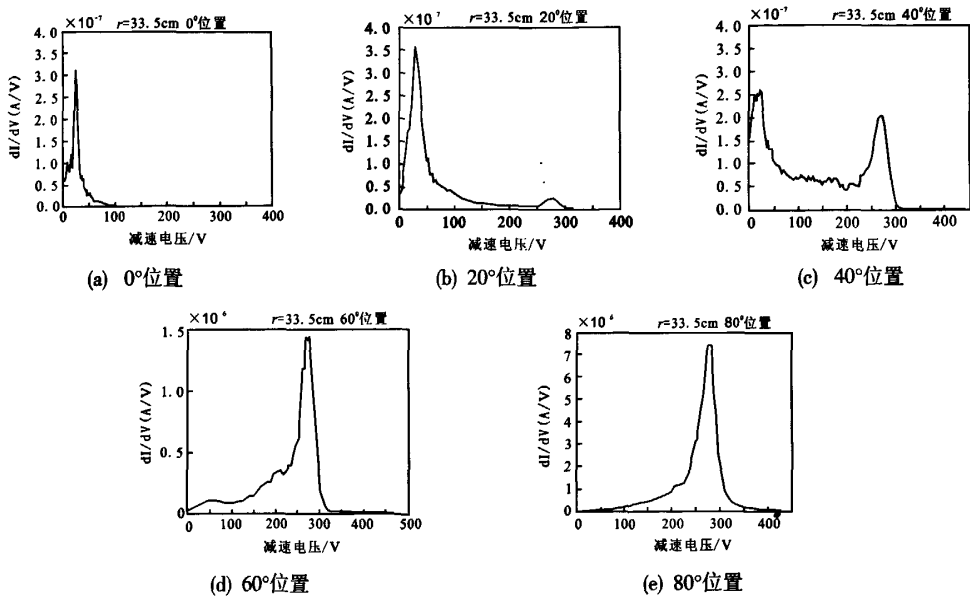


图 7 各角度的离子能量分布
Fig.7 Ion energy distribution in different angular positions

从图 7 可以看出,离子能量的分布可以分为两个部分:一部分是低能量离子(<50eV),这部分离子主要是由于电荷交换碰撞产生的,能量主要集中在 15eV~35eV 之间;另一部分是高能量的推力器源离子,这部分离子主要是推力器加速产生的高能离子,能量主要分布在 250eV~290eV 之间,峰值出现在 280eV 左右,是产生推力的主要部分。随着与推力器中心线之间角度的减小,电荷交换碰撞产生的低能离子先增多后减少,这主要是由于电荷交换碰撞产生的低能离子在距中心线大角度位置处的积累,在 20°~30°位置处低能离子数量是最多的。另外,低能离子能量的分布

峰值位置基本不变有可能是由于实验时真空舱的真空度不够高,背景中性粒子数量较多,导致电荷交换碰撞产生的低能离子较多而无法分辨的缘故。而高能量的离子随着与推力器中心线之间角度的减小而逐渐增多,在 10°位置处,高能离子开始出现,源离子能量分布主要集中在 250eV~290eV 之间。在 0°位置,羽流仅仅是由电荷交换碰撞产生的低能量离子组成;在 10°位置处,高能源离子开始出现,羽流是由大多数低能离子和少数高能源离子组成;在 20°位置处中间能量的离子开始出现,羽流由大部分低能量离子和少部分高能源离子以及中间能量的离子组成,

中间能量的离子主要是由源离子和背景中性原子弹性碰撞等产生的；在 30° 位置处羽流由低能量离子、中间能量离子以及高能量源离子组成，低能离子仍然占有大多数，相比于 20° 位置，中间能量的离子和高能量源离子都有所增多，在 40° 位置，羽流由低能量离子、中间能量离子以及高能量源离子组成，各组分所占的比重比较接近，在该角度处，羽流由低能离子占多数开始逐渐向高能粒子占多数转变；在 50° 位置，羽流主要由中间能量的离子和高能量源离子组成，同时也有少部分的低能量离子；而在 60° 以及更大的角度，羽流的绝大部分是由高能量源离子构成的，仅仅有极少的中间能量的离子，而且随着角度的增大，中间能量的离子越来越少。综上所述，在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 位置处，阻滞势分析器的电流主要是收集了

低能量的离子，而在 40° 位置处，低能量离子、中间能量离子和高能量源离子的分布基本相当，而在大于 50° 的位置处，则高能量源离子才是构成阻滞势分析器电流的主要部分，并且随着角度的增大，高能源离子越来越多，而低能离子则越来越少。

在不同阳极放电电压下对羽流进行了离子能量分布测量，各角度位置不同阳极放电电压下离子能量分布的比较如图 8 所示。可以看出，在不同阳极放电电压下，离子能量分布随角度的变化趋势基本相同，与额定工况一致。低能离子的分布基本不随放电电压的改变而变化，能量主要集中在 $15\text{eV} \sim 35\text{eV}$ 之间，而高能量源离子的分布随着放电电压的增高而往高能量方向偏移。

