

# 卫星中介质深层充电特征研究<sup>\*</sup>

黄建国<sup>†</sup> 陈 东

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080)

(2003 年 4 月 22 日收到)

介质深层充电效应是诱发地球同步轨道卫星运行故障和异常的重要因素之一. 通过数值模拟方法对卫星介质材料中充电所致最大电场与高能电子能谱、介质厚度、及屏蔽厚度等的关系进行了详细研究, 给出了介质中最大电场的基本特征.

关键词: 卫星, 介质深层充电, 高能电子, 计算机模拟

PACC: 9480

## 1. 引 言

卫星中介质深层充电(deep dielectric charging)是指空间高能带电粒子穿过卫星表面, 在卫星构件的电介质材料内部传输并沉积从而建立电场的过程, 又称为内部介质充电(internal dielectric charging), 是区别于表面充电的另一种由高能粒子辐射引起的航天器充电效应. 当深层充电产生的电场超过介质材料的击穿阈值时, 就会发生放电. 放电所产生的电磁脉冲会干扰甚至破坏卫星内电子学系统的正常工作, 严重时使整个卫星失效. 介质深层充电效应是导致地球同步轨道( $6.6R_e$ )卫星故障和异常的主要原因, 主要是由地球外辐射带( $3-7R_e$ )的高能电子引起的. 这些高能电子的能量主要位于  $0.1-10\text{MeV}$  范围内, 具有很强的穿透能力, 它们可以穿透卫星表面敷层进入卫星构件的电介质中, 从而产生充电效应.

充电过程主要包括两个方面: 一方面高能电子穿透卫星表面的敷层材料, 进入卫星内部的介质材料中. 电子与介质材料相互作用的中间过程是复杂的, 主要方式是 Rutherford 散射和核相互作用, 最终结果是不同能量的电子沉积于介质材料的不同深度, 从而在介质内部生成一定的电荷结构并建立电

场. 另一方面, 因为介质本身有一定的电导率, 并且卫星构件的电介质材料多为高分子聚合物, 在受到辐照时会形成所谓的辐射感应电导率, 比没有辐照时的暗电导率大得多<sup>[1-3]</sup>, 因此在电场作用下会形成泄漏电流, 该过程与电荷沉积过程的作用相反. 当上述两个过程达到平衡时, 介质中的电场便达到最大. 如果该最大电场大于介质材料的电场击穿阈值, 就可以判定会发生放电.

文献 [4] 中详细介绍了深层充电过程的微分方程, 以及高能电子的传输、沉积和辐射感应电导率的物理描述, 并给出了介质中电场的空间分布和时间演变特征. 充电所致最大电场出现在介质构件的接地侧, 例如, 对于背部(受到辐照的一侧称为正面)接地的平板介质构件, 最大电场即位于平板的背部, 因而接地侧是放电发生的危险区域. 本文将进一步对最大电场与电子能谱、介质厚度以及屏蔽厚度的关系进行研究, 并在此基础上给出抗深层充电效应的初步措施和建议.

## 2. 模拟方法

图 1 为典型的平板和圆柱介质构件形状和接地情况. 根据上述深层充电的物理机理以及静电场理论可以得到充电过程所满足的微分方程. 平板模型的微分方程为

<sup>\*</sup> 国家高技术研究发展计划青年基金(批准号: 863-2-7-7-1)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: jghuang@earth.sepc.ac.cn

$$\frac{dE(x,t)}{dt} = \frac{1}{\epsilon} (e\Phi(0) - e\Phi(x) - \sigma(E, \Phi(x))E(x,t)), \quad (1)$$

其中  $E$  为介质中的电场,  $\Phi(0)$  和  $\Phi(x)$  分别为介质正面(背部接地)和深度  $x$  处的高能电子通量,  $e$  为电子电荷,  $\epsilon$  为介电常数,  $\sigma$  为介质电导率, 它是电场和辐射剂量率(正比于电子通量)的函数<sup>[5]</sup>. 如果考虑电场方向, 这里的电子电荷应该取负值, 则电场也为负值, 这里没有考虑电场方向, 电场为正值. 圆柱模型的微分方程为

$$\frac{R_0}{r} e\Phi(R_0) - e\Phi(r) - \sigma(E, \Phi(r))E(r,t) = \epsilon \frac{dE(r,t)}{dt}, \quad (2)$$

