



# 高梯度 磁力分离

〔英〕R. 格柏 R. R. 柏斯 著

刘永之 译

中国建筑工业出版社

# 高梯度磁力分离

[英] R.格柏 R.R.柏斯 著

刘永之 译

中国建筑工业出版社

高梯度磁力分离是近期发展起来的一种有效的分离微细弱磁性颗粒的方法。目前它不仅成功地用于矿石的分选，还在钢铁、电力等工业的水处理中得到应用，并可望在医学和其它许多需要进行微细分离的领域中发挥效益。

本书是当前第一本全面系统地介绍高梯度磁力分离的理论和实践的图书。书中阐明由传统的磁选到高梯度磁力分离的发展；从理论上分析了颗粒在高梯度磁场中的分离的机理；介绍了高梯度磁选机的设计、结构和操作；并列举了其在各方面的应用。本书对从事选矿及其它细物料分离的有关人员均有参考价值。

本书翻译中刘国民协助作了校订工作。

## High Gradient Magnetic Separation

Richard Gerber and Robert R. Birss

RESEARCH STUDIES PRESS

1983

\* \* \*

### 高梯度磁力分离

刘永之译

\*

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  
北京市平谷县大华山印刷厂印刷

\*

开本：850×1168毫米 1/32 印张：5<sup>1</sup>/<sub>4</sub> 字数：141千字

1987年8月第一版 1987年8月第一次印刷

印数：1—2,190册 定价：1.05元

统一书号：15040·5269

# 前 言

高梯度磁力分离是从悬浮液中分出微米级弱磁性颗粒的一种有效方法。近几年来它已引起人们极大的注意，且已广泛地用于选矿工业、钢铁工业和发电厂水的处理中。这种方法为化学、生物化学、原子能、煤和其它工业中常常遇到的颗粒系统的选择性处理中的复杂问题，提供了一种有效的解决途径。高梯度磁力分离的应用不只限于工业生产的一方面，这种方法还能用于废水的处理，通常还用作污染控制。也有希望在医学和其它应用科学的不同分枝上找到应用，因此高梯度磁力分离迅速地成为现代工业技术中不可缺少的一部分，所以不仅急需懂得其所涉及的原理，还必须懂得何时何地采用这种方法才有利。

虽然有相当多研究论文涉及高梯度磁力分离，但这本书是关于此一课题的第一本专著。本书的目的是提供高梯度磁力分离方法理论和实践的一个全面的说明，并与磁选机的设计和在典型工业生产条件下的操作方式结合在一起进行讨论。第一章包括磁选法的一般要点，在本章中探讨了重要参数间的基本关系，特别强调了磁力密度的作用并将其看作为描述磁选法特征的本质参数。而这些方法将在第二章中深入研究，此中将按照从弱磁选机到强磁系统乃至最后到高梯度磁力分离的发展过程来研究。

书中特别注意了大型高梯度磁选机的设计和构造，包括常规的和超导磁选机两种。第三章和第四章是与单根丝和多根丝介质有关的颗粒吸留在丝介质上的理论。而第五章中则叙述了高梯度磁选现有的和发展的应用。

高梯度磁力分离是一种涉及多种学科的方法。因此高年级优秀大学生和性质非常不同的课题研究生（如应用物理，胶体化

学，化学制品，机械和电气工程，采矿，土壤和环境科学），如果他们研究的课题涉及到微粒的排除、捕收或选别，则必将从本书中受益。希望专门从事研究的工作者，技术咨询工作者，设计工程师和技术经理们，查阅高梯度磁选可靠的资料时，也会发现本书的价值。

