

DOI: 10.19527/j.cnki.2096-1642.0874



# 高频感应等离子体流动模型与 微型电推进器流场特性分析

李亦非, 付宸聪, 刘伟, 蔡国飙, 王伟宗  
(北京航空航天大学, 北京 100191)

## Fluid Model of High-Frequency Induction Plasma and Flow Field Characteristics of Micro Electric Thruster

LI Yi-fei, FU Chen-cong, LIU Wei, CAI Guo-biao, WANG Wei-zong  
(Beihang University, Beijing 100191, China)

**摘要:** 微型射频离子推力器具有结构简单、工作寿命长、推力动态范围大、性能调节响应灵敏等特点, 是国际微电推进领域的研究热点之一。射频离子推力器电离室内的感性耦合放电等离子体特性和推力器的性能密切相关。为此, 文章建立了低气压、小尺寸微型射频离子推力器电离室内感性耦合等离子体流体模型, 开展了电磁场、流场、化学反应浓度场的多物理场耦合仿真分析, 并研究了等离子体放电特征参数随推进剂工质气压、放电吸收功率、射频频率以及线圈匝数等因素的变化规律。结果表明, 推进剂工质气压、放电吸收功率是调节微型射频离子推力器性能的主要因素, 该研究为综合调控微型射频离子推力器的工作性能奠定了良好的基础。

**关键词:** 微型射频离子推力器; 感性耦合放电; 流体模型; 多物理场耦合; 放电参数

**中图分类号:** V439+.1

**文献标志码:** A

**Abstract:** The micro radio frequency (RF) ion thruster is one of the international research hotspots in the field of micro-electric propulsion because of its simple structure, long lifetime, large thrust range and quick response. The performance of RF ion thruster is closely related to the characteristics of plasma in discharge chamber. To this end, a fluid model of inductively coupled plasma in micro RF ion thruster with low pressure and small size was established. A multi-physical coupling simulation involving electromagnetic field, flow field and chemical reaction concentration field was carried out. The variations of characteristic parameters of plasma with propellant pressure, absorption power, RF frequency and coil turns were studied. The results show that the propellant pressure and the absorption power are the main factors to regulate the performance of micro RF ion thruster. This study lays a good foundation for comprehensively regulating the performance of micro RF ion thruster.

**Keywords:** micro radio frequency (RF) ion thruster; inductively coupled plasma (ICP); fluid model; multi-physical coupling; discharge parameters

## 引言

“航天探索, 动力先行”。与利用燃料氧化燃烧产生推力的化学推进相比, 电推进利用电离推进剂加速工质形成射流, 具有比冲高、推力小、控制精度高、使用寿命长等优点, 尤其适用于航天器位置

保持、轨道转移、轨道维持、姿态控制和深空探测等太空任务<sup>[1]</sup>。根据推进剂加速机制的不同, 可将电推进分为3类: 电热推进<sup>[2-4]</sup>、电磁推进<sup>[5-7]</sup>和静电推进<sup>[8]</sup>。射频离子推力器基于感性耦合放电技术, 无放电电极, 不存在电子轰击式推力器的阴极

收稿日期: 2020-08-14; 修回日期: 2020-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(51977003); 国防基础科研计划(JCKY2019601D112)

第一作者简介: 李亦非(1998-) 男, 硕士, 主要研究方向为航天器空间离子推力器。E-mail: 16721030@buaa.edu.cn

通信作者简介: 王伟宗(1984-) 男, 教授, 主要研究方向为航天器空间电推进。E-mail: wangweizong@buaa.edu.cn

引用格式: 李亦非, 付宸聪, 刘伟, 等. 高频感应等离子体流动模型与微型电推进器流场特性分析[J]. 气体物理, 2021, 6(2): 9-18.

Citation: Li Y F, Fu C C, Liu W, et al. Fluid model of high-frequency induction plasma and flow field characteristics of micro electric thruster[J].

Physics of Gases, 2021, 6(2): 9-18.

寿命问题,同时没有电子回旋共振式离子推力器需要外部静磁场和固定推进剂流量以达到电子回旋共振的限制,具有结构简单、工作寿命长、推力动态范围大、性能调节响应灵敏<sup>[9]</sup>等特点,是国际电推进领域的研究热点之一。

无论是高推力精度要求的太空任务(如欧洲航天局的 Darwin, GAIA, LISA 等),还是协同运作的立方星星座任务(如 SpaceX 的 StarLink),都迫切需要微推进系统<sup>[10]</sup>。微型射频离子推力器满足体积小、质量小、推力小、响应快速、控制精确的要求,除此之外结构简单、工作寿命长,是最具有发展潜力的推力器之一。

目前,对微型射频离子推力器的研究主要集中在欧洲和美国,典型样机有德国吉森大学的 RIT-10<sup>[11-12]</sup>, RIT-4<sup>[10,13]</sup>,美国宾夕法尼亚州立大学的 MRIT<sup>[14]</sup>,美国 BUSEK 公司的 BIT-3。其中 RIT-10 于 2001 年在 ARTEMIS 通信卫星上得到正式应用,用于执行南北位置保持任务<sup>[15]</sup>,BIT-3 预计 2020 年之后将搭载太空发射系统升空<sup>[16]</sup>。国内研制微型射频离子推力器起步较晚,相关研究较少,最早是由中国科学院空间科学技术中心对 RIT-15 采用氙作为工质进行性能实验测试<sup>[17]</sup>。中科院力学所的  $\mu$ RIT-2.5 已进行飞行验证<sup>[18]</sup>。

射频离子推力器电离室内的感性耦合放电等离子体特性和推力器的性能密切相关。感性耦合放电等离子体数值仿真可以提供比实验更加丰富的结果,甚至可以揭示在实验中无法观察到的现象,因此得到国内外的广泛关注。针对射频离子推力器内部感性耦合等离子体的数值仿真模型主要有 3 种:全局模型<sup>[19-20]</sup>、流体模型<sup>[21-22]</sup>、粒子模型<sup>[23-24]</sup>。流体模型与全局模型相比可以得到等离子体特性参数的空间分布,与粒子模型相比节省计算时间与空间消耗,具有显著优势。

