

体视学

組銀定量分析の原理と應用

体 视 学

组织定量分析的原理和应用

余永宁 刘国权 编著

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书以简明的集合论语言系统地阐述了体视学的基本原理以及这些原理的实际应用。主要内容包括：体视学的统一术语，体视学的基本方法，体积、面积和线长度密度，粒子的形状、尺寸、数量密度以及尺寸分布，薄壁组织的厚度及厚度分布，薄膜试样投影图象分析的体视学原理，取向非均匀分布的体视学原理，非平面表面的定量分析，最后还介绍了自动图象分析仪的原理和应用。

本书可供从事体视学理论研究以及从事组织分析研究的 科学 研究人员、教师、工程技术人员阅读，也可供 材料科学、生物 学、医学、岩矿等专业的大学生、研究生学习和参考。

体 视 学

组织定量分析的原理和应用

余永宁 刘国权 编著

责任编辑 赵公台

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街莱佛士大厦89号)

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 15 3/4 字数 414 千字

1989年12月第一版 1989年12月第一次印刷

印数00,001~1,100册

ISBN 7-5024-0338-1

TP·14定价12.50元

前 言

12年前笔者编写过一个小册子——《定量金相》，主要是供教学用的，随后，把最基本的体视学原理编入了教材《金属学原理》中。在1980年后，笔者曾几次在北京市以及全国范围的体视学学习班讲授体视学，又编写了《体视金相学》作为教材。近年来，我国已引进了相当数量的图象分析仪，因而有更多的人对定量描述组织图象的原理和方法发生兴趣。很多从事各种研究组织图象的科技工作者、大学生和研究生都希望能够有一本系统论述体视学原理和方法的参考书，这就使笔者想在过去教学和工作的基础上，重新写一本较为系统和全面的有关分析和测量组织图象的原理和方法的书。由于其它工作较多，经过两年多断断续续地编写，同时，刘国权同志帮助编写了第九、第十两章，这样，终于使《体视学》这本书得以脱稿。

为使这本书能够更广泛地适合于材料科学、生物学、医学以及一切从事有关研究组织图象的科技工作者阅读，编写时并不局限于材料科学范围，所以，这本书的名字也不再是《定量金相》或是《体视金相学》，而采用更广泛的名称——《体视学》。

为了便于读者阅读和使用，本书在内容上尽量全面系统地介绍体视学的原理和方法。为此较为详细地介绍了基本原理的理论推导过程，一方面是因为这对正确使用体视学方法是必要的，另一方面因为体视学理论仍有待发展，这对进一步开拓体视学理论也是必要的。本书还介绍了由基本原理导出的各种方法的实际应用，对于主要兴趣在应用方面的人，也可以避开理论推导而直接查阅和使用所导出的结果以及有关实际应用部分。

由于编著者水平所限，书中难免有疏漏或错误之处。尽管如此，我们谨希受教于同行们，并且希望这本书能对从事有关组织图象研究和应用的科技工作者、大学生和研究生有一些帮助。如果能达到了这个目的，我们将感到十分荣幸。

余永宁

1986年10月

目 录

绪论	1
1 基本概念、体视学常用符号及基本操作	4
1.1 体视学的语言和符号	4
1.2 集合论的基本概念在体视学中的应用	6
1.3 体视学方法的基本操作	10
1.3.1 几何概率	11
1.3.2 基本测量方法	22
2 基本体视学参数的估计	35
2.1 体积密度 V_V 的估计	35
2.1.1 德莱塞定律: $V_V = A_A$	36
2.1.2 罗西瓦尔定律: $V_V = L_L$	40
2.1.3 以计点法测量体积密度: $V_V = P_P$	43
2.2 表面积密度 S_V 的测量	45
2.2.1 表面积密度 S_V 和截面上的断面轮廓边界长度 密度 $L_A(B_A)$ 的关系	45
2.2.2 表面密度 S_V 和在测试线上的截点密度 P_L 间的关系	48
2.3 平面上的线长度密度 L_A 的测量	51
2.3.1 比丰原理	52
2.3.2 在平面上线长度密度 L_A 的测量	53
2.4 空间中的线长度密度 L_V 的测量	56
2.5 体视学参数测量的一些实际问题	58
2.5.1 测量 V_V	60
2.5.2 测量 S_V	67
2.5.3 测量 L_A	73
2.5.4 测量 L_V	74
3 粒子的形状、尺寸以及在空间中的数量密度	76
3.1 粒子系统中粒子在空间的数量密度 N_V	77
3.2 凸型粒子系统的粒子参数间的一般关系	81

