

某型航空包装箱加速试验方法研究

赵帅帅¹, 许玉珍¹, 陈靖怡¹, 杜雨芳²

(1.北京强度环境研究所, 北京 100076; 2.中国包装科研测试中心, 天津 300457)

摘要: **目的** 激发航空包装箱使用寿命内的潜在薄弱环节。**方法** 基于寿命期剖面和故障机理分析, 采用时间压缩、事件压缩和加速应力的加速方法, 设计一种综合考虑湿热、随机振动、叉运、人工拆装、冲击和跌落的多应力加速试验方法。**结果** 该试验将模拟包装箱 16 年使用寿命的试验时间加速至 96 天, 有效地激发了产品金属紧固件锈蚀、结构件部分损坏等潜在故障, 进而通过改进措施提升了包装箱的可靠性水平。

结论 该方法用于多应力加速试验合理可行。

关键词: 航空包装箱; 寿命期剖面; 加速试验

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.07.007

中图分类号: TB114.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)07-0034-04

Accelerated Testing Methods for Certain Aviation Packing Box

ZHAO Shuai-shuai¹, XU Yu-zhen¹, CHEN Jing-yi¹, DU Yu-fang²

(1. Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China;

2. China Packaging Research Test Center, Tianjin 300457, China)

ABSTRACT: The paper aims to stimulate weak links of aviation packing box. Based on potential failure mechanism and the life profile, an accelerated testing which gave overall consideration to damp heat test, random vibration test, fork transport test, artificial dismounting test, impact test and drop test was designed by time compression, events compression and accelerating stress method. The test time was shortened to 96 days to stimulate 16 years working life of packing box. The potential failures such as metal corrosion and structure damage were stimulated successfully. Furthermore, the reliability level of packing box was improved by improvement measures. The results show that this method is reasonable and feasible to design accelerated testing under multiple environmental stresses.

KEY WORDS: aviation packing box; life profile; accelerated testing

加速试验自美罗姆航展中心 1967 年首次给出统一定义至今, 已成功地应用于航天、航空、民用等诸多领域^[1-7]。目前国内探讨较多的应力施加方法是恒定和步进单应力加速方法, 多应力加速方法较少^[8-14]。对于机械产品, 在工作期间除工作应力外, 还会受到温度、湿度、振动等各种环境应力的综合影响而产生

故障。某型航空包装箱使用寿命为 16 年, 用于运输高精度飞机零部件, 在运输装卸过程中, 易受综合应力影响而发生损坏, 影响运输件安全。为了激发航空包装箱使用寿命内的薄弱环节, 文中基于寿命期剖面和故障机理分析, 设计了多应力加速试验方法, 暴露产品缺陷, 进而通过改进措施提升包装箱可靠性水平。

收稿日期: 2020-02-13; 修订日期: 2020-03-03

Received: 2020-02-13; Revised: 2020-03-03

作者简介: 赵帅帅 (1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为可靠性与环境试验。

Biography: ZHAO Shuai-shuai (1987—), Male, Engineer, Research focus: reliability and environmental test.

1 寿命期剖面和故障机理分析

寿命期剖面为产品自出厂到退役（包括报废）过程中有关事件和条件的时间历程^[15]。某型航空包装箱的寿命期剖面如图 1 所示。

航空包装箱潜在故障模式及机理分析如下：受环境因素而造成的老化；高温高湿造成包装箱金属紧固件锈蚀，影响结构强度；陆运、海运过程中受到振动

造成机械损伤；叉车装运过程中，叉齿碰撞造成机械损伤；反复拆装造成机械损伤；装卸和运输过程中受到的冲击和跌落造成机械损伤。

包装箱寿命期内环境应力包括自然环境应力和诱发环境应力。自然环境应力中敏感应力主要是海运过程中的湿热应力；诱发环境应力中的敏感应力主要是陆运、海运、装卸过程中的随机振动、叉运、人工拆装、冲击、跌落，这些敏感应力选作加速试验应力。

