

CIDIANXUANKUANG

磁电选矿

王常任 主编

冶金工业出版社

磁 电 选 矿

王常任 主编

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2006

图书在版编目 (CIP) 数据

磁电选矿/王常任主编. — 北京: 冶金工业出版社,
1986.5 (2006 重印)

ISBN 7-5024-0463-5

I. 磁… II. 王… III. 电磁选矿 IV. TD924

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 003746 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 宋 良 美术编辑 李 心 责任印制 牛晓波

北京鑫正大印刷有限公司印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1986 年 5 月第 1 版; 2006 年 5 月第 6 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 19.5 印张; 462 千字; 303 页; 14301—16300 册
35.00 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)

前 言

本书是遵循冶金工业部所属高等院校本科四年制造矿专业的“磁电选矿”课程教学大纲编写的，考虑到当前磁电选矿的发展和需要，对大纲内容进行了充实。

本书内容共分为两大部分。第一部分为磁选，第二部分为电选。书中主要阐述了磁电选矿的基本原理和基本理论；系统介绍了磁电选矿设备的结构、工作原理和应用以及磁电选矿设备的磁系或电极结构参数；还介绍了磁电选矿设备用的材料及其特性，磁路计算的基本知识以及磁、电分析和测量仪器；列举了有关磁电选矿实践方面的资料和数据。

本书的第一、二、三、五、六、七、八、九、十一和第十三章（第一、二、五和第六节）由东北工学院王常任同志编写，第四、十、十二和第十三章（第三和第四节）由北京钢铁学院刘承宪同志编写，第十四、十五、十六、十七和第十八章由中南工业大学刘永之同志编写。本书由东北工学院王常任同志主编。中南工业大学孙仲元、武汉钢铁学院蒋朝澜和东北工学院郑龙熙等三名同志对书稿中主要篇章进行了详细审阅和校核；东北工学院施素芬同志为编者编写第二、三和第十三章提供了资料，在此表示感谢。

本书可作为冶金工科高等院校选矿专业的教学用书，也可供冶金、建材、煤炭、化工和地质等部门从事选矿科研、设计、生产的工程技术人员参考。

由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者多多批评指正。

编 者

1985年3月

目 录

第一篇 磁 选	1
第一章 磁选的基本原理	3
第一节 磁选的基本条件和方式.....	3
第二节 与磁选有关的磁场的基本概念和磁量.....	3
第三节 回收磁性矿粒需要的磁力.....	6
第二章 矿物的磁性	9
第一节 矿物按磁性的分类.....	9
第二节 强磁性矿物的磁性.....	10
第三节 影响强磁性矿物磁性的因素.....	15
第四节 弱磁性矿物的磁性.....	22
第五节 矿物磁性对磁选过程的影响.....	25
第三章 弱磁场磁选设备	28
第一节 干式弱磁场磁选机.....	29
第二节 湿式弱磁场磁选机.....	32
第三节 预磁和脱磁设备.....	40
第四节 除铁器.....	42
第四章 强磁场磁选设备	44
第一节 干式强磁场磁选机.....	44
第二节 湿式强磁场磁选机.....	51
第三节 高梯度磁选机 (HGMS)	60
第五章 磁选设备用的磁性材料及其特性	65
第一节 铁磁性材料的磁特性及其分类.....	65
第二节 软磁材料.....	67
第三节 硬磁材料.....	68
第四节 非磁性材料.....	77
第六章 弱磁场磁选设备的磁系结构参数	79
第一节 开放型磁系磁选机的磁场.....	81
第二节 开放型磁系磁选机的旋转磁场.....	85
第三节 磁选机磁系的极面宽和极隙宽的比值.....	86
第四节 磁选机磁系的极距.....	87
第五节 磁选机磁系的高度、宽度、半径和极数.....	92
第六节 磁力脱泥槽磁系的形状、位置和尺寸.....	94
第七节 磁化 (或脱磁) 设备的磁化 (或脱磁) 时间.....	97
第七章 强磁场磁选设备的磁系结构参数	98
第一节 平面-单齿磁极对的参数.....	98

第二节	双曲线形磁极对的参数	101
第三节	平面或槽形-多齿磁极对的参数	103
第四节	等磁力磁极对的参数	108
第五节	多层尖齿极的参数	109
第六节	多层球极的参数	114
第七节	多层丝极的参数	116
第八节	多层网极的参数	122
第八章	回收磁力的计算	129
第一节	在磁选机圆筒(或圆辊)上吸住磁性矿粒需要的磁力	129
第二节	从磁选机的矿流中吸出磁性矿粒需要的磁力	134
第三节	在磁力脱泥槽中吸引磁性矿粒需要的磁力	140
第九章	磁路计算	142
第一节	磁路定律	142
第二节	气隙磁导的计算	142
第三节	磁路计算	154
第四节	柱形、塔形和马鞍形线圈的磁场强度的计算	164
第十章	超导磁选	173
第一节	超导电的基本理论	173
第二节	超导材料	178
第三节	低温的获得和保持	180
第四节	超导磁选机及其应用	182
第十一章	磁流体分选	189
第一节	磁流体动力分选(MHDS)法	189
第二节	磁流体静力分选(MHSS)法	190
第三节	磁流体静力分选的应用	198
第十二章	磁力分析和磁测量仪器	201
第一节	磁力分析仪器	201
第二节	磁场强度和磁通量的测量仪器	210
第三节	永磁材料磁性能的测定	215
第十三章	磁选的实践应用	219
第一节	磁选前矿石的准备	219
第二节	铁矿石的磁选	225
第三节	锰矿石的磁选	232
第四节	有色和稀有金属矿石的磁选	234
第五节	强磁性重介质的回收和再生	238
第六节	水的磁化处理	238
第二篇 电 选		243
第十四章	矿物的电性质	245
第一节	介电常数	245

