

环境效应与防护

“天舟一号”货运飞船在轨污染探测数据分析

于钱, 臧卫国, 杨东升, 院小雪, 田东波, 任飞扬

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: **目的** 分析“天舟一号”(TZ-1)货运飞船的空间污染探测器的在轨探测数据。**方法** TZ-1货运飞船上的污染探测器采用石英晶体微量天平(QCM),利用污染物沉积在QCM探测器传感晶片表面引起的振荡频率变化情况分析航天器在轨空间污染环境。根据其探测原理,通过分析下传的原始数据,得到航天器在轨的污染累积量结果。**结果** 航天器在轨飞行过程中,污染累积已达到会导致污染敏感器件光学性能明显退化的程度,并且污染源温度是影响航天器污染累积量的一个重要因素,可以将其作为航天器在轨污染控制的重要措施。**结论** 该研究结果可以为航天器污染设计、控制提供参考,为提高航天器可靠性设计提供数据支持。

关键词: “天舟一号”货运飞船;石英晶体微量天平;在轨探测;污染物

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.04.014

中图分类号: TJ86; V416.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)04-0070-05

On-orbit Contamination Detection Data for “TZ-1” Cargo Spaceship

YU Qian, ZANG Wei-guo, YANG Dong-sheng, YUAN Xiao-xue, TIAN Dong-bo, REN Fei-yang
(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: Objective To analyze on-orbit detection data of the space contamination detector for “TZ-1” Cargo Spaceship. **Methods** Quartz Crystal Microbalance (QCM) was used to detect contamination the TZ-1 to make use of the changes of oscillation frequency caused by contaminant deposited on the sensor crystal. The on-orbit contamination accumulation of the spacecraft was obtained by analyzing the downloaded original data based on the detecting principle. **Results** The detection data showed that optical properties of contamination sensitive components deteriorated significantly under the influence of accumulation of contaminants. The contamination source temperature was an important influencing factor of contamination accumulation. Consequently, temperature could be taken as an important method for on-orbit contamination control on spacecraft. **Conclusion** These results can be references for contamination control design, and also provide data support for improving spacecrafts reliability.

KEY WORDS: tianzhou-1 cargo spaceship (TZ-1); quartz crystal microbalance (QCM); on-orbit detection; contaminant

航天器在研制过程中,各个系统及部件使用大量非金属材料,包括电缆绝缘层、导热硅脂、硅橡胶、粘结剂、涂层等^[1]。航天器在轨飞行时处于真空冷热交变的环境中,这些非金属材料会在空间真空环境下产生污染物^[2],其与航天器在地面总装过程中吸附在

表面的污染物及发动机羽流产生的污染物,是造成航天器表面污染的主要源头。这些污染物沉积在航天器表面,影响着航天器表面的光、热属性^[3]。航天器易受污染影响的部分主要有热控涂层、光学镜头、光学窗口、太阳能电池片等污染敏感部件。这些部件受污染

收稿日期: 2017-12-29; 修订日期: 2018-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(21277014)

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

后将会降低航天器的性能，缩短航天器的使用寿命，甚至导致其失效^[4-7]。国内外以光学系统和敏感系统为主要载荷的航天器也多次发生由于污染而造成重大损失的事故，文献[8]中报道，据 NASA 统计，美国 20 世纪 70 年代有 13 颗，80 年代有 11 颗，90 年代有 1 颗航天器因污染造成故障。由于航天器具有投入资金巨大、技术密集和高风险性的特点，所以其可靠性和安全性显得非常重要，航天器一旦出现故障要付出昂贵的代价，因此能够获取航天器在轨污染的数据，对于航天器的设计和污染控制有重要作用。

美国在多个航天器上都进行过在轨污染测量，如文献[9]中报道 SKYLAB 和 APOLLO 望远镜组件上安装了 6 台 QCM 探测器，文献[10]中报道 MSX 卫星上安装了 5 台 QCM 探测器，这些探测器提供了大量在轨污染监测数据。我国近期也开展了少量在轨污染监测试验，文献[11]中报道“新技术验证一号”卫星上利用镓铟磷太阳能电池间接探测空间污染环境。文献[12]中报道“天宫一号”(TG-1)目标飞行器上利用微质量计监测空间污染环境，总体来说，我国航天器在轨污染状况数据非常缺乏。文中的 QCM 探测器是 TZ-1 货运飞船“空间环境监测与控制试验系统”中的试验载荷之一，在 2017 年 4 月 20 日随 TZ-1 货运飞船发射成功，QCM 探测器试验目的之一是监测货运飞船长期在轨过程中的空间污染环境。

