

低功率霍尔推力器阳极供气环工程设计关键参数仿真*

龙建飞^{1,2}, 罗威¹, 程谋森², 杨威³, 孙明明³

(1. 南华大学核科学技术学院, 湖南衡阳 421001; 2. 国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073;

3. 兰州空间技术物理研究所真空技术与物理重点实验室, 甘肃兰州 730000)

摘要:为了提高低功率霍尔推力器放电通道内中性原子分布均匀性,采用有限元方法对阳极供气环关键结构参数进行优化研究。针对双腔式阳极供气环结构,重点分析了缓冲腔容积比以及缓冲腔隔板导流小孔数量等关键参数对阳极供气均匀性的影响。研究表明:随着缓冲腔容积比的增大,阳极供气环出气孔差异率先快速减小后趋于稳定,其中当容积率 $k=1.0$ 时,平均差异率和最大差异率分别为1.77%和3.79%;隔板间导流小孔数量从8增加到14时,出气孔差异率呈现浴盆曲线特性,其中导流孔数量为10时,平均差异率和最大差异率分别为1.8%和3.8%。研究结果可为霍尔推力器阳极供气环工程设计提供理论支撑。

关键词:霍尔推力器;阳极供气环;有限元;质量流量;均匀性

中图分类号:V475.1 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2023)03-053-08

Simulation of key parameters in engineering design of anode gas distribution ring of low-power Hall thruster

LONG Jianfei^{1,2}, LUO Wei¹, CHENG Mousen², YANG Wei³, SUN Mingming³

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China;

2. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Technology & Physics, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to improve the uniformity of the neutral atom distribution in the discharge channel of the low-power Hall thruster, the finite element method was used to optimize the key structural parameters of the anode gas distribution ring. Aiming at the double-chamber anode gas distribution ring structure, the influence of key parameters such as the volume ratio of the buffer chambers and the number of diversion holes between the buffer chamber partitions on the uniformity of anode gas supply was analyzed. The research results show that with the increase of the volume ratio, the difference of the anode gas distribution ring outlet pores decreases rapidly and then stabilizes. When the ratio $k=1.0$, the average difference rate and the maximum difference rate are 1.77% and 3.79%, respectively; when the number of diversion holes between the buffer chamber partitions increases from 8 to 14, the difference rate of the air outlets shows the characteristics of the bathtub curve, and when number of the diversion holes is 10, the average difference rate and the maximum difference rate are 1.8% and 3.8%, respectively. The research results can provide theoretical support for the engineering design of the anode gas distribution ring of the Hall thruster.

Keywords: Hall thruster; anode gas distribution ring; finite element; mass flow rate; uniformity

随着我国微小卫星快速发展以及商业航天兴起^[1-2],低功率霍尔推力器以其结构简单、效率高、工作寿命长等优势而备受期待^[3],同时各空间任务也对低功率霍尔推力器性能不断提出更高要求。霍尔推力器优化研究中发现,放电通道内工质气体分布均匀性是影响其性能的重要因素。当通道内气体分布存在周向不均匀时,等离子体密度存在周向角梯度并产生周向电场,同时与磁场耦合时,会导致过多的电子漂移到通道壁面,从

而增加推力器热负荷并降低其效率^[4-5];另外通道内气体分布周向不均匀也会导致放电电流增加,并使得放电电流振荡严重,减小推力器的效率和比冲^[6-7]。低功率霍尔推力器由于几何尺寸相对小,其性能对通道内气体分布均匀性更加敏感。因此,改善通道内气体分布均匀性对低功率霍尔推力器性能优化具有重要意义。

霍尔推力器主要通过阳极供气环向放电通道内注入工质气体,其中阳极供气环结构参数将直

* 收稿日期:2021-07-06

基金项目:中国博士后科学基金第65批面上项目一等资助项目(2019M653906);湖南省教育厅重点资助项目(19A440);湖南省自然科学基金面上资助项目(2021JJ30564);南华大学博士启动基金资助项目(190XQD013)

作者简介:龙建飞(1984—),男,湖南省衡阳市,高级工程师,博士,E-mail:ljf510@163.com;

程谋森(通信作者),男,山东平度人,教授,博士,博士生导师,E-mail:mscheng@nudt.edu.cn

接影响通道内气体分布均匀性。2003 年法国 Vail 等^[6]对阳极供气环出气小孔的径向位置进行了研究,对比分析了三种不同径向位置对放电通道内气体均匀性的影响,测试结果表明,当出气小孔位于阳极供气环的中径时,通道内气体均匀性最好。2008 年 Miyasaka 等^[7]分析了阳极供气环出气孔大小与通道内气体分布之间的关系,研究发现,改变阳极供气环出气小孔的直径,将影响放电通道气体均匀性,并使得推力器振荡特性有明显的变化,相比而言,出气小孔直径越小,电离区气体密度越高,对应的电流振荡振幅也越大。2017 年 Conversano 等^[8]针对低功率磁屏蔽霍尔推力器阳极供气环优化效果进行实验研究,采用皮托管探头结合旋转平台对放电通道内气体周向分布进行了测试,结果显示,通道内周向气体压强值与平均值最大误差小于 5%,验证了该推力器放电通道内气体分布具有较好的均匀性。2018 年兰州物理研究所郭宁研究员^[9]提出由多孔材料替换现有的出气孔结构,以实现工质气体均匀分布。2020 年北京航空航天大学汤海滨教授^[10]将现有出气孔结构改成分配孔与狭缝相结合结构,以实现较为均匀的气体分布。这些研究多关注出气孔的位置、大小以及结构方式等,而关于阳极供气环内部关键参数的定量研究少有报道,目前供气环设计仍是低功率霍尔推力器研制中的关键因素。

