

Ni₃Al 基单晶高温合金蠕变本构模型

王荣桥^{1,2,3}, 张 斌¹, 胡殿印^{1,2,3}

- (1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;
2. 北京航空航天大学 航空发动机结构强度北京市重点实验室, 北京 100191;
3. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 结合 Ni₃Al 基单晶高温合金蠕变行为的微观机理,在晶体滑移理论的基础上,建立了描述 Ni₃Al 基单晶高温合金蠕变行为的本构模型,并通过 ANSYS 提供的 UPFs 二次开发平台对所建立的本构模型进行了有限元实现。利用蠕变试验数据,结合遗传算法获取了两种 Ni₃Al 基材料的蠕变本构模型参数。利用所建立的蠕变本构模型对两种 Ni₃Al 基材料的高温拉伸试件进行了有限元模拟,与试验结果吻合良好。这表明在晶体滑移理论基础上建立的本构模型是合理的,并且能够较好地描述 Ni₃Al 基单晶高温合金三个阶段的蠕变行为,具有一定的应用价值。

关 键 词: Ni₃Al 基单晶; 蠕变; 本构模型; 晶体滑移理论; ANSYS 二次开发

中图分类号: V252. 2; O344. 6 **文献标志码:** A

Creep constitutive model of Ni₃Al-based single crystal superalloy

WANG Rongqiao^{1,2,3}, ZHANG Bin¹, HU Dianyin^{1,2,3}

- (1. School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Beijing Key Laboratory of Aero-Engine Structure and Strength,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
3. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: Combined with the microscopic mechanism of the creep behavior of Ni₃Al-based single crystal superalloy, the creep constitutive model based on the crystal slip theory was established to describe the creep behavior of Ni₃Al-based single crystal superalloy. And the finite element implementation of the constitutive model established was conducted through the UPFs redevelopment platform provided by ANSYS. Using the creep test data, the model parameters of two kinds of Ni₃Al-based materials were obtained based on genetic algorithm. Using the creep constitutive model established, the finite element simulation of high temperature tensile specimens of two kinds of Ni₃Al-based materials was carried out, and the results had a good agreement with the test results. It shows that the creep constitutive model based on the crystal slip theory is reasonable and it can simulate three stages of

收稿日期:2016-09-11
基金项目:国家自然科学基金(51375031,51305012,51675024)
作者简介:王荣桥(1968—),男,教授、博士生导师,博士,主要从事发动机结构强度可靠性、多学科优化设计等研究。
通讯作者:胡殿印(1980—),女,教授,博士,主要从事发动机结构强度及疲劳可靠性研究。E-mail:hdy@buaa.edu.cn
引用格式:王荣桥,张斌,胡殿印. Ni₃Al 基单晶高温合金蠕变本构模型[J]. 航空动力学报,2018,33(3):657-662. WANG Rongqiao, ZHANG Bin, HU Dianyin. Creep constitutive model of Ni₃Al-based single crystal superalloy[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(3): 657-662.

creep behavior of Ni₃Al-based single crystal superalloy well. Therefore, it has a definite application value.

Key words: Ni₃Al-based single crystal; creep; constitutive model; crystal slip theory; redevelopment of ANSYS

Ni₃Al 基单晶高温合金具有优异的力学性能^[1],其比刚度高、屈服应力高、熔点高、抗氧化和抗蠕变能力强,非常有潜力应用于先进航空发动机高温部件。国内对 Ni₃Al 基材料的研究尚处于起步阶段,但是也取得了一定的成果,生产出了性能优异的 IC6、IC6A、IC10 以及 IC6SX 等 Ni₃Al 基高温合金。其中,IC6 已经成功应用于某型航空发动机涡轮导向器,是国内目前使用温度最高的涡轮导向器材料^[2];IC10 材料制成的涡轮导向器也已应用在正在进行地面面试车的某型航空发动机中^[3]。

Ni₃Al 基材料具有 Li₂ 型晶体结构,其晶体结构示意图如图 1 所示。该晶体结构由面心立方晶体结构衍生而来。Ni₃Al 基单晶高温合金主要以 γ' 相为主,其次还有 (γ' + γ) 两相组织以及 γ 相等。

