

稀有金属矿 工艺矿物学

XIYOU JINSHUKUANG GONGYI KUANGWUXUE

◆ 梁冬云 李 波 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

稀有金属矿工艺矿物学

梁冬云 李 波 编著

北 京

冶金工业出版社

2015

内 容 简 介

本书系统地介绍了各种稀有金属资源的性质特点和工艺矿物学的研究方法,并分别论述了铍、锂、钛、锆铪、钽铌、钼、钒、稀土、铀、铷铯和分散元素等稀有金属矿种的矿石类型、矿物物理化学性质,元素在矿石中的赋存状态,以及与选冶相关的工艺矿物学特性。各矿种均有典型工艺矿物学研究成果实例介绍,各实例中充分体现了现代检测新技术与传统工艺矿物学研究方法相结合所取得的成就,深入且全面地剖析矿石的工艺矿物学特征。该书为我国第一部稀有金属矿工艺矿物学专著,对稀有金属资源的矿物学研究、选冶工艺研究具有重要的学术价值和应用价值。

本书适合于大学本科、研究生以及专业教师在教学和科研中参考,也可供相关矿山企业工程技术人员阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

稀有金属矿工艺矿物学/梁冬云,李波编著. —北京:冶金工业出版社, 2015. 7

ISBN 978-7-5024-6934-4

I. ①稀… II. ①梁… ②李… III. ①稀有金属矿床—工艺矿物学 IV. ①P618. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 154635 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 程志宏 徐银河 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6934-4

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2015年7月第1版,2015年7月第1次印刷

169mm×239mm; 20.25 印张; 4 彩页; 404 千字; 309 页

73.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

工艺矿物学是应用矿物学的分支学科，同时也是介于地质学与选矿、冶金工艺学之间的边缘学科，是一门以研究天然矿石原料和矿石加工工艺过程产品的化学组成、矿物组成和矿物性状为目的的学科。稀有金属工艺矿物学是属于工艺矿物学研究的范畴，所谓稀有金属，特指在地壳中丰度很低或分布稀疏的金属。稀有金属具有各种独特的性质，是发展现代尖端技术、高新技术不可缺少的原料，尤其在航天航空领域和新能源方面，稀有金属正在发挥越来越重要的作用。当前世界各国对稀有金属矿产资源的需求与日俱增，使得稀有金属的供给形势严峻，价格波动大，多数经济发达国家将稀有金属视为重要的战略物资加以储备。稀有金属资源分离提取困难和利用率低是全球普遍存在的问题，以至于加剧了资源的紧缺性，矿石选矿分离技术的提升则是制约稀有金属资源高效利用的瓶颈问题。为了提高对稀有金属矿的开发利用，必须进行矿石工艺矿物学研究，首先全面查清稀有元素在矿石中的赋存状态，掌握矿石性质的基础数据和资料，针对矿石性质特点，明确技术创新方向和目标，对成功规划稀有金属矿山以及设计高效的选冶工艺流程是极为重要的。

我国的工艺矿物学是从岩矿鉴定开始，起步于20世纪50年代，至70年代成立了工艺矿物学学术组织，经历了从单纯鉴定矿物到全面诠释工艺过程的矿物特征，从依赖显微镜人工鉴定到大型测试仪器得到广泛应用的发展过程，研究方法逐渐实现了从表象到本质，从微观到宏观表征，从定性到定量以及数据的图像化、信息化的进步，工艺矿物学理论、方法以及研究手段经过不断发展和更新，已产生了质的飞跃，形成了“现代工艺矿物学”，成为矿物工程学不可或缺的组成部分。现代工艺矿物学的趋势是朝着大型仪器和计算机结合的定量矿物

学, 矿物学数据图像化、信息化的方向发展, 这一发展大大加快和提高了获得矿石信息的速度和检测的精度。由于定量矿物学带来精细准确的矿物学数据, 工艺矿物学的革命性进步, 有效地促进了稀有金属选矿工艺流程设计的精细化和分选工艺的精准化, 使依据矿物性质特点进行分流分选工艺在多个稀有金属矿选矿中获得了成功。

本书作者自 1982 年开始从事稀有金属矿产的工艺矿物学研究工作, 三十多年的工作实践, 深谙稀有金属矿研究工作的高难度, 秉承前辈们严谨、细致、务实的学术作风, 在研究稀有金属矿物特征方面积累了丰富的经验和形成专有的技术方法。本书是作者及其科研团队工作成果的结晶, 同时也是对工艺矿物学前辈的研究方法和研究成果的总结。

