

• 中等专业学校教学用书 •



磁电选矿

冶金工业出版社

ZHONGDENG ZHUANYE
XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU

TD924

4

3

中等专业学校教学用书

磁 电 选 矿

昆明冶金专科学校 赵志英 主编

6x15/25



冶金工业出版社

643257

中等专业学校教学用书

磁电选矿

昆明冶金专科学校 赵志英 主编

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷33号)

新华书店总店科技发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 16 字数 382 千字

1989年11月第一版 1989年11月第一次印刷

印数00,001~2,310册

ISBN 7-5024-0557-7

TD·92 (译) 定价2.85元

前 言

本书系按照冶金部1988~1990年冶金中等专业学校教材出版规划和《磁电选矿》教学大纲编写的。书中除主要介绍和阐述磁电选矿的基本理论和设备构造等之外,为了使本教材能反映磁电选矿的发展动向和趋势,还对有关的某些新设备、新技术和新工艺作了适当的补充和介绍。

参加本书编写工作的为长沙冶金专科学校魏宝珍老师,主要负责第1、2、3、4、9、10.1~10.4、12部分(章);吉林冶金工校宋长盛老师,主要负责5、7部分(章);昆明冶金专科学校赵志英老师,主要负责绪论、及第6、8、10.5、11、13、14、15等部分(章)。赵志英老师任主编。

本书可作为冶金中专四年制造矿专业的教材,也可供从事选矿的技术人员参考。

由于编者水平有限,缺点和错误在所难免,敬希有关同行提出批评和指正。

编 者

1988年5月

目 录

绪论	1
I 强磁性矿物的磁选	5
1 磁选的理论基础	5
1.1 磁选基本原理	5
1.2 回收磁性颗粒所需要的磁力	11
2 矿物的磁化	15
2.1 矿物磁性分类	15
2.2 强磁性矿物的磁性特点	20
2.3 影响强磁性矿物磁性的因素	21
2.4 弱磁性矿物的磁性特点	28
3 磁选机磁系结构及磁路计算简介	29
3.1 磁系类型	29
3.2 磁系材料	30
3.3 非磁性材料	33
3.4 磁路及计算简介	33
4 弱磁场磁选机的磁系	41
4.1 开放磁系磁极宽和极间隙宽的比值对磁场的影响	41
4.2 开放磁系极距对磁场的影响	42
4.3 磁系高度、宽度、半径和极数对磁场的影响	43
4.4 开放磁系磁极对称面上磁场强度变化指数方程式	44
4.5 回收磁性颗粒磁力的计算	47
5 弱磁场磁选设备	52
5.1 湿式弱磁场磁选设备	53
5.2 干式弱磁场磁选机	72
5.3 弱磁场设备的操作与维护	79
6 矿物的磁性分析及磁测量仪器	85
6.1 矿物的磁性分析	85
6.2 磁选机磁场强度的测量	93
7 弱磁选磁选实践	97
7.1 铁矿石的工业类型	97
7.2 铁矿石的工业要求和产品质量	100
7.3 铁矿石选别实例	101
8 弱磁性铁矿石的磁化焙烧	110
8.1 弱磁性铁矿石磁化焙烧的原理	110
8.2 赤铁矿的还原焙烧	112
8.3 还原焙烧炉	117
8.4 焙烧磁选流程	125

I 弱磁性矿物的磁选	127
9 强磁场磁选机的磁系	127
9.1 选别弱磁性矿石常用的磁系类型	127
9.2 单分选面(单层磁介质)磁系的磁场特性	129
9.3 多分选面(多层磁介质)磁系的磁场特性	134
10 强磁场磁选机	143
10.1 强磁选机的磁路结构	143
10.2 干式强磁选机	144
10.3 湿式强磁选机	150
10.4 高梯度磁选机	162
10.5 超导电技术在磁选机上的应用	170
11 磁流体分选和磁种分选	180
11.1 磁流体分选概述	180
11.2 磁流体动力分选法	180
11.3 磁流体静力分选法	181
11.4 磁种分选技术	188
12 弱磁性矿石的磁选实践	192
12.1 弱磁性铁矿石的磁选	192
12.2 锰矿石的磁选	194
12.3 含稀有金属弱磁性矿石的磁选	196
12.4 非金属矿物的磁选	199
II 特殊选矿	203
13 电选	203
13.1 矿物的电性	203
13.2 矿物在电场中带电的方法	207
13.3 鼓筒式电选机分离的条件	211
13.4 电选机	214
13.5 电选的实际应用	221
14 光电选矿	230
14.1 概述	230
14.2 光电选矿的基本原理	230
14.3 光电选矿机的结构原理	237
14.4 光电选矿实例	241
15 摩擦选矿法	245
15.1 矿粒的弹性和摩擦系数	245
15.2 矿粒在斜面上的运动	246
15.3 摩擦选矿机	248

