典型空间聚合物介质的抗内带电改性技术

王金锋 郑晓泉 李盛涛 白婧婧

(西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 消除航天器介质内带电所产生脉冲放电威胁的最佳方式,除有效屏蔽外,就是研制不会产生脉冲放电的介质材料和绝缘结构件. 通过对航天器用聚酰亚胺、环氧树脂和聚四氟乙烯等几种典型聚合物的改性研究发现,采用微米级无机粉料对聚合物介质材料进行改性,只要添加剂的电导率显著低于聚合物的电导率,该复合介质材料即可产生显著的非线性电阻率特性,可以实现在介质内带电程度达到放电阈值时迅速以非脉冲电导电流方式释放掉所储存的危险电荷,有可能达到消除脉冲放电的目标;当该添加剂含有微量"施主"杂质时甚至还可以提高介质材料在正常情况下的电阻率. 对复合介质非线性电阻特性的产生机理进行了分析.

关 键 词: 航天器介质; 改性; 非线性电导; 内带电防护

中图分类号: TM 215.1⁺3; TM 154.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)02-0180-05

Internal charging protection technology of typical space polymer dielectric material

Wang Jinfeng Zheng Xiaoquan Li Shengtao Bai Jingjing

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong Univevsity, Xi'an 710049, China)

Abstract: Besides efficient shield, the best method for eliminating the pulsed discharge induced by the deep charge of spacecraft dielectric was to use dielectric materials or insulation structural components that never produce any pulsed discharges. By non-linearity modification experiment research on several typical polymer dielectrics like Polyimide, Epoxide resin and Teflon, it was found that through the addition of the inorganic powder that possess a conductivity much higher than that of the polymer, the composite dielectric material would produce a remarkable non-linearity conductance character. By this way, the excessive charges would be discharged as a method of non-pulsed conducting current before the deep dielectric charging reaches the discharge threshold. It was proved that, even the normal resistance could be increased by this method. Finally, the mechanism on the non-linearity conductance of the composite material was investigated.

Key words: space aircraft dielectrics; modification; non-linearity conductivity; internal charged protection

空间介质内带电极易引发严重影响航天器敏感电子电路运行可靠性的多频谱脉冲放电. 放电严重时会直接导致敏感电子器件或有机介质击穿或烧毁. 我国在研究航天器内带电问题上起步较晚,目前国内的研究多集中在航天器介质带电规律上,针对空间介质材料进行改性而实现介质内带电防护技术研究方面在国内、国际公开刊物上均未检索到相关研究报道. 国内文献检索显示,针对空间介质内带电规律和带电机理的研究也多集中在计算和仿真上[1-8],在实验研究方面也还处于起步阶段[9-12]. 分析表明,除屏蔽措施外,材料的电导特性是确定应用在空间环境下的介质是否

收稿日期: 2009-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50577052); 国家专项基金、电力设备电气绝缘国家重点实验室自主课题(EIPE09107)

作者简介: 王金锋(1984 -),男,河南许昌人,博士生, xc. wangjf@ stu. xjtu. edu. cn.

会产生临界深层带电的关键参数.

本文采用一种微米级无机填料对航天器常用的聚酰亚胺(Polyimide)、环氧树脂和聚四氟乙烯(Teflon)3 种聚合物材料进行改性,发现改性材料样品出现显著的非线性电导特性. 而且 PI(Polyimide)复合材料在 0 ℃以上的常态电阻率还有所提高. 表明对空间介质材料进行非线性电导改性有可能成为一种有效的抗内带电防护方法.

1　介质电导特性与内带电防护分析

影响介质带电程度的最重要电气参数是材料的电导率,较大的电导率有利于静电荷的泄放. 分析表明,应用在空间环境下介质材料的电导由 3 项构成,即体电导率、诱导电导率和强场电导率.

