

金属学 的 进展

上海科学技术文献出版社

前 言

金属学是研究金属和合金的组织结构，以及组织结构与性能之关系的一门学科；又是发展新型金属材料和新的金属加工工艺的理论源泉。近十几年来，由于出现了各种较新的实验技术，已使物理冶金学的面貌焕然一新。尤其是由于透射电子显微镜技术的发展，可以直接观察金属内部的精细结构，因而能更直观地探索影响金属各种性能的本质原因。目前用透射电子显微镜已能直接看到物理的原子象。理论研究的进展，有力地推动了新材料和新的冶金工艺的发展，例如，近十几年内发展的非晶态金属材料、记忆合金、抗氢新钢种和控制轧制新工艺等等，都是与金属学基本理论研究不可分的。

本书译载了几篇有关显微组织的总结性论文，论文的作者都是研究有关这方面问题的著名专家，这些论文对金属学都有杰出的贡献。其中 Aaronson 教授精辟地总括了近十几年来物理冶金学的成就，以及它作为一门独立学科在材料工程中的重要性。又如“晶体的界面结构”一节是目前各国冶金界正积极开展研究的课题。可以预期，在理论上搞清金属内部的界面结构，将使材料科学出现新的突破。

本书对于从事金属学和金属物理研究的工作者，从事工厂实验室的金相和热处理的工作者，以及大专院校有关专业师生颇有参考价值。由于水平有限，其中难免有错误之处，望读者批评指正。

编者 1980年2月

目 录

显微组织——序言	(1)
形貌和显微组织	(4)
缺陷和显微组织	(24)
晶体的界面结构	(83)
切变相变和显微组织	(115)
扩散相变理论和显微组织	(139)

35639

显微组织——序言

Hubert I. Aaronson

在整个 20 世纪 50 年代,甚至在 60 年代早期,物理冶金学家仍十分怀疑他们的领域的有效性。冶金学家认为他们既非科学家(因为他们的领域缺乏适当的理论基础),又非工程师(部分地由于物理冶金学在实际问题中常以完全定性的方式被应用),他们在科学和工程学的宽广领域中觉得不自在。但又认为在某种场合或某种方式中,物理冶金学家确系属于这一领域,这种感觉是一直存在的。

然而,在本年代中,事态发生了进展,它们将在短期内导致科学基础的巩固和提供令人信服的例证,使人认识到物理冶金学是工程学中的一名有效贡献者。此外,材料科学和工程学“超领域”的发展将在物理冶金学的引导下进行。对工程学的主要贡献列举如下:作为半导体工业的实验基础的区域提纯,使马赫 3 的飞机成为可能,并大大促使赖以发展慢得多的飞机和特快宇宙飞船的、具有高的强度-重量比的各种钛合金的发展,以及对疲劳的唯象(和机制上的)了解的进展。后者的详尽程度足以使设计师能对缓和大气层和宇宙空间以及地面车辆中的这一由疲劳引起的严重问题取得很大进展。

在这方面具有重要意义的是科学基础的巩固,它包括三个主要发展。其一是理论的迅速发展,开始于第二次世界大战期间及刚结束时。在 20 世纪 60 年代,理论已为大家所熟悉,而高

等院校训练的冶金工作者，以及对冶金学感兴趣的物理学家和物理化学家对它作出了重要的贡献。其二是西蒙斯-巴利菲实验，它最终提供了空位确实存在且大致具有预测浓度的真正令人信服的证据。其三（主要在剑桥大学进行）是发展了透射电子显微术，并应用这一技术来直接证明位错的实际存在。透射电子显微术最后使冶金工作者原来不得不将他们的实验结果归因于在亚显微尺度上所发生的未知过程的频率，降低到可被接受的程度。目前已可能看到足够接近于原子的机制，从而有可能提供这些机制的实际可信的模型。目前金相学比以往任何时期更成为其在科学上和工程上实力的基本源泉。