1 探测器简介

1.1 探测器原理

TZ-1 货运飞船的污染监测采用 QCM 探测器，QCM 探测器是以 Sauerbrey 公式为基础^[13]，利用厚度剪切压电石英晶体频率变化量与其附着物的质量成正比的原理，通过暴露于污染物中的传感晶体振荡频率变化来实现污染沉积量的测量。Sauerbrey 公式为：

$$\Delta m/A = -C_f \Delta f \quad (1)$$

式中： Δf 为探测器频率改变量，Hz； Δm 为沉积质量改变量，g； A 为沉积的面积， cm^2 ； C_f 为质量灵敏度，为一常数， $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{Hz})$ 。

由 Sauerbrey 公式可以看出，探测器频率改变量 Δf 与沉积质量改变量 Δm 是线性关系。Glassford 等人的研究表明，质量灵敏度 C_f 值通常只与晶体的基本物理特性相关，随温度的变化很小，5 K 低温下 QCM 的质量灵敏度为 298 K 温度下质量灵敏度的 99.937%，温度的变化对其质量灵敏度的变化可以忽略。随着石英晶体基频的升高，探测器的灵敏度提升，一定基频的石英晶体的 C_f 值对应一个常数。表 1 为 AT 切型石英晶体的质量灵敏度^[14]。

TZ-1 货运飞船的 QCM 探测器使用的石英晶体谐

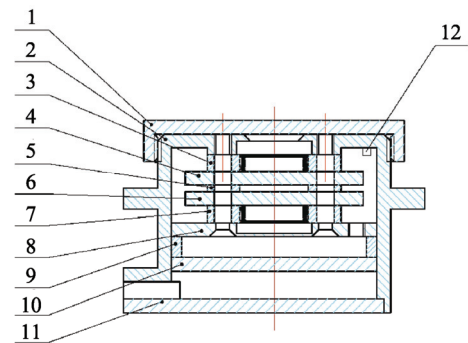
表 1 AT 切型石英晶体的质量灵敏度

基频/MHz	质量灵敏度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$)
5	1.77×10^{-8}
10	4.42×10^{-9}
15	1.96×10^{-9}
20	1.10×10^{-9}

振基频为 10 MHz，石英晶体采用 AT 切割，因此其质量灵敏度为 $4.42 \times 10^{-9} \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{Hz})$ 。

1.2 探测器组成

TZ-1 货运飞船 QCM 探测器结构如图 1 所示，采用两个 AT 切割基频 10 MHz 的石英晶片前、后安装，即传感晶片和参考晶片，分别与各自的激励芯片构成振荡电路，然后进行混频差频输出。通过差频将晶片 10 MHz 左右的基频信号转换成数 kHz 的输出信号，降低了频率采集的难度。传感晶片暴露于污染环境中，污染物沉积后振动频率降低，参考晶片不暴露于污染环境中，振动频率不受污染物影响，由两个晶片振荡频率之差，能够测量出沉积在传感晶片表面的污染量的大小。QCM 探测器两晶片采用相似的温度频率特性，当温度发生变化时，两个晶片的振荡频率都发生相似的变化，通过差频抵消，使得差频输出信号温度效应降低。



1. 探头盖；2. 外壳；3. 传感晶片绝缘垫；4. 传感晶片；5. 绝缘垫；6. 参考晶片；7. 参考晶片绝缘垫；8. 固定板；9. 电路板垫圈；10. 电路板；11. 盖板；12. 热敏电阻

图 1 QCM 探测器结构

1.3 探测器性能

TZ-1 货运飞船 QCM 探测器的传感晶片比参考晶片的振动频率约低 6 kHz，因此 QCM 探测器的输出频率会随着沉积污染物质量增长而增加。石英晶片振荡频率会随着温度的变化而改变，QCM 探测器选用温度系数低的 AT 切割石英晶片，并通过传感晶片与参考晶片的温频匹配来减小温度的影响。在工作温度范围内，将温度导致的频率改变控制在数十赫兹。QCM 探测器采用热敏电阻测温，在轨探测过程中，可以通过选择工作温度条件相当的时刻来获取污染

物的沉积信息，消除温度对于探测结果的影响。

TZ-1 货运飞船 QCM 探测器的主要性能指标见表 2。

表 2 QCM 探测器主要性能指标

参数	技术指标
质量灵敏度	$4.42 \times 10^{-9} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{Hz})$
量程范围	$0 \sim 5 \times 10^{-5} \text{ g}/\text{cm}^2$
工作温度范围	$-55 \sim 85 \text{ }^\circ\text{C}$
采样频率	1 Hz

