

高等教育“十三五”规划教材



金属矿与非金属矿 加工技术

任瑞晨 张开永 主编

Jinshukuang Yu Feijinshukuang
Jiagong Jishu

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

教材

金属矿与非金属矿加工技术

主 编	任瑞晨	张开永
副主编	张玉德	徐敬尧
	李彩霞	夏邦权

中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

金属矿与非金属矿加工技术/任瑞晨,张开永主编. —徐州:

中国矿业大学出版社, 2018. 3

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3517 - 6

I. ①金… II. ①任…②张… III. ①金属矿物—加工②非金属矿物—加工 IV. ①TD95②TD97

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 083325 号

书 名 金属矿与非金属矿加工技术

主 编 任瑞晨 张开永

责任编辑 褚建萍

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885376 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 18.75 字数 470 千字

版次印次 2018 年 3 月第 1 版 2018 年 3 月第 1 次印刷

定 价 35.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

矿物加工工程专业发展的大趋势在于：“继承、集成、创新和发展选煤、选矿和非金属矿加工利用技术，开展矿山固体废弃物与尾矿的综合开发利用”。为了改善本专业领域师生和工程技术人员知识结构，适应国民经济发展需要，促进学生就业，本书在综合现有矿物加工工程专业教材的基础上，以工艺矿物学概要为基础，主要对金属矿和非金属矿的分选加工进行了介绍，具有以下几方面的特点：

(1) 概要介绍了金属矿与非金属矿的分选与利用方面相关基础知识。本书对主要的金属矿和非金属矿分选的基本术语、方法、工艺等进行了归纳整理，用通俗易懂的方式编写，便于读者学习和理解。

(2) 凝炼了主要金属矿和非金属矿分选技术，如金矿、铜矿、铁矿、石墨等，同时融入最新的研究成果和技术，既介绍了主要的金属矿与非金属矿分选技术，又注意把握最新科研动态。

(3) 拓宽学生的知识领域和就业渠道。随着科学技术和国民经济的发展，以及矿业产业结构调整，矿物加工企业去产能化和供给侧改革等政策的出台，单一领域学习矿物加工知识，尤其是传统的选煤、选矿和非金属矿加工技术，已经不能适应新形势发展的需要，学生接触的知识面窄，难以形成完备的矿物加工与利用的知识结构体系，因而，就业不乐观，特别是选煤专业学生。在这种情况下，通过对金属矿与非金属矿分选加工基本知识的学习，既可以扩大知识面，也可以对就业有一定帮助，也是矿业类高等院校教学改革的发展趋势。

本书以工艺矿物学概要及其最新发展状况为开篇，这是矿物加工与利用工艺、工程技术的基础，由安徽理工大学徐敬尧等编写；第二篇主要介绍金属矿加工技术，由华北科技学院张开永负责编写（其中第一章金属矿概述由石常省编写）；第三篇概要介绍非金属矿加工工艺技术，由河南理工大学张玉德负责编写；辽宁工程技术大学李彩霞负责全书篇章结构等布局审校，由任瑞晨统一审定。

本书可作为高等学校矿物加工工程专业本科生、研究生的专业教学参考书，也可作为企业职工培训教材，对地质、冶金、化工、材料等相关技术领域的科研人员和工程技术人员具有参考价值。

本书在编写过程中参考了大量的著作、期刊、研究报告和网上等相关技术资料，在此一并表示感谢。本书是选煤专业师生扩展知识领域方面的一次尝试，由于编者水平有限，书中难免会有不妥之处，敬请读者批评指正，以便于进一步修订。

编 者

2017年3月

目 录

第一篇 工艺矿物学

第一章 工艺矿物学概要.....	3
第一节 工艺矿物学的发展概况及其地位与作用.....	3
第二节 工艺矿物学研究的内容.....	4
第三节 国内外工艺矿物学进展及发展趋势.....	7
第二章 矿物的工艺学性质研究	11
第一节 矿石矿物组成	11
第二节 矿石中元素赋存状态	16
第三节 矿物嵌布特征	18
第四节 矿物的解离与连生	20
第五节 矿物的工艺光学性质	21
第六节 矿物的其他工艺学性质	25
第三章 工艺矿物学研究、鉴定与分析测试方法.....	27
第一节 矿物光学显微镜分析检测	27
第二节 矿物的衍射分析	29
第三节 矿物的电子显微分析	30
第四节 矿物光谱、电子能谱分析.....	38
第五节 矿物的其他测试分析方法	42
第四章 矿物加工学中工艺矿物学应用概要	48
第一节 总论	48
第二节 矿石分选前的准备作业	50
第三节 工艺矿物学在重力选矿中的应用概要	57
第四节 工艺矿物学在磁电选矿中的应用概要	62
第五节 工艺矿物学在浮游选矿中的应用概要	71