本书编写得到了邱显扬教授的鼓励和指导, 在编写过程中他给予了悉心指导和帮助; 汤玉和、何晓娟、董天颂也在编写过程中给予了充分的支持和帮助; 工艺矿物学前辈许志华、陈水仙予以倾心指导并对书稿细致修改, 在此诚挚地表示谢意; 洪秋阳、张莉莉、李玉燕、肖飞燕、于丽丽等在矿物检测和数据获取方面做了大量工作, 巫锦东、李美荣、陈海亮在查阅整理资料数据、插图绘制、书稿整理和校核等方面给予充分的支持和帮助, 在此作者一并表示衷心的感谢!

本书较全面介绍了稀有金属矿的性质特点和稀有金属矿工艺矿物学的研究方法, 系统叙述了各种稀有金属矿石的工艺矿物学特征, 并分别列举研究实例。本书适合于大学本科、研究生以及专业教师在教学和科研中参考, 也可供相关矿山企业工程技术人员阅读使用。

本书的编写历时三年有余, 由于作者水平所限, 尤其在矿业迅猛发展的今天, 作者尚未能对大量新成果和新成就进行充分的分析和更新, 书中存在的不完善和欠妥之处, 欢迎读者批评指正。

谨以本书献给培育过我的老师和前辈们并通过该书的出版, 传承前辈学术思想, 启迪后来者。

编著者
2015 年 5 月

目 录

1 绪 论	1
1.1 工艺矿物学的意义及内容	1
1.1.1 工艺矿物学的意义	1
1.1.2 工艺矿物学的内容	2
1.2 工艺矿物学的发展历程和现状	3
2 稀有金属矿资源	6
2.1 稀有金属概述	6
2.2 稀有金属矿产的种类	6
2.3 稀有金属矿的矿床类型	7
2.4 世界的稀有金属矿资源概况	8
2.5 我国的稀有金属矿资源概况	11
3 稀有金属工艺矿物学的检测与分析方法	16
3.1 稀有金属矿石的特性	16
3.2 稀有金属工艺矿物学的检测分析方法	16
3.2.1 样品的采取和制备	16
3.2.2 矿石的矿物组成定量检测	18
3.2.3 矿石中 useful 矿物嵌布特征和嵌布粒度的测量	25
3.2.4 矿物的解离性和单体解离度测定	30
3.2.5 矿物嵌布特征与矿石分选类型	32
3.2.6 单矿物分离	33
3.2.7 元素在矿石中赋存状态	42
3.2.8 与选矿工艺相关的矿物理化性质	45
4 铍矿的工艺矿物学	52
4.1 铍资源简介	52
4.2 铍在矿石中的存在形式和矿物种类	53
4.2.1 铍在矿石中的存在形式	53

4.2.2	铍的矿物种类	54
4.3	主要铍矿物的晶体化学和物理化学性质	55
4.3.1	绿柱石 $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$	55
4.3.2	蓝柱石 $\text{BeAl}[\text{SiO}_4]\text{OH}$	56
4.3.3	硅铍石 $\text{Be}_2[\text{SiO}_4]$	57
4.3.4	羟硅铍石 $\text{Be}_4[\text{Si}_2\text{O}_7](\text{OH})_2$	58
4.3.5	金绿宝石 BeAl_2O_4	58
4.3.6	兴安石 $(\text{Y}, \text{Ce}, \text{Yb})_2\text{Be}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{OH})_2$	59
4.4	铍矿石类型和选矿工艺	60
4.4.1	铍矿石类型	60
4.4.2	铍矿石选矿工艺和铍提取工艺	62
4.5	高温热液绿柱石型钨铍矿石工艺矿物学实例	62
4.5.1	原矿物质组成	62
4.5.2	主要矿物的嵌布粒度	63
4.5.3	主要矿物选矿工艺特性和嵌布状态	63
4.5.4	钨在矿石中的赋存状态	65
4.5.5	铍在矿石中的赋存状态	66
4.5.6	影响矿石选矿的矿物因素分析	66
4.6	矽卡岩金绿宝石型铍矿石工艺矿物学实例	66
4.6.1	原矿物质组成	66
4.6.2	主要矿物的嵌布粒度	67
4.6.3	主要矿物选矿工艺特性和嵌布状态	68
4.6.4	铍在矿石中的赋存状态	72
4.6.5	影响选矿的矿物学因素分析	72
5	锂矿的工艺矿物学	74
5.1	锂资源简介	74
5.2	锂在地壳中的存在形式和矿物种类	75
5.2.1	锂在矿石中的存在形式	75
5.2.2	锂矿物种类	75
5.3	主要锂矿物的晶体化学和物理化学性质	77
5.3.1	锂云母 $\text{K}\{\text{Li}_{2-x}\text{Al}_{1+x}\text{Al}[\text{Al}_{2x}\text{Si}_{4-x}\text{O}_{10}]\text{F}_2\}$	77
5.3.2	锂辉石 $\text{LiAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$	77
5.3.3	扎布耶石 Li_2CO_3	78

