

鉬单晶体的范性形变*

周邦新

提 要

在本文中,用金相和X射线方法,研究了24个取向不同的鉬单晶体在 -80°C (-50°C)、 27°C 、 1000°C 和 $\sim 2000^{\circ}\text{C}$ 拉伸后的情况。分析研究的结果,认为观察到的 $\{112\}$ 、 $\{123\}$ 、 $\{145\}$ 等滑移痕迹,是由于在两组不平行的 $\{110\}$ 面上,沿着同一个 $\langle 111 \rangle$ 方向组合滑移后构成的外观面貌,而滑移面是密排的 $\{110\}$ 面。外观滑移面(从滑移痕迹测定出的)会随样品取向不同而发生变化。当变形温度改变时,同一个样品的外观滑移面可能改变,也可能不改变,这要由样品的取向来决定。

一、引 言

体心立方金属的形变问题,比面心立方金属和密排六方金属都更复杂。由滑移痕迹所决定的晶面常常是非密排的晶面,滑移痕迹也显得不规则^[1]。如何解释这种现象,至今还存在争论。如能更确切地了解体心立方金属的滑移变形机构,那么,对体心立方金属的一些其他特性,如脆性等,也可能得到更深入的認識。

过去曾研究过鉬单晶体的范性形变^[2-4],但更多的是研究铁(純鉄和 α 鉄)和鉄硅合金单晶体的范性形变^[1,5-10]。对其他体心立方金属,如鎢^[11,12]、鉻、鈮、鈉、鉀等单晶,也进行过研究^[1]。总起来说,对体心立方金属的滑移机构,有着三种不同的看法:第一种意见认为滑移是在包含着 $\langle 111 \rangle$ 方向并受到最大分切应力作用的“非晶体学面”上发生,滑移方向是 $\langle 111 \rangle$ ^[1],后来考虑到不同晶面上滑移阻力不同而作了一些修正^[6]。第二种意见认为滑移面是 $\{110\}$ 、 $\{112\}$ 和 $\{123\}$,滑移方向是 $\langle 111 \rangle$ ^[1,7,9]。在研究鉬单晶形变时^[3],观察到滑移面是 $\{112\}$ 的样品中,从劳埃星芒决定的晶格弯曲的转动轴不是 $\langle 110 \rangle$,而是 $\langle 112 \rangle$,因而认为滑移面是密排的 $\{110\}$ 面,当在两组不平行的 $\{110\}$ 面上沿着同一个 $\langle 111 \rangle$ 方向滑移时,就可以构成 $\{112\}$ 、 $\{123\}$ 等滑移痕迹,如图1所示(为了便于观察,将样品截面画成方形),这是第三种意见。但后来研究鉄单晶时^[6]没有观察到这种现象,因而没有支持第三种观点。从第二种观点出发,Andrade^[13]还从实验中总结了

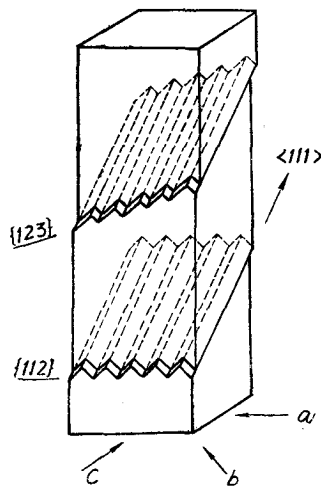


图1 在两组不平行的 $\{110\}$ 面上,沿着同一个 $\langle 111 \rangle$ 方向滑移后,而构成 $\{112\}$ 、 $\{123\}$ 等滑移痕迹的示意图。

* 1962年3月12日收到。

体心立方金属的滑移面随形变温度不同而变化的规律,但未得到后来实验结果的支持^[3,11]。究竟体心立方金属的滑移机构是怎样的?当形变温度改变时,滑移面又将如何变化?这对于认识体心立方金属的变形,确是一些基本的、但是还有待进一步阐明的问题。

我们用金相和X射线方法,研究了不同取向的钼单晶体在不同温度拉伸的情况下,认为用第三种意见来解释钼单晶体的滑移机构更为合适。随着形变温度改变,由滑移痕迹决定的外观滑移面¹⁾可能改变,也可能不改变,这要由晶体的取向来决定。

二、单晶体的制备和实验方法

直径1毫米的工业纯钼丝,用形变再结晶方法^[14],可生长出100~300毫米长的单晶体。样品用水冷铜电极支持,外套石英管(直径30毫米)在真空中直接通电加热。样品先加热到~1500℃保持20秒得到细小的再结晶晶粒后,再把样品温度降到800~900℃用扭转方式变形,变形度为 $\sim 0.230 \times 2\pi$,扭转变形后,再给以~0.5%的拉伸变形,实验证明这两种变形方式组合在一起时可以得到最好的结果。形变后的样品用每小时150℃的升温速度,从1200℃加热到~2000℃,保持6小时。在这种情况下,形变度和升温速度是生长单晶体的关键因素。在石英管外附加的温度梯度(加一个走动的电炉)并不起显著作用。

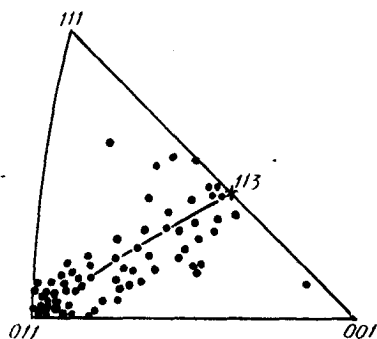


图2 68个单晶体取向的分布图

用劳埃背反射照象的方法,测定了晶体的取向。图2表示了68个单晶体的取向,它们大致分布在 $[011]$ — $[113]$ 连线的附近,在 $[011]$ 附近更为密集,这可能是由于冷拔后的钼丝中存在 $\langle 110 \rangle$ 织构的缘故。选择取向适合的单晶体,截成25毫米长,经过电解抛光后再做拉伸试验。拉伸试样的标距为15毫米。在 -80°C ~ 150°C 拉伸试验时,拉伸速度是每分钟3毫米,用照象方法记录负荷-伸长曲线。在 1000°C 和~ 2000°C 拉伸时,样品用通电方法加热,温度用光学高温计测量。样品经过~5%拉伸后,用金相方法测定滑移面和滑移方向^[1]。拉伸后的某些样品,用细焦点X射线源照象,研究了劳埃星芒的变化,焦点直径是40微米,光栏直径是0.15毫米。

