

# 组合结构金属波纹管的低周疲劳寿命分析

范就星, 韩明君, 李金佩

兰州理工大学理学院, 甘肃 兰州

Email: 781569659@qq.com

收稿日期: 2021年4月27日; 录用日期: 2021年5月28日; 发布日期: 2021年6月7日

## 摘要

建立扁圆锥壳-圆弧-圆环板组合结构波纹管模型, 应用有限元分析工程软件, 结合波纹管在机械密封系统中的实际工况进行低周疲劳寿命分析。在静力学分析的基础上借助Fatigue Tool模块进行疲劳寿命分析, 得出组合结构波纹管的倾角增大会降低波纹管的整体刚度, 疲劳寿命随着倾角的增大而减少。在热-结构耦合模型上进行疲劳寿命分析, 发现倾角越大对于温差的变化越敏感, 在同温差条件下最小疲劳寿命下降的幅度越大。研究为波纹管的结构优化设计提供参考。

## 关键词

组合结构金属波纹管, 低周疲劳, 疲劳寿命, 热-结构耦合

# Low Cycle Fatigue Life Analysis of Composite Structure Metal Bellows

Jiuxing Fan, Mingjun Han, Jinpei Li

School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu

Email: 781569659@qq.com

Received: Apr. 27<sup>th</sup>, 2021; accepted: May 28<sup>th</sup>, 2021; published: Jun. 7<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Combined with the actual working condition of bellows in mechanical seal system, the composite structure metal bellows model is established. The low cycle fatigue life was analyzed by finite element software. Based on the static analysis, fatigue life analysis is carried out with the help of the Fatigue Tool module. It is concluded that the overall stiffness of the combined structure bellows will be reduced with the increase of the inclination angle, and the fatigue life will decrease with the increase of the inclination Angle. Fatigue life analysis was carried out on the ther-

mal-structural coupling model, and it was found that the larger the inclination angle was, the more sensitive it was to the change of temperature difference, and the greater the range of the minimum fatigue life decreased under the condition of the same temperature difference. The research provides a reference for the structural optimization design of bellows.

## Keywords

Composite Structure Metal Bellows, Low Cycle Fatigue, The Fatigue Life, Thermal-Structural Coupling

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在干气密封系统中,一般由密封圈、动静环、弹性元件(波纹管)组成。波纹管作为一个重要的零部件在系统中起着连接、补偿、降噪减振的作用。它是一种外表面呈现波纹形状的轴对称管状挠性壳体。波纹管在实际工程中可作为弹性元件和柔性连接件广泛应用,有时候也可作为密封元件和补偿器元件来使用。目前,市面上使用较为广泛的是焊接金属波纹管,它们普遍是由奥氏体不锈钢、镍铜合金制造。焊接金属波纹管由许多冲压形成的薄型膜片焊接而成的可伸缩金属管。其首先将两个成型的膜片以同心圆的方式作内缘焊接组成膜片对,以此为基础再把这些膜片对的外缘焊接组成波纹管段。

