

[011]取向镍基单晶合金高温蠕变期间 γ' 相定向粗化行为研究

水 丽^{1,2,3}, 金 涛², 田素贵³, 胡壮麒²

(1. 沈阳理工大学, 辽宁 沈阳 110168)

(2. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016)

(3. 沈阳工业大学, 辽宁 沈阳 110023)

摘 要: 研究了 980 °C, 200 MPa 拉伸蠕变期间[011]取向镍基单晶合金中 γ' 相的演化方式。采用有限元方法计算了单晶合金在有/无外加载荷时 Von Mises 应力及弹性应变能密度在 γ 和 γ' 两相中的分布。结果表明: 沿[011]取向施加拉伸应力时, 与应力轴呈 45°角基体通道(roof)的 Von Mises 应力远高于与应力轴平行的基体通道(gable)中的 Von Mises 应力, 两通道中应变能密度的差异驱动 γ' 相形成元素从变形较大的通道向变形较小的通道扩散, 而 γ 相形成元素反向扩散, 导致 γ' 相沿[010]和[100]取向扩散生长, 形成垂直于[001]方向且与应力轴倾斜成 45°角的层片状筏形组织。

关键词: 镍基单晶合金; 有限元分析; 组织演化; 蠕变

中图分类号: TG 132. 3⁺²

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)05-0826-04

在镍基单晶合金的应用研究中, 合金的化学成分、组织结构对力学性能有重要影响, 同时单晶合金的蠕变行为具有明显的取向依赖性。因此, 单晶合金蠕变行为的各向异性得到众多研究者的重视。彭志方等^[1]从 γ 和 γ' 相形态演变的角度对 CMSX-4 合金的各向异性行为进行了研究, 结果发现, 合金晶体取向的变化对高温蠕变期间 γ' 相的形貌演化产生明显的影响。Pearson^[2]等指出: 具有<112>取向的单晶合金, 在拉伸蠕变过程中形成与拉伸应力轴成 35°角的特殊 γ' 相筏形组织; 而 Shah^[3]的研究表明, 对<111>取向的单晶合金, 无论是拉伸或压缩蠕变, 都不会改变 γ' 相的形貌。Voelkl 等^[4]根据动态回复蠕变和 γ/γ' 相界面迁移的机制计算了 3 种取向合金的蠕变曲线, 将 γ 和 γ' 相特征尺寸的变化与蠕变速率及持久寿命相联系, 建立了一个综合评价蠕变强度各向异性的模型。

对于[001]取向单晶合金在高温拉伸蠕变期间 γ' 相的粗化取向, 已经过广泛深入的研究^[5,6], 并且被大量的实验所证实, 但[011]取向单晶合金在拉应力作用下, γ' 相的粗化行为的文献报道较少。据此, 本研究采用 FEM 计算, 讨论了[011]取向单晶合金在高温低应力条件下高温蠕变期间 γ' 相的组织演化行为。

1 实 验

采用螺旋选晶法, 在真空定向凝固炉中, 以高温梯度制取平板状的[001]取向单晶镍基合金, 其化学成分(质量分数, %下同)为: Al5.47, Ti2.14, Cr8.39, Ta2.92, W-9.47, Co5.01, C0.014, Ni 余量。选用的热处理制度为: 1300 °C, 4 h AC+1100 °C, 4 h AC+870 °C, 16 h, AC。经完全热处理后, 试样用 Laue 背散射法确定晶体取向, 用线切割切取轴向为[001]和[011]取向的拉伸蠕变样品, 切取样品晶体取向的偏差在 4°以内。

在 980 °C, 200 MPa 条件下进行单轴恒载拉伸蠕变测试。将一部分试样分别在不同时间终止试验, 带载冷却至室温, 沿平行于[011]取向切取金相试样, 利用 SEM 进行组织形貌观察, 了解[011]取向单晶合金中 γ' 相在蠕变期间的组织演化特征, 并测算 γ' 相筏化组织与拉伸应力轴的角度。

