

膜片组件贮存失效分析与加速贮存试验研究

徐静¹, 李海波¹, 杨晋勇², 郑德强¹, 李振将²

(1. 北京强度环境研究所 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100076;

2. 北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076)

摘要:膜片组件是影响某伺服系统贮存可靠性的关键部组件,在分析膜片组件在库房贮存条件下失效机理的基础上,通过有限元建模分析,预测了膜片组件的贮存主要失效模式。研究设计了膜片组件恒定温度应力加速贮存试验方案并实施试验,对膜片组件加速贮存试验获得的区间数据进行了插值处理,并对处理后的试验数据进行统计分析,得到了贮存条件下膜片组件的贮存期评估结论。

关键词:膜片组件;贮存失效分析;加速贮存试验;恒定应力;统计分析

DOI:10.7643/issn.1672-9242.2013.04.013

中图分类号:TJ760.89 **文献标识码:**A

文章编号:1672-9242(2013)04-0052-04

Storage Failure Analysis and Accelerated Storage Test of Diaphragm Assembly

XU Jing¹, LI Hai-bo¹, YANG Jin-yong², ZHENG De-qiang¹, LI Zhen-jiang²

(1. Science and Technology on Reliability and Environment Engineering Laboratory, Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China;

2. Beijing Research Institute of Precise Mechatronics and Controls, Beijing 100076, China)

Abstract: Diaphragm assembly is a critical component influencing storage reliability of servo system. Based on analysis of depot storage environment and the failure mechanism of diaphragm assembly, main storage failure modes of diaphragm assembly were predicted though finite element analysis. An accelerated storage test for the diaphragm assembly was designed and carried out. Linear interpolation algorithms were used to process the data obtained from the accelerated test of the diaphragm assembly. Through statistic analyzing of the processed data, the storage life of the diaphragm assembly under storage environment was evaluated.

Key words: diaphragm assembly; failure analysis; accelerated storage test; constant stress; statistic analysis

随着航天科技的发展和工艺水平的提高,导弹产品一般具有较长的贮存寿命和较高的贮存可靠性,利用自然贮存试验很难在研制阶段或较短的时间内给出产品的贮存期指标^[1]。

加速寿命试验在保证不改变产品失效机理的前提下,通过提高某单一(如温度、湿度、振动、压力等)或综合应力使产品在短时间内失效^[2-4]。加速寿命试验时间效率相对较高,通过一定的数据分析方法,

收稿日期: 2013-02-19

作者简介: 徐静(1981—),女,硕士,助理工程师,主要研究方向为可靠性工程与加速试验技术。

可以快速外推得到产品在正常条件下的可靠性特征量。目前基于产品工作状态的加速试验寿命试验研究较多,加速贮存寿命试验的应用研究相对较少,且主要针对材料和电子元器件,部组件、整机的加速贮存试验还处于探索阶段。

某类型膜片组件是某伺服系统的关键部组件之一,用于结构密封。对膜片组件进行了加速贮存寿命试验研究,对试验产品进行了失效机理分析,设计开展膜片组件的温度应力加速贮存试验方法,实施膜片组件恒定温度应力的加速贮存试验,对试验数据进行统计推断,评估得到了膜片组件库房贮存条件下的贮存期。

1 膜片组件加速贮存试验方法

1.1 膜片组件的贮存失效机理

研究用膜片组件由金属结构件及膜片组成,通过结构胶粘接在一起。在贮存时,膜片组件的主要作用是密封,在工作时,膜片组件需承受一定大小的压强作用。

在库房贮存中,贮存环境的主要环境应力有温度和湿度等,而影响研究对象贮存的环境因素主要是温度。

温度、氧的作用下,使得非金属材料的化学成分、分子构造发生变化,引起材料表面或材料物理化学性质和机械性能的改变。对于膜片组件,高温会加速非金属材料 and 元件的老化和失效,使膜片裂纹、断裂、膨胀,胶粘剂粘接强度下降;低温会使结构材料机械强度减弱,但由于贮存中对低温有严格控制,一般不会产生太大影响。