在射频离子推力器的工作过程中,放电室内的物理场包括流场、等离子体浓度场、射频线圈施加的电磁场。各个物理场之间呈现强耦合关系:流场影响中性粒子及放电室气压的分布;电磁场影响等离子体中的电离过程,改变带电粒子的浓度分布;等离子体通过 Joule 和非 Joule 加热效应,影响流场分布。微型射频离子推力器流体模型考虑了上述多物理场的耦合以获得等离子体特征参数分布,并揭示放电过程中质量、动量和能量传递的机制。

文献中对大尺寸感性耦合放电有较多的流体

模型研究<sup>[25-26]</sup>,本文对依据缩尺准则设计的放电室内径 40 mm 的微型射频离子推力器进行分析,建立了低气压、小尺度下的感性耦合等离子体流体模型,探究了等离子体放电特征参数随推进剂工质气压、放电吸收功率、射频频率以及线圈匝数等因素的变化规律。结果表明,推进剂工质气压、放电吸收功率是调节微型射频离子推力器性能的主要因素。

## 1 等离子体流体模型

### 1.1 流体条件验证

流体模型将等离子体中各种粒子看作连续流体,用质量、动量、能量方程描述等离子体行为。在使用流体模型分析推力器放电过程之前,首先须明确在所设计推力器工况下流体模型是否适用。

当工质气压在在 13.3 Pa (100 mtorr) 以上时,等离子体内碰撞占据主导,可以将带电粒子看作连续流体。但微型射频离子推力器的工质气压一般为 0.1~1 Pa,故须预先分析流体模型在此情况下是否适用。Mikellides 等<sup>[27]</sup>的研究表明,当粒子的平均自由程远小于放电室的特征长度时,碰撞会占据主导,具体表述见下式

$$Kn = \frac{\lambda_{\text{mfp}}}{L} < 0.4$$

式中,  $Kn$  是粒子的 Knudsen 数,  $\lambda_{\text{mfp}}$  是粒子的平均自由程,  $L$  是放电室的特征长度。射频离子推力器内部电子 Knudsen 数较大,但电子由于会被鞘层反射,碰撞机会增大,故电子 Knudsen 数不具代表性。考虑离子与中性粒子的碰撞,其平均自由程如下式所示<sup>[22]</sup>。

$$\lambda_{\text{mfp}} = \frac{1}{n_n Q_{\text{in}}}$$

式中,  $n_n$  是放电室内部中性粒子数密度,  $Q_{\text{in}}$  是离子-中性粒子散射碰撞截面,单位为  $\text{m}^2$ <sup>[28]</sup>。

$$Q_{\text{in}} = \frac{8.280\ 72 \times 10^{-16}}{c_r}$$

式中,  $c_r$  是由约化质量定义的单电荷离子与中性粒子的相对热运动速度。

$$c_r = \sqrt{\frac{16k_B T_i}{\pi m_i}}$$

式中,  $k_B$  是 Boltzman 常数,  $T_i$  是离子温度,  $m_i$  是离子质量. 中性粒子数密度通过中性流的 Maxwell 平均通量方程计算.

$$\dot{m} = m_n \left( \frac{n_n \bar{c}_n}{4} A_{\text{grid}} \Phi_n \right)$$

式中,  $\dot{m}$  是工质流量, 其单位是 kg/s,  $A_{\text{grid}}$  是栅极总面积,  $\Phi_n$  是栅极系统对中性粒子的有效透明度,  $\bar{c}_n$  是中性粒子平均热运动速度.

$$\bar{c}_n = \sqrt{\frac{8k_B T_i}{\pi m_i}}$$

由双栅系统近似公式可得到有效透明度为

$$\Phi_n = \frac{1}{\frac{1}{\Phi_{\text{screen}}} + \frac{1}{\Phi_{\text{accel}}} - 1}$$

由上述公式, 可得所设计微型射频离子推力器放电室内离子 Knudsen 数随工质流量的变化规律. 同时, 根据理想气体状态方程可得放电室内部压强随工质流量的变化规律, 如图 1 所示.

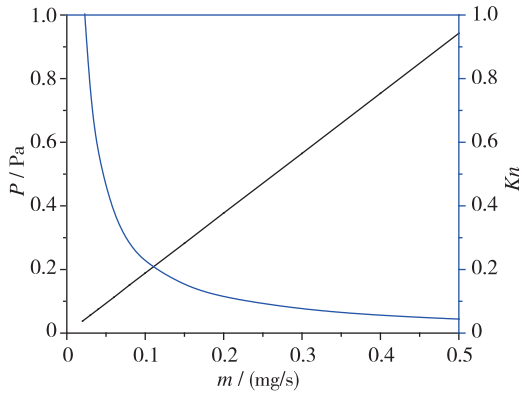


图 1 流体条件验证

Fig. 1 Fluid condition verification

由图 1 可知, 在推力器工质气压为 0.133 Pa 时, 工质流量约为 0.6 mg/s, 对应  $Kn$  为 0.37, 小于 0.4. 因此可以推断, 当工质气压在 0.133 Pa 以上时, 采用流体模型是合理的.

## 1.2 几何构建

图 2 为按照所设计微型射频离子推力器建立的二维轴对称简化模型的几何构造, 考虑了放电室入口与出口间工质流动. 轴对称处理会导致现实中的螺旋型线圈变为轴对称的环形, Tsay<sup>[22]</sup> 用实验验证了采用两种不同构型线圈得到结果的最大误差不超过 5%, 证明了二维轴对称模型的合理性.

由图 2 可知, 模型包括等离子体、石英放电室、铜线圈和真空 4 个部分, 物理性质见表 1, 其中等离子体的物理性质由等离子体模块计算得出.

