

# 磁流体静力跳汰分选法<sup>①</sup>

卢继美<sup>②</sup> 许孙曲<sup>③</sup> 黄万抚<sup>④</sup>

(南方冶金学院)

## 摘 要

磁流体静力跳汰分选是利用周期性变化的背景磁场,使磁流体的磁浮力产生周期性变化,从而导致处于磁流体内的固体颗粒产生垂直振动,以强化分选效果。

**关键词:** 磁流体, 跳汰, 选矿

第一台磁流体静力分选机问世二十多年以后的今天,磁流体静力分选技术的研究重点主要集中在研制优质的磁流体和设计高效率的分选机,以扩大磁流体静力分选在实验室和工业生产中的应用。

本文论述在磁流体静力分选法基础上发展起来的磁流体静力跳汰分选法,即 MHSJS (Magnetohydrostatic Jigging Separation) 法。

## 1 MHSJS 的基本原理

基于磁流体磁浮力与背景场密切相关的特点,施加周期性变化外磁场,使磁浮力产生周期性变化,导致处于磁流体内的固体颗粒产生垂直振动,以强化物料的分选,这就是 MHSJS 的实质。

处于磁流体内的固体颗粒(设该颗粒为 1 个单位体积)在垂直方向上受到的作用力为

$$F = F_1 + F_2 - F_3 - F_4 \quad (1)$$

式中  $F$  为合力;  $F_1$  为重力;  $F_2$  为磁力;  $F_3$  为浮力;  $F_4$  为磁浮力(见图 1)。且

$$F = \rho_1 g + \mu_0 x_1 H \text{grad} H - \rho_0 g - \mu_0 x_0 H \text{grad} H \quad (2)$$

式中  $\rho_1$  为颗粒密度;  $g$  为重力加速度;  $\mu_0$  为真空磁导率;  $x_1$  为颗粒的比磁化系数;  $\rho_0$  为磁流体密度;  $x_0$  为磁流体的磁化系数;  $H \text{grad} H$  为磁场磁力。

当该颗粒处于静力平衡时,  $F=0$ , 即

$$\frac{(\rho_1 - \rho_0)g}{\mu_0(x_0 - x_1)} = C = H \text{grad} H \quad (3)$$

式中  $C$ ——常数

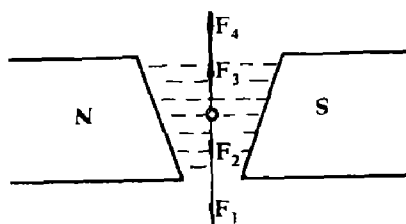


图 1 作用在固体颗粒上的力

由 (3) 式可知:  $c$  是仅与磁流体和固体性质(密度和磁化系数)有关的常数,但它同时又是磁场磁力的函数。这说明,对一定的磁流体和固体颗粒而言,颗粒在磁流体里的悬浮位置,仅与磁场磁力有关;磁场磁力变化,颗粒的悬浮位置也随之变化。即当某点的  $H \text{grad} H > C$  时,颗粒将向上移动,反之,将向

