

环境效应与防护

基于碳纤维复合材料的可重复使用
运载器静电防护研究

武杰, 郑宏涛

(中国运载火箭技术研究院研究发展中心, 北京 100076)

摘要: **目的** 研究可重复使用运载器的静电防护方案。**方法** 针对可重复使用运载器特点, 以及飞行期间遭遇的空间静电放电环境, 基于空间静电带电数学模型, 计算出运载器表面材料带电离子的静电充电电位。在此基础上, 分析复合材料静电特性, 提出静电防护层与电气设备等电位共地方案。**结果** 该方案采用碳纤维复合材料作为静电防护层, 与大截面积的接地母线相连, 为运载器电气设备提供低阻抗、大电荷容量的等电位地。**结论** 该方案能够有效抵御静电产生的干扰, 为运载器电子设备提供可靠、安全、抗干扰的电磁环境。另外, 该方案工艺实现简单, 大大减轻了运载器的设计质量。

关键词: 可重复使用运载器; 复合材料; 空间静电充放电; 静电防护

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.07.015

中图分类号: TJ04; V258

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)07-0074-05

Electrostatic Protection of Reusable Launch Vehicle Based on Carbon
Fiber Composite Material

WU Jie, ZHENG Hong-tao

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: Objective To research the electrostatic protection scheme of reusable launch vehicles. **Methods** According to the working environment characteristics and the space electrostatic discharge environment encountered by reusable launch vehicle, the mathematical model of the space charge was established to calculate the electrostatic charge potential of charged ions on the surface of reusable launch vehicle. On this basis, the static characteristics of a large number of materials were analyzed, and the integration scheme of electrostatic protection layer and electrical equipment were proposed. **Results** Carbon fibre composite was taken as an electrostatic protection layer to connect ground bus of large section to provide equipotential of low resistance and large charge capacity for electrical equipment of vehicle. **Conclusion** The scheme can effectively resist the disturbance caused by static electricity, and provide a reliable, safe and anti-interference electromagnetic environment for the electronic equipment. In addition, the method is simple, which greatly reduces the weight of the vehicle.

KEY WORDS: reusable launch vehicle; composite materials; space electrostatic charge-discharge; electrostatic protection

可重复使用运载器是一种低成本、高收益、长期在轨、水平着陆的新一代天地往返运输系统。其在空间高速飞行过程中, 由于空间带电离子的存在及运载器表面

与大气摩擦会产生大量静电荷。静电荷会沿着运载器表面结构材料以一定的扩散速度进行扩散。如果运载器结构材料的电阻率很大, 就会阻挡静电荷的流动和均匀

收稿日期: 2017-01-12; 修订日期: 2017-02-18

作者简介: 武杰(1975—), 男, 山西霍州人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为飞行器总体设计。

性,导致运载器不同区域出现很强的电势差,一旦堆积在运载器表面的静电荷超过一定阈值,就会产生瞬间静电放电^[1]。静电放电会对运载器电气设备产生电磁干扰、电源和敏感器件损坏以及表面材料性能退化,严重时会引起运载器在轨工作异常或故障^[2]。

为达到减轻机体质量,增加任务载荷目的,可重复使用运载器整机身采用先进复合材料成为必然选择。复合材料也有自身缺点,由于其具有非金属特点,所以无法达到金属所具有的良好导电性能。当遇到静电环境时,运载器机身无法实现等电位而产生静电放电,对其安装内部的电子设备产生干扰,因而静电防护及等电位设计问题成为制约可重复使用运载器的环境适应性关键问题。

根据静电理论,不同物质间相互作用的静电起电机理不同,带电极性和带电量存在显著差别。另外,大气压、环境温湿度、风速等因素也会影响起电过程^[3]。由此可见,解决可重复使用运载器静电防护问题离不开对环境、材料及等电位研究,为此,可重复使用运载器静电防护主要从以下几个方面开展。

1) 对运载器所处的环境进行研究,结合材料的静电特性确定带电效应和放电机理。

2) 对运载器常用复合材料的静电特性进行研究,分析其静电特性、工艺特性等优缺点。

3) 根据空间带电环境特点和复合材料静电特性,研究基于复合材料的可重复使用运载器静电防护设计方案。

1 空间带电环境研究

运载器产品在运输、系统联试、总装、贮存等过程中,会遇到操作人员、雷击、摩擦产生的静电放电干扰。除与常规电子设备和系统遭受的危害相似外,还有发射前后、在轨、再入段所遇到的空间带电问题。

