

Ni 基单晶叶片粘塑性分析*

岳珠峰 吕震宙 郑长卿

(西北工业大学工程力学系, 西安, 710072)

尹泽勇

(南华动力机械研究所, 株洲, 412002)

摘 要: 从位错滑移机理出发, 建立了一种适用于 Ni 基高温单晶结构分析用的晶体滑移粘塑性本构模型。该模型将八面体、十二面体及六面体滑移系作为潜在的开动滑移系, 考虑阻应力和背应力两种内应力状态参量。利用某 Ni 基单晶叶片材料在 700 °C 和 950 °C 的试验结果对模型进行了考核并标定了模型参数。进而将所建模型编入有限元结构分析软件中, 对某型发动机单晶叶片进行了计算分析。

主题词: 叶片, 镍基合金, 粘塑性, 应变率, 有限元法, 本构方程

分类号: V232.4, V231.91

A VISCOPLASTIC CRYSTALLOGRAPHIC ANALYSIS OF A NICKEL-BASE SINGLE CRYSTAL BLADE

Yue Zhufeng Lü Zhenzhou Zheng Changqing

(Dept. of Engineering Mechanics, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an, 710072)

Yin Zeyong

(Nanhua Powerplant Research Inst., Zhuzhou, 412002)

Abstract: Based on dislocation theory, an unified anisotropic crystallographic constitute has been developed for nickel-base single crystal superalloys. Octahedral $\{111\} \langle 110 \rangle$, $\{111\} \langle 112 \rangle$ and cubic $\{100\} \langle 110 \rangle$ slip systems are considered in the model. The constitute utilizes drag stress and back stress state variables to model the local inelastic flow. The model was tested with the experiments of nickel-base crystal superalloy DD3 at 700 °C and 950 °C. The model parameters have been also simultaneously obtained at the two temperatures. The constitute has been implemented into a structure finite element program. The strength and life of a nickel-base single crystal turbine blade have been calculated.

Subject terms: Blade, Nickel base superalloy, Viscoplasticity, Strain rate, Finite element method, Constitutive equation

1 引 言

Ni 基单晶超合金材料具有相对好的高温机械性能。目前已成为新型航空航天发动机热端

* 本文 1995 年 5 月 21 日收到, 本课题得到航空基金和西安交大力学开放基金的资助

部件重要结构材料,也是在役发动机延寿的易损结构替代材料。滑移变形是单晶材料基本变形机理。经典的晶体滑移本构模型将应变率分成弹性、塑性和蠕变等部分,并分别加以确定。事实上在高温状态下,这种分解有时是很困难的,也不代表变形的物理本质,因此出现了一些所谓的“统一模型”。这类模型将应变率分成线性和非线性两部分,非线性部分包括塑性和蠕变等部分,这样做有很大的优越性,成为人们逐渐采用的方法。

2 本构模型建立

金属体受外载后,产生的线性应变率 $\dot{\epsilon}^e$ 可以由应力增量直接得到,并满足立方对称关系,非线性应变率 $\dot{\epsilon}^i$ 为滑移系剪切应变率 $\dot{\gamma}$ 的宏观表现。金属的滑移应变率 $\dot{\gamma}$ 可由位错密度 N 、位错 Burgers 矢量 b 及位错运动速度 v 得到^[1]:

$$\dot{\gamma} = Nbv \quad (1)$$

采用 Gilman 建立的 v 与剪应力 τ 的关系^[2]:

$$v = H \exp\left(-\frac{G}{\tau}\right) \quad (2)$$

式中 H 与 G 为模型参数。

Ni 基单晶叶片材料为两相材料,基体 γ 和增强相 γ' 。从细观变形机理上,单晶体在外力作用下,位错首先在弱相-基体上产生,在不同受载环境下,通过切过 γ' 和绕过 γ' 相形成宏观的滑移。因此用两个内应力状态参量来表征滑移变形是合适的。采用 Krempl 等提出的两个内应力状态参数的组合形式^[3],结合 (1) 与 (2) 式,滑移系的剪应变率 $\dot{\gamma}$ 可以用下式表示:

$$\dot{\gamma} = D \exp\left[-A\left(\frac{Z}{|\tau - Q|}\right)^n\right] \sin(\tau - Q) \quad (3)$$