①于 1991 年 9 月 1 日收到修正稿

②副教授; ③教授; ④讲师

下移动。因此,若周期性地改变非均匀磁场,则颗粒也将呈周期性地垂直振动。这垂直振动如同重力选矿中的跳汰法一样,能加速物料按比重分层和强化物料的分选效果。

## 2 MHSJS 机的结构

磁流体静力跳汰分选机主要包括激磁系统、分选系统和磁流体循环系统三部分,见图2。

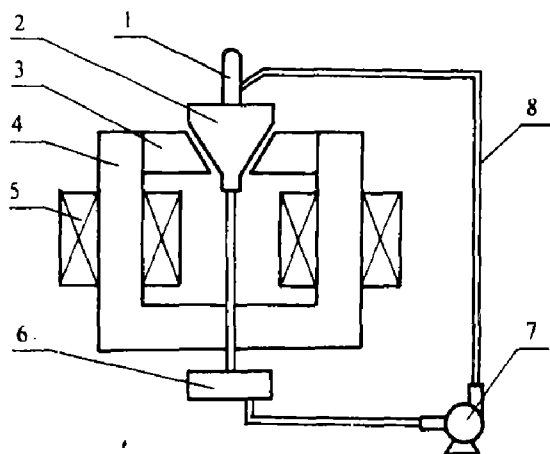


图2 磁流体静力跳汰分选机示意图

1—给矿器; 2—分选槽; 3—磁极头; 4—磁路;  
5—线圈; 6—接矿槽; 7—泵; 8—管路

激磁系统包括铁芯、磁极、线圈和电源。铁芯采用工程纯铁。磁极头形状决定了磁场特性,其确定方法归结为在特定条件下求磁场等位面形状的问题。在平面静磁场条件下,磁极间隙中静磁场的磁位  $V$  应满足拉普拉斯方程

$V_2 = 0$ , 采用极坐标时用分离变量求解。具有实际意义的解为

$$\begin{cases} V = A\theta & k = 0 \\ V = Ar^k \sin k\theta & k \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中  $r$  为平面极坐标的矢径;  $\theta$  为极角;  $A$  和  $R$  为常数。

$k$ ,  $\theta$  与磁极头形状的关系为:

$k=0$  时  $\theta = \theta_0$ , 为楔形磁极;

$k=2$  时  $r = r_0 \sin^{-1/2} 2\theta$ , 为等轴双曲线磁极;

$k=3/2$  时  $r = r_0 \sin^{-2/3} 3\theta/2$ , 为等磁力形磁极。

本研究中使用楔形磁极头、楔角为  $78^\circ$ , 直流电流激磁时磁极间隙中心轴线  $y$  上各点的  $H_{\text{grad}H}$  的测定结果见图3。由图可见在楔形磁极中,  $H_{\text{grad}H}$  与磁极中高度  $y$  的变化曲线很陡, 适合于含有用矿物比重大、脉石矿物比重较小的物料分选。

线圈匝数依据线圈的总磁势确定, 即各部分磁势之和等于总磁势。本研究中线圈总匝数为 2527 匝。

磁流体静力跳汰分选机的最大特点是使用脉冲电源, 该电源由可控硅整流器和超低频信号发生器组成。既可输出直流电流又可输出脉冲电流。

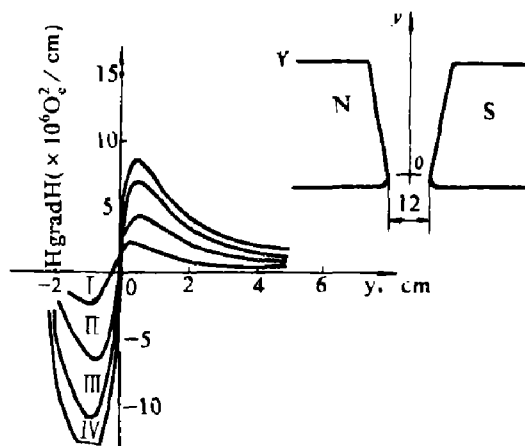


图3 楔形磁极中磁场磁力在  $y$  方向上的分布

I:  $I=5\text{A}$ ; II:  $I=10\text{A}$ ; III:  $I=15\text{A}$ ; IV:  $I=20\text{A}$

分选系统包括分选槽, 接矿槽和给矿器。分选槽内部设有可自由调节的分离隔板, 以便提取不同比重的物料层, 槽体下部设有轻、重产品排出口。

循环系统包括泵和管路, 该系统可控制分选速度和提高处理能力以及保持分选槽内的液面稳定。

## 3 MHSJS 的跳汰曲线

磁流体静力跳汰分选中, 磁浮力的周期性

变化推动了固体颗粒作垂直振动, 而磁浮力的大小可由视密度值来衡量, 因此, 定义视密度随时间变化曲线为磁流体静力跳汰分选机的跳汰曲线。

### 3.1 激磁电流特性

图4为用示波器测得的不同频率的激磁电流波形的测试结果。由脉冲序列分析法<sup>[1]</sup>可知该电流波形符合下列函数:

$$I(t) = k_2 - (k_2 - I_1)e^{-k_1 t} \quad 0 \leq t \leq T' \quad (5)$$

$$I(t) = I_2 e^{-(t-T')k_1} \quad T' \leq t \leq T \quad (6)$$

式中  $t$  为时间;  $I(t)$  为电流函数;  $I_1$  和  $I_2$  及  $T'$  和  $T$  为图4中所示的物理量, 在一定频率下这些物理量为常数;  $k_1$  和  $k_2$  为常数, 它们的值列于表1。

