

# 光滑薄壁管件的多轴循环弹塑性有限元分析

孙国芹, 尚德广, 丁雷, 邓静, 贾冠华, 阎楚良  
(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100022)

**摘要:** 为数值模拟构件在多轴循环加载下的应力应变响应, 利用 ANSYS 分析软件对承受高温 2 轴比例与非比例循环拉扭加载下的光滑薄壁管件进行了弹塑性有限元分析. 分析模拟过程中, 采用 von Mises 屈服准则、非线性随动强化准则和高温单轴循环加载的应力应变数据来描述材料高温弹塑性特性. 采用柱坐标系下在试样一端加轴向位移和周向位移来实现拉扭应变加载. 通过对光滑薄壁管件的后处理结果与试验比较表明, 采用的循环弹塑性有限元分析得到的结果与试验结果相吻合.

**关键词:** 弹塑性; 有限元法; 疲劳; 应变控制; 多轴; 迟滞迴线

**中图分类号:** O 346.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0254 - 0037(2007)03 - 0235 - 05

实际工程结构多在循环载荷下服役, 疲劳寿命预测是结构设计过程中不可缺少的内容. 多轴加载是影响构件疲劳寿命的主要因素, 尤其在多轴非比例循环加载下, 应力应变响应比单轴和比例加载更加复杂. 许多研究人员应用有限元数值模拟构件单、多轴加载情况, 得到构件各处应力应变响应, 分析应力幅、平均应力和蠕变等对应力应变各分量的影响, 并结合各种寿命预测方法对构件进行寿命预测<sup>[1-7]</sup>. 这些文献都是描述应力控制的单轴和多轴比例加载, 所加载荷为有限元软件中可直接施加的力或力矩. 有关详细描述拉扭应变加载的高温比例和非比例加载的文献未见报道. 本文使用 ANSYS 有限元分析软件对承受循环拉扭应变加载的光滑薄壁管试样进行了高温 2 轴比例与非比例弹塑性有限元分析.

## 1 薄壁管在多轴加载下的应力应变状态分析

薄壁管件承受拉扭复合加载时, 其受力状态近似为平面应力状态, 沿着壁厚方向的应力梯度可忽略不计. 因此在试件的横截面上只有 2 个非 0 应力, 试件的 9 个应力分量可表示为

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

试件标距内任 1 个点的应变分量可写为

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & 0 \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \frac{1}{2} \gamma_{xy} & 0 \\ \frac{1}{2} \gamma_{xy} & -\nu \varepsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & -\nu \varepsilon_{xx} \end{pmatrix} \quad (2)$$

## 2 疲劳试验

试验采用镍基高温合金 GH4169 热轧棒材, 热处理后, 加工成圆柱形薄壁管状试样, 试样标距为 50 mm, 形状及尺寸如图 1 所示.

收稿日期: 2006-03-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10172010).

作者简介: 孙国芹(1973-), 女, 河北邢台人, 讲师.

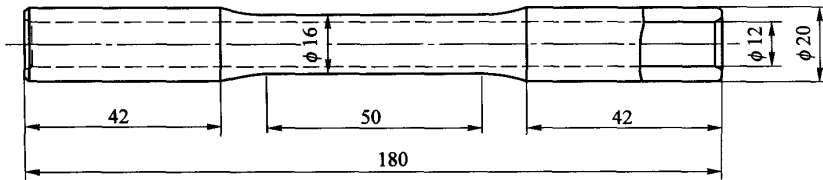


图1 光滑薄壁管件

Fig.1 The smooth thin tubular specimen

试验在 MTS809 拉-扭电液伺服疲劳试验机上进行. 采用轴向与剪切同时控制的方式, 试样标距段上安装标距为 50 mm 的 MTS632.68C-01 型拉扭引伸计. 试验在 650 °C 下进行, 采用应变控制方式, 三角波加载, 加载频率为 0.1 Hz. 试验过程中, 每隔 20 ms 进行实时数据采集. 试验加载的轴向和剪切应变见表 1.

表 1 薄壁件加载参数

Table 1 Loading parameters for the thin tubular specimens

编号	相位差/(°)	$\epsilon_z/\%$	$\gamma_{xy}/\%$	$N_f$
N01	0	0.546	0.884	458
N02	45	0.701	1.16	260
N03	90	0.789	1.26	218

### 3 有限元建模

考虑与试验加载条件的一致性及其计算公式的准确性, 取标距段的尺寸进行有限元建模.

