

运载火箭电气产品低气压环境适应性设计研究

武玉玉, 马 上, 阮 征, 高 波, 任一鹏

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘 要: 运载火箭生命周期内会经历低气压环境, 该环境会引发电气产品一系列不利的、具有破坏性的环境效应。因此, 电气产品在方案设计时应考虑低气压环境适应性问题。对运载火箭电气产品典型低气压环境效应及对应的设计措施进行了研究, 提出了可行的低气压环境试验考核方法, 形成了较为系统的运载火箭电气产品低气压环境适应性设计方法。该方法可为运载火箭电气产品低气压环境适应性设计提供参考。

关键词: 低气压; 环境效应; 适应性设计

中图分类号: V442

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2019) 06-0025-05

Research on Low-Pressure Environment Adaptability Design for Electrical Products on Launch Vehicles

WU Yuyu, MA Shang, RUAN Zheng, GAO Bo, REN Yipeng

(Beijing Institute of Aeronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Launch vehicles will experience low-pressure environment in its lifetime, which will cause a series of adverse and even devastating effects on electrical products. So consideration must be taken seriously when electrical products are to be designed in the project. This paper analyzes typically low-pressure environment effects on electrical products, and proposes solutions to solve these effects in the design, and explores the performance test technique in the lab, thus to establish systematical technique relatively for low-pressure environment adaptability of electrical products in the design. And this can provide reference to future electrical products.

Key words: Low-pressure; Environment effects; Adaptability design

0 引言

在地球引力作用下, 空气依附在地球周围。空气具有一定的质量, 在距离地球表面的不同高度形成压力, 该压力被称为大气压力(简称气压)^[1]。作用在单位面积上的气压, 在数值上等于单位面积上向上延伸到大气上界的垂直空气柱所受到的重力。离地球表面越远(海拔越高), 气压越低。在标准海平面, 大气压力为 101325Pa; 在海平面以上的 30km 以内, 气压下降速率为 10Pa/

m; 在接近 31km 处的大气压力约为海平面标准大气压值的 1%。通常把低于标准海平面的气压称为低气压。

运载火箭在其寿命周期内(包括生产、贮存、运输及飞行等剖面)会经历低气压环境, 特别是运载火箭起飞后, 气压从近似标准气压持续下降, 直至真空。低气压会对箭上电气产品形成环境效应, 引发一系列不利的、具有破坏性的结果, 如结构破坏、密封和电路失效等, 轻则影响产品性能与功能, 重则引发整个飞行任务失利。

收稿日期: 2019-05-09; 修订日期: 2019-09-12

作者简介: 武玉玉 (1980-), 女, 高级工程师, 主要研究方向为运载火箭气动与热环境总体设计。

E-mail: songzhj85@126.com

因此,运载火箭研制时必须开展电气产品低气压环境适应性设计^[2],确保其功能与性能满足使用要求。

本文对运载火箭电气产品的低气压环境效应及设计应对措施进行了研究,同时对试验考核方法进行了研究,形成了较为系统的运载火箭电气产品低气压环境适应性设计方法,为电气产品低气压环境适应性设计提供参考。

1 运载火箭电气产品低气压环境效应分析

GJB 150.2A-2009^[3]中明确了低气压环境可能导致军用装备产生以下物理、化学效应:密封垫密封的壳体漏气、漏液体,密封容器变形、破损或破裂,低密度材料的物理和化学性能发生变化,装备因热传导降低而发生过热,润滑剂蒸发,发动机的启动和工作不稳定,真空密封失效,由于电弧或电晕放电造成装备失灵或工作不稳定。

实际上,不同低气压环境条件会产生不同类型的环境效应,且不同低气压环境条件下同类环境效应破坏程度也不尽相同。对于密封结构而言,只有在气压下降至结构内外压差超过结构强度设计阈值后才可能使结构破裂,在此之前只能使结构表面承受压差载荷,产生形变。考虑运载火箭总体方案、任务特点、低气压环境条件及电气产品设计,典型的电气产品低气压环境效应主要包括以下几种类型。

1.1 低压放电导致产品电性能降低、失效

运载火箭电气产品多采用空气作为绝缘介质。在正常大气条件下,空气是绝好的绝缘介质^[4],但处于低气压环境时,意味着空气密度降低,气体分子之间的相互作用力减弱。在电场作用下,空气中残留的带电粒子获得足够的能量,碰撞中性粒子,使其激发或电离出电子和正离子,新产生的带电粒子被电场加速,又发生新的激发或电离,于是空间中电子数产生雪崩式增长,使原本绝缘的气体变为传导等离子体,发生了放电现象,甚至间隙击穿^[5]。轻则使得电气产品电性能下降,重则损坏电路,导致整个飞行试验失利。

