

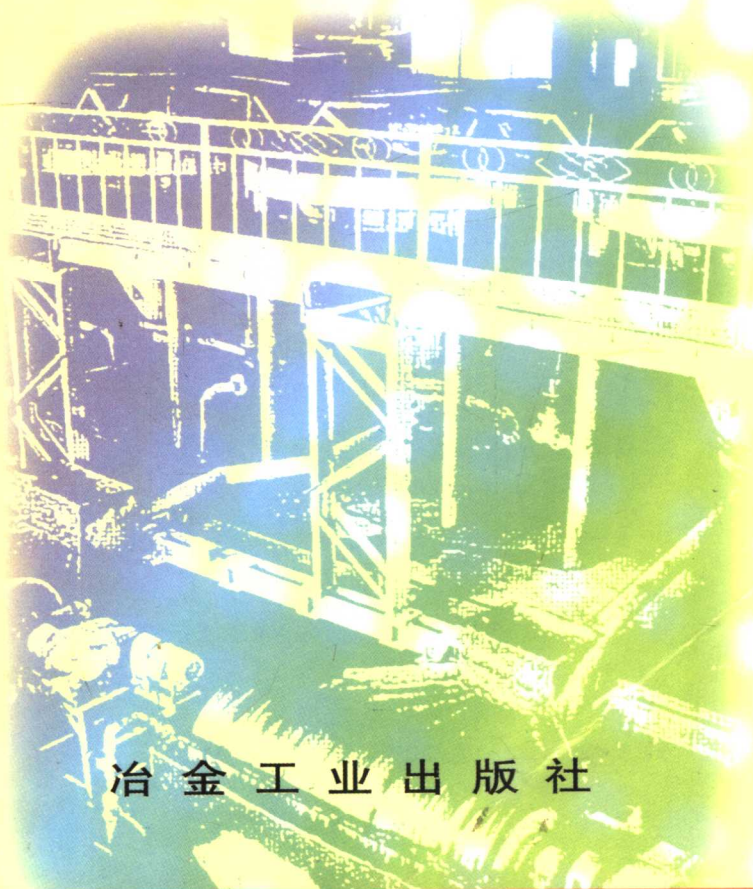


劳动和社会保障部培训就业司推荐
冶金行业职业教育培训规划教材

磁电选矿技术

CIDIAN XUANKUANG JISHU

陈 斌 主编



冶金工业出版社

劳动和社会保障部培训就业司推荐
冶金行业职业教育培训规划教材

磁电选矿技术

主 编 陈 斌
副主编 刘自力
审 稿 李世厚 严小陵

北 京
冶金工业出版社
2007

内 容 提 要

本书为冶金行业职业技能培训教材,是参照冶金行业技能标准和职业技能鉴定规范,根据冶金企业的生产实际和岗位群的技能要求编写的,并经劳动和社会保障部职业培训教材工作委员会办公室组织专家评审通过。

全书共分8章,主要包括绪论、磁选的理论基础、弱磁场磁选设备、强磁场磁选设备、电选的基本理论、电选设备、磁电选矿的实践应用、磁电选实验操作技术等。

本书也可作为职业技术学院相关专业的教材或工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

磁电选矿技术/陈斌主编. —北京:冶金工业出版社,
2007.1

冶金行业职业教育培训规划教材

ISBN 978-7-5024-4012-1

I. 磁… II. 陈… III. 磁力选矿 IV. TD924.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 077974 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)

责任编辑 俞跃春 美术编辑 王耀忠

责任校对 王贺兰 李文彦 责任印制 丁小晶

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2007年1月第1版,2007年1月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 12.25印张; 325千字; 183页; 1-3000册

