

# 晶体缺陷研究的历史回顾\*

钱 临 照

(中国科学技术大学)

一块水晶,不甚透明,里面有裂缝 (flaw)、云翳 (cloud)、泡影 (bubble) 等。这些缺陷是宏观的,矿物学家很早以前就注意到了。我们现在要回顾的是晶体的微观的或亚微观的缺陷。

如果有人站在完整晶体中任何一个点阵的点上,那么他看到四周的环境都是一样。从这个意义上说,一块有限大小的晶体不能称为完整晶体。然而,无限大的晶体是不存在的,所以晶体的不完整性指的是晶体内部的缺陷。在边界上几个分子厚度内的点阵常数和键的结构与内部有差异,这些属于表面物理的研究范畴。

为什么在早期的晶体研究中,人们就对晶体中的缺陷予以重视呢?首先是因为发现晶体内部没有缺陷简直是绝无仅有的,也就是说,晶体内存在缺陷是难以避免的。其次,从应用观点来看,缺陷对晶体的物理性能有有害的一面,也有有益的一面,半导体的掺杂就是一例。晶体的缺陷和晶体的力学强度有密切关系。

## 一

晶体缺陷的研究是从发现光子和晶体点阵的交互作用不符合所谓完整晶体的现象开始的。

1912年, Von Laue 首次设想,晶体中的点阵象个光栅,它对 X 射线能起衍射作用。这就启发人们借助 X 射线这个工具来研究晶体结构。其后两年, C. G. Darwin<sup>[1]</sup> 观察到所谓完整晶体的衍射强度有失常现象,怀疑晶体中具有不完整性。按照 X 射线衍射成象的理论,在一个大而完整的晶体中,单色 X 射线衍射波应

该有消光效应,因而它的强度应当很小,衍射强度应与晶体的结构因子  $F$  成正比,而衍射张角只有几秒弧度。但是,实测的结果是衍射强度比预期的要大一两个数量级;衍射强度与结构因子  $F^2$  而不是与  $F$  成比例,而且衍射张角的弧度不是秒,而是分。从理论上讲,衍射强度之所以与  $F^2$  成比例,必定是由于衍射是从很小尺寸的晶体发生出来的。 Darwin 还设想一块真实的晶体是由原子按点阵排列整齐的完整的小晶块拼凑而成的<sup>[2]</sup>,晶块与晶块之间的取向略有不同。每个小晶块的衍射强度遵从  $F$  定律,但就整个晶体而言,因为小晶块之间的取向不同,各晶块的衍射波不相干涉,其强度也就与  $F^2$  成比例。也正因为小晶块的取向略有不同,晶体的总衍射束比完整晶体的要宽得多。小晶块的尺寸直径不大于 1 微米。 Darwin 称此结构为镶嵌结构。

在镶嵌结构的研究工作中, W. H. Bragg 等人做了不少工作。这个实验工作的困难在于,晶面反射 X 射线的效率  $R/I$  不能按照平面镜的光学反射来计算,因为单色 X 射线投射到晶

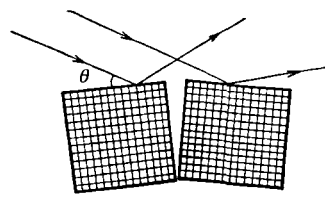


图 1

块上,入射到每个晶块的掠射角必须满足 Bragg 条件,适合于某一晶块的 X 射线入射,未必适合于其余晶块。测量反射强度  $R$  与入射强度  $I$  之比  $R/I$  若依此法进行,可能得出不同的结果(见图 1)。

\* 1979 年 5 月在南京召开的全国晶体缺陷学术交流会上  
的报告。

Bragg 的实验方法很简单：在一个小范围角度内使晶体转动，这个转动范围包含所有可能的反射，因此每个小晶块都有机会反射。仔细观察时有时无的反射，可以画出  $R(\theta)-\theta$  的曲线。假设晶体每秒反射量为  $R(\theta)$ ，而同一时间内入射量为  $I$ ，则累积反射

$$\rho = \int_{\theta-\varepsilon}^{\theta+\varepsilon} \frac{R(\theta)d\theta}{I},$$

$\varepsilon$  为晶体转动幅度，它应保证所有不同取向的晶块都能反射。如果晶体转动的角速度为  $\omega$ ，用电离室接受的总辐射量为  $E$ ，可以获得如下结果：

$$\rho = E\omega/I.$$

通过这个实验，Bragg 发现同一种晶体的累积反射是一致的。这个实验不但证明晶体中存在嵌镶结构，同时得出累积的定量反射值。从  $R(\theta)-\theta$  曲线来看，同一种晶体不同部位的曲线形式不一样，但曲线所包含的面积都相等。

