

镍基单晶合金压痕蠕变研究

闫五柱^{1,2}, 张嘉振^{1,2}, 周振功², 岳珠峰³

(1. 中国商用飞机有限责任公司 北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

(2. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150080)

(3. 西北工业大学, 陕西 西安 710129)

摘要: 为了探索用压痕法确定晶体学蠕变应力指数的可行性, 采用晶体塑性理论模型对不同取向镍基单晶合金压痕蠕变行为进行了有限元模拟。研究表明, 晶体学对称性会导致压痕表面应力呈现特定的对称性; 晶体取向对压痕蠕变深度及其扩展速率具有显著的影响。通过开展不同载荷下的压痕蠕变模拟, 获得相应的稳态压痕深度扩展速率, 再通过线性回归的方法可有效获得晶体学蠕变应力指数。本文提出的确定蠕变应力指数的方法不受晶体取向的影响, 有望应用于各向异性高温合金蠕变性能评估。

关键词: 镍基合金; 单晶; 压痕; 蠕变; 晶体塑性; 有限元

中图分类号: TG111.8

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)09-2303-04

随着镍基单晶合金在航空发动机热端部件中的广泛应用, 如何确定其服役高温蠕变性能显得尤为重要^[1-3]。近年来, 压痕蠕变技术由于其简便、有效和非破坏性等优点, 在测定材料蠕变特性方面得到研究者的广泛关注^[4-8]。在压痕蠕变测试中, 传统的尖压头和球形压头通常被圆柱形平压头替代, 以确保在压痕蠕变过程中保持恒定的压痕应力。

压痕蠕变法确定材料蠕变参数的关键在于建立压痕蠕变和传统单轴拉伸蠕变之间的关系。压痕蠕变的数值模拟最早由 Yu 和 Li^[9]开展, 假定等效 Mises 应力与蠕变率之间存在幂率关系, 从而得到:

$$\dot{\epsilon} = C_i \sigma_N^{n_i} \quad (1)$$

$$n = n_i = \frac{\Delta \ln \dot{\epsilon}}{\Delta \ln \sigma_{\text{eff}}} = \frac{\Delta \ln \dot{\epsilon}}{\Delta \ln \sigma_N} \quad (2)$$

其中, \dot{h} 为稳态压痕深度扩展速率, σ_N 为压痕应力, n_i 为压痕蠕变应力指数, C_i 为与温度和材料有关的常数, n 为拉伸蠕变应力指数, σ_{eff} 为等效 Mises 应力, $\dot{\epsilon}$ 为稳态蠕变率。由上式可以看出, 压痕深度扩展速率与压痕应力之间呈幂率关系, 指数即为拉伸蠕变应力指数, 因此, 可以由压痕蠕变法获得材料蠕变应力指数。近来, Dorner^[10]和 Liu^[11]对钛合金和铝合金进行压痕蠕变测试, 并得到了相应的蠕变参数, 从而验证了上式的正确性。

先前对压痕蠕变的研究大多假设被测材料为各向

同性。研究表明, 晶体取向对材料表面压痕形貌具有显著影响^[12,13], 而晶体取向对压痕蠕变行为及确定蠕变参数的影响尚鲜有报道。采用定向凝固技术制造的高温单晶合金具有显著的各向异性特性, 其力学本构关系一般采用晶体塑性理论模型来描述, 单晶塑性变形由晶体学滑移来实现。因此, 单晶的压痕行为与传统的各向同性材料相比有较大差异^[14]。

本文采用晶体塑性理论, 对面心立方镍基单晶合金压痕蠕变行为开展了数值模拟。重点研究了晶体取向对表面压痕应力分布、压痕深度扩展和蠕变参数的影响, 为压痕蠕变法确定高温单晶合金蠕变参数提供重要参考和依据。

1 晶体学蠕变本构关系

假定蠕变第 2 阶段遵循 Norton 蠕变法则, 则分解切应变率 $\dot{\gamma}$ 可表示为:

