

# 镍铬合金中的位错运动与位错反应\*

郭可信 林保军<sup>1)</sup>

(中国科学院金属研究所)

## 提 要

对镍铬合金中单一滑移面内和两个滑移面间的位错反应,特别是动态下的反应,进行了透射电子显微镜观察,并对其的一些位错组态进行了衍衬分析。

1. 六角位错网络主要是单一滑移面内柏氏矢量相差  $120^\circ$  的两组位错间反应的结果;
2. 与螺型位错一样,刃型或混合型位错也能在两个滑移面间交滑移;
3. 两个滑移面间的位错反应有时在其截线方向生成不滑动的位错(如 L. C. 位错锁)并不能完全阻挡住这两个滑移面上的位错运动;
4. 在含铝、钛的镍铬合金中,超点阵位错的反应与不含铝、钛的合金或无序固溶体中的位错反应相似。

## 一、引 言

在冷加工变形后的面心立方晶体中,随着层错能的降低,位错产生交滑移的趋势减弱,塞积成列的趋势增强,甚至会扩展为两个不全位错,中间夹有一片层错。铝的层错能高,位错在运动过程中容易产生多次往复的交滑移<sup>[1]</sup>。铜铝合金的层错能低,常常可以观察到塞积列和扩展位错。镍的层错能并不低,但在加入铬后,层错能有所下降,一方面会使全位错转变成扩展位错,另一方面还能保持交滑移特征。因此,镍铬合金是研究各种位错运动与位错反应的一种比较合适的合金。

关于面心立方金属的单晶体在范性形变三个阶段中的位错组态,文献中已有不少报道,可参阅 Hirsch 的文献总结<sup>[2]</sup>。我们的兴趣主要是观察位错运动与位错反应的细节,因此把变形量限制在 0.5—2% 内,位错数目不多,可以研究几个位错间的反应,特别是接近实际使用情况下的多晶体内的位错反应。另一方面,我们采用在电子显微镜中加大束流的方法,使位错在表面应力的作用下开始缓慢运动,以便观察位错运动及动态下的位错反应。

合金 1 中含 20%Cr,合金 2 中除 Cr 外还含 1%Al 和 2.5%Ti。这两种合金中的位错反应基本相同,只是在合金 2 中由于有有序化的  $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$  生成,有时可以观察到成对出现的超点阵位错。合金在 1100°C 固溶处理后,轧制成 30—50 微米厚的薄带,中间经过多次退火处理。再次固溶处理后,剪成薄带拉伸试样,在 Chevenard 微拉伸机上进行 0.5,

\* 1978 年 3 月 20 日收到。

1) 本工作的实验部分是在 1965—1966 年完成的,当时林保军同志在金属研究所工作。

1, 2% 的变形处理. 在冰醋酸、高氯酸、无水乙醇、甘油混合液的电解液中, 在电压为 10 伏, 电流密度为 0.2—0.3 安/平方厘米的条件下进行电解减薄到 0.3 微米左右, 然后在电子显微镜中在加速电压为 100—150 千伏的情况下进行观察.

## 二、单一滑移面内的位错运动与位错反应

在同一滑移面上, 位错线的柏氏矢量虽有六种可能 (考虑了指向,  $\mathbf{b}$  及  $-\mathbf{b}$  算两种可能), 但不同位错线的柏氏矢量间的夹角仅有四种可能: (i)  $0^\circ$ , 柏氏矢量相同; (ii)  $180^\circ$ , 柏氏矢量相反; (iii)  $120^\circ$ , 柏氏矢量不同, 用 Thompson 记号表示, 相同字母不在同一位置, 如  $\mathbf{AB}$  与  $\mathbf{BC}$ ; (iv)  $60^\circ$ , 柏氏矢量不同, 但相同字母在同一位置, 如  $\mathbf{AB}$  与  $\mathbf{AC}$  或  $\mathbf{AB}$  与  $\mathbf{CB}$ . 第一种情况, 同号位错产生排斥作用, 在障碍物前塞积成列. 第二种情况, 反号位错相互吸引而抵消, 这实际上是  $\mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_2 = \mathbf{b}_3$ , 位错反应中  $\mathbf{b}_3 = 0$  的一个特例. 第三种情况, 异号位错可能产生交互作用而生成一段具有柏氏矢量为  $\mathbf{b}_3$  的位错线段. 如  $\mathbf{AB} + \mathbf{BC} = \mathbf{AC}$ ,  $\mathbf{AC}$  仍为  $-\frac{1}{2}\langle 110 \rangle$  滑移矢量, 这种位错反应可以导致能量降低. 第四种情况, 由于柏氏矢量间的夹角小于  $90^\circ$ , 位错反应会使能量增高, 而  $\mathbf{b}_3$  将为  $\frac{1}{2}\langle 112 \rangle$ , 这不是面心立方晶体中可能有的滑移矢量. 对前三种情况下的位错反应分别讨论如下.

### 1. $0^\circ$ , 柏氏矢量相同

在同一滑移面上, 柏氏矢量相同的位错间有排斥作用, 当运动受到阻碍后会塞积成列, 障碍物可能是晶界、第二相粒子、不能滑动的位错组态等. 孪晶界面对位错运动也有一定障碍作用, 图 1 中就有多列位错塞积在孪晶界 T 处. 领先的位错已到达孪晶界, 后来的位错由于斥力的作用排列得越来越疏稀. 位错塞积列产生的应力还会使领先的位错越过孪晶的共格界面进入孪晶内. 显然, 基体与孪晶内的两个滑移面以孪晶界面 T 为镜面呈反映对称关系, 并有相同的晶面指数. 这是一种交滑移, 两个互为孪晶的晶体内的位错有同一柏氏矢量  $\mathbf{b}$ , 而  $\mathbf{b}$  也就是这两个晶体中指数相同的滑移面与共格孪晶面的截线方向.

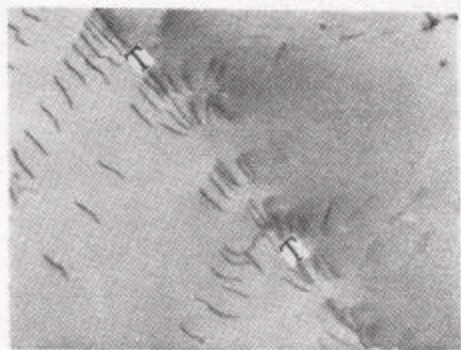


图 1 柏氏矢量相同的位错在孪晶界 (T) 塞积成列, 螺型位错越过共格孪晶界产生交滑移. 两个晶粒内的滑移面以孪晶界为镜面呈反映对称关系  
22000 $\times$

在部分有序化的固溶体中, 同号位错还会形成一对超点阵位错, 这将在第四部分中讨论.