1914 年 Darwin 早已得出晶体中的晶块必须足够小，才能产生反射强度大于大晶块的反射强度的结论。Darwin 得出完整晶体的条件：晶面按理想排列的数目必须很大。反之，则称之为非完整晶体。其后，1934 年 G. I. Taylor 在计算两小角晶粒间界处位错所造成的应力场时指出，高应力所在处就是当年 Darwin 所建议的嵌镶块的边界<sup>[3]</sup>。这样，就把嵌镶块的结构和位错第一次结合起来。

实际上，早在上世纪末(1895 年)，Thomas 和 Andrews 就已注意到，当把成吨重的熟铁从白热状态缓慢地冷却下来时，可以发现铁的晶粒中有次结构存在<sup>[4]</sup>。F. S. Tritton 认为，这种次结构是由一个晶粒中的取向略有不同的许多细小晶体所组成<sup>[5]</sup>。到三十年代，有更多的人发现，经加工后退火的晶体的劳厄斑中有更细密的结构，认为这是晶粒中产生了次结构，或称嵌镶结构。M. J. Buerger 以及 A. B. Greninger 则以为大多数非完整晶体并不是由等大的嵌镶晶块所组成<sup>[6]</sup>，而是由棒状晶畴所组成，这些棒状晶畴产生于单个晶核。他们称这种结构为系属结构。

K. Lonsdale 通过实验证明，许多种有机晶体以及 I 型金刚石有强烈的 X 射线初级消光现象<sup>[7]</sup>，所以他认为这些晶体是没有嵌镶结构的。

直到五十、六十年代初，文献上还可以找到结合嵌镶结构理论来研究位错密度的文章。

## 二

在二十世纪二十年代，人们对晶体的非完整性提出几个问题：晶体的非完整性的结构是什么样的？非完整性是否是晶体的属性？非完整性对晶体的物理性能有何影响？

Darwin, Bragg 等人在晶体的嵌镶结构上做的工作，引起了同时代不少人的兴趣，特别是对非完整性晶体的结构和非完整性是否是晶体的属性争论较多。

美国的 F. Zwicky 和 A. Goetz 一派提出一种看法：非完整性是晶体的属性之一。Zwicky 力图证明在晶体中存在一种所谓次级结构。这种次级结构比 X 射线所能显示的要大得多，并且排列得那么整齐，堪称为晶态。Zwicky 还曾试图说明在一个理想晶体中除了整齐排列的正离子和负离子外，还可能有一种稳定的超结构。

Goetz 是 Zwicky 的合作者，他提出一种称为“群”的结构。他解释所谓“群”就是有一定数目的分子聚集成团，成为晶态的排列。在“群”之内和“群”之外的分子的稳定性有所不同。至于“群”的大小则随晶体的品种而异，是晶体的一个常数。Goetz 自称，提出这种“群”结构并不反对 Zwicky 的次级结构的假设，但又与 Zwicky 不同。Goetz 说，人们认为晶体从固相通过熔点转变到液相就失去了晶体的结构。他做了一个实验，发现晶体的过冷程度与这个晶体加热过程的历史有关。过热愈高，过冷也愈大。晶体在熔点之上继续维持它的晶体结构，因此在晶体固化冷却过程中，这个结构还继续维持着。他说，这种现象是和认为晶体是熔融体结晶出来的单分子建造而成的想法不相容的。

### 三

Goetz 在他的一篇总结性的论文中最后说：“一种熔融金属在进入晶体固态之前，它必须经过一个仲晶态中间相，分子群在这个中间相中就形成了，这时候的几何组群已经近似于固体了。这种群的大小是这个晶体的物理常数，在 $10^{-14}$ — $10^{-15}$ 厘米<sup>3</sup>之间。”<sup>[8]</sup>这种群的线性大小略小于 $10^{-1}$ 微米，而用X射线量测的嵌镶块直径约在1—3微米之间。但是 Goetz 补充说，这个假说只得到为数不多的实验的支持。实验用的都是一些不寻常的金属，例如铋、砷、锑、镓、锡、铟等。不论 Zwicky 的次级结构，或是 Goetz 的“群”结构，都认为这些缺陷是晶体的属性，是固有的。与此相反，这些或那些微观缺陷不是晶体的本质。