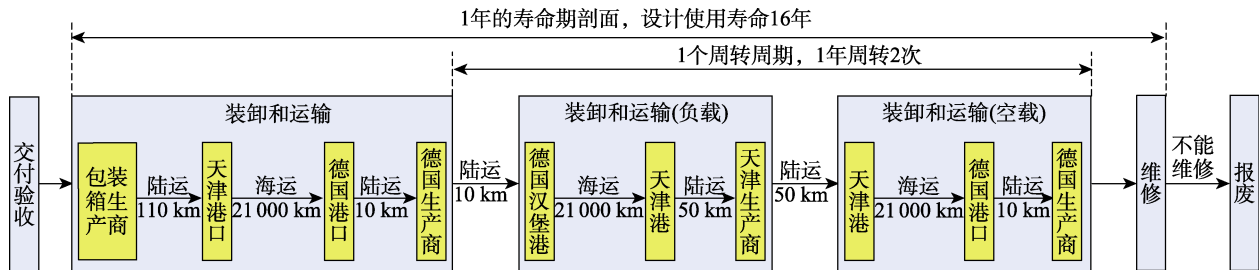


图 1 航空包装箱寿命期剖面

2 加速试验

基于寿命期剖面和故障机理分析，参照标准，设计加速试验方案。

2.1 加速方法

依据 IEC 62506—2013 的加速方法^[16]，航空包装箱主要通过三种手段实现加速。

1) 时间压缩方法是一种只考虑产品明显损伤状态下的持续时间的加速试验方法，适用于那些产品工作应力及其累计损伤明显高于其他工作模式（非工作状态或者备用状态）下的场合。航空包装箱只考虑寿命期内装卸和运输等对产品有明显损伤的时间段，而忽略存储等备用状态对产品基本无损伤的时间段。

2) 事件压缩方法适用于当一种应力是不断循环的，可以通过增加应力重复频次来实现加速的场合。这种方式下，产品动作的次数应该与其实际使用时产生的累积损伤效果保持一致。包装箱承受的叉运、人工拆装、冲击、跌落应力均采用事件压缩方法。

3) 加大应力方法主要通过加大环境应力来实现加速目的。包装箱承受的湿热、随机振动应力采用此方法加速，加速应力不超过包装箱的工作极限应力。

2.2 试验方案

基于寿命期剖面和敏感应力分析，航空包装箱加速试验项目包括湿热试验、随机振动试验、叉运试验、人工拆装试验、冲击试验和跌落试验。对于应力施加方式，以每种应力模拟寿命期的累积损伤为原则，兼顾工程上湿热应力与其他应力综合施加导致试验经

费的大幅增加。因此，加速试验方案采用依次施加各种应力的方式，此方法也被 IEC 62506—2013 及文献 [17] 推荐和采用。

1) 湿热试验采用加大应力方法，主要考核海运过程中高温高湿环境对包装箱金属紧固件的影响。湿热试验仅加速温度应力，选取海运高温高湿时间段的平均相对湿度 85%，温度应力选取 85 °C，金属紧固件材质为铝合金，激活能为 0.48 eV，海运过程中的平均温度为 25 °C。采用阿伦尼斯模型^[18]，根据式 (1) 求取加速因子为 22.94。包装箱海运过程 1 年经历高温高湿环境为 90 天，模拟 1 年的湿热试验时间为 94 h。

$$d = \exp \left[\frac{E}{k} \left(\frac{1}{t_0} - \frac{1}{t_j} \right) \right] \quad (1)$$

式中： E 为激活能； k 为玻尔兹曼常数， $k=8.617 \times 10^{-5}$ eV/°C； t_0 是正常温度； t_j 是加速温度。

2) 随机振动试验采用加大应力方法，主要考核陆运、海运过程中振动对包装箱结构的影响，包括陆运随机振动试验和海运随机振动试验。陆运随机振动试验条件按照 ISTA 3E—2009 进行^[19]，1 年中陆运里程为 360 km，振动量级 $G_{\text{rms}}=0.52$ ，时间为 30 min。海运随机振动试验条件在海运实测随机振动条件振动量值 G_{rms} 基础上增大至 10 倍，疲劳等价关系见式 (2)，其中，材料常量 k 取值 $2^{[20]}$ 。1 年中海运随机振动加速后振动量级 $G_{\text{rms}}=0.22$ ，时间为 42 min。

$$T_1 / T_0 = (W_0 / W_1)^k = (G_{\text{rms}0} / G_{\text{rms}1})^{2k} \quad (2)$$

式中： T_1 为试验的时间； T_0 为实际的时间； W_0 为实测的随机振动量值，见图 2； W_1 为试验的随机振

动量值； G_{rms0} 为实测的随机振动加速度均方根值； G_{rms1} 为试验的随机振动量加速度均方根值。

3) 叉运和人工拆装试验。叉运和人工拆装试验采用事件压缩方法, 主要考核装卸过程中叉运和人工拆装对包装箱结构的影响。经过统计, 包装箱 1 年平均经历叉运 36 次, 人工拆装 6 次, 按照该次数模拟实际叉运和拆装过程进行试验。