其中  $\Phi(R_0)$  和  $\Phi(r)$  分别为圆柱介质表面(芯部接地)和半径  $r$  处的高能电子通量. 高能电子通量  $\Phi$  的物理描述采用经验公式法取代繁琐的蒙特-卡罗模拟计算. 根据 Weber 公式<sup>[6]</sup>, 能量为  $E_e$  的电子射程为

$$R = 0.55 E_e \left( 1 - \frac{0.9841}{1 + 3E_e} \right) \quad [g/cm^2]. \quad (3)$$

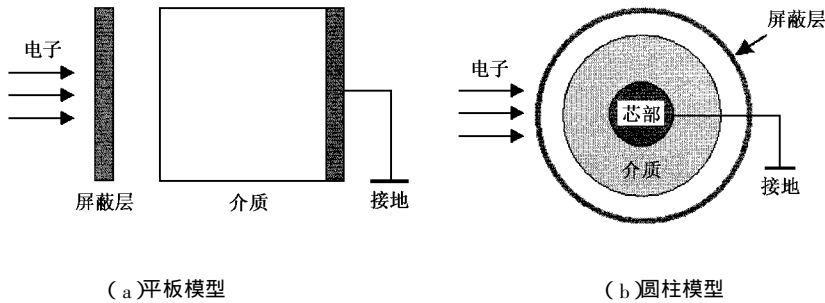


图 1 平板和圆柱介质构件的形状和接地示意图

文献 [7] 将电子分布近似为在深度为  $a$  的范围内均匀线性分布, 如图 2 所示,  $a$  可以表示为

$$a = 0.283 E_e \quad [g/cm^2], \quad (4)$$

则任意深度  $x$  的电子通量为

$$\Phi(x) = \begin{cases} \Phi(0), & x < R - a, \\ \frac{R-x}{a} \Phi(0), & R - a \leq x < R, \\ 0, & R \leq x. \end{cases} \quad (5)$$

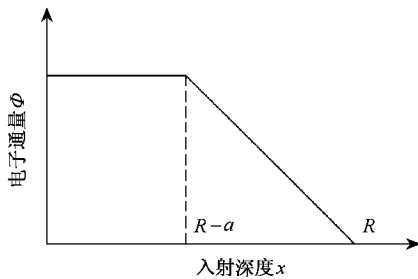


图 2 电子通量随入射深度变化的近似描述

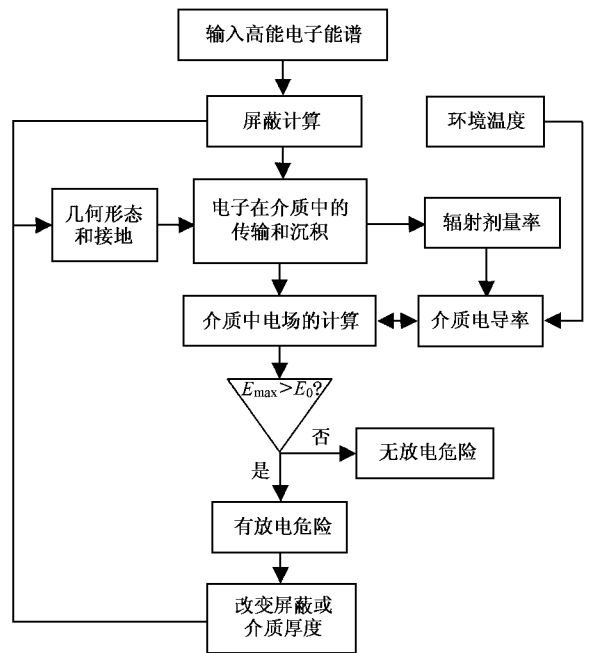


图 3 模块组成和逻辑框架

根据前面的微分方程, 在给定高能电子能谱的情况下就可以通过数值计算得到介质内部的电场  $E(x,t)$ , 模拟计算的模块组成和逻辑框架如图 3 所示.

### 3. 介质深层充电的特征

本文分别对平板模型和圆柱模型进行了计算.