#### 3.1 弹塑性材料特性

考虑材料非线性, ANSYS 提供多种塑性材料选项, 如双线性随动强化、双线性等向强化、多线性随动强化和多线性等向强化等. 随动强化假定屈服面的大小保持不变而仅在屈服的方向上移动, 当某个方向的屈服应力升高时, 其相反方向的屈服应力应该降低. 等向强化指屈服面以材料中所作塑性功的大小为基础在尺寸上扩张. 图 2 为试验条件下 GH4169 合金比例加载下轴向循环应力-应变响应. 试验结果表明, 随着循环数的改变, 屈服面在移动, 合金在循环加载下具有随动强化特性, 考虑采用多线性随动强化模型数值模拟比双线性随动强化精确度更高, 故在有限元计算过程中, 弹塑性材料特性采用 von Mises 屈服准则和多线性随动强化模型(KINH)<sup>[8]</sup>. 根据 GH4169 合金在 650 °C 下的单轴疲劳数据结合循环应力-应变曲线方程可得到 20 组应力应变数据, 从而绘出 GH4169 合金在 650 °C 下的单轴循环应力应变曲线.  $T=650\text{ °C}$  时, 弹性模量  $E=182\text{ GPa}$ , 泊松比为 0.325<sup>[9]</sup>.

#### 3.2 有限单元离散化

在有限元分析中, 采用三维 20 节点六面体单元 SOLID95. 在划分网格时, 单元尺寸轴向约 1 mm, 周向角度为 15°, 径向约 1 mm. 采用均匀网格划分, 共分成 3 600 个单元和 9 792 个节点. 有限元网格划分结果见图 3.

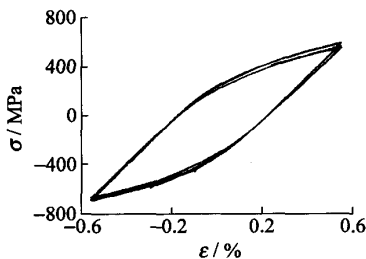


图2 GH4169 合金比例加载下轴循环应力应变响应

Fig.2 The axial cyclic stress-strain response under proportional loading for GH4169 alloy

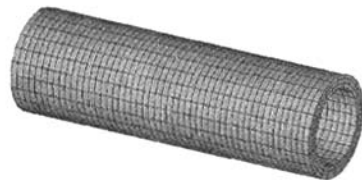


图3 薄壁管有限元网格

Fig.3 The FEM mesh mode of thin tubular specimen

### 3.3 加载方式

考虑到试验加载方式为拉扭方向应变加载,因此在对模型加载时采用一端刚性固定,另一端在轴向和周向分别施加位移载荷的方式进行加载,以实现拉扭加载效果。

设圆柱坐标为  $r, \varphi, z$ , 位移矢量的分量  $u_r, u_\varphi, u_z$  与  $\varphi$  无关, 相对伸长和剪应变形式为

$$\begin{cases} \epsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \epsilon_\varphi = \frac{u_r}{r}, \epsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \\ \gamma_{r\varphi} = \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} - \frac{u_\varphi}{r}, \gamma_{\varphi z} = \frac{\partial u_\varphi}{\partial z}, \gamma_{rz} = \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \end{cases} \quad (3)$$

应变分量增量公式的一般式为

$$d\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial}{\partial x_j} du_i + \frac{\partial}{\partial x_i} du_j \right) \quad (4)$$

式(4)可用于描述较大的变形,这些变形可由无限小变形的总和得到,式中应变分量增量的计算是相对瞬时状态的。

考虑沿与  $z$  轴相重合的柱体轴向作单向拉伸时,其应变增量为

$$d\epsilon_z = \frac{dl}{l} \quad (5)$$

式中  $l$  是柱体的瞬时长度的,积分得真实应变为

$$\epsilon_z = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (6)$$

式中  $l_0$  是原始长度。由式(6)推导出轴向位移  $\Delta l$  的计算公式为

$$\Delta l = l - l_0 = l_0(e^{\epsilon_z} - 1) \quad (7)$$

结合式(3)和式(4),周向位移的计算公式按类似方法得出

$$d\gamma_{\varphi z} = \frac{du_\varphi}{l} \quad (8)$$

式中,  $l$  是柱体的瞬时长度的;  $du_\varphi$  为  $\varphi$  方向的无限小位移。

$$\gamma_{\varphi z} = \int_{u_{\varphi_0}}^{u_\varphi} \frac{du_\varphi}{l} \quad (9)$$

$$\Delta u_\varphi = u_\varphi - u_{\varphi_0} = l\gamma_{\varphi z} \quad (10)$$

