

# 喷管长度对氨电弧加热发动机性能影响的模拟研究

耿金越<sup>1</sup>, 王海兴<sup>1</sup>, 陈熙<sup>2</sup>, 潘文霞<sup>3</sup>

(1. 北京航空航天大学 宇航学院 北京

2. 清华大学 工程力学系 北京

3. 中国科学院 力学研究所 北京)

北京航空航天大学宇航学院, 100191

Tel: 010-82339631, E-mail: [whx@buaa.edu.cn](mailto:whx@buaa.edu.cn)

**关键词:** 电弧加热发动机, 等离子体, 数值模拟, 喷管长度

**摘要:** 本文对低功率氨电弧加热发动机内的传热与流动过程进行了数值模拟, 研究了发动机喷管扩张段长度变化对发动机工作性能的影响。模拟结果表明: 在弧电流为 10 A, 入口总压为 2.5 atm 时, 氨电弧加热发动机喷管扩张段长度变短对上游的流动状态影响较小, 但对电弧加热发动机的工作性能有较大影响; 随着喷管长度变短, 发动机的推力和比冲随之提高。计算获得的典型工况下发动机出口平面上的轴向速度和温度的径向分布与文献报道的实验测量结果大体相符。

## 1 引言

电弧加热发动机属于电热推进方式, 以千瓦量级低功率电弧加热发动机为例, 供给发动机的气态推进剂以旋流方式进入, 经过阴极和阳极间放电所产生的直流电弧加热, 形成最高温度超过万度的高温部分电离气体, 经拉瓦尔喷管膨胀加速 (气体压力与温度相应下降), 以超声速射流形式喷出, 产生推力。经过几十年的努力, 具有高性能的电弧加热发动机在国外已经成功应用于地球同步卫星的南北位置保持<sup>[1]</sup>。

文献[2,3]对电弧加热发动机的性能进行了一些初步模拟研究。电弧加热发动机的性能 (推力、比冲等) 不仅与所采用的推进剂种类和工作参数有关, 还依赖于发动机约束段直径、长度, 喷管扩张段长度、扩张半角等结构参数。文献[4-6]通过实验方法研究了喷管形状和约束段尺寸等结构参数变化对发动机性能的影响, 获得了一些重要的实验结果。关于提高发动机使用性能的研究, 过去较多地依靠反复实验和经验判断来进行, 费时费力。因而发展准确可靠的数值模拟程序, 不仅可以增加我们对发动机内部复杂物理过程、机制的理解, 同时还可以根据发动机内部物理量、性能参数的变化规律, 对发动机的结构设计及性能提高提出改进建议。

在本文的计算中, 选取地面实验中通常采用的氨氢混合物模拟氨作为工作气体, 研究其他结构参数不变的情况下, 喷管扩张段长度变化对发动机工作性能的影响, 并将典型工况下的计算结果与文献报道的实验数据进行比较, 验证数值模拟结果的准确性。

## 2 数值模拟方案

本文数值模拟中采用的基本假定包括: (1) 发动机内部气体的流动为定常、轴对称、层流流动; (2) 等离子体处于局域热力学平衡状态, 对辐射为光学薄; (3) 工作气体采用 1: 3 氨氢混合物模拟氨, 其物理性质为压力和温度的函数; (4) 忽略浮力和重力, 忽略周向流动。模拟中采用如下的控制方程组<sup>[2,3,7]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u u)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho u v)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + j_r B_\theta \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u v)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v v)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] - 2 \mu \frac{v}{r^2} - j_z B_\theta \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u h)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v h)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{k}{c_p} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{k}{c_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) + u \frac{\partial p}{\partial z} + v \frac{\partial p}{\partial r} + \Phi + \frac{j_z^2 + j_r^2}{\sigma} + \frac{5k_B}{2e} \left( \frac{j_z}{c_p} \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{j_r}{c_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) - U_r \quad (4)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \sigma \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