第二节	矿物的电阻	246
第三节	矿物的比导电度	247
第四节	矿物的整流性	247
第十五章	电选机的电场	249
第一节	静电场	249
第二节	电晕电场	250
第三节	复合电场	251
第十六章	电选的基本理论	253
第一节	矿粒在静电场中带电	253
第二节	矿粒在电晕电场中带电	253
第三节	矿粒在复合电场中带电	254
第四节	矿粒摩擦带电	255
第五节	电选过程的理论研究	255
第六节	作用在矿粒上的机械力和电力	263
第十七章	电选机	264
第一节	鼓筒式电选机	264
第二节	其他类型电选机	271
第三节	电选机的高压电源	276
第四节	电选机的安全问题	278
第十八章	电选的实践应用	279
第一节	有色金属矿石中白钨锡石的电选	279
第二节	稀有金属矿石的电选	281
第三节	黑色金属铁矿石的电选	285
第四节	其他矿石的电选	285
第五节	影响电选的因素	287
第六节	电选的发展方向	290
附录		294
附表 1	各种矿物的物质比磁化率	294
附表 2	强磁性铁矿石的物质比磁化率 χ	296
附表 3	弱磁性矿物的物质比磁化率	298
附表 4	各种矿物的介电常数和电阻	298
附表 5	矿物的比导电度和整流性	300
主要参考资料		303

第一篇 磁 选

磁选是在不均匀磁场中利用矿物之间的磁性差异而使不同矿物实现分离的一种选矿方法。该法比较简单而又有效。关于磁选法的原理，虽然有许多方面还未充分了解，但在当今的选矿领域和其他领域中却占有重要地位。磁选法广泛地应用于黑色金属矿石的选别，有色和稀有金属矿石的精选，重介质选矿中介质的回收，从非金属矿物原料中除去含铁杂质，排出铁物保护破碎机和其他设备，从冶炼生产的钢渣中回收废钢以及从生产和生活污水中除去污染物等。

磁选是处理铁矿石的主要选矿方法。按用磁选法选别铁矿石的规模来说，磁选法在我国、苏联、美国、加拿大、瑞典和挪威等国家占有重要地位。我国铁矿石资源丰富，目前保有的铁矿石探明储量居世界前列，但贫矿占80%左右，富矿仅占20%左右，而富矿中又有5%由于含有害杂质不能直接冶炼。因此，铁矿石中的80%以上需要选矿。就世界范围来说也大体如此。铁矿石经过选矿以后，提高了品位，降低二氧化硅和有害杂质的含量，给以后的冶炼过程带来许多好处。根据我国的生产实践统计，铁精矿品位每提高1%，高炉利用系数可增加2~3%，焦炭消耗量可降低1.5%，石灰石消耗量可减少2%。

许多有色和稀有金属矿物具有不同程度的磁性，而另一些则没有。采用单独的重选法和浮选法不能获得合格精矿，需要结合磁选和其他方法才能获得合格精矿。例如，钨矿重选所得黑钨粗精矿中，一般含有锡和其他一些有用成分。锡在钨的冶炼过程中是有害杂质。利用黑钨矿具有弱磁性和锡石无磁性这一特点采用磁选法进行处理后，可除去含锡杂质，获得合格的钨精矿。

在重介质选矿中使用磁铁矿和硅铁作为介质，它们在重介质选矿过程中有一部分进入轻、重产品的洗水中，通过磁选法可回收它们并使之再用。

非金属矿物原料的选矿中，在许多情况下都伴随有除铁的问题，磁选成为一个重要的作业。例如，高岭土中铁是一种有害杂质。含铁高时，高岭土的白度、耐火度和绝缘性都降低，严重影响制品的质量。一般若将含铁杂质除去1~2%时，白度可提高2~4个单位。世界各国对高岭土进行了研究，并应用高梯度磁分离装置除去含铁杂质获得了良好的效果。

蓝晶石、石英、红电气石、长石、霞石闪长岩等选别很早以来就用干式磁选法。例如苏联、美国、加拿大、印度等国的霞石闪长岩的选矿，为了除去强磁性矿物，使用了弱磁场磁选机，并用强磁选机除去非磁性产品中的弱磁性矿物（如赤铁矿）。

