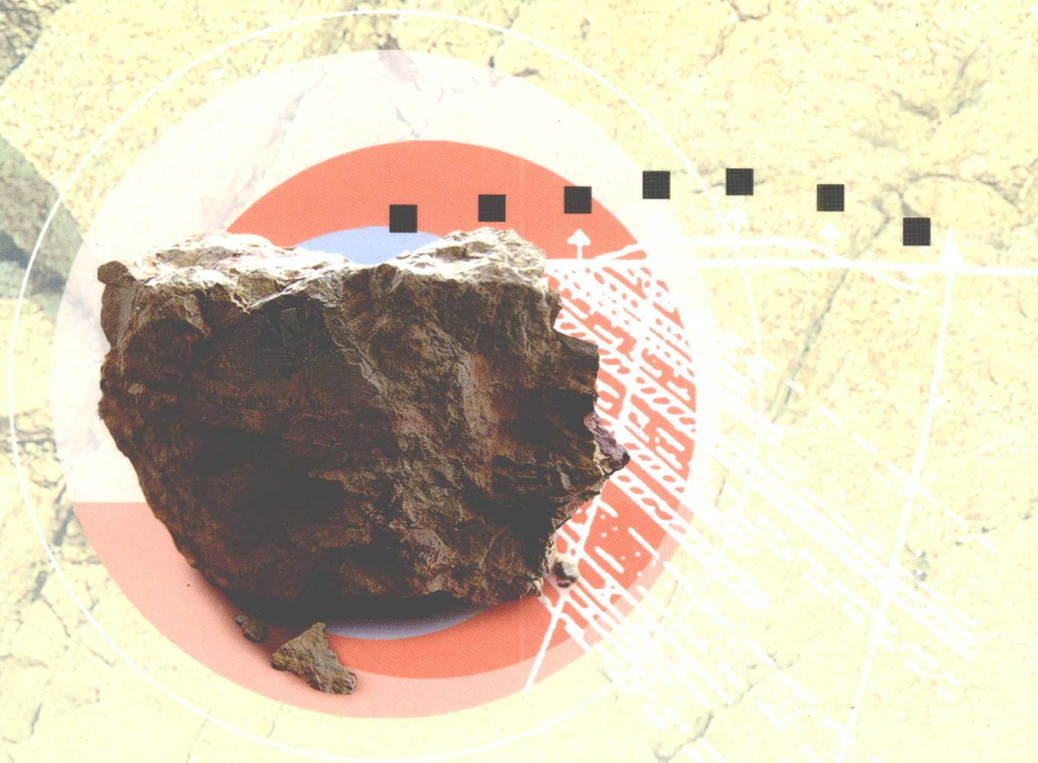


教育部地质工程教学指导分委员会推荐教材
中国地质大学“十五”规划教材

矿石学教程

KUANGSHIXUE JIAOCHENG

◎ 王 苹 主编



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

教育部地质工程教学指导分委员会推荐教材
中国地质大学“十五”规划教材

矿石学教程

王苹 主编



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

内 容 简 介

本书是为适应“十五”教学规划要求而编写的教学用书。全书内容分为七章,主要包括矿石学的基本概念、反射光的基本理论及反光显微镜、吸收性矿物的物理性质、矿物鉴定及矿物鉴定表、矿石的构造和结构、矿化阶段和矿物生成顺序、矿石工艺性质研究等。对于现行教学中没有时间介绍而又有参考价值的部分,作为附录附于书后。

本书结构合理,内容丰富,文字简练,图片清晰。书中能及时反映矿石学当前研究的新成果、新进展,是当代具先进水平的矿石学教科书。

本书除供地质类专业师生使用外,还可作为岩矿鉴定研究人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

矿石学教程/王苹主编. —武汉:中国地质大学出版社,2008.10

ISBN 978-7-5625-2282-9

I. 矿…

II. 王…

III. 矿石学-教材

IV. P616

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 152870 号

矿石学教程

王 苹 主 编

责任编辑:赵颖弘

技术编辑:阮一飞

责任校对:林 泉

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cn>

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:403 千字 印张:14.5 图版:18

版次:2008 年 10 月第 1 版

印次:2008 年 10 月第 1 次印刷

印刷:湖北地矿印业有限公司

印数:1—1 000 册

ISBN 978-7-5625-2282-9

定价:50.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

《矿石学教程》是为适应“十五”教学计划要求而编写的教学用书,它适用于地质类专业的学生及相关的岩矿鉴定人员。本课程是一门独立的专业基础课,要求学生在学完基础课(普通物理学、普通化学、高等数学等)和地质基础课(普通地质学、结晶学、矿物学、岩石学)等课程的基础上,在大三时开设。

本教程是在 20 世纪 80 年代由徐国风教授主编的《矿相学教程》基础上重新编写的,它是集几代教师几十年的教学经验,同时结合矿石学研究的新成果并参阅兄弟院校的同类教材编写而成。它的内容除了基本理论和反光显微镜介绍之外,主要分为两大部分:第一部分为矿物鉴定,第二部分为矿石研究。矿物鉴定主要依据矿物的光学物理性质及其他特征给矿物定名,尤其强调常见矿物的简易鉴定,基本属于金属矿物学的内容。矿石研究主要包括矿石组构研究、矿化期、矿化阶段和矿物生成顺序研究,还兼顾矿石工艺性质研究,这部分属于矿床学的内容。由此我们认为,矿石学应属于矿物学和矿床学之间的边缘学科。

本教程在内容和结构上较以往教材有了较大改进,除单列绪论一章外,新增加了“反射光基本理论”部分,并且把矿物的物理性质归总放在一章中。同时由于现行教学的时间限制,考虑到教学内容的连贯性,把教材中有些不在课堂上讲解的内容放在书后作为附录登出,以便学生自学或参考。调整后的教材显得内容更充实,结构更合理,条理更清楚。

