

热阴极电离真空规在卫星热试验中的使用与失效分析

杜春林, 许忠旭, 刘春, 徐照武, 李培印

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 热阴极电离真空规(简称电离规)在高真空测量领域有着广泛的应用。介绍了电离规在卫星真空热试验中的使用情况,并进行了分析。在卫星真空热试验中,分别在星表及星上布置了电离规,使用过程中发现星表电离规在整个试验期间测量正常,而星上电离规在试验开始一段时间后均会失效,且故障现象一致,通过对比分析发现是规管内部受有机物污染所致。

关键词: 热阴极电离真空规; 热试验; 真空度; 污染

中图分类号: V441 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)03-0019-04

Analysis of Hot Cathode Ionization Vacuum Gauge Usage and Failure in the Satellite Thermal Test

DU Chun-lin, XU Zhong-xu, LIU Chun, XU Zhao-wu, LI Pei-yin

(Beijing Institute of Spacecraft Environmental Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: The hot cathode ionization vacuum gauge (ionization gauge) has a wide range of applications in high vacuum measurement. The application of the gauge in satellite thermal vacuum test was introduced and analyzed. In satellite thermal vacuum test, the gauges were installed on the satellite and trestle. It was founded that the gauges on trestle worked normally throughout the test, but the gauges on satellite failed after a period of time. The failure phenomena were the same. It was founded that the cause of failure is contamination by organic substance.

Key words: hot cathode ionization vacuum gauge; thermal test; vacuum degree; contamination

热阴极电离真空规(简称电离规)作为一个真空测量装置广泛应用于高真空领域,例如空间环境模拟装置、半导体工业、物理气相沉积(PVD)镀膜设备等^[1]。普通型热阴极电离规的测量范围为 $1 \sim 10^{-5}$ Pa。

热阴极电离真空规通常由配套的电气测量电路来显示数值。规管的功能是把非电量的气体压力转

换成电量——离子电流。规管基本结构由3个电极构成:提供一定数量电子流的灯丝(阴极),产生电子加速场并收集电子流的阳极(加速极)和收集离子流的收集极^[2]。其工作原理如下:阴极通电加热后发射电子,电子飞向带正电的电子加速极,一部分电子被电子加速极捕获,另一部分电子穿过电子加速极。

收稿日期: 2012-02-28

作者简介: 杜春林(1980—),男,辽宁锦州人,硕士,工程师,主要从事真空技术与空间环境试验与模拟技术研究。

电子在飞行途中与气体分子碰撞,使气体分子发生一定概率的电离,电离产生的正离子数正比于气体密度,在温度一定的前提下正比于气体的压力,从而通过测量离子电流的大小间接得到压力值。

1 试验用电离规的选择与安装

空间模拟设备用来模拟外太空的空间环境,其中一项重要的指标便是真空度。文中介绍的试验中其稳定的工作真空度为 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ Pa,属于高真空范畴,可以采用的真空规有热阴极电离真空规和冷阴极电离真空规。冷阴极电离真空规存在强磁场,由于电离规要在星上和星表安装,强磁场会对卫星上的设备产生有害影响,试验中采用热阴极电离真空规,其安装位置如图1所示。试验中所采用的热阴极电离真空规为普通型电离规,压力测量范围为 $10^5 \sim 4$ Pa,允许误差为 $\pm 50\%$,电离规正常的工作环境温度 $0 \sim 40$ °C。



图1 电离规安装示意

Fig. 1 The installation diagram of ionization gauge

一般试验中使用4~5支电离规,型号与规格完全相同,其中两支电离规安装在卫星支架上,通过绑扎、吊挂方式安装在星体表面,位于星表多层保温材料外距离多层保温材料10 mm以上的容器空间内,用来测量星表真空度,其实物如图2所示。其余的电离规安装在卫星上,用来测量卫星内部真空度,电离规通过专用连接支架与星表开孔处附近安装孔连接、固定,真空规测量口正对舱板开孔,具体的安装实物如图3所示。安装完成后用多层保温材料将其包裹,如图4所示。