式中 D 、 A 、 n 为滑移系模型参数。 Z 为阻应力状态变量, Q 为背应力状态变量。

对于 Ni 基单晶高温试验结果,背应力演化方程属于“饱和”型,可以取成下式

$$\dot{\Omega} = m_2(\Omega_1 - \Omega)\dot{W}_p \quad (4)$$

式中 $\dot{W}_p = \tau\dot{\gamma}$

初始条件为 $\Omega(0) = \Omega_0$ 。 Ω_1 为饱和值, Ω_0 和 m_2 为模型参数。其积分形式为

$$\Omega = \Omega_1 + (\Omega_1 - \Omega_0)\exp(-m_2 W_p) \quad (5)$$

阻应力 Z 除了要求能够模拟一些粘塑性现象,对 Ni 基单晶合金还需要模拟方向性、拉/压不对称性等非 Schmid 效应以及潜硬化等特性。

设阻应力 Z 由以下两部组成:

$$Z = g + Z_0 \quad (6)$$

Z_0 反映方向性和拉/压不对称性等非 Schmid 效应,可以采用 LCP 模型形式^[3],则为

$$Z_0 = V_1 \tau_1 + V_2 \tau_2 \quad (7)$$

也可以采用 PPV 模型形式^[4],则为

$$Z_0 = V_1\tau_1 + V_2\tau_2 + V_3\tau_3 \quad (8)$$

V_1 和 V_2 、 V_3 为材料系数, τ_1 和 τ_2 、 τ_3 为滑移系的分切应力。

这里需要指出的是 PPV 和 LCP 模型基于八面体滑移系在峰值强度温度以下的变形^[5], 若不存在非 Schmid 效应, 则 $Z_0=0$

g 为不考虑方向性和拉/压不对称性的阻应力演化方程, 也可以写成饱和型

$$\dot{g} = m_1(H_1 - g)\dot{\tau} = m_1(H_1 - g)\dot{W}_P \quad (9)$$

初值条件为 $g(0) = H_0$; 式中 H_1 为饱和值, m_1 和 H_0 为模型参数。

潜硬化的含意为激活的滑移系使得非激活临界开动应力发生变化。它可以在背应力中得到反映。我们修改 g 为 Z_1 ^[6]。

$$Z_a = \frac{\sum_{\beta} q_{a\beta} g_{\beta} \dot{r}_{a\beta}}{\sum_{\beta} \dot{r}_{a\beta}} \quad (10)$$

式中下标 α 与 β 为滑移系指示符, 其中 $q_{a\beta}=1 \quad \alpha=\beta$; $q_{a\beta}=L \quad \alpha \neq \beta$ 。

L 为潜硬化比 (Latent Hardening Ratio), 它为激活新滑移系的分切屈服应力 τ_2 与已激活滑移的滑移系的流动应力 τ_1 之比, 即 τ_2/τ_1 。

3 模型参数的标定

实验可以证实^[7,8], 高温环境下的 Ni 基单晶叶片材料, 在低应变率下, 可开动的滑移系为十二面体和六面体滑移系; 在高应变率下, 可开动的滑移系为八面体和六面体滑移系。参数的标定可以采用 $\langle 001 \rangle$ 、 $\langle 011 \rangle$ 、 $\langle 111 \rangle$ 和 $\langle 112 \rangle$ 晶体取向的不同应变率下的瞬时拉伸、不同应力水平下的蠕变试验结果。本文取直径为 5 mm 标距长 25 mm 的圆棒试样 (总长为 75 mm), 试验温度为 700°C 和 950°C, 所用机型号为改装的 M-3Γ, 开始时加温率为 50°C/min, 至设定温度后保温 20 min, 通过引伸仪记录标距位移-时间 (载荷) 关系。试验结果与模型分析结果示于图 1~4, 这两个温度状态下的模型参数值示于表 1 和表 2 (其中参数 D , A 为设定)。潜硬化系数可以根据文献 [9] 结果取 $L=1.24$ 。