对于波纹管这种重要零部件,其性能的好坏直接关系着整个系统的使用和运行;然而疲劳断裂是金属材料最为常见的失效形式之一。据统计,因疲劳而引起的零件破坏高达 60%至 90%。在过往学者们通过利用有限元分析软件和根据美国膨胀节制造商协会标准(EJMA) [1] [2]的经验公式对 U 型和 V 型的焊接金属波纹管的疲劳寿命研究比较多[3] [4] [5]。焊接金属波纹管的膜片形状直接决定波纹管的力学性能和使用寿命。近年来研究开发了许多新型波片结构,如:非对称 S 型波片结构、倾角边缘波片结构、非对称膜片结构等。买买提明·艾尼和徐中华[6]基于 Ansys Workbench (AWE)平台应用 Fatigue Tool 工具箱对 S 型金属波纹管进行高周疲劳寿命分析,验证了有限元分析模拟金属波纹管的疲劳寿命分析其精度远远高于经验公式,同时为后人们提供了研究波纹管寿命的新思路。丁雪兴等人[7]根据 316 钢材的 S-N 曲线对 U 型、S 型波纹管进行疲劳寿命分析获得它们的最低疲劳寿命值和危险部位,并代入到道理损伤公式中进行相互的对比。根据对比结果得出:U 型波纹管无法再机械密封中广泛应用。宋林红等[8]通过疲劳模型的建立,运用 Smith-Watson Topper 法分析了 U 型波纹管在各种工况下的疲劳寿命情况。孙泽刚等[9]采用 ANSYS 软件对波纹管在一定工况下进行静应力分析,找出受应力最大的节点并计算其寿命。发现波纹管受力最大的地方往往是最容易发生疲劳破坏。于长波等[10]应用非线性有限元法,得到多层波纹管的应力分布,并对其疲劳寿命模型进行了预测。万宏强等人[11]运用 ANSYS 有限元软件对 U 型波纹管进行热-结构耦合分析,得到了几何参数对其性能的影响规律。韩燕[12]利用 ANSYS 软件分析焊接金属波纹管波片的温度场,得到不同温度对波纹管应力分布的影响。李树勋等[13]运用 ANSYS 软件建立 U 型波纹管模型,研究了波纹管在受到外压载荷和拉压位移载荷的共同作用下,分析波纹管的疲劳特性,以及在外载荷作用下对波纹管疲劳寿命的影响。程兆雄等人[14]按非线性大挠度弹性屈曲理论对广泛应用于工程中的“圆板-扁圆锥壳-圆环板”组合结构的弹性突跳现象进行了分析。周朝逾等人[15]研究了扁圆锥壳-圆弧-圆环组合结构波纹管膜片的非线性动力学问题,基于薄壳理论和等效连续化方法的基础,

对这种组合结构波纹管进行了理论推导。

过去学者们对于 U、V 型波形的焊接金属波纹管研究比较广泛，近些年，发现 S 形波纹管具有独特的力学性能；然而对于类 S 型组合结构焊接金属波纹管的研究仅限于理论上分析。本文基于商用软件结合干气密封系统中焊接金属波纹管的实际尺寸建立模型，运用 Fatigue Tool 模块结合实际工况对这种组合结构波纹管进行疲劳寿命的分析。通过仿真分析结果直观地反映出其力学性能和危险部位。为实际应用和此后的结构再优化性能更提高提供参考。

## 2. 疲劳分析基础

Ansys Workbench Fatigue 疲劳计算以 ASME 锅炉和压力容器规范(ASME Boiler and Pressure Vessel Code)作为计算的依据，采用简化的弹塑性假设和 Miner 累积疲劳准则。目前，对结构的疲劳寿命分析的方法主要有名义应力(S-N)寿命法(也即全寿命法)、局部应变(E-N)寿命法(也即裂纹萌生寿命法)、断裂力学(LEFM)法(也即裂纹扩展寿命法)。

### 2.1. 疲劳损伤法则

常用的疲劳损伤法则是 Palmgren-Miner 法则，也称疲劳损伤线性积累假说。假设结构的第  $i$  级应力水平下经过的循环数为  $n_i$ ，第  $i$  级应力水平下的达到破坏时的应力循环数为  $N_i$ ，那么不同应力幅的载荷混合作用下，载荷循环对结构造成的损伤率为  $\sum \frac{n_i}{N_i}$ 。假设  $S$  代表疲劳损伤累积损伤系数，即：

$$S = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

当各应力的寿命损伤率之和大于等于 1 时，即  $S \geq 1$ ，疲劳破坏就会发生；当  $S < 1$  时，构件尚未开始破坏。

### 2.2. 低周疲劳寿命分析

一般地，在高应力或高应变条件下，应力循环周数在 10,000 以下的疲劳，称为低周疲劳。低周疲劳问题即在外载荷作用下模型发生了塑性变形。由于交变的塑性应变在这种疲劳破坏中起主要作用，故也称作塑性疲劳或应变疲劳。在应变 - 寿命分析中，平均应力修正方法一般有两种：Morrow 修正和 SWT 修正。Morrow 修正是根据每一循环的平均应力来上下移动弹性寿命，而 SWT 修正是一个包含每一循环的最大应力损伤参数，SWT 修正比 Morrow 修正更大。相对于 Morrow 修正来说，SWT 修正在受拉时趋于保守，在受压时趋于非保守，一般取较为保守的修正方法。

