装备通用质量特性及寿命评估

基于温度循环失效机理的铝制金属密封圈 疲劳寿命仿真

张玮钰¹,张黎源¹,张志平¹,姜正鹤¹,许忠政¹, 王春雷¹,刘皋²,阳航²,冯静²

> (1.核工业理化工程研究院,天津 300000; 2.湖南银杏可靠性技术研究所有限公司,长沙 400100)

摘要:目的 解决真空法兰密封中的金属密封圈寿命难以预测的问题。方法 基于金属密封圈的失效机理, 提出一种疲劳仿真方法,对金属密封圈的使用寿命进行有效预测。通过有限元仿真方法对金属密封圈安装 过程及其使用过程进行仿真模拟,得到金属密封圈使用过程的应力分布,然后结合 Conffin-Manson 疲劳模 型,对金属密封圈的使用寿命进行疲劳仿真,最后设计加速寿命试验,对其仿真结果进行验证。结果 疲劳 仿真所得的金属密封圈使用疲劳寿命为 26 915 次温度循环,加速寿命试验结果为 28 401 次温度循环,仿真 误差为 5.23%。结论 构建的安装过程和疲劳仿真模型与实际相符。

关键词:金属密封圈;有限元;疲劳仿真;加速寿命试验;真空

中图分类号: TH16; U463.34 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2021)02-0120-08 **DOI**: 10.7643/issn.1672-9242.2021.02.021

Simulation on Fatigue Life of Aluminum Metal Sealing Ring Based on the Temperature Cycle Failure Mechanism

ZHANG Wei-yu¹, ZHANG Li-yuan¹, ZHANG Zhi-ping¹, JIANG Zheng-he¹, XU Zhong-zheng¹, WANG Chun-lei¹, LIU Gao², YANG Hang², FENG Jing²

(1.Nuclear Industry Institute of Physical and Chemical Engineering, Tianjin 300000, China;2. Hunan Gingko Reliability Technology Institute Co., Ltd, Changsha 400100, China)

ABSTRACT: Aiming to solve the problem that the life of metal sealing ring is difficult to predict, this paper proposed a fatigue simulation method to predict the service life of metal sealing ring effectively based on the failure mechanism of metal sealing ring. The metal sealing ring installation process and its service process were simulated by the finite element simulation method to obtain the stress distribution of the metal sealing ring in the service process, and then a fatigue simulation on the service life of the metal sealing ring was conducted based on the Conffin-Manson fatigue model. Lastly, the simulation result was verified by an accelerated life experiment. The simulation results show that the service life of the metal sealing ring obtained from the

收稿日期: 2020-05-11; 修订日期: 2020-05-20

Received: 2020-05-11; Revised: 2020-05-20

作者简介:张玮钰(1992—),女,硕士,主要研究方向为真空装备可靠性技术。

Biography: ZHANG Wei-yu(1992--), Female, Master, Research focus: reliability technology of vacuum equipment.

通讯作者:冯静(1975—),女,博士,副教授,主要研究方向为装备可靠性试验与评估。

Corresponding author: FENG Jing(1975-), Female, Ph. D., Associate professor, Research focus: equipment reliability test and evaluation.

引文格式: 张玮钰, 王春雷, 刘皋, 等. 基于温度循环失效机理的铝制金属密封圈疲劳寿命仿真[J]. 装备环境工程, 2021, 18(2): 120-127. ZHANG Wei-yu, WANG Chun-lei, LIU Gao, et al. Simulation on fatigue life of aluminum metal sealing ring based on the temperature cycle failure mechanism [J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(2): 120-127.

fatigue simulation is 26,915 temperature cycles, and the accelerated life experimental results is 28,401 temperature cycles, and the simulation error is only 5.23%. Therefore, it can be concluded that the constructed installation process and fatigue simulation models are consistent with the actual situation.