考虑到矿石学主要为一门方法实验课,在教学方法上除了介绍基本知识、基本理论外,还安排了大量的实验课,以期通过实验加深学生对理论的理解,培养和锻炼学生的动手能力。

本教程由王革担任主编,具体分工如下:绪论及第一、二、三、四、五、六章、附录Ⅳ、Ⅴ由王革编写,第七章由李立平编写,附录Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ由左大华编写,全书文字处理、图件绘制及第四章中的鉴定表核对由陆建培担任,最后由王革统一修改、定稿。

由于编者水平和时间有限,书中不当之处,欢迎使用者不吝赐教。

编 者

二〇〇八年八月

第一章 绪 论	(1)
第二章 反射光的基本理论及反光显微镜	(7)
第一节 反射光的基本理论	(7)
第二节 反光显微镜	(10)
第三章 矿物的物理性质	(18)
第一节 矿物的反射率	(18)
第二节 矿物的反射色	(28)
第三节 矿物的双反射及反射多色性	(32)
第四节 矿物的均质性及非均质性	(37)
第五节 矿物的内反射	(43)
第六节 矿物的显微硬度	(47)
第四章 矿物鉴定	(55)
第一节 矿物的综合鉴定	(55)
第二节 矿物的简易鉴定	(122)
第五章 矿石的构造、结构	(125)
第一节 概述	(125)
第二节 矿石构造	(126)
第三节 矿石结构	(139)
第四节 矿物的晶粒内部结构	(151)
第六章 矿化阶段及矿物生成顺序	(159)
第一节 矿化期及矿化阶段	(159)
第二节 矿物的生成顺序及矿物的世代	(162)
第三节 矿物生成顺序图表的编制	(165)
第七章 矿石工艺性质研究	(169)
第一节 概述	(169)
第二节 矿石的化学成分和矿物组成	(169)
第三节 元素的赋存状态及其研究方法	(177)
第四节 矿物的嵌布粒度及解离性	(185)
第五节 矿物物性及其工艺特性	(194)
附录 I 吸收性晶体的复数光性指示体	(197)

附录 II	金属矿物的反射色颜色指数	(200)
附录 III	矿物在聚敛光下的偏光图	(207)
附录 IV	矿物的浸蚀鉴定	(216)
附录 V	矿物的显微结晶化学分析	(220)
参考文献		(224)
图版及说明		(227)

第一章 绪 论

一、矿石学

矿石学(ore petrology)是以矿石为研究对象的一门基础地质科学,主要是研究固体矿石中的金属矿石、煤及宝玉石等。

众所周知,矿石是成矿物质在特定的地质环境和物理化学条件下经漫长的地质成矿过程演化的最终产物,是在当前经济技术条件下能够直接利用或从中提取有用组分的单晶矿物或矿物集合体。显然,矿石学通过研究矿石,利用反序的工作方法,为研究矿床的形成、演化、成矿作用及地质找矿、矿石利用等提供可靠信息,无疑具有重要的理论和实际意义。

矿石学的研究方法在许多方面与以合金为研究对象的金相学相似。矿石学是矿床学、找矿勘探地质学、矿石工艺学(选矿学和冶金学)等的基础学科。在实际应用上,矿石学与数学、物理学、化学等基础理论科学的关系密切,它必须充分利用这些学科的基本知识和新的研究成果;同样,矿石学还要应用结晶学、矿物学、岩石学、地球化学、古生物学、地层学等基础地质科学的基本理论和方法;当然,矿石学的研究成果也可以反过来为上述学科提供资料,通过不同学科之间的交叉渗透,从而促进共同发展。

二、矿石学的研究内容

(1)研究矿石的矿物成分:矿石往往由多种矿物组成,由单一矿物组成的矿石比较少见,因此,鉴定、识别矿石中矿物(主要是金属矿物)的种类和含量,是矿石学研究的首要任务。

(2)研究矿石的构造、结构(组构):主要研究矿物集合体或单个矿物颗粒的形态、大小及相互接触关系。

(3)研究矿化规律:通过不同位置上矿石特征的差异(例如沿钻孔岩芯由上到下采样,在不同标高开采坑道采样,沿矿体倾斜方向采样等),研究矿化在空间上分布的规律性;通过划分不同矿化期、矿化阶段及矿物生成顺序等,研究矿化在时间上发育的规律性。

(4)研究矿石的技术加工性能:作为选矿、冶炼的基础资料,主要是测量有用矿物的含量,有用矿物的嵌布特征、连接关系、嵌布粒度、解离度、元素在矿石中的赋存状态等。

从上可知,矿石学的研究领域包括金属矿物学和矿床学的若干内容,从这个意义上可以说,矿石学是矿物学和矿床学之间的边缘学科。

三、矿石学的研究意义

(一)为矿床成因提供信息

我们知道,在地质上时间是以百万年为单位的,每一个矿床的形成都经历了几十至几百个百万年的地质演化过程,也就是说,每一个矿床的形成都有一个长期、复杂的地质过程,这个过程是不可逆过程,而这个过程的终端产物是矿石,因此矿石中必然蕴含着丰富的成矿作用信息。我们利用反序的工作方法,通过深入研究矿石,可以从微观尺度上揭示这些信息,从而帮助阐明矿床成因。

