
金属塑性变形

第二卷

中国工业出版社

75
160
:2

金属塑性变形

第二卷

塑性的物理-化学理论

[苏联] С. И. 古勃金 著

高文馨 康源直 译 聶国珊 校

中国工业出版社

《金属塑性变形》一书分三卷出版。本册是第二卷《塑性的物理-化学理论》。书中叙述了塑性的物理-化学理论基础。描述了单晶体和多晶体的各种塑性变形机理的特点。根据现代的物理-化学概念，研究了金属压力加工时各种因素对塑性和变形抗力的影响。引用了关于接触摩擦对塑性变形过程的影响的简要知识。

本书供科学工作者和工程技术人员参考，也可供冶金和机器制造高等工业学校的师生阅读。

С.И. Губкин
ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ
МЕТАЛЛОВ

Том II

Металлургиздат 1960

* * *

金属塑性变形

第二卷

塑性的物理-化学理论

高文馨 康源直译 聶国珊校

*

冶金工业部科学技术情报产品标准研究所书刊编辑室编辑

(北京灯市口71号)

中国工业出版社出版 (北京德胜门内大街10号)

北京市书刊出版业营业登记证出字第110号

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经销

*

开本850×1168¹/₃₂·印张12·字数296,000

1965年4月北京第一版·1965年4月北京第一次印刷

印数0001—4,170·定价(科六)1.80元

*

统一书号: 15165·3828 (冶金-604)

目 录

第一章 塑性变形机理及其基本特点

1. 塑性物理-化学理论的实质	1
2. 弹性变形机理	2
3. 塑性变形机理	7
4. 硬化(加工硬化)	39
5. 塑性过程条件	64
6. 塑性变形对金属性能变化的影响	78
7. 塑性变形时的相变	90
8. 热效应	99
9. 化学成分对变形抗力和塑性的影响	106
10. 状态图的力学解释	117
11. 存在液相时的塑性变形	125

第二章 塑性和变形性

1. 固体物质流变行为的变形标志	127
2. 塑性	136
3. 塑性的基本因素	154
4. 比例尺因素对塑性和变形抗力的影响	171
5. 物理-力学状态图	178
6. 提高塑性的基本途径	183
7. 对塑性的估计	194
8. 变形性	218

第三章 塑性变形抗力和接触摩擦

1. 塑性变形抗力	246
2. 硬化曲线	258

07874

IV

3. 静水压力对塑性变形抗力的影响	312
4. 温度对塑性变形抗力的影响	321
5. 变形速度对塑性变形抗力的影响	331
6. 固体的流动性	349
7. 接触摩擦	351
参考文献	374

17810

第一章 塑性变形机理及其基本特点

1. 塑性物理-化学理论的实质

塑性变形作为改变金属物质性能的方法，具有很多特点。最重要的特点是变形物体結晶組織的轉变。

在一定的变形条件和热处理条件下，組織的轉变会引起性能的重大变化。在某些情况下（例如，当对耐振强度或疲劳提出很高要求时），除塑性变形外，用任何其他方法都不可能使物质得到所需的性能。

塑性物理-化学理論的最重要任务，是控制硬化、回复、再結晶和相变的过程，以使金属物质得到所要求的性能。这时，应当主要注意变形物体的化学成分。为了控制塑性变形这一改变物质性能的方法，必須知道塑性指标和变形抗力随物质的化学成分和組織变化的規律性。

塑性变形是一种物理-化学过程，在这种过程中起主导作用的是在应力状态作用下的定向自扩散和定向扩散。物体形状的不可逆变化和物体各个单元間联系的破坏，属于力学效应，它是伴随塑性变形发生的。依变形条件不同，联系的破坏程度或大或小。联系破坏的最終結果，基本上取决于物质的化学成分。这时应该考虑到，能够作为組元和杂质的，不仅有金属的，而且有其他元素和化合物。

