

# 镍基定向结晶合金蠕变损伤的细观模型

岳珠峰, 吕震宙, 郑长卿

西北工业大学 工程力学系 350 信箱, 西安 710072

(罗海安推荐)

**摘要:** 针对镍基定向结晶合金的蠕变变形和损伤, 本文建立了有限元和自洽两种晶体滑移细观模型。在这两种模型中同时考虑了晶粒滑移损伤和晶界损伤。通过一组镍基单晶合金和一组特殊结晶取向的定向结晶合金标定了模型参数。数值分析结果表明, 这两种模型都可以比较准确地描述定向结晶合金的蠕变损伤变形和失效规律, 尤其是定向结晶合金蠕变性能的结晶取向相关性。

**关键词:** 定向结晶合金; 蠕变细观损伤; 有限元模型; 自洽模型

**分类号:** O344 6; TG113 **文献标识码:** A

## 引言

镍基高温合金广泛地应用于发动机的热端部件。在设计定向结晶合金时, 晶界取向有序化, 排除了横向晶界, 极大地提高了蠕变性能。但是在实际结构使用中, 外加载荷不一定是单向和平行晶界的, 因此晶界的作用依然存在。同时, 通过研究特殊晶界取向的定向结晶合金蠕变变形和损伤特征, 有助于一般多晶合金的蠕变损伤机理的认识。

定向结晶合金结构含有众多晶粒, 直接模拟所有的晶粒和晶界在目前是无法接受的<sup>[1]</sup>, 因此要作一些简化, 即模型化。其中有限元模型和自洽模型是两类最重要的简化方式。前者通过有限元方法来模拟一晶粒堆(有限个晶粒, 也称特征单元), 从而得知宏观的力学性能; 后者采用自洽的方法来建立宏观和细观之间的联系。在本文研究中, 因为定向结晶的晶界滑移较困难<sup>[2]</sup>, 即可以不考虑晶界的滑移和晶界滑移损伤, 即宏观蠕变应变为滑移系的滑移应变的宏观反映, 而宏观损伤则由晶界损伤和因滑移而产生的晶粒损伤两部分组成。

本研究的目的是用两种细观模型来研究定向结晶合金的蠕变损伤特征, 尤其是结晶取向的相关性。在用所建模型时, 需要取与定向结晶合金中材料和性能相同的单晶合金进行试验以标定参数。在本文中取的单晶合金不仅在材料成分上与定向结晶一致, 而且都是主要由和 两相组成, 且所占的比例近似相等, 即单晶合金中体积分量为 35% 和 65%, 定向结晶合金为 38% 和 62%。

来稿日期: 1996\_10\_18; 修订日期: 1998\_09\_26

基金来源: 国家自然科学基金(59501009)资助项目; 西安交通大学力学开放实验室基金资助项目

作者简介: 岳珠峰(1965-), 男, 教授, 博士

# 1 模型建立

## 1.1 有限元模型

研究一立方体晶粒堆, 含有  $n \times n \times n$  个相同尺寸的立方体单元, 在两对面施加蠕变载荷, 另外四面为自由。由于为定向结晶合金, 可设每一列单元为一个晶粒, 共  $n \times n$  个晶粒, 该晶粒堆中所有的晶粒具有一个相同的晶体取向, 另外两个方向每个晶粒的取向各不相同, 处于随机状态。采用文[2]建立的晶体滑移有限元分析程序, 在程序中考虑了有限变形和变形与损伤的耦合效应。

## 1.2 自洽模型

宏观应力  $S$  和晶粒应力  $s$  的关系可以采用下列增量形式<sup>[3]</sup>

$$d_{ij}(t) = -2(1 - \nu) e^{-Tt} (d_{ij}^c - d e_{ij}^c), \quad (1.1)$$

$$s_{kk} = S_{kk}, \quad (1.2)$$

式中  $s_{kk}$  和  $s_{ij}$  分别为静水应力和偏应力分量,  $G$  为剪切模量,  $\nu = 2(4 - \nu)/15(1 - \nu)$  ( $\nu$  为泊松比),  $T = G/\eta$  ( $\eta$  为剪切粘度且  $S_{ij} = 2 e_{ij}$ ),  $d_{ij}^c$  为晶粒的蠕变应变,  $e_{ij}^c$  为宏观蠕变应变,  $t$  为蠕变时间, 需要指出的是上式是针对无损伤体提出的, 为了简单计, 本文直接将其应用于有损伤体的分析之中。

