温度对不同厚度聚酰亚胺表面充电的影响*

蒙志成,孙永卫,原青云,王 松,周立栋

(军械工程学院 静电与电磁防护研究所,河北石家庄 050003)

摘 要:为了研究不同厚度聚酰亚胺在温度变化情况下的带电程度,利用自行研发的温度可控的航 天器介质材料表面带电综合实验系统,对不同厚度的聚酰亚胺在不同温度情况下进行表面充电实验,设 置电子能量为25keV,电子束流密度分别为0.5,1,2nA/cm²。实验结果表明:温度不变的情况下,随着 厚度的增大,试样表面充电平衡电位逐渐增大;厚度不变的情况下,随着温度的升高,试样表面充电平 衡电位逐渐减小。当温度在273~363K时,聚酰亚胺试样厚度越大,温度变化对其表面充电平衡电位的 变化影响越大。当温度在243~273K时,聚酰亚胺试样厚度越大,温度变化对其表面充电平衡电位的变 化影响越小。

关键词:温度;厚度;聚酰亚胺;表面充电;平衡电位 中图分类号:V255 文献标识码:A 文章编号:1001-4055 (2018) 04-0912-08 DOI: 10.13675/j. cnki. tjjs. 2018. 04. 024

Effects of Temperature on Surface Charge of Polyimide with Different Thickness

MENG Zhi-cheng, SUN Yong-wei, YUAN Qing-yun, WANG Song, ZHOU Li-dong

(Institute of Electrostatic & Electromagnetic Protection, Mechanical Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to study the charge degree of polyimide with different thickness under the circumstance of temperature change, the surface charge synthetic experimental system developed for the dielectric material of spacecraft, and temperature controllable, was used to experiment the surface charge of different thickness of polyimide material at different temperature. The electron energy was set to 25 keV, and the electron beam density was set to 0.5, 1, $2nA/\text{cm}^2$, respectively. Experimental results show that, when the temperature is constant, with the increase of thickness of polyimide, the balance potential of surface charge of the sample would increase gradually. When the thickness of polyimide is constant, with the increase of the sample would decrease gradually. When the temperature is in the range of $273 \sim 363$ K, the greater the thickness of the polyimide sample is, the greater the effect of the temperature change on the surface charge balance potential of the polyimide. When the temperature is in the range of $243 \sim 273$ K, the greater the thickness of the polyimide is constant the effect of the temperature change on the surface charge balance potential of the polyimide.

Key words: Temperature; Thickness; Polyimide; Surface charge; Balance potential

1 引 言

聚酰亚胺由于具有非常好的耐强辐射、耐高低 温、抗电晕腐蚀等特性,在航空航天领域被广泛应 用^[1-3]。例如太阳电池阵的玻璃盖片薄膜,热涂层材料,发动机常用聚合物等,大多由聚酰亚胺材料构成^[4,5]。由于聚酰亚胺是聚合物,其电导特性容易受温度的影响,从而影响其在空间环境下的带电水平^[6]。

 ^{*} 收稿日期: 2016-12-14;修订日期: 2017-03-13。
 基金项目: 国家自然科学基金(51577190)。
 作者简介:蒙志成,男,硕士生,研究领域为卫星充放电效应与防护。E-mail: 1562574572@qq.com

当航天器在轨运行时,周围的空间环境温度并不是 保持在一个恒定值,会面临环境温度由-180~250℃ 变化的情况^[7],在向阳区域和背光区域,航天器整体 的温度分布也不一致^[8]。所以,同一航天器上的不同 区域的介质会导致差异充电^[9],而且温度较低时聚酰 亚胺中的沉积电荷很难泄放,以上这些情况都极易 引发静电放电,影响一些电子设备和敏感天线的正 常运行,甚至导致损坏^[10,11]。温度对航空航天设备的 影响研究越来越受到重视^[12,13]。应用于航天器上不 同部位的聚酰亚胺厚度大不相同,所以非常有必要 对不同温度下不同厚度聚酰亚胺的带电水平进行 研究。

