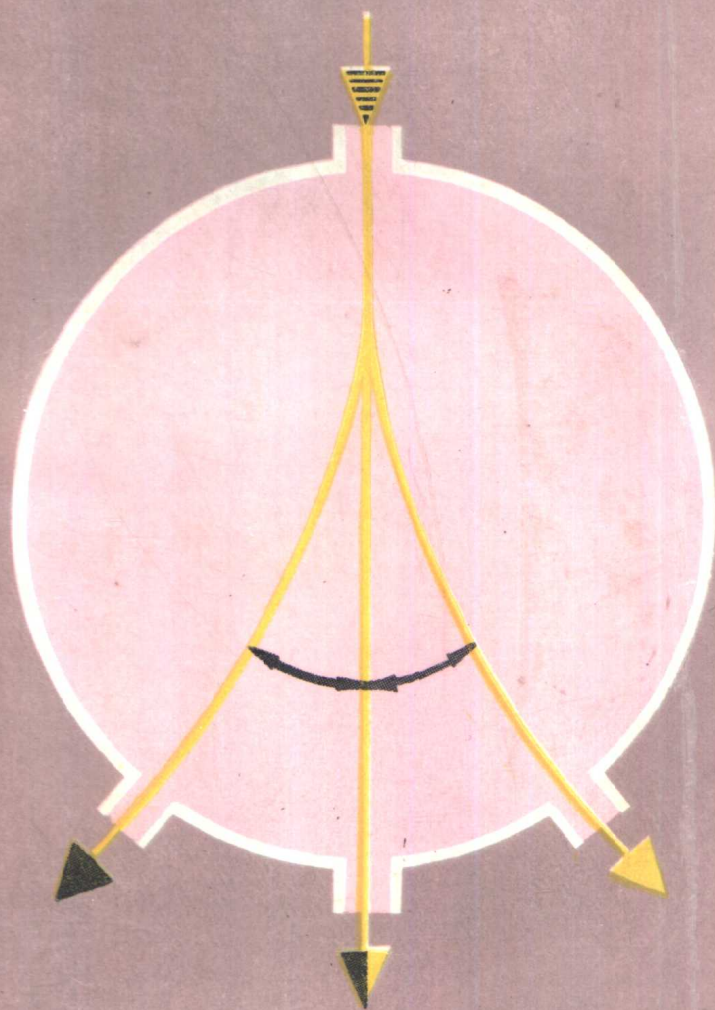


磁选理论及工艺

蒋朝澜 编著



冶金工业出版社

TD924
J-223

磁选理论及工艺

蒋朝澜 编著

冶金工业出版社

(京)新登字036号

内 容 提 要

磁选方法在近二十年来有着巨大发展,它在理论上日趋完善,在实践上深入到微细粒磁性物料的各个方面,特别是高梯度磁选、物料磁性及表现粒度的改善等领域,已经并将继续产生深刻的影响。

本书是系统全面介绍近年来磁选理论和工艺新进展的著作。书中以磁选理论和工艺(包括磁选过程的强化)为主,分析了磁分离过程的机理;阐明了各类型磁选理论模型;指出了对生产操作的积极意义;对物料磁性及其改变、磁选设备和磁选的工业应用等也作了适当的阐述,反映了近年的新进展。

本书可供矿物加工工程技术人员、管理人员使用,也可作为高等学校矿物加工工程专业教师、研究生、本科生、专科生的教学参考书

磁选理论及工艺

蒋朝澜 编著

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街发院北街39号)

新华书店总店科技发行所经销

河北省阜城县印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张10 字数261千字

1994年9月第一版 1994年9月第一次印刷

印数1~800册

ISBN 7-5024-1400-2

TD·217 定价14.00元

前 言

磁选既是一种古老的又是一种新颖的分离方法，尤其近二十余年来高梯度磁分离的出现以及超导材料在磁选中的应用，引起了人们的极大关注。它是分离极限颗粒——粗粒和微米级弱磁性颗粒的一种有效方法，而这类极限颗粒物料过去是不能用磁选法分离的。磁分离不仅广泛用于矿物加工、钢铁厂和发电厂的水处理，而且也为煤炭工业、非金属工业、原子能、化学甚至生物化学中遇到的颗粒系统的选择性分离问题，提供有效的解决途径。高梯度磁分离的出现，使磁选成为现代工业技术中的重要组成部分。因此，系统介绍磁分离过程的理论、设备、工艺和实践，是很有意义的。

