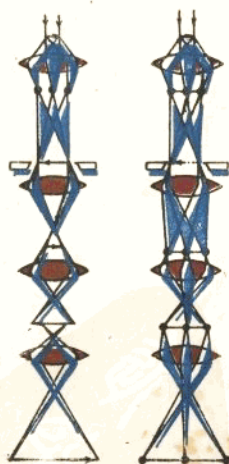


透射电子显微术及其在 金属材料检验中的应用

林保军
夏向东
梅 敦



内 容 简 介

本书分基础理论和实际应用两部分，以实际分析检验为主。基础理论有：电子光学原理，透射电镜结构，透射电子显微像衬度原理，电子衍射花样分析等。实用部分有：钢中碳化物的鉴别、钢材中组织的辨认及相的鉴定（包括普通金相、复型、金属薄膜照片的一一对应），晶体缺陷的理论和电镜观测，金属材料相变晶体学与强化实质的观察等。全书分成三册，第一册为正文，第二册为电子显微像附图，第三册为附表。

本书的写作宗旨在于普及电镜知识，为应用电子显微镜进行钢材的分析检验和开展课题研究的工作者服务。它适宜于从事金属材料、金属热处理、锻造、铸造的科技人员及工人阅读，也为从事普通金相检验的同志提供学习电子显微镜的方便，它亦可作为广大科技人员、工人和高等、中等院校师生学习电子显微镜知识的参考书。

前 言

电子显微镜检验技术已日益普及，但是由于各种原因，当前在我国这项技术的应用还受到局限。随着现代科学技术的发展，掌握透射电子显微术已成为材料科学工作者势在必行的任务。提到这个问题时有人可能会问：“我们没有电子显微镜将怎样去掌握这种技术？即使掌握了又有何用？”对这个问题的回答，实践中业已给出。有些搞金属材料冶炼、工艺、金相或物理和力学性能检验的同志常常会找到电镜检验人员说：“我们的产品不合格，请你给检验微观组织和结构，从中找找原因。”也有的说：“文献资料中介绍通过透射电子显微术解决了关键问题，能告诉我们是怎样解决的吗？”。这说明，即使没有电子显微镜，为了解决日趋深入而广泛的金属材料性能变化的本质问题，也必须用到透射电子显微术。只有掌握了该技术中对照片的分析方法后才能对别人的数据和结论有所了解，或对别人给出的检验结果进行复核，否则只能人云亦云。鉴于这种理由，我们编写了“透射电子显微术及其在金属材料检验中的应用”这本书。希望能对普及电子显微术方面的工作有所贡献。

本书在编写时主要参照的 Hirsch 等著的“*Transmission Electron Microscopy of Thin Crystal*”，赵伯麟同志编著的“快速电子衍射理论”，冯端等著的“金属物理”。读者若感到本书内容不足时，可在上述著作中查找有关内容深入学习。

本书分成三册，第一册为正文，第二册为附图，第三册为附表。如果正文中未列出的图，请到附图中相应部分查找。附表中的数据主要供实际照片分析时使用。

本书在编写和出版过程中得到内蒙科委、包头五二研究所、内蒙工学院有关领导的大力支持，内蒙工学院印刷厂、金相教研室、五二研究所电镜组的全体同志对本书编写都给了很大帮助，编者一并表示感谢。

由于水平所限，本书难免有很多缺点错误，恳请批评指正。

绪 言

材料、能源和信息是当今人类文明的三大支柱，而材料又是后两者的基础。这说明，当今的人类生活离不开材料，而金属材料又是所有材料中的最重要的组成部分。每个人都在自觉或不自觉地使用着金属材料，每个国家也都在生产和开发着金属材料；我国的四个现代化更离不开金属材料。正是由于人类急需大量的金属材料，使得“已有材料的潜力发挥”“新材料新工艺的寻求”“新理论的创立”……等问题日趋突出。因为金属材料的性能取决于它们的显微组织与结构，所以上述问题的解决几乎无一不与“金属材料的显微组织结构检验”相关联。

