

卫星热试验舱内污染监测及烘烤出气方法研究

于钱¹, 杨东升¹, 臧卫国¹, 院小雪¹, 易忠^{1,2}, 姜海富¹, 周晶晶¹

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094;
2. 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100094)

摘要: 目的 通过卫星热试验过程中采取烘烤出气措施后舱体内部污染状况分析, 为卫星试验过程中污染控制工作提供有效方法。方法 使用石英晶体微量天平(QCM)及真空度测试系统, 对星内污染沉积量与真空度进行实时监测, 比较卫星高温静置工况前后沉积量与真空度测试量值的变化。结果 整个热试验过程中星内污染出气沉积量为 $1.8 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$, 高温静置工况星内污染出气沉积量为 $5.67 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2$, 高温静置工况开始前星内真空度为 $2.9 \times 10^{-2} \text{ Pa}$, 第一次高温循环工况开始时星内真空度为 $2.3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 。结论 整个高温静置工况星内污染出气沉积量约占整个热试验过程中的30%, 且使得星内真空度由 10^{-2} Pa 的量级降低到 10^{-3} Pa 的量级, 因此高温静置烘烤措施能够有效去除卫星材料出气污染。

关键词: 污染量; 真空度; 烘烤; 材料出气

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.03.005

中图分类号: TJ011; V416 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)03-0029-05

Study of Contamination Monitoring and Baking Outgassing Methods for Satellite Cabin during Thermal Test

YU Qian¹, YANG Dong-sheng¹, ZANG Wei-guo¹,

YUAN Xiao-xue¹, YI Zhong^{1,2}, JIANG Hai-fu¹, ZHOU Jing-jing¹

(1. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;

2. Science and Technology on Reliability and Environment Engineering Laboratory, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: Objective To study the contamination condition in satellite cabin after baking operation in the process of thermal test, so as to provide an effective method for contamination control of satellite. **Methods** The contamination deposition mass and the vacuum pressure were monitored with the quartz crystal microbalance (QCM) and the vacuum test system. The changes of the deposition mass and the vacuum pressure before and after quiescence in high temperature were compared. **Results** The contamination deposition mass was $1.8 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$ in the process of thermal test and the contamination deposition mass was $5.67 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2$ in the process of baking phase. The vacuum pressure

收稿日期: 2015-03-22; 修订日期: 2015-04-06

Received: 2015-03-22; Revised: 2015-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(21277014)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(21277014)

作者简介: 于钱(1981—),男,江苏人,硕士,工程师,主要研究方向为航天器污染检测与控制。

Biography: YU Qian(1981—),Male,from Jiangsu,Master,Engineer,Research focus:contamination test and control of spacecraft.

was 2.9×10^{-2} Pa before the bake-out phase and the vacuum pressure was 2.3×10^{-3} Pa before the first temperature cycle phase. **Conclusion** The contamination deposition mass in the process of baking phase was about thirty percent of that in the thermal test. The baking method can decrease the vacuum pressure level from 10^{-2} Pa to 10^{-3} Pa, which can decrease the contamination condition in satellite cabin effectively.

KEY WORDS: contamination mass; vacuum pressure; baking; material outgassing

卫星在轨过程中,由于其非金属材料受真空、高温环境的影响,产生大量有机气体污染物,会对卫星舱外的太阳能电池、热控涂层、光学相机等敏感部件产生影响,降低部件的光学性能^[1-2]。国内外在这些方面开展了较多研究。在某颗卫星真空模拟室进行热试验期间,舱内的微波开关器件出现了功能异常^[3],试验后打开卫星舱板,在星体内部发现大量油状污染物。

经过分析,卫星舱内使用了白漆、导热硅脂、电缆、粘接剂等多类非金属材料^[4]。在高温真空环境下,由于解吸附和材料出气机理,释放出大量分子污染物,形成了低气压环境。低气压环境下,起晕电压远低于大气环境或高真空环境,电子部件很容易发生放电^[5-6]。系统加电后,开关器件在大功率信号工作过程中出现低气压放电,导致器件失效。国外卫星热试验过程中针对卫星出气控制非常重视,在采取监测措施的基础上,采取材料出气筛选^[7]及真空烘烤等方法改善污染状况^[8],降低对卫星器件的影响。如美国洛克希德·马丁公司在20世纪90年代,为避免星上的超频转发器以及高电压设备发生电晕放电或弧光放电,要求舱内的真空度达到20%安全余量后,器件才能工作^[9]。美国NASA戈达德航天飞行中心(GSFC),在1996年开展了103次系统级烘烤试验,115次高敏感部件烘烤出气试验,真空烘烤成为对卫星进行污染控制的有效方法^[8,10]。

