

镍基单晶高温合金的反相畴界强化

中国科学院金属研究所 张静华 张志亚 李英敖 管恒荣 胡壮麒

本项研究表明,在一种抗热腐蚀 DD8 单晶高温合金中,观察到反相畴界存在三种形成机制:一种是 γ' 相内局部有序化原子产生错排;第二种是基体 $1/2\langle 110 \rangle$ 位错切入 γ' 相;第三种是基体位错网诱发。经推导得到如下反相畴界能对单晶合金强度贡献的表达式: $\tau = \frac{KS^3}{b^2a^3} \left(\frac{T_c^3 f r_s}{G} \right)^{1/2}$

关键词:单晶高温合金,反相畴界

Misfit and Antiphase Boundary Strengthenings of a Single Crystal Nickel Base Superalloy

Zhang Jinghua Zhang Zhiya Li Yingao Guan Hengrong Hu Zhuangqi
(Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang)

The antiphase boundaries (APB) formed in the ordered γ' phases is a dominant strengthen mode. There are three types of mechanisms for formation of the antiphase boundary to be found in the alloy: One is the mismatch arrangement for the order atoms in a local area, the second is dislocations with $1/2\langle 110 \rangle$ cut into the γ' phases, the last one is induction by the dislocation network in the matrix. The contribution of the antiphase boundary energy to the strength of the alloy is given by:

$$\tau = \frac{KS^3}{b^2a^3} \left(\frac{T_c^3 f r_s}{G} \right)^{1/2}$$

where τ is the resistance force to deformation provided by the APB energy, S the long-range ordered degrees, T_c the transition temperature from the ordered to disordered structures in the γ' phase, f the volume fraction of the γ' phase in the alloy, r_s the radius of the γ' particles, G the shear modulus, K the proportion constant.

Keywords: single crystal superalloy, Misfit antiphase boundary

1 引言

γ' 相对镍基高温合金的强化一般称作沉淀强化,其强化作用包括 γ' 相和基体之间的界面强化和 γ' 相的有序强化。人们在设计镍基高温合金成分时,总是力图得到高体积百分数 γ' 相,然而当 γ' 相在合金中接近 100% 时,蠕变强度很低。Pollock^[1] 做过试验,由 γ' 相强化的镍基合金的蠕变强度比单一的 γ' 材料和单一的 γ 固溶体材料高出一个数量级,这结果证明有序 γ' 颗粒沉淀强化的神奇效果。 γ' 相的体积百分数、 γ' 相的尺寸大小及其与基体的错配度是强化的重要参数。然而到目前为止,这些参数与合金强度的关系并没有成熟的理论,因为这一关系太复杂,不可能存在唯一的一种模型适用于各种性能和全部的镍基合金。本文研究一种材料工程

高铬型镍基单晶合金 (DD8) γ' 相和反相畴界 (APB) 强化,探索反相畴界能、 γ' 相尺寸和体积百分数与强度的表达式。

2 实验方法

采用选晶的方法制取 DD8 单晶试棒,在自行设计的定向凝固炉拉制成单晶,试棒的尺寸为 $\phi 16\text{mm} \times 70\text{mm}$,试棒经 $1100^\circ\text{C}/8\text{h AC} + 1240^\circ\text{C}/4\text{h AC} + 1090^\circ\text{C}/2\text{h AC} + 850^\circ\text{C}/24\text{h AC}$ 热处理,单晶合金试样的分析成分为 (wt%): 15.85Cr, 8.40Co, 5.85W, 3.91Al, 3.98Ti, 1.03Ta, 余量 Ni。经过热处理的 DD8 单晶试样,进行高温拉伸、蠕变、疲劳等力学性能实验,应力轴平行单晶的生长方向 $[001]$ 。采用装有双倾台的

透射电镜观察分析试样的位错组态和反相畴界性质。

3 实验结果和讨论分析

3.1 DD8 单晶高温合金的位错、反相畴界组态

DD8 单晶高温合金在热处理过程中, 初生 γ' 相完全溶解, 析出均匀立方形 γ' , 平均尺寸为 250nm, 几乎观察不到位错^[2]。经蠕变变形后, 形成一系列位错和反

相畴界组态 (照片略), 蠕变变形的位错组态表明: 在高温应力作用下, 单晶合金的变形首先在 γ 基体中发生, 由于 γ' 有序结构对变形的阻碍, 使得大量位错缠结在 γ' 相表面而不能通过, 在较大的形变量, γ' 相将以反相畴界的方式发生变形。在高周疲劳实验中观察到基体位错切入 γ' 形成反相畴界和基体位错网诱发反相畴界的变形机制。

