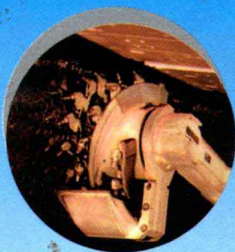


XUANKUANG GAILUN

选矿概论

段旭琴 胡永平 编著



化学工业出版社

XUANKUANG GAILUN

选矿概论

段旭琴 胡永平 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系统地介绍了选矿相关的基本概念、基本原理、工艺过程，以及主要分选加工设备的结构、特点、性能及应用范围。内容包括破碎筛分、磨矿分级、重选、浮选、磁选、电选、化学及微生物选矿、选后产品处理、选矿技术检查等，列举了多种典型金属、非金属矿物的分选工艺实例，内容丰富，实用性强。

本书可作为资源工程、冶金工程等专业的本科教学用书，也可供矿物加工、冶金、化工、环境等专业领域工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

选矿概论/段旭琴, 胡永平编著. —北京: 化学工业出版社, 2011. 1

ISBN 978-7-122-09944-0

I. 选… II. ①段…②胡… III. 选矿-概论 IV. TD9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 226289 号

责任编辑: 刘丽宏

文字编辑: 徐雪华

责任校对: 宋 玮

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京云浩印刷有限责任公司

装 订: 三河市前程装订厂

850mm×1168mm 1/32 印张 11 $\frac{1}{4}$ 字数 279 千字

2011 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686)

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 32.00 元

版权所有 违者必究

目 录

绪论	1
第一篇 粉碎与分级	10
第 1 章 粉碎与分级的基本概念	10
1.1 粉碎与分级的作用	10
1.2 物料粒度特征及分析	12
1.2.1 物料的粒度及粒度分析	12
1.2.2 粒度组成的表示	18
第 2 章 破碎与筛分	22
2.1 破碎	22
2.1.1 破碎的基础理论	22
2.1.2 破碎机	29
2.2 筛分	42
2.2.1 筛分的基础理论	42
2.2.2 筛分机	45
2.2.3 影响筛分效率的因素	53
2.3 破碎筛分流程	55
2.3.1 破碎筛分流程结构	55
2.3.2 常用破碎筛分流程	56
第 3 章 磨矿与分级	59
3.1 磨矿	59
3.1.1 磨矿过程的基本理论	59
3.1.2 磨矿机	63
3.1.3 超细粉碎机	70

3.2	分级	74
3.2.1	分级的基础知识	74
3.2.2	分级机	75
3.2.3	分级效果的评价	83
3.3	磨矿分级流程	85
3.3.1	磨矿分级流程结构	85
3.3.2	常用磨矿分级流程	87
3.3.3	磨矿分级过程的工艺指标及操作因素	90
第二篇 物料分选		95
第4章 重选		95
4.1	重选的研究对象及应用	95
4.2	重选的基本原理	97
4.2.1	颗粒在介质中的自由沉降	97
4.2.2	颗粒在介质中的干扰沉降	102
4.2.3	等降现象与等降比	102
4.3	水力分级与洗矿	103
4.3.1	水力分级	103
4.3.2	洗矿	106
4.4	重介质分选	108
4.4.1	概述	108
4.4.2	重悬浮液的性质	109
4.4.3	重介质分选设备	111
4.5	跳汰分选	116
4.5.1	概述	116
4.5.2	跳汰机	118
4.5.3	影响跳汰分选效果的因素	125
4.6	溜槽分选	127
4.6.1	概述	127
4.6.2	溜槽分选设备	128

