

变形体体积不变的位错链长 分布参数式及应用*

王勃生 孙福玉 高振英 沈 淙

(冶金工业部钢铁研究总院, 北京 100081)

摘 要 在本文作者导出的单位体积内位错链长统计分布公式及运动位错密度分量表达式基础上, 考虑到位错链长统计分布理论中一定长度以内的不可动位错链组成三维位错网络, 获得的变形体体积不变的位错链长统计分布参数表达式为

$$\rho l_{\lambda}^2 [2 - (2 + 2w + w^2)\exp(-w)] = k$$

式中, $w = l_c^2 / l_{\lambda}^2$. 也可将运动位错密度 ρ_m 与网络不可动位错密度 ρ_n 的关系表达为

$$2\rho_n = \frac{k}{l_{\lambda}^2} + \frac{w^2}{1+w} \rho_m$$

Al-1%Mg 的位错动态电镜观察结果表明, 该两式计算结果能够反映变形过程中位错链长统计分布的变化情况.

关键词 位错链长分布, 位错参数, 变形微观理论

金属材料的变形行为是和材料内部位错群体的性质及运动变化密切相关的, 这种位错群体是各种长度位错的集合. 当采用 Frank 位错源等概念解释位错增殖、运动等动力学问题时, 理论上亦需知道材料中一定长度的位错线的数量. 通过对这种位错群体长度分布函数、分布参数、运动学等方面变化规律的研究, 可以更完整、更实际地描述金属在变形过程中微观结构的变化^[1-4]. 本文对变形体体积不变的位错链长分布参数表达式及其应用进行了初步探讨.

1 变形体体积不变表达式

在位错链长统计分布研究中, 一般定义单位体积内长为 l 到 $l+dl$ 的位错链数目为 $\varphi(l)dl$, 则单位体积内位错链总数目 N 可表示为^[2-4]

$$N = \int_0^{\infty} \varphi(l)dl \quad (1)$$

* 国家自然科学基金资助项目 5880029

收到初稿日期: 1996-11-19, 收到修改稿日期: 1997-05-26

本文通讯联系人: 王勃生, 教授, 北京(100081)冶金工业部钢铁研究总院

根据位错弓出长大及作用在位错上的力的概念,在位错链长统计分布理论中通常设定存在一临界位错链长 l_c ,在一定变形应力作用下,当晶内某一位错链长度 l 大于该临界长度 l_c 时,可以滑移运动,称为运动位错或自由位错.反之则为不可动位错,后者被认为在变形过程中构成基本位错网络,也称网络位错,稳定变形的亚结构即是由大小尺寸不一的位错网络组成.单位体积内运动位错数目 N_m 及运动位错密度 ρ_m 的关系为

$$\rho_m = N_m \bar{l}_m = \int_{l_c}^{\infty} l \varphi(l) dl \quad (2)$$

网络位错数目 N_n 及网络位错密度 ρ_n 的关系为

$$\rho_n = N_n \bar{l}_n = \int_0^{l_c} l \varphi(l) dl \quad (3)$$

在位错链各向空间分布几率相等条件下,本文作者推导出经半无限区域归一化处理的单位体积位错链长统计分布函数式为^[5]

$$\varphi(l) dl = 2\rho l_\lambda^{-4} l^2 \exp\left(-\frac{l^2}{l_\lambda^2}\right) dl \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)并整理后有

$$\rho_m / \rho = 1 - \rho_n / \rho = (1+w) \exp(-w) \quad (5)$$

式中, $w = l_c^2 / l_\lambda^2$, l_λ 为晶内位错链分布最可几长度, l_c 为临界位错链长.式(4)分布曲线及 l_c 和 l_λ 值可示意于图 1.

在金属变形过程中,通常有变形体在变形过程中体积保持不变的假设.考虑到一般晶体内含有的 $10^6 - 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的位错,其分布的随机性以及位错线在晶内不可自由中断等性质,可以把变形体看作是由三维立体位错网络分割而成.则单位体积内所有位错链段在变形体内所围网络相对体积可表示为

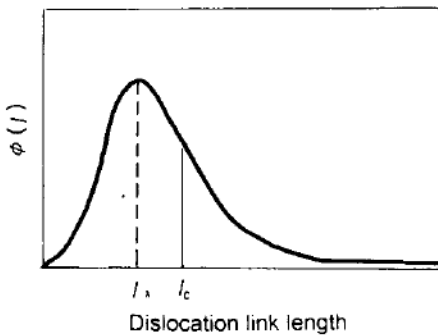


图 1 位错链长统计分布曲线示意图

Fig.1 Dislocation link length distribution in metal materials

$$V_v = \int_0^{l_c} C_0 l^3 \varphi(l) dl \quad (6)$$

式中, C_0 为与位错网络形状有关的几何常数.

