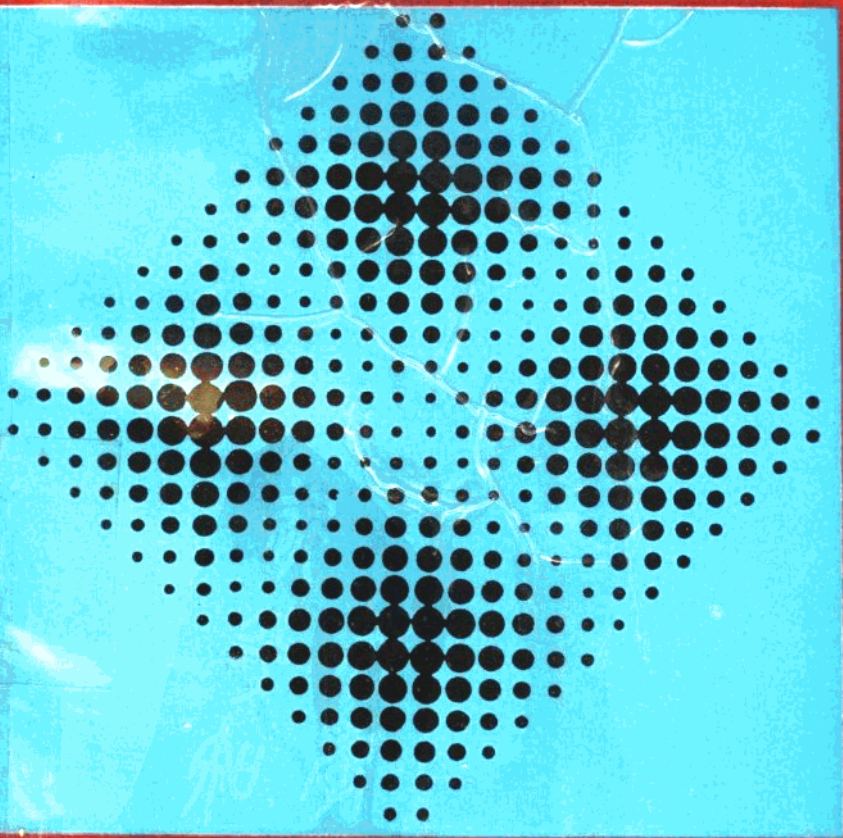




磁电选矿学

编著 刘树貽

● 有色金属地矿丛书 ● 中南工业大学出版社 ●



磁电选矿学

刘树贻 编著

中南工业大学

【湘】新登字 010 号

磁电选矿学

刘树贻 编著

责任编辑：段五媛

*

中南工业大学出版社出版发行
湖南大学印刷厂印装
湖南省新华书店经销

*

开本：850×1168 1/32 印张：10.9375 字数：269千字

1994年2月第1版 1994年2月第1次印刷

印数：001-500

*

ISBN 7-81020-637-0 / TD · 032

定价：7.20元

序

磁电选矿是选矿科学的重要分支，国内外专家学者一直在这方面进行研究，取得了很大进展，特别是高梯度磁选（HGMS）理论与工艺研究，已成国际性热门课题。如果说高梯度磁选的研究中心，在美国是普渡大学，在英国是南汉普顿大学，那么在中国高梯度磁选的研究中心就在中南工业大学。刘树贻教授 30 余年来一直从事磁电选矿领域的教学，科研，指导研究生（含博士生和硕士生）工作。经验丰富，造诣也深。在教学中，长期主讲《磁电选矿》，并多次讲授《电磁学》和《磁选专论》，授课深受学生欢迎，刘教授深知教材建设的重要性；在科研中，主要从事振动高梯度磁选和脉动高梯度磁选研究，参与了 Slon-1000 立环脉动高梯度磁选机的研制（该机于 1990 年获国家发明奖），设计了 CL- ϕ 500mm 周期式高梯度磁选机，已成功地应用于高岭土除铁，向国内外发表了 30 多篇学术论文，主要阐明其研究成果；深入细致做文献工作，担任 10 年磁选年评撰稿人，通晓国内外磁电选矿学科的前沿状况及发展趋向。这些可贵而富有成果的经历是编好《磁电选矿学》的有利条件。