1. 帮助确定成矿的物理化学条件

某些特殊的构造、结构类型可以指示成矿的物理化学条件,如温度、压力、氧逸度(f_{O_2})、硫逸度(f_{S_2})、Eh、pH等。如通过对具有出溶结构的斑铜矿(主矿物)-黄铜矿(客矿物)矿石做退火加温试验以及结合自然界矿石出溶结构的研究,可知形成稠密细小的叶片结构和格状结构者的温度是250℃以下(由快速冷却、强烈过饱和、扩散速度慢所致),而300~375℃则形成较稀疏而粗大的液滴状、蠕虫状乃至细脉状结构(由缓慢冷却、过饱和程度低、扩散速度快所致)。

磁铁矿被赤铁矿交代形成假象赤铁矿,说明成矿环境由相对还原变为氧化,Eh值升高了;反过来,若赤铁矿被磁铁矿交代形成磁赤铁矿,则表示成矿环境由氧化变为相对还原,Eh值降低了。多金属硫化物矿石中硫化物交代石英形成的交代结构表明成矿溶液的pH值升高,为碱性溶液,磁黄铁矿(含硫36.5%)被白铁矿(含硫53.4%)交代,指示含矿溶液硫离子浓度增大。

某些标型矿物与标型结构的组合可以直接指示矿石的形成条件。如铬铁矿和豆状构造组合表示高温高压下岩浆熔离的成矿条件;孔雀石、褐铁矿和蜂窝状构造组合则是原生矿石在常温常压下经历氧化作用的结果。

2. 帮助判断成矿方式,确定矿物生成顺序

热液矿床中广泛发育的交代结构,如反应边结构、骸晶结构、细脉穿插结构、假象结构等,反映出成矿过程中交代作用相当强烈,被交代矿物往往是形成较早的矿物;而接触边界圆滑的乳浊状结构、格状结构、结状结构等则是由固溶体分解作用形成的,表明组成这种结构的矿物是同时形成的。

(二)为找矿勘探提供资料

矿石研究与找矿勘探的关系密不可分,它提供的资料是找矿勘探工作中矿石评价的重要根据,直接决定着找矿勘探的方向。

例如,陕西二台子金矿为产于泥盆系沉积岩系中的微细浸染型金矿床。有一种观点认为金与矿区西南侧之辉绿岩有关,另一种观点则认为金与岩浆热液活动无关。对于矿床成因的争论涉及到找矿方向的问题。经过野外详细地质调查及矿石学研究,发现该矿床的矿石结构主要为凝胶再结晶作用和填隙作用形成的结构,围岩蚀变也不发育,这些结构特征说明成矿温度较低,溶蚀交代作用不显著,与岩浆热液交代矿床的矿石结构有明显差异,应属于渗流热卤水型热液矿床。因此,提出寻找这类金矿床应在岩性、构造有利的沉积岩地段进行,排除了在辉绿岩周围找矿的可能性,为找矿提供了有益资料。

(三)为矿石的技术加工提供依据

对一个矿床进行工业评价,仅仅知道工业品位、储量、矿体形态、产状和一般物质组成是不够的,还应对矿石技术加工性质进行研究。一般矿石在冶炼之前都要先经过选矿,那么有用矿物的粒度大小及矿物之间的镶嵌关系都直接影响到矿物最佳破碎直径的选择问题;另外要提取矿石中的有用组分,就要搞清楚哪些是有用组分,哪些是有害组分,哪些是有益组分,它们的赋存状态怎样,这些都需要做矿石学的研究工作。通过这些研究,可以帮助查定矿石的可选性,帮助确定矿石的工艺加工流程以及帮助确定矿石综合利用方案等,从而为矿石技术加工提供依据。

众所周知,选矿的第一道工序是碎矿。碎矿时,若破碎直径过大,会使矿石矿物与脉石矿物解离不开;若过小,则不但增加碎矿工作量,提高成本,而且会发生矿粉“泥化”,在尾砂中流

失有用金属。因此,选择合适的“破碎直径”是一个很重要的问题。而由矿石学研究查明矿石中有用矿物的粒度特性和连晶特性在这方面起着决定性作用。如某铁锌综合矿石,矿石学的研究资料证明,磁铁矿粒度大于 0.2mm 者占 99.87%,闪锌矿的粒度大于 0.2mm 者占 97.15%,如果把矿物的连晶特性当作简单的“平直接接触关系”处理,可确定该矿石最终破碎直径为 0.2mm。实际上,该矿石的矿物间接触关系复杂,接触界线参差不平,综合考虑到矿物间的这种连接特性,显然最终的破碎直径要小些才合理。经过进一步地研究确定应将弯曲边界构成的“半岛”状分支作为颗粒测定其粒径,一般仅 0.1mm。选矿试验最终也证明:当磨矿细度到 0.2mm 时,解离度仅 10%,仍有 90%的复合粒;当磨矿至 0.1mm 的粒径时,解离度达到 90%。因此,综合考虑矿物颗粒特点与连晶关系,确定矿石最终的合理磨矿直径为 0.1mm。

又如江西某铜矿,由于铜精矿中含砷量 $>1\%$,大大超出了工业上对铜精矿含砷量的要求(含砷量 $<0.3\%$),因此一度造成铜精矿积压。要想重新打开销路,就要想办法降低铜精矿中砷的含量,要达到此目的就要搞清楚砷的赋存状态(即砷以类质同象混入物方式存在,还是以独立矿物形式存在,亦或是机械混入物、吸附形式等等),从而解决铜、砷分离问题。通过大量细致的矿石学研究,查明了砷主要以独立的砷矿物存在,它们以砷黝铜矿为主,其次是硫砷铜矿,有少量毒砂和砷铜矿。由于该矿床中主要含砷矿物砷黝铜矿与主要铜矿物黄铜矿的浮选性能相近,因而导致铜精矿中砷的含量增高。原因找出以后,就可以选用抑制砷的抑制剂和选择铜的捕收剂,扩大分选矿物之间的差异,达到铜、砷分离的目的。