第二篇 金属矿加工工艺技术

第五章 金属矿概述	83
第一节 金属矿加工技术的重要意义	83
第二节 金属矿分类	84
第三节 金属矿加工技术	85

第四节 中国主要金属矿产分布简介	85
第六章 金属矿加工工艺和主要设备	87
第一节 破碎筛分	87
第二节 磨矿分级	90
第三节 重选	92
第四节 磁选、电选	94
第五节 浮选	96
第六节 化学选矿	106
第七章 主要金属矿加工方法	113
第一节 贵金属(金)的分选技术	113
第二节 有色金属(Cu、Pb、Zn)分选技术	123
第三节 黑色金属(Fe)的分选技术	163
第四节 稀有金属的分选技术	178

第三篇 非金属矿加工工艺技术

第八章 非金属矿概述	197
第一节 非金属矿加工利用技术的重要意义	197
第二节 非金属矿物的分类	198
第三节 非金属矿加工技术	200
第九章 非金属矿加工工艺和主要设备	205
第一节 选矿提纯	205
第二节 颗粒形态处理	206
第三节 超细粉碎与微纳米材料制备	212
第四节 物理改性技术	216
第五节 化学改性技术	227
第六节 热加工技术	241
第十章 主要非金属矿物及其加工利用	248
第一节 单质非金属	248
第二节 主要硅酸盐矿物	258
第三节 主要硫酸盐矿物	273
第四节 主要碳酸盐矿物	277
第五节 主要天然复合非金属矿物	283
参考文献	288

第一篇 工艺矿物学

第一章 工艺矿物学概要

◇ 本章提要

工艺矿物学是矿物学的一个分支。它是一门以研究矿物处理和矿物原料加工过程为主要内容的学科。在选矿方面,工艺矿物学主要研究矿石的物质成分,矿石的矿物组成,矿石的结构和构造及其物理、化学性质以及矿物在选矿过程的行为,为解释选矿机理、制定选矿工艺方案和实现选矿过程优化提供矿物学依据。本章从工艺矿物学的概论展开讨论,分析了现代矿物学的研究内容和进展及发展趋势。

第一节 工艺矿物学的发展概况及其地位与作用

人类对矿物原料的利用已有数千年历史,不过,大规模地开发和采掘则还是 20 世纪初的事。目前地壳上已知的 3 300 余种矿物被利用的仅 140 多种。而由于选矿工艺原因,这为数有限的矿种资源又有相当大的一部分被白白丢弃。黑色金属损失为 20%,有色金属损失为 40%,稀有金属损失则高达 50% 以上。加强资源综合利用、提高有用组分回收率,是应付当前资源贫化的有效途径。

工艺矿物学作为一门矿物学与选矿学相联系的工业应用技术学科,可以追溯到工业社会之初,甚或更早一些。20 世纪 40 年代后,随着相关技术成果的极大丰富,相邻基础学科与测试技术的进步,特别是与概率论、数理统计和统计学的融合,光学显微镜、X 射线衍射、X 荧光光谱、电子显微镜、矿物参数自动定量分析系统、电子(离子)探针、矿物解离分析仪、自动矿物分析系统的应用,等等,使学者们有可能从理论体系、基础知识、研究方法、基本内容等方面进行系统地总结和概述。《工艺矿物学——新的矿物学分支》一文的发表,标志着工艺矿物学作为一门独立而成熟的技术科学,稳步而成功地跨进了现代科学之林。