最后，欣然感谢下列公司允许使用它们产品生产或销售的技术资料<sup>①</sup>：

美国 Aguafine 公司，

瑞典 Boliden Kemi AB公司，

英国 Boxmag Rapid 有限公司，

英国 English Clays Lovering Pochin & Co有限公司，

联邦德国 KHD Humboldt Wedag AG；

瑞典 Sala Magnetics 公司。

也十分感谢与C.H.Loffhouse和I.S.Wells博士进行的有价值的讨论。

---

① 全书所提及的公司，在附录1中列出了它们的地址。

# 目 录

## 前 言

|                 |    |
|-----------------|----|
| 第一章 磁选绪论        | 1  |
| 第二章 分选方法, 装置和设备 | 5  |
| 第一节 弱磁场磁选机      | 5  |
| 1. 带式磁选机        | 5  |
| 2. 鼓式磁选机        | 6  |
| 第二节 强磁场磁选机      | 9  |
| 1. 感应辊式磁选机      | 9  |
| 2. 琼斯型磁选机       | 11 |
| 3. 弗兰兹铁滤器       | 20 |
| 第三节 高梯度磁选机      | 22 |
| 1. 磁场及其梯度       | 22 |
| 2. 传统周期式高梯度磁选机  | 26 |
| 3. 常规连续高梯度磁选机   | 31 |
| 4. 超导磁选机        | 34 |
| 第四节 综合评述        | 38 |
| 第三章 单根丝捕获矿粒的理论  | 42 |
| 第一节 捕获图形        | 42 |
| 第二节 磁场          | 43 |
| 第三节 流体速度分布      | 45 |
| 第四节 颗粒运动方程      | 46 |
| 1. 各种作用力        | 47 |
| 2. 极坐标运动方程      | 48 |
| 3. 运动方程的解       | 55 |
| 第五节 颗粒的聚集       | 63 |
| 1. 颗粒在轴向图形上的吸留  | 68 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 2. 颗粒在纵向图形上的吸留            | 70  |
| 第六节 矿粒与丝介质半径的最佳比值         | 75  |
| 第七节 磁滤器的效能(比值)            | 77  |
| 第四章 多根丝介质磁滤器              | 81  |
| 第一节 一般探讨                  | 81  |
| 第二节 磁选机的方程                | 81  |
| 1. 守恒方程                   | 83  |
| 2. 变化率方程                  | 84  |
| 第三节 磁选机方程的解               | 85  |
| 1. 吸留方程和边界条件              | 85  |
| 2. 初始聚集分析的近似法             | 87  |
| 3. 牢固吸留的近似图形              | 89  |
| 第四节 与实验的对比                | 91  |
| 1. 总的发展方向                 | 91  |
| 2. 退化函数 $G$               | 92  |
| 3. 饱和聚集常数 $N_T$           | 94  |
| 第五章 高梯度磁力分离的应用            | 96  |
| 第一节 高岭土选矿                 | 96  |
| 第二节 钢铁工业中的应用              | 101 |
| 第三节 发电厂的应用                | 105 |
| 第四节 选矿中的应用                | 108 |
| 第五节 水的处理                  | 110 |
| 第六节 煤的提纯                  | 113 |
| 第七节 血液的分离                 | 118 |
| 第八节 其他方面的应用               | 121 |
| 结 论                       | 124 |
| 附录 1 某些公司名称和与磁选有关的业务活动    | 127 |
| 附录 2 高梯度磁力分离中直接观察到的颗粒捕收过程 | 131 |
| 附录 3 等值筛网目数               | 134 |
| 参考文献                      | 135 |
| 索 引                       | 156 |

## 第一章 磁选绪论

磁力分选同其他物理分选方法一样，是基于许多力间的一种竞争，所涉及的原理能用图1-1所示的简图很好地解释。各种颗粒混合物给入磁选机后，磁力在一个方向吸引给料中的磁性部分，相反，与之竞争的各种力如摩擦力，重力和惯性力，则在另一方向拉住所有其他颗粒。结果是磁性颗粒从非磁性颗粒中被分开。从而有磁性的精矿（称为磁性精矿）与非磁性的成分（称之为尾矿）同时产出。磁性精矿和尾矿分别通过排矿口排出，在某

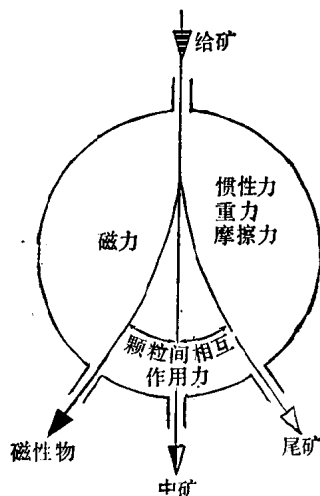


图 1-1 磁选机原理图

些情况下也设有第三排矿口以排出中间成分（称之为中矿）。由于各种力之间的作用，总是有一些非磁性颗粒混杂在磁性产品



中，一些磁性颗粒留在尾矿中，而中矿则由此两种成分组成，当分离前磁性成分还没有得到充分解离时，中矿会含有大量中等磁性的矿粒，而且在磁性精矿和非磁性尾矿中也会发现少量此类矿粒。

