

惯性器件加速贮存环境性能变化规律 及失效机理

张世艳¹, 刘俊¹, 黄波¹, 朱蕾¹, 陈源¹, 魏小琴¹, 杨朝明²

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.西安现代控制技术研究所, 西安 710065)

摘要: **目的** 研究惯性器件的加速贮存环境性能退化规律, 分析失效薄弱环节及其失效机理。**方法** 开展惯性器件的加速贮存试验, 进行惯性器件的零偏、标度因数的检测, 用扫描电子显微镜、红外显微仪、气质联用仪等分析仪器, 监测微观组织、结构损伤情况。针对石英挠性加速度计在加速贮存试验过程中的变化行为, 分析温度环境因素对其损伤的微观作用机制, 解释宏观性能退化内在原因。**结果** 惯导系统中, 石英挠性加速度计在加速贮存试验4个周期后, 其零偏超出阈值范围。**结论** 惯导系统中的薄弱环节为石英挠性加速度计的粘结剂。在加速贮存试验过程中, 粘结剂中的增塑剂邻苯二甲酸二异辛酯 (DEHP) 发生分解生成挥发物, 环氧树脂胶618的双酚A也少量挥发。当石英挠性加速度计从高温冷却至室温, 检测宏观性能时, 两种挥发物沿摆片移动至摆片底部, 与力矩器镜面形成粘连, 使摆片无法进行有效的工作 (摆动)。

关键词: 惯性器件; 石英加速度计; 加速贮存试验; 失效机理

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.03.016

中图分类号: TJ07 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)03-0076-05

Performance Change Law and Failure Mechanism of Inertial Devices in Accelerated Storage Environment

ZHANG Shi-yan¹, LIU Jun¹, HUANG Bo¹, ZHU Lei¹, CHEN Yuan¹, WEI Xiao-qin¹, YANG Chao-ming²

(1. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China;

2. Xi'an Modern Control Technology Institute, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: Objective To research the accelerated storage performance degradation rules and analyze the weakness and the failure mechanisms of inertia device. **Methods** Accelerated storage test of inertial devices was developed; the zero offset of quartz flexible accelerometer was tested; and the microstructure and structural damage were detected by electron microscopy, infrared microscopy and gas chromatography-mass spectrometry. In allusion to changes of quartz flexible accelerometer in the accelerated storage test, the microcosmic mechanism of environmental factors such as temperature was analyzed; and the internal cause of the degradation of macro properties was explained. **Results** In the inertial navigation system, the zero bias of the quartz flexible accelerometer exceeded the threshold value after 4 cycles of high temperature test. **Conclusion** The weakness of the inertial navigation system is the binder in the quartz flexible accelerometer. During the high temperature test, the plasticizer of di (2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) is decomposed to volatile matter, and the biphenyl A of epoxy resin is also volatilized. When the accelerometer is cooled from high temperature to room temperature, the two kinds of volatiles are moved to the bottom of the pendulum according to the pendulum, and the surface of the torque sensor is adhered. As a result, the pendulum cannot work effectively.

KEY WORDS: inertia device; quartz flexible accelerometer; accelerated storage test; failure mechanism

惯性制导系统具有自主式、全天候等优良特点，被广泛应用于航空、航天和航海业的导航、定位系统中。其主要作用是为各类运载体提供航向、姿态、位置、速度等运动矢量参数和相对参照坐标系等信息指令，核心元器件是加速度计、陀螺仪等。惯性器件的失效相当于惯性制导系统的作用消失，在长期贮存后是否还能达到精度指标要求，直接影响到航空、航天和航海设备定位性能的发挥。

惯导系统的价值高昂，通常在良好的包装与密封条件下贮存，在其长期贮存过程中，处于绝对湿度基本恒定的舱体内。由于装配环境的相对湿度一般控制在 60% 以下，影响贮存性能的主要因素可简化为温度，即主要考虑温度变化对惯导系统的影响。温度因素的影响会引起惯性器件的参数漂移，具体表现为零偏 K_0 与标度因数 K_1 的变化，进而造成超出允许的导航计算误差。国内目前的研究主要集中在惯性器件稳定性分析和建立惯性器件的数学模型分析。为研究惯导系统导航精度，建立导航误差数学模型，分析惯性器件误差对系统导航精度的影响^[1-3]，采用有限元仿真与物理试验相结合的方法，探索温度对石英挠性加速度计的热致变形误差影响规律^[4]。通过大量的重复性静态试验测试，分析石英挠性加速度计的误差来源，并建立导航系统定位精度误差补偿的数学模型^[5]。对惯性器件的贮存性能退化规律及其失效机理研究较少^[6-9]，且研究尚不够深入。