光学显微镜在揭示金属材料显微组织方面起了重要作用，而且将继续发挥其作用；但是，由于它的分辨本领较低及不能在显示显微组织的同时测定组织中相结构等原因，使得其不能满足金属材料科学迅速发展的要求。x射线晶体结构测定技术虽然能精确地测定金属材料的晶体结构，但它不能在对多相材料测出晶体结构的同时给出各相的形貌、分布，而后者恰恰又是影响材料性能的重要微观因素之一。1932年第一台透射电子显微镜问世后，金属材料科学工作者注意到它的高分辨本领特征，很快就将其用于金属材料显微组织的检验，随之在某些方面收到了比光学显微镜要好的效果；50年代，金属薄膜试样制备技术，选区衍射及选择衍射成像技术，动态观察技术发明后，不但使透射电子显微镜能在观察金属材料内显微形貌的同时给出该形貌区相应的晶体结构，而且还能对掺杂在一起的多种微小第二相颗粒分别进行鉴别，尤其可贵的是，对多种单相材料中的晶体缺陷可以进行直接观测。自此，在金属材料显微组织结构检验方面打开了一个新领域的大门，人们在这个领域中新的挖掘也反过来充实了金属材料科学。迄今为止，金属材料检验透射电子显微术已成为金属材料科学工作者不可缺少的研究和检验手段。它与光学显微镜、x射线技术及其它有关技术结合将在材料科学中发挥更大的作用。

“透射电子显微术及其在金属材料检验中的应用”一书与读见面，希望通过它对尚未掌握，但又急切想掌握这方面技术的同行给予启发。倘若它能达到这一目的，我们将感到无限欣慰。

编 者

1984年7月

目 录

前 言	
绪 言	
第一章 透射电子显微镜的基本原理、构造与功能	(1)
第一节 透射电子显微镜的光学原理	(1)
一、概述	(1)
二、电子的波动性及电子波的特性	(3)
三、电子在电磁场中运动的特性及电磁透镜	(4)
四、电磁透镜的像差	(9)
五、电磁透镜的分辨本领、景深和焦深	(11)
第二节 透射电子显微镜的基本构造及其主要功能	(13)
一、透射电子显微镜与光学显微镜的比较	(13)
二、透射电子显微镜的基本构造	(14)
三、透射电子显微镜成像原理	(17)
第二章 透射电子显微术用的试样制备方法	(21)
一、复型试样	(21)
二、萃取复型试样	(23)
三、金属薄膜试样	(25)
四、显微颗粒试样	(27)
第三章 电子束与晶体中原子的交互作用及电子显微像的成因	(28)
第一节 晶体中原子对入射电子的散射与晶体电子衍射	(29)
一、单个原子对运动电子的散射	(29)
二、晶体中原子面对入射电子的散射及电子衍射	(31)
三、布拉格方程的厄瓦德几何作图表示法	(32)
四、晶体的倒易点阵, 倒易空间	(33)
五、晶体单胞对入射电子的散射与结构消光	(34)
第二节 晶体电子衍射花样的特征	(35)
一、单晶体电子衍射花样的特征	(35)
二、多晶电子衍射花样的特征	(39)
第三节 电子显微形貌像的成因	(39)
一、质量、厚度(简称质厚)散射吸收像	(40)
二、衍射衬度像	(41)

第四章	电子衍射花样的标定及钢中碳化物的电子衍射相分析	(52)
第一节	简单电子衍射花样的标定	(52)
一、	布拉格方程在电子衍射情况下的简化	(52)
二、	晶带定律、晶带与电子衍射花样之间的关系	(53)
三、	简单的单晶电子衍射花样的标定程序	(54)
第二节	金属材料电子衍射花样标定时常用的晶体学公式	(57)
第三节	多晶电子衍射花样的标定	(61)
第四节	某些复杂电子衍射花样	(66)
一、	二次电子衍射附加斑点	(67)
二、	孪晶衍射引起的复杂电子衍射花样	(68)
三、	高阶劳厄区复杂电子衍射花样	(69)
四、	卫星斑点	(70)
五、	菊池线	(71)
第五节	钢中碳化物的鉴别	(73)
一、	常见钢中对力学性能起显著作用的碳(氮)化物的 类型及其析出、转变的规律	(73)
二、	钢中碳化物的透射电子显微术鉴别	(77)
三、	钢中碳化物鉴别过程的实例	(80)
四、	供电子衍射相分析用的钢中常见碳、氮化物的晶体结构数据	(81)
第五章	钢中组织的辨认及组织中相的鉴定	(83)
第一节	钢材显微组织的形貌识别	(83)
一、	淬火马氏体	(83)
二、	回火马氏体	(84)
三、	屈氏体	(84)
四、	珠光体	(84)
五、	贝氏体	(85)
六、	铁素体与奥氏体	(86)
第二节	钢材组织中的相鉴别	(87)
一、	贝氏体中两相的鉴别	(87)
二、	奥氏体不锈钢超低温淬火相变产物的鉴别	(87)
三、	Ni9%钢中残余奥氏体的鉴别	(87)
四、	高铬钢高温淬火组织中的相鉴定	(88)
第六章	位错理论初步	(89)
第一节	位错的基本概念	(90)
一、	两种基本类型位错	(90)
二、	柏氏矢量和位错环	(92)