行将出版的《磁电选矿学》一书是刘树贻教授的教学和科研结晶，除了一般必要的基础理论、设备、工艺和磁系设计等系统知识外，还编入了“磁捕获力”、“磁捕收率和磁性产品品位”等重要理论和新颖设备，反映了当代水平。全书约 30 万字，由 12 章构成，有机结合，自成体系，层次分明，论述简练，行笔流畅，图文并茂，是一本好书，可供选矿专业本科生作教材，也可作为研究生和工程技术人员的参考书。这是对培养人材的奉献。

让我们热情地期待着《磁电选矿学》的问世。

陈慕教授（博士生导师）

1993 年 9 月 16 日

于长沙中南工业大学

前 言

作者根据自己在长期教学、科研、指导研究生和编写《磁选年评》实践中的体会，将沿用多年的《磁选与电选》讲义改编成《磁电选矿学》。全书仍分为“磁选篇”和“电选篇”，前者调整为九章，后者归纳为三章，共计 30 万字。

磁电选矿在矿物原料加工中起着重要作用，且近年来迅速发展：弱磁选过渡到设备大型化，并采用高性能的钕铁硼磁系，实现更大规模和更有效的细粒强磁性物料深选或大块铁矿石预选；强磁选采用高性能的永磁和电磁磁系材料，实现强磁选设备轻型化，或提高场强扩大应用范围，加大磁间隙实现大颗粒弱磁性矿石的预选；高梯度磁选发展到脉动高梯度磁选和振动高梯度磁选，工业上实现了细粒弱磁性物料的高回收率和高纯度分选；超导磁选设备由试验型发展到工业型，成功地实现了工业应用；磁流体分选已发展为第二类磁选法。电选除了完善高压电选设备和扩大应用外，发展了高效率摩擦带电电选设备、高梯度电选设备和湿式电分离设备……《磁电选矿学》参考了大量专著和论文，引述了重要的科研成果，充实了许多新内容，反映了上述变化。

新书力求建立合乎逻辑、简明而实用的理论体系，除充实了各专题的基本原理外，增加了“磁捕收力”、“磁捕收率和磁性产品品位”及“稳态荷电量电选理论”等重要章节，并兼顾了前后理论的连贯性、推理性和普遍性，精简了经典的经验理论。

新书对于设备和重要概念的叙述，图文并茂，力求图形表达简洁、示意正确；文字叙述精简扼要切题，追根溯源，兼顾科学

性和趣味性。

本书可作为大学选矿类专业学生的教材，或更高层次研究生的参考书，也可作为选矿工程技术人员的参考书。

在本书的编写中得到了王淀佐教授、陈蕊教授、李松仁教授和刘永之教授的支持和帮助，谨表诚挚的谢意！

由于作者水平有限，错误在所难免，敬请读者指正。

作者

1993.9.7.

目 录

第一篇 磁选

导言	(1)
1 磁选原理	(3)
1.1 磁选过程	(3)
1.2 物质的磁化	(8)
1.3 磁力	(24)
1.4 磁场强度测量	(28)
2 矿物磁性	(31)
2.1 矿物按磁性分类	(31)
2.2 强磁性矿物的磁性	(33)
2.3 弱磁性矿物的磁性	(44)
2.4 矿物磁性的转变	(47)
2.5 矿物磁性的测量	(59)
3 磁场特性和磁捕收力	(67)
3.1 磁场场论基础	(67)
3.2 开放磁系的磁场特性	(79)
3.3 闭合磁系的磁场特性	(87)
3.4 齿板介质场的磁力计算	(91)
3.5 球介质场的磁场特性	(94)
3.6 丝介质场的磁场特性	(98)
4 磁捕收率和磁性产品品位	(105)
4.1 磁捕收率	(105)

