

## 金属科学研究工作的一些动向\*

金属与合金的用途主要是由性能来决定的,而影响性能的因素首先是它们的成分和结构。因此,研究成分、结构和性能变化之间的关系,寻找导致这种变化的科学原理或规律,以指导金属材料质量的提高和合金品种的发展,是金属科学工作者长期以来的努力目标。

可以这样说,金属工作由纯经验式的工艺艺术逐渐发展成为一门系统性的学科是从研究金属与合金的结构开始的。早在一百年以前,Чернов 与 Sorby 等人建立了金相技术在显微镜下观察金属与合金的结构奠定了这方面的实验基础。从那个时候开始,以 Robert-Austen、Osmond、Stead、Martens、Arnold、Howe 与 Sauveur 等人为代表的金属科学工作者在合金成分、加热温度、冷却速度等对显微结构的影响方面进行了广泛而系统的研究,积累了大量有用的资料。但是,运用当时已有的物理化学成就,把这些资料归纳成为系统性的知识,则是在 1900 年由 Roozeboom 来完成的。Roozeboom 从热力学的观点应用 Gibbs 相律来阐明相区之间的关系,大大地促进了合金相图工作的开展。当时,应用金相技术和热差分析方法进行各种合金相图的测定曾经盛行一时,其结果为钢及合金的热处理原理打下了初步基础,同时也为钢及合金品种的发展提供了必要的科学储备。

X 射线的应用是金属科学工作中的一个重要发展步骤。它告诉我们,金属及各种合金相中的原子排列是有规则的,按照其空间周期性和对称性可以归纳为若干种不同的晶体结构。X 射线晶体分析不但解决了金相技术不能解决的金属与合金相的结构问题,而且为金属理论的发展创造了必要的条件。就金属电子论而言,布里渊区就是在量子力学中应用了晶体结构对 X 射线的反射条件计算出来的。在布里渊提出的准自由电子模型的基础上, Jones 与 Mott 等人对金属与合金的性质作了阐明,同时对 Hume-Rothery 关于贵金属合金相的电子浓度经验规律也提出了理论上的解释。由此可见,早在 30 年代我们对金属特别是电子结构较为简单的碱金属与贵金属的性质,在理论上已经有一定的了解。在以后的二十几年中,金属电子理论基本上处于停滞不前的状况,不但过渡族金属的电子理论依然没有得到解决,甚至贵金属合金相理论也很少发展。近几年来虽然有人指出 Jones 在解释 Hume-Rothery 经验规律中所采用的“刚性能带”模型是不正确的,但并没有发展出比 Jones 更符合实验事实的新的理论。概括地说,今天的合金电子理论还大致处于这样一个阶段,对已知的若干简单金属的合金相的稳定性及其性能可以进行某些理论上的分析和讨论,但远不足以预言未知的合金相的结构和性能。

30 年代以后,特别是最近十几年来发展得最快的是晶体缺陷理论,这方面的理论发展首先是由于研究金属的力学性质带动起来的。早期的科学研究结果就已经指出,金属的形变是通过晶面的滑移来进行的,对于完整晶体而言,这种滑移需要滑移面上两个整排原子同时滑动。假定是这样,则根据原子间结合力来计算,完整金属晶体的强度应当是每平方毫米几千公斤,比实际观察到的一般纯金属单晶的强度大 1 000 倍左右。在 30 年代初期,科学工作者已经知道实际金属的晶体并不

\* 本文发表于《科学通报》,1963 年 11 月号(1—8)



是完整无缺的,其中可能存在着空位和间隙原子这一类的点缺陷,但这种缺陷的存在并不能用来解释上述那样大的强度差别。正当理论与实际处于这种严重矛盾的时刻,Taylor、Orowan、Polanyi 等人在 1934 年同时提出一种特殊的线缺陷来解释金属的实际强度,这种线缺陷就是今天大家都熟悉的刃型位错。按照他们提出的假设,实际金属晶体的形变滑移是通过刃型位错线的运动来进行,这种运动只涉及晶体中局部的原子运动而并不意味着整个晶面的原子间结合力同时遭到破坏,从而解释了为什么实际晶体要比完整晶体的强度小好几个数量级。在上述工作中,Taylor 还假定了在形变过程中位错密度的不断增加,彼此发生障碍,用来解释金属的加工硬化。

