

碳纳米管中和器工作特性研究

汪宇欣, 武志文, 黄天坤, 王云冰

(北京理工大学 宇航学院, 北京 100081)

摘要: 针对引力波探测和地球重力场探测等高精度空间探测任务对系统精度提高的要求, 从碳纳米管场发射中和器的工作稳定性和电子引出问题进行试验设计, 测试了其老练前后的电流波动特性, 应用Spearman秩相关检验方法对背景电场和电流波动进行相关性分析, 并使用3种不同孔径的栅极对中和器引出特性进行测试, 分析了栅极孔径对中和器性能影响的机理。结果表明, 老练处理有助于提高中和器工作稳定性, 且发射极工作背景电场与发射电流不稳定性具有强相关关系; 栅极孔径对发射性能与引出性能均有影响, 在试验工况下1 mm孔径栅极性能最佳。该结果可为推进系统中的中和器配置和中和器结构设计提供一定指导。

关键词: 碳纳米管; 中和器; 稳定性; 引出率

中图分类号: V432

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)02-0151-08

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20240004

引用格式: 汪宇欣, 武志文, 黄天坤, 等. 碳纳米管中和器工作特性研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(2): 151-158.

Reference format: WANG Y X, WU Z W, HUANG T K, et al. Operating characteristics of carbon nanotube neutralizer for space exploration missions[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(2): 151-158.

引言

空间推进系统常用电推力器实现姿态控制和位置保持等空间任务^[1-5], 电子源是大部分电推力器必需的部件, 用于提供初始电子或中和电子。

目前为止, 使用最广泛的电子源为热阴极或空心阴极^[6-7], 但二者均需要额外的加热装置, 给推进系统带来了额外的功耗和热负荷。此外, 空心阴极工作需要工质气体, 不仅增加了系统复杂度, 而且消耗的工质流量过高, 将显著降低推进系统工作的效率。近年来, 场发射阴极由于没有额外的热载荷且不消耗工质, 能够提高整个推进系统的总冲, 因此受到了广泛关注。碳纳米管具有优异的电学、热学和机械性能, 且长径比极大, 能够在低电压下实现强电场, 是场发射阴极的理想材料, 适合应用于微小推力器, 实现小束流下的束流中和, 可应用于引力波探测、地球重力场测量等探测任务。目前, 碳纳米管中和器已作为“太极一号”(Taiji-1)的射频离子微推进系统中和器^[8]和LISA Pathfinder的胶体微牛顿流体推进系统中和器^[9]实现了在轨应用, 性能良好。

有关碳纳米管中和器试验的研究主要集中于发射

极发射能力以及与推力器的耦合工作性能。在碳纳米管场发射能力方面, 日本大分工业大学分别对两种碳纳米管场发射阴极作为小型微波离子推力器中和器的工作性能进行研究。其中直接键合在铜基底的单壁碳纳米管发射极在380 V电压、0.5 mm间距下发射的电流达到了0.56 mA, 能满足中和需求^[10]; 九州大学使用88 mm×88 mm的碳纳米管场发射阴极作为离子推力器的中和器, 实现了20 mA的最大发射电流^[11]。在耦合推力器工作性能方面, 喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)用碳纳米管场发射中和器中和In-FEEP推力器束流, 在7.6 μ N推力水平下实现了比热阴极低50%的功率推力比, 证明场发射阴极在小电流下具有其独特的优越性^[12]; 佐治亚理工大学在霍尔推力器羽流等离子体环境中都对碳纳米管场发射中和器进行了短期工作测试, 试验前后的电镜照片表明发射极并未因等离子体环境出现损伤, 具备替代霍尔推力器配套空心阴极的潜力^[13]; 中国科学院力学所对基于碳纳米管中和器的射频离子微推进系统主动中和方案进行了研究, 结果表明在引入主动控制方案时, 碳纳米管中和器工作性能稳定, 能够较好地完成中和任务, 证明了该中和器与射频离子微推进系统具有良好的兼容性^[14]。

以上研究证明了碳纳米管场发射中和器具有广泛的应用前景, 但还缺乏中和器的设计依据。本文对碳纳米管中和器工作特性进行试验研究, 探究了其工作稳定性与引出特性影响因素, 使用标准差和Spearman秩相关系数等统计学方法对试验结果进行分析, 同时分析了栅极孔径对中和器性能的影响机理。研究结果可以为推进系统中的中和器配置及碳纳米管场发射中和器优化设计提供参考。

1 试验方案设计

1.1 碳纳米管中和器与试验电路

碳纳米管中和器工作原理如图1所示。碳纳米管位于由栅极和发射极基底提供的背景电场中, 其极大的长径比对背景电场具有增强作用, 因此在碳纳米管尖端附近场强远大于背景场。尖端强电场对碳纳米管表面势垒有扭曲作用, 使得碳纳米管中的电子有概率发生量子隧穿, 成为自由电子。自由电子经栅极引出, 与推力器束流中和, 以维持航天器的电中性。中和器实物图如图2所示。