4.2	磁性产品品位	(121)
5	弱磁场磁选机	(124)
5.1	湿式弱磁场磁选机	(124)
5.2	干式弱磁场磁选机	(142)
5.3	弱磁场辅助设备	(149)
6	强磁场磁选机	(153)
6.1	强磁场磁选机	(153)
6.2	高梯度磁选机	(173)
6.3	强磁场辅助设备	(188)
7	超导磁选机和磁流体分选机	(192)
7.1	超导磁选机	(192)
7.2	磁流体分选机	(212)
8	磁选实践	(223)
8.1	黑色金属矿石的磁选	(223)
8.2	有色和稀有金属矿石的磁选	(229)
9	磁系材料和磁系设计	(233)
9.1	磁系材料	(233)
9.2	强磁选机磁系设计	(240)

第二篇 电选

	导 言	(261)
10	电选原理	(263)
10.1	电选过程	(263)
10.2	矿物的电性	(265)
10.3	电选机的电场	(271)
10.4	颗粒带电方法和带电后的行为	(279)
10.5	电选原理	(283)
11	电选机	(294)

11.1	高压电选机	(294)
11.2	静电和摩擦带电电选机	(306)
11.3	介电电选机	(309)
12	电选实践	(314)
12.1	电选应用	(314)
12.2	影响电选的因素	(324)
12.3	电选的安全	(327)
附表 1	单位换算	(329)
附表 2	常见矿物的比磁化率	(330)
附表 3	常见矿物的介电常数和电阻	(332)
附表 4	常见矿物的比导电度和整流性	(334)
	参考文献	(336)

第一篇 磁选

导 言

磁选是主要选矿方法之一，在矿物加工工业中起着重要作用。磁选可用于黑色金属矿石、有色金属矿石和稀有金属矿石的精选，为冶金工业提供优质原料；也可用于非磁性原料除去铁、钛氧化物，为造纸工业、陶瓷工业和硅酸盐工业提供优质原料；还可用于废水处理，实现回水利用或减轻环境污染。其中应用最多的是铁矿石的磁选，其次是锰矿石的磁选，以及钛铁矿、黑钨矿、独居石和钽铌矿的精选。对于高岭土的除铁，磁选也显得日益重要。

磁选是基于矿物磁性差别的一种选矿工艺。矿物按磁性可分为强磁性矿物、弱磁性矿物和非磁性矿物。分选强磁性矿物宜用弱磁场磁选机；分选弱磁性矿物宜用强磁场磁选机，回收细粒弱磁性成分宜用高梯度磁选机；非磁性矿物不能直接用磁选法分选。

自 1960 年代末以来，国外磁选设备的发展相当迅速，尤其是湿式强磁选机的发展取得了重大进展，研制了多种类型的湿式强磁选机，如 Jones 湿式强磁选机，Boxmag Rapid 湿式强磁选机、Laurilla 永磁强磁选机、PEM84 周期式高梯度磁选机、SALA-HGMS 连续式高梯度磁选机、VMS 立环连续式高梯度磁选机和铁轮式高梯度磁选机。Jones (琼斯) 磁选机采用“多层齿极聚磁介质”选矿，成功地解决了氧化铁矿等弱磁性矿物的大规模工业湿式强磁选问题，为以后多种聚磁介质型强磁选机的研制起了示范作用。以铁磁性丝网为分选介质的高梯度磁选机可产

生高达 10^5T/m 数量级的磁场梯度，比齿板介质的磁场梯度约高 2 个数量级，高梯度磁选技术的开发使得工业规模回收细粒弱磁性成分成为现实，扩展了磁选的材料种类和粒度范围。随着低温物理学和超导技术的发展，自 1968 年美国发表第一个超导磁选机专利以来，已研制了 10 多种超导磁选机，其中 $\phi 275\text{mm}$ 往复列罐周期式超导磁选机、 $\phi 2134\text{mm}$ 和 $\phi 3048\text{mm}$ Ericz 周期式超导磁选机以及 DESCOS 筒式超导磁选机已投入工业应用。近年还发展了磁性能比钕钴合金更优越和价格更便宜的钕铁硼永磁磁选机。