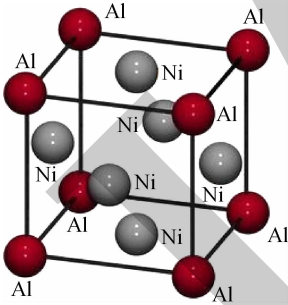


图 1 Ni₃Al 晶体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Ni₃Al crystal structure

航空发动机热端部件在服役中要长期承受接近熔点的热载荷以及数万牛顿离心力的作用,高温蠕变是其主要失效模式之一。现阶段镍基单晶高温合金是制造航空燃气轮机热端部件的主力,然而当前对该材料的使用已经接近其性能极限^[4]。Ni₃Al 基单晶高温合金是航空发动机热端部件的前景材料^[5],目前国内对 Ni₃Al 基单晶高温合金的研究内容多集中在成分对材料的影响^[6-7]、材料工艺^[8-10]、材料微观组织结构^[11-12]以及材料性能试验与分析^[13-17]等方面,而对描述 Ni₃Al 基单晶高温合金蠕变行为的本构模型研究比较少,不能支撑其在涡轮叶片上的应用。因此,对 Ni₃Al 基单晶高温合金的蠕变本构模型进行深

入研究,有着非常重要的理论和工程意义。

1 蠕变本构模型

1.1 本构模型的建立

Ni₃Al 基单晶高温合金蠕变曲线分为三个阶段,即减速蠕变阶段、稳态蠕变阶段以及加速蠕变阶段。细观上看,蠕变主要对应两个过程:第一个过程是位错在 Ni₃Al 基单晶高温合金的 γ 相内产生并演化的过程;第二个过程是位错不断切入 γ' 相导致 γ' 相的强化作用不断减弱以致材料失效的过程^[11]。两个细观过程分别对应减速蠕变阶段和加速蠕变阶段。稳态蠕变阶段的宏观表现是蠕变速率保持恒定,从细观上看,该过程实质上是一种动态平衡:一方面随着位错在 γ 相内不断增加,位错阻力增加,使得蠕变速率有降低的趋势;另一方面由于不断有位错切入 γ' 相中,弱化了 γ' 相的强化作用,使得蠕变速率有升高的趋势。

对于第一个细观过程,假设在 t 时刻 γ 相内可动位错数量为 N ,可动位错速率为

$$\frac{dN}{dt} = -N\alpha_1 \tag{1}$$

其中 α_1 为激活参数。

对式(1)积分可得 t 时刻 γ 相内可动位错量为

$$N = N_0 e^{-\alpha_1 t} \tag{2}$$

其中 N_0 为 γ 相内初始位错量。

进一步假设由于位错运动而导致的滑移系分切应变率 $\dot{\gamma}$ 正比于可动位错速率,则

$$\dot{\gamma}^{(a)} = A_1^{(a)} \alpha_1^{(a)} e^{-\alpha_1^{(a)} t} \tag{3}$$

其中 α 表示第 α 个滑移系, A_1 为材料参数,正比于 N_0 。

对于第二个细观过程,假设在 t 时刻切入 γ' 相中的可动位错速率为

$$\frac{dN}{dt} = N\beta_1 \tag{4}$$

其中 β_1 为切入参数。

对式(4)积分可得 t 时刻 γ' 相内可动位错量为

$$N = N'_0 e^{\beta_1 t} \tag{5}$$

其中 N'_0 为 γ' 相内初始位错量。

进一步假设由于位错运动而导致的滑移系分切应变率 $\dot{\gamma}$ 正比于切入 γ' 相中的可动位错速率, 则

$$\dot{\gamma}^{(a)} = B_1^{(a)} \beta_1^{(a)} e^{\beta_1^{(a)} t} \quad (6)$$

其中材料参数 B_1 正比于 N'_0 。

综合过程一和过程二可得滑移系分切应变率方程为

$$\dot{\gamma}^{(a)} = A_1^{(a)} \alpha_1^{(a)} e^{-\alpha_1^{(a)} t} + B_1^{(a)} \beta_1^{(a)} e^{\beta_1^{(a)} t} \quad (7)$$