此处  $u$  和  $v$  分别是轴向( $z$ -)和径向( $r$ -)速度分量;  $p$  和  $\phi$  是压力与电位;  $\rho$ 、 $h$ 、 $\mu$ 、 $k$ 、 $c_p$ 、 $\sigma$  和  $U_r$  分别是依赖于温度与压力的等离子体密度、比焓、粘性系数、热导率、定压比热、电导率以及单位体积辐射功率, 模拟中采用预先编制的数据库加以计算;  $\Phi$  为粘性耗散项<sup>[7]</sup>。考虑到电磁场的影响及可压缩效应, 轴向及径向动量方程(2)与(3)中引入了 Lorentz 力项, 能量方程(4)中引入了焦耳热项, 粘性耗散及压力功项; 方程(2)、(3)和(4)中的电流密度分量  $j_r$  和  $j_z$  以及自感磁场  $B_\theta$  分别由下式计算。

$$j_r = -\sigma \frac{\partial \phi}{\partial r}, \quad j_z = -\sigma \frac{\partial \phi}{\partial z}, \quad B_\theta = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r j_z \xi d\xi \quad (6)$$

数值模拟中采用中科院力学所设计的电弧加热发动机的结构尺寸<sup>[3]</sup>。在发动机入口, 给定入口总压, 在迭代过程中每一步, 均根据所求出的入口网格点处的当地静压, 由可压缩流动等熵关系式<sup>[2,3]</sup>计算入口处的轴向速度并由此确定气流量。喷管上游阳极端面温度取为外推边界条件, 钨阳极-喷管外壁面处采用辐射边界条件, 钨的辐射系数取为  $\epsilon=0.3$ ; 沿发动机轴线, 采用轴对称条件; 喷管出口截面处的温度与速度均由上游外推获得。在阴极上游端面温度取为外推边界条件, 并给定电流密度, 阳极外壁面电位取为 0, 其它边界处电位梯度均取为零。数值模拟采用  $89 \times 30$  的计算网格, 以全速度 SIMPLE 型算法进行方程组(1)–(5)的求解。

### 3 数值模拟结果与讨论

中科院力学所设计的电弧加热发动机总长为 22 mm (下文中称为喷管 I), 本文计算中将电弧加热发动机喷管扩张段截短, 截短后的发动机总长分别为 17 mm (喷管 II) 和 12 mm (喷管 III), 见图 1。为了便于比较, 计算时三个不同喷管长度的发动机均工作在弧电流 10 A, 入口总压为 2.5 atm 的条件下, 均采用氮氢混合物模拟氩作推进剂。

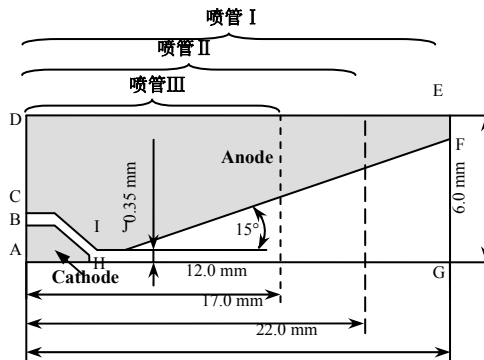


图 1 电弧加热发动机喷管结构示意图

图 2 和图 3 分别给出了不同喷管长度的氨电弧加热发动机内的轴向速度分布和温度分布。由图 2 和图 3 可以看出不同喷管长度的发动机内物理量变化规律是相似的; 推进剂主要是在发动机约束段附近被加热, 发动机内最高温度出现在阴极附近的中心轴线处, 在约束段内电流密度较高, 从而焦耳热成为此区域内气体加热的主要机制。在喷管扩张段气动膨胀占据主导地位, 焦耳加热的影响减弱, 导致发动机内气体温度逐渐下降。

从图 2 和图 3 还可以看出, 喷管长度变化对电弧发动机通道内推进剂的速度分布和温度分布影响较小, 其主要原因是电弧加热发动机扩张段内等离子体处于超声速流动<sup>[2]</sup>, 所以下游的流动状态对上游影响很小。但是从图 3 中的阳极喷管内壁面的温度分布可以看出, 喷管扩张段长度变短使得阳极壁面的温度略微升高, 其主要原因是, 一方面由于喷管长度变短使阳极内壁面电流贴附区更加集中, 从而等离子体向阳极的局部传热增加, 另一方面是由于喷管扩张段长度变短会使阳极向外界辐射传热的面积减小。