电离规安装到星表后,通过容器内过渡线缆、穿墙插头与容器外真空计连接,再通过串口服务器与测量计算机连接,数据采集原理如图5所示。



图2 星表真空规安装实物

Fig. 2 The picture of gauge on trestle



图3 星上真空规安装实物

Fig. 3 The picture of gauge on satellite



图4 真空规完成包裹后最终实物

Fig. 4 The picture of gauge after package

2 热阴极电离规的使用情况

2.1 星表电离规与容器真空度对比

试验中在星表附近安装两支电离规,分别为3#和4#,用于检测卫星表面多层保温材料外的真空度数值,试验中星表真空规所测得的真空度和容器内

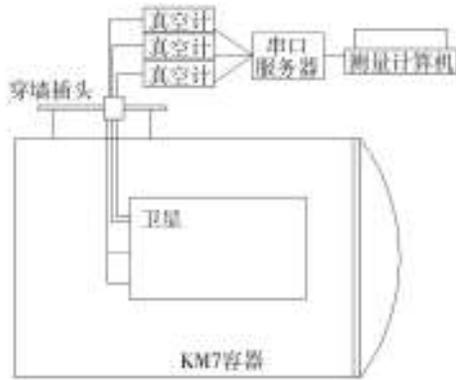


图5 真空规数据采集原理

Fig. 5 Schematic diagram of gauge data acquisition

真空度曲线如图6所示。其中容器内真空度由冷阴极电离规测得,安装在容器壳体表面。冷阴极电离规经过多次试验使用,测量可靠,工作稳定。

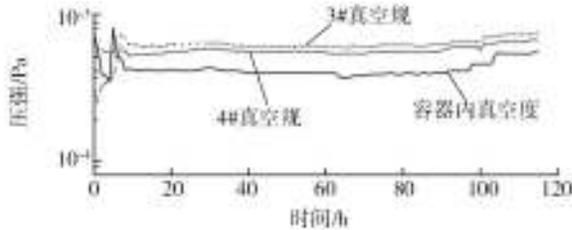


图6 卫星表面与容器内真空度对比

Fig. 6 Comparison of vacuum degree between satellite surface and container

试验工况期间,容器内真空度优于 1.3×10^{-3} Pa,满足试验要求,星表电离规在整个试验过程中均稳定运行,未出现故障。星表真空度和容器内所测得的稳定真空度均在 10^{-4} Pa 这个数量级,3支规管稳定工作后其曲线走势基本相同,排除测量误差的干扰,可以认为星表真空度基本等同于容器内真空度,电离规完全满足星表真空度的测量要求。

2.2 星上真空度与容器真空度对比

试验中在星上安装了2支电离规,分别为1#和2#,用于检测卫星内部的真空度数值,试验中星上电离规所测得的真空度和容器内真空度曲线如图7所示。

从图7中可以看到卫星内部的压力明显要高于容器内部的压力,卫星内部稳定压力在 10^{-3} Pa 量级上,容器内部真空度稳定在 10^{-4} Pa 量级上。由于卫

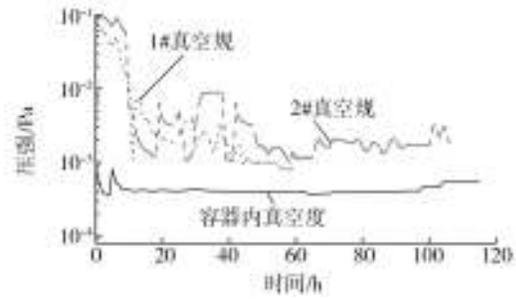


图7 卫星内部与容器内部真空度对比

Fig. 7 Comparison of vacuum degree between internal of satellite and container

星表面用多层保温材料包裹,抽气过程中星内气体向容器内扩散缓慢,所以卫星内部真空度无法与容器内部真空度同步,属正常现象。但在试验过程中两支电离规工作出现异常,1#电离规正常工作了59 h,2#电离规正常工作了106 h,之后无法开启。

3 故障分析

出现故障后,重新启动真空计,按“开电离”按钮后,屏幕显示值在0.025 mA 以下,按照使用说明书其正常示数应在0.080 ~ 0.120 mA 之间,显然不在标准范围内,电离规发射电流明显偏小,电离计无法启动。断开真空规电缆,使用万用表测量真空规端阻值,见表1。