在国内，无论磁选设备和磁选工艺都取得了有成效的进展。磁铁矿的磁选已形成了一套较完善的弱磁场磁选设备和工艺流程，实现了磁铁矿的深选，细筛自循环磁选流程或细筛再磨循环磁选流程，可使铁精矿品位提高到约 67%；研制了几种大筒径电磁和永磁磁滑轮以及大筒径湿选永磁磁选机，永磁磁系已由单一锶铁氧体磁系发展到铁氧体-钕铜钴复合磁系和钕铁硼永磁磁系，筒面场强得到提高，例如 CTDG1516 型钕铁硼永磁磁选机的筒面平均磁场高达 0.4T，它可用于分选大块磁铁矿石，也可改装成湿选设备，用于假象赤铁矿的磁选，或用于强磁选给料前除去弱铁磁性矿物。焙烧-磁选有所发展，焙烧炉有效容积已由 50m^3 发展到 100m^3 。为了发展氧化铁矿等弱磁性矿物的湿式强磁选工艺，已先后研制了 SQC-2-1100 型、SQC-4-1800 型、SQC-6-2770 型湿式强磁选机， $\phi 1500$ 型双立环湿式强磁选机，SHP-1000 型、SHP-2000 型和 SHP-3200 型湿式强磁选机。这些磁选机已在国内成功地用于分选褐铁矿、赤铁矿、黑钨矿和钽铌矿等弱磁性矿物，回收粒度下限约为 $30\mu\text{m}$ 。还研制了 CS-1 型和 CS-2 型等多种感应辊式强磁选机，主要用于粗粒锰矿石的湿选或干选，也可用于粗粒氧化铁矿石的粗选。细粒选矿是一个重要的选矿课题，为了开发细粒弱磁性矿物选矿新技术，

研制了多种连续转环式高梯度磁选机，其中 Slon-1000 型和 Slon-1500 型立环脉动高梯度磁选机以罕见的速度得到推广应用。CL- ϕ 500 型周期式高梯度磁选机填补了国内高岭土高梯度磁选空白。对超导磁选设备的研究始于 1976 年，1978 年前后，已研制出实验室型超导螺线管磁选装置和超导磁流体静力分离仪。但目前尚处于试验阶段。

本篇叙述了磁选原理、矿物磁性、磁场特性和磁捕获力、磁捕收率和磁性产品纯度、弱磁选机、强磁选机、高梯度磁选机和脉动高梯度磁选机、超导磁选机和磁流体静力分选机、典型的磁选实践及磁系设计等内容。编写时力求内容全面，切合实际，叙述简练，构图清晰，逻辑合理。

1 磁选原理

1.1 磁选过程

1.1.1 磁选过程

磁选是利用不同矿物的磁性差别，在合适的磁选设备中分离成若干产品的方法。通常，磁选产品有两种，即磁性产品和非磁性产品，其中的有用产品又称为精矿，无用产物又称为尾矿。必要时还可产出中矿。磁选从物料进入磁选机到分成若干产品的过程称为磁选过程。与其它选矿方法相比，大多数磁选过程是快速且简便的短过程，但随着细粒选矿的发展，为了提高磁选效率，有些磁选过程也是比较复杂的长过程。下面列举四种比较典型的磁选过程。

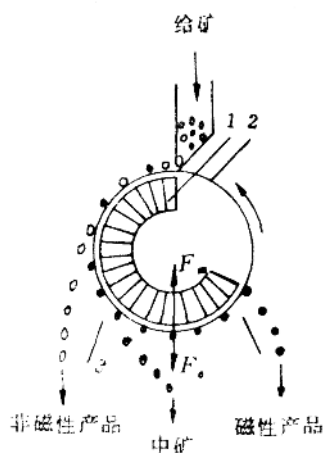


图 1-1 干式弱磁选过程

1.磁系; 2.圆筒; 3.分矿挡板

图 1-1 所示的磁选过程是一种干式弱磁选过程。所用的设备是一种干式弱磁场磁选机，它主要由磁系和分选圆筒及挡板等构成，其磁系通常为永磁磁系，由永磁磁极呈圆柱面极性交替排列而成。处理的物料为含强磁性成分（磁铁矿或粒铁等）的粒状干料。分选时，物料经料斗给到圆筒表面，非磁性的脉石颗粒在离心力和重力作用下，抛离筒面，落入非磁性产品料斗中；磁性颗粒除受离心力和重力等竞争力 F_c 作用外，还受磁力 F_m 作用，