在 Taylor 等人提出了位错的假设以后的十几年中,这个理论并没有引起金属科学工作者的注意,因而几乎没有任何发展。1947 年 Cottrell 把位错理论应用到钢的强度问题上来,指出碳原子受位错的弹性应力场作用而形成气团,这种由碳原子组成的气团对位错起着钉扎作用,从而增加其开动阻力,用来解释低碳钢的屈服现象和时效硬化现象。Cottrell 讨论的问题是当时冶金生产中的重要实际问题,冷轧薄板的表面质量以及低碳钢的脆性断裂都与屈服点和时效硬化现象有关,因而他的理论很快地引起普遍重视。从那时起,位错的研究吸引着愈来愈多的物理学工作者面向冶金工业中的实际问题,使理论与实践相结合,从而得到了迅速的发展。值得特别提到的研究成果是:Frank 根据螺旋位错模型阐明了低浓度下晶体生长的机制;Frank-Read 位错源的提出以及堆垛层错与位错反应的研究基本上弄清了面心立方金属的加工硬化问题;位错塞积指出了金属中裂缝生成的机制;位错与溶质原子的弹性交互作用,层错与原子的化学交互作用,短程有序的硬化作用,以及不同原子价的原子与位错的电交互作用等等概括了合金固溶强化的一般机理和途径。在不到 10 年的时间内,位错理论在金属强度问题方面已经初步形成系统化。

1956 年,应用电子显微镜薄膜技术直接观测金属中的位错获得成功以后,在实验结果的直接引导下,一方面澄清了过去存在的某些争论,巩固了理论上已经取得的若干成果,另一方面帮助金属科学工作者深入到更复杂的问题如金属的疲劳与脆性断裂机制等。其他领域,如相变、扩散及氧化等也愈来愈多地注意到位错的作用。

尽管近代位错理论取得了上述成就,但是还存在着一些根本问题尚未彻底解决。金属晶须强度的尺寸效应问题就是一个例子。近年来,无数的实验事实指出,微小的金属晶须具有接近理论值的强度,一般认为这是完整晶体理论强度计算结果的一个最好的证明。但是,晶须大了强度就随着降低了,大到几十微米直径以上的晶须其强度与一般晶体几乎没有差别。从许多人的工作中我们还不能十分肯定是否微小的晶须中完全没有位错存在,是否晶须大到某种程度位错就一定会出现,并且其密度随晶须尺寸的进一步增大而增加。但从无位错锗单晶与硅单晶强度不高这一事实,似乎可以认为,金属晶须强度的尺寸效应在很大程度上可能取决于受力条件下位错是否容易在晶须表面产生。这就涉及金属晶体表面的位错源问题,这个问题还需要进一步研究。

金属样品的表面状态对疲劳性能具有决定性的影响是一般公认的事实。有理由认为它的影响不应当只限于疲劳性能。因为,晶体的表面状态可能影响位错从晶体内部逃出到表面的速率,也可能影响与表面相交的位错线运动,也可能使表面裂缝尖端进一步扩展所需要的能量发生改变,也可能改变表面层的弹性常数从而影响位错在表面层的产生等等。近十多年以来,不少的金属科学工作者早已开始了这方面的研究,初步结果指出,表面状态对其他性能包括力学性能在内是有一定影响的。但是,由于实验上和理论上的复杂性,要在这个问题上取得真正的进展还有待于今后继续努力。

从伽利略时代开始,科学工作者特别是理论工作者一向是以化繁为简来取得成就的,把复杂的现象分解成为简单的因素,以便对每个因素在比较理想或严格控制的条件下进行系统深入地研究,最后总结出科学规律和理论。从实际工作的人从这些规律和理论得到启发,结合自己的经验来指