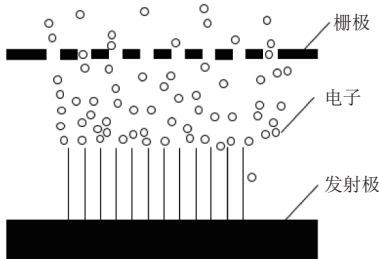


图1 碳纳米管中和器工作原理图

Fig. 1 Working principle of carbon nanotube neutralizer

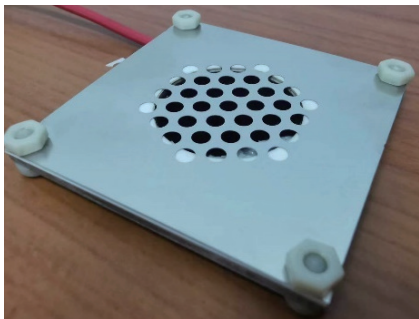


图2 中和器实物图

Fig. 2 Physical diagram of neutralizer

测试电路如图3所示, 在进行发射极稳定性测试时, ITO导电玻璃作为阳极; 在进行中和器引出性能测试时, 使带孔栅极作为阳极。

测试过程中, 通过调节发射极电压, 对中和器性能进行测试。发射极采样电阻 $R_1=108.2\text{ k}\Omega$, 栅极采样

电阻 $R_2=103.6\text{ k}\Omega$, 使用数字万用表采集电压信号 V_1 、 V_2 。为除去阴极中过高的碳管和器件表面的吸附气体, 每次试验前均对碳纳米管发射极进行了老练处理, 老练电压为当前试验涉及的最高电压, 老练时间10 min。老练结束后, 从大到小调节电压, 在每个试验工况下采集100 s信号, 采样频率2.5 Hz。试验过程中保持舱内气压小于 $2 \times 10^{-3}\text{ Pa}$ 。中和器具体参数如表1所示。

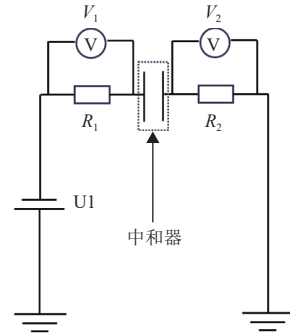


图3 试验电路

Fig. 3 Experimental circuit

表1 中和器参数

Table 1 Neutralizer parameter

参数	材料/规格
碳管高度/ μm	~ 300
发射极有效发射面积/ mm^2	490.87
绝缘片	Al_2O_3
螺栓	PPS
栅极	不锈钢
2 mm孔径栅极孔数	151
2 mm孔径栅极孔间距/mm	2.2
1 mm孔径栅极孔数	517
1 mm孔径栅极孔间距/mm	1.2
0.2 mm孔径栅极孔数	4 957
0.2 mm孔径栅极孔间距/mm	0.4

1.2 碳纳米管中和器性能评估方法

本文使用电流波动标准差表征电流波动的剧烈程度, 并通过M-G模型计算碳纳米管场发射阴极的等效场增强因子, 以此表征阴极整体性能。用Spearman秩相关系数检验两个变量是否相关, 以此判别电流波动的影响因素。

1.2.1 发射电流稳定性与电流波动标准差

发射电流的稳定性通常通过发射电流在一定时间内波动的标准差来表征, 根据欧姆定律计算每个采集点的支路电流为

$$I_{i,n} = \frac{V_{i,n}}{R_{i,n}} (i \in \{1, 2\}, n \in \{1, 2, 3, \dots, 250\}) \quad (1)$$

其中: 下标*i*表示支路*i*; 下标*n*表示采集的第*n*个数据。

每个采集点的平均电流为

$$I_i = \sum_{n=1}^{250} I_{i,n} \quad (2)$$

电流波动的标准差计算公式^[15]为

$$s_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{250} (I_{i,n} - I_i)^2}{249}} \quad (3)$$

1.2.2 电流发射能力与场增强因子

碳纳米管场发射阴极的电流发射能力主要通过其场增强能力评估, 场增强能力可由场增强因子表征。M-G图是对场发射系统进行分析的一种重要方式, 2019年, Richard 为了对场发射数据分析面临的问题进行研究, 对M-G方程进行了一些变形, 称为扩展的Murphy-Good理论^[16-17], 即:

$$\ln\{I_m/V_m^k\} \approx \ln\{A_f^{SN}(\theta \exp \eta)V_{mR}^{-k}\} - \frac{\eta V_{mR}}{V_m} \quad (4)$$

