

# 真空绝缘处理在航天电子产品上的应用

成 钢, 尹晓丽, 郑 瀚, 李 尧

兰州空间技术物理研究所, 甘肃 兰州

Email: chenggang670108@sohu.com

收稿日期: 2020年9月9日; 录用日期: 2020年9月22日; 发布日期: 2020年9月29日

---

## 摘 要

真空绝缘处理是高电压绝缘防护的方法之一。本文从真空绝缘的理论入手, 对某航天高压电子产品特殊工作环境进行分析, 并对实际的产品进行了绝缘设计及工艺验证。结果表明, 采用真空气相沉积工艺在电极表面涂敷一定厚度的Parylene涂层, 可以更好地满足产品在真空环境下的绝缘防护性能要求。

## 关键词

真空绝缘, 高电压, 防护

---

# Vacuum Insulation Theory Application in Aerospace Electronics

Gang Cheng, Xiaoli Yin, Han Zheng, Yao Li

Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou Gansu

Email: chenggang670108@sohu.com

Received: Sep. 9<sup>th</sup>, 2020; accepted: Sep. 22<sup>nd</sup>, 2020; published: Sep. 29<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Vacuum insulation technology is one of the methods of high voltage insulation protection. This article starts with the theory of vacuum insulation, analyzes the special working environment of a certain aerospace high-voltage electronic product, insulation design and process verification were performed on the actual product. The results show that applying a vacuum vapor deposition process on the electrode surface to coat a certain thickness of Parylene coating can better meet the product's insulation and protection performance requirements in a vacuum environment.

## Keywords

Vacuum Insulation, High Voltage, Defend

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



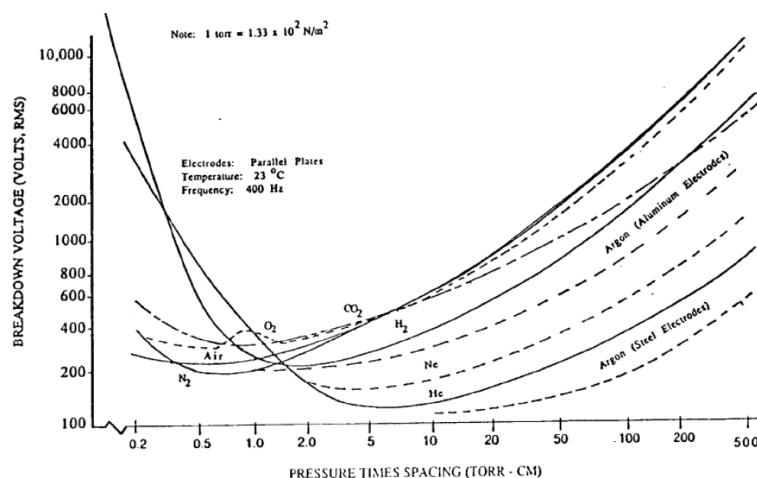
Open Access

## 1. 引言

航天电子设备与普通的地面设备相比较有着特殊的使用环境, 因此在许多方面有着特殊的要求。电子设备的绝缘问题在航天高电压设备中表现更为明显[1]。高压绝缘工艺是和绝缘材料相互结合的, 不同的绝缘材料需要不同的绝缘工艺来实施。绝缘的常用方式从形态上可以分为固相、液相和气相以及真空绝缘。其中应用最广泛的时固相绝缘, 固态的绝缘材料常见的代表材料有环氧树脂、硅橡胶、聚氨酯类物质。在工业领域, 作为液态绝缘材料的各种绝缘油也经常应用, 绝缘油有较好的击穿自愈特性和散热特性; 在某些高压电子设备中还应用到了以 SF6 为代表的气体绝缘材料。另外一类“绝缘”就是没有绝缘材料, 而是利用真空环境进行绝缘防护的应用。常见的有真空高压接触器、真空高压开关等(真空环境下也避免了切换过程中电弧的产生)。地面的真空环境需要人工进行抽真空过程, 在一个封闭的空间里形成局部的真空环境, 为了保证真空度, 需要对密封性能提出了较高的要求。作为宇航使用, 在较高的真空环境下, 不存在大量的粒子形成导电介质, 因此真空绝缘是另外一种高压防护方式。对于在太空飞行的航天器来讲, 真空是一个天然的、现实的外部环境, 为真空绝缘应用提供了绝佳的自然条件。本文结合产品对真空绝缘的理论介绍和分析, 并结合某产品的高压绝缘应用了实践和探讨。