自洽模型计算时, 在外载方向每个单元具有相同的晶体取向, 其它两个方向处于随机状态, 宏观坐标系与外应力一致, 即外应力  $S$  可以表示为  $(0, 0, S_{33}, 0, 0, 0)$ , 单元的局部坐标系与晶粒的晶体坐标系一致, 它与宏观坐标系之间可以通过坐标转换建立联系。

## 1.3 晶体本构模型

有限元和自洽两种模型采用了相同的晶体本构、晶界损伤及耦合处理方法。

滑移系  $\alpha$  的分切应力  $\tau^{(\alpha)}$  可以由晶粒应力  $s$  求得

$$\tau^{(\alpha)} = V_{ij} s_{ij}, \quad (1.3)$$

式中

$$V_{ij} = \frac{1}{2}(b_i a_j + b_j a_i), \quad (1.4)$$

$a_i$  和  $b_i$  分别为滑移系  $\alpha$  的滑移方向和滑移面单位矢量。

实验结果表明<sup>[4,5]</sup>, 对所研究的定向结晶合金, 在所研究的温度范围内, 位错的滑移即滑移系的滑移是蠕变变形的的主要形式, 即可以不考虑位错的攀移。那么滑移系的蠕变应变率  $\dot{\epsilon}^{(\alpha)}$  可以由下式表示

$$\dot{\epsilon}^{(\alpha)} = k [\tau^{(\alpha)}]^{m_1} t^p, \quad (1.5)$$

其中  $k$ ,  $m_1$  和  $p$  为模型参数。

滑移系的蠕变应变而产生的损伤  $d_m^{(\alpha)}$  可以用下式表示

$$d_m^{(\alpha)} = C [\tau^{(\alpha)}]^{p_1}, \quad (1.6)$$

式中  $C$  和  $p_1$  为模型参量。考虑损伤与变形的耦合, 滑移系的蠕变率  $\dot{\epsilon}^{(\alpha)}$  可以下式表示

$$\dot{\epsilon}^{(\alpha)} = \dot{\epsilon}_0^{(\alpha)} \exp(d_m^{(\alpha)} - d_{m0}), \quad (1.7)$$

式中符号

$$d_m^{(\cdot)} - d_{m0} = \begin{cases} d_m^{(\cdot)} - d_{m0}, & \text{当 } \sum_{i=1}^{N_g} d_m^{(\cdot)} > d_{m0}, \\ 0, & \text{当 } \sum_{i=1}^{N_g} d_m^{(\cdot)} \leq d_{m0}, \end{cases} \quad (18)$$

式中  $N_g$  为开动滑移系数,  $d_{m0}$  为一阈值

那么晶粒的损伤为

$$d_m = \sum_{i=1}^{N_g} d_m^{(\cdot)} \quad (19)$$

#### 1.4 晶界的损伤

在本文研究中, 因为定向结晶的晶界滑移较困难<sup>[2]</sup>, 即可以不考虑晶界的滑移和晶界滑移损伤。晶界的损伤率  $d_v$  取 Robotnov 型<sup>[6]</sup>

$$d_v = d_0 \left[ \frac{1}{1 - d_v} \right]^m, \quad (10)$$

式中  $d_0$  为初始损伤率,  $m$  为模型参量

定义  $\sigma_0$  为垂直于晶界的应力分量, 即

$$\sigma_0 = \sigma_{ij} n_i n_j, \quad (11)$$

那么有下式成立

$$d_0 = A \sigma_0^{p_3}, \quad (12)$$

式中  $A$  和  $p_3$  为模型参量,  $n_i$  为晶界面的法向单位矢量, 在本文中可以通过结晶方向来确定

#### 1.5 晶粒损伤和晶界损伤的耦合处理

由于滑移系的滑移而导致的晶粒蠕变应变  $\epsilon_{ij}^c$  可用下式表示

$$\epsilon_{ij}^c = \sum_{i=1}^{N_g} V_{ij}^{(\cdot)} \quad (13)$$

考虑晶界损伤则

$$\epsilon_{ij}^c = \left[ \frac{1}{1 - d_v} \right]^{p_2} \sum_{i=1}^{N_g} V_{ij}^{(\cdot)}, \quad (14)$$