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = a(\tau^{(\alpha)})^n \quad (3)$$

其中, a 和 n 为材料蠕变参数, 上标 α 指定相应滑移系。当施加应力 σ 时, 滑移系 α 上的分解切应力 $\tau^{(\alpha)}$ 可以由下式给出:

$$\tau^{(\alpha)} = \sigma : P^{(\alpha)} \quad (4)$$

$$P^{(\alpha)} = \frac{1}{2} \left(m^{(\alpha)} n^{(\alpha)\top} + n^{(\alpha)} m^{(\alpha)\top} \right) \quad (5)$$

收稿日期: 2015-09-12

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) (2007AA04Z404)

作者简介: 闫五柱, 男, 1985 年生, 博士后, 中国商用飞机有限责任公司北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211, 电话: 010-57808954, E-mail: yanwuzhu@163.com

其中, $m^{(\alpha)}$ 为滑移系 α 的滑移方向, $n^{(\alpha)}$ 为滑移面法向, P 为施密特因子。蠕变应变率可用各滑移系分解切应变率的线性组合来表示:

$$\dot{\epsilon} = \sum_{\alpha=1}^N \dot{\gamma}^{(\alpha)} P^{(\alpha)} \quad (6)$$

其中, N 为滑移系开动的数量。

假定蠕变变形对弹性行为没有影响, 则有:

$$\Delta\sigma = D : \Delta\epsilon \quad (7)$$

其中 D 为各向异性弹性刚度张量。

晶体学坐标系([001]-[010]-[100])与全局坐标系(x - y - z)之间的转换可表示为:

$$D' = TDT^T \quad (8)$$

其中, D' 和 T 分别为弹性刚度张量偏量和转换张量。

以上本构方程通过编制用户材料子程序 UMAT, 植入商用有限元软件 ABAQUS 于有限元模拟中, 该程序的有效性已得到其他相关研究的验证^[12,15]。

2 模型建立

压痕蠕变模型如图 1a 所示。被压试件为三维半无限大固体, 压头为圆柱形平压头。压头半径为 R , 试件尺寸为 $10R \times 10R \times 10R$ 以消除边界效应的影响。边界条件如下: 试件底面、左侧面和前侧面分别约束其法向, 压头仅允许在垂直方向自由, 压头与试件之间为无摩擦接触。

采用 C3D8R 单元, 在靠近压痕区域对有限元网格进行加密(见图 1b)。本文所采用的镍基单晶合金的力学参数如表 1 所示^[12]。假设八面体滑移系 $\{111\}\langle 110\rangle$ 开动。对于不同取向的单晶采用相同的蠕变参数, 以研究晶体取向的对压痕蠕变行为的影响。

3 结果与讨论

3.1 表面压痕应力分布特征

为了得到镍基单晶合金蠕变行为特征信息, 有必要研究不同晶体取向下的压痕应力分布。图 2 给出了 3 种不同取向的单晶表面压痕蠕变 Mises 应力云图。

由图 2 可以看出, [001]、[011]和[111]取向单晶表面压痕 Mises 应力云图分别呈方形、蝶形和三角形, 这与 Xu^[12]的研究结果一致。Xu^[12]指出, [001], [011]和 [111]取向单晶表面压痕形貌分别呈四重、二重和三重对称。

在相同压痕应力和蠕变时间下, 压痕应力的大小因晶体取向的不同而变化。这是由于不同取向单晶的滑移系不同, 晶体各向异性所引起的应力集中程度也不同。由图 2c 可以看出, [111]取向的表面压痕应力云图并不是严格的三重对称, 左下方的应力较大。这主要是由于[111]取向下有较多的滑移系开动, 蠕变过程中的应力重分布现象较为显著, 使得由晶体学对称性引起的应力云图对称性出现一定的偏差。