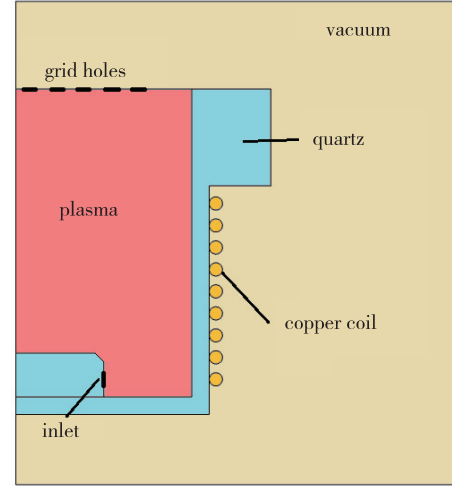


图 2 二维轴对称模型

Fig. 2 Two-dimensional axisymmetric model

表 1 各部分材料的物理性质

Table 1 Physical properties of each part of the material

structure	materials	$\mu_r$	$\varepsilon_r$	$\sigma /$ (S/m)
discharge chamber	quartz	1	4.2	$1 \times 10^{-14}$
coils	copper	1	1	$6 \times 10^7$
vacuum	-	1	1	0

## 1.3 氙气流场

中性粒子的数密度以及压强、速度分布对电离影响很大, 故须对氙气流场进行计算. 对于射频离子推力器, 电离度在  $10^{-3}$  的量级, 离子对流场的影响可以忽略. 采用动量方程和连续性方程对氙气流场进行描述.

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

式中,  $\rho$  是流体密度,  $t$  是时间,  $\mathbf{u}$  是流体速度矢量,  $p$  是流体压强,  $\mathbf{I}$  是单位矩阵,  $\mathbf{K}$  是黏性应力张量,  $\mathbf{F}$  是力矢量.

壁面边界条件为无滑移, 入口设置为流量边界条件, 出口设置为压力边界条件.

研究表明, 背景气体温度对等离子体特征参数

影响不大<sup>[29]</sup>. 故微型射频离子推力器流体模型不考虑等离子体的加热效应, 背景气体温度设置为室温 300 K.

#### 1.4 等离子体

等离子体模块通过导入碰撞截面数据, 在时域计算电子碰撞反应以及重物质反应, 最终得到等离子体特性参数分布. 选取化学反应体系见表 2, 其中,  $\Delta\Sigma$  表示反应过程中的能量损耗,  $k^f$  表示反应速率, 1~5 的反应速率由其碰撞截面数据计算. 碰撞截面数据来自文献[31].

表 2 模型中考虑的反应  
Table 2 Reactions considered in the model

No.	reactions	$\Delta\Sigma/\text{eV}$	$k^f$
1	$\text{e}+\text{Xe}\Rightarrow\text{e}+\text{Xe}$	0	from cross section
2	$\text{e}+\text{Xe}\Rightarrow\text{e}+\text{Xes}$	8.315	from cross section
3	$\text{e}+\text{Xes}\Rightarrow\text{e}+\text{Xe}$	-8.315	from cross section
4	$\text{e}+\text{Xe}\Rightarrow 2\text{e}+\text{Xe}+$	12.13	from cross section
5	$\text{e}+\text{Xes}\Rightarrow 2\text{e}+\text{Xe}+$	3.8	from cross section
6	$\text{Xes}+\text{Xes}\Rightarrow\text{e}+\text{Xe}+\text{Xe}+$	-	$3.011\times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}$
7	$\text{Xes}\Rightarrow\text{Xe}$	-	$\frac{\text{s}\cdot\text{mol}}{9.49\times 10^7/\text{s}}$

流体模型将粒子看作连续流体. 电子浓度方程与能量方程为

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{\Gamma}_e = R_e - (\mathbf{u} \cdot \nabla) n_e$$

$$\frac{\partial n_\varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot \boldsymbol{\Gamma}_\varepsilon + \mathbf{E} \cdot \boldsymbol{\Gamma}_\varepsilon = S_{\text{en}} - (\mathbf{u} \cdot \nabla) n_\varepsilon + P_{\text{ind}}$$

式中,  $n_e$  是电子密度,  $\boldsymbol{\Gamma}_e$  是电子通量,  $R_e$  是电子源项,  $\mathbf{u}$  是中性流体的速度矢量,  $n_\varepsilon$  是电子能量密度,  $\boldsymbol{\Gamma}_\varepsilon$  是电子能通量,  $\mathbf{E}$  是电场矢量,  $S_{\text{en}}$  是反应与碰撞造成的能量损失,  $P_{\text{ind}}$  是输入功率. 其中,  $-(\mathbf{u} \cdot \nabla) n_e$  及  $-(\mathbf{u} \cdot \nabla) n_\varepsilon$  是对流项. 电子通量及电子能通量如下

$$\boldsymbol{\Gamma}_e = -(\mu_e \cdot \mathbf{E}) n_e - D_e \cdot \nabla n_e$$

$$\boldsymbol{\Gamma}_\varepsilon = -(\mu_\varepsilon \cdot \mathbf{E}) n_\varepsilon - D_{\text{en}} \cdot \nabla n_\varepsilon$$

式中,  $\mu_e$  是电子迁移率,  $D_e$  是电子扩散系数,  $\mu_\varepsilon$  是电子能迁移率,  $D_{\text{en}}$  是电子能扩散系数, 在电子能量分布函数满足 Maxwell 分布的情况下, 通过 Einstein 关系计算<sup>[31]</sup>.

$$\mu_e = \frac{e}{m_e \nu_m}, \quad D_e = \mu_e T_e$$

$$\mu_\varepsilon = \frac{5}{3} \mu_e, \quad D_{\text{en}} = \mu_\varepsilon T$$

式中,  $\nu_m$  是弹性碰撞频率. 用漂移-扩散方程计算重物质运输, 适用于除电子之外的所有粒子.

$$\rho \frac{\partial \omega_k}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \omega_k = \nabla \cdot \mathbf{j}_k + R_k$$

式中,  $\omega_k$  是第  $k$  种物质的质量分数,  $\mathbf{j}_k$  是第  $k$  种物质的扩散通量矢量,  $R_k$  是第  $k$  种物质的产率系数. 采用 Poisson 方程计算等离子体的电势  $V$ .