虽然物理冶金科学目前的主要理论基础大部分系从物理和化学上更基本的原理导出，但不能简单地认为是从这个基础发展出来的另一种派生学科。物理冶金学主要研究以缺陷为基础的现象，这些现象通常是较为复杂和较不规则的；它也许最好描述为一种部分自组事件的科学。在例如扩散转变的形核或马氏体片的生长中，自组程度高于一般情况，而在加工硬化中则偏低。然而，自组程度通常是足够的，所以人们不至于遇到要阐明近于混乱情况的需要。另一方面，目前存在较大混乱是正常的，所以许多理论文章并不能在几年内揭开该领域的本质。虽然已经尝试这样做，但冶金学家总是通过显微组织的研究而确切地指出，这些尝试的基础太狭窄并太简单，因而不能产生现实效果。要对物理冶金学中一个重要题目作相当完整的诠释，习惯地表现为一些公式和基本上定性的物理见解的特定结合。如果对显微组织的实质缺乏评定，则通常物理见解或是不能得到，或是不能肯定，而且诠释也不能持久。

这种特定结合在其它领域中已获得应用。在那些领域中，部分自组现象是重要的。物理冶金学家是对陶瓷作出重大贡献

者。他们正在为聚合物及生物材料的研究作出贡献。而长期来,对半导体研究起着必不可少的作用。因此,认为材料科学与工程乃是几种较狭窄但相关的学科的综合这一概念,正在获得现实的意义。而且,正如所期望的那样,物理冶金学在综合过程中正在起着中心的作用。随着其本身领域的巩固以及冶金学原理可适用于邻近研究领域的反复例证,冶金学家目前似已确信其自身职业的有效性,以致他最终停止对它的怀疑。

本文考察了冶金学家或材料科学家对显微组织的了解。包括显微组织的历史的、原子的及晶体学的基础,它们在凝固、塑性形变、晶界过程及相变中是如何产生的,及其如何测定等。这些范围宽广的题目充分证明了我们目前对显微组织的理解所依赖基础的广度,并可在今后的研究中进一步将本方法的规模和作用扩展到了解固体中的复杂现象。

葛正凯译自《Metallography》Vol. 8, No. 1
(1975), p. 1~3 桂立丰 校

形貌和显微组织

Robert T. Dehoff

韦伯斯特对形貌所下的定义为“地面的起伏特征;任何物体的表面外形”。按此狭隘的涵义,特别当试样制备得很好时,所谓显微组织的形貌是毫无意义的。因此,在本文中应用此字的较广定义。“形貌”不是指一个人沿着世界的表面遨游时所见到的地形,而被解释为一个极细小生物在“穿过”三维的显微组织世界遨游时所见到的地形(更精确地说,组织单元的分布情况)。

假如该小生物被指定承担描述世界上地形的工作,那末作为一个三维的制图员,他的任务是艰难的。假定他能区别他所碰到的各种相,正如他的人类对手能区别土地与水那样;他甚至能绘制说明其周围组成流向的等高线地图。但假如他着手为他自己和他的前辈对各种显著的特征取名时,则会很快地用完“名字”。他会发现,当他探索他的世界时,他常会被其中特征的重复性所困扰。在意料不到的间隔中会出现巨大的剧变,而其人类对手却从未见到过这种同样的剧变。在某些情况下,这些剧变势将完全修改地形,即要再分配组成,和用新的里程碑置换旧的。

假如他生存下来并处于一个比较平静的世界上,例如处于经受质点粗化的组织中时,他可能会有时间坐下来仔细地考虑一下他所肩负的任务的艰巨性。他可能发现必须将全部任务

分成若干部分,从对显微镜景色的最简单的描述开始,再进行更详细和更完善的描述。假如我担负着他的工作,我将考虑描述显微组织的几何状态即形貌的三个级次:

- I. 定性的显微组织状态;
- II. 定量的显微组织状态;
- III. 定量的形貌状态。

描述的第一个级次只是简单地列出一张存在于组织中各种特征的一览表;第二个级次将表中每一项目与描述其广度或外形的数字联系起来;第三个级次是用特征的空间分布来进行完整的描述。从制图员的立场出发,第一个级次是他据以选定其描述的术语汇编,第二个级次是一张关于每一具体特征类型可能有多少和多大的表格,而第三个级次实际上是他的地图。