式(7)与宏观 θ 映射模型^[18-19]表达式(8)有相同的结构形式:

$$\dot{\epsilon} = \theta_1 \theta_2^{-\theta_2 t} + \theta_3 \theta_4 e^{\theta_4 t} \quad (8)$$

其中 $\dot{\epsilon}$ 为蠕变速率, θ_i 为材料常数。

本文参照宏观 θ 映射模型中 θ_i 与应力和温度的关系, 建立描述 Ni₃Al 基单晶高温合金蠕变行为的模型参数 $A_1, \alpha_1, B_1, \beta_1$ 与应力和温度的关系如下:

$$\ln A_1^{(a)} = a_1^{(a)} + b_1^{(a)} \tau^{(a)} + c_1^{(a)} T + d_1^{(a)} \tau^{(a)} T \quad (9)$$

$$\ln \alpha_1^{(a)} = a_2^{(a)} + b_2^{(a)} \tau^{(a)} + c_2^{(a)} T + d_2^{(a)} \tau^{(a)} T \quad (10)$$

$$\ln B_1^{(a)} = a_3^{(a)} + b_3^{(a)} \tau^{(a)} + c_3^{(a)} T + d_3^{(a)} \tau^{(a)} T \quad (11)$$

$$\ln \beta_1^{(a)} = a_4^{(a)} + b_4^{(a)} \tau^{(a)} + c_4^{(a)} T + d_4^{(a)} \tau^{(a)} T \quad (12)$$

其中 a_i, b_i, c_i 和 d_i 为与材料相关的常数, $i=1, 2, 3, 4$; τ 为滑移系分切应力; T 为温度。

采用应力应变坐标变换法则以及取向因子 $P^{(a)}$ 建立各滑移系的力学参量与总体坐标系下的力学参量之间的联系, 并结合建立的各滑移系分切应变率方程, 按照图 2 所示的流程建立 Ni₃Al

基单晶高温合金滑移系上的蠕变本构模型。

1.2 材料参数的确定

研究发现对于 Li₂ 型晶体, 主要有 12 个八面体滑移系和 6 个六面体滑移系。当 $\langle 001 \rangle$ 方向受载荷作用时, 只有八面体滑移系启动^[20]。由于相同类型滑移系的开动机制相同, 因此材料参数相同。所以, 对 Ni₃Al 基单晶高温合金共有 32 个滑移系参数。

Hemker 等^[21]对一种 Ni₃Al 基单晶高温合金在 745 MPa 时不同温度下 $\langle 001 \rangle$ 取向的蠕变情况进行了研究。ZHANG Yun 等^[22]对一种定向凝固的 Ni₃Al 基高温合金在 1023 K 时不同应力下定向凝固方向的蠕变情况进行了研究。在只研究定向凝固 Ni₃Al 基高温材料的定向凝固方向上的力学行为时, 可以将定向凝固 Ni₃Al 基高温合金按正交各向异性材料进行处理^[20]。

蠕变试验获取的试验数据是宏观参量之间的关系, 而基于晶体滑移理论的蠕变本构模型所需要的是能够反映材料滑移系上各参量之间关系的材料参数。因此, 获取基于晶体滑移理论的本构模型参数的关键是建立各滑移系参量与宏观参量之间的关系。本文采用 Schmid 公式(即式(13)、式(14))建立晶体坐标系下应力分量 σ_{ij} 、应变分量 ϵ_{ij} 与滑移系上分切应力 τ 、分切应变 γ 之间的关系

