

中等专业学校教学用书

磁 电 选 矿

冶金工业出版社

中等专业学校教学用书

磁 电 选 矿

徐正春等 编

冶金工业出版社

中等专业学校教学用书

磁 电 选 矿

徐正春等 编

*

冶金工业出版社 出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 $7\frac{1}{4}$ 字数 187 千字

1980年1月第一版 1980年1月第一次印刷

印数 00,001~5,000 册

统一书号: 15062·3490 定价 0.78 元

前 言

《磁电选矿》是根据 1978 年冶金中等专业学校选矿专业教育计划和磁电选矿课程教学大纲编写的教材。

本书着重阐述磁选的理论基础,强磁性矿石磁选、铁矿石磁化焙烧和弱磁性矿石磁选等所用的设备、工艺流程和生产操作的基本知识;扼要介绍电选、光电选和摩擦选的有关知识。此外,还介绍了一些国外有关磁电选矿方面的内容。

本书由沈阳有色金属学校徐正春(第一章、第二章)、昆明冶金工业学校赵志英(第三章、第六章、第七章)和长沙冶金工业学校魏宝珍(第四章、第五章)等同志编写;徐正春同志任主编。

在编写过程中,得到了兄弟学校、生产厂矿和研究设计部门的大力协助与支持,在此表示感谢。

由于编者水平所限,经验不足,书中必然存在缺点和错误,敬希读者批评指正。

编 者

1978 年 11 月

目 录

第一章 磁选的理论基础	1
第一节 磁选过程及矿粒分选的基本条件	1
第二节 磁现象及磁场的基本概念	2
一、磁场的物理概念	2
二、物体的磁化、磁化强度和磁化系数	4
三、矿粒在磁场中的行为	6
四、在恒定磁场中作用于矿粒上的磁力	8
第三节 矿物的磁性	10
一、矿物按磁性分类	10
二、强磁性矿物的磁性	11
三、弱磁性矿物的磁性	20
四、矿物比磁化系数的测定	21
五、矿石的磁性分析	24
第四节 磁选机的磁系	27
一、磁系结构及类型	27
二、磁源及磁系材料	29
三、磁路	35
四、磁选机磁场的测量	37
第二章 强磁性矿石的磁选	42
第一节 铁矿石的工业类型	42
第二节 弱磁场磁选机	44
一、弱磁场磁选机的磁场特性	44
二、湿式弱磁场磁选机	50
三、干式弱磁场磁选机	71
四、弱磁场磁选机的操作与调整	77
第三节 强磁性矿石的磁选实例	81
一、鞍山式磁铁矿的磁选实例	81
二、大庙式钒钛磁铁矿的磁选实例	88

三、大冶式含铜磁铁矿的磁选实例·····	90
四、××式含稀土元素磁铁矿的磁选实例·····	92
第三章 弱磁性铁矿石的磁化焙烧·····	94
第一节 弱磁性铁矿石磁化焙烧的原理·····	94
一、磁化焙烧的目的·····	94
二、弱磁性铁矿石磁化焙烧的原理·····	94
三、还原焙烧产品的质量检查·····	96
第二节 赤铁矿的还原焙烧·····	97
一、还原焙烧过程·····	97
二、矿石特性对还原焙烧的影响·····	98
三、温度对还原焙烧的影响·····	100
四、还原剂成分对还原焙烧的影响·····	101
第三节 还原焙烧炉·····	103
一、鞍山式竖炉·····	103
二、回转窑·····	110
三、斜坡式焙烧炉·····	112
四、沸腾焙烧炉·····	113
第四节 焙烧磁选流程·····	116
第四章 弱磁性矿物的磁选·····	118
第一节 概述·····	118
第二节 强磁场磁选机的磁场特性·····	121
一、感应磁极对的结构形状对磁场特性的影响·····	121
二、尖齿形磁极的尖削角对磁场的影响·····	123
三、平齿磁极的齿高、齿宽及齿槽宽度对磁场的影响·····	124
四、磁极对的极距和齿距对磁场的影响·····	124
五、聚磁介质对磁场特性的影响·····	127
第三节 强磁场磁选机·····	136
一、干选盘式强磁选机·····	136
二、干选感应辊式强磁选机·····	142
三、干选永磁对辊强磁选机·····	143
四、立环湿式强磁选机·····	147
五、永磁转笼式强磁选机·····	149