国内外对聚合物厚度对带电特性的影响进行了 一系列研究。同济大学波耳固体物理研究所的吴贤 勇等[14]利用热脉冲技术、等温表面电位衰减法、开路 热刺激放电的电流谱分析等方法,研究了不同温度 下厚度影响沉积在聚酰亚胺中的平均电荷重心变化 的情况。吴锴等^[15]采用对低密度聚乙烯薄膜加偏置 直流高压的方法,研究在不同的温度梯度下聚乙烯 厚度对其空间电荷分布的影响。刘婧^[16]等建立了空 间多种能量的电子对聚酰亚胺辐照的模型,模型分 析的结果表明,聚合物试样的厚度对其充电表面 电位影响的程度大于电子迁移率、陷阱捕获密度 和相对介电常数,突出了厚度对带电水平影响的重 要性。封国宝等[17]对多参数共同作用下电子辐照聚 合物的情况进行了数值模拟,研究了试样的厚度对 其中总电荷量的影响。但是,并没有研究涉及到对 不同温度条件下不同厚度聚酰亚胺表面带电水平的 研究。

本文利用实验室自行研制的航天器介质材料表 面带电综合实验系统,设置合理的辐照条件,在不同 温度下,对不同厚度的聚酰亚胺材料的表面充电电 位的变化规律进行研究,得到温度变化对不同厚度 聚酰亚胺表面充电平衡影响的规律,解释了温度变 化对不同厚度聚酰亚胺表面充电平衡电位变化影响 的机理。

2 实验装置及方法

2.1 实验装置

本文的所有实验均在温度可控的航天器介质材料表面带电综合实验系统中进行,系统为本单位自行研制,主要由真空控制系统、电子枪控制系统、温 度控制系统、检测及电位监控系统组成,综合实验系统原理框图如图1所示。



Fig. 1 Schematic diagram of integrated experiment system

(1)真空控制系统:外观形状大致为椭圆体,其 有效尺寸为500mm×500mm(直径×长度),正常工作 时极限真空度可达2.7×10⁻⁵Pa。

(2)电子枪控制系统:用于模拟地球同步轨道环 境下常见的等离子体环境,可以在真空罐工作真空 度不高于1×10⁻³Pa时开启,所发射的高能电子能量 范围为0~30keV、电子束流密度的调节为0.1~ 10nA/cm²。

(3)温度控制系统:在真空罐内靠近底部区域放 置温控板,温控板良好接地。由温控板对聚酰亚胺 薄膜进行热传导控温,温控板通过油循环管与外置 的制冷加热控制系统相连,在计算机主系统进行温 度设置输入,系统内部通过压缩机机械制冷及热电 子电加热的方式搭载自身的联结控制系统使温控 板达到并保持于所需的目标温度。(为了与真空控 制系统的工作状态进行兼容,其温度控制为213~ 363K)。

(4)检测及电位监控系统:可以控制整个综合实 验系统的工作状态,测量相关属性。包括对温度,真 空度,以及试样表面电位的监测。真空度是通过电 阻规和冷规对进行实时监控。温控板温度是通过温 度传感器连接外部计算机程序进行监控。试样表面 电位由非接触式静电电位动态测量仪监测。

2.2 实验方法

选用厚度分别为25,50,100µm的聚酰亚胺薄膜 进行本文的实验,试样由山东蓬莱公司生产。实验 前,将三种厚度的聚酰亚胺薄膜均裁剪为直径70mm 的圆状试样,背面涂上导电银胶后将其紧密贴附在 直径同样为70mm,厚度为1mm的圆状铝板上,然后 放置于干燥箱中经过24h固化和干燥处理。