在地面测试段,地面操作人员、雷击、摩擦产生的静电放电干扰,人体静电会产生几至几十千伏电压^[4],带静电的产品在放电时会产生放电电流,导致产品故障或损坏。发射上升段,运载器一般安装在火箭整流罩内。火箭上升段的静电防护主要由火箭完成。

可重复使用运载器主要活动空间为低轨道,其空间带电以表面带电为主^[5],因此,空间表面带电主要与运载器热防护材料相关。热防护层与等离子体相互作用,可能导致运载器表面充电。由于这些材料导电性能差别,以及材料二次电子特性差异等因素的影响,不同部位、不同材料具有不同的电位^[6]。

基于气体动理论,利用粒子的麦克斯韦速度分布函数对表面电位进行求解。该方法能够根据运载器不同材料、不同区域及不同运动情况,较为精确地计算出了运载器表面充电表达式^[7]。

由气体动理论得:

$$d\Gamma = n f(v_x) v_x dv_x \quad (1)$$

$$f(v_x) = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \exp\left(-\frac{mv_x^2}{2kT}\right) \quad (2)$$

式中: n 为等离子体密度; Γ 为电流密度; k 为玻尔兹曼常数; T 为等离子体温度; m 为等离子质量; v 为等离子速度。

运载器达到电位稳定后,总电流密度为0,即:

$$\Gamma_e = \Gamma_i + \delta(\Gamma_e + \Gamma_i) + \Gamma_{Fe} + \Gamma_{Ve} \quad (3)$$

式中: Γ_e 为电子电流密度; Γ_i 为正离子电流密度; Γ_{Fe} 为介质材料表面电流密度; Γ_{Ve} 为介质材料体内电子流密度。

整理后得空间静电带电数学模型:

$$U = -\frac{m_e}{2e} \left[\left(-\frac{2kT_e}{m_e} \ln \frac{n_i(1+\delta)\sqrt{m_e T_i/m_i T_e}}{(1-\delta)n_e} \right)^{1/2} + v_s \right]^2 \quad (4)$$

式中: δ 为材料二次发射系数; e 为电子电量; T_e 和 T_i 为等离子体的电子温度和离子温度; n_e 和 n_i 为等离子体电子密度和离子密度; m_e 和 m_i 为等离子体电子质量和离子质量; v_s 为飞行器相对于等离子环境的速度; k 为玻尔兹曼常数。

从空间静电带电数学模型可以看出,等离子体温度、材料的二次发射系数是影响充电量级的主要参数。以地球低轨道等离子环境参数为例,选取不同热防护材料进行运载器表面充电计算。由图1可知,可重复使用运载器空间带电环境不会产生大于1 V 的电位。运载器表面充电电位由等离子体环境变化而决定,在低轨环境下,航天器带电最大充电电压不会超过几十伏^[5]。

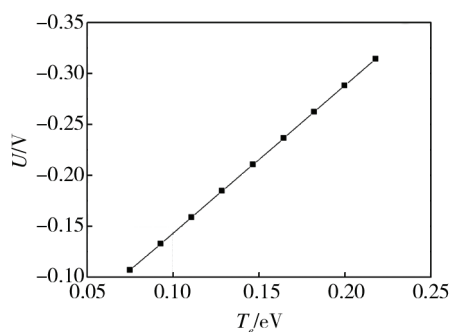


图1 运载器表面电位与电子温度关系

通过对空间静电带电环境可知,由于充电电压低,运载器空间环境产生的静电干扰较小。因此,静电防护重点集中在地面操作、测试及运输产生的静电防护上。在发生静电放电干扰时,应使运载器表面形成等电位,不要直接侵入内部电路,通过国内外的大量调研和详细分析,形成了以“法拉第筒”进行飞行器等电位设计的指导思想^[8]。可重复将运载器材料用全复材作为其机身,由于其具有非金属特点,因此无法

达到金属所具有的良好导电性能。由此可重复使用运载器表面材料的静电特性是否能够满足静电防护需求成为研究重点。

2 材料的静电特性研究

评价材料静电特性的重要参数是电阻率,包括表面电阻率和体电阻率。表面电阻率定义为单位宽度、

单位长度材料的表面电阻值,即正方形材料两对边间的表面电阻值,其数值大小与正方形的几何尺寸无关。体电阻率定义为单位横截面积单位长度上材料的体积电阻值。

参照表1中的内容,静电防护材料的电阻率一般控制在 $10^4 \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 区段。大部分研究人员认为电阻率介于 $10^7 \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 范围时,材料就已具备传导和耗散静电电荷的能力^[9]。