由式(7)和式(10)计算出轴向位移和周向位移,然后在加载步中直接对试件一端施加该轴向位移载荷和周向位移载荷。

### 3.4 波形加载

薄壁管件有限元模型选用三角波加载,相位差取  $0^\circ, 45^\circ$  和  $90^\circ$ , 非比例加载取轴向应变相位超前于剪切应变。比例加载 1 个循环分为 3 个载荷步,  $45^\circ$  非比例加载 1 个循环分为 6 个载荷步,  $90^\circ$  非比例加载 1 个循环分为 4 个载荷步。有限元中循环加载为稳定循环加载,故只需计算 2 个循环即可。

## 4 薄壁管件有限元与试验的应力应变数据比对

薄壁管件无应力集中部位,但因模型两端有奇异点,故有限元分析在试样中间段取点。图 4(a)、图 4(b)为比例加载有限元分析与试验结果的应力应变响应比较结果,图 4(c)~图 4(f)为非比例加载有限元分析与试验结果的应力应变响应比较结果。由图显示,2 轴比例与非比例加载有限元分析得到的拉压分量和扭转分量的应力应变滞迴环形状与试验结果均相似;比例加载拉压分量和扭转分量的应力应变曲线光滑无畸变;  $45^\circ$  非比例加载拉压分量的应力应变曲线光滑无畸变,而扭转分量应力应变曲线有 2 个转折点,滞迴环发生畸变。  $90^\circ$  非比例应变加载、拉压和扭转分量应力应变滞迴环均发生了畸变;有限元分析 3

种加载路径得到应力应变滞回曲线形状与试验结果吻合。

作者分析了在各种加载路径下,1个循环中塑性应变及应力最大值误差的大小.分析表明,1个循环中塑性应变值的最小误差为8%,最大误差为17%,多数误差在10%左右.最大应力值的最小误差为0.6%,最大误差为20%,多数误差在10%以内.

分析结果表明,本文采用 von Mises 屈服准则、多线性随动强化模型及高温单轴材料特性曲线可用于高温多轴加载的有限元应力应变数据分析,采用对模型轴向和周向位移加载可正确实现多轴比例和非比例应变加载,所给出的有限元分析方法有较好的应用价值.

另外,从图4中可观察到,有限元分析得到的迟滞回线与试验得到的迟滞回线相比,有限元分析得到的应力极值为正值时与试验相比多数偏低,应力极值为负值时偏高.考虑这是由于材料假定为随动强化,实际材料可能为随动强化和等向硬化的混合材料,故与实际情况有些偏差.