29.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

冶金行业职业教育培训规划教材

编辑委员会

主 任 王子林 中国钢协人力资源与劳动保障工作委员会教育培训研究会
主任委员;唐山钢铁公司 副总经理

曹胜利 冶金工业出版社 社长

副主任 董兆伟 河北工业职业技术学院 院长

鲁启峰 中国钢协人力资源与劳动保障工作委员会教育培训研究会
副主任委员;中国钢协职业培训中心 副主任

顾 问 北京科技大学 曲 英 王筱留 袁 康 施东成
委 员

首钢总公司	舒友珍	何智广	宝山钢铁公司	杨敏宏
太原钢铁公司	贾宝林	孟永钢	武汉钢铁公司	孙志桥
马鞍山钢铁公司	王茂龙	陈 宣	本溪钢铁公司	张春雨
唐山钢铁公司	宋润平	冯柄晓	江苏沙钢公司	黄国刚
济南钢铁公司	陈启祥	赵树俭	天津天铁公司	王金铭
南京钢铁联合公司	陈龙宝	朱朝全	钢协培训中心	宋 凯
承德钢铁公司	魏洪如	高 影	济源钢铁公司	靳沁萍
石家庄钢铁公司	侯 敏	冷学中	滦河集团公司	王爱民
首钢迁安钢铁公司	王宝军	王 蕾	河北冶金研究院	彭万树
邯郸钢铁公司	张晓力	李 阳	河北冶金设计院	周建宏
宣化钢铁公司	张聪山	李豪杰	港陆钢铁公司	赵福桐
淮阴钢铁公司	刘 瑾	王灿秀	邯钢衡水薄板厂	魏虎平
邢台钢铁公司	张力达	孙汉勇	半壁店钢铁公司	刘春梅
纵横钢铁公司	王建民	阚永梅	鹿泉钢铁公司	杜会武
河北工业职业技术学院	袁建路	李文兴	河北立国集团	郭志敏
山西工程职业技术学院	王明海	史学红		
冶金工业出版社	宋 良	(010-64027900, 3ba@cnmip.com.cn)		

序

吴溪淳

改革开放以来,我国经济和社会发展取得了辉煌成就,冶金工业实现了持续、快速、健康发展,钢产量已连续数年位居世界首位。这其间凝结着冶金行业广大职工的智慧 and 心血,包含着千千万万产业工人的汗水和辛劳。实践证明,人才是兴国之本、富民之基和发展之源,是科技创新、经济发展和社会进步的探索者、实践者和推动者。冶金行业中的高技能人才是推动技术创新、实现科技成果转化不可缺少的重要力量,其数量能否迅速增长、素质能否不断提高,关系到冶金行业核心竞争力的强弱。同时,冶金行业作为国家基础产业,拥有数百万从业人员,其综合素质关系到我国产业工人队伍整体素质,关系到工人阶级自身先进性在新的历史条件下的巩固和发展,直接关系到我国综合国力能否不断增强。

强化职业技能培训工作,提高企业核心竞争力,是国民经济可持续发展的重要保障,党中央和国务院给予了高度重视。在2003年的全国人事工作会议上,中央再一次明确了人才立国的发展战略,同时国家已经着手进行终身学习法的制定调研工作。结合《职业教育法》的颁布实施,职业教育工作将出现长期稳定发展的新局面。

为了搞好冶金行业职工的技能培训工作,河北工业职业技术学院同冶金工业出版社和中国钢协职业培训中心密切协作,联合有关的冶金企业和职业技术学院,编写了这套冶金行业职业教育培训规划教材,并经劳动和社会保障部职业培训教材工作委员会办公室组织专家评审通过,给予推荐。河北工业职业技术学院的各级领导和教师在时间紧、任务重的情况下,克服困难,辛勤工作,在有关单位的工程技术人员和教师的积极参与和大力支持下,出色地完成了前期工作,为冶金行业的职业技能培训工作的顺利进行,打下了坚实的基础。相信本套教材的出版,将为企业生产一线人员的理论水平、操作水平和管理水平的进一步提高,企业核心竞争力的不断增强,起到积极的推进作用。

随着近年来冶金行业的高速发展,职业技能培训工作也取得了巨大的成绩,

大多数企业建立了完善的职工教育培训体系,职工素质不断提高,为我国冶金行业的发展提供了强大的人力资源支持。我个人认为,今后的培训工作重点,应注意继续加强职业技能培训工作者的队伍建设,继续丰富教材品种,加强对高技能人才的培养,进一步加强岗前培训,加强企业间、国际间的合作,开辟新的局面。

展望未来,任重而道远。希望各冶金企业与相关院校、出版部门进一步开拓思路,加强合作,全面提升从业人员的素质,要在冶金企业的职工队伍中培养一批刻苦学习、岗位成才的带头人,培养一批推动技术创新、实现科技成果转化的带头人,培养一批提高生产效率、提升产品质量的带头人;不断创新,不断发展,力争使我国冶金行业职业技能培训工作跨上一个新台阶,为冶金行业持续、稳定、健康发展,做出新的贡献!

前 言

新技术的迅猛发展和经济全球化趋势的日益显现,经济社会发展的关键要素将会更多地依赖于人力资源,依赖于人的知识和技能,依赖于对新技术的掌握和劳动者素质的提高。西方工业化国家的发展实践也早已证明了这一点。我国改革开放后在技能人才的培养和使用方面有了较大的发展,但由于观念、体制等各种因素的制约,这种发展与我国经济社会发展的速度要求相比,还存在着较大的差距,突出表现为高级技能人才奇缺,供求矛盾十分尖锐,并伴有比较严重的结构失衡,企业对技能型人才的需求十分迫切。

高技能人才的教育培训,不仅要有资金投入和加快师资建设,而且还要有教材建设。教育培训,首先要解决教材问题。

本书以培养具有较高选矿职业素质和较强职业技能、适应选矿厂生产及管理需要的高级技术应用型人才为目标,贯彻理论与实际相结合的原则,力求体现职业教育针对性强、理论知识的实践性强、培养应用型人才的特点,在系统阐明磁选、电选技术的基本理论和基本知识的同时,注重使学员学会理论知识的应用和实践技术的操作,提高分析解决问题的能力。

目录中带有“*”的章节为高等职业技术教育选学内容,其余章节为高等职业技术教育及技师培训必学内容。

本书由昆明冶金高等专科学校陈斌担任主编,刘自力任副主编。参加编写工作的有陈斌(编写了第1章、第2章、第5章和第8章),刘自力(编写第3章、第4章),杨家文(编写第6章、第7章)。昆明理工大学李世厚和昆明冶金研究院严小陵对全书进行了审阅,在此表示感谢。

本书在编写过程中引用了大量的文献资料,谨向各位作者、出版社致以诚挚的谢意!