三、实验结果

1. 样品取向和变形温度对外观滑移面晶面指数的影响:

选择了24个取向不同的单晶体,它们取向的分布如图3所示。这些样品在 -80°C (-50°C)、 27°C 、 1000°C 和~ 2000°C 拉伸后,由滑移痕迹测出外观滑移面的位置,如图4所示,它们的滑移方向,除了42和25两样品在~ 2000°C 拉伸后测得的结果,与 $\langle 111 \rangle$ 偏离稍大以外,其他都非常靠近 $\langle 111 \rangle$ 。从图4中可以看到,样品在室温拉伸后,即使把测

1) 我们把由样品表面观察到的痕迹所决定的晶面,称为外观滑移面,和晶体在滑移时实际的滑移面相区别。

量误差估计为 $\pm 5^\circ$, 也难于将所有样品的外观滑移面归并成 $\{110\}$ 、 $\{112\}$ 和 $\{123\}$ 三种, 特别是 44 d 和 39 两个样品的实验结果都经过重复试验。低温拉伸时, 在取向不同的大多数样品中, 都观察到 $\{110\}$ 滑移痕迹; 但高温拉伸时, 大多数样品的滑移痕迹则接近 $\{123\}$ 。如果将 $\{110\}$ — $\{112\}$ 区间, 以 10° 为间隔划分成 $\{110\}$ 、 $\{145\}$ 、 $\{123\}$ 和 $\{112\}$ 四个区间, 把不同取向的样品, 在不同温度拉伸后由滑移痕迹测出的外观滑移面, 归并成这四种类型, 把分别属于这四类滑移痕迹样品的取向用不同符号画在极图的一个三角形内, 如图 5 所示, 其中 a、b、c、d 分别是在 -80°C (-50°C)、 27°C 、 1000°C 和 $\sim 2000^\circ\text{C}$ 拉伸后测得的结果, 当取向靠近 $\langle 111 \rangle$ — $\langle 011 \rangle$ 线的样品 (A 区), 和取向靠近 $\langle 001 \rangle$ 的样品 (E 区), 从室温直到 $\sim 2000^\circ\text{C}$ 拉伸时, 只观察到 $\{112\}$ 的滑移痕迹; 在 -80°C 拉伸时, 除了观察到较模糊的 $\{112\}$ 滑移痕迹外, 还有清楚笔直的 $\{110\}$ 滑移痕迹。取向靠近 $\langle 111 \rangle$ — $\langle 001 \rangle$ 线的样品 (D 区), 在 -50°C 到 $\sim 2000^\circ\text{C}$ 拉伸时, 都只观察到 $\{110\}$ 的滑移痕迹。在 A、D 区域之间, 又可分成 B、C 两区, 取向在 B、C 区域内的样品, 拉伸后观察到的滑移痕迹分别落在 $\{123\}$

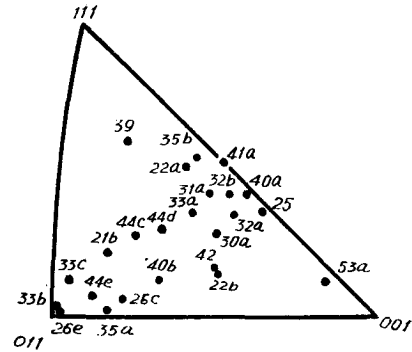


图 3 24 个单晶体取向的分布图

编号	取向 χ° ψ°	-80°C (-50°C) ¹⁾				27°C				1000°C				~2000°C			
		$\langle 101 \rangle$ $\langle 312 \rangle$ $\langle 211 \rangle$				$\langle 101 \rangle$ $\langle 312 \rangle$ $\langle 211 \rangle$				$\langle 101 \rangle$ $\langle 312 \rangle$ $\langle 211 \rangle$				$\langle 101 \rangle$ $\langle 312 \rangle$ $\langle 211 \rangle$			
		0°	10°	20°	30°	0°	10°	20°	30°	0°	10°	20°	30°	0°	10°	20°	30°
33b ²⁾	29	x			ox				ox				ox				ox
	(28)								ox								
26e	29								xo								
	(28)								ox								
33c	27	x			ox				ox				ox				ox
44e	21								xo				x-o				ox
	(19.5)								ox								ox
21b	20								ox				xo				ox
35a	17								ox				ox				ox
	(17)								ox								ox
26c	16								xo				x-o				ox
	(14)								x-o								ox
40b	9	x-o							ox				ox				ox
44c	16	x-o							xo				xo				ox
44d	11.5	x-o							xo				ox				ox
39	21			x-o					x-o				x-o				ox
33a	8								x-o				ox				ox
22b	0												ox				ox
30a	3.5								xo				ox				ox
22a	11.5																ox
35b	11	x-o							x-o				x-o				ox
31a	6								x-o				x-o				ox
40a	1								x-o				x-o				ox
42	0	ox							ox				ox				ox
25a	-3								ox				ox				ox
53a ³⁾	26								ox								ox

图 4 不同取向的样品, 在不同温度拉伸后, 外观滑移面的位置 (x), 和包含 $\langle 111 \rangle$ 方向并受到最大分切应力晶面的位置 (o)。

- 1) 其中 42 和 35b 在 -50°C 拉伸。
- 2) 第二排括号内的数据是交滑移, 外观滑移面在 $\langle 101 \rangle$ — $\langle 211 \rangle$ 之间, 滑移方向是 $[111]$ 。
- 3) 样品 53a 的外观滑移面是 $\langle 112 \rangle$, 滑移方向是 $[111]$ 。

