



教育部高等学校地矿学科教学指导委员会
地质工程专业规划教材

JIAOYUBUGAODENGXUEXIAODIKUANGXUEKE
JIAOXUEZHIDAOWEIYUANHUI
DIZHIGONGCHENGZHUANYE GUIHUAJIAOCAI



矿相学

主 编 张术根
副主编 胡 斌



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

P616
ZSG

矿相学

主 编 张术根
副主编 胡 斌



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

矿相学/张术根主编. —长沙:中南大学出版社,2014. 11

ISBN 978 - 7 - 5487 - 1209 - 1

I. 矿... II. 张... III. 矿物相 IV. P616

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 249419 号

矿相学

张术根 主编

责任编辑 刘石年

责任印制 易建国

出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

印 装 长沙印通印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 18 字数 444 千字

版 次 2014 年 11 月第 1 版 2014 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 1209 - 1

定 价 50.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

中南大学出版社
WWW.CSNU.PRESS.CN



前 言

.....

自 20 世纪 90 年代开始,我国实行了多次专业调整和教学改革,尤其是地质类工科专业的设置,已经发生了很大的变化,专业覆盖面显著拓宽,专业综合性更强,专业课程设置也几经调整,矿相学作为一门独立的地质专业基础课,在部分高等学校的地质类专业被压缩或取消。然而,随着金属矿产资源需求量激增,找矿勘查和开发利用强度及难度急增,在涉及金属矿产勘查评价与开发利用的研究机构、地勘单位及矿产企业,无论从事矿产地质研究,还是从事矿产资源勘查评价或矿物资源加工利用(包括综合利用)的科研生产实践活动,都清楚地表明掌握矿相学的专业知识与技能是非常重要的,因而在地质类专业设置矿相学课程显得越来越有必要。我国高等学校的矿相学教材,主要从 20 世纪 80 年代开始先后出版,这些教材分别适用于 20 世纪 90 年代以前不同的理科、工科地质类专业,其教学大纲要求、学时数以及先修课程基础均与现阶段地质类专业教学要求存在不相适应的问题,也与近 30 年来国内外矿相学的发展进步及应用拓宽存在一定距离。本书根据现阶段地质类专业,尤其是工科专业新的专业特点、教学要求、矿相学学科的发展现状及相关学科领域的应用要求,取原适用于各传统地质类专业矿相学教材的优点,弥补其不足。结合作者近 30 年来的矿产地质科研与教学体会,突出矿相学的矿床成因研究应用和矿石工艺性质研究应用,以金属矿物显微镜鉴定方法、矿物的结构构造和矿物晶粒内部结构的特征及其类型,矿化期、矿化阶段的划分和矿物生成顺序确定的原则方法及标志,以及矿石工艺性质等为重点内容,较系统地阐述矿相学的基本理论、基本知识、基本方法及其综合应用。编写时充分吸收和反映了国内外矿相学研究的新理论、新方法及应用研究成果,能够较好地满足地质类专业、特别是工科专业对该课程的教学要求,也可作为地质科研、地质勘查、选矿、冶金及材料等相关专业科技人员的参考书。

本书由张术根教授主编,胡斌副教授参与编写。张术根教授负责编写第一章、第四章至第十一章,胡斌副教授负责编写第二、三章及第十二章。全书由张术根教授统一修改、定稿。因为编者水平和条件有限,缺点错误在所难免,希望读者批评指正。

本书插图主要由吴双、刘炫、胡杰等清绘,图版由黄超文、刘贤红、刘纯波等编排,谨致谢忱。本书所引用文献资料都在参考文献中列出,还有其他许多没有引用的前人研究成果也为本书编写创造了良好的学术条件,在此一并致谢!

第一章 绪 论	(1)
第一节 矿相学的概念、研究对象、研究任务及研究意义	(1)
一、矿相学的概念	(1)
二、矿相学的研究对象	(1)
三、矿相学的研究任务	(1)
四、矿相学的研究意义	(1)
第二节 矿相学的课程性质及与其他学科的关系	(6)
第三节 矿相学研究的工作程序	(6)
第四节 矿相学研究现状与发展趋势	(7)
一、矿相学发展简史	(7)
二、矿相学发展现状	(7)
三、矿相学的发展趋势	(8)
第二章 吸收性晶体的基本光学原理	(9)
第一节 光的偏振	(9)
一、自然光	(9)
二、偏振光	(9)
第二节 光的折射与反射	(10)
第三节 吸收性晶体的复数光学指示体	(11)
一、吸收性晶体的基本概念	(11)
二、复数光学指示体	(12)
第三章 矿相显微镜	(15)
第一节 矿相显微镜的结构	(15)
第二节 主要光学部件的性能与作用	(16)
一、垂直照明系统	(16)
二、物镜	(19)
三、目镜	(22)
第三节 矿相显微镜的常见附件	(23)
第四节 矿相显微镜的调节、使用与维护	(25)
一、矿相显微镜的调节	(25)
二、矿相显微镜使用的一般程序	(27)
三、显微镜的保管与维护	(28)
四、矿相显微镜调节校正实例(BA310EPi - POL 透反射偏光显微镜)	(28)
第五节 光片制备	(32)