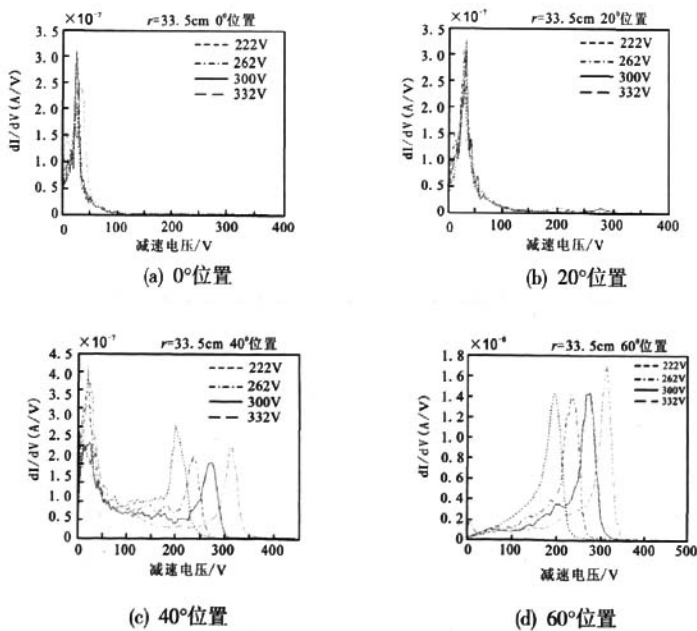


图 8 各角度位置不同阳极放电电压下离子能量分布的比较

Fig.8 Comparison of ion energy distribution at different anode discharge voltage

3 结论

本文采用阻滞势分析器对霍尔推力器羽流的离子能量分布进行了实验研究，研究了不同放电电压对霍尔推力器羽流离子能量分布的影响，获

得如下结论：

- (1) 霍尔推力器羽流离子主要由电荷交换碰撞产生的低能量离子和高能量源离子组成，随着与推力器中心线之间的角度逐渐减小，低能离子分布先增多后减少，而高能量源离子的分布则是逐渐增多。

(下转第 38 页)

示。改变不同的尺寸设计参数,可迅速画出该设计参数下的波纹管三维模型。

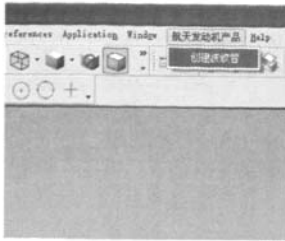


图4 波纹管建模菜单

Fig.4 Menu for the bellows modeling

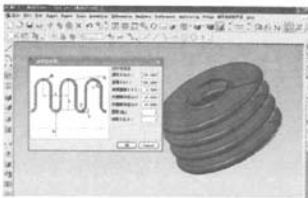


图5 波纹管建模界面

Fig.5 Interface for the bellows modeling

4 结论

提出了在UG中利用UG/Open工具和VC6.0进行液体火箭发动机波纹管设计的方法,并开发

了相应的交互式人机界面程序。设计人员可方便的利用该程序进行波纹管的快速建模,大大节省了波纹管的几何建模时间。

参考文献:

- [1] 董正卫, 田立中, 付宜利. UG/OPEN API 编程基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [2] 赵韩, 朱可, 张炳力, 等. 基于UG二次开发的参数化零件族系统[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2006, 29(8): 929-932.
- [3] 黄勇. UG/Open API、MFC和COM开发实例精解[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [4] 刘雅博, 陈拂晓, 郭俊卿. MFC在UG二次开发CAD系统中的应用[J]. 金属成形工艺, 2004, (3): 39-41.
- [5] 李如忠. UG二次开发中利用MFC的方法[J]. 机械工程与自动化, 2008, (6): 166-168.
- [6] 徐开先. 波纹管类组件的制造及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [7] 范元勋, 庄亚红, 王华坤. UG二次开发工具的使用[J]. 机械制造与自动化, 2002, (6): 70-72.
- [8] 毛炳秋, 林莉. 基于UG的皮带轮参数化结构设计[J]. 煤矿机械, 2006, 27(7): 15-18.
- [9] 索小娟, 孙恒五. UG二次开发中菜单定制与设计技术的应用研究[J]. 机械管理开发, 2009, 24(3): 150-151.

(编辑: 陈红霞)

(上接第14页)

(2) 在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 位置处, 低能量离子占多数, 而在大于 50° 的位置处, 高能量源离子分布占据绝大多数。

(3) 随着霍尔推力器阳极放电电压的增加, 羽流源离子能量分布会相应向高能量方向偏移。

参考文献:

- [1] Azziz Y. Instrument Development and Plasma Measurements on a 200 - Watt Hall Thruster Plume [D]. Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [2] Hutchinson, I H. Principles of Plasma Diagnostics [M]. Cambridge University Press, Cambridge, 2002.
- [3] King L B. Transport -Property and Mass Spectral Measurements in the Plasma Exhaust Plume of Hall - Effect Space Propulsion System[D]. University of Michigan, 1998.

(编辑: 王建喜)