四、矿石学发展简史

矿石学的发展历史表明它是一门比较年轻的学科,是在矿物学、矿床学、金相学的基础上发展起来的。20 世纪初才把金相学研究合金成分、结构特点的方法应用于研究天然矿石。20 世纪 50 年代以前国外学者 H. Schneiderhöhn, M. Berek, A. Г. Берехтин, J. Orcel, R. W. Van der Veen, P. Ramdohr, E. S. Bastin, G. M. Schwartz, И. С. Вольинский, M. N. Short, A. B. Edwards 等在不透明矿物晶体光学、显微镜下鉴定方法、矿石组构研究等方面作出了重要贡献,为早期矿石学的发展奠定了基础。这一时期矿石学研究以定性的理论解释和主要为定性、半定量的测试数据鉴定矿物为特征,矿石构造、结构的研究也是在传统地质学范畴内进行观察和描述。后来, R. Galopin, N. F. M. Henry, W. Uytendogaardt, P. Ramdohr, S. H. U. Bowie, E. Stumpfl, Л. Н. Вяльсов, H. Piller, С. А. Юцко, М. С. Безсмертная, Т. Н. Чвилева, E. N. Cameron, A. F. Hallimond, R. L. Stanton, J. R. Craig, A. Cridle, L. J. Cabri, B. Cervelle, A. Sugaki 等为光学定量理论、显微镜下近代鉴定法、在相关系实验基础上矿物共生组合、矿石组构研究作了研讨和综合。我国矿相学家陈正、徐国风等在矿物反射色颜色指数、旋转性定量理论与新测定方法、矿石构造结构、矿石工艺性质研究等方面,为解决我国现代化建设中的实际矿石学问题和探索矿石学领域中的某些理论问题作出了显著的成绩。可以预见,今后不透明金属矿物鉴定与研究将向微粒、微区、快速、定量方向发展,矿石组构的研究与近代成矿理论和实验以及各种先进选矿、冶炼方法相结合的方向发展;测试仪器自动化及与电子计算机相结合,将量子化学、固体物理学最新研究成果引进矿石学领域乃是不可忽视的发展趋势;矿石学必然要为矿床成因、地质找矿和矿石加工以及新材料研制等方面作出更大的贡献。

五、矿石学的研究方法

研究矿石的方法很多,归纳起来主要有以下几种:

(1)野外(或现场)实地观察及放大镜研究:可以取得有关矿石特征的原始资料,可以从宏观上直接了解矿石的产出状态,初步认识矿石中主要矿物的种类及矿化特点,确定并采集进一步研究用的标本,为室内的详细研究打下可靠的基础。

(2)反光显微镜研究:是研究矿石的最主要、最基础的方法,有着其他任何方法不可替代的作用。它除了能满足矿石的常规研究外,还能对其他研究方法提供可靠的测试样品。本教材将对反光显微镜研究方法作详细的介绍。

(3)电子探针分析:是利用磁透镜,将来自电子枪的高能电子束聚焦于直径为 $0.01\sim 1\mu\text{m}$ 的范围内,轰击欲测样品(矿石),使其中各元素发射特征 X 射线,经分光识别进行定性、定量分析。它可分析元素周期表中从第 4 个元素 Be 到第 92 个元素 U 的所有元素,分析微区范围小至 $1\mu\text{m}$,其相对灵敏度达 100×10^{-6} 。它具有微区、微量、快速、直观、不破坏样品等特点。

(4)电子显微镜研究:光学显微镜的放大倍数最大不超过 2 000 倍,分辨本领最高不超过 $0.2\mu\text{m}$,而电子显微镜却能够把物体放大几十万倍,甚至上百或千万倍,分辨本领高达 0.1nm 。超高压电子显微镜可以研究晶体结构和晶体缺陷;在辅助装置的配合下,电子显微镜还能连续观察金属在外力作用下内部变化的过程。

(5)X 射线分析:可以测定矿物晶体的晶胞大小、格子类型、空间群和原子排列形式等,主要用于矿物晶体结构研究和矿物鉴定。此外,还有激光光谱分析、拉曼光谱分析、红外光谱分析等。

六、矿石学研究的工作程序

矿石学研究的工作程序可分为以下 3 个阶段:

(一)野外研究阶段

首先收集已有地质资料来了解区域及矿床的地层、构造、岩浆活动、地质发展史、矿体构造、矿石及围岩等方面的情况,在此基础上再选择有意义的矿化露头、探槽、坑道、钻孔、采场进行地质观察和编录,同时采集研究用标本。采集的原则是:各个矿体或重要矿体有代表性的标本以及特征性的标本(包括各种矿物、典型矿石构造结构、共生组合的标本和重要围岩标本等)。

(二)室内研究阶段

主要任务是进行显微镜下鉴定和研究,必要时还须进行其他一些专门性研究(如电子探针分析、X 射线分析、单矿物化学分析、激光显微光谱分析、红外吸收光谱分析、电子显微镜分析、X 光荧光光谱分析、中子活化分析、图像分析仪测定、同位素年龄分析等)。

研究用标本根据不同情况分别制成磨光块(矿块)、磨光片(光片)、薄片、光薄片、砂光片等。对上述这些加工过的标本进行显微镜下研究主要是能比在野外更精确地研究矿石(围岩)的物质成分特点(矿物成分、化学成分、矿物共生组合)和形态特征(矿石的结构、矿物粒度和含量、矿物晶粒内部结构等)。