第四章 矿物的反射率、反射色、双反射、反射多色性	(33)
第一节 矿物的反射率及其观测	(33)
一、反射率的基本概念	(33)
二、反射率的形成机理	(35)
三、反射率的测定方法	(37)
四、反射率的研究意义	(41)
五、反射率测定的影响因素	(41)
第二节 矿物的反射色及其观测	(43)
一、反射色的概念	(43)
二、反射色的分类	(44)
三、反射色的定性观察方法及影响因素	(44)
四、反射色的颜色指数	(45)
五、常见金属矿物的反射色	(51)
第三节 矿物的双反射(率)、反射多色性及其观测	(52)
一、矿物双反射(率)和反射多色性的概念	(52)
二、双反射和反射多色性的形成机理	(53)
三、矿物双反射和反射多色性的观察方法与视测分级	(54)
四、矿物双反射和反射多色性视测的影响因素	(55)
五、非均质矿物反射光性符号确定	(56)
第五章 矿物的均质性、非均质性、偏光色及内反射	(60)
第一节 矿物的均质性、非均质性	(60)
一、均质性、非均质性及相关概念	(60)
二、均质性、非均质性的形成机理	(61)
三、矿物均质性、非均质性的观察方法与视测分级	(63)
四、均质性、非均质性观测的影响因素	(64)
第二节 非均质矿物的偏光色及其观测	(65)
一、非均质矿物的偏光色	(65)
二、偏光色的形成机理	(65)
三、偏光色的观察方法	(66)
四、矿物偏光色观测的影响因素	(67)
第三节 非均质矿物的旋向及相差符号	(68)
一、非均质矿物的旋向	(68)
二、相差符号	(69)
三、非均质矿物旋向及相差符号的矿物鉴定意义	(70)
第四节 矿物内反射及其观测	(70)
一、内反射的概念及形成机理	(70)
二、内反射的观察方法	(71)
三、内反射的视测分级	(73)

四、内反射研究的意义	(74)
第六章 矿物的偏光图	(75)
第一节 偏光图的形成原理	(75)
一、物镜圆内入射角和入射方位角的分布规律	(75)
二、反射(视)旋转角及反射(视)旋转色散	(76)
三、反射(视)旋转效应与非均质(视)旋转效应叠加及综合(视)旋转色散	(77)
第二节 各类矿物的偏光图基本特征	(78)
一、均质矿物的偏光图	(78)
二、非均质矿物的偏光图	(79)
第三节 矿物的旋转色散	(82)
一、矿物的反射旋转色散和反射视旋转色散	(82)
二、非均质矿物的综合旋转色散和综合视旋转色散	(84)
三、非均质矿物的非均质旋转色散和非均质视旋转色散	(85)
四、偏光图中双曲线暗带顶端所表现的椭圆度和椭圆色散	(89)
第四节 各类矿物偏光图的矿物鉴定意义及观测注意事项	(89)
一、快速准确地区分均质矿物和非均质矿物	(90)
二、反射(视)旋转角及反射(视)旋转色散是均质矿物的重要鉴定特征	(90)
三、各种(视)旋转色散等光学性质是非均质矿物的重要鉴定特征	(90)
四、矿物偏光图观测注意事项	(91)
第七章 矿物的显微硬度及其观测	(93)
第一节 矿物硬度的概念及研究意义	(93)
一、矿物硬度的概念及形成机理	(93)
二、矿物硬度的研究意义	(94)
第二节 矿物刻划硬度及其测试	(95)
第三节 矿物抗磨硬度及其测试	(95)
第四节 矿物抗压硬度及其测试	(96)
一、测试原理	(96)
二、测试方法步骤问题	(97)
三、测试注意问题	(98)
四、矿物显微抗压硬度与脆性塑性的关系讨论	(99)
五、矿物显微抗压硬度与摩氏硬度的关系	(100)
第八章 矿物的浸蚀鉴定与结构浸蚀	(101)
第一节 概述	(101)
一、基本概念	(101)
二、浸蚀反应机理	(101)
三、研究意义	(102)
第二节 矿物的浸蚀鉴定方法步骤	(103)

一、浸蚀鉴定的试剂和用具	(103)
二、浸蚀鉴定实际操作步骤及注意事项	(104)
三、浸蚀反应的影响因素	(105)
第三节 矿物的结构浸蚀	(105)
一、结构浸蚀机理	(105)
二、结构浸蚀操作及注意事项	(106)
三、常用的结构浸蚀方法	(106)
四、结构浸蚀方法探索与应用讨论	(106)
第九章 综合性系统鉴定及简易鉴定	(109)
第一节 矿物的综合鉴定	(109)
一、矿物的综合鉴定	(109)
二、金属矿物鉴定表类型简介	(109)
三、金属矿物鉴定表编制原则与要求	(110)
四、金属矿物鉴定表及其使用说明	(111)
第二节 矿物的简易鉴定	(112)
第十章 矿石的构造、结构及矿物晶粒内部结构	(115)
第一节 概述	(115)
一、矿石构造和结构的概念	(115)
二、研究矿石构造和结构的意义	(116)
三、研究矿石构造结构的方法	(117)
第二节 矿石构造	(117)
一、矿石构造的主要形态类型及其特征	(117)
二、矿石构造的主要成因类型	(120)
三、确定矿石构造成因类型的主要标志	(125)
第三节 矿石结构	(126)
一、矿石结构的主要形态类型	(127)
二、矿石结构的主要成因类型	(129)
三、各主要成因类型的矿石结构特征	(130)
四、确定矿石结构成因类型的主要标志	(141)
第四节 矿物的晶粒内部结构	(141)
一、晶粒内部结构研究意义	(141)
二、晶粒内部结构的研究方法	(142)
三、矿物晶粒内部结构的主要类型	(144)
第十一章 矿化期、矿化阶段及矿物的生成顺序	(149)
第一节 矿化期	(149)
一、矿化期的概念	(149)
二、矿化期的确定	(149)