$$\tau^{(a)} = S_i^{(a)} \sigma_{ij} \quad (13)$$

$$\gamma^{(a)} = \bar{S}_i^{(a)} \epsilon_{ij} \quad (14)$$

其中 $S_i^{(a)}$ 为 Schmid 系数因子, $\bar{S}_i^{(a)}$ 为 Schmid 变换系数。

在应力或温度一定的情况下, 式(9)~式(12)可以进一步简化为

$$\ln A_1^{(a)} = C_1^{(a)} + D_1^{(a)} X \quad (15)$$

$$\ln \alpha_1^{(a)} = C_2^{(a)} + D_2^{(a)} X \quad (16)$$

$$\ln B_1^{(a)} = C_3^{(a)} + D_3^{(a)} X \quad (17)$$

$$\ln \beta_1^{(a)} = C_4^{(a)} + D_4^{(a)} X \quad (18)$$

其中应力一定时, $X = T$, $C_i^{(a)} = a_i^{(a)} + b_i^{(a)} \tau^{(a)}$, $D_i^{(a)} = c_i^{(a)} + d_i^{(a)} \tau^{(a)}$; 温度一定时, $X = \tau^{(a)}$, $C_i^{(a)} = a_i^{(a)} + c_i^{(a)} T$, $D_i^{(a)} = b_i^{(a)} + d_i^{(a)} T$, $i=1, 2, 3, 4$ 。

在式(7)以及式(13)~式(18)的基础上结合遗传算法对文献[21]中 Ni₃Al 基单晶高温合金在 745 MPa 时不同温度下 $\langle 001 \rangle$ 取向的蠕变曲线以及文献[22]中定向凝固 Ni₃Al 基高温合金在 1023 K 时不同应力下定向凝固方向的蠕变曲线进行拟合, 获得的两种 Ni₃Al 基材料八面体滑移系下的 C_i 和 D_i 参数分别如表 1 和表 2 所示。

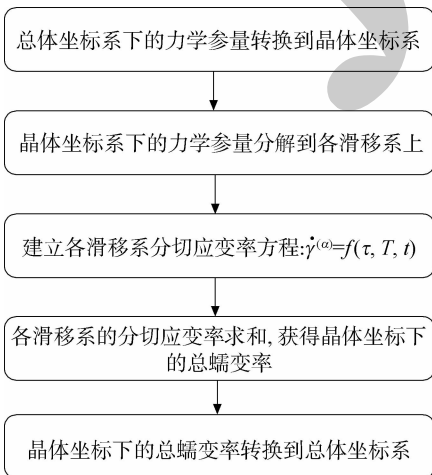


图 2 微观本构模型流程

Fig. 2 Flow chart of microscopic constitutive model

表 1 Ni_3Al 基单晶高温合金在 745 MPa、不同温度条件下八面体滑移系材料参数

Table 1 Material parameters of octahedral slide system of Ni_3Al -based single crystal superalloy under 745 MPa and different temperature conditions

参数	C_i	D_i
A_1	-58.11	0.056 6
α_1	59.46	0.067 0
B_1	114.24	-0.136 0
β_1	-67.49	0.071 0

表 2 Ni_3Al 基定向凝固高温合金在 1023 K、不同应力条件下八面体滑移系材料参数

Table 2 Material parameters of octahedral slide system of Ni_3Al -based directional solidification superalloy under 1023 K and different stress conditions

参数	C_i	D_i
A_1	-22.96	0.015 9
α_1	17.71	-0.017 9
B_1	-8.50	0.011 5
β_1	-9.83	0.023 7

2 本构模型的有限元实现

该蠕变模型通过 ANSYS 提供的 UPFs 二次开发平台编写 usermat 用户子程序实现。Usermat 用户子程序的基本任务有两个：一是完成应力更新；二是求解一致切线算子矩阵。本文采用显式时间积分算法进行编程，具体流程见图 3。