从能量观点来看，Zwicky 认为，超结构的形成是由于晶体结构的自由能的降低所致。因此他说晶体中存在平衡组态的次结构。有名的 Smekal 的块结构假说认为这种结构是晶体中不可避免的，是由晶体生长速度决定的。按照这个说法，理想晶体才具有平衡组态的结构。一个晶体只要存在一定的时间，次结构就会自然消失。这和我们的经验不相符合。E. Orowan 反对次级结构存在会降低晶体自由能的观点。他提出一个生动的例子：云母具有非常好的解理面，垂直于解理面方向的张力强度必然是很小的。我们如果制备一根轴线垂直于解理面的小棍子，时常要担心这根棍子断裂。如果云母的解理面有次结构或块结构，那么解理面的表面能应该是很低的了。然而事实与此相反，Obreimoff 测定云母解理面的表面能异常之高，约为5000尔格/厘米<sup>2</sup>。

1934年 P. P. Ewald 和 M. Renninger<sup>[9]</sup>在岩盐上做了一项极为细致的工作，发现在人工小心制备出来的岩盐上，用X射线测量它的累积反射量和衍射线的半宽度，表明它并无嵌镶结构。如果晶体经过琢磨，就可得出不同的结果，表明晶体中有了嵌镶结构。

晶体中微结构缺陷——嵌镶块等虽是常见的，但不是晶体的属性。这在1934年以后才逐渐为大家所认识。

晶体中出现缺陷，对晶体的物理性能，特别是力学性质有何影响，二十年代做了许多工作，也有不少争议。

问题是从反面提出来的。

1921年，M. Polanyi 首先从事固体断裂强度的理论估计工作，他得出一个粗略的估计是固体的断裂强度约为1000公斤/毫米<sup>2</sup><sup>[10]</sup>。同年，A. A. Griffith 发表一个著名的工作，玻璃丝的实测断裂强度仅为14公斤/毫米<sup>2</sup><sup>[11]</sup>。早在1903年，W. W. Coblenz 做了一个有趣的实验，他把厚约0.5毫米的岩盐片含在口中数分钟，用牙齿和舌头来弯曲它，发现它是容易断裂的<sup>[12]</sup>。这个实验吸引 A. Joffé<sup>[13]</sup>及其学派从二十年代初到三十年代的许多年间研究岩盐的断裂强度。

在注意到研究断裂强度的日子里，不能忘记 J. Frenkel 在晶体点阵的基础上计算金属晶体屈服强度的工作，他计算的结果约在 $10^2$ — $10^3$ 公斤/毫米<sup>2</sup>之间<sup>[14]</sup>。这个数字与 Polanyi 的计算大致符合。Polanyi 的计算是从断裂产生表面能出发，它适用于单晶体或多晶体，也适用于非晶态物体。而 Frenkel 的计算模型只适用于原子排列整齐的晶体。

用离子晶体的模型计算岩盐的强度约为200公斤/毫米<sup>2</sup>，而实验数值仅为0.4公斤/毫米<sup>2</sup>。Joffé 学派的工作集中在岩盐上。他们利用各种手段(X射线、光学设备)，变化工作湿度(干的或者湿的表面，甚至把试样浸在水里等)，进行实验研究，得出结论：岩盐强度之所以降低是因为它的表面上有尖锐的微裂缝。

当负载加到试样上，应力集中在这些表面微裂缝的尖端上，裂缝的扩展使得晶体断裂。这样就降低了岩盐的强度。Joffé 的论断和 Griffith 在玻璃丝上实验的结果相符。Griffith 发现玻璃丝愈细，强度愈高。细丝上的表面面积小，表面缺陷少，应力集中在表面裂缝上的机会小，因而提高了试样的强度。

Joffé 的上述结论主要是从两个实验得来的：第一个实验是把岩盐浸到热水里，使岩盐的表面被热水溶去一部分，并在这种装置下测量岩盐强度陡增情况；另一个实验是把一个球状岩盐试样先放在液体空气里冷却，然后突然把它投入热水或者熔融的锡中。根据 Grünberg 的热应力分布计算，可以知道在一二秒之间岩盐球的中心部分由于它的外层热膨胀受到 70 公斤/毫米<sup>2</sup>的巨大均匀应力，然而试样并不破裂。

E. Orowan 在 1934 年做了两个有趣的实验<sup>[45]</sup>：敲打一块普通的云母片，就象敲打一块硬纸板一样，发出噗噗的声音。如果细心地切割云母片，使它的边缘光滑无损，敲打时发出的声音就是清脆的。前者对振动阻尼很强，而后者则否。这表明对振动的阻尼起巨大作用的是云母边缘上的小小缺陷，而非云母内部的缺陷（如次级结构、块结构之类）。另一个实验是把一块普通切割的云母片挂起来，先只使它中央的一个小部分受到拉伸，它的强度是很大的，然后重新安排负载面积，使云母的边缘也受到拉伸，此时在比较小的拉伸力之下，云母片就要破裂（见图 2）。