表1  $k_1$  和  $k_2$  的值

| 频率, Hz | 2.0   | 3.0   | 4.0    | 5.0    | 6.0    | 7.0    |
|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| $k_1$  | 2.01  | 2.402 | 2.145  | 2.614  | 2.273  | 2.649  |
| $k_2$  | 19.95 | 18.05 | 32.258 | 36.618 | 52.317 | 64.083 |

图4中各虚线为按(5)及(6)式绘制的  $I(t)-t$  关系曲线, 该曲线的变化周期为  $T$ 。实

测结果与理论计算值吻合良好。

### 3.2 磁场特性

磁流体静力跳汰分选机使用楔形磁极(图5)假设沿垂直于纸面方向的磁极为无限长, 则可忽略磁场的边缘效应及水平方向的磁场梯度, 并认为磁场磁力仅与  $z$  有关。在任意瞬时, 由不同介质分界面上的磁位相同, 可导出楔形磁极的磁场磁力与  $z$  的关系<sup>[2]</sup>:

$$H \text{grad} H = \left( \frac{V_o}{\pi - 2\theta_o} \right)^2 \left( \frac{1}{10.6 \times 10^{-2} - z} \right)^3 \quad (7)$$

$$V_o = NI / [2(1 + \mu_o s_2 l_1 / \mu_1 s_1 l_2)] \quad (8)$$

式中  $N$  为线圈匝数;  $\theta_o$  为楔角;  $\mu_1$  为 DT<sub>2</sub> 型工程纯铁的磁导率;  $l_1$  和  $s_1$  分别为磁轭中心线长度和横截面积;  $l_2$  和  $s_2$  分别为沿中心线的空气隙长度和横截面积。

因为 DT<sub>2</sub> 型工程纯铁的最大相对磁导率为  $\mu_m > 4000$ <sup>[3]</sup>, 由于分选过程中难于达到饱和磁场, 故假定  $\mu_1 = 2000\mu_o$ 。磁流体静力跳汰分选机的各参数为  $l_1 = 1.54$  m,  $s_1 = 0.24 \times 0.12$  m<sup>2</sup>,  $l_2 = 0.02$  m,  $N = 2527$ , 取  $s_2 = (1.22 \times 0.24) \times (1.22 \times 0.12)$  m<sup>2</sup>, 代入(8)式得<sup>[4]</sup>