4.7 摇床分选	134
4.7.1 概述	134
4.7.2 摇床的构造及分类	137
4.7.3 影响摇床分选效果的因素	138
第5章 磁选	141
5.1 磁选的基本原理	141
5.1.1 磁选过程	141
5.1.2 磁选机的磁场	142
5.1.3 颗粒的磁化	144
5.1.4 磁性颗粒在非均匀磁场中所受的磁力	145
5.2 矿物的磁性	147
5.2.1 矿物磁性的分类	147
5.2.2 强磁性矿物的磁性特点	148
5.2.3 弱磁性矿物的磁性特点	150
5.2.4 改变物质磁性的方法	150
5.3 磁选设备	154
5.3.1 概述	154
5.3.2 弱磁场磁选机	158
5.3.3 强磁场磁选机	166
第6章 浮选	175
6.1 概述	175
6.2 浮选原理	177
6.2.1 润湿性、水化现象与可浮性	177
6.2.2 矿物的表面电性与可浮性	180
6.2.3 气泡矿化	182
6.3 浮选药剂	185
6.3.1 捕收剂	186
6.3.2 起泡剂	196
6.3.3 调整剂	198
6.4 浮选机	202

6.4.1	机械搅拌浮选机	203
6.4.2	充(压)气式浮选机——浮选柱	208
6.4.3	气析式浮选机	211
6.4.4	浮选机的发展趋势	213
6.5	浮选流程及结构	213
6.5.1	浮选原则流程	214
6.5.2	浮选流程内部结构	217
6.6	影响浮选效果的因素	218
6.7	浮选新工艺	222
第7章	电选和拣选	226
7.1	电选的基本原理	226
7.2	矿物的电性	227
7.2.1	矿物的电导率	227
7.2.2	矿物的介电常数	229
7.2.3	矿物的比电导度和整流性	230
7.3	矿粒在电场中带电的方式	231
7.4	电选机	234
7.5	影响电选效果的因素	238
7.5.1	物料性质的影响	238
7.5.2	电选机可调参数的影响	239
7.6	拣选	240
第8章	化学分选及微生物选矿	244
8.1	焙烧	244
8.1.1	氯化焙烧	244
8.1.2	还原焙烧	247
8.1.3	钠化焙烧	247
8.1.4	磁化焙烧	249
8.2	选择性浸出	249
8.2.1	概述	249
8.2.2	氰化浸出	250

8.3	溶剂萃取	253
8.3.1	概述	253
8.3.2	萃取机理	255
8.3.3	溶剂萃取的应用	257
8.3.4	超临界流体萃取	258
8.4	微生物选矿	261
8.4.1	概述	261
8.4.2	微生物浸矿技术	262
8.4.3	微生物浸矿技术工业应用与发展	270
8.4.4	微生物浮选技术	273
第三篇 精、尾矿处理		275
第9章 精矿脱水		275
9.1	概述	275
9.1.1	精矿脱水的意义与作用	275
9.1.2	固体散粒物料中水分的性质	275
9.1.3	脱水方法和脱水流程	276
9.2	沉淀、浓缩	277
9.2.1	沉淀浓缩的基本原理	277
9.2.2	浓缩设备	279
9.2.3	离心沉降浓缩	283
9.3	过滤	284
9.3.1	概述	284
9.3.2	过滤设备	285
9.4	干燥	293
第10章 尾矿处理		296
10.1	尾矿的贮存与输送	296
10.1.1	尾矿沉淀池	297
10.1.2	尾矿沉淀池初期坝	297
10.2	尾矿水的净化与回水再用	299