导生产实践的发展。这种做法在过去是行之有效的,毫无疑问,在今后还会继续下去。位错理论的发展大大地加深了我们对金属及其合金的强度与塑性的了解,但这种了解还很不完整,特别是在工程技术所要求的复杂条件下,金属与合金中的微观结构变化对宏观性能的影响还没有很好地沟通起来,因而要求用位错理论来直接指导生产实践是为时过早的。正是这样,前英国原子能委员会冶金方面负责人 Finniston, 1960 年在英国冶金学者协会的一篇报告中提出了下述指责:“一直到现在,冶金工作者在发展合金和制订合金性能规范时并没有认为有必要考虑位错的种类、密度和分布”。他又说:“目前,并不是所有的金属理论知识对于冶金产品的质量控制都是能起作用的。为了满足近代工程技术对合金性能的要求,冶金工作者目前仍必须依靠长期积累的生产经验和系统试验结果来选择合金成分、确定适当的加工工艺、热处理与表面处理方法以及对其他冶金因素做出必要的规定,而不是依靠选择合金中的位错含量所能解决的。”

总的说来,金属科学工作中微观方面的理论研究目前还落后于生产实践的要求,已有的理论知识还不够成熟或者不够完满,以至于现有的理论还不能有效地运用到生产实践中去,因而,从发展生产的角度来说,金属科学工作者主要还是依赖于长期积累的生产经验和系统试验的方法来解决这方面的实际问题。

## 二

密切结合生产建设的需要进行金属科学研究是大量的,也是推动金属学与金属物理发展的最广泛的基础。从历史上看,金相技术的建立首先是用来观察具有复杂结构的钢而不是其他的简单金属与合金,相图工作的开展首先着重复杂的铁-碳平衡图而不是任意的简单二元相图,说明金属科学研究与当前生产实践的密切关系。这种关系过去是这样,今天也是这样,将来仍然会是这样。

在生产实践所要求的复杂条件下,寻找科学规律、发展理论并不是那么容易的,往往需要通过许多人的工作,长期积累数据和经验并不断总结经验,或者对观察到的现象反复进行科学分析并逐步深入,最后才得出某种科学原理或规律。值得注意的是,一直到今天,在生产实践中起直接指导作用的还大多是半经验式的原理和联系宏观或半微观的科学规律。这些原理和规律目前大多是定性的而不是定量的。以下将从钢的热处理原理和时效硬化合金两方面举例来说明这个问题。

钢的热处理原理的研究在 19 世纪末已经开始了,20 世纪初随着铁-碳平衡图的出现,发展到一个新的高潮,不少的人研究了加热温度和冷却速度对奥氏体分解的影响以及它的分解产物的显微结构,对钢的淬火硬化曾经提出了许多不同的解释。特别是合金钢的热处理原理在 1930 年以前还处于混乱不明的状态,一直到 S 曲线出现以后,奥氏体和马氏体的生成条件和显微结构搞清楚,钢的热处理原理才真正有了巩固的基础,能有效地指导生产实践。一些热处理中的细节问题,特别是马氏体的回火分解过程和淬火合金钢回火过程中碳化物的变化在电子显微镜的观察下才逐步得到明确。淬火低合金钢在回火过程中的二次硬化现象是由于从碳化铁转变成合金碳化物,这种转变也是一种成核与长大过程,开始生成的核与铁素体保持着共格关系产生应力场因而导致硬化,其硬化机制与时效硬化大致相同。应用电子显微镜薄膜技术研究 18/8 型奥氏体不锈钢的淬火与回火过程阐明了 Nb、Ti、Mo 等合金元素的作用。加 Nb 或 Ti 能消除不锈钢的晶粒间界腐蚀,是由于层错对 NbC 和 TiC 的成核作用从而避免了碳化物在晶粒间界沉淀。在含 Mo 的不锈钢中则完全没有层错,碳化钼沿位错线开始沉淀,解释了为什么加钼可以提高不锈钢的高温蠕变性能。这一类的研究结果表达了近年来在钢的热处理方面所取得的成就和研究方向。