三、位错密度	(95)
四、位错的运动	(95)
第二节 位错的弹性性质	(99)
一、位错的应力场与应变场	(100)
二、位错的弹性应变能	(102)
三、作用在位错线上的力	(103)
第三节 实际晶体中的位错	(105)
一、位错反应和堆垛层错 (简称层错)	(105)
二、面心立方晶体中的全位错与不全位错	(106)
三、体心立方晶体中的位错	(109)
第七章 晶体缺陷观测	(111)
第一节 晶体缺陷衍衬理论简介	(111)
一、衍衬运动学理论概要	(111)
二、衍衬动力学理论概要	(113)
第二节 晶体缺陷衍衬像的形貌特征	(113)
一、位错	(114)
二、层错	(117)
第三节 晶体缺陷的运动与交互作用	(122)
一、位错线的弓出	(122)
二、单一滑移面内的位错运动和位错反应	(122)
三、不同滑移面内的位错运动和位错交互作用	(124)
四、扩展位错的运动和交互作用	(126)
第四节 位错柏氏矢量的测定 (双光束技术)	(127)
第五节 位错密度的测定	(131)
一、薄膜试样厚度的测定	(131)
二、低位错密度的测定	(132)
三、高位错密度的测定	(134)
第八章 金属材料相变晶体学与强化实质的观察	(136)
第一节 淬火相变	(136)
第二节 钢中过冷奥氏体的等温转变	(138)
一、类似珠光体的显微组织	(138)
二、钢中贝氏体的形貌学	(142)
第三节 弥散强化的实质	(143)
第四节 位错强化	(144)
一、高密度位错状态	(144)
二、位错亚结构饱和和亚晶界	(144)
三、位错缠结	(145)

第一章 透射电子显微镜的 基本原理、构造与功能

透射电子显微镜由于使用了电子束作照明源,通过电磁透镜成象,所以它的分辨本领比光学显微镜高得多,在观察物体放大的同时可以鉴定物质的晶体结构。这就为我们探索金属材料的精细结构开辟了广阔前途。在学习电子显微分析技术时,首先需要了解电子光学原理及透射电子显微镜的基本结构和主要功能,以便为学习这种分析技术打下良好的基础。

第一节 透射电子显微镜的光学原理

一、概述

通常,在25厘米的明视距离内,人眼能够分辨的最小距离是0.1~0.2毫米,这个数值被称为人眼的分辨本领。如果想要观察更微小的细节,就必须将其放大到这个距离,显微镜就是一种能够把欲观察的细节放大的仪器。

光学显微镜的发明,对人类认识事物由宏观到微观起了巨大的作用。光学显微镜的设计原理是:两块以上的透镜组合在一起就可以提高物体象的放大倍数,用物镜产生物体的放大象,通过目镜再次放大并观察这个放大的象。但是,光学显微镜由于所用光源的特性及光线的衍射效应,使它的分辨本领受到限制。下面我们用最简单的光学系统来说明这一点。

假定 O_1 和 O_2 是两个发光强度相等的点光源,如图 1-1 所示。这两个点光源分开有一定距离。自 O_1 和 O_2 发出的光通过透镜 L 和光阑 D 时,由于光线的衍射效应,它们在像平面上形成的不是两个像点,而是两个由多级明暗圆环组成的衍射斑。每个衍射斑被称为埃利斑。它的中心区是中央亮斑,集中了入射光的大部分能量,其余能量依次递减地分布在各级亮环中。埃利斑的大小通常以第一暗环的半径来衡量。

点光源通过透镜产生的埃利斑半径 d_0 为:

$$d_0 = \frac{0.61 \lambda}{n \sin \alpha} M \quad (1-1)$$

式中 λ ——照明光源的波长;
 n ——透镜和物体之间介质的折射率;
 α ——透镜孔径半角;
 M ——透镜的放大倍数。
常常令 $n \sin \alpha = N.A.$, 被称为数值孔径。