2 目 录

3.3 形状相同、尺寸相同的粒子系统	82
3.3.1 旋转体: 球体、圆柱体和椭球体	83
3.3.2 一般的凸型粒子及凸型多面体	91
3.4 测量形状相同、尺寸相同的粒子系统的粒子空 间数量密度的其他方法	95
3.4.1 韦伯尔和戈梅斯法	95
3.4.2 德霍夫法	101
3.5 形状相同、尺寸不同的粒子系统	105
3.5.1 粒子系统的平均参数	105
3.5.2 萨尔特科夫关于包含不同尺寸球粒子的系统的分析	106
3.5.3 尺寸分布对韦伯尔和戈梅斯法中的 β 的影响	109
3.5.4 用测试线测量的方法	111
3.5.5 统计直径	113
3.6 粒子系统的其它参数	115
3.6.1 粒子在基体上分布的平均自由程	115
3.6.2 分布在基体内界面上的粒子数量密度	116
3.6.3 粒子的接触程度	118
3.7 测量粒子形状、尺寸和数量密度的一些实际问题	120
3.7.1 粒子形状的近似	120
3.7.2 测量 N_A 及 N_V	122
3.7.3 断面尺寸的测量	124
3.7.4 晶粒尺寸的测量	127
4 粒子尺寸分布	134
4.1 随机截面切过一个球所得的断面圆尺寸分布	134
4.2 随机截面截过包含尺寸不同的球粒子系统的断 面圆尺寸分布	138
4.3 从截面上的断面圆尺寸分布导出球粒子空间尺 寸分布的直径法	141
4.3.1 一般原理	141
4.3.2 施瓦茨—萨尔特科夫法	144
4.3.3 戈德史密斯—克鲁兹—奥里夫法	151
4.3.4 威克塞尔法	155

4.3.5 伍德赫德法	158
4.4 估计球粒子系统球尺寸分布的萨尔特科夫面积法	165
4.5 球粒子系统粒子尺寸分布的矩和截面上断面尺寸分布的矩之间的关系	170
4.6 估计球粒子尺寸分布的弦长法	172
4.6.1 随机测试线穿过球粒子截得某一长度的弦的概率	173
4.6.2 尺寸不同的球粒子系统的尺寸分布的弦长(连续型)分析法	174
4.6.3 尺寸不同的球粒子系统尺寸分布的弦长(离散型)分析法	176
4.6.4 弦长法的作图解法	178
4.7 非球粒子系统的粒子尺寸分布	183
4.7.1 形状相同的旋转椭球体粒子系统的尺寸分布	183
4.7.2 椭球体的形状—尺寸分布	184
4.7.3 三轴椭球系统的弦长法	189
4.7.4 形状相同的多面体粒子系统	190
4.8 尺寸为对数正态分布的粒子系统及由截线测量确定粒子尺寸分布的矩	191
4.9 测量粒子尺寸分布的一些实际问题	195
4.9.1 从断面尺寸分布重建粒子空间尺寸分布	195
4.9.2 弦长法测定球粒子尺寸分布	207
5 薄壁(片)组织的厚度	214
5.1 薄壁组织在随机截面上的宽度	216
5.1.1 薄壁组织的厚度是均匀的情况	216
5.1.2 薄壁组织的厚度是不均匀的情况	217
5.2 随机测试线穿过薄壁组织的截线长度	219
5.2.1 薄壁组织的厚度是均匀的情况	219
5.2.2 薄壁组织的厚度是不均匀的情况	221
5.3 薄壁组织厚度分布的测量:作图法	222
5.4 薄壁组织厚度分布的测量:数值计算法	228
5.4.1 测试面法	229
5.4.2 测试线法	232

4 目 录

5.5 用算法估算薄壁组织的厚度	235
5.6 测量薄壁组织厚度分布的实际例子	235
5.6.1 作图法	235
5.6.2 数值算法	239
6 形状的描述	246
6.1 晶粒(胞)组合系统的拓扑关系	247
6.2 平均曲率的测量	254
6.2.1 平面曲线的曲率	254
6.2.2 曲面的曲率	258
6.2.3 曲面的平均曲率密度和随机截面上相截迹线的曲率密度	263
6.2.4 以测试线扫过截面的切点数来估计曲面的平均平均曲率	266
6.2.5 积分平均曲率的几何意义	271
6.2.6 曲率测量应用的一些例子	275
6.3 形状的统计描述	278
6.4 用连续顺序取截面的方法重建三维组织	281
7 薄片试样投影图象分析的体视学原理	285
7.1 薄膜或切片中组织的投影图象和其空间组织维数 的等价关系	286
7.2 在没有重叠和被薄膜或切片表面截短情况下 投影图象的精确关系	288
7.2.1 在投影面上的点	288
7.2.2 线	290
7.2.3 面	293
7.2.4 凸型粒子	294
7.3 在薄膜(切片)中粒子间没有重叠但有被薄膜 (切片)表面切割截短的情况	298
7.3.1 随机截面的厚度对截面和组元相截的概率的影响	298
7.3.2 测试面厚度对估算凸型粒子系统的 V_v 和 S_v 的影响	299
7.3.3 截面厚度影响的修正因子	304
7.3.4 粒子尺寸分布对修正因子的影响	307
7.3.5 粒子被截短后由于部分截短粒子衬度不足而引起的 损失对修正因子的影响	311