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_r + \sigma_E \tag{1}$$

式中,σ_0 表示介质体电导率;σ_r 表示辐射诱导电导率;σ_E 表示强场电导率. 后 2 项根据空间环境的变化和介质带电量的不同而处在不断的变化之中. 当介质带电量达到击穿前夕时,第 3 项的数值才显著增加. 介质电导率由载流子迁移率 μ_i,载流子浓度 n_i 和载流子带电量 q_i 三者构成,即

$$\sigma = \sum_{i=1}^{n} n_i q_i \mu_i \tag{2}$$

如介质材料在空间环境下的电导率设计合理,在发生介质材料静电击穿前即会达到电荷平衡,即 $dQ_{积累} = dQ_{泻放}$. 为此,要求应用在空间环境下的介质材料有较大(远超过材料自身的本征电导率)的诱导电导率或强场电导率. 同时希望介质出现强场电导率时的静电场强度 E_{DC} 恒小于材料的直流电场击穿强度,即 $E_{DC} < E_B$.

主绝缘材料,体电导率如过高会导致电力损耗过大和绝缘发热,因此通过提升绝缘体电导率的方法来实现抗内带电是不可取的. 考虑到在强辐射情况下也不希望较大功率损失,最好的方法是采用具有显著非线性电导特性的绝缘材料作为抗内带电的绝缘材料:即只有在强辐射或静电荷积累到一定程度才呈现出暂态较高体电导率的材料.

非线性电导是一种在介质材料接近电气击穿强度时出现的电导率随电场强度急剧升高的现象. 虽然非线性电导有利于静电荷的释放,但因其特性太陡,此时的电荷释放一定是以电脉冲形式出现的,而且,非线性电导特性出现的电场强度无法控制. 所以合理的非线性电导特性应该是平滑的且具有较低的阈值电场.

综上分析,抗内带电最佳的方法是使材料具有平滑且阈值电场较低的非线性电导特性.

2　实验装置与试样

2.1　试　样

1) 自制 PI、Teflon、环氧树脂试样与复合试样,试样规格 100 mm × 100 mm × 2.5 mm;

2) 微米级无机复合添加剂,粒度范围 4 ~ 50 μm,粒度中值 35 μm.

2.2　试验装置

1) 非线性电导实验系统(见图 1):包括 400 kV直流高压发生器,nA ~ mA 表(自制)等;

2) CONCEPT80 宽带介电谱测量系统(德).

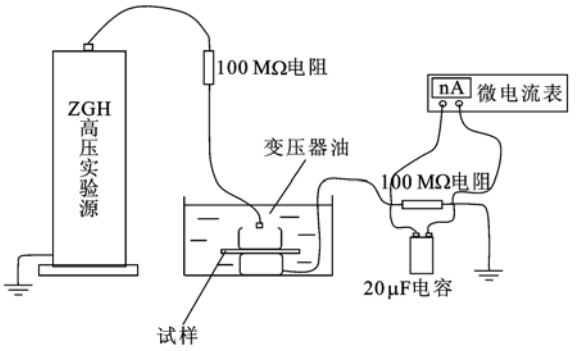


图 1　非线性电导实验系统示意图

3　实验结果与分析

本文认为,满足空间介质材料抗带电性能的最合理的非线性电导特性应满足 2 个基本条件:①非线性电导出现的阈值电场强度应显著降低,这样可以将介质带电水平限制在较低水平,按照一般电力设备绝缘强度裕度设计惯例,高于工作场强 10 倍左右较为合理;②非线性电导特性曲线应较为平缓,因为陡峭的强场电导特性可能引发威胁航天器安全的脉冲型放电. 下面主要描述对 3 种典型空间介质材料进行非线性电导改性后的电导特性实验结果.

3.1　Teflon 的非线性改性实验结果

Teflon 以其优异的电性能、耐温性能和机械强度、自润滑特性等,广泛被用作航天器电缆绝缘材料及结构件等. 对聚四氟乙烯进行改性的最大困难是 Teflon 不容易加工和粉粒添加剂难以均匀分布. 研究发现,采用 Teflon 悬浮液可以获得较均匀的 Teflon 微米添加剂复合试样. 并对其电导性能进行了实验,结果见图 2. 实验显示,Teflon 本身的强场电导特性阈值大约为 27.5 kV/mm,而 20% 的添加剂可以使 Teflon 复合材料的非线性电导特性阈值出现在 7 kV/mm 左右,远低于材料的击穿强度. 而直流击穿强度略有降低(见表 1,降

低约2.6%).