苏联是工艺矿物学研究起步较早的国家。H. M. 费多罗夫斯基在论述矿床地质—经济综合评价原则时,即蕴含着对矿石进行工艺矿物学分析的概念。1946 年,Б. Б. 多利沃—多布罗沃利斯基和 B. A. 格拉兹科夫斯基的专著中,对工艺矿物学曾有过系统性的总结。我国早在 20 世纪 50 年代即开始了这方面的工作。东北大学、北京矿冶研究总院等单位在学科的发展和完善上都不同程度地做出了自己的贡献。1979 年成立隶属于中国金属学会选矿学术委员会的工艺矿物学学术组织和 1983 年创办的《工艺矿物学》期刊,奠定了我国工艺矿物学研究的基础。美国于 1981 年芝加哥年会上,召开了工艺矿物学首届讨论会。苏联全苏矿物原料研究所、日本东北大学选矿制炼研究所应用矿物研究室和 A. И. 金兹堡、B. Э. 布利斯科夫斯基、P. F. 凯尔、W. 帕克、P. 兰姆道尔等科学家都对工艺矿物学的学科发展做出了较大贡献。

在工艺矿物学的积极参与下,矿产资源综合利用水平近些年来有了长足的进步。如我

国的黄金生产中,大约有 15% 的黄金产量即来自于其他矿种里的伴生金。至于选冶工艺加工水平,由于工艺矿物学的帮助,得以迅速提高的事例更是比比皆是。为了适应工艺加工要求,对矿石的分析不仅要有品位、储量、伴生组分等指标,还要掌握与工艺加工有关的矿石性质及其地质、物理、化学成因和空间分布规律。这些性质主要有:组成矿物的类别和含量、元素赋存状态、矿物嵌布特征、流程产品的矿物解离度,矿物的密度、电性、磁性、硬度、弹性、塑性、湿润性、可浮性、吸附性、离子交换性、热特性、溶解性、辐射性以及细菌性等。这些影响工艺加工的全部矿石特征,统一称之为矿石的工艺矿物学性质。研究矿石的工艺矿物学性质及其在加工过程中的性状的学科,即为工艺矿物学。

传统的地质勘探工作,大多是在金属平均含量的基础上,期望提交更多的储量。工艺矿物学除了要努力为选矿试验提供相应的矿石特征资料外,更要积极走向资源利用的全过程,有效地参与到地质勘探、矿床评价、储量计算等基础地质过程中。只有这样,才有可能对矿床做出恰如其分的地质评价,确定合理的选矿方法,选择最佳流程方案,控制、解释和预测工艺过程,推动分选技术、设备的不断更新,在可能的条件下,使矿产资源在一个可以预见的时期内,得到充分利用,其有用组分得到最大限度地回收。另外,在工艺矿物学研究中,还要注意对矿石性质的地质成因和微观机理的分析,使对矿石工艺矿物学性质的认识与说明,从具体、个别、外在的表象描绘,向系统、本质、整体的规律性方向过渡,促使学科的理论体系、研究方法与基本知识跨进到一个新的更加成熟的理性王国。同时,为了更有效地发挥学科在国民经济中的作用,积极开展服务于本学科的专用测试仪器、方法和手段的研究也是非常重要的。这样就可以缩短矿石性质研究周期,增强其在矿业生产、科研、设计和试验中的适用性,使矿石性质、特别是一些常规性的工艺矿物学性质查定由烦琐、粗糙、费时,走向简便、快速、准确,以满足加工工业部门飞速发展的需要。

工艺矿物学是与矿物开发利用研究密切联系的现代矿物学中应用矿物学的一个重要分支,现代矿物学体系及工艺矿物学在其中的地位和关系见图 1-1(见下页)。

第二节 工艺矿物学研究的内容

作为一门独立的学科,工艺矿物学所要研究的内容是广泛而深入的。同时随着矿产资源综合利用程度的不断深化和工业技术水平的不断提高,研究领域将会继续延伸和拓宽。其最基本的任务有以下 11 个方面:① 矿石的矿物组成;② 矿石中元素的赋存状态;③ 矿石组成矿物的嵌布特征;④ 矿物的性质及鉴定;⑤ 查明矿石工艺类型的空间分布规律,编制矿物工艺图;⑥ 研究矿石的表生变化;⑦ 分析矿物的工艺性质对其元素组成和微结构的依赖性;⑧ 考察矿物在工艺加工过程中的性状;⑨ 研究各种作用下,朝预定方向改变矿物工艺性质的可能性及其机理;⑩ 分析矿物工艺性质的成矿地质条件;⑪ 判明尾矿综合利用的可能性。

