

往复式振动高梯度磁选机及其磁系设计^①

何平波^② 孙仲元^③ 陈 荃^③

(中南工业大学)

摘 要

针对硫化矿磁分离特点设计的一种新型高梯度磁选机,采用铠装鞍形线圈磁系,场强高达2T;分选时,分选槽在往复直线运动的同时伴随水平振动,;论文在简介了该磁选机的结构和工作原理之后着重阐述了磁系设计中采用的新方法——预估-反算有限元法。该法的特点是用有限元法求得铠装鞍形线圈磁系分选空间的场强分布,并由此确定该磁系的漏磁系数,可使设计者摆脱对经验的依赖,具有简便、准确、可靠等特点。

关键词: 高梯度磁选机, 往复振动, 有限元法, 鞍形线圈设计

硫化矿磁分离是近十年来在国内外兴起的一项新的选矿技术,但是迄今为止仍然停留于实验室试验阶段,其主要原因在于还没有一种适合的工业型或半工业型磁选设备。为了尽快研制成这类设备,本文将集中讨论新型半工业型高梯度磁选机的设计问题。

已有的高梯度磁选设备主要有周期式螺旋管、平环、立环和脉动高梯度磁选机四类,它们各具特点,但都不能适应硫化矿分离的需要。

鉴于多数可用磁选处理的硫化矿混合精矿中磁性矿物的含量都比较高,最佳机型应当是连续式高梯度磁选机,而不是周期式。考虑到要求的背景场强高,只宜采用鞍形线圈磁系。此外,为了提高分选效率必须设置振动装置,实现振动则需要不同于平环的往复直线运动的分选槽,这样,本研制确定的硫化矿磁分离装置,将是有振动装置的分选槽在鞍形磁系分选腔内作往复直线运动的高梯度磁选机。

这种往复式振动高梯度磁选机,既吸取了平环高梯度磁选机鞍形磁系的特点,又兼有脉

动高梯度磁选机分选效率高的优点,还解决了平环机分选效率偏低、脉动机背景场强不高的问题。此外,同平环机相比,由于用线状分选槽替代了环状分选槽,因而结构简单、重量轻、占地面积小、传动功率低。

目前,本研究的样机正在试验之中,结果将另文发表。

1 整机结构与工作原理

所设计的样机,定名为CQD-1型往复式振动高梯度磁选机,整机结构如图1所示,主要部件有铠装鞍形线圈、分选槽、振动装置、分选槽驱动机构、冲洗装置和接矿斗等。

分选槽内装有聚磁介质。分选时分选槽沿鞍形线圈分选通道作间歇式往复直线运动,即分选槽先在某一位置上于静止的状态下接矿;经一定时间后,再快速移动至下一个位置,如此循环往复。分选槽在振动装置作用下,沿水平方向振动,原矿由给矿斗给人,经上铁铠所开的圆形孔通道流至分选槽。非磁性矿粒穿过