低气压放电的影响因素十分复杂,它与运载火箭飞行条件、电气产品材料特性、电容电压、工艺等因素均相关。对于运载火箭电气产品放电气压范围目前尚无可直接指导设计的预示模型。1889年,帕邢根据平行平板电极的间隙击穿试验

结果提出了帕邢定律,它描述了在气体种类、产品表面材料等确定时,击穿电压 U 是气压与电极间距离乘积 Pd 的函数 $U=f(Pd)$ ^[6]。图1是帕邢定律曲线示意图,该模型仅适用于电场十分均匀的放电情形。根据运载火箭电气产品研制经验,发生低气压放电的气压范围为300Pa~1.33Pa。

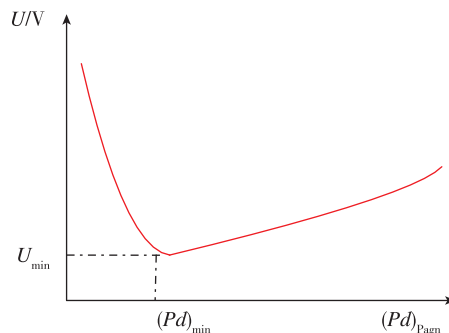


图1 帕邢曲线

Fig. 1 Schematic diagram of Paschen curve

1.2 内外压差导致密封结构变形、破裂

在地面组装过程中,密封结构内压力为标准大气压(或接近标准大气压)。但运载火箭起飞后,随着飞行高度增加外界气压降低,密封结构内外表面就产生了压差。高度越高,压差越大,极限工况下密封结构内外表面将承受一个标准大气压的内压。在此过程中,随着压差的增大,密封结构可能会变形,当此压差超过密封结构设计强度后,会导致密封结构破裂,进而密封失效。对于非完全密封结构,若结构内部压力下降速率比外界气压下降速率低,结构内外表面也要承受一定的压差。

1.3 散热效率降低导致产品温度过高

电气产品在通电状态下,部分电能会转换为热能,使其自身温度升高。对于运载火箭舱段内以自然对流为主进行热交换的电气产品而言,随着气压下降,空气密度下降,可用于热交换的空气质量减少,空气吸收的热量也将减少,导致电气产品散热效率降低,产品温度升高。当超过产品正常工作温度范围时,会导致电气产品不可逆的性能损伤。图2是赵世宜等^[1]研究的小型电动机随海拔高度的增加表面温升曲线。而且,随着气压下降,电气产品表面的自然对流换热所占的比例越来越小,辐射散热所占的比例越来越大,辐射散热将成为主要的散热形式。

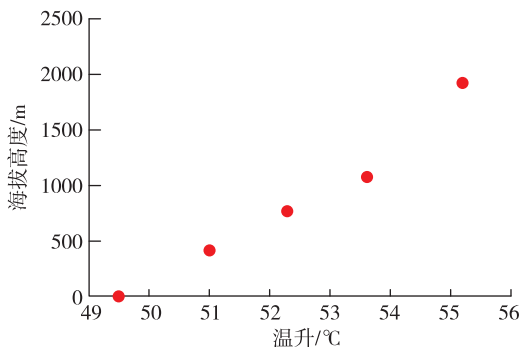


图 2 小型电动机表面温升与海拔高度关系

Fig. 2 Relationship between temperature rise and altitude of small motor

1.4 综合环境效应

运载火箭在任务剖面内不仅经历低气压环境,也要经历其他环境,如高、低温环境,振动环境等,这些环境共同作用会产生更为恶劣的综合环境效应。如低温-低气压环境效应,低气压环境使密封结构承载内压,低温会使材料收缩、变脆,加大产品密封结构损坏的风险;低气压-高温环境将进一步加剧电气产品过热风险;低气压-振动环境将加速密封产品结构损伤及裂缝产生,致使密封失效^[7-9]。

2 运载火箭低气压环境适应性设计

低气压环境适应性是指产品在寿命周期内的贮存、运输和使用等状态中经历的各种低气压环境作用下可实现其预定功能的能力,即正常工作的能力;低气压环境适应性设计则是通过设计使产品具备这种能力。运载火箭电气产品低气压环境设计是其总体方案设计中的重要工作,设计时根据电气产品的功能与性能、使用等要求,从结构设计、材料选择、电压电容、工艺等方面综合考虑,尽可能从源头上提高产品的低气压环境适应性。结合运载火箭电气产品环境效应,适应性设计一般有如下措施。