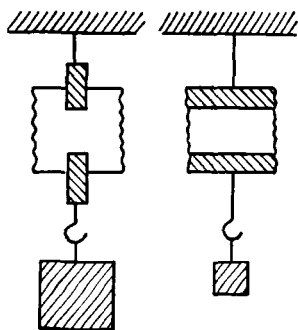


图 2

岩盐、云母和玻璃丝在上述不同情况下的强度数值，大约如下：浸在热水中的岩盐强度一般为 10 公斤/毫米<sup>2</sup>，个别可达 30—160 公斤/毫米<sup>2</sup>。和空气接触的岩盐的强度一般只有 0.4 公斤/毫米<sup>2</sup>，而理论值为 200 公斤/毫米<sup>2</sup>。较厚的云母片采用特殊加载法的强度为 320 公斤/毫米<sup>2</sup>，采用通常加载法的强度为 25 公斤/毫

米<sup>2</sup>，而薄云母片的强度可高达 500 公斤/毫米<sup>2</sup>。细的石英丝强度可达 2000 公斤/毫米<sup>2</sup>。玻璃丝可达 400 公斤/毫米<sup>2</sup>，而较粗的样品强度要小一到两个数量级。

Griffith 裂缝这种固体缺陷作为固体断裂的主要原因，于是被肯定下来。三十年代 Andrade 等人<sup>[46]</sup>，五十年代 Orowan, Argon 等人对 Griffith 裂缝的产生还有研究工作的报道。

到现在已经明确，固体中的缺陷对力学性质的影响主要归之于表面裂缝，这是目前关于材料断裂理论的最基本的根据。关于缺陷对固体其它物理性质的影响，在二十年代左右研究得还很少。

#### 四

固体表面上的裂缝对固体的断裂起了重大的作用。固体内部的缺陷起什么作用呢？

在做断裂试验时，往往由于加载速度的不同，在同一种材料上发现两种断裂方式——脆性断裂和范性断裂。这是在工程上很早就知道的事。对晶体的范性形变和晶体内部缺陷之间关系的研究是从二十世纪初开始的。我所能找到的最早文献是 1913 年 B. B. Baker 在钠与钾的单晶上发现“象鱼鳞状的花纹”<sup>[47]</sup>。在这篇报告的后面的讨论中，Bragg 指出这种有规则的鱼鳞状的花纹可能和晶体的结构有关。E. N. da C. Andrade 在汞、铅、锡等晶体上也观察到同样的现象<sup>[48]</sup>。现在大家知道这是晶体的滑移线，鱼鳞状的花纹是双滑移。在有关晶体的滑移面和滑移方向的文献中，可以看到 1899 年测定铜、银、金几种面心立方体上的滑移面和滑移方向的报道，但没有查到原始资料，工作可能是在天然晶体上做的，或许是偶合。发现人工金属单晶体上发生滑移现象与 Darwin 发现 X 射线为晶体点阵衍射产生的异常现象是在同一年。

金属单晶体的制造与研究晶体缺陷有重要关系。最早制造单晶体是在 1898 年，用的是铋<sup>[49]</sup>；1901 年 L. Lownds 等人的工作和晶体

的缺陷研究关系不大<sup>[20]</sup>。1913年 Baker 和 1914年 Andrade 做的几种低熔点金属的工作可以算作晶体缺陷研究的开始。1917年 J. Czochralski 用几种低熔点金属如铅、锡、锌，测定了它们形成单晶体的最大抽拉速度<sup>[21]</sup>。苏联的 I. Obreimoff 与 L. Schubnikoff 在 1924 年与 P. W. Bridgman 在 1925 年先后创造了垂直炉子晶体逐步下降冷却法<sup>[22]</sup>。H. C. H. Carpenter 与 C. F. Elam 在 1921 年首先用应变再结晶法制出铝单晶体<sup>[23]</sup>。我曾看见过她用这个方法制造出直径约 5 厘米长约 15 厘米的铝单晶。

晶体的脆性断裂的主要原因在于表面的缺陷，但范性形变的开始就不能归于这个原因。Joffé 学派在岩盐晶体上用光学的双折射方法发现晶体在加载时产生内部滑移<sup>[24]</sup>。