假如磁性部分（或非磁性部分）是要求的产品时，则磁选的效率能用两个指标表示：

(a) 回收率，此定义为在磁性产品中（尾矿）磁性物料（或非磁性物料）的量与给矿中该种物料量的比率。

(b) 品位，此为磁性产品（或尾矿）中磁性物料（或非磁性物料）的百分数。

这两个指标是用来表征磁选机从给料中回收磁性颗粒（或非磁性颗粒）的能力和回收产品本身的质量。

磁力，竞争力和颗粒间的力相互作用对磁性产品的回收率  $R_m$  和品位  $G_m$  的影响，可用简单机率理论定量地确定，从而根据定义品位能写成为下式：

$$G_m = \frac{R_m}{R_m + AR_{nm}} \quad (1-1)$$

式中  $R_{nm}$  为在磁性产物中非磁性颗粒的回收率， $A$  为非磁性颗粒与给矿中磁性部分的质量比。一般说来， $R_m$  和  $R_{nm}$  两者与分选过程操作变量的依赖关系是相当复杂的。这种关系可通过假定一磁性颗粒会保留在磁性产品中的机率来说明，而保留在磁性产品中的机率是磁力  $F_m$  与竞争力  $F_c$  比值乘以某个系数（分数），为简化起见，可认为是线性关系，从而

$$R_m = K \frac{F_m}{F_c} \quad (1-2)$$

式中  $K$  为一比例常数。回收率  $R_{nm}$  的表达式可由磁性产品中的非磁性颗粒夹杂的机率而求得。此为两段过程，根据这点，首先非磁性颗粒由于颗粒间的作用力  $F_i$  与竞争力  $F_c$  相对抗而捕收在磁性颗粒中，然后磁性颗粒与非磁性颗粒附着一起而被吸引至磁性矿流中。由于总机率是作为两个单独作业段的机率的乘积而给

出，回收率 $R_{nm}$ 可写成为

$$R_{nm} = K' R_m \frac{F_i}{F_c} \quad (1-3)$$

式中 $K'$ 为比例常数，将式(1-3)代入式(1-1)而得

$$G_m = \frac{1}{1 + AK' F_i / F_c} \quad (1-4)$$

显然，从式(1-2)及式(1-4)可知，回收率随着磁力的增加而增加，随竞争力的增加而减小，反之品位则随竞争力的增加而提高，随颗粒间的吸力增强而降低。

除回收率和品位之外，还有另一参数称之为性能系数(比值)，它用于磁选机效率试验或理论计算方面。为此目的，假定只将相同粒度和同种物料磁性颗粒给入磁选机。则生产率 $\pi$ 可定义为 $N_{\text{排出}}/N_{\text{进入}}$ 的比值，此中 $N_{\text{进入}}$ 为进入磁选机的颗粒数，而 $N_{\text{排出}}$ 为离开磁选机经尾矿排出的颗粒数。 $\pi$ 的数值越小，磁选机的效率越高。回收率的公式为

$$R_m = (N_{\text{进入}} - N_{\text{排出}}) / N_{\text{进入}} = 1 - \pi$$

假如只一种类型且已分散的磁性颗粒给入磁选机，颗粒间的作用力不予考虑，则磁选机的试验和与回收能力有关的性能说明则大为简化。颗粒回收的能力决定于磁力的大小。它表明(是第三章第四节1点)，作用在一个小的磁性颗粒上的磁力由下面的公式给出，可以达到近乎满意的程度。

$$\vec{F} = \chi V_p \text{grad} \left( \frac{1}{2} H B_0 \right), \quad (1-5)$$

式中 $H$ 和 $B_0 = \mu_0 H$ ，分别为磁场强度的大小和矿粒所在位置的磁通密度； $V_p$ 为颗粒体积； $\chi = \chi_p - \chi_m$ 为颗粒与周围介质间磁化系数的差别；而 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨利/米。

方程(1-5)乃两个因子的乘积，第一因子 $\chi V_p$ ，反映出颗粒的物理性质；第二个因子则反映磁力密度，

$$\vec{f}_m = \text{grad} \left( \frac{1}{2} H B_0 \right) \quad (1-6)$$

它反映磁选机在颗粒所在位置的回收能力。在等磁力磁选机的特

殊情况下,进行选别的整个区域中 $\vec{f}_m$ 为常数(即与位置无关)。更加普遍地乃是整个分选带的每个地点的磁力密度都是不同的。然而建立一个典型的 $\vec{f}_m$ 值(即取最大或平均值)是可能的,这个数值能标志磁选机的特征以及其回收能力。所以磁力密度认为是用以表征磁选机及进行磁选机分类的唯一参数。

