



浅析聚磁介质在磁选机中的应用

赵礼兵, 张玉栋, 李富平

(河北联合大学, 河北 唐山 063009)

摘要:高梯度磁选机是在其他强磁选机的基础上发展起来的一种新型强磁选机。通过整个高梯度磁选机工作体积的磁化场是均匀的,即工作体积中的任何一个颗粒受到的力相同,且磁化场中的磁介质被均匀磁化,同直径的磁介质在磁化空间的任何位置,其梯度的数量级是相同的,与一般磁选机相比较,磁场梯度大大提高,从而为磁性颗粒的选别提供强大的磁力克服流体阻力和重力,使微细粒弱磁性颗粒可以得到有效的回收。高梯度磁选是在能产生高梯度的聚磁介质上进行的,而高梯度的产生与聚磁介质的材质、形状、放置方式、相对尺寸及充填率等参数有密切关系,对磁选机的磁选指标有较大的影响。

关键词:高梯度磁选机;聚磁介质;参数;影响

中图分类号:TD457 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-6532(2012)06-0003-06

将铁磁性聚磁材料插入均匀的磁场中作为分选介质的高梯度磁选机,其聚磁介质的存在从根本上改变了磁场的特性。本研究分析了不同形状及工艺参数的聚磁介质对磁场的影响,在矿物分选过程中,根据不同的聚磁介质的特点,合理选用聚磁介质,提高分选效率和指标。

1 圆柱形介质棒

导磁不锈钢介质棒工作可靠,分选指标稳定,效率高。磁感应强度随聚磁介质距离的增大而降低,且介质棒截面半径越小,衰减的越快。所以,截面半径小的聚磁介质产生的磁感应强度和磁场强度虽然高,但作用深度小^[1]。在距介质棒表面相同的测试点,磁场强度和磁感应强度随着介质棒直径的增加逐渐变小。高磁场主要集中于介质棒的上下部分区域,对于介质棒而言,有效捕集面积随着介质棒直径的增加逐渐增大。

弱磁性矿物在水平磁系磁场中圆柱形介质棒所受的磁力为:

$$F_{\text{磁力}} = \left(\frac{4}{3} \chi \pi b^3 \mu_0 M \right) \frac{r_0^2}{r^3} \left(H_0 \cos 2\alpha + \frac{Mr_0^2}{2r^2} \right) \quad (1)$$

χ —矿物颗粒的质量磁化率; b —矿物颗粒半径; μ_0 —真空导磁率; M —矿物颗粒的质量; r_0 —导磁介质棒半径; H_0 —背景场强。

在图1(a)的在高梯度磁场中,相对于磁力和流体阻力,可忽略不计矿粒所受到的静电力和范德华引力,考虑的主要是磁力 F 、流体阻力 F_D 和矿粒的重力 G 。

虽然矿浆不是理想流体,但其流速较低,雷诺数小,所以圆柱体迎水面的流线与理想流体的流线基本相同。对粒度较小的颗粒,矿粒所受流体粘滞力服从斯托克斯阻力公式,即

$$F_D = 6\pi b \eta v_0 \quad (2)$$

v_0 —矿浆运动的初速度; η —矿浆的粘滞系数。

在捕收的过程中 $F_{\text{磁力}} \geq F_D$,而磁性矿粒的捕收率取决于 $F_{\text{磁力}}$ 与 F_D 的比值,由此可知矿浆的粘度系数一定时,矿粒越大,磁性越强,越易捕收; M/r 表示磁介质的特性,在磁性矿粒向介质棒运动时, r 逐渐变小,则磁力越来越大,越容易捕收。同时,由于磁力 F 随着矿粒与圆柱形棒介质距离的接近,作用在矿粒上的磁力将越来越大,故水平和垂直方向上的加速度也将会变大,矿粒的运动轨迹为不规则的抛物线。

