# TM<sub>011</sub> MPT 等离子体和电场特征分析与调谐实验

杨涓1)† 孙江宏2) 王雨轩1) 罗凌峰1) 张岩2) 康小录2) 贾晴晴2)

1) (西北工业大学航天学院, 西安 710072)

2) (上海空间推进研究所, 上海 200233)

(2024年8月10日收到; 2024年11月7日收到修改稿)

微波等离子体推力器 (microwave plasma thruster, MPT) 属于电热型推力器,其圆柱腔内等离子体过程、 微波场分布与 TM<sub>011</sub> 模谐振状态是影响性能的重要因素.针对前人研究的可连续调节谐振状态的千瓦级 MPT, 需要开展结构固定的 MPT 研究,使其调谐过程简单、谐振状态良好,为深入研究奠定基础.本文对结构固定 的千瓦级 MPT 圆柱腔内等离子体过程进行分析,探寻最佳放电条件.计算腔体内 TM<sub>011</sub> 模谐振状态下的微 波电场和功率密度分布,分析其影响因素.对圆柱腔进行精细调谐实验,研究圆柱腔尺度和微波耦合探针尺 度对谐振状态的影响.理论分析和数值计算结果发现 489 Pa 压强条件下氦气放电消耗功率最低,长径比大于1 的圆柱腔内电场分布规律有利于气体放电.调谐实验结果发现长度和半径适中的球形探针使最短圆柱 腔 TM<sub>011</sub> 谐振状态最佳、谐振频率最接近工作频率 2.45 GHz.实验证明该腔体及匹配的探针使微波功率利用 率高、氦气易放电,其结构方案具有正确性和可靠性.

关键词:微波等离子体推力器,气体放电与等离子体产生,微波技术
 PACS: 52.75.Di, 51.50.+v, 84.90.+a
 CSTR: 32037.14.aps.74.20241118

# 1 引 言

微波等离子体推力器 (microwave plasma thruster, MPT) 属于电热型电推力器, 其利用微波能 量电离气体产生等离子体, 等离子体再被喷管加速 产生推力<sup>[1]</sup>. 根据常规化学推力器、磁约束离子推 力器和霍尔推力器装置的原理和工作过程, MPT 比冲高于化学推力器、低于离子推力器和霍尔推力 器, 推力低于化学推力器、高于离子推力器和霍尔 推力器<sup>[2]</sup>. 因此 MPT 折中了化学和电推进特点, 具有应用优势.

20世纪 50年代,美国开展 MPT 等离子体特 性实验研究,验证了推力器吸收微波能量的可能 性<sup>[3-5]</sup>.90年代后,随着微波技术发展,美国、欧洲、 日本和中国等对 MPT 重新开展研究并取得显著 成果. Sullivan 和 Micci<sup>[6]</sup>建立了固定结构的 MPT 及其实验系统, 通过测量输入和反射出推力器的微 波功率, 发现推力器以氦气与氩气为工质时微波能 量利用率较高. 分析了激光诱导测速仪诊断推力器 喷管出口处气流速度和扩张角, 为评估推力和比冲 奠定了基础. Yildiz 和 Celik<sup>[7]</sup>开发了 MPT 等离子 体动力学数值模型, 计算研究 8 GHz、小型化 MPT 内部氩气等离子体的旋流现象, 发现旋流效应使等 离子稳定集中在喷管上游腔体轴线附近, 并使推力 和比冲稳定; 同时研究并预示了水工质 MPT 的可 行性. Mehmet 和 Murat<sup>[8]</sup> 为了更好地理解微波谐 振腔中的加热机理, 提出了一个双流体全局模型. 利用 COMSOL Multiphysics 有限元软件求解相 应的方程, 确定了推力器性能和等离子体参数, 对

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: yangjuan@nwpu.edu.cn

<sup>© 2025</sup> 中国物理学会 Chinese Physical Society

假设的几何形状、腔体温度和压力值、相关的等离 子体参数进行了计算,给出了期望电子密度结果的 径向和轴向分布. Ivanov等<sup>[9]</sup> 根据纳米卫星应用 背景,考虑电子、氩离子与中性离子间的碰撞,数 值模拟研究新型微小几何结构的 MPT.结果表明 4 W 微波功率和 3 mg/s 流量,能产生 1 mN 推力. Tsubasa 等<sup>[10]</sup> 根据微小卫星应用背景,进行了小 型化氩气和水工质 MPT 内部的等离子体物理与 加热过程的数值模拟研究. 以降低功耗、提升性能 为目的,建立了多目标优化设计方案,通过电磁和 等离子体数值模拟,评估了 MPT 最优、可靠工作 的几何结构.

韩先伟等[11-20] 针对 1 kW 具有活塞调节装置 的圆柱谐振腔和 100 W 同轴谐振腔 MPT, 进行了 大量的数值模拟和实验研究. 采用微波等离子体流 体模型,考虑等离子体与微波电磁场的相互耦合过 程以及喷管内等离子体流动,数值模拟研究了推力 器圆柱腔和喷管内等离子体形成过程、与电磁场相 互作用特征及参数分布规律,获得100W同轴腔 MPT 的推力和比冲分别为 20-40 mN, 450-550 s. 采用蒙特卡罗模拟方法计算 1 kW MPT 羽流密 度、压强及温度沿轴向和径向变化规律,发现喷管 远处参数逐渐减小.采用推力分离措施,消除了影 响 MPT 推力测试的诸多因素,提升了推力测量的 精度. 分析了 MPT 在地球同步轨道卫星上的应用 可行性,提出了电推进系统的变轨方案. 2022 年虽 然国内出现微波谐振腔的研究<sup>[21,22]</sup>,但是其研究核 心与微波气体放电关系不大.