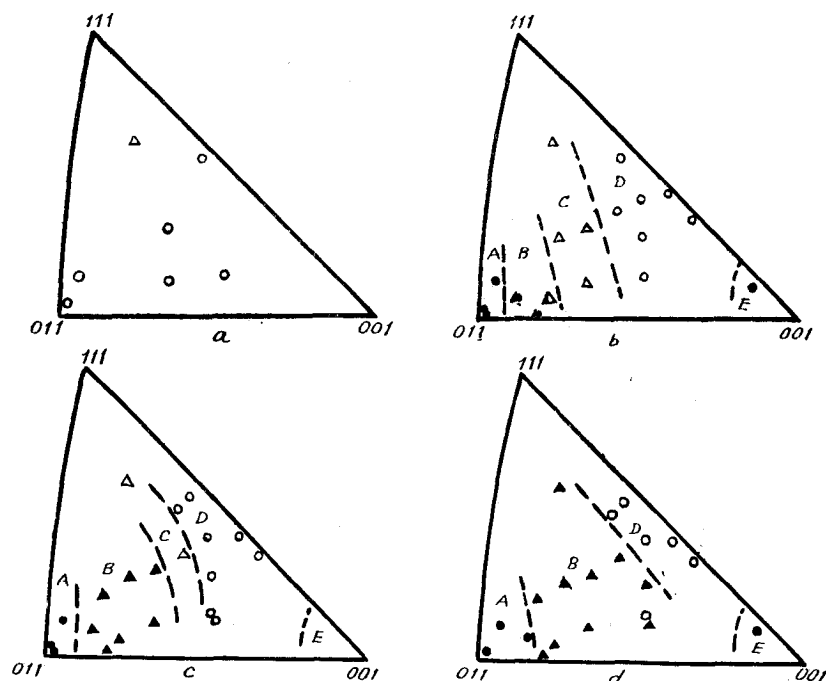


图5 分别属于 $\{110\}$ 、 $\{145\}$ 、 $\{123\}$ 和 $\{112\}$ 滑移痕迹的样品,它们的取向分布随变形温度不同而变化的图形。

○——滑移痕迹在 $\{110\}$ 区间的样品; ▲——滑移痕迹在 $\{123\}$ 区间的样品;
 △——滑移痕迹在 $\{145\}$ 区间的样品; ●——滑移痕迹在 $\{112\}$ 区间的样品。
 a, 在 -80°C (-50°C)拉伸; b, 在 27°C 拉伸; c, 在 1000°C 拉伸; d, 在 $\sim 2000^{\circ}\text{C}$ 拉伸。

和 $\{145\}$ 区间内。随着形变温度改变,这几个区域的界线 and 大小也会发生变动。B区随形变温度升高而扩大,并向 $\langle 111 \rangle - \langle 001 \rangle$ 线方向移动;C区随形变温度升高,也向着 $\langle 111 \rangle - \langle 001 \rangle$ 线方向移动,但范围逐渐变窄,在高温($\sim 2000^{\circ}\text{C}$)拉伸时,这区域就不再存在。随形变温度升高A区略有扩大,D区则显著缩小。E区数据较少,它随形变温度改变时将如何变化,还不能作出判断。另外E区和D区间如何过渡?取向靠近 $\langle 111 \rangle$ 角的样品的情況怎样?都还有待研究。从以上结果来看,当形变温度变化时,由滑移痕迹所测出的外观滑移面可能改变,也可能不改变,这要由样品的取向来决定,不能一概而论。

取向在上述范围内的样品,在室温及低于室温的温度拉伸后,并未观察到形变孪晶,这与铁、钨单晶的行为有所不同。

2. 形变温度及样品取向对滑移痕迹外貌的影响

图6是42样品在不同温度拉伸断裂后,从a、b、c不同方向观察时的滑移痕迹情况,其中a方向是从垂直于应力轴和滑移方向构成的平面去观察;c方向是从平行于应力轴和滑移方向构成的平面去观察;b方向则介于a、c之间,如图1所示。随着形变温度升高,单位长度内滑移带的数量减少,滑移量增加。在变形量大的地方,还可以观察到形变带的结构。样品在 150°C 拉伸后的滑移痕迹,已经比室温(27°C)拉伸的滑移痕迹显得清楚。从a方向观察时,滑移痕迹很直;从c方向观察时,滑移痕迹就成为不规则的波纹状,在较高温度拉伸时成为树枝叉状。这是体心立方金属滑移痕迹外貌的一般特征,在不同