KEY WORDS: metal sealing ring; finite element; fatigue simulation; accelerated life test; vacuum

真空法兰的有效密封关系整个真空设备的安全 及稳定,而金属密封圈在真空法兰密封中起决定性作 用。设备加压过程中能否减少泄漏、提高可靠性,在 很大程度上取决于密封部件的密封性能是否完善^[1]。 金属密封圈属于长寿命产品,通过实验对长寿命产品 进行寿命预测具有成本高昂、耗时长、误差大等缺陷, 因此难以对金属密封圈的寿命进行有效的预测。

杨绮云等^[2-3]通过 ANSYS Workbentch 软件对金 属密封圈进行分析,模拟其变形过程,并分析失效机 理。研究发现,金属密封圈上方在挤压应力作用下发 生不规则永久变形(过量变形),严重影响了金属材 料之间的密合度,从而导致泄漏故障。此不规则永久 变形是由于金属密封圈上方缺乏金属密封圈变形空 间,进而形成过度应力集中造成的。当在上端盖开了 变形导槽后,该金属密封圈的泄漏故障得以消除。在 真空容器的正常使用过程中,由于环境温度的变化造 成金属密封圈的热胀冷缩,铝材质的金属密封圈比不 锈钢法兰的线膨胀系数大,使得金属密封圈在热胀冷 缩过程中承受循环的挤压-拉伸应力,进而引发疲劳 失效。

文中基于金属密封圈热胀冷缩的失效机理,提出 了一种有限元仿真方法对金属密封圈压缩变形过程 及其疲劳使用过程进行仿真模拟。结合 Conffin-Manson 疲劳模型^[4],对金属密封圈的疲劳使用寿命 进行了预测,并设计了加速寿命试验对仿真结果进行 了验证。

1 仿真方法及步骤

金属密封圈在安装时会发生塑性变形和弹性变 形,塑性变形使得金属密封圈形状发生改变,弹性变 形使金属密封圈获得一定的压应力。由于金属密封圈 的疲劳效应是在变形后的模型的基础上产生的,所以 在进行金属密封圈的疲劳仿真前,须进行金属密封圈 安装过程仿真,以获得金属密封圈压缩后的模型。金 属密封圈有限元仿真的步骤如图1所示。

对金属密封圈安装过程进行仿真,除需要金属密 封圈及法兰的材料参数外,还需计算法兰的总压力。 已知 630 法兰的螺栓直径 *d* 为 12 mm,扳手力矩 *M*_b 为 41 N·m,钢-钢表面的无润滑静摩擦系数为 0.15, 则预紧力 *F* 可用式(1)计算^[5-6]。

$$F = \frac{M_{\rm b}}{0.163d} \tag{1}$$

经计算得单个螺栓预紧力为 20 961.145 N,已知 螺栓个数为 48,故法兰总压力为 1.006 135×10⁶ N。



图 1 金属密封圈有限元仿真步骤 Fig.1 Finite element simulation steps of metal sealing ring

工程上常采用零件 S-N 曲线法对材料的疲劳寿 命进行估算,受材质、结构、表面质量、试验应力特 性等综合影响,往往需通过试验才可获得。有的零件 很难模拟其使用应力或试验装置搭建成本昂贵,因此 常采用经验方法对疲劳模型的参数进行估计。铝制金 属密封圈硬度低、屈服强度小,因此文中采用硬度法 对 Conffin-Manson 疲劳模型中的参数进行估算。

Coffin-Manson 公式^[7-10]的表达式如式(2)所示。

$$\varepsilon_{\rm a} = \varepsilon_{\rm ea} + \varepsilon_{\rm pa} = \frac{\sigma_{\rm f}'}{E} (2N)^b + \varepsilon_{\rm f}' (2N)^c \tag{2}$$

式中: ε_a 为总变形量; ε_{ea} 为弹性变形分量; ε_{pa} 为塑性变形分量; E 为弹性模量; σ_{f} 为疲劳强度系数; b 为疲劳强度指数; ε_{f} 为疲劳延性系数; c 为疲劳延 性指数; N 为寿命次数。

采用硬度法^[11]估算材料的 Coffin- Manson 公式 的各参数时,各参数的计算方法如式(3)所示^[3]。

$$b = -0.09, c = -0.56, \sigma'_{\rm f} = 4.25H_{\rm HB} + 225, \varepsilon'_{\rm f} = 0.32H_{\rm HB}^2 - 487H_{\rm HB} + 191\ 000$$
(3)