从国外与国内的研究综述可见,国外 20 世纪 80 年代以前研究的 MPT 具有依据与可行性. 20 世纪 90 年代至今,其研究一直被广泛关注,并 把推力器电功率从千瓦级降至瓦级,使其满足常规 和微型空间飞行器需求.国内早期唯有西北工业大 学开展 MPT 研究,后期该研究几乎中断.但是 MPT 推力器的特点使其研究又逐步兴起.国内应继承前 期研究经验,继续开展 MPT 研究.前期千瓦级 MPT 研究都针对可调活塞圆柱腔,其独特优点体 现在活塞可随时调节,保障推力器具有最高的微波 功率利用效率,这需要调节活塞以保证推力器微波 谐振状态.然而调节活塞使推力器结构复杂和调谐 过程繁琐,而且推力器工作于真空环境时,需要自 动控制步进电机才能实现调谐,增加了推力器复杂 性.为此本文在现有研究基础上,分析推力器内的 气体放电机制和等离子体过程, 探寻最佳的气体放 电条件, 探究最低能量激发氦气需求的气体压强, 使气体快速可靠放电并进入稳定工作状态, 为实验 研究带来便利条件. 以最佳的谐振状态为目标, 根 据微波理论, 明确 1 kW MPT 圆柱腔理论尺度. 以此为基础, 采用计算机软件对不同长径比 MPT 圆柱腔进行电磁场特征计算分析, 确定圆柱腔理论 尺度的正确性. 对圆柱腔长度和微波耦合探针几何 结构进行多尺度、细致的调谐实验研究, 最后获得 无活塞、紧凑的固定结构 MPT 圆柱腔, 并利用气 体放电实验证明调谐实验结果的可靠性, 为下一步 深入的实验研究奠定基础.

# 2 MPT 气体电离机制与电磁特征

### 2.1 MPT 系统与圆柱腔

如图1所示,1kW MPT 地面实验系统由微 波子系统、工质供应子系统和 MPT 组成. 其中 MPT 由微波耦合探针、圆柱腔(前腔与后腔)、前 后腔石英隔板与喷管构成, 微波子系统由电功率处 理器 (power processor unit, PPU)、微波发生器、 三端口环形器、负载、定向耦合器、正反向功率计 构成.系统工作时,微波发生器把 PPU 输出的电 能转化为 2.45 GHz 微波能, 通过三端口环形器、 定向耦合器输入到 MPT 圆柱腔. 正反向功率计分 别检测输入和反射出 MPT 的微波功率. 恰当设计 圆柱腔可使其内微波形成 2.45 GHz TM<sub>011</sub> 谐振 波, 微波能量吸收率最高<sup>[15-18]</sup>. TM<sub>011</sub> 谐振波电场 强度和微波功率密度在圆柱腔前后端面中心区最 强,并沿半径方向降低.在足够的输入微波功率条 件下, 气体输入 MPT 后腔后, 被后端面中心区强 微波电场击穿产生等离子体,等离子体快速被喷管 加速产生推力,此过程等离子体未经历其他路径的 扩散与漂移,降低了推力损失.

根据微波理论<sup>[23]</sup>,圆柱腔的长度 *L*<sub>P</sub>、直径 *D*、 谐振频率 *f*以及谐振波模之间存在复杂的关系如 图 2 所示,如果 TM<sub>011</sub> 波谐振腔体的 *L*<sub>P</sub> 和 *D* 选择 不恰,将引发出 TE<sub>112</sub>, TM<sub>012</sub> 和 TE<sub>111</sub> 等不需要 的谐振波,因为这些谐振波电场和能量密度不能聚 焦于喷管上游而产生浪费.评估谐振腔对微波能量 吸收状况的重要参数为品质因数 *Q*<sub>0</sub>, 定义为

$$Q_0 = 2\pi \frac{W}{w}\Big|_{\omega=\omega}$$

其中, $\omega$ 为微波圆频率, $\omega_0$ 为谐振腔的圆频率,



图 1 MPT 地面实验系统

Fig. 1. Ground experiment system of MPT.

 $D/L_{\rm P}$ .



图 2 圆柱腔结构尺度与谐振波模的关系

Fig. 2. Relation between the cavity dimension and cylindrical cavity resonance mode.

W和 w分别为总能量和一周期谐振腔的耗能.  $Q_0$ 值愈高, 腔体吸收微波能量愈高, 损耗愈低. 图 3 为圆柱腔谐振波因数 ( $Q_0\delta/\lambda$ ) 与  $D/L_P$  关系, 其中  $\delta$  为材料趋肤深度,  $\lambda$  为微波波长,  $Q_0\delta/\lambda$  与  $Q_0$  成 正比. 根据图 2 和图 3, 为避免杂波并提高品质因 素  $Q_0$ , 针对 2.45 GHz 微波, 取 D = 101.6 mm,  $L_P = 158.7$  mm 为初始结构参数.