为了便于说明问题,这里只给出平板模型的模拟计算结果,对于圆柱模型而言结果类似.计算选用的介质材料为卫星上常用的环氧树脂(epoxy).计算中高能电子采用了两种形式的能谱:1)地球同步轨道典型积分能谱 GEODUR(全向入射,各向同性,持续时间为 24h),如图 4 所示.2)单能电子束,能量为 0.75 MeV,通量为  $1.24 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ .文献[4]分别对环氧树脂和聚四氟乙烯(teflon)的圆柱模型和平板模型的 14 组几何尺寸(介质厚度从 0.1 到 0.5cm)计算了最大电场,并与 ESA 的 DICTAT<sup>[7]</sup>(DERA internal charging treat analysis tool)计算结果进行比较,一般相对误差为 5%左右,存在屏蔽时相对误差较大,但不超过 50%,估计与辐射电导率计算中参数的选取有关,应该认为这样的结果比较满意.

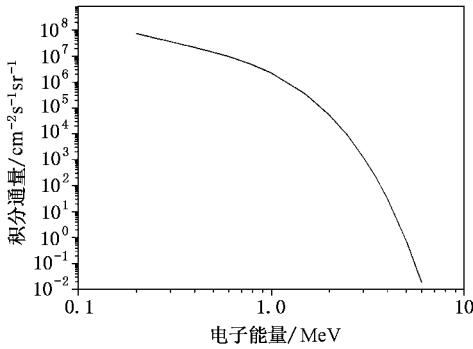


图 4 地球同步轨道典型积分能谱(GEODUR)

### 3.1. 最大电场与介质厚度的关系

图 5 给出 GEODUR 能谱下介质内最大电场随介质厚度的变化关系.从图 5 可以看出,最大电场随介质厚度的增加而增大,当介质厚度到达一定值(此处约为 0.25cm)时,电场基本达到饱和.当高能电子能谱确定时,对于较薄的介质,部分电子会穿出介质层,沉积的电荷量有限,因而所达到的最大电场较小.随介质变厚,沉积的电荷量逐渐增加,介质内最大电场也随之增加,当介质厚度超过高能电子的射程时,电子无法穿越介质层,从而介质中沉积的电荷量达到最大,此时最大电场便不再随介质厚度而增大.因此,要想减小甚至避免深层充电危险性,应在允许条件下尽量选用薄的介质材料.

### 3.2. 介质内最大电场与高能电子能谱的关系

图 6 中给出厚度为 0.3cm 的 epoxy 介质层在无屏蔽和有屏蔽两种情况下内部最大电场随电子能量

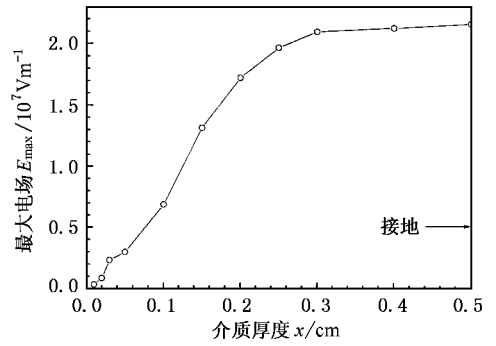


图 5 最大电场随介质厚度的变化关系

的变化关系.在未加屏蔽的情况下,当电子能量  $E_e < 1.05 \text{ MeV}$  时,介质内最大电场保持不变;当电子能量  $1.05 \text{ MeV} < E_e < 2.5 \text{ MeV}$  时,最大电场随电子能量而迅速衰减;当电子能量  $E_e > 2.5 \text{ MeV}$  时,最大电场基本趋于零.