目前我国卫星热试验过程中,通常要求使用石英微量天平、成分分析等方法^[11]对舱外的污染状况进行监测,获得了多次卫星舱外的污染状况^[12-13],但是对舱内的污染监测、舱内污染防护方法关注较少。基于上述原因,文中使用石英晶体微量天平(QCM)及真空计测试系统对卫星舱内的污染状况进行监测,并采取了烘烤出气污染控制方法,进行污染去除研究。该研究对了解卫星舱内的污染状况,确定烘烤污染控制方法的效果具有实际的意义。

1 热试验舱内污染监测

1.1 测试仪器

1) 石英晶体微量天平(QCM)。QCM是通过改变

输出频率表征表面污染沉积量的测试仪器,可用于微小质量的实时监测,广泛应用于我国卫星研制过程中的污染监测工作。试验采用北京卫星环境工程研究所研制的QK-20型QCM对舱体内污染累积量进行监测,QCM的基频为20 MHz,质量灵敏度为 1.1×10^{-9} g/(cm²·Hz)。

2) 真空计。真空计是用来监测真空模拟器中环境压力的测试仪器。试验采用热阴极电离真空规,真空度的测试范围为 $1 \sim 10^{-5}$ Pa^[14]。

3) 气相色谱质谱仪。气相色谱质谱仪用来分析热试验卫星材料出气污染物的组分。试验使用美国安捷伦公司的气相色谱质谱仪(5975C, 7890A),质量范围为 $1 \sim 10^{50}$ amu,质量分辨率为1 amu。

1.2 卫星热试验工况

为了防止卫星的开关器件在试验过程中由于污染出气引起低气压环境造成损坏,在进行卫星热试验前,采取了高温静置烘烤措施,使舱内材料出气,以改善试验时舱内真空环境,减小材料出气对舱内设备的影响。高温静置时间为72 h,温度为45℃。随后为试验的4个温度循环阶段。卫星热试验过程中,设置的工况剖面如图1所示。

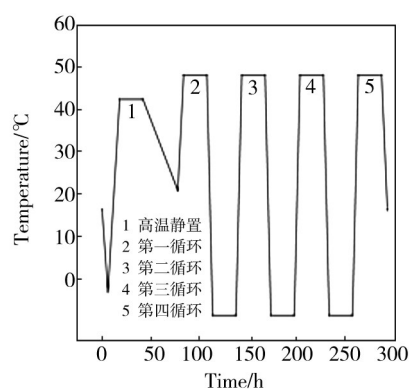


图1 卫星热试验工况

Fig.1 Thermal test phase of satellite

1.3 热试验出气污染物结果

热试验过程中,在开关器件附近安装了QCM传感器,QCM传感器使用铝制支架安装在卫星的内部,测试面与开关器件保持一致,用来实时监测卫星舱内开

关器件附近的污染沉积量。整个卫星热试验期间污染沉积曲线如图2所示。

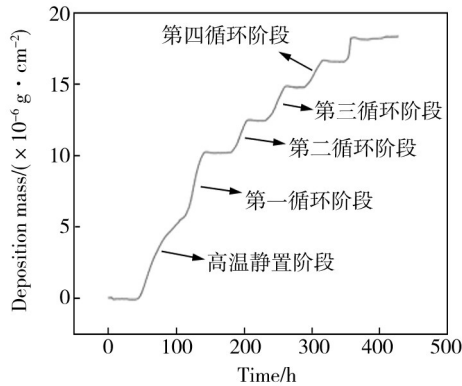


图2 热试验过程中石英晶体微量天平污染沉积曲线
Fig.2 Deposition mass of QCM in the process of thermal test

