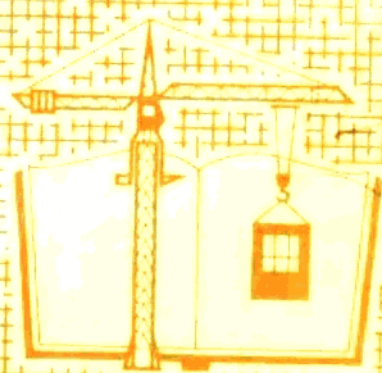


特殊选矿

袁楚雄 刘汉理 崔国治 施飞祥 徐洪林



等学校试用教材

中国建筑工业出版社

TD92
1
3

高等学校试用教材

特 殊 选 矿

袁楚雄 刘汉理 崔国治
施飞祥 徐洪林

中国建筑工业出版社

圖北
涼

A

55.06.057

本书较系统地阐述了与非金属矿物分选有关的特殊选矿方法，包括磁选、电选、拣选、油膏选、摩擦与弹跳选、化学选。对于随着现代电子技术的发展而逐渐完善起来的自动拣选法，如光电拣选、X光电拣选、磁性拣选、放射性拣选，作了较详细的介绍，全书共分四篇十九章。

本书在内容上注意了充实理论，重视实践；总结吸收国内外的新成就；从选矿的共性入手，突出非金属选矿的特点。

本书可作为建材高等学校非金属选矿专业的教材，也可供建材、冶金、煤炭、化工、地质等部门从事选矿科研、设计，生产的技术人员参考。

高等学校试用教材

特 殊 选 矿

袁楚雄 刘汉理 崔国治

施飞祥 徐洪林

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本：787×1092毫米 1/16 印张：20 字数：487千字

1982年7月第一版 1982年7月第一次印刷

印数：1—1,400册 定价：2.05元

统一书号：15040·4326

前 言

本书是为适应建材高等学校非金属选矿专业的教学需要,根据建材部审定的非金属选矿专业教学计划和《特殊选矿》课程教学大纲而编写的。

按照非金属选矿专业的教学计划,《特殊选矿》课程与《浮游选矿》、《重力选矿》课程并列为必修的三门选矿方法课。《特殊选矿》课程讲授的内容包括浮选、重选以外与非金属矿物分选有关的其他选矿方法。

本书内容分为四大部分。第一部分为磁选;第二部分为电选;第三部分为拣选(包括光电拣选、X光电拣选、磁性拣选、放射性拣选等);第四部分为其他特殊选(包括油膏选、摩擦与弹跳选、化学选)。对每一种选矿方法阐述了基本原理和基本理论,介绍了典型的分选设备,列举了有关实践方面的资料和数据。

本书由武汉建筑材料工业学院选矿教研室和山东701矿的袁楚雄(第一篇和第二篇)、刘汉理(第十一章和第十六章)、施飞祥(第十二章和第十三章)、崔国治(第十四章和第十五章)、徐洪林(第四篇)编写,最后全书由袁楚雄统一修改定稿。

本书初稿完成后,曾于1981年4月在武汉召开了审稿会。由中南矿冶学院刘永之副教授和东北工学院王常任副教授担任主审。参加审稿的有:中南矿冶学院孙仲元副教授,武汉钢铁学院李华封讲师,江西有色冶金研究所谭维汶工程师,苏州非金属矿山设计研究院刘世廉工程师,山东701矿研究所李士奇工程师。江西有色冶金研究所王安佐工程师和湖南601矿罗文忠工程师寄来了书面意见。山东建筑材料工业学院徐洵讲师和马歆祥讲师。他们对本书的初稿提出了许多宝贵意见。

应当特别提到的是,本书的编写得到了刘永之、王常任、孙仲元三位副教授的指导和关注。他们详细地审阅了初稿,提出了很多修改意见,并且提供了一些新资料。

在本书编写过程中,还得到了许多单位的支持和帮助。编者谨向本书的主审和参加审稿的全体同志以及给予本书编写以支持和帮助的单位和个人表示衷心的感谢。

由于我们水平有限,加之时间仓促,书中缺点和错误在所难免,敬希读者多多批评指正。

编 者

1981年12月

目 录

第一篇 磁 选

第一章 磁选的基本原理	4	第一节 弱磁场磁选机	52
第一节 磁选过程	4	第二节 强磁场磁选机	57
第二节 矿物颗粒的磁化	5	第三节 高梯度磁选机	65
第三节 矿物颗粒所受的磁力	8	第四节 磁测量和磁分析仪器	68
第四节 磁选过程的选择性	10	第五章 磁选机磁系的设计计算	75
第二章 矿物的磁性	14	第一节 克服比机械力所需的比磁力	
第一节 物质和矿物的磁性分类	14	计算	75
第二节 强磁性矿物的磁性特点和磁		第二节 有铁芯的电磁磁系的设计计算	82
化本质	15	第三节 圆柱型螺线管磁系的设计计算	87
第三节 强磁性矿物磁性的变化规律	18	第六章 磁选实践	98
第四节 弱磁性矿物的磁性	26	第一节 非金属矿石的磁选	98
第三章 磁选机的磁系和磁场特性	29	第二节 黑色金属矿石的磁选	104
第一节 电磁磁系和永磁磁系	29	第三节 有色和稀有金属矿石的磁选	106
第二节 开放磁系和闭合磁系	34	第七章 磁流体分选及超导电子技术	
第三节 开放磁系的磁场特性	36	的应用	109
第四节 闭合磁系的磁场特性	40	第一节 磁流体分选	109
第四章 磁选机	51	第二节 超导技术在磁选中的应用	119