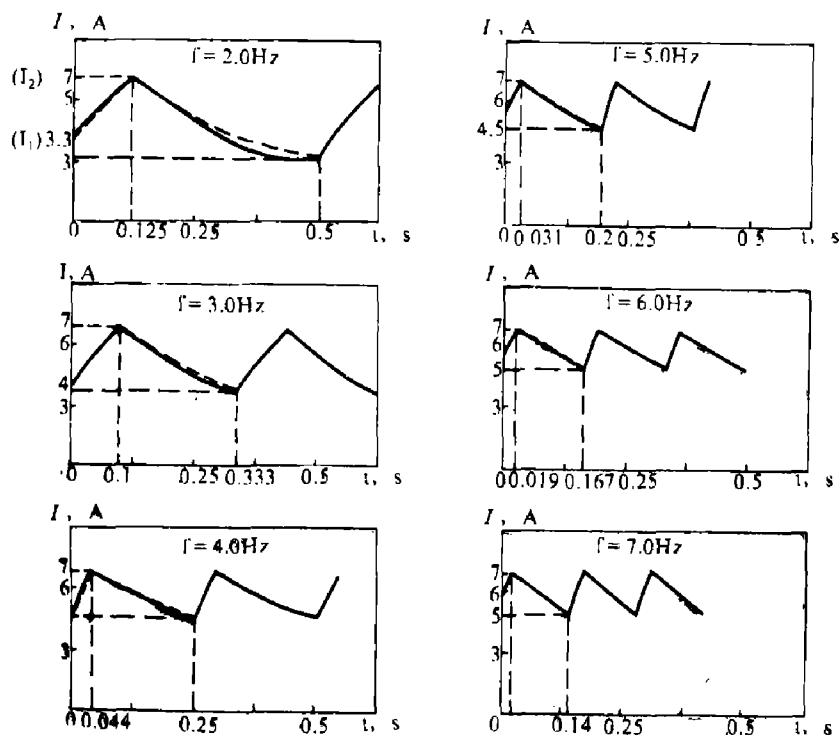


图4 电流波形图

—— 实测值; ---- 理论计算值

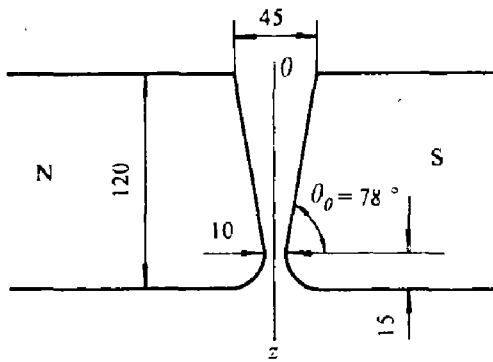


图5 楔形极参数计算

$$V_0 = 1195.02I \quad (9)$$

将(9)式和  $a_0 = 78 \times \frac{\pi}{180}$  代入(7)式得

$$H_{\text{grad}H} = \frac{8.15 \times 10^6}{(10.6 \times 10^{-2} - z)^3} I^2 \quad (10)$$

将(5)和(6)式代入(10)式得

$$H_{\text{grad}H} = 8.15 \times 10^6 [k_2 - (k_2 - I_1)e^{-k_1 t}]^2 / (10.6 \times 10^{-2} - z)^3 \quad 0 \leq t \leq T' \quad (11)$$

$$H_{\text{grad}H} = 8.15 \times 10^6 I_2^2 e^{-2(t-T')k_1} / (10.6 \times 10^{-2} - z)^3 \quad T' \leq t \leq T \quad (12)$$

方程(11)和(12)即是磁流体静力跳汰分选机的  $H_{\text{grad}H}-t$  函数关系式。当频率为 5.0 Hz, 最大激磁电流为 7 A,  $z$  分别为 0.03, 0.06, 0.09 m 时  $H_{\text{grad}H}-t$  曲线示于图 6 中。可见, 这是一周期函数, 并且随  $z$  增大,  $H_{\text{grad}H}$  的变化也增大。这是由于楔形磁极磁场呈上弱下强分布所致。

### 3.3 跳汰曲线

磁流体置于楔形磁极的磁场中时, 沿垂直方向受到的作用力有重力 ( $f_g = \rho_0 g$ ) 和磁力 ( $f_m = \mu_0 x_0 H_{\text{grad}H}$ ), 它们的合力为:

$$f = f_g + f_m = \rho_0 g + \mu_0 x_0 H_{\text{grad}H} \quad (13)$$

$$\text{则: } \rho_s = f/g = \rho_0 + H_{\text{grad}H} \mu_0 x_0 / g \quad (14)$$

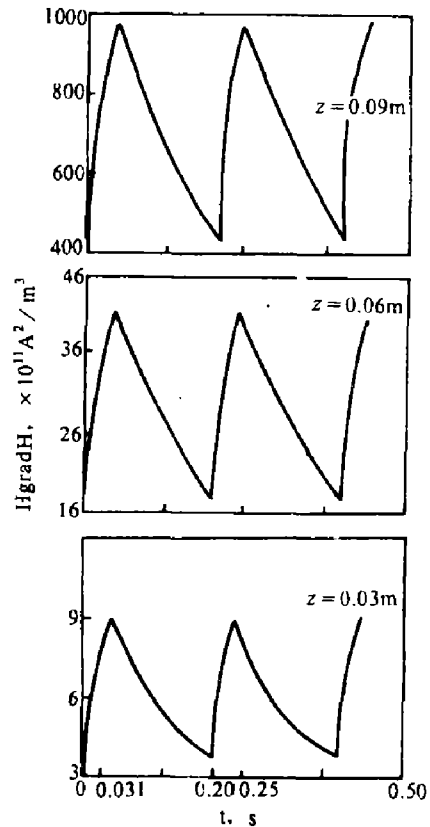
$\rho_s$  即定义为磁流体的视密度 (也称分选密度)。对一定的磁流体,  $\rho_s$  仅是  $H_{\text{grad}H}$  的函数。将(10)式代入(14)式得