试验结束后,对卫星舱体内的污染物质取样,使用气相色谱质谱分析仪对物质的组分进行了分析,物质色谱分析结果如图3所示。

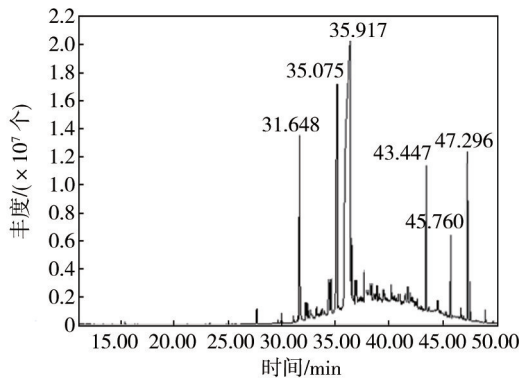


图3 热试验污染物色谱图
Fig.3 Contamination chromatogram of thermal test

污染物主要成分为邻苯和硅氧烷类物质。其中邻苯类物质包括:邻苯二甲酸二乙酯(31.648)、邻苯二甲酸二2-甲基丙酯(35.917)、邻苯二甲酸二2-甲基庚酯(47.296)。硅氧烷类物质包括:八甲基环四硅氧烷(D4,35.075)、十四甲基环七硅氧烷(D7,43.447)、十八甲基环九硅氧烷(D9,45.760)。

1.4 结果分析

上述QCM及污染物组分测试结果表明:整个试验过程中的污染累积量达到了 $1.8 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$ 量级,试验后在卫星舱内也发现了明显的污染物质,表明卫星舱内的污染状况严重;污染物主要成分为邻苯和硅氧烷类物质;污染物可能对卫星器件产生影响,有必要对卫星舱内的污染进行控制。

2 热试验高温静置烘烤措施效果分析

2.1 卫星材料出气机理

根据不同的物理和化学机制,材料出气污染物的产生主要包括解吸附和材料真空出气过程。解吸附过程是一种物理过程,材料在大气环境下会吸附一些气体。当材料置于真空中时,物理吸附于材料表面的气体从表面挥发,解吸附过程比较容易发生,持续的时间较短,在真空环境下几个小时内就可以基本完成。材料真空出气是一种包括了物理和化学机理的过程,可以持续很长的时间。通常材料解吸附的是一些分子量较小的气体,这些气体不会对敏感表面形成较大污染,而材料真空出气产物通常是一些大分子有机污染物,易于沉积在敏感表面,因此材料真空出气是导致卫星表面长期受到分子污染影响的主要机制。材料真空出气速率可以通过式(1)表示:

$$\frac{dm}{dt}(t,T) = am \frac{\exp(-E_a/RT)}{t^b}$$
 (1)

式中: E_a 为激活能, J/mol; R 为气体常数,一般取 $8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ 。因此卫星材料的出气速率受材料温度、出气时间的影响,其中与温度呈指数关系,与试验时间呈幂函数关系。

2.2 各工况舱内污染结果对比

由图2所示石英晶体微量天平污染沉积量测试结果,得出热试验过程中各工况的污染累积量见表1。

表1 热试验各工况污染量结果		
Table 1 Contamination deposition mass in the process of thermal test		
试验阶段	时间/h	天平污染沉积量/($\times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$)
高温静置阶段	72	5.67
第一循环工况	60	4.67
第二循环工况	60	2.47
第三循环工况	60	2.13
第四循环工况	60	1.73

污染沉积量结果能从侧面反应卫星材料出气污染的状况。由表1可知,在整个高温静置阶段,天平测试污染沉积量为 $5.67 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2$,而整个热试验过程中的污染为 $1.8 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$,高温静置阶段的污染物沉积量占整个热试验过程污染沉积量的比例超过了30%。在整个热试验阶段,各工况天平污染量结果逐

渐减少。

热试验期间,在卫星舱外、舱内均放置了电离规真空计,实时监测卫星舱外及舱内环境真空度。高温静置阶段及第一高温工况中不同时刻星内外真空度的变化情况见表2。

表2 热试验不同时刻真空度
Table 2 Vacuum pressure of thermal test

阶段	星外真空度/ ($\times 10^{-4}$ Pa)	星内真空度/ ($\times 10^{-4}$ Pa)
真空、低温背景建立	8.5	140
高温静置开始	6.7	290
高温静置 10 h	5.2	57
高温静置 15 h	5.0	36
高温静置 24 h	4.4	24
静置 48 h	3.8	8.0
静置 72 h	4.2	5.5
第一循环工况高温平衡阶段	3.9	23
第一循环工况结束	3.7	5.5

真空度结果反应了卫星舱内空间环境的污染状况。由表2可知,高温静置阶段开始时,卫星舱内的真空度为 2.9×10^{-2} Pa;高温静置阶段结束后,卫星舱内的真空度为 5.5×10^{-4} Pa;随后进行的第一循环工况阶段,卫星舱内的真空度为 2.3×10^{-3} Pa。