本书以磁选理论和磁选工艺（包括磁选过程的强化）为主，分析了磁分离过程的机理，阐明了各类磁选理论模型，指出了对生产操作的意义，反映了磁选理论和工艺方面的新成就。

随着科学技术的发展，磁选物料性质的改善包括颗粒物料表面磁性和表观粒度的改善，愈加引起研究和生产人员的兴趣。可以期望，待选物料性质的改善，同历来受到重视的磁选设备一样，会成为磁选领域中的重要发展方向。本书结合编著者的研究成果对此作了充分的阐述。

本书第1章为磁选的物理基础，探讨磁选法的一般基本问题。第2章探讨待选物料的基本属性——磁性，包括磁性本质和改变磁性的方法，着重介绍表面磁性的改变方法。第3章为磁选设备，从发展过程阐明磁选机主要发展阶段及其特点，第4章为磁选理论，包括磁捕获和聚集（或吸留）过程的机理，以及强磁性和弱磁性矿物分散和团聚的基本规律。第5章为分选过程工艺参数。第6章为磁选过程的强化，实质上是改善物料磁性的继续和深化。

ABF37/05

第7章为磁选的工业应用。

从本书的内容可以看出，本书对矿物加工工程专业的生产技术人员、管理人员、研究人员和设计人员，是非常有用的，同样，对高等学校有关专业的教师、研究生、本科生和专科生也是重要的教学参考书。

在编写过程中，得到徐美琴、雷国元同志的大力帮助，特此致谢。

对本书任何有价值的批评，编著者都将欣然接受。

编者

1993.3

目 录

绪论	1
1 磁选的物理基础	4
1.1 磁选过程	4
1.2 磁选方法及分类	5
1.3 磁选电磁学的基本知识	6
1.4 基本磁学单位	11
1.5 磁选过程的作用力	11
1.6 磁选机的磁体	16
1.6.1 永磁体	17
1.6.2 电磁体	23
1.6.3 磁场梯度的产生	37
1.6.4 磁场的测量	42
2 矿物和矿石的磁性	49
2.1 物质的磁性	49
2.2 物质按磁性分类	50
2.2.1 逆磁性	50
2.2.2 顺磁性	50
2.2.3 铁磁性	51
2.2.4 反铁磁性	52
2.2.5 亚铁磁性	52
2.3 矿物按磁性分类	54
2.3.1 强磁性矿物	54
2.3.2 弱磁性矿物	54
2.3.3 非磁性矿物	54
2.4 强磁性矿物的磁性	55

2.4.1	强磁性矿物的磁性特点	55
2.4.2	强磁性矿物磁性和晶体结构的关系	57
2.4.3	影响强磁性矿物磁性的因素	59
2.5	弱磁性矿物的磁性	66
2.6	改变矿物容积磁性的方法	68
2.6.1	概述	68
2.6.2	磁化焙烧原理	68
2.6.3	热磁选矿	70
2.7	改变矿物表面磁性的方法	71
2.7.1	碱浸磁化	71
2.7.2	电化学处理	72
2.7.3	疏水磁化	74
2.7.4	磁种磁化	75
2.7.5	磁化剂磁化	77
2.8	矿物磁性的测定	77
2.8.1	有质动力法测定矿物的比磁化率	78
2.8.2	感应法测定矿物的比磁化率	82
3	磁选机和磁选辅助设备	84
3.1	概述	84
3.2	弱磁场磁选机	87
3.2.1	干式弱磁场磁选机	88
3.2.2	湿式弱磁场磁选机	94
3.3	强磁场磁选机	102
3.3.1	干式强磁场磁选机	103
3.3.2	湿式强磁场磁选机	107
3.4	高梯度磁选机	112
3.4.1	周期式高梯度磁选机	113
3.4.2	连续式高梯度磁选机	115
3.4.3	脉动式高梯度磁选机	120
3.5	超导磁选机	122