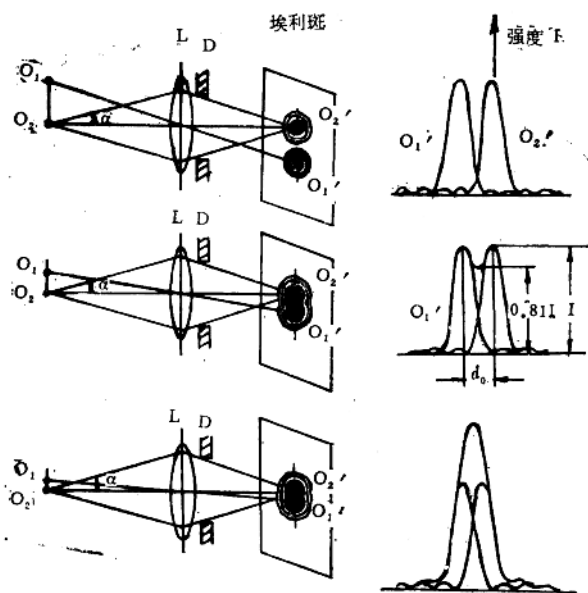


图1—1 两个点光源像的叠加

光学显微镜通过透镜成像时，每一个点光源发出的光都在透镜的像平面上形成各自的埃利斑像。如果将点光源 O_1 向点光源 O_2 靠近，彼此分开的两个埃利斑就会相互接近，继而叠加。能分辨两个埃利斑的判据是：两个埃利斑的中心间距等于第一个暗环半径 d_0 。此时，由两个埃利斑光强度曲线的叠加可知，两埃利斑中央峰之间叠加强度比中央峰最大强度 I 低19%，因此肉眼仍能够分辨出是两个点光源的像。通常把两埃利斑中心间距等于 d_0 时所对应的两个点光源间距离 d 定义为透镜能分辨的最小距离，被称为透镜的分辨本领。由式（1—1）得到：

$$d = \frac{d_0}{M}$$

所以

$$d = \frac{0.61 \lambda}{n \sin \alpha} \quad (1-2)$$

由公式（1—2）可见，光线的波动本质决定了衍射效应，由衍射效应产生的埃利斑所造成的像差（亦称衍射像差）影响着透镜的分辨本领。 d 值的主要影响因素是光线的波长和

数值孔径。由公式(1-2)看出,波长愈短,数值孔径愈大,两个点光源间距离就愈小,显微镜的分辨本领就愈高。显微镜除衍射像差外,还有几何像差。这种像差,由于设计和制造了组合透镜,它们对分辨本领的影响已基本被校正。在光学显微镜透镜系统中,油浸物镜的数值孔径 $n \sin \alpha \approx 1.25$,因此式(1-2)被近似地认为:

$$d \approx \frac{\lambda}{2} \quad (1-3)$$

这就是说,光学显微镜的最佳分辨本领约为使用光线波长的一半。可见光的波长约在 $4000 \sim 8000 \text{ \AA}$ 的范围内,如果取波长为 $4000 \text{ \AA}$,则光学显微镜的极限分辨本领约为 $2000 \text{ \AA}$ 。

由上述可见,构成显微镜的基本条件:一个是光源;一个是使光线放大聚集成像的透镜。光源的波长是影响分辨本领的决定性因素,为了提高分辨本领,人们就千方百计地寻找波长极短的光源,于是就想到了利用电子波。由于电子波在电磁场中会受到偏转,人们进一步想到制造电磁式透镜使电子波聚焦成像。

二、电子的波动性及电子波的特性

1924年,法国科学家德·布罗意证明:任何一种微粒子,当它们在作高速运动的时候,都表现出波性,这种波的波长与粒子的质量及粒子运动的速度成反比。电子也是一种微粒子,同样具有粒子和波动的双重属性,它的运动服从波粒二像性的规律。电子的波长与它的速度和质量之间的关系如下式所示:

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (1-4)$$

式中, m 为运动电子的质量, v 为运动电子的速度; h 为普朗克常数,等于 6.62×10^{-27} 尔格·秒。

目前,常用透射电子显微镜的电压在 $50 \sim 200$ 千伏。在这种高压作用下,电子作高速运动,根据相对论原理,这时电子的质量将随运动速度的增加而增大,即:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (1-5)$$