由于编者水平所限,书中不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者
2006年9月

目 录

1 绪论	1
2 磁选的理论基础	3
2.1 磁选基本原理	3
2.1.1 磁选过程及磁分离的基本条件	3
2.1.2 磁场的物理概念	4
2.1.3 矿物的磁化、磁化强度和磁化系数	5
2.1.4 磁感应强度概念	7
2.2 回收磁性颗粒所需要的磁力	8
2.2.1 均匀磁场、不均匀磁场和磁场梯度	8
2.2.2 回收磁性颗粒需要的磁力计算及其应用条件	9
2.3 矿物的磁化	11
2.3.1 矿物磁性分类	11
2.3.2 强磁性矿物的磁性特点	16
2.3.3 影响强磁性矿物磁性的因素	17
2.3.4 弱磁性矿物的磁性特点	23
小结	24
复习思考题	24
3 弱磁场磁选设备	25
3.1 弱磁场磁选设备的磁系及分类	25
3.1.1 开放磁系	25
3.1.2 磁选设备的分类	26
3.2 湿式弱磁场磁选设备	27
3.2.1 永磁筒式磁选机	27
*3.2.2 电磁磁选机	34
3.2.3 磁力脱水槽	36
*3.2.4 旋转磁场磁选机	41
3.2.5 预磁器和脱磁器	42
3.3 干式弱磁场磁选设备	45
3.3.1 永磁双筒磁选机	45
3.3.2 磁滚筒(又叫磁滑轮)	48
3.3.3 除铁器	50
3.4 弱磁场设备的操作与维护	52

3.4.1 湿式弱磁场设备的操作与调整	52
3.4.2 干式弱磁场磁选机的操作调整	54
小结	56
复习思考题	56
4 强磁场磁选设备	58
4.1 强磁场磁选设备的磁系	58
4.1.1 强磁场磁选设备的磁系类型	58
4.1.2 强磁场磁选设备的磁路结构	60
4.2 干式强磁场磁选设备	61
4.2.1 干式圆盘式强磁选机	61
4.2.2 干式感应辊式强磁选机	64
4.2.3 干式对辊永磁强磁选机	66
4.3 湿式强磁场磁选设备	67
4.3.1 琼斯强磁选机	67
4.3.2 SQC-6-2770 湿式强磁选机	70
4.3.3 CS-1 型电磁感应辊式强磁选机	73
4.3.4 双立环式强磁选机	75
* 4.3.5 多梯度磁选机	77
4.4 高梯度磁选设备	78
4.4.1 周期式高梯度磁选机	78
4.4.2 连续式高梯度磁选机	80
* 4.4.3 $\phi 600 \text{ mm} \times 255 \text{ mm}$ 磁滤式强磁选机	83
* 4.4.4 永磁“铁轮”高梯度磁选机	85
4.5 超导磁选设备	86
4.5.1 概述	86
4.5.2 超导体的基本概念	86
* 4.5.3 超导材料	88
* 4.5.4 低温过程的实现	90
* 4.5.5 超导磁选机	90
4.6 磁流体分选和磁种分选	93
4.6.1 磁流体分选概述	93
* 4.6.2 磁流体动力分选法(MHDS)	94
* 4.6.3 磁流体静力分选法(MHSS)	94
* 4.6.4 磁种分选技术	101
小结	103
复习思考题	104
5 电选的基本理论	106
5.1 电选的基本条件和方式	106

5.2 矿物的电性质	107
5.2.1 电导率	107
5.2.2 介电常数	109
5.2.3 比导电度	109
5.2.4 矿物的整流性	111
5.3 矿物在电场中带电的方法	111
5.3.1 传导(接触)带电	111
5.3.2 感应带电	112
5.3.3 电晕带电	112
5.3.4 摩擦带电	113
5.3.5 其他带电方法	114
5.4 电选分离的条件	114
5.4.1 矿粒在电场中所受的电力	114
5.4.2 作用在矿粒上的机械力	116
5.4.3 电选分离的条件	117
小结	117
复习思考题	118
6 电选设备	119
6.1 鼓筒式电选机	119
6.1.1 $\phi 120\text{ mm} \times 1500\text{ mm}$ 双辊电选机	119
6.1.2 YD-型电选机	120
6.1.3 卡普科高压电选机(Carpco High Tension Separator)	122
6.2 其他类型电选机	123
6.2.1 电场摇床	123
6.2.2 回旋电选机	124
6.2.3 板网式电选机	125
6.3 影响电选的因素	126
6.3.1 电选的操作因素	126
6.3.2 电选机的保护和操作安全	127
小结	128
复习思考题	128
7 磁电选矿的实践应用	129
7.1 强磁性铁矿石选别	129
7.1.1 铁矿石的工业类型	129
7.1.2 铁矿石的工业要求和产品质量	132
7.1.3 铁矿石选别实例	133
7.2 弱磁性铁矿石的磁化焙烧	139
7.2.1 弱磁性铁矿石磁化焙烧的原理	140
7.2.2 赤铁矿的还原焙烧	142