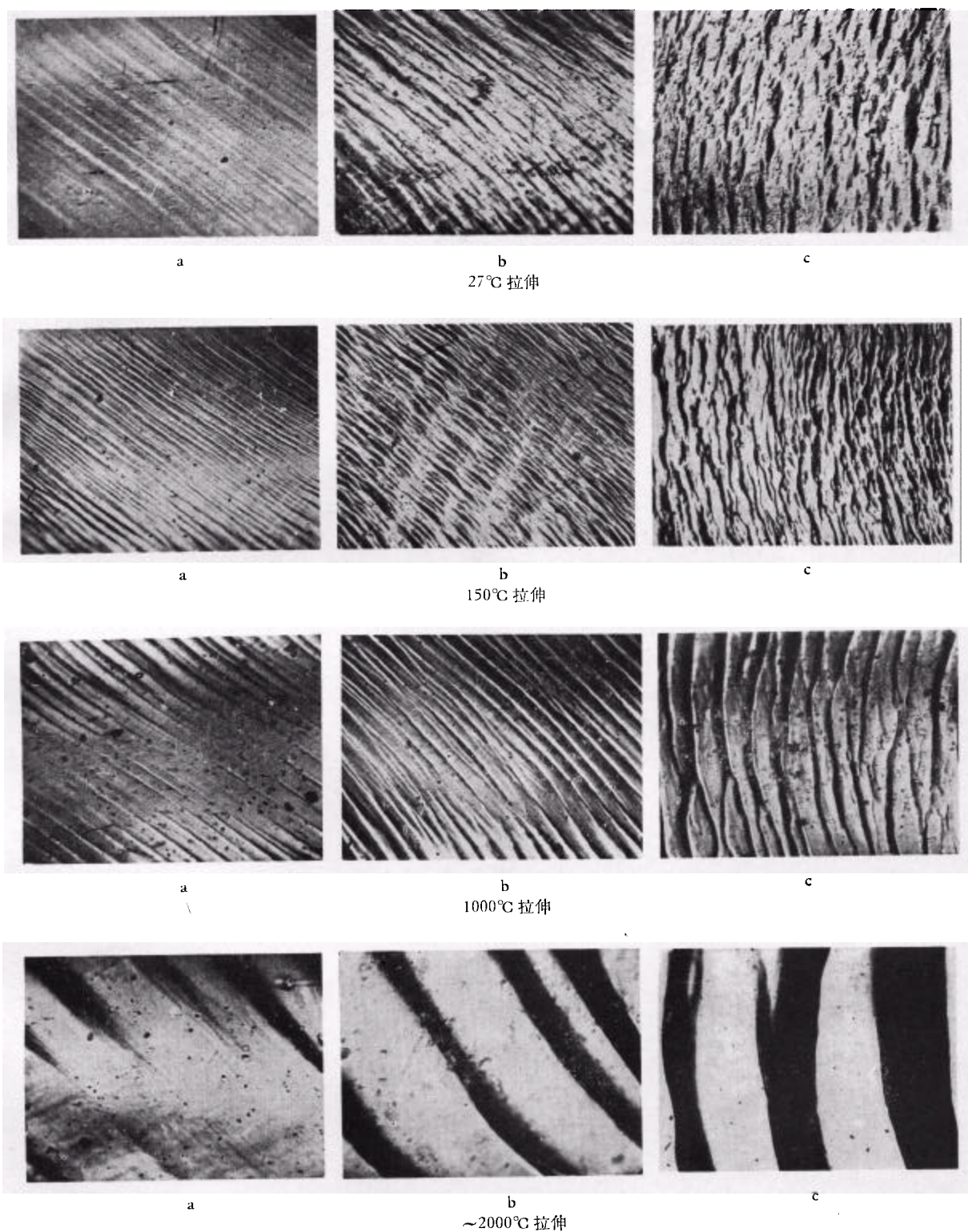


图6 样品 42 在不同温度拉伸后,从 a、b、c(如图 1 中所指示的方向)不同方向观察到的滑移痕迹, $\times 320$

取向的絕大多数样品中,無論它們的外观滑移面是 $\{110\}$ 、 $\{123\}$ 还是 $\{112\}$,都是如此,但是外观滑移面为 $\{110\}$ 的样品中,也有个别样品不同,我們发现取向在靠近 $\langle 111 \rangle$ — $\langle 001 \rangle$ 綫,距离 $\langle 001 \rangle$ $20^\circ \sim 25^\circ$ 的40a和25两个样品,在室温拉伸后,从c方向观察时滑移痕迹清晰可見,并不成波紋状(如图7). 在室温拉伸后,研究了外观滑移面都是 $\{110\}$ 的10个样品,它們的取向分布如图8所示. 在图中用“ $\otimes$ ”符号表示从c方向观察时,滑移痕迹清晰的样品;用“ $\circ$ ”符号表示滑移痕迹成波紋状的样品. 从图中可以看到,从c方向观察时,滑移痕迹清晰的样品,它們的取向分布在一个非常狹窄的范围内,只有在經過仔細研究后,才能被发现,这可能和样品的取向有关.

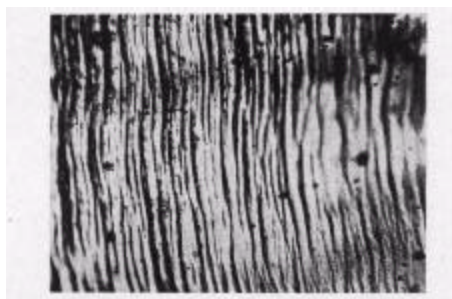


图7 样品25在 27°C 拉伸后,从c方向观察到的滑移痕迹. $\times 320$

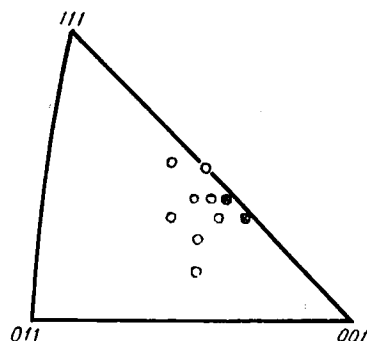


图8 滑移痕迹都是 $\{110\}$ 的10个样品.
 $\otimes$ ——从c方向观察时,滑移痕迹清晰的样品;
 $\circ$ ——从c方向观察时,滑移痕迹成波紋状的样品.

