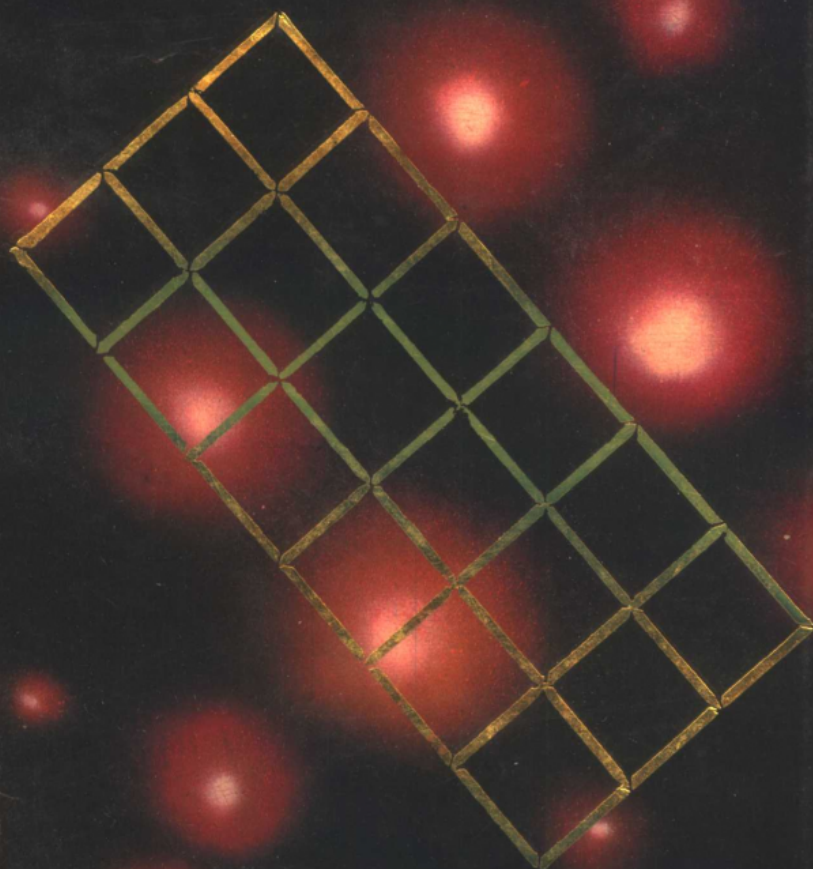


钢的电子显微

金相学

谈育煦 王静宜



山东科学技术出版社



钢的电子显微金相学

谈育煦 王静宜 编著

山东科学技术出版社

责任编辑 梁柏龄

(鲁)新登字 05 号

钢的电子显微金相学

谈育煦 王静宜 编著

*

山东科学技术出版社出版

(济南市玉函路 邮政编码 250002)

山东省新华书店发行

山东印刷技工学校实习厂印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 10.75 印张 4 插页 235 千字

1993 年 3 月第 1 版 1993 年 3 月第 1 次印刷

印数: 1—1000

ISBN7—5331—1405—5/TG·5

定价 11.10 元

前 言

迄今为止还没有见到一本系统地把透射电子显微分析技术与钢的组织结构及相变过程研究相结合的专门著作，这是因为长期以来电子显微技术和物理冶金这两个领域各有其侧重的研究范围。从事电子显微技术工作的专家们都注重于电镜本身的原理结构设计以及成像衬度理论的研究，他们无意去认真观察分析和讨论各种特定材料的性态。当前已出版的有关电子显微学的专著和教科书，由于传统上的原因，只叙述和讨论学科自身系统的内容，它们无法和个别具体领域的议题结合起来。因此，广大从事金属材料及热处理工作的专业人员虽然深知电子显微分析技术的重要性，但因缺少联系两个领域的中间桥梁而感到难于入门，以至于有人把透射电子显微分析看作是一级高不可攀的台阶。为了解决上述矛盾，笔者有意识地把电子显微学的原理与钢的具体组织结构分析和相变过程的内容有机地结合起来。为此，定书名为《钢的电子显微金相学》。书中实用部分内容具有一定的代表性，叙述时既重视分析结果，又强调说明道理，其目的是使读者在掌握了本书有关章节内容后，不仅可以利用电子衍射和形貌分析相结合的方法来识别钢中的组织结构，而且还可以利用已有的知识来制订科研方案。

本书共八章，第一、二、三章介绍电子显微分析技术，采用简明语言和示意图扼要地说明透射电镜成像原理和电子衍射的分析方法，以便使初学者能较省力地理解正空间和倒空间的概念以及衍衬成像的基本原理。第四、五章主要是钢中典型组成相的透射电子显微分析，介绍 70 年代末至 80 年代中期国内外对马氏体、贝氏体形态学的研究。透射电子显微术作为一种重要的分析手段，在这个领域的研究中具有突出的贡献，从而可以认为《电子显微金相学》将大为充实金相分析的内容。第六、七、八章是透射电子显微术的应用实例，通过各章节的具体例子可以了解到电子显微学与物理冶金、力学冶金以及合金设计等学科之间的相互渗透关系。这些内容在一定程度上可为金属材料研究和热处理工艺设计方面提供调整组织结构、改变合金成分和设计试验方案的参考依据。由此可见，从事材料科学与工程研究的专门人员

