

涡轮泵端面密封贮存仿真及可靠性分析

吴 勋^{1,2}, 刘纪涛¹, 肖 飞¹, 张为华¹

(1.国防科技大学 航天与材料工程学院,湖南 长沙 410073;2.第二炮兵装备研究院,北京 100085)

摘 要:为分析长期贮存条件下涡轮泵端面密封变形问题,采用有限元分析软件对涡轮泵端面密封静环组件过盈配合及长期贮存中的蠕变变形进行了分析计算。使用应变率硬化材料模型描述蠕变特性,得到了不同年限下密封组件应力—应变和石墨环变形结果。随后利用无失效数据的多层 Bayes 方法和广义强度应力模型两种方法对端面密封静环组件可靠性进行了评估。广义强度应力模型将仿真结果引入,联合现场试验信息评估组件长期贮存后密封性能可靠性,有效提高了小子样条件下可靠性评定的精度,而且更加可信。

关键词:端面密封;蠕变;可靠性分析;Bayes 方法

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2009.04.004

中图分类号: TJ760.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)04-0015-05

对于发动机涡轮泵,端面密封结构起着至关重要的作用。一旦端面密封失效,将会引起工质泄漏,严重时将导致介质相互串腔,致使发动机点火后氧化剂和燃烧剂提前接触,导致爆炸。研究分析表明,导致端面密封失效的主要原因为端面密封静环组件变形。国内外对涡轮泵的研究大多针对涡轮泵转子及其支撑结构的动静态特性,而对端面密封变形的研究则主要集中在热变形和压力变形两方面^[1-2]。

本文分析了端面密封静环组件长期贮存条件下的变形情况,并且应用多层 Bayes 方法和广义强度应力模型的可靠性评估方法,对涡轮泵端面密封静环组件密封可靠性进行了评定。

1 端面密封静环组件建模与变形分析

1.1 几何模型与失效分析

涡轮泵端面密封性能主要由动环和静环组件保证。静环组件由静环座、石墨环组成,通过过盈配合并在其间浸酚醛树脂加工而成,几何模型见图 1。涡轮泵工作中,静环组件相对保持静止,石墨环紧贴动环平面,并由两者的平面度保证密封性能。通过测试,经过长期贮存后的密封组件,动环平面的平面度一直保持良好的;静环组件尤其是石墨环变形较大。石墨环与动环平面之间的间隙成为工质泄漏的主要原因。

经过分析,静环组件产生变形的原因为:静环座与石墨环过盈配合产生的内应力随着时间的延长会不断发生变化;由于加工误差、装配误差以及静环的不对称结构(静环法兰上设置有 2 个小孔,影响了整体对称性)会产生不对称变形(两边隆起,中间凹陷)。

因此,应从设计公差、装配误差、材料蠕变等角度通过有限元方法精确分析变形。

1.2 密封组件有限元模型

由于静环组件的不对称性,二维有限元模型不能正确表达问题。本文选用 ANSYS 中 SOLID92 单元划分网格,计算石墨环在上述过程中的变形,采用接触单元 CONTA174 和 TARGE170 描述 2 个实体界面间

* 收稿日期:2009-04-22

基金项目:总装预研基金资助项目(6140423)

作者简介:吴 勋(1967—),男,江苏扬州人,高级工程师,博士生,主要从事火箭发动机贮存使用与可靠性研究。
E-mail:cba00114@sina.com

的接触和滑移, 计算界面接触压应力和摩擦应力。有限元模型见图 2。

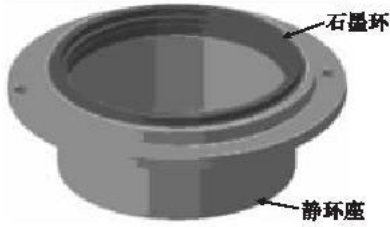


图 1 静环组件结构

Fig. 1 Structure of stationary seal ring module



图 2 静环组件有限元模型

Fig. 2 Finite element model of stationary seal ring

静环组件实际加工和装配过程中, 需要经历静环座升温、组件过盈装配、降温、时效处理和端面再次加工等工序。前 3 个工序对实际构建力学模型的变形结果没有影响, 因此简化成常温安装后变形协调的过盈配合。在实际制造中, 时效处理后会再次进行端面的机械加工, 因此产品工作过程中的变形应等于蠕变后某时刻的仿真变形量减去时效期时刻的仿真变形量。同时, 实际产品贮存年限与仿真时间相差一个时效期。

