

六角结构金属中特殊位错组态的分析

李宗全 张立德 龙起易 何怡贞

(中国科学院金属研究所)

李永洪 田凤祚

(冶金工业部有色金属研究总院)

1981 年 2 月 2 日收到

提 要

本文从稳定的位错组态的能量最低原理出发, 分析了六角结构金属中能够出现的特殊位错组态。这些位错组态由两组分别位于间距很小的两个滑移面上的位错列阵组成, 用透射电子显微镜观察时, 它们呈现为有规则的位错“网络”。

由于位错之间的相互作用, 在一个面上形成的位错网络结构早就为人们所熟悉, 并进行了深入的研究^[1-4], 其中以对六角位错网络的研究为最多, 并提出了在双轴应力作用下形成六角位错网络的交滑移机制。在六角结构金属中的六角位错网络已在 Ti 及 Ti 合金, Be, Zn... 等金属中观察到。这些网络都是在基面上、而且只能在基面上形成^[5]。

实际上, 在六角结构金属中, 除了由位错的交滑移在基面上形成六角位错网络外, 还可以在两个相距很近、相互平行的非基面上, 形成特殊的位错组态, 这种组态的投影成六角、菱形或四方“网络”。

实验方法和结果

我们采用在 1200 和 850°C 反复加热和保温的方法^[6] 制备了高纯碘还原钛单晶。制备成适合于透射电子显微镜观察用的试样, 然后在 JEM-1000 高压电子显微镜下观察, 操作电压为 1000kV。

本实验所用试样的膜面接近于 (010) 面, 所观察到的六角位错“网络”如图 1(a) 所示。六角“网络”中的一个方向上的位错线呈双线。这种双线不是由衍衬效应引起的, 从 A, B 等处可以看出这一点。

从衍衬分析可知, 当 $g = \bar{1}1\bar{5}$ 时, 整个位错“网络”只出现残余衬度。由 $g \cdot b = 0$ 位错有效不可见判据及晶体滑移几何关系, 测得位错的 Burgers 矢量为 $\pm[110]$, 即整个位错“网络”是由一组位错或两组反号位错组成。

从迹线分析可知, 位错“网络”与膜面的交线 CD 为 $[50\bar{1}]$, 因此位错“网络”所在的面为 $[50\bar{1}]$ 与 $[110]$ 所构成的面, 即 $(1\bar{1}5)$ 面。