第二节 矿化阶段	(151)
一、矿化阶段的概念	(151)
二、矿化阶段的划分	(151)
三、各成因类型矿床的矿化阶段划分与命名	(154)
第三节 矿物的生成顺序及矿物的世代	(155)
一、矿物生成顺序的概念	(155)
二、矿物生成顺序的确定	(155)
三、矿物的世代	(158)
第四节 矿物生成顺序图表的编制	(160)
一、矿物生成顺序图表	(160)
二、矿物生成顺序图表的形式	(160)
三、编制矿物生成顺序图表的实例	(161)
第十二章 矿石工艺性质研究	(168)
第一节 概述	(168)
第二节 矿石的组成矿物及其含量测定	(169)
一、分离矿物称重法	(169)
二、矿物组成元素分析法	(169)
三、矿物体积含量几何测定法	(170)
第三节 元素的赋存状态及其配分计算	(172)
一、元素在矿石中的赋存状态	(172)
二、元素的配分计算	(174)
第四节 矿物的工艺粒度	(176)
一、矿物工艺粒度的概念	(176)
二、矿物工艺粒度测量	(178)
第五节 矿物的解离性研究	(181)
一、单体与连生体的概念	(181)
二、单体解离度的概念	(182)
三、矿物的嵌布特性	(182)
四、连生矿物的嵌镶关系	(183)
附表	(185)
附表 1: 金属矿物鉴定表索引表	(185)
附表 2: 金属矿物综合鉴定表	(188)
参考文献	(258)
图版	(259)
图版 1: 矿石构造	(259)
图版 2: 矿石结构	(267)
图版 3: 矿物晶体内部结构	(275)

第一章 绪 论

第一节 矿相学的概念、研究对象、研究任务及研究意义

一、矿相学的概念

矿相学(mineragraphy)是以矿相显微镜为基本研究手段研究金属矿石的一门地质科学。其研究领域包括矿石矿物学(ore mineralogy)和矿石学(ore petrology),根据研究内容和任务的不同,可分为成因矿相学和工艺矿相学两个组成部分。

二、矿相学的研究对象

因为组成矿石的金属矿物在标准厚度(0.03 mm)的薄片上不透明,不能像岩石的岩相学研究那样磨制成薄片利用透射偏光观测研究,而只能磨制成表面平整光洁的光片(块),利用反射偏光观测研究,故矿相学的主要研究对象是以不透明矿物为主要组成矿物的金属矿石及其选矿产品。此外,有关冶金废渣、金属材料的物相组成、组织结构等也可视为矿相学的研究对象。

三、矿相学的研究任务

1. 鉴定不透明矿物

以矿相显微镜为基本手段,主要通过研究不透明矿物的光学、物理、化学性质,内部结构及切面形态等特征,必要时结合其他辅助手段,综合鉴定不透明矿物。

2. 获取矿石形成过程和矿床成因信息

以矿相显微镜为基本手段,研究金属矿石的矿物组成、构造、结构,矿物晶粒的切面形状、内部结构,以及它们的时空发育分布规律。结合矿床地质特征,划分出矿化期、矿化阶段及矿物的生成顺序,恢复矿石的形成过程。分析矿床的矿化条件、成矿作用类型与方式,为矿床成因研究和找矿勘探提供依据。

3. 研究评价矿石的加工利用性质

以矿相显微镜为基本手段,考查研究矿石中 useful、有害元素的赋存状态,有用矿物或化学组分的含量,矿物的嵌布粒度、嵌布特性与嵌镶关系,矿物间的“物性差”及解离性等矿石的工艺性质,结合选冶试验,研究评价矿石的加工利用性质,为选择合理的加工利用途径和技术方案提供基础资料。

四、矿相学的研究意义

从矿相学的研究任务可知,除鉴定不透明矿物以外,其突出的研究意义在于可获取矿石

形成过程和矿床成因信息,有效评价矿石的加工工艺性质。

1. 在获取矿石形成过程和矿床成因信息方面的意义

矿床形成经历了漫长而复杂的演化过程,其恢复重构是认识矿床形成条件、成矿机理、矿床成因及成矿规律的主要途径,是矿床学研究的核心任务之一。矿床形成的过程应包括成矿系统从有用矿物堆积以前的地质作用,经过矿床形成阶段,最后到后生阶段。由矿石中矿物结晶颗粒和矿物集合体形态特征构成的矿石结构与构造的特点,是在一定的成矿地质条件和物理化学条件下形成的。因此,矿石的矿物组成、构造、结构特征实际上就是成矿系统的矿物形成过程的客观证据,可据此分析成矿条件及其演化的特点,即不同成因的矿石有着不同的矿物组合、构造及结构。所以矿相学研究矿石的矿物成分和结构构造可以获得许多重要的成矿过程及矿床成因信息,能有效帮助阐明成矿条件、成矿机理、矿床成因及成矿规律。