另一方面，金属的理论强度的理论估计也在这段时间(1927年)由 J. Frenkel 所提出。人们发现单晶体上滑移开始所需的应力远低于理论值。实验的条件具备了，在各种晶体上的数据已经得出来了，理论估计值也有了。问题提得很突出，我们现在缺少一个晶体内部缺陷的模型。显然，仅仅 Griffith 裂缝是不能满足的。

1923年 G. Massing, M. Polanyi 认为晶体被弹性弯曲时<sup>[25]</sup>，晶格发生错排，好象用砖来砌拱型门洞的样子。他用“Biegegleitung”这个德文字来形容这种晶体的形变。Massing 与 Polanyi 第一次企图用晶体中含有缺陷的模型来说明晶体的弹性形变。1928年，L. Prandtl 的模型是设想把晶体分成上、下两半块，在下半块有个周期性的场，象个瓦楞纸面<sup>[26]</sup>。把上半块中某一个原子当作一个能来回滑动的特殊原子，这个原子和上半块中其它原子有弹性的联系。在小的应力下，这个特殊原子在下面的势谷里来回滑动；在较大应力下，它就能带动其它原子跃过下面的势垒，进入邻近的势谷里去了。可以看出，在这个模型中考虑了某一个特殊原子跳过势垒，但没有明确指出这个特殊原子就是晶体缺陷所在。1929年 U. Dehlinger 的 Verhaukung 模型明确说明晶体中存在局部点阵缺陷(见图 3)。它的特点在于点阵的失配是局部的，

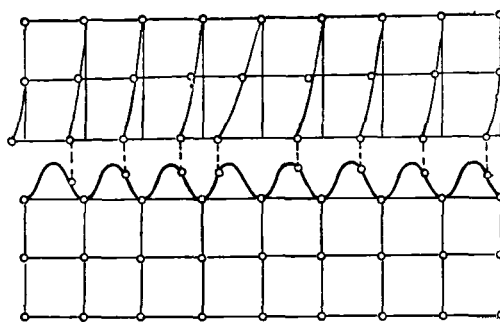


图 3

在其余部分仍然是完整晶体。Dehlinger 指出垂直于滑移面的晶面在位错附近必然是弯曲的。W. G. Burgers 指出，经过形变过的晶体，它的劳厄斑都发生拉长或分裂<sup>[27]</sup>，这是晶格平面弯曲的证明。他进一步指出，面心立方晶体经过加工后的形变，在垂直于滑移方向的(211)晶面上的劳厄斑并不拉长或分裂，这说明(211)晶面没有受到弯曲。这是符合上述 Dehlinger 模型的。Dehlinger 用数学的处理方法初步估计失配原子的范围，所得结果比精细的计算反而显著。Dehlinger 模型重要之点在于指出晶体点阵中有局部失配，垂直于滑移面的晶面必然是弯曲的。这个时期中关于范性形变理论讨论见文献[28]。

## 五

现在公认影响晶体力学性质的晶体缺陷模型是 1934 年由 E. Orowan, M. Polanyi 以及 G. I. Taylor 所提出的著名的位错模型<sup>[29]</sup>。现代位错理论就是建立在这个基础之上的。

他们三个人的模型在原则上是相同的，即缺陷是原子的失配范围，但它只局限于晶体的某一部分。使这个原子失配范围产生运动的应力是极小的，原子失配范围在应力之下逐个传递开来，以致全部原子逐个发生运动，即晶体的滑移。他们的模型与 Dehlinger 模型的不同在于后者垂直于滑移面的晶面要发生弯曲，而前者则否。Taylor 认为晶体中的位错排列是点阵式的。他计算了这些位错点阵之间的相互作用

(每个位错产生应力场),从而得出金属加工硬化理论。这个加工硬化理论虽然没有为后人所接受,但位错点阵的概念却成了后来发现晶体中位错网络的先锋。Taylor的首创工作还在于他把晶体中的位错和Volterra的弹性位错联系起来,从而可以计算在位错周围的应力场。

作为历史来叙述,不能不提到二十年代有些学派认为晶体之所以有滑移运动,是由于晶格热振动。R. Becker的工作是大家所熟悉的<sup>[30]</sup>。主张把晶体的性质分成结构敏感和非结构敏感两类的A. Smekal也是竭力主张热振动学说的。他在论述滑移面上范性形变的机制的一节中还推崇过这个学说<sup>[31]</sup>。但评述Taylor的模型时,他认为这个模型是在晶体的热运动使晶体中没有毛病的部分出现滑移的基本概念上完成的,并指责Taylor的理论及范性形变的开始以及晶体硬化的实验事实都有严重不符之处。