合金的时效硬化在 1906 年就有人在 Al-Cu-Mg 合金中发现这种现象,但当时的金相技术没有



能够观察到有沉淀相出现,同时 Al-Cu 二元相图中的固溶线也未被肯定,因而这样一个重要的现象的发现在以后的十几年内并没有产生实际效果。1919年,Merica 指出铜在铝中的固溶度随温度的降低而减小,假定了 Al-Cu 合金的时效硬化是由于沉淀相对晶体滑移的阻碍作用。当 Al-Cu 合金的时效硬化达到它的顶峰时,在金相显微镜下仍然看不到沉淀相,Merica 则认为这是由于沉淀颗粒过细所致。后来的研究结果表明,Merica 提出的时效硬化机制是不完全正确的,但固溶度随温度降低是时效硬化合金的必要条件这一定性的科学原理对发展合金起了方向性的指导作用。因而远在 G. P. 区被发现以前,许多新的时效硬化型合金已经发展出来了。由此可见,阐明机制并不一定是发展新合金的必要条件。

但是,对时效硬化这样一个重要问题进行深入的研究是不会得不到实际效果的。1937年 Guinier 与 Preston 分别应用精细的 X 射线分析,发现了 G. P. 区,阐明了时效硬化与微观结构的对应关系以后,英国 Mond 镍公司为了满足制造燃气轮机的需要在 1939 年开始了发展高温合金的工作,有效地运用了当时关于时效硬化合金的知识和经验。考虑到高温合金需要同时具备高温强度与抗氧化性能,他们选择了具有良好的抗高温氧化性能的 80/20 镍铬电阻合金作为基础,企图在这个合金中加入其他元素来产生沉淀硬化以提高其强度。他们发现在上述 Ni-Cr 合金中加入少量铝可以产生一种面心立方结构的沉淀相  $Ni_3Al$ ,后者与其基体具有共格性,因而可以显著地提高 Ni-Cr 合金的强度。Ni-Cr-Ti-Al 四元合金中的沉淀相其结构与  $Ni_3Al$  相同,强化性能更好,只是这种合金的热处理方法与一般的时效硬化合金不一样。Nimonic 80 就是这样在短短的两三年内发展出来了。在这项工作中,他们采取的具体步骤是:①应用 X 射线研究不同合金元素在 80/20Ni-Cr 合金中的固溶度;②研究不同的热处理对合金硬度的影响;③进行合金的可锻性试验;④进行全面的高温性能测试以便对合金作最后的选择。在工作过程中他们首先总结出一个经验规律,这就是产生沉淀相的合金元素的加入量只需略高于使用温度下的溶解度就能够得到最好的高温性能。应用这个经验规律,大大地缩小了选择合金的成分范围,减少了工作量,使 X 射线工作能够在较短的时期内针对较多种类的加入元素进行固溶度的测定。后来,在 Ni-Cr-Ti-Al 的基础上,用 X 射线研究了其他合金元素对 Ti 和 Al 在 Ni-Cr 合金中固溶度的影响,发现加 20%Co 使 Ti 和 Al 在上述合金中的固溶度显著降低,因而以同样的 Ti 和 Al 的含量可以得到较好的蠕变性能。某些含钴的镍基高温合金包括较近公布的 Nimonic115 在内就是根据这些道理发展起来的。

由以上可知,从实际问题出发充分运用已有的知识和经验进行系统而细致的工作,是金属科学研究取得进展的主要方面,我们今天发展合金还是依靠这种做法。在工作中,偶然的发现有时也能导致有用的结果,镍基合金中加硼或锆来改进其耐热性能就是偶然发现的。第二次世界大战期间,英国 Mond 镍公司在某一次试验中发现用新来的一批金属铬做合金原料生产出来的 Nimonic 80 其高温性能特别好。根据这一线索他们追查了这批铬的生产过程,发现制备铬的工作人员从溶液中提取  $Cr_2O_3$  时曾经加入少量硼酸来加速沉淀,因而在铬中残留了一些硼。用这种铬做合金原料,在 Nimonic 80 中引入了不到万分之一的硼,显著地改进了合金的高温性能,真是出乎当时意料之外。Nimonic 80A 这个新品种就是这样得来的。后来,美国人在镍基合金中加微量的锆也是偶然发现的,锆是从真空冶炼炉的坩埚材料首次引入的。在上述工作中,如果不深追偶然的因素,或者缺乏必要的化学成分分析技术,都不可能发现硼和锆的作用。