图 4 给出了电弧加热发动机不同喷管长度下, 发动机内气体轴向速度(a)和气体温度(b)沿轴线变化情况。从图中可以看出, 将发动机喷管截短, 对于发动机上游参数影响较小。图 5 给出了不同喷管长度下, 电弧加热发动机出口平面上气体的轴向速度(a)和气体温度(b)的径向分布。很明显, 由于出

口平面位于不同的轴向位置，所以不同喷管扩张段长度下发动机的出口参数有较大区别，喷管扩张段长度越小，发动机出口处的最大轴向速度和最高温度越高。

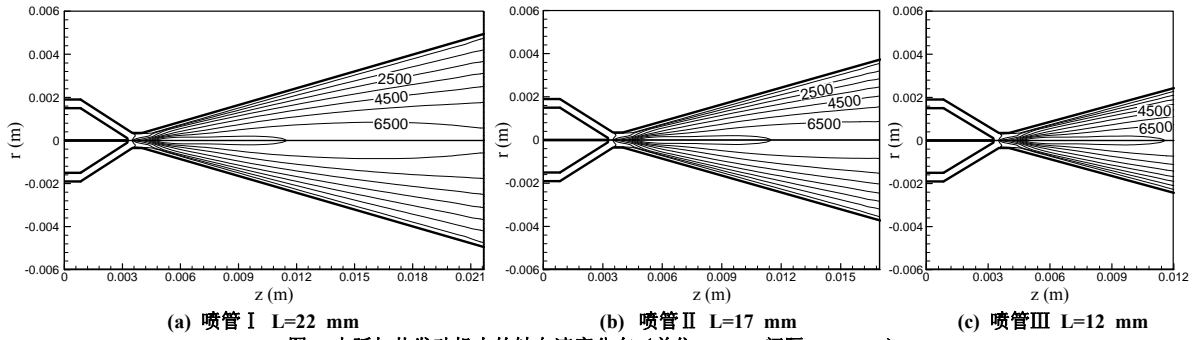


图 2 电弧加热发动机内的轴向速度分布 (单位: m/s, 间隔 1000 m/s)

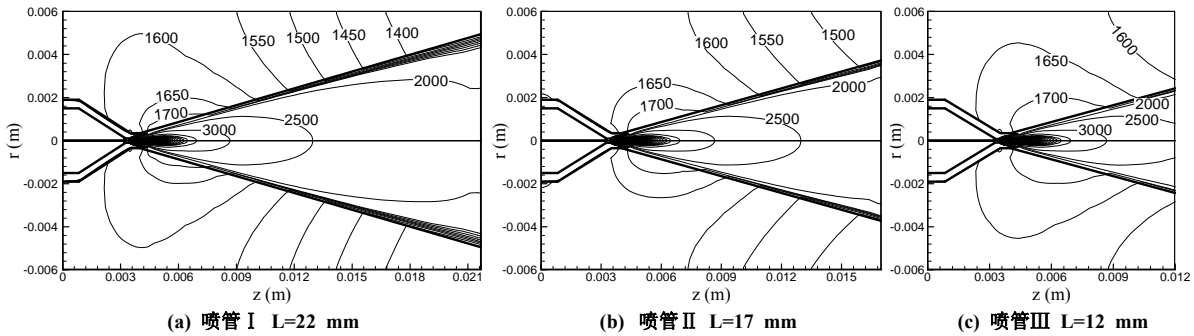


图 3 电弧加热发动机流道内及壁面固体区的温度分布 (单位: K, 流道内间隔 500 K, 阳极壁面间隔 50 K)