对丝介质的磁选机或由其他颗粒捕收元件组成的设备,磁力密度很容易表示为(用边界连续条件分别表示切向和法向分力 $\vec{H}$ 和 $\vec{B}$ )

$$f_m \approx B_0 M / a \quad (1-7)$$

此中 $B_0$ 为磁通密度; $M$ 为捕收元件的磁化强度, $a$ 为捕收表面的曲率半径。从而磁力密度的一个估计数值在大多数情况下是容易求得的。

磁力密度的概念(以后常会缩写成*m.f.d.*)在下一章的叙述中非常有用,在那一章中磁选的发展是按弱磁选机,强磁系统乃至最后的高梯度磁选顺序依次研究的,在每种条件下探讨典型设备的设计和应用。

从方程(1-5)和(1-6)也非常明显地看出,只有假定所讨论的梯度是指磁能密度的梯度,而并非仅指磁场的梯度时,高梯度磁选的名称才是正确的。

## 第二章 分选方法，装置和设备

### 第一节 弱磁场磁选机

#### 1. 带式磁选机

在这种类型磁选机中，给料由矿斗供给，经皮带运送到非均匀磁场区中，磁场是由连续而固定的电磁铁磁系产生。感应磁极从皮带上吸起磁性颗粒并朝第二个磁系连续移动，这种磁系的目的是运出这些磁性颗粒至分选区旁适当位置的排矿口排出。因此，给料被分成为不含磁性部分并最终作为尾矿在皮带末端排出。例如，威塞利尔（Wetherill）磁选机的第二个移动磁系，由两根横向皮带组成，与主运输带互成直角，横向皮带是在悬起的齿形电磁铁下面移动。磁性颗粒由电磁铁吸引，在其运动中被转动很快的横向皮带所拦截，被排到恰当的定位接矿斗中。

另一种是由英国波克斯麦格拉皮德（Boxmag Rapid<sup>4</sup>）（见附录1厂商表）设计的磁选机，如图2-1所示。电磁铁安装在运输皮带之下，可调转动圆盘悬装于皮带之上部，其直径比皮带宽度大。圆盘周边正好安在电磁铁极头的中心部分。从而磁性矿粒在此处被挑出而吸到圆盘下较高磁场梯度的区域。然后被带出皮带边外，在场强近乎零的地方被刮入磁选机两旁的接矿槽中。磁选机的生产能力不仅决定于机器的大小，也取决于处理物料的性质和所需分选的程度。处理中等粒度的矿粒（-60网目）带宽为0.38米时，典型的生产能力为500公斤/小时。

磁力密度的大小，即 $\left| \text{grad} \left( \frac{1}{2} HB_0 \right) \right|$ ，决定于带式磁选机的设计，而且在横跨皮带与捕收部件之间的空气隙上也不同；典型的

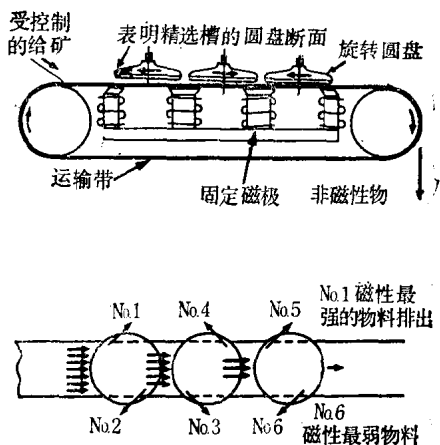


图 2-1 带一盘式磁选机  
(由 Boxmag Rapid<sup>4</sup>提供)

为 $10^4 \sim 10^5$ 牛顿/米<sup>3</sup>。带式磁选机能用于干式和湿式磁选，他们构成了磁选装置的一大类。性能上更为详细的说明，可在K.S.-Dean和C.W.Davies<sup>3</sup>的评论文章或A.F.Taggart的手册<sup>6</sup>中找到。

## 2. 鼓式磁选机

选铁矿石最普通的设备型式是鼓式磁选机，有两种型式——干式和湿式。

干式鼓式磁选机的原理画成草图示于图2-2，强永久磁铁的固定磁系安装在非磁性转鼓内，相邻磁极极性交替。现在的永久磁铁通常都是由钕铁氧体做成。这些磁铁的自由磁极（译者注：即极头）与鼓筒壁内表面靠的很近，从而形成了一个分选区，该区从鼓筒之顶部延伸至超过分离隔板处。矿石（常常要先经仔细筛分级）给到鼓筒顶部，并沿鼓面带到下方。尾矿便落下，而磁性矿物吸在鼓面，它被带到分隔板的另一边，在磁极的末端排出。分选效率与磁力、离心力，重力和其它作用于矿粒上各种力