2 在轨探测数据分析

TZ-1 货运飞船 QCM 探测器安装在舱外后锥段第 III 象限。TZ-1 货运飞船在轨运行期间，从 2017 年 5 月 31 日开始至 2017 年 9 月 3 日期间，QCM 探测器进行了监测试验，因为需要配合飞船开展其他试验任务，因此 QCM 探测器在测试过程中多次进行了开机、关机的操作，导致了监测数据的不连续。

从 2017 年 7 月 13 日至 2017 年 8 月 18 日期间，QCM 探测器获取了相对连续的探测数据，文中对这一时间区间的测试结果进行分析。在轨污染监测数据如图 2 所示，QCM 探测器在轨的 36 d 时间内，其表面污染沉积量为 $1.64 \times 10^{-6} \text{ g}/\text{cm}^2$ 。

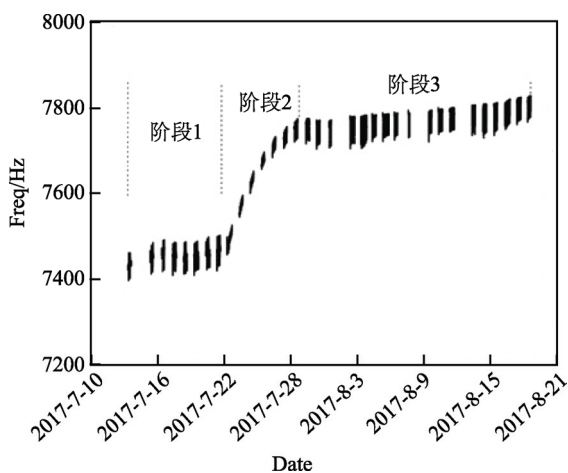


图 2 在轨污染监测数据

图 3 为美国使用航天器污染物中常见的 Silicones 对太阳吸收率影响的测试结果^[15]。

对于 Silicones 污染物，通常 $1 \times 10^{-6} \text{ g}/\text{cm}^2$ 污染量级对应于 10 nm 污染膜厚度，可见 TZ-1 货运飞船的污染累积量已经达到影响污染敏感器件光学性能的量级。

从图 2 中可以看出，在不同试验时间，QCM 探测器的污染量增长速率有着明显的差异。将污染监测试验分为三个阶段，各阶段的污染增长速率见表 3。

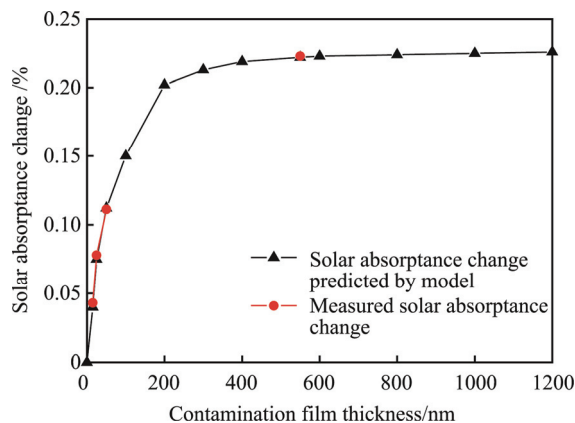


图 3 太阳吸收率随污染物厚度变化曲线 (Silicones)

表 3 污染累积量及日增长速率

阶段	日期	污染累积量/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)	日均污染量/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)
1	2017-7-13— 2017-7-21	1.77×10^{-7}	2.2×10^{-8}
2	2017-7-22— 2017-7-28	1.22×10^{-6}	2.03×10^{-7}
3	2017-7-29— 2017-8-18	2.34×10^{-7}	1.2×10^{-8}

从 2017 年 7 月 13 日至 2017 年 7 月 21 日，为阶段 1，这个阶段中 QCM 探测器频率增长了 40 Hz，即污染累积量为 $1.77 \times 10^{-7} \text{ g}/\text{cm}^2$ ，每天的污染增长量为 $2.2 \times 10^{-8} \text{ g}/\text{cm}^2$ 。从 2017 年 7 月 22 日至 2017 年 7 月 28 日，为阶段 2，这个阶段中 QCM 探测器频率增长了 277 Hz，即污染累积量为 $1.22 \times 10^{-6} \text{ g}/\text{cm}^2$ ，每天的污染增长量为 $2.03 \times 10^{-7} \text{ g}/\text{cm}^2$ 。从 2017 年 7 月 29 日至 2017 年 8 月 18 日，为阶段 3，这个阶段中 QCM 探测器频率增长了 53 Hz，即污染累积量为 $2.34 \times 10^{-7} \text{ g}/\text{cm}^2$ ，每天的污染增长量为 $1.2 \times 10^{-8} \text{ g}/\text{cm}^2$ 。造成各阶段污染增长速率差异明显的原因主要是由于飞船在轨过程中进行了姿态调整，导致 QCM 探测器周边污染出气源遭受的环境改变。