3.2 晶体取向对压痕蠕变深度扩展的影响

在过去几十年中, 有学者对不同取向的镍基单晶

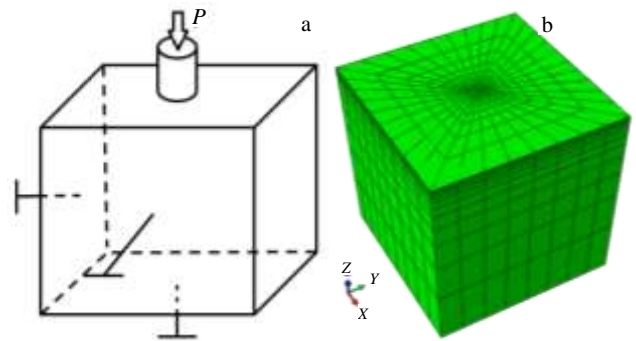


图 1 压痕蠕变模型

Fig.1 Indentation creep models: (a) schematic view of the model and (b) finite element model

表 1 镍基单晶合金力学性能参数

Table 1 Mechanical parameters of nickel based single crystal superalloys

Property	Value
Young's modulus, E/MPa	86300
Possion's ratio, ν	0.33
Creep pre-factor, $a/s^{-1}\text{MPa}^n$	1.0×10^{-15}
Creep exponent, n	5.11

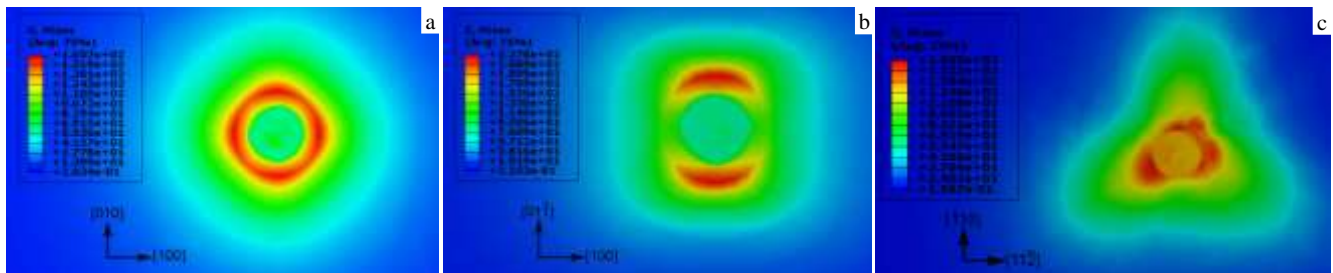


图 2 3 种不同取向的单晶表面压痕 Mises 应力分布

Fig.2 Surface von Mises stress contour plots for [001] (a), [011] (b) and [111] oriented single crystals (c)

合金蠕变行为进行了实验研究^[16-18]。据报道，晶体取向对镍基单晶合金蠕变行为具有显著影响。在本文中，假定不同晶体取向的单晶具有相同的晶体学蠕变参数，以研究晶体取向的影响。

图3给出了[001]，[011]和[111]取向单晶压痕深度随蠕变时间的变化。由图3可以看出，压痕深度扩展经历了2个阶段：瞬态蠕变阶段和稳态蠕变阶段。在瞬态蠕变阶段，压痕深度扩展速率迅速降低；在稳态蠕变阶段，压痕深度扩展速率趋向于恒定。与单轴拉伸蠕变不同的是压痕蠕变不存在加速蠕变阶段。

由图3还可以看出，在相同压痕应力和蠕变时间下，[111]取向单晶所对应的压痕深度和压痕深度扩展速率最大，[001]取向单晶所对应的压痕深度和压痕深度扩展速率最小，主要原因是[111]取向单晶有更多的滑移系开动。