## 2. Paschen 放电和真空绝缘机理

根据 Paschen 放电原理, 气体的击穿电压  $V_s$  是管内电极间距  $d$  和管内气压  $P$  乘积的函数。存在以下关系式:



备注: 压力转换: 1000 毫巴 = 1 巴 = 1 个大气压 = 105 帕 = 760 毫米汞柱 = 760 托。

Figure 1. Paschen curve diagram

图 1. Paschen 曲线图

$$V_s = \frac{B_0 p d}{\ln(A p d / \Phi)} \quad (1)$$

式中, A、 $B_0$ 、 $\Phi$  为常数。

根据 Paschen 定律, 对一定的气体, 存在最低的击穿电压  $V_{smin}$ , 该击穿电压所对应的  $pd$  值为  $(pd)_0$ , 这种物理关系用相应的“帕邢(Paschen)曲线”表示, 曲线在  $(pd)_0$  处分为左右两支。它给出了击穿电压与压力和间隙间距的函数关系, 如图 1 所示。

Paschen 击穿是与气体绝缘击穿相关的效应表现。对于所有的气体或气体混合物来说, 存在一个电极间的最小电压, 当低于此电压时不会发生能够导致电晕或电压击穿的雪崩放电形式的电气击穿。当电位高于此最小值时, 雪崩放电所需要的初始值可以基于气体或气体混合物的 Paschen 曲线来求得, 通过考虑不同的电场和气体固体绝缘材料进行修正得到。

雪崩放电的初始电压是一个跟气体密度、极间气隙距离有关的函数, 气隙距离包括导体上不超过气隙距离的固体绝缘厚度, 它完全符合雪崩击穿理论。由于雪崩击穿, 总是存在最佳状态, 其中分子距离(由气体压力给出)和电场强度(由总间隙距离给出)提供电离的最佳条件。对于这些“最佳”条件, 结果是非常低的击穿电压。

从研究结果看, Paschen 曲线及其最小值取决于[2]:

- a) 气体成分组成;
- b) 电压类型: AC, DC 或脉冲(对于大多数电压类型, 峰值电压是最具决定性的值);
- c) 电极材料及形状。

因此, 接近于 0 Pa 的真空环境, 已经远在 Paschen 曲线的左侧, 见图 1 所示, 电子的自由行程远大于极间距离, 使得碰撞电离实际上不可能发生, 故按照碰撞电离学说,  $pd$  极小时,  $V_s$  将趋于无穷, 真空正是理想的绝缘“材料”。但是场强或温度的继续提高, 阴极会出现强场发射而导致击穿和微粒引发的击穿。强场发射和材料特性、温度和场强相关。试验表明, 压力低于 133 Pa 后, 击穿场强很高, 且与剩余压力关系很小; 但剩余压力高于 133 Pa 时, 击穿场强急剧下降。电极表面的绝缘杂质、电极表面与电机绝缘的金属、非金属微粒都是很强的场致电子发射点[3]。