(三)综合整理研究阶段

主要是综合野外、室内研究的成果和文献资料,编写矿石研究报告书。其报告内容主要包括:①区域及矿床地质特征;②矿石类型、矿物成分及化学成分特点;③矿石的组构特征及矿

化期、矿化阶段、矿物生成顺序、矿物世代等研究成果;④矿石中有益有害组分赋存状态,有用矿物嵌布特征、嵌布粒度、连接关系等。最后,在分析实际资料的基础上提出矿床成因的见解及找矿评价、矿石技术加工方案的建议。

七、矿石磨光片的制备

(一)光片

光片是一面磨光的矿石块,大小可以略有不同,一般为 $2\text{cm} \times 3\text{cm}$ 左右见方,根据其制作方法及用途可以分为不同的类型。

(二)光片类型

(1)磨光块:一般为 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 左右见方的矿石块,主要用于研究矿石构造。

(2)光片:一般为 $2\text{cm} \times 3\text{cm}$ 左右见方的矿石块。

(3)砂光片:把天然重砂或人工重砂样品用电木粉或环氧树脂固结成型,经磨制后成为砂光片。

(4)光薄片:厚度与薄片相同或略厚,一面磨平后粘在载玻片上,另一面是抛光的矿石片。

光片、砂光片、光薄片除了用于光学显微镜鉴定外,还可以作为电子探针、电子显微镜、激光拉曼光谱仪、红外光谱仪等仪器的测试样品。

(三)光片制备的步骤

光片制备一般要经过切割、粗磨、细磨、精磨、抛光、编号 6 个步骤,如果遇到疏松多孔、易碎的矿石标本,磨制前需要用松香加松节油煮胶,目的是使其固结、便于磨制。

(1)切割:在切片机上将矿石标本中所需观测部分切割成 $30\text{mm} \times 25\text{mm} \times 8\text{mm}$ 大的长方扁块。对具特殊研究意义的矿石构造和结构光片,可根据研究任务的要求切出较大的光块。

(2)粗磨:在铁盘磨片机上用 150 号金刚砂(直径约 $100\mu\text{m}$)粗磨成型。

(3)细磨:用更细的金刚砂(320 号)在磨片机上将粗磨好的矿石一面继续磨平。

(4)精磨:这是磨制光片的关键工序,对光片质量起决定性作用。用 1200 号(M14 号)、M12 号金刚砂(或 2 号白泥浆)在玻璃板上人工精磨,必要时换一块玻璃板用 M7 号金刚砂精磨,直到矿石块表面具备一定反射光线能力为止。

(5)抛光:这是光片制备工作的最后一道工序。将细磨好的矿石块放在帆布磨盘上,加用水调好的三氧化二铬或三氧化二铁溶液初步抛光,其中三氧化二铬研磨力最强,光片易抛光。然后再将矿石块置于呢料磨盘上加用水调好的氧化镁溶液进行抛光。氧化镁在研磨过程中本身就具有愈磨愈细的特点,特别适合作为最后抛光材料。

光片最后的抛光工作应根据不同硬度的矿物采用不同的蒙布。如方铅矿、黄铜矿、辉锑矿等软矿物以法兰绒、金丝绒为宜;黄铁矿、毒砂、磁铁矿等硬矿物以用帆布、尼龙织物为好。磨制更软的矿物,例如煤光片等,需要在绸子磨盘上进行。

光片在抛光过程中需将光片经常洗净擦干置于显微镜下检查,直至粗擦痕和麻点消失,光面平滑如镜为止。如果软矿物间有强烈突起,表明抛光时间过长;如果软矿物发亮而硬矿物粗糙,表示在玻璃板上的精磨不够;如果软矿物擦痕很多,则是由于抛光用布料较粗糙造成的。由于光片的磨光面显露在空气中容易氧化,蒙沾灰尘,故在镜下观察前需在呢绒质擦板上擦拭干净,必要时需重新抛光才能观察。

(6)编号:光片磨好后应立即编号,以免错混。编号的名称与顺序应与野外采集的标本一致。

(四) 矿石光片的质量要求

矿石光片质量的好坏,直接影响到在显微镜下观测的精确程度。因此,在磨制矿石光片的过程中,一定要满足以下 3 点要求:

- (1) 光片表面平滑如镜,无麻点(小坑)、细裂缝和粗大的擦痕存在;
- (2) 同一种矿物在光片的中心部分和边缘部分,其磨光程度应完全一致;
- (3) 光片中软矿物和硬矿物之间相对突起不应过于明显。

第二章 反射光的基本理论及反光显微镜

第一节 反射光的基本理论

一、光的本质

现代物理学认为光是一种电磁振动。1905年爱因斯坦提出光具有波动性和粒子性,叫光的二象性。如干涉、衍射等是波所特有的现象,光电效应则说明光有粒子性,即光是由一个个的光子组成的。用测量波动性的方法测出光是一种波,用测量粒子性的方法测出光是一束电子流。光的二象性的表现并不是时刻同步的。在某些情况下光的波动本质表现得较为明显(如光的反射、折射等),在另一些情况下光作为一束粒子的性能又占首要地位(如发光作用)。

在矿石学研究中,主要是应用光的波动性对矿物的光学性质进行研究,以达到鉴定矿物的目的。电磁波的波长范围很宽,可见光仅是其中很窄的一段(图 2-1-1)。

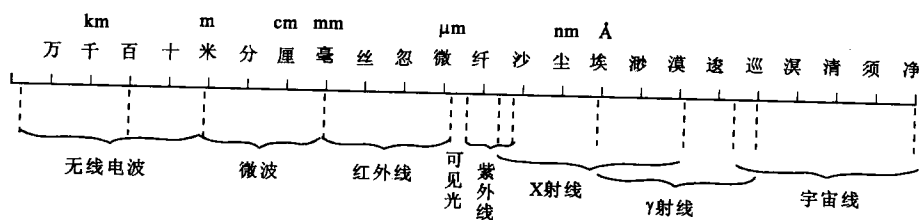


图 2-1-1 电磁波谱

二、自然光

自然光是在垂直光波传播的方向上,沿一切可能的方向振动的光波总和。也就是说,光源发出的光波其振动方向虽然永远与光的传播方向垂直,但在某一瞬间,振动方向在垂直于光的传播方向的平面内可以取所有可能方向,没有一个方向较其他方向占优势,即光波的振动方向是在瞬间变化的,在所有可能方向上,光的振幅都相等[图 2-1-2(a)]。