若能一定程度地掌握电子显微金相分析技术，则在发展新材料、新工艺和新技术的过程中定将获益匪浅。

本书第一、二、三章由王静宜编写，第五、六、七、八章由谈育煦编写，第四章为共同编写。附录由丁秉钧同志计算。

本书可供高年级大学生、研究生用作参考教材，也可供工程技术人员及研究人员阅读。

由于我们水平有限，书中错误和片面之处一定不少，如蒙指正，至为感谢。

作 者

1992年1月

目 录

第一章 透射电子显微镜	1
第一节 透射电子显微镜的构造和工作原理	1
一、透射电子显微镜的结构 ^{(1) (2) (3) (4)}	1
二、其他主要部件	4
第二节 透射电子显微镜的分辨率(鉴别力) ^{(1) (2) (5)}	7
一、衍射效应所规定的分辨率	7
二、由像差所决定的分辨率	7
三、分辨率的测定	9
第三节 透射电子显微镜的景深和焦长	10
一、景深	10
二、焦长	11
第二章 电子衍射	13
第一节 概述	13
第二节 衍射几何 ⁽⁶⁾	13
一、Bragg 定律	13
二、Ewald 图解	17
三、倒易点阵的基本概念 ⁽⁷⁾	18
四、电子衍射的基本公式 ^{(2) (4)}	20
五、结构因数 ⁽⁶⁾	20
六、零阶倒易面 ^{(2) (4) (5)}	24
七、偏离矢量	25
第三节 电子显微镜中的电子衍射	27
一、有效相机常数 K'	27
二、磁转角	28
三、选区衍射操作	29
第四节 单晶体电子衍射花样的标定 ^{(2) (4) (8)}	30
一、单晶体电子衍射花样的标定程序	30
二、钢中典型组成相电子衍射花样的标定	33
第五节 复杂电子衍射花样	36
一、高阶劳厄花样	36
二、超点阵斑点	36
三、二次衍射斑点	36
第三章 透射电子显微图像分析原理	38
第一节 衍射衬度的概念	38
第二节 衍衬运动学 ^{(4) (9) (10)}	39

一、基本假设	39
二、理想晶体的衍射强度	40
三、利用完整晶体衍射运动学基本方程计算薄晶体的衬度	42
四、非完整晶体的衍射强度	45
第三节 晶体缺陷的观察分析	46
一、层错 ⁽⁹⁾	46
二、位错 ⁽¹⁾	48
三、第二相质点	50
第四章 马氏体的电子显微分析	52
第一节 马氏体的形态和亚结构	52
一、板条马氏体 ^{(11) (12) (13) (14) (15) (16) (17) (18) (19) (20) (21)}	52
二、{259}型片状马氏体 ^{(11) (22) (23)}	69
三、{225}型马氏体 ⁽²⁴⁾	73
四、隐针马氏体的电子显微分析 ^{(21) (25)}	76
五、关于马氏体形态和亚结构的小结	78
第二节 马氏体的惯习面	78
一、迹线分析原理 ^{(1) (5) (6)}	79
二、板条马氏体惯习面的测定	79
第五章 贝氏体和珠光体的电子显微分析	82
第一节 贝氏体的电子显微分析	82
一、贝氏体的组织和亚结构 ^{(25) (27) (28)}	82
二、贝氏体转变时惯习面的决定	85
三、贝氏体中的 ϵ 碳化物 ⁽²⁹⁾	85
四、贝氏体中的三斜晶碳化物 ⁽²⁹⁾	87
五、小结	91
第二节 珠光体的电子显微分析	93
一、珠光体的形态 ⁽³⁰⁾	93
二、珠光体的解理面 ⁽³¹⁾	93
第六章 马氏体相变的透射电子显微分析	96
第一节 奥氏体向马氏体转变时位向关系的验证	96
第二节 相变过程中马氏体和奥氏体含碳量的测定	99
一、利用透射电子显微术测定铁素体—马氏体复相钢中马氏体晶体内的 实际含碳量 ⁽³²⁾	99
二、板条马氏体间残余奥氏体薄膜的含碳量测定	100
第三节 低温马氏体相的电子衍射分析 ^{(33) (34) (35)}	101
第七章 形变诱发马氏体相变的电子显微分析	108
第一节 形变诱发马氏体的形核 ^{(36) (37)}	108
第二节 形变量和应变速率对诱发马氏体相变过程的影响 ⁽³⁸⁾	109

一、低应变速率形变时形变量对奥氏体向马氏体转变过程的影响	109
二、高应变速率形变时形变量对奥氏体向马氏体转变过程的影响	111
三、马氏体的形核和成长机制	111
第三节 结构钢中形变诱发马氏体相变的透射电子显微分析	114
一、复相钢 ^{〔39〕}	114
二、高强度钢 ^{〔40〕〔41〕}	118
第八章 马氏体的回火转变	120
第一节 马氏体中碳原子集群的形貌分析 ^{〔42〕〔43〕}	120
第二节 马氏体在 60~80℃ 及低、中、高温回火时发生的转变 ^{〔44〕〔45〕}	122
一、碳原子的长程有序排列	122
二、调幅结构的形成	125
三、低温回火阶段	128
四、中温回火阶段	129
五、高温回火阶段	130
第三节 钢铁材料中碳化物转变的透射电子显微分析 ^{〔46〕}	131
附录一 衍射斑点标定表	136
附录二 标准电子衍射花样	156
参考文献	162