式中: *H*_{HB} 为布氏硬度, 对于工业纯铝材质, *H*_{HB}=25。

根据上述算法估算出工业纯铝的 Coffin-Manson 公式见式(4)。

$$\varepsilon_{\rm a} = \varepsilon_{\rm ea} + \varepsilon_{\rm pa} = \frac{331.25}{71\ 000} (2N)^{-0.09} + 2.521 (2N)^{-0.56}$$
(4)

2 仿真模型

受试金属密封圈产品为工业纯铝材质,法兰为304

不锈钢材质,查《机械工程材料手册金属材料》[12]手 册,材料的相关性能参数见表1。

Tab.1 Material parameters						
材质	参数名称	参数值				
	密度	2700 kg/m ³				
	导热系数 k	159.1 W/(m·K)				
	恒压热容 C_p	946 J/(kg·K)				
	热膨胀系数	$2.4 \times 10^{-5} / K$				
工业纯铝	杨氏模量 E	71 000 MPa				
	泊松比	0.31				
	屈服强度	30 MPa				
	切线模量	166.6667 MPa				
	硬度	25 HB				
	密度	7850 kg/m ³				
	导热系数 k	44.5 W/(m·K)				
201 天标树	恒压热容 C_p	475 J/(kg·K)				
304 小窃钢	热膨胀系数	$1.23 \times 10^{-5} / K$				
	杨氏模量 E	200 000 MPa				
	泊松比	0.30				

表 1 材料参数

为了减少计算量,金属密封圈采用二维轴对称模 型进行建模,又与其法兰的模型上下对称,故仅需 对金属密封圈及其连接法兰的上半部分进行建模即 可。添加固体力学物理场(带材料塑性),并设置好 载荷约束如图 2 所示[13-14]。金属密封圈采用半圆结 构,半径为1mm。在金属密封圈与上下两个法兰的 接触位置添加接触约束,金属密封圈中心对称面添 加对称平面约束,对刚性域的垫片添加向下的作用 力载荷,大小为1.006 135×10⁶N。此外,由于金属 密封圈已发生塑性变形,因此需在线弹性材料节点 下添加塑性节点。

通过多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 建立金属密封圈热疲劳仿真模型,如图3所示。添加 固体力学、固体传热和疲劳物理场,在疲劳物理场节 点下添加应变疲劳模型,选取局部模型的固体力学2 作为物理场接口,选取组合 Basquin 和 Conffin-Manson 模型,平均应力校正方法选择 Morrow 法, 并根据式(4)设置相应的疲劳强度系数、疲劳强度 指数、疲劳延性系数及疲劳延性指数[15-16]。



图 2 金属密封圈安装过程仿真模型设置 Fig.2 Simulation model settings of the metal sealing ring installation process

金属密封圈安装过程仿真结果分析 3

通过添加固体力学物理场并计算,获得金属密封 圈安装完毕后的应力分布及变形如图 4 所示,金属密 封圈上表面的变形曲线如图 5 所示,金属密封圈变形 后的模型如图6所示。

从图 4 可知,金属密封圈在安装过程中受挤压应 力而发生剧烈的塑性变形,挤压应力最大为 205 MPa。从图 5 中可知,其最大变形量发生在金属 密封圈中部,约为0.3346 mm。通过实际安装金属密 封圈,打开法兰进行测量,从图6可知,2 mm 的金

属密封圈安装变形后约为 1.39 mm, 压缩量为 0.61 mm。由于仿真模型仅为上半部分,因此得到的 单侧压缩量为 0.3346 mm , 则双侧压缩量为 0.6692 mm, 略大于实际值, 误差约为 9.7%。考虑到 实际测量时金属密封圈弹性形变的恢复,造成测量的 压缩量偏小,故实际误差应更小。因此,文中的金属 密封圈安装过程仿真模型能较好地反应金属密封圈 的真实变形情况。