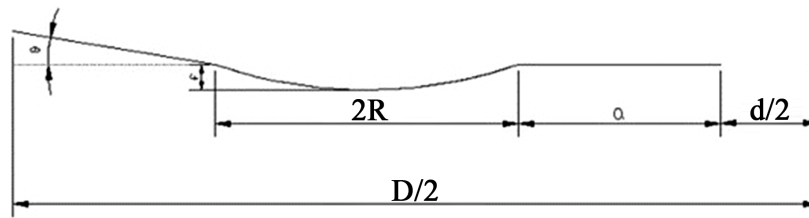
## 3. 组合结构波纹管参数化有限元模型的建立

### 3.1. 单个波片的几何参数

单个膜片的几何参数(见表 1)及结构(见图 1)；为方便研究，将圆锥壳与水平方向的夹角记为  $\theta$ 。

**Table 1.** Structural size parameters of the composite structure bellows diaphragm  
**表 1.** 组合结构波纹管膜片结构尺寸参数

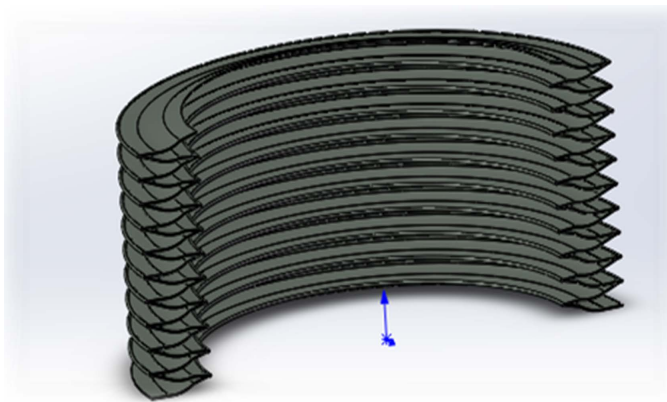
参数	外径 D/mm	内径 d/mm	壁厚 $\delta$ /mm	圆弧波长 2R/mm	矢高 f/mm	圆环板长 a/mm	倾角
尺寸	56	42	0.14	3	0.25	2	$\theta$



**Figure 1.** Schematic diagram of the composite structure bellows diaphragm  
**图 1.** 组合结构波纹管膜片结构示意图

### 3.2. 组合结构波纹管模型建立

本文借助三维设计软件 Solidworks 初步建立组合结构波纹管的三维模型(其截面图见图 2), 再转换成 IGS 格式导入 AWE 平台进行分析。



**Figure 2.** Sectional view of 3D solid model of combined structure bellows  
**图 2.** 组合结构波纹管三维实体模型截面图

### 3.3. 材料属性

由于奥氏体不锈钢具有稳定的奥氏体组织, 属于耐蚀钢, 有着较好的力学性能, 便于进行机械加工、冲压和焊接; 故把奥氏体不锈钢(俗称 304 不锈钢)作为材料。其材料属性见表 2。

**Table 2.** Properties of bellows material  
**表 2.** 波纹管材料属性

密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比 $\mu$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	抗拉强度 $\sigma_b/\text{MPa}$	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	导热系数 $k/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	线膨胀系数 $\lambda/\text{K}^{-1}$
7800	0.3	196	520	205	16.3	1.72E-5