进入选矿厂中的矿石常含有铁物，它易损坏细碎破碎机。为了保护破碎机不受损坏，在破碎机的给矿皮带上方装有悬吊磁铁以吸出矿石中的铁物。

冶炼生产的钢渣中含有大量钢渣，通过干式磨矿和干式弱磁选可以回收钢渣，在国外有生产实例。

应用高梯度磁分离或结合其他一些方法处理生产和生活污水以除去其中的污物。目前世界各国正在进行广泛深入地研究，有的已应用到工业中去。比较常见的要算是用高梯度磁分离器处理钢厂废水以除去其中的磁性铁杂质。

中国最早发现磁现象，在公元前一千多年就利用磁石的极性创造了指南针。从17~18世纪人们作了用手提式永久磁铁从锡石和其他稀有金属精矿中除铁的初次尝试。但是工业上开始应用磁选法选别铁矿石是在19世纪末，美国和瑞典制造出第一批用于干选铁矿石的电磁筒式磁选机。

20世纪初，铁矿石的磁选在瑞典得到较大的发展，出现了湿式筒式磁选机，它是现代化磁选机的原形，可以成功和经济地湿选细粒的铁矿石。

19世纪末，为了磁选弱磁性矿石，美国制造出闭合型电磁系的强磁场带式磁选机。以后为了同一目的，苏联和其他一些国家又制造出强磁场盘式、辊式和鼓式磁选机。上述几种磁选机共同的缺点是选别空间小，处理能力低。本世纪60年代，琼斯（Jones）型强磁选机首先在英国问世。这是强磁场磁选机的一个重要突破。这种磁选机在两原磁极间隙中成功的利用了多层的聚磁介质板，大大增加了选别空间，因而处理能力大大提高。

最近十多年来，磁选得到了较大的发展，出现了一些新的磁选工艺和新的磁选设备。高梯度磁选是本世纪70年代发展起来的一项磁选新工艺。它能有效地回收磁性很弱、粒度很细的磁性矿粒，为解决品位低、粒度细、磁性弱的氧化铁矿石的选别开辟了新途径。它不仅用于选别矿石，还可用于选别许多其他细粒和微细粒物料。高梯度磁选新工艺在环境保护领域内也有广泛地应用前景，将来可能成为全球性的环境保护的重要方法之一。

磁流体选矿也是磁选新工艺。它（包括磁流体静力分选和磁流体动力分选）是以特殊的流体（如顺磁性溶液、铁磁性胶粒悬浮液和电解质溶液）作为分选介质，利用流体在磁场或磁场和电场的联合作用下产生的“加重”作用，按矿物之间的磁性和密度的差异或磁性、导电性和密度的差异，而使不同矿物实现分离的一种新的选矿方法。当矿物之间磁性差异小而密度或导电性差异较大时，采用磁流体选矿可以有效地分选。磁流体静力分选应用于金刚石的选矿在国内外已进行了一些试验研究工作。结果表明，它可以作为金刚石选矿中的精选方法之一。

超导电技术是当代一门重要的新技术。近年来已把它用于选矿领域，研制出超导电磁选机。这种磁选机采用超导电材料作线圈，在极低的温度（绝对零度附近）下工作。线圈通入电流后可在较大的选分空间内产生1600 kA/m（20000 Oe）以上的强磁场，并且线圈不消耗电能，磁场长时间不衰减。这种磁选机的体积小，重量轻，磁场强度大，分选效果好，是用于工业生产的较理想的设备。我国也正在进行超导电磁选机的研制工作。这种磁选机可用于选别矿石特别是稀有金属矿石以及从非金属矿物原料中除去含铁杂质等等。

第一章 磁选的基本原理

第一节 磁选的基本条件和方式

磁选是在磁选设备的磁场中进行的。被选矿石给入磁选设备的选分空间后，受到磁力和机械力（包括重力、离心力、水流动力，等等）的作用。磁性不同的矿粒受到不同的磁力作用，沿着不同的路径运动（见图1-1）。由于矿粒运动的路径不同，所以分别接取时就得到磁性产品和非磁性产品（或是磁性强的产品和磁性弱的产品）。进入磁性产品中的磁性矿粒的运动路径由作用在这些矿粒上的磁力和所有机械力合力的比值来决定。进入非磁性产品中的非磁性矿粒的运动路径由作用在它们上面的机械力的合力来决定。因此，为了保证把被选分的矿石中的磁性强的矿粒和磁性弱的矿粒分开，必须满足以下条件：

