

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.04.008

基于微观胞元的镍基单晶合金应力松弛数值模拟

曾 军, 丁智平, 方建辉, 白晓鹏

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 对 DD3 镍基单晶高温合金薄壁圆筒试样在 680 °C 进行了拉/扭低周疲劳试验, 基于单晶合金的微观结构特性, 建立了 γ/γ' 双相微观多胞元力学模型, 采用双线性随动 Hill 硬化模型, 对试样进行拉/扭循环位移加载有限元数值模拟。研究表明: 高温非对称循环载荷下, 试样轴向表现出应力松弛行为和非弹性形变累积, 其中基体相最先出现塑性累积变形, 导致低周疲劳破坏。数值模拟研究发现, 使用单个胞元模型进行拉/扭多轴位移加载, 会出现边界应力畸变现象, 与试验结果不相吻合, 而采用多个胞元力学模型则可以避免发生边界应力畸变现象, 能够更好地模拟高温非对称循环载荷下的应力松弛行为和对单晶合金进行应力弱化损伤研究。

关键词: 镍基单晶合金; 非对称循环载荷; 应力松弛; 多胞模型; 非弹性形变

中图分类号: TG132.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)04-0041-05

Simulation on Stress Relaxation of DD3 Nickel-Based Single Crystal Superalloy Based on Micro Cell Model

Zeng Jun, Ding Zhiping, Fang Jianhui, Bai Xiaopeng

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: The tension-torsion experiments at 680 °C on DD3 nickel-based single crystal superalloy thin-wall tube samples were conducted. Based on the microstructure characteristics of nickel-based single crystal alloy, two-phase multi-cell microscopic scale mechanical model were established. Using the bilinear follow Hill hardening model, made finite element numerical simulation of tension / torsion cyclic displacement loading on the samples. It is indicated that the sample axis showed stress relaxing behavior and inelastic deformation accumulation under high temperature asymmetric cyclic loading. The matrix phase appeared plastic deformation accumulation at first and led to low cycle fatigue damage. The numerical simulation found that the boundary stress distortion phenomenon appeared with a single cell for tension-torsion displacement loading, it is not consistent with experimental results. While using multi-cell model could avoid this phenomenon, it can better simulate stress relaxation behavior under asymmetric cyclic loading at high temperature and study stress weaken damage for single crystal alloy.

Keywords: nickel-based single crystal superalloy; asymmetric cyclic loading; stress relaxation; multi-cell model; inelastic deformation

收稿日期: 2013-06-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875080), 湖南省研究生科研创新基金资助项目(CX2013B410), 湖南省十二五重点学科(机械工程)基金资助项目

作者简介: 曾 军(1987-), 男, 江西丰城人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为机械结构强度,

E-mail: zengjun6462378@163.com

1 研究背景

镍基单晶合金因其良好的高温抗疲劳和蠕变性能,已成为航空涡轮发动机热端部件的重要材料。航空涡轮发动机热端部件不仅承受高温蠕变损伤,同时还因发动机启动—巡航—停机产生的非对称循环载荷及温度变化而引起低周疲劳(low cycle fatigue, LCF)破坏^[1]。在高温和非对称循环载荷下,单晶合金会产生应力松弛现象,即在恒定应变条件下,金属材料应力随时间减小的现象。应力松弛是一个微塑性变形逐渐累积的过程,而高温加剧了这一过程^[2],应力松弛累积至一定程度会产生应力弱化损伤,从而导致构件断裂失效。要正确分析非对称循环载荷作用下的应力应变响应和应力松弛行为,研究其结构在循环载荷作用下内应力的重新分布是关键。越来越多的学者不满足现有较为完善的高温热弹塑性有限元方法^[3],而寻求采用数值模拟的方法来研究高温材料及弹性构件的应力应变响应和应力松弛行为。