3.5.1	超导高梯度磁选机	124
3.5.2	超导开梯度磁选机	126
4	磁选理论	128
4.1	开放磁系磁场磁选理论	128
4.1.1	开放磁系磁场	128
4.1.2	开放磁系磁选动力学	132
4.2	闭合磁系磁场磁选理论	143
4.2.1	闭合磁系磁场磁选理论	143
4.2.2	磁介质磁场磁选理论	148
4.3	磁团聚分选	175
4.3.1	微细粒矿物的一般特性	175
4.3.2	强磁性矿物磁团聚	177
4.3.3	弱磁性矿物磁团聚	188
5	磁选过程的工艺参数	198
5.1	磁选工艺的选择	198
5.1.1	磁选工艺选择	198
5.1.2	磁选机的选择	204
5.1.3	作业性质的选择	206
5.2	磁场	207
5.3	磁介质	212
5.3.1	磁介质的材料	212
5.3.2	磁介质的形状	214
5.3.3	介质尺寸	216
5.3.4	介质高度	218
5.3.5	介质的磨损	218
5.3.6	介质的堵塞和清理	220
5.4	给矿速度和矿浆流速	221
5.4.1	给矿速度	221
5.4.2	矿浆速度	222
5.5	矿浆浓度	225

5.6	漂洗和清洗水	226
5.7	物料颗粒粒度	228
5.8	颗粒的磁性	232
5.8.1	颗粒磁性的影响	232
5.8.2	按磁化率梯度分选	234
5.9	矿浆预处理	235
5.9.1	脱泥	235
5.9.2	分散	237
5.9.3	团聚	238
5.9.4	矿浆的pH值	239
5.10	表面作用	240
6	磁选过程的强化	245
6.1	电化学处理	245
6.1.1	电化学处理的基本原理	245
6.1.2	电化学处理的设备	255
6.1.3	电化学处理工艺	256
6.2	磁种处理	259
6.2.1	磁种处理的类型	259
6.2.2	磁种处理工艺	261
7	磁选的工业应用	268
7.1	在黑色金属矿选矿方面的应用	268
7.1.1	在铁矿选矿方面的应用	268
7.1.2	锰矿石选矿实例	277
7.2	在有色金属和稀有金属矿选矿中的应用	281
7.3	在非金属矿选矿方面的应用	284
7.3.1	高岭土的磁选	284
7.3.2	萤石的磁选	286
7.3.3	铝矾土的磁选	286
7.3.4	石棉的磁选	288
7.4	煤的磁选	289

7.4.1	煤的高梯度磁选	290
7.4.2	煤的开梯度磁选	292
7.4.3	液化煤的磁选	292
7.4.4	煤中的磁铁矿的磁选回收	293
7.4.5	增加黄铁矿的磁性	294
7.5	废水处理	297
7.5.1	钢铁工业	297
7.5.2	热电厂	298
7.5.3	江河水的过滤	301
7.6	废气处理	301
7.6.1	烟道气的磁滤	301
7.6.2	煤灰的磁处理	302
7.7	核工业	304
7.7.1	从放射性燃料溶解器液体中脱除放射性 固体	305
7.7.2	氢氧化铁絮凝体的脱除	306
主要参考文献		307

绪 论

磁选是基于待选物料磁性差异来实现分离的一种选矿方法。该法简单易行，效率高，污染少，故在20世纪90年代，必将越来越受到选矿界的重视。磁选在铁锰矿石选别中，占有极重要的位置，对多数弱磁性矿石的选别和从工业矿物（非金属矿物）中排除含铁成分都是不可缺少的过程。此外，在水处理过程中，磁选也是重要环节。

铁矿石的主要选别方法是磁选。无论从世界范围，或是从中国来说，富铁矿石储量不足20%，需选矿处理的贫矿占80%以上。经过选别后，把含铁25~35%的矿石，提高到含铁63~68%的精矿。使用这种精料炼铁，冶炼强度提高，高炉利用系数增加（铁精矿品位每提高1%，炼铁炉利用系数增加2~3%）。