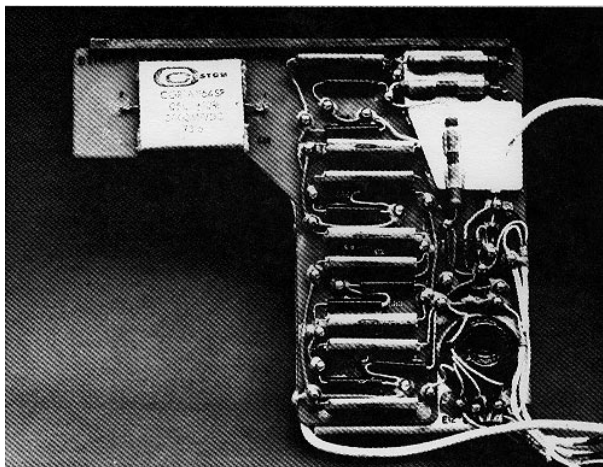
真空绝缘是基于空气击穿放电的机理, 不同于固体或液体绝缘, 因其本身的“真空”, 缺少足够的可以移动的离子, 也不会受到材料老化影响, 不会受到机械, 热, 化学, 湿度、辐射等因素的影响, 这是在应用时的天然形成的许多优点, 正是基于这些优点, 分析认为更符合在空间环境中应用的高电压电子产品, 结合具体的产品上, 将真空绝缘作为一种绝缘方式进行试验验证。

### 3. 真空绝缘的应用和验证

在国外的航天电子产品耐高压绝缘设计中, 也曾采用真空绝缘的方式, 比如: 应用与空间地球观测任务的 ERS-C 波段雷达, 工作电压为 15 kV DC 和 2 kV DC。高压产品的结构设计入图 2 所示。在元器件的焊接方面, 采用近似球形表面的焊点, 有利于减少电极表面的场强分布, 这类焊点被叫做“高压焊点”。图 3 是 ECSS-E-HB-20-05A 中给出的高压焊点的实例。

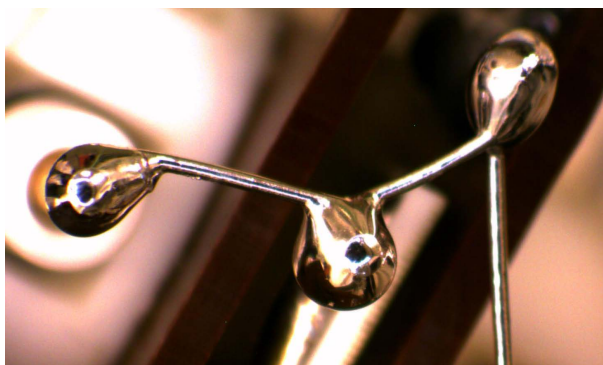
在前文的理论分析中, 电极之间放电都是在一定的空间条件下的放电机理, 对于在同一平面上的两个电极之间, 除了要考虑电极之间的距离与气压的关系之外, 表面的爬电是一个不可回避, 且是个比较重要的问题。基于真空的绝缘设计首先要确保不同电极之间表面的洁净, 洁净的表面可抑制绝缘体表面粒子吸附, 避免在电场下形成可移动粒子, 进而产生电荷碰撞产生的闪络放电; 严重的污染本身也会导致沿界面的爬电而导致击穿。因此, 保证带电体表面的洁净无污染是真空绝缘强度得到保证的前提条件。基于真空的绝缘防护工艺重点就是确保带电体表面的洁净无污染。工艺的实现首先要对需高压绝缘防护

的产品进行比较彻底的清洗，利用不同的清洗剂来针对不同属性的污染物进行清洗。目前比较成熟的清洗工艺是无水乙醇清洗和掺有皂化剂的去离子水清洗。清洗后，防止后续装配过程中造成的二次污染也是关键。