魏大胜等人^[4]以 FGH95 和 GH4169 两种镍基合金的循环特性为基础,寻求与载荷历程相关的损伤参量,进而建立了应力弱化损伤模型。J. J. Sha 等人^[5]采用弯曲应力松弛测试对碳化硅陶瓷复合材料的拉伸应力松弛特性进行了研究。文献[6-8]采用有限元分析软件自带的本构模型,对金属构件高温蠕变应力松弛行为进行了分析研究。M. Okazaki 等人^[9]对 [001]取向 CMSX-4 镍基单晶合金圆柱光滑试样,进行了单轴低周疲劳试验和非比例加载热机械疲劳试验研究,考虑单晶合金的 γ / γ' 混合微观结构,提出了预测单晶合金低周疲劳和热机械疲劳的微观力学模型。丁智平等人^[10-11]基于镍基单晶高温合金的微观组织特性建立 γ / γ' 双相单胞有限元模型进行多轴非比例循环加载应力应变数值模拟,并基于能量耗散理论,引入参量 k 表征非比例加载对疲劳寿命的影响,建立镍基单晶低周疲劳寿命预测模型。

在离心力作用下,涡轮叶片主要承受非对称循环载荷以及高温蠕变应力松弛的作用,因此有必要研究单晶合金在高温下的应力松弛行为和应力弱化损伤。本文基于 DD3 镍基单晶高温合金的微观组织特性,建立多胞元力学模型,进行拉/扭多轴循环位移加载数值模拟来研究材料的应力松弛行为。

2 DD3 镍基单晶拉/扭低周疲劳试验

2.1 试验材料与方案

多轴拉/扭低周疲劳试验^[10]采用薄壁圆筒试样,

外径 14 mm, 内径 11 mm, 波形为三角波, 加载应变率为 $7\ 200\ \mu\text{m/s}$, 标距段长度为 25 mm, 试样取向均为 [001] 方向。试验采用应变控制, 温度为 $680\ ^\circ\text{C}$, 所有试样的取向偏离轴向的角度均在 9° 以内, 全部试验数据的记录均由计算机自动完成。单晶合金成分见表 1, 应变加载路径见图 1。

表 1 DD3 单晶合金成分

Table 1 Composition of DD3 single crystal superalloy %

成分	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	C	Ni
质量分数	9.5	6.0	5.2	5.0	5.8	2.3	<0.01	rest

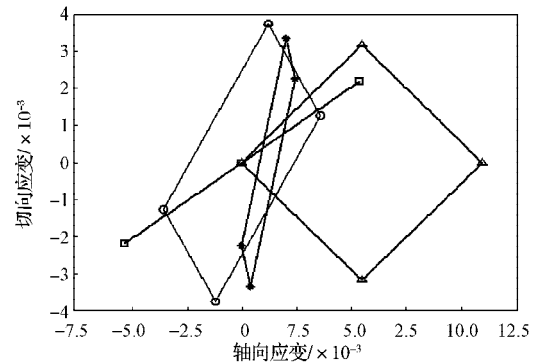


图 1 680 °C 应变加载路径

Fig.1 Strain loading path at 680 °C

2.2 试验结果

图 2~3 为 $680\ ^\circ\text{C}$ 拉/扭非对称循环载荷下, 轴向和切向应力应变循环前期响应曲线。

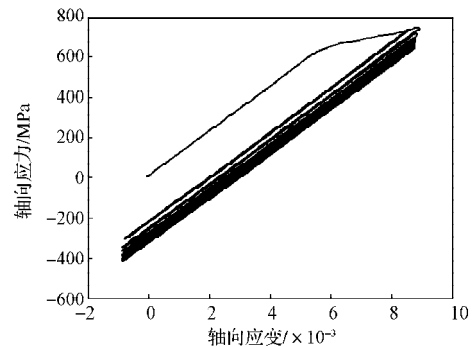


图 2 [001]取向多轴疲劳试验轴向应力应变曲线

Fig.2 Axial stress strain curves for [001]