磁选法获得广泛用的国家有：中国、独立国家联合体、美国、瑞典、加拿大、芬兰、捷克和斯洛伐克等。

磁选在有色和稀有金属矿石的粗精矿精选中获得应用，例如，重选法得到的黑钨矿粗精矿中，常含锡石和其他成分，黑钨矿具有弱磁性，合格黑钨精矿是从磁选过程产生的。又如铜-钼、铜-铅、铜-锌和铜-铋等硫化矿粗精矿，若铜矿物主要是黄铜矿，它也具有弱磁性，故可用磁选法把铜矿物分离出。

非金属矿物原料中的高岭土，铁是有害杂质，用磁选法除铁已久为人知。此外，硅砂、型砂、长石、霞石闪长岩、蓝晶石等的除铁，同样采用磁选法。

粉末冶金厂还原铁粉，钢渣中含有大量铁的成分，都可用磁选回收。

虽然早在公元前550年古希腊知晓了磁的现象，公元前三世纪中国发现了磁铁的定向性质，但是直到法拉第（Faraday）才

发现所有物质都不同程度地对磁场作用敏感。鲍尔 (Ball)、诺顿 (Norton)、爱迪生 (Edison) 等人应用这一原理从脉石中分离出铁矿石, 并且用电磁筒式磁选机成功地实现了强磁性矿物的分选。1895年韦瑟里尔 (Wetheril) 设计出了强磁场并且具有粒状物料流偏向装置的磁选机。相继研制了盘式、筒式和辊式等不同类型的干式磁选机。这些设备处理的矿物限于粒度较粗和中等强磁性矿物。湿式磁选的格朗达尔 (Grondal) 筒式磁选机, 解决了干式磁选难以胜任的细粒分选问题。1937年弗朗茨 (Frantz) 研制出了一种由包铁螺线管中充填铁磁钢带构成的磁选机, 该种磁选机在发展现代强磁场和高梯度磁选机中成为重要的里程碑。1960年琼斯 (Jones) 式磁选机首次在原磁极之间充填磁介质, 这种多层磁介质, 既增大了选别空间, 又保持了工作隙中较大的磁感强度, 这为强磁场磁选机在工业中的应用奠定了基础, 也推进了高梯度磁选机的研制。道地高梯度磁选机 (HGMS) 在60年代末才出现, 这一周期和连续作业磁选机的发展, 扩展了磁选在微米级颗粒范围的弱磁性甚至逆磁性矿物中的应用, 使磁选的深选能力加强了。

强磁场和高梯度磁选工艺提供了解决在化学、生物化学、核工业和其他工业所遇到的各种复杂问题。该法的应用不仅限于工业过程的生产阶段, 而且也可用于固体废料、废水和废气的处理以及环境保护的一般问题。高梯度磁选最近20余年来在实践应用中的巨大进展, 表明磁选物理基础的形成有了根本性变化, 高梯度磁分离的理论和实践的初步总结, 在格伯 (Gerber) 和伯斯 (Birss) 合著的《高梯度磁力分离》一书中作了较全面的反映。

除了在磁选机结构方面的巨大发展以外, 在磁系材料和在采用联合力场方面也有进展。铁磁性材料由于磁饱和的原因, 对要求超强磁感应强度的弱磁性粗块和微细粒矿物来说, 都是不适宜的, 这时磁选设备的磁性材料应采用超导材料。随着高温超导材料的不断出现, 超导磁选机在工业上的应用前景指日可待。联合力场是综合利用物料各种性质的有效措施, 如综合利用磁性和密

度的有磁流体静力分选机，磁水力旋流器，磁团聚器，综合利用磁性和电性的有磁流体动力分选机，综合利用磁性和表面润湿性的有磁粘附和磁种分选等。

本书采用SI单位制，考虑到习惯上的原因，在多数地方还附上当量的CGS制单位。

1 磁选的物理基础

1.1 磁选过程

磁选是一种物理分离方法，它是基于被分离物料中不同组分的磁性差异。在磁场中，物料同时受到磁力和竞争力（包括重力、惯性力、流体阻力和离心力等）的作用，对磁性较强的颗粒，磁力超过竞争力，对磁性较弱或非磁性颗粒竞争力超过磁力，