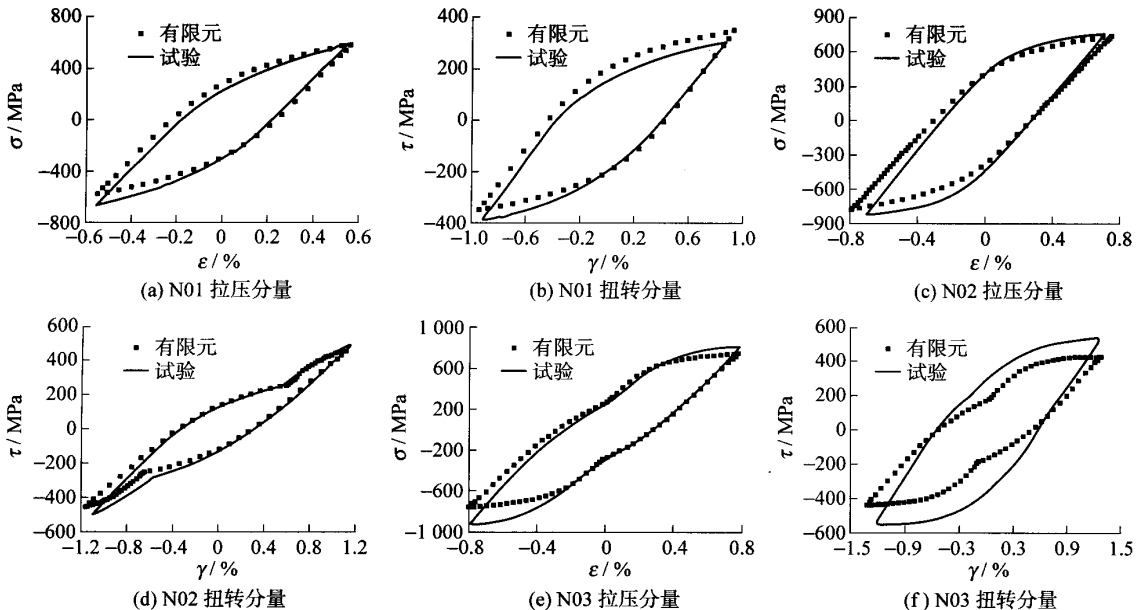


图4 比例和非比例加载下薄壁管件的应力应变滞回曲线

Fig.4 The stress-strain hysteresis loops for the thin tubular specimens under proportional and nonproportional loading

## 5 结论

1) 采用 von Mises 屈服准则,多线性随动强化法则和高温单轴循环加载的应力应变数据描述材料弹性特性进行循环弹塑性有限元分析能取得较好的效果.

2) 提出采用在柱坐标系下加轴向位移和周向位移方式实现拉扭比例和非比例应变加载.

3) 光滑薄壁管件2轴比例与非比例循环加载有限元分析结果与试验数据吻合较好.

4) 有限元得到的迟滞回线与试验的形状误差及材料的硬化特性有关.

## 参考文献:

- [1] DIETER H, EKKEHARD M, HORST N. Neuber-based life prediction procedure for multiaxially loaded components[J]. ASTM Special Technical Publication, 1994, 1231: 388-404.
- [2] YAMAUCHI M, CHUMAN M. Fatigue and creep damage evaluation procedure under multiaxial stress state[J]. Strength, Fracture and Complexity, 2003, 1(4): 227-228.
- [3] LI B, REIS L, FREITAS M D. Simulation of cyclic stress/strain evolutions for multiaxial fatigue life prediction[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28: 451-458.

- [4] DAS J, SRINIYASAN, SIVAKUMAR M. Multiaxial fatigue life prediction of a high temperature steam turbine rotor using a critical plane approach[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2000, 7: 347-358.
- [5] SAVAJDIS A, SAVAJDIS G, ZHANG C. Elastic-plastic FE analysis of a notched shaft under multiaxial nonproportional synchronous cyclic loading[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2001, 36: 87-97.
- [6] HOFFMANN M, SEEGER T. A Generalized method for estimating multiaxial elastic-plastic notch stresses and strains[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1985, 107: 250-254.
- [7] INOUE T, IMAATANI S, FUKUDA Y, et al. Inelastic stress-strain response for notched specimen of  $2\frac{1}{4}$ -Cr-1Mo steel at 600 °C [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1994, 150: 129-139.
- [8] SMITH D J, FARRAHI G H, ZHU W X, et al. Experimental measurement and finite element simulation of the interaction between residual stresses and mechanical loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23: 293-302.
- [9] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册:第二卷 变形高温合金铸造高温合金[M]. 第2版. 北京: 中国标准出版社, 2002: 323-359.

## Elastoplastic Finite Element Analysis of Smoothing Specimen Under Multiaxial Cycle Loading

SUN Guo-qin, SHANG De-guang, DING Lei, DENG Jing, JIA Guan-hua, YAN Chu-liang

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract:** To numerically simulate the stress-strain response of the components under multiaxial cyclic loading, an elastoplastic finite element analysis was adopted to thin tubular specimens under multiaxial proportional and nonproportional tension/torsion loading at high temperature. Finite element modeling was founded by ANSYS FEA software. Elastoplastic material property under high temperature was described by the von Mises yield criterion and the multilinear kinematic hardening rule and uniaxial cyclic stress-strain data under high temperature. Triangle waves were used in the proportional and nonproportional loading. Tension-torsion loading with strain controlling was carried out by applying the axial and circular displacement on one end of the specimen in the cylindrical coordinate system. It had a good agreement between postprocessing results of the thin tubular specimens and the test results.

**Key words:** elastoplasticity; finite element method; fatigue; strain control; multiaxial; hysteresis loop