为了提高放电通道气体分布均匀性,本文结合兰州空间技术物理研究所多年研制经验,采用有限元软件进行仿真,研究缓冲腔容积比、隔板导流小孔数量两个内部关键参数对供气均匀性的影响规律,为低功率霍尔推力器阳极供气环工程设计提供理论参考。

1 仿真模型

1.1 结构建模

霍尔推力器放电通道典型结构如图 1 所示,其中阳极供气环位于放电通道底部。由贮供单元提供的工质气体通过进气管路注入阳极供气环,并在其结构内实现匀化处理,最后由出口气孔进入放电通道,从而实现均匀分布。考虑进气管路的固定、密封、绝缘等工程问题,一般阳极供气环采用单管进气,这便使得工质气体注入位置将严重偏离阳极供气环的轴心,且单管进气流量等于多个出气孔流量总和,因此,如何克服偏心压力及大流量作用而实现均匀分配,成为阳极供气环内部结构设计的难题。

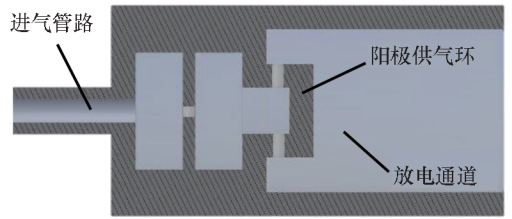


图 1 霍尔推力器放电通道结构示意图

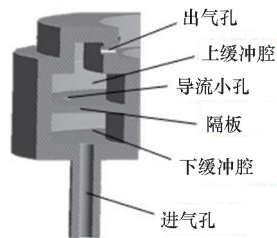
Fig. 1 Schematic diagram of Hall thruster discharge channel

阳极供气环一般采用双腔式结构,工质气体通过单管首先进入下缓冲腔实现一次匀化,然后由两腔隔板上的多个导流小孔过渡到上缓冲腔并实现二次匀化,最后通过多个均布的输出气孔进入放电通道,以实现放电通道内均匀分布。本文将以国产典型低功率霍尔推力器 LHT40 阳极供气环开展仿真分析,对该推力器阳极供气环进行 1:1 三维建模。采用三维实体四面体单元自上而下的方法,对模型进行自适应网格划分,其中对自适应网格划分不能够达到分析要求的部位进行局部网格细化,增加节点数,以达到理想的计算结果。阳极供气环模型如图 2 所示,其中图 2(a)为整体结构,图 2(b)为环剖面结构。该阳极供气环主要参数如表 1 所示。



(a) 整体结构

(a) Overall structure



(b) 剖面图

(b) Section view

图 2 阳极供气环结构建模与网格划分

Fig. 2 Modeling and meshing of anode gas distribution ring

1.2 边界条件

阳极供气环内气体的流动状态根据雷诺系数 $Re^{[11]}$ 大小判断,主要分为湍流 ($Re > 200$) 和黏

表1 阳极供气环主要结构参数

Tab.1 Main structural parameters of anode gas distribution ring

位置	直径/mm	数量	内径/mm	外径/mm
进气口	0.5	1		
出气口	0.5	24		
下缓冲腔			31	41
上缓冲腔			31	41

滞流 ($Re < 1\ 200$)。雷诺系数公式如下:

$$Re = \frac{Q_m d}{\eta A} \quad (1)$$

式中: Q_m 为质量流量, d 为管道直径, η 为流体的黏滞系数^[12] (对于 20 °C 的氙气流, 黏滞系数为 $2.1 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), A 为管道横截面积。

LHT40 推力器阳极供气环进气管道直径为 1.0 mm, 进入氙气流量为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{s}^{-1}$, 则根据式(1)可得, 管道内雷诺系数 $Re = 60.6$, 即管道内流动属于黏滞流动。

基于黏滞流特征, 结合推力器供气工作参数, 模型中将入口边界设置为质量流量, 根据该推力器阳极流量参数, 该值设置为 $1.0 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。出口边界设置为压强边界, 霍尔推力器通道内压强^[10]一般约为 2.0 Pa, 300 K 温度下通道内(阳极供气环出气孔附近)气体平均自由程 $\bar{\lambda}$ 约为 $7.0 \times 10^{-4} \text{ m}$, 通道外径 41 mm, 对应克努森系数^[13] ($k_n = \bar{\lambda}/d$) 约为 0.008, 可近似认为满足黏滞流。阳极供气环内壁面均采用无滑移绝热壁面边界条件, 即壁面流速为 0, 工质气体与壁面也不发生能量交换。

1.3 控制方程

控制方程采用有限容积法离散, 压力速度耦合计算采用 SIMPLEC 算法, 残差精度设为 1.0×10^{-6} 。流动状态满足连续性方程、动量守恒方程和质量守恒方程。单位时间内流出控制体的流体净质量总和等于同时间间隔因密度变化而减少的质量, 式(2)为连续性方程的微分形式。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0 \quad (2)$$