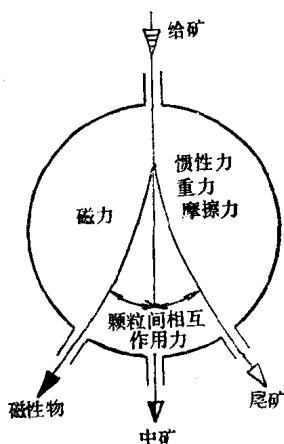


图 1-1 磁选过程模拟图

最终合力决定了颗粒的运动轨迹。磁力占优势的颗粒，便成为磁性产品，竞争力占优势的颗粒成为尾矿（非磁性产品），在某些情况下也可分出中矿（图1-1）。由于颗粒间相互作用力，有些非磁性颗粒混杂在磁性产品中，一些磁性颗粒进入尾矿，而中矿中含有这两种颗粒和未单体解离的连生体。

为在磁场中有效分选磁性较强同磁性较弱颗粒，必要的（但不是充分的）条件是：作用在磁性较强颗粒上的磁力 F_m 必须大于其总的竞争力 F_c 。与此同时，作用在磁性较弱颗粒上的磁力 F'_m 应当小于相应的总竞争力 F'_c 。所以，保证有效分选的必要条件是：

$$F_m > F_c \quad (1-1)$$

$$F'_c > F'_m \quad (1-2)$$

或综合为一个不等式:

$$(F_c < F_m) > (F'_m < F'_c) \quad (1-3)$$

式中 F_m ——作用在磁性较强颗粒上的磁力;

F'_m ——作用在磁性较弱颗粒上的磁力;

F_c 、 F'_c ——作用在磁性较强和较弱颗粒上的竞争力。

上述公式虽然简单,但表达了分选过程的本质。公式表明,磁力和竞争力决定了磁选机的分选性能,而这些力则取决于待选物料的性质和磁选设备的特性。

1.2 磁选方法及分类

根据磁选机结构不同,给矿方式不同,可以有多种磁选方法,但最本质的方法是两种,即吸出法和吸留法。吸出法是矿料流距磁选机磁场一定距离,料流经过磁场时,磁性较强的矿物所受磁力超过竞争力,向磁极偏移并吸在分选面上,而与含有非磁性和磁性更弱的料流分离;吸留法是矿料流最初就给在离磁极较近的分选面上,磁性较强的矿物被磁极吸住,其余矿物由于竞争力的作用而抛离分选面(图1-2)。

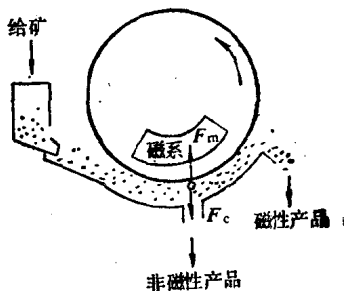


图 1-2 磁选方法原理图

用吸向磁极的方法来回收磁性颗粒,常称为正选,由磁极排斥开的,称为反选。一般在当选别的物料中磁性颗粒含量低时宜采用正选。当精选或磁性颗粒含量高时采用反选。因为少量非磁性颗粒容易从大量磁性颗粒中分出,否则,重复多次吸引颗粒,难免混入非磁性颗粒。正磁选通常在空气或水介质中实现,并相应称为干选或湿选。反磁选在铁磁悬浮液或液体中实现,常用湿选。

根据磁选过程的作用不同,可分为主要过程,准备过程和辅助过程。主要过程指分选过程本身,该过程是以获取合格产品为

目的的。分选前以物料的准备过程为目的，称准备过程，如磁化，选择性团聚、退磁、用药剂或其他方法处理矿物表面控制它们的磁性和凝聚状态。属于辅助过程的如磁脱泥和脱水、磁除尘等。磁选方法的分类示于图1-3。