1.3 蠕变模型

材料蠕变现象反映于材料在恒定应力作用下会发生持续变形; 与此对应的是应力松弛现象, 当材料受恒定应变作用时, 应力随时间逐渐减小。金属材料在高温或强应力作用下蠕变或松弛现象尤为显著^[3]。在恒定应力作用下, 材料蠕变应变 ϵ_{cr} 随时间 t 的变化规律一般如图 3 所示。

在此选用应变率硬化模型:

$$\dot{\epsilon}_{cr} = A \sigma^B \epsilon_{cr}^C \exp(-D/T) \quad (1)$$

式中: σ 为应力; T 为温度; A 、 B 、 C 、 D 为常数。可以看到蠕变速率是应力、应变、温度与时间的函数^[4-5]。

考虑到密封组件贮存环境稳定(室温), 温度变化影响很小, 因此, 简化为以下计算模型:

$$\dot{\epsilon}_{cr} = K \sigma^n \quad (2)$$

参数 K 和 n 的选取依据为: 等截面杆在 100 MPa 恒定拉应力作用下, 经过 10 年蠕变, 其长度将增加 0.315%。

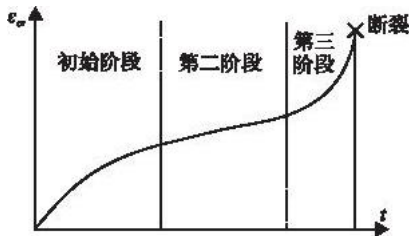


图 3 材料蠕变曲线

Fig. 3 Creep curve of material



4 静环座 Von Mises 等效应力云图

Fig. 4 Von Mises equivalent stress nephogram of stationary seat

1.4 仿真分析变形结果

为了获得密封端面最大变形量, 按照密封组件最大设计公差和装配公差设定仿真模型。此时, 石墨环与静环座边缘线为椭圆线。仿真模型中两者长轴与短轴交叉装配。

按照上述假定, 经过仿真分析便可以得到任意时刻应力—应变及组件间内应力(接触应力)情况。图 4、图 5、图 6 分别显示了贮存 20 年后静环座 Von Mises 等效应力云图、石墨环 Von Mises 等效应力云图和石墨环边缘位移情况。

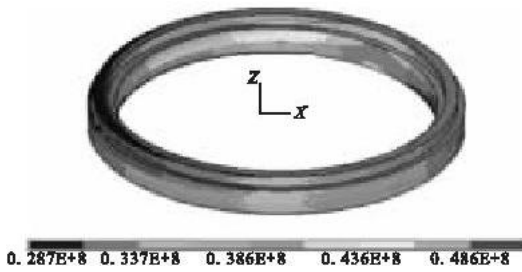


图5 石墨环 Von Mises 等效应力云图
Fig. 5 Von Mises equivalent stress nephogram of graphite annulus

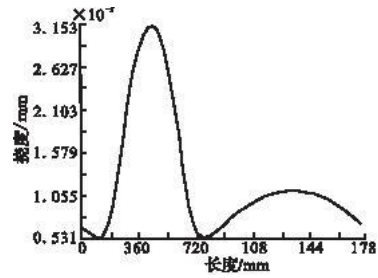


图6 石墨环边缘位移
g. 6 Displacement of graphite annulus edge

2 端面密封可靠性分析

为了充分考察涡轮泵端面密封静环组件长期贮存后因变形引起的安全性问题,对涡轮泵端面密封漏气做了少量的现场试验,共计 36 套,无一失效发生。在此情况下,使用经典的可靠性分析方法评估“小子样”问题势必带来“可信度危机”。因此需要寻找合适的评定方法对此问题进行评估。这里主要应用多层 Bayes 方法和广义强度应力模型 2 种方法评估端面密封静环组件可靠性。

2.1 多层 Bayes 方法

对于二项分布的 Bayes 可靠性评估方法,可靠度 R 的后验密度为:

$$\pi(R | n, f) = \frac{\pi(R)L(R | n, f)}{\int_0^1 \pi(R)L(R | n, f)dR} \quad (3)$$