化学成分对变形物体的破坏特性有决定性的影响。不弄清破坏的本质及其規律性，就很难了解塑性变形过程，因为破坏是它的最后阶段。破坏本质的知識不足，是因为对于化学鍵和化学成分的本质对金属物质破坏的特性和动力学的影响，缺乏应有的注意。

由于采用了具有很多特点的新合金，就必须有新的加工方法。例如，用压力加工方法加工在通常条件下很脆的合金。当用变形方法制造厚度以微米来测量的制件时，象表面与体积之比这样的因素，具有很大意义。

实际上，解决这些问题，正象解决在塑性变形时与接触摩擦有关的问题一样，与表面现象的物理-化学有关。要弄清润滑剂和表面氧化物对变形抗力和变形物体质量的影响，也不断地与物理-化学发生关系。

解决在接近熔点的高温下应用变形的問題，与周围介质对变形物体塑性的影响密切相关，并且需要引用物理-化学的研究方法。

在拟定现代变形理论时，仅仅依据物理-化学的基本原理，就能够弄清象外摩擦、周围介质、变形速度、平均应力、静水压力和温度这样一些因素的影响，提出“塑性”概念的根据，并拟定有科学根据的估计塑性的方法。

还可以举出更多的例子来说明，许多最重要的塑性变形问题，倘若不用现代物理-化学，都是不可能解决的。

2. 弹性变形机理

为了使物质流动，就必须使它的动力学单位（对金属物质来说为原子）得到足以克服位垒的活化能。应该把原子的活化状态与自由状态（力学稳定状态）区别开来。

在自由状态（力学稳定状态）下，原子的位能是最小的，因为它们之间的斥力和吸力相互平衡。因此原子占据着完全一定的位置，它相应于稳定平衡。可以形象地表述：这时的原子是处

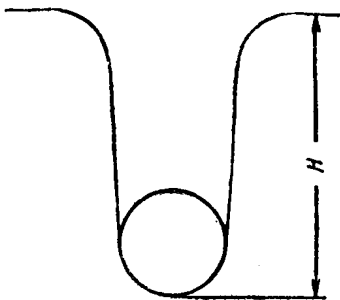


图 1 原子在位阱底部的示意图

于位阱底部(图1)。对于每一种具体情况,位阱的图形和尺寸都可以计算出来。这种计算基本上是根据显微弹性变形理论进行的〔9〕。这个理论考虑了在介质(在这种情况下为结晶介质)的显微区域内发生的原子的力学相互作用。显微弹性变形理论能解释许多对金属合金理论有直接关系的现象。例如,这个理论在个别情况下能解释某种类型的空间点阵存在的原因。图2所示为铜的自由能与剪切变形的关系曲线,它指出了体心立方点阵的不稳定性。K.甄纳〔9〕把铁在高温下的同素异形转变与 $\frac{1}{2}(C_{11}-C_{12})$ 的低值联系起来。

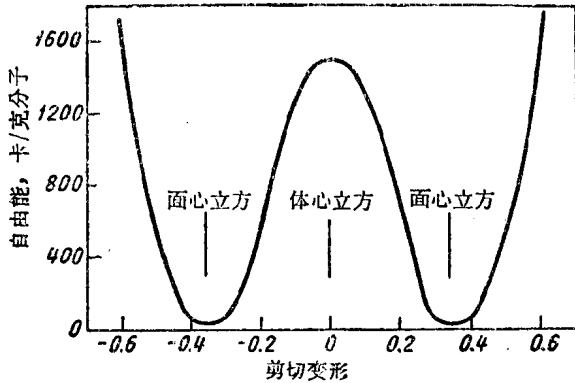


图2 铜的自由能与剪切变形的关系曲线〔9〕

在外力作用下,原子的稳定位置被破坏(在自己的位阱中升起),这时物体的位能增加(图3)。物体这种状态的外部效应是尺寸和形状的变化。原子力求回到平衡位置;偏离越大,这种趋向也越大,并且物体承受着应力状态。变形物体每一点的应力状态都可以用应力张量来描述。同一点范围内的变形状态用变形张量来描述。变形张量与应力张量之间的关系用虎克定律来确定,因为所研究的是弹性变形状态。当从物体上解除外力作用