绪 论

磁选法已有一百多年的历史，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，直到上世纪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。在本世纪60年代英国琼斯（Jones）磁选机的问世，在磁选机的设计和制造方面，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。

在琼斯机之后的近二十年来，强磁选机又获得了较大的发展。到了七十年代，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了；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，作了新的改进，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，这极大的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種技术经济指标，在磁选机制造方面成功地应用了超导技术。超导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，有人又称之为第二类磁选法。

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，利用一定化学条件（pH调整剂等）使磁性种子选择性地目的矿物表面吸附，人为的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。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1977年报导，世界铁矿储量为340Gt，远景储量780Gt，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，伴生有其他有价成分，需要采用复杂的联合流程，才能获得高品位铁精矿和有价成分的综合利用。此外，贫矿多富矿少，贫矿约占86%，富矿约占14%。而且弱磁性（红矿）矿石多，强磁性矿石（磁铁矿）少，弱磁性矿石约占60%以上。

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。在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进、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。但目前在我国弱磁性矿石的选矿方面仍占有一定比重。

光电选矿（又称光电拣选）法是本世纪初期发展起来的一种选矿方法。随着现代工业和科学技术的发展，对各种矿产资源的需求量日益增大，矿山规模不断扩大，机械化程度也愈来愈高，因此，采掘时混入的废石量增大。选矿厂入选前进行预选富集，是提高选矿厂经济效益和技术指标的有效途径。它扩大了矿产资源的利用范围，增加了矿山的服务年限。光电选矿是预选（粗选）富集的一种主要手段，而且也是获得最终产品的一种重要选矿方法。例如，一些原生钨矿和金矿等，入选矿石的废石量可高达80~90%，采用光电选矿法代替人工手选弃去废石，对提高技术经济指标来说是极其有效的。用光电选对金刚石粗精矿精选也可直接得到金刚石产品。

随着高技术科学的发展，特别是光学和电子技术的发展，光电选矿设备日益完善，其应用领域和规模越来越大。除用于选别金属矿（白钨矿、黑钨矿、钛铁矿和金、银矿等）和金刚石之外，还广泛用于选别非金属矿，如重晶石、滑石、长石、石膏、菱镁矿、燧石、皂石、石英、锂云母、铈榴石等。此外在分选石灰石、大理石、白云石等建材原料方面，

也获得了应用。

我国从60年代开始进行光电分选的研究，60年代末期用于中南地区一些省份的钨矿分选。对于非金属矿和一些土特产品（如谷物、瓜子、猪宗等）也进行了试验研究，取得了相当好的效果，对今后进一步发展打下了一定的基础。

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。在五十年代末期，特别是近二十年来，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，约为 3×10^7 t以上。主要为钛铁矿、金红石、锆英石、钾盐等矿物。从这些数字看出，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。直到本世纪三十年代，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作了很大的改进，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30~50t/h。并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方面。

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。

I 强磁性矿物的磁选

1 磁选的理论基础

1.1 磁选基本原理

1.1.1 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。

下面以一个具体的磁选工艺为例,简单说明矿物磁分离的过程。图1-1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。当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,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。

在磁分离的过程中,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,它们阻碍矿粒吸向圆筒。如果作用在矿粒上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二种或多种单纯的产品。

欲使两种不同磁性的矿物分离,必需具备以下必要条件:

- (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

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

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

$$F_m \geq \Sigma F_e \quad (1-2)$$

式中 F_m ——颗粒受到的磁力(向心);