样品在室温及低于室温的温度拉伸后,从c方向观察时,还可以看到一种极不規則、間断的痕迹如图9a,这种痕迹在室温拉伸后也可观察到,但比較少. 在低于室温的温度拉

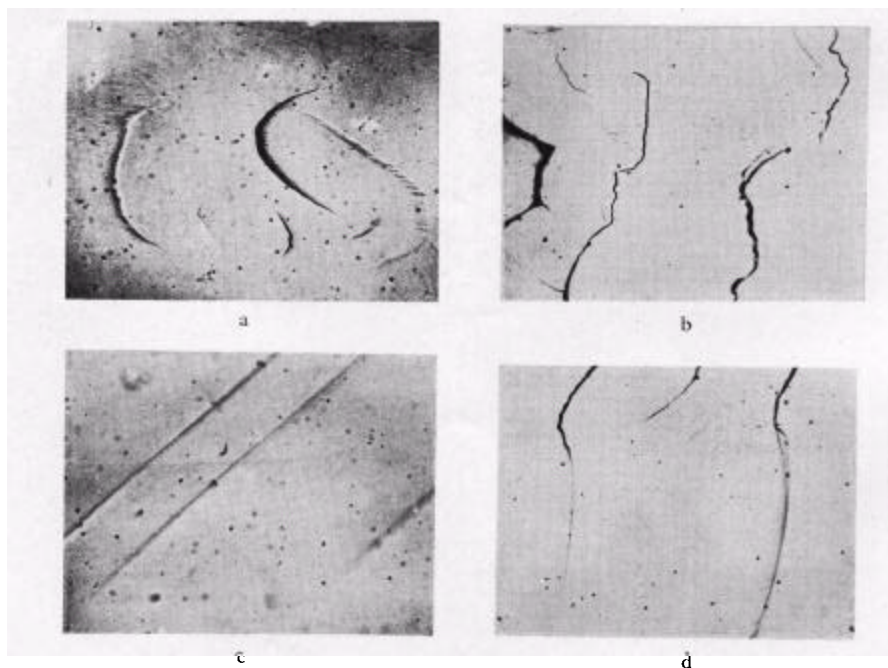


图9 样品33c在 -80°C 拉伸后的 $\{110\}$ 滑移痕迹,和不規則的其他痕迹. $\times 320$

伸后較多,取向在 A、B 区間的样品(指图 5b 中的 A、B 区間來說)較多,取向在 D 区間的样品較少。外觀滑移面是 $\{112\}$ 的 33c 和 33b 两个样品,在 -80°C 拉伸时,这种不規則的痕迹有的还成鋸齿状(图 9b),除了这种不規則的痕迹和比較模糊的 $\{112\}$ 滑移痕迹外,还有清楚毕直的 $\{110\}$ 滑移痕迹(图 9c),有时 $\{110\}$ 滑移痕迹还可以和另一种高指数晶面的痕迹相連(图 9d),并且高指数晶面的痕迹带有鋸齿状,也显得較寬。

在室温拉伸时,外觀滑移面落在 $\{145\}$ 区間的样品,如 44d 和 40b,在 -80°C 拉伸时,外觀滑移面改变为 $\{110\}$,从 c 方向观察到的滑移痕迹,也变得比較清楚(图 10)。

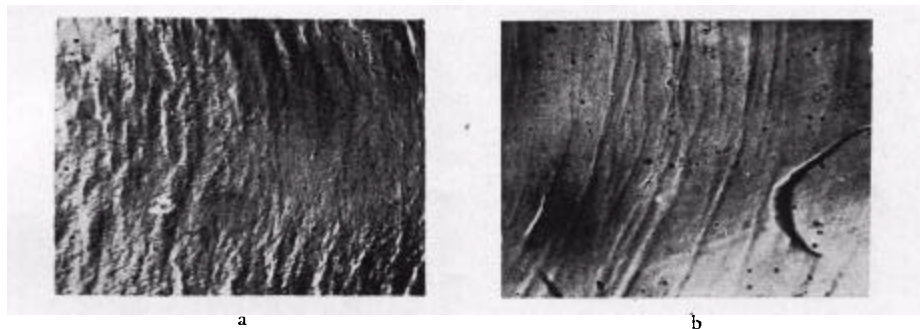


图 10 样品 44d 在 27°C (a) 和 -80°C (b) 拉伸后,从 c 方向观察到的滑移痕迹。 $\times 320$

3. 样品 33c 在不同温度拉伸后的劳埃星芒

用細焦点 X 射线源照象,研究了样品 33c 在 22°C 和 1000°C 拉伸 $8\sim 10\%$ 后的劳埃星芒。样品在 22°C 拉伸后,外觀滑移面是 (211) (图 11),其次还有不太清楚的 $(\bar{2}11)$ 交滑移痕迹。在 1000°C 拉伸后,并无交滑移产生,外觀滑移面是 (211) 。如果滑移确是在 (211) 面上,那么由于滑移后引起的晶格弯曲,它們的轉动軸将是与滑移方向 $[\bar{1}11]$ 相距 90° ,并在 (211) 面內的 $[0\bar{1}1]$ (图 11)。从劳埃照片中也應該观察到 $(0\bar{1}1)$ 劳埃斑点是比較完整的,而其它劳埃斑点則將繞 $(0\bar{1}1)$ 斑点发生伸长,产生劳埃星芒。样品 33c 在 22°C 拉伸后,得到的劳埃照片如图 12a、b,在图 12a 中, $(\bar{1}00)$ 劳埃斑点及其周围的劳埃斑点的星芒分成三支;在图 10 b 中的 $(0\bar{1}1)$ 劳埃斑也是破碎的,在它周围劳埃斑点的星芒也分成多支。

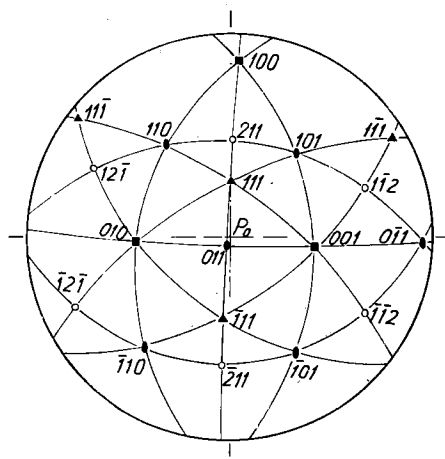


图 11 样品 33c 的标准极图。 p_0 ——样品軸

从这两张劳埃照片中,可以看出晶体在滑移后所引起晶格弯曲的轉动軸,肯定不只一个,而是几个;它們不是 $[0\bar{1}1]$,而是接近 $[12\bar{1}]$ 、 $[1\bar{1}2]$ 和 $[\bar{1}2\bar{1}]$ 。因此可以判断滑移不是真正在 (211) 面上发生,而可能是在 (110) 、 (101) 、 $(\bar{1}10)$ 和 $(\bar{1}01)$ 面上发生。 (211) 和 $(\bar{2}11)$ 滑移痕迹只是一种外觀的面貌。这比过去观察到的結果^[3]更为清楚。样品 33c 在 1000°C 拉伸后得到的劳埃照片如图 12c、d,这时劳埃星芒并没有分支現象, $(0\bar{1}1)$ 劳埃斑点也比較完整,其他劳埃斑点都繞 $(0\bar{1}1)$ 斑点发生伸长,产生星芒。晶体在滑移后引起的晶格弯曲,它的轉动軸是 $[0\bar{1}1]$,这时滑移可以看作是在 (211) 面上进行。