● C_{11} 和 C_{12} —各向异性介质的弹性系数。

时，原子回到稳定平衡状态，而位能降到最小值。结果，物体恢复了原始形状。

这样，弹性变形机理就是原子偏离稳定平衡位置，但是在这样一个必要条件下：偏离原子被包围的情况还保持着。后一条件很重要，因为它确定了弹性变形与塑性变形之间的联系。

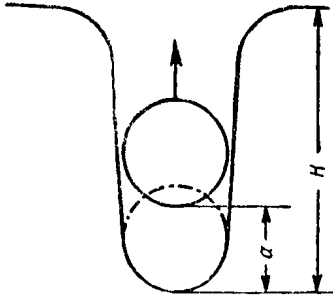


图 3 原子偏离稳定平衡位置

物体的弹性形变越大，原子的活化程度也越大。最后，位能达到这样一个数值，它足以使原子从它的位阱中，亦即从其他原子的一定包围中跳出。跳出的原子照例不再回到原来的位置；它

将沿着弹性变形状态场矢量所确定的方向移动，直到落入空着的位阱中或卡在其他原子之间（落入结点间）为止。在后一种情况下，原子会发生局部的附加扰动。这时在结晶点阵中发生局部畸变，并且作为畸变的结果，发生相互平衡的内力。后者在物体卸载后保留下来，因此在物体内部保留有残余应力。

原子从一个稳定平衡位置向另一个稳定平衡位置的转移是不可逆的，并且应当看作是塑性变形的最初级行动。

自扩散的初级行动也是原子从一个稳定平衡位置向另一个稳定平衡位置的转移。但是物体形状和尺寸的塑性变化只能在下述情况下发生，即在大量原子参加下，原子的转移是多次的和定向的。因此把大量原子从一个稳定位置向另一个稳定位置的一次定向转移作为塑性变形的初级行动，是合乎逻辑的。单位时间内的移动原子数确定着塑性流动速度。

原子跳出前应当先对稳定平衡位置偏离某一距离。这样，定向跳出只能在弹性变形介质内实现。跳出后还未转移到新位置的原子处于一种特殊状态。这种原子可以形象地表示为“卡”在位垒顶部了（图 4）。这种位置相应于形状和尺寸的不稳定塑性变

化。当物体卸载时，处于上述状态的大多数原子逐渐回复到稳定位置，因而物体的尺寸和形状被恢复。少数原子转移到新的稳定平衡位置，这就使具有稳定特性的形状和尺寸产生相应的不可逆变化。

虎克定律表示应力与变形之间的线性关系。研究原子之间的相互作用力可得出结论：线性关系是近似的〔1〕。

金属在预塑性区域内的弹性变形不仅是一个应力的函数。它也取决于温度、固溶体的有序程度、磁场的变化及其他原因。

弹性变形能引起相应显微区域的温度变化。结果发生温度起伏弛豫(均衡化)，它是通过某些原子从一个稳定位置向另一个稳定位置的定向转移来实现的。这样，温度起伏弛豫与预塑性区域的非弹性现象有关。

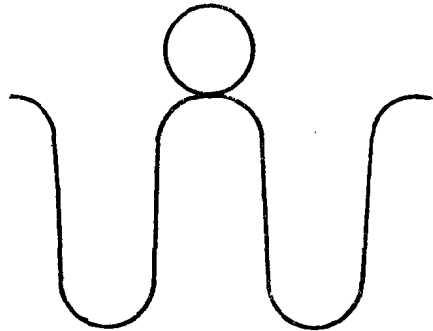


图 4 在位垒顶部的原子

如果假定弹性变形只取决于两个因素：应力和由于施加应力状态而引起的温度变化，那么弹性变形的数值可用下列公式来确定：

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{M_R} + \lambda \Delta T, \quad (1)$$