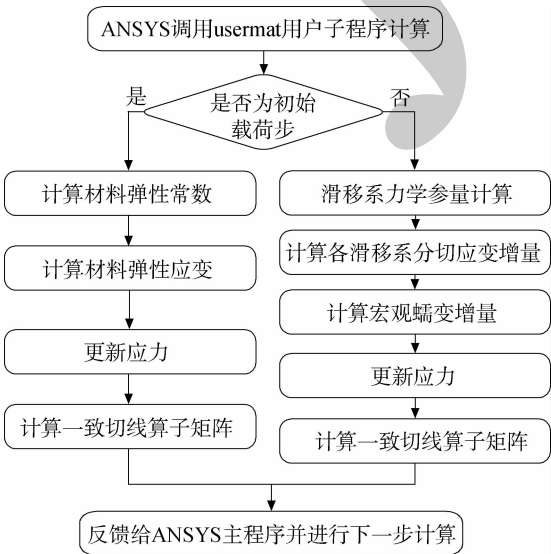


图 3 ANSYS 计算流程图

Fig. 3 Flow chart of calculation in ANSYS

计算过程中，首先在极短的时间内初始载荷线性增加，此时材料仅发生线弹性变形，之后载荷保持不变，材料在稳定载荷下发生蠕变。在每一步计算过程中，ANSYS 会调用 usermat 用户子程序，并向其提供前一步更新后的状态变量、应力等参量，状态变量、应力等参量以及一致切线算子矩阵的计算在 usermat 用户子程序中进行，之后返回给 ANSYS，进行下一步计算。

3 本构模型的算例验证

图 4 为某 Ni_3Al 基单晶高温合金蠕变试件，取其考核段的 1/8(图 4 中深色部分)建立图 5 所示的有限元模型。在有限元模型施加对称约束，设置初始温度为试验温度，在模型端面施加恒定面载荷，其中位移约束及应力边界条件如图 6 所示。

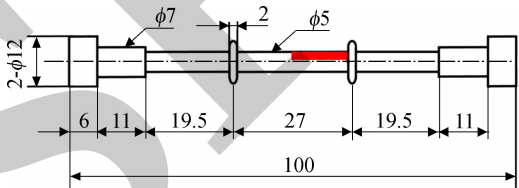


图 4 Ni_3Al 基单晶高温合金蠕变试样图^[5](单位:mm)
Fig. 4 Creep test sample of Ni_3Al -based single crystal superalloy^[5] (unit:mm)

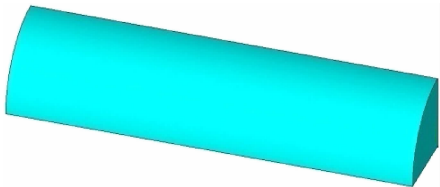


图 5 有限元模型
Fig. 5 Finite element model

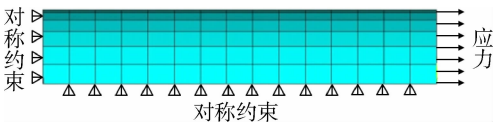


图 6 位移约束及应力边界条件
Fig. 6 Displacement constraint and stress boundary condition

将表 1 和表 2 中的材料参数代入基于晶体滑移理论的蠕变本构模型中，在 ANSYS 中利用“TB,USER”命令调用自编的 usermat 用户子程序对文献[21]中 Ni_3Al 基单晶高温合金在 745 MPa/903.15 K、745 MPa/916.15 K 和 745 MPa/

932.15 K 条件下〈001〉取向的蠕变情况以及文献[22]中 Ni₃Al 基定向凝固高温合金在 1023 K/450 MPa、1023 K/500 MPa 和 1023 K/525 MPa 条件下定向凝固方向的蠕变情况进行计算,两种材料的计算结果与试验结果的对比分别如图 7 和图 8 所示。

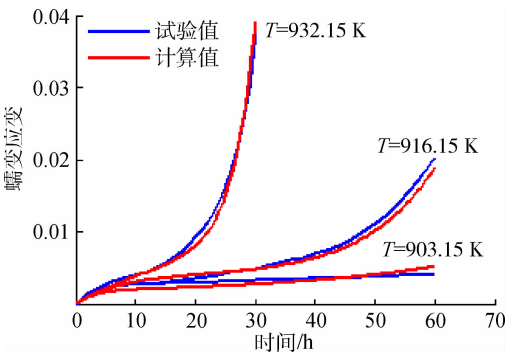


图 7 Ni₃Al 基单晶高温合金在 745 MPa、应力不同温度条件下〈001〉方向试验结果与计算结果对比图
Fig. 7 Comparison of test results and calculated results of Ni₃Al-based single crystal superalloy in 〈001〉 direction under stress 745 MPa and different temperature conditions