式中  $p_2$  为一模型参数

在有限元模型中, 上式变成下式

$$\epsilon_{ij}^c = \sum_{i=1}^{N_g} V_{ij}^{(\cdot)} \left[ \frac{1}{1 - d_v} \right]^{p_2} \quad (15)$$

即将晶界损伤耦合到晶体滑移本构模型之中

在自洽模型中, 宏观蠕变应变为晶粒蠕变应变的晶体取向平均值, 也可以是算术平均值, 用下列符号表示

$$e_{ij}^c = \left\{ \epsilon_{ij}^c \right\} \quad (16)$$

宏观损伤也用同样方法处理, 即

$$D = \left\{ d \right\}, \quad (17)$$

式中

$$d = d_v + d_m \quad (18)$$

## 2 试验和模型参数的标定

所有的模型参数都直接用实验来标定。试样由镍基单晶和定向结晶合金两部分组成。国内外实验研究表明<sup>[1,2,5,7,8]</sup>, 这两类合金在蠕变状态下开动的滑移系为十二面体 $\{111\}$  112 和六面体 $\{100\}$  110 两组, 共 18 条。因此在标定参数时针对这两组滑移系进行

### 2.1 单晶试验

材料的主要成分如表 1 所示

试验温度为 760 和 950。其中 $[001]$ 取向实验结果用于标定十二面体滑移系的模型参数, 而 $[111]$ 取向用于标定六面体滑移系的参数。模型参数值示于表 2 之中

表 1 材料的主要成分(Ni 余)

	Co/ %	W/ %	Mo/ %	Al/ %	Ti/ %	Cr/ %
单晶	4.5~5.5	5.0~6.0	3.5~4.5	5.5~6.2	1.7~2.4	9.0~10.0
定向结晶	4.8~5.4	5.1~5.80	3.5~4.2	5.5~6.4	1.6~2.2	9.0~10.0

### 2.2 双晶模型

取结晶晶界垂直于应力轴的定向结晶合金的蠕变试验结果来标定其它模型参数, 并且假设各晶粒的取向为  $001 / 010 / 100$ 。该材料的主要成分示于表 1 中, 模型参数示于表 2 中

表 2 界面模型值

参数	温度			
	760		950	
	$\{111\}$ 112	$\{100\}$ 110	$\{111\}$ 112	$\{100\}$ 110
$k$	$4.68 \cdot 10^{-18}$	$4.68 \cdot 10^{-18}$	$8.25 \cdot 10^{-18}$	$8.25 \cdot 10^{-18}$
$m_1$	5.61	5.61	4.45	4.45
$p$	0.246	0.246	0.405	0.405
$C$	2.0	1.5	1.1	1.25
$p_1$	1.10	1.19	2.00	2.01
$p_2$	4.11	4.11	5.61	5.61
$m$	4.11	4.11	5.61	5.61
$A$	$7.1 \cdot 10^{-18}$	$7.1 \cdot 10^{-18}$	$1.5 \cdot 10^{-18}$	$1.5 \cdot 10^{-18}$
$p_3$	2.12	2.12	3.16	3.16
$d_{n0}$	0.15	0.15	0.15	0.15

## 3 结果分析

有限元模型和自洽模型都取 36 个晶粒(有限元为 216 个单元), 模拟结果表明, 36 个晶粒的结果已较为稳定。晶粒的取向通过随机法产生, 为了防止计算时损伤趋于 1 而应变发散的问题, 在所有计算中晶粒最大损伤  $d_c$  取 0.95