2 结果与分析

2.1 [011]取向单晶合金的组织形貌

图 1 为单晶合金(011)横截面的铸态及热处理态的组织形貌。可以看出, 在合金的枝晶间区域存在着大量的共晶组织(见图 1a), 枝晶间的 γ' 相尺寸较大, 且不规则(见图 1b)。热处理后的 γ' 相排列规则(见图 1c), 在(011)横截面, γ' 相沿[001]和[010]方向排列, γ' 相为正方体形态。

收稿日期: 2008-06-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50171045)

作者简介: 水 丽, 女, 1963 年生, 博士, 沈阳理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110168, 电话: 024-24680841

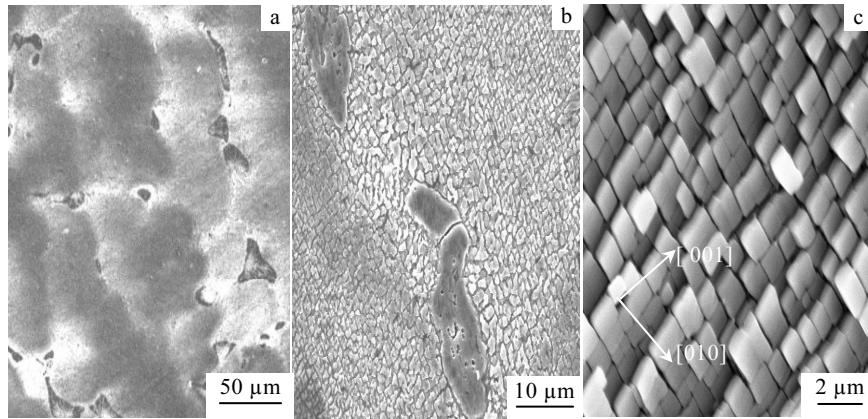


图 1 [011]取向单晶合金横截面的铸态组织及热处理后 γ' 相的形貌

Fig.1 Microstructure of as-cast and as heat treatment for the single crystal alloy: (a, b) [011] cross-section and (c) morphology of γ' phase after standard heat treatment

2.2 [011]取向单晶合金在拉伸蠕变期间的组织演化

图 2 为[011]取向单晶合金在 980 °C, 200 MPa 条件下蠕变不同时间后的组织形貌。试样的施加应力方向为[011]取向, 观察面为(100)晶面。可见, 蠕变前, 立方 γ' 相沿[010]和[001]取向规则排列(图 2a); 蠕变 10 h 后, γ' 相形态已经发生变化, 立方体的棱角已局部溶解, γ' 相沿[010]取向逐渐相互连接, 沿[001]取向也有部分连接(图 2b); 蠕变 35 h 后, 大部分 γ' 相沿[010]取向已经形成连续的筏状组织, 但在局部区域仍能观察到有少量 γ' 相沿[001]取向排列(图 2c); 蠕变 100 h 后, γ' 相形态保持稳定, 形成与[011]应力轴方向约 45°角的筏状结构(图 2d)。

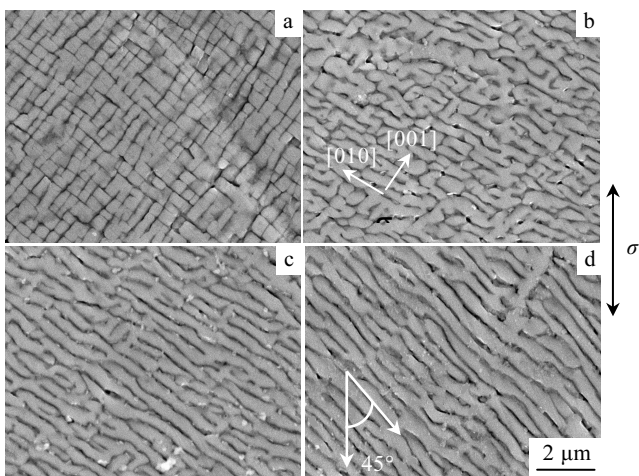


图 2 [011]取向单晶合金经蠕变不同时间后的组织形貌

Fig.2 Morphologies of γ' precipitates in [011] orientation: (a) 0 h, (b) 10 h, (c) 35 h, and (d) 100 h