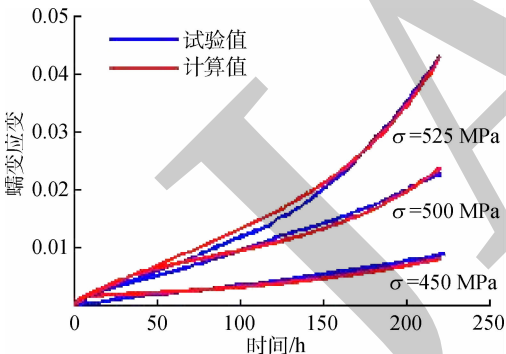


图 8 Ni₃Al 基定向凝固高温合金在 1023 K、不同应力条件下定向凝固方向试验结果与计算结果对比图
Fig. 8 Comparison of test results and calculated results of Ni₃Al-based directional solidification superalloy in directional solidification direction under 1023 K and different stress conditions

从图 7 和图 8 中可以看出,通过 ANSYS 计算得到的 Ni₃Al 基高温合金的蠕变数据与试验获得的蠕变数据整体符合较好,所建立的本构模型能够较好地模拟合金的蠕变行为,具有一定的应用价值。

4 结 论

本文针对 Ni₃Al 基单晶高温合金的蠕变问

题,发展了一种 Ni₃Al 基单晶高温合金的蠕变本构模型。具体结论如下:

- 1) 从 Ni₃Al 基单晶高温合金的蠕变机理出发,结合晶体滑移理论建立了 Ni₃Al 基单晶高温合金的蠕变本构模型。
- 2) 研究了本构模型的有限元解法,结合 ANSYS 软件中 UPFs 平台编写了 usermat 用户子程序,将本构模型植入 ANSYS 中。
- 3) 对文献[21]和文献[22]中 Ni₃Al 基高温合金的蠕变曲线进行了拟合,获取了两种材料八面体滑移系的材料参数。
- 4) 利用编写的 usermat 用户子程序,对单轴拉伸试件进行了有限元模拟计算,对比计算结果与试验结果发现所构建的本构模型对 Ni₃Al 基高温合金蠕变行为具有良好的描述效果,具有一定的理论价值和工程应用价值。

参考文献:

[1] 徐颂波. 新一代高温结构材料: 金属间化合物 Ni₃Al [J]. 上海有色金属, 1997, 18(2): 88-92.
XU Songbo. New generational high-temperature structure material: intermetallic compound Ni₃Al[J]. Shanghai Non-ferrous Metals, 1997, 18(2): 88-92. (in Chinese)

[2] 刘庆琼. Ni₃Al 基 IC6 高温合金工程应用研究[J]. 航空材料学报, 2003, 23(增刊 1): 209-214.
LIU Qingquan. Research on engineering application of Ni₃Al-base superalloy IC6[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003, 23(Suppl. 1): 209-214. (in Chinese)

[3] 赵希宏, 黄朝晖, 谭永宁, 等. 新型 Ni₃Al 基定向凝固高温合金 IC10[J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 20-24.
ZHAO Xihong, HUANG Zhaohui, TAN Yongning, et al. New Ni₃Al-based directionally-solidified superalloy IC10 [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26 (3): 20-24. (in Chinese)

[4] 董志国, 王鸣, 李晓欣, 等. 航空发动机涡轮叶片材料的应用与发展[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(增刊 2): 475-477.
DONG Zhiguo, WANG Ming, LI Xiaoxin, et al. Application and progress of materials for turbine blade of aero-engine[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 23 (Suppl. 2): 475-477. (in Chinese)

[5] 孔志刚. Ni₃Al 金属间化合物基单晶高温合金 IC6SX 组织和力学性能[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2007.
KONG Zhigang. Microstructure and mechanical properties of Ni₃Al intermetallic compound based IC6SX single crystal superalloy[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)

[6] CHENG Ai, LI Shusuo, LIANG Yunfei, et al. Influence of Mo and Ta additions on solidification behavior of Ni₃Al single crystal alloys[J]. Progress in Natural Science, 2015, 25(4): 353-360.