### 2. $180^\circ$ , 柏氏矢量相反

在同一滑移面上, 柏氏矢量相反的位错间有吸引作用, 并能相互抵消. 图 2 中 a 有一列位错在表面污染产生的应力作用下, 在同一滑移面上朝相反方向运动, 位错线朝前进方向凸出. 当一对位错线相距较远时, 运动速度较慢, 彼此接近到较近距离时就加速运动, 最后汇合而抵消, 并在晶膜的上下表面留下两条亮的痕迹 (图 2 中 b), 接着第二对位错

线又相互抵消(图 2 中 c),如此重复下去(图 2 中 d),直到最后右边只剩下一根在界面上的位错(图 2 中 e)。

图 2 中柏氏矢量相反的位错成对抵消这一现象并不是偶然事件。在拉伸试验中会产生大量柏氏矢量相反的位错朝相反方向运动,但是只有当它们是处在同一晶面上时才会互相抵消。任何位错源产生的位错圈中,位错线的方向是一顺的,有同一柏氏矢量。当这些位错圈扩大到晶膜表面后就会裂开成为在同一滑移面上的两根位错。位错线方向相反,柏氏矢量相同;或者更恰当一些,位错线方向相同,柏氏矢量相反。当然,这些位错圈原来可能是完整的,但是在试样的电解减薄过程中在膜的上下表面被切断了<sup>[3]</sup>。图 3 左下角的第二相颗粒在形变过程中就是一个位错源,向几个方向发出位错,其中向孪晶界一方发出的位错圈(实际上是半圈,下同)在拍摄图 3a 时尚有两个(P 处),并在继续扩大中;在图 3b 中只余下一个,而在图 3c 中完全裂

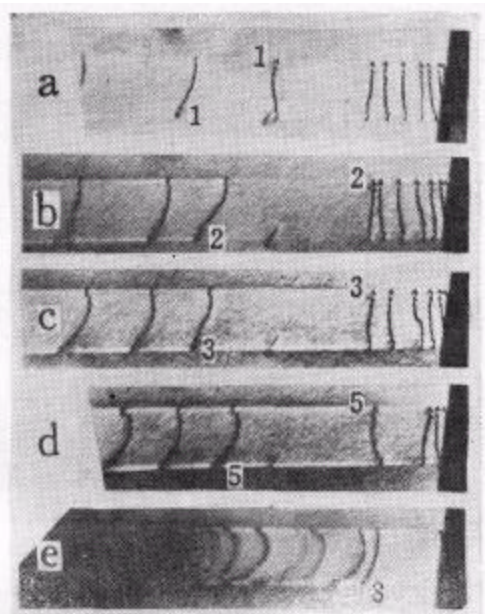


图 2 柏氏矢量相反的位错互相吸引,成对抵消;1-1, 2-2, 3-3 等位错的衍衬象呈反演关系,说明有相反的柏氏矢量 15000 $\times$

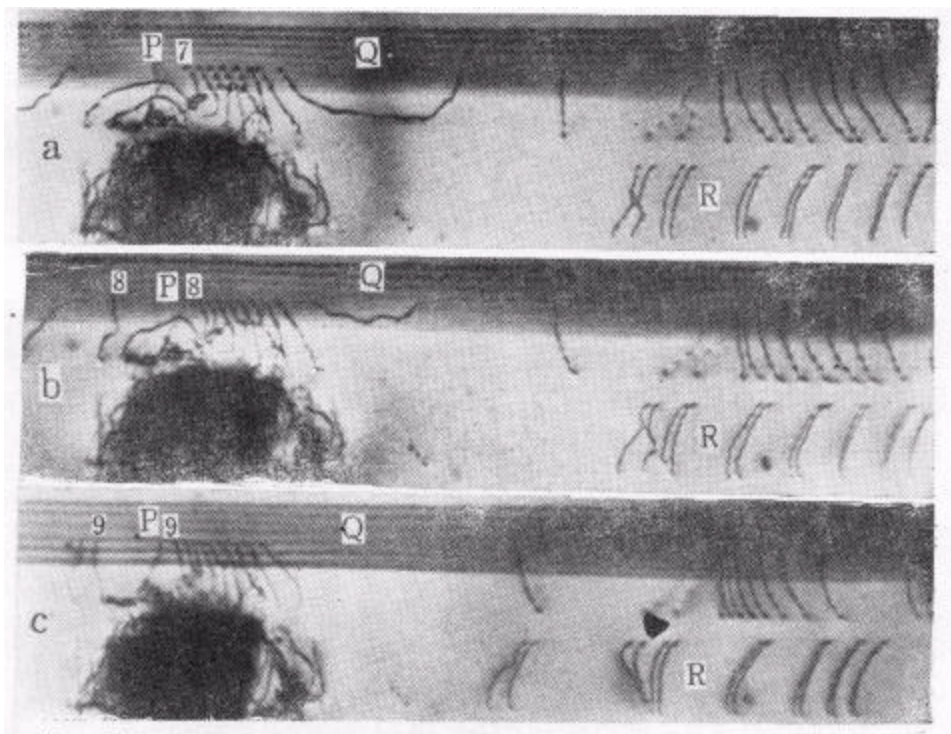


图 3 位错圈裂开产生一对柏氏矢量相反的位错(P),柏氏矢量相反的位错线对在表面汇合成位错圈而逐渐消失(Q);超点阵位错成对向左运动(R) 30000 $\times$

开。每一个位错圈开裂后就会生成一对柏氏矢量相反的位错,如图 3b 中的 8—8 及图 3c 中的 9—9,因此在塞积列中多了两对柏氏矢量相反的位错向相反方向运动。如果在滑移面上有两个这种位错源(图 4(a)),它们产生的柏氏矢量相反的位错就会像图 2 所示的那样成对抵消。图 3a 中 Q 处的半个位错圈受到类似的应力作用而逐渐缩小,最后消失。当然,这并不排除它是由两个柏氏矢量相反的位错先在膜的一个表面上汇合而成半个位错圈的可能性(图 4(b))。两个滑移面间的这种位错反应见图 17 和 18。

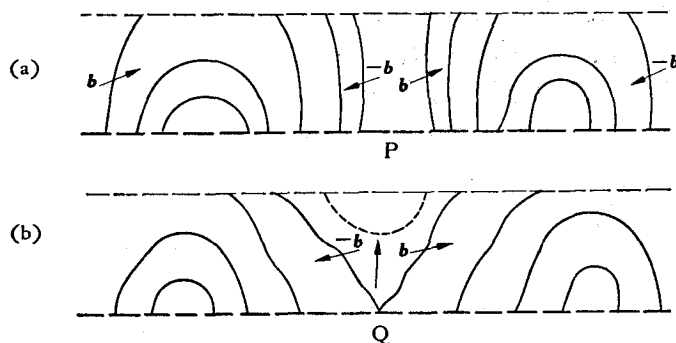


图 4 两个位错源产生的柏氏矢量相反的位错成对抵消的示意图

在相距不远的平行滑移面间,柏氏矢量相反的位错(主要是刃型位错)的相互吸引会组成反号位错线对,简称偶极子。也会由两列反号位错组成多重极子。我们也经常观察到这种现象,但未进行细致分析。

### 3. $120^\circ$ , 柏氏矢量不同

使用 Thompson 记号(见图 9),在  $\delta$  面即(111)面上柏氏矢量不同的位错反应可能是

$$BA + AC = BC$$

或

$$\frac{1}{2}[01\bar{1}] + \frac{1}{2}[\bar{1}01] = \frac{1}{2}[\bar{1}\bar{1}0].$$

这种反应可以降低能量,生成稳定的位错组态,如六角位错网络。

图 5 的膜面接近(112),宽的滑移痕迹是(111),其中有明显的位错塞积与位错反应。从位错线的方向来看有三组,其中两组分别用  $BA$  和  $AC$  注明, $BC$  实际上是一些接近平行于 $[\bar{1}\bar{1}0]$ 方向的位错线段(图 5(a)),象是另两组位错间反应的产物。选择  $\bar{2}20$ ,  $\bar{1}3\bar{1}$ ,  $3\bar{1}\bar{1}$  衍射成明场象,分别摄得图 5(a—c)。从下列  $g \cdot b$  关系

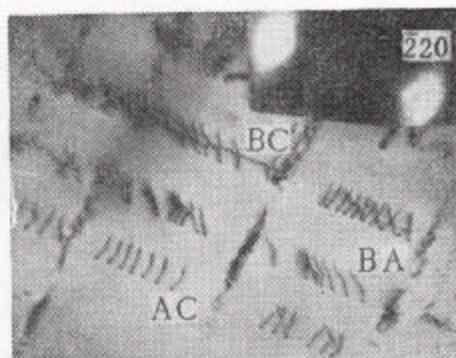
| 图    | $g$               | $BA$                     | $AC$                     | $BC$                           | 观察结果         |
|------|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------|
|      |                   | $\frac{1}{2}[01\bar{1}]$ | $\frac{1}{2}[\bar{1}01]$ | $\frac{1}{2}[\bar{1}\bar{1}0]$ |              |
| 5(a) | $\bar{2}20$       | 1                        | 1                        | 2                              | 三组位错线皆清晰可见   |
| 5(b) | $\bar{1}3\bar{1}$ | 2                        | 0                        | 2                              | $AC$ 很弱或接近消失 |
| 5(c) | $3\bar{1}\bar{1}$ | 0                        | -2                       | -2                             | $BA$ 较弱,部分消失 |