7.3.6	粒子间的平均自由程	317
7.3.7	凸型粒子的平均平均曲率	318
7.4	在没有重叠的情况下从投影图中粒子投影尺寸 分布建立粒子空间尺寸分布	319
7.5	随机分布组织的总投影	324
7.5.1	平面上线段的总投影	325
7.5.2	空间线段的总投影	327
7.5.3	空间曲面的总投影	327
7.6	空间组织在投影方向有重叠覆盖的情况	328
7.6.1	粒子系统的 V_v	328
7.6.2	空间中的表面积	330
7.6.3	空间中的线长度	331
7.6.4	空间中的点	332
7.7	解决截面厚度不为零时的体视学关系的一般化 模型	333
8	取向非均匀分布的组织体视学	341
8.1	取向非均匀分布组织的几何性质	341
8.1.1	平面上的线组织	341
8.1.2	空间中的线组织	343
8.1.3	空间中的曲面	345
8.2	平面取向非均匀分布的曲线的体视学参数	348
8.2.1	取向均匀分布无择优取向的情况	350
8.2.2	$f(\psi)$ 是心形线分布的情况	351
8.2.3	萨尔特科夫的处理方法	358
8.3	空间中取向非均匀分布曲线的体视学参数	365
8.3.1	无任何择优取向均匀分布的情况	367
8.3.2	$f(\psi)$ 是费希尔分布的情况	367
8.3.3	$f(\psi)$ 是心形线分布(马里奥特分布)的情况	371
8.3.4	萨尔特科夫的处理方法	374
8.4	空间中取向非均匀分布曲面的体视学参数	376
8.4.1	取向均匀无规分布的情况	379
8.4.2	$f(\psi)$ 为费希尔分布的情况	380

6 目 录

8.4.3 $f(\psi)$ 为心形线分布的情况	333
8.4.4 萨尔特科夫的处理方法	332
8.4.5 择优取向方向和择优取向程度的确定	333
8.5 片层状组织	399
9 非平面表面定量分析	401
9.1 有关基本概念	401
9.1.1 术语及惯例	404
9.1.2 断口表面的分类	405
9.2 基本方法	407
9.2.1 立体图象对观测法	407
9.2.2 正投影法	408
9.2.3 剖面迹线法	403
9.3 不平度与真实表面面积	409
9.3.1 面不平度指数与真实表面面积	409
9.3.2 线不平度指数与真实线长度	409
9.3.3 面不平度指数与线不平度指数之间的相互关系	411
9.4 表面面积密度与体积密度	420
9.4.1 表面面积密度公式的推导	420
9.4.2 体积密度与表面面积密度之间的相互关系	424
9.5 断口表面与其正投影图象之间的精确关系	427
9.5.1 任意曲率表面	427
9.5.2 名义平坦表面	429
9.5.3 一般非平面表面	430
9.6 断裂路径选择性的定量描述	432
9.6.1 对种类的选择性	432
9.6.2 对粒子尺寸的选择性	433
9.7 其它定量分析	434
9.7.1 取向分析	434
9.7.2 曲率分析	436
9.7.3 高度分析及裂缝分支指数	437
9.7.4 断口表面粒子尺寸分布问题	439
9.7.5 断口表面的再现	439

9.8 分辨率及分数维	440
9.8.1 分析结果对放大倍数的依赖性	440
9.8.2 分数维及其应用	441
10 自动图象分析	448
10.1 图象分析的分类	448
10.2 自动图象分析的基本原理	451
10.2.1 自动图象分析系统的基本结构	451
10.2.2 自动图象分析的基本过程	452
10.3 测量与参量	452
10.3.1 系统参量	453
10.3.2 场测量及可测参量	453
10.3.3 特征物测量及可测参量	456
10.4 数学形态学初步	460
10.4.1 利用结构元进行形态变换	460
10.4.2 图象的形态学描述与测量	463
10.5 自动图象分析的误差问题	471
10.5.1 仪器误差	471
10.5.2 人为误差	481
10.5.3 随机误差与随机不确定度	483
10.6 自动图象分析的应用及注意事项	485
参考文献	487

