

中国现代科学全书 ●

CHINESE ENCYCLOPAEDIC SERIES OF MODERN SCIENCES ●

矿业工程学

MINING ENGINEERING

● 王淀佐 卢寿慈 陈清如 张荣曾 编著

矿物加工学

MINERAL PROCESSING

中国矿业大学出版社

中国现代科学全书·矿业工程学

矿物加工学

王淀佐 卢寿慈 编著
陈清如 张荣曾

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书主要内容由三大部分组成:第一部分,矿物加工学概述;第二部分,矿物加工学的理论基础和单元技术;第三部分,成就与展望,介绍近年来国外在粉碎、筛分、重选、浮选和化学处理等领域的最新进展以及我国在矿物加工领域所取得的研究开发应用成果和成就。最后讨论了矿物加工学面临的问题和发展趋势,并对 21 世纪矿物加工技术的发展作了展望。

图书在版编目(CIP)数据

矿物加工学/王淀佐等编著. —徐州:中国矿业大学出版社,2003.4

ISBN 7 - 81070 - 696 - 9

I. 矿... II. 王... III. 选矿—基本知识
IV. TD9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 028421 号

书 名 矿物加工学

编 著 王淀佐 卢寿慈 陈清如 张荣曾

责任编辑 解京选 褚建萍

责任校对 崔永春

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

排 版 中国矿业大学出版社排版中

印 刷 江苏徐州新华印刷厂

经 销 新华书店

开 本 850×1168 1/32 印张 15.375 字数 397 千字

版次印次 2003 年 4 月第 1 版 2003 年 4 月第 1 次印刷

印 数 1~1100 册

定 价 35.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

作者简介



王浣佐教授,1934年出生,1961年毕业于中南工业大学(长沙)。中国科学院院士,中国工程院院士。

曾任中南工业大学(现中南大学)教授和北京有色金属研究总院教授,1998年任中国工程院副院长。

主要研究课题:矿物浮选和浮选药剂;硫化矿浮选电化学与电位浮选技术;细粒浮选和矿粒絮凝分散;浮选溶液化学;硫化矿生物提取科学与工程;矿冶过程应用表面化学;矿山冶金废渣废水处理等。

发表著作8部,论文300多篇。



卢寿慈教授,1933年出生,1955年毕业于北京矿业学院。1960年于莫斯科有色金属及黄金学院研究生毕业,获技术科学副博士学位。曾先后在中南矿冶学院及武汉钢铁学院任教,1992年至今为北京科技大学教授。

长期从事矿物加工及颗粒技术教学及研究工作。主要科研方向是微细粒分选理论及工艺、颗粒分级、分散及表面改性技术以及工业水处理等。主要著作:《矿物浮选原理》、《矿物颗粒分选工程》、《界面分选原理及应用》、《粉体加工技术》及《Interfacial Separation of Particles》等。

B 694/17



陈清如教授,1926年出生,中国工程院院士。1952年毕业于唐山交通大学。1958年至1960年在苏联莫斯科矿业学院进修。1952年起在中国矿业大学从事矿物加工和利用的教学与科研工作。

现任《煤炭学报》、《洁净煤技术》编委和美国《颗粒科学和技术》杂志编委。

陈教授创立了“潮湿细粒煤的粒群透筛理论”和“空气重介质流化床干法选煤稳态流化理论”。在世界上首先建立了第一座空气重介质床干法选煤厂。有多项成果获国家级奖励。

发表学术论文150余篇,其中50余篇为国际学术杂志和会议论文,出版著作9部。



张荣曾教授,1932年出生,江西省临川县人。1953年毕业于中国矿业学院,现为中国矿业大学教授、博士生导师。

张荣曾教授是我国水煤浆燃料制备技术的开拓者与奠基人之一,也是国内矿物加工领域的著名学者。曾荣获国家科技进步3等奖1项、省部级1等奖2项、2等奖2项及1997年能源大奖和2001年全国优秀博士论文导师奖。主要著作:《重力选矿学》、《水煤浆制浆技术》、《选煤实用数理统计》、《重力选矿原理》等7本。他历任国家水煤浆工程技术研究中心制浆技术研究所所长、中国颗粒学会理事、中国煤炭学会选煤专业委员会委员等社会职务。