第一章 透射电子显微镜

第一节 透射电子显微镜的构造和工作原理

一、透射电子显微镜的结构 (1) (2) (3) (4)

透射电子显微镜是以电子束作为照明光源。因为电子束在电场或磁场中会受到作用力而发生偏转，所以利用这一特性可设计出静电或电磁透镜使电子束聚焦。新式的电子显微镜均为电磁透镜系统成像。

图 1-1 是电子显微镜的光路系统示意图，和光学显微镜对比，二者十分相似。总的来说，电子显微镜的镜筒是由三个主要部分组成，即照明系统、成像系统和观察记录装置，现分述如下：

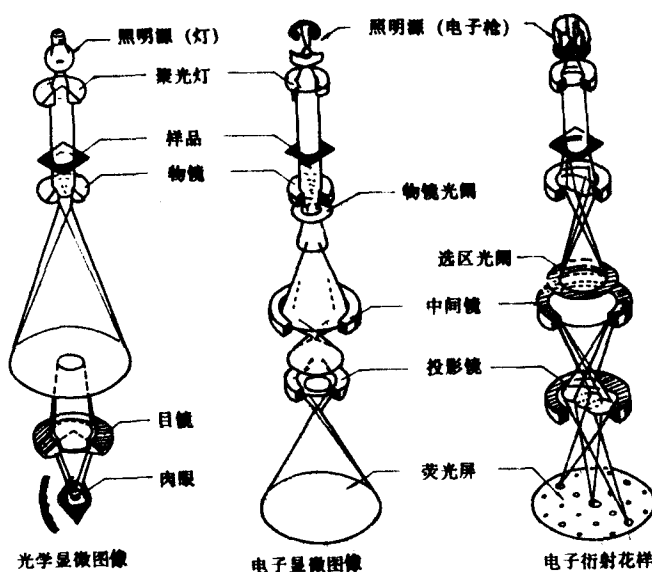


图 1-1 电子显微镜和光学显微镜光路系统示意图

(一) 照明系统

照明系统主要是由电子枪和聚光镜组成。

电子枪：图 1-2 是电子枪的示意图。阴极上加一负高压（一般为几十千伏至几百千伏），阳极接地电压为零。在阴极和阳极之间加入一个带有自偏压回路的栅极，它的电压比阴极负几百至近千伏，用它来控制阴极发射电子的数量。因为三个极的电位各不相同，因此等位面在空间呈图 1-2b 中所示的形状分布。阴极发射的电子受到电场的作用发生偏转，在阴极和阳极之间的某一点，电子束会聚成一个交叉点，这就是电子源，

其直径约为几十微米。

聚光镜：在放大倍数为几十万倍的高分辨率电子显微镜中，样品被照明的范围必须很小，因此，必须把电子枪提供的电子源直径进一步会聚缩小，以得到一束强度较高、直径较小、相干性又好的电子束。高性能电子显微镜都采用双聚光镜来做到这点的。图 1-3 是双聚光镜的原理图，图中 $2r_c$ 为电子源直径， CL_1 、 CL_2 分别表示第一聚光镜和第二聚光镜， A_1 、 A_2 是聚光镜光阑。

当电子源位于第一聚光镜的两倍焦距之外时，它的像被缩小至 $2r_c'$ 。第一聚光镜是一个强磁透镜，焦距较短，在保持物距不变的条件下，焦距愈短，像距愈小，像也缩得很小（因为 $\frac{1}{f} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}$ ， $M = \frac{L_2}{L_1}$ ，

其中 L_1 为物距、 L_2 为像距、 f 为焦距、 M 为放大倍数）。通常情况下，第一聚光镜可以把电子源缩小 10~50 倍（即 $M = 1/10 \sim 1/50$ ）。由于第一聚光镜的焦距很小，如果在第一聚光镜下方安放物镜时，因两者靠得太近，无法安装样品台和其它附件。因此，在第一聚光镜下还必须加入第二聚光镜 CL_2 。第二聚光镜是一个弱透镜，它的焦距很长，如果把电子源的一次像 $2r_c'$ 置于第二聚光镜的两倍焦距之内，则可得到一个比 $2r_c'$ 略大的像 $2r_c''$ 。光阑 A_2 可以使第一聚光镜的孔径半角从 β 减小到 α 。孔径半角减小，使成像的电子束只限于近轴光束，可以减小球差，提高成像质量。如果把 $2r_c'$ 置于第二聚光镜的焦点处，则可以得到一束完全平行的电子束，有利于衍射操作。在第二聚光镜下方安放物镜时，因二者间留有较大的间隙，可用于装入样品台和其它附件。

如果第一聚光镜把一个 $50\mu\text{m}$ 的电子源缩小 50 倍，而第二聚光镜又把电子源的像放大两倍，则在样品上可得到一个 $2\mu\text{m}$ 大小的照明光斑。