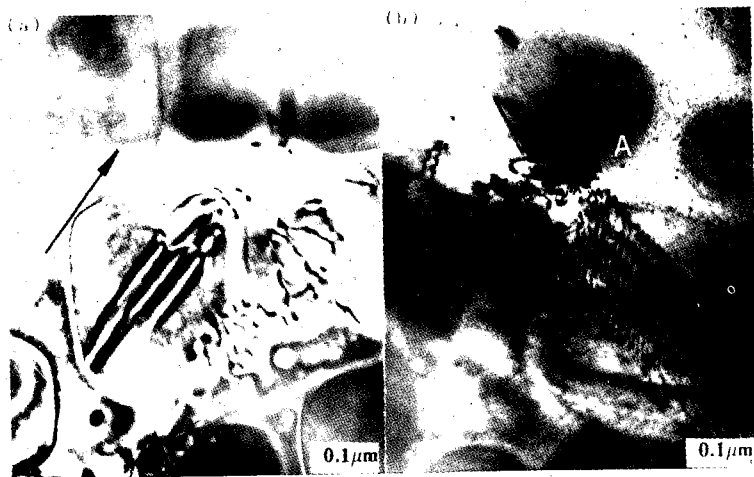


图1 循环 1.5×10^7 周次试样中基体位错切入并通过 γ' , 在 γ' 内留下反相畴界 (a) 和基体位错网诱发 γ' 内生成反相畴界 (b)

图 1a 左下部基体存在一局部应变区, 发射两列位错, 其中一列通过 γ' 相 (图中箭头指示位错运动方向), 在 γ' 相内留下反相畴界。图 1b 是基体中一排规则位错网运动到 “A” 处受阻于 γ' 相, 从而在 “A” 处 γ' 中诱发产生了反相畴界。

为进一步研究 γ' 相有序结构的变形特点, 采用高温 (1180°C) 时效, 使 γ' 相长大, 在本实验中, γ' 相达到 1200nm, 然后在 850°C 做拉伸实验。发现大 γ' 相与正常 γ' 相 (250nm) 的位错组态有很大不同, 见图 2。大 γ' 表面布满高密度位错网, 内部出现许多超点阵位错对和反相畴界, 在图 2 的 γ' 内, 超点阵位错对以 “S” 标出, 反相畴界以 “A” 标出, 超点阵位错对的 Burgers 矢量和反相畴的位移矢量是 $1/2\langle 110 \rangle$ 。

从以上的观察分析可以得到, γ' 相中的反相畴界有三种形成方式, 一种为 γ' 相内的局部应变作用, 使有序化原子产生错排, 见图 3a。T, T 是超点阵位错对, 它们之间由反相畴界连接。图 2 中 S 就是这种形成方式。第二种形成方式是基体 $1/2\langle 110 \rangle$ 位错穿过界面切入 γ' 相, 见图 3b, 当位错 “1” 切入 γ' 时 (界面上同时生成位错 “2”), 在界面与位错 “1” 之间生成反相畴



图2 在 850°C 拉伸试样中, 大 γ' 内的超点阵位错对和反相畴界

界, 见图 3b I, 当位错 “2” 切入 γ' 时, 在它扫过的区域消除了反相畴界, 见图 3b II, 于是在位错 “1” 和 “2” 之间留存了一块反相畴界, 图 1a 和图 2aA 的反相畴界属于这种形成机制。第三种形成方式便是基体位错网诱发 γ' 内产生反相畴界 (图 1b), 这种基体位错网

中位错的 Burgers 矢量是 $1/2\langle 110 \rangle$ [3]。

以上实验结果证明：单晶合金中 γ' 相强化合金的主要标志是，变形过程中 γ' 有序结构对位错运动的阻碍作用和 γ' 中反相畴界的形成。

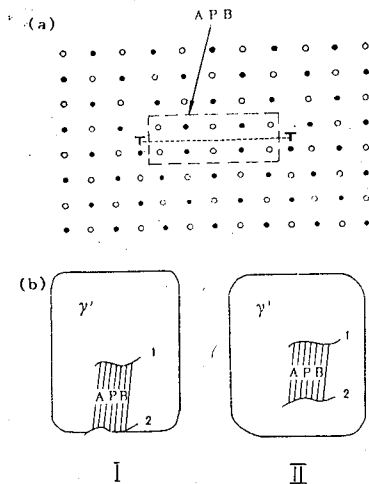


图3 γ' 内有序化原子错排产生反相畴界 (a) 和基体位错切入 γ' 产生反相畴界 (b)