10.2.1	尾矿颗粒及悬浮物的处理	299
10.2.2	尾矿水的净化方法	300
10.2.3	回水再用	300
第四篇 选矿过程的取样检查与选厂金属平衡		302
第 11 章 选矿过程的取样检查与选厂金属平衡		302
11.1	选矿过程的取样检查	302
11.2	选矿工艺过程的可检参数	305
11.3	选矿厂的金属平衡	308
11.3.1	工艺金属平衡	309
11.3.2	商品金属平衡	311
第五篇 选矿工艺实践		313
第 12 章 金属及非金属矿选矿工艺实践		313
12.1	黑色金属矿物分选工艺	313
12.1.1	铁矿石分选工艺	313
12.1.2	铜、铁矿石分选工艺	316
12.1.3	锰、铬矿石分选工艺	319
12.1.4	钒钛磁铁矿、钛铁矿分选工艺	320
12.2	稀有金属矿物分选工艺	321
12.2.1	钨矿、锡矿分选工艺	321
12.2.2	钽、铌矿分选工艺	323
12.3	有色及贵金属矿物分选工艺	323
12.3.1	铜、铅、锌等主要有色金属矿资源特点	323
12.3.2	硫化铜、铅、锌矿的分选工艺	324
12.3.3	有色金属氧化矿分选工艺	325
12.3.4	贵金属矿石分选工艺	326
12.3.5	难选低品位铜矿的化学分选工艺	327
12.4	非金属矿物分选工艺	329
12.4.1	萤石矿分选工艺	329

12.4.2	石墨矿分选工艺	329
12.4.3	菱镁矿分选工艺	330
12.4.4	非金属矿物的化学处理	330
12.5	煤炭分选工艺	335
12.5.1	炼焦煤分选实例	336
12.5.2	动力煤分选实例	338
参考文献	342

绪 论

选矿，现代学科中又称为矿物加工，是利用矿物间物理或物理化学性质的差异，借助各种分选设备将矿石中的有用矿物和脉石矿物分离，并达到使有用矿物相对富集的过程。选矿学是研究矿物分选的学问，是一门包括分离、富集、综合利用矿产资源的技术科学。

(1) 矿物与矿石

众所周知，地球的外壳是岩石，岩石是由一种或多种矿物组成的矿物集合体。矿物就是在地壳中经过自然的物理化学作用或生物化学作用所生产的具有固定化学成分和物理性质的自然元素（如金、石墨、硫黄）或天然化合物（如磁铁矿、黄铜矿、石英）。矿物的种类繁多，在众多的矿物中，能为人类利用的称为有用矿物。在当前的技术经济条件下，人们能够将含有有用矿物的岩石开采出来，并对其中的某些组分加以富集、利用，这类岩石就称为矿石；否则，称为岩石。地壳中，具有开采利用价值的矿石积聚区，通常称为矿床。在矿石中，除有用矿物外，还含有目前无法富集或尚不能利用的一些矿物，这些无用的矿物称为脉石。

矿石的概念是发展的，随着经济需要的增长、资源分布的变化和科学技术的发展，更多的岩石可能升格为矿石。如，目前我国，矿物集合体中含铁量达到 20% 以上，就可作为铁矿石；含铁量小于 20%，就被划为岩石。对地下开采的单一铜矿，若矿物集合体中含铜 0.5% 以上时，就可作为矿石；含铜小于 0.5%，则被划为岩石。同样，脉石矿物的界定也是相对的，它也随资源和经济技术条件的变化而变化。例如，一般矿石中的黄铁矿往往作为伴生

矿物而抛弃，但若黄铁矿含量较高时，也可选矿回收用以提硫。矿山开采过程中剥离的矿石，表外矿及尾矿中的有价成分，许多也正在被重新综合利用。

矿石的种类很多。按矿产的性质及其工业用途，矿石分为金属矿、非金属矿和可燃性有机岩。按所含金属的种类可以分为单金属矿石（即其中含有一种有价金属），如单一铜矿石或铁矿石；多金属复合矿石（即其中含有两种以上可回收的金属），如铜铅锌矿石、铅钼铁矿石等。按有价成分存在形态可分为单质，如含金、铜等自然元素的矿石；硫化矿石，如有用矿物为黄铜矿（ CuFeS_2 ）、方铅矿（ PbS ），闪锌矿（ ZnS ）等硫化物的矿石；氧化矿石，如有用矿物为磁铁矿（ Fe_3O_4 ）、赤铁矿（ Fe_2O_3 ）等氧化物的矿石；混合矿石，即既含硫化矿物又含氧化矿物的矿石；卤化物，如萤石（ CaF_2 ）。按矿石中有价成分的含量，矿石还可分为贫矿和富矿，如磁铁矿矿石，含铁大于45%者为富矿，含铁小于45%者为贫矿。按矿物的嵌布特性，矿石还可分为细粒嵌布和粗粒嵌布、均匀嵌布和不均匀嵌布。