Orowan, Palanyi和Taylor三人的模型就是现在所称的刃型位错。当时他们的文章在固体物理学界反应不大。1939年J. M. Burgers考虑到Taylor的二维点阵位错和Volterra的弹性位错之间的联系,提出螺型位错的模型,并且首次指出Burgers矢量(当时的名称为位错强度矢量)的重要性<sup>[32]</sup>。可能是个巧合,对位错的基本概念及其发展做出开创性贡献的Prandtl, Taylor和Burgers三个人都是流体力学的著名学者,也许流体力学里的旋涡丝概念有助于晶体中位错概念的形成。

第二次世界大战期间,各项基础科学研究受到不同程度的影响。战后,以N. F. Mott为首的布里斯托尔(Bristol)固体物理研究学派形成,其中包括F. C. Frank, F. R. N. Nabarro, J. W. Mitchell, N. Thompson, J. I. Eshelby, N. Cabrera;在伯明翰有A. H. Cottrell, R. E. Peierls;在美国有F. Seitz, T. A. Read, W. Shockley, R. D. Heidenreich, J. S. Koehler等。在战后五六年里晶体缺陷及金属强度的工作可以举1947年在布里斯托尔召开的“固体强度会议”为代表<sup>[33]</sup>。在那次会议上,A. H. Cottrell

提出,对 $\alpha$ -铁中由固溶碳、氮等原子所引起的屈服点和应变时效等现象,可用碳、氮原子云(称为柯氏气团)来作定量解释。其实,到那时,晶体中存在位错已获得明显的证据了。

在那个时期,位错的增殖机制是个关键问题。1947年,就在布里斯托尔会议上, Frank提出一个“位错动力学增殖机制”。他用高速运动的位错在晶面上反射的机制来说明位错可以增殖。这种位错必须有高能量,所以这样来解释增殖显然是不能满意的。1950年Frank和W. T. Read共同提出一个著名的Frank-Read增殖源<sup>[34]</sup>。其后,1952年J. Bardeen和C. Herring又提出另一种由热运动攀移的位错增殖机制<sup>[35]</sup>。与此同时,L. J. Griffin于1950年首先观察到绿柱石晶体的天然表面上存在生长螺旋线,以后出现了大量研究晶体螺旋线生长的实验工作。位错的存在已获得进一步证实。

让我们再回到第二次世界大战初期。1939年Orowan不满意于通常计算位错弹性能时把位错线附近在半径 $r_0$ 以内的材料挖去(在半径 $r_0$ 以内的弹性场是非线性的)。他考虑到位错中心的原子位移所引起的非线性的应力应变关系,设计了一个位错点阵模型。Orowan请教R. Peierls,在这个模型上作数学分析,企图求出反抗位错运动的初始力。Peierls就这个模型进行了计算<sup>[36]</sup>。由于战争,此事不为人们所注意。战后,1947年Nabarro重新推导,发现和Peierls的最后结果相差一个系数2<sup>[37]</sup>。计算出的晶体的临界切应力和实测数值相近。现在称此为Peierls-Nabarro力。1967年在美国西雅图召开的“位错动力学”会议上,Peierls把事实介绍出来,他谦逊地说,这个力应当叫做Orowan-Nabarro力才对。

谈到这里,我们还得讲一讲苏联对晶体缺陷的研究工作。前面已谈过Joffé学派对晶体缺陷研究的贡献。除此之外,Stepanov解释晶体滑移现象时说,在滑移过程中层与层之间温度升高,以致高达晶体的熔点使滑移层之间呈液态<sup>[38]</sup>。Joffé提出和上面的假说相反的论点:晶体的滑移要导致晶体硬化。这是三十年代的

事。到五十年代, Stepanov 对滑移机制又提出另一种假说, 他认为滑移发生之初必须有一个核, 然后发展为萌芽状态, 再后产生滑移。假使这个机制有些道理, 那也只是半微观的说法, 和最初对再结晶所提出的机制有类似之处。这不是当时所要求的。那时, Joffé 已是高龄, 他的学派如 Classen-Neklyudova 等少数人是倾向于位错理论的。必须指出, Frenkel 是苏联科学家中对位错研究作出开拓性贡献的人。