$$f_{1\text{磁}} > \Sigma f_{\text{机}} > f_{2\text{磁}} \quad (1-1)$$

式中 $f_{1\text{磁}}$ ——作用在磁性强的矿粒上的磁力；

$f_{2\text{磁}}$ ——作用在磁性弱的矿粒上的磁力；

$\Sigma f_{\text{机}}$ ——与磁力方向相反的所有机械力的合力。

这一公式不仅说明了不同磁性矿粒的分离条件，同时也说明了磁选的实质，即磁选是利用磁力和机械力对不同磁性矿粒的不同作用而实现的。

磁力和机械力对不同磁性矿粒的不同作用与矿石的选分方式有关，见图1-2。从图中可以看出，矿粒在不同的情况下按磁性分离的路径也不同。第一种情况对于磁性差别较大的矿粒分离效果很好（见图1-2(a)），而对于磁性相近的矿粒由于磁性与非磁性矿粒的路径相近，选分难以控制（见图1-2(b)）；后两种情况（见图1-2(c)、(d)和图1-2(e)、(f)）对磁性相近的难选矿石分离效果较好，因为在非磁性部分排出的地方，磁铁表面仅是吸出和吸住个别的被非磁性部分机械混杂的磁性矿粒，而大部分的磁性矿粒在这以前就已经被分离出去了。

所以， $f_{\text{磁}} > f_{\text{机}}$ 保证了磁性矿粒被吸到磁极上，在分离磁性差别较大的易选矿石时，能够顺利地分出磁性部分，但在分离磁性差异小的难选矿石时，如要获得高质量的磁性部分，就需要很好地调整各种磁性矿粒的磁力和机械力关系，使之能有选择性的分离，才能得到良好的效果。

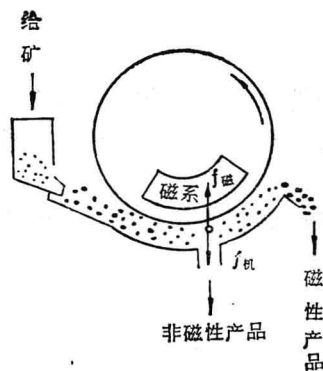


图 1-1 矿粒在磁选机中分离的示意图

第二节 与磁选有关的磁场的基本概念和磁量

一、磁场、磁感应强度、磁化强度、磁化率

磁场是物质的特殊状态，并显示在载电导体或磁极的周围。磁选时在磁场中作用有吸

引力（对顺磁性和铁磁性颗粒）和排斥力（对逆磁性或同极性的硬磁性颗粒）。

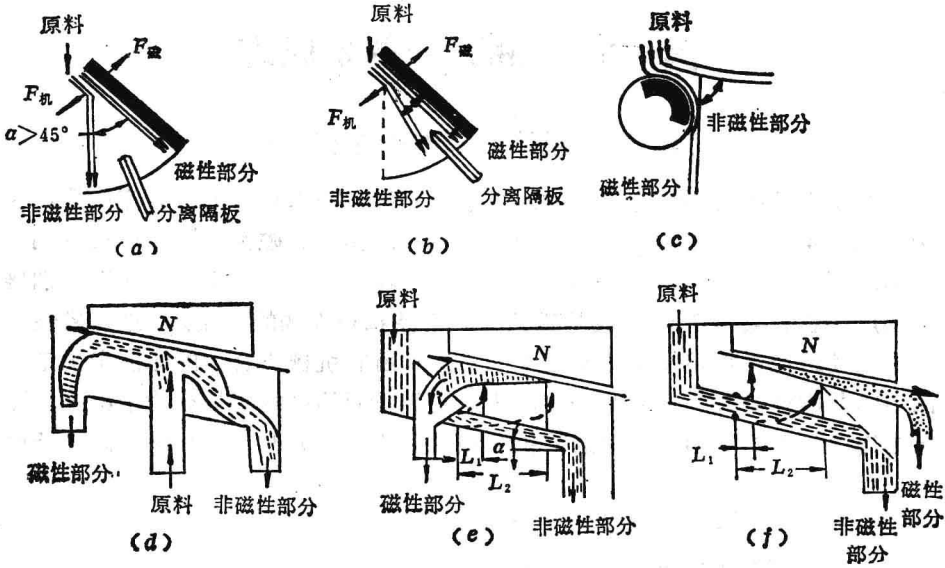


图 1-2 矿粒在不同情况下按磁性分离的示意图
(a)、(b)——磁性矿粒偏离；(c)、(d)——磁性矿粒吸住；
(e)、(f)——磁性矿粒吸出

磁选时起作用的物理力场有如磁力场、重力场和离心力场等，它们同样是物质性质的特殊形式。描述磁选设备选分空间某点的磁场用磁感应强度 B_0 。(在SI单位制中单位为 Wb/m^2 或 T)。