前 言

根据这套丛书编写出版的目的,本书重点介绍“矿物加工学”这门技术学科的主要科学基础和工程技术内容。具体介绍矿物加工学的发展沿革、矿物加工学的学科体系构成和矿物加工学在国民经济及社会发展中的地位与作用,并举例介绍了我国主要选矿、选煤厂技术工艺;介绍加工物料的表征、解离粉碎、筛分分级、物理分选(重选、磁电选、光电选、放射选等)、浮选及其他界面分选技术,物料的表面改性、化学加工、造粒及成型技术以及它们所涉及的物理、化学基础知识,介绍了一些单元技术过程的数学模型与模拟;介绍了复合物理场中颗粒运动与分选、微细颗粒在静电场中的行为与分离技术、微细颗粒的分选理论及应用、复杂多金属硫化物电化学调控浮选、药剂的分子设计与开发、电化学催化及调控技术与矿物浮选、矿物溶解提取以及流化床理论与煤的干法分选和水煤浆燃料技术等。

本书由王淀佐、卢寿慈、陈清如、张荣曾(按姓氏笔画排序)四位在国内矿物加工学领域卓有成就的教授为主编写,他们各人所在学术梯队的一些同志参加了编写工作,在各章节的后面,都分别列出撰写者,可见本书是集体工作的结晶。按照本书的题目,本应有更多有代表性的学者参加编写工作,由于种种客观原因,未能做到。因此,尽管参加编写的人数不少,这本书仍然只是“几家之言”,是从有关的一些角度和侧面反映矿物加工学的内容和成就。有许多优秀研究成果和成功的生产实践未能包括进来,书中对有代表性的选矿(煤)厂的介绍、资料和数据都是转引自相关的出版物,不一定很准确或者没有反映出最新的动态,这是需要说明并希望得

到理解的。

改变目前按照生产工艺流程顺序介绍矿物加工学内容的习惯,试图以理论基础和单元技术为主要框架,辅以简单介绍各类矿物加工的典型生产工艺流程,这是本书的一种探索。我们认为按照这个思路编写供本科专业使用的教材,可能更符合当前的需要。

本书的内容难免有不当之处,恳请读者批评指正。

编写者

2002 年 12 月

目 录

第一篇 总 论

第一章 矿物加工学概述.....	3
第一节 矿物加工学概述.....	3
第二节 矿物加工学在国民经济及社会发展 中的地位 and 作用.....	7
第三节 矿物加工工程学科体系	10
第二章 我国主要选矿、选煤厂工艺流程.....	16

第二篇 矿物加工学的理论基础和单元技术

第三章 加工物料的表征、解离粉碎和筛分分级.....	45
第一节 矿物加工对象的鉴别与表征	45
第二节 解离与粉碎	71
第三节 筛分与分级	93
第四章 物料分选富集.....	151
第一节 物理分选.....	151
第二节 界面分选理论及应用	183
第三节 泡沫浮选及选择性高分子絮凝.....	198

第五章 物料的表面改性、化学加工与成型	218
第一节 矿物的表面改性	218
第二节 矿物原料的化学加工处理	244
第三节 造粒成型	272
第四节 煤的造粒与成型	284
第六章 过程的数学模型	301
第一节 矿石颗粒粒度分布的数学模型	301
第二节 筛分与分级的数学模型	304
第三节 破碎与磨矿的数学模型	306
第四节 重力分选过程的数学模型	311
第五节 浮选过程的数学模型	314