双聚光镜的最大优点是照到试样上的电子束截面小，使整体样品不易过热和污染，

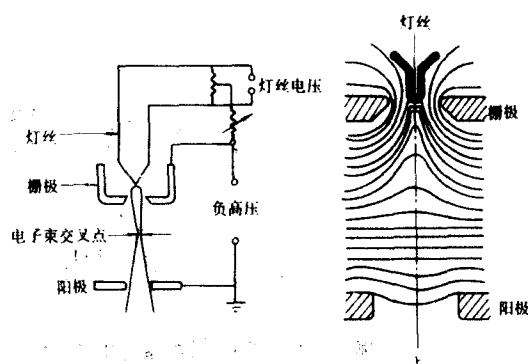


图 1-2 电子枪示意图

a. 自偏压回路 b. 等电位面分布

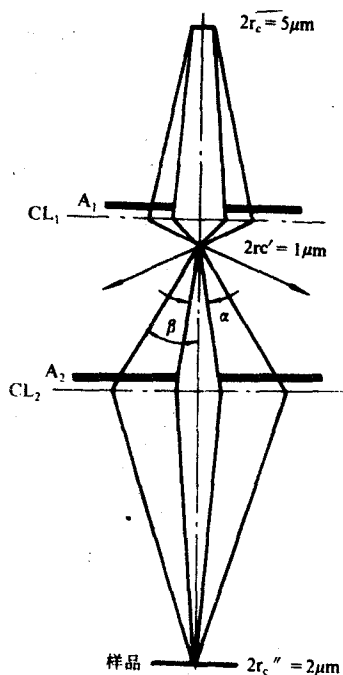


图 1-3 双聚光镜原理图

然而在样品被照射部分上电子束强度却是增加的。

放大倍数低于 50000 倍的普通性能的透射电子显微镜，一般只采用单透镜（弱透镜）系统。

（二）成像系统

成像系统主要是由物镜、中间镜和投影镜组成。透射电子显微镜分辨能力的高低主要取决于物镜的质量，因为只有被物镜分辨出来的结构细节通过中间镜和投影镜进一步放大才能被肉眼看清。物镜是一个强磁透镜，焦距很短（约 1.5~3mm），放大倍数最高可达 300 倍。中间镜是弱磁透镜，焦距很长，其放大倍数可通过调节其激磁电流来改变（放大倍数为 0~20 倍），当 $M > 1$ 时作放大用， $M < 1$ 时可作缩小物像用。中间镜可以是一个，也可以有两个，后者用于点分辨率为 0.3~0.5nm 水平的高分辨率电镜。投影镜的作用是把经中间镜放大（或缩小）的像进一步放大并投影到荧光屏上，它是一个短焦距强磁透镜，放大倍数可达 100 倍以上。

电子显微镜的总放大倍数是各级透镜放大倍数的乘积。如果物镜放大倍数 $M_o = 150$ 倍，中间镜的放大倍数 $M_i = 2$ 倍，投影镜的放大倍数 $M_p = 100$ 倍，则 $M = M_o \times M_i \times M_p = 3 \times 10^4$ 倍。中间镜是一个可变倍率的透镜，透射电子显微镜的放大倍数主要由它来调节，如果把其放大倍数从上述的 2 倍增加到 20 倍，则总放大倍数可增至 $M = 3 \times 10^5$ 倍。

图 1-4 是透射电子显微镜成像系统的光路图，这是一组四透镜系统的光路图。图 1-4a 是 1 万倍以下的光路图，此时第二中间镜处于关闭状态，第一中间镜将物镜像缩小，再经投影镜放大。图 1-4b 是放大倍数位于 1 万~5 万倍时的光路图。图 1-4c 是放大倍数大于 5 万倍时的情况。以图 1-4c 的光路作为参考，若保持中间镜的象平面位置不变，把中间镜的激磁电流降低，使焦距和物距同时变长，当它的物平面移到物镜的后焦面位置时，就可在荧光屏上得到一幅电子衍射花样（即图 1-4d）。

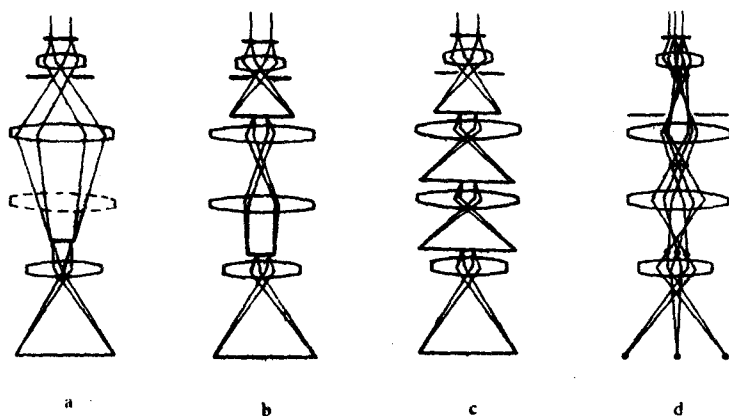


图 1-4 透射电子显微镜成像系统光路图

a. 低倍(<10000X) b. 中倍(10000~50000X) c. 高倍(>50000X) d. 电子衍射

（三）观察和记录装置

观察和记录装置即荧光屏和照相机构。电子射线和 X 射线一样是不可见光波，为

了便于观察，必须借助荧光屏，因为它能对电子感光，且感光度和电子束的强度成正比，从而能使透射电子的强度像转换成可见光的图像。

在荧光屏下面放置一个可以自动换片的照相暗盒，内装感光底片即构成了照相机机构。照相时只要把荧光屏翻起，电子束即可使照相底片曝光。由于透射电子显微镜具有较大的焦深，虽然荧光屏和底片之间有数十厘米的间距，但此间距位于焦长范围之内，因而照相时仍能保持图像清晰。