式中, ρ 为流体密度, v_i 为流体速度。

动量方程本质是满足牛顿第二定律, 对于给定的流体微元体, 动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力之和。不可压缩黏性流体的动量方程满足如式(3)所示的 Navier-Stokes 方程^[12]。

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + (v_i \cdot \nabla) v_i = f - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 v_i \quad (3)$$

式中, f 为单位体积流体受的外力, p 为压力, μ 为动力黏度。

在确定供气管路中的气流均为黏滞流后, 假设气流在供气管路中均为稳定性流动, 即: ①阳极供气环均为理想管道(管道不漏气、不吸附); ②供气环内压强不随时间发生变化; ③气体的黏滞系数恒定。

2 仿真分析

2.1 评判指标

阳极供气环一般以多个均布的出气孔(LHT40 推力器为 24 个)向通道内注入工质气体, 出气孔供气均匀性将直接决定放电通道内气体周向分布。因此, 本文以出气孔的质量流量参数为计算输出, 计算每个出气孔的质量流量差异率 f_i , 并进一步以最大差异率 f_{\max} 、平均差异率 f_{avg} 作为评判指标进行分析, 对应表达式如下:

$$\begin{cases} m_{\text{avg}} = \frac{\sum m_i}{N_{\text{total}}} \\ f_i = \left| \frac{m_i - m_{\text{avg}}}{m_{\text{avg}}} \right| \\ f_{\max} = \max \left(\left| \frac{m_i - m_{\text{avg}}}{m_{\text{avg}}} \right| \right) \\ f_{\text{avg}} = \frac{\sum |m_i - m_{\text{avg}}|}{M_{\text{total}}} \end{cases} \quad (4)$$

其中: m_i 是第 i 出气孔的质量流量; N_{total} 为出气孔数量; m_{avg} 是出气孔的平均质量流量; M_{total} 是出气孔总质量流量。

为了提高出气孔供气的均匀性, 本文将结合评判指标, 重点研究缓冲腔容积比、隔板导流小孔数量两个参数对供气均匀性的影响规律。

2.2 缓冲腔容积比仿真分析

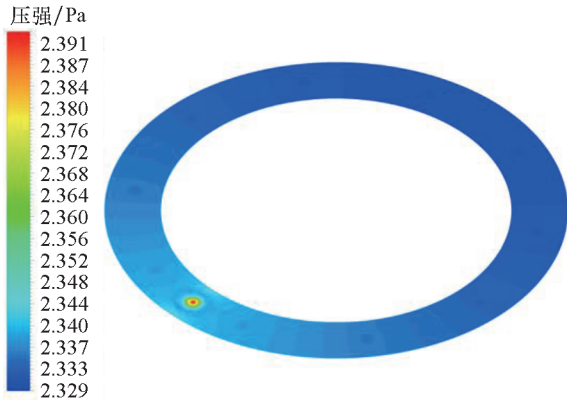
阳极供气环分为上下两个缓冲腔, 由进气管注入的工质气体在下缓冲腔进行一次匀化, 通过隔板小孔流入上缓冲腔并进行二次匀化, 最终由上缓冲腔顶板出气小孔注入放电通道。在两次匀化过程中, 上下缓冲腔的容积比例 ($k = V_{\text{up}}/V_{\text{down}}$) 对出气孔质量流量均匀性具有重要影响。本文分别选取了 k 为 0.5、1.0、1.5、2.0 四组变量进行仿真计算。由于供气环的内外半径受限于放电通道, 不宜变动, 同时为了不影响推力器放电通道的有效长度, 阳极供气环的总高度也将固定(上下缓冲腔总高度

4.0 mm), 因此, 仿真计算中, 主要通过改变上下缓冲腔的相对高度进行容积比的调节, 另外隔板导流小孔数量选用 10 个。

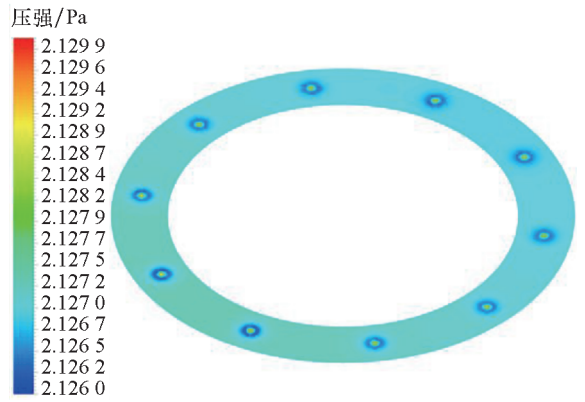
图 3 为不同容积比下阳极供气环内气体分布结果。分别选取了下缓冲腔和上缓冲腔内部中间的气体分布进行对比分析, 从图中可以看出, 整体而言, 下缓冲腔内气体分布周向非均匀性大于上缓冲腔。进一步对比发现, 容积比 k 从 0.5 增大到 2.0, 下缓冲腔气体分布均匀性变化不大; 而上

缓冲腔内气体均匀性在 k 从 0.5 到 1.0 时得到一定改善, 之后趋于稳定。分析认为, 在缓冲腔总高固定情况下, 随着容积比增大, 上缓冲腔容积相应增大, 使得其腔内工质气体密度下降, 有利于气体的均匀性分布。