六、SHP型湿式强磁选机·····	151
七、多梯度磁选机·····	154
第四节 国外强磁选机及其它磁选方法·····	159
一、琼斯(Jones)湿式强磁选机·····	159
二、吉尔(Gill)强磁选机·····	161
三、拉皮得(Rapid)湿式转环强磁选机·····	162
四、高梯度磁选·····	165
五、磁流体分离法·····	168
六、超导磁选·····	170
第五节 弱磁性矿石磁选实例·····	170
一、弱磁性铁矿石磁选实例·····	170
二、稀有金属矿石磁选实例·····	176
第五章 电选·····	179
第一节 电选分离的基本理论·····	179
第二节 电选机·····	188
第三节 电选的影响因素及其操作·····	197
第四节 电选操作安全·····	200
第五节 电选选别工艺流程实例·····	201
第六章 光电选矿·····	206
第一节 概述·····	206
第二节 光电选矿的基本原理·····	206
第三节 光电选矿机的结构原理·····	211
第四节 光电选矿实例·····	215
第七章 摩擦选矿·····	216
第一节 矿粒的弹性和摩擦系数·····	216
第二节 矿粒在斜面上的运动·····	218
第三节 摩擦选矿机·····	220

第一章 磁选的理论基础

第一节 磁选过程及矿粒分选的基本条件

磁选是根据矿石中各种矿物的磁性差异，在磁选机磁场中进行分选的一种选矿方法。

当具有不同磁性的矿物粒子通过磁选机的磁场时(图 1-1)，必然要受到磁力和机械力的作用。由于磁性较强的矿粒与磁性较弱的矿粒所受的磁力不同，便产生了不同的运动轨迹，从而把矿粒按其磁性不同选分为两种或多种单独的选矿产品。

回收到磁性产品中的磁性矿粒的运动轨迹，由作用于磁性矿粒上的磁力和机械力的合力来决定。而进入到非磁性产品中的矿粒，因受磁力作用很小，甚至不受磁力作用，其运动轨迹仅由机械力来决定。

从图 1-1 可以看出，当磁选机磁场作用于矿粒上的磁力大于机械力时，磁性矿粒被吸引到圆筒上，并随圆筒旋转，带到卸矿区作为精矿产出；而非磁性矿粒则随矿浆流动作为尾矿排出。

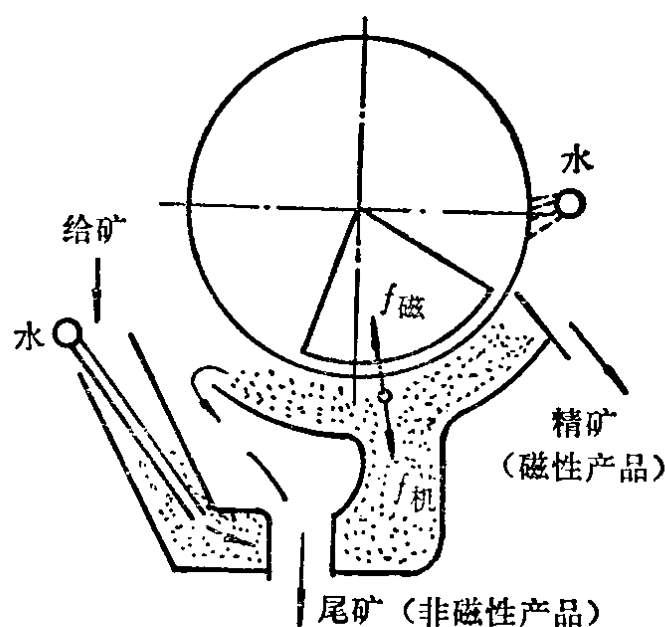


图 1-1 磁选过程示意图

由此可见,为了保证磁性矿粒与非磁性矿粒分离,作用在磁性矿粒上的磁力必须大于与它方向相反的所有机械力的合力,即

$$f_{\text{磁}} > \Sigma f_{\text{机}} \quad (1-1)$$

式中 $f_{\text{磁}}$ ——作用在磁性矿粒上的磁力;