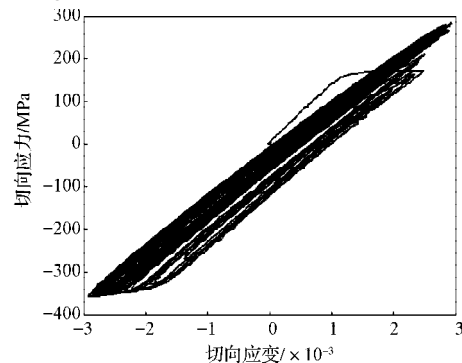


图 3 [001]取向多轴疲劳试验切向应力应变曲线

Fig.3 Shear stress strain curves for [001]

从图 2~3 可以看出, 随着循环次数的增加, 轴向 (非对称) 产生应力松弛行为, 同时伴随着应变缓慢增加; 而切向为对称载荷, 没有出现应力松弛行为, 只出现了试验没控制住的抖动问题。由应力松弛产生非弹性形变的累积, 材料将承受应力弱化损伤的作用, 直到试样断裂失效。从细、微观角度上看, 应力松弛是以弹性应变能作为驱动力的位错运动及原子扩散过程, 是位错排列、应力分布及亚结构趋向均匀化, 材料内部组织和性能趋于稳定化的过程^[2]。

3 微观胞元力学模型

3.1 有限元模型的建立

DD3 镍基单晶高温合金是高度复杂化具有面心六面体结构的金属间化合物, 主要由基体相 γ 和沉淀相 γ' 组成。这两相的材料参数、力学性能均不相同, 如表 2 所示。图 4 为镍基单晶合金的微观组织结构。从图中可以看出基体相包裹着沉淀相, 其中 γ' 相约占一个胞元体积的 68%。

表 2 DD3 单晶高温合金微观模型材料参数

Table 2 Parameters of microscopic model materials for single crystal DD3

温度 / °C	弹性模量 / GPa		剪切模量 / GPa		屈服强度 / MPa		泊松比	硬化模量 H' /GPa
	γ'	γ	γ'	γ	γ'	γ		
680	97.3	111.6	106.2	113.9	1 031.5	700	0.4	0.455
850	89.1	101.2	100.2	105.2	1 020.0	551	0.4	0.455

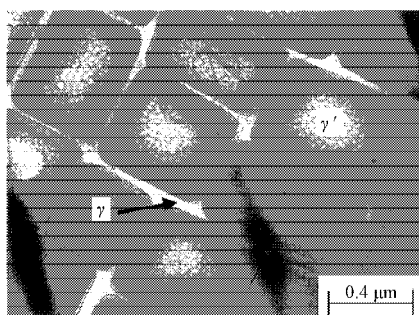


图 4 镍基单晶合金微观结构

Fig. 4 Microscopic structure of nickel-based single crystal

本文建立的多胞元力学模型由 4 个单胞元组成。图 5 为划分网格后的多胞元模型, 其中 a 为剖开后的基体, b 为沉淀相。

模型采用 solid186 单元, 共有 95 931 个节点, 90 368 个单元。约束模型 AB 边, 将试验应变数据换算为位移, 在 1, 2 面上分别施加切向位移, 由于扭转角很小, 可将正切值近似为扭转角大小, 再将其乘以距离面 1 的高度, 即为该处的切向位移;

3, 4 面上分别施加轴向位移。模型整体施加均布温度载荷。

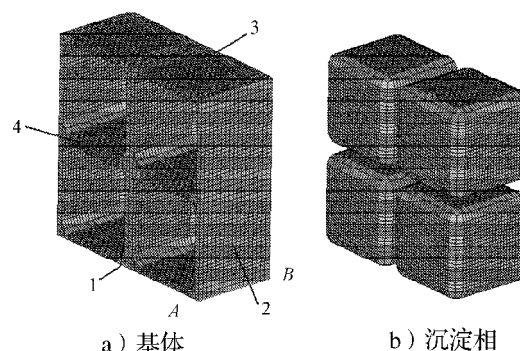


图 5 多胞元有限元模型

Fig. 5 Finite element model of multiple cell

模型在 ANSYS 分析软件中进行约束求解。取双线性随动 Hill 硬化模型, 采用正交各向异性非线性计算, 各向异性参数 K 在 680 °C 时取值为 3.971 5。