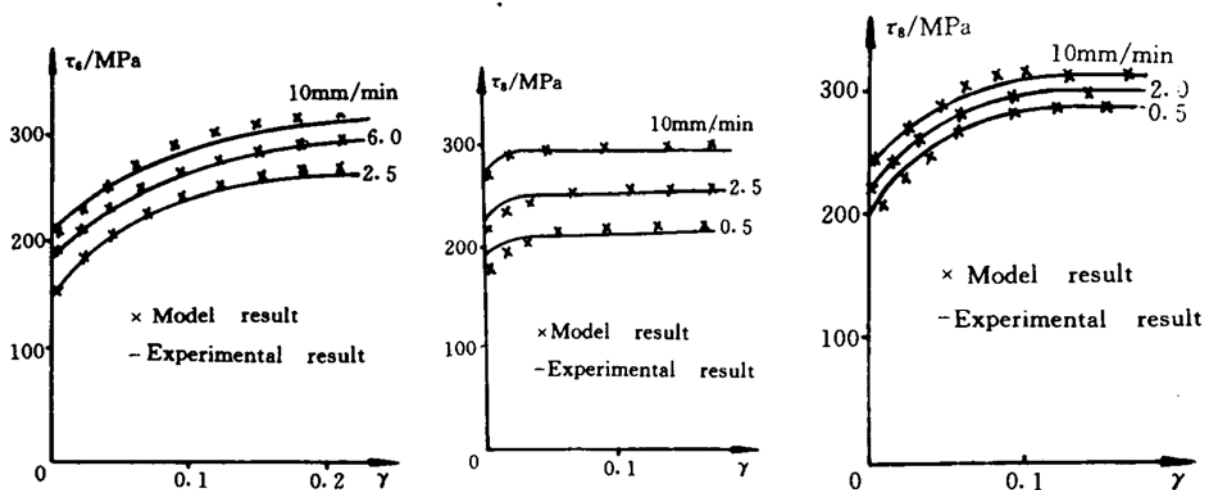


Fig. 1 The curve of shear stress of $\{111\} \langle 110 \rangle$ (τ_s) and shear stress of $\{100\} \langle 100 \rangle$ (τ_s) at 950°C