1) 帮助判断成矿作用类型与成矿作用方式

成矿地质作用类型不同,往往在矿石的矿物组合、构造、结构等方面各具特色。因此,根据矿石的矿物组合、构造及结构特点,可以提供矿床成矿作用类型的有效信息。例如,风化作用形成的矿石,其矿物组合表现为氧化物、氢氧化物组合,结构主要为微细粒结构、胶状、变胶状组构,构造常见蜂窝状、多孔状、葡萄状及土状等构造。热液作用形成的矿石,其矿石结构包括各种晶粒结构、各种交代结构及固溶体分离结构,矿石构造常发育各种脉状构造、晶洞状构造。

矿石形成方式不同,其矿物组合、构造、结构等方面也各具特色。例如,就沉积成矿作用而言,碎屑结构反映其为机械沉积产物,而鲕状、豆状、肾状构造则反映其为胶体沉积产物。就热液成矿作用而言,各种充填脉状构造、晶洞状构造、梳状构造反映其形成方式为充填作用,交代条带状构造、各种交代脉状构造反映其形成方式为交代作用。

2) 帮助分析成矿物理化学条件及其演化规律

矿石形成的物理化学环境必然在其矿物组合、构造、结构及晶体内部结构等方面打上烙印。例如,“假象赤铁矿”、“穆磁铁矿”反映成矿环境的氧化还原条件发生了明显变化;硫化物矿物交代石英形成的交代溶蚀结构说明成矿溶液由酸性转变为碱性。磁黄铁矿分解为黄铁矿表示成矿介质的氧逸度(f_{O_2})增加, S^{2-} 转变为 $[S_2]^{2-}$;磁黄铁矿被白铁矿交代体现含矿溶液硫离子浓度增大。又如,通过对具有出溶结构的斑铜矿(主矿物)—黄铜矿(次矿物)矿石做加温退火试验,以及结合自然界矿石出溶结构的情况考虑,得知 250°C 以下形成稠密而细小的叶片结构和格状结构(由快速冷却、强烈过饱和、扩散速度小所致), $300\sim 375^{\circ}\text{C}$ 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、扩散速度大所致)。再如,部分硫化物矿床发育黄铁矿“三晶嵌联”结构、斑状或似斑状结构,反映其形成后经历了退火重结晶作用;发育黄铁矿“草莓粒状”结构或“显微莓群状”构造,反映其可能是噬硫细菌还原或低温快速结晶的产物。

根据矿石的结构构造特点,有时还能帮助推断矿床形成的深度条件。如深度离地表 $3\sim 5\text{ km}$ 到 $10\sim 15\text{ km}$ 的“深成带”矿床,矿石主要具有结晶作用形成的构造和结构;深度离地表 $1\sim 1.5\text{ km}$ 到 $3\sim 5\text{ km}$ 的“浅成带”矿床则矿石显著发育胶状、变胶状组构。

3) 帮助恢复矿床的成因机制和成矿作用过程

例如福建尤溪丁家山铅锌矿床,在20世纪80年代以前被认为是接触交代型矿床,之后随着“VMS”矿床理论的盛行,部分研究者又认为其属于“VMS”型矿床,称为“华南型块状硫

化物矿床”。然而,矿相学研究表明,作为该矿床结晶最早的金属矿物板条状“假象赤铁矿”、粒状磁铁矿、石英等矿物及其集合体主要沿石榴子石、透辉石、硅灰石、绿帘石、透闪石等硫酸盐矿物集合体粒间及裂隙穿插交代,呈细脉、网脉状,硫化物矿物集合体则明显穿插交代上述矿物集合体。结合矿区地质条件、矿床矿化特征、矿床地球化学及同位素定年研究,重新厘定该矿床为与燕山期花岗岩浆活动有关的接触交代型矿床。除表生期外,矿床的形成经历了矽卡岩期的干矽卡岩阶段、湿矽卡岩阶段、气成氧化物阶段和热液期高温硫化物(一石英)阶段、中温硫化物(一阳起石—石英)阶段和低温硫化物(一蛇纹石—碳酸盐)阶段的复杂成矿过程(张术根等,2012;石得凤等,2012)。又如2007年开始发现并勘查的印度尼西亚北马鲁古省塔里阿布岛(Taliabu)西部铁矿田,矿床产在印支期花岗岩与石炭系变质砂岩、大理岩、白云质大理岩接触带,已经完成详细勘查的3个铁矿床都具有2种矿石类型:其一为含硫中低品位($w_{\text{Fe}} = 45 \times 10^{-2} \sim 25 \times 10^{-2}$)磁铁矿矿石,其二为贫硫高品位($w_{\text{Fe}} \geq 60 \times 10^{-2}$)磁铁矿矿石。前者主要产于花岗岩与大理岩、白云质大理岩接触带外带、紧贴花岗岩与围岩接触界面的大理岩与白云质大理岩、大理岩与变质砂岩层间;矿石的矿物组合除透辉石、金云母、绿帘石、透闪石、阳起石及蛇纹石等矽卡岩特征矿物组合外,磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿、铁闪锌矿等金属矿物也是其常见矿物组合;矿石结构主要为结晶粒状结构、各种交代结构和固溶体分离结构;矿石构造主要为稠密浸染状、浸染状、次块状、团块状、斑杂状及脉状构造。后者主要产在花岗岩与围岩接触界面形态复杂的正接触带、内接触带的云英岩化花岗岩裂隙、紧贴接触界面的变质砂岩层间;矿石的矿物组合除含有极少量的磷灰石、萤石、石英外,主要为磁铁矿,还可见少量沿磁铁矿晶粒边缘及裂隙交代的赤铁矿;矿石结构主要为细粒结晶结构,少量似斑状结构及三晶嵌联结构;矿石构造主要包括致密块状构造、似流纹状构造、气孔状构造以及熔结瘤状构造。从而在矿相学研究的基础上,结合矿田地质条件、矿床矿化特征、矿床地球化学及磁铁矿成因矿物学等研究,厘定出该矿田具有接触交代型和矿浆贯入型2种矿化类型,不仅为该矿田铁矿床找矿空间拓宽提供了重要基础资料,也为该矿田铁矿石开发利用方案的制定提供了有效的地质依据(丁俊,张术根,2012a,2012b)。