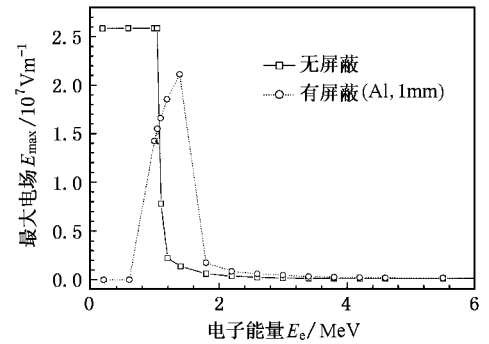


图 6 介质中最大电场随高能电子能量的变化关系 (epoxy  $d=0.3 \text{ cm}$ )

前面已经论述,介质深层充电是由高能电子的沉积和电荷泄漏(即形成欧姆电流)两个过程决定的,对于背部接地的平板介质而言,最大电场  $E_{\text{max}}$  位于背部接地侧.当充电过程达到平衡时,根据电流连续性原理,有

$$\alpha(\Phi_{\text{入射}} - \Phi_{\text{背部}}) = j_{\text{背部}} = \sigma_{\text{背部}} E_{\text{max}}, \quad (6)$$

$$E_{\text{max}} = \frac{\alpha(\Phi_{\text{入射}} - \Phi_{\text{背部}})}{\sigma_{\text{背部}}}, \quad (7)$$

其中  $\Phi_{\text{入射}}$  和  $\Phi_{\text{背部}}$  分别为平板介质正面的入射电子通量和背部出射电子通量,  $\sigma_{\text{背部}}$  为背部接地端的电导率,因此  $\Phi_{\text{背部}}$  决定于介质厚度  $d$  和电子能量  $E_e$ .由(5)式可知:

$$\Phi_{\text{背部}} = \begin{cases} \Phi_{\text{入射}}, & d < R - a, \\ \frac{R-d}{a} \Phi_{\text{入射}}, & R - a \leq d < R, \\ 0, & R \leq d. \end{cases} \quad (8)$$

根据 Fowler 方程<sup>[1]</sup>可以推导出(忽略电场和温度的影响):

$$\sigma_{\text{背部}} = \sigma_0 + C\Phi_{\text{背部}}, \quad (9)$$

其中  $\sigma_0$  为介质的暗电导率(未受辐照时),  $C$  为常数, 取决于材料的物理性能和几何形态.

在电子入射通量  $\Phi_{\text{入射}}$  确定的情况下, 当电子能量  $E_e < 1.05\text{MeV}$  时, 可以求得此时电子的射程  $R < d$ , 由(8)式有  $\Phi_{\text{背部}} = 0$ , 即电子全部沉积在介质中, 且  $\sigma_{\text{背部}} = \sigma_0$ , 由(7)式可知  $E_{\text{max}}$  仅决定于电子的入射通量  $\Phi_{\text{入射}}$ , 因而, 不随电子能量改变. 当  $E_e > 2.5\text{MeV}$  时,  $d < R - a$ , 即入射电子全部穿出介质层. 由(8)式可知,  $\Phi_{\text{背部}} = \Phi_{\text{入射}}$ ,  $E_{\text{max}} = 0$ . 当  $1.05\text{MeV} < E_e < 2.5\text{MeV}$  时,  $R - a \leq d \leq R$ , 即部分入射电子穿出介质层, 此时有  $\Phi_{\text{背部}} = ((R - d)/a)\Phi_{\text{入射}} = (1.94(1 - 0.9841(1 + 3E_e)) - d/0.283E_e)\Phi_{\text{入射}}$ , 显然  $\Phi_{\text{背部}}$  随  $E_e$  的增加而增加, 即介质中沉积的电荷量减小, 同时由(9)式可知, 由于辐射感应电导率的影响,  $\sigma_{\text{背部}}$  随  $E_e$  的增加而增大. 由(7)式可知,  $E_{\text{max}}$  在上述两种因素的共同作用下随  $E_e$  的增加而很快衰减.

当存在屏蔽时, 在低能端, 因电子被屏蔽层阻挡, 使得介质内部电场很小; 随电子能量的增加, 越来越多的电子穿过屏蔽层而沉积于介质中, 最大电场也随之增加; 随后随能量的进一步增加, 越来越多的电子开始穿过介质层, 使得沉积的电荷量减小, 同时接地侧的辐射感应电导率也迅速增加, 从而最大电场迅速衰减. 可见, 当存在屏蔽的情况下, 存在一个能量值, 使得介质中的电场达到极大.

### 3.3. 介质内最大电场与屏蔽厚度的关系

图 7 给出厚度为 0.1cm 的 epoxy 介质在单能电子束入射条件下内部最大电场随屏蔽(Al)厚度的变化关系. 随屏蔽厚度的增加, 介质内最大电场先增大, 当屏蔽厚度超过某一值时, 最大电场迅速下降. 为解释这一特征, 下面作一简化计算, 可以清楚地看出, 在曲线的上升和下降中哪些因素在起关键性作用.

