

基于射频等离子体鞘层模型的放电仿真研究

胡瑞韬¹, 戴飞^{1*}, 张国梁¹

¹ 电子信息工程学院, 北京航空航天大学, 北京

摘要

电磁辐射对燃油危害是加油站、炼油厂、油气基地等大型设施禁用手机和其他无线通讯设备的重要原因。不同于静电对燃油蒸气的危害, 本文的研究重点在于分析不同频率下的射频放电击穿特性。基于射频等离子体鞘层模型, 通过多物理场仿真, 分析了 12M~300MHz 频率下的氩气射频放电过程。仿真结果表明, 当激励频率大于雪崩击穿临界频率时, 两侧极板附近会形成随激励周期变化的鞘层区, 中心区域为准电中性的等离子体区。同时, 当激励频率远小于等离子体频率时, 鞘层会促进极板附近的 γ 电离过程; 随着频率增大, 鞘层特性会逐渐退化, 而鞘层边界区域的 α 电离过程会增强。此外, 放电特性曲线表明, 频率越高, 板间放电电压越小, 对应的击穿阈值越低。

关键字: 射频放电, 鞘层, 等离子体, 多物理场

引言

环境中过度的电磁能量不仅会导致电磁干扰, 更会对一些特定目标产生毁伤性影响, 一般称之为电磁辐射危害。电磁辐射危害根据其作用对象又分为电磁辐射对人体危害(Hazards of electromagnetic radiation to personnel, HERP)、电磁辐射对军械危害(Hazards of electromagnetic radiation to ordnance, HERO)和电磁辐射对燃油危害(Hazards of electromagnetic radiation to fuel, HERF)。其中, HERF 包含了电磁耦合、射频放电和强迫燃烧三个过程, 是一个典型的涉及电磁、流体、等离子体和燃烧的多物理场问题。在 HERF 研究中, 我们需要分析点火瞬态问题而不关心后续的稳态燃烧。因此, 启动燃烧链式反应的射频放电过程就成为了研究的一个重点。

另一方面, 由于 1atm 压强下放电反应剧烈, 此时对气体射频放电过程进行建模和解析也是研究的难点。受研究手段的限制, 早期人们只能通过大量的实验总结一些经验规律[1]。同时, 相较雷电、静电等直流放电问题, 射频放电的频段更宽、场耦合关系更复杂, 因此人们尚未能深入把握其作用机理。然而随着多物理场理论及其数值计算技术的逐渐成熟, 对于射频放电问题, 多物理场仿真已然成为了一种高效、可靠的研究手段。文献[2]发现不同频率下的射频放电具有不同的放电周期, 电子的运动随放电周期中电场的变化而不同, 故不同频率下放电机理具有完全不同的物理特性。文献[3]通过提取模型结构参数和电参数建立了射频放电前后的等效交流电容模型, 同时仿真分析了 1Hz~60MHz 下的射频放电过程, 发现随着频率升高会出现电子雪崩效应击穿等 5 种击穿特性。为深入研究射频放电的机理并分析不同频率下的击穿阈值, 本文基于射频等离子体鞘层模型, 重点对电子雪崩击穿效应下的电离过程和放电特性进行研究。

射频等离子体鞘层模型

射频放电的诱因主要是特定频率在电不连续结构处耦合的射频电场与气体中带电粒子的相互作用。根据 HERF

的作用场景, 本文以“汽车油箱口-加油枪”结构为研究对象。为便于建模, 本文将该结构简化为两块同心的圆柱导体, 长度为 150mm, 内径为 a , 间距为 2mm。如图 1 所示, 仿真时将内外导体作为放电电极, 内部电极接激励, 外部电极接地。在计算过程中, 在圆柱体侧壁的中心馈电。如前文所述, 由于 1atm 压强下放电反应剧烈, 需要尽量细化网格。为了降低模型的自由度和计算量, 我们先以氩气作为放电气体。同时考虑到圆柱体长度远大于电极距离, 本文忽略边缘效应, 将三维模型简化为一维轴对称模型进行分析。

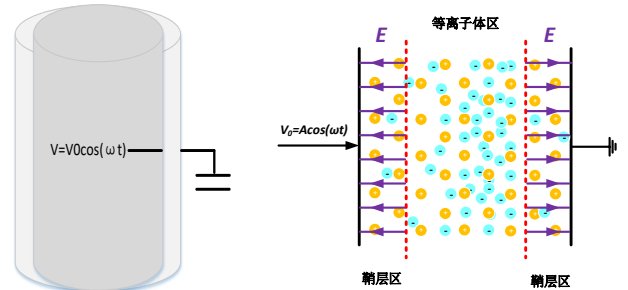


图 1 圆柱电极模型(左)和射频等离子体鞘层模型(右)