5.4 锂矿石类型和选矿工艺	78
5.4.1 锂矿石类型	78
5.4.2 锂矿石选矿工艺	79
5.5 碱性花岗伟晶岩型锂多金属矿工艺矿物学实例	79
5.5.1 原矿物质组成	79
5.5.2 主要矿物的嵌布粒度	80
5.5.3 主要矿物的解离度	81
5.5.4 主要矿物的嵌布状态和矿物学特性	82
5.5.5 主要有价金属在矿石中的赋存状态	89
5.5.6 影响选矿的矿物学因素分析	91
6 钛矿的工艺矿物学	93
6.1 钛资源简介	93
6.2 钛在矿石中的存在形式和矿物种类	94
6.2.1 钛在矿石中的主要存在形式	94
6.2.2 钛矿物种类	94
6.3 主要钛矿物的晶体化学和物理化学性质	96
6.3.1 金红石 TiO_2	96
6.3.2 锐钛矿 TiO_2	97
6.3.3 板钛矿 TiO_2	98
6.3.4 钛铁矿 FeTiO_3	98
6.4 钛矿石类型和选矿工艺	100
6.4.1 钛矿石类型	100
6.4.2 钛矿石的选矿工艺	100
6.5 磁铁矿型钛矿工艺矿物学实例	101
6.5.1 原矿物质组成	101
6.5.2 主要矿物嵌布粒度	103
6.5.3 主要矿物解离度	103
6.5.4 主要矿物的矿物特征和嵌布状态	104
6.5.5 铁、钛、钒在矿石中的赋存状态	108
6.5.6 影响矿石分选的矿物学因素	110
6.6 金红石型钛矿工艺矿物学实例	110
6.6.1 原矿物质组成	110
6.6.2 主要矿物嵌布粒度测定	111
6.6.3 金红石解离度测定	112

6.6.4	主要矿物矿物学特性和嵌布状态	112
6.6.5	矿物磁性分析	116
6.6.6	钛在矿石中的赋存状态	116
6.6.7	影响选矿的矿物学因素分析	117
6.7	海滨钛铁砂矿工艺矿物学实例	118
6.7.1	原砂物质组成	118
6.7.2	原砂粒度组成和金属分布	118
6.7.3	主要矿物粒度测定	119
6.7.4	主要矿物的选矿工艺特性	119
6.7.5	原砂中钛和锆的赋存状态	124
6.7.6	影响选矿的矿物学因素分析	125
7	锆、铪矿的工艺矿物学	127
7.1	锆、铪资源简介	127
7.2	锆、铪矿物种类	128
7.2.1	锆、铪之间的类质同象	128
7.2.2	锆、铪矿物种类	128
7.3	主要锆矿物的晶体化学和物理化学性质	129
7.3.1	锆石 (Zr, Hf)[SiO ₄]	129
7.3.2	斜锆石 ZrO ₂	130
7.4	锆、铪矿石类型及选矿工艺	131
7.4.1	锆、铪矿石类型	131
7.4.2	锆、铪矿石的选矿工艺	131
7.5	海滨锆钛砂矿工艺矿物学实例	132
7.5.1	原矿物质组成	132
7.5.2	主要有价矿物粒度分布	133
7.5.3	锆石的矿物学特性和嵌布状态	134
7.5.4	原砂中锆的赋存状态	136
7.5.5	影响选矿的矿物学因素分析	137
8	钽、铌矿的工艺矿物学	138
8.1	钽、铌资源简介	138
8.2	钽、铌在矿石中的主要存在形式和矿物种类	140
8.2.1	钽、铌在矿石中的主要存在形式	140
8.2.2	钽、铌矿物种类	140