# 2.2 MPT 圆柱腔内的气体电离与等离子体 形成机制

MPT 内气体压强范围宽, 气体电离机制随压强变化<sup>[23]</sup>. 高、低压条件下气体被微波电场电离需要的电场强度阈值分别为

$$E_{\rm b} = m_{\rm e} \gamma_{\rm m} \sqrt{2V_{\rm i}/eM} \approx C_1,$$



图 3 谐振模波形因数  $Q_0 \delta \lambda$ 与  $D/L_P$ 的关系 Fig. 3. Relation between resonant mode factor  $Q_0 \delta \lambda$  and

$$E_{\rm b} = 4\omega \sqrt{2\pi V_{\rm i} T_{\rm e}/3}/(\tau \gamma_{\rm m}) \approx C_2/\tau p$$

其中 $\gamma_m$ ,  $V_i$ , M,  $\tau$ , p,  $T_e$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ 为碰撞频率、气体电离电位、离子质量、特征扩散强度、压强、电子温度和高、低压条件下系数.高压下,电离电场强度阈值随压强增大而增大;低气压相反.当微波电场强度均方根  $E_{rms} \ge E_b$ 时微波气体放电,稳定后电子产生数与复合数相平衡,且 $E_{rms} = E_{max}/\sqrt{2}_{max}$ . 其中 $E_{max}$ 是 TM<sub>011</sub>模圆柱谐振腔内微波电场强度峰值.谐振时, TM<sub>011</sub>模最高电场和磁场能相等并等于谐振腔中任一瞬时电磁场总能,即

$$W_0 = W_{\text{emax}} = W_{\text{mmax}} = \varepsilon \int_V \boldsymbol{E} \boldsymbol{E}^* / 2 \mathrm{d} V.$$

根据圆柱谐振腔内 TM<sub>011</sub> 模电磁场强度解析 式<sup>[23]</sup>,得

$$W_{\rm max} = \sqrt{4W_0 \Big/ \left\{ 0.25\pi\varepsilon D^2 L_{\rm P} J_1^2 \left( 0.5k_{\rm c}D \right) - 0.25\pi^2\varepsilon D^2 [-J_2 \left( 0.5k_{\rm c}D \right) + J]^2 / k_{\rm c} \right\}},$$

其中  $k_c = 2p_{ni}/D$ ,  $p_{ni}$ 是 n阶贝塞尔函数 J<sub>n</sub>的第 *i*个根.由上式和圆柱腔直径与长度可计算出谐 振频率为 2.45 GHz, 1 kW MPT 圆柱腔内  $E_{max} =$ 2.3875×10<sup>4</sup> V/m,  $E_{rms} = 1.688 \times 10^4$  V/m. 借鉴文 献 [23] 可以给出微波等离子体特征扩散特征强度 为 19.495 mm, 利用 (4) 式可计算出腔内氦气击穿 场强  $E_b$ 随压强 P的变化曲线如图 4 所示. 1 kW MPT 谐振腔内气体压强低于 42.7 Pa 时, 气体击 穿电场强度  $E_b$ 随压强增大而降低; 压强高于 4.8 kPa 时,  $E_b$ 随压强增大而增大.在 42.7 Pa— 4.8 kPa 范围, 微波电场强度均方根  $E_{rms}$ 大于击穿 电场强度  $E_b$ 阈值, 是气体易放电区.在此区最低 击穿电场强度压强 489 Pa, 气体最易放电, 放电的 微波功率最低.



图 4 MPT 圆柱腔内氦气击穿电场强度随压强变化规律 Fig. 4. Relation between electric field intensity of helium discharge and pressure.

推力器内不同压强范围引起不同气体放电条 件的原因由腔内不同的物理过程引起. 如图 4 所 示,在最低气体击穿电场强度点 A 以外区域, 压强 增大,气体密度增大,气体内部主要过程为电子与 重粒子 (离子和原子或分子)碰撞和电子与微波电 场相互作用. 电子在微波电场作用下能量提高, 再 通过碰撞把能量传递给重粒子.这些过程随密度增 大而愈加频繁,由此引起击穿气体的电场强度阈 值 Eb 随压强增大,并维持等离子体的产生与稳定. 但是当密度增大到一定程度, 粒子的更高频率碰撞 将破坏电子与微波电场的相互作用,使微波能量难 以被吸收而截止,此过程的参数范围应该消除.在 A点以内区域, 压强降低, 气体密度降低. 电子与 微波电场相互作用受到碰撞的干扰减弱,电子能吸 收更多的微波能量. 但是密度低使携带能量的电子 与重粒子的碰撞频率降低,微波能量传递给重粒子 的概率降低,因此必须增加外界微波能量,即电场强度阈值 *E*<sub>b</sub>才能满足气体放电过程.

圆柱腔内气体放电后, 微波的振荡将在放电区 产生电流并形成 Joule 热, 使放电区粒子运动速度 增大, 电子与中性粒子及离子的弹性和非弹性碰 撞、激发和去激发碰撞频率增大, 最后碰撞过程达 到平衡, 气体放电稳定, 形成稳定的等离子体. 通 过调节气体流量和压强, 可以改变维持等离子体的 微波功率, 并调节微波功率利用率与推力性能.