三、偏光

偏光有 3 种,即直线偏光(平面偏光)、椭圆偏光和圆偏光。

1. 直线偏光

就是我们通常所说的偏光,指的是只在一个固定方向上作有规律振动的光。因为光波振动的方向彼此平行,同时在一个平面内振动,因此也叫平面偏光[图 2-1-2(b)]。

2. 椭圆偏光和圆偏光

虽然二者属于偏光范畴,但从成因上讲它们是直线偏光合成的结果。

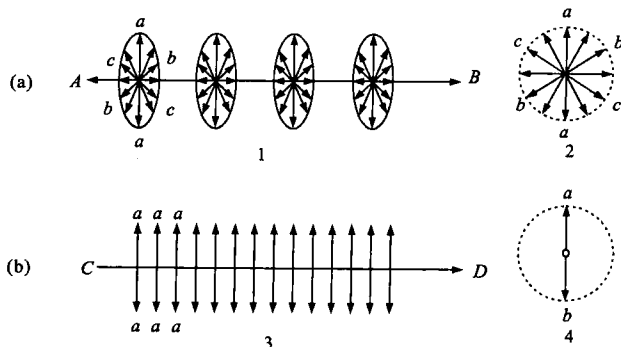


图 2-1-2 自然光与直线偏光

四、互相垂直振动的直线偏光的合成

当两条振动方向互相垂直的直线偏光相加时,在不同条件下,将发生下列 3 种情况:

1. 直线偏光

两条振动方向互相垂直的同频率直线偏光,在周相相同(周相差 Δ 为 0 或 $n\pi, n=1,2,3, \dots$)的情况下,合成光波仍然是一条直线偏光,若二者振幅相同,合成的直线偏光为一正方形的对角线;若二者振幅不同,则合成的直线偏光将偏向于振幅大的直线偏光一侧,也就是说合成偏光发生了旋转[图 2-1-3(a)、(e)、(i)]。

2. 椭圆偏光

两条振动方向互相垂直的同频率直线偏光,在周相不同(周相差 Δ 不为 0 或 $n\pi, n=1,2,3, \dots$)的情况下,若二者振幅不同,合成光波必然形成种种椭圆偏光[图 2-1-3(b)、(c)、(d)、(f)、(g)、(h)、(j)]。

3. 圆偏光

两条振动方向互相垂直的同频率直线偏光,在周相不同(周相差 Δ 不为 0 或 $n\pi, n=1,3,5, \dots$)、振幅相同的情况下,合成光波将形成圆偏光。

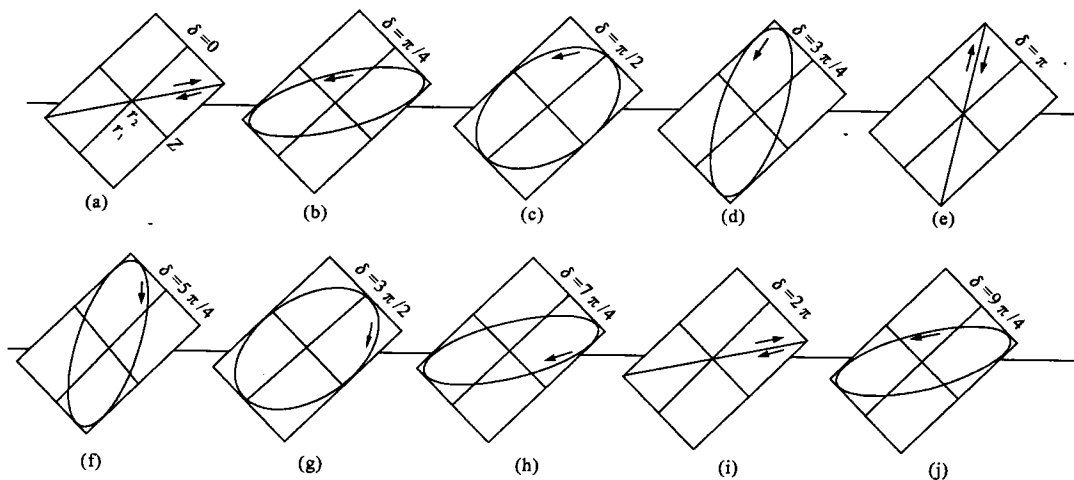


图 2-1-3 同频率、不同周相及振幅的两个相互垂直之振动的合成示意图

实际上,直线偏光和圆偏光都是椭圆偏光的特例。直线偏光相当于椭圆短轴趋近于0,当椭圆短轴增大到与长轴相等时则形成圆偏光。

4. 直线偏光、椭圆偏光和圆偏光的检测

置检偏镜于光路中,如果是直线偏光,检偏镜转动一周出现两次消光;如果是椭圆偏光,检偏镜转动一周可看到两次较明、两次较暗,且不出现全消光;如果是圆偏光,检偏镜转动一周无明显变化。