上述 11 项研究内容就是一个完整的工艺矿物学学科体系。实际进行工艺矿物学研究时,还要依据研究对象的形成特点与种类,确定对其工艺矿物学性质研究的不同要求,像冶金、化工、建材等生产加工时的工艺矿物学研究,最为关注的多是原料与产物中的矿物组成。

工艺矿物学的各类研究对象中,成矿作用形成的矿石和其在选矿生产流程中的产物,由于组成单元系天然生成的矿物,因而具有最为复杂的工艺矿物学性质。对它们这些性质的

一级分支

二级分支



图 1-1 现代矿物学的学科体系

鉴别、研究,需要运用的理论、技术和方法,基本涵盖了学科的各个方面。相比之下,冶金、建材、化工等生产工艺中的固体原料和产物,则通常规模较小,矿物组成较单一,矿物晶体化学性质变化不大。分析考察它们时,涉及的工艺矿物学理论、技术、方法也就不如研究矿石及其选矿产物时那样全面和具有代表性。

工艺矿物学的研究内容,虽然划分成了 11 个不同的领域,但它们各自却处于学科组成的不同层面。其中矿物组成、粒度分析、元素赋存状态和矿物加工时的性状等内容,在学科中具有基础知识、基本理论和基本技能的性质,它们自身既有比较完整的理论体系,又有相对成熟的工作原理、操作技术与测试设备。比较而言,其余部分则可看成是基于上述知识、理论和技能之上的实际应用。

工艺矿物学研究的内容及知识体系概览如图 1-2 所示。



图 1-2 工艺矿物学研究的内容及知识体系概览

第三节 国内外工艺矿物学进展及发展趋势

在过去的 20 余年间,国内外的工艺矿物学发展迅速,工艺矿物学在矿产资源开发过程中的重要作用得到了广泛的认可。各种先进仪器设备的研发和应用大大促进了工艺矿物学的发展。工艺矿物学研究渗透到矿业领域的各个方面:为矿山企业的生产流程服务,通过对矿山企业生产流程的工艺矿物学考察,找到矿山生产流程的缺陷,为其生产流程的优化提供支持;在地质勘探工作中加入详细的工艺矿物学研究,为资源开发决策提供重要的矿石可利用信息以及矿床的工艺矿物学评价;在世界矿产资源开发趋向于贫、细、杂、新的大背景下,工艺矿物学研究 with 选冶工艺研究和生产实践将结合得愈加紧密。

一、国内外工艺矿物学进展

国外矿山企业的发展模式大大促进了工艺矿物学的发展。国外规模较大的矿山企业一般都具有很强的研发能力,随着矿山企业的规模越来越大,巨大的研发能力能够充分完成从地质勘探到磨矿、选矿再到出产品这一整体过程的最优化,不断改进自己的选矿流程,在保证资源的高效回收的同时也做到了资源利用的合理及高效性。

长期以来,产、学、研相分离,使得我国在工艺矿物学的研究(原创关键仪器和应用研究)上与国外存在一定的差距。

近些年,国内外的工艺矿物学发展迅速,工艺矿物学在矿产资源开发过程中的重要作用得到了广泛的认可,其进展主要表现在以下几个方面。

1. 工艺矿物学研究手段的突破

工艺矿物学参数自动测定系统的研发成功,是工艺矿物学领域所取得的重要成就,该系统不仅使解离度测定实现了自动化,而且也使解离度测定的准确性和可重现性得到了很大提高。许多研究机构都在这一领域开展着工作。

QEMSCAN 系统:由 Zeiss EVO50 扫描电镜、1~4 个具有轻元素 Gresham X—光探头的能谱、自主研制的扫描电镜控制系统及能谱控制系统和软件组成。系统既可以鉴定矿物,又可以区分物相,能够自动测定解离度、矿物嵌布粒度、矿物相对含量、矿物嵌布复杂程度(association)等工艺矿物学参数。