#### 2.3 MPT 圆柱腔电磁场特征

MPT 工作时,喷管上游微波电场和能量密度 对气体电离和等离子体维持十分重要,需要计算分 析圆柱谐振腔内的电场和能量密度特征. 在相同 微波输入功率条件下,取 TM<sub>011</sub> 谐振圆柱腔长径 比分别为  $L_{\rm P}/D = 1.56$ ,  $L_{\rm P}/D = 1$ ,  $L_{\rm P}/D = 0.5$ , 采用高频结构模拟器 (high-frequency structure simulator, HFSS) 模块进行计算, 模拟出微波功率 密度和总电场强度及其矢量方向分布规律如图 5 和 图 6 所示. 发现 3 个腔体内微波功率密度与电场强 度呈二维轴对称分布,并且在前后端面轴线附近微 波功率密度和电场强度最强. 后端面轴心区域衔接 喷管,是气体电离与等离子体引出区.长径比降低, 腔体前后端面轴线上微波功率密度和电场强度提 高,后端面轴心处微波功率密度和电场强度沿径向 增大. 由于微波电场能量对气体电离和等离子体维 持的作用,长径比降低导致后端面等离子体从轴线 沿半径扩散区域增大,使等离子体引出路程和时间 延长,带来等离子体壁面损失和湮灭现象增强的现 象,导致推力降低.因此,最大长径比 $L_{\rm P}/D = 1.56$ 喷管上游强微波电场区域集中最大化,等离子体能 快速引出产生推力,理论上是应考虑的结构.

# 3 MPT TM<sub>011</sub> 圆柱腔谐振状态实验 研究

#### 3.1 实验方法

保障推力器正常工作的条件是 MPT 圆柱腔 内微波为 2.45 GHz TM<sub>011</sub> 谐振波,而且具有最低 回波损耗 $L_m$ <sup>[14]</sup>,其中 $L_m = 10 \lg P_r / P_i$ , $P_r$ 和 $P_i$ 分 别为腔体的微波反射和输入功率.MPT 圆柱腔除 了金属材料构成的前后腔外,存在气密结构和隔离



图 5 不同长径比 TM<sub>011</sub> 模圆柱谐振腔功率密度分布 (a)  $L_{\rm P}/D = 1.56$ ; (b)  $L_{\rm P}/D = 1$ ; (c)  $L_{\rm P}/D = 0.5$ 

Fig. 5. Energy density distribution inside of cylindrical cavity at  $TM_{011}$  mode and with different  $L_P/D$ : (a)  $L_P/D = 1.56$ ; (b)  $L_P/D = 1$ ; (c)  $L_P/D = 0.5$ .



图 6 不同长径比 TM<sub>011</sub> 模圆柱谐振腔电场强度及其矢量分布 (a)  $L_{\rm P}/D = 1.56$ ; (b)  $L_{\rm P}/D = 1$ ; (c)  $L_{\rm P}/D = 0.5$ Fig. 6. Electric field intensity and vector distribution inside of cylindrical cavity at TM<sub>011</sub> mode and different  $L_{\rm P}/D$ : (a)  $L_{\rm P}/D = 1.56$ ; (b)  $L_{\rm P}/D = 1$ ; (c)  $L_{\rm P}/D = 0.5$ .

前后腔的石英隔板,因此仅以腔体的直径与长度难 以保证推力器谐振状态.图7为推力器圆柱腔结 构,微波耦合探针位于前端面电场强度最强中心 区,是激发微波场的重要部件,其结构影响微波电 场强度和功率密度的最高值、微波能量吸收率和谐 振状态.根据图5和图6计算结果,圆柱腔长度密 切影响两端微波电场强度和功率密度最高值及其 区域.石英玻璃隔板对微波能量有衰减作用,其位 置影响前后腔内电磁场整体分布规律和最高电场 强度及区域.由此可见,实验研究图8所示球形和 半球形微波耦合探针尺度、总腔和前腔长度、石英 隔板位置对谐振频率和回波损耗的影响规律,是寻 圆柱腔内 2.45 GHz TM<sub>011</sub>谐振波的重要方案.

图 9 为 MPT TM<sub>011</sub> 圆柱腔谐振状态实验研 究系统,由网络分析仪和 MPT 组成. 网络分析仪 通过短路校准后接入 MPT,再通过电缆把微波信 号输入推力器,同时接收推力器反射微波信号,获 得推力器回波损耗曲线如图 10 所示. 图中最低回 波损耗 L<sub>m</sub>显示圆柱腔的谐振状态,对应的频率为 谐振频率.固定圆柱腔直径 101.6 mm、石英隔板 厚 8 mm,调节腔总长及前腔长、图 8 所示微波耦



Fig. 8. Microwave coupling probe.

合天线球和半球半径  $R_r$  以及天线圆柱杆长度  $L_b$ , 实验研究  $L_m$  和 $\Delta F_{req}$  随结构尺寸的变化规律,从 中获得最低 $\Delta F_{req}$  与  $L_m$ ,才能明确圆柱腔谐振状态 下的最佳结构尺度.



图 9 调谐实验系统 Fig. 9. Tuning experiment system.



图 10 圆柱腔回波损耗曲线 Fig. 10. Return loss curve.

#### 3.2 推力器圆柱腔调谐实验

圆柱腔总长  $L_{\rm P}$  分 158.7—147.0 mm 和 146.0— 131.0 mm 两区域, 分别为长、短圆柱腔区. 对前者 配匹配前腔轴向尺度  $L_{\rm F}$ , 形成  $L_{\rm P}/L_{\rm F}$  系列值 158.7 mm/81.25 mm,152 mm/78.25 mm,146 mm/ 75.25 mm. 后者形成  $L_{\rm P}/L_{\rm F}$  系列值 146.0 mm/ 72.5 mm, 138 mm/65.5 mm, 135 mm/62.5 mm, 131.5 mm/58 mm. 在不同结构和尺度的探针匹配 下, 实验研究两类长、短腔体尺度对 $\Delta F_{\rm req}$  与  $L_{\rm m}$  的 影响规律, 发现长腔体尺度的变化都使谐振频率远 离 2.45 GHz, 因此捕获谐振状态比较难, 可以进行 粗调谐实验. 但是短腔体相反, 有规律的短腔体尺 度变化使其谐振频率逐渐接近 2.45 GHz, 必须对 每个尺度下的短腔体分别进行调谐实验, 才能获得 精确的谐振状态.