试验研究及经验表明金属结构在贮存过程中很难发生失效,属高可靠性、长寿命产品。通过分析可得,膜片组件在贮存过程中的失效模式有两种:膜片破裂和膜片与结构脱粘。由结构胶的性能和产品使用及贮存过程中的强度要求认为膜片与结构脱粘的发生概率很小,从而判定膜片是膜片组件的薄弱环节,其失效原因可归为膜片老化。

1.2 膜片组件加速贮存试验方法

目前,常用的加速贮存试验方法有恒定应力加

速贮存试验、步进应力加速贮存试验、步退应力加速贮存试验等。恒加试验的评估结果精度最高,但所需时间较长,试验样本量较大;与恒加试验相比,步进试验与步退试验具有试验样本量小、试验时间短等优点,但它们的估计结果不如恒加试验的估计精确^[3]。

针对膜片组件,选择理论较为成熟的恒定应力加速试验方法。通过分析膜片组件的贮存环境和失效机理,得知温度是影响膜片组件贮存寿命的主要因素,因此选择温度应力作为膜片组件加速贮存试验的加速应力。

4个应力等级的恒加试验是目前认可的较优的恒加试验方法^[5],故选取4个加速应力水平。通过膜片组件温度极限摸底试验,确定产品的贮存温度应力极限,开展膜片组件贮存温度极限摸底试验,确定膜片组件的高温应力极限。文献[1]指出为保证产品的失效机理不变,最高加速应力较极限应力低15~30℃,据此确定膜片组件加速贮存试验的最高加速应力水平为90℃。根据膜片组件贮存环境温度的均值确定最低加速应力水平为60℃。按照GB 2689,以温度为加速应力时,中间应力水平由最低、最高应力及温度倒数等间隔原则确定^[6]。膜片组件加速贮存试验的4个应力水平为60,70,80,90℃。

对于高可靠长寿命的产品,试验件的数量不应太少,最好不少于30件。膜片组件加速贮存的试验件为64件,平均分为4组,每组16件。综合考虑试验时间和失效对评估精度的影响,试验采用定数截尾或定时截尾的试验方式。

膜片长期贮存会使产品的应力破坏强度下降,在压力作用下可能出现裂纹和破裂等情况,膜片组件的失效判据为气密性测试出现泄漏。根据产品的失效机理,试验采用先疏后密的试验测试间隔。为减少测试对产品的影响,测试间隔时间不能过短。

2 膜片组件失效模式分析

膜片组件由金属结构件及膜片通过胶粘剂粘接组成。定期测试时,气体压强施加于膜片上。根据膜片组件结构特点,建立膜片组件的实体有限元模型,依据膜片组件的实际工作和测试情况,在膜片组建上施加均布压强,设定名牌与结构粘接面的位移