①于1991年3月10日收到

②博士; ③教授

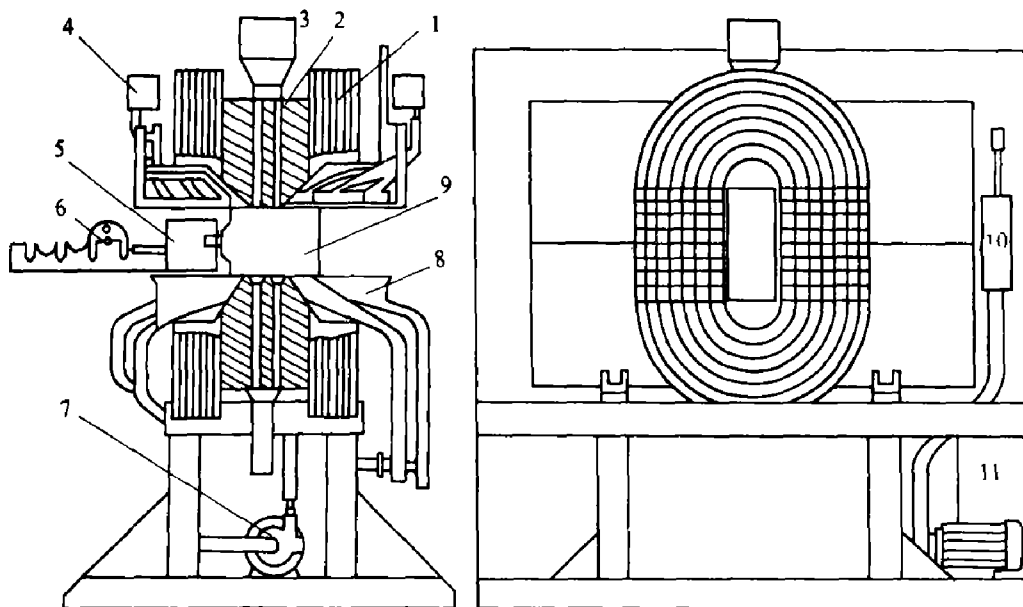


图1 CQD-1型整机结构图

1—鞍形线圈；2—铁铠；3—给矿斗；4—冲洗水控制阀部件；5—振动器；
6—传动部件；7—水泵；8—接矿槽；9—分选槽；10—集水器；11—软水器

分选槽，经下铁铠的圆孔通道进入尾矿斗。磁性矿粒则被吸附在磁介质上，随分选槽运动至中矿冲洗位置，在清洗水作用下，将其中的非磁性夹杂物清洗下来送入中矿斗后，再随分选槽运动至磁场外部的卸矿位置，由冲洗水卸进精矿斗。

2 磁系设计

由图1及前述工作原理可知，本机的关键部件及设计重点均在磁系部分，特别是鞍形线圈部分。在本文以前，高梯度磁选的磁系设计还没有突破传统的磁路设计范畴。在设计磁系的核心部分——鞍形线圈时，常常用下式确定其磁势，即所需安匝数

$$IN = \sigma H \delta / 0.4\pi \quad (1)$$

式中 H ——设计要求的场强；

δ ——分选空间高度； σ ——漏磁系数

理论分析可知， σ 不仅涉及到漏磁，也与铁铠消耗的磁势有关，因而是较广义的漏磁系数，有时也称为放大系数。漏磁系数 σ 的确定是很困难的，以前的设计者只能凭经验来选

择。然而， σ 是磁系设计中非常关键的一个参数， σ 过小，磁系达不到设计场强； σ 过大，则会导致制造成本和能耗的增加。

σ 之所以难确定，归根到底是由于在给定的磁势的条件下，难以计算铠装鞍形线圈的气隙场强，本文作者在场论研究的基础上，率先采用有限元数值方法计算铠装鞍形线圈分选空间的场强，并获得了满意的结果。

在满足工程设计精度要求的条件下，从分选空间中部取一横截面进行研究，并且忽略边缘效应的影响，把所研究的场域简化为二维平面场。又由于场强分布的对称性，可以只取中部横截面的一半进行研究。

图2表示所论平面闭合场域，ABCD为场域边界，AFED内为激磁线圈，BC为中部横截面的中心线，AB、CD及DA为气隙和激磁线圈与铁铠的分界线。由场论理论可知，场域内各点均应满足泊松方程