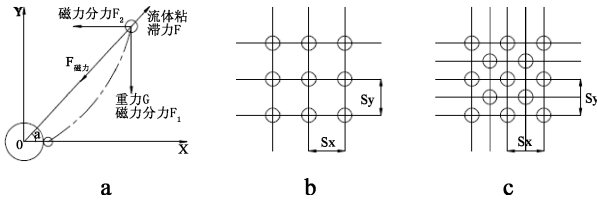


图 1 矿粒受力及圆柱形聚磁介质排列类型

Fig. 1 Forces on mineral particles and arrangement types of cylindrical magnetic medium

- a. 矿粒在圆柱形介质棒附近受力分析;
- b. I 型矩阵型排列; c. II 型交叉排列

- a. Force analysis of mineral particles near cylindrical magnetic medium rod; b. Type I matrix arrangement;
- c. Type II intersecting arrangement

一般情况下,聚磁介质棒一般有两种排列类型,通常称为 I 型矩阵排列和 II 型交叉排列,见图 1 中 b、c,研究证明^[2]:

(1) 当 $S_x \leq 5r_0$ 时,两种排列类型沿 X 方向的变化规律近的似地可用下式表示:

$$H_x = H_0 m e^{-cx} \quad (3)$$

H_0 —背景磁场强度; m 、 c —由丝极排列形式和间距决定的常数; x —离两丝极中心的相对距离, $x = \frac{r}{r_0}$ (r_0 为丝极半径, r 为绝对距离)

(2) 当 $S_x \geq 6r_0$ 时,此时不管是排列类型 I 还是排列类型 II,其复合磁场特性和单根丝极的近似,可按一根丝极来表示,即

$$H_x = \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) H_0 \quad (4)$$

圆形断面介质棒的磁场力作用深度约为 $1.5d_{\text{丝}}$, 这样在磁化方向上相邻的两根介质棒的磁场力作用范围约为 $3.0d_{\text{丝}}$ (介质棒表面间的距离)^[3]。为了使多数介质棒都有吸着磁性颗粒的机会,既要减小磁性矿粒流失的机会,又要使介质棒的附着量较为均匀,在相邻两根介质棒之间吸着几层磁性颗粒后,还应留有 1~3 个矿粒能顺利通过的间隙。

鞍山齐大山铁矿采用聚磁介质为圆柱形介质棒的 Slon 高梯度磁选机,得到强磁尾矿品位平均 8.45%,精矿品位 67.40%,回收率 76.40% 的指标^[4]。

2 导磁钢板网

网状磁介质可分为两类:压制成的钢板网和编

制成的编织网。导磁钢板网具有分布密度可变,钢板网的空隙分布和矿浆流速均匀、精选效果好且不易堵塞,适用于弱磁性矿物的分选。

钢板网是由许多呈 X 形的矩形截面的磁性基体 (简称 X 形磁性基体) 组成, X 形磁性基体理论上有一个适宜的偏角 (此时磁场力最高), 从以前的测量结果可以得出它的适宜偏角的位置为: X 形铁磁性基体的主干部截面的对角线与背景场方向一致 (见图 2), 这种情况下它在背景场方向上的尺寸最长^[5], 计算出适宜偏角 θ 为 22° 。

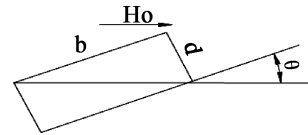


图 2 X 形铁磁性基本适宜偏角

Fig. 2 Ferromagnetism of type x suitable for the deflection angle

适宜偏角下的 x 形铁磁性基体主干部外部某处 ($x \leq 2d$) 的磁场强度 (H_x) 可由下经验公式求出:

$$H_x = H_0 (a_0 + a_1 e^{-a_2 x}) \quad (5)$$

H_0 —背景场强强度 (奥斯特); x —在 x 方向上离开基体表面的相对距离;

a_0 、 a_1 、 a_2 —常数, 当 x 形铁磁性基体为单层且其主干部较长时, $a_0 = 1.28$, $a_1 = 1.34$, $a_2 = 2.58$ 。