2.3 结果分析

由上述卫星热试验各工况污染量及真空度结果对比,可以得到以下的结论。

1) 热试验各个阶段天平污染沉积量逐渐减少,反应了材料出气污染逐渐减少,符合材料真空出气的规律。

2) 由污染量测试结果可知,通过高温静置阶段的烘烤处理,材料出气污染沉积量占整个热试验过程的30%,高温静置阶段有效促进了材料出气。

3) 经过高温静置阶段的烘烤处理,卫星舱内的真空度由 10^{-2} Pa量级降低到了 10^{-3} Pa量级。

3 结论

该次热试验过程中对某卫星舱内的污染状况进行了监测,并在试验过程中采取了减轻卫星舱内污染状况的高温静置烘烤处理方法。对上述结果分析,可以得出以下结论。

1) 卫星热试验过程中舱内污染状况严重,有必要开展卫星舱内污染环境的监测与控制研究。

2) 高温静置烘烤是一种简单可行的措施,能有效去除卫星舱内材料出气污染,能够保证星内开关器件试验过程中运行的可靠性。

3) 舱内环境相对密闭,需要在烘烤措施期间,设置排气通道,使材料出气物快速导出舱外。

4) 卫星舱体内污染产生的源头主要是非金属材料真空出气,需要开展部件级甚至材料级污染控制方法的研究,包括污染控制的方式,污染控制措施的实施条件等。

参考文献:

- [1] 童靖宇,向树红. 临近空间环境及环境试验[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 1—4.
TONG Jing-yu, XIANG Shu-hong. Near Space Environment and Environment Tests[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3): 1—4.
- [2] 李涛,易忠,高鸿. 航天器材料空间环境适应性评价技术[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 37—40.
LI Tao, YI Zhong, GAO Hong. Summarization Space Environmental Worthiness Evaluation Technology for Spacecraft Material[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3): 37—40.
- [3] 张洪波,刘天雄,李长江. 卫星热真空试验微波开关分子污染防护研究[J]. 航天器工程, 2011, 20(5): 125—130.
ZHANG Hong-bo, LIU Tian-xiong, LI Chang-jiang. Research on Prevention of Molecular Contamination of Microwave Switches in Thermal Vacuum Test for Satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(5): 125—130.
- [4] 刘天雄,罗成,朱剑涛,等. 热真空试验中分子污染敏感单机的失效机理及对策[J]. 航天器工程, 2014, 23(1): 47—52.
LIU Tian-xiong, LUO Cheng, ZHU Jian-tao, et al. Failure Mechanism and Countermeasure of Unit Sensitive to Molecular Contamination in Thermal Vacuum Test[J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(1): 47—52.
- [5] 王志浩,冯伟泉,周岭,等. 航天器单机内PCB焊点低气压放电试验研究[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(3): 292—295.
WANG Zhi-hao, FENG Wei-quan, ZHOU Ling, et al. Low-pressure Discharging Test for Solder Fillets on PCBs Used in Spacecraft Units[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(3): 292—295.
- [6] 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): 14—17.
LIU Zhong-hua, LI Shu-jie. Research on Low Pressure Discharge and Vacuum Microdischarge Effects of Satellite-borne Microwave Modules[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2014, 32(4): 14—17.