第二篇 电 选

第八章 电选的基本原理	130	第二节 电晕选矿机	149
第一节 电选过程	130	第三节 电选机的安全技术	151
第二节 矿物的电性	131	第四节 影响电选效果的因素	152
第三节 使矿粒带电的方法	135	第十章 电选实践	156
第四节 电场作用于矿粒上的电力	141	第一节 非金属矿石的电选	156
第九章 电选机及影响电选效果的		第二节 有色及稀有金属矿石的电选	158
因素	143	第三节 黑色金属矿石的电选	160
第一节 电晕-静电复合电场选矿机	143	第四节 其他物料的电选	161

第三篇 拣 选

第十一章 拣选概述	165	第四节 其它拣选特性检测	194
第一节 拣选过程	165	第十三章 检测信号的放大和处理	196
第二节 拣选特性及拣选分类	166	第一节 检测信号放大和处理的一般	
第十二章 矿石的拣选特性检测	169	程序	196
第一节 表面光性检测	169	第二节 检测、放大处理和执行系统	
第二节 发光性检测	177	相互之间的衔接	200
第三节 磁性检测	188	第三节 常用的放大和处理电路	205

第四节	放大和处理系统的干扰及抑制···	221	第三节	高速气阀执行系统·····	237
第十四章	拣选的给矿系统·····	225	第四节	气阀性能的测试·····	244
第一节	给矿系统概述·····	225	第十六章	拣选机及拣选实践·····	250
第二节	拣选机的给矿系统·····	227	第一节	光电拣选机及拣选实践·····	250
第十五章	拣选的执行系统·····	234	第二节	X光电拣选机及拣选实践·····	261
第一节	执行系统概述·····	234	第三节	磁性拣选机及拣选实践·····	266
第二节	电磁铁执行系统·····	234	第四节	放射性拣选机及拣选实践·····	268

第四篇 其它特殊选

第十七章	油膏选·····	272	第三节	非金属矿石的化学选矿实践·····	304
第一节	油选的基本原理·····	272	附 录		
第二节	油膏·····	274	附表 1	磁选中常用物理量的单位换算关系·····	308
第三节	油选机·····	276	附表 2	矿物的比磁化系数·····	308
第四节	影响油选效果的因素·····	279	附表 3	弱磁性铁、铬、锰矿物的比磁化系数·····	309
第十八章	摩擦与弹跳选·····	283	附表 4	矿物的导电率·····	310
第一节	摩擦与弹跳选矿的基本原理·····	284	附表 5	矿物的介电常数·····	310
第二节	摩擦与弹跳选矿机·····	286	附表 6	矿物的相对导电系数和整流性·····	312
第十九章	化学选·····	294	主要参考资料		315
第一节	浸出的化学过程·····	294			
第二节	浸出工艺·····	301			

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选的一种选矿方法。它是目前大规模应用于工业生产的主要选矿方法之一。

磁选可应用于黑色金属矿石的选别，有色和稀有金属矿石的精选，非金属矿石的分选，从非金属矿物原料中除去含铁杂质以及从生产和生活污水中除去污染物等。

磁选在国民经济中具有重要意义。它能为国民经济各部门提供合格的矿物原料，能使矿产资源得到综合利用。

钢铁工业是国民经济的基础工业，铁矿石是钢铁工业的主要原料，而磁选是处理铁矿石的主要选矿方法。对于磁铁矿石，磁选则是最有效最经济的选矿方法。

我国铁矿资源丰富。据地质部门提供的资料，我国目前保有的铁矿探明储量已达400多亿吨，居世界前列。但贫矿占80%，富矿仅占20%。富矿中又有5%由于含有害杂质不能直接冶炼。因此，我国铁矿石中80%以上需要选矿。就世界范围来说也大体如此。铁矿石通过磁选和其他选矿法选别后，提高了铁的含量，降低了二氧化硅和有害杂质的含量，对以后的冶炼过程具有很大的经济意义。根据我国的生产实践，铁精矿品位每提高1%，高炉利用系数可增加2~3%，焦炭消耗量减少1.5%，石灰石消耗量减少2%。同时生铁质量提高。可见，选矿给冶炼带来了高产、优质、低成本的经济效益。

许多有色和稀有金属矿物具有不同程度的磁性。采用浮选法和重选法不能将它们全部回收。为了充分利用国家资源，许多有色和稀有金属粗精矿需要采用磁选和其它选矿法进行精选。例如，重选所得黑钨粗精矿中，一般含有锡和其他一些有用元素。锡在钨的冶炼过程中是有害杂质。利用黑钨矿具有弱磁性这一特点采用磁选法进行处理后，既可除去含锡杂质，提高精矿品位，又可得到锡精矿。