首先计算 0.75MeV 的电子射程  $R$  和分布长度  $a$ , 为便于分析, 统一将  $R, a$  和介质层厚度  $d$  折合成 Al 的长度, 即  $R = 0.107\text{cm}, a = 0.079\text{cm}, d = 0.056\text{cm}$ . 将  $R$  和  $a$  的值代入(5)式, 可以得到穿过厚度为  $x$  的屏蔽层而进入介质层的电子通量随屏蔽厚度  $x$  的变化关系  $\Phi_{\text{入射}}(x)$ , 则从介质层背部

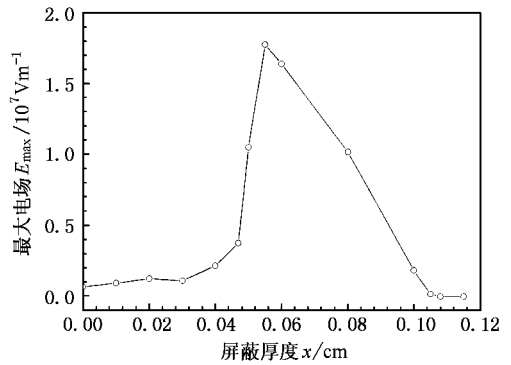


图 7 单能电子束辐照下介质内最大电场随屏蔽厚度的变化关系

(地)透射的电子通量为

$$\Phi_{\text{背部}}(x) = \Phi_{\text{入射}}(x + d). \quad (10)$$

由(9)式可得

$$\sigma_{\text{背部}}(x) = \sigma_0 + C\Phi_{\text{背部}} = \sigma_0 + C\Phi_{\text{入射}}(x + d). \quad (11)$$

根据(7)式, 得到介质中最大电场为

$$E_{\text{max}}(x) = \frac{e(\Phi_{\text{入射}} - \Phi_{\text{背部}})}{\sigma_{\text{背部}}}. \quad (12)$$

图 8 中  $\Phi_{\text{入射}}, \Phi_{\text{背部}}, \sigma_{\text{背部}}$  曲线均对表面值进行了归一化处理,  $E_{\text{max}}$  则对其峰值作归一化, 显然与模拟计算结果符合得很好. 从图 8 可以清楚地看出, 开始随屏蔽厚度的增加, 介质中电荷沉积率  $\Phi_{\text{入射}} - \Phi_{\text{背部}}$  不断增加, 同时接地端的电导率  $\sigma_{\text{背部}}$  因辐射剂量率  $\Phi_{\text{背部}}$  的减小而减小, 所以接地端的最大电场  $E_{\text{max}}$  随屏蔽厚度的增加而上升. 当屏蔽层与介质层的总厚度大于电子的射程时, 电子不再穿透介质层, 接地端电导率  $\sigma_{\text{背部}}$  基本不再变化(忽略电场和温度效应), 而介质中电荷的沉积率随屏蔽层的变厚而减小, 所以接地端的最大电场  $E_{\text{max}}$  随之迅速衰减.

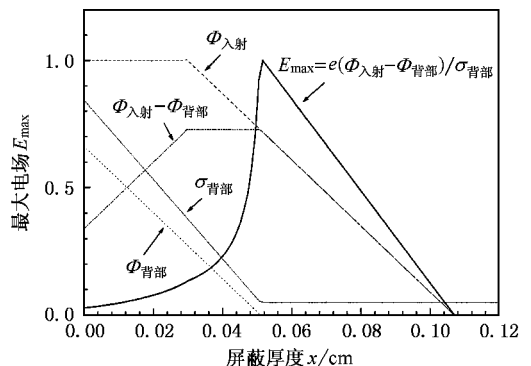


图 8 介质内最大电场随屏蔽厚度变化的理论估算

图 9 给出厚度为 0.1 cm 的平板介质在 GEODUR 能谱下,内部最大电场随屏蔽 Al 厚度的变化关系。随屏蔽的增厚,电场单调下降,开始下降很快,当屏蔽层超过一定厚度之后,再增加屏蔽层作用就十分有限,因此在实际应用中,应该通过计算选择适当的屏蔽厚度,这样既能够有效地屏蔽,又能够节约资源。