3. 2 DD8 单晶高温合金的反相畴界强化

镍基高温合金中 γ' 相的分子式是 $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ ，其有序结构的特点是每一个原子的周围都是与其不同的原子，见图 3a，这种原子排列方式，系统的能量水平最低。在应力和/或热激活作用下，有序 γ' 相产生位错的原理也如图 3a 所示，位错将成对存在，其间是反相畴界，反相畴界的形成过程也是系统能量水平的增高过程，所增加的能量就是反相畴界能。在一般情况下，基体位错切入有序 γ' 相需克服两种能量： γ 与 γ' 的界面能和反相畴界能。但是在 DD8 单晶合金，以前的工作已经证明 [4]： γ 与 γ' 之间的错配应变强化不是主导的强化因素，因此将界面能做忽略处理。在这种情况下，问题就变得简单了。

根据 Ham 理论 [5]，一根位错切割有序 γ' 颗粒，作用在位错上的外力 (τ) 所做功 (τb) 应与反相畴界能 ($\frac{2r_s\gamma_0}{L}$) 相平衡 (忽略界面能)：

$$\tau b = \frac{2r_s\gamma_0}{L} \quad (1)$$

在此 b 为滑移矢量， r_s 为将被切割的有序 γ' 颗粒的半径， L 为位错线方向上有序颗粒间距， γ_0 为比反相畴界能。一般采 Friedel 表达式 [6]：

$$L' = \left(\frac{2\pi T^2}{\tau b} \right)^{1/3} \quad (2)$$

(2) 式中 T 为位错线张力， L 为颗粒方格子间距。有序

颗粒的体积分数 f 可由下式给出：

$$f = \frac{\pi r_s^2}{L^2} \quad (3)$$

将 (3) 式代入 (2) 式，若只考虑近程应力场，位错线张力可取： $T = 1/2Gb^2$ ，于是解 (1) 式得到：

$$\tau = \frac{2\gamma_0^{3/2}}{b^2} \left(\frac{2r_s}{\pi G} \right)^{1/2} \quad (4)$$

式中 G 为切变模量， τ 是位错切割有序 γ' 相所需外加应力，也是反相畴界能为单晶合金提供的变形阻力。 γ' 中处在 $\{111\}$ 面上的反相畴界能表达式为 [7]：

$$\gamma_0 = \frac{1.41kT_0S^2}{a^2} \quad (5)$$

式中 K 为 Boltzmann 常数， T_0 为 γ' 相有序无序转变温度， S 是长程有序度， a 是晶格常数，将 (5) 式代入 (4) 式得：

$$\tau = \frac{KS^3}{b^2a^3} \left(\frac{T_0^2r_s}{G} \right)^{1/2} \quad (6)$$

(6) 式便是反相畴界能对单晶合金强度贡献的粗略表达式，式中 K 是常数， G 是与 γ' 相固溶强化有关的物理量。(6) 式中涉及的材料参量都是可测物理量，可由该式的结果直接对比不同单晶合金的反相畴界强化效果，直接指导单晶合金成分设计。

4 结论

(1) 观察到单晶合金中反相畴界存在三种形成机制： γ' 内有序化原子错排；基体位错切入 γ' 和基体位错网诱发。

(2) 反相畴界是 DD8 单晶合金的主要强化形式，反相畴界能为单晶合金提供的变形阻力的表达式为：

$$\tau = \frac{KS^3}{b^2a^3} \left(\frac{T_0^2r_s}{G} \right)^{1/2}$$

参考文献

1. T. M. Pollock and A. S. Argon, Superalloys 1988, Ed. by S. Reichman, D. N. Duhl et al. Proc. of the Sixth Int. Symp. on Superalloy, TMS-AIME, (1988) 285
2. Zhang Jinghua, Tang Yajun, Hu Zhuangqi et al. Materials Science Progress, Vol. 4, 1990, 392 (in chinese)
3. J. H. Zhang, Z. Q. Hu, Y. B. Xu and Z. G. Wang: Metall. Trans. Vol. 23A, 1992, pp. 1253-58.
4. 张静华, 唐亚俊, 张志亚, 李英敖, 胡壮麒等, 材料科学进展 Vol. 4 (1990) 392
5. R. K. Ham, Ordered Alloys: Structural Applications and Physical Metallurgy, Claitors, Baton Rouge, Louisiana, (1970) 365
6. J. Friedel, "Dislocations", Pergamon Press, Oxford, 1964
7. 蔡玉林, 郑运荣, 高温合金的金相研究, 国防工业出版社, (1986) 8