$\Sigma f_{\text{机}}$ ——与磁力方向相反的机械力合力,包括重力、惯性力、介质阻力、摩擦力等。

否则,磁选过程不可能正常进行。

因此,为了分析与掌握磁选过程,必须很好地研究磁选机磁场的基本性质,矿物的磁性以及矿粒在磁选机中运动的基本规律等等。

第二节 磁现象及磁场的基本概念

一、磁场的物理概念

磁场就是存在磁力作用的空间。在磁场中最常见的现象,是两物体的互相吸引或互相排斥。这种现象在磁铁的两极(北极和南极)表现更为突出。同一个磁铁的两极永远带有符号相反、数量相等的磁量而且不能互相分开。

库仑实验证明:磁极与磁极相互作用时,其作用力表示如下:

$$f = K \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1-2)$$

式中 f ——两磁极互相间的作用力;

m_1, m_2 ——磁极所荷的磁量;

r ——两磁极间的距离;

K ——与介质性质和计量单位有关的比例系数。

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的各向同性的均质介质,则 $K=\frac{1}{\mu}$, μ 为介质的导磁系数。

所以,在任何介质中,库仑定律的一般公式可写成:

$$f = \frac{1}{\mu} \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1-3)$$

假定在真空中, 互相作用的两磁荷相等, 即 $m_1 = m_2 = m$, 则根据库仑定律得出:

$$m = r\sqrt{f} \tag{1-4}$$

若两磁极相距为 1 厘米, 相互作用力为 1 达因, 即当 $r = 1$ 和 $f = 1$ 时, 磁量 $m = 1$ 单位磁量。因此, 在绝对电磁单位制中, 1 个单位磁量就是: 在真空中两个相等磁量相距 1 厘米, 相互作用力为 1 达因, 称该磁量为 1 个单位磁量。

应当指出, 磁量的概念纯粹是假定的, 实际上根本不存在磁量, 只是为了便于推导各种数学关系, 才提出磁量这一物理概念。

物体在磁场中某一点将会受到磁力的作用, 为了度量磁场中某点的磁场强度, 可用单位北极的磁量在该点所受的磁力大小来表示, 也就是:

$$H = \frac{f}{m} \tag{1-5}$$

式中 H ——磁场强度。

磁场强度是向量, 其方向与磁场作用力的方向一致。在绝对电磁单位制中, 磁场强度的单位为奥斯特。1 奥斯特相当于单位磁量上的作用力等于 1 达因的磁场强度。

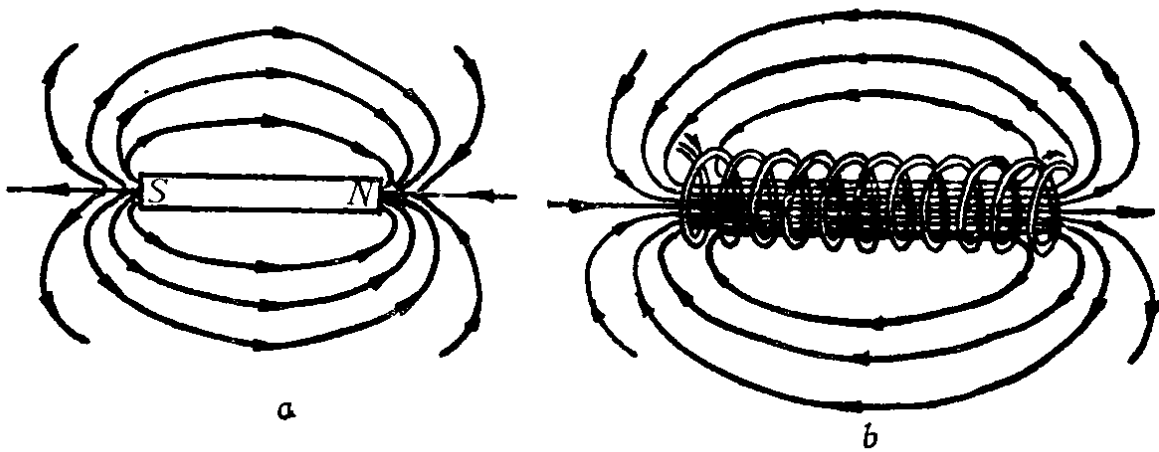


图 1-2 永久磁铁和螺线管的磁力线分布图

磁场还可以用假想的磁力线来表示(图 1-2)。

习惯规定磁力线在磁铁外部自 N 极出发到 S 极, 而在磁铁内部由 S 极出发到 N 极, 并以磁力线的流向表示磁场的方向, 即磁力线上某点的切线方向就是磁场在该点的磁场强度的方向, 同时以

单位面积上通过的磁力线条数，即磁力线的疏密程度表示磁场的强弱。

二、物体的磁化、磁化强度和磁化系数

在通常情况下，物体在没有外磁场作用时并不显示磁性，而当物体进入磁场后，在外磁场作用下便显出磁性。这是什么原因呢？原来任何物体都是由分子组成，而分子是由原子组成的。原子中的电子绕原子核运动以及电子的自旋都能产生磁效应，所以每个原子就相当于一个微小的磁铁(或叫单元磁铁)。在没有外磁场的情况下，物体中的单元磁铁因分子的强烈热运动，其分布是杂乱无章、毫无秩序的，因此它们产生的磁效应相互抵消，从宏观上看整个物体不显示磁性。如果把物体放在外磁场中，则因外磁场的作用，物体中各单元磁铁便全部地或部分地顺着外磁场的作用方向，有秩序地排列起来，使物体显示出磁性。这种物体在外磁场作用下带磁而显示磁性的物理现象，叫做物体的磁化。

物体在磁场中被磁化后(图 1-3)，在两极产生磁量 m ，又设两极之间的距离为 L ，则物体磁化后的磁矩 M 应为

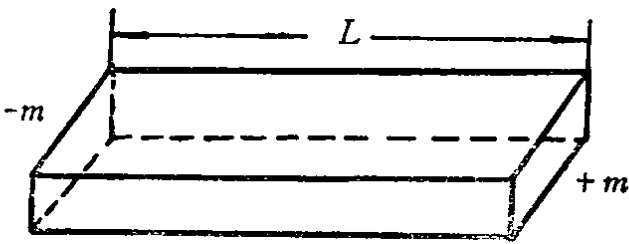


图 1-3 物体的磁化

$$M = mL \tag{1-6}$$

磁矩 M 是在物体体积为 V 的情况下得出的，为了说明物体的磁化程度，可以磁化强度 J ，也就是以单位体积的磁矩来表示，即

$$J = \frac{M}{V} \tag{1-7}$$

磁化强度 J 能反映出物体被磁化的程度。当物体未磁化时，则因其磁矩 $M = 0$ ，磁化强度 $J = 0$ ；当物体磁化后， $M \neq 0$ ， $J \neq 0$ 。

物体的磁化强度又与外磁场强度有关，实验证明，在没有达到磁饱和之前，物体的磁化强度与外磁场强度成正比例变化，也就是

$$J = \kappa_0 H_0 \tag{1-8}$$

式中 J ——物体的磁化强度，高斯；

H_0 ——外磁场强度, 奥斯特;