实验所设置的不同的温度值分别为 243,258, 273,288,303,318,333,348,363K,温度间隔为

15K。将入射电子能量设置为25keV不变,电子束流 密度分别设置为0.5,1,2nA/cm²。实验开始前,先将 粘有薄膜试样的圆状铝板用导电薄膜紧密贴附于温 控板上,确保试样背面能够良好接地,并且能够与温 控板进行有效的温度传导。实验时,在真空环境下 通过制冷加热控制系统将温控板设置到所需温度, 保持30min以确保试样整体与温控板的温度一致。 在容器真空度低于10⁻³Pa时,将电子枪开启,为了使 入射电子的束流稳定,电子枪在预热10min后才进行 辐照实验,预热期间,通过接地挡板将高能电子与试 样隔离,避免累积效应影响正常的实验结果。在前 期的摸底实验中发现,试样在充电达到大约30min时 表面电位能趋向平衡,所以正式实验时,合理地安排 测量表面电位的时间,在前20min内表面电位增长的 幅度较大,所以每隔1min测量一次试样表面电位值, 将探头移到试样正上方读数后迅速移开使试样继续 接受辐照,由于测量时间较短,所以辐照过程可以认 为是连续的,即测量表面电位的过程不影响整个连 续辐照实验。20min后由于表面电位增长的幅度不 大,所以每5min测量一次表面电位值,测量的方法与 前 20min 内一致。进行完一个温度值下的充电实验 后,将电子枪关闭,温控板调节为常温,真空罐内气 压恢复为常压,打开真空罐对试样进行消电处理,使 其表面达到零电位,再进行下一个温度值的充电实 验。确保在每个不同温度值下的充电实验时相互独 立的,保证了实验的有效性。

将所测得的各个表面电位值汇总,得到不同温度下不同厚度聚酰亚胺表面充电电位随时间的变化关系,如图2~4所示,横坐标表示充电时间,纵坐标表示表面电位。三种厚度聚酰亚胺表面充电平衡电位与温度的关系如图5~7所示,横坐标表示温度,纵坐标表示表面充电平衡电位。

3 实验结果与分析

3.1 厚度对聚酰亚胺整体充电水平的影响

由图 2~图7可以看出,随着厚度的增大,聚酰亚 胺表面充电平衡电位整体呈现逐渐增大的趋势。

首先对聚酰亚胺薄膜的充电过程进行分析,一 般可以用等效电路来表示。聚合物在高能电子辐照 作用下的充电过程可以等效为一阻容网络中流过一 定的电流,表面电位随着充电时间的进行逐渐升高, 最后在某一时刻达到平衡状态,继续充电表面电位 不再随着时间变化。聚合物材料在受到空间高能电 子辐照时,由于其本征电导率极低,除了个别极其恶 劣的情况外,大多数情况下,入射的高能电子不会穿透材料,而是沉积在材料中的某一深度^[18]。在此定义由电子入射界面到分界线区域为电荷沉积区,该区域充斥高能电子,电子运动较活跃。由分界线到接地界面为电荷迁移区,该区域内电荷基本为原试样的本征电荷,高能电子很少甚至几乎没有,电荷依靠自建电场或者在电荷浓度梯度的作用下向接地端输运^[19,20]。

试样表面充电电位为电荷沉积区电位与电荷迁 移区电位之和

$$V = I_0 R_1 + Q/C_2$$
 (1)

式中 I₀ 为电子辐照引起的入射到试样中的电



Fig. 2 Change of the surface potential of polyimide with the charge time at different temperatures (beam density is $0.5nA/cm^2$)



Fig. 3 Change of the surface potential of polyimide with the charge time at different temperatures (beam density is $1nA/cm^2$)



Fig. 5 Relationship between the surface charge balance potential of polyimide and temperature (beam density is 0.5nA/cm²)



Fig. 4 Change of the surface potential of polyimide with the charge time at different temperatures (beam density is $2nA/cm^2$)



Fig. 6 Relationship between the surface charge balance potential of polyimide and temperature (beam density is $1nA/cm^2$)

流, *R*₁为电荷沉积区等效电阻, *Q*为电荷迁移区的电荷量, *C*, 为电荷迁移区的等效电容。

由式(1),随着试样厚度的增大,电荷迁移区的 等效电容减小,在其他条件比如注入电流不变的情 况下,注入的电荷量也不变,所以电荷迁移区的电位 随着厚度的增大而增大,从而导致试样整体的电位 增大。图2~7的实验结果验证了此分析。





3.2 温度对聚酰亚胺整体充电水平的影响

由图 2~7,随着温度的升高,三种厚度的聚酰亚 胺的表面充电平衡电位整体均呈现逐渐减小的趋势。

当面临温度变化的情况时,聚酰亚胺试样的电导率不仅受到辐射的影响,还受到温度的影响,此时,电荷迁移区不仅仅是一个等效电容,而是等效为并联上可变电阻的另一阻容网络。试样表面充电平衡电位可表示为

$$V = I_0 L A^{-1} (\sigma_{\rm ric} + \sigma_{\rm TI})^{-1} + I_0 (d - L) A^{-1} (\sigma_{\rm T2})^{-1}$$
(2)