将式(4)代入式(6)积分并整理后有

$$\int_0^{l_c} C_0 l^3 \varphi(l) dl = \bar{C}_0 \rho l_\lambda^2 \left[2 - (2 + 2w + w^2) \exp(-w) \right] \quad (7)$$

则变形体体积不变约束条件 $dV_v = 0$ 可写为

$$\rho l_i^2 \left[2 - (2 + 2w + w^2) \exp(-w) \right] = k \quad (8)$$

式中, k 是与平均几何常数 \bar{C}_0 及材料本身有关的一个常数. 依 $\rho = \rho_m + \rho_n$, $N = N_m + N_n$, 并结合式(5), 可将式(8)改写为

$$2\rho_n = \frac{k}{l_i^2} + \frac{w^2}{1+w} \rho_m \quad (9)$$

式(8), (9)即为变形体体积不变的位错链长分布参数约束条件.

2 讨论及应用

式(8)或式(9)中的 k 值是一个仅与材料本身和位错网络几何特征有关的常数, 在变形过程中可视为不变. 当实验测得晶体位错链最可几长度 l_i , 位错密度 ρ , 临界位错链长 l_c 与最可几位错链长 l_i 比值的平方 w 等任意两个参数时, 均可据式(8)计算出余下的第三个值. 在位错链长统计分布研究中, 临界位错链长度 l_c 值划分了变形过程中运动位错与网络位错间的界限, 将两种在变形过程中起不同作用的位错区别开来. 因而 l_c 值的确认具有重要意义. 目前虽然提出了几种 l_c 值的计算方法^[3,4], 但无任何理论或实验的支持. 式(8)表明, 当 k 值已知时, 可通过位错密度和最可几位错链长值的测定来计算 w 值, 进而可间接确定 l_c 值. 这在试验设计上比式(5)要方便得多, 从而为间接计算 l_c 值提供了另一途径.

图2为 Al-1% Mg 合金在 300 °C, 不同测试应力条件下的位错密度及运动位错分数的动态电镜测试结果 (电镜样品厚度为 5 μm). 位错密度用截线法测量, 运动位错用高速摄相测得. 应力水平较低时的位错密度及运动位错分量测试误差小于应力水平较高时的测量误差值, 而由式(5)可知^[6], 运动位错密度分量变化对 w 值的影响程度, 在 50% 以下时要小于运动位错密度在 50% 以上水平. 故此, 为确定常数 k 值, 由图可选取, 在 4.4 MPa 应力条件下位错密

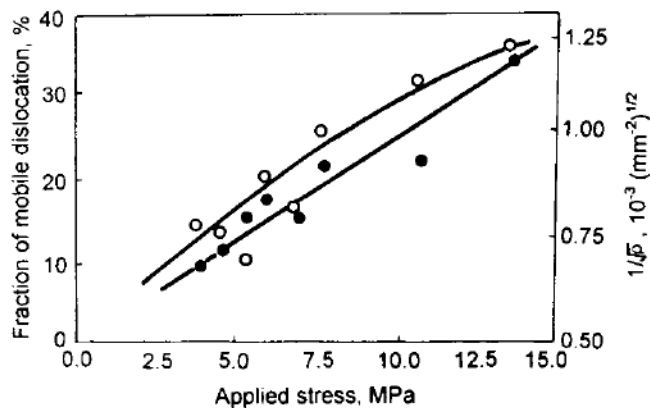


图2 Al-1% Mg 合金在 300 °C 不同测试应力下运动位错分数及位错密度的动态电镜测量值

Fig.2 Fraction of mobile dislocation, dislocation density as a function of applied stress during creep of Al-1% Mg, *in situ* tested at 300 °C

○ fraction of mobile dislocation ● dislocation density

度 ρ 值约为 $0.5 \times 10^6 \text{ mm}^{-2}$, 运动位错分量约为 13%. 该条件下根据位错实验照片可用截线法^[4,7]求得 l_λ 值约为 $0.3 \mu\text{m}$. 由此, 依据式(5)可求得此时 w 值为 3.53, 依据式(8)可求得常数 k 约为 6.4×10^{-2} . 据此, 可计算该合金在其它变形条件下的 l_c , l_λ 及 w 值变化见图 3.