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_q, \quad \mathbf{E} = -\nabla V$$

式中,  $\rho_q$  是等离子体的体电荷密度. 边界条件设置参考对感性耦合等离子体放电的研究<sup>[29]</sup>. 初始电子密度设置为  $10^{17} \text{ m}^{-3}$ , 初始平均电子能量为 5 eV. 在壁面处不考虑二次电子发射, 壁面边界条件如下<sup>[29]</sup>

$$-\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\Gamma}_e = \frac{1}{4} \cdot v_{\text{eth}} \cdot n_e$$

$$-\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\Gamma}_\varepsilon = \frac{5}{12} \cdot v_{\text{eth}} \cdot n_\varepsilon$$

式中,  $\mathbf{n}$  表示表面的法向量,  $v_{\text{eth}}$  是电子的热运动速度. 对静电边界条件, 工质入口与出口处设置为零电荷与绝缘, 壁面处设置为接地.

#### 1.5 电磁场

电磁场模块通过在频域求解 Maxwell 方程组, 得到磁场以及感应电场的变化规律.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{j} \omega \mathbf{D} + \sigma \nu \times \mathbf{B} + \mathbf{J}_e$$

$$\mathbf{E} = -\mathbf{j} \omega \mathbf{A}$$

将上述 4 式化简合并后, 可以得到

$$(\mathbf{j} \omega \sigma - \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r) \mathbf{A} + \nabla \times \left( \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_e$$

式中,  $\mathbf{j}$  是虚数单位,  $\omega$  是射频源的角频率,  $\sigma$  是等离子体电导率,  $\varepsilon_0$  是真空介电常数,  $\mathbf{A}$  是磁矢势,  $\mu_0$  是真空磁导率,  $\mathbf{J}_e$  是应用外部电流. 由上式求解磁矢势, 根据磁矢势计算出磁场与感应电场.

#### 1.6 多物理场耦合

等离子体模块与磁场模块通过等离子体电导与变压器模型形成耦合关系. 首先根据反应进度实时计算出等离子体的电导率

$$\sigma_{\text{plasma}} = \frac{q^2 n_e}{m_e (\nu_e + \mathbf{j} \omega)}$$

式中,  $q$  是元电荷,  $m_e$  是电子质量,  $\nu_e$  是电子碰撞频率. 其次引入变压器模型, 该模型将线圈看作变压器的初级, 等离子体看作次级.<sup>[32]</sup>

$$\begin{aligned}\tilde{V}_{rf} &= j\omega L_{11}\tilde{I}_{rf} + j\omega L_{12}\tilde{I}_p \\ \tilde{V}_p &= j\omega L_{21}\tilde{I}_{rf} + j\omega L_{22}\tilde{I}_p\end{aligned}$$

式中,  $\tilde{V}_{rf}$  是射频线圈两端的电压,  $\tilde{V}_p$  是假想的等离子体两端的电压,  $\tilde{I}_{rf}$  是通过射频线圈的电流,  $\tilde{I}_p$  是假想的通过等离子体的电流, 物理量上方的波浪号代表其为交流量. 各物理量含义如图 3 所示.<sup>[32]</sup>

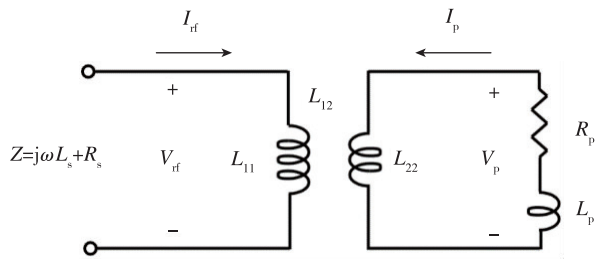


图 3 变压器模型

Fig. 3 Transformer model

通过等离子体内的感应电流密度以及感应电场来计算等离子体吸收的功率密度如下

$$Q_{th} = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}^T)$$

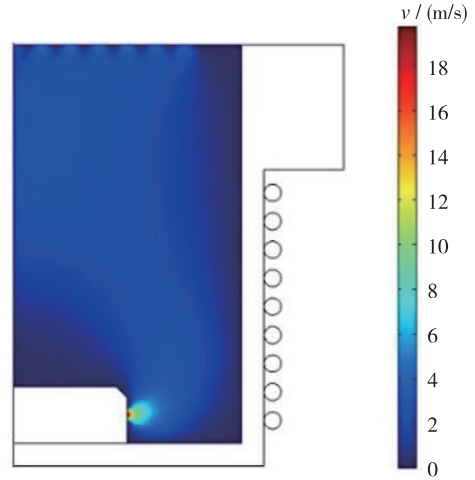
式中,  $\mathbf{J}$  是等离子体内的感应电流密度,  $\mathbf{E}$  是等离子体内的感应电场强度.

## 2 结果与讨论

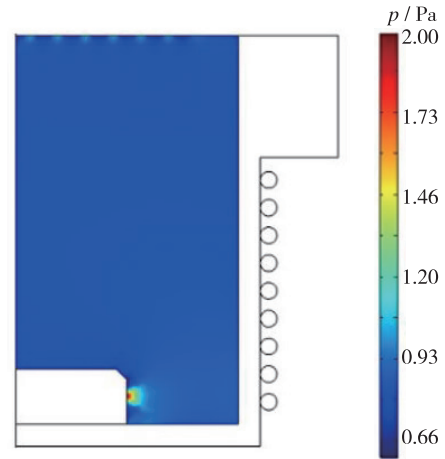
### 2.1 特定工况计算结果

利用构建的微型射频离子推力器流体模型, 对工质流量为 0.33 mg/s、放电室压强为 0.8 Pa、吸收功率为 20 W、线圈射频频率为 2.5 MHz 工况下的射频放电等离子体进行了数值仿真.

图 4 为达到稳态时推力器内部流场. 由图可知, 速度与压强的最大值均发生在工质入口处, 这是因为入口处的流通面积很小, 氙气工质进入时产生堆积形成了较大的速度、压强峰值. 同理, 在工质出口可以看到类似的速度、压强极值. 由图 4(b) 可知, 放电室内的工质气压均匀保持在 0.8 Pa, 为等离子体的均匀分布提供了条件.



(a) Velocity field



(b) Pressure field

图 4 流场计算结果

Fig. 4 Flow field calculation results

图 5 为等离子体电子密度与电子温度分布. 由图 5(a) 可知, 电子密度在轴线处有最大值, 在壁面处有最小值, 这是因为壁面处离子与电子通过表面反应再结合产生中性粒子, 造成离子电子损失. 由图 5(b) 可知, 电子温度在线圈附近有最大值, 在轴线处有非零最小值, 这是因为趋肤效应导致功率大多沉积在线圈附近, 使电子温度较高.