石棉矿石中，石棉纤维的含量一般较低。由于开采时的贫化率较高，因此进入选矿厂的原矿中含有相当数量的废石。利用超基性岩型的石棉矿石中一般伴生有磁铁矿的特点，可采用磁选法进行初步富集，及早地除去部分废石。这样，可以提高入选原矿品位，增大选矿处理能力，改善分选过程，降低选矿成本。例如，加拿大采用磁选法使石棉矿石初步富集，丢弃的废石占原矿量的30~45%，大大提高了选矿的技术经济指标。金刚石矿石中，一般也含有一些磁性矿物，因此磁选也是金刚石矿石的一种重要选矿方法。例如，非洲的某些金刚石选矿厂，在重介质粗选前采用磁选进行初步富集，在精选作业中较普遍地采用了磁选。高岭土中，铁是一种有害杂质。含铁高时，将使高岭土的白度、耐火度、绝缘性都降低，严重影响制品质量。因此，从高岭土中除去铁杂质是高岭土选矿的重要研究课题。一般，若将含铁杂质除去1~2%时，白度可提高2~4个单位。世界各国对高岭土采用强磁场除铁进行了许多研究。特别是近十年来，首先在高岭土工业研究并应用的高梯度强

磁场磁选机，不仅有效地解决了这一课题，而且推动了整个磁选技术的发展。

磁选的应用已有一百多年的历史。早在17世纪人们就作了用永久磁铁选别铁矿石的尝试。1792年英国发表了用磁铁选别铁矿石的第一个专利。1849年美国发表了一项工业磁选机专利。以后，各国陆续制造出了多种不同结构的磁选机。由于构造尚不完善，磁选机没有得到广泛应用。自1855年提出采用电磁铁来产生磁场后，磁选机才日趋完善，并出现了各种各样的应用于工业生产的电磁选矿机，磁选法的应用因而日益广泛。1955年以前，几乎所有的磁选机都是电磁式的。随着永磁材料的发展，磁选机的磁系材料开始采用铝镍钴合金，随后又逐渐采用铁氧体。

磁选在弱磁性矿石方面的应用比较晚。直到上世纪90年代，才提出采用尖削磁极与平面磁极组成的闭合磁系来产生强磁场，以分选弱磁性矿物。这种磁系迄今仍在一些强磁场磁选机中采用。为分选细粒弱磁性矿物，几十年来曾研制出多种湿式强磁场磁选机，其中以感应辊式磁选机应用最广。老式的感应辊式磁选机每对磁极之间的分选空间中只有一个分选面，为单分选面的感应磁极磁选机。这种磁选机结构笨重，价格昂贵，处理量小，选矿成本高。本世纪60年代，琼斯（Jones）型磁选机首先在英国问世。这是湿式强磁场磁选机的一个重要突破。从此，湿式分选细粒弱磁性矿物才有了较为可靠的磁选机。这种磁选机虽然也很笨重，但由于磁极对之间的分选空间中充填了聚磁介质（齿板或小球等），大大增加了分选面积，同时提高了磁场强度和磁场梯度，因而生产能力大大提高，选矿成本降低，可以用来分选价值较低的弱磁性铁矿石。这种磁选机为多分选面的感应磁极磁选机。

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机，一些新技术在磁选中得到了应用。例如，高梯度磁选，磁流体选矿，超导电磁选机等。虽然有些还处于实验室和半工业性试验阶段，但从试验结果和应用情况来看是很有发展前途的。

高梯度磁选（HGMS）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、粒度很细的顺磁性矿粒。因而为解决贫（品位贫）、细（嵌布粒度细）、弱（磁性弱）的氧化铁矿石的分选开辟了新途径。高梯度磁选不是在传统的两个磁极之间进行，而是在一个铠装螺线管内进行，采用不锈钢磁性线状材料为聚磁介质，因而大大提高了磁场强度和磁场梯度，特别是磁场梯度。同时，大大增加了磁性颗粒的吸着面积，尤其有利于微细颗粒的吸着。这种磁选机由于具有很高的磁场梯度（其磁场梯度比琼斯型磁选机约大10倍），故称高梯度磁选。它有着广泛的用途。不仅用于分选矿物，而且可用于分选许多其他细粒和微细粒物料；不仅用于矿业工程，而且可用于环境保护（例如污水处理、气体净化等）。按照高梯度磁选国际会议上许多专家的观点，这一过程将来可能成为全球性的环境保护的重要方法之一。

磁流体选矿包括磁流体静力分选（MHSS）和磁流体动力分选（MHDS）。它是以某些特殊的流体（顺磁性溶液、铁磁性悬浮液、电解质溶液等）作为分选介质，利用它们在磁场或磁场和电场的联合作用下产生的“加重”作用，根据矿物之间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选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。因此目前有人将磁选分为两大类：一类是普通磁选，即单纯利用矿物之间的磁性差异来分选（包括弱磁场磁选和强磁场磁选）；另一类是特殊磁选，即同时利用磁性和其他物理性质（密度、导电

性)的差异来分选。

超导电技术是当代一门重要的新技术。近年来,国外已将它应用于选矿,研制成功了超导电磁选机。这种磁选机采用超导材料作线圈,在极低的温度(绝对零度附近)下工作。线圈通以电流后可在较大的分选空间内产生1600千安/米以上的强磁场,并且不消耗电能,磁场长时间不衰减。这种磁选机体积小,重量轻,磁场强度大,分选效果好,是用于工业生产的理想设备。

高梯度磁选,磁流体选矿和超导电磁选机在非金属矿物分选中具有重要意义。高梯度磁选是首先在高岭土工业发展起来的。它是高岭土提纯的有效方法,目前在国外已应用于高岭土生产。磁流体静力分选应用于金刚石的选矿在国外已进行了一些试验研究工作。试验结果表明,它可以作为金刚石选矿中的精选方法之一。我国也进行了关于这方面的试验研究,取得了可喜的成果。初步认为,它是回收细粒金刚石的一种有效方法。在国外,超导电磁选机用于分选高岭土已进入半工业性试验阶段。我国也正在进行超导电磁选机的研制,并且有可能最先应用于细粒金刚石的分选中。