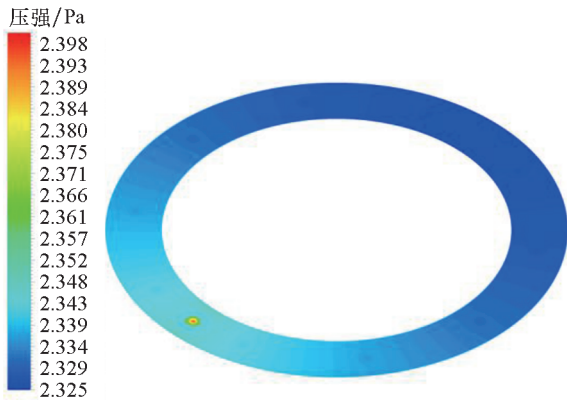
图 4 为不同容积比下出气孔质量流量随着周向角度变化关系, 其中周向角度以进气管路为参考零度。从图中可以看出, 在不同容积比下, 出气孔质量流量均表现出相近变化趋势, 即随着周向



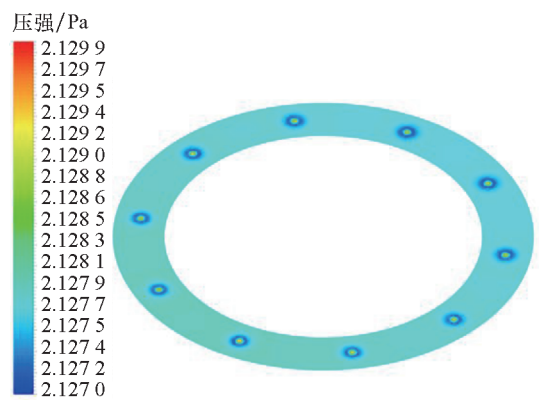
(a) $k=0.5$ (下腔)
(a) $k=0.5$ (lower chamber)



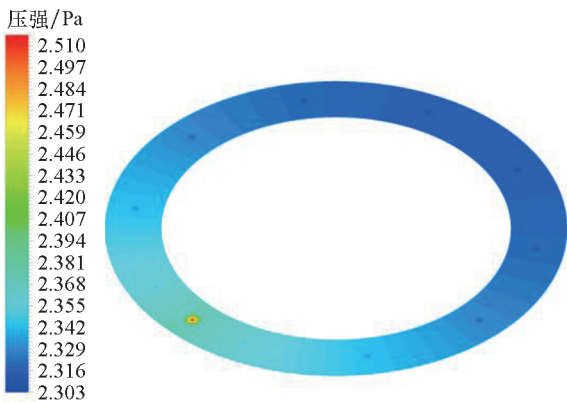
(b) $k=0.5$ (上腔)
(b) $k=0.5$ (upper chamber)



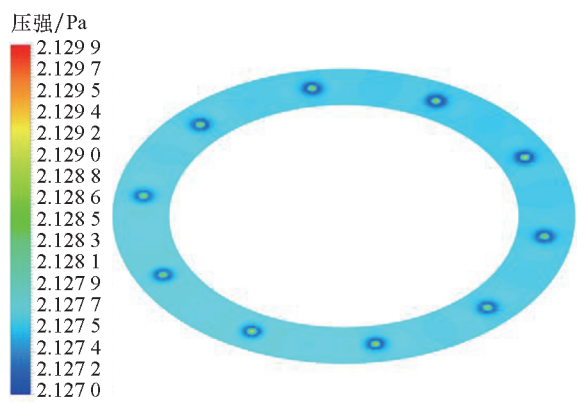
(c) $k=1.0$ (下腔)
(c) $k=1.0$ (lower chamber)



(d) $k=1.0$ (上腔)
(d) $k=1.0$ (upper chamber)



(e) $k=1.5$ (下腔)
(e) $k=1.5$ (lower chamber)



(f) $k=1.5$ (上腔)
(f) $k=1.5$ (upper chamber)