- [7] ASTM-E-595-06, Standard Test Method for Total Mass Loss and Collected Volatile Condensable Materials from Outgassing in a Vacuum Environment[S].
- [8] 周传良. 高度污染敏感有效载荷的真空烘烤技术[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(6): 340—343.
ZHOU Chuan-liang. Vacuum Bakeout Technology for Spacecraft Payload with High Sensitive Contamination[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(6): 340—343.
- [9] 院小雪, 刘国青, 易忠, 等. 空间次生环境研究及探测方法概述[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(2): 217—222.
YUAN Xiao-xue, LIU Guo-qing, YI Zhong, et al. Review of Induced Space Environment and Related Detecting Methods [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014, 31(2): 217—222.
- [10] WOOLDRIDGE Eve M. Contamination Control Considerations for the Next Generation Space Telescope (NGST) [R]. Goddard Space Flight Center, NASA Report Number: 19980237489, 1998.
- [11] 黄本诚, 马有礼. 航天器空间环境试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
HUANG Ben-cheng, MA You-li. Space Environment Test Technology of Spacecraft[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.
- [12] 吴东, 韦锡峰, 康纪军. 某型号真空热试验污染问题排查及对策解析[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(1): 77—79.
WU Dong, WEI Xi-feng, KANG Ji-jun. Trouble Shooting and Analysis of Strategies for Satellite Contamination in a Vacuum Thermal Test[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(1): 77—79.
- [13] 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.
JIAO Zi-long, PANG He-wei, YI Zhong, et al. Composition Analysis of Contaminant in Thermal Vacuum Test for Spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(6): 711—714.
- [14] 杜春林, 许忠旭, 刘春, 等. 热阴极电离真空规在卫星热试验中的使用与失效分析[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 19—23.
DU Chun-lin, XU Zhong-xu, LIU Chun, et al. Analysis of Hot Cathode Ionization Vacuum Gauge Usage and Failure in the Satellite Thermal Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3): 19—23.
-
- (上接第14页)
- 2009, 44(4): 263—271.
- [22] 王晓飞, 王刚, 沙云东. 试验环境下耐高温噪声测量技术概述[J]. 环境模拟技术, 2014(8): 13—18.
WANG Xiao-fei, WANG Gang, SHA Yun-dong. Summary of Acoustic Measurement Technology of High Temperature Resistance in the Test Environment[J]. Environmental Technology, 2014(8): 13—18.
- [23] 王一临, 罗兰. 提高武器装备的运输环境适应性[J]. 装备环境工程, 2005, 5(2): 54—58.
WANG Yi-lin, LUO Lan. Increasing Transport Environmental Worthiness of Weapons[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 5(2): 54—58.
- [24] 庞勇, 曹文洲. 发射平台对飞行器环境影响的研究[J]. 质量与可靠性, 2010(增刊): 457—461.
PANG Yong, CAO Wen-zhou. Research on Launch Flat Effect on Spacecraft Environment[J]. Quality and Reliability, 2010(Suppl): 457—461.
- [25] 赵保平, 张韬. 系统级产品环境试验与评估若干问题探讨[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 54—62.
ZHAO Bao-ping, ZHANG Tao. Discuss on Environmental Test and Evaluation of System Grade Products[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(6): 54—62.
- [26] 蓝仁恩, 谭浩, 张志勇, 等. 舰载发射箱在水下爆炸载荷下的瞬态响应分析[J]. 战术导弹技术, 2014(4): 38—42.
LAN Ren-en, TAN Hao, ZHANG Zhi-yong, et al. Transient Response Analysis of Launch Box on Ship under Explosion Load[J]. Tactical Missile Technology, 2014(4): 38—42.
- [27] 江洪开, 张世英, 华明军, 等. 运输环境中火箭贮箱强度可靠性仿真[J]. 上海航天, 1996, 22(1): 27—31.
JIANG Hong-kai, ZHANG Shi-ying, HUA Ming-jun, et al. Intensity Reliability Simulation for Rocket Tank in Transportation Environment[J]. Aerospace Shanghai, 1996, 22(1): 27—31.
- [28] 冯翔, 李向斌, 关正西, 等. 运输环境中某战术导弹结构振动特性分析[J]. 固体导弹技术, 1999, 22(1): 6—9.
FENG Xiang, LI Xiang-bin, GUAN Zheng-xi, et al. Finite Element Structure Vibration Characteristic Analysis of a Solid Missile in Transportation Environment[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1999, 22(1): 6—9.
- [29] 王清海, 刘仲敏, 陈小兵. 基于PANTRAN/NASTRAN的发射装置震动特性设计[J]. 航空兵器, 2011(2): 52—56.
WANG Qing-hai, LIU Zhong-min, CHEN Xiao-bing. Design of Launcher Vibration Characteristic Based on Patran and Nastran[J]. Aero Weaponry, 2011(2): 52—56.
- [30] 刘领先, 岳葳, 唐卫平, 等. 基于DDAM方法的舰艇导弹发射装置冲击仿真[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(2): 33—35.
LIU Ling-xian, YUE Wei, TANG Wei-ping, et al. Simulation of Resistant Shock Capability of Missile Launcher Based on DDAM[J]. Sichuan Ordnance Journal, 2011, 32(2): 33—35.
- [31] 赵保平, 孙建亮, 张韬, 等. 产品定寿延寿中的几个环境问题[J]. 装备环境工程, 2014, 11(4): 21—25.
ZHAO Bao-ping, SUN Jian-liang, ZHANG Tao, et al. Problems of Environment Engineering in Life Estimation and Prolongation of Products[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(4): 21—25.