$$\nabla^2 A = j \quad (2)$$

式中 A ——矢量磁位；

j ——电流密度

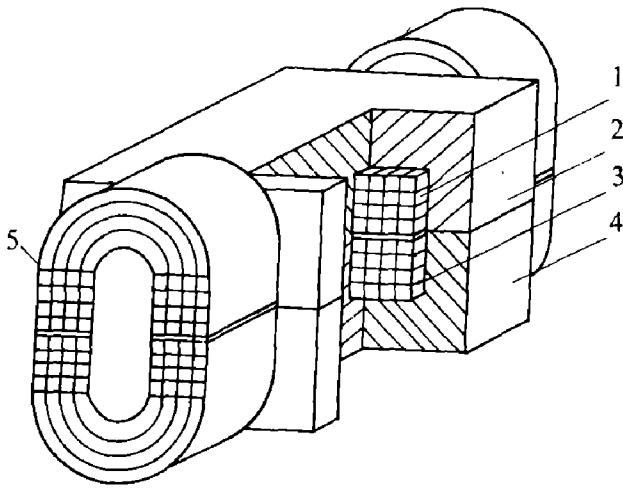


图2 场强及其边界

如前所述，边界 BC 为对称中心线，也是磁感强度 B 线的一部分，由电磁场理论推知，B 线即为等矢量磁位线，故在 BC 上有 $A = \text{常数}$ ；考虑到矢量磁位的相对性，不妨取 $A = 0$ 即 $A|_{BC} = 0$ 。边界 AB、CD 和 DA 为空气与铁磁性物——铁铠的交界线，故有

$$\frac{\partial A}{\partial n} \Big|_{AB} = \frac{\partial A}{\partial n} \Big|_{CD} = \frac{\partial A}{\partial n} \Big|_{DA} = 0.$$

综上所述，可得如下边值问题

$$\left. \begin{aligned} \Delta^2 A &= j \\ A|_{BC} &= 0 \\ \frac{\partial A}{\partial n} \Big|_{AB} &= \frac{\partial A}{\partial n} \Big|_{CD} = \frac{\partial A}{\partial n} \Big|_{DA} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 n ——与交界线正交方向的座标

上述边值问题可用有限元数值方法进行求解，基本原理和步骤是：首先，利用变分原理将边值问题转化为相应的变分问题，即所谓泛函极值问题；然后，利用剖分插值化变分问题为普通的多元函数极值问题。剖分插值是这样进行的：将所论场域剖分为若干个三角元，在每个三角元上以待求函数的节点值作为待求函数的插值，并以此分片插值函数近似替代待求函数，从而把泛函化为依赖于这些未知节点值的普通函数。通过剖分插值，泛函极值问题便简化为普通多元函数的极值问题，后者通常归

结为一组多元线性方程组，采用适当的代数方法，通过微机运算，便可求得各节点上矢量磁位的数值解。

对于本文所求解的边值问题，按上述原理和步骤，经过一系列推导、运算，得到如下形式的线性方程组

$$[K][A] = [P] \quad (4)$$

式中 $[K]$ —— M 阶方阵，通常称为总系数矩阵， M 为三角剖分所得节点的总数； $[A]$ —— M 阶列阵，待求的 M 个节点上的矢量磁位； $[P]$ —— M 阶列阵，与电流密度有关的已知数。

本文采用超松弛迭代法解 (4) 式的线性方程组，其一般迭代公式为

$$A_i^{(m+1)} = (1 - \alpha)A_i^{(m)} + \alpha \left[\left(- \sum_{j=1}^{i-1} K_{ij} A_j^{(m+1)} - \sum_{j=i+1}^M K_{ij} A_j^{(m)} \right) / K_{ii} \right] \quad (5)$$

式中 α ——加速收敛因子

在场域剖分细密和节点数高的情况下，由于内存单元数量的限制，一般中小型计算机不能用 (5) 式进行运算，即使采用等带宽、变带宽等稀疏矩阵处理方法，也是如此。

通过对总系数矩阵 $[K]$ 和其中非零元素的分析与推导，可得到如下的迭代公式

$$A_{ij}^{(m+1)} = (1 - \alpha)A_{ij}^{(m)} + \alpha \left[(K_1 A_{i-1,j}^{(m+1)} + K_2 A_{i,j-1}^{(m+1)} + K_3 A_{i+1,j}^{(m)} + K_4 A_{i,j+1}^{(m)}) / K_0 \right] \quad (6)$$

$$K_0 = \sum_{n=1}^6 \frac{1}{4\mu_n \Delta_n} (b_{i,j}^2 + c_{i,j}^2) \quad (7)$$