式中 M_R ——弛豫弹性模数，也叫“等温模数”；

λ ——热膨胀系数；

ΔT ——温度变化。

用来确定弹性变形数值的方程式(1)实际上是很复杂的。因为这一数值还取决于其他因素。

如果变形物体是固溶体，那么弹性变形会引起原子的热力学位的变化。结果发生浓度弛豫，这就是原子的移动在拉伸区域内使

点陣常数增大，在压缩区域内使点陣常数减小。这样，浓度弛豫也与非弹性现象有关。这种情况是苏联研究者B.C.果尔斯基首先注意到的，他拟定了这类扩散所引起的各种现象的理论。

在铁磁性材料中由于弹性变形而发生磁场强度的起伏弛豫，这也是产生非弹性现象的原因之一。

把应力状态施加到多晶体金属上，会引起相邻晶粒之间的热力位起伏。结果，发生的弛豫也会引起非弹性现象。

我们来研究垂直于拉伸轴的晶粒边界。可用泊桑系数确定的横向压缩对于每一个晶粒是不同的，而在边界处则是相同的，因此发生了横向应力。由于这些横向应力不相等，热力位也不相等，而这又引起扩散，从而引起非弹性现象。

上述弹性变形机理是以原子和微分子作为动力学单位的物质的唯一弹性变形机理。这种机理的特点是弹性变形程度较小，通常不超过百分之一。这是因为原子较小地偏离其稳定位置就已引起原子转移向新位置，或者引起完整性的破坏。上述弹性变形机理可以叫作偏离机理。

在以巨分子作为动力学单位的高分子物质中，弹性变形既借助于偏离机理，也借助于另一机理来实现，这种机理就是巨分子形状的变化。这种机理可以叫作展开机理，它在某种程度上反映巨分子所得到的那种形变。展开机理保证有可能得到很大的弹性变形程度。用这一机理的作用能解释例如橡胶的高弹性变形。

可以作出下述结论：

- 1) 塑性变形只能在弹性变形介质中发生和发展；
- 2) 弹性变形程度不能达到很大数值，因为即使在原子的偏离相当小时，就将发生塑性现象，或者发生物体完整性的破坏；
- 3) 在真实材料中，在应力与弹性变形之间不存在线性关系。弹性变形不仅取决于应力，而且还取决于由施加应力状态而引起的温度的、化学的和磁性的变化，以及取决于在弹性变形物体内因其他各种原因而发生的原子的局部扰动。结果就发生定向扩散和自扩散现象，从而引起预塑性区域内的非弹性现象。

3. 塑性变形机理

通常研究单晶体和多晶体的塑性变形机理。在研究单晶体塑性变形时，主要注意基本机理即滑移和孪生的一般描述〔3〕。几乎在所有金属学教科书中都简略地引用这种描述。因此在本书中，把基本注意力集中到试图即使是大致弄清晶体塑性变形机理的本质，是合适的。

如前所述，塑性变形的初级行动是原子群从一个稳定平衡位置向另一个稳定平衡位置的定向的一次的和非同步的移动。初级行动的多次重复引起明显的效应，即物体形状和尺寸的不可逆变化。移动的原子群可能占据变形物体中的不同位置。后者在一些情况下只取决于施加应力场的特性，而在另一些情况下也取决于变形物体的组织。此外，成群的移动不可能伴随有各种併发现象发生。