可以确定图 5 中的位错反应是  $BA + AC = BC$  (由于没有确定柏氏矢量的正负号,因此位错反应也可能是  $CA + AB = CB$ )。从图 5 中位错线的形貌也可以看出,位错线

$BA$  和  $AC$  交割成一个四重结点, 经过反应后生成一段  $BC$  和两个三重结点。

值得指出的是,  $BC$  线段与其柏氏矢量平行, 显然是螺型位错。在图 5(b) 中很弱或接近消失的  $AC$  线段与衍射矢量  $g$  接近正交, 说明它是螺型分量为主的位错。同理可由图 5(c) 确定  $BA$  也是螺型分量为主的位错。由螺型位错或螺型分量为主的位错构成的六角网络如图 6 所示, 这种组态能量低, 比较稳定, 也符合三组位错间线张力的平衡关系。

图 7 中的六角网络虽不如图 6 那么规整, 但还是清晰可辨的。在图 7(a) 中六角网络的两侧还有尚未参与位错反应的两种位错 (P, Q),



(a)  $g = 220$ , 三种位错线都出现, 与  $[110]$  平行的  $BC$  是螺型位错



(b)  $g = \bar{1}3\bar{1}$ ,  $AC$  的衍衬象很弱或接近消失



(c)  $g = 3\bar{1}\bar{1}$ ,  $BA$  的衍衬象很弱或接近消失

图 5 柏氏矢量相差  $120^\circ$  的位错反应  $BA + AC = EC$  的衍衬分析 10000 $\times$

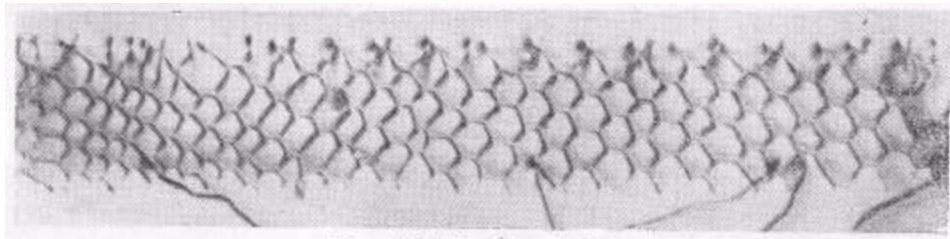


图 6 六角位错网络 39000 $\times$

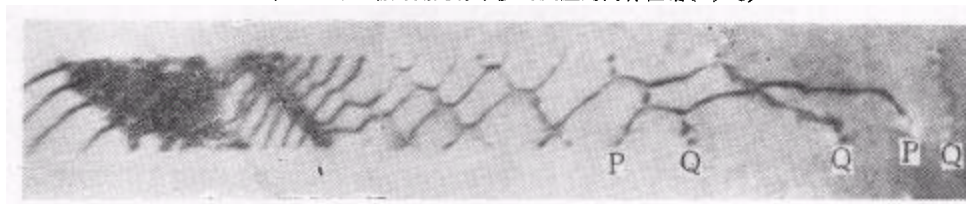
这意味着六角网络可能是同一滑移面上两种柏氏矢量不同的位错线间反应的结果<sup>[4]</sup>。图 7(b) 中的六角位错网络显然是一些位错圈 (P) 与另一组位错线 (Q) 间反应的结果。在同一滑移面上, 如有两个位错源给出两组位错的柏氏矢量间的夹角为  $120^\circ$ , 就会产生六角网络 (图 7(c))。

既然位错网络的柏氏矢量全都在同一滑移面上, 这种位错网络显然是可滑动的。图 8 的位错网络中一根位错线 (X) 的运动是比较明显的, 如果仔细观察还可以发现其它运动细节 (Y)。

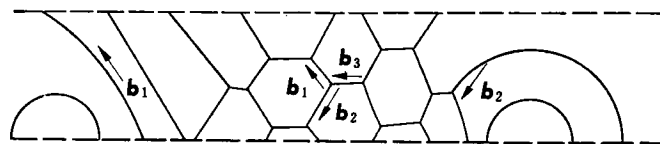
关于位错网络生成的机理, 还要在下面讨论两个滑移面间的  $120^\circ$  位错反应时进一步阐述。



(a) 六角网络两侧尚有未参与反应的两种位错(P, Q)



(b) 六角网络是由一些位错圈(P)与另一组位错(Q)间反应的结果



(c) 两个位错源产生的柏氏矢量相差  $120^\circ$  的位错生成六角网络(示意图)

图7 单一滑移面上柏氏矢量相差  $120^\circ$  的位错反应生成六角网络 30000 $\times$

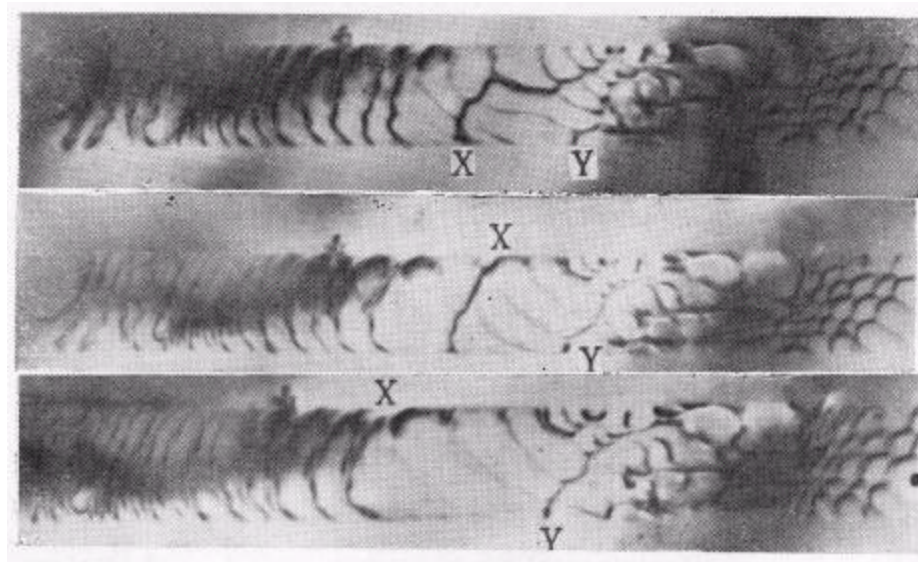


图8 位错网络中位错的运动(X, Y) 35000 $\times$

### 三、两个滑移面上的位错运动与位错反应

两个滑移面间的位错反应要比单一滑移面上的情况复杂得多。位错线的柏氏矢量间的夹角关系,除了上面已经讨论过的  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $180^\circ$  外,还有  $90^\circ$ ,如图9中 **AD** 与

**BC** 或 **AC** 与 **BD** 间的夹角。不仅如此,同是一样的夹角,两个滑移面间的位错反应与单一滑移面上的情况相比,不但形式不同,内容也要丰富得多。下面还是按 $0^\circ$ , $180^\circ$ , $120^\circ$ 顺序进行讨论, $90^\circ$ 的 Hirth 位错锁很少见,不在这里讨论。