2.3 γ' 相定向粗化的有限元分析

有限元分析中使用的刚度系数为(单位: 10^{11} Pa): $c_{11}^{\gamma'}=2.02$, $c_{12}^{\gamma'}=1.39$, $c_{44}^{\gamma'}=0.95$, $c_{11}^{\gamma''}=1.79$, $c_{12}^{\gamma''}=1.2$, $c_{44}^{\gamma''}=0.88$ 。研究所用的合金在室温下的 γ/γ' 两相晶格点阵错配度 $\delta_{RT}=-0.15\%$ 。根据 γ 、 γ' 两相的膨胀系数, 估算出在 980 °C 下, 合金中两相的错配度为 $\delta=-0.4\%$ 。由于 γ/γ' 两相结构的立方对称性, 有限元计算仅考虑 1/8 颗粒与其相邻的基体, 当应力轴沿[011]取向时, 将基体通道分为两类: 一类与载荷方向平行, 称为 gable 通道, 另一类通道与载荷方向成 45°夹角, 称为 roof 通道。图 3a、3b 分别为无外加应力和施加 200 MPa 拉应力条件下, Von Mises 应力在 γ 和 γ' 两相中的分布。由图 3a 可以看出, Von Mises 应力在 roof 通道和 gable 通道内的分布具有明显的对称特征。当沿[011]取向施加 200 MPa 的拉应力时, roof 和 gable 通道中的 Von Mises 应力发生明显的变化, 在 roof 通道中 Von Mises 应力的最大值由 300 增加到 584 MPa, 而 gable 通道中 Von Mises 应力的最大值由 300 提高至 458 MPa。图 4a、4b 分别为无外加应力和施加 200 MPa 拉应力条件下, 弹性应变能密度在 γ 和 γ' 两相中的分布特征。可见, 在无外加应力条件下, 应变能密度在 roof 和 gable 通道中的分布完全相同; 当施加拉伸应力后, 导致 roof 和 gable 通道中的应变能密度发生明显的变化。从图中可以看出, 应变能密度变化趋势与 Von Mises 应力在两类基体通道中的变化趋势相同, 这种应力分布的变化将使 roof 基体通道中发生塑性变形。

2.4 γ' 相粗化机理讨论

在实验的温度和应力范围内, 合金在蠕变初期的变形特征是位错在 γ 基体通道的八面体滑移系中运

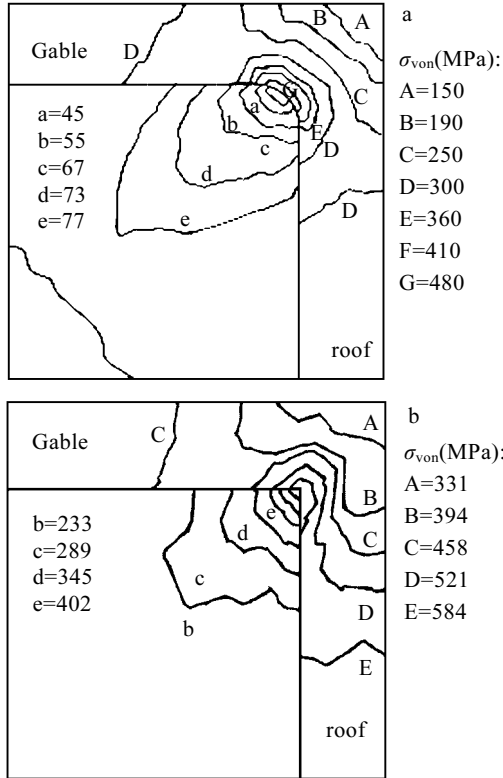


图 3 不同基体通道中的 Von Mises 应力分布

Fig.3 Von Mises stress distribution in different matrix channels: (a) Von Mises stress distribution in stress-free state and (b) Von Mises stress distribution of [011] orientation under 200 MPa