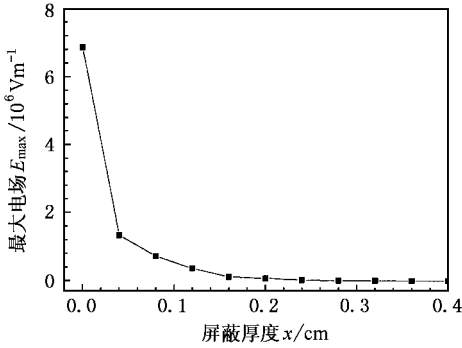


图 9 GEODUR 能谱情况下介质内最大电场随屏蔽厚度的变化关系

## 4. 讨 论

本文给出了卫星介质构件中比较典型的背部接地的平板模型的模拟结果,具有一定的普遍性。对于正面接地以及正面和背部同时接地的情形,介质内

最大电场出现的位置将有所不同:正面接地中,最大电压出现在介质正面(接地侧),而两面同时接地时,最大电场将出现在介质的某一接地侧,并取决于介质厚度<sup>[4]</sup>。但就最大电场与介质、屏蔽与高能电子能谱的关系而言,情况类似,关于接地对电场的影响,将在以后的工作中进行详细研究。

深层充电所致的介质内最大电场随介质厚度的增加而增大,随屏蔽厚度增加而减小,因此在允许的情况下采用薄的介质层和增加屏蔽厚度可以防止发生放电,但要有效地实施防护,应该选用适当的介质厚度及屏蔽厚度,比如对于屏蔽而言,超过一定厚度后,所起的作用十分有限。因此,通过计算卫星介质构件中最大电场与介质厚度及屏蔽厚度的变化关系,再结合构件本身的功能需求等条件,可以帮助选取最佳的设计参数,满足抗辐射加固的需求。

本文的模拟计算是在给定高能电子能谱的条件下进行的,如果嵌入高能电子环境模式,即可对在轨卫星的深层充电效应进行分析,目前模式的建立工作正在进行之中。但至今已有的 AE8 模式不能反映诱发深层充电的能量在 100keV—10MeV、以高能电子通量增强事件为特征的外辐射带高能电子环境。欧空局基于大量的空间高能电子探测数据建立了 FLUMIC 模式,这将对建立高能电子环境模式起到很好的借鉴和参考作用。

- [ 1 ] Fowler J F 1956 *Proc. Roy. Soc. London A* **236** 464  
 [ 2 ] Harrison S E, Copage F N and Snyder A W 1963 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **10** 118  
 [ 3 ] Ahrens T J and Wooten F 1976 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **23** 2134  
 [ 4 ] Huang J G 2003 *China Defense Science and Technology Final Report* Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences [ in Chinese ] 黄建国 2003 中国国防科学技术报告(中

国科学院空间科学与应用研究中心 )]

- [ 5 ] Rodgers D J, Ryden K A, Latham P M, Levy L and Panabiere G 1999 *ESA Contract Final Report DERA/CIS( CIS2 )7/13/36/2/4/FINAL*, p25  
 [ 6 ] Weber K H 1952 *Nucl. Inst. Meth.* **25** 261  
 [ 7 ] <http://www.spnvis.oma.be/spnvis/>

# A study of characteristics for deep dielectric charging on satellites<sup>\*</sup>

Huang Jian-Guo    Chen Dong

( *Center for Space Science and Applied Research , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 ,China* )

( Received 22 April 2003 )

## Abstract

Deep dielectric charging is one of the key factors that induce malfunction and failure on geosynchronous satellites. In this paper , the relations between the maximum electric field generated during charging and high energy spectrum , thickness of dielectric and that of shield applied are studied , and the main characteristics about the maximum electric field are provided

**Keywords** : satellite , deep dielectric charging , high energy electron , computer simulation

**PACC** : 9480

---

<sup>\*</sup> Project supported by the Foundation for Outstanding Young Researchers from the National High Technology Development Program of China ( Grant No. 863-2-7-7-1 ).