

U形波纹管疲劳寿命有限元分析

陈友恒, 段 玫

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023)

摘要: 运用 ANSYS 有限元软件对波纹管进行应力分析, 得出波纹管应力集中位置, 借助 Fatigue tool 模块, 采用 $E-N$ 方法进行疲劳寿命分析, 得到波纹管的疲劳寿命分布。有限元分析结果与经验公式及试验结果的比较, 得出有限元模拟结果比经验公式更加接近试验结果。最后指出了在进行波纹管疲劳寿命有限元分析过程中需要注意的问题。

关键词: 波纹管; 有限元; 疲劳寿命

中图分类号: TH 703.1 文献标识码: A

Finite Element Analysis to Fatigue Life of U-shape Bellows

CHEN You-heng, DUAN Mei

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

Abstract: The stress and the stress convergence points of bellows is analyzed in this paper by ANSYS software, then the fatigue life of bellows is investigated on $E-N$ curves of the fatigue tool module and the fatigue life distribution has been obtained. A comparison has been made between finite element analysis and empirical formula. It is found that the finite element results is closer to the experimental results, indicating that the finite element analysis is reliable. At last, the problems in the future research is pointed out.

Keywords: bellows; finite element; fatigue life

波纹管(Bellows)是一种轴对称带波纹的管状壳体,在轴向力、横向力和弯矩作用下允许产生较大的变形。一般由奥氏体不锈钢、高镍合金制造,是航空、航天、石油化工、船舶、核工程及各种仪器仪表、调节附件中重要的弹性元件。在实际运行过程中,尤其是开停车及变工况工作时,波纹管在压力以及位移载荷共同作用下,波峰或波谷附近局部区域内的应力超过材料的屈服强度而产生大范围的塑性变形,当塑性变形累积到一定的程度,波纹管局部区域产生微裂纹,微裂纹长大、合并,形成一条或几条主裂纹,波纹管就有可能出现低周疲劳断裂失效。在低周疲劳分析中常用的是应变寿命方法,也叫应变寿命法或 $E-N$ 方法。

目前金属波纹管的疲劳寿命一般都是采用 EJMA^[1] 标准中的经验公式, EJMA 中的经验公式

是通过大量波纹管的疲劳试验,取试验结果的平均疲劳寿命,拟合疲劳曲线,得出总应力范围与疲劳寿命的关系,这种方法误差较大,而且在波纹管的设计过程中通常要选取一个安全系数才能满足实际工程应用。本文采用 ANSYS Workbench 的 Fatigue Tool 模块对波纹管的疲劳寿命进行了研究,以求为波纹管的疲劳设计找到一种新的方法。

1 有限元分析基础

疲劳的本质是塑性的累积,在处理循环载荷下的疲劳时,通常都是用疲劳累积损伤理论,目前应用最广泛的累积损伤理论是 Palmgren - Miner 准则, Palmgren - Miner 准则不考虑历史加载顺序对疲劳寿命的影响,并假定载荷循环是正弦

收稿日期: 2012-10-10

作者简介: 陈友恒,在读硕士研究生,研究方向:波纹管技术开发与应用。

形^[2]的,其具体表达式如(1)式:

$$D = \sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right) \quad (1)$$

式中: D 为疲劳累积损伤系数,当 D 值小于 1 时,认为构件是安全的,不会发生疲劳破坏,当 D 值大于或等于 1 时,意味着构件已经破坏或是开始破坏; n_i 为第 i 阶应力水平下的实际应力循环数; N_i 为第 i 阶水平下的疲劳寿命,可由应变寿命 Coffin - manson - basquin 方程求得:

Basquin 指出高周疲劳寿命跟弹性应变之间符合幂关系,即:

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b \quad (2)$$

Coffin 和 Manson 对于低周疲劳和塑性应变得到同样的结果,即:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (3)$$

把(2)、(3)式加在一起,就可以得到全应变

和疲劳寿命的关系如(4)式,

$$\varepsilon_i = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (4)$$

式中: 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。

2 U 形波纹管疲劳分析

2.1 模型建立

U 形波纹管几何参数见表 1,材质为 304 不锈钢,材料属性见表 2,采用 PRO/E 软件建立波纹管的三维模型(图 1),再将模型导入到 Workbench 中进行分析,由于波纹管是轴对称结构,为了提高计算机的计算效率,将三维模型在 Workbench 中转化为二维平面模型(图 2)进行分析。

表 1 波纹管几何参数^[3]

Table 1 Dimensions of bellows

| Inner diameter at root D_b /mm | Convolution height h /mm | Convolution pitch q /mm | Convolution thickness δ /mm | No. of plies n | No. of convolutions N |
|-------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|---------------------|----------------------------|
| 271 | 40 | 30 | 1.5 | 1 | 4 |

表 2 波纹管材料属性

Table 2 Properties of bellows material

| Modulus of elasticity/GPa | Poisson's ratio | Yield strength(0.2%) /MPa | Density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) |
|---------------------------|-----------------|---------------------------|---|
| 186 | 0.3 | 316 | 7 850 |