3.2 有限元模型求解

位移加载波形采用三角波, 使用 ANSYS 参数化设计语言 APDL (ANSYS parametric design language), 根据不同加载路径、计算循环加载过程中不同载荷步所对应的拉 / 扭应变, 编写命令程序进行求解。文献[12]考虑了单晶合金的各向异性特性, 通过引入描述正交各向异性材料在偏轴受载时, 存在正应力和切应力耦合效应的应力不变量, 得出了立方晶体单晶材料屈服准则及相应的弹塑性本构模型, 具有较高的精度。本文将它们编成有限元分析子程序, 将其集成到 ANSYS 结构分析软件中, 对 DD3 镍基单晶合金疲劳试样进行高温拉 / 扭非比例循环加载数值模拟, 得到基体相 γ 和沉淀相 γ' 的分析结果。

4 模拟结果与讨论

4.1 边界效应

本文在对单胞元模型^[10]进行拉 / 扭多轴位移加载时 (试验为位移控制), 发现在圆角过度处出现了边界应力畸变的现象, 与试验结果不符, 如图 6 和表 3 所示。为了避免这一现象, 本课题组建立多胞元模型进行数值模拟, 结果如图 7 和表 3 所示。

从图 7 可以看出, 应力最大处位于中心, 边界效应消失。将表 3 的结果绘制成图形, 如图 8~9 所示。从表 3 和图 8~9 可以看出, 单胞元模型计算结果均与试验结果相差较大, 而多胞元模型计算结果与试验结果相差较小。这证明了建立多胞元模型的合理性和必要性。

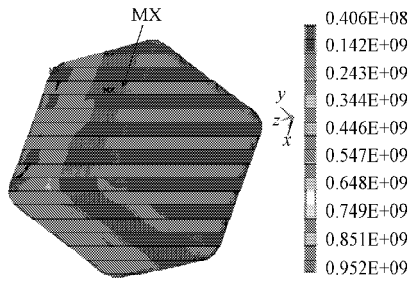


图6 单胞模型 Mises 应力云图

Fig. 6 Mises stress nephogram of single cell model

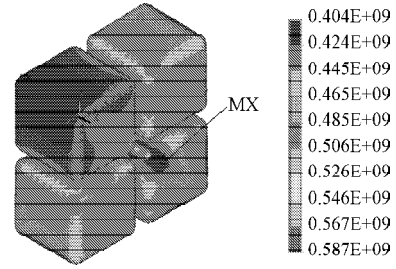


图7 多胞模型 Mises 应力云图

Fig. 7 Mises stress nephogram of multiple cell model

表3 单、多胞元模型计算结果与试验结果

Table 3 The calculated and experimental results for single and multiple cell model

MPa

试样 编号	最大轴向应力范围					最大切向应力范围				
	试验结果	单胞基体	单胞沉淀相	多胞基体	多胞沉淀相	试验结果	单胞基体	单胞沉淀相	多胞基体	多胞沉淀相
1	1 170.0	2 621.6	997.1	1 469.6	1 210.1	541.8	674.5	764.1	415.1	408.3
2	1 049.1	1 663.4	882.6	1 282.3	1 189.5	623.3	410.8	460.8	464.2	443.5
3	237.9	2 668.6	959.7	2 12.8	202.2	648.3	973.5	1 027.2	631.8	533.2
4	658.0	3 322.1	2 024.7	670.3	665.6	527.2	922.0	1 011.2	596.7	553.7
5	719.6	2 681.1	2 207.2	762.5	683.8	738.0	1 103.6	1 328.8	645.4	624.5
6	296.1	1 982.9	925.1	232.1	118.2	876.2	1 124.1	1 377.9	668.4	622.0
7	1 060.1	1 878.9	1 548.6	1 260.2	1 103.1	762.9	847.4	986.7	622.2	599.8
8	1 186.2	3 628.1	3 525.9	1 400.8	1 237.3	658.4	1 166.2	809.5	567.2	476.9