$$\rho_s = \rho_0 + \frac{8.15 \times 10^6 \mu_0 x_0}{(10.6 \times 10^{-2} - z)^3} I^2 \quad (15)$$

将方程组(5)和(6)代入(15)式得

$$\rho_s = \rho_0 + \frac{8.15 \times 10^6 \mu_0 x_0}{(10.6 \times 10^{-2} - z)^3 g} [k_2 - (k_1 - I_1)e^{-k_1 t}]^2 \quad 0 \leq t \leq T' \quad (16)$$

$$\rho_s = \rho_0 + \frac{8.15 \times 10^6 \mu_0 x_0 I_2^2}{(10.6 \times 10^{-2} - z)^3 g} \times e^{-2(t-T')k_1} \quad T' \leq t \leq T \quad (17)$$

图6  $H_{\text{grad}H}-t$  曲线

方程组(16)和(17)即是磁流体静力跳汰分选机的跳汰曲线的函数表达式。其密度为  $\rho_0 = 866 \text{ kg/m}^3$ , 磁化系数为  $7.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$  的煤油基铁磁流体。频率 5.0 Hz、最大激磁电流为 7 A 时的跳汰曲线示于图 7, 可见磁流体静力跳汰分选机的跳汰曲线呈锯齿形, 与重介质跳汰学说的跳汰曲线相近<sup>[1]</sup>。由于磁浮力的存在, 整个分选空间内的磁流体都可看成是“重介质”, 并且其分选密度是和待分选物料的密度相适应的, 因此, 磁流体静力跳汰分选

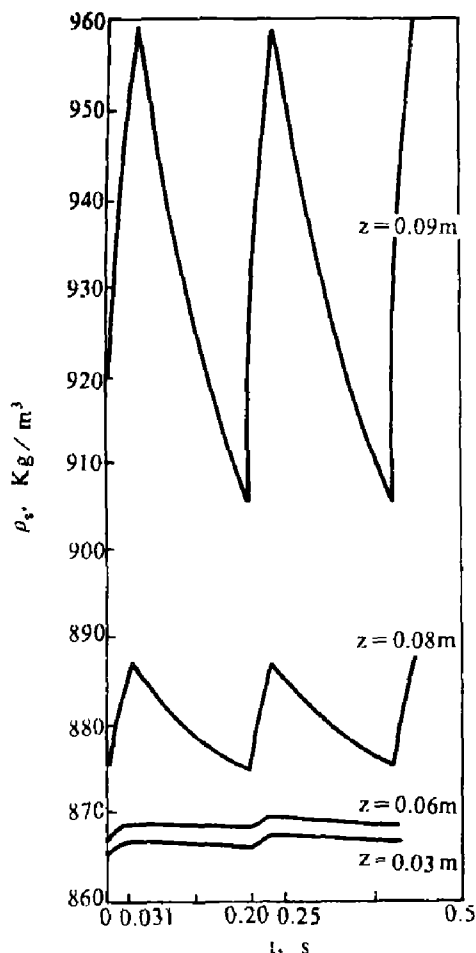


图7 跳汰曲线

机的跳汰曲线能很好的适应固体颗粒的沉降运动特性,从而强化物料的分选,尤其是细粒物料的分选。

此外,随着  $z$  的增加,  $\rho_s$  值及其变化幅度也增加。针对视密度的这种分布和变化特征,应考虑采取深部给料。当物料由底部给入时,由于受到剧烈变化的磁浮力的作用,将使物料颗粒之间达到完全松散的状态,而后各不同密度和磁化系数的颗粒将向与自身密度相近的区域运动并逐渐分层,结果可减少层间夹杂,降低分选粒度和提高分选精度。