第三编 进展和展望

第七章 我国矿物加工学某些研究应用进展	325
第一节 复合物理场中颗粒运动与分选	325
第二节 微细颗粒的分选理论及应用	342
第三节 复杂多金属硫化矿电化学调控浮选	358
第四节 药剂分子设计和特效药剂的开发	382
第五节 电化学催化与矿物浮选、矿物溶解提取	399
第六节 流化床理论与煤的干法分选	407
第七节 水煤浆燃料制备技术	418
第八节 疏水聚团分选	439
第九节 微细颗粒在静电场中的行为与分离技术	459
参考文献	476

第一篇 总论

第一章 矿物加工学概述

第一节 矿物加工学概述

随着“矿物加工学”的科学技术内容、处理对象和产品品种的不断深化,这个专业领域的名称也几经改变。在我国目前工业界沿袭历史习惯,通常称为“选矿”。在国内外学术界及在有关科技著作和文献中,则由早期“选矿”(Ore Dressing)逐步发展为“矿石加工”(Ore Processing),后又定名为“矿物加工”(Mineral Processing)。大英百科全书中,载有对这三个不同词汇的阐述界定,但在实际使用当中,常常不容易也无必要作出严格的划分。当今出版的专业刊物,召开的专业学术会议和发表的论文报告,比较正式的都是用“矿物加工”作为这一专业领域的名称。国家学位委员会制定的专业目录中,专业名称已经定名为“矿物加工工程”。

本书名称采用“矿物加工学”,试图尽可能比较全面系统地介绍这一学科的产生及发展过程,反映出这个学科的科学基础和主要单元技术,介绍近年来国际上尤其是我国取得的研究开发应用成果和成就。由此我们还可以通过以往的“选矿学”著作的内容和体系相比较,研究它们之间的异同,使“矿物加工学”的内容范围和体系更加符合当今研究开发、工业生产以及专业学校培养人才的需要,有助于事业的发展。

为方便非选矿专业的读者阅读本书,下面对“矿物加工学概述”这一学科进行简要概述。

地壳由岩石构成,岩石是矿物的集合体。岩石中有价矿物成分

的含量在当前技术经济条件下,可以提取利用者称为“矿石”。矿石中除含有一定量的有价成分外,还含有大量暂时“无用或无价”的其他矿物,通称为“脉石”。矿山采出的原始产品称“原矿”,其中含有大量的脉石。

把矿石加以破碎,使有价矿物与脉石矿物彼此解离开,然后,将有价矿物富集起来,供冶金、化工、建材工业用作原料、材料及燃料,并抛弃其中绝大部分脉石和有害杂质的工艺过程,称“选矿”、“矿物加工”或“矿物处理”。选出、富集了有价矿物的产品供作冶金、化工原料时称“精矿”,分出的可暂时抛弃的无价部分称“尾矿”或“矸石”。若原矿中含有多种有价矿物,则通过矿物加工可将它们分别选出、富集起来,成为相应的多种产品。虽然有价目的矿物已富集在精矿中,但由于选矿过程不可能将有价目的矿物与脉石完全绝对分开,所以精矿产品中也混有脉石,而尾矿中也必然会含有少量的有价矿物。原矿与产品中有价目的矿物的含量称矿石的“品位”,选矿过程中还会产生一部分品位介于精矿与尾矿之间的中矿。此外,选矿过程还包括按粒度的分选作业,称“筛分”与“分级”。在选矿过程中按粒度分级是为了适应不同分选作业的需要,同时粒度规格也是产品质量的一个指标。由于尾矿中仍含有少部分有价矿物,所以它只是暂时被搁置,随着技术的进步,还可以再加工,从中回收有价矿物,或改作其他用途。事实上目前世界上就有许多选矿厂在处理过去老厂留下的尾矿,例如美国的克来马克斯钼矿选矿厂与加拿大的萨利文矿铅锌和铜铅锌选矿厂等。

最早,矿物加工所处理的对象是金属矿石。随着处理对象扩展到非金属矿物原料和煤炭,处理方法也随之扩展至各种化学提取分离技术。在 20 世纪初期,按照 A. F. Taggart 的分类,矿物加工包括三个分支,即:物理选矿、矿物的化学提取处理及化石燃料加工。化石燃料加工并不包括石油、天然气、油母页岩加工,只涉及煤炭的物理与化学加工。当今,矿物加工的内容又扩展到包括金属与