### 1. $0^\circ$ , 柏氏矢量相同

两个滑移面间的截线是 $\langle 110 \rangle$ 方向,如图9中的 **BA**。显然, **BA** 是(111)面( $\delta$ )与( $\bar{1}\bar{1}1$ )面( $\gamma$ )间共有的柏氏矢量,如果一根位错线具有这种柏氏矢量,它就可能由一个滑移面转移到另一个滑移面上去。交滑移的方式有两种。一种方式是螺型位错的一次转移,位错线与两个滑移面的截线平行,整个位错线同时转移到另一个滑移面。铝合金中的交滑移就是如此<sup>[1]</sup>,图1中越过共格孪晶界的交滑移也是如此。另一种方式是逐步过渡,位错线的一部分在一个滑移面上,另一部分在另一个滑移面上。图10中左边的晶粒内有

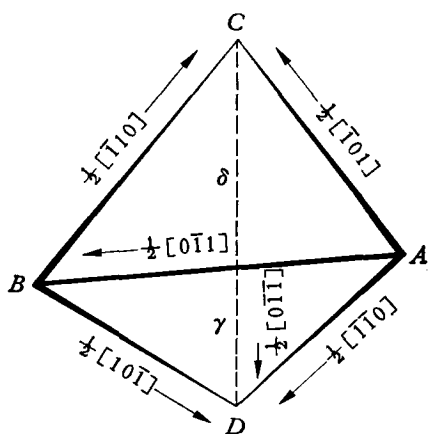


图9 面心立方晶体中位错的柏氏矢量的 Thompson 记号

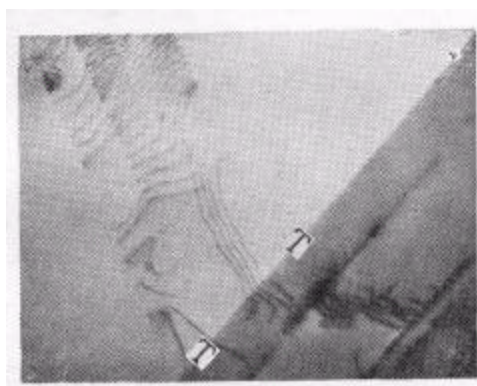
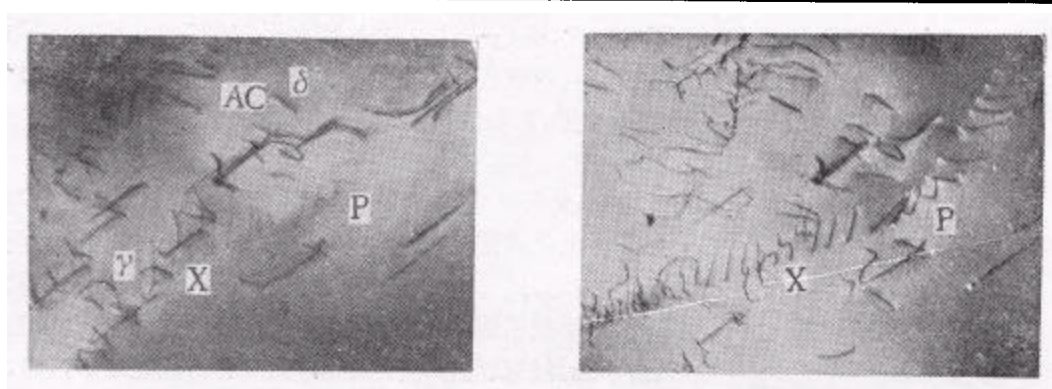


图10 混合型位错越过孪晶界(T)产生交滑移 12000 $\times$

三列位错线,分别分布在三个平行的滑移面上,其中两列位错线中已经有些位错线跨过共格孪晶界,同时坐落在两个晶粒内的呈孪晶对称关系的滑移面上。在这种逐步转移过程中,位错线拉长,并且主要是刃型分量为为主的位错线。

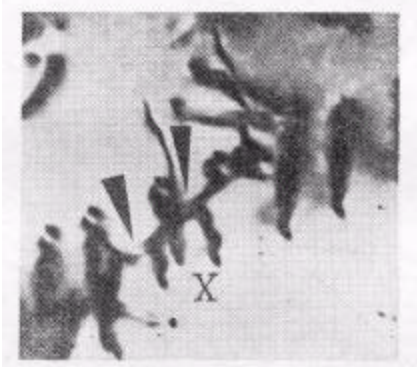
图11中P处是一组位错线从一个滑移面正在逐步转移到另一个滑移面的真实写照,交滑移过程中位错线的转折点就在两个滑移面的截线上,图12(a)是其示意图。显然,交滑移是从位错线的一端先开始的,逐步过渡,在截线处折向另一个滑移面。试样的膜面接近(011),图11中两个滑移面分别是(111)及( $\bar{1}\bar{1}1$ ),它们的截线方向是 $[01\bar{1}]$ (见图13)。图11(a)的衍射矢量  $\mathbf{g} = 200$ ,交滑移的一组位错线的象衬较弱。从  $\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} = 0$  可以确定  $\mathbf{b} = \frac{1}{2}[01\bar{1}]$ (另一个可能是  $\frac{1}{2}[011]$ ,但它不在这两个滑移面上)。这是这两个滑移面共有的柏氏矢量,也是它们之间产生交滑移的唯一的柏氏矢量。

当受力情况改变或一系列位错的运动受到阻碍时,交滑移是经常发生的。多晶体中的一个晶粒受力情况复杂,有时在两个滑移面上都有位错运动,它们之间的交滑移是很频繁的,在图14中用c标明。图14中P及Q处,一系列位错从一个滑移面转向另一个滑移面,一如图11中一样。但是在R处,两列位错正在交换滑移面,一系列位错从窄的滑移面转向



(a)  $g = 200$ , P 处交滑移位错 BA 的衍衬象很弱 15000 $\times$

(b)  $g = 111$ , 新生成的 BC 位错线无衍衬 15000 $\times$



(c) 图(a),(b)中 X 处的局部放大象(60000 $\times$ ),  $g = 3\bar{1}1$ , 交割位错 AC 有双象(用箭头标明)

图11 两个滑移面上的交滑移(P)与位错反应(X)

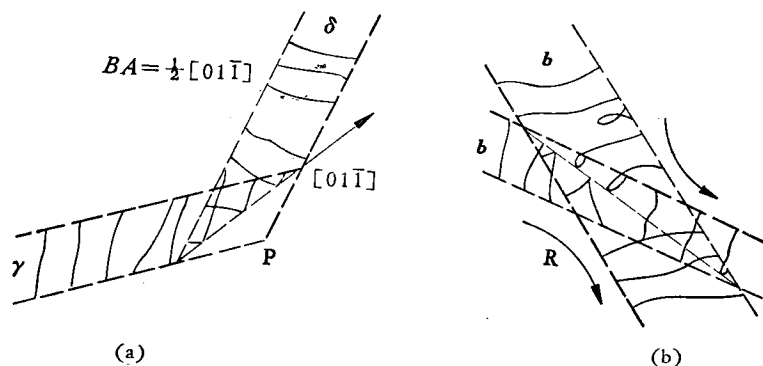


图 12 交滑移(图 11 中 P 处)与交叉滑移(图 14 中 R 处)的示意图

宽的滑移面,另一列位错从宽的滑移面转向窄的滑移面.一般说来,它们是交替成对出现,见图 15 中 R. 这说明有同一柏氏矢量的两列位错在两个滑移面上运动,当它们逐渐靠近时,它们之间的排斥力迫使对方改变前进方向,向自己所在的滑移面上转移(见示意图 12 (b)). 我们称这种交滑移为交叉滑移.