二、其他主要部件

(一) 样品台

老式透射电子显微镜的样品台只能使样品作平移运动。新型透射电子显微镜的样品台不仅可作平移运动，而且可以作倾斜和绕轴旋转的操作，实际上它具有和测角器相同的功能。利用这种样品台可以十分方便地在电子显微镜上对单晶体（或数个晶体）作结构分析。样品台的倾斜动作可通过两种方式来实现（图 1-5、1-6）。

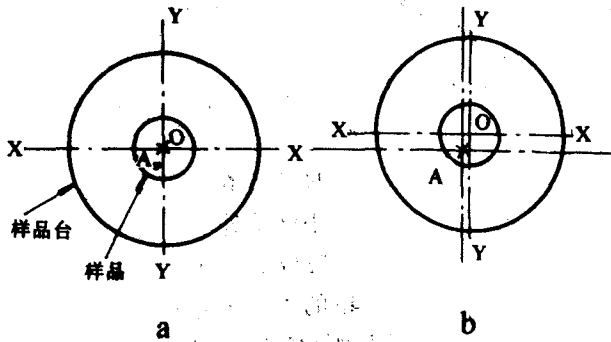


图 1-5 倾斜轴位于样品中心的倾斜装置

× 电子束照射位置(观察位置) O 样品中心 A 样品上任一点

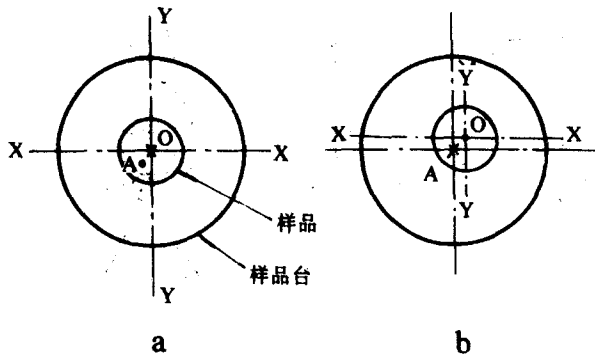


图 1-6 倾斜轴位于样品台中心的倾斜装置

× 电子束照射位置(观察位置) O 样品中心 A 样品与任一点

第一种方式是倾斜轴 $X-X'$ 和 $Y-Y'$ 的交点位于样品的中心 O 点，如果电子束正好通过 O 点（ $\times$ 和 O 点重合），则样品台作倾斜操作时， O 点位置不变（图 1-5a）。假如

要观察样品上任一点 A 时，因为电子束总是位于荧光屏中心不能移动，故整个样品台必须作平移运动，使 A 点移到电子束位置 ($\times$ 和 A 重合)，相应的倾斜轴交点 (即样品中心 O) 就移向电子束的右上方 (图 1-5b)，于是作倾斜操作时， A 点即会绕 $X-X$ 轴和 $Y-Y$ 轴转动。在倍率较高时， A 点将跑出观察范围之外。顶插式样品台就属于这种倾斜方式。

第二种方式是倾斜轴交叉点固定在样品台中心，同时电子束也通过此中心，样品本身可以相对于样品台作平移运动。图 1-6a 是样品中心和样品台中心重合。图 1-6b 是观察点 A 移到倾斜轴交叉点上，电子束正好通过 A 点，而样品中心移到倾斜轴交叉点的右上方。作倾斜操作时， A 点仍保持不动。侧插式样品台属于这种倾斜方式。

上述两种倾斜方式各有特点，顶插式样品台操作时虽然不方便，但由于它是从物镜上部插入极靴中去的，故上下极靴的间隙可做得很小，因而球差小，分辨率高。侧插式倾斜样品台操作比较方便，但它是从侧面插入物镜极靴的，因而不能使上下极靴的间隙做得太小，相比之下，分辨率较低。但是 70 年代后期制造出来的带有侧插式倾斜台的物镜，分辨能力已达到 0.35nm (晶格分辨率为 0.144nm)。因此，目前倾向于发展这类样品台。新型的 $EM400T$ 、 $JEM-2000EX$ 和 $H-800$ 电子显微镜均装有侧插式样品台，并配有旋转、双倾、加热、冷却、大角度倾斜和拉伸等样品杆，给相变研究和动态观察带来不少方便。

图 1-7 是一个侧插式单倾样品台示意图。用一对蜗轮副作倾斜调节，蜗轮的轴线即倾斜轴。样品置于样品杆前端，当样品杆插入倾斜台后，以定点 A 为支点，用螺钉 Z 可调节样品的水平位置。调节螺钉 X 和 Y ，可使样品相对于倾斜轴作平移运动。因为电子束方向 (即观察点位置) 已事先调整到和倾斜轴垂直相交，若把样品上的某一感兴趣的部位调节到观察点位置后再倾动样品台，物像即可保持原位倾斜。