从了解镍基合金中微量硼具有好的效果开始,近 20 年来微量元素在合金中的作用,愈来愈引起金属科学工作者的重视,出现了不少的研究成果。今天大家都知道,在某些钢中加微量硼(0.0025%)可以大大提高其淬透性,其原因是含硼的钢在冷却时奥氏体的分解速度较不含硼的钢缓慢。在镍铬电阻合金中加微量 Zr、Cd 或 Ce(混合稀土),则通过内氧化促使表面氧化层向合金基



体内部生根,从而有利于阻止表面氧化层的剥落,提高了合金的高温抗氧化性能和使用寿命。微量或少量添加元素对合金的凝固结晶以及热处理过程中新相的成核长大更是近年来研究得较多的问题,成果尤其丰富。例如,在铝合金中加入少量钛可以显著地细化凝固后的晶粒,一般认为这是由于碳化钛对铝晶粒具有成核作用。Al-Zn-Mg 合金如果含有 0.1%—0.5%Ag,其时效硬化程度由于沉淀相的变细而大为提高。Cu-Be 合金中加 0.2%—0.4%Co 可以避免在 300℃左右时效后晶粒间界出现不连续的沉淀相,从而防止这种合金很快变软。工业生产的 Cu-Be 合金中一般都加有少量钴就是出于这种考虑。可以想像到,在某些情况下微量或少量元素在合金中的作用不会都像上面所讲的那样单纯,0.05%Cd、In 或 Sn 对 Al-Cu 合金的时效硬化作用就是一个典型的复杂例子。Al-Cu 合金中加入微量 Cd、In 或 Sn 等元素以后,高温时效产物  $\theta'$  相的成核速度显然是变快了,但是在低温时效过程中 G. P. 区的形成却受到了抑制。对这种现象的解释是,Cd、In、Sn 等元素对 Al-Cu 合金中的空位或位错具有较强的交互作用,从而抑制了借助于空位的铜原子扩散,阻碍了 G. P. 区的形成。进一步的实验事实指出,倘若上述 Al-Cu 合金在淬火前经受过冷加工,则 Cd、In、Sn 等元素失去它们对  $\theta'$  相的加速成核作用,有人认为这是由于这些元素在时效处理前已经被位错线所吸收的缘故。

上面所举的一些例子大都偏重于微量或少量元素对合金性能起好的作用,金属科学工作者根据需要在合金中添加这些元素可以达到改进性能的目的。大家知道,微量元素也可以使合金的性能变坏,产生这种效果的元素往往是从原料、炉衬或炉气中带入的,我们通常称它们为微量杂质。近年来,了解各种微量杂质的作用,杜绝它们的来源,以及寻找去除残留的微量杂质的方法已经成为冶金科学工作者的严重任务。

微量杂质对金属与合金性能的影响可以从下述事实得到一般性的了解。钢的回火脆是很久以来没有得到解决的一个重要实际问题,近年来有人发现,在含 3%Ni 的镍钢、镍铬钢或镍钼钢中如果把 P、As、Sn 特别是 Sb 的含量控制在十万分之五以下,则这几种钢可以在 450℃长期使用而不至于发生回火脆。对高压蒸汽锅炉用钢来说,这项研究结果是极其重要的。镍基合金中低熔点杂质的有害作用是众所周知的,对产品中允许的杂质含量也早已有严格规定,但是我们对这一类杂质的作用机制还了解得不够透彻。最近有人发现,如果能进一步降低杂质把 Pb、Bi、Te 等元素的含量控制在百万分之一以下,则对于改进镍基合金的塑性大有好处。具体地说,可以在镍基合金中加入较多的 Ti、Al、Mo 等强化元素而不至于引起高温脆性或影响其热加工性能和高温持久强度。