4) 帮助评价深部矿石质量和矿床远景

例如镍黄铁矿(Pn)、磁黄铁矿(Po)、黄铜矿(Cp)矿石在风化时其中镍黄铁矿被紫硫镍矿(V)交代,即发生“紫硫镍矿”化作用,此时释放出Fe和Ni。Fe主要呈 FeCO_3 沉淀,镍离子(Ni^{2+})与周围的磁黄铁矿(Po)反应形成新生的 V_{Po} (V_{Po} 呈羽毛状假象反应边,不规则地占据着相毗邻的Po颗粒边缘周围的底面裂开面)。 V_{Po} 的数量受Pn被 V_{Po} 交代期间释放出来的Ni的数量控制,即 V_{Pn} 与 V_{Po} 的比例可成为衡量原生矿石中Pn与Po比例的尺度。故羽状边缘(V_{Po})肥大,表明它是由富含Pn的镍矿富矿石变来,而羽状边缘(V_{Po})细小,则表明是由贫Pn的贫镍矿石变来。因而这种“边缘羽状结构”对于评价深部原生镍矿石的贫富具有重要的实际意义。

5) 帮助确定找矿方向

闪锌矿中FeS分子的含量比例通常与其形成温度高低呈正相关关系,而闪锌矿中出溶物磁黄铁矿和黄铜矿的数量大小又与闪锌矿中FeS分子的含量高低直接相关。因此,可以根据在矿相显微镜下观察和测定闪锌矿中磁黄铁矿和黄铜矿的数量(用图像分析仪定量精确测定)推测闪锌矿的形成温度条件以及矿床成因类型。例如,有研究成果表明,矽卡岩型铜矿床闪锌矿中FeS分子含量最高(平均为18.9%,最高可达21.4%),云英岩型花岗岩中浸染状

铜钨矿床中闪锌矿中的 FeS 分子含量次高(平均为 17.6%, 最高达 19.6%), 石英脉型铜锡矿床中闪锌矿中的 FeS 分子含量较低(平均为 16.9%), 石英脉型铜钨矿床中闪锌矿中的 FeS 分子含量更低(平均为 14.4%)。我国河南灵宝某多金属硫铁矿矿床在成因上存在着矽卡岩型与斑岩型矿床的争议, 涉及在该区的找矿主要目标是寻找矽卡岩型铁、铜等矿床还是寻找斑岩型钼、钨等矿床这一重大找矿方向问题。前面已经说明, 典型矽卡岩型矿床中产出的闪锌矿都属于高温型深色铁闪锌矿, 具有固溶体分离作用形成的大量黄铜矿或磁黄铁矿叶片或乳浊体。而该矿床闪锌矿却显深棕褐色, 在绝大部分光片中未见有上述黄铜矿或磁黄铁矿的固溶体分离物。经研究该矿床闪锌矿含 FeS 分子约为 5.6%, 其形成温度约为 210.4℃, 与斑岩型中温热液的形成条件相近, 而与典型矽卡岩型高温形成环境不符(徐国风, 1987)。

同样, 前述丁家山铅锌矿无论是作为矽卡岩型矿床还是作为“华南型块状硫化物矿床”, 其找矿前提或找矿方向都是迥然不同的。

显然, 由上述几个简单的实例可以看出, 矿相学研究可以帮助查明矿石的矿物组成、结构、构造等特征, 为重建矿床成矿过程, 探讨成矿作用类型与方式、查明成矿物理化学条件(物种类型、温度、压力、酸碱度、氧逸度、硫逸度、氧-还原电位等)、矿化分带性, 矿化强度的变化以及成矿作用时空规律等矿床成因提供重要的基础资料, 为地质找矿勘探及成矿预测工作提供理论依据和实际线索。