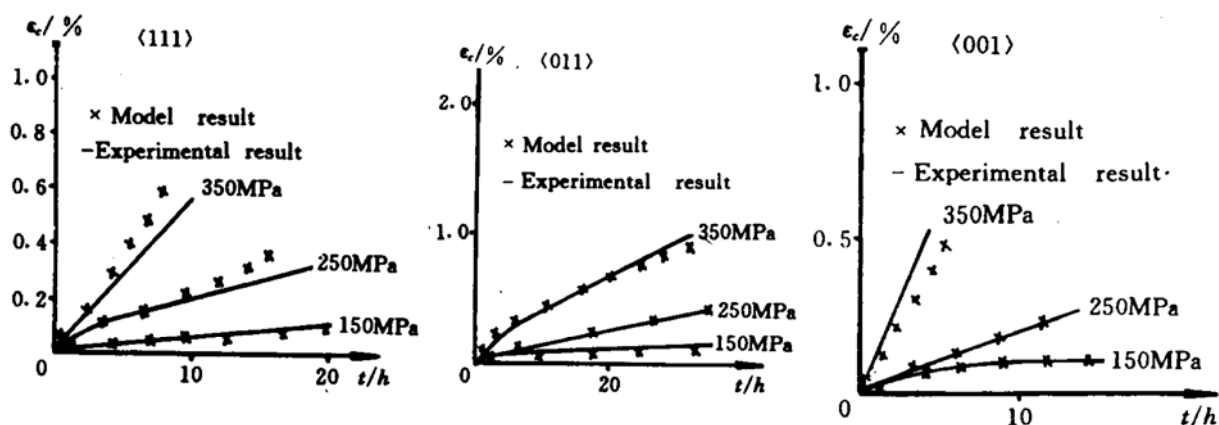


Fig. 2 The creep curve at 950°C

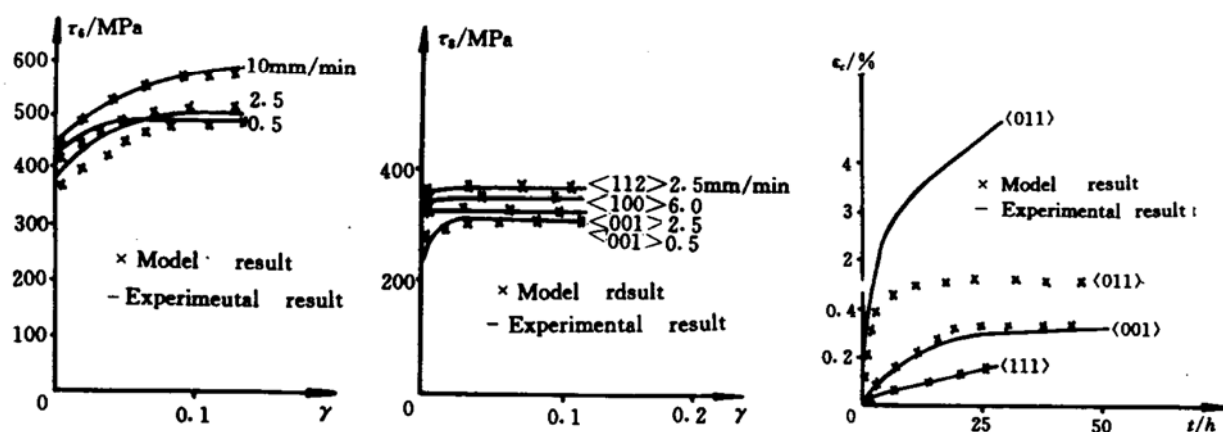
Fig. 3 The curve of shear stress of $\{100\}$ $\langle 110 \rangle$ (τ_s) and shear of $\{100\}$ $\langle 110 \rangle$ (τ_s) at 700°C

Fig. 4 The creep curve at 700°C

Table 1 Model parameters at 700°C

	$\{111\} \langle 110 \rangle$	$\{111\} \langle 112 \rangle$	$\{100\} \langle 110 \rangle$ (High strain rate)	$\{100\} \langle 110 \rangle$ (Low strain rate)
D	10000	1.0	10000	1.0
A	0.5	0.5	0.5	0.5
n	1.8	1.8	1.8	1.8
v_1	0.00212	0.0	0.0	0.0
v_2	0.0023	0.0	0.0	0.0
v_3	-0.0049	0.0	0.0	0.0
H_1	375	300	800	100
H_0	325	0.0	300	0.0
m_1	1.8	0.9	0.9	1.8
q	1.24	0.0	1.24	0.0
Ω_1	100	0.0	100	0.0
Ω_0	0.0	0.0	0.0	0.0
m_2	1.8	0.0	0.7	0.0

Table 2 Model parameters at 950°C

	{111} <110>	{111} <112>	{100} <110> (High strain rate)	{100} <110> (Low strain rate)
D	10000	1.0	10000	1.0
A	0.5	0.5	0.5	0.5
n	0.53	0.53	0.53	0.53
v_1	0.0	0.0	0.0	0.0
v_2	0.0	0.0	0.0	0.0
v_3	0.0	0.0	0.0	0.0
H_1	400	200	400	200
H_0	150	200	120	200
m_1	1.0	0.0	1.0	0.0
q	1.24	0.0	1.24	0.0
Ω_1	0.0	0.0	0.0	0.0
Ω_0	0.0	0.0	0.0	0.0
m_2	0.0	0.0	0.0	0.0

从模型初步分析结果来看,除了 700 °C、600 MPa 取向蠕变响应差别较大外(即说明蠕变性能与晶体取向相关^[10],温度升高,这种差别减小),其余结果可以说明所建模型是合适的。

4 单晶叶片的计算分析

将上述本构模型理论编入有限元结构分析程序中^[11],考虑了有限变形和晶格转动效应,对单晶叶片进行了初步计算分析。真实叶片形状(取<100>-<010>-<100>晶体取向)如图 5 所示,共 49 个 20 节点 3 维固体等参元,取 3×3×3 阶积分。图中给出了工作状态的温度分布。叶片受温度载荷和离心载荷共同作用。初始温度为 20 °C,转速为 4712 r/s。图 5 也给出在时间 $t=1$ h 的变形图。图 6 和图 7 给出叶尖位移和最大非线性应变与时间的关系,从图中可知,开始时非线性应变较大,之后逐渐趋于常数,如果假设叶尖设计时存有 0.5 mm 的间距,由此可计算在此工况下失效寿命为 1500 h。