过去一般认为只有螺型位错才可能交滑移,并且用平行滑移面上柏氏矢量相反的螺型位错可以通过交滑移而互相抵消,解释为什么在范性形变的第一阶段(易滑移)有大量

刃型位错多重极子，而只有很少螺型位错残留下来<sup>[2]</sup>。上述观察说明混合型或刃型位错也可以通过逐步过渡的方式交滑移到另一个滑移面上去。这种类型的交滑移之所以较为普遍可能与位错的线张力有关。图 11, 14 及 15 中两个滑移面的截线较长, 图 16 中更长, 如要产生螺型位错一次转移方式的交滑移, 位错线的长度要显著增加, 从能量考虑, 这显然是不利的。

虽然交滑移是范性形变的一种重要方式<sup>[2]</sup>, 但是过去主要是在观察试样表面的滑移痕迹对交滑移进行了较多的研究<sup>[5,6]</sup>。后来在硅<sup>[7]</sup>以及最近在铜<sup>[8]</sup>中用 X 射线形貌技术直接观察到逐步过渡型的交滑移, 并在 Cu-Al 合金薄膜<sup>[9]</sup>中观察到部分交滑移的 L 形位错作为单支弗兰克-瑞德位错

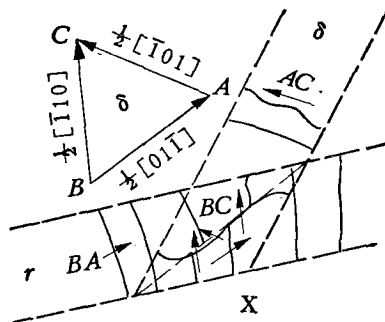


图13 图 11 中 X 处的位错反应的示意图

图14 交滑移(P)与交叉滑移(R)  
40000×

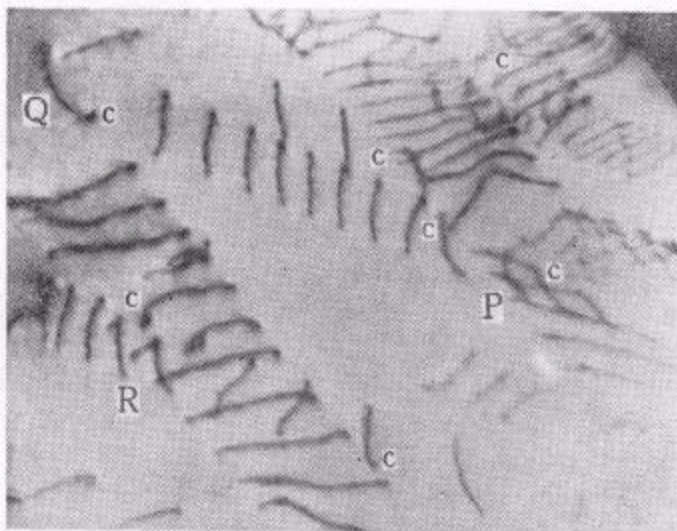
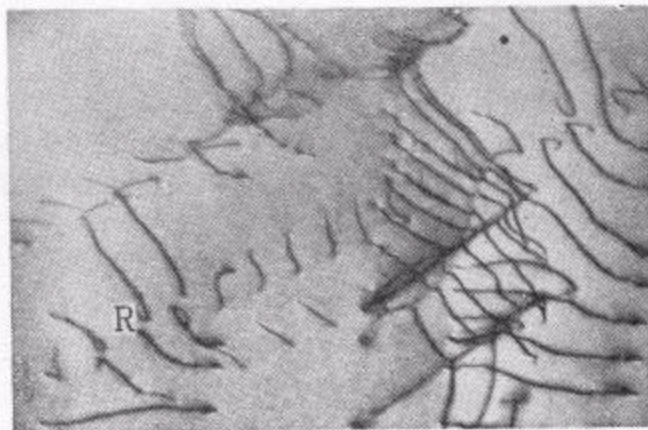
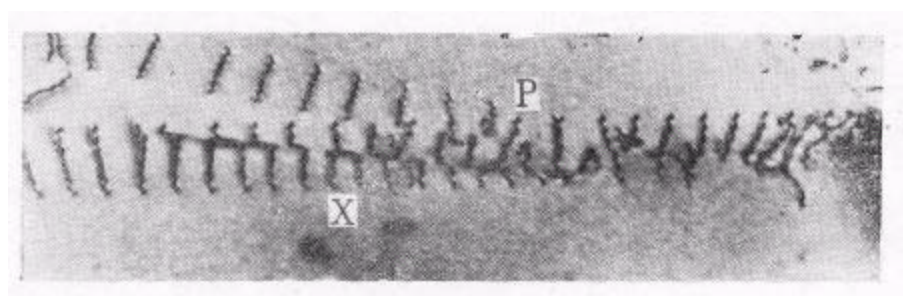


图 15 两列位错交叉滑移(R)  
30000×

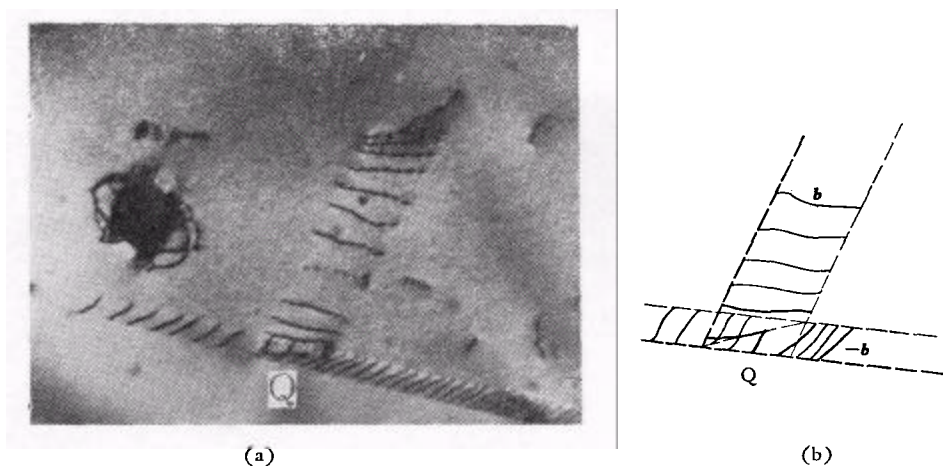


图 16 两列位错间交滑移(P)与位错反应(X) 30000 $\times$ 

源,不断产生新的位错圈。鉴于刃型位错与混合型位错进行交滑移的可能性与普遍性,应在今后的晶体范性形变研究中给予较多的注意。

## 2. $180^\circ$ , 柏氏矢量相反

在解释图 3 中 Q 处半个位错圈的消失时,我们曾认为同一滑移面上两根柏氏矢量相反的位错线在膜的表面相吸引而成半位错圈。这种现象也可能在两个滑移面相截处发生,柏氏矢量相反的位错先在截线表面露头处汇合,逐渐缩小,变成一个 L 形位错(图 17(a))。不过,图 11 中部分交滑移的 L 形位错线的两端分别在薄膜试样的上下表面(见示

图 17 柏氏矢量相反的位错相互吸引成位错圈(Q)及示意图(b) 25000 $\times$ 

意图 12),而图 17(a)中的 L 形位错线的两端都在膜的同一表面上(见示意图 17(b))。

图 18(a)中两个滑移面上柏氏矢量相反的两列位错相互吸引,成对汇合,逐渐收缩,在膜的另一表面汇聚成一点(用箭头标明),最终消失,其示意图如图 18(b)所示。图 18(a)中两列位错基本上一一衔接,显示柏氏矢量相反的位错间相互吸引的作用。尽管汇合后的位错线看起来在两个滑移面的截线处无折点,但它们也是以此为界的两个位错线段,分别在两个滑移面上运动。

## 3. $120^\circ$ , 柏氏矢量不同

两个滑移面上的位错只可能在其截线上相遇,而新生成的位错线段在初生成时也一定在截线上。图 19 中两列位错相遇,其中一列位错分别与另一列的一根位错和三根位错(X)发生反应。图 11 中也有类似的反应(X),其示意图如图 13 所示。假设  $r$  面上有一