7.2.3 还原焙烧炉.....	146
7.2.4 焙烧磁选流程	154
7.2.5 弱磁性铁矿石的磁选	154
7.3 锰矿石的磁选.....	156
*7.3.1 我国锰矿磁选概况	156
*7.3.2 几个生产实例.....	157
7.4 含稀有金属弱磁性矿石的磁选	158
*7.4.1 粗钨精矿的精选	158
*7.4.2 含钽铌铁矿的磁选	159
*7.4.3 海滨砂矿粗精矿的磁选	160
7.5 非金属矿物的磁选	160
7.5.1 高岭土的磁选	160
*7.5.2 石棉矿石的磁选	161
*7.5.3 石墨浮尾的磁选	162
7.6 电选的实际应用.....	162
7.6.1 白钨-锡石分选流程	162
*7.6.2 钽铌矿的电选流程	164
*7.6.3 钛铁矿和金红石的电选流程	164
小结	166
复习思考题	167
8 磁电选实验操作技术.....	168
8.1 矿物的磁性分析.....	168
8.1.1 矿物比磁化系数测定	168
8.1.2 磁性矿物含量的分析	172
8.2 磁选机磁场强度的测量	174
8.2.1 用磁通计测定磁场强度(磁通计法)	175
8.2.2 用高斯计测定磁场强度(高斯计法)	177
8.3 矿物的电性分析.....	177
8.3.1 介电常数的测定	178
8.3.2 矿物电阻的测定	178
8.3.3 矿物的比导电度的测定	179
8.3.4 矿物的整流性的测定	180
小结	180
复习思考题	181
参考文献	182

1 绪 论

磁选法已有 100 多年的历史,开始用于选别强磁性矿石(磁铁矿)。初期的磁选机由于结构尚不完善,并没有得到广泛的应用。自 1855 年采用电磁铁产生磁场后,磁选机才日臻完善,并出现了各种类型的工业生产用磁选机,磁选法在铁矿选矿方面才得到广泛的应用。1955 年以后,由于永磁材料的发展,磁选机磁系开始采用永磁体,特别是弱磁选机的磁系逐渐永磁化。

磁选在弱磁性矿石的选矿方面应用比较晚,直到 19 世纪 90 年代,才提出采用尖削磁极和平面磁极组成的闭合磁系产生强磁场,以分选弱磁性矿物。又经半个多世纪,相继出现了多种类型的湿式和干式两类强磁选机,其中感应辊式磁选机应用较广。但这种磁选机的极距小,选别空间是单层的,分选面积小,其处理能力、成本、磁场特性等方面,都不够理想。在 20 世纪 60 年代英国琼斯(Jones)磁选机的问世,使磁选机的设计和制造实现了一次重要突破。这种磁选机由于在磁极对之间充填了多层聚磁介质(齿板、小球等),扩大了极距,增加了分选面积,使磁场强度和梯度也得到了很大的提高。琼斯机的出现,对弱磁性贫铁矿的分选,提供了一种较好的分选设备。

在琼斯机之后的 20 年中,强磁选机又获得了较大的发展。到了 20 世纪 70 年代,出现了高梯度磁选机,为细粒弱磁性物料的分选又开辟了新的途径,磁选领域也进一步扩大;它不仅用于选别矿石,而且还深入到环保工程和医学方面;高梯度磁选,在磁系结构方面,做了新的改进,同时采用了不锈钢的铁磁性钢毛作聚磁介质,使磁场梯度提高了一个数量级,这极大地改进了磁选机的磁场特性。

为了进一步提高磁选机的磁场强度和各项技术经济指标,在磁选机制造方面成功地应用了超导电技术。超导电技术是近代低温物理的一个很活跃的分支,吸引了很多科学家的注意,为世人所瞩目。它是利用一些超导材料,在某一低温条件下电阻为零,不消耗电能(或者说电能消耗极少)为基础,制造出以超导磁体代替磁选机常规磁体的超导磁选机。这种磁选机体积小、重量轻、磁场强度和磁场梯度高、单位机重处理量大、能耗低、分选效果好,是当代最先进的磁选设备。很显然,随着超导技术的继续进展必将引起磁选机制造方面的巨大变革。