8.3 主要钽、铌矿物的晶体化学和物理化学性质	142
8.3.1 钽、铌铁矿族矿物 $(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$	142
8.3.2 烧绿石-细晶石	143
8.3.3 褐钇铌矿	145
8.3.4 易解石	147
8.3.5 黑稀金矿-复稀金矿	148
8.4 钽铌矿石类型和选矿工艺	149
8.4.1 钽铌矿石类型	149
8.4.2 钽铌矿石的选矿工艺	151
8.5 碱性花岗岩铌稀有金属矿工艺矿物学实例	152
8.5.1 原矿物质组成	152
8.5.2 主要矿物嵌布粒度	153
8.5.3 主要矿物的磁性分析	153
8.5.4 铌-钼-铍-稀土矿物及其选矿工艺特性	154
8.5.5 矿石中铌钽铍稀土的赋存状态	160
8.5.6 影响选矿矿物学因素分析	163
8.6 花岗伟晶岩钽铌矿工艺矿物学实例	165
8.6.1 原矿物质组成	165
8.6.2 主要矿物嵌布粒度	166
8.6.3 重液分离试验	167
8.6.4 钽铌矿物及其选矿工艺特性	168
8.6.5 矿石中钽铌的赋存状态	174
8.6.6 影响选矿矿物学因素分析	175
9 钨矿的工艺矿物学	177
9.1 钨资源简介	177
9.2 钨在矿石中的主要存在形式和钨矿物分类	178
9.2.1 钨在矿石中的主要存在形式	178
9.2.2 钨矿物种类	179
9.3 主要钨矿物的晶体化学和物理化学性质	180
9.3.1 黑钨矿 $(\text{Mn}, \text{Fe})[\text{WO}_4]$	180
9.3.2 白钨矿 $\text{Ca}[\text{WO}_4]$ -钼钨钙矿 $\text{Ca}[\text{MoO}_3]$	181
9.4 钨矿矿石类型和选矿工艺	182
9.4.1 钨矿矿石类型	182
9.4.2 钨矿石的选矿工艺	184

9.5 矽卡岩型钨矿石工艺矿物学实例	185
9.5.1 原矿物质组成	185
9.5.2 主要矿物嵌布粒度	187
9.5.3 主要矿物解离度	187
9.5.4 主要矿物选矿工艺特性和嵌布状态	188
9.5.5 主要有价金属在矿石中的赋存状态	192
9.5.6 影响选矿的矿物学因素分析	194
10 钼矿的工艺矿物学	195
10.1 钼资源简介	195
10.2 钼在矿石中的主要存在形式和钼矿物分类	196
10.2.1 钼矿石的主要存在形式	196
10.2.2 钼矿物种类	197
10.3 主要钼矿物的晶体化学和物理化学性质	197
10.3.1 辉钼矿 MoS_2	197
10.3.2 钼铅矿 $\text{Pb}[\text{MoO}_4]$ (彩钼铅矿)	198
10.4 钼矿石类型和选矿工艺	199
10.4.1 钼矿石类型	199
10.4.2 钼矿石的选矿工艺	200
10.5 斑岩型钼矿石工艺矿物学实例	201
10.5.1 原矿物质组成	201
10.5.2 辉钼矿嵌布粒度测定	203
10.5.3 辉钼矿解离度测定	203
10.5.4 主要矿物的选矿工艺特性和嵌布关系	204
10.5.5 矿石中有价金属的赋存状态	206
10.5.6 影响选矿矿物学因素分析	207
11 钒矿的工艺矿物学	208
11.1 钒资源简介	208
11.2 钒在矿石中的主要存在形式和钒矿物种类	209
11.2.1 钒在矿石中的主要存在形式	209
11.2.2 钒矿物种类	209
11.3 主要钒矿物和含钒矿物的晶体化学和物理化学性质	211
11.3.1 钒钛磁铁矿 $\text{Fe}^{3+}(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$	211
11.3.2 钒云母 $\text{K}\{\text{V}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_8](\text{OH})_2\}$	212