文中通过开展惯性器件的加速贮存试验，提高试验应力水平的方式，加速惯性器件的物理或化学变化过程，获得零偏、标度因数的检测数据，分析试验数据的特点和变化规律。针对已失效的试验样品，利用扫描电子显微镜、气-质联用仪等分析仪器，监测微观组织、结构损伤情况，分析温度对惯性器件

微观损伤作用机制，揭示惯性器件贮存环境的损伤机理，可为改进惯性器件工艺设计提供支撑，具有重要经济意义。

1 加速贮存试验

1.1 试验样品

试验样品为出厂检验合格的惯导系统产品，三套平行样品编号为 1#、2#、3#，每套惯导系统由三只光纤陀螺仪和三只石英挠性加速度计组合而成，试验样品如图 1 所示。加速贮存试验时，样品无包装。



图 1 惯导系统试验样品

1.2 试验条件

为了研究惯性器件在典型湿热海洋环境下库房贮存的性能演变规律及其失效机理，以实际监测的库房环境数据为基础，通过疲劳统计学中常用的雨流计数法建立环境载荷谱，结合惯性器件产品的结构特点，转化形成惯性器件加速贮存试验的试验方法，可反应实际贮存库房的温度变化对惯性器件的影响。根据参考文献[10]制定的试验谱如图 2 所示。

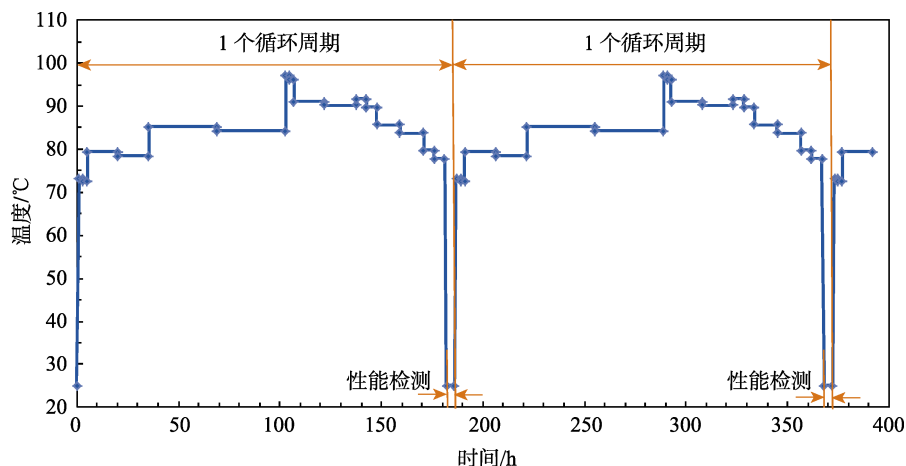


图 2 加速试验循环周期

1.3 试验设备和性能检测

采用湿热试验箱开展加速贮存试验,试验箱能够满足 40~100 °C 工作温度要求,温度允许偏差为 ± 2 °C,相对湿度控制在 30% 以下。

参考 GJB 2426A—2004《光纤陀螺仪测试方法》、GJB 2504—1995《石英挠性加速度计通用规范》等相应惯性器件的技术要求,进行惯性器件零偏、标度因数等性能检测。

1.4 试验过程

将惯性器件样品放置在试验箱隔架上,按加速试验应力量值条件设置试验箱运行参数,主要参数包括温度变化曲线、湿度数据。试验箱升温速率为 1 °C/min,以完成一个 180 h 的加速试验为一个循环周期。一个循环试验周期结束后,试验箱以 1 °C/min 的降温速率下降到常温后,再取样进行性能检测。试验总时间为 10 个循环试验周期,共计 1800 h。