定性显微组织状态

存在于显微组织中的特征可毫无遗漏地区分为点、曲线、面以及体。体可能具有由点缺陷、位错以及堆垛层错组成的内部结构或亚结构。其余特征则由一些不同类型的体的相互交联而形成。通常可设想两个体的交联决定一个面,三个体的交联决定一条空间曲线,而四个体的交联决定一个点*。因此,建立一种汇总表,用在交联时能给出较低维次特征的形状的各种体来说明这些特征,看来对于显微制图员是有用的。应用这种方法,使得列出和识别可能存在于由任意个相所组成的组织中的所有体、界面、三重线以及四重点成为可能。这种汇总表的最初部分见表1、2、3。

* 当然,一条曲线可能由三个以上的体的交联而形成,而一个点则由四个以上的体的交联而形成。然而,这些组态所需的系统有序度在大于原子尺度的显微组织中通常并不遇到。

一个系统的定性显微组织状态，可用系统中存在的各种特征类型所列的表来确定。由于组织中的一切体实质上含有一切晶体缺陷，故将它们包括在这种表内并不能提供可资应用的数据。因此，在描述三个相以下的系统的定性显微组织状态时，仅须由表 1、2、3 中识别并列出现存在的那些特征即可。根据对代

表 1 单相组织中所存在的特征

维 数	特 征	表 示
3	体 (晶 粒)	α
2	面 (晶 界)	$\alpha\alpha$
1	曲线 (晶粒棱边)	$\alpha\alpha\alpha$
0	点 (晶 粒 隅 角)	$\alpha\alpha\alpha\alpha$

总 计: 4 种 特 征

表 2 二相组织中可能存在的特征

维 数	特 征	表 示
3	体 (晶粒, 质点)	$\alpha \quad \beta$
2	面 (晶界, 界面)	$\alpha\alpha \quad \beta\beta \quad \alpha\beta$
1	曲线 (晶粒棱边, 三重线)	$\alpha\alpha\alpha$ $\alpha\alpha\beta$ $\alpha\beta\beta$ } 在 $\alpha\beta$ 界面上 $\beta\beta\beta$
0	点 (四 重 点)	$\alpha\alpha\alpha\alpha$ $\alpha\alpha\alpha\beta$ $\alpha\alpha\beta\beta$ $\alpha\beta\beta\beta$ } 在 $\alpha\beta$ 界面上 $\beta\beta\beta\beta$

总 计: 14 种特征

表 3 三相组织中可能存在的特征

维 数	特 征	表 示
3	体 (晶粒, 质点)	$\alpha \ \beta \ \gamma$
2	面 (晶界, 界面)	$\alpha\alpha \ \beta\beta \ \gamma\gamma \ \alpha\beta \ \beta\gamma \ \alpha\gamma$
1	曲线 (晶粒棱边, 三重线)	$\alpha\alpha\alpha \ \beta\beta\beta \ \gamma\gamma\gamma$ $\alpha\alpha\beta$ (在 $\alpha\beta$ 界面上) $\alpha\beta\beta$ $\alpha\alpha\gamma$ (在 $\alpha\gamma$ 界面上) $\alpha\gamma\gamma$ $\beta\beta\gamma$ (在 $\beta\gamma$ 界面上) $\beta\gamma\gamma$ $\alpha\beta\gamma$ (在所有界面上)
0	点 (晶粒隅角, 四重点)	$\alpha\alpha\alpha\alpha \ \beta\beta\beta\beta \ \gamma\gamma\gamma\gamma$ $\alpha\alpha\alpha\beta$ $\alpha\alpha\beta\beta$ } (在 $\alpha\beta$ 界面上) $\alpha\beta\beta\beta$ $\alpha\alpha\alpha\gamma$ $\alpha\alpha\gamma\gamma$ } (在 $\alpha\gamma$ 界面上) $\alpha\gamma\gamma\gamma$ $\beta\beta\beta\gamma$ $\beta\beta\gamma\gamma$ } (在 $\beta\gamma$ 界面上) $\beta\gamma\gamma\gamma$ $\alpha\alpha\beta\gamma$ $\alpha\beta\beta\gamma$ } (在 $\alpha\beta\gamma$ 线上) $\alpha\beta\gamma\gamma$