第一章 磁选的基本原理

第一节 磁选过程

首先,我们以一个具体的磁选机来简要地说明磁选的工艺过程。

图 1-1 为湿式分选铁矿石用的圆筒式弱磁场磁选机的构造示意图。这种磁选机由分选圆筒、磁系、分选箱、给矿箱等部件组成。

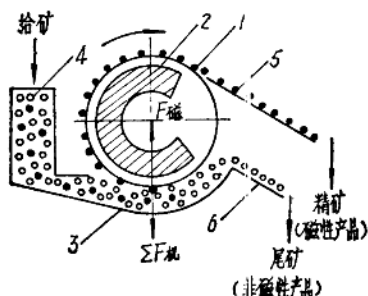


图 1-1 磁选过程示意图

1—分选圆筒；2—磁系；3—分选箱；
4—给矿箱；5—精矿流槽；6—尾矿流槽

磁选机的分选圆筒由非导磁材料做成。其内部装有磁系,以产生一个不均匀磁场。工作时,圆筒沿顺时针方向旋转,磁系固定不动。细磨矿浆经给矿箱进入分选箱,其中的磁性矿粒在不均匀磁场作用下被磁化,从而受到磁场作用于它的磁吸引力,故被吸在圆筒上,并随之旋转。至圆筒上部磁系缺口处,由于磁吸引力减弱,矿粒被释放,经流槽排出,成为精矿。非磁性矿粒,由于受到的磁场作用力很小,仍留在矿浆中,随矿浆流排出,成为尾矿。因此,磁性不同的矿粒实现了分选。

在磁选过程中,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,包括重力、离心力、惯性力、摩擦力、分选介质阻力等。他阻碍矿粒吸向圆筒。如果作用于矿粒上的磁力大于机械力,那么矿粒将被吸在圆筒上,成为精矿;反之,如果磁力小于机械力,则矿粒留在矿浆中,成为尾矿。由此可知,磁选过程实质上是磁力和机械力互相竞争,互相争夺矿粒的过程。

对于磁性矿粒,它所受到的磁力大,能够克服机械力,即磁力占优势;对于非磁性矿粒,它受到的磁力很小,不是以克服机械力,即机械力占优势。不同磁性的矿粒,由于作用于它们之上的磁力和机械力的比值不同,运动轨迹也就不同,从而可以分选。

欲使两种不同磁性的矿物颗粒能够分选,必须具备以下必要条件:

1.要有一个磁场强度和磁场梯度足够大的不均匀磁场。这样才能产生足够克服机械力的磁力;

2.矿物颗粒之间要有一定的磁性差异,即必须满足:

$$K = \frac{\chi}{\chi'} > 1 \quad \text{或} \quad K - 1 > 0 \quad (1-1)$$

式中 K ——两种矿物的比磁化系数之比;

χ ——磁性矿物的比磁化系数;

χ' ——非磁性矿物的比磁化系数。

3. 作用于矿物颗粒上的磁力和机械力的比值必须满足:

对于磁性颗粒

$$F_m > \Sigma F_m \text{ 或 } \frac{F_m}{\Sigma F_m} > 1 \quad (1-2)$$

对于非磁性颗粒

$$F'_m < \Sigma F'_m \text{ 或 } \frac{F'_m}{\Sigma F'_m} < 1 \quad (1-3)$$

式中 F_m, F'_m ——磁性和非磁性颗粒所受的磁力;

$\Sigma F_m, \Sigma F'_m$ ——磁性和非磁性颗粒所受的与磁力方向相反的机械力的合力。

以上必要条件也就是研究磁选过程所必须研究的基本问题。

第二节 矿物颗粒的磁化

矿物颗粒在不均匀磁场中的磁化是磁选过程的基本物理现象。所谓磁化就是矿物颗粒在磁场作用下从不表现磁性变为具有一定磁性的现象。其根本原因是矿物颗粒内原子磁矩按磁场方向的排列。

下面我们先介绍物质磁性的来源和磁化的本质, 然后引出磁化强度和磁化系数的概念和有关公式。

物质的磁性来源于原子的磁性。原子的磁性来源于原子的磁矩。由于原子的结构不同, 各种原子具有不同的磁矩。

原子的磁矩来源于电子和原子核的磁矩。原子核的磁矩很小, 可以忽略不计。电子的磁矩又分为轨道磁矩和自旋磁矩。轨道磁矩是由电子环绕原子核运动而产生的, 自旋磁矩是由电子的自旋运动而产生的。原子的总磁矩就是电子的轨道磁矩与自旋磁矩的总和。

原子磁矩是不是所有电子的磁矩总和呢? 现代物理学告诉我们, 决定原子磁矩的不是所有电子的磁矩总和, 而只是未填满的那些次壳层中的电子的磁矩总和。

我们知道, 在原子中, 电子分布在大小不同的轨道上, 形成若干个壳层。具有相同的主量子数 n 值的电子构成一个主壳层。在同一主壳层中, 电子的轨道形状还有差别。在这些轨道上运动的电子又形成 n 个次壳层。在填满了电子的次壳层中, 各电子的轨道运动分别占据了所有的可能方向, 形成了一个球形的对称集体。因此合成的总轨道磁矩等于 0。电子的自旋磁矩也互相抵消了。所以计算原子的总磁矩时, 只需考虑未填满的那些次壳层中的电子。