式中, c 为光速,等于 3×10^{10} 厘米/秒。 m_0 为电子静止质量,等于 9.1×10^{-28} 克。

上述二式说明,电子高速运动时具有波性,电子的波长决定于它运动的质量和速度。假如一个初速为零的电子,受到电压 V 的加速作用,它以很高速度作匀速运动,这时电子的动能是:

$$eV = mc^2 - m_0 c^2 \quad (1-6)$$

用 $(m + m_0)$ 乘式(1-6)并将式(1-5)代入得

$$(m + m_0) eV = m^2 v^2 \quad (1-7)$$

把式(1-7)中 mv 的值代入式(1-4)中得

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{(m+m_0)eV}} = \frac{h}{\sqrt{2m_0eV\left(1+\frac{eV}{2m_0c^2}\right)}} \quad (1-8a)$$

式中, e 为电子电荷, $e = 4.8 \times 10^{-10}$ 绝对静电单位。再把有关数值代入, 上式则为:

$$\lambda = \frac{12.25}{\sqrt{V(1+0.979 \times 10^{-6}V)}} \approx \frac{12.25}{\sqrt{V(1+10^{-6}V)}} (\text{\AA}) \quad (1-8b)$$

不同加速电压下, 电子波长数值如表 1-1 所示。

表1-1 电子波长与加速电压的关系

加速电压 V (kV)	40	60	80	100	200	500	1000
波 长 ($\text{\AA}$)	0.0602	0.0487	0.0418	0.0370	0.0251	0.0142	0.00872

综上所述, 电子是一种带负电荷的微粒, 它在传播的过程中像光波一样具有波的性质, 其波长随加速电压的增高而变短, 而且比固体中原子间距还要小得多。光学显微镜是利用光波的特性制成的放大仪器, 能够分辨出肉眼无法分辨的物质细节。人们利用电子波波长极短的特性, 作为新的显微镜光源, 用来制造电子显微镜, 就可以分辨光学显微镜无法分辨的细微组织结构。

三、电子在电磁场中运动的特性及电磁透镜

1926年, 德国科学家布施发现: 高速运动的电子在电场或磁场的作用下会发生偏转, 并且能够被聚焦, 就如同可见光通过玻璃透镜被折射、聚焦一样。这一重要发现引起许多人的注意, 它为电磁透镜的研制提供了理论依据。

由于电子显微镜是应用电子束作为光源, 让电子通过样品, 再通过电磁透镜放大成像, 所以下面介绍电磁透镜的聚焦原理及特点。

1. 静电透镜聚焦原理

一个运动的电子在静电场中要受到电场力的作用, 其作用力为:

$$F_{\text{电}} = -eE \quad (1-9)$$

式中, e 为电子电荷, E 为电场强度矢量。因为电子带负电, 负号表示不论电子在任何位置, 它所受到的电场力作用方向与该位置的电场强度方向相反。 E 的方向为沿着电力线的切线指向电位降低的方向。 $F_{\text{电}}$ 的方向为沿着电力线的切线指向电位增高的方向。电子所受作用力的大小和方向取决于电场强度的大小和方向, 与电子的速度及方向无关。这说明静电场对运动电子有偏转折射作用。

如果 V_1 和 V_2 是两个等电位区。当一个速度为 v 的电子沿着与等位面法线成一定角度的方向运动，从 V_1 电位区进入 V_2 电位区的瞬间，在界面 O 处，电子运动速度从 v_1 变到 v_2 ，电子运动方向发生偏转（如图 1-2 所示）。

电子受到垂直于界面的作用力发生偏转的情况为：

$$\frac{\sin \theta}{\sin \gamma} = \frac{\sqrt{V_2}}{\sqrt{V_1}} \quad (1-10)$$

式 (1-10) 称为电子光学折射定律。它表明电子从低电位过渡到高电位时，电子运动轨迹折向法线；电子从高电位过渡到低电位时，电子运动轨迹远离法线。这种现象类似光线从光疏物质到光密物质时折向法线；从光密物质到光疏物质时远离法线的折射原理。这里，电位的平方根 $\sqrt{V}$ 起着折射率的作用，说明电场中等电位面是对电子折射率相同的表面，它与玻璃透镜中两种介质界面所起的折射作用相仿。

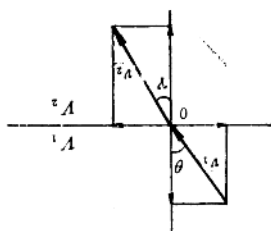


图1-2 电场对电子折射的示意图

既然玻璃透镜可以使光波聚焦成像，那么类似形状的等电位面簇也可能使电子波聚焦成像。这种能产生旋转对称等电位面簇的电极装置，被称为静电透镜。由于电场中电位是连续变化的，所以电场对电子的折射率也连续变化。这便造成电子在静电透镜场中沿曲线轨迹运动，从而使电子会聚、发散予以成像。