近年来在磁选方面出现了一些新工艺、新方法,如磁流体分选、磁种分选法相继问世。这些新工艺、新方法与传统磁选法不同,它们不是以矿物原有磁性为分选的基点,而是借助了一些其他手段和方法进行分选的。如磁流体分选,它除了根据矿物磁性以外,还借助一些顺磁性溶液作分选介质,在磁场或磁场和电场联合作用下,产生一种“加重”作用,同时利用矿物之间磁性、密度和导电性的差异使矿物得到分选。这类磁选法,有人又称为第二类磁选法。

磁种分选是在细磨的弱磁性(或非磁性)和逆磁性矿物的矿浆中,加入制备好的铁磁性种子,运用一定化学条件(pH 调整剂等)使磁性种子选择性地吸附在目的矿物表面,人为地改变非磁性和逆磁性矿物的磁性,然后用一般磁选法分离。磁种分选打破了磁选利用被选别颗粒本身磁性进行分选的界限,使非磁性和逆磁性矿物原则上都能够用磁选法进行分离。磁种分选为一些嵌布粒度极细的复合矿提供了充分综合利用的可能性,大大扩展了磁选分选的界限。

磁选法长期以来以分选黑色金属矿石为主,就目前来看磁选法在铁矿石选矿方面,仍处于主导地位。但毫无疑问,磁选目前除了黑色金属矿石之外,已广泛用于稀有金属和非金属矿石的分选,如钨、锡粗精矿的分选、海滨砂矿粗精矿的分选、高岭土的提纯、石棉矿的预选等。在这些矿

物的分选流程中,都包括有磁选作业,并伴随有除铁工序。此外,蓝晶石、石英、红电气石、长石、霞石、闪长岩等都在不同程度上应用磁选作业进行分选。

在铁矿石选矿方面,磁选是主要的选矿方法。作为钢铁原料的铁矿石,据报道,世界铁矿储量为 340 Gt,远景储量 780 Gt,平均含铁 39.7%。我国铁矿资源丰富,探明储量居世界前列,但贫矿占 85% 左右,而贫矿中有 5% 由于含有害杂质,不能直接冶炼。因此,铁矿石的 80% 需要选矿。就世界范围来说,也大致如此。

我国幅员辽阔,铁矿资源分布较广,地质成因及工业类型复杂。据统计,资源的 2/3 为复合矿,伴生着其他有价成分,需要采用复杂的联合流程,才能获得高品位铁精矿和进行有价成分的综合利用。此外,贫矿多,富矿少,而且弱磁性(赤铁矿)矿石多,强磁性矿石(磁铁矿)少。

目前对弱磁性贫铁矿的处理方法,国内外多用重选、磁选、浮选和焙烧磁选,以及联合流程等方法处理。焙烧磁选是由磁化焙烧和弱磁选两部分工艺组成的。经焙烧的弱磁性铁矿,用弱磁选机处理具有分选指标高、流程简单等特点。我国焙烧磁选在弱磁性铁矿选矿方面占有极重要的地位。

磁化焙烧是利用一定条件,将弱磁性铁矿物(赤铁矿、褐铁矿、菱铁矿和黄铁矿等)转变成强磁性铁矿物(磁铁矿或 γ -赤铁矿)的工艺方法。按其焙烧设备不同可分为竖炉焙烧、转炉焙烧、沸腾炉焙烧以及斜坡炉焙烧等。我国在磁化焙烧生产中,对强化焙烧磁选工艺、焙烧炉设备的设计和改造、处理复杂铁矿石的磁化焙烧和粉状矿焙烧工艺方面,进行了很多试验和研究工作,在技术上处于领先地位。

焙烧磁选法,由于基建投资较高,能源消耗大,生产成本相对较高。特别是近年来由于强磁选的发展,磁化焙烧方面的缺点更显得突出,所以这就限制了它在铁矿选矿方面的进一步发展。

电选法是根据矿物的电性差异进行分选的一种选矿方法。其发展历史大约有一个世纪。开始发展速度较慢。在 20 世纪 50 年代末期,特别是近 30 年来,电选获得较快的发展。目前,对于钛矿物的分选、超纯铁矿的精选、钨锡粗精矿的分选、钽铌矿的分选、独居石和金、银矿等的分选,以及一些非金属矿的分选,都证明电选是一种行之有效的选矿方法。

据资料统计,西方各国每年用电选生产的精矿量在 30 Mt 以上。主要为钛铁矿、金红石、锆英石、钾盐等矿物。这说明电选在选矿中的地位是举足轻重的。

电选法发展的初期,由于电选过程是在静电场中进行分选的,因此分选效率不高,处理量也比较小。直到 20 世纪 30 年代,由于采用了电晕带电的方法,才大大提高了分选效率。电选的研究也开始引起人们的重视。在电选机的电极结构和电场特性方面做了很大改进,研制出了一些新型高效电选机,其处理能力也有较大提高,台时处理量已达 30~50 t/h;此外对处理细粒的高效新设备也给予了极大重视。电选理论已由一般的定性研究转向定量分析。