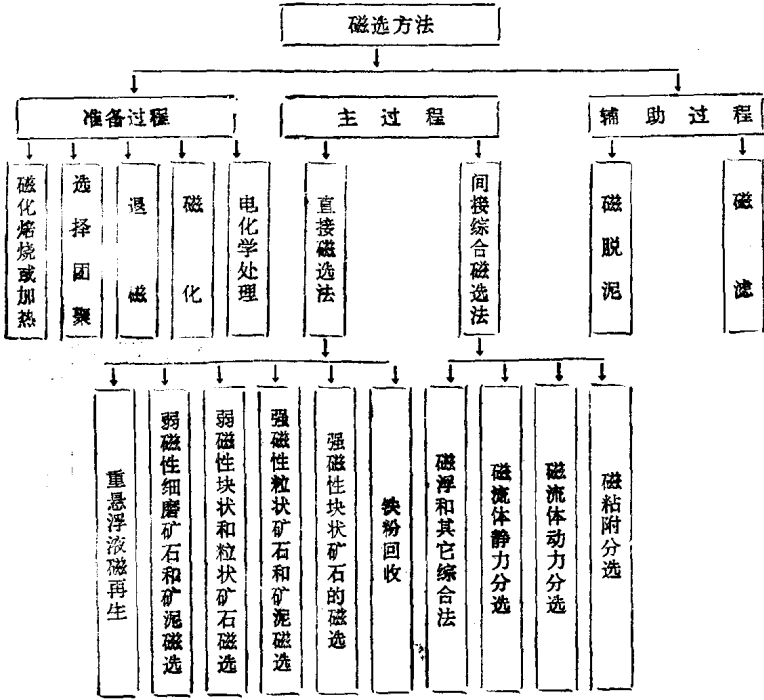


图 1-3 磁选方法分类

1.3 磁选电磁学的基本知识

本书牵涉很多磁学物理参数，因此简要地介绍它们的物理意义和相互关系将是必要的。

磁场是自然界中存在的一种特殊形式的物质。永磁铁或载流导线的周围即存在磁场，在该磁场内磁性物质将受到永磁铁或载流导线的吸力作用。说磁场是一种特殊形式的物质，是因为物质的主要属性：能量、质量和动量，磁场都具备，同时也遵循能量

守恒定律和质量守恒定律。但与一般实物有差异，它的质点（光子）的静止质量是零，无一定体积，没有“不可入性”等。它不依赖于人们的意识而存在，能被人们的主观所反映的客观现实，它还有与时空不可分割的特点，所以磁场是物质的一种特殊形式。

电场或磁场是统一电磁场的一个方面，变动的电场要引起磁场，变动的磁场能感生电场，二者紧密相关。

描述空间某点磁场的物理量用磁感应强度 B ，其单位在SI制中为 Wb/m^2 或 T 。另外一个辅助物理量——磁场强度 H ，其单位为 A/m 或 kA/m ，也经常使用。 B 和 H 是两个既有大小又有方向的物理量。在真空中的相互关系式：

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (1-4)$$

式中 μ_0 ——真空磁导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H}/\text{m}$ 。

在磁介质中， B 和 H 的相关式：

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1-5)$$

式中 μ ——介质磁导率。

它们的方向不同， μ 一般是张量，它是表明介质通过磁通线能力的物理参量。

磁感应强度 B 包含外加的磁化力成分和两个内禀性质的物理量成分，即磁化强度 M (A/m)（单位体积的总磁矩）和磁极化强度 J (T)（单位体积的总磁偶极矩），这些量的关系：

$$\vec{J} = \mu_0 \vec{M} \quad (1-6)$$

磁感应强度、磁场强度和磁极化强度的关系：

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J} \quad (1-7)$$

根据 (1-6) 式，磁感应强度还可以写成，

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (1-8)$$

从 (1-5)、(1-7) 式，可表示出 J 和 H 或 B 的关系：

$$\vec{J} = (\mu - \mu_0) \vec{H} = \left(1 - \frac{\mu_0}{\mu} \right) \vec{B} = \frac{\mu_r - 1}{\mu_r} \vec{B}, \quad (1-9)$$

式中 $\mu_r = \mu/\mu_0$ ，相对磁导率。

在CGS制中，磁感应强度 B 单位是 Gs ，真空磁导率 μ_0 为无量