11.4 主要钒矿类型和提钒工艺	213
11.4.1 主要钒矿类型	213
11.4.2 钒矿石的提钒工艺	214
11.5 钒钛磁铁矿型含钒矿石工艺矿物学实例	215
11.5.1 原矿物质组成	215
11.5.2 钒钛磁铁矿和钛铁矿的嵌布粒度	215
11.5.3 钒钛磁铁矿和钛铁矿的解离度测定	216
11.5.4 主要矿物的矿物特征和嵌布有关状态	217
11.5.5 钒在矿石中的赋存状态	222
11.5.6 小结	222
11.6 石煤型钒矿工艺矿物学实例	223
11.6.1 原矿物质组成	223
11.6.2 主要矿物的物化性质和嵌布状态	224
11.6.3 矿物磁性分析	231
11.6.4 钒在矿石中赋存状态	232
11.6.5 影响选矿的矿物学因素分析	233
12 稀土矿的工艺矿物学	234
12.1 稀土资源简介	234
12.2 稀土在矿石中的存在形式和稀土矿物种类	236
12.2.1 稀土在矿石中的存在形式	236
12.2.2 稀土矿物种类	236
12.3 主要稀土矿物的晶体化学和物理化学性质	240
12.3.1 独居石 (Ce, La, Y, Th)[PO ₄]	240
12.3.2 氟碳铈矿 (Ce, La)[CO ₃]F	240
12.3.3 磷钇矿 Y[PO ₄]	241
12.3.4 褐帘石 (Ca, Ce) ₂ (Fe, Al, Mg) ₃ [SiO ₄][Si ₂ O ₇]O(OH)	241
12.3.5 离子相稀土	242
12.4 稀土矿矿石类型和选矿工艺	243
12.4.1 稀土矿矿石类型	243
12.4.2 稀土矿矿石选矿工艺	245
12.5 碳酸盐热液脉状稀土矿工艺矿物学实例	247
12.5.1 原矿物质组成	247
12.5.2 主要矿物的嵌布粒度	248

12.5.3	稀土矿物的解离度测定	249
12.5.4	主要矿物选矿工艺特性和嵌布状态	249
12.5.5	稀土在矿石中的赋存状态	254
12.5.6	影响稀土选矿的矿物学因素分析	255
13	分散金属钪的工艺矿物学	257
13.1	钪资源简介	257
13.2	钪的地球化学特点	260
13.3	钪矿物和钪在矿石中的赋存状态	260
13.4	钪的主要矿石类型和提钪工艺	262
13.4.1	钪的主要矿石类型	262
13.4.2	钪的提取工艺	263
13.5	矿石中钪的赋存状态考查实例	264
13.5.1	矿石概况	264
13.5.2	矿石矿物组成	264
13.5.3	矿石中各粒级金属分布	265
13.5.4	钪在矿石中赋存状态	266
14	分散金属铷、铯的工艺矿物学	268
14.1	铷、铯资源简介	268
14.2	含铷铯矿物及其他铷铯资源种类	270
14.3	主要铷矿物和含铷铯矿物的晶体化学和物理化学性质	270
14.3.1	铯沸石 $\text{Cs}[\text{AlSi}_2\text{O}_6]$	270
14.3.2	含铷铯的云母族矿物 $\text{MR}_{2-3}[(\text{OH}, \text{F})_2/\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$	272
14.3.3	含铷铯的钾长石和天河石	272
14.4	主要铷铯矿石类型和铷铯的提取工艺	273
14.4.1	主要铷铯矿石类型	273
14.4.2	铷铯的提取工艺	273
14.5	碱性伟晶岩稀有金属矿中铷、铯的赋存状态研究	274
14.5.1	原矿物质组成	274
14.5.2	主要矿物的物理化学特征和选矿工艺特性	275
14.5.3	铷在矿石中的赋存状态	281
14.5.4	铯在矿石中的赋存状态	281
14.5.5	影响铷、铯选矿的矿物学因素分析	282

15 分散元素矿产的工艺矿物学	283
15.1 分散元素种类和资源简介	283
15.2 分散元素的地球化学特点及其在矿石中的赋存状态	286
15.3 分散元素矿物	289
15.4 分散元素矿产的矿石类型	298
15.4.1 锗矿石类型	298
15.4.2 镓矿石类型	298
15.4.3 镉矿石类型	299
15.4.4 铟矿石类型	299
15.4.5 硒矿石类型	299
15.4.6 碲矿石类型	301
15.4.7 铼矿石类型	302
15.4.8 铊矿石类型	302
15.5 层控铅锌矿中锗和镉的赋存状态	302
15.6 斑岩型铜钼矿中铼的赋存状态	303
15.7 热液型铜多金属矿中硒、碲矿物	304
参考文献	306