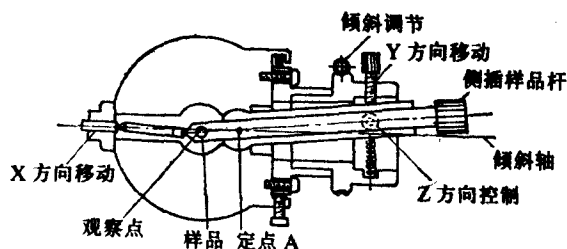


图 1-7 侧插式单倾样品台示意图

(二) 消像散器

极靴内孔存在椭圆度、上下极靴孔的轴线有偏差、极靴材料成分不均匀以及局部污染等原因，都会使透镜的磁场产生非旋转对称。透镜磁场的非旋转对称会使不同方向上聚焦能力出现差别，其结果使成像的物点 P 通过透镜后不能在象平面上聚焦成一个点 (图 1-8)。在聚焦最好的情况下能得到一个最小的散焦斑，把最小散焦斑的半径 R_A 折算到物点处 (即除以透镜的放大倍数 $\frac{R_A}{M}$) 即成物体上的一个圆斑半径 Δr_A ，这就是透镜的最小像散斑半径，用它来衡量透镜像散的大小。 Δr_A 越小，磁透镜象散越小。如果磁透镜已存在固有像散，则可以通过引入一个强度和方位都可以调节的矫正磁场的装置——消像散器来降低或消除像散。

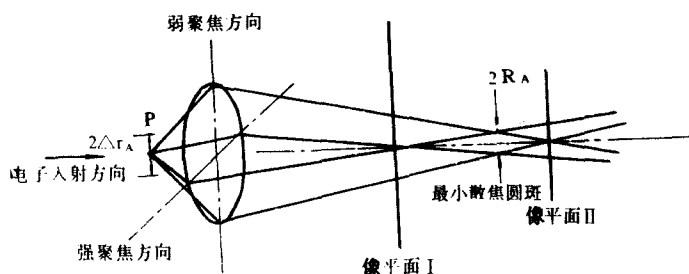


图 1-8 像散原理图

消像散器可以是机械式的，也可以是电磁式的。前者是在磁透镜的磁场周围放置数块位置可调节的导磁体来吸引一部分磁场，使固有的椭圆形磁场校正成旋转对称的磁场。后者是通过电磁间的吸引和排斥作用来校正非旋转对称的磁场，图 1-9 为电磁式消像散器示意图。消像散器一般都装在透镜的上、下极靴之间。

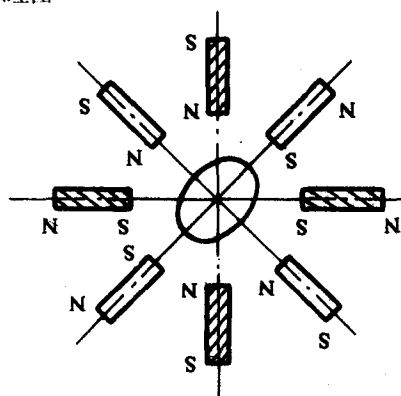


图 1-9 电磁式消像散器示意图

(三) 偏转线圈

新式的电子显微镜都带有电磁偏转器，利用电磁偏转器可以使入射电子束平

移和倾斜。图 1-10 是电子束平移和倾斜的原理图。两个偏转线圈是联动的，如果上、下偏转线圈偏转的角度相等但方向相反，则电子束进行平移运动（图 1-10a）；如果上偏转线圈使电子束顺时针偏转 θ 角，下偏转线圈使电子束逆时针偏转 $\theta+\beta$ 角，则电子束作倾斜 β 角的动作，而入射点的位置不变（图 1-10b）。利用电子束原位倾斜可进行所谓中心暗场的成象操作（见第三章图 3-1）。

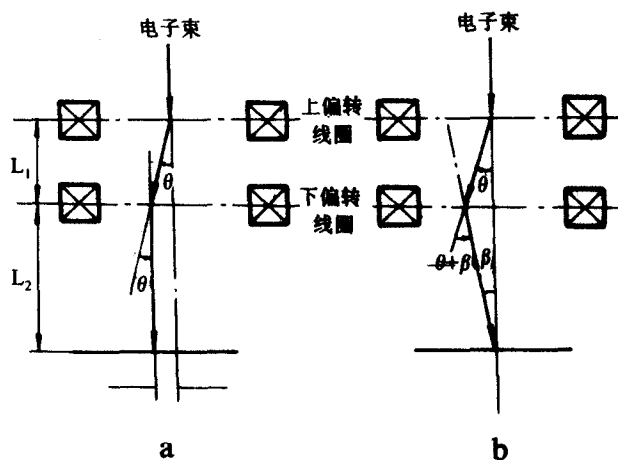


图 1-10 电子束偏转系统示意图

a 平移 b 倾斜

第二节 透射电子显微镜的分辨率 (鉴别力) ^{(1) (2) (5)}

透射电子显微镜的分辨率主要取决于衍射效应和像差。

一、衍射效应所规定的分辨率

由衍射效应所限定的电子显微镜的分辨率在理论上可由 Rayleigh 公式计算

$$\Delta r_o = \frac{0.61\lambda}{N\sin\alpha} \quad (1-1)$$

式中 Δr_o 为在试样上能分辨出来的两个物点间的最小距离, 这就是所谓分辨率。 λ 为光波的波长 (在这里是指电子波的波长)、 N 为介质的折射系数、 α 为磁透镜的孔径半角。电子波的波长由电子枪的加速电压所决定, 加速电压越高, 波长 λ 越小。若加速电压为 200KV 时, $\lambda = 0.00251\text{nm}$, 和可见光相比, 二者有 5 个数量级之差。但电子显微镜的孔径半角却很小, 一般只有 $1^\circ \sim 2^\circ$, 而光学透镜的孔径半角可达 70° 以上。