编织网是由许多呈正交的不同弯度不同的圆形截面的十字形钢磁线基体组成, 见图 3。钢磁线的弯曲是有规律的, 线心是一条较规则的曲线 (近似正弦波曲线), 见图 4。在直角坐标系中钢磁线的曲线方程可近似地表示成为:

$$x = a \cos kz - a \quad (6)$$

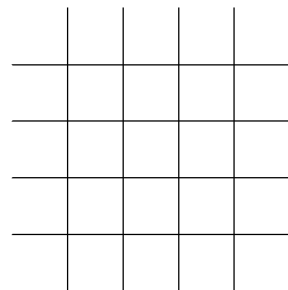


图 3 不锈钢导磁编制网结构图

Fig. 3 Structure diagram of stainless steel magnetic compilation net

a —铁磁线的波形振幅; k —与铁磁线的波形周期有关的常数。

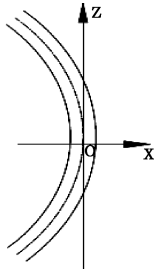


图4 直角坐标系中的大弯度铁磁线

Fig.4 Bending ferromagnetic line in the rectangular coordinate system

编织网的磁场特性主要由两部分组成,其中大弯度钢磁线凸部(实为一个感应磁极)的磁力高于与其相对的小弯度凸部(为另一个感应磁极)的磁力^[5]。所以,前者在分选过程中是扑捉磁性颗粒的主要区域。所以增大铁磁线的“波形周期”和提高“波形振幅”能显著增加磁场力。

海钢2[#]尾矿库矿样经过聚磁介质为导磁钢板网的SSS-II型高梯度磁选机选别,可得到精矿产率41.79%,品位64.32%,回收率77.67%,中矿产率4.24%,品位32.9%,回收率3.87%;尾矿产率53.37%,品位14.31,回收率21.46%的选别指标,优于常规型高梯度磁选机^[6]。凤城某红柱石矿含Fe₂O₃8%~9%,经聚磁介质为编织钢板网的DMG型高梯度磁选机一段分选,Fe₂O₃含量5%~6%,经两段分选Fe₂O₃含量降至1%以下,达一级品要求^[7]。

3 新型多尖刺不锈钢导磁钢毛

不锈钢导磁钢毛是一种广泛应用于磁分离介质,能产生高梯度的较好的磁介质。它有很好的可压缩性和断面尺寸的可变性,利于产生大面积可供磁性颗粒粘附的高梯度磁性区域,而它的不锈性又能较好地避免腐蚀所产生的不利影响,提高其使用寿命,降低生产成本。

采用1[#]金属铬、1[#]电解镍、1[#]电解铜、DT4纯铁、钼、硅等原材料。配料后,在中频感应真空电炉中进行熔炼浇注。铸锭化学成分分析结果见表1。铸锭经锻造开坯后,用特殊方法加工出钢毛产品^[8]。

钢毛产品磁性能为: $B_{20} = 12200$ 高斯, $B_{100} = 145000$ 高斯, $H_c < 2$ 奥斯特, $B_r = 7900$ 高斯。强度、

塑性为: $\delta_b = 50\text{Kg/mm}^2$, $HRB = 79$, $\delta = 30\%$ 。

表1 钢毛铸锭化学成分/%

Table 1 Chemical components of steel ingot

铬	镍	锰	钼	铜	硅	铁
17.1	0.23	0.025	0.01	0.05	0.05	其余

以处于均匀的外电场中椭圆钢毛介质为例,当外磁场强度 H_0 沿 x 轴方向时(见图5),根据复势函数理论,由上式可导出椭圆柱形磁介质外部的磁场强度 H 为^[10]:

$$H = H_0 \left| 1 + \frac{1-k}{2} \left(\frac{Z}{\sqrt{Z^2+c^2}} - 1 \right) \right| \quad (7)$$

式中: $Z = x + iy$ 代表点的坐标(复数); $c = \sqrt{a^2-b^2}$ 代表半焦距; $k = (1+\lambda)(1-u,\lambda)/(1-\lambda)(1+u,\lambda)$; $\lambda = b/a$ 称为椭圆的压缩系数。