### 4. 组合结构波纹管疲劳分析

考虑到波纹管是轴对称结构, 其应力分布具有轴对称性。为了保证计算精度且提高计算速度, 将三维模型转化为平面二维模型进行静力分析和疲劳寿命分析。根据网格密度无关性和网格精度定性判断指标对二维组合结构波纹管模型进行网格划分, 共有 53,682 个节点, 23,877 个单元, 其二维模型网格划分如图 3 所示。选用 Morrow 修正理论对其进行评估, 疲劳修正因子  $k_f = 0.9$ , 载荷类型设为 Fully Reversed。

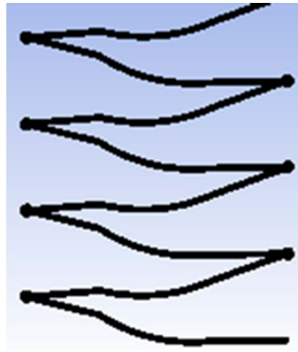


Figure 3. 2D model of composite structure bellows (partial)  
图 3. 组合结构波纹管二维有限元模型(局部)

#### 4.1. 304 不锈钢的应变——寿命曲线

材料的应变—寿命曲线(E-N)一般是通过用大量低周疲劳试验得到的数值描绘出来的。通过查阅机械材料手册等相关资料,得到这种不锈钢的强度系数为 1100 Mpa、延性系数为 0.34、强度指数为-0.119、延性指数为-0.49。

#### 4.2. 边界条件设定

根据实际工况,本文研究对象其工作状态是一端固定,一端自由。在干气密封实际工作过程中,旋转轴会通过止转螺钉带动连波纹管、动环在内的焊接组合件一并旋转。动环与静环之间会产生一个几微米大小的气膜;鉴于这种情况在仿真模拟中给游离一端施加 6.5 mm 的压缩位移载荷。考虑到波纹管内外会存在压力差 $\Delta P$ ,施加在整个波纹管的外表面, $\Delta P = 0.5 \text{ Mpa}$ 。其静力学边界条件如图 4 所示。