# 3.2.1 不同探针与长圆柱腔轴向尺度对 $\Delta F_{req} 与 L_m 影响的粗调实验$

分别采用  $R_{\rm r}/L_{\rm b} = 3.0$  mm/3.5 mm 球状天线 和  $R_{\rm r}/L_{\rm b} = 4.5$  mm/4.0 mm 半球形天线, 利用图 9 所示实验系统,研究出 $\Delta F_{req}$ 和  $L_m$ 随长圆柱腔长度的变化规律如图 11 所示.可见分别匹配两类探针的腔体轴向尺寸变化引起 $\Delta F_{req}$ 的变化范围为 –110.0到–100.0 MHz.长腔体匹配半球形探针时,  $L_m$ 低;短长度腔体匹配球形探针, $L_m$ 低于匹配半球形探针的长腔体.



图 11 不同探针与长腔体长度对 $\Delta F_{req}$ 和  $L_m$ 的影响 Fig. 11. Influence of probe type and long cavity length on  $\Delta F_{req}$  and  $L_m$ .

# 3.2.2 不同探针与短圆柱腔轴向尺度变化 $addelta \Delta F_{reg} ext{ } = L_m$ 影响的细调实验

如图 12(a) 所示,  $L_P/L_F$  为 146.0 mm/72.5 mm、 半球形天线长  $L_b = 4.5$  mm、球半径  $R_r$  在 4.0— 8.0 mm 范围变化时,  $\Delta F_{req} 与 L_m$  分布在-110.0 到 -100.0 MHz 和-4.50 到-2.50 dB 范围内.表现出 最低  $L_m$ ,  $\Delta F_{req}$  分别随天线半球半径的增加而提高 与降低的规律. 如图 12(b) 所示, 对于球形探针球 半径  $L_b = 3.5$  mm, 长  $L_b$  在 3.0—6.0 mm 范围变 化时, 最低  $L_m 与 \Delta F_{req}$  变化范围分别为-5.50 到 -3.75 dB 和-105.0 到-101.0 MHz; 对于半球形探 针球半径  $R_r = 4.0$  mm、长  $L_b$  在 6—7.5 mm 范围 变 化时,  $L_m 与 \Delta F_{req}$  变化范围分别为-7.50 到 -5.25 dB 和-101.0 到-100.0 MHz. 表现出球形和 半球形探针的长度与半径对 $\Delta F_{req}$ 影响不大, 但是 两类探针长度对  $L_m$  度影响较大, 且半球形探针条 件下的  $L_m$  低于球形探针.

当短腔  $L_{\rm P}/L_{\rm F} = 138.0 \text{ mm}/65.5 \text{ mm}$ ,不同探 针类型和结构尺寸条件下的 $\Delta F_{\rm req}$ 和最低  $L_{\rm m}$  变化 规律曲线见图 13(a), (b). 如图 13(a) 所示, 球形探 针直杆长  $L_{\rm b} = 4.5 \text{ mm}$ 、球半径  $R_{\rm r}$  在 3.5—4.5 mm 内变化时,  $\Delta F_{\rm req}$  与最低  $L_{\rm m}$  在-70.0 到-47.5 MHz 和-4.0 到-3.0 dB 范围内线性变化; 半球形探针长 度  $L_{\rm b}$  = 4.5 mm、球半径  $R_{\rm r}$ 在 3.5—5.5 mm 范围 内变化时,  $\Delta F_{\rm req}$ 与最低  $L_{\rm m}$ 在—57.5 到—32.5 MHz 和—8.0 到—4.0 dB 范围内线性变化.可见与球形天 线相比,半球形天线性能优.而且半球形和球形天 线半径越接近 3.5 mm,谐振频率愈靠近 2.45 GHz,  $L_{\rm m}$ 愈低,愈接近谐振状态.如图 13(b)所示,探针 长  $L_{\rm b}$  = 3 mm、球形探针球半径  $R_{\rm r}$ 在 3.5—4.5 mm 时,最低 $\Delta F_{\rm req}$ 与  $L_{\rm m}$ 分别在—52.0 到—36.0 MHz 和 —6.5 到—4.0 dB 范围为内变化;半球形探针球半径  $R_{\rm r}$ 在 3.5—6.0 mm 范围时,最低  $L_{\rm m}$ 与 $\Delta F_{\rm req}$ 分别 在—9.5 到—5.0 dB 和—40.0 到—32.0 MHz 内变化. 其结果依然是半球形天线优于球形天线、与图 13(a) 相比,结果依然是半球形和球形天线长度愈接近 3.5 mm,圆柱腔愈靠近谐振状态.