电势与感应电场的分布如图 6 所示. 由图可知, 电势的峰值出现在轴线处; 而电场强度模在壁面处达到最大值, 向轴向逐渐减小, 在轴线处趋近于零.

图 5 与图 6 中的等离子体特性参数以及电场分布与文献[21]结果有相同趋势, 证明结果合理性.

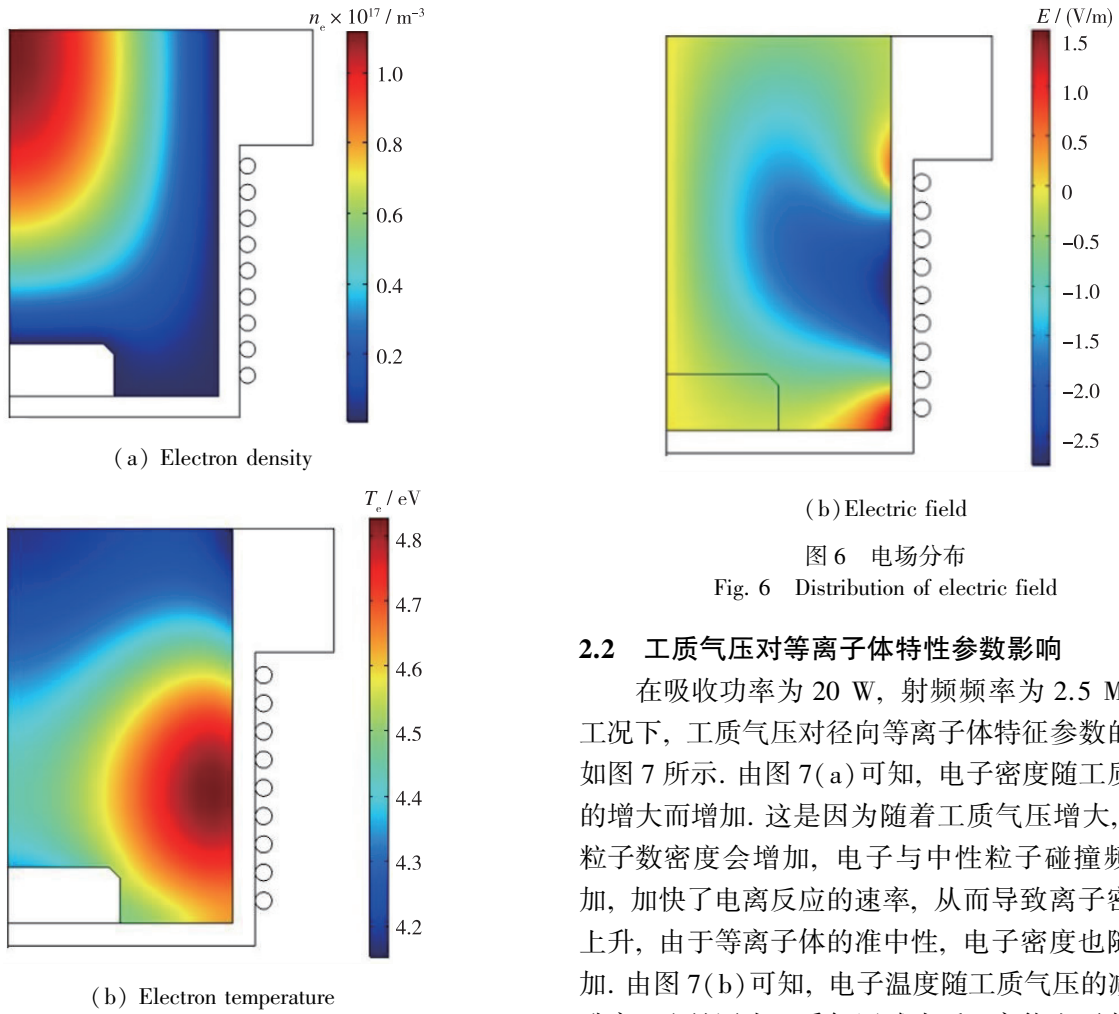


图5 等离子体特性参数分布  
Fig. 5 Distribution of plasma characteristic parameters

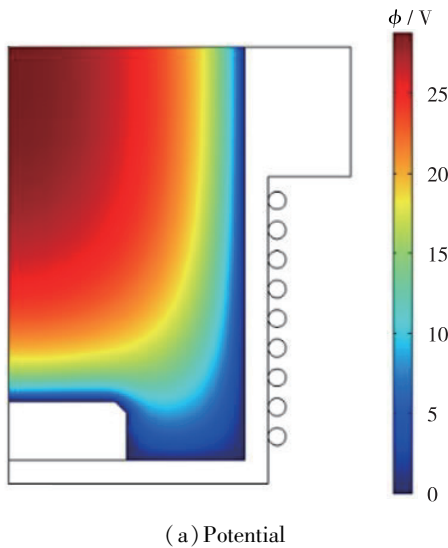
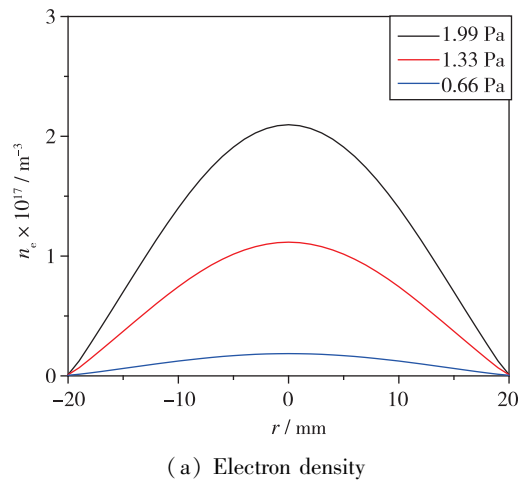
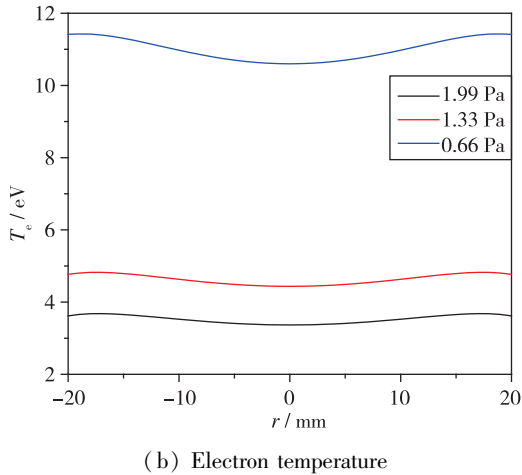