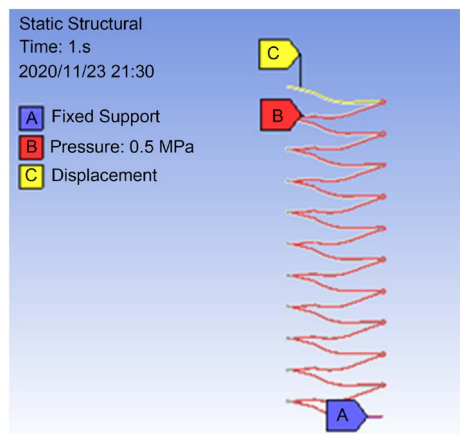


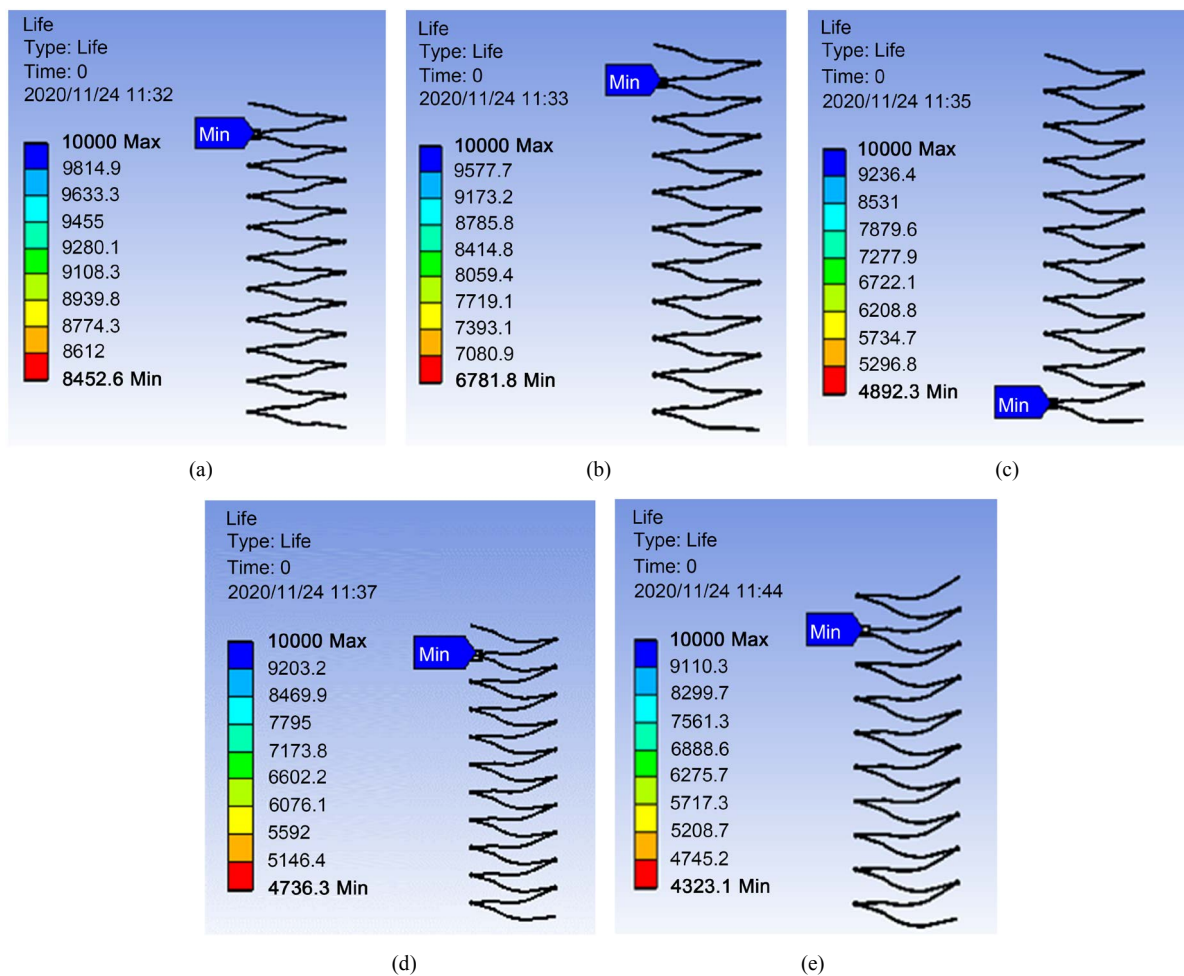
Figure 4. Static boundary conditions  
图 4. 静力学边界条件

为研究膜片扁圆锥壳部分倾斜角  $\theta$  的不同对波纹管疲劳寿命之间的关系,先分别对  $\theta = 0^\circ$ 、 $7.5^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $22.5^\circ$ 、 $30^\circ$  的波纹管进行静力学分析,结果发现波纹管的最大应力都出现在了两个波片焊菇处附近,此处为裂纹的最始萌生点,与实际中焊接处易发生破坏的情况相同。

#### 4.3. 结果分析

图 5 所示是倾角  $\theta = 0^\circ$ 、 $7.5^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $22.5^\circ$ 、 $30^\circ$  的组合结构波纹管疲劳寿命图。可以看到,这 5 种不

同倾角的组合结构波纹管它们的最小疲劳寿命分别为 8452 周次、6781 周次、4892 周次、4736 周次和 4323 周次；且最小疲劳寿命发生的位置都与应力分析模块的最大应力处吻合，即波纹管的膜片焊接处附近。随着倾角的增大，组合结构波纹管的最小疲劳寿命呈逐渐降低的趋势。缘由是倾角的提高会降低波纹管的整体刚度，使得在相同载荷下应变增大应力水平上升，由此倾角大的比倾角小的更容易产生裂纹，降低了最小疲劳寿命。通过仿真分析可得出，增大这种组合结构波纹管的倾角会降低其整体刚度从而减少疲劳使用寿命。