由于磁力大于竞争力，因而吸于筒面，并随筒运转，在运转过程中受磁极交变极性的作用，产生磁扰动效应，又称磁翻滚效应，不断排出被夹杂的非磁性颗粒，进入无磁力区域时，卸入磁性产品料斗中，未单体解离的连生体颗粒多半落入中矿斗中。分矿挡板的位置可以变动，以便调节不同产品的产率，达到所需的品位。这种分选过程是一种连续分选过程。

图 1-2 所示的分选过程是一种干式强磁选过程。图示的磁选设备是一种干式单盘强磁场磁选机，主要由电磁磁系，分选圆盘和输料皮带等构成。磁系由线圈，铁芯和极头组成。由纯铁制成的分选圆盘与磁系构成矩形闭合磁回路，圆盘的齿尖可产生高

达 1.6T 的磁感应强度，常用于分选黑钨矿和钛铁矿等弱磁性矿物。现以黑钨、锡石为例说明其分选过程：来自重选产品的黑钨矿和锡石混合干料进入磁选机磁场时，弱磁性黑钨矿粒同时受到磁力和竞争力的作用，由于磁力大于与磁力方向相反的竞争力，因而被吸引到分选圆盘的齿尖上，并随圆盘一起旋转，当离开磁场时，在离心力和重力作用下，掉入磁性产品漏斗中；非磁性的锡石矿粒不受磁力作用，只受重力等机械力的作用，故随输料皮带从尾部卸入非磁性产品接矿斗中。

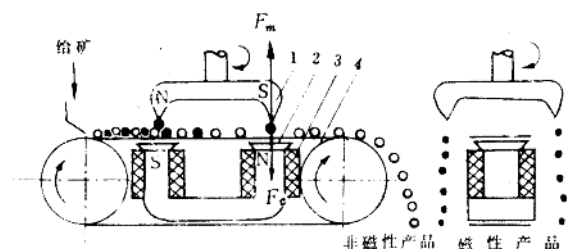
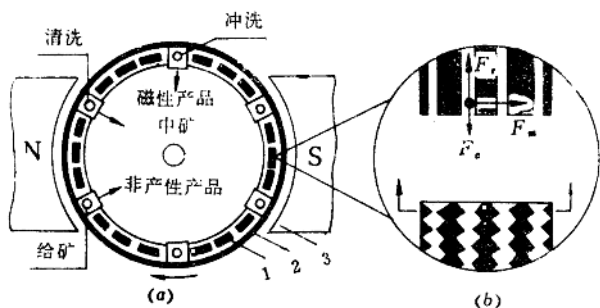


图 1-2 干式强磁选过程

1 分选圆盘；2.电磁铁；3.激磁线圈；4.输料皮带

图 1-3 表示的分选过程是一种湿式强磁选过程。图示设备是一种湿式平环强磁选机，主要由电磁铁和分选圆环构成，圆环由工程纯铁制成，环周边配置许多分选箱，分选箱中装配一定数量的导磁不锈钢齿板介质，齿尖对齿尖排列，以便在磁极感应下产生强磁力，捕收弱磁性矿粒，如赤铁矿、褐铁矿、菱铁矿、黑钨矿粒等。分选环成水平配置，工作时，在磁场中慢速旋转，浆

状物料从圆环进入磁极端给人分选箱；非磁性矿粒随矿浆从齿板间隙穿过，成为非磁性产品，磁性矿粒在磁力 F_m 作用下克服竞争力 F_c ，吸于齿尖，随环旋转至清洗点，受清洗水清洗，分离被夹杂的非磁性矿粒和连生体矿粒，成为中矿，当转至两个磁极之间的中间位置时，受压力水冲洗，成为磁性产品。图示的 F_r 为矿粒所受的摩擦力，其大小为 $F_r = F_m \cdot \text{tg}\phi$ ， ϕ 为摩擦角。磁性矿粒被捕收的条件是， $F_r > F_c$ 。