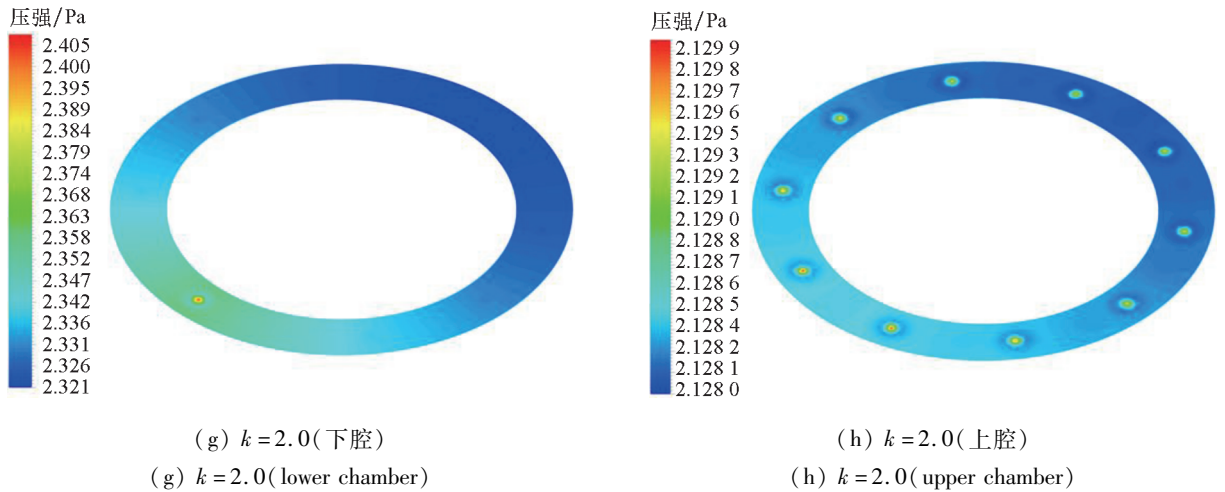


图3 不同容积比下气体压强分布

Fig.3 Comparison of gas distribution under different volume ratio

角的增大,相应位置的出气孔质量流量先减小后增大。进一步对比发现,容积比不同,出气孔质量流量分布区间存在较明显不同,其中容积比 $k=1.0$ 时,出气孔的质量流量分布区间(最大值 $4.173 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 与最小值 $4.167 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间)相对较集中,且具有较好的周向对称性。

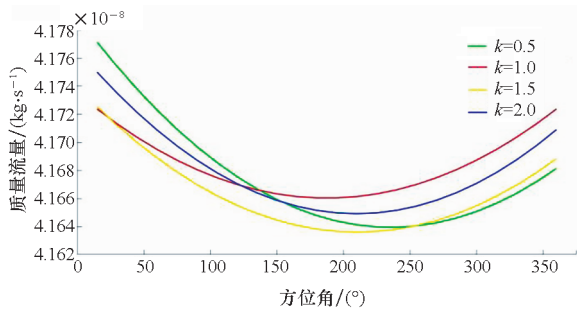


图4 容积比对出气孔质量流量影响

Fig.4 Effect of volume ratio on mass flow rate of outlet

图5 为出气孔最大差异率和平均差异率随容积比变化关系。从图中可以看出,出气孔最大差异率和平均差异率均呈现先快速减小后趋于稳定趋势,其中 k 从 0.5 增大到 1.0 时,平均差异率和最大差异率均快速下降,而 k 大于 1.0 之后逐渐趋于稳定。

2.3 隔板小孔数量影响仿真

两腔之间隔板上的小孔作为气体导流通道,对工质气体在阳极供气环内部的匀化特性具有重要影响。考虑加工精度及防堵塞等工程因素^[9-10],小孔直径一般设置为 0.5 mm,因此,小孔数量成为关键设计参数。结合以往工程经验^[9],本文分别选取了 8、10、12 和 14 个小孔数量

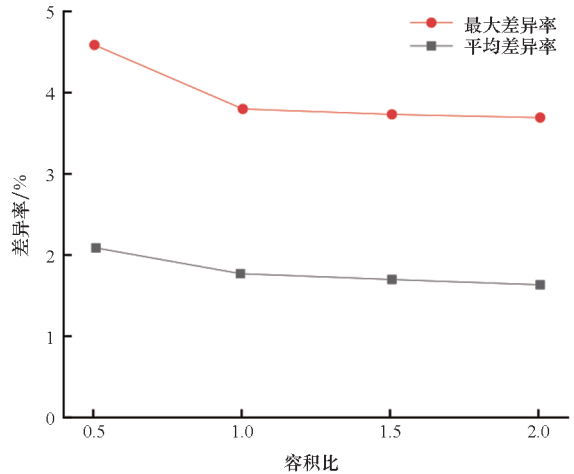


图5 容积比对最大差异率和平均差异率影响
Fig.5 Effect of the volume ratio on the maximum difference rate and average difference rate

作为样本进行仿真计算,其中缓冲腔容积比选定为 1 : 1。

图6 为不同小孔数量下阳极供气环内部气体分布结果。从图中可以看出,下缓冲腔气体分布均存在较大差异性,而通过导流孔后的上缓冲腔内气体分布均匀性显著提高。

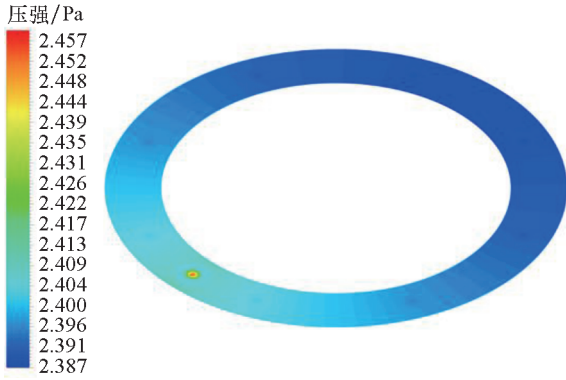
图7 为不同导流小孔数量下出气孔质量流量随着周向角度变化关系。从图中可以看出,越远离进气管路,出气孔的质量流量越小,在进气孔的对面(约 $180^\circ \sim 200^\circ$) 出气孔质量流量最小。对比发现,隔板小孔数量不同,出气孔质量流量的均匀性不同,其中导流小孔数量为 10 时,出气孔的质量流量差异性最小,且具有较好的对称性。