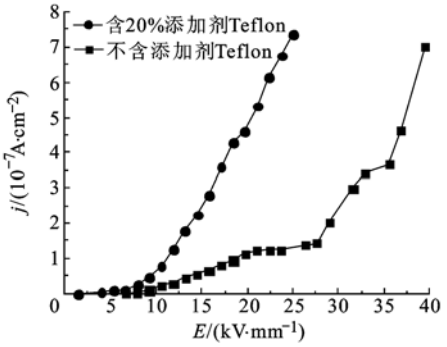


图2 Teflon的改性实验结果

表1 复合试样的DC平均击穿强度 E_{Bpj} kV/mm

基体树脂	添加剂加入量		
	0	10%	20%
环氧树脂	40.56	44.76	44.05
聚四氟乙烯	29.46		28.68

3.2 对环氧树脂的非线性改性实验结果

环氧树脂是电路板常用基体树脂材料,无机添加剂粉粒在液态环氧树脂中容易沉淀是试样制作的难点,因此对其进行改性的关键是添加剂能否在环氧树脂中均匀分布. 采用机械高速搅拌和加速预固化的方法,获得了基本均匀的复合材料板状试样. 图3为对板状环氧树脂复合试样的电导特性实验结果.

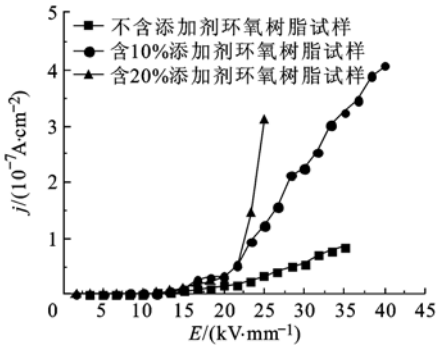


图3 环氧树脂的改性实验结果

实验显示,添加剂致使环氧复合材料在较低电场下(21 kV/mm左右)出现非线性电导,远低于材料的击穿强度40 kV/mm. DC击穿强度反而上升(见表1,分别为上升10.4%和8.6%).

3.3 PI的非线性电导改性结果

PI具有优良的耐高低温性能、介电性能和机械性能,在航天器上主要用做热控薄膜和绝缘结构件材料. 对改性PI做的电导特性和阻温特性分别如图4~图6所示.

1) 非线性电导特性. 本实验研究显示(见图4),添加剂含量不同时会对PI产生不同的改性效果:添加剂含量为5%是较为合理,原因是复合材料的电导率曲线较为平滑,在低场下的电导率比基体树脂还略有降低(见图5)等.

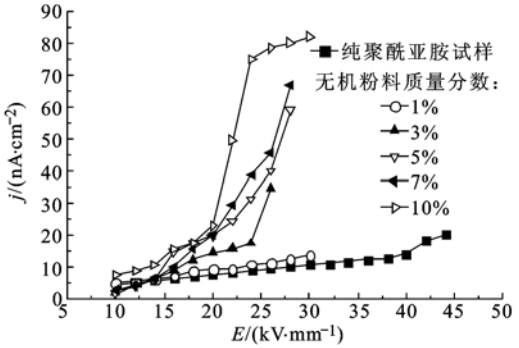


图4 PI的电导改性实验结果

2) 电导率与添加剂含量关系. 本实验结果显示,复合材料的体电导率随着添加剂含量具有最小值(5%含量时),而不是简单按添加剂体积分数单调变化. 表明在添加剂与基体树脂之间存在一种能影响电导率的界面极化效应,会产生对直流电的限流作用.