## 4 MHSJS 法分选试验

### 4.1 方铅矿和石英混合物的分选试验

将粒度  $-2+0.028\text{ mm}$  的方铅矿和石英按 9:10 的比例混合后作待分选物料,用煤油基铁磁流体 ( $\rho_0 = 843\text{ kg/m}^3$ ) 做分选介质,最

大激磁电流为 7A,物料由上部经电振给料器进入分选机中。共做三次分选试验,随后,再进行比较,又做了三次磁流体静电分选,结果表明前者的平均效率比后者提高 7.59%。

### 4.2 不同粒级方铅矿和毒砂混合物料的试验

确定由四个粒级 ( $-0.18+0.154$ ,  $-0.154+0.11$ ,  $-0.11+0.09$  和  $-0.09+0.055$ ) 的方铅矿分别与四个粒级 ( $-0.45+0.28$ ,  $-0.28+0.18$ ,  $-0.18+0.11$ ,  $-0.11+0.055$ ) 的毒砂混合后作待分选物料,分选介质为密度等于  $1030\text{ kg/m}^3$  的水基铁磁流体,采取上部给料方式,分别进行了磁流体静力跳汰分选和磁流体静力分选,磁流体静力跳汰分选机的激磁电流为  $I_{\max} = 15\text{ A}$ ,频率为  $4.0\text{ Hz}$ 。前者比后者的平均选矿效率提高 11.16%。

### 4.3 讨论

磁流体静力跳汰分选结果明显地优于磁流体静力分选。在磁流体里非磁性颗粒在磁感应方向上存在相互吸引,而在与磁感应方向相垂直的方向上存在相互排斥<sup>[5]</sup>。在磁流体静力分选中,不同性质的物料颗粒受到重力和恒定磁浮力的作用而相互分层,难于破坏颗粒间的吸引作用,以致易造成夹杂。此外,铁磁流体的粘性较大,细小颗粒的惯性较小,使不同性质的微细颗粒相互粘附,难于充分分层。在磁流体静力跳汰分选中,由于周期性变化的磁浮力的作用,使处于磁流体里的固体颗粒产生振动,从而可破坏颗粒间的相互吸引作用,促进了颗粒间的松散,减少了层间夹杂;此外,振动还使相同比重不同大小的颗粒沉降速度趋于一致,即使分选过程更多地取决于颗粒密度和介质密度及分选密度。所以,磁流体静力跳汰分选处理微细物料和宽级别的物料,较一般磁流体分选更为有效。

## 5 结语

磁流体静力跳汰分选作为一种新的物料分选方法,克服了一般磁流体静力分选的缺点,

(下转 P32)

- In: Baker C *et al* (eds) Aluminium Lithium Alloys. III. The Institute of Metals, London: 1986, 310
- 19 Srivatsan T S, Bobeck G E, Sudarshan T S, Molian P A. In: Sanders Jr T H *et al* (eds) , Aluminium Lithium Alloys. V, Vol.3, Birmingham: Materials and Component Engineering Pub. Ltd. , 1989, 1237
- 20 Schumacher M. Seawater Corrosion Handbook. New Jersey: Noyes Data Corp. , 1979
- 21 Groover R E, Lennox. Jr. T J, Peterson M H. Mater. Prot. , November, 1964: 25
- 22 Drogowska M, Brossard L, Menard H. Corro. , 1987, 43: 549

(上接 P19)

能处理更细级别和宽级别的物料。此外, 其独特的振动作用, 使得跳汰曲线呈锯齿状, 较好地适应了物料颗粒的沉降运动特性, 可减少层间夹杂和提高分选效率。

### 参考文献

- 1 李瀚荪. 电路分析 (中). 北京: 高等教育出版社, 1983, 408
- 2 彭会清. 有色金属 (选矿部分), 1985, (5): 21
- 3 王常任. 磁电选矿. 北京: 冶金工业出版社, 1985, 68
- 4 王常任. 磁选设备的工艺设计基础. 南方冶金学院. 1985, 53
- 5 Fujita T *et al*. IN: Forth International conference on magnetic fluids Abstracts, 1986, 42—43