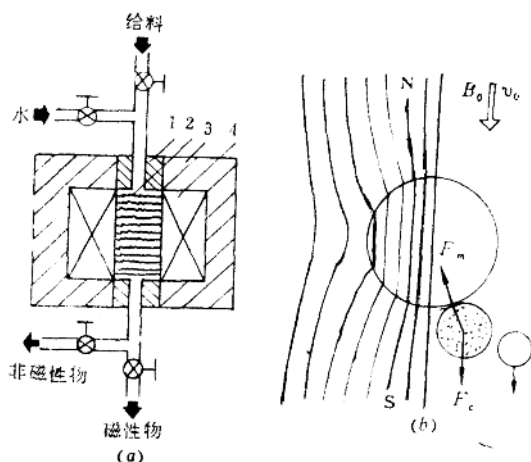
(a) 平环强磁选机分选过程 (b) 磁性矿粒在齿板介质中受力

图 1-3 湿式强磁选过程

1. 分选箱；2. 分选圆环；3. 磁极

图 1-4 所示的磁选过程为周期性高梯度磁选过程。应用的设备为周期性螺线管高梯度磁选机，主要由螺线线圈、铁铠、磁极头和导磁不锈钢毛罐等构成。钢毛磁化到饱和时能产生高磁场梯度，钢毛越细，在其周围产生的磁场梯度越高，而磁力作用的范围则越小，因而这种设备适合于回收微细粒弱磁性颗粒，如高

岭土中的铁和钛氧化物等。料浆进入磁化钢毛罐后，非磁性颗粒随料浆穿过钢毛介质，从非磁性物排料阀排出，磁性颗粒受高梯度磁力作用，克服竞争力，吸于钢毛上表面或下表面，经过较长时间给料后，即钢毛介质吸附磁性颗粒达饱和时，停止给料，然后给水清洗出钢毛介质中被夹杂的非磁性颗粒，清洗后断磁，给水冲洗出钢毛介质中的磁性颗粒。然后又重复上一分选过程。这种分选过程较长，选矿作业不是连续的，因而称为周期式高梯度



(a)周期式高梯度磁选机
分选过程

(b)磁性颗粒在导磁不锈
钢毛介质中受力

图 1-4 周期式高梯度磁选过程

1.磁极头；2.导磁不锈钢毛罐；3.铁壳；4.螺旋管

磁选。整个分选过程又称为分选周期，上下分选周期的连贯性通过自动控制各个阀门的开闭而实现。

1.1.2 磁选的必要条件

上述磁选过程表明，磁性颗粒在磁选机磁场中，除受磁力 F_m 作用外，还受竞争力 F_c 的作用。竞争力可定义为与磁力方向相反的所有机械力的合力，包括重力、离心力、惯性力和流体动力阻力等。在磁选过程中，磁力是捕收磁性颗粒的力，又称为磁捕收力；竞争力是使磁性颗粒脱离磁极的力，又称为脱合力。显然，磁性颗粒与非磁性颗粒分离的必要条件是

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

式中 F_m 为磁性颗粒所受的磁力； F_c 为竞争力。若要使两种磁性不同的颗粒分离，则必要条件是，较强磁性颗粒所受的磁力应大于竞争力，即 $F_{m1} > F_{c1}$ ，较弱磁性颗粒所受的磁力应小于竞争力，即 $F_{m2} < F_{c2}$ 。需要说明，在磁选实践中，不可能有绝对纯净的磁性产品与非磁性产品，除未单体解离的连生体影响产品纯度外，一些单体磁性颗粒混入非磁性产品中，一些单体非磁性颗粒混入磁性产品中。前一种情况，导致磁性成分的回收率下降，主要原因是这些磁性颗粒的粒度太细，磁力不足以克服流体阻力等竞争力；后一种情况导致磁性产品的品位下降，原因多半是颗粒之间存在较强的相互作用力，颗粒粒度越细，料浆浓度越大，颗粒间相互作用力越明显。

1.2 物质的磁化

上述磁选过程表明，电磁线圈可使磁选机的铁芯和磁极磁化，在其周围产生磁场。磁极之间的磁场又使矿粒磁化，显现磁性，进而产生磁力；而非磁性矿粒只能受到肉眼观察不到的微弱