式中: $L(R | n, f) = C_n^f R^{n-f} (1-R)^f$,为 R 的似然函数; n, f 分别为试验总数与失效数。 $\pi(R) = \pi(R | a, b) = R^{a-1} (1-R)^{b-1} / B(a, b)$,为 R 的先验分布(Beta 分布)。根据 Lindley 和 Smith 提出的多层先验分布的想法,在先验分布中含有超参数时,可对超参数再给出一个先验分布^[6]。通过求 $\pi(R | a, b)$ 对 R 的一阶导数可知应使参数 $0 < b < 1, a \geq 1$ 。在此, $\pi(R | a, b)$ 为 R 的增函数。

此时, a 的先验分布取 $(0, C)$ 上的均匀分布(其中 $C > 1$ 为常数),则 a 的先验密度为 $\pi(a) = \frac{1}{C-1}$, $1 < a < c$,由此可得 R 的多层先验密度为:

$$\pi(R) = \int_0^1 \pi(R | b)\pi(b)db = \int_0^1 b(1-R)^{b-1} db \quad (4)$$

在无失效情况下 R 的似然函数为:

$$L(0 | R) = R^n \quad (5)$$

根据 Bayes 定理,则 R 的多层后验密度为:

$$h(R | 0) = \frac{\pi(R)L(0 | R)}{\int_0^1 \pi(R)L(0 | R)dR} = \frac{\int_1^C R^{n+a-1} da}{\int_1^C \left[a \int_0^1 R^{n+a-1} dR \right] da} = \frac{\int_1^C R^{n+a-1} da}{(C-1) - n \ln \left(\frac{C+n}{1+n} \right)} \quad (6)$$

则在平方损失下, R 的多层 Bayes 估计为:

$$\hat{R} = \int_0^1 Rh(R | 0)dR = \frac{\int_1^C \left[a \int_0^1 R^{n+a-1} dR \right] da}{(C-1) - n \ln \left(\frac{C+n}{1+n} \right)} = \frac{(C-1) - (1+n) \ln \left(\frac{C+1+n}{2+n} \right)}{(C-1) - n \ln \left(\frac{C+n}{1+n} \right)} \quad (7)$$

通过计算,无失效数据可靠性分析结果见表 1($2 \leq C \leq 8$)。从表 1 可以看出, C 对可靠度分析的多层 Bayes 估计是稳健的。因此,可在 $2 \leq C \leq 8$ 范围内取中值作为系统可靠度的估计。经计算,端面密封组件系统可靠度为 0.975 2。

表 1 可靠性分析结果

Tab. 1 Result of reliability analysis

<i>C</i>	2	3	4	5	6	7	8
<i>R</i>	0.974 1	0.974 5	0.974	90.975 2	0.975 6	0.976 0	0.976 3

2.2 基于广义强度应力模型的可靠性评估

现场试验中并未得到试车失败的端面密封静环组件最大变形量,因此本失效模式的变形量上限未知。但通过仿真结果可知,贮存 15 年后的石墨环端面变形基本稳定,因此将计算得到的 20 年的最大变形量作为上限值,通过广义强度应力模型考察其可靠性。如前所述,此变形量应由图 6 计算得到的最大仿真变形量与时效时期时刻的仿真变形量的差,其值为 11.89 μm。

广义强度应力理论^[7]的基本计算公式为:

$$R = P\{X - Y > 0\} \tag{8}$$

即强度 *X* 大于应力 *Y* 的概率。当强度和应力均服从正态分布,即 $X \sim N(\mu, \sigma^2), Y \sim N(\mu_y, \sigma_y^2)$,两者相互独立时,根据 Raiffa 和 Schlaifer 的定义,正态分布的精度为 $h\Delta\sigma^{-2}$, $N(\mu, h)$ 的共轭型先验分布 $f_0(\mu, h)$ 是正态 Γ 分布

$$f_0(\mu, h) = N\Gamma_2(\mu, h | \bar{n}, \bar{x}_0; \nu, \omega) \tag{9}$$

式中 (\bar{n}, \bar{x}_0) 和 (ν, ω) 为正态 Γ 分布中的 2 组参数。

由 Bayes 定理,若 (μ, h) 取无信息先验分布: $\pi(\mu, h) \propto h^{-1}$, 则 (μ, h) 的 Bayes 后验分布密度函数为:

$$f(\mu, h) = N\Gamma_2(\mu, h | n, \bar{x}; \nu, \omega), \quad \omega = s_x^2, \quad \nu = n - 1 \tag{10}$$