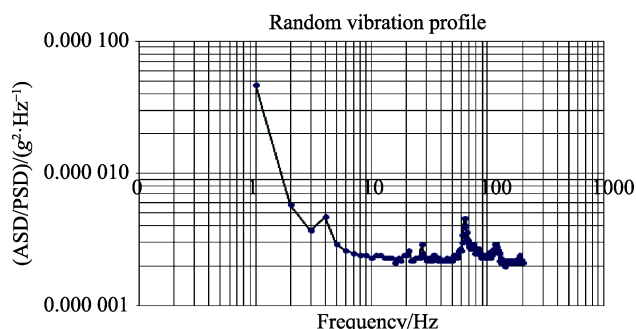


图 2 实测随机振动条件

Fig.2 Determined condition of random vibration

4) 冲击和跌落试验。冲击和跌落试验采用事件压缩方法, 主要考核运输和装卸过程中冲击和跌落对包装箱结构的影响。经过统计, 包装箱 1 年平均经历冲击 18 次, 跌落 9 次, 按照该次数进行试验, 冲击和跌落位置平均分配于不同面和棱。

5) 总体方案。包装箱加速试验共 16 个循环, 每个循环等效 1 年, 模拟包装箱 16 年使用寿命过程中敏感应力湿热、随机振动、叉运、人工拆装、冲击和跌落的综合影响。每个循环试验按 1) — 4) 中规定的量级和时间进行, 试验时间为 6 天, 总试验时间为 96 天。

2.3 试验结果

试验过程中, 金属紧固件发生锈蚀。在第 13 个循环, 包装箱侧板分离, 结构出现部分损坏, 部分试验故障如图 3 所示。针对故障进行了分析, 并采取了改进措施^[21]: 对金属紧固件增加了防锈处理工艺, 对损坏部位进行了加固设计, 增强了包装箱的结构强度。对改进后的产品增加了 2 个循环的试验, 验证改进措施的有效性, 后续试验未出现故障。通过本次试验, 包装箱的可靠性水平得到了提高, 在预防性维修的情况下, 使用寿命满足 16 年设计要求。

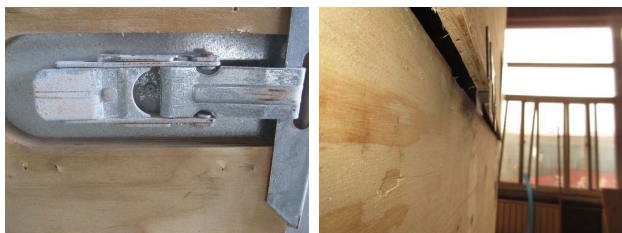


图 3 试验故障

Fig.3 Test failure

3 结语

为了激发航空包装箱 16 年使用寿命内的薄弱环节, 文中基于寿命期剖面 and 故障机理分析, 设计了多应力加速试验方法。试验时间加速至 96 天, 快速暴露了产品缺陷, 进而通过改进措施提升了包装箱可靠性水平。因此, 对于使用工况复杂产品, 准确建立寿命期剖面 and 定位敏感应力, 合理设计加速试验方法, 可以有效地激发产品寿命期薄弱环节, 提升产品可靠性水平。

参考文献:

- [1] YURKOWSKY W, SCHAFER R E, FINKELSTEIN J M. Accelerated Testing Technology. Technical Report[R]. No RADC-TR-67-420, 1967.
- [2] 冯颖. 航天电子产品加速寿命试验技术研究[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(6): 571-574.
FENG Ying. The Research on Accelerated Life Test of Spaceflight Electronic Products[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(6): 571-574.
- [3] 刘志全, 李新立, 遇今. 长寿命航天器机构的加速寿命试验方法[J]. 中国空间科学技术, 2008(4): 65-71.
LIU Zhi-quan, LI Xin-li, YU Jin. Methods of Accelerated Life Tests for Long-life Spacecraft Mechanisms[J]. Chinese Space Science and Technology, 2008(4): 65-71.
- [4] 张莘莘. 航空产品加速寿命试验研究及应用[J]. 北京航空航天大学学报, 1995, 21(4): 124-129.
ZHANG Ping-ping. Study and Application of Accelerated Life Test for Aviation Products[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1995, 21(4): 124-129.
- [5] 刘文珽, 李玉海, 陈群志, 等. 飞机结构腐蚀部位涂层加速试验环境谱研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(1): 109-112.
LIU Wen-ting, LI Yu-hai, CHEN Qun-zhi, et al. Accelerated Corrosion Environmental Spectrums for Testing Surface Coatings of Critical Areas of Flight Aircraft Structures[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(1): 109-112.
- [6] 卢振永, 金伟良, 王海龙, 等. 人工气候模拟加速试验的相似性设计[J]. 浙江大学学报, 2009, 43(6): 1071-1076.
LU Zhen-yong, JIN Wei-liang, WANG Hai-long, et al. Similar Design on Accelerated Test of Artificial Climate Simulation[J]. Journal of Zhejiang University, 2009, 43(6): 1071-1076.
- [7] 王冲, 刘焕芹, 罗遥凌, 等. 电脉冲用于混凝土抗硫酸盐侵蚀加速试验方法[J]. 同济大学学报, 2013, 41(12): 1865-1871.
WANG Chong, LIU Huan-qin, LUO Yao-ling, et al. Accelerated Test Method of Sulfate Attack Resistance of Concrete Based on Electrical Pluse[J]. Journal of Tongji