微量杂质对金属与合金的抗腐蚀性能的影响是尤其敏感的。锌基压铸合金中 Pb、Cd、Sn 等元素含量超过百万分之几就会产生晶粒间界腐蚀,铝合金中 Fe、Ni、P 等元素含量稍高就导致抗腐蚀性能的降低,这些事实在近代工业规范中已经得到反映。最近又有人提到,镍基合金在一氧化碳等还原气氛中的“绿蚀”速度可以由于极微量铅的存在而大大加剧。类似这样的问题随着近代工业和尖端技术的发展将会愈来愈多。

难熔金属的应用进一步加深了我们对微量杂质有害作用的认识。万分之几的氮就可以使铬显著变脆。氧对钼的影响尤为突出,研究表明,纯度为 99.99%的钼锭当其含氧量为百万分之一时,其脆性转变温度远在零摄氏度以下,即 $-60^{\circ}\text{C}$ 。但是,同样的钼锭如果含氧量为百万分之二,则其脆性转变温度为 $200^{\circ}\text{C}$ 。增加百万分之一的含氧量竟然使钼锭的脆性转变温度提高了 $260^{\circ}\text{C}$ ,在目前是很难理解的。氧对钨的影响与钼大致相同。一般认为,难熔金属的脆性与间隙杂质原子在晶粒间界的聚集有关,比较含氧量相同的钼、钨等金属的单晶和多晶样品的塑性试验数据似乎可以用来证明这种推测。按照这种推测,那么在晶粒间界的结构未搞清楚以前,要阐明氧在钼、钨等金属中的作用机制是很困难的。



目前,金属科学工作者为了改善难熔金属特别是钼和钨的脆性,提出了三种途径:①进行提纯来降低杂质含量特别是氧含量;②通过加工来改变组织结构俾能容忍一定的杂质含量;③采取合金化的途径以期降低脆性转变温度。关于合金元素的作用,在钼中加钛或锆所取得的效果可能主要归功于脱氧,但加铌的作用则是另一种情况。有人认为,在钼、钨中加 15% 以上的铌之所以能提高塑性,其原因可能包括三个方面:①改变氧化物的性质和分布,例如使  $\text{MoO}_2$  改变成为不润湿晶粒界面的钼铌或钨铌复杂氧化物从而使氧不至于在晶粒间界聚集;②使钼与钨晶体中的层错能降低,有助于在低温下通过孪晶来产生形变;③使钼与钨中的氧溶解度降低,因而可以减少对位错起钉扎作用的间隙原子,降低了屈服点,增加了塑性。有人指出,层错能之所以降低与晶体的自由电子浓度的增大有关,就这一点而言,钼铌及钨铌合金与某些铜合金似乎有类似之处。我们不妨撇开这种企图解释层错能为什么降低的理论猜测,仅就层错能降低这一实验事实,如果假定钼铌及钨铌合金中的层错有助于氧化物的成核,那么上述三个方面的原因实际上是一回事。电子显微镜薄膜技术应当有助于解决这方面的问题,但是还没有人对钼铌或钨铌合金中氧化物的成核进行认真的实验观测。

难熔金属的低温变脆并不限于体心立方结构,铱是一种面心立方结构的金属,但根据最近报道也有脆性转变温度。另外,合金化可以显著提高塑性也并不限于钼铌及钨铌合金,例如,钌(Ru)也是一种很脆的难熔金属,纯钌经过熔化铸锭不能加工成型,有人在钌中加 45% (原子数) 的钨得到的钌钨固溶体塑性很好,可以承受冷加工,其原因则尚无报道。

金属科学研究工作的方面是很广阔的,内容也是极其丰富的,以上不过是就发展合金和提高合金质量两个方面选择几个例子来表达当前的某些动向。可以看出,减少杂质和控制杂质含量是提高金属与合金质量和稳定质量的关键,目前世界各工业先进国家在这方面所作的努力已经到达了一个新的水平,例如对镍基高温合金中有害杂质含量的控制已经不是十万分之几而是百万分之一以下了。关于发展合金,研究新金属特别是难熔金属及其合金是一个方面,另一方面则是在已有合金的基础上研究微量或少量添加元素和热处理方法对性能的影响,多组元低成分已经成为发展合金的一个重要方向。