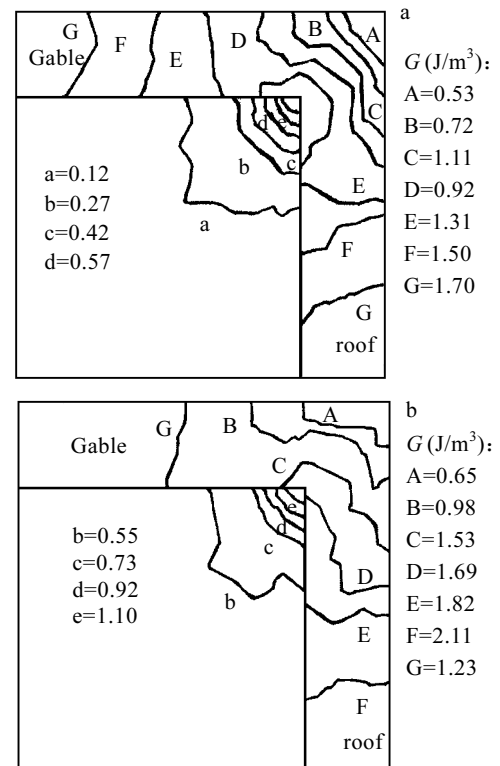


图 4 不同基体通道中的应变能密度分布

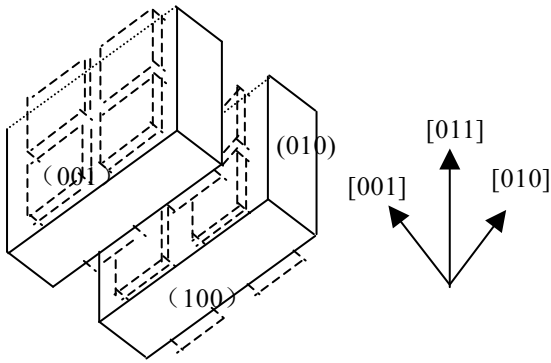
Fig.4 Elastic strain energy density distribution in different matrix channels: (a) Strain energy density distribution in stress-free state (b) Strain energy density distribution of [011] orientation under 200 MPa

动，而 γ' 相中无位错^[7,8]。因此，可以认为粘滞性塑性流变发生在 γ 基体， γ' 相仅发生弹性应变。分析认为：在 roof 基体通道中有较高的 Von Mises 应力，因此形变位错主要在该通道中运动^[9]。随蠕变的进行，位错在该通道中的密度增加，随位错密度的增加，元素定向按管道扩散的几率增加，促使 γ' 相发生组织演化。同时，在该区域内应变能密度增大。如果认为应变能密度的变化 $[G]$ 是合金元素扩散的驱动力，则元素的扩散通量可以表示为^[10]

$$J_M = - \frac{D_M \times \Delta X_M [G]}{L} \quad (1)$$

式中， G 为应变能密度， D_M 为元素的扩散系数， L 为扩散距离， $\Delta X_M = X_M^{\gamma'} - X_M^{\gamma}$ ，其中， X_M^{γ} 和 $X_M^{\gamma'}$ 分别是合金元素 M 在 γ 和 γ' 两相中的平衡摩尔分数。由式(1)可知，由于 roof 通道中应变能密度变化较大，此通道中合金元素的扩散速率相对较快，此外由于在 roof 通道中首先形成界面位错，使共格错配应力得到松弛，使 roof 通道中 γ 相形成元素 Cr、W、Co 等的化学势

降低^[6]，从而促使其从 gable 通道向 roof 通道扩散，而 Al、Ta 等 γ' 相形成元素则从 roof 通道向 gable 通道扩散，导致 γ' 相沿 [100] 取向扩散生长为筏形组织。事实上，实际 [011] 晶体取向与应力轴方向存在微小偏差，这种偏差，导致合金中 [001] 和 [010] 取向的应力分量并不对称，同时使 [001] 与 [010] 两通道中 Von Mises 应力及应变能密度的分布发生变化。可以认为：两通道中的应变能密度差可作为驱动力，促使元素在 [001] 与 [010] roof 通道中也发生元素的互扩散。这样， γ' 相的筏形化方向存在 2 种可能，如果 [001] 取向的应力分量大于 [010] 取向的应力分量，即 $\sigma_{001} > \sigma_{010}$ ，则 γ' 相将沿 [100] 和 [010] 取向形成筏状；如果 $\sigma_{001} < \sigma_{010}$ ，则 γ' 相将沿 [100] 和 [001] 取向形成筏状组织。结合 SEM 形貌观察，画出 [011] 取向合金中 γ' 相由立方体形态转变为片层形态的演变示意图，如图 5 所示。可见， γ' 相沿 [010] 和 [100] 方向扩展形成层片状筏形组织，片层的法线方向为 [001]，与 [011] 应力轴方向约为 45° 角。