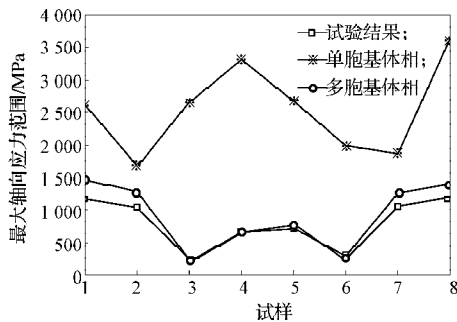


图8 最大轴向应力范围比较

Fig. 8 Comparison of maximum axial stress range

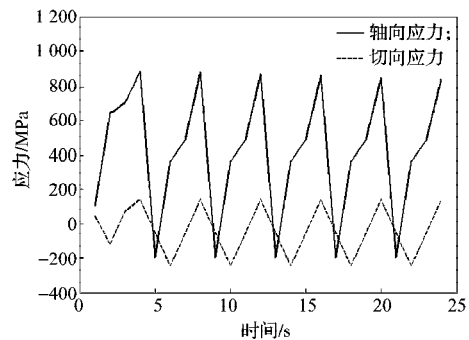


图10 轴向/切向应力随时间历程曲线

Fig. 10 The curves for axial/shear stress vs time

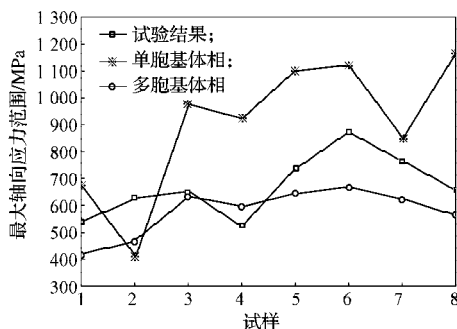


图9 最大切向应力范围比较

Fig. 9 Comparison of maximum shear stress range

从图可以看出，随着循环加载次数的增加，轴向应力有逐渐减小的趋势，但切向应力几乎不变。

图 11 为轴向基体与沉淀相塑性变形的时间历程曲线。

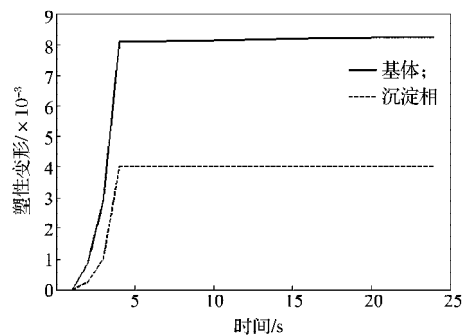


图11 轴向塑性变形随时间历程曲线

Fig. 11 The curve for axial plastic deformation vs time

4.2 应力松弛行为

利用 ANSYS 软件时间历程后处理 (POST26) 程序, 获取微观多胞元有限元模型, 模拟拉/扭高温非对称循环载荷下轴向/切向应力随时间历程曲线, 如图 10 所示。

从图可以看出, 基体相与沉淀相均出现了程度不同的轴向循环塑性变形累积现象, 且基体相的塑性变形数值大于沉淀相。

在恒定应变条件下, 材料的应力随循环加载次数的增加而逐渐减小, 材料的总应变保持不变, 即弹性应变和非弹性应变总和不变。这实际上是一个由非弹性变形部分取代弹性变形, 从而产生微塑性变形累积的过程^[2], 在高温环境下更明显。