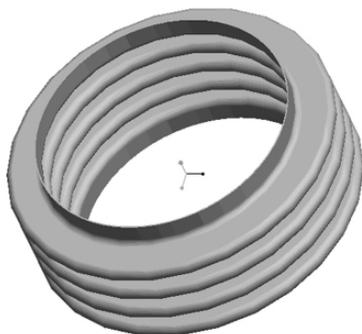


图 1 U 形波纹管三维实体模型

Fig. 1 3D model of U-shape bellows

波纹管材料类型选为多线性等向强化材料 (Multilinear Isotropic Hardening),材料特性数据来源于波纹管材料的拉伸试验,网格划分采用智能网格划分,在二维平面结构中,共有 24 657 个节

点数,7 268 个单元,波纹管的有限元模型如图 3 所示。



图 2 U 形波纹管平面模型

Fig. 2 2D model of U-shape bellows

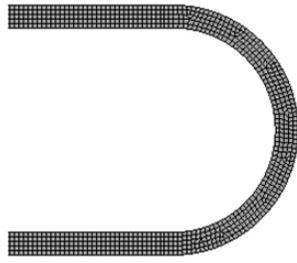


图 3 波纹管有限元模型(局部)

Fig. 3 Finite element model of bellows (partial)

波纹管的加载工况为受内压 0.6 MPa ,温度 为常温 ,单波允许最大轴向位移 5.75 mm ,边界 条件是一端固支 ,一端沿轴向方向施加 ± 11.5 mm 的位移载荷。

3.2 材料的 E - N 曲线

材料的 E - N 曲线一般是通过大量的低周疲 劳试验得到 ,304 不锈钢的疲劳性能如表 3 所示。 由表 3 数据绘制出 304 不锈钢的 E - N 曲线图 , 如图 4 所示。

表 3 304 不锈钢疲劳性能

Table 3 Fatigue strength of 304 stainless steel

| Strength coefficient σ_f / MPa | Strength exponent b | Ductility coefficient ϵ_f | Ductility exponent c |
|---|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| 1 ,100 | -0.119 | 0.340 | -0.490 |

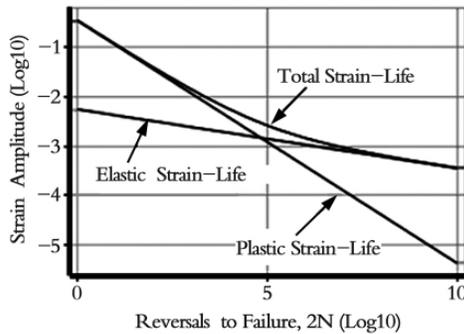


图 4 E - N 曲线图

Fig. 4 E - N curve

2.3 应力分析

疲劳分析的基础是先对波纹管进行应力分 析 ,波纹管在内压及位移载荷的共同作用下 ,某 些局部部位的应力已经超过了材料的屈服强度 , 通过有限元计算 ,可得到波纹管应力分布的具体 情况。如图 5 所示。

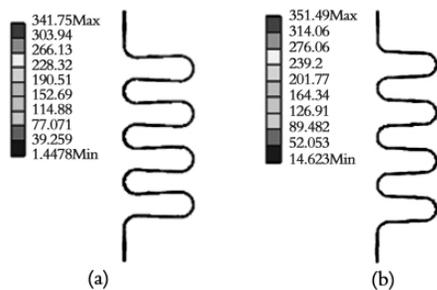


图 5 波纹管等效应力云图

a、内压 + 压缩; b、内压 + 拉伸

Fig. 5 Equivalent stress of bellows: (a) inner pressure + tensile disp; (b) inner pressure + compression disp

由图 5 可以看出 ,波纹管受压缩载荷时 ,最 大应力出现在波谷位置 ,当波纹管受拉伸载荷 时 ,最大应力出现在波峰位置 ,并且最大应力处 已经超过了材料的屈服强度而产生塑性变形 ,波 纹管在拉、压位移载荷的循环作用下 ,在应力集 中处容易形成初始裂纹 ,因此可以认为波峰、波 谷是波纹管的薄弱部位 ,即裂纹萌生点 ,控制着 波纹管的疲劳寿命。

2.4 波纹管疲劳寿命有限元分析

调用有限元分析生成的结果 ,设置疲劳分析 参数 ,载荷类型为对称循环 ,疲劳分析结果如图 6 所示。

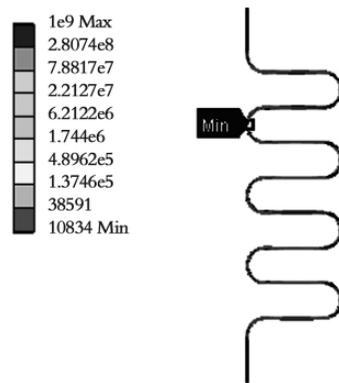


图 6 疲劳寿命分布图

Fig. 6 Distributing of fatigue life

由图 6 可以看到 ,最小寿命是 10 834 周次 ,出 现在第一波与第二波之间的波谷处 ,同时在波峰、波 谷处 ,波纹管的疲劳寿命比其它位置的疲劳寿命要 低 ,这与疲劳试验结果及应力分析结果是一致的。