κ_0 ——比例系数。

$$\kappa_0 = \frac{J}{H_0} = \frac{M}{V H_0} \quad (1-9)$$

从公式(1-9)可以看出, κ_0 就是 1 立方厘米的物体, 在磁场强度为 1 奥斯特的磁场中产生的磁矩, 所以又叫 κ_0 为物体的容积磁化系数。显然, κ_0 是表示物体被磁化难易程度的物理量, 物体的 κ_0 值越大, 越易被磁化。

在实际工作中, 为方便起见, 常用单位质量物体的磁化系数, 也就是物体的比磁化系数 χ_0 来说明物体的磁性。比磁化系数就是 1 克物体在磁场强度为 1 奥斯的外磁场中所产生的磁矩, 为此可以物体的容积磁化系数 κ_0 与物体的密度 δ 的比值, 求出物体的比磁化系数 χ_0 , 即

$$\chi_0 = \frac{\kappa_0}{\delta} \quad (1-10)$$

应当指出, χ_0 和 κ_0 一样是一个和物体性质密切相关的重要的磁性常数。对于大多数物体, 如弱磁性矿物的 κ_0 和 χ_0 是一个常数, 只有少数物体, 例如强磁性矿物的 κ_0 和 χ_0 不是常数。

根据物质在磁场中磁化的表现, 物质可以分为顺磁质和反磁质。

顺磁质的磁化强度向量与外磁场的方向相同, 因而磁化系数有正值; 反磁质的磁化强度向量与外磁场的方向相反, 所以磁化系数为负值。

由于顺磁质被磁化后会增加原磁场的磁场强度, 因此电磁铁线圈内部介质中的磁场强度, 应等于线圈电流所产生的磁场强度 H_0 与被磁化了的介质所产生的磁场强度 H' 之和, 称为合磁场强度 B , 即

$$B = H_0 + H' \quad (1-11)$$

称 B 为磁感应强度。

H' 是由于介质被磁化所产生的, 它与磁化强度有关,

$$H' = 4\pi J \quad (1-12)$$

而

$$J = \kappa_0 H_0$$

所以

$$B = H_0 + 4\pi\kappa_0 H_0 = (1 + 4\pi\kappa_0) H_0$$

又

$$1 + 4\pi\kappa_0 = \mu$$

μ 为介质的导磁系数, 故磁感应强度公式又可写成

$$B = \mu H_0 \quad (1-13)$$

因为在真空中, H 与 B 的数值相等, 在绝对电磁单位制时, B 之单位为高斯, 真空中 1 高斯等于 1 奥斯特。

对于反磁质及大多数的顺磁质, 磁场强度 H' 与 H_0 相比是很小的, 但有几种物质(例如铁)的 H' 要比 H_0 大很多, 称之为铁磁性物质。在电磁铁的螺线管中放入铁芯, 其目的就是为了增加磁场强度。