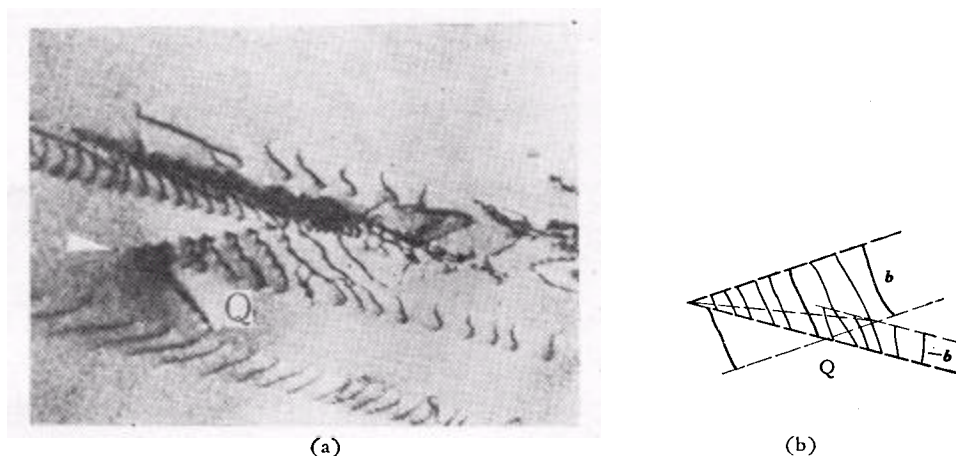


图 18 柏氏矢量相反的位错相互吸引, 成对抵消((a)中Q处)及示意图(b) 25000×

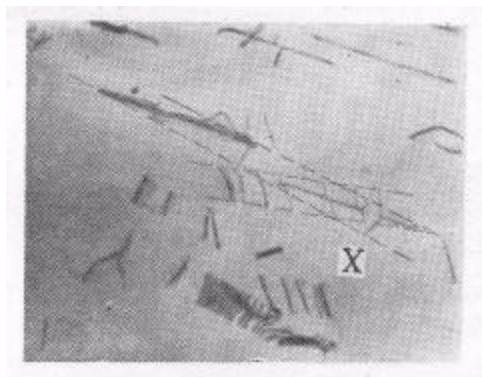


图 19 两个滑移面间的位错反应在其截线上(X处)生成新位错线的形貌 13000×

组位错,  $\delta$  面上的交割位错与它的反应有下述三种情况:

- |     | $\gamma$ 面上的一组位错 | $\delta$ 面上的交割位错 | $\gamma/\delta$ 截线上新生成的位错 |                                                                                 |
|-----|------------------|------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| (1) | $DB$             | $BA$             | $= DA$                    | 三种位错在 $\gamma$ 上均可滑动, 由于线张力的作用, 在 $\gamma$ 上成六角网络                               |
| (2) | $BA$             | $AC$             | $= BC$                    | $BC, AC$ 在 $\delta$ 上可滑动, 但 $BA$ 一组位错在 $\gamma$ 上, 由于后者的牵制, $BA, AC$ 在截线上成笔直的线段 |
| (3) | $DB$             | $BC$             | $= DC$                    | $DC$ 在 $\gamma, \delta$ 上均不可滑动, $DC, BC$ 在截线上成笔直的线段                             |

第一种位错反应的特点是  $\delta$  面上的交割位错是螺型位错  $BA$ , 它和新生成的位错的柏氏矢量  $DA$  都在  $\gamma$  面上, 因此可以在这个面上滑动。Whelan<sup>[10]</sup> 最早指出, 由于位错的线张力, 它们之间往往成  $120^\circ$  夹角。如果在平行的一些  $\delta$  滑移面都有  $BA$  型位错线, 它们与  $\gamma$  面上的一组位错间的反应就会形成六角网络。当然, 这需要在这些  $\delta$  滑移面都有一个  $BA$  位错, 这种可能性不大。鉴于这些位错在  $\gamma$  面上都是可滑的, 只要在  $\delta$  面上有

一个位错源,它就会给出一列 **BA** 位错,领先的位错在截线上与这一组位错间发生反应,后继的位错列产生的斥力使截线上的位错在  $\gamma$  面上滑动,下一根 **BA** 位错接着在截线上参与位错反应,如此循环下去,形成六角网络. 这种机制有如机织布一样,  $\gamma$  面上的一组位错是经线,交割位错是纬线,“织”成六角位错网<sup>[11,12]</sup>.

在  $\{111\}$  滑移面上常可以观察到六角位错网,除了上述这种可能性外,也应考虑单一滑移面上两种柏氏矢量的夹角为  $120^\circ$  的位错反应. 如前所述,后一种可能性还是较大的.

第二种位错反应的特点是  $\gamma$  面上的一组位错的柏氏矢量是 **BA**, 截线上的 **AC**, **BC** 两种位错线只能在  $\delta$  面上滑动. 由于前者的牵制,它们很难移动,因此在截线上留下一条笔直的位错线. 图 11 中 X 处的位错反应就属于这种类型,图 13 是其示意图. 从图 11(a) 中的交滑移就可以确定  $\gamma$  面上的一组位错线的柏氏矢量是  $\mathbf{BA} = \frac{1}{2} [01\bar{1}]$ , 它与 200 衍射满足  $\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} = 0$  的关系. 图 11(b) 中  $\mathbf{g} = 11\bar{1}$ , 新生成的位错线段无衍衬, 它的柏氏矢量只可能是  $\mathbf{BC} = \frac{1}{2} [\bar{1}10]$ . 图 11(c) 是 X 处位错反应在较高放大倍率下的  $\mathbf{g} = 3\bar{1}1$  的衍衬象,交割位错显示双象(用箭头标明),这与其柏氏矢量  $\mathbf{AC} = \frac{1}{2} [\bar{1}01]$ ,  $\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} = 2$  是一致的. 从上述衍衬分析可以肯定它属于  $\mathbf{BA} + \mathbf{AC} = \mathbf{BC}$  的反应. 这种位错反应尽管留下长而直的位错线段,却不是 Lomer-Cottrell 位错,不能混为一谈,详见后述.

第三种位错反应的特点是无 **BA** 型位错参与反应,而是  $\alpha$  面上的 **DB** 与 **BC** 型(或  $\beta$  面上的 **DA** 与 **AC** 型)位错间的反应(见图 9),生成的位错的柏氏矢量是 **DC**, 它既不能在  $\gamma$  也不能在  $\delta$  面上滑动. 如果这些全位错还分解为不全位错,通称为面角位错或 Lomer-Cottrell 位错(简称 L. C. 位错或 L. C. 锁),但是现在也有不少人称这种全位错反应的产物为 L. C. 锁<sup>[13,14]</sup>,因为它是固定在  $\gamma/\delta$  截线上很难滑动的位错. 位错线在  $[01\bar{1}]$  方向,  $\mathbf{b} = \frac{1}{2} [011]$ , 它们构成  $(100)$ , 位错线仅能在这个面上滑动,而这又不是面心立方金属中常见的滑移面.