即 $\ln\{I_m/V_m^k\}$ 与 $1/V_m$ 线性负相关。其中: I_m 为测试电流, 本文 $I_m=I_1$; V_m 为测试电压, 本文 $V_m=U_1+U_2-I_1 \times R_1-I_2 \times R_2$; k 为与功函数 φ 相关的常数, 本文取 $\varphi=4.5 \text{ eV}$, 对应 $k \approx 1.23$ 。基于上述模型对试验数据进行回归分析, 将线性回归函数的斜率记为 S , 则可以通过下式计算场增强因子:

$$\gamma = -db\phi^{\frac{3}{2}}/S \quad (5)$$

其中: d 为宏观电极间距; $b[\approx 6.830890 \cdot \text{eV}^{1.5} \cdot \text{V} \cdot \text{nm}^{-1}]$ 为第二FN常数。

1.2.3 Spearman秩相关检验

为探究电流稳定性的影响因素, 用Spearman秩相关系数检验变量独立性, 计算方法^[18]为

1) 将样本 I_m 、 V_m 分别记为向量 X_m 、 Y_m , 其秩向量记为 $r(X_m)$ 和 $r(Y_m)$;

2) 计算秩差向量 $d=r(X_m)-r(Y_m)$;

3) 秩相关系数 $r_s = 1 - \frac{6}{l(l^2-1)} \sum_{j=1}^l d_j^2$, d_j 表示向量 d 中的元素;

4) 当 p 值小于显著性水平时, 认为模型显著, 具有相关关系, 反之认为二者不具有相关关系。

1.2.4 引出性能与引出率

中和器引出率定义为引出电流与发射电流之比, 引出率越大, 中和器引出性能越好。其中引出电流通过发射电流与栅极电流计算, 计算公式为

$$I_{\text{extraction}} = \frac{V_1}{R_1} - \frac{V_2}{R_2} \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{I_{\text{extraction}} R_1}{V_1} \quad (7)$$

2 发射极工作稳定性测试

2.1 老练处理对发射极工作稳定性的影响

在实际使用碳纳米管阴极的过程中, 通常需要使碳管在较大的电流密度下工作一段时间以除去阴极中高度过高的碳管和器件表面的吸附气体, 这个过程称为老练。对两种发射极老练前后的伏安特性进行了测试, 结果如图4所示, 其中右上角为对应的M-G图。发射极1老练前后场增强因子分别为16070和24557, 发射极2老练前后场增强因子分别为21623和72058。老练前后发射极性能表现出较大的差别, 场增强因子的增大可能是由于过高的碳管的损毁。少量过高的碳纳米管从大面积碳纳米管中移除后, 其余碳纳米管受到的屏蔽作用会减小, 大量较短的碳纳米管开始具备发射电子的能力, 因此整体场增强因子增大。但高电流下发射极的发射能力较弱, 这一方面可能是因为吸附气体降低了碳纳米管表面的功函数, 另一方面可能是由工作碳管场增强因子的减小导致的。由M-G理论可知, 当地场强越大, 发射电流密度随场强的变化越快。在同样的背景电场下, 老练前工作碳管的当地场强可能远高于老练后的, 导致其发射电流密度相差极大; 而老练后的工作碳管数量相对老练前较大, 带来电流的线性增长, 二者的相对大小关系不确定。

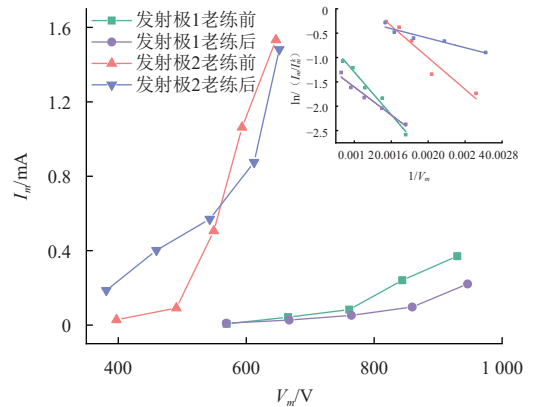


图4 老练前后发射极伏安特性

Fig. 4 Emitter volt-ampere characteristics before and after aging

老练前后发射极电流稳定性如图5所示, 其中发射极2老练前在550 V电压工作时电流出现阶跃变化, 导致其标准差远高于其余工况, 为0.078 mA, 未在图中展示。老练处理前发射极电流稳定性整体弱于老练处理后, 且老练处理前电流常出现阶跃、脉冲等形式的非预期变化, 这一方面是因为在气体吸附与解吸的过

程中,碳纳米管表面的功函数会发生变化,导致发射电流变化;另一方面由于发射电子的能量较高,可能与气体分子发生碰撞产生了额外的杂质电流。碳纳米管中和器的使用环境为高真空环境,一般来说不存在气体吸附与解吸的问题,但由于航天器需要从地面大气环境中发射且部分推力器使用气体工质,中和器在使用前期和使用时仍有可能暴露在气体环境中,直接使用老练方法进行除气处理虽然简便,但也存在因电流波动过大导致相关器件损坏的风险。因此在使用时仍然需要关注中和器工作环境的气体含量,评估失效风险,进行安全性设计。