2.1 电性能下降、失效

针对电气产品低气压条件放电引起的电性能下降、失效环境效应,运载火箭电气产品设计时可参考帕邢定律对电压和极间距离进行优化;在借鉴成熟产品设计基础上,综合考虑质量、尺寸以及其他设计要求,从结构、材料、电路以及工艺等方面采取相应的措施。

1) 结构或电路密封化,密封后的结构或电路

处于生产组装时的标准气压,可有效避免低气压放电效应,但需对产品进行气密性设计和检查。

2) 增大电路间隙,增大电容,降低电场强度;壳体材料采用聚合物材料,比如聚丙烯^[10];采用惰性气体作为绝缘介质,比如采用氩气、氦气等,通过这些措施,提高低气压环境适应性。

3) 在工艺设计和加工过程中,电极边缘附近尽量避免出现突变和尖点,采取平滑和圆角设计;防止污染,避免因污染而造成放电功率阈值降低。

2.2 密封结构变形、破裂

电气产品密封结构设计时,根据实际任务剖面低气压环境,确定内压极限工况,并考虑一定裕度。为增强结构承载强度,可与提高结构刚度和强度设计的方法相同,比如采用加筋结构,选用高强度材料等。

2.3 散热效率降低

运载火箭大部分电气产品的温度适应范围较小,高温上限通常在 $65^{\circ}\text{C}\sim 75^{\circ}\text{C}$ 。由于火箭飞行时间相对较短,在方案设计中,对于低气压降低散热效率问题关注相对较少。一般在设计上应适当提高产品的耐热能力,如更换耐热材料和结构;或采取措施增强对流作用,如在电气产品内部增加风扇,或表面包覆相变材料和热管等主动温控措施。

2.4 综合环境

对于运载火箭电气产品在飞行中经历的低气压与其他类型环境的综合环境效应,通常是在各单一环境效应的应对措施基础上,采取综合的、优化的设计来提高电气产品的环境适应性。

3 低气压环境适应性试验考核方法

20世纪30年代左右,美国和欧洲等工业较为发达的国家,开始对产品作简单的环境试验,其中包括低气压环境试验。国内在20世纪50年代开始产品环境试验探索,并在80年代初颁布了一批电工电子产品环境试验标准,这些标准主要是等效采用或参照采用国际电工委员会相应标准制定的^[10]。

正常大气条件下无法验证与考核运载火箭电气产品低气压环境适应性,必须开展专项试验,试验方法主要有两种:

1) 低气压箱考核,对低气压箱内进行抽压,

模拟低气压变化过程, 监测电气产品在加电状态下各性能与功能, 进行低气压环境适应性验证与考核。运载火箭电气产品通常按照 GJB 150.2A-2009《军用装备实验室环境试验方法第二部分低气压(高度)试验》标准^[11-12]执行;

2) 热真空箱考核, 对热真空箱内进行抽压, 并启动热流(高温)模拟设备, 模拟低气压和热流(高温)变化过程, 验证与考核电气产品在低气压和热流(高温)环境下的适应性, 通常参照 QJ 2630.1A-2012《航天器组件空间环境试验方法第1部分: 热真空试验》执行。

在这两种考核试验中, 需要重点关注以下几个问题:

1) 目前国内试验真空箱能达到的最低气压在 10^{-3} Pa ~ 10^{-5} Pa 之间, 在进行低气压环境适应性考核时, 需综合考虑低气压环境和实际的低气压设备能力, 制定合理的试验条件。

2) 运载火箭在地面贮存、运输等剖面下低气压环境变化不明显, 但飞行中低气压变化速率达到 2kPa/s 以上, 不同气压变化速率引发的环境效应也不同, 在试验中应予以考虑。为充分考核电气产品低气压环境效应, 通常会降低气压变化速率, 航天飞行器广泛采用的压力变化速率为不超过 10kPa/min; 也可结合低气压箱或热真空箱设备能力, 使其压力变化率不大于实际飞行压力变化速率。

3) 低气压环境适应性考核试验中, 电气产品必须加电(GJB 150.2A-2009 中未明确规定), 在低气压试验前应确定关键的监测参数并进行监测; 对于放电效应, 需在试验中观测电气产品的气压敏感值, 为产品的改进设计或类似产品的低气压环境适应性设计提供参考。