的相对大小的依赖关系很复杂。特别是给矿的湿度能强烈地影响磁选机的生产率。如果湿度大，颗粒会互相粘在一起，这会导致不能令人满意的分选结果。另一方面，磁性颗粒通常会受到一个大小不断变化的磁力的影响，这是由于矿粒由鼓面带运至经过磁极的极性交变区。会使矿粒产生一个翻转运动或转动，从而有助于分选，所以给矿实质上应当是干的，应布满于鼓面而又不超过一单粒层厚度。

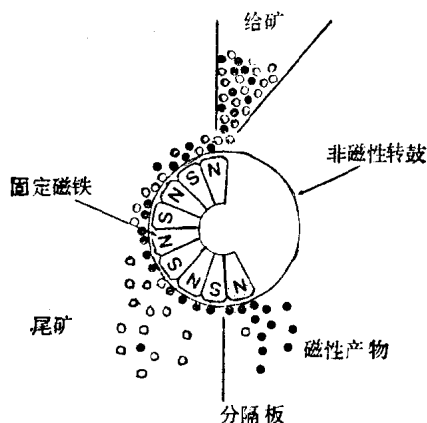


图 2-2 干式鼓筒式磁选机

有时也希望回收中矿，通常通过改进分选磁系的几何位置来达到这一目的。中矿常常是由未充分解离的既含有磁性又含有非磁性成分的颗粒组成。因为矿石的磨碎是较为昂贵的作业，因此矿石先用鼓式磁选机分选，然后在再处理之前，仅仅再磨中矿，这在经济上往往是有利的。磁铁矿精选的典型机组是由依次进行分选三个鼓式磁选机组成，通常以小于100转/分的可调转速转动。这种机组每小时每米长的生产能力为40至80吨。给矿粒度近乎3毫米。关于干式鼓式磁选机选矿的一般情况的更详细资料，在P.G.Kihlsted和B.Sköld<sup>7</sup>的研究论文中可找到。

湿式鼓式磁选机依赖于磁力，重力和水电力间的竞争。其平衡情况有可能比干式鼓式磁选机更加协调，从而能分选较小的颗

粒（可下降到75微米）。所以湿式鼓式磁选机除用于选矿外，常常还用作重介质的回收。如图2-3所示的顺流式湿式鼓式磁选机是最普遍使用的结构。矿浆从上部给矿箱给入槽中，在此矿浆流动与不锈钢鼓筒转动为同一方向。磁性矿粒被固定磁铁吸引至非磁性鼓筒表面，并将其带到左边，此磁性矿粒聚集在磁场区的末端，最后经溢流堰排出。非磁性颗粒沉降到槽的最低点，并作尾矿排出。顺流型磁选机能生产高品位的精矿，但可能丢下相当大量的磁性物料在尾矿中，一般来说即回收率不太高。所以，尾矿常常在图2-4的逆流式湿式鼓式磁选机上再行处理。

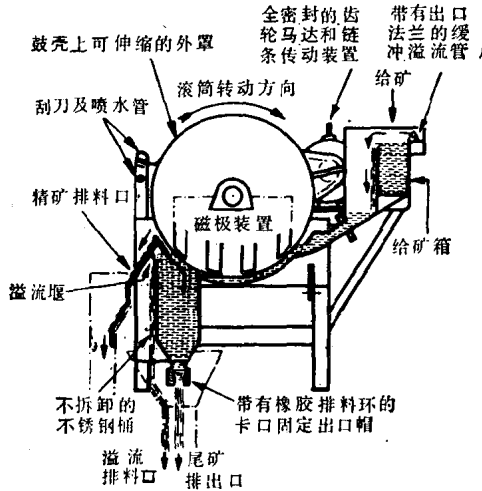


图 2-3 顺流湿式鼓式磁选机（由Boxmag Rapid<sup>®</sup>提供）

在这种设备中，正如其名称所提出的含意那样，给矿流经矿浆槽时，其流动方向与鼓筒转动方向相反。这就导致了高的回收率，而精矿品位比较低。其理由是除了多数矿粒在鼓筒很短区段上被扑集（靠近给矿进入点）外，磁性矿粒也有机会在进一步下流时被回收，而被带回到磁性产品的排出口。第三种类型的湿式鼓式磁选机是丰逆流鼓式磁选机(图2-5所示)。在此处的矿浆是直接