分别针对这三个试验阶段进行分析，测试结果如图 4 所示。

阶段 1 污染测试结果如图 4a 所示，测试过程中，QCM 探测器的污染增长速率基本保持一致。从其温度测试结果可以看出，QCM 探测器每天的最高工作温度维持在 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右，最低温度为 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。

阶段 2 污染测试结果如图 4b 所示，测试过程中，QCM 探测器的污染增长速率增加较大，并随着时间逐渐减缓。从其温度测试结果可以看出，QCM 探测器每天初始时的最高工作温度为 $13.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右，最低温度为 $-8.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右；结束时最高温度为 $5.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右，最低温度为 $-4.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。

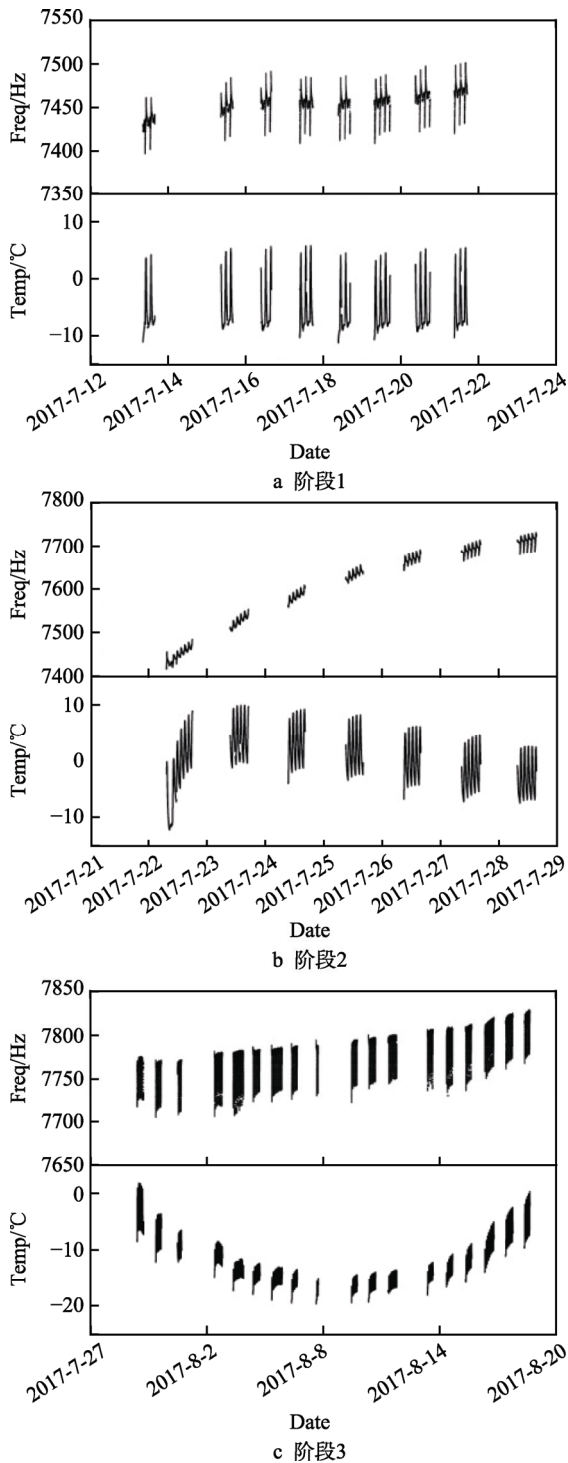


图 4 污染测试结果

阶段 3 污染测试结果如图 4c 所示, 测试过程中, QCM 探测器的污染增长速率降低。从其温度测试结果可以看出, QCM 探测器每天初始时的最高工作温度为 1.6 °C 左右, 最低温度为 -7.2 °C 左右; 结束时最高温度为 -15.0 °C 左右, 最低温度为 -19.2 °C 左右。

由上述测试结果可知:

1) TZ-1 货运飞船 QCM 探测器在轨 36 d 时间内, 污染沉积量为 $1.64 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2$, 污染累积量达到