4 某天线低气压环境适应性设计与考核

某固体运载火箭遥测天线安装在箭体外表面, 见图3。根据火箭总体飞行方案, 其经历的低气压环境为从 101325Pa 降至真空, 最大压力变化速率为 3kPa/s, 飞行过程中经历严重的气动热环境(最大热流约为 $300\text{kW}/\text{m}^2$)。遥测天线方案设计时考虑到其功率较小(不超过 10W), 在借用以往研制经验基础上, 选定了遥测天线表面材料; 电路两级设计接近于平行平板, 根据帕邢定律对击穿电压进行了估算, 并对电路两级间距进行优化;

针对飞行过程中的气动热环境, 同时考虑到天线透波要求, 采用了陶瓷防热罩进行热防护, 陶瓷防热罩与箭体表面组成密封结构。遥测天线结构和防热罩承载能力设计要求综合考虑了低气压环境造成的内外压差和飞行外压载荷。

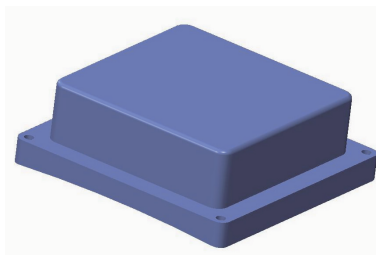


图3 遥测天线示意图

Fig.3 Schematic diagram of telemetry antenna

在完成了遥测天线防热罩隔热效果和结构承载评估分析与验证后, 依据 GJB 150.2A-2009 标准在低气压箱内开展了遥测天线低气压环境适应性专项试验。在综合考虑低气压试验箱能力条件及其他运载火箭遥测天线设计、试验考核结果的基础上, 低气压试验条件调整至 $101325\text{Pa} \sim 1 \times 10^{-4}\text{Pa}$, 试验过程中对遥测天线的各项电性能数据进行监测, 遥测天线顺利通过了低气压环境试验考核。

5 结论

低气压环境会引发运载火箭电气产品一系列环境破坏效应, 本文针对典型的环境效应进行了分析, 并针对这些效应从结构设计、材料选择、电压电容、工艺等方面提出了设计应对措施; 通过对低气压环境试验方法和标准研究, 提出了低气压环境适应性考核试验应重点关注的问题, 并完成了某运载火箭遥测天线低气压环境适应性设计与考核。基于此, 形成了较为系统的低气压环境工程设计方法, 可为运载火箭电气产品低气压环境适应性设计提供参考。

参考文献

- [1] 赵世宜, 胡立成, 吴娟, 等. 低气压环境对军用电工电子产品的影响 [J]. 装备环境工程, 2009, 6(5): 100-102.
- [2] 祝耀昌, 张建军. 武器装备环境适应性要求、环境适应性验证要求和环境条件及其相互关系的讨论(一) [J]. 航天器环境工程, 2012, 29(1): 1-6.

- [3] 中国人民解放军总装备部. GJB 150.2A-2009, 军用装备实验室环境试验方法 [S], 2009.
- [4] 刘中华, 李树杰. 星用微波组件低气压放电与真空微放电效应研究 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2014, 32 (4): 4-7.
- [5] 王瑞, 张娜, 李韵, 等. 低气压放电效应研究进展 [J]. 空间电子技术, 2015 (1): 1-6.
- [6] 赵斌, 郭赞洪, 唐其环, 等. 浅析低气压对装备及元器件的影响 [J]. 装备环境工程, 2016, 13 (5): 180-186.
- [7] 高强, 庞志兵, 魏赫. 高原高寒环境对武器装备的影响 [J]. 装备环境工程, 2013, 10 (6): 118-122.
- [8] 孙立军, 蔡汝山. 高原环境对电工电子产品的影响及防护 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2010, 28 (4): 15-18.
- [9] Woo R. Final report on RF voltage breakdown in coaxial transmission lines [M]. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 1970.
- [10] 夏喻, 李卫国, 秦司晨, 等. 聚丙烯材料应用于低气压放电腔体可行性研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2017, 37 (2): 188-193.
- [11] 宋小燕, 翟波. 低气压试验标准及试验技术分析 [J]. 环境技术, 2014 (6): 94-97.
- [12] 史光梅, 王易君, 罗群生, 等. 浅析我国军工产品低气压(高度)试验方法标准 [J]. 装备环境工程, 2013, 10 (1): 91-93.
- [13] 于洋. 简谈低气压环境对产品的影响及低气压试验方法标准的应用 [J]. 环境技术, 1999, 17 (4): 24-25.

引用格式: 武玉玉, 马上, 阮征, 等. 运载火箭电气产品低气压环境适应性设计研究[J]. 宇航总体技术, 2019, 3 (6): 25-29.

Citation: Wu Y Y, Ma S, Ruan Z, et al. Research on low-pressure environment adaptability design for electrical products on launch vehicles [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2019, 3 (6): 25-29.