上述自然光、直线偏光、椭圆偏光等,在反光显微镜、矿物物理性质观测等章节中都要用到,要求一定要把概念弄清楚。

五、斜照光外反射光的分解

当自然光以入射角 α 由空气斜射到某一电解质表面时,入射光的一部分折射入电解质内,另一部分则发生反射。反射光将分解为垂直入射面振动的光强($R_{\perp}$)和平行入射面振动的光强($R_{\parallel}$)。实验证明, $R_{\perp}$ 总是大于 $R_{\parallel}$,这样,反射光必然是垂直入射面振动占优势的部分偏振光。入射角 α 增大时,反射光中垂直入射面的光振动所占比例也加大,即反射光偏振程度增加。到某一特殊角 α 时,反射光全部是垂直入射面的光振动,即是纯粹的直线偏光。角 α 叫起偏角或布雷斯特集角。如图2-1-4表示钙铝石榴石反射光中 $R_{\perp}$ 与 $R_{\parallel}$ 曲线。从图中可看出, $R_{\perp} > R_{\parallel}$,反射光为 $R_{\perp}$ 占优势的部分偏振光。至 $\alpha=60^{\circ}$ 时, $R_{\parallel}=0$,反射光全部为 $R_{\perp}$,即为纯粹的偏振光。

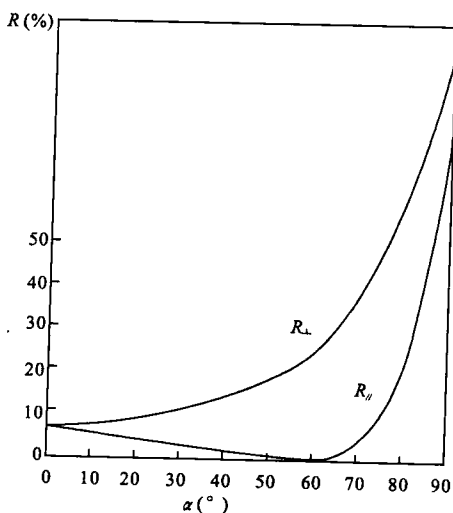


图 2-1-4 钙铝石榴石的反射率曲线

由于上述原因,当光线斜射到透明矿物光面上,产生 $R_{\perp} > R_{\parallel}$,且二者之间不存在周相差,因此合振动的振幅必然偏向 $R_{\perp}$,从而产生反射旋转。此时合成偏光为直线偏光,当偏振器垂直合振动方向时可显示完全的消光。当光线斜射到金属矿物表面,除产生 $R_{\perp} > R_{\parallel}$ 外, $R_{\perp}$ 与 $R_{\parallel}$ 之间还存在不为 $0, \pi/2, \pi$ 的周相差,从而产生椭圆偏光旋转作用。此时当检偏振器垂直椭圆长轴时,显示“不完全的黑暗”。

另外,这种斜照光外反射光的分解产生的 $R_{\perp} > R_{\parallel}$,还影响到反光显微镜的玻片式反射器用自然光照明时的光线变化。反光显微镜的玻片反射器,用自然光照射时,入射角 α 为 45° ,是一种斜射状态,所以从反射器反射出来的光已经不是自然光,而是垂直入射面的分振动($R_{\perp}$)占优势的部分偏振光。因此,在自然光照射条件下,偶尔能见到某些强非均质性矿物的双反射(如辉钼矿、辉锑矿、铜蓝等),其原因就在于此。由于垂直入射面的分振动为左右方向振动,为获取较大的光源强度,反光显微镜的前偏光镜一般都设置为左右向。

六、矿物的吸收性和吸收性矿物

(一)矿物的吸收性

光波照射到矿物表面,会引起价电子的振动和跃迁,消耗了入射光的部分能量,从而使透射光线或反射光线的强度比入射光强度小,这一物理现象叫做矿物对光的吸收。

兰伯特(J. H. Lambert)论证:光射入吸收性矿物后,其振幅随透入深度的增大而逐渐减小。也就是说,光波进入矿物其强度逐渐衰减的现象称为矿物的吸收性。吸收性强弱可以用吸收系数(K)表示,吸收系数 K 越大,矿物的吸收性越强(图 2-1-5)。

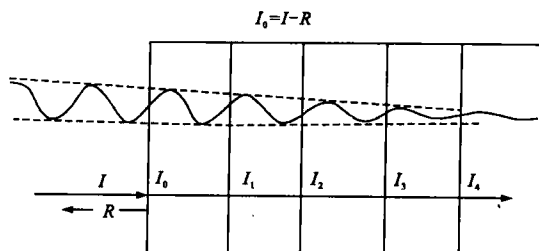


图 2-1-5 矿物对光波的吸收示意图

图 2-1-5 上半部分表示光波进入矿物后振幅逐渐衰减的情况,下半部分表示光波进入矿物不同深度后的不同光强。透过矿物 X 距离后的光强 I_X 与刚进入矿物时($X=0$)的光强 I_0 的关系为:

$$I_X = I_0 e^{-\frac{4\pi K X}{\lambda_0}} \quad (2-1-1)$$

式中: e 为自然对数的底, $e=2.718\ 29\dots$; π 为圆周率, $\pi=3.141\ 5\dots$; K 为吸收系数; λ_0 为光波透入矿物一个真空波长中距离。

当透过矿物的距离 $X=\lambda_0$ 时,(2-1-1)式就变为:

$$I_X = I_0 \cdot e^{-4\pi K} \quad (2-1-2)$$

(2-1-2)式表示光波透入矿物的距离为一个真空波长(λ_0)时,光强降为原值的 $1/4\pi K$ 。这说明 K 值越大,光波衰减得越快,光强降低得越多,矿物的吸收性越强。反之,矿物的 K 值越小,光波衰减得越慢,光强降低得越小,矿物的吸收性越弱。