进一步对出气孔的最大差异率和平均差异率

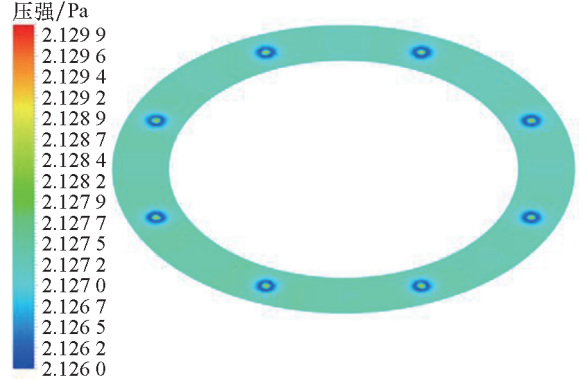
进行分析,仿真结果如图 8 所示。从仿真结果可以看出,隔板导流孔数量从 8 个增加到 14 个,出气孔的平均差异率表现出浴盆曲线特性,当隔板小孔数量为 10~12 个时,平均差异率和最大差异率均有较小值(平均差异率约为 1.8%,最大差异率约为 3.8%)。分析认为:在隔板间导流小孔尺寸固定情况下,小孔数量过少,使得从下缓冲腔到上缓冲腔的气体流速过急,不利于上缓冲腔内气

体均匀性分布,致使出气孔质量流量很难保证均匀性;而隔板间导流小孔数量过多,下缓冲腔内气体尚未充分匀化,便过多流入上缓冲腔,同样增大了上缓冲腔的非均匀性,从而使得出气孔质量流量差异率增大。

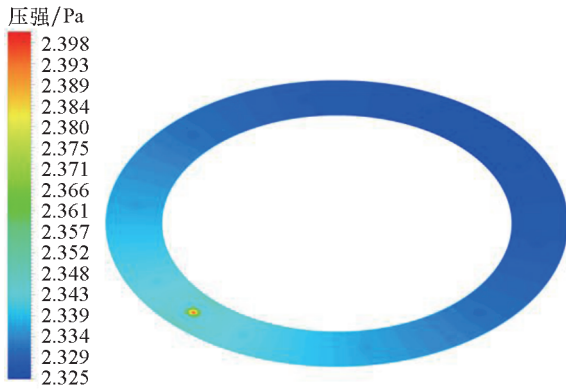
基于以上仿真结果,做进一步的计算分析。为了在缓冲腔内实现气体的均匀分布,需要使得气体沿着周向的流阻远远低于隔板间导流小孔的



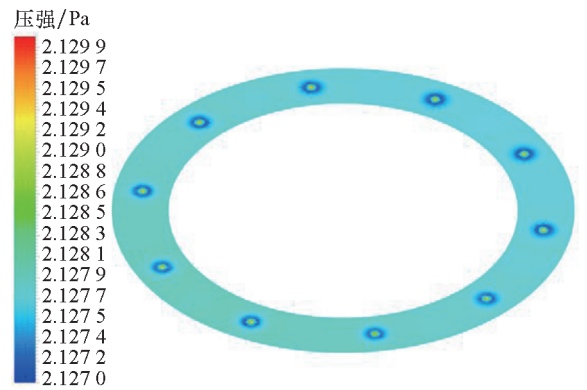
(a) 8 孔(下腔)
(a) 8 holes(lower chamber)



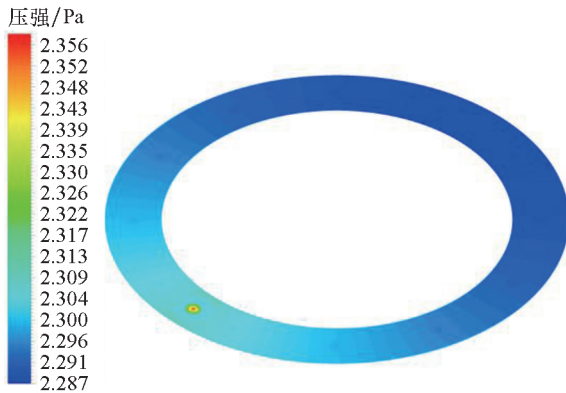
(b) 8 孔(上腔)
(b) 8 holes(upper chamber)



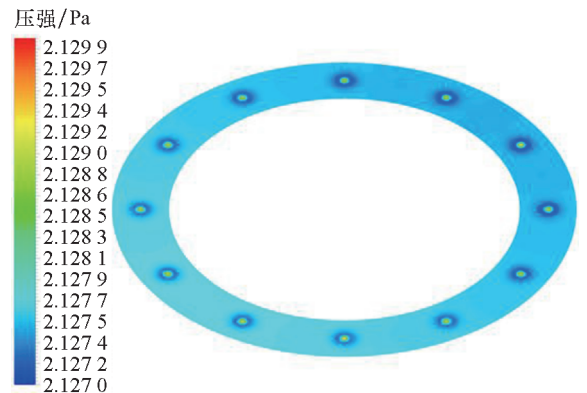
(c) 10 孔(下腔)
(c) 10 holes(lower chamber)



(d) 10 孔(上腔)
(d) 10 holes(upper chamber)



(e) 12 孔(下腔)
(e) 12 holes(lower chamber)



(f) 12 孔(上腔)
(f) 12 holes(upper chamber)