电子雪崩击穿效应产生的条件是激励频率大于式(1)所示的临界频率 f_{c0} [4]:

$$f_{c0} = \frac{\mu_e E}{\pi d} \quad (1)$$

式中, E 是射频电场的幅值, d 是极间距离, μ_e 是电子迁移率。1atm 下氩气的电子迁移率为 $0.218\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 代入式(1)可求得本文所建立模型的 f_{c0} 约为 12MHz。当激励频率大于 f_{c0} 时, 自由电子在电场极性变换前无法到达电极, 将会在极板间周期震荡, 放电空间内的电子数将会大大增加, 最终产生电子雪崩击穿效应。此外, 由于正离子质量较大, 其随电场的运动远弱于自由电子, 使得雪崩击穿过程中两侧极板附近区域的正离子密度远大于电子密度, 形成射频等离子体鞘层[5], 如图 1 所示。鞘层内部存在很强的指向极板的电场, 当离子穿越鞘层向极板运动时, 将被加速并撞击极板产生 γ 电子。因此, 鞘层可视为一个由二极管、电容及电流源组成的并联电路, 如图 2 所示。

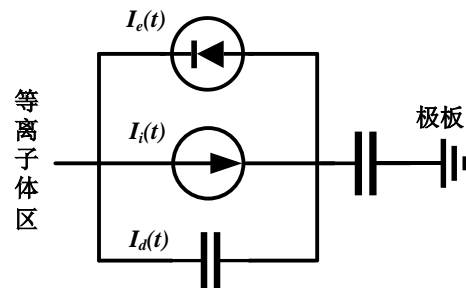


图 2 射频等离子体鞘层等效电路模型

不难得到鞘层内的电流闭合关系为:

$$I_i(t) - I_e(t) - C_s(t) \frac{dV_s(t)}{dt} = I(t) = K \cos(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

式中, $I(t)$ 为终端电流, $I_i(t)$ 为鞘层内的离子电流, $I_e(t)$ 为考虑了 α 电子和 γ 电子的电子电流, $V_s(t)$ 为鞘层电压降, $C_s(t) = \epsilon_0 A/d_s(t)$ 为瞬时鞘层电容, $d_s(t)$ 为瞬时鞘层厚度。可以看出, 在雪崩击穿过程中, 由于鞘层的形成将会对电离机制和放电特性产生很大的影响。

COMSOL 仿真软件的使用

本文采用 COMSOL 软件中“等离子体—时间周期”场接口, 相较传统的时域计算, 该接口对于具有周期性的射频放电模型的求解效率有显著地提高。仿真模型的结构为一维轴对称模型, 具体参数参考前文圆柱电容器结构。终端使用功率激励, 频率范围为 12M~300MHz, 气体间隙为氩气, 初始压强为 1atm, 初始温度为 273.15K。

仿真结果

通过改变终端功率和激励频率, 本文对电子雪崩击穿过程中的平均鞘层厚度、电位分布、电离速率和放电阈值等重要放电参数进行了仿真分析。同时, 本文选取激励频率为 13.56MHz 的标准参比反应池作为对比[6]。

1) **平均鞘层厚度:** 由电子密度分布 (图 3) 可以看出, 不同频率下两侧极板附近均形成了随激励周期变化的鞘层。但随频率增大, 电子震荡频率也会增大, 平均鞘层厚度则会逐渐变小。

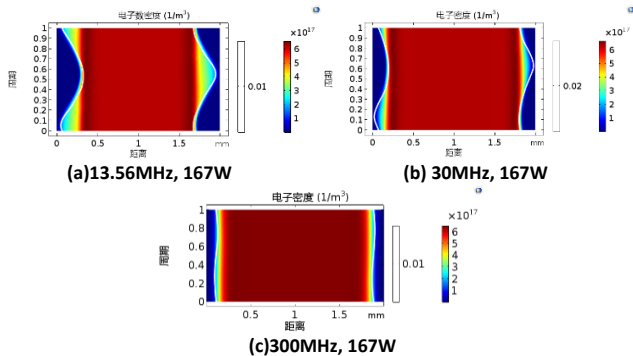
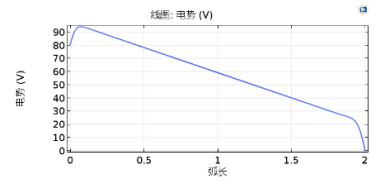
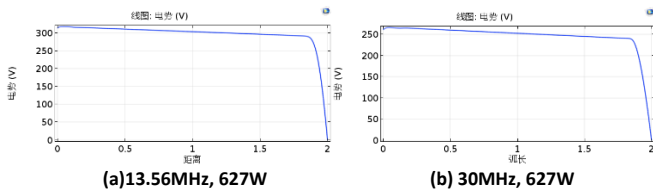