ΣF_e ——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。

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1-2所示。

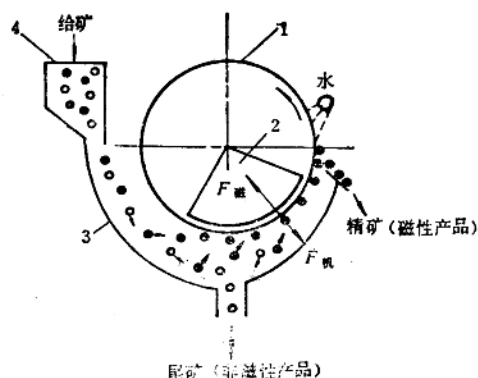


图 1-1 矿粒在磁选机中分离示意图

- 磁性矿粒
- 非磁性矿粒

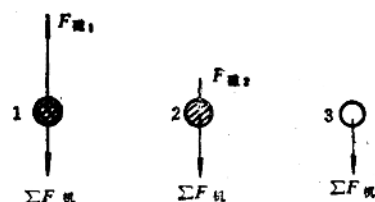


图 1-2 不同磁性矿粒在磁场中受力示意图

- 1—强磁性颗粒；2—弱磁性颗粒；3—无磁性颗粒

从图中得知， $F_{磁1} > F_{磁2} \geq \Sigma F_{机}$ ，对强磁性颗粒由于 $F_{磁1} \gg \Sigma F_{机}$ ，必被磁极吸引。弱磁性颗粒由于 $F_{磁2} \approx \Sigma F_{机}$ 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。

1.1.2 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：如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

$$f = K \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (1-3)$$

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

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

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 1cm，相互作用力为 1dyn (1 dyn = 10^{-5} 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，与其所处的位置有关，如图

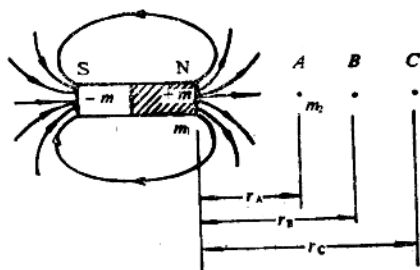


图 1-3 磁场示意图

1-3，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北极磁量在该点所受磁力的大小，即有

$$H = \frac{f}{Q_2} \quad (1-5)$$

式中 H ——磁场强度，奥斯特 (Oe)；

f, Q_2 ——同前。

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)，1Oe相当于单位磁量上磁作用力为1dyn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。在国际制单位制中，磁场强度用A/m表示，1A/m等于 $4\pi \times 10^{-3}$ Oe。考察空气中的磁场时，磁场强度值与磁通密度数值相等。

将公式 (1-3) 代入到公式 (1-5) 中, 则获得:

$$H = \frac{Q_1}{r^2} K \quad (1-6)$$

公式 (1-6) 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。

1.1.3 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 1-4 (a) 所示, 各分子的磁矩取向是杂乱无规则

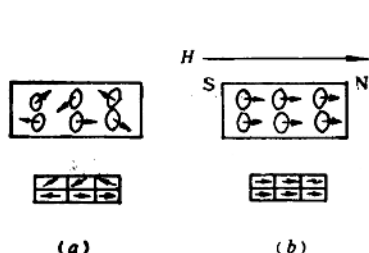


图 1-4 物质磁化示意图

(a) 磁化前; (b) 磁化后

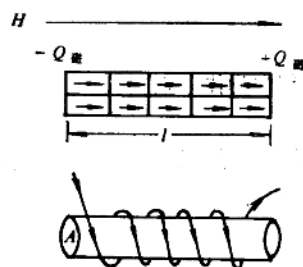


图 1-5 物质磁矩示意图

的, 它们之间的磁性相互抵消, 所以从整体来看, 物质对外不显示磁性。如果把它放进磁场中, 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 1-4 (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,则必各具有一定的磁矩,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,见图1-5,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_m ,两极间的距离为 l 时,则此物体磁化后的总磁矩为

$$M = Q_m l \quad (1-7)$$

式中 M ——物体的磁矩 $A m^2$;

Q_m ——物体磁极强度 $A m$;

l ——物体长轴长度 m 。

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,就相当一个由这样的大环形电流组成的通电螺旋管如图1-5所示,磁化后的磁矩为

$$M = N I A \quad (1-8)$$

式中 M ——磁矩, $A m^2$;