它与通常在基面上观察到的六角位错网络不同。图 2 是 α -Ti 单晶基面上的六角位

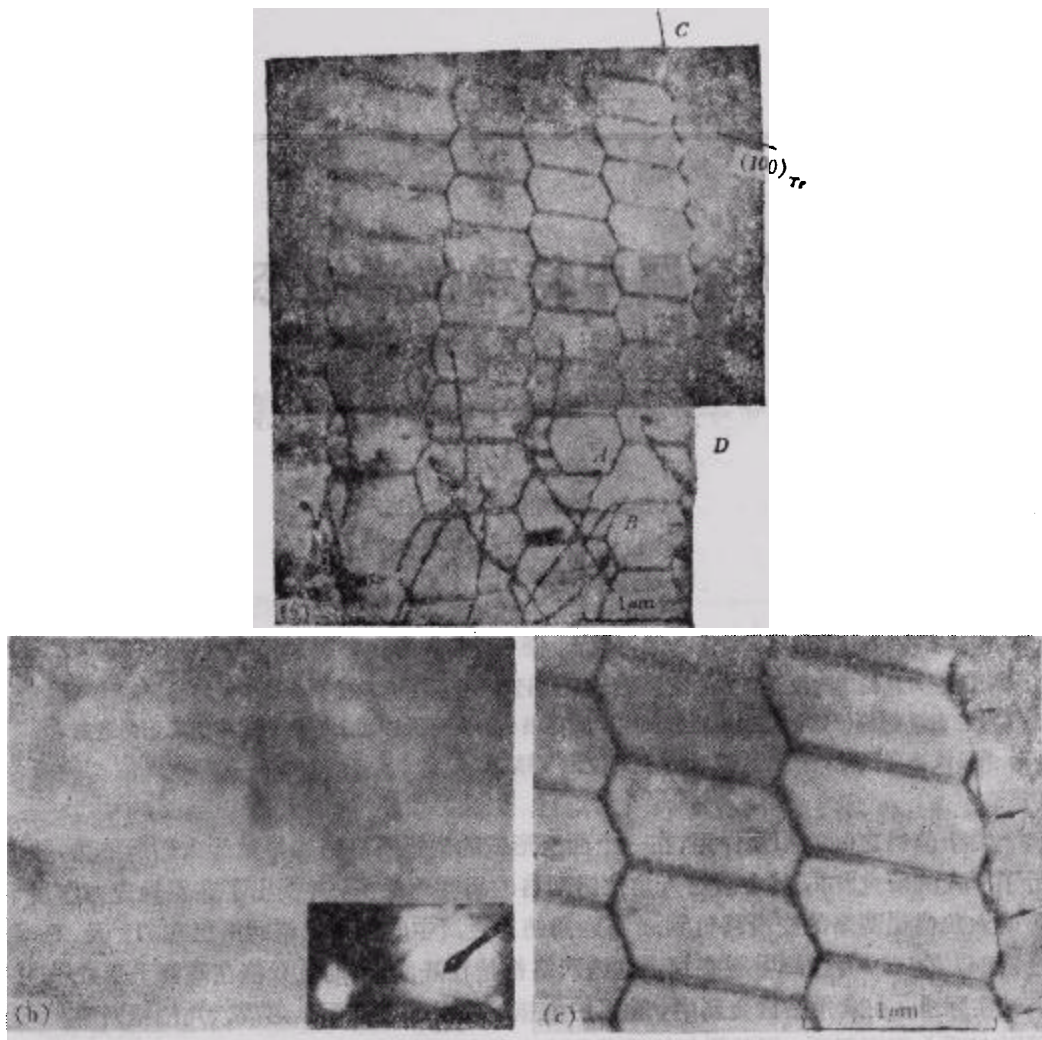


图1 α -Ti 单晶中所观察到的位错“网络”(a)在 (100) 面的迹线方向位错“网络”呈双线,并且双线的末端一边是封闭的、一边是开口的;(b)当 $g=\bar{1}15$ 时,整个位错“网络”只出现残余衬度,右下角为相应的衍射谱;(c)为(a)的局部放大图,位错“网络”与膜面的交点不在一条直线上(如箭头所示)

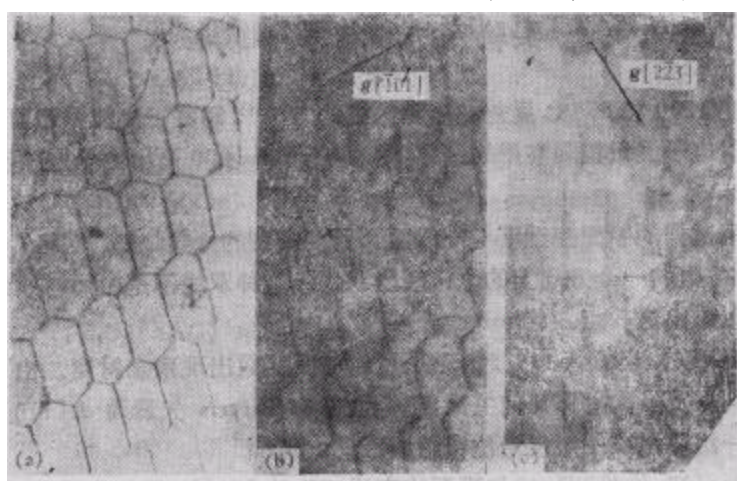


图2 α -Ti 单晶中的六角位错网络,在不同的操作反射下,不同的位错线段不可见 (a)全部位错网都可见;(b),(c)分别有一组位错不可见,相应的操作反射已在图中标出

错网络, 在不同的 $\mathbf{g}$ 矢量下, 网络中的不同位错线段不可见, 并且网络中无双线. 这些差别说明两者的形成机制迥然不同.

分析和讨论

六角结构金属基面上形成的六角位错网络, 用交滑移机制得到了很好的解释^[4]. 而在同一滑移面上的一组位错或两组反号位错不可能形成图 1 那样规则的位错网络, 而在相距很近的两个相互平行的滑移面上的同号或反号位错则可能以规则的方式排列、形成特殊的位错组态, 其投影成为“网络”.

下面从位错之间的相互作用力出发, 讨论位错之间的平衡位置.

假设两条相互平行的位错线具有相同或反号的 Burgers 矢量, 且分别位于相距为 h 的两个相互平行的滑移面上. 令第一条位错位于 $0x$ 轴方向, $x-y$ 平面为位错的滑移面. 从位错之间的相互作用能 W_{12} ^[7] 可以计算出平行位错单位长度之间的相互作用力的滑移分量为

$$F_{y/L} = -\partial(W_{12}/L)/\partial y \\ = \pm \left\{ \frac{\mu b_s^2}{2\pi} \frac{y}{h^2 + y^2} + \frac{\mu b_c^2}{2\pi(1-\nu)} \left[\frac{y}{h^2 + y^2} - \frac{2h^2 y}{(h^2 + y^2)^2} \right] \right\}. \quad (1)$$

括号前的正负号分别对应于两位错的 Burgers 矢量同号或反号的情况; b_s , b_c 分别为 Burgers 矢量的螺型分量和刃型分量.