式中 \bar{x}, s_x^2 分别为样本数量为 *n* 的 *X* 的完全样本的均值和方差。

通过推导可以得到 *R* 的 Bayes 下限 *R_L* 满足:

$$\int_0^\infty \Phi \left[\sqrt{nh} \left(\frac{\mu - \bar{x}}{s_x} \right) + u_{R_L} \sqrt{n + nh \left(\frac{\sigma_x}{s_x} \right)^2} \right] \Gamma_2(h | \nu, 1) dh = 1 - r \tag{11}$$

式中 $\Phi(\cdot)$ 为正态分布函数。

对于现场试验得到的 36 套端面密封组件,经检验,变形数据服从正态分布 ($\mu = 8.4; \sigma = 1.7$)。利用上述方法计算得到的端面密封组件可靠度(置信度 0.8)见表 2。由于后一种方法融合了现场试验数据和仿真数据 2 种信息,对密封组件可靠性的考察更加全面,因此结果也更加可信。

表 2 端面密封组件可靠度

Tab. 2 Reliability of end face seal module

实际变形量数据		仿真数据		可靠度下限
μ	σ	μ	σ	<i>R_L</i>
8.4	1.7	11.89	0	0.979 9

3 结束语

1) 对静环组件蠕变过程进行了有限元计算,分析了长期贮存后静环组件的应力分布和石墨环变形情况;

2) 使用无失效数据的多层 Bayes 方法,通过现场试验数据分析了系统可靠性;随后通过引入广义强度应力模型的可靠性评估方法,应用仿真数据和现场试验数据对组件可靠性进行了评估,得到了与前者相近的结果。

参考文献:

[1] 白长青,许庆余,张小龙.滚动轴承—火箭发动机液氢涡轮泵转子系统的动力特性分析[J].航空学报,2006,27(2):258—261.

BAI Changqing, XU Qingyu, ZHANG Xiaolong. Dynamic Properties Analysis of Ball Bearings—liquid Hydrogen Turbo Pump Used in Rocket Engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(2): 258—261. (in Chinese)

- [2] 徐悦, 田爱梅, 何磊, 等. 涡轮泵环形密封激振特性的数值计算[J]. 水动力研究进展, 2005, 20(增刊): 815—820.
XU Yue, TIAN Aimei, HE Lei, et al. Numerical Study of Fluid-induced Vibration in Annular Seal of Turbopumps[J]. Journal of Hydrodynamics, 2005, 20, Supp:815—820. (in Chinese)
- [3] Altenbach H, Kolarow G, Morachkovsky O K, et al. On the Accuracy of Creep—damage Predictions in Thinwalled Structures Using the Finite Element Method[J]. Computational Mechanics, 2000, 25: 87—98.
- [4] Karthikeyan S, Viswanathan G B, Gouma P I, et al. Mechanisms and Effect of Microstructure on Creep of TiAl—based alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2002, A329—331: 621—630.
- [5] O'Donnell M P. Comparison of Crack Initiation Life Estimation Procedures Under Creep—fatigue Conditions[J]. Nuclear Engineering and Design, 2005, 235: 1989—2001.
- [6] 韩明. 二项分布无失效数据可靠度的多层 Bayes 分析[J]. 运筹与管理, 1999, 8(2): 12—15.
HAN Ming. The Hierarchical Bayesian Estimation of Reliability of Binomial Distribution Zero—Failure Data[J]. Operations Research and Management Science, 1999, 8(2): 12—15. (in Chinese)
- [7] 周源泉. 可靠性评定[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
ZHOU Yuanquan. Reliability Estimation[M]. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰, 徐敏)

Storage Simulation and Reliability Analysis of Turbo Pump End—face Seal

WU Xun^{1,2}, LIU Ji—tao¹, XIAO Fei¹, ZHANG Wei—hua¹

(1. Institute of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technique, Changsha, 410073, China; 2. The Equipment Research Institute of PLA's Second Artillery, Beijing, 100085)

Abstract: To study the long—term storage distortion of turbo pump end—face seal, the interference fit and long term storage creep character of the stationary seal ring of end—face seal is analyzed using finite element software. The creep behavior is formulated using strain ratio harden material model. The stress—strain of the module and the deflection of the graphite annulus are present in different storage life. And turbo pump end—face seal's reliability is obtained using hierarchical Bayesian zero—failure estimation and stress—strength interference method. In the latter method, simulation result is employed. The long—time storage reliability estimation using field test information and simulation information can effectively increase the accuracy of estimator under small sample situation, and is more credible.

Key words: end—face seal; creep; reliability evaluation; Bayes method