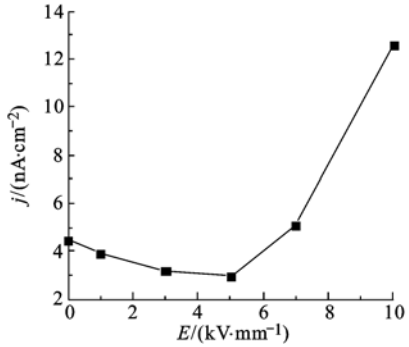


图5 复合介质体电导率与添加剂含量关系

3) 阻温特性. 航天器围绕地球运行时不断经历周期性的温度变化,研究介质材料的阻温特性是考核介质材料抗内带电性能的重要环节. 本实验显示,当添加剂含量在3%~5%之间时,在0℃以上温度范围,复合材料的体电阻率反而增加(见图6). 由于添加剂的电阻率远低于基体树脂的电阻率,更证实了在上述所提出的2种材料界面存在界面极化限流作用的推测.

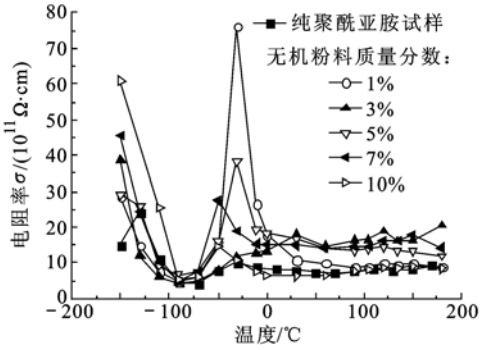


图6 添加剂改性试样的阻温特性曲线

3.4　实验分析

实验研究显示,采用复合添加剂对 Teflon,PI 和环氧树脂 3 种典型空间聚合物介质进行非线性电导率改性的效果十分显著. 由于航天器供电电缆的电源为直流电,而介质损耗描述的是介质在交变电场下才会出现的一种损耗,因此改性对材料介电常数和介质损失带来的变化并不对绝缘材料在空间的使用带来影响. 改性后所带来的抗内带电防护的好处却是巨大的. 当然,这还是初步的实验研究,随着研究的深入,有关添加剂成分的优选结果,添加剂与材料加工工艺、使用性能相适应的最佳加入量和粒度分布等一系列研究成果必然为我国介质抗内带电防护技术带来较大发展. 由于复合介质非线性电导率产生机理所能检索到的相关文献极少,因此以下有关本实验研究结果机理的讨论主要根据本文的研究经验和电介质物理理论推测.

本文认为,复合介质出现非线性电导的原因大致为:由于添加剂具有远高于基体树脂的电导率,按照介质物理理论[13],在外施直流电压的情况下,应用串联复合介质模型,对比图 4 和图 5,对复合材料非线性电导做如下描述(见图 7):①聚合物欧姆电导区. 较低电场下,复合材料内部的局部电场按电导率呈反比分布,电场主要由基体树脂承担. 此时复合介质呈现聚合物基体的欧姆特性. ②聚合物薄层隧道电流产生区. 距离为纳米级的 2 个添加剂粒子间的聚合物薄层首先出现“隧道”效应电流[14],此时宏观电流随外加电场上升而非线性上升. ③聚合物局部强场电导产生区. 外施电压进一步上升,距离为纳米 ~ 微米级的聚合物薄层上出现局部强场电导,此时聚合物薄层上的局部强场电导将远大于添加剂粒子的体电导,主要电场转为由添加剂粒子承担,宏观电流迅速上升. ④添加剂欧姆电导区. 外施电压继续上升,所有聚合物薄层上均出现强场电导,由于添加剂电阻的限流作用,宏观电流近似线性上升. 复合材料又一次出现以添加剂为主体的欧姆特征. ⑤宏观强场电导区. 在复合材料击穿前夕,整体材料必然出现强场电导,最终必将再一次出现电流陡增情况.

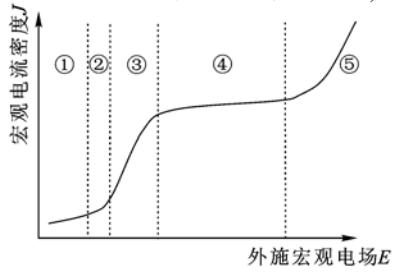


图 7　复合介质的理想非线性电导特性

4　结　论

1)采用电导率远低于基体树脂的无机添加剂对 PI、环氧树脂和 Teflon 等航天器用聚合物材料进行非线性电导改性,复合材料均会产生显著的非线性电导特性. 改性试样的直流击穿强度基本不发生改变.