图 1 和图 2 给出了 760, 647MPa 和 950, 176MPa 时的实验结果和模拟结果, 图 3 和图 4 给出了结晶取向与蠕变失效寿命的关系, 从图中可以看出, 随着结晶角度的增加, 蠕变寿命都

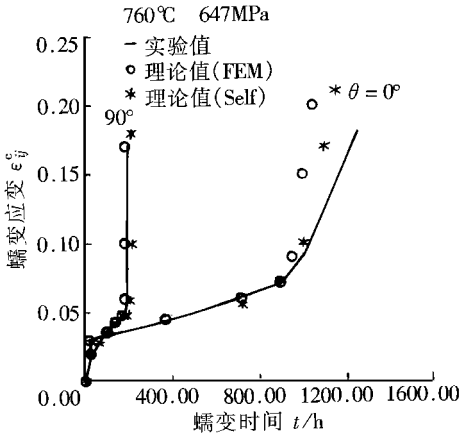


图1 760 时定向结晶合金的蠕变响应  
( $\theta$  为晶体取向与外应力轴夹角)

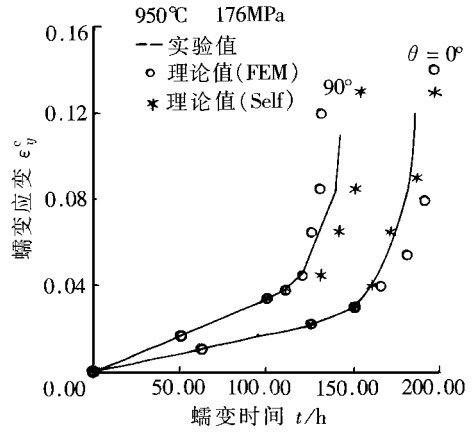


图2 950 时定向结晶合金的蠕变响应  
( $\theta$  为晶体取向与外应力轴夹角)