式中 I_0 为电子辐照引起的入射到试样中的电流, d 为介质厚度, L 为电荷沉积深度, A 为介质表面积, σ_{ric} 为辐射诱导电导率, σ_{T1} 为电荷沉积区中受温度影响的电导率, σ_{T2} 为电荷迁移区中受温度影响的电导率。

基于聚合物载流子输运理论,聚合物材料的电 导率可以表示为^[21]

$$\sigma = en\mu \tag{3}$$

式中 e 为单位载流子所带的电荷量, n 为载流子 浓度, μ为载流子迁移率。载流子的浓度和迁移率均 在很大程度上受到温度的影响。

聚合物中自由载流子的迁移率与温度的关系为[22]

$$\mu = \mu_0 \exp(-\frac{A_0}{kT}) \tag{4}$$

式中 μ_0 为电子在 $T \rightarrow \infty$ 情况下的迁移率, A_0 表

示电子在不同的能级间跳跃时需越过的势垒高度。

由式(4),聚合物材料的电子迁移率随温度的变 化而变化,一般是随温度的升高而增大,当环境温度 升高时,不管是电荷沉积区还是电荷迁移区,电子迁 移率均增大,两区域受到温度影响的电导率均增大, 由式(2)可得,聚酰亚胺试样的表面充电平衡电位随 着温度的升高逐渐降低,图 2~7的实验结果验证了 此分析。

3.3 厚度对不同温度区间聚酰亚胺表面充电的影响

为分析温度变化对不同厚度聚酰亚胺表面充电 平衡电位的影响程度,定义变化幅度为 $P = |(U_1 - U_2)/U_1|$, U_1 为基准平衡电位,首先取 U_1 为温度在 243K 时试样 的表面充电平衡电位, U_2 为温度在 363K 时试样的表 面充电平衡电位,将温度变化时不同厚度聚酰亚胺 的表面充电平衡电位在温度为 363K 相对于温度为 243K 时的变化幅度进行了统计。

(1) 東流密度为 0.5nA/cm²时,当环境温度在
243~363K,厚度为 25,50,100μm时,变化幅度分别为71.5%,78.2%,83.4%。

(2) 束流密度为 1nA/cm²时,当环境温度在 243~
363K,厚度为 25,50,100μm时,变化幅度分别为
66.5%,75.2%,77.1%。

(3) 束流密度为 2nA/cm²时,当环境温度在 243~
363K,厚度为 25,50,100μm时,变化幅度分别为 45.6%,56.5%,65.6%。

随着温度的升高,聚酰亚胺试样厚度越大时表 面充电平衡电位变化的幅度越大,这表明,在温度变 化范围为243~363K时,聚酰亚胺试样的厚度越大, 温度变化对其表面充电平衡电位的影响就越大。

由聚合物材料的能带理论,聚合物材料由于加 工工艺不同或者其他因素,其表面或者内部存在或 多或少,或深或浅的陷阱,与在金属材料中的运动情 况不同,在电子束的辐照作用下,高能电子从表面注 入后,与聚合物表面或者内部的分子碰撞后产生电 离作用产生二次电子,使电荷总量增加,但是碰撞会 损失一部分能量,使得其随后在聚合物中输运时,很 容易被陷阱俘获而形成空间电荷,这就是导致介质 内部存在高场强的原因^[23]。另外,入陷的载流子有 可能成为复合中心,与异极性电荷在陷阱中进行复 合,起到维持聚合物体内电荷平衡的作用^[24]。电荷 在聚合物材料中的运动往往是跳跃的形式,从一个 能级跳跃到另一个能级,电荷运动过程会被陷阱俘 获,被浅陷阱俘获的容易跳出,被深陷阱俘获时则很 难跳出。当存在辐射条件或者环境温度升高时,被 陷阱俘获的电荷会得到能量,从而容易挣脱陷阱的 束缚成为自由电荷。

由 Molinié等的研究结论,用如下方程来解释在 辐照情况下聚酰亚胺试样内部载流子浓度的变化过 程^[25]。其中载流子分为正的载流子(空穴)和负的载 流子(电子)。