静电透镜种类很多，但现代电镜中，除电子枪外，都不用静电透镜聚焦成像。发射电子束的电子枪就是一种静电透镜，它可把电子束最小截面缩小到直径为几十微米，以保证足够的照明强度。

2. 磁透镜成像原理

现代透射电子显微镜通常采用磁透镜聚焦成像，因此需要了解电子在磁场中运动的规律以及磁透镜的聚焦原理和特点。

运动的电子在磁场中要受到磁场力的作用，这种作用力称为洛伦兹力。它使电子的运动方向发生偏转。按照这种原理，人们设计制造了各种磁场装置，被称为磁透镜。用它来使电子束偏转、聚焦成像，这就组成了透射电子显微镜的各种磁透镜。

(1) 电子在均匀磁场中的运动

运动的电子在磁场中受到的作用力为：

$$\mathbf{F}_{\text{磁}} = -e(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1-11)$$

$\mathbf{F}_{\text{磁}}$ 称为洛伦兹力， e 为电子电荷量， $\mathbf{v}$ 为电子运动速度矢量， $\mathbf{B}$ 为磁感应强度矢量（与磁场强度 $\mathbf{H}$ 的关系为 $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ ，在真空中 $\mu = 1$ ，所以 $\mathbf{B} = \mathbf{H}$ ）。由于电子带负电荷，等式右边的负号表明电子所受磁场力的方向与 $(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ 的方向相反。

洛伦兹力 $F_{\text{磁}}$ 的大小可用下式计算：

$$F_{\text{磁}} = evH \sin(\nu, \mathbf{B}) = evB \sin \alpha \quad (1-12)$$

式中， α 是 $\mathbf{v}$ 和 $\mathbf{B}$ 两者之间的夹角。由式 (1-12) 可见，磁场对运动电子的作用力与电子运动速度 v 、磁感应强度 B 以及它们之间的夹角 α 有关。下面我们通过它们之间的关系，来讨论电子在均匀磁场中运动的轨迹。

(a) 电子进入磁场时，若其运动方向与磁场方向一致，即 $\mathbf{v} \parallel \mathbf{B}$ ($\alpha = 0$)，则 $F_{\text{磁}} = 0$ 。这种情况下，磁场对运动电子没有力的作用，电子运动速度的大小和方向都不改变，仍作匀速直线运动。

(b) 电子进入磁场时，若其运动方向与磁场方向垂直，即 $\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$ ($\alpha = 90^\circ$)，则 $F_{\text{磁}} = evB$ 。这时电子受到最大的磁场作用力，这种力不能改变电子运动的速度，却能改变运动的方向，使运动轨迹偏转。由于 $F_{\text{磁}}$ 垂直于 $\mathbf{v}$ 和 $\mathbf{B}$ 所决定的平面，所以，电子必然在与磁场垂直的平面内作匀速圆周运动，如图 1-3 所示。此时，磁场力起着向心力的作用，即

$$F_{\text{磁}} = F_{\text{向心}}$$

$$evB = \frac{mv^2}{r}$$

电子在均匀磁场中作圆周运动的半径为：

$$r = \frac{mv}{eB} = \frac{v}{\eta B} \quad (1-13)$$

式中， η 为电子的比电荷， $\eta = e/m$ 。式 (1-13) 表明，电子作圆周运动的半径与速度成正比。

许多电子以不同的运动速度垂直于磁场方向同时由 P 点进入磁场，这时各个电子以不同的速度通过 P 点形成不同半径的圆周，如图 1-4 所示。电子旋转一周所需时间 τ 为：

$$\tau = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{\eta B} \quad (1-14)$$

式 (1-14) 说明，每个电子运动的速度不同，所形成的圆周半径不同，但旋转一周所需时间 τ 却相同。

(c) 电子进入磁场时，其运动方向与磁场方向成一定角度，即 $\mathbf{v}$ 与 $\mathbf{B}$ 成 α 角。这时可把速度 $\mathbf{v}$ 分解为平行于磁场方向的分量 v_z 和垂直于磁场方向的分量 $v_\perp$ 。由于 v_z 使电子沿 z 轴作匀速直线运动， $v_\perp$ 使电子在垂直于 z 轴的平面上作圆周运动，所以电子合成运动的轨迹是一螺

