伺服涡轮泵入口密封膜片加速贮存试验研究

李沛剑¹ 王志峰² 郭军刚²

(1. 海军驻航天一院军事代表室,北京 100076; 2. 北京精密机电控制设备研究所,北京 100076)



摘要:依据膜片材料性能及产品失效模式,制订了膜片加速贮存试验方案。结合加速贮存 和寿命分布相关理论模型和方法,对某型涡轮泵入口密封膜片组件进行加速贮存试验研究,验 证了膜片组件贮存期的指标要求,并获取了膜片组件的贮存寿命与贮存可靠性的相关评估结果。 关键词: 膜片; 加速贮存; 试验; 失效; 涡轮泵

Accelerated Storage Test Study of A Sealing Diaphragm Used in Inlet of A Servo Turbo-pump

Li Peijian¹ Wang Zhifeng² Guo Jungang² (1. Navy Deputy Office in CALT, Beijing 100076; 2. Beijing Research Institute of Precise Mechatronics and Controls, Beijing 100076)

Abstract: An accelerated storage scheme was formulated up by a sealing diaphragm material property and failure mechanism. An accelerated storage test study for a servo turbo-pump inlet sealing diaphragm was carried out in accordance with related theory model and method based on accelerated storage and life distribution. The test validated the quota parameter of sealing diaphragm storage period and obtained evaluating result based on the storage life and storage reliability of the diaphragm assembly.

Key words: diaphragm; accelerated storage; test; failure; turbo-pump

1 引言

某型膜片组件(以下简称产品或膜片组件)用于 航天伺服燃气源(一次能源)与涡轮泵式伺服液压源 (二次能源)之间的结构密封,安装于涡轮泵的进气 入口处。膜片组件结构件为金属材料,膜片为有机玻 璃材料,膜片粘接于结构件上。



其结构组成见图 1 (*P*₁ 所指侧为膜片正向,与燃 气源相通; *P*₂ 所指侧为膜片反向,与涡轮腔相通)。 膜片组件的主要作用是阻止涡轮泵式伺服液压源在长 期贮存时微渗的液压油介质从涡轮腔流入伺服燃气源 燃烧室,污染损坏燃气发生剂。

2 产品加速贮存试验方法

2.1 产品贮存失效分析

产品在规定环境下贮存,其材料性能参数会变化, 材料强度随贮存时间延长呈下降趋势。膜片结构件是 金属材料,可以忽略其性能变化;而非金属材料在长 期贮存过程中存在可观的老化问题,性能随着时间的 延长而相应下降。膜片组件非金属材料见表 1。

作者简介: 李沛剑(1979),工程师,机械电子工程专业;研究方向:导弹总体及 伺服技术。 收稿日期: 2019-01-08

表1 膜片组件用非金属材料明细

序号	材料	所属组件	标准	零件和材料功能
1	有机玻璃	膜片组件	GB/T7134—1996	密封
2	SY-50S 胶粘剂	膜片组件	Q/6S1785—2002	粘接

膜片组件主要起密封隔离作用。有机玻璃和胶粘 剂在长期贮存过程中受环境应力的影响老化,性能下 降,出现膜片破裂和膜片与结构件脱粘的现象,导致 密封失效。膜片组件的失效模式和失效判据如下:

失效模式: 有机玻璃膜片老化破裂或膜片与结构 件脱粘。

失效判据:考虑膜片组件在使用过程中最恶劣的环境,即涡轮腔内充满液压油,且腔内压力最高为0.34MPa,因此膜片组件的失效判据为0.34MPa下保持1min气密性试验出现泄漏。

2.2 加速贮存方法

根据产品工程研制经验和相关技术标准,采用恒 应力加速贮存试验方法,并从众多影响因素中选取主 要因素——温度,作为试验加速应力。为得到试验所 需的加速应力水平,试验前期开展了温度摸底试验。