2)添加剂粒子之间的聚合物薄层上出现隧道电流和局部强场电导是复合介质产生非线性电导的根本原因. 主要电场在聚合物薄层和添加剂粒子之间转化,添加剂粒子的限流作用以及整体复合介质最终出现强场电导就是非线性电导的全貌.

通过对 3 种空间聚合物材料的非线性电导率改性试样的制备工艺研究,发现改性后的复合材料具有预计的非线性电导特性,初步研究获得了预期结果. 可以预料,复合介质优良的非线性电导特性,有利于及时泄放掉介质中因高能电子注入积累的静电荷,达到介质抗深层带电的防护目标. 但研究是否满足工程应用需要,还有许多路要走:①最适宜添加剂品种选择;②添加剂粒度和粒度分布选择;③添加剂自身的配比研究;④添加剂与基体树脂的相容性研究;⑤复合材料机械性能研究等. 此外,复合材料是否满足消除脉冲型放电的目标,还要依赖于热刺激电流(TSC, Thermally Stimulated Current)等实验来验证,最终还要通过空间环境模拟实验进行验证. 还需要在线测量介质在高能电子注入情况下的电荷聚集程度、在线电导特性分析等.

参考文献(References)

[1] 丁义刚,冯伟泉. 带电粒子在材料中的剂量深度分布计算[J]. 航天器环境工程,2005,22(5):283 – 288
Ding Yigang, Feng Weiquan. Study on dose-depth profile calculation of charged particles in the materials [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2005, 22(5): 283 – 288 (in Chinese)

[2] 闫小娟,陈东,黄建国,等. 诱发卫星深层充电的高能电子环境模式研究[J]. 航天器环境工程,2008,25(2):120 – 124
Yan Xiaojuan, Chen Dong, Huang Jianguo, et al. A space energetic electron environment model for spacecraft deep dielectric charging evaluation [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(2): 120 – 124 (in Chinese)

[3] 黄建国,陈东. 卫星中介质深层充电特征研究[J]. 物理学报,2004,53(3):0961 – 0966
Huang Jianguo, Chen Dong. A study of characteristics for deep dielectric charging on satellites[J]. Acta Physica Sinica, 2004,

53(3):0961 - 0966(in Chinese)

[4] 黄建国,陈东. 卫星介质深层充电的计算机模拟研究[J]. 地球物理学报,2004,47(3):392 - 397
Huang Jianguo, Chen Dong. A study of deep dielectric charge on satellites by computer simultion[J]. Chinese Journal of Geophysics,2004,47(3):392 - 397(in Chinese)

[5] 黄建国,陈东,师立勤. 卫星介质深层充电中的主要物理问题[J]. 空间科学学报,2004,24(5):346 - 353
Huang Jianguo, Chen Dong, Shi Liqin. Key physical problems in deep dielectric charge on satellites [J]. Chinese Journal of Space Science,2004,24(5):346 - 353(in Chinese)

[6] 杨勇,易忠,院小雪,等. 卫星介质深层充电电场时域差分计算方法研究[J]. 宇航学报,2008,29(1):276 - 281
Yang Yong, Yi Zhong, Yuan Xiaoxue, et al. Study on calculation method of the internal charging electric field on satellites dielectric by time domain differential [J]. Journal of Astronautics, 2008,29(1):276 - 281(in Chinese)

[7] 高炳荣,郝永强,焦维新. 用蒙特卡罗方法研究卫星内部带电问题[J]. 空间科学学报,2004,24(4):289 - 294
Gao Bingrong, Hao Yongqiang, Jiao Weixin. A study on spacecraft internal charging with Monte Carlo method[J]. Chinese Journal of Space Science,2004,24(4):289 - 294(in Chinese)