图6 电场分布  
Fig. 6 Distribution of electric field

### 2.2 工质气压对等离子体特性参数影响

在吸收功率为 20 W, 射频频率为 2.5 MHz 的工况下, 工质气压对径向等离子体特征参数的影响如图 7 所示. 由图 7(a)可知, 电子密度随工质气压的增大而增加. 这是因为随着工质气压增大, 中性粒子数密度会增加, 电子与中性粒子碰撞频率增加, 加快了电离反应的速率, 从而导致离子密度的上升, 由于等离子体的准中性, 电子密度也随之增加. 由图 7(b)可知, 电子温度随工质气压的减小而升高, 这是因为工质气压减小后, 高能电子与中性粒子以及离子之间的碰撞频率降低, 损失能量减少, 表现为电子温度上升.





(b) Electron temperature  
图 7 工质气压对等离子体特性参数影响  
Fig. 7 Influence of propellant pressure on plasma characteristic parameters

2.3 吸收功率对等离子体特性参数影响

在工质气压为 1.33 Pa, 射频频率为 2.5 MHz 的工况下, 吸收功率对径向等离子体特征参数的影响如图 8 所示. 由图 8(a)可知, 电子密度随吸收功率的增大而增加, 这是因为有更多的电功率由于电离生成等离子体. 相比之下, 电子温度则表现出功率无关性, 几乎不随吸收功率的增大而改变, 如图 8(b)所示.

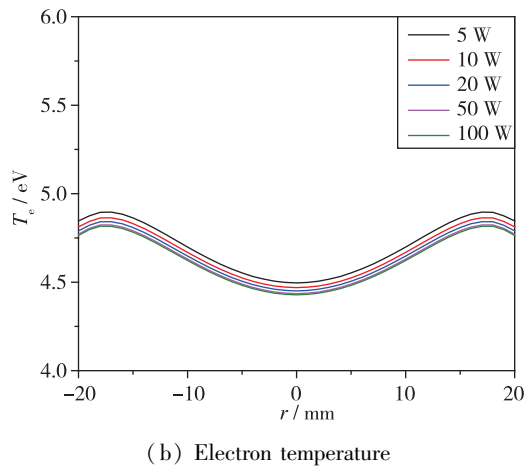
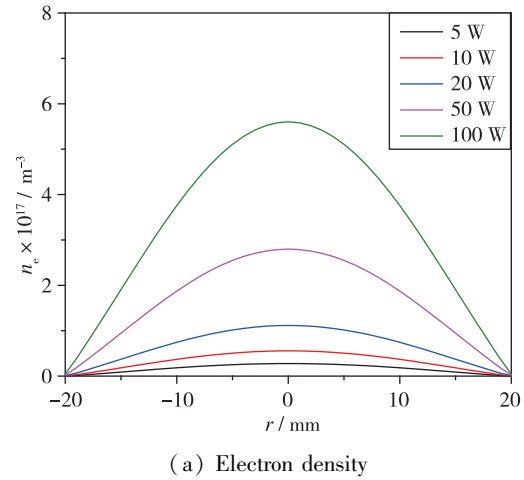
2.4 射频频率对等离子体特性参数影响

在吸收功率为 20 W, 工质气压为 1.33 Pa 时, 选取 2.5, 13.56, 50, 100, 200 MHz 等 5 个常见频率, 探究射频频率对等离子体特征参数的影响, 结果如图 9 所示. 可以看出电子密度随射频频率的增加略有下降, 与文献[23]中粒子模型计算结果趋势一致. 电子温度随频率增大几乎不变. 栅极附近的等离子体密度直接决定了栅极系统引出的束流大小, 进而影响推力器的推力, 为使栅极附近鞘层等离子体密度尽可能大, 设计时选择较小的射频频率. 由于射频频率对等离子体特性参数的影响很小, 且在推力器工作过程中改变其射频频率较为困难, 射频频率一般不作为调节推力性能的参数.

2.5 线圈匝数对等离子体特性参数影响

线圈匝数通过影响电磁场进而影响等离子体特征参数分布. 在吸收功率为 20 W, 射频频率为 2.5 MHz, 工质气压为 1.33 Pa 时, 选取线圈匝数为 3, 5, 7, 9 匝, 探究线圈匝数对等离子体特征参数的影响. 图 10 为不同线圈匝数下磁场分布. 由图可知, 随着线圈匝数的增加, 磁通密度更加紧密地聚

集在放电室内部靠近壁面的位置, 但放电室内磁场分布几乎不变. 表 3 为不同匝数下等离子体特征参数, 其中,  $n_e$  代表电子密度,  $T_e$  代表电子温度. 结果表明, 线圈匝数对电离室内平均电子密度以及平均电子温度几乎没有影响.