图5 [011]取向单晶合金中 γ' 相组织演化示意图Fig.5 Evolution models of γ and γ' in [011] oriented specimens

3 结 论

1) 在 980 °C, 200 MPa 拉伸蠕变期间, [011]取向单晶合金中, γ' 相沿[010]和[100]取向扩散生长, 形成垂直于[001]方向且与应力轴倾斜成 45°角的层片状筏形组织。

2) 当沿[011]取向施加拉伸应力时, roof 通道的 Von Mises 应力远高于 gable 通道, 使塑性变形集中于 roof 通道, 两通道中应变能密度的变化, 驱动 γ' 相形成元素从塑性变形较大的通道向塑性变形较小的通道

扩散, 而 γ 相形成元素则发生相反方向的扩散, 导致 roof 通道拓宽, gable 通道逐渐减小, 促使 γ' 相沿应力轴成 45°角形成层片状筏形组织。

参考文献 References

- [1] Peng Zhifang(彭志方), Yan yanhui(严演辉). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 1997, 33(12): 1147
- [2] Pearson D D, Lemkey F D, Kear B H. *Superalloys* 1984[C].[s.n.]: TMS-AIME Metal Park, 1984: 513
- [3] Shah D M. *Scripta Metall Mater*[J], 1983, 17: 997
- [4] Voelkl R, Glatzel U, Feller-Kniepmeier M. *Scripta Metall Mater*[J], 1994, 31: 1481
- [5] Tien J K, Copley S M. *Metall Mater Trans*[J], 1971, A2: 326
- [6] Zhou Li(周 丽), Li Shouxin(李守新). *Z Metallkd*[J], 2002(4): 315
- [7] Tian (田素贵), Chen Changrong(陈昌荣), Yang Hongcai(杨洪才) *et al. Acta Metallurgica Sinica* (金属学报)[J], 2000, 36(3): 465
- [8] Tian Sugui (田素贵), Zhou Huihua(周惠华), Zhang Jinghua(张静华) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 1998, 34(12): 1261
- [9] Müller L, Glatzel U, Feller-Kniepmeier M. *Acta Metall Mater*[J], 1992, 40: 1321
- [10] Pollock T M, Argon A S. *Acta Metall Mater*[J], 1994, 42: 1859

Phase Morphology Evolution of a Single Crystal Nickel-Base Superalloy in the [011] Direction During the Tensile Creep

Shui Li^{1,2,3}, Jin Tao², Tian Sugui³, Hu Zhuangqi²

(1. Shenyang Institute of Technology, Shenyang 110168, China)

(2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

(3. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China)

Abstract: By means of finite elements analysis, an investigation has been made for the directional coarsening manners and evolutionary rule of γ' precipitates in a single crystal nickel-base superalloy with [011] orientation during tensile creep at 980 °C and 200 MPa. Results show that the von Mises stress in the matrix channel that is 45° with respect to the loading direction is larger than that in the matrix channel that is parallel to the loading direction when external loads applied along the [011] direction. The strain energy change in two kinds of matrix channel is the driving force for the γ' directional coarsening, the γ' phase developed along the [010] and [100] and perpendicular to the [001] orientations, and formed lamellar raft morphology inclined 45° angle to the tensile stress axis.

Key words: single crystal nickel base superalloy; finite element analysis; microstructural evolution; creep

Biography: Shui Li, Ph.D., School of Materials Science and Engineering, Shenyang Institute of Technology, Shenyang 110168, P. R. China,

Tel: 0086-24-24680841