文献中有不少关于 L. C. 位错锁的报道,并认为它是阻碍位错运动从而产生加工硬化的重要因素之一<sup>[2]</sup>. 在范性形变第一阶段就有 L. C. 位错出现,而在第二阶段大量生成<sup>[6,13,14]</sup>. 关于 L. C. 位错的早期文献存在过一些混乱. 在未进行衍衬分析的情况下,就把截线上的笔直位错线认为是 L. C. 位错锁,这显然是不合适的. 我们发现有的笔直的位错线段是 L. C. 位错,有的则是上述第二种位错反应(图 11, 16 及 19). 当膜面接近  $(011)$  的情况下, L. C. 位错的柏氏矢量  $\pm \frac{1}{2} [011]$  与入射电子束接近平行,因此它与所有衍射束都接近满足  $\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} = 0$  的正交条件,即使有衍衬象出现,也一定很弱. 图 11, 16 及 19 中有不少平行于  $\gamma/\delta$  截线方向的笔直线段,都不是 L. C. 位错. 文献中也有类似情况,却被认为是 L. C. 位错<sup>[15]</sup>. 有的位错线在与电子束平行的一个  $\{111\}$  面上,尽管它不一定是直的,在荧光屏上的投影也是直线,把它看作是 L. C. 位错显然也不一定是正确的<sup>[16]</sup>. 鉴于第二种位错反应也会给出笔直的位错线段,在确定 L. C. 位错时一定要进行

全面的衍衬分析。

无论是第二种还是第三种位错反应，都会两个滑移面的截线方向产生不滑动的笔直位错线段，但是这并不能排除参与位错反应的一些位错线在 $\gamma$ 或 $\delta$ 面上滑动。图20中有两根这种笔直的位错线，在与上面一根直位错线相连的一组位错线段正在 $\delta$ 滑移面上运动(在图20的a中用t注明);在与下面一根直位错线相连的一组位错线段正在另一个滑移面 $\gamma$ 上运动(图20a—c中用s注明)。在后者中，一根位错线(图20b)在与这根直线相遇后分成两段(图20c)，分开来沿着这根直线向前运动(图20d)，待离开这根直线后，上一半消失，下一半发展成为一根与上下膜表面接触的位错线(图20e)。这一系列动态观察说明，在截线上的不滑动的位错线并不能阻碍这两个滑移面上的位错运动。因此，一

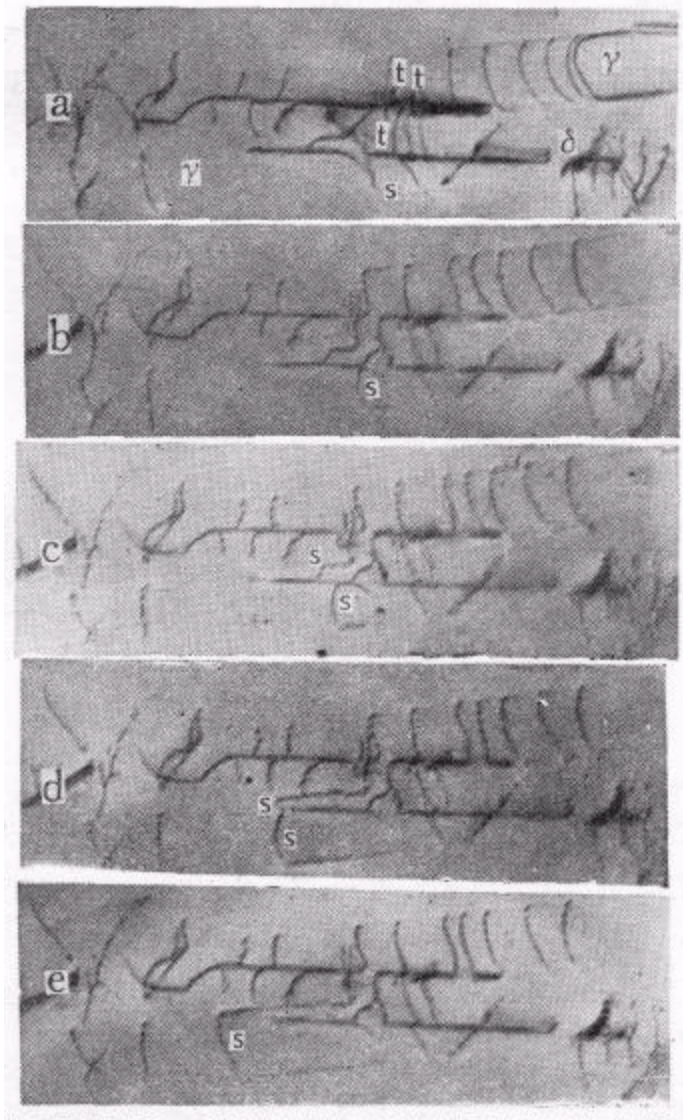


图20 两个滑移面( $\gamma$ ,  $\delta$ )间的位错反应在截线上生成不滑动的位错,并未能阻止位错(s, t)分别在这两个滑移面上运动 30000 $\times$

般认为 L. C. 位错锁能够阻碍位错运动可能是不全面的,对此应做具体分析。这是一个有待继续进行研究的课题,它对阐明金属的加工硬化现象会有一定的意义。

#### 四、超点阵位错

在许多长程有序结构中已经观察到一对对由两个在无序结构中的全位错构成的超点阵位错,中间夹有一片反相畴界面。前人已经在含铝的镍基合金中观察到这种超点阵位错,并认为这是位错穿过有序的  $\text{Ni}_3\text{Al}$  沉淀相的结果<sup>[27]</sup>。在经过时效处理的合金 2 (含 Al 约 1%, 含 Ti 约 2.5%) 中,我们也观察到一些超点阵位错的运动和位错反应,与第二、三部分中讨论的位错反应与位错组态很相似。

图 3 中 R 处有一列超点阵位错在向左运动。从每一对位错线有相同的衍衬象特征可以肯定它们有相同的柏氏矢量,每一对位错构成一个超点阵位错。在运动过程中,每对位错可以改变其外貌,但总是成对的运动,并且领先对的间距最宽,逐渐变小,这与在运动中的全位错容易扩展,而扩展位错容易加宽是一致的。在图 3 中  $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$  显然尚未析出,至少没有长大到能察觉的程度,可是已经观察到超点阵位错。这可能与固溶体的不均匀性有关,其中可能已经存在有短程序或  $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$  的核,这将会促进超点阵位错的形成。

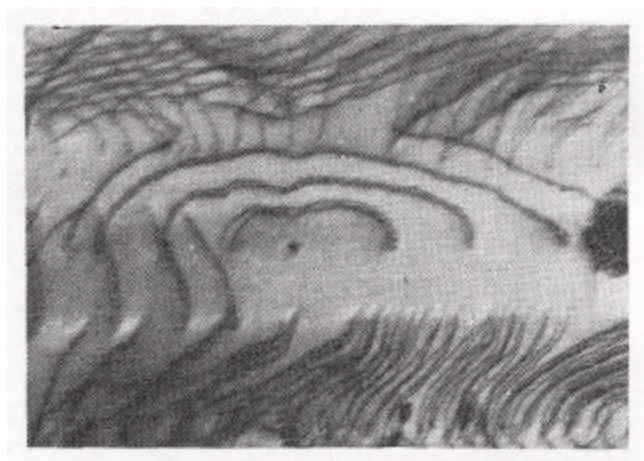


图 21 位错源与超点阵位错 30000 $\times$

图 21 中有一位错源给出柏氏矢量相同的位错圈,位错圈也是成对出现,长大到与膜面接触后就裂开成为两对超点阵位错。显然,每个超点阵位错线对有相同的  $\frac{1}{2}\langle 110 \rangle$  柏氏矢量,但这两对超点阵位错则有相反的  $\langle 110 \rangle$  柏氏矢量。

同一滑移面上的柏氏矢量不同的超点阵位错交织成网,不过它们之间还没有发生位错反应(图 22)。

图 23 中有两组不同的超点阵位错反应,它们都是一个滑移面上的超点阵位错与另一个滑移面上的非超点阵位错间的反应。在 R 处,它们有柏氏矢量相同的位错的交滑移反应的特征,而在 X 处有柏氏矢量相差  $120^\circ$  的位错反应的形态。显然,在位错反应中,超点