当位于 $x-y$ 坐标面上的位错被一组平行位错所代替时 (图 3), 则在距 $x-y$ 面 h 的滑移面上单个位错所受的力为平行位错列阵中每个位错与它的相互作用力的叠加, 即

$$F_{y/L} = \pm \left\{ \frac{\mu b_s^2}{2\pi l} \sum_n \frac{(n-m)R^2}{1 + (n-m)^2 R^2} + \frac{\mu b_c^2}{2\pi(1-\nu)l} \sum_n \left[\frac{(n-m)R^2}{1 + (n-m)^2 R^2} - \frac{2(n-m)R^2}{(1 + (n-m)^2 R^2)^2} \right] \right\}, \quad (2)$$

式中 $R = l/h$.

$F_{y/L}$ 是以 l 为周期的周期函数, 在每一周期中单个位错所受的力及相应的平衡位置分别如图 4 和图 5 所示. 在这些平衡位置, 单个位错与平行位错列阵之间的相互作用能为极小值.

当两组平行位错具有相同(或反号)的 Burgers 矢量并分别位于相距很近的两个平行的滑移面上时, 同一滑移面上的位错之间的相互作用只影响它们之间的距离 l 的大小, 而两个滑移面上位错的相对平衡位置由这两个面上的位错之间的相互作用所决定, 其排列方式与图 5 相同. 两个滑移面上位错之间相互作用的大小, 与两个滑移面之间的距离有关. 当滑移面之间的距离小于同一滑移面上位错之间距离的四分之一时, 一个滑移面上的位错受到另一个滑移面上的位错的影响明显增大, 容易形成稳定的位错结构.