通过 COMSOL 结果数据的导入,获得的金属密 封圈变形后的模型如图 7 所示,在此变形模型基础 上,进行固体传热仿真分析和疲劳分析。



图 3 金属密封圈热疲劳仿真模型设置

Fig.3 Thermal fatigue simulation model settings of the metal sealing ring



图 4 金属密封圈安装完毕后应力分布云图 Fig.4 Cloud chart of the stress distribution after the installation of metal sealing ring

4 金属密封圈疲劳仿真结果分析

在 COMSOL 软件的固体传热模块中添加温度载 荷, 计算后获得不同温度载荷条件下金属密封圈应力 云图(见图 8), 其中室温设为 20 ℃。由于热胀冷缩 产生的应力只与温度差值相关, 与绝对温度值无关, 因此温度应力属于二次应力。当外部约束对其变形进



图 5 金属密封圈上表面变形分布曲线 Fig.5 Deformation distribution curve of the upper surface of metal sealing ring



图 6 金属密封圈安装变形后厚度值测量结果 Fig.6 Measurement result of thickness value after the installation of metal sealing ring

行限制时,使用仿真方法所计算的结果会显著偏大。 通过添加图3所示的金属密封圈热疲劳仿真模型,获 得不同温度差应力下的疲劳仿真结果(见表2)。

5 金属密封圈加速寿命试验

采用快速温度循环对环境温差变化造成的热胀 冷缩效应进行加速。金属密封圈的材料为铝,由于铝 的再结晶温度约为 100.11 ℃,超过再结晶温度会造

率为 15 K/min。





留一定安全裕度的前提下,将试验最高温设置为 95℃,将最低温设置为-35℃。为了节省样本及试验 时间,确定步进温度循环应力作为加速应力,设置的 三个试验应力:低温为-30℃、高温为90℃、温变 率为10 K/min;低温为-30℃、高温为90℃、温变 率为15 K/min;低温为-35℃、高温为95℃、温变

成机理变异, 且铝的理论耐低温极限为-40℃, 在保

金属密封圈失效的性能指标为漏率超过规范值 (1×10⁻¹² Pa·m³/s),漏率检测装置如图9所示。其中 分子泵用于提供真空环境,氦质谱检漏仪及吸枪组合 用于检测密封圈漏率,真空计用于显示真空度是否达 到要求值,盲法兰、连接法兰组件和测量法兰组件为 测量辅助件,便于金属密封圈的装卸。盲法兰组件和 连接法兰组件随金属密封圈一同放置在温度箱中进 行温度循环试验。



Fig.8 Cloud chart of stress distribution of the metal sealing ring under different temperature loads

Tab.2 Life data u	under different	differential temperature stresses				
温差/K	寿命/次	温差/K	寿命/次			
20	26 850	80	2273			
30	12 378	90	1868			
40	7403	100	1568			
50	5029	110	1340			
60	3687	120	1160			
70	2843	130	1017			

表 2 各温差应力下寿命数据

6 试验结果分析

试验测量的金属密封圈漏率数据见表 3。采用过 程建模方法针对试验数据进行建模^[17-18],具体技术路 线如图 10 所示。



图 9 金属密封圈检测装置 Fig.9 Detection device of metal sealing ring

Tab.3 Leakage test data of metal sealing ring											
	 样本 编号	漏率(×10 ⁻¹³ Pa·m ³ /s)									
名称		前 90 个循环			中间 90 个循环		后 90 个循环				
		初始值	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	第6次	第7次	第8次	第9次
			测量	测量	测量	测量	测量	测量	测量	测量	测量
金属密 封圈	A1	1.6	2	1.72	1.2	1.5	2.7	3.8	4.6	1.3	1.4
	A2	1.3	1.9	3.2	1.1	1	1.8	1.4	1.2	1.2	1.3
	A3	1	2	2	2.1	1.4	2	2.5	5.6	1.5	1.7
	A4	2	2.3	1.5	1.9	1.5	1.6	2.8	1.7	1.7	1.3
	A5	2.5	2.6	1.4	2.1	1.8	1.2	2.2	1.2	1.7	1.2
	A6	1.2	3.2	1.2	4.1	1.2	1.2	3.3	1.5	1.6	1.6