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{dn}}{\mathrm{dt}} = g - \frac{n}{\tau_{n}} - \alpha n p_{t} \\ \frac{\mathrm{dp}}{\mathrm{dt}} = g - \frac{p}{\tau_{p}} - \alpha p n_{t} \\ \frac{\mathrm{dn}_{t}}{\mathrm{dt}} = \frac{n}{\tau_{n}} - \eta n_{t} - \alpha n_{t} p \\ \frac{\mathrm{dp}_{t}}{\mathrm{dt}} = \frac{n}{\tau_{p}} - \eta n_{p} - \alpha p_{t} n \end{cases}$$
(5)

式中n为自由电子的浓度,p为自由空穴的浓度, n_i 为被陷阱俘获的电子的浓度, p_i 为被陷阱俘获的 空穴的浓度,g为载流子的产生率, α 为载流子的复合 系数, τ_a 为电荷自由迁移的时间, τ_p 为空穴自由迁移 的时间, η 为热脱陷常数,可表示为^[26]

$$\eta = N_{\rm c} v_{\rm th} \sigma_{\rm c} \exp\left(\frac{-E_{\rm t}}{kT}\right) \tag{6}$$

式中 N_c 为导带中的有效陷阱密度, v_{th} 为载流子的热运动速率, E_t 为陷阱能级,k为玻尔兹曼常数,T为环境温度。

一般载流子从陷阱中脱离有以下途径:声辅助 脱陷,光辅助脱陷,冲击电离和隧道效应。基于本文 的实验条件,真空罐中为黑暗密闭环境,所以仅考虑 热作用下的脱陷作用^[27]。

载流子的产生率g与电子能量和束流密度有关,载流子的复合系数α与陷阱密度、陷阱电荷密度,载 流子所在区域的平均自由程等因素有关。

对于电荷沉积区,由于高能电子的注入,该区域 内电子活跃程度大,且基于本文设置的电子能量,电 子的最大沉积深度不大,电荷沉积区相比于电荷迁 移区厚度较小,陷阱数量和能量均较小,载流子的产 生程度远远大于复合程度,而产生过程主要取决于 高能电子的注入并与聚合物中的分子等进行电离, 该过程受温度影响的程度较小。

在电荷迁移区,由于高能电子很少或几乎没有, 且厚度大于电荷沉积区,在电荷迁移区内,电荷的产 生作用很弱,载流子在陷阱中的复合作用强于电荷 沉积区,例如电子与陷阱中的空穴进行复合,空穴与 陷阱中的电子进行复合。当温度升高时,会促进被 陷阱俘获的载流子进行脱陷作用,成为自由载流子, 使电荷向接地端的输运作用增强。温度变化主要是 影响电荷迁移区的电荷输运过程。

在基于25keV能量的电子束辐照条件下,高能电子入射的最大深度不变,当聚酰亚胺试样厚度越大时,电荷迁移区厚度与电荷沉积区厚度的比值就越大,所以试样整体厚度越大,在有热脱陷作用的情况下,温度变化时,其表面充电平衡电位受到温度变化的影响就越大。

相关文献表明273K温度点为聚酰亚胺特性变化的临界点^[28,29]。取273K为基准平衡电位进行分析,将温度变化时不同厚度聚酰亚胺的表面充电平衡电位在温度为363K,相对于温度为273K时的变化幅度进行了统计。

(1) 束流密度为 0.5nA/cm²时,环境温度在 273~
363K,厚度为 25,50,100μm时,变化幅度分别为 64%,73%,80%。

(2) 東流密度为 1nA/cm²时,环境温度在 273~
363K,厚度为 25,50,100μm时,变化幅度分别为 57%,68.6%,72%。

(3) 東流密度为 2nA/cm²时,环境温度在 273~
363K,厚度为 25,50,100μm时,变化幅度分别为 28%,43.8%,53%。

仍取 273K 为基准平衡电位进行分析,将温度变 化时不同厚度聚酰亚胺的表面充电平衡电位在温度 为 243K,相对于温度为 273K 时的变化幅度进行了统 计,即针对 273K 以下的情况。