MLA 系统:由 FEI 扫描电镜、1~2 个 EDAX 能谱和软件组成。MLA 在充分利用背散射电子图像区分矿物相的基础上可有多种布置 X—射线能谱分析点的模式(十种以上),可供灵活选择,充分利用了背散射电子图像,解决了 X—射线能谱分析可能在两矿物之间产生虚假“边界相”,增加了矿物鉴定的准确性。MLA 是一个高速自动化的矿物参数自动定量分析系统,能对样品进行矿物物质组成、成分定量、矿物嵌布特征、矿物粒级分布、矿物解离度等自动定量分析,主要用于矿业、冶金、地质等领域。

加拿大矿产能源技术中心(CANMET)的采矿和矿物科学实验室(MMSL)开发了一种基于电子探针分析的图像分析系统,此系统应用一种电子束稳定器在每一秒不断检测和调节电子束束流,CANMET-MMSL 应用此系统开展背散射电子图像处理分析工作,90%的情况都可应用此系统完成工作。CANMET-MMSL 认为它比其他同类系统测定速度都要快几倍,每小时可测定 30 000 个颗粒。

挪威的 Norwegian 理工大学开发出一种基于自动扫描电子显微镜的颗粒结构测定系

统(Particle Texture Analysis,PTA),它基于扫描电镜和标准半定量能谱系统,通过被散射电子图像分析和 X—射线能谱分析测定工艺矿物学参数。此系统还能够结合电子背散射衍射 EBSD(Electron BackScatter Diffraction)开展工作,以获得比 X—射线能谱分析更好的空间分辨率。

除此之外,许多研究机构都发展了自动扫描电镜系统,如丹麦和格陵兰地质调查所(Geological Survey of Denmark and Greenland)的计算机控制扫描电镜,澳大利亚的 CSIRO 的自动地质扫描电镜 Auto GeoSEM 等。

可以预见以背散射电子图像分析和 X—射线能谱结合的自动扫描电镜系统将成为以后工艺矿物学研究的重要手段,在未来的一段时间内,工艺矿物学研究机构都将会试图开发自己的工艺矿物学参数测定系统,这些系统将充分利用当今先进的扫描电镜、能谱以及图像处理技术,图像分析和处理技术又将成为工艺矿物学的热点,MLA 引领了这一趋势。以 MLA 为代表的自动系统出现后,人们把应用这样系统开展的工艺矿物学研究称为定量矿物学(Quantitative Mineralogy)和自动矿物学(Automated Mineralogy)。

2. 工艺矿物学研究的对象和目的改变

在我国,工艺矿物学受重视的程度还不够,选厂对其流程的检查、监控及选矿产品的质量控制在基本上停留在以化学分析为主要的技术手段上,而对其流程产品的解离度考察工作并不多,对其流程的可优化程度并不十分清楚,选厂所追求的是流程的稳定,而不是流程的最佳,流程优化的工作力度不够大。工艺矿物学检测能力在一般的甚至是较大型的中国矿山企业还不存在,而各科研机构中也只有北京矿冶研究总院保持了完整的工艺矿物学人员建制和仪器设备。工艺矿物学研究工作大部分都为配合选矿工艺研究工作,以要进行选矿加工的矿石为研究对象,为选矿流程提供矿物组成、含量、目标矿物嵌布粒度、磨矿产品解离度、伴生元素赋存状态等信息。

在国外,工艺矿物学研究目的并非主要是为选矿工艺研究服务,而主要转向为矿山企业的生产流程服务,工作重点为通过对矿山企业生产流程的工艺矿物学考察,找到矿山生产流程的缺陷,为其生产流程的优化提供努力方向。不久的将来,对我国矿山生产流程的全流程考察和流程优化将成为工艺矿物学研究的主要领域。

在国外由于工艺矿物学研究而促使选厂流程优化的实例较多,如美国的爱达荷州的 Lucky Friday 矿山由于矿石性质改变得不到合格铅精矿,且锌回收率降低,全流程工艺矿物学考察表明,铅精矿中存在解离的闪锌矿、黄铁矿及脉石颗粒,通过增加选厂精选次数使这一问题得到解决。除研究机构外,国外矿山企业对其流程优化和监控也非常重视,如澳大利亚的 Mt. Isa. 矿,几乎每个月都会把它的选矿产品送到有关单位做工艺矿物学检测,这使它能够随时掌握其选矿流程的运行状况。在我国,通过对云南某赤铁矿矿石的研究,发现赤铁矿单体呈纤维鳞片状,粒度极细,一般为 $0.002\sim 0.008\text{ mm}$,主要脉石矿物石英嵌布粒度相对赤铁矿粗,适宜采用阶段磨矿、阶段选别工艺。同时分析了该矿铁回收率不高的原因之一是:矿石中有一部分赤铁矿呈细粒浸染状分布于白云石和石英中。