(a) Electron density  
(b) Electron temperature  
图 8 吸收功率对等离子体特性参数影响  
Fig. 8 Influence of absorption power on plasma characteristic parameters

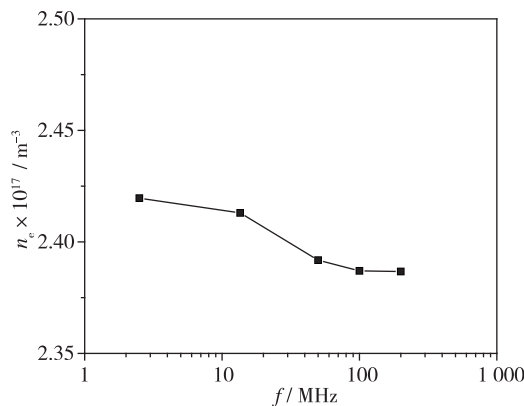


图 9 射频频率对等离子体特性参数影响  
Fig. 9 Influence of RF frequency on plasma characteristic parameters

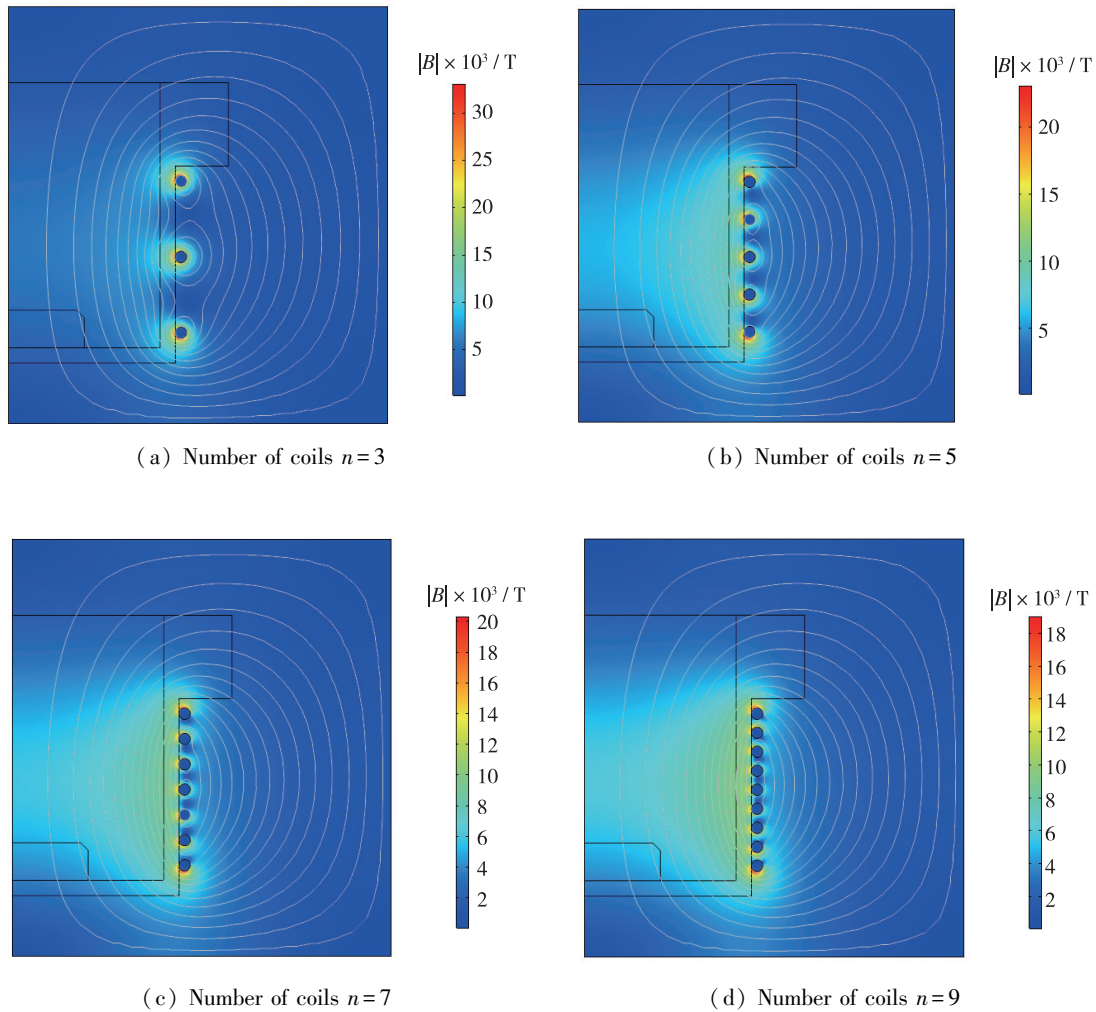


图 10 线圈匝数对磁场影响

Fig. 10 Influence of number of coils on the magnetic field

表 3 线圈匝数对等离子体特性参数影响

Table 3 Influence of number of coils on plasma characteristic parameters

numbers of coils	$n_e \times 10^{16} / \text{m}^{-3}$	$T_e / \text{eV}$
3	2.51	4.49
5	2.45	4.52
7	2.43	4.53
9	2.42	4.53

### 3 结论

本文建立了微型射频离子推力器感性耦合放电等离子体流体模型,对特定工况下的推力器等离子体特性参数分布进行了仿真研究,探究了等离子体放电特征参数随推进剂工质气压、放电吸收功率、射频频率以及线圈匝数等因素的变化规律.结

论如下:

(1)对于所设计内径为 40 mm 的微型射频离子推力器,在工质气压为 0.133 Pa 以上时,可以采用流体模型进行仿真分析.

(2)在吸收功率、射频频率和线圈匝数保持不变时,工质气压增大会使电子密度增加,电子温度降低.

(3)在工质气压、射频频率和线圈匝数保持不变时,吸收功率增大会使电子密度增加,电子温度几乎不变.

(4)在其他参数相同时,射频频率和线圈匝数对等离子体特征参数的影响可以忽略.

(5)由上述结论可以看出,推进剂工质气压、放电吸收功率是调节微型射频离子推力器性能的主要因素,该研究为综合调控微型射频离子推力器的工作性能奠定了良好的基础.