以上是没有外加磁场的情况。在有外加磁场时, 电子的运动状况要发生变化。这时每个电子都受到一种洛伦兹力。因而电子除了轨道运动和自旋运动外, 还要附加一个以外磁场方向为轴线的转动, 称为电子的进动。这种进动也要产生相应的磁矩, 称为附加磁矩。根据电磁感应定律, 由磁场感应作用而产生的磁矩方向必然和外加磁场的方向相反。这就是所谓逆磁性。由此可知, 逆磁性是普遍存在于所有物质之中的。

由于电子的进动而产生的附加磁矩很小, 因此只有当原子的固有磁矩为 0 时, 它才能被显示出来。逆磁性物质就属于这种情况。即电子的附加磁矩是这类物质产生磁效应的根本原因。

顺磁性物质的原子具有未被抵消的电子磁矩, 因而原子有一个固有磁矩。但由于固有

磁矩处于无序状态，方向是混乱的，对外磁效应互相抵消，因而不表现宏观的磁性。当有外加磁场时，固有磁矩稍微转向外磁场方向，产生微弱的有序状态，因而对外就显示出微弱的磁性。这时我们就称物质被磁化了。在这类物质中，电子的附加磁矩可以忽略不计，但电子的进动依然存在。电子的固有磁矩是这类物质产生磁效应的根本原因。

铁磁性物质与顺磁性物质、逆磁性物质有显著区别。它具有很强的磁性，可以在很弱的磁场中获得很强的磁感应，甚至磁化至饱和。还具有其他一些特殊的磁特性，例如存在一个磁性转变温度——居里点。即当温度高于这一临界温度时，铁磁性完全消失而变为普通的顺磁性。这些单用原子磁矩在外磁场作用下的定向排列的理论已经不能解释。因为铁磁性物质的单个原子并不具有任何特殊的磁性，例如铁(Fe)、钴(Co)、镍(Ni)与锰(Mn)、铬(Cr)元素的原子内的3d层电子都是没有填满的壳层，原子都具有一定的磁矩。然而前三者是典型的铁磁性元素，后两者则是普通的顺磁性元素。怎样解释这种巨大的差异呢？

铁磁性物质在很弱的磁场下，能磁化到接近饱和这一事实表明，这些物质内部的原子磁矩，在没有外加磁场作用下，已经以某种方式排列起来，即已经达到一定程度的磁化。这种磁化称为自发磁化。自发磁化是在许多小区域内进行的。在每一小区域内，原子磁矩按同一方向排列。这些自发磁化的小区域叫作磁畴。

在没有外加磁场时，铁磁性物质内各个磁畴的自发磁化取向各不相同，对外效应互相抵消，因而不显示磁性。一个磁畴体积的数量级约为 10^{-15} 米³，一个原子体积的数量级仅为 10^{-30} 米³，因此每个磁畴内可以含有 10^{15} 个原子。当有外加磁场时，外磁场不是使单个原子磁矩转向，而是使各个磁畴的磁矩转向外磁场方向。这样铁磁性物质就在一个不太强的外加磁场作用下被强烈地磁化，直至饱和。当温度高于居里点时，由于分子热运动能量已经大于自发磁化的等效磁场能量，磁畴完全瓦解而变为普通的顺磁质。因此，磁畴的存在和自发磁化是铁磁性物质产生很强的磁效应的根本原因。

那么自发磁化的原因又是什么呢？量子力学的理论告诉我们，物质内部相邻原子的电子之间有一种来源于静电的交换作用，它迫使各原子的磁矩平行排列。在铁磁性物质内，这种作用的效果好象有一很强的等效磁场作用在各个原子磁矩上一样，使得各个原子磁矩按同一方向整齐排列。因此，电子间的交换作用是自发磁化的根本原因。

固体物质的磁性除了上述人所熟知的逆磁性、顺磁性和铁磁性外，还有所谓反铁磁性和亚铁磁性。在反铁磁性物质里，磁矩分为对等的两组，各形成一个次点阵。在同一组内磁矩互相平行，但两组之间则彼此反平行。对每一次点阵而言，具有类似铁磁性的自发磁化，但两组自发磁化的总和则为0。反铁磁性物质也存在一个磁性转变温度——奈耳点。当温度高于这一临界温度时，反铁磁性变为一般顺磁性。由于奈耳点很低（约为几十度K），因此在室温下反铁磁性物质均为顺磁性物质。在亚铁磁性物质里，磁矩分占不对等的两个次点阵，反平行的磁矩并不彼此完全抵消，因而宏观地表现出自发磁化，与铁磁性物质相类似。铁氧体就是典型的亚铁磁性物质。磁矩的反平行排列是由于一种通过氧离子 O^{2-} 而形成的间接交换作用而引起。铁磁性、反铁磁性和亚铁磁性的磁矩排列示意图如图1-2所示。

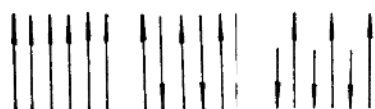


图 1-2 三种磁性的磁矩排列示意图
(a)铁磁性；(b)反铁磁性；
(c)亚铁磁性

综上所述，固体磁性分类可列表如下：

固体磁性分类	原子的固有磁矩为 0 —— 逆磁体（感生磁矩）	
	原子的固有磁矩不为 0	弱磁体 { 顺磁体（磁矩排列混乱） 反铁磁体
		强磁体 { 铁磁体 亚铁磁体 } （磁矩有序排列）