3. 工艺矿物学研究领域不断拓展

国外工艺矿物学研究已渗透到矿业领域的各个方面。澳大利亚昆士兰大学的 JKMRC 目前正在进行地质选冶绘图及采矿模拟研究,开发一种实用方法来定量化整合地质特征、矿石工艺矿物学特性与矿物加工行为及采矿优化,通过 MLA 这样的自动系统对矿山岩芯进

行广泛系统的测试来获得丰富的工艺矿物学数据,开展小型试验,建立三维模型统计获得矿体每个部位的矿石可加工性质和模拟采矿模型,实现采矿最优化。

有人研究了利用工艺矿物学来评价未开采矿石破碎后预先富集的可能性,矿石为 Sudbury 的铜镍硫化物矿石,硫化物集合体相对于脉石矿物的解离度是确定预富集程度和方法的重要指标,其方法为通过破碎分级、重选或磁选使有价矿物达到可接受的富集程度,由工艺矿物学判断哪个部分矿石可以抛弃或再破碎及破碎程度。

工艺矿物学在资源综合利用及环境保护方面也发挥重要作用。在矿石的综合利用和环境保护方面开展研究较多的为铜镍硫化物矿石中蛇纹石的利用,蛇纹石具有吸收大气中二氧化碳的能力,大气中的二氧化碳可以以碳酸镁的形式固定在富含蛇纹石及橄榄石的铜镍硫化物矿石选矿尾矿中。美国能源部化石能源办公室(Office of Fossil Energy)的研究中心及芬兰地质调查局(Geological Survey of Finland)都在从事这方面的研究。

空气中可吸入颗粒物的矿物学研究已很多,在矿山环保研究中很多人关注砷和硫的地球化学行为。

4. 特别注意取样的代表性

任何研究中最重要环节是获得有代表性的能够充分反映流程产品性质的样品,在选矿流程的元素平衡过程中,如果取样的代表性得不到保证,元素进出选矿流程将不能吻合,回收率的计算也不能保证。澳大利亚 CSIRO Minerals 的 Ralph Holmes 提出正确的取样方法是保证取样对象的每个部分被取到的概率相同,制定了针对出料孔、管道出口、皮带、料堆及车皮等的正确取样方法和湿态取样的注意事项及不同粒级物料在保证一定可信度时的最低取样量。目前,Ralph Holmes 制定的取样方法已成为国际化标准组织 ISO 的取样标准。

二、工艺矿物学的发展趋势

虽然近些年工艺矿物学在矿产资源开发利用中发展迅速,在可见的将来,其发展趋势将主要体现在以下几个方面。

1. 工艺矿物学与矿物加工、采矿以及地质探矿等学科更大程度的融合

工艺矿物学与矿物加工科学的融合不仅是工艺矿物学的发展方向,同时也是矿物加工科学的发展方向。在国外,选厂流程优化是选矿学者及工艺矿物学者最关注的工作,实现选厂流程优化首先要找到流程的缺陷,同时对选矿流程的模拟是实现流程优化最经济的手段,无论是流程缺陷的查找还是流程模拟都离不开工艺矿物学。如澳大利亚 JKMRC 的磨矿模拟技术和浮选模拟技术都将与 MLA 的工艺矿物学解离度测定结合。

矿产资源高效利用和实现矿业可持续发展都要求在充分了解资源状况的前提下再采矿和选矿,这促进了采矿、地质、矿物学及选矿的结合。JKMRC 的地质选冶绘图及采矿模拟是地质、采矿与工艺矿物学及选矿结合的范例。在我国也开始了数字化矿山的研究,而工艺矿物学在矿体矿石性质的获得方面将发挥巨大作用。