2.2.1 理论模型

设膜片组件的寿命 *t* 服从 Weibull 分布^[1~3],其分 布函数和概率密度函数分别为:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right], \quad t > 0$$
⁽¹⁾

$$\begin{pmatrix} \operatorname{Var}(\hat{\beta}) & \operatorname{Cov}(\hat{\beta}, \hat{a}) & \operatorname{Cov}(\hat{\beta}, \hat{b}) \\ \operatorname{Cov}(\hat{a}, \hat{\beta}) & \operatorname{Var}(\hat{a}) & \operatorname{Cov}(\hat{a}, \hat{b}) \\ \operatorname{Cov}(\hat{b}, \hat{\beta}) & \operatorname{Cov}(\hat{b}, \hat{a}) & \operatorname{Var}(\hat{b}) \end{pmatrix} \approx - \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 L}{\partial \beta^2} & \frac{\partial^2 L}{\partial \beta \partial a} & \frac{\partial^2 L}{\partial \beta \partial b} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial a \partial \beta} & \frac{\partial^2 L}{\partial a^2} & \frac{\partial^2 L}{\partial a \partial b} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial b \partial \beta} & \frac{\partial^2 L}{\partial b^2} & \frac{\partial^2 L}{\partial b \partial a} \end{pmatrix}_{\rho}^{-1}$$

通过参数估计的近似方差阵,贮存寿命、贮存可 靠性与待估参数的数学关系式,求得待估参数点估计 对数的近似方差,利用最大似然估计函数关系式的近 似正态性,得到正常贮存时的贮存可靠寿命下限和贮 存可靠性下限。

2.2.2 试验方法

加速试验应保持失效机理不变。为确定膜片组件 加速贮存试验的温度应力上限,首先温度摸底试验。 根据试验结果,在温度应力上限以下选取若干组加速 应力水平。

将膜片试件按应力组随机分配,置于专用试验工 装内。为模拟膜片组件贮存最恶劣状态,需在组件内

$$f(t) = \frac{\beta t^{\beta - 1}}{\eta^{\beta}} \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right\}, \quad t > 0$$
(2)

其中,参数 β 为形状参数, η 为尺度参数或特征寿命。

膜片组件加速贮存采用温度为加速应力,假设加 速模型为 Arrhenius 模型:

$$\xi = A e^{\frac{E}{KT}} \tag{3}$$

式中, *č* 为某寿命特征, *E* 为激活能, *K* 为波尔兹 曼常数, *T* 为绝对温度, *A* 为正常数。

该模型两边取对数有:

$$\ln \xi = a + \frac{b}{T} \tag{4}$$

其中, ξ是某寿命特征, a, b 为待定常数。

对于 Weibull 分布, 其似然函数为:

$$L = \prod_{i=1}^{k} \prod_{j=1}^{n_i} \frac{\beta t_{ij}^{\beta-1}}{\eta_i^{\beta}} \exp\left[-\left(\frac{t_{ij}}{\eta_i}\right)^{\beta}\right] \cdot \left\{\exp\left[-\left(\frac{\tau_i}{\eta_i}\right)^{\beta}\right]\right\}^{n_i - r_i}$$
(5)

利用参数估计值求得贮存期为 t 的贮存可靠性估 计值 R(t), 贮存可靠性为 R 的贮存期估计 t_R , 数学表 达式为:

$$\hat{R}(t) = \exp\left\{-\left(t/\hat{\eta}\right)^{\hat{\beta}}\right\}$$
(6)

$$\hat{t}_{R} = \hat{\eta} \left(-\ln R \right)^{1/\beta} \tag{7}$$

利用 Fisher 信息阵求得待估参数的近似协方差矩阵,模型参数估计值代入 Fisher 信息阵,以 Fisher 信息样本阵近似作为 Fisher 信息阵,即获得参数估计 \hat{a} , \hat{b} , $\hat{\beta}$ 的近似方差阵等式为:

(8)

 $(\hat{\beta}\hat{\beta}\hat{\beta}\hat{\beta}) = \hat{\beta}, a = \hat{a}, b = \hat{b}$

(P₂向)注入15号航空液压油。各组分别加载温度应 力,试验温度的温升及降温速率不超过1℃/min。将各 试验温度下的试件按规定的时间间隔取出,进行 0.34MPa下保持1min气密性试验,记录膜片组件气密 性不满足产品性能要求的时间作为失效寿命数据。