由上式可知,只要把场内某点 (x,y) 的复数坐标 $z = x + iy$ 带入上式,就可以算出该点的磁场强度。

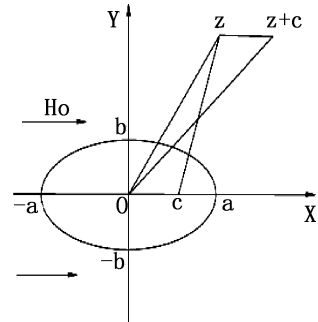


图5 钢毛的横截面及外场强 H_0

Fig.5 Section and outfield intensity H_0 of steel

钢毛的断面形状直接影响介质的磁场特性。在钢毛介质及其断面形状的研究结果表明,在矩形、三角形、六边形及八边形的断面形状中,三角形和矩形断面的介质磁力跌落较快,即磁场梯度较大,且两种断面磁力作用深度亦相近^[11]。但考虑到有效的捕集面积,生产中通常选用用矩形断面的钢毛介质。

假设钢毛的断面尺寸 $a \times b$,当背景磁场的场强一定时, b/a 值较大则有较强的捕收力,但 b/a 过大时,导致介质退磁困难,并且使分离空间的介质数量减少而降低捕集面积。因此,一般取 $b/a = 3 \sim 5$,而 a 和 b 的值,则首先取决于分离矿粒的粒度,可按梯度匹配准则确定。如果将 a 、 b 转换成的圆形钢毛介质断面直径与所分离矿粒直径,之比约为3时,矿粒

所受磁力最大^[11]。

钢毛高梯度分离技术应用黄茅山锡精矿得到的指标为锡品位由 61.9% 提高到 64% ~ 70%、回收率 60% ~ 98%，含铁由 8.07% 降到 4% ~ 1.7%，除铁率 62% ~ 68%^[8]。

4 齿板介质

利用磁板介质分选弱磁性矿物是琼斯在 1955 年发明的。目前,齿板介质强磁选机是世界上湿式磁选弱磁性矿物的主要强磁选设备。齿板介质的主要参数为齿尖 β, 齿间距 a 及齿距 b, 见图 6。齿板聚磁介质组装形式一般为中间齿板是双面齿板, 边缘齿板是单面齿板, 齿与齿排列方式有尖对尖排列和尖对凹型排列两种形式(见图 6、7)。

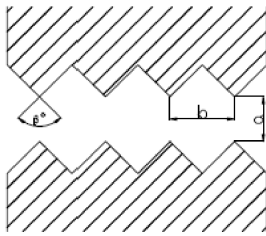


图 6 齿板尖对尖排列

Fig. 6 Canine-to-canine arrangement of truss plate

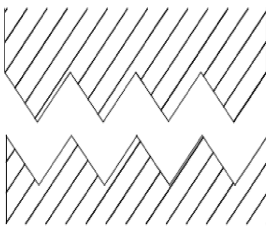


图 7 齿板尖对凹排列

Fig. 7 Canine to concave arrangement of truss plate

取磁极的磁势为 W, 或磁压降为 2W。齿板齿面上的磁场强度、梯度及比磁力^[12-14]为:

$$H = \left| \frac{d\omega}{dZ} \right| = \left| \frac{d\xi}{dZ} \right| = \frac{2WB(\alpha, \beta)}{\pi S} \times \xi^{\frac{1}{2}-\alpha} (1-\xi)^{\frac{1}{2}-\beta} \quad (8)$$

$$\frac{dH}{dZ} = \left| \frac{d\xi}{dZ} \right| = \frac{2WB^2(\alpha, \beta)}{\pi S^2} \times \frac{(\frac{1}{2}-\alpha)(1-\xi) - (\frac{1}{2}-\beta)\xi}{\xi^{2\alpha-\frac{1}{2}}(1-\xi)^{2\beta-\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

$$F = H \frac{dH}{dZ} = \frac{(2W)^2 B^3(\alpha, \beta)}{\pi^2 S^3} \times \frac{(\frac{1}{2}-\alpha)(1-\xi) - (\frac{1}{2}-\beta)\xi}{\xi^{3\alpha-1}(1-\xi)^{3\beta-1}} \quad (10)$$