$$K_1 = \sum_{n=1}^2 \frac{1}{4\mu_n \Delta_n} (b_{i,j} b_{i-1,j} + c_{i,j} c_{i-1,j}) \quad (8)$$

$$K_2 = \sum_{n=1}^2 \frac{1}{4\mu_n \Delta_n} (b_{i,j} b_{i,j-1} + c_{i,j} c_{i,j-1}) \quad (9)$$

$$K_3 = \sum_{n=1}^2 \frac{1}{4\mu_n \Delta_n} (b_{i,j} b_{i+1,j} + c_{i,j} c_{i+1,j}) \quad (10)$$

$$K_4 = \sum_{n=1}^2 \frac{1}{4\mu_n \Delta_n} (b_{i,j} b_{i,j+1} + c_{i,j} c_{i,j+1}) \quad (11)$$

式中 i, j —各节点编号, 若某节点位于 i 行 j 列, 则记该节点的矢量磁位为 $A_{i,j}$; Δ_n, μ_n —相关联的 n 个三角中第 n 个三角元的面积和介质导磁率; b, c —与节点座标有关的参数, 设某三角元三节点记为 i, j, m , 则

$$b_i = y_j - y_m \quad b_j = y_m - y_i \quad b_m = y_i - y_j$$

$$c_i = x_m - x_j \quad c_j = x_i - x_m \quad c_m = x_j - x_i$$

x, y 为该节点的座标值。运用(7)~(11)式计算非零元素, 采用(6)式来解线性方程组, 由于几乎没有零元素参入运算, 因而极大地减少了计算机所需的内存, 同时也简化了形成总系数矩阵 $[K]$ 的计算过程, 解决了有限元法中高阶线性方程组难以在微型计算机上求解的问题。

求出矢量磁位 A 后, 根据 A 与场强 B 的关系, 即

$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y} \quad B_y = -\frac{\partial A}{\partial x}$$

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$$

可继续用电子计算机求得鞍形线圈中部横截面上各节点的场强 B 值。

在上述研究的基础上, 采用以下方法和步骤进行 CQD-1 型机的鞍形线圈设计, 并称之为预估-反算有限元法。

1 预估漏磁系数 σ

σ 的预估, 可根据以往的设计经验进行, 其值大约在 1.0~1.5 之间, 实际上, 可在此范围内任取一值。

2 用 (1) 式初步计算所需磁势

3 选定导线规格, 确定匝数和充填率

按大于或等于分选空间高度来确定线圈轴向匝数 N_z , 选定总匝数 N , 径向匝数由 $N_r = N / N_z$ 确定, 导线匝间应预留绝缘层厚度和绕制间隙, 由此计算出线圈导线的充填率 λ 。

4 按 $I = IN / N$ 计算激磁电流

根据导线规格, 按 $j = I / S_c$ 计算电流密度。在此, S_c 为导线有效截面积。

5 根据已知的电流密度 j , 线圈的几何

尺寸及充填率 λ , 用有限元法计算磁系分选空间场强分布和中点场强 H_0 。

6 按公式 $\sigma = 0.4\pi IN / (H_0\delta)$ 计算该系的实际漏磁系数

7 根据不同情况, 修正原设计参数或者重新计算

先将算出的实际漏磁系数 σ 代入(1)式, 算出实际所需磁势。若与初步计算磁势相符或相差甚微; 则说明预估的漏磁系数与实际情况吻合, 此时可直接进行余下的常规磁系设计工作。一般情况是实际所需磁势与初步设计磁势不相符, 或有一定差距, 此时需按下式修正原设计的电流密度

$$j = IN / NS_c$$

式中 IN —实际需要的磁势; N —初步设计的线圈总匝数。

如果修正后电流密度仍在合适的范围内, 则可按修正后的电流密度完成余下的常规磁系设计; 否则需重新计算。电流密度过大时, 可增加线圈匝数或加大导线规格, 再确定线圈几何尺寸, 按预估-反算法重新计算; 电流密度过小时, 可减少线圈匝数或减小导线规格, 重新计算。