1 绪 论

1.1 工艺矿物学的意义及内容

1.1.1 工艺矿物学的意义

矿物学是研究矿物的化学成分、晶体结构、形态、性质、成因、产状、共生组合、变化条件、时间与空间上的分布规律、形成与演化的历史和用途以及它们之间关系的科学。随着现代工业的发展与技术的进步,矿物学的研究范围越来越广也越来越深入,并且在矿物学理论学科的基础上,伴随着不同领域所针对的对象差异,发展形成侧重点不同的专门技术和方法,创立了新的边缘学科,如地质成因矿物学、宝石学、选矿工艺矿物学、冶金工艺矿物学等,均属应用矿物学的范畴。选矿工艺矿物学是一门以研究天然矿石原料和矿石加工工艺过程产品的化学组成、矿物组成和矿物性状为研究目的的学科,是介于地质学与选矿工艺学之间的一门边缘学科。本书内容所着重论述的就是选矿工艺矿物学,亦即工艺矿物学。工艺矿物学的基本理论不但包括如矿物学、晶体光学、矿床学、岩石学、矿相学等的地质学科的理论,而且也包含了选矿工艺学的基本方法和理论,如矿物的磁学性质、介电性质、溶解性、表面性质(可浮性)等。工艺矿物学研究对象主要为天然矿石原料和选矿产品。然而,随着各学科研究的深入与相互渗透以及研究领域之间的合作关系延伸,选矿工艺矿物学有时也涉及冶金过程及其最终产品的物质组成,例如湿法冶金浸出渣的组成、火法冶金的炉渣组成以及有用元素的赋存状态等。

工艺矿物学研究目的就是为了设计与矿石性质相适应的选矿工艺流程,通过研究矿物的化学成分、矿物组成、矿物的嵌布粒度、有用和有害元素在矿石中的赋存状态以及矿物在各种工艺过程中的行为,包括对工艺矿物学特征参数检测和矿物性状关系分析进而对矿石进行剖析和研究,以诠释选矿机理、制定选矿工艺方案并为选矿过程优化提供方向性指导。工艺矿物学是选矿工程技术人员的“眼睛”,为选矿提供矿石的矿物学基础数据和资料,是选择工艺处理方案、确定工艺理论指标、预测和控制金属损失和评价工艺处理效果的依据。工艺矿物学的研究和选矿研究相得益彰,共同为充分合理利用矿产资源,提高有用组分的利用率并尽可能避免矿产开采过程和选矿过程中产生有害金属污染提供科学依据。

稀有金属矿工艺矿物学是矿石工艺矿物学研究的组成部分,与一般矿产的工

艺矿物学的内容基本相同,通过工艺矿物学特征参数检测和矿物性状关系分析对矿石进行剖析和研究,研究结果为诠释选矿机理、制定选矿工艺方案和实现选矿过程优化提供了方向性指导。然而,由于稀有金属矿的品位低,目标矿物种类多以及含量稀少等特殊性的,在样品制备、实验方法和研究手段方面具有更高的要求。

1.1.2 工艺矿物学的内容

1.1.2.1 矿石的化学组成

工艺矿物学研究矿石中所含主要化学元素的种类和含量。通常采用光谱半定量方法来确定矿石所含元素的种类,进而再采用化学分析方法和化学物相分析方法定量测定矿石中组成元素或化合物的含量。

1.1.2.2 矿石的矿物组成

工艺矿物学采用显微镜鉴定、X 衍射分析、电子探针分析等方法确定矿石中组成矿物的种类,然后再采用工艺矿物学定量方法测定各种矿物的含量。自动图像分析(如 MLA 矿物自动定量检测系统)等可对矿石进行自动矿物种类识别和全矿物定量检测。

1.1.2.3 矿石中的矿物嵌布粒度

工艺矿物学一般采取矿石块矿磨制成矿石光片和薄片,在显微镜下测定主要有价矿物的嵌布粒度。对矿石进行选矿时,矿物在矿石中的嵌布粒度大小是确定磨矿细度和破碎方案的关键因素,直接影响到工艺流程方案的制订和选择。

1.1.2.4 矿石有价元素和有害元素的赋存状态

工艺矿物学还通过矿石中矿物定量测定结果和各矿物的单矿物化学分析,考查某元素在矿石中的存在形式和该元素在各组成相中的分配比例。以确定选矿选取的目的矿物和选矿的理论回收率。