3 有限元结果与经验公式及试验结果比较

3.1 经验公式计算

目前运用最广泛的波纹管疲劳寿命计算公式来自于 EJMA 标准,根据 EJMA 标准中疲劳寿命公式,计算表 1 中波纹管的疲劳寿命如下:

内压产生的子午向薄膜应力:

$$S_3 = \frac{ph}{2h\delta_m} = \frac{0.6 \times 40}{2 \times 1 \times 1.396} = 8.6 \text{ (MPa)} \quad (5)$$

内压产生的子午向弯曲应力:

$$S_4 = \frac{ph^2 C_p}{2n\delta_m^2} = \frac{0.6 \times 40^2 \times 0.6876}{2 \times 1 \times 1.396^2} = 169.36 \text{ (MPa)} \quad (6)$$

位移产生的子午向薄膜应力:

$$S_5 = \frac{E_b \delta_m^2 e}{2h^3 C_f} = \frac{186000 \times 1.396^2 \times 5.75}{2 \times 40^3 \times 1.4449} = 11.27 \text{ (MPa)} \quad (7)$$

位移产生的子午向弯曲应力:

$$S_6 = \frac{5E_b \delta_m e}{3h^2 C_d} = \frac{5 \times 186000 \times 1.396 \times 5.75}{3 \times 40^2 \times 1.6258} = 957 \text{ (MPa)} \quad (8)$$

总应力范围为:

$$S_t = 0.7(S_3 + S_4) + S_5 + S_6 = 1093 \text{ (MPa)} \quad (9)$$

由此求得计算疲劳寿命为:

$$N_c = \left(\frac{12800}{S_t - 372} \right)^{3.4} = \left(\frac{12800}{1093 - 372} \right)^{3.4} = 17682 \quad (10)$$

3.2 疲劳寿命试验

根据表 1 中波形参数设计加工出 4 个波纹管,在专用的波纹管疲劳试验机上进行疲劳试验,试验工况与有限元模拟工况一致,试验结果如表 4 所示。

表 4 疲劳试验结果^[3]

Tab 4 Results of fatigue test

| Test number | Fatigue life /N _c |
|-------------|------------------------------|
| 1 | 7 562 |
| 2 | 10 000 |
| 3 | 4 742 |
| 4 | 8 082 |

3.3 结果分析

由表 4 可以计算出,试验的平均疲劳寿命是 7 597 周次。试验结果与经验公式及有限元模拟结果存在一定的差异,但有限元模拟结果更加接近试验结果,这种差异主要是由于忽略了波纹管在成形过程中造成壁厚不均匀而引起波纹管局部应变集中的影响,以及在试验过程中波纹管材料循环硬化的影响。

4 结论

(1) 波纹管应力集中位置是波峰、波谷处,波峰、波谷是控制波纹管疲劳寿命的关键部位,采用 E-N 方法对波纹管进行疲劳分析,疲劳寿命的薄弱位置在波峰、波谷处,说明疲劳分析结果与应力分析结果是一致的。

(2) 有限元模拟结果比经验公式更加接近试验结果,说明利用有限元模拟波纹管疲劳寿命的方法是可行的。

(3) 有限元分析中的波纹管模拟是理想化模型,没有考虑到波纹管在实际成形过程中造成壁厚的不均匀性及在疲劳试验过程中材料的循环硬化效应,因此,在今后的研究中需要建立更加合理的有限元模型,综合考虑影响波纹管疲劳寿命的各种因素,使得有限元模拟结果具有更高的可靠性。

参考文献

- [1] EJMA. Standards of the expansion joint manufactures association, Inc [S]. New York: EJMA, 2003.
- [2] 孙启新,董玉平.基于 ANSYS 的 U 形波纹管疲劳寿命分析 [J]. 中国制造业信息化, 2007, 36(9): 59—61.
SUN Q X, DONG Y P. The Fatigue Life analysis of u-form corrugated shell based on ANSYS [J]. Manufacture Information Engineering of China, 2007, 36(9): 59—61.
- [3] GB/T 12777 编制工作组. 波纹管设计公式试验验证报告 [R]. 1998: 7.
The GB/T 12777 work group. Test report to design formula of bellows [R]. 1998: 7.
- [4] 宋林红,黄乃宁,马明轩,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.
Song L H, Huang N N, Ma M X. Fatigue life finite element analysis of metal bellows [J]. Pipeline Technique

- and Equipment 2008(3):16—18.
- [5] 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.
- Xu Zh H, Mamtimin G, Cheng W. Finite element analysis to fatigue life of the S-shape bellows [J]. Pressure Vessel Technology 2009 26(2):21—25.
- [6] 田坤,竺长安. U形波纹管疲劳寿命研究 [J]. 传感器与微系统 2011,30(2):17—19.
- Tian K, Zhu C A. Study on fatigue life of U-shape sinuflotube [J]. Transducer and Microsystem Technologies 2009 26(2):21—25.

(编辑:段玉琴)