矿石的性质包括矿石的化学成分、矿物组成、结构构造（如颗粒和集合体的大小、形状，分布以及颗粒间的连晶等）、矿石中金属元素的赋存状态、矿石的物理化学性质等。它们都与选矿密切相关。例如，根据矿石的化学成分及矿物组成，可以确定应该回收哪些有用成分（矿物及元素），应该去除哪些有害杂质（矿物及元素）；根据矿石的结构构造及有用成分的赋存状态，可以判定磨矿的单体解离粒度，矿石的可选性以及综合利用有用成分的可能性；根据矿石的物理化学性质，可以初步分析宜采用哪些选矿方法，选择最有效的选矿流程以及了解可能影响选别过程的因素等。总之，矿石的性质是选矿的重要依据。

（2）选矿的基本内容

从矿井开采出来的矿石叫做原矿（ore），原矿中的有用矿物和

无用脉石或有用矿物间通常是共生在一起的，一般不能直接进行冶炼，需要先进行加工。把原矿加以粉碎，使之彼此分离，然后，借助各种方法和设备将有用矿物加以富集，无用的脉石抛弃，才能供下一步使用。对原矿进行这一加工的过程叫做选矿（ore preparation）或矿物加工（mineral processing）。选矿承担了人工富矿的作用。例如，黑钨矿石一般含有大量的脉石，如石英，经过选矿除去大量的石英之类的脉石，使钨矿物成分得到富集，成为精矿产品。特别是一些多金属共生的矿石，其中所含各金属成分如Cu-Pb-Zn-Fe在冶炼时常常是相互为害的，只有经过选矿得到多种精矿产品后，才能分别进行冶炼。此外，选矿对冶炼的技术经济效果也是十分明显的，例如，铜精矿品位从15%提高到16%，可使冶炼回收率提高0.1%~0.15%，生产能力提高6%~8%，燃料消耗降低6%~7%；又如铁精矿品位提高1%，则高炉生铁产量可以提高2.5%，焦比下降1.5%。因此，选矿的目的就是除去矿石中所含的大量脉石及有害元素，使有用矿物得到富集或使共生的各种有用矿物彼此分离，得到一种或几种有用矿物的精矿产品。选矿对于开发矿业，充分利用矿产资源有着十分重要的意义。

在自然界，除少数矿物为液体（如汞）外，多为固体。固体矿物都具有一定的晶体结构和物理化学性质。原矿中的有用成分和有用脉石，经过选矿过程之所以能够彼此分离，其基本依据是矿物的各种物理性质、表面的物理化学性质及化学性质所存在的差异。直接与选矿有关的矿物性质主要有密度、磁性、导电性、润湿性等。密度是指单位体积矿物的质量，它是重选的依据。密度不同的矿物粒子在运动的介质中（水、空气与重液）受到流体动力和各种机械力的作用，造成适宜的松散分层和分离条件，从而使不同密度的颗粒分离。矿物的磁性是它被磁铁吸引或排斥的性质。一般矿物可分为强磁性矿物（如磁铁矿等）、弱磁性矿物（如赤铁矿等）和非磁性矿物（如金刚石、赤铜矿等）。矿物磁性是磁选的依据，不同磁

性的矿物在磁场中受到不同的作用力而分离。导电性是指矿物的导电能力。一般矿物有良导体、半导体和非导体之分。它是电选的依据。当矿物通过电选机的电场时，由于矿物的电导率不同，作用于矿物上的电力就不同，因而使矿物分离。润湿性是指矿物能被水润湿的性质。易被水润湿的矿物称为亲水性矿物（如石英、方解石等）。反之，称为疏水性矿物（如辉铜矿、石墨等）。矿物的自然润湿性主要取决于矿物的结晶构造。不同润湿性的矿物具有不同的可浮性，因此，润湿性是浮选的依据。疏水性矿物选择性地附着于气泡上，达到与亲水矿物的分离。