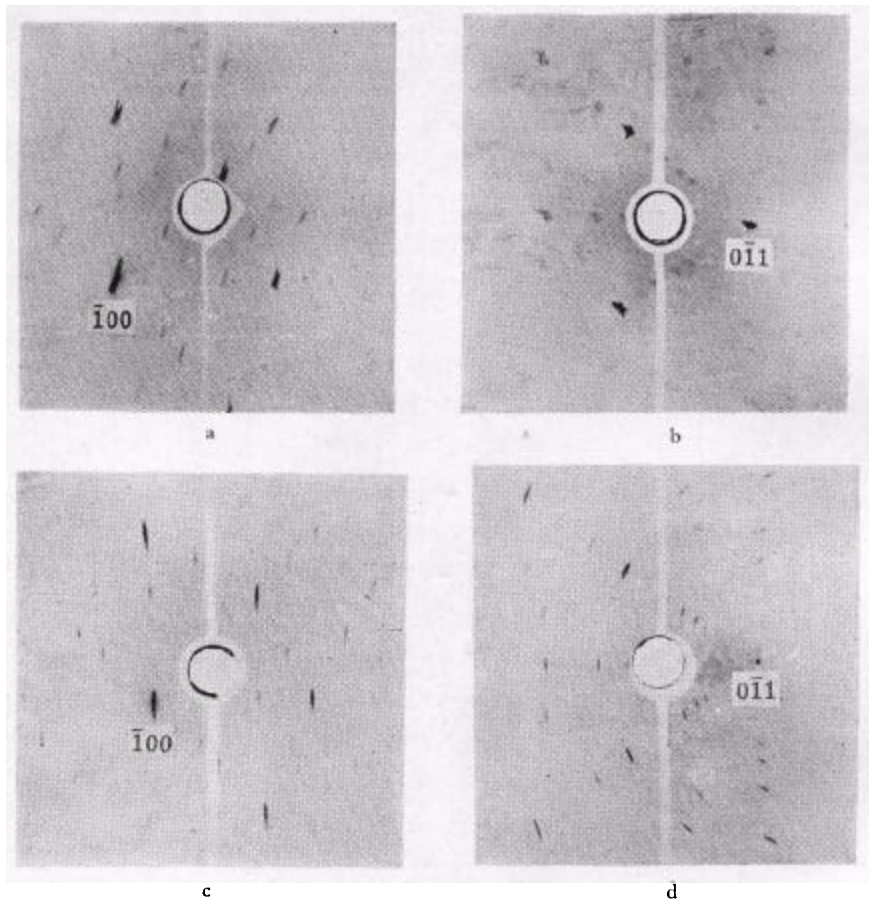


图 12 样品 33c 在不同温度拉伸后的劳埃照片。a, b, 在 22°C 拉伸; c, d, 在 1000°C 拉伸。

4. 温度对临界切应力和延伸率的影响

图 13 是样品 35 b 和 42 在 -50°C 到 150°C 拉伸时, {110} 面的临界切应力随温度的变化

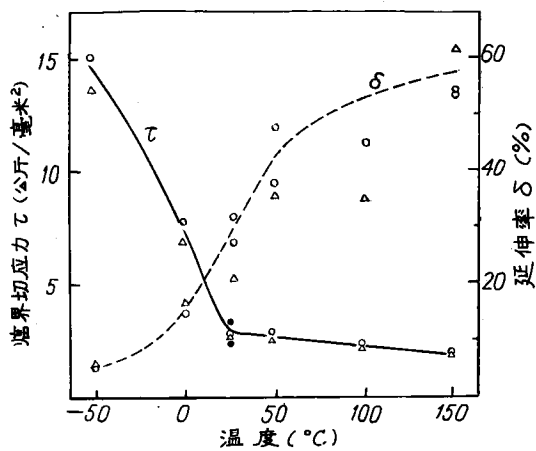


图 13 形变温度对临界切应力和延伸率的影响。

△——样品 35b; ○——样品 42;
●——样品 40a 和 31a。

化和延伸率随形变温度的变化。在低于室温拉伸时,随形变温度降低,临界切应力迅速上升。但在高于室温一直到 150°C 拉伸时,临界切应力的变化却不大。这和铁单晶中所得到的结果相似^[5-7]。随形变温度降低,样品的延伸率

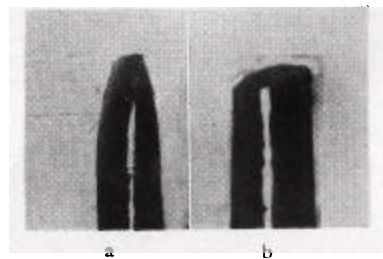


图 14 样品 42 在 0°C (a) 及 -50°C (b) 拉伸后的断口照片。×15

也随着降低,在 0°C 拉伸时,断面收缩率仍可达到 100%,但在 -50°C 拉伸时,则表现为脆性断口。图 14 是样品 42 在 0°C 及 -50°C 拉伸后的断口照片。从延伸率及断面收缩率来看,单晶体也有一个脆性转变温度,但不如多晶样品明显。

四、结果讨论

1. 鉍单晶体的滑移机构

由于 (101) 面、 (312) 面和 (211) 面非常接近,如果考虑到实验误差而把由滑移痕迹测出的外观滑移面归并成 $\{110\}$ 、 $\{123\}$ 、和 $\{112\}$,容易造成粗糙的结果。即使这样,也还有一些样品的外观滑移面不能归并在内。这不仅在鉍单晶的试验结果中如此,在过去研究铁单晶的结果中,也有相似的困难^[5,6]。另一种意见认为滑移是在包含着 $\langle 111 \rangle$ 方向,并受到最大分切应力的“非晶体学面”上进行,这与以上实验结果也不符合。如果我们用包含着 $\langle 111 \rangle$ 的最大切应力面和 (101) 面之间夹角 χ ,以及外观滑移面和 (101) 面之间的夹角 ψ 为坐标,将每一样品的 χ 和 ψ 画入图 15 中,从图 15 中可以看出,除了在 χ 等于 0° 、 30° 附近时, ψ 大致也等于 0° 、 30° 外,其他点子分布相当杂乱,并不存在任何规律。