这样，依原子成群移动发生的条件不同，可观察到不同的塑性变形机理。

现在，把下列晶体塑性变形机理区别开来是合适的。

非晶机理（扩散塑性）

粘性液体和简单的（低分子的）非晶体的流动，是由这种最简单的机理来实现的。此外，这种机理也能在一定的温度-速度条件下沿多晶体晶粒边界处观察到，显然，它是在接近晶体熔点的温度下的基本机理之一。塑性变形的非晶机理是原子从一个稳定平衡位置沿施加应力场梯度方向向另一个稳定平衡位置的非同步的顺序移动。非晶机理的特点是，在定向移动的顺序方向没有任何有序性，而剪切抗力取决于变形速度和静水压力（平均应力）。

平 移 滑 移

这种塑性变形机理既可在单晶体中也可在多晶体中观察到。

平移滑移沿一定的結晶面和結晶方向发生。如果在滑移时沒有象弯曲、扭轉、形成晶块和晶块轉动、沿无理晶面孳生、以及双滑移这些併发现象，則滑移叫作平移滑移。在这种情况下，在劳埃图上沒有星芒（图5），这是存在平移滑移的實驗証明。这种滑移

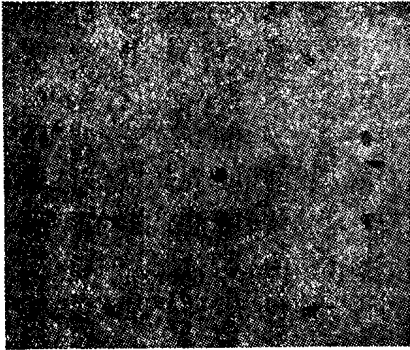


图5 变形晶体的劳埃图〔6〕

移在萘单晶体的純剪切变形时曾被柯亨道尔夫〔4〕观察到，而在鋁单晶体的純剪切变形时曾被巴烏曼〔5〕观察到。在溴化鉍和碘化鉍固体晶体塑性变形时，M. B. 克拉森-涅克留多娃也曾观察到平移滑移，这种晶体按其力学性能和結構來說接近于 α -鉄晶体〔6〕。这些試样的变形是由压入鋼球的方法实现的。从变形区域和未变形区域

提取的劳埃图是相同的。根据上述試驗，M. B. 克拉森-涅克留多娃得出結論：在已知条件下，作用着的塑性变形机理图接近于典型的平移滑移图。

有足够的根据认为，平移滑移是在起始的較小的塑性变形程度下发生的。随着塑性变形的增加，它可轉变为复杂滑移，这将在下面研究。

平移滑移的特点之一是剪切应力与作用在滑移面上的法向应力无关。平移滑移的本质还没有最后弄清。

根据結晶点陣靜电理論（假設一层原子相对于另一层原子同时移动），晶体的屈服极限具有下列数值：銅是520公斤/毫米²，銀是330公斤/毫米²。但实际上銅是0.1公斤/毫米²，銀是0.06公斤/毫米²。

这样大的差异通常是由于晶体的真实組織不完善，也由于在平移滑移时不存在一层原子相对于另一层原子同时（同步）移动。这个問題是由位錯理論（脱节理論）弄明确的。这一理論描

述了原子移动的机理，后者是晶体塑性变形的基礎。И.А.奧金格指出，經多次研究已确定有十种以上的多晶体塑性变形机理〔7〕。按照И.А.奧金格，这些机理可以合併成三类：剪切类、扩散类和晶粒間类。位錯理論不仅揭示了剪切类机理的实质，而且概括了上述三类塑性机理。

A.X.科垂耳的著作〔8〕給出了关于位錯理論內容的十分完全的概念。因此本书仅限于援引这一理論对塑性物理-化学理論有意义的某些原則性論点。

位錯可以理解为存在有原子群从稳定平衡位置的移动。脫位原子群中的原子处于活化状态，并且同一群中原子的活化程度可以是不同的。这样，脫位的原子群是处于应力状态中的介质单元。弹性变形的和应力状态中的介质单元的主要特点是，介质单元是由两部分組成的，由一部分的应力引起的弹性力与由另一部分的应力引起的弹性力平衡。这样，介质单元的应力是相互平衡的。实际上这些应力在塑性的物理-化学理論中被看作第三种附加应力（确切些說，是这些应力的变种之一）。