任何物质都存在有分子电流。分子电流和被它包围面积的乘积叫做分子电流的磁矩，即

$$m_i = i \Delta s \quad (1-2)$$

式中 m_i ——磁矩， $A \cdot m^2$ ；

i ——分子电流，A；

Δs ——电流包围的面积， m^2 。

物质进入磁化场后分子电流便或多或少地取向于磁化场方向，结果产生一个附加磁场叠加在磁化场上，从而改变了磁化场。

某一体积物质的合成磁矩 m 等于分子电流磁矩 m_i 的矢量和，即

$$m = \sum m_i \quad (1-3)$$

单位体积物质的磁矩叫做物质的磁化强度，即

$$M = \frac{dm}{dV} \quad A/m \quad (1-4)$$

式中 m ——物质的合成磁矩， $A \cdot m^2$ ；

V ——物质的体积， m^3 ；

M ——磁化强度， A/m 。

磁化强度是描写物质磁化程度的物理量。

矢量 $H_0 = B/\mu_0$ 。 H_0 叫做磁化场的磁场强度, A/m。

式中 B ——物质内的磁感应强度;

μ_0 ——真空的磁导率 ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/m} \cdot \text{A}$ 或 H/m)。

H_0 、 B 和 M 之间存在如下的关系

$$B = \mu H_0 \quad \text{T} \quad (1-5)$$

$$M = \kappa H_0 \quad \text{A/m} \quad (1-6)$$

式中 μ 、 κ ——物质的磁导率 (或物质的导磁系数, H/m) 和物质的体积磁化率 (或物质的体积磁化系数, 无因次)。

κ 是一个和物质性质有关的重要的磁性系数, 它是表示物质被磁化难易程度的物理量。 κ 值愈大, 表明该物质愈容易被磁化。对于大多数物质如弱磁性矿物, κ 是一个常数, 只有少数物质如强磁性矿物, κ 不是常数。

物质的体积磁化率与其本身的密度之比值, 叫做物质的质量磁化率 (或物质的比磁化率), 即

$$\chi = \frac{\kappa}{\delta} \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (1-7)$$

式中 δ ——物质的密度, kg/m^3 。

由 H_0 、 B 和 M 式可得出 μ 和 κ 的关系为

$$\mu = \mu_0(1 + \kappa) \quad \text{H/m} \quad (1-8)$$

二、在无电流的自由空间内矢量 H 的旋度

下面讨论由带电流的导体、线圈和磁极所产生的外磁场。设有二维磁场 H , 在场中作一包围 $M(x, y)$ 点的闭曲线 l 。设 l 所围区域的面积为 ΔS , 当 l 收缩到 $M(x, y)$ 时, 极限

$$\lim_{l \rightarrow M} \frac{\oint H \cdot dl}{\Delta S}$$

存在, 则称此极限为磁场 H 在 $M(x, y)$ 点的旋度, 即

$$\text{rot } H = \lim_{l \rightarrow M} \frac{\oint H \cdot dl}{\Delta S} \quad (1-9)$$

在直角坐标系中上式可写成

$$\text{rot } H = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (1-10)$$

式中 H_x 和 H_y 是磁场强度 H 在 x 和 y 轴上的分量。

因为在外磁场内无电流, 所以

$$\text{rot } H = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = 0 \quad (1-11)$$

三、在无电流的自由空间内的磁感应强度 B 的散度

在二维磁场 B 中作包围 $M(x, y)$ 点的闭曲面 S , S 包围的区域为 Ω , Ω 的体积为 ΔV 。当 Ω 收缩到 $M(x, y)$ 时, 极限

$$\lim_{\Omega \rightarrow M} \frac{\oint B \cdot dS}{\Delta V}$$

存在, 则称此极限为磁场 $\mathbf{B}$ 在 $M(x, y)$ 点的散度, 即

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = \lim_{\Delta V \rightarrow M} \frac{\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}}{\Delta V} \quad (1-12)$$

在直角坐标系中上式可写成

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} \quad (1-13)$$

式中 B_x 和 B_y 是磁感应强度 $\mathbf{B}$ 在 x 和 y 轴上的分量。

因为经过任何一个不包含磁量和电流的闭曲面的全部磁通等于零, 所以

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = \mu_0 \left(\frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (1-14)$$

亦即

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = \mu_0 \operatorname{div} \mathbf{H} = 0 \quad (1-15)$$

由上式得出

$$\operatorname{div} \mathbf{H} = \frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} = 0 \quad (1-16)$$

这样看来, 在没有磁量也没有电流的磁场中, 磁场的基本方程是

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = 0$$

和

$$\operatorname{div} \mathbf{H} = 0 \quad (1-17)$$

它说明这种场是无旋场和无散场。

按照现代关于磁场性质的概念, 表征磁场最基本的是磁感应强度, 但是在现在许多书籍中仍然习惯用磁场强度来表示磁场, 我们也是这样。还要说明的是, 以后在没有原则性意义的地方, $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{M}$ 等磁量我们就不用矢量形式表示了。

第三节 回收磁性矿粒需要的磁力

磁场有均匀磁场和非均匀磁场。如果磁场中各点的磁场强度相同, 则此磁场是均匀磁场, 否则就是非均匀磁场。磁场非均匀性是通过磁极的适当的磁场强度、形状、尺寸和排列产生。典型的均匀磁场和非均匀磁场如图 1-3 所示。磁场的非均匀性用导数 $\frac{dH}{dl}$ 表示,