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,磁化强度在数值上是以物体单位体积内的磁矩来量度,常用符号为 J ,则有

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

由公式(1-7)和(1-8)代入式(1-9)可得

$$J = \frac{M}{V} = \frac{Q_m l}{A l} = \frac{Q_m}{A} \quad (1-10)$$

$$J = \frac{M}{V} = \frac{N I A}{A l} = \frac{N I}{l} \quad (1-11)$$

从公式(1-10)和公式(1-11)可获得物体的磁化强度可用单位面积上的磁极强度(即磁极面密度),或用单位长度上的安匝数来表示。

磁化强度的方向随物体性质而异,对强磁性和顺磁性物体,其磁化方向则与外磁场相同,对于逆磁性物体,其磁化强度与外磁场方向相反。物体磁化强度愈大,表明物体被磁化的程度和物体本身的磁性也愈大。

研究表明,磁化强度与磁化磁场强度的关系是

$$J = K H \quad (1-12)$$

式中 H ——磁化物体使用的外磁场强度;

K ——体磁化系数(比例常数);

J ——物体的磁化强度。

当被磁化物体为矿物颗粒时, 则 K 为该颗粒的体积磁化系数, 也就是颗粒的磁化强度与磁化它的外磁场强度的比值, K 值是矿物的一个重要的磁化指标, 其物理意义是 1cm^3 大小的矿物颗粒, 在 10e 的磁场中磁化所获得的磁矩, 详见公式 (1-13), 它的数值大小表明了该颗粒磁化的难易程度, K 值愈大, 表明愈容易磁化。对逆磁性矿物, K 为负值, 顺磁性矿物的 K 值大于 1, 对强磁性矿物其 K 值远远大于 1。

由公式 (1-12) 得

$$K = \frac{T}{H} = \frac{M}{VH} \quad (1-13)$$

式中 V ——为颗粒体积, 其余符号意义同前。

物质的体磁化系数与本身密度之比值, 叫做质量磁化系数或称作物质比磁化系数, 即

$$x_0 = \frac{K}{\delta} = \frac{M}{mH} \quad (1-14)$$

式中 x_0 是比磁化系数, 即为 1g 物质在 10e 磁场中获得的磁矩, x_0 的单位是 m^3/kg , m 是物质质量, 其余符号同前。

1.1.4 磁感应强度概念

磁感应强度也是用来量度磁场大小的一个物理量, 前面讨论的磁场强度 “ H ” 是采用磁荷的观点, 实际上磁荷是不存在的, 是历史上虚构的, 是在未发现磁性起源于运动电荷之前而假定的。但由于其符合客观实际, 在较长的一段历史时期内应用, 特别在工程中应用较为方便, 习惯性保留至现在。自从认识了运动电荷是磁现象的根本原因以后, 就常用磁场对运动电荷或载流导线的作用来描述磁场, 由此引进磁感应强度 (B), 磁感应强度 B 通常称为 B 矢量, 与磁场强度 H 相当。

根据物质在磁场中磁化的表现, 顺磁性物质和强磁性物质磁化后, 会产生一个与磁场方向相同的附加磁场, 比如电磁铁, 当铁心在通电的线圈中磁化, 它的磁场大小则为线圈产生的磁场 H , 与铁心磁化后产生的附加磁场 H' 之和, 这种合磁场称为磁感应强度 B 。即

$$\vec{B} = \vec{H} + \vec{H'} \quad (1-15)$$

式中 $\vec{B}$ ——磁感应强度;

$\vec{H}$ ——线圈产生的磁场, 与安匝数有关;

$\vec{H'}$ ——铁心磁化后的附加磁场。

H' 的大小与被磁化物质的性质有关, 磁性强的 (即导磁性大的) 物质其附加磁场 H' 大于导磁性小的物质, 逆磁性物质其附加磁场 H' 与 H 方向相反, 为一个很小的负值, 由实验得知 H' 与它们的磁化强度有关, 即:

$$B = H + 4\pi J \quad (1-16)$$

因为 $J = KH$, 故有

$$B = (1 + 4\pi K)H \quad (1-17)$$

$$B = \mu H \quad (1-18)$$

式中 μ 为物质的导磁系数, 在真空中 B 与 H 的数值相等, 在绝对电磁单位中, B 的单位为高斯, 在真空中 1Gs 磁感应强度等于 10e 磁场强度, 在国际单位制中磁感应强度用特斯拉表示。 1T 等于 10^4Gs 。在高斯制中磁介质的导磁系数 (导磁率), 从公式 (1-18) 表明, 真空中的导磁率等于 1, 所以在真空中磁场强度值与磁感应强度值相等。空气的导磁