1.5 失效机理分析

采用美国尼高力公司的 iN10 红外显微镜对摆片组极板上的污染物进行微区的表面全反射红外光谱检测。采用美国安捷伦公司的 AGILENT(6890N-5975C) 型气相色谱-质谱联用仪对摆片组极板上的污染物进行分子结构测试,色谱柱 HP-5MS 熔融烧结合石英毛细管(30 m \times 0.32 mm \times 1.0 μ m),进样口温度为 300 °C,载气为高纯氦气,载气流速为 25 mL/min,分流比为 25:1,总流动时间为 25 min。质谱采用 EI 离子源,离子源温度为 230 °C,质量过滤器的温度为 150 °C,接口温度为 250 °C。

2 结果分析与讨论

2.1 失效模式分析

加速贮存试验后惯导系统中 x 轴、 y 轴、 z 轴三个方向陀螺仪的零偏和标度因数数据并未超出阈值,且基本无变化。这说明在试验周期内,惯导系统中陀螺仪尚未发生明显的性能退化行为。

加速贮存试验后,惯导系统中 x 轴、 y 轴、 z 轴三个方向的石英挠性加速度计的零偏和标度因数的变化曲线如图 3 和图 4 所示。由图 3 可知,在试验 4 个周期之后,惯导系统样品 2[#]和样品 3[#]中 y 轴石英挠性加速度计发生无输出的失效现象。通过样品解剖,取出无输出的 y 轴石英挠性加速度计,更换正常验收合格的加速度计,将完整的惯导系统继续试验。对无输出的加速度计进行失效机理分析,更换的样品继续开展后续加速贮存试验,未发生失效行为。更换后的惯导系统中,加速度计的零偏值均满足判据要求。由图 4 可知,标度因数值随试验时间并未超出阈值范围