**Figure 2.** High voltage structure design of a foreign aerospace electronic product [4]

**图 2.** 国外某航天电子产品的高压结构设计[4]



**Figure 3.** Examples of welding with spherical solder joints [5]

**图 3.** 采用球形焊点焊接的实例[5]

在某型号的高电压产品研制中，产品输出最高电压超过 1500 V，测试电压 3000 V，为典型的航天高电压产品。产品中用到了 TO-254 封装的高压整流器件，见图 4(a)所示，电极与电极之间的距离 1 mm 左右，电极之间的电压差约 600 V，在高真空条件下，按照表 1 推算，真空保守应用绝缘能力约为 1~10 kV/mm，具备采用真空绝缘的条件。在导线连接时，焊点采用了高压焊点工艺，焊接后的整流桥经过去离子水清洗工序，可以保证焊点和电极表面干净无污染，见图 4(b)所示。由于整流桥组件只是产品高压的一部分电路，该组件还需要装入机箱内部，然后在完成其他的装联工作。电装完成后还要经历长时间的地面存储、环境试验等工作，在这些过程中，已经得到清洁的表面是否可以得到很好的防护，是真空绝缘能力的保证。

在工程实践中，通过对现有的涂覆材料性能和工艺特点对比，选用了清洗后的组件整体进行了真空相涂覆工艺，涂层材料为 Parylene 材料，Parylene 是美国军事标准 MIL-46058C 电路板防护材料中唯一一种固态涂料，是上世纪六十年代中期美国联合碳化物公司开发的一种新型敷形涂层材料，它是一种多

分子聚合物。Parylene 涂层用独特的真空气相沉积工艺制备,即在真空条件下,对二聚体原料在 180℃ 以上加热升华为气态,再经 700℃ 左右高温裂解成单体自由基分子,单体分子进入沉积室后遇冷(室温)在被涂覆产品表面重新聚合,由活性小分子在基材表面“生长”出完全敷形的 0.1  $\mu\text{m}$  至 200  $\mu\text{m}$  的大分子的聚合物薄膜涂层,它能涂敷到各种形状的表面,包括尖锐的棱边,裂缝里和内表面。这种薄膜涂层具有厚度均匀、致密无针孔、透明无应力、不含助剂、不损伤工件、具有优异的电绝缘性和防护性[6]。该工艺的实施保证了电极表面以及电极之间的表面对污染防护。

在产品的工作温度范围内,Parylene 涂层化学性能稳定,材料的质损(TWL)小于 0.12%,可挥发物(CMV)小于 0.01%,产品进过预除气处理,在各项环境试验中,表现良好,各项性能指标满足产品的需要。因此 Parylene 是首选的真空绝缘的涂覆材料。

基于真空气相涂覆的均匀性和致密性,对焊接清洗后的整流组件进行了 Parylene C 涂覆,通过以往的涂覆经验和试验摸底,将应于真空绝缘的电极表面涂层的厚度设计为 20  $\mu\text{m}$  左右。

高压组件试件按照真空气相沉积工艺流程,采用 PDS2060VPC 真空气相涂覆机进行真空气相沉积 Parylene C 涂覆,将 Parylene 材料的均匀的涂敷在整体组件的表面。