当物体上的光点通过透镜成像时, 由于光阑孔边缘产生衍射的缘故, 在像平面上得到的像并不是一个点, 而是一个中心最亮, 周围带有明暗相间的同心圆环的圆斑 (Airy 斑)。例如, 试样上有两个光点 S_1 、

S_2 通过物镜成像, 在像平面上产生两个衍射斑 S'_1 、 S'_2 (图 1-11a)。如果令两个衍射斑互相靠拢, 若位于两峰之间的强度谷比强度峰低 19% 时 (以强度峰的高度为 100%), 这个强度反差对人眼来说刚有所感觉, 也就是说, 人眼刚能分清存在 S'_1 和 S'_2 两个光点。如果峰谷之间的反差小于 19% 时, 则人眼已分不清 S'_1 和 S'_2 是两个点子了。因此, 强度值相差 19% 是一个临界值, 这就是所谓 Rayleigh 判据 (图 1-11b)。式 (1-1) 中的常数项就是以这个判据为基础得来的。

若两个光点相互接近, 其间刚能造成 19% 强度差时的间距恰为 R_o 。此时实测的分辨本领

$$\Delta r_o = \frac{R_o}{M} \quad (1-2)$$

M 为透镜的放大倍数。

二、由像差所决定的分辨率

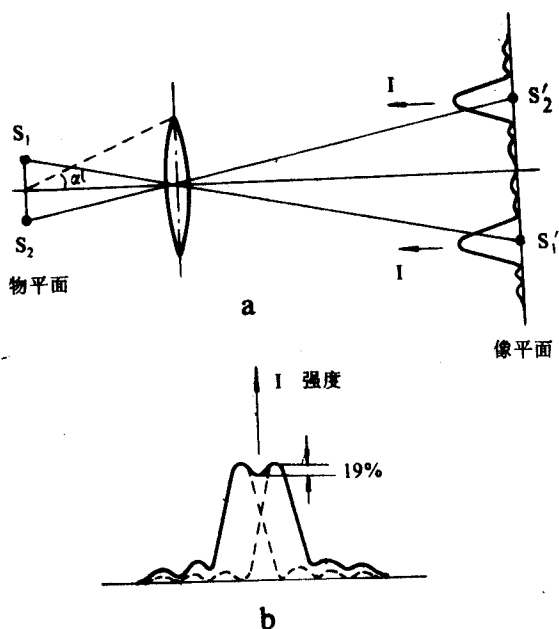


图 1-11 光的衍射斑和由衍射决定的分辨本领

像差主要分成两大类：第一类是几何象差（主要是球差和像散）；第二类是色差。像差的大小也能影响电子显微镜的分辨本领。

（一）球差

球差是由于电磁透镜的中心区域和边缘区域对电子的折射能力不同而造成的。离开透镜主轴越远的电子（远轴电子）比主轴附近的电子（旁轴电子）折射能力强。当物点 P 通过透镜成像时，电子就不会会聚到同一个点上，而形成的是一个散焦斑，如图 1-12 所示。如果把成像平面在远轴电子的焦点和旁轴电子的焦点之间移动，可以得到一个最小的散焦圆斑。最小散焦斑的半径用 R_s 表示，若除以放大倍数可把它折算到物平面上去，其大小为：

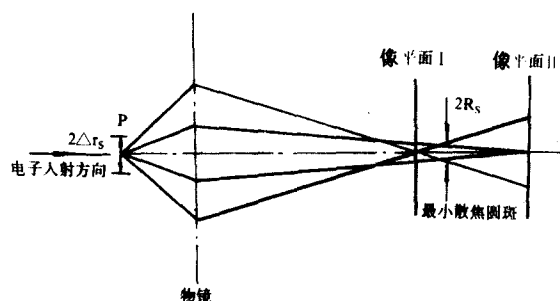


图 1-12 球差原理图

把式 (1-3) 和式 (1-2) 相比较，可以看出由球差造成的最小散焦斑半径和衍射效应产生的 R_o 是相似的，而衍射效应引起的透镜分辨本领 Δr_o 和球差大小 Δr_s 相对应。

$$\Delta r_s = \frac{R_s}{M} \quad (1-3)$$

把式 (1-3) 和式 (1-2) 相比较，可以看出由球差造成的最小散焦斑半径和衍射效应产生的 R_o 是相似的，而衍射效应引起的透镜分辨本领 Δr_o 和球差大小 Δr_s 相对应。