**Figure 5.** Fatigue life distribution of corrugated pipe with different inclination angle. (a) 0 degree inclination; (b) 7.5 degree inclination; (c) 15 degree inclination; (d) 22.5 degree inclination; (e) 30 degree inclination

**图 5.** 不同倾角组合结构波纹管的疲劳寿命分布。(a) 倾角为 0°；(b) 倾角为 7.5°；(c) 倾角为 15°；(d) 倾角为 22.5°；(e) 倾角为 30°

### 5. 组合结构波纹管的热 - 结构耦合疲劳寿命分析

实际当中，机械密封系统中往往会存在温度影响。温度会使波纹管产生热膨胀，而热膨胀又会产生热应力。在组合结构波纹管的热 - 结构耦合分析的基础上，进行疲劳寿命分析。为研究不同温差对于不同倾角组合结构波纹管的疲劳性能，分别在上文的载荷边界条件的基础上，对倾角为 0°、7.5°、15°、22.5°、30°的波纹管外表面分别添加 24℃、26℃、28℃、30℃、32℃、34℃、36℃、38℃、40℃的温度载荷，对其内表面添加 22℃的温度载荷，从而形成了 2℃、4℃、6℃、8℃、10℃、12℃、14℃、16℃、18℃的内

外温差。见图 6 所示。

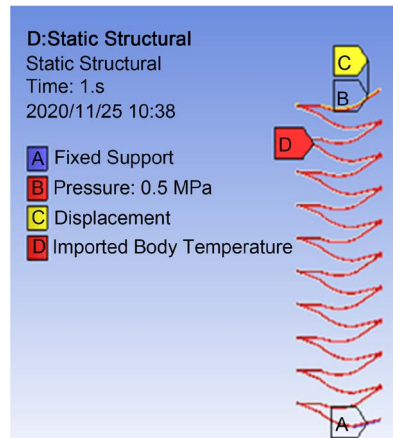


Figure 6. Thermal-structure coupled fatigue analysis load boundary conditions  
图 6. 热 - 结构耦合疲劳分析载荷边界条件

### 不同倾角于不同外部温度条件下最小疲劳寿命对比分析

图 7 是倾角  $\theta = 0^\circ$ 、 $7.5^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $22.5^\circ$ 、 $30^\circ$  的组合结构波纹管在不同外部温度下的最小疲劳寿命变化曲线。可以直观清晰看出，随着外部加载温度的上升，这 5 种组合结构波纹管的最小疲劳寿命在降低。 $0^\circ$  组合结构波纹管最小疲劳寿命随着外部温度加载的上升，下降得最为明显。从图中可以看出倾角越小，对温度的改变越敏感，相同温差下最小疲劳寿命减少得越多。

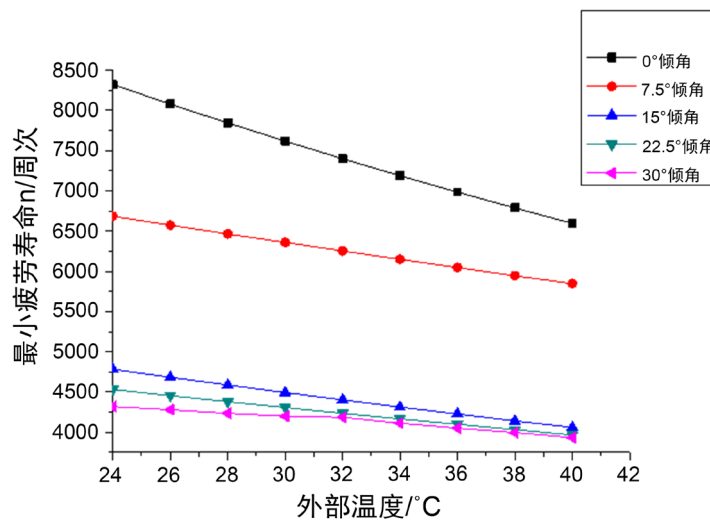


Figure 7. Comparison of minimum fatigue life distribution under different inclination angles and different external temperatures  
图 7. 不同倾角不同外部温度加载下最小疲劳寿命分布对比