(1) 東流密度为 0.5nA/cm²时,环境温度在 273K
 以下,厚度为 25,50,100μm时,变化幅度分别为
 25.3%,23.5%,20.1%。

(2) 束流密度为 1nA/cm²时,环境温度在 273K 以下,厚度为 25,50,100μm时,变化幅度分别为 28.2%, 26.7%,22.5%。

(3) 束流密度为 2nA/cm²时,环境温度在 273K 以下,厚度为 25,50,100μm 时,变化幅度分别为 32.3%,
29.0%,25.4%。

由以上分析,温度在273K以上时,均呈现聚酰 亚胺试样的厚度越大,温度变化对其表面充电平衡 电位的影响就越大的规律。而随着温度的进一步降 低,温度由273K向243K变化时,聚酰亚胺试样厚度 越大表面充电平衡电位变化的幅度越小。这表明, 温度在273K以下时,聚酰亚胺试样的厚度越大,温 度变化对其表面充电平衡电位的影响越小。以下对 呈现该规律的机理进行分析。

当温度在 273K 以下时,由介质气体吸附量与温 度等压关系可得,在气压相同的情况下,温度越低, 介质表面所吸附的气体分子量越大^[30]。另外,由于 聚合物的厚度越大,单位体积内陷阱的浓度越大,且 复合中心越多。

综上可得,在低温区,聚合物表面有较大的气体 吸附量,高能电子与气体分子电离形成等离子体通 道,有效地将电荷由边缘向接地端泄放。而且,聚合 物薄膜的厚度越小,虽然单位体积内储存的电荷密度 上升了,但是电荷的稳定性下降,即薄膜厚度越大,电 荷稳定性越大^[12]。所以,在温度为273K时,随着温度 的进一步降低,试样内部会通过很强的复合作用将 沉积的电荷中和,并且温度较低时,热助脱陷作用就 较弱,这样,在低温条件下,试样厚度越大,沉积电荷 在陷阱中的进行复合作用的程度就越大,有效地缓解 了空间电荷的产生。所以在相同的电子辐照条件下, 温度在273K以下时,厚度越大,温度变化对聚酰亚胺 表面充电平衡电位的影响越小。

4 结 论

本文利用实验室自行研制的航天器介质材料表 面带电综合实验系统,对不同温度下、不同厚度的聚 酰亚胺材料进行了电子辐照实验,实验结果表明:

(1)温度不变时,随着聚酰亚胺试样厚度的增大, 试样表面充电平衡电位逐渐增大;试样厚度不变时, 随着温度的升高,试样表面充电平衡电位逐渐减小。

(2)当温度在 273~363K时,聚酰亚胺试样厚度 越大,温度变化对其表面充电平衡电位变化的影响 越大,即温度在 273K以上时,考虑热脱陷作用时,在 相同的电子束辐照下,厚度越大,温度变化时,聚酰 亚胺表面充电平衡电位的稳定性越差。

(3)当温度在 243~273K 时,聚酰亚胺试样厚度 越大,温度变化对其表面充电平衡电位变化的影响 越小,即温度在 273K 以下时,试样内热脱陷作用较 弱,在相同的电子束辐照下,厚度越大,温度变化时, 聚酰亚胺表面充电平衡电位的稳定性越好。

参考文献:

- Liaw D J, Wang K L, Huang Y C, et al. Advanced Polyimide Materials: Syntheses, Physical Properties and Applications[J]. Progress in Polymer Science, 2012, 37 (7).
- [2] 王 凯,肖 飞,詹茂盛.聚酰亚胺/无机氧化物复合 薄膜的制备与耐原子氧性能[J].北京航空航天大学 学报,2012,38(5):601-604.
- [3] 查俊伟, 党智敏. 聚酰亚胺/纳米 ZnO 耐电晕杂化膜

的绝缘特性[J]. 中国电机工程学报, 2009, (34): 122-127.