2. 在矿石加工工艺性质评价方面的意义

在矿石加工工艺性质评价方面, 矿相学研究更是不可缺少的重要基础性工作。

1) 帮助查定矿石的可利用性

例如我国南方产于泥盆系的“宁乡式”铁矿, 为胶体沉积成因的鲕状赤铁矿矿床。其中有许多矿床的矿石品位达到了工业要求, 曾经有些小型矿床未经详细勘查和矿石质量评价研究就盲目开采, 高品位铁矿石直接送钢铁厂, 然而钢铁厂化验结果总是杂质超标、特别是 SiO_2 含量严重超标, 无法利用。实际上这类铁矿床的矿相学研究表明, 部分“宁乡式”铁矿区的铁矿石中, SiO_2 主要以粉砂级石英碎屑构成赤铁矿鲕核和以偏胶态富集于部分圈层, 无法通过选矿去除, 因而在当前选冶技术条件下没有可利用性, 成为“呆矿”。又如我国某铁矿, 矿石品位已达工业要求, 但勘探过程中对铁的赋存状态没有查清, 全铁中有很大一部分是硅酸铁矿, 以致建矿建炉后炼不出铁。对比之下, 我国江苏某赋存于闪长玢岩体内的热液交代型铁矿床, 矿石全铁量 w_{Fe} 虽仅约为 20%, 其中还有百分之几的硅酸铁, 但通过矿相等研究后提出了合理的选矿流程方案, 矿山选矿效果良好。该矿床主要铁矿物为磁铁矿(占 82%), 矿石主要为浸染状、细脉浸染状、角砾状构造等。有用矿物磁铁矿结晶完好, 常呈自形到半自形晶粒。粒度一般为 0.2~1 mm, 大的可达 3~4 mm。它在矿石中属中-细粒均匀嵌布, 与脉石矿物(长石、辉石、角闪石、方解石、绿泥石等)的连接关系简单, 多为规则毗连连接。由于磁铁矿粒度较大, 嵌布均匀, 连接关系规则而平直, 磨矿细度到 0.2 mm(即-200 目的占 60%~65%)时磁铁矿已基本解离。矿山采用单一磁选法就达到较好的选矿指标(精矿品位 60%, 回收率 75%~78%)。

2) 帮助选定矿石工艺加工流程

国内外微细浸染型金矿, 自然金粒径多为微米级或更细的“次显微金”, 绝大多数产在细粒黄铁矿中呈“次显微状机械混入物”。由于黄铁矿均质致密且无解理, 受应力破碎时裂开面的位置是任意的, 同时金颗粒粒度太细, 磨矿造成的黄铁矿裂开面通过自然金次显微颗粒的

概率极小,即不能通过碎矿分选的办法直接富集自然金,而只能先分选出含金黄铁矿后再通过冶炼制酸脱硫于剩渣中用混汞法或氰化法回收金。

又如广东莲花山钨矿床,精选钨矿后的硫化物尾矿含钴, w_{Co} 达 0.3%, 储量亦较大。用常规的“焙烧—酸浸炼钴法”没有成功。原因就在于钴不是赋存在黄铁矿中,而是呈独立的斜方砷钴矿和方钴矿与毒砂紧密连生。这在焙烧时会产生剧毒的 As_2O_3 , 严重污染环境,造成公害。后根据矿石物质组成特点采取无毒害的“细菌(氧化铁硫杆菌)浸钴新工艺”获得成功。钴的浸出率为 86.7%, 总回收率为 67.56%, 同时还回收了副产品硫酸镍和硫酸钠, 避免了环境污染(徐国风, 1987)。

3) 帮助确定矿石的伴(共)生有益元素的选冶回收利用价值

前述印度尼西亚北马鲁古省塔里阿布铁矿田的 II 号矿床, 详查阶段取样化验结果表明, 其磁铁矿矿石 Sn 含量 w_{Sn} 在 0.2% ~ 0.5%、0.5% ~ 1.0% 及 > 1.00% 的样品比例分别占 14.8%、22.2% 及 18.5%, 锡含量在 w_{Sn} 0.5% 以上的样品占样品总数的比例为 40.7%, 而锡含量在 0.2% 以上者占样品总数的比例高达 55.5%。显然, 单纯从矿石的锡含量来看, 该矿田铁矿床的锡具有较高的综合利用价值, 甚至达到独立锡矿床的品位指标要求。然而, 以矿相显微镜为基本手段, 结合扫描电子显微镜及 X 射线衍射分析及化学物相分析, 发现其主要以黑砷锡铁矿、砷钙锡矿形式存在, 在浅表风化带还出现水镁锡矿, 它们的锡分配量约占总锡量的 50%, 其次为磁铁矿结合锡, 其占锡的总分配量约 30%, 锡石中的锡占锡的总分配量约 15%, 尚有占总锡量的 5% 为硅酸盐结合锡(主要载于矽卡岩矿物石榴子石中)。磨矿试验产品的锡分配率测算结果表明, 200 目以上粒级碎矿产品的锡占有率达 92%。因为受目前选矿技术条件约束, 锡石是唯一可选矿回收利用的锡矿物, 故该矿床的磁铁矿矿石伴(共)生锡不具有明显的选矿回收利用价值(张术根等, 2012)。类似的情况在我国南方许多接触交代型含锡矿床的含锡矽卡岩型矿石中也有报道。

4) 帮助确定矿石综合利用方案

确定矿石综合利用方案离不开对矿石进行矿相学研究的基础资料。例如, 江苏吴庄铁矿为接触交代—热液型矿床。全区矿石平均 w_{Fe} 48.56%、 w_{Co} 0.021%、 w_S 1.87%, 磁铁矿的铁占 92.55%、赤铁矿的铁占 2.99%、菱铁矿的铁占 0.86%、黄铁矿的铁占 1.47%、硅酸铁的铁占 0.13%。钴为类质同象混入物赋存于黄铁矿(w_{Co} 0.534%)中, 未见独立钴矿物。黄铁矿主要为半自形—他形晶粒, 粒径多为 0.05 ~ 0.1 mm, 大的达 1 ~ 2 mm。由此可知, 该矿床应以铁为主, 硫作为杂质被除去并附带回收, 钴则随硫富集进入黄铁矿精矿。由于嵌布粒度较细和连接关系较复杂, 磨矿细度要求 -200 目占 80% 以保证铁精矿有较好的质量(w_{Fe} 65.1%)和回收率(91.39%)。采用先磁选再浮选的选矿工艺流程最终获得一级品钴—硫精矿(w_{Co} 0.516%、钴回收率为 76.56%, 含硫 47.68%、硫回收率为 84.92%), 相当于增加了一个中型钴矿床和一个中小型硫铁矿矿床(徐国风, 1987)。