3.3 晶体学蠕变应力指数的确定

Xu^[15]等提出以下列方程来描述镍基单晶合金压痕蠕变行为：

$$\dot{h} = AP^n \text{ 和 } \tau = \eta P \tag{9}$$

其中， A 和 n 分别为压痕蠕变常量和晶体学蠕变指数， P 为压痕应力， τ 为分解切应力。 η 是与施密特因子相关的几何转化因子。由式(9)还可以得到：

$$\dot{h} = C_i(\tau)^n \tag{10}$$

由上式可知，晶体学蠕变应力指数可以通过对压痕蠕变数据拟合得到。

为了得到蠕变应力指数，开展了一系列不同载荷($P=200, 300, 400, 500, 600$ MPa)下的压痕蠕变数值模拟。采用如图4所示的外推法获得稳态压痕深度扩展速率。在图4中，绘制稳态压入速率随时间倒数的变化图，对原始数据进行多阶指数衰减函数拟合，并外推至无限时间($1/t=0$)，从而得到稳态压痕深度扩展速率。

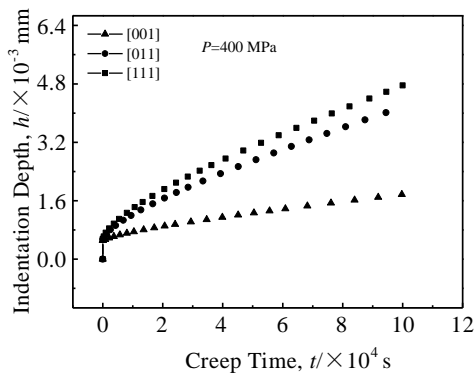


图3 晶体取向对压痕深度扩展的影响

Fig.3 Effect of crystallographic orientation on indentation depth propagation

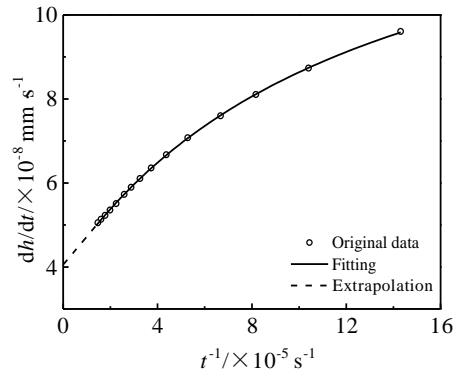


图4 采用外推法确定稳态压入速率

Fig.4 Determination of the steady-state velocity of the indenter using extrapolation method

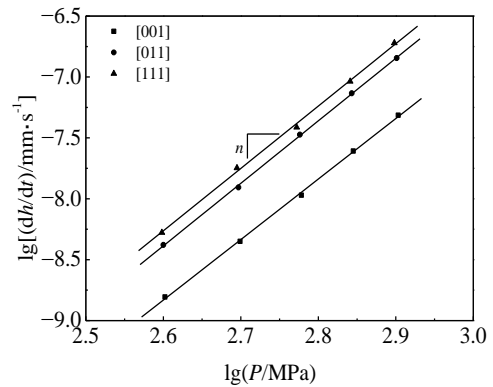


图5 采用压痕蠕变法确定不同取向单晶晶体学蠕变参数

Fig.5 Determination of crystallographic creep parameters for different crystallographic orientations using indentation creep method

如图5所示，在双对数坐标中绘制压痕深度扩展速率随压痕应力的变化图，并进行线性拟合，则拟合斜率即为晶体学蠕变应力指数(参考式(9))。[001]、[011]和[111]取向单晶由压痕蠕变法所获得的晶体学蠕变应力指数分别为 $n=5.01, 5.18, 5.15$ ，与理论值 $n=5.11$ 较为吻合。由图5可以看出，晶体取向对晶体学蠕变应力指数的确定没有影响，压痕蠕变法可以有效地获得镍基单晶合金蠕变应力指数。