图 22 同一滑移面上柏氏矢量不同的超点阵位错交织成网 50000 $\times$

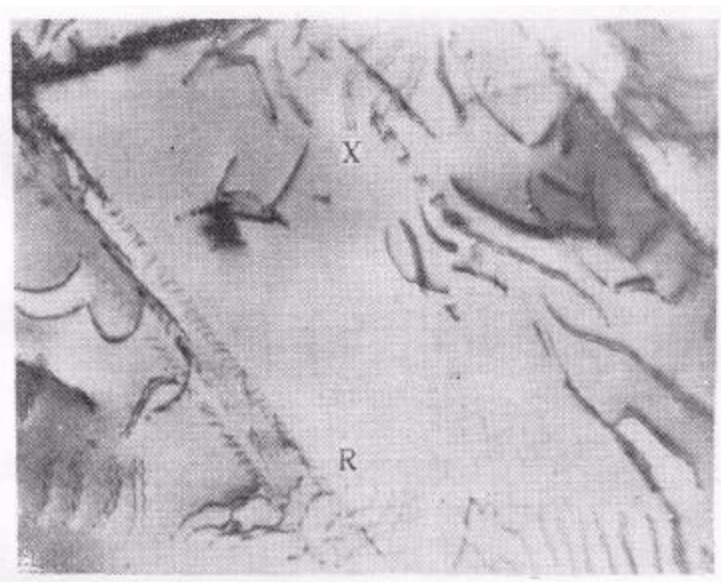


图 23 超点阵位错参与的交滑移型位错反应(R)及柏氏矢量相差  $120^\circ$  的位错反应(X) 30000 $\times$

阵位错也是作为一个整体参加反应,因此在截线上生成新位错线段后,超点阵位错的成对出现的特征仍明晰可辨。

上述对超点阵位错的观察还是很初步的,超点阵位错间的反应应有更丰富的内容,值得进一步深入研究。

## 五、结 语

1. 使用透射电子显微镜对镍铬合金薄膜中单一滑移面内和两个滑移面间的位错运动与位错反应,进行了系统的观察,并对一些有代表性的位错组态进行了衍衬分析。位错的柏氏矢量是决定位错运动和位错反应的主要因素,重点讨论柏氏矢量间的夹角为 $0^\circ$ , $180^\circ$ 和 $120^\circ$ 的情况。

2.  $0^\circ$ , 柏氏矢量相同

(1) 位错之间互相排斥,它们在运动过程中遇到障碍(难滑动的位错组态、晶界、第二相等)就会在一个滑移面上塞积成列(图 1);

(2) 位错塞积列的斥力还会进一步使领先的位错越过共格孪晶界, 在孪晶的同指数滑移面上产生交滑移(图 1 及图 10);

(3) 在多晶体的一个晶粒内, 由于应力状态比较复杂, 交滑移还是常见的. 不仅螺型位错能交滑移, 刃型和混合型位错也能交滑移. 在后一情况下, 位错线常有 L 的外形, 折点就在两个滑移面的截线上, 而两个位错线段则分别处于不同的滑移面上, 一个在膜的上表面露头, 另一个在膜的下表面露头(图 11, 14—16).

### 3. $180^\circ$ , 柏氏矢量相反

(1) 位错之间相互吸引, 在同一滑移面内有时成对抵消(图 2), 有时则在膜的一个表面先汇合形成半位错圈, 再逐渐消失(图 3 中 Q 处);

(2) 两个相邻而平行的滑移面间柏氏矢量相反的位错互相吸引生成偶极子或多重极子, 使畸变能降低;

(3) 两个交叉的滑移面上柏氏矢量相反的位错先在膜的一个表面汇合, 形成 L 形位错, 折点在截线上, 不过在两个滑移面上的两个位错线段的露头点都处于膜的同一表面上(图 17, 18).

### 4. $120^\circ$ , 柏氏矢量不同

(1) 两个柏氏矢量相差  $120^\circ$  的位错间的反应生成一段新的位错, 后者的柏氏矢量与前两者都相差  $120^\circ$ (图 5);

(2) 在同一滑移面内, 两列柏氏矢量相差  $120^\circ$  的位错相交产生六角网络, 并且主要是螺型或螺型分量为为主的位错网络(图 6—8);

(3) 两个交叉滑移面之间的  $120^\circ$  位错反应产生的新的位错线段就在两个  $\{111\}$  的截线上(图 19). 如果这种位错的运动很困难, 甚至是不滑动的 Lomer-Cottrell 位错(它的柏氏矢量不在这两个滑移面上), 它常常是一根长而直的位错线. 即使在这种情况下, 它也不能完全阻挡其它位错在这两个滑移面上运动(图 20).

### 5. 超点阵位错

(1) 在含 Al, Ti 的合金中, 中温处理会产生短程序和局部长程序(相畴). 在这种情况下, 两个柏氏矢量相同的位错线对构成一个超点阵位错, 中间夹有一片反相畴界面(图 3, 21);

(2) 超点阵位错在运动过程中, 一对位错线间的距离往往加大, 反相畴界面相应加宽(图 3);

(3) 超点阵位错的反应也由柏氏矢量决定, 位错组态与不含 Al, Ti 的合金或无序固溶体中的位错反应相似(图 22, 23).

钱临照同志对此文提出一些有益的修改建议, 曹涵清、张修睦、李黎光同志协助整理此文, 特此致谢.

## 参 考 文 献

- [1] 郭可信、张修睦, 物理学报, **22** (1966), 257.
- [2] P. B. Hirsch, The Physics of Metals, 2 Defects (Editor P. B. Hirsch, Cambridge Univ. Press, 1975), 189.
- [3] G. Dupouy, High Voltage Electron Microscopy, (Editors P. R. Swann, C. J. Humphreys, M.

- J. Goringe, Academic Press, 1974), 441.
- [4] Frank, F. C., Defects in Crystalline Solids. (The Physical Society, London, 1955), 159.
- [5] P. B. Hirsch and J. S. Lally, *Phil. Mag.*, **12** (1965), 595.
- [6] H. Neuhauser, J. Koropp and R. Heage, *Acta Met.*, **23** (1975), 441.
- [7] A. George and G. Champier, *Phil. Mag.*, **31** (1975) 961.
- [8] F. Minari, B. Pichaud and L. Capella, *Phil. Mag.*, **31** (1975), 275.
- [9] C. B. Carter, *Phil. Mag.*, **35** (1977), 75.
- [10] M. J. Whelan, *Proc. Roy. Soc.*, A249 (1959), 114.
- [11] H. M. Miekkoja, *Phil. Mag.*, **13** (1966), 367.
- [12] V. K. Lindroos and H. M. Miekkoja *Phil. Mag.*, **16** (1967), 693.
- [13] H. P. Karnthaler F. Prinz and G. Haslinger, *Acta Met.*, **23** (1975), 155.
- [14] Z. S. Basinski, Dislocations in Solids, (The Faraday Society, London, 1964), 93.
- [15] T. C. Tisone, J. O. Brittain and M. Meshii, *Phil. Mag.*, **16** (1967), 647.
- [16] M. M. Hutchison and C. J. Bell, *Phil. Mag.*, **15** (1967), 213.
- [17] H. Gleiter and E. Hornbogen, *Phys. Stat. Sol.*, **12** (1965), 251.

## MOVEMENT AND INTERACTIONS OF DISLOCATIONS IN NICKEL-CHROMIUM ALLOYS

GUO KE-XIN      LIN BAO-JUN

(Institute of Metal Research, Academia Sinica)

### ABSTRACT

Interactions of dislocations, especially under dynamic conditions, on a single glide plane or from two crossing glide planes were studied in general, and certain dislocation configurations in particular, by means of transmission electron microscopy and diffraction contrast methods. The main findings are:

1. Hexagonal dislocation networks are mainly formed by the interaction of dislocations on a single glide plane with Burgers vectors at  $120^\circ$ .
2. Like screw dislocations, edge and mixed dislocations can also cross-slip between two glide planes.
3. Interactions of dislocations from two crossing glide planes sometimes form long, straight, non-mobile dislocations at the intersections, e.g., Lomer-Cottrell dislocations. However, this non-mobile dislocation does not block, as it is generally accepted, the movement of dislocations on these two glide planes.
4. In nickel-chromium alloys containing aluminum and titanium, interactions of superlattice dislocations are more or less similar to those observed in Al- and Ti-free alloys or in disordered solid solutions.