[8] 黄建国,陈东. 不同接地方式的卫星介质深层充电研究[J]. 物理学报,2004,53(5):1611 - 1616
Huang Jianguo, Chen Dong. A study of deep dielectric charging on satellites for different grounding patterns [J]. Acta Physica Sinica,2004,53(5):1611 - 1616(in Chinese)

[9] 马亚莉,王立,秦晓刚,等. 空间电荷测量技术在卫星内带电分析中的应用[J]. 真空与低温,2007,13(2):120 - 124
Ma Yali, Wang Li, Qin Xiaogang, et al. Application of the measurement techniques of space charge distribution in the internal dielectric charge anlysis[J]. Vacuum and Cryogenics,2007,13(2):120 - 124(in Chinese)

[10] 秦晓刚,郑晓泉,王立. 航天介质材料寿命的电性能评估技术[J]. 真空与低温,2007,13(4):198 - 201
Qin Xiaogang, Zheng Xiaoquan, Wang Li. Life evaluation technology of spacecraft dielectric on electrical parameters [J]. Vacuum and Cryogenics,2007,13(4):198 - 201(in Chinese)

[11] 郑晓泉,王立,秦晓刚. 空间环境下介质的可靠性与寿命的地面评价方法研究[J]. 绝缘材料,2006,39(2):24 - 28
Zheng Xiaoquan , Wang Li , Qin Xiaogang. Study on evaluation method of dielectric reliability and working life in space environment [J]. Insulating Materials, 2006, 39(2):24 - 28(in Chinese)

[12] 韩建伟,张振龙,黄建国,等. 卫星介质深层充放电模拟实验装置研制进展[J]. 航天器环境工程 2007,24(1):47 - 50
Han Jianwei, Zhang Zhenlong, Huang Jianguo, et al. An environmental simulation facility for study of deep dielectric charging on satellites [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2007,24(1):47 - 50(in Chinese)

[13] 金维芳. 电介质物理学[M]. 北京:机械工业出版社,1995
Jin Weifang. Dielectric physics[M]. Beijing: Mechanical Industry Publications Company,1995(in Chinese)

[14] Tu D M, Wu H C, Xi B F. Dielectric behavior of as + implanted polyethylene terephthalate films[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,1992,2(27):383 - 390

(编 辑:张 嵘)

(上接第179页)

[7] Yagdar O, Agno A, Vincent R. UAV airspace management system UAMS[C]//5th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. Hakodate: Association for Computing Machinery,2006:1 - 3

[8] 王世锦,隋东. 低空空域飞行冲突风险研究[J]. 西南交通大学学报,2010,45(1):116 - 123
Wang Shijin, Sui Dong. Risk analysis of flight conflict in low altitude airspace [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010,45(1):116 - 123(in Chinese)

[9] 王英勋,蔡志浩. 无人机的自主飞行控制[J]. 航空制造技术,2009,8(8):26 - 31
Wang Yingxun, Cai Zhihao. Autonomous flight control of unmanned aerial vehicle[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2009,8(8):26 - 31(in Chinese)

[10] Correa M A, Camargo J B, Jr. Introducing UAV in the CNS/ATM using cooperative multiagent negotiation[C]//European Safety and Reliability Conference. Stavanger: Taylor and Francis Balkema,2007:2077 - 2084

[11] Pena N, Scarlatti D, Ollero A. UAVs integration in the SWIM based architecture for ATM[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications,2009,54(1/2/3):39 - 59

[12] Lauzon M, Rabbath C, Gagnon E. UAV autonomy for complex environments[C]//SPIE Unmanned Systems Technology VIII. Kissimmee: SPIE,2006:62300J

[13] Simon J N, Braasch M S. Deriving sensible requirements for UAV sense-and-avoid systems[C]//28th Digital Avionics Systems Conference. Orlando: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc,2009:6. C. 4-1 - 6. C. 4-12

[14] Rosales J J, Toledo M, Bonardi L, et al. Development of a UAV low-cost navigation system prototype for ATM applications [C]//22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Savannah: Institute of Navigation,2009:3471 - 3479

(编 辑:李 晶)