要求。由此可知,该惯导系统中,陀螺仪随时间变化并无明显性能退化行为,石英挠性加速度计的敏感参数是零偏,首先出现失效的是 y 轴方向,失效模式是无输出。

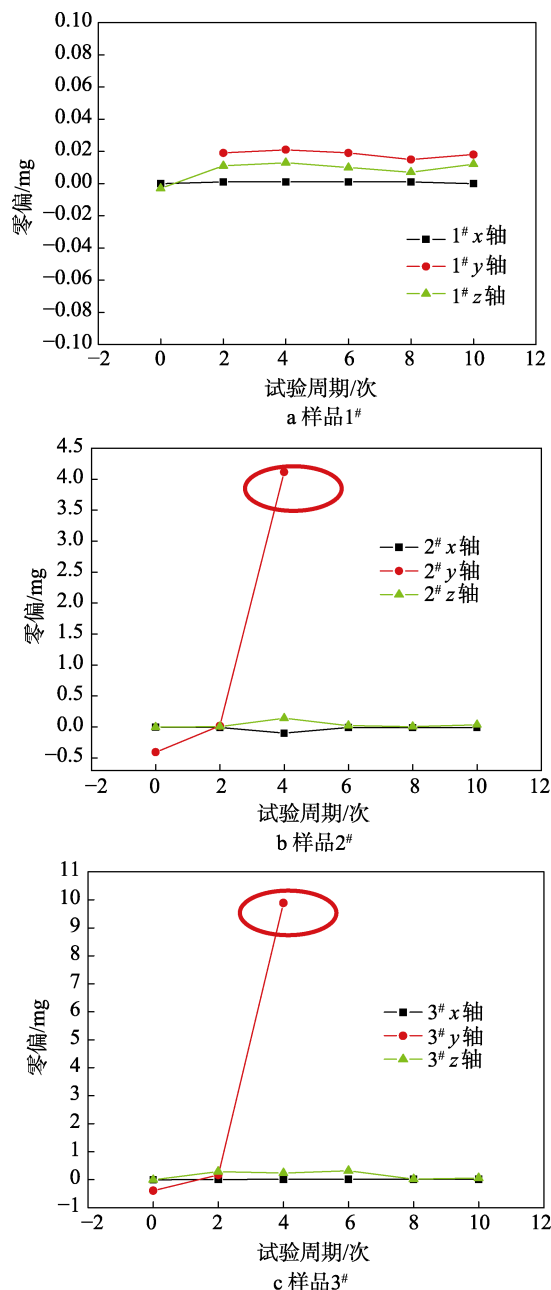


图3 三套惯导系统中 x 、 y 、 z 轴加速度计零偏值变化曲线

2.2 失效机理分析

由于惯导系统样品 2[#]和样品 3[#]发生无输出失效现象,为了研究其失效机理,将惯导系统样品 2[#]和样品 3[#]解剖,分别取出其中的 y 轴石英挠性加速度计,开展失效分析。石英挠性加速度计主要由伺服电路和表头组成,表头主要由外壳和表芯组成,表芯由上力矩器、摆片组、激光焊接腹带、下力矩器、伺服电路

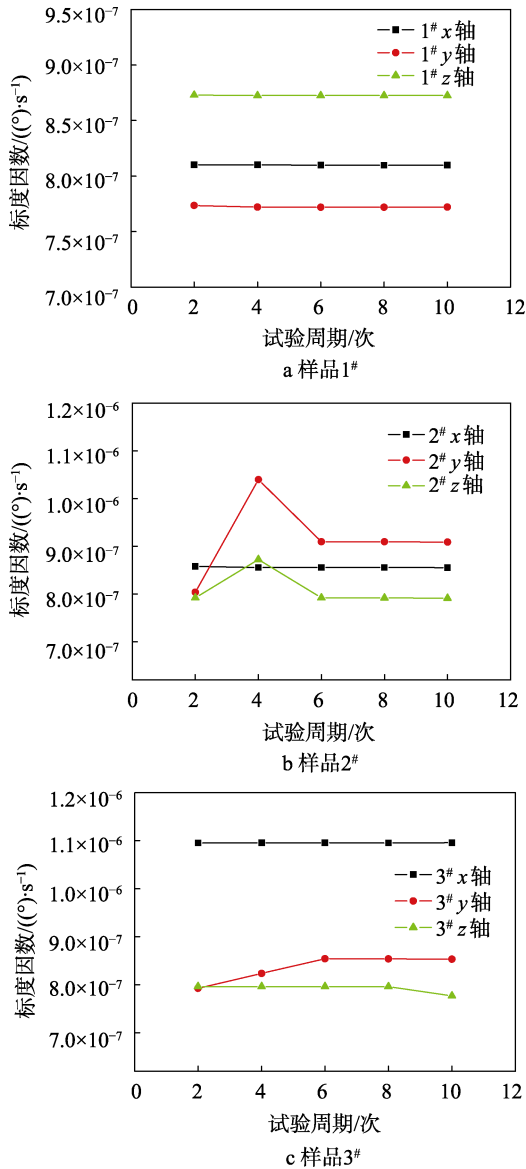


图 4 三套惯导系统中 x、y、z 轴加速度计标准因数数值变化曲线

组成。根据解剖结果，可明确失效部位应为表芯的摆片组。根据厂家提供的石英挠性加速度计摆片组生产工艺过程可知，摆片组的镀膜摆片与线圈之间主要通过丁腈橡胶和环氧树脂胶 618 粘结，表芯内部空间极为狭小，极少量的污染物就可使摆片发生粘连或卡滞，导致输出异常。采用金相显微镜、傅里叶红外光谱仪、气相色谱-质谱联用仪对加速度计的失效部位进行检测，并分析其失效机理。

1) 污染物形貌分析。利用 iN10 红外显微镜观察失效产品的摆片组，查看其表面清洁情况，微观形貌检测结果如图 5 所示。由图 5 可知，摆片组的极板及上力矩器的轭铁极板上均有污染物。由此推断石英挠性加速度计平时处于摆零状态放置，摆片在经过实验室加速贮存试验后，丁腈橡胶部分成分发生老化。当温度从高温冷却至室温时，该老化成分沿摆片移动至