[7] LI Shusuo,XIE Xiaoying,JIANG Liwu,et al. Effects of Ru on microstructure stability and mechanical properties of Ni₃Al single crystal alloy[J]. Progress in Natural Science, 2011,21(4):286-292.

[8] 魏丽,张恒,李树索,等. 热处理对一种 Ni₃Al 基单晶合金组织的影响[J]. 稀有金属,2012,36(2):178-183.
WEI Li,ZHANG Heng,LI Shusuo. Influence of heat treatments on microstructure of single crystal Ni₃Al-base superalloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals,2012,36(2):178-183. (in Chinese)

[9] 吴松,侯金保,郎波. Ni₃Al 单晶高温合金过渡液相扩散焊工艺[J]. 焊接学报,2012,33(2):105-108.
WU Song,HOU Jinbao,LANG Bo. Transient liquid phase diffusion bonding processing of Ni₃Al single crystal superalloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012,33(2):105-108. (in Chinese)

[10] KONG Zhigang,JI Lei,LI Shusuo,et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties for a Ni₃Al base single crystal alloy DDIC6[J]. Materials Science Forum,2007,546/547/548/549:1443-1446.

[11] WU Yuxiao,ZHANG Heng,LI Fulin,et al. Kinetics and microstructural evolution during recrystallization of a Ni₃Al-based single crystal superalloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2012,22(9):2098-2105.

[12] 李亚楠,何迪,李树索,等. Ni₃Al 基单晶合金 IC6sx 的表面再结晶[J]. 金属学报,2008,44(4):391-396.
LI Yanan,HE Di,LI Shusuo,et al. Surface recrystallization in a Ni₃Al base single crystal alloy IC6sx[J]. Acta Metallurgica Sinica,2008,44(4):391-396. (in Chinese)

[13] 赵海根,李树索,裴延玲,等. Ni₃Al 基单晶合金 IC21 的微观组织及力学性能[J]. 金属学报,2015,51(10):1279-1287.
ZHAO Haigen,LI Shusuo,PEI Yanling,et al. Microstructure and mechanical properties of Ni₃Al-based single crystal alloy IC21[J]. Acta Metallurgica Sinica,2015,51(10):1279-1287. (in Chinese)

[14] LI Fulin,LI Shusuo,WU Yuxiao,et al. Thermal cycle fatigue behaviors of a single crystal Ni₃Al base alloy[J]. Procedia Engineering,2012,27:1141-1149.

[15] KONG Zhigang,HAN Yafang,LI Shusuo. Effect of anisotropy on microstructure and high temperature stress rupture properties of Ni₃Al base single crystal alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2006,16(Suppl. 3):1892-1896.

[16] KONG Zhigang,LI Shusuo. Effects of temperature and stress on the creep behavior of a Ni₃Al base single crystal alloy[J]. Progress in Natural Science,2013,23(2):205-210.

[17] JIANG Liwu,LI Shusuo,WU Meiling. Investigation on creep mechanism of a Ni₃Al-based single crystal superalloy IC6SX under 760℃/540 MPa[J]. Materials Science Forum,2013,747/748:804-809.

[18] WILSHIRE B,OWEN D R J. Recent advance in creep and fracture of engineering materials and structures [M]. Swansea,UK:Pineridge Press,1982.

[19] EVANS R W,WILSHIRE B. Creep of metals and alloys [M]. London:the Institute of Metals,1985.

[20] 张宏建. IC10 合金的力学性能试验及本构模型研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2009.
ZHANG Hongjian. Research on the mechanical properties and constitutive equations of alloy IC10[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2009. (in Chinese)

[21] HEMKER K J,MILLS M J,NIX W D. An investigation of the mechanisms that control intermediate temperature creep of Ni₃Al [J]. Acta Metallurgica et Materialia,1991,39(8):1901-1913.

[22] ZHANG Yun,LIN Dongliang. Creep behavior of a directionally solidified Ni₃Al alloy[C]//Proceedings of the 3rd Biennial Meeting of Chemical Perspectives of Microelectronic Materials. Boston,US:Materials Research Society,1993:611-616.

(编辑:陈 越)