总 计: 34 种特征

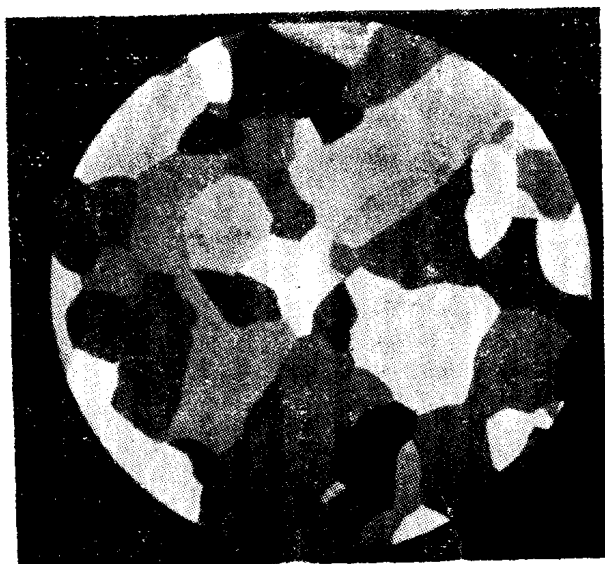


图1 单相的多晶铝(α), 具有下列特征: α 晶粒、 $\alpha\alpha$ 晶界、 $\alpha\alpha\alpha$ 晶粒棱边以及 $\alpha\alpha\alpha\alpha$ 四重点(在截面上未能见到)

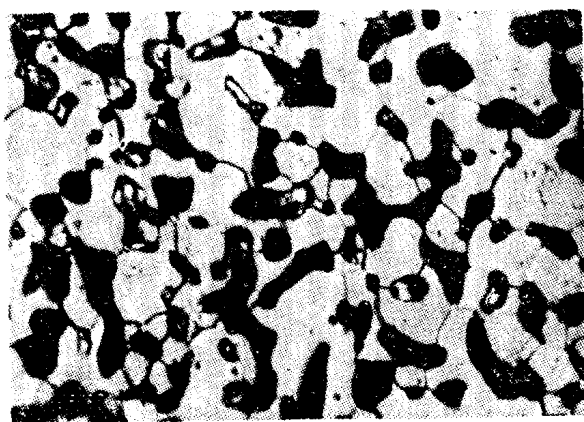


图2 由 α 和 p 二相所组成的、多孔的二氧化铪试样, 具有下列特征:
 α 和 p 相, αp 界面, $\alpha\alpha\alpha$, $\alpha\alpha p$ 三重线, 以及 $\alpha\alpha\alpha\alpha$ 和 $\alpha\alpha\alpha p$ 四重点

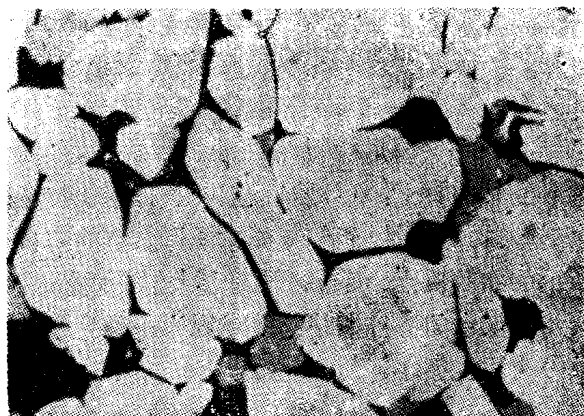


图3 多孔的赤铁矿硅石,其组织具有三种相(α , β 及 p),
四种界面($\alpha\alpha$, $\alpha\beta$, αp 和 βp),四种三重线($\alpha\alpha\alpha$, $\alpha\alpha\beta$, $\alpha\alpha p$
和 $\alpha\beta p$),以及四种四重点($\alpha\alpha\alpha\alpha$, $\alpha\alpha\alpha\beta$, $\alpha\alpha\alpha p$ 和 $\alpha\alpha\beta p$)