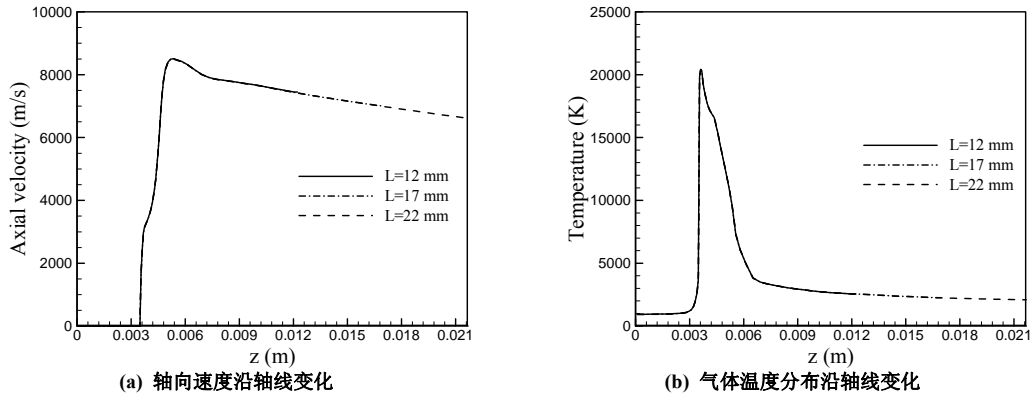


图 4 电弧加热发动机内轴向速度和气体温度沿轴线变化

由图 4 给出的发动机内气体的轴向速度沿轴线变化可以看出，由于电弧加热发动机内部物理过程的复杂性和特殊性，使轴向速度的最大值并不是象传统的 Laval 喷管那样，出现在喷管的出口处。由此我们推测，发动机可能不是工作在最佳性能状态。因此，我们尝试从能量转化的角度研究喷管长度对发动机性能的影响。电弧加热发动机规范化的轴向动能通量和规范化的轴向动量通量分别可以按式(7)和式(8)计算。

$$E_{ka} = \int_0^{r_z} \rho u \left( \frac{1}{2} u^2 \right) 2\pi r dr / G \quad (7)$$

$$E_m = \int_0^{r_z} \rho u^2 2\pi r dr / G \quad (8)$$

式中  $r_z$  是轴向距离  $z$  处电弧加热发动机轴线到阳极壁面的距离； $G$  是电弧加热发动机质量流量。由于发动机的比冲可以表示为  $I_{sp} = E_{m,exit} / g$ ， $g$  是当地重力加速度， $E_{m,exit}$  是发动机出口截面的规范化轴向动量通量，所以根据规范化动量通量的变化可以预测发动机的比冲。

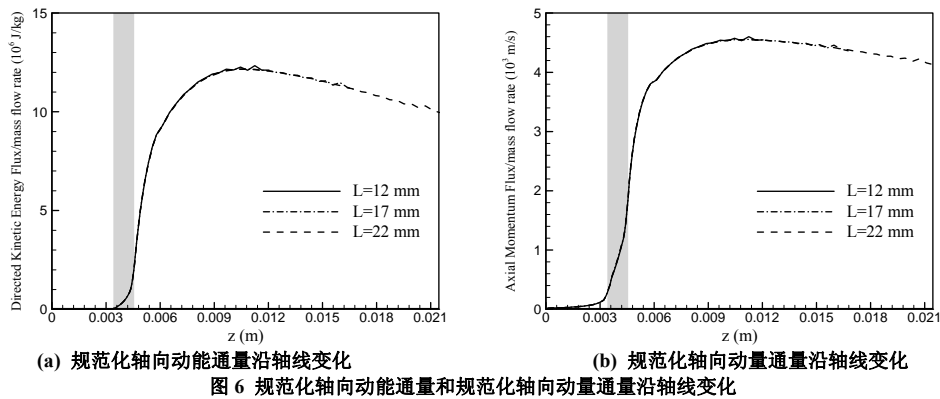
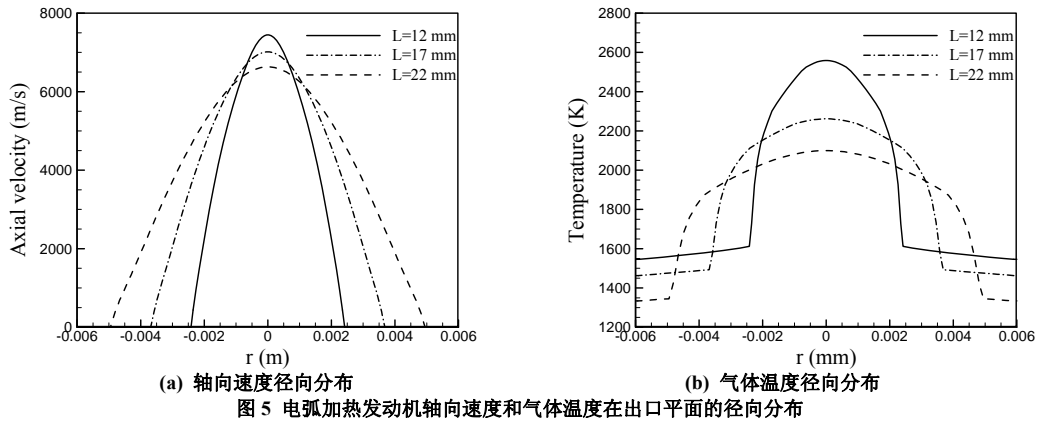