三、矿粒在磁场中的行为

根据磁场强度分布的情况, 磁场可分为均匀磁场和不均匀磁场(图 1-4)。

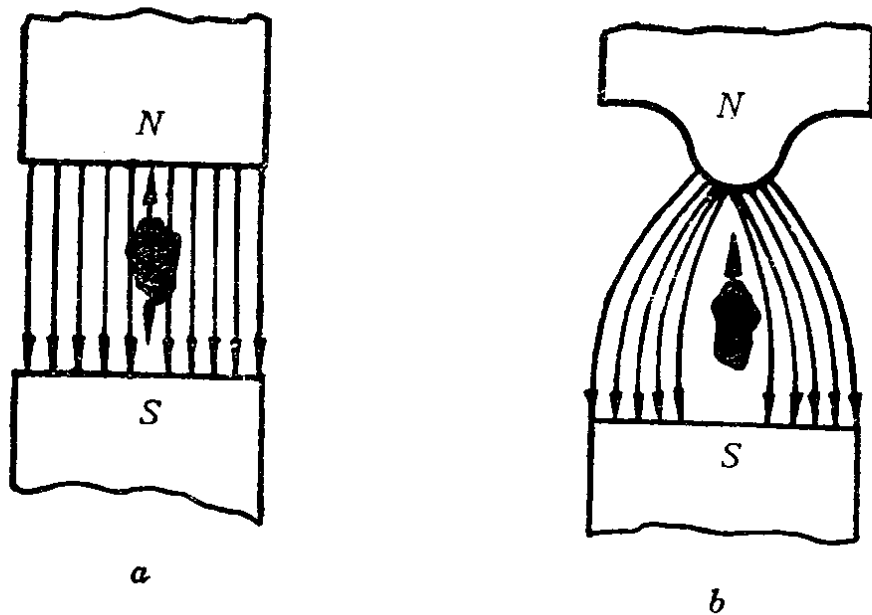


图 1-4 矿粒在均匀磁场和不均匀磁场中的行为

在均匀磁场中, 各点的磁场强度相同, 也就是磁场强度 H 为一常数。而在不均匀磁场中, 磁场强度的大小和方向是逐点变化的, 磁场强度 H 不为常数。在均匀磁场中磁力线的分布是均匀的, 而在不均匀磁场中磁力线的分布是不均匀的。

磁场的均匀程度可以用磁场梯度来量度，所谓磁场梯度就是单位距离(例如 1 厘米)内磁场强度的变化数值(图 1-5)。

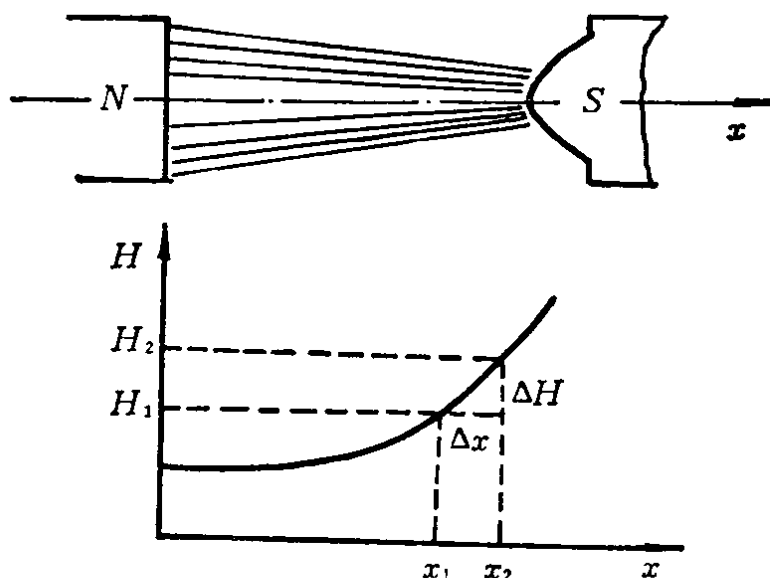


图 1-5 磁场梯度示意图

设距离 N 极 x_1 处的磁场强度为 H_1 ，距离 x_2 处的磁场强度为 H_2 ，则磁场梯度(以符号 $grad H$ 表示)应为

$$grad H = \frac{H_2 - H_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta H}{\Delta x} = \frac{dH}{dx} \quad (1-14)$$

式中 $\frac{dH}{dx}$ 的意义是：当磁场内两点的距离很小时的磁场强度变化量。

从公式(1-14)可知，在均匀磁场中因磁场强度的变化量 $dH = 0$ ，所以 $\frac{dH}{dx} = 0$ 或 $grad H = 0$ ；在不均匀磁场中，因 $dH \neq 0$ ，所以 $\frac{dH}{dx} \neq 0$ 或者 $grad H \neq 0$ ，并且磁场梯度越大，单位距离内磁场强度的变化量也越大，磁场越不均匀。

和任何物体一样，矿粒在磁场中被磁化，两端产生数量相等、符号相反的磁量 m 。如果矿粒在均匀磁场中被磁化，则因两端的磁场强度相同，所受的磁力大小也相同，但方向相反，因此从整体上说，矿粒不受磁力作用，而只受转矩作用，此转矩使矿粒的长轴最终平行于磁场的方向。在不均匀磁场中，矿粒除受转矩作用外，