绪 论

体视学“Stereology”这一词是在1961年由汉斯·伊莱亚斯(Hans·Elias)在德国的费尔德贝格(Feldberg)召集的只有十几个人参加的一个非正式国际会议上创造的。这是一个新概念,甚至在最近的字典里仍然找不到这个词。这次会议的目的主要是交换有关细胞组织或材料组织等的“截面的立体诠释”的观点。虽然,与会者只是少数的生物学家和数学家,但是,会议的内容很快就引起了长期从事组织分析工作和关注这类工作的材料科学、冶金学、矿物学工作者的注意。两年后,即1963年,在维也纳正式成立了国际体视学会。之后,差不多每四年就召开一次学术会议,至今已经召开过六次会议。这样,世界上已经有一支横跨好几个学科的、从事体视学研究和应用的庞大队伍了。

体视学的原始定义为:“体视学是建立从组织的截面所获得的二维测量值与描述这组织的三维参数之间的关系的数学方法的科学。”从我们以后的讨论将会知道,这种定义还嫌太狭窄。事实上,我们不一定用二维截面而是用一维的线穿过平面或空间组织,也可以用其测量值来估算二维或三维的组织参数。这样,在上面定义中把问题限制在“二维截面”和“三维组织”是不必要的。如果把上面定义中的“二维”和“三维”改以“ s 维”和“ n 维”(其中 $s < n$),则会使定义更为一般化。

研究空间组织总是在其截面图象或是在其投影图象上进行的,前者是不透明的材料的截面的光学显微镜图象,后者包括透明物体的薄片光学显微镜图象、薄膜电子显微镜图象、断口的投影图象等。通常通过观察分析这些图象来推断空间组织的真实情况。很容易想象这个过程的困难性。例如,在截面上看到某种组织的断面轮廓是一个圆,我们很难断定空间中的组织究竟是球、是圆柱还是椭圆,又例如,空间球形组织在截面上的断面虽然是

一个圆，但是，有一点是清楚的：在绝大多数情况下，断面圆的直径小于真实球的直径。我们很难简单地判定空间球的直径有多大。对于投影图象，由于空间组织被切片（或薄膜）两端面截短以及切片（或薄膜）中组织在投影方向的互相重叠等原因，问题会更为复杂化。由于对这些问题缺乏认识，有一些人，甚至有一些教科书中往往因为对截面（或投影图象）的错误解释而使得所表达的空间组织不符合实际情况。

很明显，我们无法只依靠对任何一个物体的单一截面所得的断面轮廓来对这个物体空间形状作出任何有价值的判断。但是，如果对这个物体作相当多的随机截面（包括二维的截面和一维的截线），我们可以依靠在这些截面上所得的信息作出对这个物体空间形状的有一定价值的判断。当然，如果对这个物体沿一定方向作出无限多个连续截面，就可能得出比较全面和正确的判断，根据这些资料还有可能作出三维图形。这就是所谓“三维重建”的问题。同样，我们也无法依靠物体的单个投影图来对物体的空间形状作出任何有价值的判断。如果依据这个物体在很多方向的投影图，则可能作出有一定价值的判断。由此可见，体视学理论是建立在统计基础上的。一个基本的问题是：若以某种方式切割物体时，物体由于切割所获得的某种断面轮廓出现的概率是多少？这是贯穿整个体视学的基本问题。所以，体视学是建立在统计数学、几何概率、曲线和曲面理论、微分几何等学科的基础上的。

综上所述，体视学的任务就是用严格的数学方法，根据从比实际组织维数小的截面（投影图）所获的信息，定量地描述实际组织。实际上，体视学工作分两大类：一类是体视学基础理论的研究，从事这部分工作的大都是各种类型的数学工作者；另一类则是利用这些理论去寻求解决显微组织形貌的描述和测量的方法的研究，从事这部分工作的大都是生物学工作者、材料科学工作者及矿物学工作者等。事实上，相当一部分科学工作者同时从事这两方面的工作。不消说，从事体视学基础理论研究工作的人应该熟知体视学的研究方法和基础理论，而对于从事体视学实际