影响污染敏感器件光学性能的量级。

2) 通过各阶段的测试结果可以看出, 阶段 2 QCM 探测器的工作温度区间明显高于阶段 1, 阶段 1 的工作温度区间要高于阶段 3。QCM 探测器的工作温度升高, 表明周边区域的放气源的温度也相应增加, 而放气源温度的增加也导致了放气源出气污染物增加, QCM 探测器探测的污染沉积量也相应增加。

3) 真空环境下温度参数是影响出气污染量的关键因素, 可以通过控制出气污染源温度的方式, 进行航天器在轨污染控制。

将 TZ-1 货运飞船 QCM 探测器测试结果与文献 [9] 中 SkyLab QCM 探测器测试结果及文献 [12] 中 TG-1 微质量计探测结果进行比较, 结果见表 4。

表 4 TZ-1 与 Skylab、TG-1 污染测试结果比较

型号	时间/d	污染累积量/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)	日均污染量/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)
Skylab	106	6.5×10^{-6}	6.1×10^{-8}
TG-1	45	3.65×10^{-6}	8.1×10^{-8}
TZ-1	36	1.64×10^{-6}	4.6×10^{-8}

Skylab QCM 探测器在轨 106 d 时间内, 污染沉积量为 $6.5 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2$, 平均每天的污染累积量为 $6.1 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^2$ 。TG-1 微质量计在轨 45 d 时间内, 污染沉积量为 $3.65 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2$, 平均每天的污染累积量为 $8.1 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^2$ 。TZ-1 货运飞船 QCM 探测器在轨 36 d 时间内, 污染沉积量为 $1.64 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2$, 平均每天的污染累积量为 $4.6 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^2$ 。综合比较, 污染沉积量量级基本相当。

3 结论

文中利用 QCM 探测器对“TZ-1”货运飞船长期在轨污染状况进行了监测, 分析了污染监测数据。结果表明, 航天器在轨过程中, 长期污染累积量已经达到影响污染敏感器件光学性能的量级, 航天器污染控制措施仍需要进一步加强; 污染源温度是影响航天器污染累积量的一个重要因素, 也是航天器在轨污染控制的一个重要措施。探测数据为污染源控制、污染敏感器件的布置等航天器设计提供了参考, 还需进一步加强在轨污染环境及效应探测, 建立污染环境数据库, 为航天器可靠性设计提供数据支持。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 于钱, 杨东升, 臧卫国, 等. 卫星热试验舱内污染监测

- 及烘烤出气方法研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(3): 29-33.
- [3] 院小雪, 周传良, 杨东升. 航天光学系统的污染控制技术 [J]. 航天器环境工程, 2012, 29(2): 168-172.
- [4] 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.
- [5] 院小雪, 于钱, 臧卫国, 等. 非金属材料放气对砷化镓电池的影响分析[J]. 装备环境工程, 2015, 12(3): 45-48.
- [6] ARNOLD G S. Spacecraft Contamination Model Development[C]// Optical Systems Contamination and Degradation. San Diego California: Proceedings of the SPIE, 1998: 227-289.
- [7] 李娜, 院小雪, 孟立飞, 等. 沸石分子筛对航天器分子污染物的吸附性能研究[J]. 宇航学报, 2016, 37(4): 494-498.
- [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.
- [9] NAUMANN R, MOORE W, NISEN D, et al. Quartz Crystal Microbalance Contamination Monitors on Skylab: A Quick Look Analysis[R]. Marshall Space Flight Center, 1973.
- [10] WOOD B E, HALL D F, LESH O J C, et al. On-orbit Midcourse Space Experiment (MSX) Satellite Environment Flight Experiments[R]. AIAA 99-0252, 2013
- [11] 院小雪, 庞寿成, 杨东升, 等. “新技术验证一号”卫星在轨污染探测数据分析[J]. 宇航学报, 2016, 37(2): 240-244.
- [12] 唐萍, 朱光武, 秦国泰, 等. “天宫一号”目标飞行器表面污染物沉积探测数据及分析[J]. 载人航天, 2014, 20(5): 491-496.
- [13] 徐秀明, 王俊德, 李海洋. QCM 和 SAW 传感器的原理及其在现场检测中的应用[J]. 化学进展, 2005, 17(5): 876-880.
- [14] 杨东升, 臧卫国, 于钱. 低温石英天平在材料放气污染特性测试中的应用[J]. 航天器环境工程, 2005, 22(5): 300-303.
- [15] GARY P, MIRIA M F. Contamination Examples and Lessons from Low Earth Orbit Experiments and Operational Hardware[R]. Marshall Space Flight Center, 2009.