8 按照上述方法和步骤, 确定本设计磁系鞍形线圈的几何参数和电气参数如下:

(1) 所需磁势

用预估-反算有限元法算得本设计磁系的漏磁系数 σ 为 1.15, 因此

$$IN = \sigma H_0 \delta / (0.4\pi)$$

$$= 1.15 \times 20\,000 \times 20 / 1.25$$

$$= 368\,000 \text{ 安匝}$$

(2) 导线规格

采用截面尺寸为 $10 \times 10 \times 2 \text{ mm}$ 的空心矩形铜管作导线, 其有效截面积为 74 mm^2 。

(3) 线圈匝数

鞍形线圈的轴向长度, 等于轴向每匝导线截面边长之和, 加上导线匝间绝缘层厚度及绕制间隙。线圈的轴向匝数应满足线圈轴向长度与分选空间高度及上下磁极厚度之和相等的原则。已知分选高度为 20 cm, 上下磁极厚度各

为 6.8 cm，绝缘层及绕制间隙预留 0.2 cm，导线截面边长为 1 cm。因此，轴向匝数 N_z 应为 28 匝。线圈总匝数 N 定为 784 匝。故径向匝数 $N_r = N / N_z = 28$ 匝。

(4) 激磁电流 I 和电流密度 j

$$I = IN / N = 368\ 000 / 784 = 469\text{ A}$$

$$j = IS_c = 469 / 74 = 6.34\text{ A/mm}^2$$

(5) 导线总长 L

根据线圈总匝数及其几何形状和绕制方式，算得导线总长 L 为 1 706 m。

(6) 导线总电阻 R

导线工作温度取 45℃，该温度下，导线电阻率 ρ 为 $0.020\ 005\ \Omega\ \text{mm}^2/\text{m}$

$$R = \rho L / S_c = 0.020\ 005 \times 1\ 706 / 74 = 0.461\ \Omega$$

(7) 激磁功率 W ，电压 V

$$W = I^2 R = 469^2 \times 0.461 = 101.4\ \text{kW}$$

$$V = W / I = 101.4 \times 10^3 / 469 = 216\ \text{V}$$

由以上步骤设计而成的铠装鞍形线圈磁系的立体图如图 3 所示。其中铁铠的设计计算及线圈冷却方案设计和导体工作温度校核均采用常规方法，本文不予赘述。

分选效率，结构简单，占地面地小，传动功率低等特点；

2 率先采用预估-反算有限元法进行铠装鞍形线圈磁系设计，使设计者摆脱了对经验的依赖，具有简便、准确、可靠等特点；

3 提出了计算大型稀疏矩阵的新迭代公式和总系数矩阵中元素的计算公式，极大地减少了计算所需内存，简化了运算过程，解决了用微机计算有限元法中高阶线性方程组的难题。

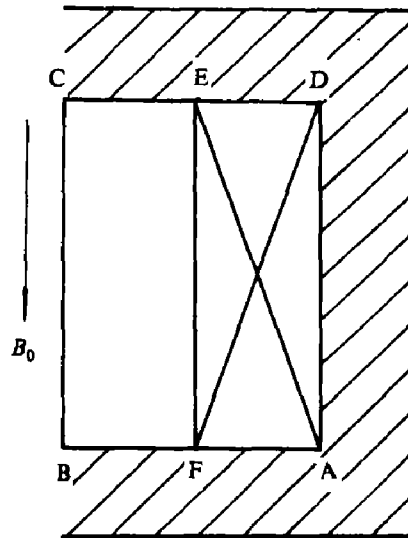


图 3 磁系立体图

1—上鞍形线圈；2—上铁铠；3—下鞍形线圈；4—下铁铠

3 结论

1 针对硫化矿混合精矿高梯度磁分离的需要设计的 CQD-1 型往复式振动高梯度磁选机，采用铠装鞍形线圈磁系，分选时分选槽在振动的同时作往复直线运动，具有高场强，高

参考文献

1 盛剑霓等. 电磁场数值分析, 北京: 科学出版社, 1984, 54