电选法耗电量小,成本低,设备构造简单,加之电选为干式作业,不需要供水和脱水的一系列设施,没有废水所造成的污染,这都使电选的应用前景具有一定的优越条件。

2 磁选的理论基础

2.1 磁选基本原理

2.1.1 磁选过程及磁分离的基本条件

磁选是利用矿物磁性的差异,在不均匀磁场中进行分离的选矿方法。图2-1为选别磁铁矿常用的圆筒磁选机的示意图,这种磁选机由分选圆筒1、磁系2、分选箱3、给矿箱4等部件组成。工作时圆筒逆时针方向旋转,磁系固定不动。细磨的矿浆经给矿箱进入分选箱,其中磁性矿粒在不均匀磁场作用下被磁化,受到磁场磁力的吸引,吸在圆筒表面并随圆筒旋转。磁性矿粒转至磁系出口处,由于磁力减弱加上冲洗水的冲刷,脱离磁力的吸引而被排出成为精矿(磁性矿粒)。非磁性矿粒,由于不受磁力的作用,仍留在矿浆中,随矿浆排出成为尾矿。因此,磁性不同的矿粒实现了分离。

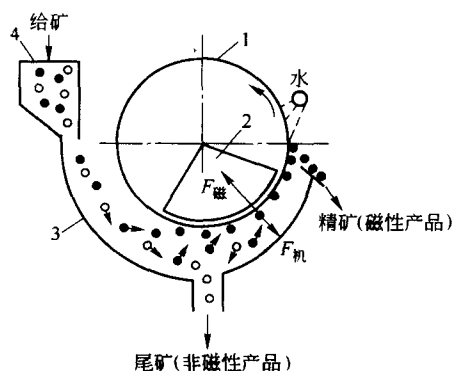


图 2-1 矿粒在磁选机中分离的示意图
1—分选圆筒；2—磁系；3—分选箱；4—给矿箱
●—磁性矿粒；○—非磁性矿粒

在磁选分离的过程中,明显看出矿粒同时受到两种力的作用,一种是磁力,它使矿粒吸向圆筒;另一种是机械力,它包含有颗粒的重力、离心力、惯性力、流体阻力、摩擦力、颗粒与颗粒之间的吸力和排斥力,以及分选介质的流体动力阻力等,它们阻碍矿粒被吸向圆筒。如果矿粒所受的磁力大于所受的机械力之和,则吸附在圆筒表面上,成为精矿;反之则仍留在矿浆中随矿流排出,成为尾矿。由此可知,磁选过程实质上是磁力和机械力相互竞争,相互争夺矿粒的过程。

磁性强的矿粒,受的磁力大,能克服所受的机械力,即磁力占优势;对非磁性或磁性很弱的矿粒,由于它们不受或受很小的磁力作用,所受机械力占优势。不同磁性的矿粒,由于所受的磁力和机械力的比值不同,导致它们运动轨迹不相同,从而把矿粒按其磁性不同分成两种或多种单纯的产品。

欲使两种不同磁性的矿物分离,必须具备以下必要条件:

- (1) 要有一个能够产生足够大的不均匀磁场的设备。
- (2) 被分离的矿物必定具有一定磁性差异,即必须满足

$$S = \frac{x_1}{x_2} \gg 1 \quad (2-1)$$

式中 S ——两种矿物比磁化系数之比值;

x_1, x_2 ——分别为两种矿物的比磁化系数。

- (3) 作用在磁性矿粒上的磁力和机械力必须满足

$$F_{\text{磁}} \geq \sum F_{\text{机}} \quad (2-2)$$

式中 $F_{\text{磁}}$ ——颗粒受到的磁力(向心);

$\sum F_{\text{机}}$ ——颗粒受到的机械力之和,与磁力方向相反与磁力作竞争的力。

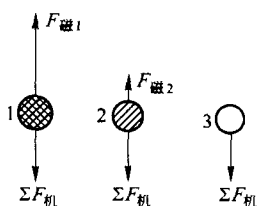


图 2-2 不同磁性矿粒在磁场中受力示意图

1—强磁性颗粒; 2—弱磁性颗粒;
3—无磁性颗粒

上式是磁分离必须具备的基本条件。

当矿粒进入到一定强度的不均匀磁场中,强磁性矿粒受到的磁力大,弱磁性矿粒受的磁力小,无磁性矿粒不受磁力的作用,如图 2-2 所示。

从图中可知, $F_{\text{磁}1} > F_{\text{磁}2} \geq \sum F_{\text{机}}$, 对强磁性颗粒由于 $F_{\text{磁}1} \gg \sum F_{\text{机}}$, 必被磁极吸引。弱磁性颗粒由于 $F_{\text{磁}2} \approx \sum F_{\text{机}}$ 不一定能被磁极吸引,若增大磁场强度,也会被磁极吸引。无磁性颗粒不受磁力作用,因而不被磁极吸引。由此可见,作用在颗粒上的磁力大于所受的机械力之和,是磁分离的必要条件。两种