非金属矿石的物理选矿、冶炼前的团矿与烧结、矿物的化学加工处理、矿粒的化学加工改性、选煤与煤炭的物理加工。这些过程一般是采用物理或物理化学方法,传统的技术是在不改变这些矿物本身的基本化学组成情况下,从原矿中分离富集和提取有价矿物,或者将它们进一步加工成高附加值的产品,例如加工成各类结构材料,直至加工成具有独特性能或优异性能的功能材料和复合材料。

近年来,适应传统工艺处理的富原矿资源日益减少。贫矿、“表外矿”(未圈入可采范围的贫矿)和组分复杂、加工处理困难的矿产资源的利用越来越迫切。一些新的技术被开发应用,在金属矿领域,各种“堆浸”和“生物浸出”技术已有显著发展。这一由传统的采矿、冶金、选矿和生物工程学科交叉组成的新工艺,未来将有更大的发展。浸出工艺的产品不是矿物,而是纯金属材料。

煤炭业通称矿业,但煤炭并非典型矿物,而是由三亿多年前古生植物残骸累积,经页岩、泥浆和淤泥覆盖,在地壳变质作用下形成的层状岩石。煤中的有价部分为其中的有机质。成煤植物中自身含有的矿物质、煤炭沉积过程中从外部带入的矿物质,以及开采过程中混入的煤层顶、底板及夹层岩石,都属于不可燃的杂质。由矿井开采出的煤炭产品称“原煤”。煤炭的质量习惯上不是以其中有机质的含量(品位),而是按它的发热量或燃烧后的剩余残渣——“灰分”的含量来评价的。灰分愈低,质量越好。因此,选煤过程的产品,包括精煤、中煤及矸石,是按照它们灰分的高低来划分的。不同用户对煤炭不但有灰分的要求,而且对粒度规格也有限制,将原煤按粒度分级成为粒度规格不同的产品简称“筛选”。煤炭的物理加工除选煤(习惯上也称洗煤)外,还包括将粉煤成型,加工成便于应用的型煤,以及将煤炭加工成一种高浓度水煤浆燃料,使传统的固体煤炭转化为一种流体燃料。

下面首先介绍传统的(经典的)物理选矿的基本内容。原矿中

的有价矿物是呈各种形态以不同大小嵌布在矿石中的,要从中选出高品位的精矿,通常先将原矿进行破碎,甚至要进一步磨矿,使它成为更细的颗粒。破碎后的细颗粒所含的有用矿物的品位必然会有高有低,这样才有可能将它们分离成品位不同的产品。所以,选矿过程分为使有价矿物与脉石杂质相互解离和将其中品位高的颗粒富集成为精矿产品的分选两个基本环节。破碎、磨矿的细度不够,不足以得到品位合格的精矿与可以抛弃的尾矿;但是过细,不但没有必要,还会增加能耗和下一步分选作业的困难。因此,掌握适当的解离度是十分重要的。

品位不同的颗粒,由于其物质组成不同,必然会使它们的物理性质或表面物理化学性质间出现差异。选矿(煤)过程的分选作业,正是依据它们性质上的这些差异将它们分离的。例如,人工拣选时,就是依据颗粒的颜色与光泽不同,从原矿中挑选出脉石或精矿。绝大多数的机械选矿方法,都是在流动介质中进行的,性质不同的颗粒,在外力场的作用下,在流场中的运动状态各不相同。依据这一点,就可以将它们分开。选矿过程中所用的分选介质有空气和水、水溶液、悬浮液或磁流体等。如果所用的分选介质不是空气,选矿产品还必须先经过脱水,脱水实质上也是一种分离作业,即固、液分离。所以矿物加工中的分选作业可通称为分离。物理选矿可利用的矿物性质及常用选矿方法见表 1-1。