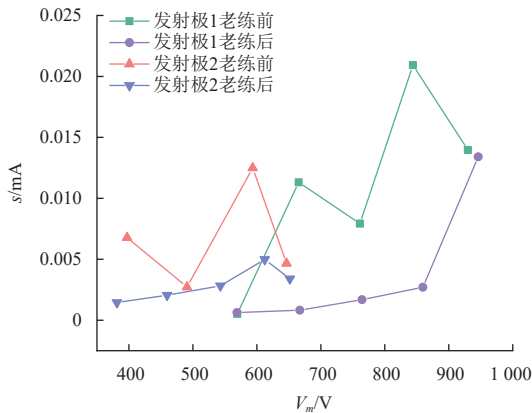


图5 老练处理与电流稳定性
Fig. 5 Aging treatment and current stability

对发射极进行老练后,在0.54 mm间距下,400~800 V电压范围内以反-正-反-正的测试流程对碳纳米管发射极进行连续的步进电压扫描,扫描步长100 V,试验结果如图6所示,其中行程 n 代指本次测试中第 n 次完成完整的电压扫描。4次行程计算获得的场增强因子波动误差不超过12%,发射极在不同的测试行程下无明显性能变化。

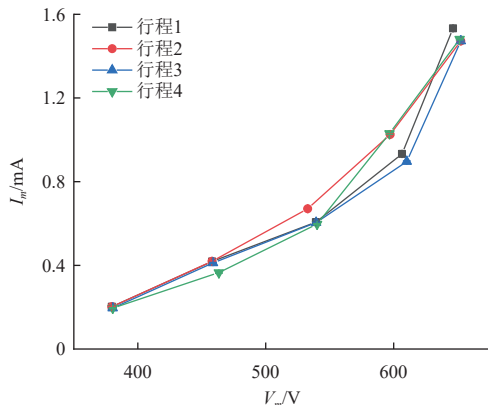


图6 不同测试行程下的发射极伏安特性
Fig. 6 Emitter volt-ampere characteristics at different test trips

2.2 工作状态对发射极工作稳定性的影响

碳纳米管发射极 I - V 特性如图7所示,随着工作电压增大、工作电流水平升高,发射电流不稳定性增强。工作电流由1.51 μA 增大至181.34 μA 时,电流标准差 s 由0.12 μA 增大至15.32 μA ,电流波动范围分别为0.59 μA 和22.00 μA 。

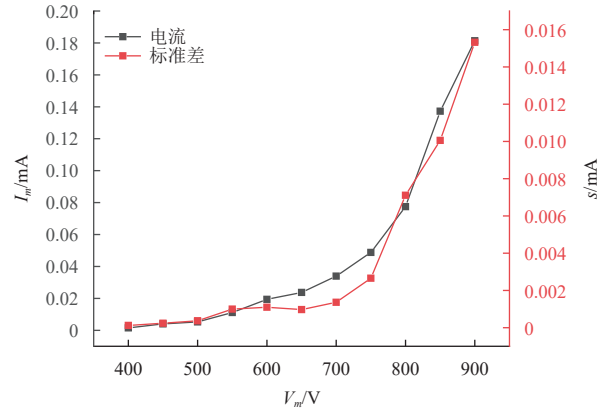


图7 老练处理后的电流-电压特性
Fig. 7 Current-voltage characteristics after seasoned treatment

在750 V工作电压下进行发射极寿命试验,试验结果如图8所示。计算每100 s的电流波动标准差,在整个寿命试验期间,电流随时间线性衰减,工作2 000 s后电流衰减了约46.2%,但电流波动标准差几乎不发生变化,即在本工况下发射极的工作稳定性不取决于发射电流水平。

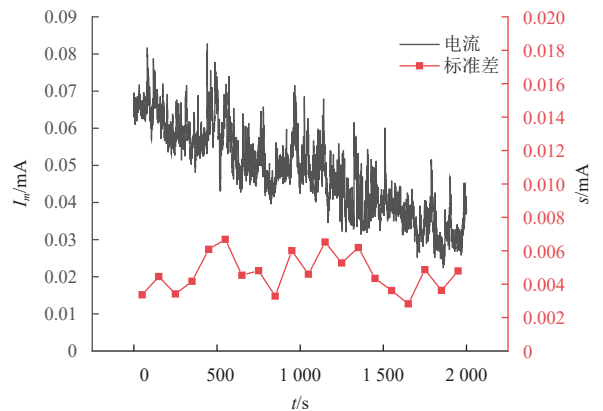


图8 寿命试验与电流稳定性
Fig. 8 Life test and current stability

在不同电极间距下对同一电流水平的电流稳定性进行测试,结果如图9所示。整体来看随着背景电场的增大,电流波动有增大的趋势。对二者作Spearman相关性分析, $r_s = 0.83$, p 值为 1.29×10^{-46} ,远小于0.01,因此可认为二者在99%的置信水平上具有相关性。这