(二)吸收性矿物

能使光波自由透过的矿物叫透明矿物。严格地讲,自然界没有一种矿物是严格透明的,只要它有足够的厚度,光波透过后总有些光能损失。所谓吸收性矿物,是指那些对入射光吸收相当强烈的矿物(一般指金属矿物)。

矿物的透明度与吸收系数(K)关系密切。邵洁涟等(1974)根据矿物吸收系数(K)把矿物分为透明矿物($K<0.025$)、半透明矿物($0.73>K>0.025$)和不透明矿物($K>0.73$)。不透明矿物和半透明矿物又统称为吸收性矿物。

实际应用时,把矿物磨制成 0.03mm 厚的薄片仍然不透光就称为不透明矿物。显然,它们不能像透明矿物那样制成薄片在透射光(偏光显微镜)下观察,而只能制成光片在反射光(反光显微镜)下研究了。

第二节 反光显微镜

反光显微镜是进行矿石学研究的重要工具,虽然现今有很多的新方法、新仪器被用于矿石研究中,但作为最基本的工具,反光显微镜的作用无可替代。除了满足常规的矿石研究外,它可为其他的研究方法提供可靠的资料,是其他研究方法的基础。

反光显微镜的结构主要由机械系统、光学系统、光源系统三部分组成。机械系统包括镜座、镜臂、镜筒、载物台和升降螺旋。光学系统由物镜、目镜、垂直照明系统组成。反光显微镜与偏光显微镜的机械系统构成一样,现今各厂家生产的偏光、反光显微镜有统一的机械系统,更有偏反光两用显微镜是共体显微镜,二者只有一套机械系统。因此,有关机械系统的结构,本书不再赘述,这里只着重介绍反光显微镜的光学系统和光源系统。

一、反光显微镜的光学系统

反光显微镜的光学系统由物镜、目镜、垂直照明系统和上偏光镜四部分组成。

(一)物镜(接物镜)

物镜是由复杂透镜组成的光学放大系统,其作用是将微小物体造成一个放大实像,人眼则通过目镜来观察这个实像。物镜具有放大能力和分辨本领(分辨率)两种基本特性。一般将放大数倍的物镜称为低倍物镜,放大十倍左右为中倍物镜,放大数十倍的为高倍物镜。物镜分辨物像细微结构的能力为分辨率,通常以分辨物像的实际距离 L (分开两个点或两条平行线的最短距离)来表示:

$$L = 0.61 \frac{\lambda}{n \cdot \sin \delta} = 0.61 \frac{\lambda}{A \cdot N} \quad (2-2-1)$$

式中: L 为物镜的分辨率; n 为物镜前透镜与矿石光片之间介质(空气、油、水)的折射率; λ 为观察时所用的光线之波长(用白光观察时可用人眼最敏感的 550nm 黄绿色光来代表); δ 为物镜的半孔径角; $A \cdot N$ 为物镜的“数值孔径”。

如图 2-2-1(a)所示和上式可知,物镜的分辨率主要与“数值孔径”有关(λ 为相当固定的因素),而 $A \cdot N$ 又与介质的折射率 n 及物镜的半孔径角 δ 有关。因而在油浸时观察($n=1.515$)比干镜头($n=1$)观察物镜的分辨本领大(即分辨率大,可看出细微结构)。半孔径角 δ 越大物镜的分辨本领也越大, δ 理论值最大为 90° ,但实际只能达到 72° ,故干镜头的最大“数值孔径”为 $\sin 72^\circ (0.95)$,即物镜前透镜与矿石光片之间的距离(自由工作距离)不能为 0,实际上最小为 0.1mm。

物镜可以分为干燥物镜和浸没物镜两大类。干燥物镜在使用时,物镜与光片之间为空气($n=1.00$);浸没物镜使用时,物镜与光片之间充满浸没液体,如最常用的液体为香柏油($n=1.515$),浸没物镜也常叫油浸物镜。

如图 2-2-1(b)所示,自透镜中央附近透过所成的像(O_1)和自透镜边缘透过所成的像(O_2)不能重合,这就构成“球面像差”。如图 2-2-1(c)所示,白光中不同光波透过透镜时会

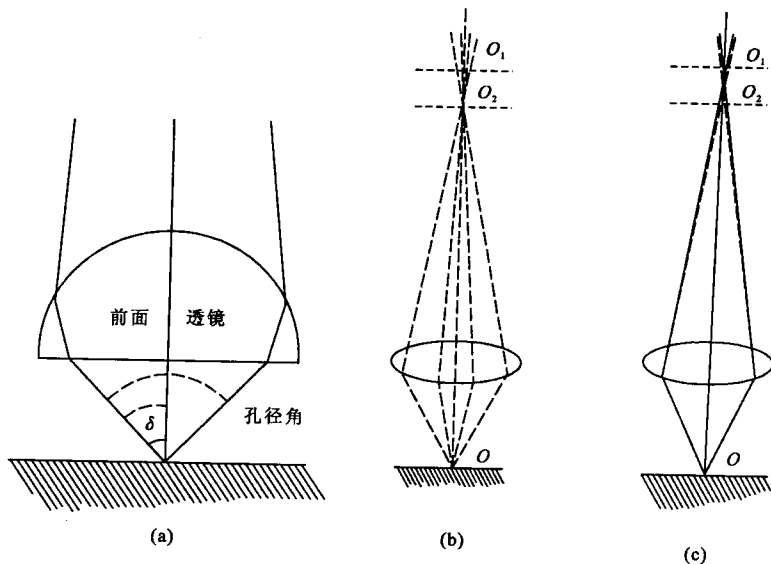


图 2-2-1 物镜孔径角(2δ)、球面像差和色差示意图