分析样品 33c 在不同温度拉伸后用 X 射线和金相研究所得到的结果来看,我们认为滑移还是在密排的 $\{110\}$ 面上发生,而观察到的 $\{112\}$ 、 $\{123\}$ ……等滑移痕迹,是由于在两组不平行的 $\{110\}$ 面上,沿着同一个 $\langle 111 \rangle$ 方向滑移时构成的外观面貌。这样,也可以很好地解释从 c 方向观察到成波状纹的滑移痕迹。这种滑移方式,与最早提出的“铅笔式”滑移不同,它有固定的滑移面,我们称这种滑移方式为“组合滑移”。Low 等^[15]用腐蚀技术观察铁硅合金单晶受弯曲后,在 $\{110\}$ 滑移面内位错圈的情况,给这种滑移机构提供了位错运动的图象。他们观察到位错圈的螺型位错部分,常常滑出由刃型位错部分构成的滑移面,而造成一段短小并倾斜的刃型位错,当这组位错运动出表面后,构成的滑移痕迹,从滑移方向方面来观察,就不是直线,而成曲折状。考虑到刃型位错的能量,我们有理由相信这一段短小倾斜的位错,最大可能是在另一组密排的 $\{110\}$ 面内,分别在这两组 $\{110\}$ 面上的两段刃型位错的长短,除了与这两组 $\{110\}$ 面所受到的分切应力大小有关外,还可能受到形变温度和形变速度的影响。当这两段刃型位错足够长时,从 c 方向将可观察到波状纹或锯齿状的滑移痕迹,劳埃斑点的星芒也会分成多支,这可以用来说明样品 33c 在室温拉伸后劳埃星芒分支的现象(图 12a),以及样品在 -80°C 拉伸后所观察到成锯齿状的不规则痕迹(图 9b)。如果当这两段刃型位错足够短时,从 c 方向观察到的滑移痕迹也会变得比较清楚,劳埃星芒

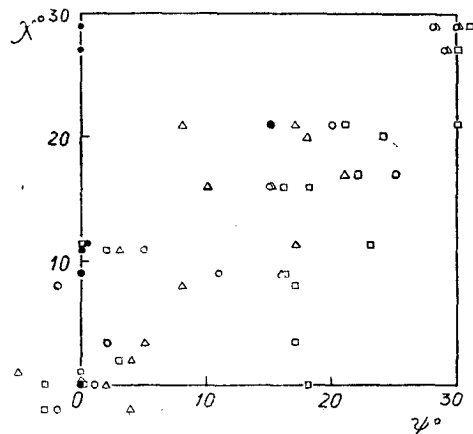


图 15 不同取向的样品,在不同温度拉伸后, χ 和 ψ 之间的关系。

χ : 包含 $\langle 111 \rangle$ 方向并受到最大分切应力的晶面和 (101) 面之间的夹角。

ψ : 外观滑移面和 (101) 面之间的夹角。

● — -80°C (-50°C) 拉伸;

○ — 27°C 拉伸;

△ — 1000°C 拉伸;

□ — $\sim 2000^{\circ}\text{C}$ 拉伸。

也就不再成分支状,这可用来说明样品 33c 在 1000℃ 拉伸后的情况(图 12c)。Steijn^[6]等研究铁单晶在室温拉伸后,在出现{112}滑移的样品中,并没有观察到分支的劳埃星芒,这可能与形变温度有关,因为铁的熔点比铝低,如果铁单晶能在更低一些的温度拉伸,在出现{112}滑移的样品中,或许也能观察到分支的劳埃星芒。

从这种观点出发,也容易理解当晶体取向改变时由滑移痕迹决定的外观滑移面也会改变的事实。当取向靠近 $\langle 011 \rangle$ — $\langle 111 \rangle$ 线和 $\langle 001 \rangle$ 角的样品,由于滑移面{110}的分布,对应力轴是对称的,各组{110}面上的分切应力大致相等,因此可以在两组{110}面上,或者四组{110}面上作均等的组合滑移,而构成{112}滑移痕迹。随着晶体取向偏离上述区域,{110}面的分布对于应力轴的不对称性增加,各组{110}面上的分切应力也变为不相等,组合滑移在两组或四组{110}面上由均等分配变为不均等分配,因而出现{123}、{145}……一直到{110}的滑移痕迹。当大部分的滑移被限制在一组{110}面上时,即使在室温拉伸,从c方向观察到的滑移痕迹也会是清楚的,样品 25 和 40a 就可能属于这种情况(图 7)。最早,钱临照和周如松先生^[2]研究铝单晶体在室温拉伸时只观察到{112}的滑移痕迹;在 1000℃ 拉伸时,只观察到{110}的滑移痕迹。以及后来陈能宽先生^[4]研究铝单晶体在 2000℃ 拉伸时,只观察到{110}的滑移痕迹,这可能是受到了样品取向局限的缘故。

从位错观点来看组合滑移的发生,螺位错的运动将起重要的作用。螺位错运动时相互交割,会产生一排空穴或间隙原子,因此温度条件对螺位错运动的影响将比刃型位错的影响更显著。在高温时,螺位错运动较易;低温时,螺位错运动较难。由于组合滑移将受到温度条件的影响,所以外观滑移面也会因形变温度不同而发生改变。低温时,发生组合滑移困难,所以样品 33c 和 33b 在 -80℃ 拉伸时,出现了清楚的{110}滑移痕迹;在高温时,发生组合滑移容易,因而样品 33c 和 33b 在室温及高温拉伸时,只有{112}滑移痕迹。相同的道理,也可以说明样品 44d 和 40b 在 -80℃ 拉伸时,滑移痕迹是{110};在室温拉伸时滑移痕迹是{145};而在 1000℃、2000℃ 拉伸时,滑移痕迹又变成{123}的现象。