虽然图 12 和图 13 都在固定腔体长度条件下

检测到低  $L_{\rm m}$  值和接近 2.45 GHz 的谐振状态,而 且 3.5 mm 半径的半球探针捕获到的谐振状态最 优,但是这类探针中的半球结构存在尖点并引起圆 柱腔前端面附近微波场强集中,引起腔体内电场分 布规律偏离 TM<sub>011</sub> 模微波电场.相反球形探针整 体结构没有尖点,其表面都圆滑过度,腔体内电场 分布接近 TM<sub>011</sub> 模微波电场.另外国内 MPT 前期 研究经验说明推力器愈接近谐振状态<sup>[13,14,17]</sup>,其影 响因素愈多.因此基于图 13 所示圆柱腔谐振状态 实验结果,采用半径 3.5 mm 球形微波耦合探针, 缩短腔体长度到  $L_{\rm P}/L_{\rm F}$  为 135 mm/62.4 mm 和 131.5 mm/58 mm,实验研究探针长度变化对谐振 状态的影响.如图 14 所示,实验结果表明长与短 腔体分别与半径 3.5 mm 和长度 6.5 mm 的球形探 针匹配时, $L_{\rm m}$  最低点值分别为–17,–11 dB,  $\Delta F_{\rm req}$ 



图 12  $L_{\rm P}/L_{\rm F}$  =146 mm/72.25 mm 条件下探针结构及尺度对 $\Delta F_{\rm req}$  和  $L_{\rm m}$  的影响 (a) 长 4.5 mm、半径 4.0—8.0 mm 半球形探针; (b) 半径 3.5 mm、长 3.0—6.0 mm 球形探针和半径 4.0 mm、长 6.0—7.5 mm 半球形探针

Fig. 12. Influence of structure and dimension of probe on  $\Delta F_{\text{req}}$  and  $L_{\text{m}}$  as  $L_{\text{P}}/L_{\text{F}} = 146 \text{ mm}/72.25 \text{ mm}$ : (a) 4.5 mm length and 4.0–8.0 mm radius of half ball; (b) 3.5 mm radius and 3.0–6.0 mm length of ball, 4.0 mm radius and 6.0–7.5 mm length of half ball.



图 13  $L_P/L_F = 138 \text{ mm}/65.5 \text{ mm} 腔体 \Delta F_{req} 和 L_m 随天线半径的变化规律 (a) 球形与半球形天线长 4.5 mm; (b) 球形与半球形 天线长 3 mm$ 

Fig. 13.  $\Delta F_{\text{req}}$  and  $L_{\text{m}}$  of the cavity at  $L_{\text{P}}/L_{\text{F}} = 138 \text{ mm}/65.5 \text{ mm}$  varying with probe radius: (a) Ball and half ball probe length of 4.5 mm; (b) ball and half ball probe length of 3 mm.

适中分别为 20 MHz, 5 MHz. 因此这两个腔体属 于最佳谐振状态的最优选择,将最有利于推力器气 体放电和等离子体维持.



图 14 3.5 mm 球形探针半径及  $L_P/L_F = 135 \text{ mm}/62.4 \text{ mm}$  和 131.5 mm/58 mm 条件下 $\Delta F_{req}$ 和  $L_m$  随探针长度的变化 规律

Fig. 14. Variation of  $\Delta F_{\rm req}$  and  $L_{\rm m}$  with the ball probe length at the condition of  $R_{\rm r}=3.5~{\rm mm}$  and  $L_{\rm P}/L_{\rm F}=135~{\rm mm}/62.4~{\rm mm},\,131.5~{\rm mm}/58~{\rm mm}.$ 

# 4 真实功率加载条件下 MPT 放电实验

根据图 14 所示圆柱腔调谐实验结果, 总长分 别为 135 mm 和 131.5 mm 的固定结构推力器圆 柱腔分别匹配半径 3.5 mm 和长度 6.5 mm 的球形 耦合探针时,谐振状态最佳,最有利于气体放电和 等离子体产生. 与 131.5 mm 腔体相比, 135 mm 腔体 Lm低、谐振频率离推力器频率 2.45 GHz 较 远. 这两个腔体是否能使气体电离, 需要进行真实 功率加载条件下的实验验证. 根据图 14 实验结 果,用两套尺度探针半径与长度 3.5 mm/3 mm 和 3.5 mm/6.5 mm 分别匹配 131.5 mm, 135 mm 长 的圆柱腔,分别安装于图1系统中进行放电实验. 首先把圆柱腔喷管出口用堵盖封闭并保证圆柱腔 的密封性,再对推力器抽真空.根据前述 MPT 圆 柱腔内气体电离机制分析,借鉴氦气放电曲线计算 结果图 4,调节压强至氦气最容易放电的气压范围 480 Pa 左右, 再打开图 1 所示 PPU 系统, 使 500 W 微波功率输入到推力器圆柱腔,观察气体放电情 况. 发现匹配两类尺度探针的 135 mm 长度腔体都 不能放电,匹配两类尺度探针 131.5 mm 的腔体都 瞬间放电. 这是因为短腔体虽然 Lm 高, 但是其谐 振频率和 2.45 GHz 接近的程度都高于长腔体, 所 以 TM<sub>011</sub> 波功率易被短腔体推力器吸收, 长短探针

都使短腔体可靠放电. 把微波功率调节至 748.4 W 不变, 把圆柱腔喷管堵盖打开, 缓慢调节氦气输入 流量及气体压强, 等离子体及其引出图像如图 15 所示. 实验参数如图 16 所示, 匹配短探针的短圆 柱腔吸收的微波功率低于长探针的短圆柱腔. 此外 可以看出, 虽然短探针腔体谐振频率接近工作频 率 2.45 GHz, 但是短探针腔体的回波损耗显著高 出长探针腔体很多, 由此使短探针腔体吸收微波功 率显著低于长探针腔体. 该实验证明长探针匹配短 腔体具有易放电、微波功率利用率高的特点, 证明 了此结构方案的可靠性.



图 15 短腔体 MPT 氦气等离子体 (a) 内部等离子体; (b) 等 离子体引出

Fig. 15. Helium plasma of MPT with the short cavity: (a) Plasma inside of cavity; (b) plasma extraction.