还由于矿粒两端的磁场强度不同而受不同的磁力作用，从而表现出整个矿粒受磁力作用，并向磁场强度高的方向运动。

这就说明了磁选机的磁场必须是不均匀磁场，否则不可能达到选分的目的。

四、在恒定磁场中作用于矿粒上的磁力

在恒定磁场中各点的磁场强度不随时间而变化，由直流电产生的磁场以及永久磁铁的磁场都属于恒定磁场。由交流电产生的磁场则属于交变磁场。

如果把一颗尺寸很小的矿粒放在磁选机的磁场中，使矿粒的长轴方向与磁场方向一致，并假定该不均匀磁场的磁场梯度 $gradH = \text{常数}$ (图 1-6)。

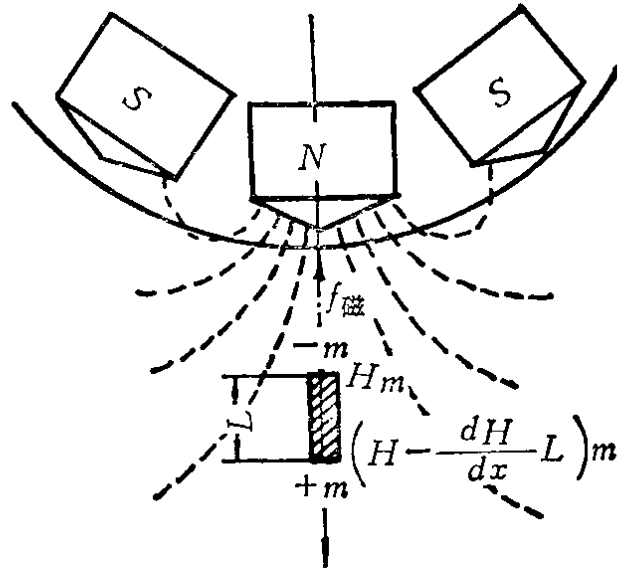


图 1-6 矿粒在磁场中受到的磁力

设矿粒两端磁化后各带磁量为 $+m$ 及 $-m$ ，矿粒沿长轴方向的长度为 L ，则矿粒两端受磁场作用力的大小分别为 Hm 和 $\left(H - \frac{dH}{dx}L\right)m$ ，而作用于整个矿粒上的磁力 f_m 应为两者之差值，即

$$f_m = Hm - \left(H - \frac{dH}{dx}L\right)m = mL \frac{dH}{dx} = M \frac{dH}{dx} \quad (1-15)$$

把公式(1-6)和公式(1-8)代入公式(1-15)可得

$$f_m = \kappa_0 V H \frac{dH}{dx} \quad (1-16)$$

公式(1-16)表示了磁场作用于一个矿粒上的磁力，但矿粒有大小、轻重之分，为了便于比较不同矿粒所受的磁力，可以比磁力也就是磁场作用于单位质量(例如 1 克)矿粒上的磁力来表示。比磁力的计算公式如下：

$$F_{\text{磁}} = \frac{f_{\text{磁}}}{Q} = \frac{\kappa_0 V H \frac{dH}{dx}}{V \delta} = \chi_0 H \frac{dH}{dx} = \chi_0 H \text{ grad } H \quad (1-17)$$

式中 $F_{\text{磁}}$ ——比磁力, 达因/克;

Q ——矿粒重量, 克;

δ ——矿粒密度, 克/厘米³;