由上述几个实例可知, 对一个矿床进行工业评价, 仅仅知道矿石品位、储量、矿体形态、产状和一般物质组成是不够的, 还应该对矿石的工艺性质进行研究。不论是在地质评价阶段进行矿石可选性试验, 还是为矿山提供选厂设计, 都要求查明矿石的化学成分和矿物成分及其含量、矿石的构造和结构、有用矿物嵌布特性和粒度以及连接关系、有益有害元素赋存状态等方面的特点, 以选择最经济有效的选冶方法, 确定最佳的磨矿细度及最合理的工艺流程, 尽可能地综合利用回收各种有用组分。这些工作大都与矿相学研究密切相关, 充分体现

了矿相学在指导矿石加工利用方面的重要实用意义。

第二节 矿相学的课程性质及与其他学科的关系

从研究对象和研究任务不难看出,矿相学主要服务于矿床学、成矿预测学、矿产资源勘查评价、矿石加工工艺学及矿物学的研究,因而它是地质类专业、特别是工科专业(如矿产普查与勘探专业)的一门重要的应用型专业基础课。

矿相学既作为上述学科的补充与延续直接服务于上述学科,又必须充分利用这些学科的有关理论知识、研究方法及研究成果,根据这些学科研究的丰富资料、理论及方法的最新成果对矿相学提出的新要求和新命题,丰富和发展矿相学的学科理论、研究内容、研究方法与研究手段。除与上述学科具有密切的联系之外,矿相学还与某些学科有着紧密的联系。矿相学必须充分利用数学、物理学(尤其是光学及其他谱学)、化学等学科的基本理论、知识与方法,必须充分利用结晶学、矿物学、晶体光学、岩石学、地球化学等学科的基本理论、专门知识、实验技术及研究成果,并不断引进各种新的技术方法和测试装备,以促进其学科发展。此外,矿相学研究者还应学习矿石加工工艺学、冶金工艺学的基本知识,以便更好地为确定矿石加工技术流程、提高矿物资源综合利用率及降低加工成本服务。

第三节 矿相学研究的工作程序

矿相学研究的一般工作程序可分为以下4个阶段。

1. 野外研究阶段

首先收集研究已有地质资料,了解区域成矿地质背景、矿区地质特征、矿体地质特征、赋矿围岩及其蚀变等。在此基础上,开展现场地质调查,选择有代表性的矿化露头。探槽、坑道、钻孔进行地质观测与编录,同时采集供室内研究用的矿石及岩石标本。采集的原则是:(1)各矿体或至少是重要矿体需有代表性的标本,所采集标本需有准确的采样位置与样品地质特征描述、相片或素描;(2)所采集的矿石标本能充分反映各矿石类型、矿物共生组合、典型结构构造的特征,还必须有重要围岩标本;(3)所采集的矿石和重要围岩标本能充分反映矿床的矿化特征及物质成分的空间变化。

2. 室内研究阶段

主要任务是在野外观察描述的基础上,进行显微镜下的矿物鉴定及观测研究。根据研究任务要求,必要时还需采用其他专业的研究手段,如X射线衍射分析、电子显微镜分析、电子探针分析、化学物相分析、单矿物化学分析、红外吸收光谱分析、X荧光光谱分析、图像分析仪测定等,进行深入、细致的研究。

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为了在野外观察的基础上更精确地研究矿石(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(矿石的组构、矿物粒度和含量、矿物晶粒内部结构等)。

3. 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,编写矿相学研究报告书。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)矿石的结构特征及矿化期、矿化阶段、矿物生成顺序、矿物世代等的研究成果；(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、嵌联关系等。最后在分析实际资料的基础上提出矿床成因认识及找矿评价、矿石技术加工方案的建议。

4. 检查审核阶段

这个阶段的工作十分重要，是保证矿相学研究成果质量和应用效果的重要环节，不能忽视或草率对待。矿相学研究报告书的检查审核，视研究任务来源不同，由项目的上级主管部门或委托方组织完成，其任务是对所提交的矿相学研究报告书及其辅助材料进行讨论、审查、评议。通常的做法是，先对各种原始资料进行复核审查，检查矿相学观测记录与光(薄)片及标本是否相符，光(薄)片的观测鉴定是否准确可靠，各种研究资料(包括野外阶段至室内综合研究阶段)是否完整等。然后，审查所采用的研究方法，野外地质现象与室内研究的联系程度、研究结论是否正确可靠，依据是否充分，研究成果的质量水平等。如果检查审核发现问题、错误及遗漏之处，则应根据检查审核意见进行补充、修改，甚至重做，直至合格。