图 6 给出了氨电弧加热发动机内规范化轴向动能通量(a)和规范化轴向动量通量(b)沿轴线变化情况, 图中阴影部分是发动机约束段的位置。由图 6(a)可知, 在喷管扩张段, 随着推进剂的热能不断转化为动能, 规范化轴向动能通量在扩张段先迅速增加, 在距上游推进剂入口 10 mm 左右达到最大值; 此后又由于气体的粘性耗散及各种能量损失作用下, 随着气体流向喷管出口又逐渐减小。由图 6(b)可知, 规范化轴向动量通量有着与规范化轴向动能通量相同的变化趋势。根据上述模拟结果推算的不同喷管长度下的发动机性能参数见表 1。由表 1 可知, 两次减短扩张段长度, 使得比冲由 428 s 提高到 477 s; 而推力由 108.1 mN 增加到 119.6 mN, 发动机的推力和比冲均有所提高。同时由于电弧加热发动机内大部分推进剂在靠近喷管壁面的区域流过<sup>[2]</sup>, 阳极壁面温度的升高使靠近壁面的气体温度随之提高, 气体密度下降, 从而使电弧加热发动机的流量略微减小; 同时壁面附近的气体电导率也随气体温度的升高而增加, 导致电弧加热发动机弧电压略有降低,

上述结果似乎表明, 在电弧加热发动机内, 采用较短的喷管可以提高发动机的性能, 因为喷管长度太长, 粘性和传热损失会降低发动机的性能。但是实际上, 如果喷管过短, 投入发动机的能量中用于推进剂解离、电离、甚至激发的非平衡能量损失就会加大, 同样也会造成发动机的性能和效率的降低。目前, 我们的数值模拟工作还不能对非平衡现象做进一步的定量分析, 需要在今后的工作中加以改进。

表 1 喷管长度对电弧加热发动机主要性能参数的影响

	喷管总长	电流	电压	质量流量	推力	比冲
喷管 I	22 mm	10 A	82.6 V	25.8 mg/s	108.1 mN	428 s
喷管 II	17 mm	10 A	82.5 V	25.7 mg/s	114.4 mN	454 s
喷管 III	12 mm	10 A	82.4 V	25.6 mg/s	119.6 mN	477 s

本文研究中还对 NASA Lewis 中心设计的 1 kW 级电弧加热发动机<sup>[8-10]</sup>进行了数值模拟。模拟中采

用和文献报道的实验类似的工作条件,即采用氮氢混合物模拟氨作为推进剂,弧电流为 9 A,质量流量为 38.1 mg/s,计算获得电压为 93.6 V(不包含鞘层电压),比冲为 457 s,推力为 170.7 mN。文献[9,10]中报道的实验中同样采用氮氢混合物模拟氨作推进剂,在弧电流为 9 A、弧电压为 111 V、质量流量为 37.9 mg/s 的条件下,采用激光诱导荧光法(LIF)测量了喷管出口下游 1 mm 处速度和温度沿径向分布。图 7 是本文模拟结果和文献中报道的实验测量值的对比。图 7(a)是电弧加热发动机气体轴向速度在出口平面的分布,由图中可以看出,实验测量值比模拟结果略高,我们推测是因为实验中测量的是喷管出口下游 1 mm 处的速度分布,而当地环境压力较低,气体排出发动机后会再次膨胀加速导致实验值略高于数值模拟结果。图 7(b)是本文数值模拟获得的发动机出口平面上温度的径向分布与实验测量值的比较,由图看出,模拟结果与相似工况下的实验测量值的数值范围大体符合。