选矿实践中，往往还采取人为的方法来扩大矿物间物理性质或物理化学性质的差异，以提高分选效率。如用磁化焙烧的方法改变矿物磁性；用酸和盐类处理矿物表面，选择性地改变矿物的导电性；用各种浮选药剂改变矿物的自然润湿性等。除此之外，矿物的形状、粒度、硬度、颜色、光泽等也往往是某些特殊选矿方法的依据。

根据不同的矿石类型和对选矿产品的要求，在实践中可采用不同的选矿方法。常用的选矿方法有重选法、磁选法、电选法和浮选法，其中浮选法应用最广。有色金属矿（铜、铅、锌、硫、钼等矿石）主要用浮选处理；某些黑色金属、稀有金属和一些非金属矿（石墨、磷石灰等）等也用浮选选别。重选法广泛地应用于黑色、有色、稀有金属和煤的分选；磁选法多用于黑色金属（铁、锰、铬）和稀有金属的分选，也可用于从非金属矿物原料中除去含铁杂质，还可用于净化生产、生活用水以及重介质选煤中磁铁矿的回收；电选法用于有色金属矿石和稀有金属矿石、黑色金属矿石的分选，还用于非金属矿石（如煤粉、金刚石、石墨、石棉、高岭土和滑石等）的分选。目前，主要用于混合粗精矿的分离和精选；如白钨矿和锡石的分离，锆石英的精选、钽铌矿的精选。除上述常用的四种选矿方法外，还有光电选矿法、化学选矿法及其他特殊选矿

法。各种选矿方法有时单独使用，有时是几种方法的联合应用。

一般选别单一矿石、硫化矿石、粗粒嵌布矿石要比选别多金属复合矿石、氧化矿石、细粒嵌布矿石简单一些。

矿石的选别处理过程是在选矿厂中完成的。不论选矿厂的规模大小，一般都包括以下三个最基本的工艺过程。

① 矿石分选前的准备作业。包括原矿的破碎、筛分、磨矿、分级等工序。本过程的目的是使有用矿物与脉石矿物以及各种有用矿物相互间单体解离，为下一步的选矿分离创造适宜的条件。

② 分选作业。利用重选、磁选、电选、浮选或其他选矿方法将有用矿物同脉石分离，并使有用矿物相互分离，获得最终选矿产品（精矿、尾矿，有时还产出中矿）的工序。

③ 选后产品的处理作业。包括各种精矿、尾矿产品的脱水，细粒物料的沉淀浓缩、过滤、干燥和洗水澄清循环复用等。

有的选矿厂根据矿石性质和分选的需要，在分选作业前设有洗矿预选抛废以及物理、化学预处理，如赤铁矿的磁化焙烧、氧化铜矿的离析焙烧等作业。

矿石经过分选作业处理后，可得到精矿（concentrate）、中矿（middling）和尾矿（tailing）三种产品。其中有用矿物含量较高的最终产品叫做精矿。最终精矿的主要成分及杂质含量都要达到国家标准，才称为合格精矿。分选过程中得到的尚需进一步处理的中间产品，叫做中矿。剩余的有用矿物含量很低，不需进一步处理（或技术经济上不适于进一步处理）的产品，叫做尾矿。

表示矿石连续加工的工艺过程，称为流程。用线和图表示流程时，叫工艺流程图。只表示流程的“骨干”而不记载流程细节者，称为原则流程图。若用主要设备和辅助设备表示的流程图，称为机械流程图或机械联系图。