介质单元应力状态的这种概念完全相应于位錯的一般概念，据此，位錯所扩及的点陣的一部分受拉伸，而另一部分受压缩（图6）。

位錯可以是刃型的和螺型的。刃型位錯相当于拉伸（压缩）变形，而螺型位錯相当于剪切变形。因此这两种位錯的結合能够引起介质单元的任何不均匀应力状态，但是要在这样的条件下：整个单元的应力相互平衡。

位錯依其相对于某一所取方向的位置可分为正的和負的（图7）。异名位錯以吸力相互作用着，这个吸力与位錯間的距离成反比。同号位錯彼此相斥。这样，它們就不断地移动着。

在不受应力的物体中，移动位錯的数量很少，并且位錯的移动是紊乱的。結果，物体的形状和尺寸不发生任何变化。在对物

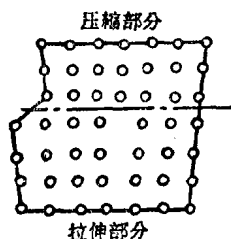


图6 位錯图

体施加了应力状态的情况下（例如，施加外部机械作用），移动位错的数目将急剧增加，而其移动将变成定向的。结果，物体的形状和尺寸改变了。

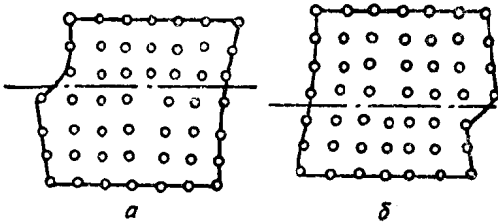


图 7 正的 (a) 和负的 (b) 位错图

位错生成的问题是
有意义的。

显然，一个原因是
结晶点阵的缺陷。另一个原因可能是非弹性现象，正象 R. 甄纳〔9〕指出的那样，在真实晶

体弹性变形时，非弹性现象是不可避免地要出现的。在相应于非弹性现象的地方应当发生第三种附加应力。这些应力的出现可以解释成脱位原子群的出现。

此外，根据塑性流动的结晶学本质可知，一些位错经过晶体的定向移动与另一些位错的生成不断地发生关系。这是位错生成的基本原因之一。这样，一个位错的移动就足以使新位错发生，并使塑性流动强烈地发展。

显然，在塑性流动的生成和发展的这种概念下可以得出下述结论：为实现晶体塑性变形所需的应力，仅为一层原子相对于另一层原子同时移动时的几百分之一。

根据位错概念，用平移滑移理论有可能绘出流动曲线，它确定应力与结晶学剪切间的关系。试验证实了理论绘图。位错理论能解释硬化、再结晶、复原、弥散硬化、不稳定蠕变的某些方面，也能解释各种形式的复杂滑移的形成以及塑性流动过程中外来原子的偏析和移动。此外，它还能解释滑移带的形成，亦即它是彼此间相互作用的各对异号位错的集聚。И. А. 奥金格认为，位错理论不仅能解释各种塑性变形机理和在粗视组织、显微组织和 X 射线组织的研究中观察到的各种现象的细节，而且也能确定金属在不同条件下变形时其性能变化的原因。