表1 真空规失效前后通路阻值

Table 1 Resistance value of gauge before and after failure

标号	针号	试验前阻值 R/Ω	失效后阻值 R/Ω
1#电离规	1,3	2.22	1.47
	2,4	2.49	1.70
2#电离规	1,3	2.18	1.70
	2,4	2.45	1.69

从表1可以看出电离规失效后,其通路阻值发生了明显的变化,阻值均偏低,初步推断规管内部受到污染,导致电极物性发生改变,使真空规发射电子能力降低而无法工作。

4 机理分析

试验停机开罐后,将1#和2#故障电离规取下做

表面附着物成分分析,检测了两只电离规内部污染物成分,失效后的电离规如图8所示。为了检验电离规内部表面附着物,切割后的实物如图9所示。采用色谱-质谱分析仪对污染物进行分析,两只电离规内部污染物总离子流色谱如图10所示。不同的成分保留时间不同,即可根据保留时间确定样品中的成分,对样品进行成分定性分析。总离子流色谱图的纵坐标为样品中所含成分在质谱仪中形成的离子丰度,代表质谱仪中接收到的成分电离离子数量,丰度越高接受的离子数越多,样品中该成分的含量越高。在仪器本底曲线上可以看到一个个尖锐的色谱峰,色谱峰代表色谱柱流出成分通过检测器时所产生的响应信号的变化曲线,一个色谱峰代表着一种成分。



图8 失效后的电离规

Fig. 8 Picture of failure gauges



图9 切割后的电离规

Fig. 9 Picture of gauge after cutting

从图10中可以看出,试验过程中的两个电离规内部的污染物基本相同。经过谱库的检索和人工的核对,可以得出:电离规内主要污染物包括3种邻苯二甲酸酯类污染物和5种硅氧烷类污染物,保留时间分别为35.8,37.7,47.3 min的色谱峰代表着邻苯二甲酸酯类,其余保留时间的色谱峰代表着硅氧烷类

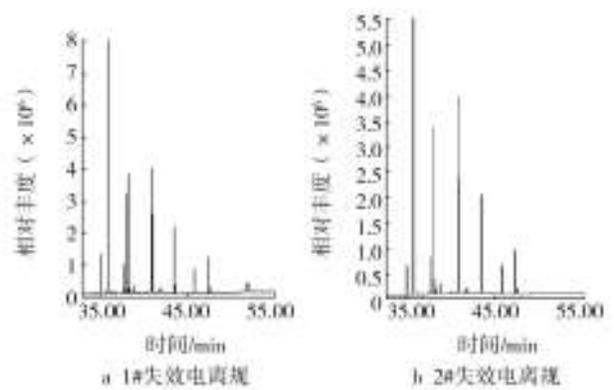


图10 电离规内部污染物的总离子流色谱

Fig. 10 The total ion chromatogram of pollutants in the gauge

物质。

硅氧烷类与邻苯二甲酸酯类同属有机物,含碳、硅元素,对电离规的使用影响极大。因为电离规的灯丝极易受到含碳、硅元素物质的污染,高温灯丝与有机污染物发生反应,导致灯丝会过度消耗,最终导致灯丝发射电流不足或丧失发射能力,从而使电离规无法工作,由此可以推断,星上存在的润滑油脂类有机物^[3-5]在高真空状态下蒸发进入了电离规,使灯丝受到污染,导致电离规无法正常工作。

5 结语

热阴极电离规多用于容器真空度测量,用于星内真空度的测量属于一种尝试。文中对热阴极电离规在真空热试验中的使用情况进行了分析,发现星表电离规使用正常,满足使用要求;星上电离规在试验过程中均出现故障。通过与同时期进行的多颗卫星真空热试验进行对比,发现电离规基本上工作3~5 d后即无法工作。通过对规管通路阻值的测量和规管内附着物化学成分的分析,可以断定电离规无法正常工作是由于规管内部灯丝受到了污染所致。某型号卫星内部进行了表面去油脂处理,该星上电离规使用了9 d,可见卫星表面的清洁程度对电离规的使用寿命有很大的影响,今后将在延长规管的使用寿命以及防污染等方面开展进一步研究。

参考文献:

[1] 王晓冬,巴德纯,张世伟,等. 真空技术[M]. 北京:冶金工

(下转第40页)

鉴于上述差距,应有针对性地开展以下研究。

1) 航天器用材料空间环境暴露剂量分析方法研究。主要基于对国内外现有环境模型的研究,通过模型分析结果与实际在轨探测结果的对比,验证现有环境模型在空间材料空间环境评估中的适用性。在此基础上,研究卫星构型、姿态对星(船)选用的原材料产品在轨期间空间环境暴露剂量的影响,最终获得计算特定产品在特定轨道、特定卫星上的特定位置处遭遇到的环境剂量的能力。

2) 航天器用材料空间环境地面模拟试验方法研究。通过研究产品试验前预处理方法、地面模拟源的适用性分析、产品温度及加速因子对试验结果的影响等内容,对现有的标准体系进行补充,提升其指导性与有效性。

3) 基于地面单因素材料空间环境试验结果的叠加原理研究。主要研究电子、质子、紫外、原子氧、真空/热等空间环境作用下原材料的微观辐照缺陷及其演化和相互作用规律,发现多因素协合效应的本质,掌握用单因素的空间环境试验结果进行叠加的原理。

主要从两个方面开展,首先对各类空间环境导致的材料微观损伤机理进行分析,建立各环境单独作用下微观损伤与材料热物性变化之间的构效关系。以上述构效关系的研究结果为基础,识别材料不同环境损伤效应之间的相互作用机制,发现航天器用材料空间综合环境效应的本质,为基于地面模拟试验的航天器用材料性能评估、认定及产品的复验提供理论支持。

2.3 材料复验

材料复验旨在检验原材料性能的一致性,对于保证星(船)材料质量有重要的意义。目前的复验工作仅限于对材料基础理化、力学、热学等常规性能进行测试,但这些功能性指标的测试不足以验证产品的空间环境适应性,这给星(船)产品的可靠性带来隐患。

复验项目的设置与实施要从复验周期、试验可实施性等多方面综合考虑。针对复验环节的应用需求,目前的空间环境适应性评价技术尚存在以下问题:

1) 用于评估材料全寿命期内空间环境适应性的试验周期过长,缺乏用于复验已认定原材料产品的短周期试验评估方法;

2) 行业内相关标准规范不健全或适用性不强。

鉴于上述问题,应有针对性地开展以下研究:

1) 深入开展材料空间环境效应研究,探求可以表征材料的环境效应“敏感度”的关键失效行为;

2) 建立健全用于原材料热循环、排气及可凝性测试等相关标准。

3 结语

空间环境适应性评价技术研究与型号原材料选用、认定、复验等工作需要有机结合,一方面有的放矢地强化材料空间环境效应研究,使环境分析方法研究、试验方法研究更加具有针对性,研究成果更具实用性;另一方面对以“统一选用管理、统一复验管理、统一认定管理、统一失效分析管理”为核心的航天器材料质量保证能力进行补充、完善,并最终予以加强。

参考文献:

[1] ASTM-E595-06, Standard Test Method for Total Mass Loss and Collected Volatile Condensable Materials from Outgassing in a Vacuum Environment[S].

[2] 冯伟泉. 航天器材料空间环境适应性评价与认定准则研究[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(2): 139—143.

[3] 刘宇明. 空间紫外辐射环境及效应研究[J]. 航天器环境工程, 2007, 24(6): 359—365.

[4] 李涛, 姜利祥, 郭亮. 空间原子氧环境对太阳电池阵的影响分析[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(4): 428—433.

[5] 韩增尧. 第36届 COSPAR 会议空间碎片专题综述[J]. 航天器环境工程, 2007, 24(3): 131—134.

(上接第22页)

业出版社, 2006: 236.

[2] 刘玉岱. 真空测量与检漏[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2007: 31.

[3] 程广河. 浅析航天器的污染及其控制[J]. 航天器环境工

程, 2003, 20(1): 35—39.

[4] 焦子龙, 庞贺伟, 易忠, 等. 卫星真空热试验污染物成分分析[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(3): 240—243.

[5] 焦子龙, 庞贺伟, 易忠, 等. 航天器真空热试验污染物成分分析[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(6): 711—714.