## 6. 结论与分析

1) 对组合结构波纹管的疲劳分析，得出这种组合结构波纹管塑性变形而产生裂纹萌生点在膜片的焊接处，与 U 型、V 型最先出现裂纹萌生点的部位相似。疲劳寿命的薄弱处与静力分析的最大应力点相一致，因此应多关注应力分析最大应力处，因为它是结构中最容易发生疲劳断裂的地方。

2) 对不同倾角组合结构波纹管的疲劳寿命分析,发现组合结构波纹管的最小疲劳寿命随着倾角的增大而减少。经分析,倾角的增大会降低组合结构波纹管的整体刚度。

3) 在热-结构耦合分析中,对不同倾角组合结构波纹管施加不同的外部温度载荷,分别产生 2℃、4℃、6℃、8℃、10℃、12℃、14℃、16℃、18℃ 的内外温差,进行疲劳寿命分析。将结果对比分析,发现这五种组合结构波纹管的最小疲劳寿命随着外部加载温度的上升而减少,且角度越小对温度越敏感,最小疲劳寿命值下降得越明显。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(11472123), 国家自然科学基金项目(11862012)。

## 参考文献

- [1] EJMA (2003) Standards of the Expansion Joint Manufactures Association. EJMA, New York.
- [2] 牛玉华. 最新 EJMA 标准的修订内容介绍及分析[J]. 压力容器, 2012, 29(8): 31-36.
- [3] 田坤, 竺长安. U 型波纹管疲劳寿命研究[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(2): 17-19.
- [4] 李上青. 基于有限元的波纹管疲劳寿命影响因素分析[J]. 管道技术与设备, 2016(3): 34-37.
- [5] 刘进详, 穆塔里夫·阿赫迈德. 热油泵用机械密封波纹管疲劳特性研究[J]. 润滑与密封, 2019, 44(9): 96-101.
- [6] 徐中华, 买买提明·艾尼, 程伟. S 型焊接金属波纹管疲劳寿命的有限元分析[J]. 压力容器, 2009, 26(2): 21-25.
- [7] 吴媛媛. 机械密封焊接金属波纹管的疲劳寿命计算及分析[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- [8] 宋林红, 黄乃宁, 等. 金属波纹管疲劳寿命的有限元分析[J]. 管道技术与设备, 2008(3): 16-18.
- [9] 孙泽刚, 陈磊. 波纹管型机械密封的动压力分析及疲劳计算[J]. 润滑与密封, 2014, 39(5): 82-86.
- [10] 于长波, 王建军, 李楚林, 等. 多层 U 形波纹管的疲劳寿命有限元分析[J]. 压力容器, 2008, 25(2): 23-27.
- [11] 万宏强, 汪亮, 刘扬. 基于 ANSYS 的 U 型波纹管参数计算与分析[J]. 西安工业大学学报, 2008, 28(2): 123-127.
- [12] 韩燕, 王淮维. 温度对机械密封金属波纹管力学性能的影响[J]. 润滑与密封, 2012, 37(3): 85-88.
- [13] 李树勋, 张丽芳, 吕兴, 徐晓刚, 雒相垚. 二级波纹管截止阀用波纹管结构强度及疲劳可靠性研究[J]. 流体机械, 2018, 46(11): 39-44.
- [14] 程兆雄, 黄怡筠, 李晓川, 马刚峰. “圆板-扁圆锥壳-圆环板”组合结构的弹性突跳分析[J]. 工程力学, 1998, 16(4): 78-82.
- [15] 周朝逾. 组合结构波纹管膜片非线性固有特性分析[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.