2. 建立数学模型预测选矿指标是工艺矿物学发展趋势

工艺矿物学与数学模型结合将会发挥更重要的作用。比如通过对块状矿石的工艺矿物学研究预测碎矿产品性质;通过对碎矿产品工艺矿物学性质的研究预测磨矿产品解离度;通过对已有选矿流程的元素平衡、矿物平衡、粒度平衡及解离度平衡等研究预测相似矿石新流程可能的指标。

3. 矿床的工艺矿物学评价

为了与国际接轨,我国颁发了新的储量及资源量标准,新标准以地质勘探程度、经济因素及可实施性划分储量级别,这就意味着只有地质勘探工作对储量及资源量的描述是不够的,如何以经济因素和可实施性评价矿产资源在我国还需要探索,而工艺矿物学研究应在这个方向上努力,并发挥重要作用。以后针对每个新发现的矿床除了详细的地质工作外,还应该针对不同矿石做详细的工艺矿物学工作。

4. 工艺矿物学工作规范化及标准制定

目前在国际上工艺矿物学工作还没有一个被多数认可的规范或标准,但以 MLA 及 QEMSCAN 为代表的工艺矿物学参数自动测定系统出现以后,工艺矿物学参数测定的规范化及制定相应的与工艺矿物学相关标准的工作将逐渐展开。澳大利亚、加拿大、南非、美国、巴西、智利及欧洲等地的矿业研究及矿业开发机构之间有着紧密的联系,这些国家和地区间有的已结成了联合会,这种广泛的联系有利于技术的传播,有利于在工艺矿物学工作规范上形成共识。尽管我国也是矿业大国,但与国外的实质接触还欠缺。

第二章 矿物的工艺学性质研究

◇ 本章提要

到目前为止,所发现的天然矿物有 3 300 多种,另外还有数量众多的人造矿物,这些矿物均有其自身的化学组成、晶体结构、一定的形态和物理性质,这是组成岩石、矿石及工艺产品的基础。为了充分利用和研究这些物质,我们必须对矿物有很好的认识和了解。矿物的工艺性质是鉴定和研究及利用矿物的基础。

第一节 矿石矿物组成

矿石中有用成分(元素或矿物)重量和矿石重量之比称为矿石品位,金、铂等贵金属矿石用 g/t 表示,其他矿石常用百分数表示。常用矿石品位来衡量矿石的价值,脉石(矿石中的无用矿物或有用成分含量甚微而不能利用的矿物)的成分和有害杂质的多少会影响矿石价值。

一、矿石的组成和构造

凡是地壳中的矿物自然集合体,在现代技术经济水平条件下,能以工业规模从中提取国民经济所必需的金属或其他矿物产品者,称为矿石。矿石一般分为贫矿石和富矿石及金属矿石和非金属矿石。矿石贫化主要以矿石贫化率(工业矿石品位与采出矿石品位之差与工业矿石品位的比值,以百分数表示)表示。

矿石矿物按矿物含量的多少可分为:

- ① 主要矿物,指在矿石中含量较多且在某一矿种中起主要作用的矿物。
- ② 次要矿物,指在矿石中含量较少且对矿石品位不起决定作用的矿物。
- ③ 微量矿物,指在矿石中含量很少,对矿石不起大作用的矿物。矿石中某些特征元素矿物,如镍矿石中微量铂族元素矿物,虽其含量甚微,但有较高的综合利用价值,这类微量矿物仍有较大的经济意义。

在研究矿石的矿物组成时,还应区分矿物的成因(原生的、次生的、变质的)和矿物的工艺特征(易选冶的、难选冶的)等。

矿石的概念是相对的,随着人类对新矿物原料需求的不断增长和工艺技术条件的不断改进,目前无用的矿物也可成为矿石矿物。确定矿与非矿的主要因素是对矿石品位的要求。

矿石结构,系指矿石中矿物颗粒的形状、大小及其相互关系。矿石结构主要取决于矿物颗粒的形成条件,它是研究矿物生成顺序的重要标志。矿石结构类型甚为多样,有由熔体和溶液中结晶形成的结构、由固溶体分离作用形成的结构、由再结晶作用形成的结构、由沉积作用形成的结构、由压力作用形成的结构等,最常见的矿石结构有等粒结构、不等粒结构、纤维状结构、环带状结构、叶片状结构、结晶定向结构、胶状结构、破裂结构、紧密联晶结构、交代结构等(见图 2-1)。