在基础理论还不能有效地指导生产实践的目前情况下,金属科学工作者的任务往往是双重的。一方面要多快好省地解决生产建设发展中不断提出的实际问题,另一方面也要根据可能为基础理论的发展提供条件。这两方面都需要进行系统性的工作,但由于着眼点不同在具体工作中采取的途径则是不一样的。譬如,前面已经提到的在 Ni-Cr-Ti-Al 四元系中加入另一种合金元素,研究它对 Ti 和 Al 在 Ni-Cr 基体中固溶度的影响显然是从任务出发的做法。如果要为理论的发展提供系统数据便不会选择这样一种复杂的四元系作为研究固溶度的对象,英国 Hume-Rothery 及其合作者的做法可资参考。

在任务工作中,我们往往解决了问题而不知其所以然是不足为怪的。在前面所举的许多例子中,如果要进一步追问其所以然就会碰到一些长期得不到解决的基础理论问题。对待这一类的问题我们应当实事求是,既不当忽视也不可以过分强调,如果过分强调就会把过多的人力物力投入与当前生产建设距离较远而且长期不能收到效果的工作中去,这样做显然是不合算的。

### 三

在结束这篇文章以前,有必要强调一下改进和发展实验技术与测试方法的重要意义。从前面所举的一些金属科学工作的例子可以看出,如果不掌握金相、X 射线分析、电子显微镜等技术就不可能对合金结构进行深入的研究,如果没有近代仪器分析如固体源质谱仪之类便谈不到控制杂质的

含量到百万分之一以下,与此类似的例子在这里没有提到的是很多的。由于科学工作的需要,新的实验技术的出现比过去更快了,微区域 X 射线光谱分析技术,X 射线显微镜技术等等标志着近年来这方面的发展。此外,金属科学工作者根据需要还应当不断吸取物理学方面的研究成果来补充已有实验方法的不足。例如磁学方面研究超细金属粉末的超顺磁现象所用的测量方法,有人用来研究某些合金(如 Cu-2%Co)中沉淀相的析出过程,这种合金的初期沉淀相只有几个埃的大小,不是一般的电子显微镜技术所能观察到的。金属科学研究工作的水平在很大程度上就是这样,依靠实验方法和技术的改进与发展,依靠吸取其他学科的新成就而不断提高的。

实验技术与测试方法的发展对于金属理论工作也起着重要的作用。1956 年以前,位错方面的研究只能采取传统的理论工作方式依靠合乎逻辑的假设进行计算或推理。这种工作方式在应用电子显微镜薄膜技术直接观测位错成功后就少有人采用了,直接观测在目前已成为研究位错的一种主要方法。近年来有人集中力量发展场离子发射显微镜,似乎说明研究点缺陷也倾向于采取直接观测的途径。关于金属电子理论,近年来取得某些进展也主要是通过实验获得的,具体地说,就是应用了所谓“异常的电阻趋肤效应”和“De Haas-Van Alphen 效应”来测定金属晶体中费密面的形状。前者是用超纯金属在低温和外加高频电流的条件下测量晶体取向与表面电阻的关系,后者是在低温和强磁场下沿不同的晶体取向测量磁场强度与磁化率的关系。从这些实验结果推算出来的铜单晶和铝单晶中的费密面形状,与 30 年代 Jones 根据某种假设推算出来的结果是有差别的。

金属学与金属物理是一门实验科学。今天的实验科学已经发展到这样一种程度,依靠个人设计制造简单设备出成果的时代基本上已经过去了。要发展近代实验技术,一个研究所就得集中一批包括各种专业知识的人员,或者另有专门机构来承担这项任务。从事理论性工作的人不但不应当回避发展近代实验技术的困难,而且要努力争取走在前面。有人说得好,搞基础科学的人如果回避困难就会走入枝节问题,搞一点雕虫小技,不可能为应用科学开辟途径。