- University, 2013, 41(12): 1865-1871.
- [8] 骆燕燕, 陆俭国, 李文华, 等. 密封式电磁继电器贮存加速寿命试验方法研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(8): 997-1001.
LUO Yan-yan, LU Jian-guo, LI Wen-hua, et al. Study on the Accelerated Life Test of Storage Life for Sealed Electromagnetic Relays[J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(8): 997-1001.
- [9] 葛广平, 刘立喜. 竞争失效产品恒定应力加速寿命试验的优化设计[J]. 应用概率统计, 2002, 18(3): 260-268.
GE Guang-ping, LIU Li-xi. Optimum Constant-Stress Accelerated Life Tests with Competing Causes of Failure under Exponential Distribution[J]. Chinese Journal of Applied Probability and Statistics, 2002, 18(3): 260-268.
- [10] 郑波, 葛广平. 基于步进应力加速寿命试验的引信贮存寿命评估[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(5): 545-547.
ZHENG Bo, GE Guang-ping. Estimation of Fuze Storage Life Based on Stepped Stress Accelerated Life Testing[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(5): 545-547.
- [11] 谭源源, 张春华, 陈循. 竞争失效场合步进应力加速试验统计分析[J]. 航空学报, 2011, 32(3): 429-437.
TAN Yuan-yuan, ZHANG Chun-hua, CHEN Xun. Analysis of Step Stress Accelerated Testing with Competing Failure Modes[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2011, 32(3): 429-437.
- [12] 罗小林, 张亚. 无线电引信步降应力加速寿命试验技术研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(14): 3482-3484.
LUO Xiao-lin, ZHANG Ya. The Study on the Fuse Step-down-stress Accelerated Life Test Technology[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(14): 3482-3484.
- [13] 陈文华, 李红石, 连文志, 等. 航天电连接器环境综合应力加速寿命试验与统计分析[J]. 浙江大学学报, 2006, 40(2): 348-351.
CHEN Wen-hua, LI Hong-shi, LIAN Wen-zhi, et al. Accelerated Life Test and Statistical Analysis of Aerospace Electrical Connectors under Multiple Environmental Stresses[J]. Journal of Zhejiang University, 2006, 40(2): 348-351.
- [14] 查国清, 黄小凯, 康锐. 基于多应力加速试验方法的智能电表寿命评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(12): 2217-2223.
ZHA Guo-qing, HUANG Xiao-kai, KANG Rui. Smart Meter Lifetime Evaluation Based on Multi-stress Acceleration Test Method[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(12): 2217-2223.
- [15] GJB 4239—2001, 装备环境工程通用要求[S].
GJB 4239—2001, General Requirement of Materiel Environmental Engineering[S].
- [16] IEC 62506—2013, Methods for Product Accelerated Testing[S].
- [17] KRASICH M, CORPORATION B. Accelerated Reliability Growth Testing and Data Analysis Method[J]. Reliability and Maintainability Symposium, 2008, 1: 385-391.
- [18] 茆诗松. 加速寿命试验的加速模型[J]. 质量与可靠性, 2003(2): 15-17.
MAO Shi-song. The Accelerated Model of Accelerated Life Testing[J]. Quality and Reliability, 2003(2): 15-17.
- [19] ISTA 3E-2009, Unitized Loads of Same Product[S].
- [20] GJB/Z 150.16A, 军用装备实验室环境试验方法 第 16 部分: 振动试验[S].
GJB/Z 150.16A, Environmental Test Methods for Military Equipment Laboratory Part 16: Vibration Test[S].
- [21] GJB/Z 899A, 可靠性鉴定和验收试验[S].
GJB/Z 899A, Reliability Assessment and Acceptable Test[S].