第四节 矿相学研究现状与发展趋势

一、矿相学发展简史

矿相学诞生于20世纪早期，是一门相对比较年轻的学科，是在矿物学、矿床学、金相学的基础上发展起来的。20世纪初，国外部分学者开始将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，标志着矿相学开始孕育，经 H. Schneiderhohn, M. Berek, A. Г. Бетехин, J. Orcel, R. W. Van der Veen, P. Ramdohr, E. S. Bastin, G. M. Schwartz, N. C. ВопЫнский, M. N. Short, A. B. Edwards 等学者致力于不透明矿物晶体光学、显微镜下鉴定方法以及矿石组构等方面的研究，到20世纪50年代，矿相学已初步形成学科，但其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。20世纪60年代开始，R. Galopin, N. F. M. Henry, W. Uytendogaardt, P. Ramdohr, S. H. U. Bowie, E. Stumpf, Л. Н. Вяпгсов, Н. Piller, C. A. Юшко, М. С. Безсмертная, Т. Н. Чвилева, E. N. Cameron, A. F. Hallimond, R. L. Stanton, J. R. Craig, A. Criddle, L. J. Cabri, B. Cervelle, A. Sugarki 等研究者对矿相学的光学定量理论、显微镜下近代鉴定法、矿物共生组合、矿石组构研究进行了比较系统的探讨和总结，我国矿相学家陈正、张志雄等在矿物反射色颜色指数、旋转性定量理论与新测定方法、矿石结构构造、矿石工艺性质研究等方面为解决矿相学实际应用问题和探索矿相学领域中的某些理论问题做出了显著的成绩，矿相学在理论基础、显微镜质量性能、研究方法及应用方面逐渐发展成为较成熟的学科。

二、矿相学发展现状

矿相学从20世纪60年代开始逐渐成为地质类专业的应用型专业基础课，发展到当今，不仅其基础理论逐渐充实完善，研究方法也逐渐从定性研究走向定量研究，应用领域也逐渐深化与拓宽。在研究手段上，作为基本研究手段的矿相显微镜其精密度、观测功能、功能性

附件数量、观测精度、清晰度、操作便利性及自动化程度都显著提高,而且辅助研究手段也不断丰富,如电子显微镜、电子探针、微区 X 射线衍射分析、激光光谱、拉曼光谱等一系列辅助手段在矿相学研究领域得到了应用并发挥着越来越重要的作用,使矿相学向微粒、微区、快速、定量方向发展。尤其是多功能集成化自动化研究装备的开发应用,使矿相学研究更简便化,定量化和自动化程度显著提高,研究成果的准确性和实用性也显著提高。2001 年,澳大利亚工业研究组织(CSIRO)发明的扫描电子显微镜矿物定量分析研究系统(QEMSCAN)开始在矿相学研究领域进行商业化应用,在 QEMSCAN 基础上,澳大利亚昆士兰大学又自主研发了工艺矿相学参数自动定量分析系统 MLA(Mineral Liberation Analyzer),类似的装备在其他发达国家也陆续问世。这些现代化装备,能使矿石的矿物组成、结构、构造、元素赋存状态、矿物粒度统计、嵌布特征、嵌镶关系、目标矿物解离性等矿相学研究内容全部在一套装置上完成,甚至在数据处理完成后系统将自动生成完整的研究报告。随着资源、环境问题的日益突出和材料科学革命,矿相学的研究领域不再局限于金属矿石及其选矿产品,选矿尾砂、冶金、化工等固体废渣的矿相学研究成果也已经开始成为无害化处理与综合利用的重要基础资料。另外在金属材料、复合材料的晶相组成、组织结构等研究方面也常借鉴矿相学的研究方法。

三、矿相学的发展趋势

毫无疑问,无论在矿床学、成矿预测学、矿产资源勘查评价方面或矿石加工工艺学、矿物学研究方面,甚至在固体废渣的资源-环境特性评价及新材料研究方面,矿相显微镜作为基本研究手段仍然不失其应有地位与作用,但其精密度、观测功能、观测精度、清晰度、操作便利性及自动化程度的提高与改进依然需要人们不懈的努力。多功能集成化自动化研究装备作为辅助手段将在矿相学研究中广泛应用,越来越发挥其强大功能,而经济性和轻便化也是其努力改进的方向。

随着矿产资源需求量的增长和成矿理论的创新及找矿技术方法的进步对矿相学的要求也在提高,难度增大,任务更艰巨。反映在以下 3 个方面:①新成矿带、新类型矿床(包括非传统矿床)逐渐被发现和勘探开发,在获取矿石形成过程和矿床成因信息方面的需求;②随着矿产资源需求量增长和矿石加工工艺的进步,难处理的复杂矿物资源越来越多,作为矿相学的传统研究任务,矿石加工工艺性质研究要求越来越高。③随着资源-环境问题的日益突出和材料革命的不断推进,矿相学研究向固体废渣及新材料研究应用拓展深化并发挥越来越重要的作用,无疑也是必然趋势。总体来看,将矿相学研究与现代成矿理论、成矿实验研究以及各种现代选冶方法相结合,与固体废渣综合利用和环境治理的理论及方法相结合,与新材料理论及研制相结合,是未来矿相学研究的发展方向,测试仪器精密化、集成化、轻便化、自动化是未来矿相学研究手段的发展方向,将量子化学、固体物理学最新研究成果引进矿相学领域是矿相学理论创新的不可忽视的发展趋势。矿相学作为成长中的年轻学科,必然要为地质找矿、矿石加工工艺、固体废渣处置以及新材料研制等方面作出更大的贡献。