2. 铝单晶体在较低温度拉伸时的滑移和脆性断裂

样品在室温及低于室温的温度拉伸后,从c方向观察到如图 9 这种极不规则的痕迹,在室温拉伸后,这种痕迹虽然很少,但是也可以观察到,这时样品有非常好的范性。当样品在低温拉伸,产生这种痕迹后,再在室温拉伸,断面缩减率仍可达到 100%。从以上现象来看,可以初步判断它不是裂纹,而可能是属于滑移痕迹。

样品在受到拉伸应力时,在几组{110}面上的分切应力虽然有一定的比例,但由于变形温度降低,造成螺位错运动困难,这时组合滑移很可能并不按比例,而是任意的在两组{110}面上发生,因而出现极不规则的滑移痕迹。这样,也可以理解这种不规则滑移痕迹的多少,与样品取向也有关系的现象。从痕迹外貌来看,造成这样大的滑移量,必然是由于大量刃型位错运动出表面的结果;滑移痕迹是间断的,则表示大量螺位错被塞积住。这种痕迹的出现,是体心立方金属在低温变形时所共有的现象呢?还是铝单晶中所独有的现象?现在还不十分清楚,不过从螺位错被塞积的情况来看,这种痕迹的出现,和裂缝产生和脆性断裂,很可能有直接的联系。这是一个有兴趣而待研究的问题。

五、結 論

1. 鉬单晶体样品在室温拉伸后, 由于样品的取向不同, 外观滑移面可以在 $\{110\}$ — $\{112\}$ 之间的任何位置, 滑移方向都是 $\langle 111 \rangle$ 。

2. 同一个取向的鉬单晶样品, 在不同温度拉伸时, 外观滑移面可能改变, 也可能不改变, 这要由样品的取向来决定, 滑移方向则始终是 $\langle 111 \rangle$ 。

3. 取向在靠近 $\langle 111 \rangle$ — $\langle 001 \rangle$ 线, 距离 $\langle 001 \rangle 20^\circ \sim 25^\circ$ 范围内的样品, 在室温拉伸后, 从 c 方向 (图 1) 观察时, 可以看到清楚的滑移痕迹, 而其他取向的样品在室温拉伸后, 从 c 方向观察时, 滑移痕迹成波状, 在高温拉伸后成树枝叉状。

4. 出现 $\{112\}$ 滑移痕迹的鉬单晶样品, 在较低温度 (22°C) 拉伸后, 从 X 射线劳埃照片中可以看到分支的劳埃星芒; 但在高温 (1000°C) 拉伸后, 就看不到这种现象。

5. 在拉伸变形后的鉬单晶中, 观察到的 $\{112\}$ 、 $\{123\}$ 、 $\{145\}$ ……等滑移痕迹, 可能是由于在两组 (或四组) $\{110\}$ 面内, 沿着同一个 $\langle 111 \rangle$ 方向滑移后构成的外貌, 称为“组合滑移”。

6. 形变温度对鉬单晶在 $\{110\}$ 面上临界切应力的影响, 与在铁单晶中得到的结果相似。低于室温时, 随着形变温度降低, 临界切应力迅速增加; 但变形温度从室温变化到 150°C 时, 温度对临界切应力的影响并不大。

本文曾請錢臨照教授和李恆德教授审阅, 并提出了宝贵的意见, 作者深表感谢。

参 考 文 献

- [1] Maddin, R. and Chen, N. K. (陈能宽), *Progress in Metal Physics*, **5**, 66—84.
- [2] Tsien, L. C. (錢臨照) and Chow, Y. C. (周如松), *Proc. Roy. Soc.*, **A 163** (1937), 19.
- [3] Chen, N. K. (陈能宽), and Maddin, R., *Trans. A.I.M.E.*, **191** (1951), 937.
- [4] Maddin, R. and Chen, N. K. (陈能宽), *Trans. A.I.M.E.*, **200** (1954), 280.
- [5] Vogel, F. L. and Brick, R. M., *Trans. A.I.M.E.*, **197** (1953), 700.
- [6] Steijn, R. P. and Brick, R. M., *Trans. A.S.M.*, **46** (1954), 1406.
- [7] Allen, N. P., Hopkins, B. E. and Meleman, J. E., *Proc. Roy. Soc.*, **A 234** (1956), 221.
- [8] Cox, J. I., Honne, J. and Mehl, R. F., *Trans. A.S.M.*, **49** (1957), 118.
- [9] Barrett, C. S., Ansel, G. and Mehl, R. F., *Trans. A.S.M.*, **25** (1937), 702.
- [10] Opinsky, A. and Smoluchowski, R., *J. Appl. Physics*, **22** (1951), 1488.
- [11] Schadler, H. W., *Trans. A.I.M.E.*, **218** (1960), 649.
- [12] Leber, S. and Pugh, J. W., *Trans. A.I.M.E.*, **218** (1960), 791.
- [13] Andrade, C. and Chow, Y. S. (周如松), *Proc. Roy. Soc.*, **A 173** (1940), 290.
- [14] Chen, N. K. (陈能宽), Maddin, R. and Pond, R. B., *Trans. A.I.M.E.*, **191** (1951), 461.
- [15] Low, J. R. and Guard, R. W., *Acta Met.*, **7** (1959), 171.

A STUDY OF THE PLASTIC DEFORMATION OF SINGLE CRYSTALS OF MOLYBDENUM

CHOU PANG-HSIN

ABSTRACT

Twenty four single crystals of molybdenum of different orientations after extension at -80°C (-50°C), 27°C , 1000°C and $\sim 2000^{\circ}\text{C}$ were investigated. From a study of metallographic and X-ray diffraction results, it was found that the slip traces, $\{112\}$, $\{123\}$, $\{145\}$ etc., may be interpreted as conjugate slip in two nonparallel $\{110\}$ planes along the same $\langle 111 \rangle$ direction. The appearance of slip traces was different for different orientations of specimen. At different temperatures of extension, the appearance of slip traces of the same specimen orientation may be the same or different depending on the specimen orientation.