当两个面上的位错相互斜交时, 它们之间的相互作用力^[7] 为

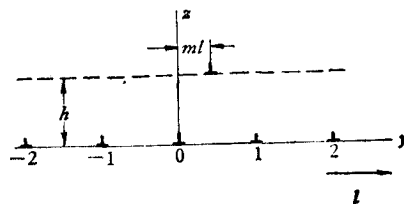


图 3 一个位错与一组平行位错相对位置示意图

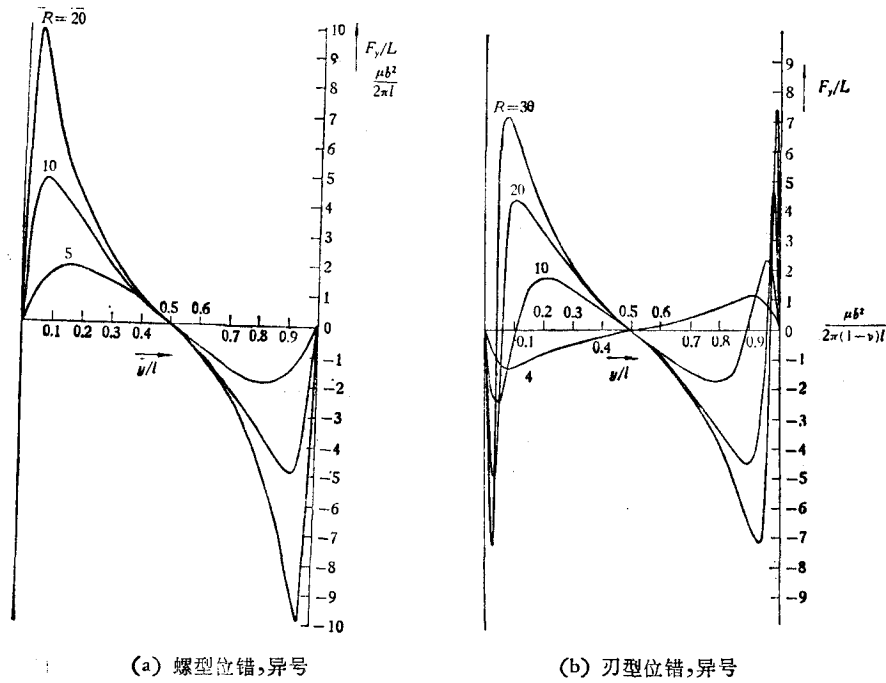


图 4 每一周期中, 单个位错所受的滑移驱动力

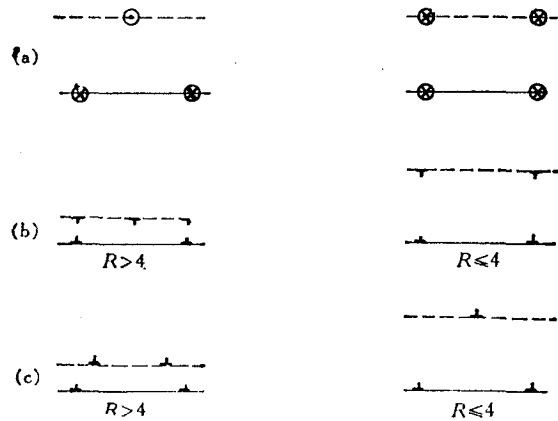


图 5 每一周期中, 位错的相对平衡位置

(a) 螺型位错; (b) 异号刃型位错; (c) 同号刃型位错

$$F_{12} = \frac{\mu}{\sin(\theta_2 - \theta_1)} \frac{R}{R} \left[\frac{1}{2} b^2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \frac{1}{1 - \nu} b^2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \right], \quad (3)$$

式中 R 为两位错之间的最短距离; θ_1, θ_2 分别为两条位错线与 Burgers 矢量之间的夹角。

用与上面平行位错相互作用类似的考虑, 两组平行位错分别位于两个相互平行的滑移面上, 这两组位错彼此斜交, 当它们之间的相互作用力为零时, 彼此处于稳定位置。此时满足下述关系:

$$\cos \theta_1 \cos \theta_2 + \frac{2}{1 - \nu} \sin \theta_1 \sin \theta_2 = 0. \quad (4)$$

当这两组斜交的位错处于稳定位置时,在透射电子显微镜中便观察到菱形的位错“网络”,例如如图 6(a) 那样的“位错网”. 这种网络并不是真正的位错网络,而是在透射电子显微镜观察中,这种特殊位错组态的投影的结果. 当两个面上的位错分别为刃、螺位错时,这种结构也是稳定的,在透射电子显微镜观察中便是四方“网络”,如图 6(b) 所示.

当位于两个平行滑移面上的两组斜交位错不满足关系式(4)时,位错线将发生局部形状的改变,使两个面上的位错的相互作用力为零,达到平衡位置. 例如两组接近于刃型的位错相互作用,其 Burgers 矢量反号, $\theta_1 \approx \theta_2$, 不满足关系式(4),如图 6(c) 所示. 为了降低系统的能量,位错线发生局部形状的改变,使原来直的位错线变成“之”字形,而且两个面上的位错中的相当大部分变到相互平行的位置. 从图 5 可以看出,此时的相互作用力为零,相互作用能可为极小. 由于位错线形状的改变,在透射电子显微镜下便成了六角“网络”[图 6(d)]. 这就是我们在 α -Ti 中所观察到的一种“网络”(见图 1). 由于两组位错的 Burgers 矢量反号,在平行部分两者的应力场部分抵消. 因此,在图 1 中双线部分的衬度小于其它部分.

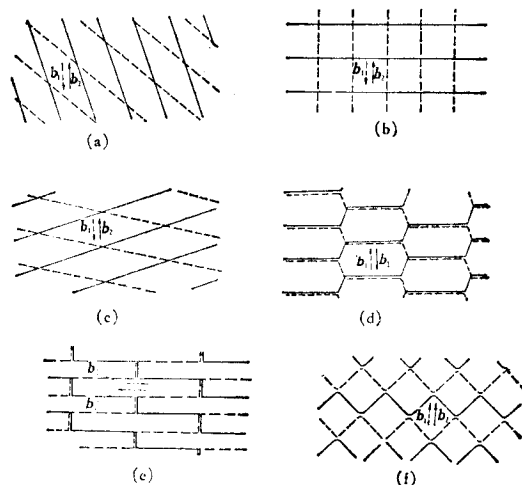


图 6 由相距很近的两个面上的位错规则排列构成的位错“网络”实线、虚线各表示一个面上的位错,且 $b_1 = b_2$

如果这两组位错的 Burgers 矢量同号时,形成类似于图 6(c) 所示的长方“网络”,其双线方向平行于 Burgers 矢量.

同理,当两组斜交位错接近于螺型位错、并且两组位错的 Burgers 矢量反号时,便形成图 6(e) 所示的长方“网络”. 如果两组位错的 Burgers 矢量同号时,形成类似于图 6(d) 所示的六角“网络”,其双线方向平行于 Burgers 矢量.