式中: $Z = \frac{S}{B(\alpha, \beta)} \int_0^\xi \xi^{\alpha-1} (1-\xi)^{\beta-1} d\xi; \omega =$

$$\frac{2Wi}{\pi} \sin^{-1}(2\xi - 1)$$

$$S = \frac{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}{\Gamma(\alpha+\beta)} = B(\alpha, \beta) \text{ (第一类尤拉积分)}。$$

(8) ~ (10) 中, $0 < \xi < 1$ 。当介质达到磁饱和前, 磁场强度与磁势成正比, 与齿间距成反比; 磁场梯度与磁势成正比, 与齿间距的平方成反比; 比磁力与磁势的平方成正比, 与齿间距的立方成反比。

对于尖对尖型磁场, 在实用上一般取 $\theta_1 = \theta_2$, 即 $|\alpha| = |\beta|$, 于是磁场强度 H、梯度及比磁力有

$$H = \frac{2WB}{\pi S} \times (\xi - \xi^2)(1-\xi)^{\frac{1}{2}-\alpha} \quad (11)$$

$$\frac{dH}{dZ} = \frac{2WB^2}{\pi S^2} \times (\frac{1}{2}-\alpha)(1-2\xi)(\xi - \xi^2)^{\frac{1}{2}-2\alpha} \quad (12)$$

$$F = \frac{(2W)^2 B^3}{\pi^2 S^3} \times (\frac{1}{2}-\alpha)(1-2\xi)(\xi - \xi^2)^{1-3\alpha} \quad (13)$$

对于尖对凹型磁场, 在实用上一般取 $\alpha + \beta = 1$ (以 π 为单位), 但由于 $\Gamma(a+b) = 1$ 故有

$$H = \frac{2WB}{\pi S} \times \xi^{\frac{1}{2}-\alpha}(1-\xi)^{\alpha-\frac{1}{2}} \quad (14)$$

$$\frac{dH}{dZ} = \frac{2WB^2}{\pi S^2} \times (\frac{1}{2}-\alpha)(1-2\xi)^{2\alpha-3/2} \xi^{\frac{1}{2}-2\alpha} \quad (15)$$

$$F = \frac{(2W)^2 B^3}{\pi^2 S^3} \times (\frac{1}{2}-\alpha)(1-\xi)^{3\alpha-2} \xi^{1-3\xi} \quad (16)$$

在使用小齿距齿板时, 最大给矿粒度为 0.4 ~ 0.6mm 的选别效果较好, 而使用大齿板齿距时, 最大给矿粒度在 0.7 ~ 0.9mm 的选别效果较好。一般情况下, 极距等于齿距的一半, 极距均约为最大给矿粒度的 3 ~ 4 倍^[15], 在齿距和极距的适宜取值范条件下根据给矿粒度来确定齿板参数。

前苏联米哈依洛夫采选公司采用 $\partial P\Phi - M1$ 型磁选机, 在给矿品位 34.12% 时, 精矿品位 52.6%, 尾矿品位 13.0%, 磁性产品回收率 82.3%^[16]。

5 钢球介质

当磁场中有钢球介质时, 对于磁极头形状一定, 极宽与极隙之比一定的多极磁系, 球两端的磁场强

度为:

$$H_x = KH_0 e^{-cx} \quad (17)$$

式中: H_x —离磁极 x 厘米处的磁场强度(奥斯特); H_0 —磁极面上的磁场强度(奥斯特); e —自然对数的底; c —磁场不均匀系数。

而球介质两端点的磁场强度则用下式:

$$H_{\text{球端}} = KH_0 e^{-cx} \quad (18)$$

其中 K 为比例系数, K 当球介质的材料一定时, 与球的直径大小、磁极间球的数量多少及它们的排列方式、球间隙的大小有关。对于最适宜的球介质直径, $K \approx 2$; 其余球径 $K \approx 1 \sim 2$ 。

钢球介质在磁场中的排列方式一般为单层平行排列, 单层菱形排列及多层菱形排列几种方式, 见图8。不论是单排排列, 还是多排排列, 间隙处的磁场强度随球间距的增大而减小。间隙处两球心的连线上磁场强度最高, 距离间隙处的此连线愈远(不论是沿垂直此连线的方向, 还是沿球面), 磁场强度愈低。对于多层球介质, 上层球介质间隙的磁场强度低于下层球介质间隙的磁场强度^[17]。球介质以球心为原点, 沿径向的磁场强度变化很大, 所以在开放磁系中球介质所形成的磁场是一个高梯度磁场。