一方面可能是由于电场与碳纳米管相互作用导致的非预期碳管结构变化, 譬如碳纳米管结构失稳^[19]和库伦爆炸^[20]等, 另一方面可能与电源的输出稳定性有关。

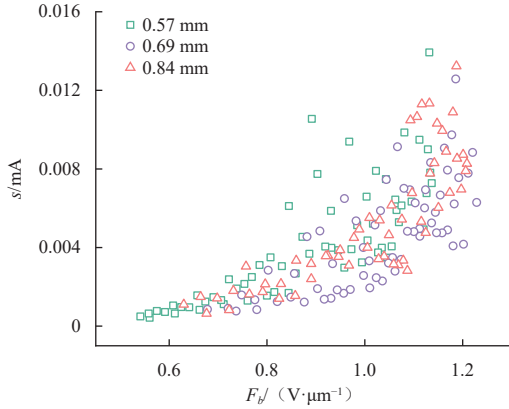


图9 电流稳定性随背景电场的变化

Fig. 9 Current stability vs. background electric field

测试电源在不同电压输出水平下的稳定性如图10所示, 随着电压水平的增长, 电源输出的稳定性显著下降。输出电压从100 V增大到500 V, 电压波动的标准差从0.006增长至0.042, 波动幅度从0.05 V增长至0.18 V。以1 mm间距工况为例, 100 V和900 V电压对应外电场的波动为99.92~99.97 V/mm和899.367~899.996 V/mm。由于一根单独工作的碳纳米管场增强因子约为其长径比, 且文献[21]对高度1 μm、间距50 nm的碳纳米管簇进行过仿真计算, 其尖端场强约为单独工作碳管尖端场强的40%, 本文取场增强因子 1×10^4 进行估算。电源输出波动引起的碳纳米管尖端的当地场强波动范围分别为 $9.992 \times 10^5 \sim 9.997 \times 10^5$ V/mm和 $8.993 67 \times 10^6 \sim 8.999 96 \times 10^6$ V/mm。根据M-G理论可计算发射电流密度随当地场强的变化曲线, 结果如图11所示。在当场场强较大时, 发射电流密度对当地场强的变化更敏感, 100 V和900 V水平下的电压输出对应的发射电流密度范围分别为 $1.44 \times 10^{-26} \sim 1.48 \times 10^{-26}$ μA/mm²和 $2.91 \sim 2.93$ μA/mm², 即随着电压波动的增大, 碳纳米管当地发射电流密度波动也会增大。理论计算的电流密度大于实际测量值, 这是因为随着高度的增加, 碳纳米管间屏蔽效应会增强, 上文所取当场场增强因子 1×10^4 可能远大于实际值, 且在大面积场发射阴极中, 碳管高度、半径及间距等参数分布不均匀, 实际发射面积可能远小于宏观面积。场增强因子不随电压变化、发射面积随电压单调变化, 高电压下这两处计算误差不仅对电流波动无抑制作用, 反而可能进一步放大电流波动, 因此不影响试验结论。

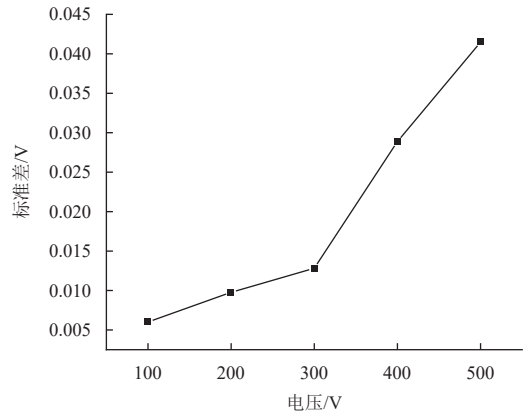


图10 不同电压水平下的电源稳定性

Fig. 10 Power supply stability at different voltage levels

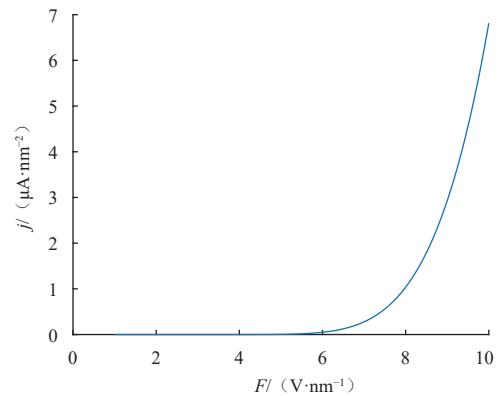


图11 发射电流密度随当地场强的变化曲线

Fig. 11 Curve of emission current density with local field intensity

为保证中和器的工作稳定性, 应使其在尽量低的背景电场下工作。因此在推进系统需要进行大束流中和时, 使用多个在低电场条件下工作的中和器更能保证设备的安全性和可靠性。