见图 4(b)所示。通过体视显微镜检查,涂层均匀致密,表面无针孔、裂纹等缺陷,通过对陪样的剖切检查,薄膜连续性和厚度达到了设计要求。

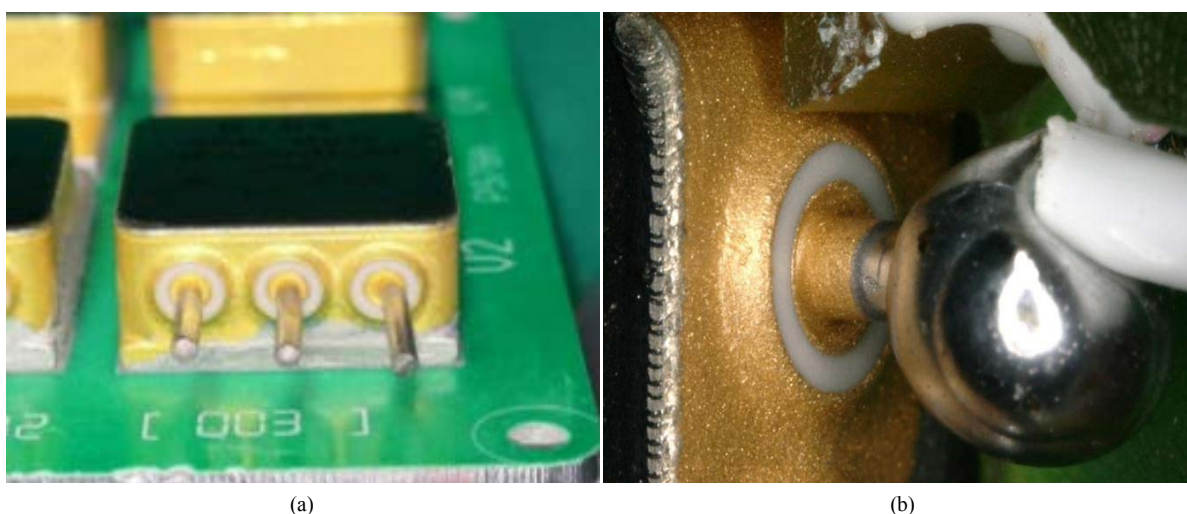


Figure 4. Pictures of before and after vacuum insulation pretreatment

图 4. 高压元器件真空绝缘预处理前后图片

在试验验证过程中,对经过真空气相沉积工艺处理的电路,进行了不同气压条件下的耐电压测试,低气压条件下(9000~100 Pa),试验件低气压下放电的起始气压均在 500 Pa 左右,击穿发生前的耐受时间超过 30 min;在小于 100 Pa 的条件下,未出现放电现象。高压模块试件经 500 次循环的高低温冲击试验后,元器件电极位置涂覆层未发现膜层起泡、脱落等现象,膜层耐压未发生变化。

经过同样工艺进行真空绝缘处理型号产品,按照产品规定的试验项目开展了全部的环境试验,在各项环境试验中表现稳定,特别是真空(低真空)条件下,未发生绝缘击穿和放电现象,性能稳定,在 1000 h 热真空加电试验中工作正常,可以长期持续工作。满足了产品的性能指标要求。

同时,在工程应用时,有一些“间接影响”需要进行考虑:

a) 对于需要密封保压的产品,压力条件可以随时间改变。密封的泄漏可能随着时间的推移而使产品内部达到临界低气压。

b) 真空下的材料的表面排气会引起与局部低气压, 除气效果随着温度上升和在真空中长时间暴露而衰减, 这通常会使得绝缘强度的改善。

#### 4. 真空绝缘适用性要求

通常, 在航天产品的实际工况下, 深空环境几乎不会存在带电粒子, 带电粒子的平均自由行程也远远超过电极间距。因而“真空”是非常好的绝缘体[2]。

然而在大多数情况下, 这种高真空是不存在的, 气体原子和带电粒子可能有以下几种来源:

- a、附近材料的出气作用;
- b、附近表面的附着气体;
- c、元器件内部残存空气;
- d、绝缘中充满了气体的空洞;
- e、航天器的气体泄漏;

这些污染会带来起晕电压沿 Paschen 中的高真空侧向最小电压点处变化, 优良的设计和生产过程控制可以使上述大部分因素最小化。对于毫米或厘米范围内的典型间隙, 临界压力在 1 Pa 至 1000 Pa 的范围内[6]。

因此作为空间应用, 真空绝缘的条件必须满足任何条件下的电极之间(附近)的气压应小于 1 Pa。经调研, 在国外的航天电子产品耐高压绝缘设计中, 采用真空绝缘有成功的案例, 而且在相关标准中也给出了设计和实施的指导。ESA 高压设计标准 ECSS-E-HB-20-05A 《High voltage engineering and design handbook》, 给出了固体或真空绝缘防护设计依据, 如表 1 所示:

**Table 1.** Maximum electric field strength of electrical insulation [5]

**表 1.** 电气绝缘的最大的电场强度取值表[5]

最大电场强度 $E_{max}$	$E_{max}$ 的典型安全适用范围	备注
1~2 kV/mm	大气环境	
5~8 kV/mm	高等级绝缘或气体加压绝缘(SF6)	
0.5~2 kV/mm	固体绝缘材料(AC)	
1~10 kV/mm	液体绝缘材料(DC)	
5~20 kV/mm	固体绝缘材料的薄层(电容器的电介质)	
0.3~0.6 kV/mm	有放电路径的固体绝缘	
1~10 kV/mm	真空绝缘	

依据 NASA 高压设计资料 PD-ED-1202 《High Voltage Power Supply Design AND Manufacturing Practice》, 给出了固体或真空绝缘防护设计依据, 如表 2 所示:

**Table 2.** High-voltage power supply design criteria [4]

**表 2.** 高压电源设计准则[4]

物理布局
电压分区(独立的高压和低压部组件)
隔离的地(为已知的电流提供通道)
电压抑制(限制高电压信号串入低电压电路)
电场

## Continued

固体绝缘:	
DC 场强	50 V/mil
AC 场强	10 V/mil
表面爬电	8 V/mil
空气或真空间距	20 V/mil

出气

每 1000 cc 封闭空间应设计大于 2 cm<sup>2</sup> 出气孔(屏蔽和射频型号例外)

为了避免真空绝缘中出现的绝缘材料污染物挥发造成的局部低气压和微粒引发的击穿效应,避免污染也是关键环节之一。污染是绝缘体表面绝缘强度降低的主要因素。汗渍、油污、灰尘的存在,会加剧表面爬电现象的产生,降低绝缘物质的介电强度。被污染的电极的击穿电压比单纯材料或合金材料电极的击穿电压要低,根据污染程度的不同,击穿电压可能会相差一个数量级[2]。在空间环境下,带电放射性粒子、紫外辐射和污染颗粒会造成另一种污染,都会影响气体的起晕电压和击穿电压[7]。电装后保证电路板以及元器件、焊点的洁净度,可以明显提高绝缘强度,降低击穿现象的发生。因此,在应用真空绝缘时,避免裸露金属表面的污染、控制材料的出气量是较为关键的因素。

## 5. 结论

真空绝缘是利用真空条件下不存在或微量存在粒子,而避免在一定的电场作用下形成的带电粒子移动而导致电流放电,从而达到绝缘的目的。该绝缘方式不同于固相、液相和气相的绝缘机理,对于航天电子产品的特殊的外层空间工作条件,真空绝缘机理可以得到充分的利用。在真空绝缘实施过程中,为了保证电极表面的“洁净”,通过对表面采用了真空气相沉积工艺,在表面形成一定厚度的 Parylene 材料的涂层防护,避免了电极表面的粒子放电,阻止电极之间表面爬电的条件,通过试验验证,获得了较理想的真空绝缘性能,满足了产品的实际应用。实践证明,利用 Parylene 材料进行配合真空绝缘的实施,在工程上是一种新的有效的绝缘方式的尝试。

## 参考文献

- [1] 成钢,王少宁. 航天高电压设备的绝缘防护研究[J]. 电子设计工程, 2011, 19(16): 144.
- [2] Marshall Space Flight Center (1978) MFSC-STD-531, High Voltage Design Criteria. American Military Standard, Alabama, 5-10.
- [3] 严璋,朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 第3版. 北京: 中国电力出版社, 2002: 95-96, 104.
- [4] NASA Lewis Research Center (1994) PD-ED-1202, High Voltage Power Supply Design and Manufacturing Practices. American Military Standard, Alabama, p. 2.
- [5] ESA (2012) ECSS-E-HB-20-05A, High Voltage Engineering and Design Handbook. p. 80.
- [6] Tato, C., Palencia, J. and De la Cruz, F. (2004) The Power Control Unit for the Propulsion Engine of GOCE Program. 4th International Spacecraft Propulsion Conference, Sardinia, 2-4 June 2004, p. 75.
- [7] (2007) Generic High Voltage Power Supply—Next Generation. 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Cincinnati, 8-11 July 2007, p. 131.