图 16 短腔体 MPT 氦气放电实验参数随流量 *'n* 变化规律 (a) 功率; (b) 压强

Fig. 16. Experiment parameter variation of He discharge in shorter cylinder cavity of MPT with flowrate  $\dot{m}$ : (a) Power; (b) pressure.

# 5 总 结

根据微波和等离子体理论,对 MPT 圆柱谐振 腔的结构参数进行了评估,计算明确了 1 kW,固 定结构、无调节活塞 MPT 圆柱腔理论尺度,分析 了推力器内等离子体的放电机制、评估了放电条 件,对不同长径比 MPT 圆柱腔内电磁场特征进行 了计算分析.对推力器圆柱腔结构进行多结构、多 尺度、细致的调谐实验研究,获得无调节活塞、紧 凑的 MPT 圆柱腔,开展了氦气放电实验并验证了 调谐实验结果的可行性,为下一步深入的实验研究 奠定了基础.论文研究获得的结论如下.

1) 对 MPT 圆柱腔内的 TM<sub>011</sub> 谐振波及其他 杂波特征进行分析, 确定出有利于 TM<sub>011</sub> 谐振波 产生、避免杂波出现的几何范围, 明确了推力器腔 体的几何结构.

2) 分析了 MPT 圆柱腔内的气体放电和等离
 子体产生机制,获得了有利于氦气放电的压强条
 件,为推力器的可靠放电奠定了基础.

3) 对不同长径比圆柱腔内的微波电场及其功 率密度进行了计算分析,获得了长径比对微波电场 的影响规律,获得了适合于推力器工作的电场分布 规律.

 4)采用微波调谐的实验研究方法,在不同微 波耦合探针结构条件下,对多尺度推力器圆柱腔进 行了细致的调谐实验,获得了最佳的推力器结构.

5) 气体放电和等离子体引出实验验证了 MPT 圆柱腔 TM<sub>011</sub> 谐振波调谐实验结果的正确性, 为 后续深入的 MPT 研究奠定了扎实基础.

#### 参考文献

- Mao G W, He H Q, Yang J, Shi S L 2012 J. Propul. Technol. 19 21 (in Chinese) [毛根旺, 何洪庆, 杨涓, 史韶莉 2012 推进技 术 19 21]
- [2] Hang G R, Li S N, Kang X L, Jin Y Z, Sun W X 2023 J. Propul. Technol. 44 38 (in Chinese) [杭观荣, 李诗凝, 康小录,

金逸舟, 孙雯熙 2023 推进技术 44 38]

- [3] Herlin M A, Brown S C 1948 *Phys. Rev. B* 74 1650
- [4] Brown S C, MacDonald A D 1949 Phys. Rev. B 76 1629
- [5] Whitehair S, Asmussen J, Nakanishi S 1987 J. Propuls. Power 3 136
- [6] Sullivan D, Micci M 1994 30th Joint Propulsion Conference and Exhibit Indianapolis, June 27–29, 1994 p3127
- [7] Yildiz M S, Celik M 2015 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference Orlando, July 27–29, 2015 p3926
- [8] Mehmet S Y, Murat C 2015 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference Orlando, FL, July 27–29, 2015
- [9] Ivanov S, Kolev S, Kiss'ovski Z 2021 Contrib. Plasm. Phys. 61 e202100017
- [10] Tsubasa O, Suk H, Hideaki O 2023 AIAA SciTech Forum and Exposition, National Harbor, MD, Februray 10, 2003
- [11] Han X W, Mao G W, He H Q 2002 Sol. Roc. Technol. 25 21 (in Chinese) [韩先伟, 毛根旺, 何洪庆 2002 固体火箭技术 25 21]
- [12] Han X W, He H Q, Tang J L, Mao G W 2002 Aerospace Shanghai 19 1 (in Chinese) [韩先伟, 何洪庆, 唐金兰, 毛根旺 2002 上海航天 19 1]
- [13] Tang J L, He H Q, Mao G W, Wan W 2002 Solis Rocket Tech. 25 31 (in Chinese) [唐金兰, 何洪庆, 毛根旺, 万伟 2002 固体火箭技术 25 31]
- [14] Yang J, He H Q, Mao G W, Han X W 2004 J. Spacecraft Rockets 41 126
- [15] Yang J, Mao G W, He H Q, Tang J L, Song J, Su W Y 2004 Acta Phys. Sin. 53 4282 (in Chinese) [杨涓, 毛根旺, 何洪庆, 唐金兰, 宋军, 苏纬仪 2004 物理学报 53 4282]
- [16] Yang J, Su W Y, Mao G W, Xia G Q 2006 Acta Phys. Sin.
  55 6494 (in Chinese) [杨涓, 苏纬仪, 毛根旺, 夏广庆 2006 物理
  学报 55 6494]
- [17] Yang J, Xu Y Q, Tang J L, Mao G W, Yang T L 2008 Rev. Sci. Instrum. 79 083503
- [18] Yang J, Xu Y Q, Meng Z Q, Yang T L 2008 Phys. Plasmas 15 023503
- [19] Tang J L, He H Q, Han X W, Mao G W, Yang J, Wan W 2002 J. Propul. Technol. 23 303 (in Chinese) [唐金兰, 何洪庆, 韩先伟, 毛根旺, 杨涓, 万伟 2002 推进技术 23 303]
- [20] Sun A B, Mao G W, Xia G Q, Chen M L, Xing P T 2012 J. Propul. Technol. 33 138 (in Chinese) [孙安邦, 毛根旺, 夏广庆, 陈茂林, 邢鹏涛 2012 推进技术 33 138]
- [21] Chen Z Y, Peng Y B, Wang R, He Y N, Cui W Z 2022 Acta Phys. Sin. 71 240702 (in Chinese) [陈泽煜, 彭玉彬, 王瑞, 贺永 宁, 崔万照 2022 物理学报 71 240702]
- [22] Gao H Y, Yang X D, Zhou B, He Q, Wei L F 2022 Acta Phys. Sin. 71 064202 (in Chinese) [高海燕, 杨欣达, 周波, 贺 青, 韦联福 2022 物理学报 71 064202]
- [23] Roth J R (translated by Wu J Q) 1998 Industrial Plasma Engineering Volume I-Basic Principles (Beijing: Science Press) (in Chinese) [罗思 J R 著 (吴坚强 等 译) 1998 工业等 离子体工程·第 I 卷·基本原理 (北京: 科学出版社)]