表性的显微截面的组织检查,总是能够做到这一点的。关于显微组织及其相应的定性状态的一些例子如图1~3所示。

通过定性地评定所存在特征的某些特性,可使上述定性描述更为详细。例如,通过简单地观察一个截面的组织,就可说明每一相所占的体积分数,可描述粒状特征的粗细,质点的排列是聚集的或分散的,质点的形状是简单的或复杂的。

定量显微组织状态

列于显微组织定性描述表中的每一种特征均联系着一种或多种明确可定的几何特性。用数值指定这些特性中的一种或几种,可对系统的显微组织状态作出定量的描述。定量的程度取决于被评定的独立特性的数目以及被指定的这些数值的准确度。特性可区分为形貌特性、度量特性两类。

假如一种特征的形貌变化或形变并不改变某种几何特性的数值,亦即特征仅被拉长、膨胀或扭曲等,而变化后它既不断开,又不自相并合,则这一几何特性是形貌性的。对于二相组织中的每种特征,可能定为形貌特性的列于表4。这些特性报道了组织的两种独特的特点:(1)数目(某一具体组织特征的不连通部分的个数),(2)连通性(组织特征单元所具有的超自连通数)。如图4所示的弥散质点,其数目的值是大的,而连通性则为零。存在于烧结初期中的孔隙网络(图5)则为一种具有极高连通性数值的单一连通特征。

表4 二相组织中特征的形貌特性

维 数	特 征	记 号	特 性	
			数 目	连 通 性
3	体	α	✓	✓
		β	✓	✓
2	面	$\alpha\alpha$	*	—
		$\beta\beta$	*	—
		$\alpha\beta$	✓	✓
1	曲 线	$\alpha\alpha\alpha$	*	**
		$\beta\beta\beta$	*	**
		$\alpha\alpha\beta$	*	**
		$\alpha\beta\beta$	*	**
0	点	$\alpha\alpha\alpha\alpha$	✓	—
		$\beta\beta\beta\beta$	✓	—
		$\alpha\alpha\alpha\beta$	✓	—
		$\alpha\alpha\beta\beta$	✓	—
		$\alpha\beta\beta\beta$	✓	—