边界条件为0,依据 Mises 准则进行分析,结果如图1 所示。

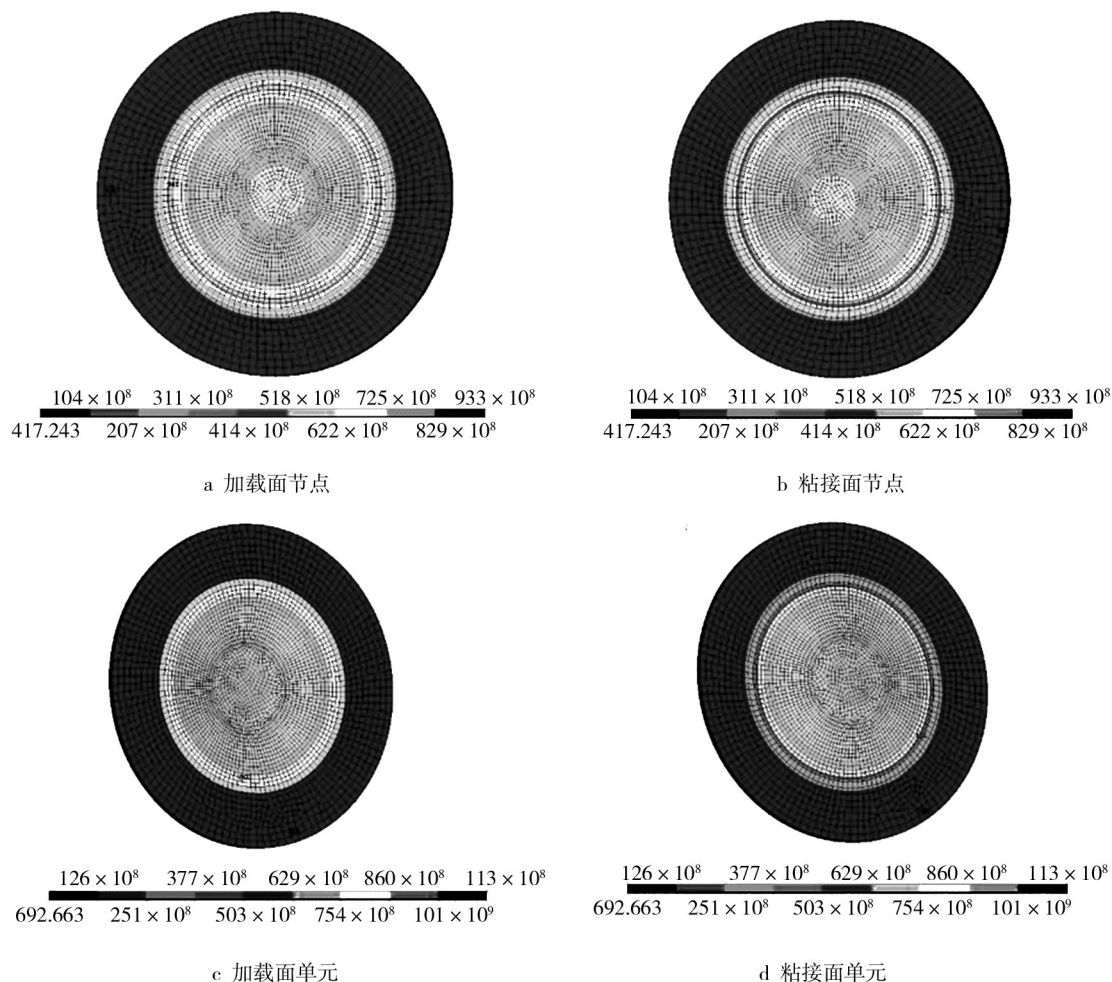


图1 膜片受均布载荷时的应力分布

Fig. 1 Stress distribution of the diaphragm assembly under uniform load

由图1可知,膜片粘接处的应力近似为0,加载面最大应力为83.9 MPa,粘接面最大应力为93.3 MPa,均出现在膜片粘接环面内径的内侧,且加载面的最大内应力面积小于粘接面的最大内应力面积。从单元应力分布可见,加载面的最大应力小于整体最大应力,最大应力在粘接面的内径处。膜片的破坏应由最大应力处开始,从计算分析的结果可得膜片组件在试验中的失效模式具体表现为从粘接结构的内径处断裂失效。

3 膜片组件贮存期评估

按照设计的试验方案,开展了膜片组件恒定温

度应力加速贮存寿命试验,得到了各温度应力下膜片组件的试验数据,且试验件的失效模式与预测结果一致。

试验采用定期检测的方法获得试验数据,得到失效时间为区间失效数据,采用常用的线性插值算法,将线性等间隔插值的时间点作为试件的具体失效时间^[7]。

膜片组件的失效为损伤累积失效,假设膜片组件的寿命分布为Weibull分布,根据加速试验的基本假设,其在各应力水平下的概率密度函数见式(1)^[7-9]。

$$f_i(t) = \frac{\beta}{\eta_i} t^{\beta-1} \exp(- (t/\eta_i)^\beta) \quad t \geq 0 \quad (1)$$