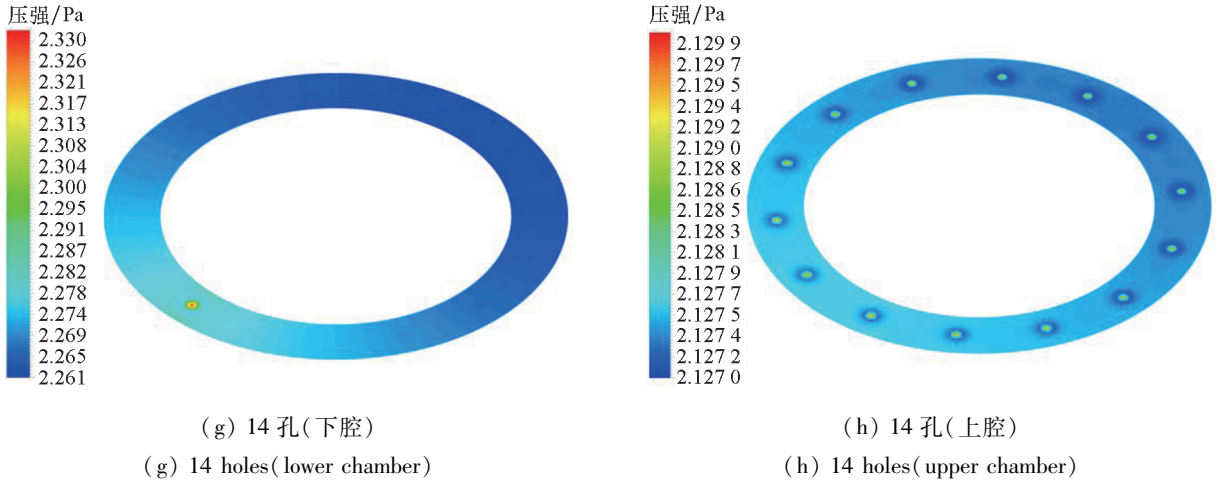


图6 不同隔板小孔数量下气体分布仿真对比

Fig. 6 Comparison of gas distribution under different number of small holes in diaphragm

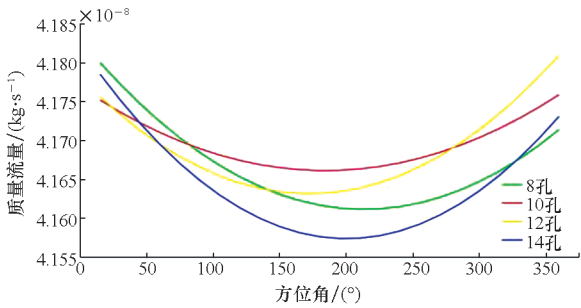


图7 隔板小孔数量对各出气孔差异率影响

Fig. 7 Effect of the number of small holes on the difference rate of each outlet

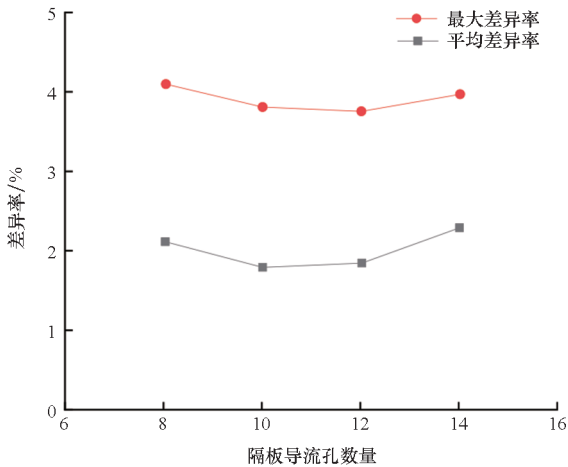


图8 隔板小孔数量对平均差异率和最大差异率影响

Fig. 8 Effect of the number of small holes on the maximum difference rate and average difference rate

流阻,从物理上来说,这种情况下,可以使得气体在缓冲腔内沿着周向自由流动,直到均匀分布在缓冲腔内,然后再从隔板间小孔或者出气孔流出。

气体的流动阻力与流导系数成反比,在上下缓冲腔内主要沿着周向流动,由于缓冲腔横截面

积为矩形,根据泊肃叶公式^[12],气体流阻满足如下公式:

$$R_{\text{rectangular}} \approx \frac{12\mu L_r}{wh^3 \left(1 - 0.63 \frac{h}{w}\right)} \quad (5)$$

式中, μ 是推进剂的黏度, L_r 是矩形环的中线环形长度, w 是矩形环横截面宽度, h 是矩形环横截面高度。

隔板间导流小孔(或者出气小孔)横截面积为圆形,气体流阻公式如下:

$$R_{\text{circular}} \approx \frac{8\mu L_c}{\pi r^4} \quad (6)$$

式中, L_c 是圆形孔口的长度, r 是圆形孔口的半径。

导流小孔以及出气小孔均为并联关系,因此,气体沿着导流小孔方向(或者出气小孔)的总流阻满足如下关系:

$$R_{\text{cir_total}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (7)$$

为了实现工质气体高度均匀性要求,在缓冲腔内沿周向方向的流动阻力远低于导流小孔或者出气孔的流动阻力。可以用气体沿两个方向的流阻比例进行表示,即:

$$j = \frac{R_{\text{cir_total}}}{R_{\text{rectangular}}} \approx \frac{2nL_c wh^3 \left(1 - 0.63 \frac{h}{w}\right)}{3\pi r^4 L_r} \quad (8)$$