试验采用定期检测的方法获得试验数据,对于定 期检测得到的试验数据可以通过插值的方法确定试样 的具体失效时间;采用定数截尾与定时截尾相结合的 方法判断试验结束。

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

膜片组件恒定温度加速贮存试验剖面见图 2。



各温度下的有效试验时间 120d (2880h),累计共进行 24 次测试。其中,100℃下 3 件产品失效。失效试验件如图 3。



图 3 膜片组件失效试件照片

3.2 试验结果分析

100℃下3件产品失效分别在1440h(60d)、1560h (65d)、1680h(70d)试验后检测发现。100℃下的 总试验时间为2880h(120d),3个失效出现在试验进 程的一半左右,之后至试验截止,再无失效发生,故 100℃下的这3个故障可判定为早期失效。

膜片组件局部脱粘的早期失效可能是由于胶层较 薄或涂抹不均匀等原因造成的。若将早期失效数据与 其他正常产品的试验数据一起分析,会增大正常产品 的离散性,使得产品可靠性特征量的区间估计下限值 偏低。故将膜片组件的试验数据分为早期失效数据和 正常产品数据分别分析。由于只有 100℃下存在失效数 据,因此本次试验采用 100℃下的数据分析评估寿命, 利用温度加速的范德霍夫规则(10 度规则)^[4.5]外推 25℃下的可靠贮存寿命。

3.2.1 早期失效数据分析

将 100℃下膜片组件的区间失效数据线性插值^[6], 得到失效产品的具体失效时间,根据寿命分布拟合优 度检验结果,采用对数正态分布和极大似然方法,计 算早期失效的膜片组件在 100℃下的平均寿命和可靠 贮存寿命,结果见表 2,可靠性函数曲线如图 4。

表2 100℃下早期失效膜片组件贮存寿命评估结果 h

参数估计	μ=7.311, σ=0.08						
可靠性指标	E(t)	<i>t</i> _{0.9}	<i>t</i> _{0.99}	t _{0.999}	t _{0.9999}	t _{0.99999}	
点估计	1501.6	1350.6	1242.1	1168.2	1110.8	1063.2	
置信度 0.8	1444.2	1267.7	1125.3	1029.4	956.0	896.4	



图 4 100℃下早期失效膜片组件的可靠性曲线

根据范德霍夫规则外推早期失效的膜片组件在 25℃下的平均寿命和可靠贮存寿命,结果见表 3。

表3 25℃下早期失效膜片组件贮存寿命评估结果 a

可靠性指标	E(t)	<i>t</i> _{0.9}	t _{0.99}	t _{0.999}	t _{0.9999}	t _{0.99999}
点估计	31.0	27.9	25.7	24.1	23.0	22.0
置信度 0.8	29.8	26.2	23.3	21.3	19.8	18.5

3.2.2 截尾数据分析

利用 100℃下的截尾数据,采用极大似然方法,计 算得到膜片组件在 100℃下的平均贮存寿命和可靠贮 存寿命如表 4 所示,此段截尾数据无失效出现,故采 用 1 参数 Weibull 分布分析计算^[7,8],Weibull 分布的 形状参数取为 8。根据范德霍夫规则外推膜片组件在 25℃下的平均寿命和可靠贮存寿命,结果如表 5 所示。

表4 100℃下膜片组件的贮存寿命评估结果 h

参数估计	$\beta = 8, \eta = 7334.7$						
可靠性指标	E(t)	t _{0.9}	t _{0.99}	t _{0.999}	t _{0.9999}	t _{0.99999}	
点估计	7435.9	5959.8	4443.0	3329.9	2496.9	1872.4	
置信度 0.8	7010.3	5618.7	4188.7	3139.3	2354.0	1765.2	

表5 25℃下膜片组件的贮存寿命评估结果 a

						-
可靠性指标	E(t)	t _{0.9}	t _{0.99}	t _{0.999}	t _{0.9999}	t _{0.99999}
点估计	153.6	123.1	91.8	68.8	51.6	38.7
置信度 0.8	144.8	116.1	86.5	64.9	48.6	36.5

4 结束语

根据本次膜片组件加速贮存试验的试验情况和现

有数据的评估结果,有如下结论:

a. 按早期失效保守分析,在贮存温度为25℃的条件下,当贮存可靠度为0.99999,置信水平为0.8h,膜 片组件的贮存寿命可满足18a的贮存期要求;

b. 由于失效数据较少,且多组应力水平下无失效 数据,外推采用了经验的范德霍夫规则(10度规则), 可能造成评估结果与实际贮存寿命存在偏差;

c. 根据膜片组件摸底试验和加速贮存试验现象分 析, 膜片组件存在的两种失效模式(膜片破裂和膜片 脱粘)中, 膜片脱粘是其在贮存环境下的首要失效模 式, 先于膜片破裂出现。