表 1-1 可利用的矿物性质及常用选矿方法

所依据矿物性质	选矿方法	工艺名称举例
密度	重力选矿	洗矿、分级、重介质选矿、跳汰、摇床、溜槽分选、螺旋选矿、气力分选等
磁性(导磁性)	磁力选矿	弱磁场力分选、强磁场力分选、高梯度磁场力分选、超导磁选机分选等
导电性	电选	高压静电选、摩擦电选

续表 1-1

所依据矿物性质	选矿方法	工艺名称举例
颗粒表面物理化学性质(润湿性)	浮选、絮凝	泡沫浮选、表层浮选、油浮选、油团浮选、液-液分离、离子浮选、界面选矿、选择性絮凝
颜色、光泽、放射性、导电性、磁性等等	拣选	手选、X射线拣选、放射性拣选、磁性拣选、导电性拣选、光中子检测拣选等等
粒度	按粒度分选	筛分、分级
形状	按形状分选	按形状筛分
摩擦系数	摩擦与弹跳	摩擦与弹跳分选
溶解度	化学选矿	浸出、沉淀分离、溶剂萃取或吸附或电解

从表 1-1 中可以看出,矿物加工涉及的学科领域很广,包括物理、化学、物理化学、力学、矿物学及化工、材料、电气与电子技术等许多方面。

随着世界经济的发展,地球上可供人类使用的资源也日趋贫乏,为使国民经济可持续发展,将对环境带来污染的工业与生活废弃物加工成可用产品,已是当务之急。这些物料虽然不是矿物,但却是重要的资源。采用矿物加工技术,可从中提取有价部分,同时净化了环境,减少了污染。所以,近年来,矿物加工的范围已扩展到这些领域。

第二节 矿物加工学在国民经济及社会发展中的地位 and 作用

人类在漫长的生存与发展过程中所需要的金属、非金属矿物以及一次能源,大部分是从地下资源中获取的。各种金属在地壳中储量的估计值见表 1-2。

表 1-2 各种金属在地壳中的蕴藏量

元素	蕴藏量/%	3.5 km 内蕴藏量/t	元素	蕴藏量/%	3.5 km 内蕴藏量/t
(氧)	46.4		钒	0.014	$10^{14} \sim 10^{15}$
硅	28.2	} $10^{16} \sim 10^{18}$	铬	0.010	} $10^{13} \sim 10^{14}$
铝	8.2		镍	0.0075	
铁	5.6		锌	0.0070	
钙	4.1		铜	0.0055	
钠	2.4		钴	0.0025	
镁	2.3	$10^{16} \sim 10^{18}$	铅	0.0013	} $10^{11} \sim 10^{13}$
钾	2.1		铀	0.00027	
钛	0.057	} $10^{15} \sim 10^{16}$	锡	0.00020	
锰	0.095		钨	0.00015	
钼	0.043		汞	8×10^{-6}	
锶	0.038		银	7×10^{-6}	} $< 10^{11}$
稀土	0.023		金	$< 5 \times 10^{-6}$	
锇	0.017	$10^{14} \sim 10^{16}$	铂族金属	$< 5 \times 10^{-6}$	

从表 1-2 中可以看出,前 8 种金属在地壳中的蕴藏量达到 99% 以上,其中硅和氧占 74.6%,而工业上重要的金属含量却很少。如果含重要金属的矿物在整个地球上呈均匀分布的话,就会因极其分散而不可能经济地开采利用。由于各种地质作用与自然现象的作用,使其中一些金属矿物富集成为可供开采利用的矿床。但是,只有少数富含高价矿物的原矿,即“富矿”可直接冶炼、燃用或处理;大部分由于矿山采出的原矿品位太低,满足不了冶炼技术的需要,或者从技术角度虽可行,但是这将使矿石的运输费用和冶炼、处理设备的负荷大大增加,在经济上显然是不合理的。而且有许多矿物是共生在一起的,只有将它们分别选出才能加以利用。所