为了描述矿物颗粒的磁化状态（磁化方向和强度），需要引入磁化强度矢量的概念。磁化强度在数值上是矿物颗粒单位体积内的磁矩。用 J 表示。即：

$$J = \frac{M}{V} \quad (1-4)$$

式中 J —— 矿物颗粒的磁化强度，安/米；

M —— 矿物颗粒的磁矩，安·米²；

V —— 矿物颗粒的体积，米³。

磁化强度的方向则随矿物颗粒的性质而异。对于逆磁性矿物颗粒，磁化强度的方向与外磁场方向相反；对于顺磁性矿物颗粒，则与外磁场方向相同。磁化强度愈大，表明矿物颗粒被外磁场磁化的程度愈大。

矿物颗粒在外磁场中被磁化后，可以看作是一根等效的磁棒。磁棒的磁矩 M 为：

$$M = Q_m L \quad (1-5)$$

式中 Q_m —— 磁棒的磁极强度，安·米；

L —— 磁棒的长度，米。

因此，矿物颗粒的磁化强度可以表示为：

$$J = \frac{M}{V} = \frac{Q_m L}{SL} = \frac{Q_m}{S} = Q_0 \quad (1-6)$$

式中 S —— 矿物颗粒的等效截面积，米²；

L —— 矿物颗粒的等效长度，米；

Q_0 —— 单位面积上的磁极强度（磁极面密度），安/米。

即矿物颗粒的磁化强度等于与它等效的磁棒单位面积上的磁极强度或磁极面密度。

矿物颗粒被磁化后，也可看成是一个由许多表面圆电流构成的等效螺线管。螺线管的磁矩 M 为：

$$M = NIS \quad (1-7)$$

式中 N —— 螺线管的匝数；

I —— 螺线管的电流强度，安；

S —— 螺线管的截面积，米²。

因此，矿物颗粒的磁化强度也可表示为：

$$J = \frac{M}{V} = \frac{NIS}{SL} = \frac{NI}{L} = I_0 \quad (1-8)$$

式中 N —— 表面圆电流的数目；

I —— 每一表面圆电流的电流强度，安；

S —— 等效螺线管的截面积，米²；

L —— 等效螺线管的长度，米；

I_0 ——单位长度上的表面圆电流强度，安/米。

即矿物颗粒的磁化强度等于与它等效的螺线管单位长度上的表面圆电流强度。

研究表明，磁化强度与磁化磁场强度的关系是：

$$J = \chi_0 H \quad (1-9)$$

式中 H ——磁化磁场强度，安/米；

χ_0 ——比例系数，称为体积磁化系数，无因次。

体积磁化系数 χ_0 是矿物颗粒的磁化强度与磁化磁场强度的比值，是矿物的一个重要磁性指标。其物理意义是表示单位体积的矿物颗粒在单位强度的磁场中磁化时所产生的磁矩。它的数值大小表明了磁化的难易程度。 χ_0 愈大，表明愈容易磁化。对于逆磁性的矿物颗粒， $\chi_0 < 0$ ；对于顺磁性的矿物颗粒， $\chi_0 > 0$ 。

在磁选中，常用比磁化系数这一概念。它是矿物的体积磁化系数与其密度的比值。即：

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

式中 χ ——矿物的比磁化系数，米³/千克；

δ ——矿物的密度，千克/米³。

比磁化系数 χ 是矿物的又一个重要磁化指标。其物理意义是表示单位质量的矿物颗粒在单位强度的磁场中磁化时所产生的磁矩。

第三节 矿物颗粒所受的磁力

不均匀磁场是磁选的必要条件之一。矿物颗粒在不均匀磁场中磁化后，将受到磁力的作用。为什么磁选必须在不均匀磁场中进行？磁力的大小如何计算？这是本节所要解决的主要问题。

所谓不均匀磁场就是磁场中各点磁场强度的大小和方向都是变化的。与此相应的均匀磁场则是磁场中各点磁场强度的大小和方向都不变。典型的均匀磁场和不均匀磁场如图1-3所示。其中图(a)只是两磁极之间的中央部分为均匀磁场（边缘部分除外）。

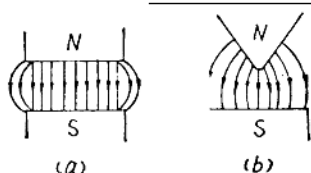


图 1-3 两种不同的磁场

(a) 均匀磁场；(b) 不均匀磁场

磁场的均匀性用磁场梯度 $\frac{dH}{dx}$ 或 $\text{grad}H$ 来

表示。磁场梯度为一矢量，其方向为磁场强度变化最大的方向且指向 H 增大的一方，其大小等于该方向。单位长度上磁场强度的增量。对于均匀磁场，

$$\frac{dH}{dx} = 0 ; \text{对于不均匀磁场, } \frac{dH}{dx} \neq 0。$$

矿物颗粒在不同的磁场中受到不同的作用。在

均匀磁场中，它只受转矩的作用，转矩使它的长轴平行于磁场方向；在不均匀磁场中，它不仅受转矩的作用，还受磁力的作用。结果它既发生转动，又向着磁场梯度增大的方向移动，最后被吸在磁极表面上。这样，不同磁性的矿物颗粒就可以分离。因此磁选只能在不均匀磁场中实现。