Δr_s 的数值在理论上可根据下式计算：

$$\Delta r_s = C_s \alpha^3 \quad (1-4)$$

C_s 为球差系数， α 为孔径半角（弧度）。

孔径半角 α 减小，球差值急剧变小。若在电磁透镜的背焦面上加上一个小孔径的光阑，就可使透镜的孔径半角变小，从而可以减小球差，提高分辨率。但是从衍射角度来看，孔径半角减小会降低透镜的分辨率，因为从 Rayleigh 公式可以看出， α 变大， Δr_o 变小。因此要照顾衍射，则 α 越大越好；相反，从球差角度来看， α 要越小越好。为了解决这一矛盾，可以令 $\Delta r_s = \Delta r_o$ ，从式 (1-1) 和式 (1-3) 解出 α 值，此 α 值即为兼顾到衍射效应和球差二者的最佳值。

（二）像散

由图 1-8 可知，像散引起的最小散焦斑半径 R_A 除以放大倍数，即可折算成像散的分辨距离 Δr_A ，其值可用

$$\Delta r_A = \Delta f_A \cdot \alpha \quad (1-5)$$

Δf_A 为电磁透镜非旋转对称时引起的焦距差， α 为孔径半角。

Δr_A 值的大小决定于消像散的结果。如果 Δr_A 比 Δr_o 或 Δr_s 小，则减小像散不会进一步提高透镜的分辨本领。若 Δr_A 比 Δr_o 和 Δr_s 大（如果其他条件不影响透镜的分辨本领时），则分辨率主要由像散所控制。

（三）色差

图 1-13 是形成色差的原理图。若电子束内的电子能量有差别，则能量大的电子在距透镜光心较远处聚焦，而能量较小的电子在距光心较近处聚焦，由此也造成了一个焦

距差。把像平面在长焦点和短焦点之间移动时，也可找到一个最小散焦斑，其半径为 R_c 。把 R_c 除以放大倍数，即可折算成由色差造成的分辨距离 Δr_c 。 Δr_c 可用式 (1-6) 计算：

$$\Delta r_c = C_c \alpha \left| \frac{\Delta E}{E} \right| \tag{1-6}$$

式中 C_c 为色差系数， α 为孔径半角， $\frac{\Delta E}{E}$ 为电子束能量变化率。当 C_c 和 α 一定时， $\left| \frac{\Delta E}{E} \right|$ 的数值取决于加速电压的稳定性和电子穿过样品时发生的非弹性散射程度。如果样品很薄，后者的作用甚小。

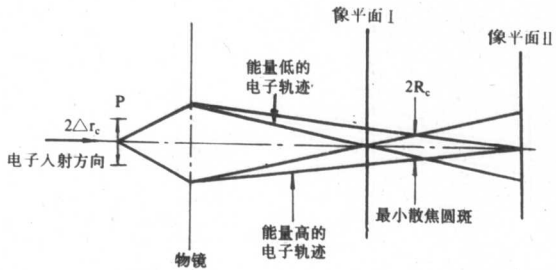


图 1-13 色差原理图

综上所述，电磁透镜的分辨率主要和四个因素有关，即 Δr_o 、 Δr_s 、 Δr_A 和 Δr_c ，而控制分辨率的因素是这四个因素中数值最大者。

三、分辨率的测定

(一) 点分辨距离的测定

用铂或铂铱合金在真空中加热熔化，使它们蒸发到碳支承膜上。若蒸发规范控制得当，可以得到直径在 0.5~1nm、间距在 0.2~1nm 范围的上述金属（或合金）颗粒。蒸发时不应使金属层的厚度太厚，一般应控制在 0.5nm 左右。若金属层太厚，颗粒的间距会小于 0.2nm，就不能提供待测的分辨距离。

点分辨率测定时，必须事先知道电子显微镜的放大倍数。在摄得金属粒子的照片后，经光学放大 5~10 倍，找出最小的粒子间距，并除以总放大倍数（电子显微镜的放大倍数乘光学放大倍数），即为电子显微镜的点分辨率。

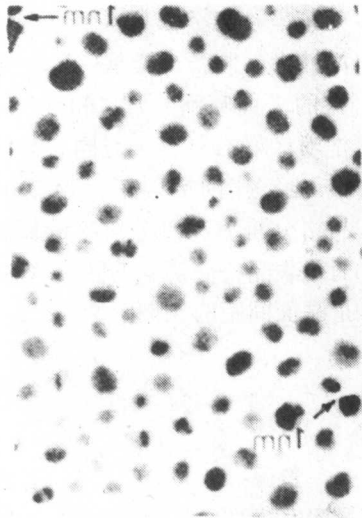


图 1-14 点分辨率的测定

图 1-14 是一张铂铱粒子的照片，图中粒子间距实测为 1.0mm，除以电镜放大倍数 10^5 倍及光学放大倍数 10 倍后，得到实际粒子间距 $d=1.0\text{nm}$ ，这就是点分辨率。

(二) 晶格分辨距离的测定

利用定向成长的单晶体薄膜作为标准样品，用平行于晶体薄膜某一晶面的电子束摄取该晶面的间距条纹（晶格条纹）像。由于晶面间距是已知的，故只要在摄取的照片上测定条纹间距的大小，并用它和已知晶面间距相比，即为电子显微镜的放大倍数。