五十年代初, 以位错为对象研究晶体缺陷的各国学派风起云涌。英国的 Bristol 学派、西德的 A. Seeger 学派、法国的 J. Friedel 学派、比利时的 S. Amelinckx 学派竞相投入这一个研究课题, 为晶体中位错理论争作贡献。对他们来说, 位错这种缺陷存在于晶体中并且影响它的力学性质和晶体生长, 这是没有疑问的。然而当时还拿不出直观的证据来对付那些反对派。这犹如作战, 还没有到最后决定性的一步。而对科学工作来说, 直观的证据乃是决定性的。五十年代中期, 以 N. F. Mott 为首的剑桥学派, 其中有 P. B. Hirsch, M. J. Whelan, R. W. Menter, D. W. Pashley 等人, 聚集在剑桥。1956 年 Menter 利用当时分辨本领为 6—7 埃的电子显微镜, 在一种叫铂酞花青 (Phthalocyanine) 的晶体上观察到位错的结构, 十分惊奇地发现它和二十二年前 Taylor 等人的模型完全一致。这个决定性的一击, 使反对派从此消声匿迹。

## 六

总之, 物理学跟其它科学一样, 都是在认真总结历史上的经验教训和充分分析当前现状的基础上发展起来的。正确地认清当时的发展趋势, 并把主要力量集中起来, 用在刀刃上, 才能使物理学的工作获得下一步的突破。X 射线对晶体结构的分析, 引导出晶体缺陷的研究, Darwin 敏锐地觉察到 X 射线为晶体所衍射的反常现象, 并进行分析, 提出晶体嵌镶结构的假说, 启开了研究晶体缺陷的门户。以年代来计算, 从 Darwin 1914 年的研究起到 1934 年国

际物理学会议上 Joffé, Orowan 对 Smakel, Goetz 等人的论战前后有二十年。从 1912 年在单晶体上发现滑移现象到 1934 年 Orowan, Polanyi, Taylor 的位错模型的建立, 经历了二十二年。这段时间是从实验来认识事实, 获得感性知识, 这是认识的第一步。从 1923 年 Massing 与 Polanyi 的第一次缺陷模型的猜测 Biegegleitung 到 1934 年成熟的位错模型的形成有十一年的蕴酿过程。从位错模型的建立到 1947 年布里斯托尔会议有十四年, 而到 1956 年 Menter 用实验证明位错的存在则是二十二年。如果从 Darwin 算起到 Menter 一共经过了四十二年。即使从 Darwin 到布里斯托尔会议, 也有三十四年。若把这段历史与 1895 年 X 射线的发现到 1912 年晶体分析的创始只有十七年的历史相比较, 显得晶体缺陷的发展历史是多么漫长和曲折!

仪器设备是发展基础科学的物质保证。1956 年 Menter 的工作是在当时认为最佳的电子显微镜上做出来的(分辨本领为 6—7 埃)。三十年代电镜的理论及制造还在开端时期, 造不出这样高分辨本领的电镜来。但是过分强调仪器和设备的重要性, 恐怕也是不适当的。例如, 1947 年布里斯托尔会议中关于 Cottrell 在  $\alpha$ -铁上的应变硬化的工作和解释, 已经指明了位错的存在。不久之后, 就在光学显微镜中看到螺型位错的存在以及它处于运动状态。这些工作都用不着什么高级的仪器。我的意思并非说好的仪器不需要, 我只想说明不能过分依赖仪器的精密。

一般说来, 基础科学的发展还必须有一个最起码的条件, 这就是政治的稳定, 社会的安宁。换句话说, 就是生活环境的保证。从 1914 年到 1934 年晶体缺陷研究的第一个阶段, 其间有第一次世界大战, 那时文化科学技术最称发达的欧洲受害最大, 在三十年代末, 欧洲的经济萧条也是阻碍科学技术发展的一个原因。这两个干扰在这一阶段中持续了几乎十年。在晶体缺陷研究的第二阶段, 从 1934 年到 1948 年, 这十四年中又遇上第二次世界大战。或许有人要

说，战争不是对科学研究工作也起了促进作用吗？他可能举出原子弹的发明作为例证。这种话还有待斟酌。我们可以反问一句，没有第二次世界大战，原子能利用就不能在那一个时期发展吗？在和平环境之中，科学技术在积累前人的成果的基础上不是可以获得更好的发展吗？

在回顾晶体缺陷历史的时候，我们不能不提到学派的重要性。所谓学派，就是一个在学术上有领导的一群人的集合，他们在某一领域内做持之以恒的研究，并且后继有人，发扬光大。在位错方面做出过重要贡献的 Prandtl, Burgers, Peierls 等人只是发表了一两篇文章，他们的兴趣在其它方面。1934 年 Orowan, Polanyi, Taylor 三人不约而同地提出晶体缺陷的正确模型——位错。Polanyi 以后转向社会科学的研究。Taylor 是一位流体力学著名学者，1934 年以前在晶体范性形变上做了不少工作，但在 1934 年以后，没有见到他在这方面的文章。只有 Orowan 自己到六十年代还在从事这方面的工作，但他的学派不大。位错研究工作自四十年代后期（即战后）到五十年代，以至六十年代，主要是由英国的以 Mott 为首的一个较大的集体完成的。由此不难看出形成学派的重要性了。