图 5 表示了从相互作用力考虑的两组平行位错之间的平衡位置. 在这些位置,位错之间的相互作用能为极小值. 但整个位错结构的总能量为位错自能与相互作用能之和

$$E_t = E_s + E_i. \quad (5)$$

当相互作用能为极小时,总能量不一定为极小. 考虑到位错形状改变引起的自能和相互作用能的改变,图 5(c) 所示的结构是不稳定的,在热应力的影响下,原来直的刃型位错变

成“之”字形,构成图 6(f) 所示的组态. 由于位错形状的改变使纯刃型位错变成混合型位

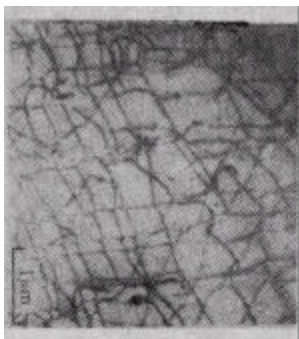


图 7 α -Ti 单晶中两个面上的位错组成的“网络”

错,单位长度位错的能量有所下降,但由于位错长度的增加使位错的自能有所增加. 而形状改变所引起的相互作用能的下降不仅抵消了自能的增加,而且使总能量有所下降,使图 6(f) 所示的组态是稳定的位错组态. 这种位错“网络”已在 α -Ti 中观察到,见图 7.

前面的分析指出,图 1 的位错“网络”是由 $(1\bar{1}5)$ 面上的位错构成的. 通常观察到的 α -Ti 的滑移面是 (001) , $(1\bar{1}0)$, $(1\bar{1}1)$ 等,而这里观察到的滑移面都是高指标面 $(1\bar{1}5)$. 这可能是由于我们所用的试样经过高温退火,高温下 $(1\bar{1}5)$ 面是 α -Ti 的滑移面. 在其它六角结构金属中也观察到了高指标滑移面,如高温下 Be 的滑移面为 $(1\bar{1}4)$ ^[8] 及有利切应力下 Zr 的滑移面是 $(1\bar{1}3)$ ^[9].

两个面上的位错要形成稳定的、规则的位错“网络”,位错线要发生局部形状的改变. 高温下,位错的动性增加,有利于位错的这种形状改变. 也就是说,高温下有利于两个面上的位错形成有规则的位错组态,构成特殊的位错“网络”.

结 语

从上面的讨论可以看出,六角结构金属中,在相距小于位错列阵间距四分之一的两个平行的非基面滑移面上的两组位错,在高温下位错改变形状,成“之”字形. 两个面上的位错形成规则的位错组态,使之在透射电子显微镜观察下成为有规则的位错“网络”形状.

参 考 文 献

- [1] F. Seitz and D. Turnbull, *Solid State Physics*, **8**(1964), 327.
- [2] H. M. Meek-Oja, *Phil Mag.*, **13**(1966), 367.
- [3] V. K. Lindress and H. M. Meek-Oja, *Phil Mag.*, **17**(1968), 119; *ibid.*, **20**(1969), 329.
- [4] G. F. Pittinato and S. F. Frederick, *Trans AIME*, **245**(1969), 2299.
- [5] R. I. Jaffee and H. M. Burte, *Titanium Science and Technology*, (1973), 1479.
- [6] E. A. Anderson, *Trans AIME*, **197**(1953), 1191.
- [7] J. P. Hirth and J. Lothe, *Theory of Dislocations*, (1968).
- [8] P. Pointu, P. Azou and P. Bastien, *Comp. Rend. Acad. Sci.*, **252**(1961), 1984.
- [9] J. E. Bailey, *Acta Met.*, **11**(1963), 267.

ANALYSIS OF THE SPECIAL STRUCTURES OF DISLOCATIONS IN HCP METALS

LI ZONG-QUAN ZHANG LI-DE LONG QI-YI HE YI-ZHEN

(Institute of Metal Research, Academia Sinica)

LI YONG-HONG TIAN FENG-ZUO

(Central Nonferrous Metals Research Institute, Ministry of Metallurgical Industry)

ABSTRACT

In this paper, we discuss the special structures of dislocations in h.c.p. metals. Two sets of dislocations that lay on two parallel non-basal slip planes will change their shape so as to become zigzag and form regular dislocation structures if the spacing of the slip planes is smaller than one quarter of the distance between the dislocations in the dislocation array. Under TEM observation, these structures appear to be regular dislocation networks that present double lines in one direction. Two of these dislocation networks in α -Ti were observed and others were showed schematically.