它指出在某点沿 l 方向上磁场强度 H 对距离的变化率。如磁场强度 H 方向相同, 则这个量在 H 变化最大的方向上叫做磁场梯度, 用 $\operatorname{grad} H$ 表示。

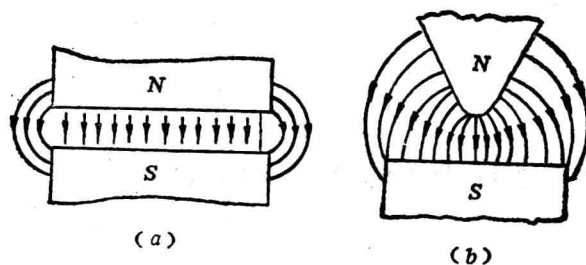


图 1-3 两种不同的磁场示意图

(a) — 均匀磁场 (中间部分); (b) — 非均匀磁场

矿粒在不同磁场中受到不同的作用。在均匀磁场中它只受到转矩的作用，转矩使它的最长方向取向于磁力线的方向（稳定）或垂直于磁力线的方向（不稳定）；在非均匀磁场中它除受转矩外，还受磁力的作用（顺磁性和铁磁性矿粒受磁引力作用）；逆磁性矿粒受排斥力作用。正是由于这种力的存在，才有可能将磁性矿粒从实际上认为是无磁性的矿粒中分出。

作用在磁选机磁场中磁性物质颗粒（磁性矿物颗粒）上的磁力，可由它在磁化时所获得的位能来确定，而磁性物质颗粒磁化时所获得的位能用下式求出

$$U = - \int_V \frac{\mu_0 \kappa H^2}{2} dV \quad (1-18)$$

式中 U ——被磁化颗粒的磁位；

μ_0 ——真空的磁导率；

κ ——颗粒的物质体积磁化率；

dV ——颗粒的体积元；

H ——颗粒体积中的磁场强度（即决定颗粒磁化状态的磁场强度，在SI单位制中单位为A/m， $1\text{A/m} = 4\pi \times 10^{-3}\text{Oe}$ ）。

根据力学定律，作用在颗粒上的力可用带负号的 U 的梯度表示，因此作用在颗粒上的磁力又可写成

$$f_{\text{磁}} = -\text{grad}U = \text{grad} \int_V \frac{\mu_0 \kappa H^2}{2} dV \quad (1-19)$$

式中负号表示磁力 $f_{\text{磁}}$ 吸引颗粒所做的功导致位能的降低。

将符号grad括在积分式中，并假定体积磁化率在颗粒所占的范围内是常数，则得

$$f_{\text{磁}} = \mu_0 \kappa \int_V H \text{grad} H dV \quad (1-20)$$

颗粒尺寸不大时，可假定在它所占据的体积内 $H \text{grad} H$ 的变化不大。这样， $H \text{grad} H$ 可以移到积分号外，于是磁力 $f_{\text{磁}}$ 将等于

$$f_{\text{磁}} = \mu_0 \kappa V H \text{grad} H \quad (1-21)$$

式中 V ——颗粒的体积。

如果所有单位都采用SI单位制，则磁力 $f_{\text{磁}}$ 单位为牛顿， $1\text{N} = 10^5 \text{dyn}$ 。

对于强磁性物体颗粒来说，它进入磁场（或称外磁场）后，物体颗粒本身也产生磁场，方向和外磁场方向相反，致使物体颗粒内部的磁场强度低于外磁场强度。降低程度与物体颗粒的磁性和形状等因素有关，此问题在第二章再来详细讨论。

因此，作用在磁性物体颗粒上的磁力不同于上式，应是

$$f_{\text{磁}} = \mu_0 \kappa_0 V H_0 \text{grad} H_0 \quad (1-22)$$

式中 $f_{\text{磁}}$ ——作用在磁性物体颗粒上的磁力，N；

κ_0 ——物体的体积磁化率（或物体的体积磁化系数），无因次；

H_0 ——外磁场强度，A/m；

在磁选研究中经常用比磁力。它是作用在单位质量颗粒上的磁力，即

$$F_{\text{磁}} = \frac{f_{\text{磁}}}{m} = \frac{\mu_0 \kappa_0 V H_0 \text{grad} H_0}{\delta V}$$

$$= \mu_0 \chi_0 H_0 \text{grad} H_0 \quad \text{N/kg} \quad (1-23)$$

式中 m ——颗粒的质量, kg;
 δ ——颗粒的密度, kg/m³;

$\chi_0 = \frac{\kappa_0}{\delta}$ ——颗粒的物体比磁化率 (或物体质量磁化系数), m³/kg;

$H_0 \text{grad} H_0$ ——磁场力, A²/m³。

磁场力 $H_0 \text{grad} H_0$ 在数值上等于 $\mu_0 \chi_0 = 1 \text{H} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ 时的比磁力。这种假定值 $H_0 \text{grad} H_0$ 便于表示磁选机非均匀磁场的磁场特性, 因为对于非均匀磁场仅用磁场强度来表示是不够的, 还必须考虑磁场梯度。