3 中和器引出特性研究

分别用栅孔直径2、1、0.2 mm的栅极对中和器性能进行测试, 结果如图12所示。3种栅极在发射极工作区域的开孔率理论值分别为74.76%、63.07%和22.35%, 但由于发射极是通过导电银胶固定在中和器上的, 相对于中和器的定位存在一定误差, 实际发射极工作区域对应的栅极开孔率与理论值存在一定偏差。

中和器引出特性如图12所示。使用0.2 mm孔栅极时, 中和器引出率在整个工作范围内约16.68%, 波动不超过1.96%, 而使用1 mm和2 mm孔的栅极时, 在低压工作段引出率有明显增长。1 mm孔的栅极对应引出率由47.92%增长至55.51%; 2 mm孔的栅极对应引出率由43.62%增长至57.17%。此外, 随着电压水平的升高, 引出率的增长速度减缓, 在800~1 000 V电压范围内, 1 mm孔栅极对应的引出率只增长了2.16%。

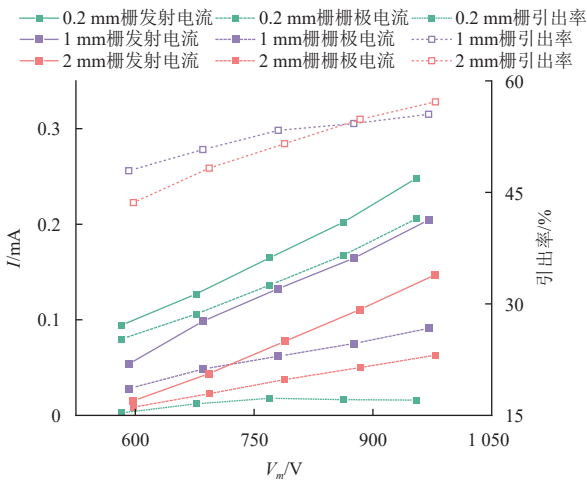


图 12 不同栅极孔径下的中和器引出率

Fig. 12 Neutralizer extraction rate at different gate apertures

3种栅极对应发射极表面在工作状态下的电压分布如图13所示, 栅极材料对应位置的电场高于栅极孔对应位置, 栅孔越大该效应越明显。0.2 mm孔栅极对发射极表面的电场几乎无影响, 而2 mm孔栅极使得发射极表面电场分布不均, 产生了最大 2.64×10^4 V/m的电场衰减。这种衰减十分不利于栅孔对应位置的碳管工作, 因此在低电压下大部分工作的碳管位于栅极材料对应的位置, 同时由于栅极材料对应位置的碳管发射电子绝大部分会撞击到栅极上, 中和器引出率较小。栅孔越大, 对应发射极表面电场分布越不均匀, 在低电压下引出率越小。随着电压的增长, 栅孔对应位置的碳管逐渐开始发射电子。此后可能由于空间电荷效应的影响^[22], 在栅极材料对应位置发射电流密度较大, 电子发射受到限制, 而栅孔对应位置电流密度较小, 随着工作电压的增长电流密度不断增大, 使得引出率逐渐收敛到极限值。该极限值可能与栅极开孔率相关, 开孔率越大, 极限引出率越高。

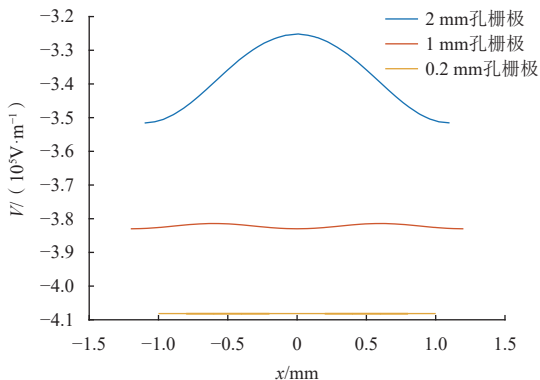


图 13 发射极表面外电场分布

Fig. 13 Grid potential distribution

如图12所示, 在954 V工作电压下使用0.2 mm孔径栅极时中和器能够实现0.25 mA的电流发射, 而2 mm孔径栅极只能实现0.15 mA的电流发射。这是因为2 mm直径的栅孔导致了发射极表面部分位置电场的弱化, 在电流发射方面存在一定劣势。中和器功耗随引出电流的变化如图14所示, 在相同的引出电流下, 使用1 mm孔径的栅极时, 中和器功耗较小。在0.04 mA引出电流下, 1 mm孔径栅极对应的中和器功耗约0.06 W, 而0.2 mm孔径栅极对应的中和器功耗约0.25 W。这是由于小孔径栅极开孔率过低, 电子引出率小, 在完成相同的电子引出任务时仍然存在更大的功耗。而970 V工作电压下, 1 mm孔径栅极对应的引出电流为0.11 mA, 2 mm孔径栅极对应的引出电流为0.08 mA。这是由大孔径栅极对应的电场衰减严重、中和器发射性能下降引起的。因此在进行碳纳米管中和器栅极的设计时, 需要同时考虑到孔过大引起的发射性能下降和孔过小引起的引出性能下降, 实现低电压、低功耗下的大电流引出。