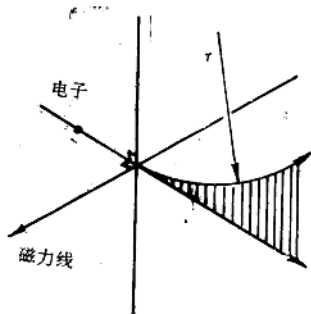


图 1-3 电子在磁场中运动的轨迹

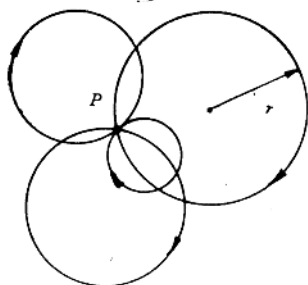


图 1-4 沿磁力线方向看电子在磁场中的圆形轨迹

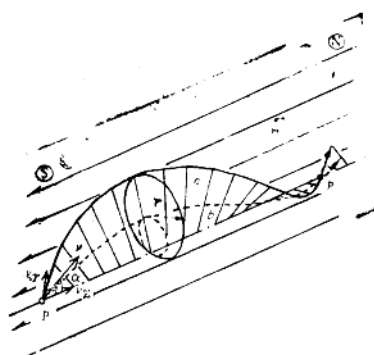


图 1-5 在均匀磁场中电子运动的轨迹

旋线，如图 1-5 所示。这有如电子从 P 点出发沿螺旋线 a 的轨迹运动到 P' 点那样。由于 $v_r = v \sin \alpha$ ，所以电子作圆周运动的半径（即螺旋线的圆周半径）为：

$$r = \frac{v}{\eta B} \sin \alpha \quad (1-15)$$

在透射电子显微镜中，应用近轴电子束成像， α 很小，所以 v_z 可用下式表示：

$$v_z = v \cos \alpha \approx v \quad (1-16)$$

当电子以不同角度从 P 点同时发射（图 1-5），沿 a 和 b 轨迹运动，以相同的时间经过相同的轴向距离到达 P' 点。在时间 τ 内每个电子沿 z 轴前进的距离为：

$$PP' = v_z \cdot \tau = \frac{2\pi v}{\eta B} \quad (1-17)$$

图 1-6 表示电子在真空磁场中的运动轨迹。所有电子从 P 点以不同的发射角同时射出，它们经过不同的途径，都能同时会聚在同一点 P' 上。这就表明均匀磁场能够聚焦成像，但是它的像和物一样大，不能制造真正的透镜。

（2）短磁透镜

现代电磁式电子显微镜中，广泛应用的是短磁透镜，它是一种能产生旋转对称非均匀磁



图 1-6 大量电子通过均匀磁场被聚焦的示意图

场的磁极装置，其磁场范围比焦距小得多。为了缩小磁场的轴向宽度，把圆筒形线圈装在铁壳中，再加上一个用导磁率很高的软磁材料做成的顶端成锥状的圆形极靴，这就成为强磁透镜。这种透镜可使磁力线集中在铁壳的中心区域，提高磁场强度，从而得到短的焦距和高的放大倍数。图 1-7 表示磁透镜的几种类型以及它们磁力线的分布情况。图 1-7 (a) 为多层螺线管，(b) 为螺线管外罩铁壳，(c) 为螺线管外罩铁壳内装极靴。

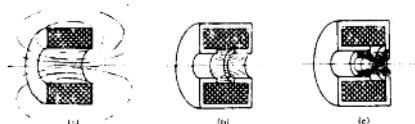


图 1-7 磁式电子透镜的类型

运动的电子途径磁透镜，既旋转又折射，两种运动同时进行，电子轨迹为圆锥状螺旋线。电子束围绕透镜旋转了一个角度 θ ，又向轴心聚焦，如图 1-8 所示。

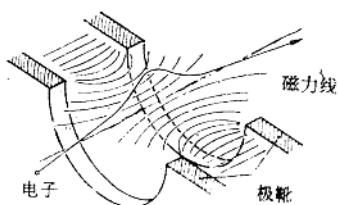


图 1-8 电子通过磁透镜时的轨迹

短磁透镜的磁场分布和成像原理如图 1-9 所示。如果短磁透镜的焦距为 f ，放大倍数为 M ，像的旋转角 θ ，那么它们之间的关系为：

$$\frac{1}{f} = \frac{\eta}{8V} \int_{-\infty}^{\infty} B^2(z) dz \quad (1-18)$$

$$\theta = \sqrt{\frac{\eta}{8V}} \int_{-\infty}^{\infty} B(z) dz \quad (1-19)$$

$$M = \frac{L_2}{L_1} = \frac{f}{L_1 - f} = \frac{L_2 - f}{f} \quad (1-20)$$

式中, V 为加速电压, η 为电子比电荷量, $\eta = e/m$, $B(z)$ 为沿透镜轴分布的磁感应强度, L_1 为透镜物距, L_2 为透镜像距。