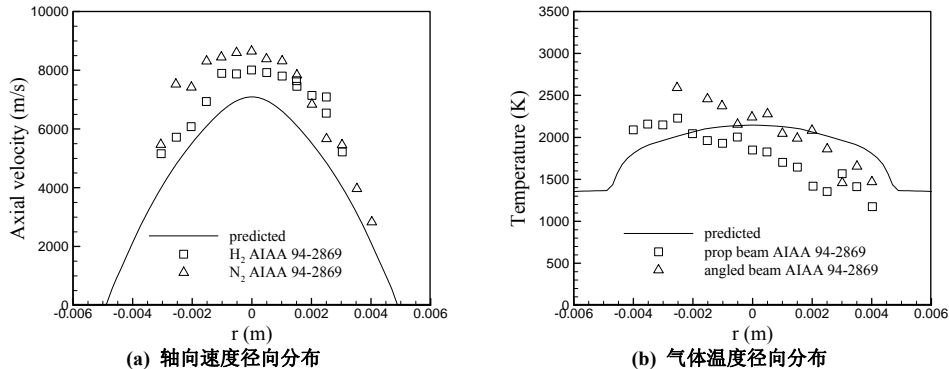


图 7 NASA Lewis 中心电弧加热发动机出口平面上轴向速度和气体温度的径向分布的实验与模拟结果对比

## 4 结论

本文采用数值模拟方法对低功率氨电弧加热发动机内的流动和传热过程进行了研究。结果表明:由于电弧加热发动机扩张段内等离子体为超声速流动,发动机喷管扩张段长度变短对上游的流动状态影响较小。然而,由于不同喷管长度出口平面位于不同的轴向位置,所以不同喷管扩张段长度的发动机出口参数有较大区别,喷管扩张段长度越小,发动机出口处的最大轴向速度和最高温度越高。计算结果表明,喷管扩张段长度对电弧加热发动机的工作性能有一定影响。计算获得的典型工况下发动机出口平面上的轴向速度和温度的径向分布与文献报道的实验测量结果大体相符。

## 参考文献

- [1] Auweter-Kurtz M, Glocker B, Götz T, et al. Arcjet thruster development [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1996, 12(6): 1077-1083.
- [2] 贾少霞, 王海兴, 陈熙, 等. 低功率氨电弧加热发动机的数值模拟 [J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(7): 1539-1542.
- [3] 贾少霞. 低功率电弧加热发动机内部传热与流动研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学宇航学院, 2009.
- [4] Deininger W D, Pivrotto T J, Brophy J R. Effect of nozzle and cathode configuration on arcjet performance [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1990, 6(3): 271-275.
- [5] Deininger W D, Cruciani G, Glogowski M J. Performance comparisons of low-power arcjets [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1995, 11(6): 1368-1371.
- [6] 汤海滨, 刘畅, 王海兴, 等. 电弧加热发动机结构参数对性能的影响 [J]. *宇航学报*, 2006, 27(5): 1063-1067.
- [7] 陈熙. 热等离子体传热与流动[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [8] Storm P V, Cappelli M A. Arcjet nozzle flow-field characterization by laser-induced fluorescence [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(3): 486-495.
- [9] Burtner D, Keefer D, Ruyten W. Experimental and numerical studies of a low-power arcjet operated on simulated ammonia [R]. AIAA 94-2869.
- [10] Burtner D, Keefer D. Low-power ammonia arcjet: numerical simulations and laser-induced fluorescence measurements [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1996, 12(6): 1123-1128.

附注:

[作者简介] 耿金越(1986-), 男, 河南省鹤壁市人, 硕士研究生, 研究方向为空间电推进及与特种推进。

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50836007, 10920162)。