现在我们来求矿物颗粒在不均匀磁场中所受的磁力大小。

将一长度为 L 的矿粒置于不均匀磁场中，并使其长轴与磁场方向一致（图 1-4）。则矿粒将被磁化，在两端感应产生两个磁极，其磁极强度分别为 $+Q_m$ 和 $-Q_m$ 。

为了便于计算它所受的磁力，我们首先作出以下两点假设：

1. 矿粒的尺寸很小。这样，在它所占的空间内， dH/dx 的变化很小，可以认为 $dH/dx = \text{常数}$ ；

2. 矿粒为均匀磁化。这样，磁矩的计算便可应用第二节中介绍的公式。

由物理学中可知：某一磁极在磁场中某点所受的磁力大小为：

$$f_m = \mu_0 Q_m H \quad (1-11)$$

式中 f_m ——磁极在磁场中所受的磁力，牛顿；

μ_0 ——真空（空气）的导磁系数；

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ 韦伯/米} \cdot \text{安}；$$

Q_m ——磁极强度，安·米；

H ——磁极所在处的磁场强度，安/米。

据此可求出矿粒在磁场中所受的磁力：

$$f_m = \mu_0 \left[Q_m H - Q_m \left(H - \frac{dH}{dx} L \right) \right] = \mu_0 Q_m L \frac{dH}{dx} = \mu_0 M \frac{dH}{dx}$$

$$\text{将} \quad M = JV = \chi_0 HV \quad \text{代入}$$

$$\text{得} \quad f_m = \mu_0 \chi_0 V H \frac{dH}{dx} = \mu_0 \chi_0 V H \text{grad} H \quad (1-12)$$

式中 f_m ——矿粒在磁场中所受的磁力，牛顿；

χ_0 ——矿粒的体积磁化系数，无因次；

V ——矿粒的体积，米³；

H ——矿粒靠近磁极的一端所在处的磁场强度，安/米；

$\frac{dH}{dx}$ ——磁场梯度，安/米²。

磁选实际中，常用的是比磁力。它是单位质量矿粒所受的磁力，即：

$$F_m = \frac{f_m}{m} = \frac{\mu_0 \chi_0 V H \frac{dH}{dx}}{V \delta} = \mu_0 \chi H \frac{dH}{dx} = \mu_0 \chi H \text{grad} H \quad (1-13)$$

式中 F_m ——矿粒在磁场中所受的比磁力，牛顿/千克；

m ——矿粒的质量，千克；

δ ——矿粒的密度，千克/米³。

由此可知，矿粒在不均匀磁场中所受的比磁力的大小决定于矿物本身的磁性—— χ （内因）与磁场的特性—— H 和 $\text{grad} H$ （外因）。这两方面的问题也就是磁选要研究的主

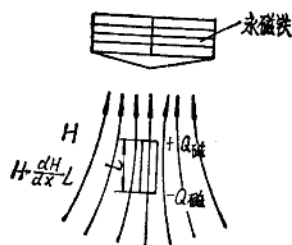


图 1-4 矿物颗粒在不均匀磁场中所受的磁力

要问题之一，我们将在第二章和第三章中分别加以详细讨论。

由式1-13可以看出，当磁场一定时，矿物的比磁化系数 χ 愈大，矿粒在磁场中所受的比磁力 $F_{\text{比}}$ 愈大，因此强磁性矿物比较容易分选。当矿物的磁性一定时，不均匀磁场的强度和梯度的乘积 $H\text{grad}H$ 愈大，矿粒所受的比磁力 $F_{\text{比}}$ 愈大。这里可以有三种情况：磁场强度大，梯度小；磁场强度小，梯度大；磁场强度和梯度都比较大。三种情况都可以得到较大的 $H\text{grad}H$ 值。因此，欲提高比磁力，从外因方面来说，必须从 H 和 $\text{grad}H$ 两方面来考虑。

H 和 $\text{grad}H$ 的乘积—— $H\text{grad}H$ 是反映磁选机磁场特性的主要指标，通常称之为磁场力。因为对于不均匀磁场，仅用磁场强度来表示其特性是不够的，还必须考虑磁场梯度。磁场力的单位为 $\text{安}^2/\text{米}^3$ 。

必须指出，比磁力的计算公式1-13有它的局限性。首先，该式是以长条形的单颗矿粒推导出来的。而实际磁选过程中却是大量的形状不规则的矿粒。矿粒相互之间有着重要的作用，矿粒对磁场的特性也有着重要影响。例如相邻的磁化了的矿粒之间也存在着磁力的作用；矿粒本身也是磁介质，可使磁场中各点的强度和梯度发生变化。当分选强磁性矿物时，这些因素的影响更加显著。然而这些因素在推导公式时都被忽略了。其次，假设 $\text{grad}H$ 为常数也是不符合实际情况的。这也就影响了公式的精确性。因此，到目前为止，该式只在弱磁性矿物的比磁化系数测定中得到了直接应用。而在磁选实践中，只能从 $F_{\text{比}}$ 与 χ 、 $H\text{grad}H$ 三者的关系中，得到一些原则性的启示。

还应当指出，在式(1-13)的推导过程中， H 是矿粒一端处的磁场强度。而在实际应用中一般采用矿粒中心处的磁场强度。因此矿粒愈小，引起的误差愈小。

【例 1-1】 在下面给矿的干式弱磁场磁选机中分选磁铁矿石。已知磁场强度为100千安/米，磁场梯度为2000千安/米²，磁铁矿的比磁化系数为 5×10^{-4} 米³/千克，空气的导磁系数为 $4\pi \times 10^{-7}$ 韦伯/米·安。求磁铁矿颗粒在磁场中所受的比磁力及使单位质量的磁铁矿颗粒向磁极作加速运动的力。