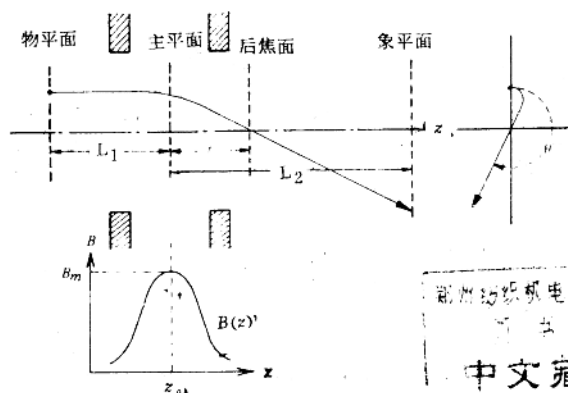


图 1-9 短磁透镜的磁场分布及成像原理

对于磁透镜, 焦距 f 与电子加速电压 V 和螺线管安匝数 (IN) 之间构成如下关系式:

$$f = K \frac{V}{(IN)^2} \quad (1-21)$$

式中, K 为常数, I 为通过透镜线圈导线的电流强度, N 为线圈圈数。

由式 (1-21) 可知, 加速电压 V 越高, 电子速度 v 越大, 则 f 越长。亦可看出, 焦距 f 反比于透镜激磁电流。因此, 可以通过调整激磁电流来改变透镜的焦距。电流越大, 磁场越强, 则放大倍数越大。这表明磁透镜的特点是其放大倍数可变。实际操作中, 往往用调整激磁电流的方法取得需要的放大倍数。

四、电磁透镜的像差

类似于玻璃透镜, 电磁透镜也具有各种像差, 它限制了可能达到的分辨本领。三级放大的电子显微镜中, 物镜的像差是最重要的。

1. 球差

球差是由于电磁透镜的中心区域和边缘区域对电子束会聚能力不同而产生的。远轴区域的电子通过透镜时, 其折射程度比近轴区域的电子严重, 两者经过透镜后不交在一点上, 结果物点的像在透镜平面上呈现为一个弥散圆斑, 见图 1-10 (a)。将该弥散圆斑折合到物平面上则其半径为:

$$r_s = C_s \alpha^3 \quad (1-22)$$

式中, C_s 为透镜球差系数, α 为透镜孔径半角。

式(1-22)说明,球差造成的最小弥散圆斑半径与球差系数及孔径半角 α^3 成正比。这表明孔径半角愈大,最小弥散圆斑就愈大,因之透镜的分辨本领就愈低。由于球差至今仍无法校正,为了提高透镜的分辨本领,必须采用很小的孔径角。

2. 色差

色差来源于透镜对不同波长的光束有不同的聚焦能力,来自物面上同一点的各色光(不同波长)经过透镜后不再聚焦于一点,从而造成像差,这种像差被称为色差。色差的存在使物面上一个光点在像平面上形成一个弥散的圆斑,见图1-10(b)。色差弥散圆斑半径与成像电子束能量(波长)变化率成正比,折合到物平面上其半径为:

$$r_c = C_c \alpha \frac{|\Delta E|}{E} \quad (1-23)$$

式中的 C_c 为色差系数, α 为孔径半角, $|\Delta E|/E$ 为能量变化率。

ΔE 主要来源于加速电压的波动,因此提高加速电压的稳定度并采取一些其它相应措施,便可将色差降低到最低限度。

3. 像散

当透镜磁场不对称时,透镜不同方向对电子束的聚焦能力不一样,使圆形物点的像变成弥散椭圆斑(见图1-10(c)),这种现象被称为像散。椭圆形弥散斑折算到物平面上,其半

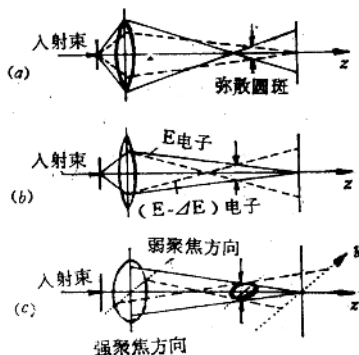


图 1-10 电磁透镜的像差光路图
(a) 球差 (b) 色差 (c) 像散