图 3 不同频率下的鞘层厚度

2) **电位分布:** 中心等离子体区域的本构关系可由式(3)表示[7]:

$$\dot{\sigma} = \frac{Ne^2}{m(\nu + j\omega)} \quad (3)$$

式中, N 为电子数密度, m 为电子质量, e 为电子电量, ν 为约化碰撞频率。因此, 当频率较低时, 中心区域可看作电导率很高的理想导体, 电压会集中在鞘层; 随着频率升高, 中心区域则应视为具有一定介电常数的介质。仿真得到的电位分布结果 (图 4) 与上述理论分析基本吻合。可以看出, 当频率升高到 300MHz 时, 中心区域电位差已经较大。



(c)300MHz, 627W

图 4 不同频率下的电位分布

3) **电离速率:** 如图 5 所示, 终端功率保持不变, 频率为 13.56MHz 时以发生鞘层内部的 γ 电离为主。随着频率增大, 鞘层边界处的 α 电离逐渐增强, 而 γ 电离逐渐减弱。根据前文结论, 频率增大, 鞘层厚度减小且电压降低, 正离子无法被有效加速, 因此 γ 电离将受到抑制。

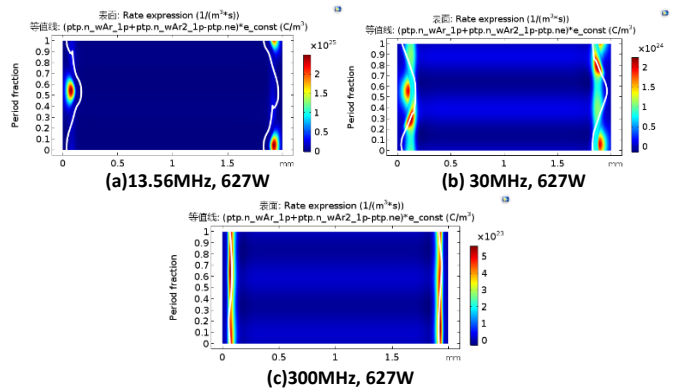


图 5 不同频率下的电离速率

4) **放电阈值:** 在固定频点下对终端功率进行扫描可以得到放电特性曲线如图 6 所示。结合前文分析, 随着频率增大, γ 电离被抑制, 曲线中的转折点消失; 但是由于 α 电离的增强, 整体上看, 频率越高, 板间放电电压越小, 放电阈值越低。13.56MHz 时的放电阈值约为 350V, 300MHz 时的放电阈值约为 80V。

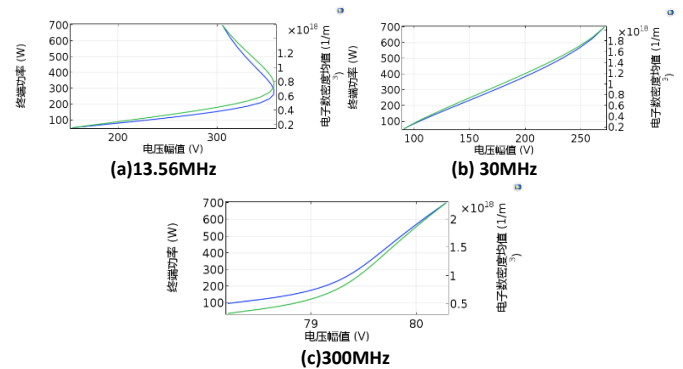


图 6 不同频率下的放电特性曲线

致谢

基金项目: 国家自然科学基金 (批准号: 61571027)

参考文献

- [1] Chen Qiong, Electromagnetic Compatibility Engineering Handbook [M], Beijing, National Defense Industrial Press, 1993.pp.196-200, pp.1255-1256
- [2] Feng Xiaoyao, Dai Fei, Fu Xinkai. A Study on the Mechanism of Hazards of High Intensity Radiated Field to Fuel Based on Multi-Physics Field [A]. 2017 Progress In Electromagnetic Research Symposium in Singapore[C]
- [3] 符新凯, 戴飞, 胡瑞韬. 基于飞机油箱口结构的射频放电等效电路

仿真模型 [A]. COMSOL 2018 Conference, Shanghai Station

- [4] 陈熙, 热等离子体传热与流动 [M]. 科学出版社, 2009. pp 27-28
- [5] 余建华, 赖建军. 具有空心阴极放电特征的射频放电的两电子组模型 [J]. HIGH POWER LASER AND PARTICLE BEAMS, vol. 16, no. 8, pp. 1049-1053, Aug. 2004
- [6] Cn.comsol.com. Available: <http://cn.comsol.com/model/alpha-to-gamma-transition-55291/>. [Accessed: 15- Sep- 2019].
- [7] Doling Su, Aixin Chen, Electromagnetic fields and waves [M]. Higher Education Press, 2009. pp397-400