**致谢** 本研究获得国家自然科学基金(51977110)、中央高校基本科研业务费(NT2020007)资助项目资助。

#### 参考文献 (References)

- [1] 张岩. 空间电推进技术应用现状与发展趋势[J]. 上海航天, 2019, 36(6): 24-34.  
Zhang Y. Application status and development trend of space electric propulsion technology[J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(6): 24-34(in Chinese).
- [2] Liebeskind J G, Hanson R K, Cappelli M A. Laser-induced fluorescence diagnostic for temperature and velocity measurements in a hydrogen Arcjet plume[J]. Applied Optics, 1993, 32(30): 6117-6127.
- [3] 于达仁, 刘辉, 丁永杰, 等. 空间电推进原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2014.  
Yu D R, Liu H, Ding Y J, et al. Fundamentals of space electric propulsion[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2014(in Chinese).
- [4] Lawrence T J. Research into resistojet rockets for small satellite applications[D]. Guildford: University of Surrey, 1998.
- [5] 康小录, 杭观荣, 朱智春. 霍尔电推进技术的发展与应用[J]. 火箭推进, 2017, 43(1): 8-17, 37.  
Kang X L, Hang G R, Zhu Z C. Development and application of Hall electric propulsion technology[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2017, 43(1): 8-17, 37(in Chinese).
- [6] Raites Y, Fisch N J. Parametric investigations of a non-conventional Hall thruster[J]. Physics of Plasmas, 2001, 8(5): 2579-2586.
- [7] Solbes A, Thomassen K, Vondra R J. Analysis of solid Teflon pulsed plasma thruster[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1970, 7(12): 1402-1406.
- [8] Mazouffre S. Electric propulsion for satellites and spacecraft: established technologies and novel approaches[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2016, 25(3): 033002.
- [9] Dobkevicius M. Modelling and design of inductively coupled radio frequency gridded ion thrusters with an application to Ion Beam Shepherd type space missions[D]. Southampton: University of Southampton, 2017.
- [10] Feili D, Loeb H W, Schartner K H, et al. Performance mapping of new  $\mu$ N-RITs at Giessen[C]. Proceedings of the 29<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Princeton: Princeton University, 2005: 252.
- [11] Walther R, Schaefer M, Freisinger J. Plasma diagnostics of the RF-ion thruster 'RIT-10'[C]. 9<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Bethesda, 1972: 472.
- [12] Groh K, Blum O, Rado H, et al. Inert gas radio-frequency thruster RIT 10 [C]. 14<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Princeton, 1979: 2100.
- [13] Feili D, Di Cara D M, Leiter H J, et al. The  $\mu$ NRIT-4 Ion Engine: a first step towards a European mini-Ion Engine System development[C]. Proceedings of the 30<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Florence, 2007.
- [14] Trudel T A, Bilén S G, Micci M M. Design and performance testing of a 1-cm miniature radio-frequency ion thruster[C]. Proceedings of the 31<sup>st</sup> International Electric Propulsion Conference, Ann Arbor, 2009, 167: 20-24.
- [15] Loeb H W, Schartner K H, Meyer B K, et al. Forty years of Giessen EP-activities and the recent RIT-Microthruster development[C]. Proceedings of the 29<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Princeton: Princeton University, 2005: 31.
- [16] Tsay M, Frongillo J, Zwahlen J. Qualification model development of cubesat RF ion propulsion system BIT-3 [C]. Proceedings of the 31<sup>st</sup> Int Symp Space Technol, Matsuyama, 2017.
- [17] 鄧惠芬. 15厘米射频离子推力器—RIT-15的实验研究[J]. 中国空间科学技术, 1986(3): 56-67.  
Feng H F. An experiment investigation of 'RIT-15' 15cm RF-thruster [J]. Chinese Space Science and Technology, 1986(3): 56-67(in Chinese).
- [18] 贺建武, 马隆飞, 薛森文, 等. 射频离子微推力器的研究进展[C]. 第十二届中国电推进学术研讨会-01-72. 哈尔滨, 2016.  
He J W, Ma L F, Xue S W, et al. Research progress of RF ion micro thrusters[C]. Proceedings of the 12<sup>th</sup> China Electric Propulsion Seminar-01-72. Harbin, 2016 (in Chinese).
- [19] Piejak R B, Godyak V A, Alexandrovich B M. A simple analysis of an inductive RF discharge[J]. Plasma Sources Science and Technology, 1992, 1(3): 179-186.
- [20] Vahedi V, Lieberman M A, DiPeso G, et al. Analytic model of power deposition in inductively coupled plasma sources[J]. Journal of Applied Physics, 1995, 78(3): 1446-1458.
- [21] 吴宸宸, 孙新锋, 顾左, 等. 射频离子推力器放电与引出特性调节规律仿真与试验研究[J]. 推进技术, 2019, 40(1): 232-240.  
Wu C C, Sun X F, Gu Z, et al. Numerical and experimental research of optimal regulation with discharge and beam current extraction for RIT[J]. Journal of Propulsion

- Technology, 2019, 40(1): 232-240(in Chinese).
- [22] Tsay M M. Two-dimensional numerical modeling of radio-frequency ion engine discharge[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [23] Takao Y, Eriguchi K, Ono K. Two-dimensional particle-in-cell simulation of a micro RF ion thruster[C]. Proceedings of the 32<sup>nd</sup> International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, 2011.
- [24] Takao Y, Kusaba N, Eriguchi K, et al. Two-dimensional particle-in-cell Monte Carlo simulation of a miniature inductively coupled plasma source[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(9): 093309.
- [25] Kim D G, Jeong Y D, Shon Y, et al. Modified fluid simulation of an inductively coupled plasma discharge[J]. Applied Science and Convergence Technology, 2019, 28(6): 221-225.
- [26] Lei F, Li X P, Liu Y M, et al. Simulation of a large size inductively coupled plasma generator and comparison with experimental data[J]. AIP Advances, 2018, 8(1): 015003.
- [27] Mikellides I G, Katz I, Goebel D M, et al. Hollow cathode theory and experiment. II. A two-dimensional theoretical model of the emitter region[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 98(11): 113303.
- [28] Szabo J J. Fully kinetic numerical modeling of a plasma thruster[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [29] Brezmes A O, Breilkopf C. Fast and reliable simulations of argon inductively coupled plasma using COMSOL[J]. Vacuum, 2015, 116: 65-72.
- [30] 安秉健. 自持空心阴极关键尺寸影响与设计准则研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
An B J. Research of influence and design criteria of hollow cathode key dimensions[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014(in Chinese).
- [31] 刘阳. 基于 COMSOL 软件的双腔室射频感性耦合氩等离子体源的二维流体力学模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.  
Liu Y. Two-dimensional fluid simulation of dual-chamber radio-frequency inductively coupled argon plasma source based on COMSOL software[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017(in Chinese).
- [32] Lieberman M A, Lichtenberg A J. Principles of plasma discharges and materials processing[M]. 2<sup>nd</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, 2005.