图 12 和图 13 分别为基体相与沉淀相的塑性应变云图。

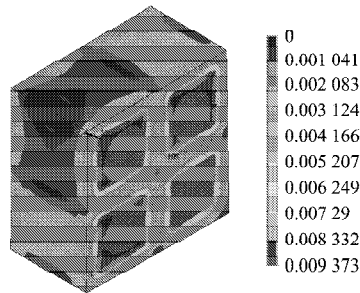


图 12 基体塑性形变云图

Fig. 12 The matrix plastic deformation nephogram

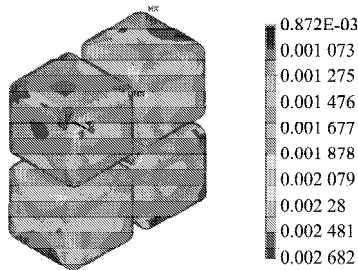


图 13 沉淀相塑性形变云图

Fig. 13 Plastic deformation nephogram of precipitation

从图 12~13 可以看出, 基体产生的塑性变形大于沉淀相, 由此可以推断基体相为材料最先发生疲劳破坏的部位, 与文献[9~10]的结论一致。

5 结论

通过对 DD3 镍基单晶合金在高温非对称循环载荷下的拉/扭多轴应力、应变响应分析, 并通过有限元数值模拟材料的应力松弛行为, 可得如下结论:

1) 高温非对称循环载荷下, 试样轴向(非对称)表现出应力松弛行为, 产生非弹性形变累积。

2) 基于 DD3 镍基单晶高温合金的微观组织特性, 建立了双相微观多胞元力学模型, 避免了单胞元模型拉/扭多轴位移加载时, 出现边界应力畸变的现象, 能够更好地模拟高温非对称循环载荷下的应力松弛行为。数值模拟结果表明, 基体相的塑性累积变形值大于沉淀相, 从而最先发生疲劳破坏。

3) 本文的工作为下一步镍基单晶高温合金在高温非对称循环载荷下, 产生的应力弱化损伤和疲劳寿命预测, 提供了一定的理论依据和数据支持。

参考文献:

- [1] 丁智平. 复杂应力状态镍基单晶高温合金低周疲劳损伤研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
Ding Zhiping. Study on Multiaxial Low Cycle Fatigue Damage of Single Crystal Ni-Based Superalloy[D]. Changsha: Center South University, 2005.
- [2] 王延喜. 弹簧钢的应力松弛行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
Wang Yanxi. Stress Relaxation Behavior of the Spring Steel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [3] Wang Xucheng, Tang Yongjin. An Effective Numerical Procedure for Inelastic Analysis of Structures Under Thermo-Mechanical Loading[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1994, 18(1/2/3): 341-348.
- [4] 魏大胜, 王延荣, 王相平, 等. 基于应力循环特征的裂纹萌生寿命预测方法[J]. 航空动力学报, 2012, 27(10): 2342-2347.
Wei Dasheng, Wang Yanrong, Wang Xiangping, et al. Life Prediction Method Based on Characteristic of Cyclic Stress[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(10): 2342-2347.
- [5] Sha J J, Park J S, Hinoki T, et al. Bend Stress Relaxation of Advanced SiC-Based Fibers and Its Prediction to Tensile Creep[J]. Mechanics of Materials, 2007, 39(2): 175-182.
- [6] 王 刚, 许宏伟, 余 雯, 等. 高压输电导线蠕变松弛有限元分析初探[J]. 云南电力技术, 2009, 37(2): 23-24.
Wang Zha, Xu Hongwei, Yu Wen, et al. High-Voltage Transmission Conductor Creep Relaxation with Finite Element Analysis[J]. Yunnan Electric Power, 2009, 37 (2): 23-24.
- [7] 赵 雁, 姬海君, 安晓宁, 等. 用 ABAQUS 对光滑试件的蠕变与应力松弛进行的数值模拟[J]. 武警工程学院学报, 2001, 17(6): 14-15.
Zhao Yan, Ji Haijun, An Xiaoning, et al. The Numerical Simulation of Creep and Stress Relaxation of Smooth Specimens with ABAQUS[J]. Journal of Engineering College of Armed Police Force, 2001, 17(6): 14-15.
- [8] Yue Z F, Eggeler G, Stöckhert B. A Creep Finite Element Analysis of Indentation Creep Testing in Two Phase Microstructures (Particle/Matrix-and thin Film/Substrate-Systems)[J]. Computational Materials Science, 2001, 21 (1): 37-56.
- [9] Okazaki M, Sakaguchi M. Thermo-Mechanical Fatigue Failure of a Single Crystal Ni-Based Superalloy[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(2): 318-323.

(下转第 84 页)