由公式 (1-23) 可看出, 作用在磁性矿粒上的比磁力 $F_{\text{磁}}$ 大小决定于磁性矿粒本身的磁性 χ_0 值和磁选机的磁场力 $H_0 \text{grad} H_0$ 值。选分 χ_0 值高的矿物如强磁性矿物时, 磁选机的磁场力 $H_0 \text{grad} H_0$ 相对的可以小些, 而选分 χ_0 值低的矿物如弱磁性矿物时, 磁场力 $H_0 \text{grad} H_0$ 就应很大。

必须指出, 在利用公式 (1-22) 和 (1-23) 时一般均采用相当于矿粒重心那一点的 $H_0 \text{grad} H_0$ 。严格说来, 只有在 $H_0 \text{grad} H_0 = \text{常数}$ 时才是正确的。一般说来, 磁选机磁场的 $H_0 \text{grad} H_0$ 不是常数, 矿粒尺寸愈小, 这种假设所引起的误差也愈小。对于尺寸相当大的矿粒, 为了更正确地计算其比磁力 $F_{\text{磁}}$, 理论上可以先将矿粒分成很小的体积, 先对每个小体积进行个别计算, 然后用积分法求出总的比磁力 $F_{\text{磁}}$ 。这实际上很难做到。经验法可以参考使用。

如把强磁性矿块紧贴或靠近磁系, 则此矿块实际所受到磁力要比按公式 (1-23) 计算出的大。产生这种情况的主要原因是强磁性矿块增加了磁极间气隙的磁导和使磁场发生很强的畸变, 致使磁场强度和磁场非均匀性均有所提高。尽管如此, 计算强磁性矿块所受的磁力还可以应用公式 (1-23), 不过得引入一个修正系数 a 。该系数考虑了矿粒的平均直径和磁系极距的比值。修正系数见下表。

从前面知道, 为了回收磁性矿粒, 必须使作用在其上的磁力大于作用在其上的、与磁力方向相反的所有机械力的合力, 即

公式 (1-23) 的修正系数 a 值

矿粒平均直径 d /极距 l	<0.05	$0.05 \sim 0.2$	>0.2
修正系数 a	1.1	1.5	2~2.5

$$f_{\text{磁}} = \mu_0 \kappa_0 V H_0 \text{grad} H_0 > \Sigma f_{\text{机}} \quad (1-24)$$

在通常情况下, 准确计算出 $\Sigma f_{\text{机}}$ 值是比较困难的, 多是根据磁选机的类型并结合实践 (包括试验) 来估算出 $\Sigma f_{\text{机}}$ 值。

第二章 矿物的磁性

第一节 矿物按磁性的分类

磁性是物质最基本的属性之一。磁现象范围是广泛的，它从微观世界中的元粒子的磁性扩展到宇宙物体的磁性。自然界中各种物质都具有不同程度的磁性，但是绝大多数物质的磁性都很弱，只有少数物质才有显著的磁性。

物质的磁性理论在近代物理学和固体物理中根据物质结构的量子力学的概念有论述。正如所述的那样，就磁性来说，物质可分为三类：顺磁性物质、逆磁性物质和铁磁性物质。可以把物质的磁性看成是具有电能（带电电核和电子）的粒子运动的结果。顺磁性物质在磁化场中呈现微弱的磁性。顺磁性主要是决定于单个电子的旋转磁矩。铁磁性物质在磁化场中呈现强磁性。铁磁性是分布在物质结晶格子结点上的大量顺磁性原子交换作用的结果。逆磁性物质在磁化场中呈现微弱的磁性。逆磁性是由于磁场中电子轨道的进动过程的结果。但是，只有在磁化场不存在原子本身磁矩等于零才显出逆磁性。在其余条件下，逆磁性则被顺磁性和铁磁性效应所掩盖。

此外，自然界还存在着反铁磁性物质和亚铁磁性物质。铁磁性物质由于原子交换作用结果使原子磁矩平行排列，而反铁磁性物质与铁磁性物质相反，原子磁矩反平行排列，正好相互抵消。亚铁磁性物质是离子磁矩反平行排列，但由于离子磁矩不相等，所以只抵消一部分，还剩余一部分。

铁磁性物质、亚铁磁性物质和反铁磁性物质，在一定温度以上表现为顺磁性。由于铁磁性物质的涅耳温度很低，所以在通常室温情况下，也可把反铁磁性物质列入顺磁性物质一类。亚铁磁性物质的宏观磁性大体上与铁磁性物质相类似，从应用观点看，也可把它列入铁磁性物质一类。