表1 材料的电阻率分布

电阻率 $\rho_v/(\Omega \cdot \text{m})$	性质	用途
$>10^{10}$	绝缘材料	输电网络部件绝缘、电容器介质
$10^7 \sim 10^{10}$	半导体、防静电或除静电	静电消除器、集成电路、产品的包装、防静电传送带和防静电地板等;
$10^4 \sim 10^7$		家用电器、设备仪器外壳等电路元件、电缆半导体层
$10^2 \sim 10^4$	导电	电路元件、电缆半导体层
$10 \sim 10^2$	电阻体、电极材料	传感器电极、弹性电极
<10	高导电	导电涂料、导电胶粘剂、电磁屏蔽材料

运载器主要涉及两层的结构材料,由外至内分别为热防护结构和承载结构,电气设备包裹在结构层内部。如果运载器结构材料电阻率静电特性能够达到防静电要求(小于 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$),则可形成对其内部设备构成具有“法拉第筒”效应静电防护层,具有静电泄放和电磁屏蔽作用,对其内部线缆,电子线路和部件提供静电防护。

2.1 热防护材料静电特性研究

热防护材料是一种为适应航天器特殊工程环境而研制的专用功能材料,作为耐热材料除了必须具备良好的耐烧蚀综合性能外,还需具有一定的力学性能和热物理性能,使其在气动环境下仍能保持结构的承载能力和热物理性能。相继研制成功的烧蚀耐热材料已有多种,适用于不同的工作环境。按其基体的不同,可分为碳基、树脂基和陶瓷基三类^[10]。

碳基耐热材料指多晶石墨和碳-碳复合材料。碳是高导体,因此碳基耐热材料一般具有良好的导电性能。树脂基耐热材料有玻璃-酚醛、高硅氧-酚醛、碳-酚醛和以不同树脂为基体的低密度烧蚀材料,导电性能差。陶瓷基耐热材料至今只有碳-石英一种,属于绝缘材料^[11]。为了减轻质量、节约成本,运载器热防护往往会同时使用几种不同热防护材料,即碳基、树脂基和陶瓷基混用,不同热防护材料电阻率特性不相同,在运载器表面将呈现不同的带电特性,存在电势差,易产生静电放电。为了保障热防护层性能,无法在热防护层表面预埋金属导线或喷涂导电涂层,因此,热防护层无法完成静电防护,而且还可能产生静电干扰。

根据静电放电的特点和任务环境分析,空中高速

运动的物体会带上静电产生电晕放电^[12]。电晕放电工程伴随强烈的电磁辐射,其对运载器舱内电子设备、天线端口电路产生干扰,电磁辐射的主要参数是放电辐射场的频谱和幅值等。图2为模拟电晕放电试验,在高压源加 $\pm 60 \text{ kV}$ 情况下,测得电晕放电辐射场的时域特征表现为衰减振荡脉冲,具有很快的上升沿电晕放电辐射场的频率分布范围较大,低频成分在 100 MHz 以下,高频成分能达到 640 MHz ,幅值能达到 -50 dBm 。

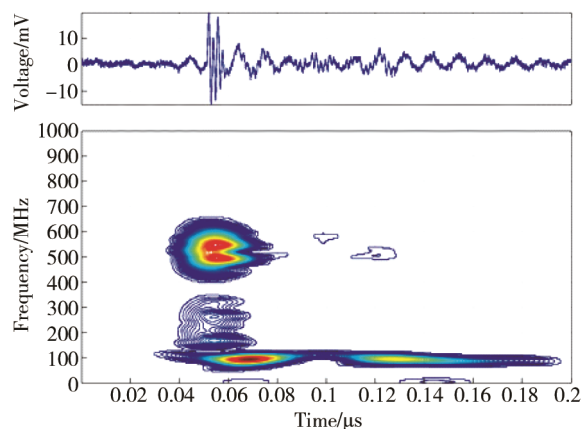


图2 典型电晕放电辐射场时频分析

运载器上天线一般布在飞行器表面,离热防护最近,最易受热防护静电放电干扰。因此,运载器在进行天线频点设计时,应尽量避免 1 GHz 以下频段。这样即使热防护材料产生静电放电,对运载器电气工作不会产生影响。

2.2 承载结构材料静电特性研究

为提高航天器的结构效率,具有高性能的先进复

合材料成为新一代航天产品不可缺少的结构材料^[10]。碳纤维具有高比强度、高比模量、耐高温及导电等优异性能,在航天、航空、兵器、船舶、核等国防领域具有重要作用。碳纤维复合材料可用作飞机结构材料、电磁屏蔽除电材料以及用于制造火箭外壳、机动船、工业机器人等^[13]。