χ_0 ——矿粒比磁化系数, 厘米³/克。

分析公式(1-17)可知, 作用于矿粒上的比磁力 $F_{\text{磁}}$ 的大小, 与矿粒的比磁化系数 χ_0 成正比, 矿粒的磁性愈强, 所受的磁力愈大。比磁力的大小又与矿粒所在处的磁场梯度 $\text{grad } H$ 和磁场强度 H 的乘积成正比, 磁场强度越大, 磁场梯度越大, 矿粒所受的磁力也越大。但在均匀磁场中, 由于 $\text{grad } H = 0$, 无论矿粒的比磁化系数多大, 磁场强度多高, 矿粒所受的磁力仍然等于零, 因而不可能进行分选。

磁场强度与磁场梯度的乘积 $H \text{ grad } H$ 又叫“磁场力”。当矿物磁性一定时, 要使磁性矿粒与脉石分开, 并尽可能获得好的分选效果, 就必须使磁选机产生足够的磁场力。

对于强磁性矿物, 因为矿粒的比磁化系数 χ_0 很大, 所需要的磁场力 $H \text{ grad } H$ 相应地可以小些; 而选分弱磁性矿物时, 因为矿粒的比磁化系数 χ_0 很小, 所需要的磁场力 $H \text{ grad } H$ 就很大。当选分磁性相近的两种矿物时, 就必须适当调节磁场力 $H \text{ grad } H$ 来提高选分效果。为了提高磁场力 $H \text{ grad } H$, 不仅要设法提高磁场强度, 而且也可以通过提高磁场梯度 $\text{grad } H$ 来达到。

应当指出, 比磁力的计算公式(1-17)是假定矿粒尺寸很小, 磁场梯度值 $\text{grad } H$ 等于常数时, 才能成立。实际上磁选机的磁场梯度并不是常数, 对于尺寸较大的矿粒, 按公式(1-17)计算的比磁力将存在较大的误差, 此时可以把矿粒分成许多小块, 再按积分的方法求出作用于矿粒上的磁力。

第三节 矿物的磁性

一、矿物按磁性分类

影响矿粒在磁选机磁场中分选的因素是很多的,包括矿石性质、工艺流程、磁选设备、操作条件等,但起决定作用的是矿石性质,而在矿石性质中,矿物的磁性又是起主导作用的因素。因此在学习磁选这门科学技术时,必须很好地研究与掌握矿物磁性及其特点。

根据矿物的比磁化系数以及在现代生产用磁选机磁场中能否分选为条件,可以把所有的矿物分为以下几类:

1. 强磁性矿物

其比磁化系数大于 3000×10^{-6} 厘米³/克。属于这一类的矿物主要有磁铁矿、磁性赤铁矿(又叫 γ -赤铁矿)、钛磁铁矿、磁黄铁矿、锌铁尖晶石等。这些矿物大多属于亚铁磁质,在弱磁场($H_0 = 1700$ 奥斯特或更高)磁选机中可选出这类矿物,所需的磁场力 $H \text{ grad } H$ 达 $(4 \sim 8) \times 10^5$ 奥斯特²/厘米。

2. 中等磁性矿物

其比磁化系数介于 $(600 \sim 3000) \times 10^{-6}$ 厘米³/克之间。属于这一类的矿物较少,有钛铁矿及假象赤铁矿等。选出这类矿物的磁选机的磁场强度 H_0 为 $2000 \sim 6000$ 奥斯特。

3. 弱磁性矿物

其比磁化系数介于 $(15 \sim 600) \times 10^{-6}$ 厘米³/克之间。属于这一类的矿物很多,如赤铁矿、镜铁矿、菱铁矿、褐铁矿、水锰矿、软锰矿、硬锰矿、铬铁矿、黑钨矿、金红石、电气石、角闪石、石榴石、绿泥石等。这类矿物中有反磁质,但多数是顺磁质。在强磁场($H_0 = 6000 \sim 26000$ 奥斯特, $H \text{ grad } H = (200 \sim 900) \times 10^5$ 奥斯特²/厘米)的磁选机中可以选出这类矿物。

4. 非磁性矿物

其比磁化系数小于 15×10^{-6} 厘米³/克。属于这类矿物有:白钨矿、锡石、辉铜矿、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、红砷镍矿、自然硫