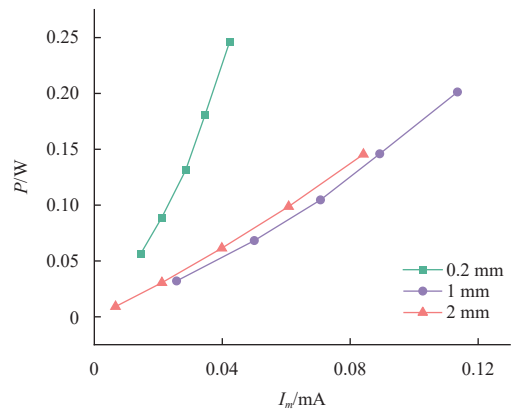


图 14 中和器功耗随引出电流的变化

Fig. 14 Neutralizer power consumption vs. the extraction current

4 结论

本文对碳纳米管中和器的工作稳定性和引出特性进行了试验研究。通过计算场增强因子、电流波动标准差以及Spearman秩相关系数等参数, 验证了老练处理及工作背景电场对中和器工作稳定性的影响。分别使用0.2、1、2 mm孔径的栅极对中和器引出特性进行测量, 对比3种工况下的发射极发射特性和引出率, 发现大孔径下发射极性能有所衰减, 但由于小孔径下栅极开孔率更低, 中和器引出率小, 在实现相同的电子发射任务时0.2 mm孔径栅极仍然会产生更大的功耗。因此在使用碳纳米管中和器时, 需要对相关器件进行解吸附处理, 并使中和器尽量在低电压水平下工作。

进行中和器栅极设计时, 需要同时考虑到栅极的开孔率对电子引出的影响以及栅极孔径对发射性能的影响。

试验结果表明, 本文研究的碳纳米管场发射中和器具有良好的工作重复性和稳定性, 且在输出电流为 0.11 mA 时最低功耗仅 0.20 W, 适合用于高精度空间探测任务。未来将在碳纳米管中和器性能优化、稳定性判据、寿命印象因素等方面开展研究, 为其工程化应用奠定基础。

参 考 文 献

- [1] 武迪, 程林, 王伟, 等. 基于切换系统的小推力轨迹优化协态初始化方法[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(5): 529-533.
WU D, CHENG L, WANG W, et al. Low thrust trajectory optimization costate initialization method based on switching system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(5): 529-533.
- [2] 李海洋, 宝音贺西. 小推力转移燃料消耗估计的机器学习方法[J]. 深空探测学报(中英文), 2019, 6(2): 195-200.
LI H Y, BAOYIN H X. A machine learning method for estimating fuel consumption in low-thrust transfer[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(2): 195-200.
- [3] 陈昶文, 武荣. 宽范围输入输出离子电推进屏栅电源的设计[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(4): 407-416.
CHEN C W, WU R. Design of ion-electric propulsion grid power supply with wide range of input and output[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(4): 407-416.
- [4] 李永, 丁凤林, 周成. 深空探测推进技术发展趋势[J]. 深空探测学报(中英文), 2018, 5(4): 323-330.
LI Y, DING F L, ZHOU C. Development trend of deep space exploration and propulsion technology[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(4): 323-330.
- [5] 李宗良, 高俊, 刘国西, 等. 小行星探测电推进系统方案研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2018, 5(4): 347-353.
LI Z L, GAO J, LIU G X, et al. Study on electric propulsion system for asteroid exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(4): 347-353.
- [6] PEDRINI D, MISURI T, PAGANUCCI F, et al. Development of hollow cathodes for space electric propulsion at sitael[J]. *Aerospace*, 2017, 4(2): 26.
- [7] GOEBEL D M, KATZ I. Fundamentals of electric propulsion: ion and Hall thrusters[M]. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2008.
- [8] 柳鹏, 周段亮, 张春海. 超顺排碳纳米管场发射电子源在射频离子微推进中和器中的应用[J]. 真空电子技术, 2020(4): 23-27.
LIU P, ZHOU D L, ZHANG C M. Application of superlinear carbon nanotube field emission electron source in radio-frequency ion micropropulsion neutralizer[J]. Vacuum Electronics, 2020(4): 23-27.
- [9] ANDERSON G, ANDERSON J, ANDERSON M, et al. Experimental results from the ST7 mission on LISA Pathfinder[J]. *Physical Review D*, 2018, 98(10): 102005.
- [10] TAKAO Y, KUGIMIYA A, NAGAI S, et al. Development of neutralizer with carbon nanotube cathode for small scale ion

engine[C]//Proceedings of the 30th International Electric Propulsion Conference. Florence, Italy: IEPC, 2007.