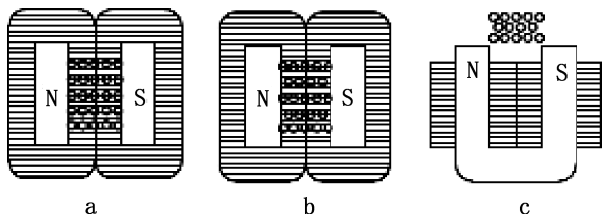


图8 多个球介质在开放磁系中的排列方式

Fig.8 Arrangement of several sphere medium in the open magnetic system

a—单层多排平行排列 b—单层多排菱形排列

c—多层菱形排列

a. Single-layer multi-array planar arrangement

b. Single-layer multi-array diamond arrangement

c. Multi-layer diamond arrangement

6 结 论

1. 适宜的丝极充填率应根据矿粒在分选过程中所受的磁力作用和丝极中要有畅通的流动空间两个因素来考虑, 过大的充填率不但达不到提高磁场力的目的, 而且还缩小了选分空间间隙, 增大了颗粒

运动的阻力, 反而会影响选分过程的正常进行。

2. 材质对圆形断面磁介质的磁场分布影响很小。一般选用圆柱(丝状)磁介质时只要选择不锈钢磁材料即可, 不必过分追求昂贵的高导磁率材料。

3. 在排列方式上, 交叉排列较平行排列分选效果好, 磁介质的间隙及相对尺寸要根据分选矿粒的大小确定。

参考文献:

- [1] 黄雄林, 汤玉和, 等. 水平磁系高梯度磁选机应用初探[J]. 矿业工程, 2010, 8(2): 25-26.
- [2] 王常任. 磁电选矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986.
- [3] 王常任, 王智. 丝状感应磁介质的磁场特性及其工艺参数研究[J]. 有色金属, 1982, 34(1): 48-49.
- [4] 赫荣安, 熊大和, 等. SLON 强磁机选别鞍山式贫赤铁矿的试验及应用[J]. 金属矿山, 2003(9): 23-24.
- [5] 王常任, 张志谦. 网状磁介质的形状及参数研究[J]. 金属矿山, 1986(10): 26-28.
- [6] 汤玉和. SSS-II 湿式双频双立环高梯度磁选机的研制[J]. 金属矿山, 2004, 333(3): 37-39.
- [7] 李月侠, 李彪. DMG 型电磁高梯度磁选机用于红矿除铁的研究及实践[J]. 金属矿山, 2001, 297(3): 39-41.
- [8] 肖任之. 不锈钢磁钢毛的研制与应用. 湖南有色金属[J]. 2000, 16(1): 13-14.
- [9] 斯迈思 WR. 静电学和电动力学(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 1981. 138.
- [10] 徐建成. 钢毛磁化状态对磁选的影响[J]. 有色金属, 1995, 47(4): 38-39.
- [11] 翟宏新. 高梯度磁分离设备的介质体新结构[J]. 过滤与分离, 1994(1): 17-19.
- [12] 杨龙. 齿板聚磁介质与磁路计算[J]. 有色金属, 1984(4): 34-35.
- [13] 徐建民. 由复势函数求场强梯度的公式[R]. 科学通报, 1982. 15, 958-959.
- [14] 冯慈璋. 电磁场[M]. 北京: 人民教育出版社, 1980. 202-203.
- [15] 高明炜, 王常任, 等. 齿板型磁介质的磁场特性及其工艺参数的研究[J]. 金属矿山, 1985(1): 36-37.
- [16] 蔡怀智. 平环型强磁选机齿板介质的结构和分选间隙最优参数的研究[J]. 矿产综合利用, 1987(3): 59-60.
- [17] 徐秉权. 球介质对开放磁系磁场分布的影响[J]. 金属矿山, 1980(5): 36-37.

(下转 16 页)