然而不是所有从事塑性变形机理研究的科学家都引用位错理

論。應該属于这类科学家的，在外国有 K. 甄納和葛庭燧，在我国有 A. A. 包奇瓦尔、A. B. 斯切潘諾夫〔10〕等人。

苏联科学家(包括 A. A. 包奇瓦尔〔11〕)的下述观点也是有意义的：他們把滑移叫作定向扩散机理。根据对滑移的理論研究和实验研究工作的分析，以及对晶体塑性行为的观察的分析，可以确信，滑移机理与扩散现象紧密相关。作为滑移的定向扩散机理的模型可以叙述如下。物体形状按定向自扩散方式发生塑性变化时，有位于結晶面(滑移面)上的大量原子群参与。在这些平面上，原子沿一定的結晶方向(滑移方向)移动，并且这种移动扩散及一迭具有相应指数的平面，它們形成滑移带(滑移痕迹)。后者能够在单晶体上用肉眼观察到和用显微镜在晶粒中观察到。滑移带又是由厚度为 200—250 埃的滑移綫組成的。这些綫彼此間的距离为 200—300 埃。滑移的可能性是有限制的，它只能发生在对所加外力取向最有利的平面內。对滑移方向也可以这样說。切向应力达到最大数值的平面和方向认为是最有利的。結果，結晶面上的原子的移动是按照所施加应力场梯度的方向发生的，这就引起物体形状在該方向上的不可逆变化。

这样，与非晶机理相比較，滑移这一定向扩散机理的第一个特点是，移动原子群在結晶学上是定向分布的。第二个特点是原子在变动稳定平衡位置时有一定的有序性。

这样，存在着两种关于晶体塑性变形时原子移动机理的观点(位錯理論和把塑性流动看作特殊的自扩散和扩散机理)。当比較深入地研究晶体塑性流动的本质时，必定得出下述結論：这两种理論都是很重要的，并且是彼此补充的。位錯理論能够大大促进塑性扩散理論的发展。例如，研究刃型位錯和螺型位錯的組合問題，应当能为下述假設引出根据：位錯的生成可能伴随有空位的形成以及原子落入結点間。这样，就为較詳細地研究定向扩散机理和扩大位錯发生机理的概念創造了可能性。討論这些問題时，介紹 B. П. 阿尔哈罗夫、Г. Н. 柯列斯尼柯夫、A. Н. 奥尔洛夫的

論文“論位錯理論发展的可能性”^①是有益的。如果批判地研究位錯理論中采用的術語，那么一系列关于位錯机理細节的描述都可以成功地应用于定向扩散机理。最后，塑性的位錯理論擁有的数学資料也可以用于塑性的扩散理論。

塑性扩散理論的个别方面也能促进位錯理論的大大发展。可以指望，在不久的将来，根据塑性的位錯理論和扩散理論将能形成一个統一的晶体塑性流动理論。

复 杂 滑 移

复杂滑移就是平移滑移机理加上具有結晶学特性和力学特性的附加現象。其中包括：单晶体或晶粒內某些区域的不对称轉向、滑移帶的弯曲和扭轉、双滑移、滑移帶內形成完整性的破坏。上述現象中的某些現象有时具有这样显著的特性，以致把滑移机理推到第二位。

如果形成滑移帶时出現星芒，那么这就表明滑移帶內的晶体破碎了，因而所研究的塑性机理已有別于平移滑移。通常把星芒看作是由于滑移帶內晶体的破碎而引起的微晶块的轉动。这种情形使得有理由认为，剪切形成的原因不是滑移，而是不对称的轉向。

戴利茲〔12〕的研究是有意义的，M.B.克拉森-涅克留多娃〔6〕曾引用过。戴利茲曾在电子显微镜下研究了未变形的和压缩到10—20%的已变形的純銅单晶体和多晶体的組織。銅的单晶体和多晶体晶粒在未变形状态下是由具有直綫边界和光滑表面的微晶块組成的。戴利茲証实，在大約20%的变形和室温下，除了出現通常的滑移痕迹外，还观察到微晶块分裂成尺寸約为1000埃的还要細的小块。結果，晶块边界被剧烈地扭曲了。此外，在单晶体或晶粒的个别区域内还观察到嵌鑲块的变向，这表明这些区域内点陣的轉向（图8）。

① 苏联科学院学报，1953，92卷，第4号。