种矿粒磁性相差愈大,则愈易分离。

矿粒所受的磁力是磁场特性和矿粒磁性的函数,也是磁选过程中研究的基本问题。

2.1.2 磁场的物理概念

凡能吸引磁铁(铁屑)的物理性质称为磁性。一根条形磁铁吸引铁屑的本领是两端吸引量多、中间吸引量少、甚至不吸引铁屑,这说明条形磁铁两端磁场最强,中间是无磁性区。我们把磁性最强的两端叫做磁铁的两个磁极。如果把条形磁铁悬挂在空间,它的两端会分别指向地球的南极和北极方向。指向地球南极的磁极,称为南极(用 S 表示),指向地球北极的磁极,称为北极(用 N 表示),因为地球本身是一个相当大的磁铁,它的 S 极位于地球北极附近,它的 N 极位于地球南极附近。实验证明磁极的极性有同性相排斥,异性相吸引的磁作用力。

在较长的历史时期内,人们认为磁极上聚集有“磁荷”与静电学中的电荷相似。从而建立了静磁学,并把磁现象和电现象看成彼此独立无关的两类现象。自公元 1819 年奥斯特发现了电流的磁效应,使人们进一步认识到磁现象的起源是电荷运动,磁和电现象有着密切的关系。

近代物理学证明,磁铁与磁铁、磁铁与电流、磁铁与运动电荷或者是电流与电流、电流与运动电荷等之间均存在着相互间的作用力,这种作用力,是通过磁体周围的磁场传递的。也就是说,磁铁或磁体间的相互作用是以磁场作媒介的,故磁场是一种特殊的物质,因为它不是由原子或分子组成的物质,但又具有物质的客观属性:

(1) 它在不停地运动,其作用力可由甲处传递到乙处;

(2) 它和电场一样也具有能量,由库仑实验证明,磁极与磁极间的相互作用力有以下关系

$$f = K \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (2-3)$$

式中 f ——两磁极间相互作用力;

Q_1, Q_2 ——分别为两磁极所荷的磁量;

r ——两磁极间的距离;

K ——与介质和计量单位有关的比例常数。

当采用绝对电磁单位制时,在真空中 $K = 1$,如果在磁场中的全部空间内,充满着均匀导磁系数为 μ 的介质时,则 $K = \frac{1}{\mu}$,所以在任何介质中,库仑定律的一般公式可写成

$$f = \frac{1}{\mu} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (2-4)$$

在绝对电磁单位制中,规定在真空中两个相等磁量(即式中 $Q_1 = Q_2$),相距 1 cm,相互作用力为 1 dyn ($1 \text{ dyn} = 10^{-5} \text{ N}$),则称该磁量为一个单位磁量。

应当指出,磁量概念纯粹是假定的,实际上是不存在的,只是为了便于指导各种有关的数值,定性上能说明问题,才提出磁量这一物理概念。

由上述公式看出,磁性物体在磁场中受到的磁力的大小,与它所处的位置有关,如图 2-3 所示,当磁性物体分别在 A、B、C 各点上,其所受的磁力有如下的关系:

$$f_A > f_B > f_C$$

为了量度磁场的大小,采用磁场强度,磁场强度规定为单位磁量在该点所受磁力的大小,即有

$$H = \frac{f}{Q_2} \quad (2-5)$$

式中 H ——磁场强度, Oe(奥斯特) ($1 \text{ Oe} = 80 \text{ A/m}$);

f ——两磁极间相互作用力;

Q_2 ——磁极所荷的磁量。

磁场强度是个向量,其方向与磁场作用力的方向一致。在绝对电磁单位制中,磁场强度单位为奥斯特(Oe),1 Oe 相当于单位磁量上磁作用力为 1 dyn 的磁场强度。磁场强度也可用单位面积上垂直穿过磁力线的多少来表示,即用磁力线上的疏密程度来量度。在国际单位制中,磁场强度用 A/m 表示,1 A/m 等于 $4\pi \times 10^{-3} \text{ Oe}$ 。考察空气中的磁场时,磁场强度值与磁通密度数值相等。

将式(2-3)代入到式(2-5)中,则获得:

$$H = \frac{Q_1}{r^2} K \quad (2-6)$$

式(2-6)说明,磁场强度只与磁源(即 Q_1)有关,与被作用的磁性物料的磁性(Q_2)无关。但是它们之间的吸引力,除与磁源的强弱有关外,还与被选物料磁性大小有关;即在同一磁场中,磁性强的物料所受的吸引力比磁性弱的物料所受的吸引力大,无磁性的物料则不受吸引力。同一磁性物料,在强磁场中受的吸引力比在弱磁场中受的吸引力大。