- [4] 贾瑞金,童靖宇.低地球轨道等离子体环境引起的高 压太阳电池阵电弧放电现象的研究[J].航天器环境 工程,2006,23(3):150-154.
- [5] 李 凯,谢二庆,林洪峰,等. 空间太阳阵二次放电的模拟实验研究[J]. 物理学报, 2005, 54(5): 2162-2166.
- [6] 王 松,武占成,唐小金,等.聚酰亚胺电导率随温度和电场强度的变化规律[J].物理学报,2016,(2): 248-254.
- [7] Hanna R, Paulmier T, Molinie P, et al. Radiation Induced Conductivity in Space Dielectric Materials [J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(3).
- [8] 赵呈选,李得天,杨生胜,等.基于PIC方法的GEO 航天器表面材料充电过程研究[J].真空科学与技术 学报,2014,34(12):1279-1284.
- [9] 王 松,武占成,唐小金,等.卫星外露电缆束介质 结构深层充电仿真分析[J]. 航天器环境工程,2015, 32(3):268-272.
- [10] Minow J, Parker L. Spacecraft Charging in Low Temperature Environments [C]. Reno: Aiaa Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2007.
- [11] 李盛涛,李国倡,闵道敏,等.人射电子能量对低密度聚乙烯深层充电特性的影响[J].物理学报,2013,62(5).
- [12] 黄伟,吉洪湖,斯仁,等.降低表面温度和发射率抑制排气系统红外辐射的研究[J].推进技术,2011,32(4):550-556. (HUANG Wei, JI Hong-hu, SI Ren, et al. Investigation of Infrared Suppression of Exhaust System by Reducing Surface Temperature and Emissivity[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(4):550-556.)
- [13] 蒙上阳,唐国金,雷勇军.低温环境下固体火箭发动 机药柱伞盘结构设计[J].推进技术,2004,25(5): 397-400. (MENG Shang-yang, TANG Guo-jin, LEI Yong-jun. Design for the Umbrella Slot Configuration of the Solid Rocket Motor Grain under Low Temperature Condition[J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(5): 397-400.)
- [14] 吴贤勇,夏钟福,安振连,等.厚度对非极性聚合物 薄膜驻极体电荷储存及电荷动态特性的影响[J].物 理学报,2004,53(12):4325-4329.
- [15] Lv Z, Wu K, Wang X, et al. Thickness Dependence of Space Charge in XLPE and Its Nanocomposites under Temperature Gradient[C]. Bologna: 2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 2013.
- [16] 刘 婧,张海波. 空间多能电子辐照聚合物充电过程的稳态特性[J]. 物理学报, 2014, 63(14):446-454.

- [17] 封国宝,王 芳,曹 猛.电子辐照聚合物带电特性
 多参数共同作用的数值模拟[J].物理学报,2015
 (22):398-407.
- [18] 李国倡, 闵道敏, 李盛涛, 等. 高能电子辐射下聚四氟乙烯深层充电特性[J]. 物理学报, 2014, 63(20):
 450-457.
- [19] 夏钟福. 聚四氟乙烯驻极体的电荷贮存与输运[J]. 应用科学学报, 1992, (2): 174-180.
- [20] 廖瑞金,李 伟,杨丽君,等.变压器油纸绝缘介质 在直流电场中的空间电荷输运特性[J].高电压技 术,2011,37(5):1057-1065.
- [21] 陈季丹. 电介质物理学[M]. 北京:机械工业出版社, 1982.
- [22] 钟力生.工程电介质物理与介电现象[M].西安:西 安交通大学出版社,2013.
- [23] 兰 莉,吴建东,王雅妮,等.低密度聚乙烯/乙丙橡 胶双层介质的界面空间电荷特性[J].中国电机工程 学报,2015,35(5):1266-1272.
- [24] 林益梅, 叶志镇, 陈兰兰, 等. ZnO 薄膜的缺陷研究

进展[J]. 真空科学与技术学报, 2006, 26(5): 385-391.

- [25] Molinié P, Dessante P, Hanna R, et al. Polyimide and FEP Charging Behavior under Multienergetic Electron-Beam Irradiation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2012, 19(4): 1215-1220.
- [26] 廖瑞金,周天春,George Chen,等.聚合物材料空间 电荷陷阱模型及参数[J].物理学报,2012,61(1).
- [27] 周天春. 伽马射线和紫外线老化条件下聚乙烯的空间电荷特性和陷阱特征[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- [28] 张振军,郑晓泉,吴文斌,等.不同温度下聚酰亚胺 真空直流沿面闪络特性[J].西安交通大学学报, 2014,48(4):47-51.
- [29] 屠幼萍,谭 荣,张贵峰,等.聚酰亚胺在低温真空 环境下的直流电气特性[J].中国电机工程学报, 2013,33(4):194-200.
- [30] 崔 群,陈海军,朱跃钊.吸附制冷用复合吸附剂的 吸附性能[J].化工学报,2005,56(10):1860-1864. (编辑:朱立影)