式中: β 为形状参数; η_i 为第 i 个应力水平下的

特征寿命; t 为寿命变量。

由于加速贮存试验绝对温度的变化范围很小,加速模型选择常用的 Arrhenius 模型,模型可转换成线性关系,见式(2)。

$$\ln \eta_i = a + b/T_i \quad (2)$$

式中: a, b 为未知常数; T_i 为第*i*个应力水平。

利用线性插值得到的膜片组件失效数据及截尾试验数据,建立未知参数的似然函数,见式(3)。

$$L = \prod_{i=1}^k \prod_{j=1}^{n_i} \frac{\beta t_{ij}^{\beta-1}}{\eta_i^\beta} \exp \left[- \left(\frac{t_{ij}}{\eta_i} \right)^\beta \right] \cdot \left\{ \exp \left[- \left(\frac{\tau_i}{\eta_i} \right)^\beta \right] \right\}^{n_i - r_i} \quad (3)$$

式中: t_{ij} 为第*i*个应力下第*j*个失效样品的失效时间; τ_i 为试验截尾时间; r_i 为 n_i 个样品中在 $(0, \tau_i]$ 内的失效数。

根据似然函数求偏导,建立未知参数 β, a, b 的对数似然方程组,利用 Newton 法求解方程组得到参数的最大似然估计 $\hat{\beta}, \hat{a}, \hat{b}$,拟合得到膜片组件在 25 °C 下的可靠性图,如图 2 所示。根据加速模型和寿命分布函数,利用 Fisher 信息阵得到未知参数的近似方差阵,利用极大似然估计量的渐近正态性进行计算。求得膜片组件在贮存温度 25 °C 下,置信度为 0.8 的贮存期下限为 16.7 a。

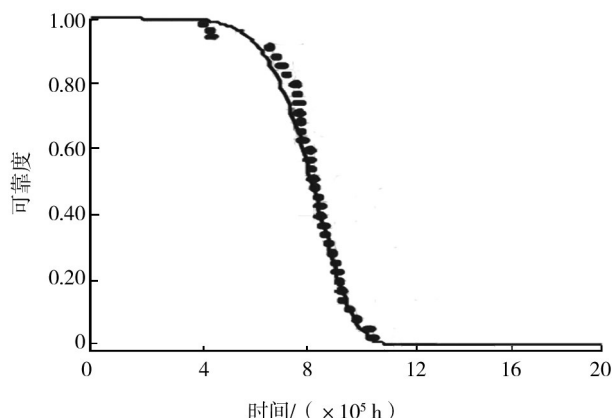


图2 25 °C下膜片组件的可靠性图

Fig. 2 Reliability of the diaphragm assembly under 25 °C

4 结论

1) 结合膜片组件的贮存环境条件,分析了膜片

组件的失效机理和主要环境影响因素。结果表明,膜片组件的失效机理为膜片老化,温度是影响膜片贮存寿命的主要因素。

2) 采用有限元建模分析方法,建立膜片组件实体有限元模型,分析膜片组件性能测试时的应力分布情况,预测膜片组件的具体失效模式,预测结果与试验情况一致。

3) 在失效机理分析的基础上,对膜片组件加速贮存试验进行了研究,设计了膜片组件恒定温度应力加速贮存试验方案并实施试验,获得失效数据,评估了膜片组件贮存期。

参考文献:

- [1] 李久祥,申军,侯海梅,等. 装备贮存延寿技术[M]. 北京:中国宇航出版社,2007.
- [2] NELSON W. Accelerated Testing: Statistical Methods, Test Plans, and Data Analysis[M]. New York: John Wiley Press, 1990.
- [3] 茆诗松,王玲玲. 加速寿命试验[M]. 北京:科学出版社, 2000.
- [4] 李海波,张正平,胡彦平. 加速寿命试验方法及其在航天产品中的应用[J]. 强度与环境,2007,34(1):2—10.
- [5] YANG G B. Optimum Constant-stress Accelerated Life-test Plans[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1994, 43(4): 575—581.
- [6] GB 2689.1, 恒定应力寿命试验和加速寿命试验方法[S].
- [7] 张建中,费鹤良,王玲玲. 威布尔分布参数估计方法的精度比较[J]. 应用数学学报,1982,5(4):397—411.
- [8] 王炳兴. Weibull 分布基于恒加寿命试验数据的统计分析[J]. 应用概率统计,2002,18(4):413—418.
- [9] 郑德强,张正平,李海波,等. Weibull 分布下恒定应力加速寿命试验分组数据的统计分析[J]. 强度与环境,2008, 35(6):40—44.