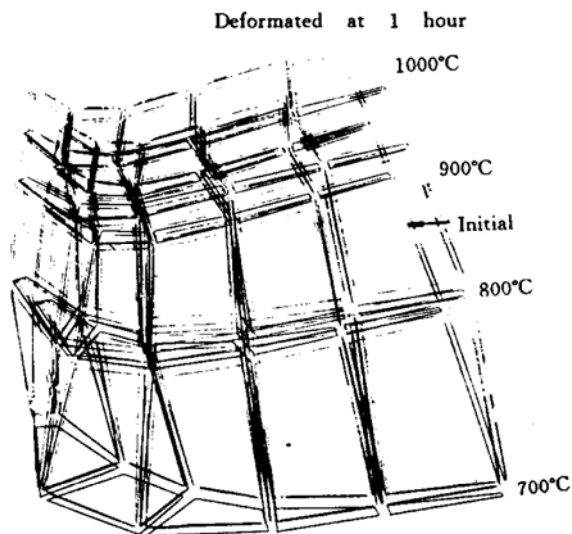


Fig. 5 The mesh of blade

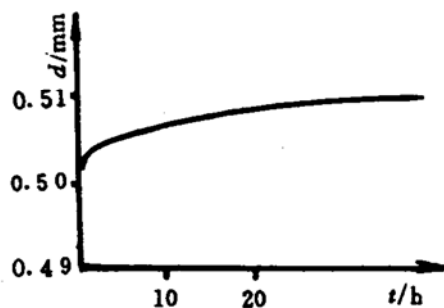


Fig. 6 The tip displacement as function of creep time

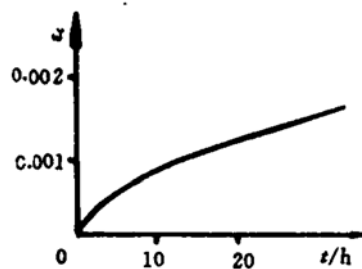


Fig. 7 The maximum creep strain as function of creep time

致谢: 本文试验工作得到北京航空材料所吴仲棠和张行安高工的大力协助, 计算工作得到西工大计算中心李海燕老师的支持, 一并致谢。

参 考 文 献

- 1 Nabarro F R N. Dislocations in solids. New York: Elsevier/North-Holland, 1979
- 2 Gilman J J. Progress in the microdynamical theory of plasticity. New York: Proc. 5 th U. S. National Cong Appl Mech, 1966: 385~394
- 3 Krempl E, Mamahon J J, Yao D. Viscoplasticity based on overstress with a differential growth law for equilibrium stress. Mech of Mater, 1986 (5)
- 4 Lall C, Chin S, Pope D P. The orientation and temperature dependence of yield stress of $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Nb})$ single crystals. Metall Trans, 1A, 1970: 1323~1332
- 5 Paidar V, Pope D P, Vitek V. A theory of the anomalous yield behavior in L1_2 ordered alloys. Acta Metall, 1984, 32: 435~448
- 6 岳珠峰, 郑长卿. Ni 基单晶叶片材料拉/压屈服特性研究. 航空学报, 1994 (14): 556-559
- 7 Milligan W W, Antolovich A P. Yielding and deformation behavior of the single crystal superalloy PWA1480. Metall Trans, 18A, 1989: 85~95
- 8 Ohne N, Takeuchi T. Anisotropic in multiaxial creep of nickel-base single superalloy CMSX-2 (experiments and identification of active slip systems). JSME Inter J, 1994, 37: 129~137
- 9 岳珠峰. Ni 基单晶叶片材料变形、损伤和破坏机理及力学研究. [博士论文]. 西安: 西北工业大学, 1994
- 10 Yue Zhufeng, Lu Zhenzhou, Zheng Changqing. The creep-damage constitutive and life predictive model for nickel-base single crystal superalloys. Metall Mater Trans A, 1995, 26: 1815~1821
- 11 岳珠峰. 单晶叶片结构强度和蠕变寿命研究报告. 西安: 西北工业大学科技报告, 1994