摆片底部，使摆片发生粘连导致摆片组失效，并出现无输出的失效现象。

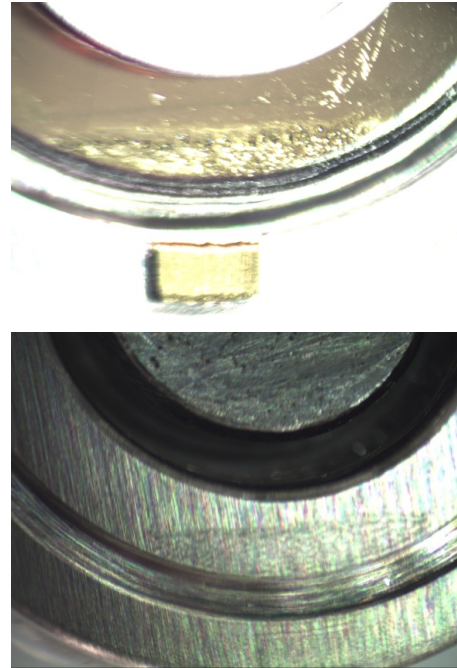


图 5 摆片极板及上轭铁极板存在污染物

2) 污染物结构分析。采用 iN10 红外显微镜对摆片组极板上的污染物进行微区（见图 6）的表面全反射红外光谱检测，其傅里叶红外光谱如图 7 所示。从

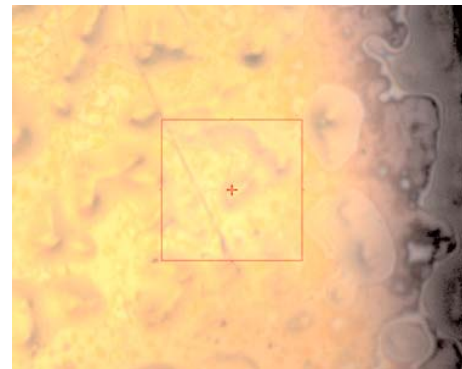


图 6 摆片污染物红外显微测试位置

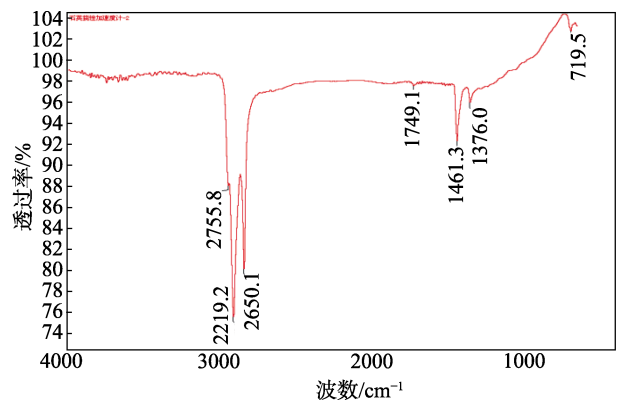


图 7 摆片污染物傅里叶红外光谱

图7可以看出,摆片污染物在波数为2956、2919、2850、1748、1461、1376、720 cm^{-1} 处存在强度不一的吸收峰。其中2919、2850 cm^{-1} 两处的吸收峰最强,查阅红外谱图,这两处的吸收峰分别为丁腈橡胶中— CH_2 碳氢键的对称和反对称伸缩振动特征峰,可认为摆片污染物中应存在丁腈橡胶相应成分。

3) 污染物化学结构分析。采用美国安捷伦公司的AGILENT(6890N-5975C)型气相色谱-质谱联用仪对摆片组极板上的污染物进行分子结构测试,其裂解气相色谱-质谱如图8和图9所示。可以看出,摆片污染物主要为丁腈橡胶增塑剂邻苯二甲酸二异辛酯分解产物挥发物、环氧树脂胶618的双酚A挥发物。