当沿小孔流出方向流阻 $R_{\text{cir_total}}$ 远大于缓冲腔周向流阻 $R_{\text{rectangular}}$ 时,一般认为相差两个数量级可近似满足条件($j > 100$),此时气体在缓冲腔内将主要沿着周向运动,气体获得周向均匀分布之后,再通过各导流小孔(或出气孔)流出。因此,流阻比例 j 越大,越有利于缓冲腔内气体均匀分

布。同时产品在设计时,需要考虑工程实现难易程度,以及供气环出气均匀性要求。

LHT40 推力器供气环结构设计主要参数如表 1 所示,其中缓冲腔容积比 $k = 1.0$ 、隔板小孔数量 $n = 10$ 时,计算可得缓冲腔流阻比例 j 约为 225。根据上面仿真结果,此时供气环出气孔平均差异率和最大差异率分别约为 1.8% 和 3.8%,即放电通道气体分布具有较好的均匀性。

3 结论

采用有限元软件对低功率霍尔推力器阳极供气环内气体流场分布进行仿真,并分析了缓冲腔容积比、隔板导流小孔数目等关键参数对阳极出气均匀性影响规律,得到主要结论:

1) 容积比 k 从 0.5 增大到 2.0 时,供气环出气孔平均差异率和最大差异率均呈现先快速减少后趋于平缓趋势。容积比 $k = 1.0$ 时,出气孔的质量流量分布区间相对较集中,且具有较好的周向对称性。

2) 随着隔板导流孔数量的增加,供气环出气孔差异率表现出浴盆曲线特性。当隔板小孔数量为 10~12 时,平均差异率和最大差异率均相对较低,其中平均差异率约为 1.8%,最大差异率约为 3.8%。

3) 流阻比例 j 越大,越有利于缓冲腔内气体的均匀分布,因此,阳极供气环结构设计时,尽可能使流阻比例增大。同时需要考虑推力器通道结构对供气环尺寸的限制以及产品工程实现难易程度等,选取合理结构参数。

目前还没有与试验数据进行对比,后续将对低功率霍尔推力器放电通道气体分布进行测量以验证结果的准确性。本文的研究结果对于低功率霍尔推力器阳极供气环结构设计具有一定的参考价值。

参考文献(References)

[1] 于达仁,牛翔,王泰卜,等. 面向空间引力波探测任务的微推进技术研究进展[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021, 60(1/2): 194-212.
YU D R, NIU X, WANG T B, et al. The developments of micro propulsion technology based on space gravitational wave detection task[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2021, 60(1/2): 194-212. (in Chinese)

[2] 邓剑峰,蔡志鸣,陈琨,等. 无拖曳控制技术研究及在我

国空间引力波探测中的应用[J]. 中国光学, 2019, 12(3): 503-514.

DENG J F, CAI Z M, CHEN K, et al. Drag-free control and its application in China's space gravitational wave detection [J]. Chinese Optics, 2019, 12(3): 503-514. (in Chinese)

[3] 于达仁,崔凯,刘辉,等. 用于引力波探测的微牛级霍尔电推进技术[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(6): 171-181.

YU D R, CUI K, LIU H, et al. Micro-Newton Hall electric propulsion technology for gravitational wave detection [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(6): 171-181. (in Chinese)

[4] HOFER R R. Development and characterization of high-efficiency, high-specific impulse xenon Hall thrusters [D]. USA: University of Michigan, 2004.

[5] 杨晨,龙建飞,张天平. LHT-100 霍尔推力器放电通道能量损耗数值计算与分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2021, 51(1): 99-107.

YANG C, LONG J F, ZHANG T P. Numerical study on energy loss in discharge channel of LHT-100 Hall thruster[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2021, 51(1): 99-107. (in Chinese)

[6] VAIL V, LAZURENKO A, LAURE C, et al. Xenon gas injection in SPT thrusters [C]//Proceedings of the 28th International Electric Propulsion Conference, 2003.

[7] MIYASAKA T, SHIBATA Y, ASATO K. Particle simulation of discharge current oscillation in Hall thrusters [J]. Vacuum, 2008, 83(1): 61-66.

[8] CONVERSANO R W, LOBBIA R B, TILLEY K C, et al. Development and initial performance testing of a low-power magnetically shielded Hall thruster with an internally-mounted hollow cathode [C]//Proceedings of the 35th International Electric Propulsion Conference, 2017.

[9] 郭宁,张天平,高俊,等. 基于多孔金属材料的阳极组件及其制作方法: CN108799032A[P]. 2018-11-13.

GUO N, ZHANG T P, GAO J, et al. Anode assembly based on porous metal material and its manufacturing method: CN108799032A[P]. 2018-11-13. (in Chinese)

[10] 汤海滨,刘一泽,张广川,等. 一种双层气腔的霍尔推力器气体分配器: CN110486242B[P]. 2020-06-26.

TANG H B, LIU Y Z, ZHANG G C, et al. A double-layer gas chamber Hall thruster gas distributor: CN110486242B[P]. 2020-06-26. (in Chinese)

[11] LAFFERTY J M. Foundations of vacuum science and technology[M]. New York: Wiley, 1998: 135-136.

[12] 朱自强. 应用计算流体力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998.

ZHU Z Q. Applied computational fluid dynamics [M]. Beijing: Beihang University Press, 1998. (in Chinese)

[13] SUN M M, ZHANG T P, WEN X D, et al. Plasma characteristics in the discharge region of a 20 A emission current hollow cathode[J]. Plasma Science and Technology, 2017, 20(2): 025503.