# Analysis on plasma and electric field property of $TM_{011}$ mode MPT and its tuning experiment

YANG Juan<sup>1)†</sup> SUN Jianghong<sup>2)</sup> WANG Yuxuan<sup>1)</sup> LUO Lingfeng<sup>1)</sup> ZHANG Yan<sup>2)</sup> KANG Xiaolu<sup>2)</sup> JIA Qingqing<sup>2)</sup>

(School of Astronautics, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)
 (Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 200233, China)

( Received 10 August 2024; revised manuscript received 7 November 2024 )

#### Abstract

Microwave plasma thruster (MPT) is a kind of electrothermal thruster. Inside its cylindrical cavity, the plasma process, microwave electric field distribution, and  $TM_{011}$  mode resonant state are important factors affecting the performance of MPT seriously. According to previous MPT formed through continuous regulation in the resonant sate of cylindrical cavity, the research is needed on a newly fixed and simple MPT, which will simplify the resonant state regulation and lays an important foundation for further study. Therefore the plasma process is analyzed to find the optimal gas discharge condition, and the microwave electric field intensity and power density distribution inside the cavity running in  $TM_{011}$  resonant sate are calculated to analyse how the parameters are influenced by the cavity dimensions. The resonant state is finely regulated to study how it is influenced by the dimensions of cylindrical cavity and microwave coupling probe with ball and half ball structure. The results of theoretical analysis and calculation show that the discharge power of helium gas is the lowest under the condition of 489 Pa and when the ratio of length to diameter is greater than 1, the microwave electric density distribution inside the cavity is beneficial. Owing to the appropriate length and radius of microwave coupling ball probe, the experiment on resonant state regulation shows that the shortest cylinder cavity is in the optimal resonant sate, with a resonance frequency very close to 2.45 GHz. The helium discharge experiment proves that the cavity and matching ball probe enable high microwave utilization and easy helium gas discharge, and the structure scheme is correct and reliable.

Keywords: microwave plasma thruster, gas breakdown and plasma generation, microwave technology

**PACS:** 52.75.Di, 51.50.+v, 84.90.+a

**DOI:** 10.7498/aps.74.20241118

CSTR: 32037.14.aps.74.20241118

 $<sup>\</sup>dagger$  Corresponding author. E-mail: <code>yangjuan@nwpu.edu.cn</code>





Institute of Physics, CAS

# TM<sub>011</sub> MPT等离子体和电场特征分析与调谐实验

杨涓 孙江宏 王雨轩 罗凌峰 张岩 康小录 贾晴晴

## Analysis on plasma and electric field property of TM<sub>011</sub> mode MPT and its tuning experiment

YANG Juan SUN Jianghong WANG Yuxuan LUO Lingfeng ZHANG Yan KANG Xiaolu JIA Qingqing

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 74, 015201 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241118 在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.74.20241118 当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

#### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

常压下预混甲烷和空气微波等离子体放电燃烧的实验研究

Experimental study on microwave plasma discharge and combustion of premixed methane and air at atmospheric pressure 物理学报. 2023, 72(15): 155201 https://doi.org/10.7498/aps.72.20230676

#### 微波谐振腔低气压放电等离子体反应动力学过程

Reaction dynamic process of low pressure discharge plasma in microwave resonant cavity 物理学报. 2022, 71(24): 240702 https://doi.org/10.7498/aps.71.20221385

#### 等离子体鞘套宽带微波反射诊断方法

Method of diagnosing broadband microwave reflection of plasma sheath 物理学报. 2022, 71(23): 235201 https://doi.org/10.7498/aps.71.20221179

腔体结构参数对毛细管放电型脉冲等离子体推力器放电特性的影响 Influence of cavity configuration parameters on discharge characteristics of cavillary discharge has

Influence of cavity configuration parameters on discharge characteristics of capillary discharge based pulsed plasma thruster 物理学报. 2021, 70(23): 235204 https://doi.org/10.7498/aps.70.20211198

2 cm电子回旋共振离子推力器离子源中磁场对等离子体特性与壁面电流影响的数值模拟

Numerical simulation of influence of magnetic field on plasma characteristics and surface current of ion source of 2-cm electron cyclotron resonance ion thruster

物理学报. 2021, 70(7): 075204 https://doi.org/10.7498/aps.70.20201667

超宽带等离子体相对论微波噪声放大器的物理分析和数值模拟

Physical analysis and numerical simulations of ultra wideband plasma relativistic microwave noise amplifier 物理学报. 2023, 72(5): 058401 https://doi.org/10.7498/aps.72.20222061