率近似等于1, 故在工程使用中磁场强度等于其磁感应强度值。然而导磁率高的低碳钢和工程软铁, 其导磁率值为真空中的几千、几万倍。采用导磁率高的材料做磁选机的铁心时, 导致产生磁感应强度(磁场强度)比原磁场增高几千、几万倍。在此还要说明的是, 以后若没有原则性意义的地方, H 、 B 以及 M 等磁量值, 我们就用矢量来表示。

磁感应强度也可以用单位面积上的磁通量(磁力线数)来表示, 单位面积上的磁力线数即是磁通密度的数值, 其单位是特斯拉(Tesla)。尽管c、g、s制现在已过时, 但在工程上最常用的单位仍然是高斯(gauss), 预言今后许多年内, 磁学领域中仍常用c、g、s制。但是, 对材料内部的磁场, 特别是聚集磁力线的磁铁材料内部的磁场, 磁感应的磁通密度比原磁场高得多, 因此必须清楚说明所指的对象。

1.2 回收磁性颗粒所需要的磁力

1.2.1 均匀磁场、不均匀磁场和磁场梯度

矿粒在磁场中被磁化后, 受到磁力的作用。磁力大小的计算, 以及矿粒在不同磁场中的行为, 是本节讨论的主要问题。

磁场有均匀磁场和不均匀磁场之分。典型的均匀磁场和不均匀磁场如图1-6所示。图1-6(a)除边缘部分外, 两极之间各点磁场强度相等, 这种磁场是均匀磁场, 否则就是不均匀磁场如图1-6(b), 磁场的不均匀程度可用磁场梯度来表示, 磁场梯度是沿磁极法线方向磁场强度的变化率, 可用 $\text{grad}B$ 或 $\text{grad}H$ 表示, $\text{grad}B$ 即是 $\frac{dB}{dx}$, $\text{grad}H$ 即为 $\frac{dH}{dx}$ 。

在均匀磁场中 $\text{grad}H=0$, 在不均匀磁场中, 各点磁场强度大小和方向都是变化的, 所以 $\text{grad}H \neq 0$, 在图1-7中, 假设距磁极表面 x_1 处的磁场强度为 H_1 , 距离 x_2 处的磁场强度为 H_2 , 同理可得距离 x_3 处的磁场强度为 H_3 , 则获得磁场梯度为:

$$\frac{dH}{dx} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\Delta H}{\Delta x} = \frac{H_2 - H_1}{x_2 - x_1} = \text{grad}H \quad (1-19)$$

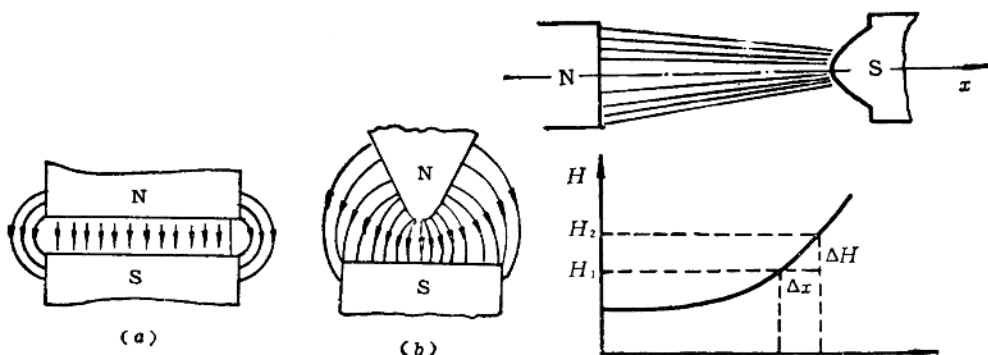


图 1-6 两种典型的磁场

(a) 均匀磁场, (b) 不均匀磁场

图 1-7 磁场强度示意图