1.1.2.5 矿石产品及选矿产品中有价矿物和有害矿物的解离度

在显微镜和扫描电镜下观察和测定磨矿产品中矿物的单体解离度、粒度变化、破裂面性状、与连生矿物的连生特性等是工艺矿物学的内容之一。

1.1.2.6 矿物之间的嵌布关系

在显微镜或扫描电镜下观察矿物之间的嵌布关系,并进行描述和照相,直观真实展示各目的矿物的嵌布粒度特征及对矿物解离度的影响。目的矿物与哪些矿物连生、粒度大小分布、它们之间连生界面的复杂程度等都直接影响该矿物的解离程度,而矿物解离程度对矿物的分选效果有着重要的影响。

1.1.2.7 矿物在选矿工艺过程的性状和行为

通过对选矿产品矿物组成的定量检测,查明重、磁、电、浮选等工艺过程产品的矿物归类组合等等。

近年来,随着国外先进工艺矿物学自动检测新技术——MLA 技术的引入和应用,现代工艺矿物学检测通过先进的图像分析技术和矿物相图与元素分析技术的结合,使得工艺矿物学研究内容不断拓展。不仅可获取大量的包括矿石的矿物组成及含量,有用、有害矿物的嵌布粒度分布,元素赋存状态等工艺矿物参数,同时通过检测还可追索各种金属元素的地球化学行为和工艺过程的走向。

1.2 工艺矿物学的发展历程和现状

工艺矿物学虽然是一门年轻的应用科学,但实际上它的研究和应用却具有悠久的历史。19 世纪中叶,光学显微镜被应用于矿物研究,就开始运用薄片矿物学研究矿石了。到 20 世纪初又应用 X 射线来研究矿物晶体结构,揭示了矿物内部的原子世界,为矿物分类和矿物性质研究奠定了基础。苏联的一些学者早在 20 世纪 30 年代曾论述了为选矿目的而作的矿物学研究,并编写了选矿显微镜及其目的和任务一书,Chamot E. M. 等编写了化学显微镜手册,Dayton R. W. 等论述了金相偏光显微镜应用于选冶产品检测和理论,Head R. E, Gaudin A. M. 等人总结了硫化矿浮选产品的研究方法以及金粒的存在形式,并发表了许多研究选矿产品物相的文章。

该学科的命名经历了不同的历程,美国、日本、德国等矿物学家曾提出过使用“选矿矿物学”、“选矿矿石学”、“岩相学”、“工业岩石学”等名称,这是工艺矿物学的初期阶段。1971 年苏联 Гинзберг А. И. 曾预言,在矿物学与矿物原料工艺学之间正在产生一个新的方向,稍后,Henley K. J. Бликовский Б. З. 沿用了“选矿矿物学”这一术语,提出了本学科的任务和方法,并认为本学科是矿物学的独立分支。1977 年 Гинзберг А. И. 提出了“工艺矿物学”的概念,并详细论述了工艺矿物学在矿山评价和选冶过程的任务、途径和方法。

传统的工艺矿物学采用光学显微镜微测法、矿物分离法和化学物相分析计算方法进行矿物定量检测。20 世纪中期,随着现代科学技术的发展,近代物理学的晶体场理论、配位场理论、分子轨道理论、能带理论以及各种谱学检测手段、微束测试技术、计算机技术等引入与发展,使工艺矿物学不断完善,英、美、加拿大等国通过研究 X 射线图像法、螺旋旋转光谱法、反射率色谱颜色定量等测试方法,实现了对工艺矿物学参数的自动检测,但由于测试方法适应性差等问题而未能推广应用。最近十年,工艺矿物自动检测技术发展较快,美国、加拿大、澳大利亚、南非、芬兰、德国等矿业大国,都开发出各具特色的矿物自动检测新技术,其中澳大利亚 JK 技术中心 (JKTech) 和加拿大 CANMET 的 W. Petruk 和 R. Lastra 的研究产品应用较为广泛。Julius Kruttschnitt 矿物研究中心 (JKMRC) 是澳大利亚最大的矿物研究中心,隶属于澳大利亚昆士兰大学。JKTech 是 JKMRC 的技术中心,JKTech 开发研究的矿石自动检测技术 (MLA) 可用于贵金属和