目前利用复合材料实现静电防护功能的常用方法主要有三种:利用碳纤维复合材料自身导电性能;复合材料表面覆金属导电膜;复合材料表面覆导电涂层。航空飞机通过碳纤维高性能复合材料表面预埋金属网格和在复合材料蒙皮表面喷涂一层金属铝,以实现静电防护,该方案在空客 A380、A350 和波音 787 飞机中被大范围采用^[14]。火箭整流罩通过表面预埋金属导线并与箭体进行搭接处理,同时在表面喷涂导电涂层以实现静电防护。

1) 碳纤维复合材料自身导电性能。碳纤维复合材料由良好导电性能的碳纤维(电阻率 $\rho \approx (1.0 \sim 1.5) \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$)来实现^[15]。碳纤维复合材料结构采用碳纤维增强环氧树脂基复合材料,该材料通常称为“预浸料”,是大量单丝纤维束或经过编织的纤维编织物。通过专业热熔预浸设备,在一定的温度和压力条件下浸渍环氧树脂基体而形成。由于环氧树脂电阻率比较高,且加工过程中碳纤维容易破碎,因此复合材料的电阻率很大($\rho \approx 10^4 \Omega \cdot \text{m}$),而且呈现各向异性^[16-17]。

2) 复合材料表面覆金属导电膜。金属导电膜具有导电性好、电磁屏蔽性能好等优点。图3为 Henkel 公司 SynSkin 9837.1LS 系列导电膜组成。碳纤维复合材料表面覆金属导电膜,导电膜组成包括金属网、PE 织物、表面膜和衬纸。

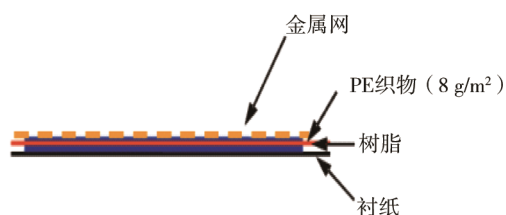


图3 SynSkin 9837.1LS 系列导电膜组成

由图3可知,复合材料 9837.1LS 表面覆金属网静电防护效果取决于金属网特性。其性能参数:面密度为 73 g/m^2 ,胶膜固化后厚度为 $0.102 \sim 0.1778 \text{ mm}$,铜网电阻为 $0.78 \text{ m}\Omega/\text{m}^2$ 。由此可知,复合材料表面覆金属网具有良好的导电性能。

3) 复合材料表面覆导电涂层。涂层具有功能可设计性强、工艺简便等特点,是运载器外表面防护的主要材料。防静电涂层体系结构如图4所示。

由图4可知,复合材料表面覆导电涂层静电防护效果取决于涂层特性。目前航天系统内常用防静电涂

层主要有两种:TL-19 系列四防漆和 TX-1 型丙烯酸导电漆。

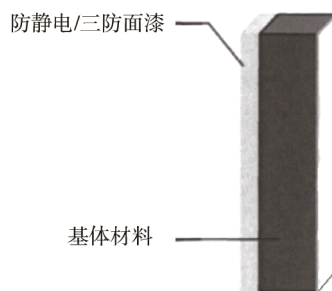


图4 防静电涂层体系结构

通过比较静电防护功能的三种常用方法可知:相比方法二和方法三,碳纤维复合材料自身导电性能最差,但其自身导电性能已远远满足小于 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 的防静电要求。复合材料表面覆金属导电膜电导率特性最好,但其会增加复合材料质量。复合材料表面覆导电涂层导电性能取决于涂层的金属含量,金属含量越高,导电性能越好,同样质量也会越大。

对于可重复使用运载器,其承载结构在热防护内部,在承载结构表面覆金属导电膜和涂覆层,存在与热防护层相容性问题,实施难度大,而且增加很大质量。综合考虑三种方案质量、成本、工艺实施难度,通过碳纤维复合材料作为运载器静电防护层,实现具有“法拉第筒”等电位静电防护设计方案为最优方案。由于碳纤维复合材料通过碳纤维浸渍环氧树脂基体而形成,因此其电阻性能不稳定,使用时需要对材料进行测试后选用,必要时可采用对碳纤维化学镀金属方法,提高复合材料的导电性和屏蔽效能^[16]。