参考文献

任鑫,赵新文,蔡琦.蒙卡洛仿真用于多种失效分布底事的故障树分析
 [J].航海工程,2010,29(5):184~187

- 2 栗亚林,张国辉,陈正荣.基于 Matlab 语言的系统可靠性仿真[J].重 庆通信学院学报,2005,24(2): 104~10
- 3 崔俞,温家亮,刘凯.特种硅橡胶制品装机贮存性能微观分析及老化机 理研究[J]. 航天制造技术,2015(2):13~16
- 4 苏振中,罗锦,江劲勇. 基于可靠性仿真的电子设备故障规律建模[J]. 计 算机测量与控制, 2007, 15(1): 29~31
- 5 边信黔,牟春晖,严浙平,等.基于故障树的无人潜航器可靠性研究[J]. 中国造船,2011,52(1):71~79
- 6 海卫华.一种基于在线预测的航天产品热待机剩余寿命评估方法研究[J].航天制造技术,2012(4):64~66
- 7 Hough G. Sensory shelf-life predictions by survival analysis accelerated storage models[J]. Food Quality and Preference, 2006(4): 468~473
- 8 Wise I J, Schrimpf R D, Parks H G, et al. A generalized model for the lifetime of microelectronic components applied to storage conditions[J]. Microelectronics Reliability, 2001, 41(3): 317~322

在计算机软件、网络通讯和数字化加工技术等领 域的理论发展和技术革新,数字化车间生产信息深度 融合的趋势下,应用于不同目的的各类工业软件将不 再局限于原有的功能范畴,将逐步集成、相互融合, 形成统一的整体。这其中不仅包括本文提到的与生产 过程息息相关的 DNC、MDC 和 MES 系统,还包括企 业信息系统 ERP、数字化工艺 CAM、CAPP 等等。在 工业数字化软件的系统集成技术的影响下,车间设备 利用率得到大幅度提高,产品质量得到有效控制和深 度追溯。这也为将来企业云制造发展打下坚实基础, 是提高制造企业竞争力的重要手段。

参考文献

- Itskovich E L. Basics of MES construction concept for production industries[J]. Automation and Remote Control, 2016(11): 2035~2043
- 2 姚红,刘远.智能生产理念下的 MES 层、Control 层规划研究[J].制造业 自动化,2018(2):1~6
- 3 Valilai O F, Houshmand M. A collaborative and integrated platform to support distributed manufacturing system using a service-oriented approach based on cloud computing paradigm[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2013(6): 911~918
- 4 Shokraneh K, Houshmand M, Valilai O F. Configuration design in scalable reconfigurable manufacturing systems (RMS): a case of single-product flow line (SPFL)[J]. International Journal of Production Research, 2018(5): 838~

- 5 Helo P, Suorsa M, Hao Yuqiu, et al. Toward a cloud-based manufacturing execution system for distributed manufacturing[J]. Computers in Industry, 2014(4): 646~675
- 6 Syed A M, Elias P, Bandyopadhyay A, et al. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities[J]. Materials Today, 2018(2): 222~225
- 7 Solomentsev Y M, Frolov E B, Feofanov A N . MES-based management of manufacturing processes[J]. Russian Engineering Research, 2017(11): 950~953
- 8 Znamenák J, Križanová G, Iringová M, et al. A proposal for production data collection on a hybrid production line in cooperation with MES[J]. Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology, 2016(2): 323~328
- 9 Ni Yanting, Cheng Yue, Xiong Fei. Integrated optimization of multiple warehouse replenishment for semiconductor manufacturing[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2017(11): 4601~4612
- 10 Delaram J, Valilai O F. An architectural view to computer integrated manufacturing systems based on Axiomatic Design Theory[J]. Computers in Industry, 2018(100): 96~114
- 11 Zaman U K U, Rivette M, Siadat A, et al. Integrated product-process design: Material and manufacturing process selection for additive manufacturing using multi-criteria decision making[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018(51): 169~180