由于测量数据存在一定的测量误差,针对测量数

据的分布特征,在保证拟合的相关系数 R 大于 0.6 的 前提下,将每个温度循环中数值过大或过小的数据作 为异常数据点去掉,使每组数据的标准差控制在 1×10⁻¹³ Pa·m³/s 以内。

通过性能退化建模,获得 3 个试验阶段(温差 120 K、温变率 10 K/min;温差 120 K、温变率 15 K/min;温差 130 K、温变率 15 K/min;)金属密封 圈的漏率退化模型:

- $\mu_1 = 0.0069N + 1.525, \ \sigma_1 = 0.493 \tag{5}$
- $\mu_2 = 0.0071N + 1.525, \ \sigma_2 = 0.434 \tag{6}$
- $\mu_3 = 0.0081 N + 1.525, \ \sigma_3 = 0.284 \tag{7}$

式中: μ_1 、 σ_1 为第1个试验阶段下的漏率均值和标准差; μ_2 , σ_2 为第2个试验阶段下的漏率均值和标准差; μ_3 , σ_3 为第3个试验阶段下的漏率均值和标准差。

将失效阈值 y_D=1×10⁻¹² 代人式(5)—(7),分 别得到金属密封圈在 3 个试验阶段下的平均寿命的 点估计值,分别为 1228.261、1193.662、1046.296 次 温度循环。从结果中可看出,金属密封圈寿命主要受 温差影响,受温变率影响较小。从表 2 的仿真结果可 知,温差 120 K 和 130 K 时,金属寿命分别为 1160 和 1017 次温度循环,误差分别为 2.76%和 2.78%。 Coffin-Manson 模型的一般形式^[19-20]为:

$$N = \frac{\delta}{\left(\Delta T\right)^{\beta_1}} \frac{1}{f^{\beta_2}} \exp\left(\frac{E_a}{KT_{\text{max}}}\right)$$
(8)

式中: *N* 为寿命 (循环次数); ΔT 为温度差, K; *f* 为循环频率; *K* 为玻尔兹曼常数, eV; T_{max} 为最高 温度, K; $\delta \ \beta_1 \ \beta_2 \ E_a$ 为待定系数。

将 3 个试验阶段金属密封圈的平均寿命分别代 入式(8),可得金属密封圈的寿命模型为:

$$N = \frac{0.204}{(\Delta T)^{0.518}} \frac{1}{f^{0.5}} \exp\left(\frac{0.208}{KT_{\text{max}}}\right)$$
(9)

经求解,得到金属密封圈正常工作应力下(温差 20 K)的寿命为 28 401 次温度循环。从表 2 的仿真 结果可知,温差为 20 K时,金属密封圈的寿命为 26 915 次温度循环,误差为 5.23%。

7 结语

文中基于金属密封圈受热胀冷缩循环而失效的 机理,提出了一种疲劳仿真方法,对金属密封圈的使 用寿命进行了预测。构造了安装过程和疲劳仿真有限 元模型,设计了金属密封圈的加速寿命试验,并对试 验数据进行退化建模分析。经过仿真计算,得到该型 金属密封圈的使用疲劳寿命为 26 915 次温度循环。 通过加速寿命试验及试验数据分析,得到该型金属密 封圈的使用寿命为 28 401 次温度循环,仿真误差为 5.23%。试验结果表明,所构建的金属密封圈安装过 程模型及疲劳仿真模型与实际相符。

参考文献:

- [1] 喻健良,罗从仁,张忠华,等.法兰密封系统螺栓加载 方式试验研究[J]. 压力容器, 2012, 29(11): 7-12.
 YU Jian-liang, LUO Cong-ren, ZHANG Zhong-hua, et al. Experimental research on bolt loading method of flange sealing system[J]. Pressure vessel, 2012, 29(11): 7-12.
- [2] 丁毅, 苏杰, 陈立民. 基于 ANSYS Workbentch 的轻质 托盘承载性能分析[J]. 包装与食品机械, 2012, 30(2): 67-69.