总形貌特性: 21

* 可分别定出各别单元的数目和不连通网络的数目。

** 由于网络的单元是简单地连通的,故连通性仅适用于网络。

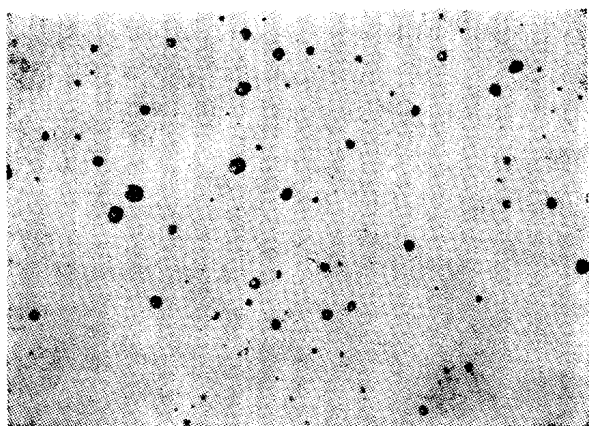


图4 烧结的二氧化铀中孤立的球状孔隙

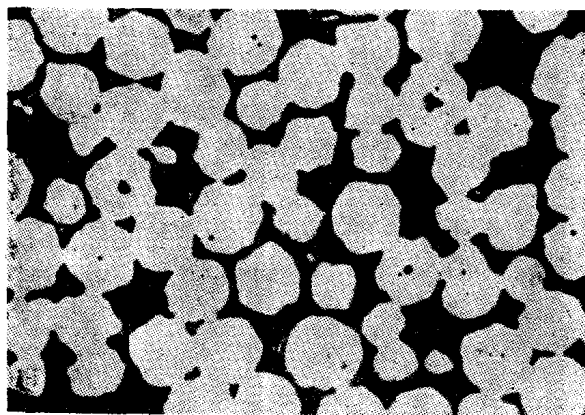


图5 轻度烧结的镍粉，其中孔隙及固相均完全连通，
各具有大的连通性数值

反之，“度量”特性说明组织特征的广度并提供某些形状信息。对于两相组织中的每一种特征所限定的度量特性列于表5。体积分数、表面积及线长度均系它们所评特征的广度的直接量度。总曲率道了与广度无关的面的信息，还给出关于它们形状的一些情况(注：总曲率不能有效地用来确定一种相内部的

晶界)。处于相际界面上的一些线性特征,亦具有对所涉相来说可确定的总曲率,且这一信息也可用计数测量法获得。在这种情况下,总曲率包括线性特征的长度以及棱边处参照相的表面之间的二面角。小的和大的体积分数示于图6。图7对比了两种组织的小的和大的表面积。图8对比了总曲率的差异。



图6 在冷加工硬化铸中大的和小的退火孪晶体积分数

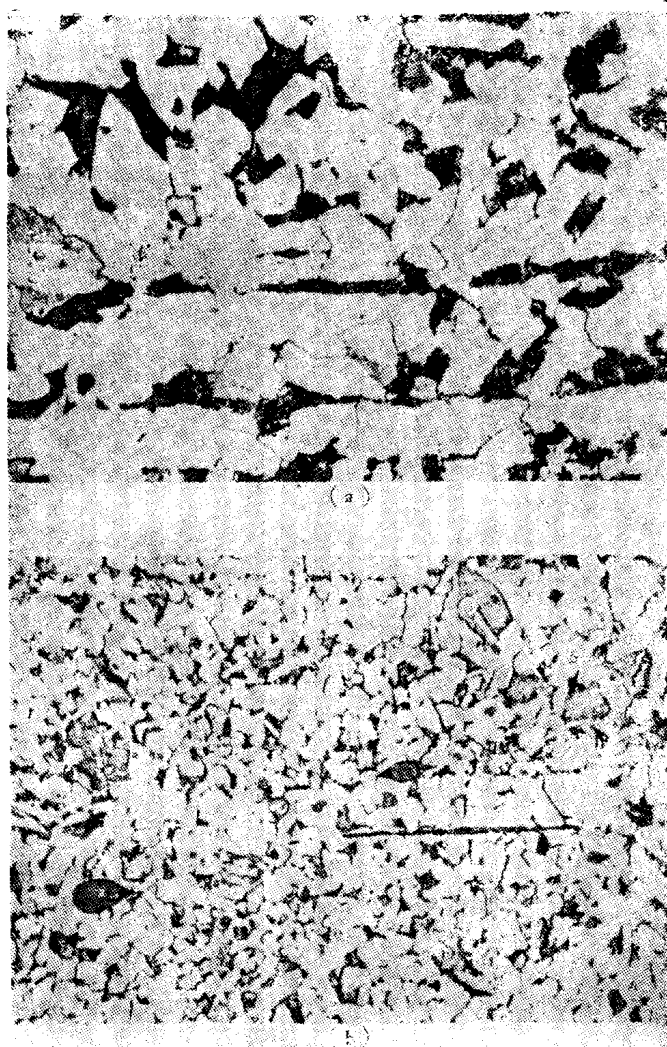


图7 相同放大倍数下 0.4C 合金钢的两种不同显微组织状态, 体积分数相同, 就小的和大的表面积进行对比



图8 两张二氧化铀显微组织照片, 具有名义上相同的第二相体积分数和表面积, 对比其总曲率: (a)大值; (b)小值