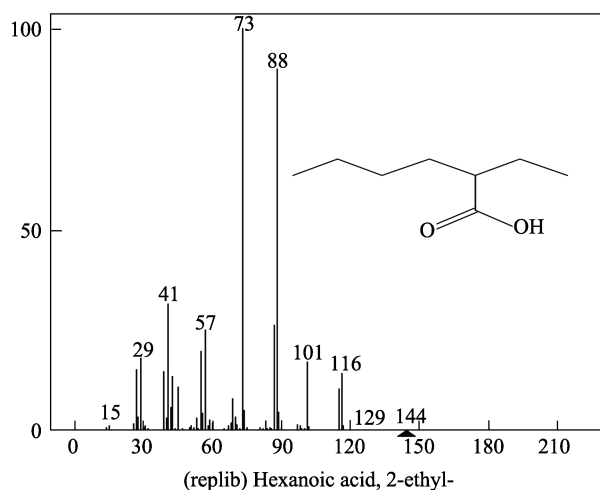


图8 摆片污染物丁腈橡胶的增塑剂裂解气相色谱-质谱

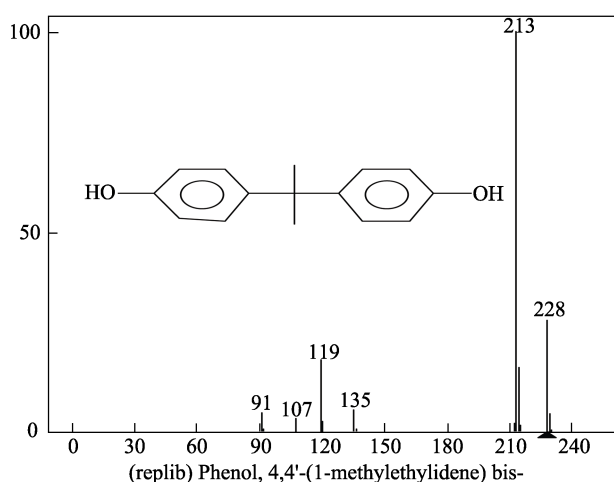


图9 摆片污染物环氧树脂胶618的双酚A裂解气相色谱-质谱

综合红外显微和气相色谱-质谱两种微观结构分析结果,石英挠性加速度计在开展加速贮存试验时,丁腈橡胶中的增塑剂邻苯二甲酸二异辛酯发生分解,生成挥发物,环氧树脂胶618的双酚A也少量挥发。当石英挠性加速度计从高温冷却至室温检测宏观性能时,两种挥发物沿摆片移动至摆片底部,与力矩器镜面形成粘连,使摆片无法进行有效的工作(摆动)。

3 结论

惯导系统中陀螺仪随时间变化并无明显性能退化行为,石英挠性加速度计的敏感参数是零偏,首先出现失效的是y轴方向,失效模式是无输出。其失效机理是加速度计镀膜摆片与线圈之间的粘结剂丁腈橡胶和环氧树脂胶618在高温老化时,发生分解生成挥发物使力矩器镜面粘连,导致加速度计的作用消失。由此可知,该惯导系统中的薄弱环节为石英挠性加速度计的粘结剂。研究获得的石英挠性加速度计贮存环境损伤机理,可为改进石英挠性加速度计工艺设计、合理延长惯导系统寿命提供技术途径和方向,具有重要经济意义。

参考文献:

- [1] 段然. 单轴摆式伺服线加速度计悬丝断裂故障的分析[J]. 可靠性物理与失效分析技术, 2012, 30(3): 35-39.
- [2] 张开东. 激光陀螺捷联惯导系统连续自标定技术[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2002.
- [3] 储海荣, 段镇, 贾宏光, 等. 捷联惯导系统的误差模型与仿真[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2779-2785.
- [4] 唐永超, 冯志刚, 田军, 等. 石英挠性加速度计热固耦合仿真分析[J]. 强度与环境, 2012, 39(6): 53-54.
- [5] 张鹏飞, 龙兴武. 石英挠性加速度计误差补偿模型的研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(4): 1100-1101.
- [6] 李天航. 惯性导航加速寿命试验和寿命预测方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [7] 王前程, 陈云霞, 邓泮鹏, 等. 加速度计加速退化机理一致性边界确定方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(11): 1512-1516.
- [8] 潘广泽, 黄创绵, 李小兵, 等. 石英挠性加速度计贮存寿命评价方法研究[J]. 可靠性与环境试验技术及评价, 2016, 34(1): 11-15.
- [9] 王洪, 李磊民, 黄玉清. 石英挠性加速度计零偏分析与建模方法[J]. 自动化仪表, 2014, 35(11): 13-16.
- [10] 陈源, 朱蕾, 朱启举, 等. 惯性器件加速试验环境谱编制与数据处理方法研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 86-90.