DING Yi, SU Jie, CHEN Li-min. Analysis of load-bearing performance of lightweight tray based on ANSYS workbentch[J]. Packaging and food machinery, 2012, 30(2): 67-69.

 [3] 杨绮云,高靖宇.食品超高压设备金属密封圈失效机 理及有限元分析[J].包装与食品机械,2013,31(3): 34-37.

YANG Qi-yun, GAO Jing-yu. Failure mechanism and finite element analysis of metal sealing rings for food ultra-high pressure equipment[J]. Packaging and food machinery, 2013, 31(3): 34-37.

[4] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京: 国防工业出版 社, 2003.

YAO Wei-xing. Structural fatigue life analysis[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003.

- [5] 唐辉. 核电设备中螺纹联接结构的松动、损伤机理[J]. 核动力工程, 1999, 20(2): 16-21.
 TANG Hui. The loosening and damage mechanism of threaded connection structure in nuclear power equipment[J]. Nuclear power engineering, 1999, 20(2): 16-21.
- [6] 孙桓, 傅则绍. 机械原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.

SUN Huan, FU Ze-shao. Mechanical principles[M]. Beijing: Higher Education Press, 1989.

- [7] 张振,李静,张忠平. 航空铝合金疲劳参数的理论估算 方法分析[J]. 失效分析与预防, 2011, 6(1): 28-31. ZHANG Zhen, LI Jing, ZHANG Zhong-ping. Analysis of theoretical estimation method for fatigue parameters of aviation aluminum alloys[J]. Failure analysis and prevention, 2011, 6(1): 28-31.
- [8] MANSON S S. Fatigue a complex subject-some simple approximation[J]. Experimental mechanics, 1965, 5: 193-226.
- [9] ONG J H. An improved technique for the prediction of axial fatigue life from tensile data[J]. International journal of fatigue, 1993, 15(3): 213-219.
- [10] Fe-safe user manual. Volume2: Fatigue theory reference manual[M]. U K: Safe Technology Limited, 2008.
- [11] ROESSLE M L, FATEMI A. Strain-controlled fatigue properties of steels and some simple approximations[J]. International journal of fatigue, 2000, 22(1): 495-511.
- [12] 曾正明. 机械工程材料手册: 金属材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
 ZENG Zheng-ming. Handbook of mechanical engineering materials: Metal materials[M]. Beijing: Mechanical Industry Press: Beijing, 2007.
- [13] 刘海澄,柳玉起. 车轮结构强度的有限元分析及应用
 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004.
 LIU Hai-cheng, LIU Yu-qi. Finite element analysis and application of wheel structural strength[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2004.
- [14] 张洪信,管殿柱. 有限元基础理论与 Ansys11.0 应用
 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
 ZHANG Hong-xin, GUAN Dian-zhu. Finite element basic theory and Ansys11.0 application[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2009.
- [15] 邱宣怀. 机械设计[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
 QIU Xuan-huai. Mechanical design[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [16] 赵少汴, 王忠保. 疲劳设计[M]. 北京: 机械工业出版

社, 1992.

ZHAO Shao-beng, WANG Zhong-bao. Fatigue design[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1992.

- [17] 汪赵新. 基于 Gamma 过程的步进应力加速退化试验 设计方法[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
 WANG Zhao-xin. Design method of stepped stress accelerated degradation test based on Gamma process[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [18] 孙权, 冯静, 潘正强. 基于性能退化的长寿命产品寿命

预测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.

SUN Quan, FENG Jing, PAN Zhengqiang. Long-life product life prediction technology based on performance degradation[M]. Beijing: Science Press, 2015.

[19] 茆诗松, 王玲玲. 加速寿命试验[M]. 北京: 科学出版 社, 2000.

MAO Shi-song, WANG Ling-ling. Accelerated life test[M]. Beijing: Science Press, 2000.

[20] MEEKER W Q, ESCOBAR L A. Statistical methods for reliability data[M]. New York: Wiley, 1998.