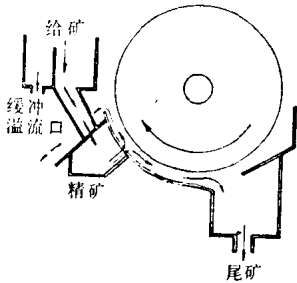


图 2-4 逆流湿式鼓式磁选

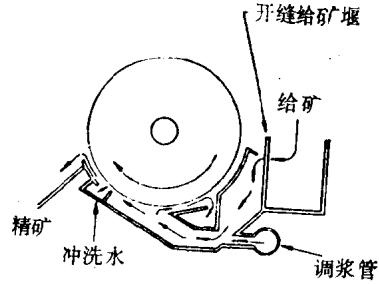


图 2-5 半逆流湿式鼓式磁选机

(见后面参考文献Suleski<sup>9</sup>)

(见后面参考文献Suleski<sup>9</sup>)

给到鼓筒之下部，磁性矿物沿鼓筒表面转动的方向运动，而尾矿<sup>9</sup>则强迫与鼓筒反向行进。半逆流式磁选机能提供高品位的铁精矿<sup>9</sup>，而细粒磁性颗粒的损失极小，因此它常常作为一种精选设备用在最后一段的湿式磁选作业中。

湿式和干式的鼓式磁选机的规格相似，直径从 0.5 米到 1.5 米，且均为 3 米长。鼓筒转速通常约为 20 转/分钟，每米鼓长每小时的生产率能达 30 吨。虽然鼓式磁选机的磁场和磁力分布已由许多作者<sup>10-12</sup>分析过，但尚未提出此种设备的动力学分选理论。现代的设计乃基于一种近似的经验法。但相对于较强磁性矿石的有限应用范围内，它们又完全是成功的。鼓面的磁力密度 ( $\frac{1}{2}HB_0$ ) 典型的为  $2 \times 10^5$  牛顿/米<sup>3</sup> 数量级。

## 第二节 强磁场磁选机

### 1. 感应辊式磁选机

特定粒度的弱磁性矿粒(即磁化系数 $\chi$ 和体积 $V_p$ 都很小)的矿粒的有效分选，需要增加磁场强度 $H$ 和增加梯度 $\text{grad}H$ ，两者都要大大超过鼓式磁选机所采用的数值。通过对这些磁选机的改造可以达到这一要求，特别是开放磁路(这是鼓式磁选机主要特点之一)，必须用闭合磁路来取代。且须引用更为有效的不



均匀磁系取代永久磁铁的极性交替排列。将这些观点付诸实际，就产生了转鼓（转辊）式磁选机。它是一种彼此隔绝的圆片的层状构造形式，圆片用低碳钢做成（由于物理上的理由）并固定于无磁性不锈钢轴上。当转辊放进磁路中一个适当形式的空间里时（磁路由磁轭和激磁线圈构成），转辊高度磁化，就所涉及的磁通来说会形成闭合磁路，从而在辊面与磁极头之间的空间内产生高的 $H$ 值。转辊圆片的突出边缘在相同地方会增加相当大的梯度 $\text{grad}H$ 数值，这就导致产生很大的（相对地）磁力。同时，圆片间的隔绝会使涡流减小到很小的程度，这种涡流是由于转辊在磁场中转动而产生的。图2-6所示的设备构成了感应辊式磁选机设计的

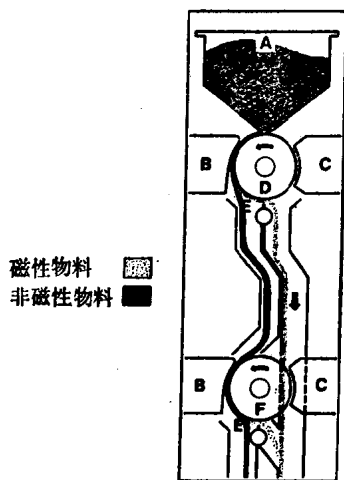


图 2-6 感应辊式磁选机（由Boxmag Rapid提供）

A—给矿漏斗；B—可调磁极头；C—固定磁极头；D—第一感应辊；E—分隔板；F—第二感应辊

基础。这种设备的给料是由可控制给矿速度的漏斗给到第一个转辊顶部，转辊以高速转动，典型的为80~800转/分钟。物料运送到磁场区域内，在此，磁性矿粒吸住在转辊圆片之突出边缘而被带到超过隔板位置的地方排出，因为磁场及其梯度在此处正好降