4 结论

- 1) [001]、[011]和[111]取向单晶表面压痕 Mises 应力云图分别呈四重、二重和三重对称。
- 2) 晶体取向对稳态压痕深度扩展速率具有显著影响。
- 3) 压痕蠕变法可以有效获得晶体学蠕变应力指数，且不受晶体取向的影响。

参考文献 References

- [1] Zhang Shu(张 姝), Tian Sugui(田素贵), Qian Benjiang(钱本江) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2012, 41(1): 28
- [2] Tian Sugui(田素贵), Liang Fushun(梁福顺), Li Anan(黎阿男) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2012, 41(6): 1016
- [3] Pan L M, Scheiblp I, Henderson M B *et al. Acta Metall Mater* [J], 1995, 43: 1375
- [4] Sastry D H. *Mater Sci Eng A*[J], 2005, 409: 67
- [5] Peng L L, Yang F Q, Nie J F *et al. Mater Sci Eng A*[J], 2005, 410-411: 42
- [6] Choi I C, Yoo B G, Kim Y J *et al. J Mater Res*[J], 2012, 27(1): 3
- [7] Su C J, Herbert E G, Sohn S *et al. J Mech Phys Solids*[J], 2013, 61(2): 517
- [8] Yan Wuzhu(闫五柱), Wen Shifeng(温世峰), Liu Jun(刘 军) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2010, 39(10): 1829
- [9] Yu H Y, Li J C M. *J Mater Sci*[J], 1977, 12: 2214
- [10] Dorner D, Röller K, Skrotzki B *et al. Mater Sci Eng A*[J], 2003, 357: 346
- [11] Liu Y J, Zhao B, Xu B X *et al. Mater Sci Eng A*[J], 2007, 456: 103
- [12] Xu B X, Yonezu A, Yue Z F *et al. Comput Mater Sci*[J], 2009, 46(2): 275
- [13] Sabnis P A, Forest S, Arakere N K *et al. Int J Plasticity*[J], 2013, 51: 200
- [14] Maier V, Merle B, Göken M *et al. J Mater Res*[J], 2013, 28(9): 1177
- [15] Xu B X, Wang X M, Zhao B *et al. Mater Sci Eng A*[J], 2008, 478: 187
- [16] Tian S, Yu X F, Yang J H *et al. Mater Sci Eng A*[J], 2004, 379: 141
- [17] Heredia F E, Pope D P. *Acta Metall*[J], 1986, 34: 279
- [18] Yue Z F, Lu Z Z, Zheng C Q. *Theor Appl Fract Mech*[J], 1996, 25: 127

Indentation Creep Performed on Nickel Based Single Crystal Superalloys

Yan Wuzhu^{1,2}, Zhang Jiazhen^{1,2}, Zhou Zhengong², Yue Zhufeng³

(1. Beijing Aeronautical Science and Technology Research Institute, Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd, Beijing 102211, China)

(2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

(3. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: In order to explore the possibility of determining crystallographic creep exponent using an indentation method, extensive finite element simulations were carried out on differently oriented nickel based single crystal superalloys by incorporating a crystal plasticity theory. The results show that the crystallographic symmetry leads to a certain symmetric distribution pattern of stress, and the crystallographic orientation has a remarkable influence on the indentation depth and its propagation rate. The steady state indentation depth propagation rates under different indentation loads were extracted by an extrapolation approach, and the crystallographic creep stress exponent was then obtained by a linear regression method. The creep stress exponents determined by this approach are independent of crystallographic orientation, which shed some light on the evaluation of creep properties of anisotropic high temperature alloy using the indentation method.

Key words: nickel based alloy; single crystal; indentation; creep; crystal plasticity; finite elements

Corresponding author: Yan Wuzhu, Ph. D., Postdoctor, Department of Structures and Strength, Beijing Aeronautical Science and Technology Research Institute, Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd, Beijing 102211, P. R. China, Tel: 0086-10-57808954, E-mail: yanwuzhu@163.com