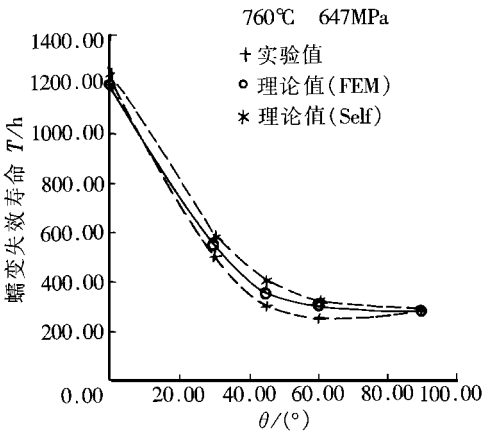


图3 蠕变失效寿命与  $\theta$  的关系

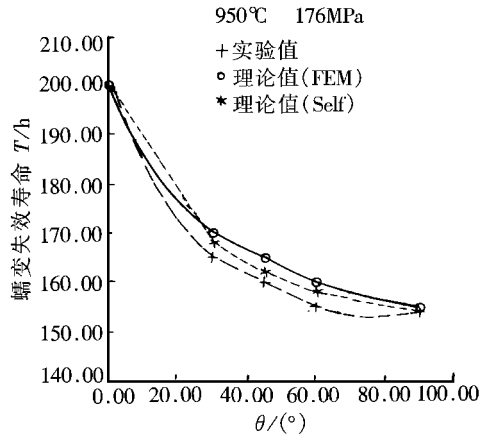


图4 蠕变失效寿命与  $\theta$  的关系

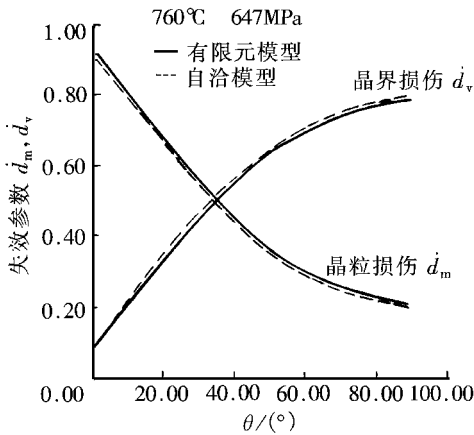


图5 失效参数与  $\theta$  的关系

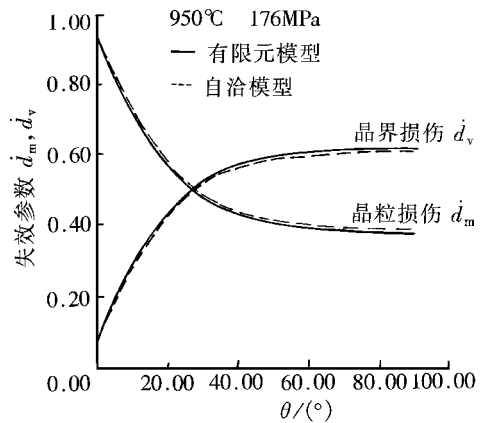


图6 蠕变损伤参数与  $\theta$  的关系  
(950 , 176MPa)

呈下降趋势 温度对这种趋势有作用,在 950 时,下降得较 760 时缓慢 图 5 和图 6 进一步结出了这两种情况下的晶粒损伤  $d_m$  和晶界损伤随  $d_v$  角度的变化情况,从图中可以看出,结晶角的增加,晶界损伤所占比重增加 温度的作用也是十分显著的

## 4 结 论

本文针对镍基单晶合金的蠕变损伤,建立了有限元和自洽两种细观模型 在这两种模型中同时考虑了晶粒滑移损伤和晶界损伤 通过一组镍基单晶合金和一特殊结晶取向的定向结晶合金标定了模型参数 数值分析结果表明,这两种模型都可以比较准确地描述定向结晶合金的蠕变变形和失效规律,尤其是定向结晶合金蠕变性能的结晶取向相关性

## 参 考 文 献

- [1] 岳珠峰. 各向异性晶体滑移粘塑性模型及其应用[R]. 中国博士后报告, 西安: 西北工业大学, 1996
- [2] Yue Z F, Lu Z Z, Zheng C Q. Evaluation of creep damage behavior of nickel\_base directionally solidified superalloys with different crystallographic orientations[J]. Theoret Appl Fracture Mech, 1996, 25: 127~ 138
- [3] Weng T J. A self\_consistent relation for the time\_dependent creep of polycrystals[J]. Internat J Plasticity, 1993, 9(2): 181~ 198
- [4] Ohno N, Takeuchi T. Multiaxial creep of a nickel\_base directionally solidified alloy: anisotropy and simulation[J]. Acta Metall Mat, 1992, 40(4): 559~ 561
- [5] Yue Z F, Lu Z Z, Zheng C Q. The creep\_damage constitutive and life predictive model for nickel\_base single crystal superalloys[J]. Metall Mater Trans A, 1995, 26(6): 1815~ 1821
- [6] Robotnov Y N. Creep Problems in Structures Members [M]. Amsterdam: North\_Holland, 1969
- [7] Ohno N, Takeuchi T. Anisotropic in multiaxial creep of nickel\_base single superalloy CMSX\_2 (experiments and identification of active slip systems)[J]. JSME Internat J, 1994, 37(1): 129~ 137
- [8] Shi Shixiang, Jordan E H. Self\_consistent constitutive modeling and testing of polycrystalline hastelloy\_X[J]. Internat J Solids Structures, 1992, 29(8): 2623~ 2638

# Meso Approaches for the Creep Damage Behavior of Nickel\_Base Directionally Solidified Superalloys

Yue Zhufeng, L Zhenzhou, Zheng Changqing

Department of Applied Mechanics, Northwestern Polytechnical

University, P O Box 350, Xi'an 710072, P R China

**Abstract:** A self\_consistent creep damage constitutive model and a finite element model have been developed for nickel\_base directionally solidified superalloys. Grain degradation and grain boundary voiding are considered. The model parameters are determined from the creep test data of a single crystal and a directionally solidified superalloy with a special crystallographic orientation. The numerical analysis shows that the modeled creep damage behaviors of nickel\_base directionally solidified superalloys with different crystallographic orientations are in good agreement with the experimental data.

**Key words:** directionally solidified superalloy; creep meso damage; finite element model; self\_consistent model