- [11] YAMAMOTO N, MORITA T, OHKAWA Y, et al. Ion thruster operation with carbon nanotube field emission cathode[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2019, 35(2): 490-493.
- [12] MARRESE-READING C, POLK J, MUELLER J, et al. In-FEEP thruster ion beam neutralization with thermionic and field emission cathodes[C]//Proceedings of the 27th International Electric Propulsion Conference. Pasadena, CA: IEPC, 2001.
- [13] SINGH L A, SANBORN G P, TURANO S P, et al. Operation of a carbon nanotube field emitter array in a hall effect thruster plume environment[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43(1): 95-102.
- [14] HE J W, LIU P, GAO R, et al. Research on the neutralization control of the RF ion micropropulsion system for the 'Taiji-1' satellite mission[J]. *Plasma Science and Technology*, 2020, 22(9): 094002.
- [15] WALPOLE R E, MYERS R, MYERS S L, et al. 概率与统计[M]. 袁东学, 龙少波, 译. 北京: 中国人民大学出版社, 2016.
- [16] FORBES R G. The Murphy-good plot: a better method of analysing field emission data[J]. *Royal Society Open Science*, 2019, 6(12): 190912.
- [17] FORBES R G. Comments on the continuing widespread and unnecessary use of a defective emission equation in field emission related Literature[J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 126(21): 210901.
- [18] 包研科. 数据分析教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 142-144.
- [19] 夏明霞, 颜宁, 李红星. 外加电场作用下碳纳米管结构稳定性及结构修饰研究[J]. *物理学报*, 2007, 56(1): 113-116.
XIA M X, YAN N, LI H X. Study of structure stability and decoration of carbon nanotube under applied electric field[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(1): 113-116.
- [20] LIU J A, SUN Y, CHEN S C, et al. A study of coulomb explosion induced by freestanding carbon nanotube during field emission[C]//Proceedings of 2021 IEEE 21st International Conference on Nanotechnology. Montréal, Canada: IEEE, 2021.
- [21] BENJAMIN L C. Carbon nanotube field emission arrays[D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2011.
- [22] 张强, 陈泽祥, 朱炳金, 等. 碳纳米管场致发射中的空间电荷效应[J]. *发光学报*, 2008, 29(3): 567-572.
ZHANG Q, CHEN Z X, ZHU B J, et al. Space charge effect in carbon nano-tube field emission[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2008, 29(3): 567-572.

作者简介:

汪宇欣(1999-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 空间电推进系统。

通信地址: 北京海淀区北京理工大学宇航楼624(100081)

电话: 18810521098

E-mail: 3120210108@bit.edu.cn

黄天坤(1989-), 男, 特别副研究员, 主要研究方向: 空间电推进系统。本文通信作者。

通信地址: 北京海淀区北京理工大学宇航楼202(100081)

电话: 15810536221

E-mail: 6120210189@bit.edu.cn

Operating Characteristics of Carbon Nanotube Neutralizer for Space Exploration Missions

WANG Yuxin, WU Zhiwen, HUANG Tiankun, WANG Yunbing
(School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: With the development of high-precision space exploration missions such as gravitational wave detection and Earth gravity field detection, the accuracy requirements of propulsion systems are further improved, and it is urgent to develop neutralizers with stable output of small current. In this paper, the working stability and electron extraction of carbon nanotube field emission neutralizer were experimentally studied. The current fluctuation characteristics before and after aging were tested, and spearman rank correlation test was used to analyze the correlation between background electric field and current fluctuation. Besides, three kinds of gate with different aperture were used to test the extraction characteristics of the neutralizer, and the influence mechanism of gate aperture on the performance of the neutralizer was analyzed. The experimental results show that aging treatment is helpful to improve the working stability of the neutralizer, and the background electric field of the emitter has a strong correlation with the instability of the emission current. The gate aperture has influence on both emission and extraction performance, and the 1 mm gate aperture has the best performance under experimental conditions. The results can provide some guidance for neutralizer configuration and structure design in propulsion system.

Keywords: carbon nanotube; neutralizer; stability; extraction rate

Highlights:

- The working stability and extraction characteristics of the neutralizer were characterized.
- Aging treatment helps to improve the working stability of the emitter.
- The gate aperture will affect the operation of the neutralizer on both the emission characteristics and the extraction characteristics.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]