（3）选矿常用的工艺指标

① 品位（grade） 品位是指矿石中某种金属或有用组分的多

少，通常用百分数（%）表示。有的用每吨或每立方米矿石中含多少克表示（g/t、g/m³）。矿石的品位以取样化验的结果求得。

原矿品位指原矿中所含金属量占原矿数量的百分比，一般用 α 表示。原矿品位是反映原矿质量的指标之一，也是选矿厂金属平衡的基本数据之一。

精矿品位是指精矿中所含金属量占精矿数量的百分数，一般用 β 表示。精矿品位是反映精矿质量的指标之一。

尾矿品位指尾矿中所含金属量占尾矿数量的百分数，一般用 θ 表示。尾矿品位反映了选矿过程中金属的损失情况。

② 产率（yield） 选矿过程中，得到的某一产品的质量与原矿质量的百分比，叫该产品的产率，通常以 γ 表示。

③ 回收率（recovery） 精矿中 useful 成分或金属的数量与原矿中该有用成分或金属的数量的百分比，称为回收率，常用 ϵ 表示。回收率是评定分选作业效率的一项重要指标，它反映了选矿过程中金属的回收程度，选矿技术水平和选矿工作质量。选矿过程要在保证精矿质量的前提下，力求提高选矿回收率。

实际回收率可用下式计算：

$$\epsilon = \frac{\gamma\beta}{100\alpha} \times 100\%$$

式中 α ——原矿品位，%；

β ——精矿品位，%；

γ ——精矿产率，%。

④ 选矿比（ratio of concentration） 原矿处理量与精矿数量的比值，指每选出一吨精矿所需要的原矿吨数，常以倍数表示。

⑤ 富矿比或富集比（enrichment ration） 精矿中 useful 矿物的品位与原矿中 useful 矿物品位的比值。它表示选矿过程中有用成分的富集程度。富矿比和回收率越高，说明选矿效率越好。

⑥ 金属平衡（metal balance 或 material balance） 某作业给料

的重量或其中的金属（或某成分）含量与各产品之间具有的平衡关系。如入厂原矿中的金属含量应等于出厂精矿和尾矿中的金属含量之和。

(4) 选矿在国民经济中的地位和作用

自然界赋予人类的众多矿产资源中，绝大多数是需要经过选择和加工才能利用的。选矿就是对固体矿产资源进行加工处理的重要的工业过程，其目的是获取有用物质，并进行综合利用。

从宏观上讲，在矿物原料加工的整个过程中，选矿是介于采矿与化工、冶金之间的学科。选矿作为一种有效的分离手段，早已广泛地应用在黑色金属及有色金属冶金工业、煤炭工业、化学工业、硅酸盐、陶瓷与建筑材料工业。近年来在金属的再生工业及环境保护领域，选矿技术的重要性也在不断提高。

选矿在冶金工业中得到了最早、最广泛的应用。由于选矿可使矿石中的金属含量富集几倍至几百倍，而且在大多数情况下与冶炼过程相比，选矿成本低，因此在技术经济上有很大的优越性。通过选矿可以降低冶炼成本。由于脉石被大部分排除，减少了炉渣量，不仅降低了能耗，也相应地减少了炉渣中的金属损失，使冶炼回收率得以提高。选矿技术的应用和发展使矿石的工业品位的下限大幅度降低，这就使大量的原来被抛弃的脉石变为可利用的资源，相应地增加了金属矿产品的回收率。

我国铁矿石的地质储量比较丰富，但贫矿石很多。在仅有的少量富矿石中，约有5%的矿石因含杂质过高不能直接冶炼。除了矿石贫之外，其矿物颗粒嵌布细，组分复杂也给矿石的开发利用带来困难。矿石储量大，但“贫、细、杂”的特点决定了我国绝大多数铁矿石要经选矿处理。钢铁工业生产的实践表明，高炉炼铁实行“精料方针”，可以降低焦炭和石灰的用量，提高高炉利用系数。为此，在最佳选、冶经济效益的前提下，必须使铁矿石经过选矿，尽量提高铁精矿品位。