在门捷列夫元素周期表的所有已知元素中，有三个元素（Fe、Ni、Co）有明显的铁磁性；有55个元素有顺磁性，其中的32个元素（Sc、Ti、V、Cr、Mn、Y、Mo、Tc、Ru、Rh、Pd、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、U、Pu和Am）在它们所生成的化合物也保存这一性质。另外的16个元素（Li、O、Na、Mg、Al、Ca、Ga、Sr、Zr、Nb、Sn、Ba、La、Lu、Hf和Th）在纯态时是顺磁性的，但在化合物状态时是逆磁性的。其余七个元素（N、K、Cu、Rb、Cs、Au和Tl）在化合物中是顺磁性的（N和Cu在纯态时是微逆磁性的）。

典型的顺磁性、逆磁性和铁磁性物质的磁化强度和磁化场强度之间的关系如图 2-1 所示。顺磁性和逆磁性物质保持着简单的直线关系，而铁磁性物质的情况比较复杂，磁化强度开始变化很快，然后趋于平缓，最后达到磁饱和。值得注意的是，当磁化场强度相当小时，磁化强度就趋于饱和值了。

在磁选实践中，矿物不按上述分类法进行分类，而是按工艺分类法进行分类。这是因为磁选机不能回收逆磁性矿物和磁化率很低的顺磁性矿物。

根据磁性，按比磁化率大小把所有矿物分成强磁性矿物、弱磁性矿物和非磁性矿物。

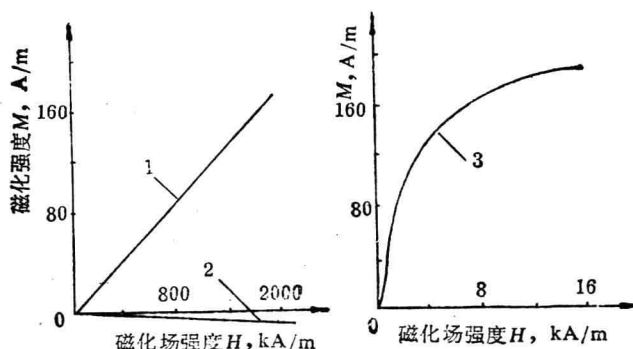


图 2-1 典型的顺磁性、逆磁性（石英）和铁磁性（磁铁矿）矿物的磁化强度曲线

1—顺磁性矿物；2—逆磁性矿物；3—铁磁性矿物

强磁性矿物 这类矿物的物质比磁化率 $\chi > 3.8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$ （或CGSM制中 $\chi > 3 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$ ），在磁场强度 H_0 达 120 kA/m （ ~ 1500 奥）的弱磁场磁选机中可以回收。属于这类矿物的主要有磁铁矿、磁赤铁矿（ γ -赤铁矿）、钛磁铁矿、磁黄铁矿和锌铁尖晶石等。这类矿物大都属于亚铁磁性物质。

弱磁性矿物 这类矿物的物质比磁化率 $\chi = 7.5 \times 10^{-6} \sim 1.26 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ （或CGSM制中 $\chi = 6 \times 10^{-4} \sim 10 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{g}$ ），在磁场强度 H_0 $800 \sim 1600 \text{ kA/m}$ （ $10000 \sim 20000$ 奥）的强磁场磁选机中可以回收。属于这类矿物的最多，如大多数铁锰矿物—赤铁矿、镜铁矿、褐铁矿、菱铁矿、水锰矿、硬锰矿、软锰矿等；一些含钛、铬、钨矿物—钛铁矿、金红石、铬铁矿、黑钨矿等；部分造岩矿物—黑云母、角闪石、绿泥石、绿帘石、蛇纹石、橄榄石、石榴石、电气石、辉石等。这类矿物大都属于顺磁性物质，也有属于反铁磁性物质。

非磁性矿物 这类矿物的物质比磁化率 $\chi < 1.26 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ （或CGSM制中 $\chi < 10 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{g}$ ）。在目前的技术条件下，不能用磁选法回收。属于这类矿物的很多，如部分金属矿物—方铅矿、闪锌矿、辉铜矿、辉铋矿、红砷镍矿、白钨矿、锡石、金等；大部分非金属矿物—自然硫、石墨、金刚石、石膏、萤石、刚玉、高岭土、煤等；大部分造岩矿物—石英、长石、方解石等。这类矿物有些属于顺磁性物质，也有些属于逆磁性物质（方铅矿、金、辉铋矿和自然硫等）。

应当指出的是，矿物的磁性受很多因素影响，不同产地不同矿床的矿物磁性往往不同，有时甚至有很大的差别。这是由于它们在生成过程的条件不同，杂质含量不同，结晶构造不同等所引起。另外，各类磁性矿物和非磁性矿物的物质比磁化率范围的规定，特别是弱磁性矿物和非磁性矿物的界限规定不是极其严格的，后者将随着磁选技术的发展，磁选机的磁场力的提高会不断地降低，所以上述分类是大致的。对于一个具体的矿物，其磁性大小应通过矿物磁性测定才能准确得出。

各种常见矿物的物质比磁化率值列于附表 1 中。

第二节 强磁性矿物的磁性

一、磁铁矿的磁性

磁铁矿、磁赤铁矿、钛磁铁矿和磁黄铁矿等都属于强磁性矿物，它们都具有强磁性矿