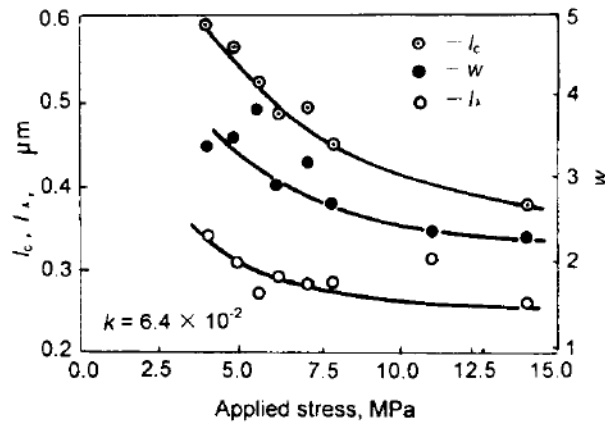


图 3 根据式(5)和式(8)计算的Al-1%Mg在300 °C不同测试应力下的 w , l_c , l_λ 值

Fig.3 Values of w , l_λ , l_c calculated from Eqs.(5) and (8) as a function of applied stress during creep of Al-1%Mg at 300 °C

由图 3 可见, 随着应力的增加, l_λ 值逐渐变小, 即位错链长分布曲线的峰值向短位错链方向移动. 这与迄今发表的所有变形晶体位错链长分布测试数据完全一致. 由图 3 还可以看出, 随应力增加, 临界位错链长值 l_c 与最可几位错链长值 l_λ 比值的平方 w 亦逐渐下降, 即 l_c 值的下降快于 l_λ 值的减少. 根据 l_c 值的物理意义及促使位错运动的应力作用, 表明可能由于应力增加使可以运动的位错链长缩短, 进而通过位错运动带动 l_λ 值的调整和减小并导致可动位错密度分量上升. 随着应力的进一步增加, l_c , l_λ 和 w 值趋于稳定. 这些现象对于进一步探讨变形时的宏观变量与材料微观参数之间的关系、发展位错链长统计分布理论均有启发作用.

3 结 论

(1) 变形体体积不变的位错链长统计分布参数表达式为

$$\rho l_\lambda^2 \left[2 - (2 + 2w + w^2) \exp(-w) \right] = k$$

(2) 对 Al-1%Mg 合金在 300 °C, 不同应力条件下位错电镜动态测试数据分析表明, 该式能够正确反映变形过程中位错链长统计分布各参数间的相互关系.

参 考 文 献

- 1 Orlová A, Čadek J. *Mater Sci Eng*, 1986; 77: 1
- 2 Ardell A J. *Mech Mater*, 1984; 3: 319
- 3 王勃生, 孙福玉, 徐温崇. 钢铁研究学报, 1990; 2(2): 89

- 4 王勃生, 孙福玉, 徐温崇. 钢铁研究学报, 1990; 2(3): 81
- 5 王勃生, 孙福玉, 徐温崇. 金属学报, 1992; 28A: 100
- 6 王勃生, 孙福玉, 高振英. 钢铁研究学报, 1995; 7(6): 48
- 7 Swann P R. *High Voltage Electron Microscopy*. London: Academic Press, 1974: 206

THE CONSTANCY OF PLASTIC VOLUME EXPRESSED BY DISLOCATION LINK LENGTH DISTRIBUTION PARAMETERS

WANG Bosheng, SUN Fuyun, GAO Zhenying, SHEN Cong (Central Iron and Steel Research Institute, Ministry of Metallurgical Industry, Beijing 100081)

(Manuscript received 1996-11-19, in revised form 1997-05-26)

ABSTRACT Based on the statistical distribution function of the dislocation link length derived by the author, an expression of dislocation link length distribution parameters for zero plastic volume change has been obtained as following

$$\rho l_{\lambda}^2 [2 - (2 + 2w + w^2)\exp(-w)] = k$$

where $w = l_c^2 / l_{\lambda}^2$ and or it can be expressed by the relation between mobile dislocation density and immobile dislocation density as follows

$$2\rho_n = \frac{k}{l_{\lambda}^2} + \frac{w^2}{1+w} \rho_m$$

The *in situ* creep test results of Al-1%Mg alloy in electron microscope confirmed the theoretical prediction.

KEY WORDS dislocation link length distribution, dislocation parameter, micro-theory of deformation

Correspondent: WANG Bosheng, professor, Department of Metal Physics, Central Iron and Steel Research Institute, Ministry of Metallurgical Industry, Beijing 100081