2.1.3 矿物的磁化、磁化强度和磁化系数

矿物颗粒的磁化,就是颗粒在外磁场作用下,从不显磁性转变成具有一定磁性的现象,其根本原因是颗粒内部的原子磁矩朝磁场方向排列的过程。

物质磁性来源于原子磁性,原子磁性来源于原子磁矩。因为任何物质的磁性都是由电子运动产生的,这是一个比较复杂的问题,这里只作简单的说明。物质是由原子、分子所组成的,原子是由带正电的原子核和核外带负电的电子组成。电子绕原子核旋转的同时还绕本身的轴线旋转,这种旋转叫做电子自转。无论电子环绕原子核旋转还是自转,都和传导电流(或运动电荷)一样,都要产生一个磁效应“原子磁矩”。明显看得出来,原子磁矩来源于原子核磁矩和电子磁矩,原子核的磁矩很小,可以忽略不计,电子磁矩又可分为绕核旋转的轨道磁矩和自旋磁矩。所以说原子的磁矩是电子轨道磁矩与电子自旋磁矩的矢量之和。分子是由多个原子组成,各个原子磁

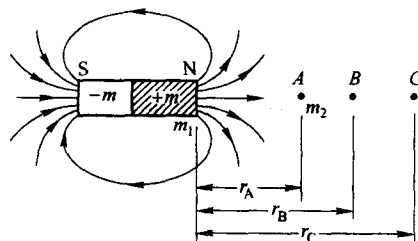


图 2-3 磁场示意图

矩的矢量和称为分子磁效应,亦可称其为“分子磁矩”,分子磁效应可用一个等效圆电流来表示,叫做分子电流。

但是,现代物理学告诉我们,物质的原子磁矩不是所有电子磁矩的矢量总和,而是在未充满的那些次层中的电子磁矩的总和,研究这个问题比较复杂,也不属这门课程的内容,这里不作进一步的讨论。

物质的分子磁矩或原子磁矩,在没有外磁场作用时,由于分子的热运动,物质的分子磁矩在空间的取向是杂乱无章的,如图 2-4(a)所示,各分子的磁矩取向是杂乱无规则的,它们之间的磁性相互抵消,所以从整体来看,物质对外不显示出磁性。如果把它放在磁场中,这时物质中的分子电流虽然仍受到热运动的影响,但在外磁场作用下会发生转动,使分子电流磁场方向趋向外磁场方向平行排列,因而形成一个附加磁场,如图 2-4(b)所示,此时物质对外显示出磁性,这种在外磁场作用下,物体由不显示磁性到显示出磁性的物理现象,叫做物体磁化。

物质由于电子旋转产生磁效应,则必具有一定的磁矩,物体的磁矩是描写物体磁性的一个物理量。磁矩的大小本课程不可能详细的讨论,只从直观现象进行观察,当物体被磁化后,由于分子磁矩均与外磁场方向平行排列,对外显示出磁性,在物体的两端则必产生极性相反的磁性,如图 2-5 所示,这是由于物体内部相邻磁性极性相反,磁性相互抵消,只有两端侧面上才显示出磁性,设两端的磁极强度为 $Q_{\text{磁}}$,两极间的距离为 l 时,则此物体磁化后的总磁矩为

$$M = Q_{\text{磁}} l \quad (2-7)$$

式中 M ——物体的磁矩, $\text{A} \cdot \text{m}^2$;

$Q_{\text{磁}}$ ——物体磁极强度, $\text{A} \cdot \text{m}$;

l ——物体长轴长度, m 。

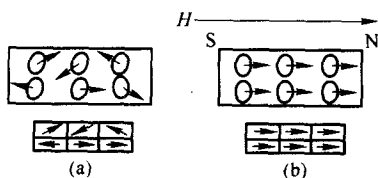


图 2-4 物质磁化示意图

(a) 磁化前; (b) 磁化后

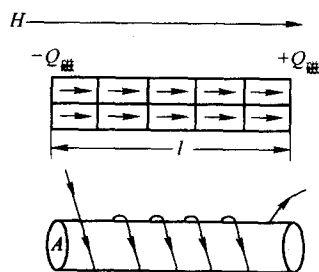


图 2-5 物质磁矩示意图

按安培分子电流来说,物体被磁化后,分子或原子磁矩按磁场方向排列,内部两相邻的极性抵消,从宏观整体来看,这个横切面内各分子环流的总和就相当于沿截面边缘的一个大的环形电流。由于沿各个截面的边缘都出现这样等效的大的环形电流,因此从整个磁化的物体看,就相当于一个由这样的大环形电流组成的通电螺旋管,如图 2-5 所示。磁化后的磁矩为

$$M = NIA \quad (2-8)$$

式中 M ——磁矩, $\text{A} \cdot \text{m}^2$;

N ——绕线匝数;

I ——电流, A ;

A ——物体断面积, m^2 。

为了描述物质磁化状态(即磁化方向和强弱),引入磁化强度矢量的概念,磁化强度在数值上