3 等电位设计研究

碳纤维复合材料虽然具备传导和耗散静电电荷的能力,以及静电防护能力,但是对于运载器电气系统,其共地阻抗较大且各向分布不均匀,因此无法作为运载器接地主体。

为避免形成公共阻抗干扰和接地闭合环路,可采用图5方式布置,准备一条接地母线连接各单机接地点,由接地母线去接接地极。为了减少接地引线的阻抗特别是电感,最好采用截面积大于 60 mm^2 的扁平铜排作为总接地母线,一般分支接地线也要采用截面积大于 22 mm^2 的铜导线^[4]。将接地母线与承载结构静电防护层相连,形成运载器静电防护等电位地。在地面操作、测试及运输时,通过接地桩将运载器上的静电导入大地。该方案既实现了运载器电气设备大容量、低阻抗等电位地要求,又实现了静电防护功能。为运载器电子设备提供可靠、安全、抗干扰的电磁环境。

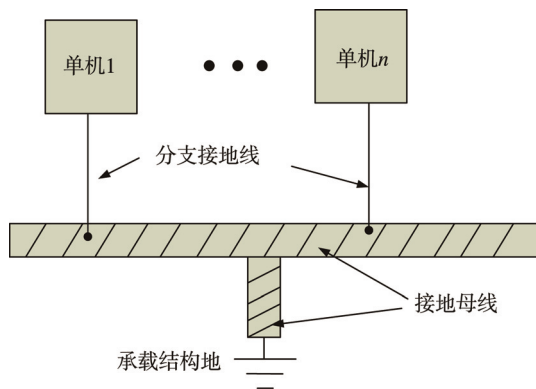


图5 运载器等电位地线布置

4 结论

通过对可重复使用运载器环境特点、所用材料静电特性研究，得到如下结论。

1) 根据运载器任务特点，基于空间静电带电数学模型，通过计算证明空间环境产生的静电干扰较小，可以忽略不考虑。静电防护重点应集中地面操作、测试及运输产生的静电干扰上。

2) 通过对热防护材料静电特性测试，可知热防护材料表面将呈现不同的带电特性，对热防护材料产生的静电干扰措施主要是通过对天线频点进行合理分配，避开静电放电产生的干扰频段。

3) 通过比较运载器承载结构常用的三种静电防护方案，综合考虑三种构型质量、成本、工艺实施难度，通过碳纤维复合材料作为运载器内部设备的静电防护层实现静电防护的方案为最优方案。

4) 通过设计接地母线，解决了运载器由于大量使用复合材料导致运载器电气设备无参考零电位问题。通过将接地母线与承载结构静电防护层相连，既实现了运载器静电防护功能，又为运载器电子设备提供可靠、安全、抗干扰的电磁环境，达到可重复使用运载器静电防护目的。

参考文献:

- [1] 刘尚合. 静电理论与防护[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1999: 327—333.
- [2] 曹敏. 飞行器防空间静电放电设计和试验技术[J]. 装备环境工程, 2011, 8(4): 117—121.
- [3] 杜熙恒, 刘尚合, 魏明, 等. 飞行器静电起电与放电模型及仿真分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2807—2809.
- [4] 沙斐. 机电一体化系统的电磁兼容技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 159—167.
- [5] 黄本诚, 童靖宇. 空间环境工程学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010: 445—474.
- [6] 原青云, 孙永卫, 刘存礼. 空间环境下航天器材料表面带电性能试验方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1644—1649.
- [7] 曹鹤飞, 刘尚合, 孙永卫, 等. 等离子体环境非偏置固体表面带电研究[J]. 物理学报, 2013, 62(11): 119401.
- [8] 王立. 航天器的表面带电及防带电设计[J]. 航天器工程, 1994(5): 42—48.
- [9] 张金星. 石墨填充复合材料静电防护与阻燃性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [10] 于翹. 材料工艺(下)[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009: 1—5.
- [11] 陈圣杰, 郑剑平, 杨继材, 等. 陶瓷电绝缘材料高温电阻测量技术研究[J]. 真空电子技术, 2010(1): 53—55.
- [12] 胡小锋, 魏明, 王雷. 电晕放电辐射场的测试与分析[J]. 河北大学学报, 2011, 8(4): 585—588.
- [13] 何凤梅, 李建平, 陈聪慧, 等. 碳纤维电阻率的评价表征[J]. 宇航材料工艺, 2012(2): 109—111.
- [14] 沈真. 碳纤维复合材料在飞机结构中的应用[J]. 高科技纤维与应用, 2010, 35(4): 1—4.
- [15] 王高潮, 徐学春, 谢小林. 载荷下碳纤维复合材料电阻变化研究进展[J]. 失效分析与预防, 2012, 7(3): 201—204.
- [16] 闫丽丽, 乔妙杰, 雷忆三. 化学镀镍碳纤维/环氧树脂复合材料电磁屏蔽性能[J]. 复合材料学报, 2013, 30(2): 43—49.
- [17] 李威, 郭权锋. 碳纤维复合材料在航天领域的应用[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 201—210.