### 参 考 文 献

- [1] C. G. Darwin, *Phil. Mag.*, 27 (1914), 675.  
 [2] C. G. Darwin, *Phil. Mag.*, 43 (1922), 800.  
 [3] G. I. Taylor, *Proc. Roy. Soc. A*, 145 (1934), 388.  
 [4] T. Andrews, *Proc. Roy. Soc.*, 58 (1895), 59.  
 [5] F. S. Tritton, *Metallurgist London*, 3 (1927), 88.  
 [6] M. J. Buerger, *Amer. Miner.*, 17 (1932), 177; *Z. Kristallogr.*, 89 (1934), 195; A. B. Greninger, *A. I. M. E.*, 117 (1935), 25.  
 [7] K. Lonsdale, *Nature London*, 153 (1944), 433.  
 [8] A. Goetz, Intern. Conf. Physics, Vol. II (1934), 62.  
 [9] P. P. Ewald, M. Renninger, *Z. F. Kristall.*, 89 (1934), 344.  
 [10] M. Polanyi, *Z. Physik*, I (1921), 323.  
 [11] A. A. Griffith, *Phil. Tran. Roy. Soc.*, 221 (1921), 163.  
 [12] W. W. Coblentz, *Phys. Rev.*, 16 (1903), 389.  
 [13] A. Joffé, *Z. Physik*, 22 (1924), 286.  
 [14] J. Frenkel, *Physik*, 37 (1926), 572.  
 [15] E. Orowan, *Z. Physik*, 87 (1934), 749.  
 [16] E. N. da C. Andrade, L. C. Tsien, *Proc. Roy. Soc. A*, 898 (1937), 346.  
 [17] B.B. Baker, *Proc. Roy. Soc.*, 25 (1913), 235.  
 [18] E. N. da C. Andrade, *Phil. Mag.*, 27 (1914), 869.  
 [19] L. Perrot, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 126 (1898), 1194.  
 [20] L. Lownds, *Ann. Physik*, 6 (1901), 146.  
 [21] J. Czocharalski, *Z. Phys. Chem.*, 92 (1917), 219.  
 [22] I. Obreimoff, L. Schubnikoff, *Z. Physik*, 25 (1924), 31; P. W. Bridgman, *Proc. Am. Acad. Arts. Sci.*, 60 (1925), 305.  
 [23] H. C. H. Carpenter, C. F. Elam, *Proc. Roy. Soc.*, 100 (1921), 329.  
 [24] I. W. Ogrimoff, L. W. Schubnikoff, *Z. Physik*, 41 (1927), 907.  
 [25] G. Massing, M. Polanyi, *Ergebn. exakt. Naturw.*, 2 (1923), 177.  
 [26] L. Prandtl, *Z. Angew. Math. Mech.*, 8 (1928), 85.  
 [27] W. G. Burgers, Intern. Conf. Physics, Vol. II (1934), 142.  
 [28] Transactions of Faraday Society, 24 (1928), 53.  
 [29] E. Orowan, *Z. Physik*, 89 (1934), 634; M. Polanyi, *Z. Physik*, 89 (1934), 660; G. I. Taylor, *Proc. Roy. Soc. A*, 145 (1934), 362.  
 [30] R. Becker, *Phys. Zeit.*, 26 (1925), 919; *Tech. Physik*, 7 (1926), 547.  
 [31] A. Smekal, Intern. Conf. Phys., Vol. II (1934), 108.  
 [32] J. M. Burgers, *Proc. K. ned. Akad. Wet.*, 42 (1939), 293.  
 [33] Report of Bristol Conf. on Strength of Solids, (1948).  
 [34] F. C. Frank, W. T. Read, *Phys. Rev.*, 79 (1950), 722.  
 [35] J. Bardeen, C. Herring, Imperfections in Nearly Perfect Crystals, (1952), 261.  
 [36] R. Peierls, *Proc. Phys. Soc. London*, 52 (1940), 34.  
 [37] F. R. N. Nabarro, *Proc. Phys. Soc. London*, 59 (1947), 236.  
 [38] Stepanov, *Sov. Phys.*, 2 (1932), 26.

### 本刊 9 卷 3 期更正

页	栏	行	误	正
285	右	11—12	真正按经典理论的“电磁波列”，实际上光子是不存在的。	真正经典理论的“电磁波列”，实际上是不存在的。