【解】 求磁铁矿颗粒所受的比磁力：

$$F_{\text{比}} = \mu_0 \chi H \frac{dH}{dx} = 4\pi \times 10^{-7} \times 5 \times 10^{-4} \times 100 \times 2000 \times 10^6 \\ = 125.6 (\text{牛顿/千克})$$

求使单位质量的磁铁矿颗粒作加速运动的力：

$$F = F_{\text{比}} - F_{\text{重}} = 125.6 - 9.8 = 115.8 (\text{牛顿/千克})$$

第四节 磁选过程的选择性

磁选过程不仅要求有足够大的磁力，以保证磁性矿粒的充分回收；而且应当有很好的选择性，以保证产品的纯度，使磁性产品中非磁性产品的混杂程度最小。

磁选时，作用于磁性矿粒和非磁性矿粒上的比磁力和比机械力的对比关系可用以下不等式来表示：

$$F_{\text{比}} < F_{\text{机}} > F'_{\text{比}} < F'_{\text{机}} \quad (1-14)$$

式中 $F_{\text{比}}$ 、 $F'_{\text{比}}$ ——分别为作用于磁性矿粒和非磁性矿粒上的比磁力；

$F_{\text{磁}}$ 、 $F'_{\text{机}}$ ——分别为作用于磁性矿粒和非磁性矿粒上的比机械力。

不等式的左边部分是保证磁性产品回收的条件；右边部分是保证磁性产品纯度的条件。为了得到高质量的磁性产品， $F'_{\text{机}}$ 在可能的情况下应当尽量大一些。

磁选过程的选择性可用下式来表示：

$$e = \frac{F'_{\text{机}}}{F_{\text{磁}}} \quad (1-15)$$

式中 e ——选择性系数。

e 值愈大，表明磁选过程的选择性愈好。干式离心式分选时有较好的选择性， e 可达0.9左右。湿式分选时选择性较差， e 只有0.4左右。 e 值也可大于1的数。试验表明， e 的最大值可以为4。

矿粒的磁性强弱对磁选过程的选择性有重要影响。在分选细粒强磁性矿石时，会产生磁团聚作用，从而降低了过程的选择性。所谓磁团聚作用，是细粒强磁性矿石在磁选机的磁场中被磁化后，彼此相互吸引成为磁团或磁链的现象。磁团或磁链中夹杂了一部分脉石，使精矿质量降低。

矿粒的粒度大小对磁选过程的选择性也有重要影响。当分选粒度范围过宽的矿石时，有可能产生等吸引现象，会降低磁选过程的选择性。所谓等吸引现象是磁性不同、粒度不同的矿粒在磁选机磁场中具有相同的磁力对机械力的比值，因而同时被吸向磁极的现象。它类似于重选过程中的等沉现象。

等吸引现象是如何产生的呢？下面我们来讨论这一问题。

磁选机的磁场特性研究表明，磁场力 $H_{\text{grad}}H$ 的变化规律是，磁极表面 $H_{\text{grad}}H$ 最大，离开磁极愈远， $H_{\text{grad}}H$ 急剧降低。因此，重心距磁极近的矿粒处于 $H_{\text{grad}}H$ 大的区域，重心距磁极远的矿粒处于 $H_{\text{grad}}H$ 小的区域。矿粒的粒度不同，它们的重心距磁极的远近就不同。如果它们是磁性相同的矿粒，则它们所受的磁力就不同，因而它们被回收的情况就不同。距磁极近的矿粒可以被回收，距磁极远的矿粒就可能不被回收。这就说明，矿粒的粒度大小影响磁选过程。

对于磁性相同而粒度不同的矿粒，其重心距磁极近的，所受的磁力大；对于粒度相同而磁性不同的矿粒，磁性强的所受的磁力大；对于磁性不同、粒度也不同的矿粒就可能出现这种现象：一颗粒磁性虽然强（ χ 大），但其重心距磁极远（ $H_{\text{grad}}H$ 小）；另一颗粒虽然磁性弱（ χ 小），但其重心距磁极近（ $H_{\text{grad}}H$ 小）。这样它们可能具有相同的磁力对机械力的比值，从而同时被吸向磁极。这就产生了等吸引现象。

等吸引现象与磁选机的给矿方式有关。不同给矿方式时的等吸引情况如图1-5所示。在上面给矿的弱磁场磁选机中，粗粒磁铁矿颗粒 D 的重心距磁极表面远，细粒贫连生体 d 的重心距磁极

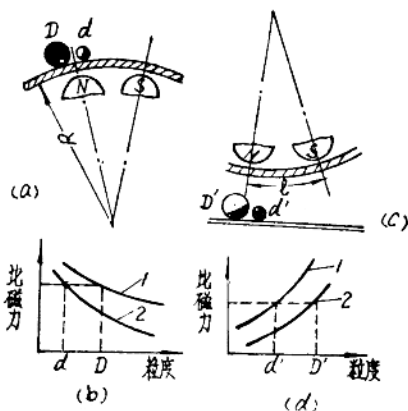


图 1-5 等吸引现象

(a)上面给矿时的等吸引现象；(b)上面给矿时比磁力与粒度的关系；(c)下面给矿时的等吸引现象；(d)下面给矿时比磁力与粒度的关系

1—磁铁矿；2—贫连生体