应用工作的人也应该了解体视学的研究方法和基础理论。只有这样，才能够在研究和描述组织中选择适当参数和开拓新的更合理的参数。目前，国内从事解决显微组织形貌的描述和测量的材料科学工作者，生物学工作者以及矿物学工作者等，由于各种原因，他们中的很多人还缺乏系统的体视学知识，特别是很多人还没有了解到体视学对他们工作的重要性，这就会在一定程度上影响他们的工作。本书是为这些从事体视学实际应用的科技工作者编写的。所以，在书中我们系统而简要地介绍了体视学的基本理论。为了便于应用，在每章后面还介绍了在实际应用时所要注意的问题。

从1963年正式成立国际体视学会以来，已经编著出很多有关体视学的优秀专著，其中比较重要的列于本书的参考文献目录中〔1~8〕。另外，还有历届国际体视学会议论文集也列入参考文献目录中〔9~12〕，以供需要进一步了解“体视学”的读者选择阅读。

1 基本概念、体视学

常用符号及基本操作

1.1 体视学的语言和符号

体视学研究的对象是组织，在不同学科中因为研究的具体对象不同，对组织的定义不尽相同。为了在各学科都能适用，在体视学中，取各学科定义中的共性，把组织定义为：“由互相依赖的各部分以明确的形状构成的整体。”组织中的所谓部分，就是构成组织的“组元”。组元可以是单一种物质，由一种组元构成的组织就类似于材料科学中的单相组织。由两种或多种组元构成的组织就类似于材料科学中的复相（或多相）组织。当一种组元以分散的单个的方式分布于另一组元上，称它们为粒子，这种组织相当于材料科学中的第二相粒子分散地分布在基体上的组织。粒子可以具有任何形状。通常把粒子分为两类：凸型和凹型粒子。如果粒子中任意两点的连线一定包含在粒子内部的话，也就是说，任何一根线穿过粒子仅截出一条弦线的话，这类粒子是凸型的；反之，只要不满足上述定义的都是凹型粒子。

描述一个组织，除了要知道组织中有哪部分以及它们各属于什么组元的定性信息之外，还要定量地加以描述。在定量方面，我们常关心组织中所要讨论的组元的体积、表面积、长度以及个数等量，但是，这些量都是容量性质，为了要把它们变为强度性质，引入“密度”概念。“密度”定义为单位体积，单位面积或单位长度上的量。例如，对于组织中的某一组元来说，它的空间体积密度、空间表面密度、空间线长密度、空间数量密度等是指在单位空间的组织中所讨论组元的体积、表面积、线长度、数量（粒数）等。

一个测试面切割空间组织，把组元切出的“象”称为组元的“断面”。在描述整个组织断面时，也采用“密度”概念，但是和空间密度不同，这里是指单位断面组织中的量。显然，这些量和空间组织有密切关系的。在测量空间组织时，不一定只限于用测试面测量，也可以用其它的几何测试器来和空间组织相截，例如，可以用测试薄片，用测试线和测试点来和空间组织相截。测试线和空间组织的组元相截出的“象”是线段，在应用“密度”概念时是指单位测试线上的量，例如单位测试线上截出组元“线段”的长度、数量等。测试点和所讨论的组元相截出的“象”是点。这时的“密度”概念是指在组元截出的数目以及整体测试点的数目比。所有这些量，也都是和空间组织密切相关的。各种测试器和空间组织相截的情况示意如图 1-1 所示。测试器用符号 T 表

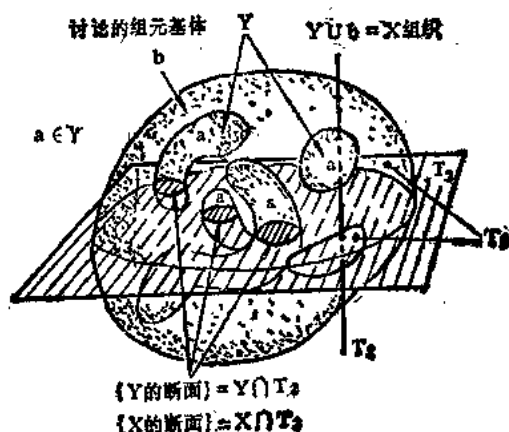


图 1-1 在基体 b 上包含物体 a 组元的组织模型。测试面 T_2 、测试线 T_1 、测试点 T_0 截过组织

示，以下标来区分测试器的性质： T_2 表示测试面， T_1 表示测试线， T_0 表示测试点。整个组织空间表示为 X ，所讨论的组元 a 表示为 Y ，余下的组元 b 称为基体，如果把 X 表示为一个集合，则 $a(Y)$ 和 b 是 X 的子集。

描述组织的量不外是体积(V)、表面积(S)、平面积(A)、