

# 涡流分选机磁系空间结构优化

华力, 张博, 蔡志远

(沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

**摘要:** 永磁辊式涡流分选机是提取火灾现场金属熔落物的重要装置,但是现有分选设备存在分选效率低,体积、质量大等问题,需要对其进行优化。对分选机核心构件磁辊的磁系空间进行了研究。首先,建立涡流分选机磁系空间结构模型,并说明了永磁辊式涡流分选机的工作原理,在磁辊给定时,给出了其磁辊磁块磁系空间的计算方程;然后,结合有限元方法分析了原磁系空间的磁感应强度分布规律,并比较不同外径、不同内径、不同铁环厚度下磁辊磁感应强度的变化规律;最后,提出一种对原涡流分选机的优化设计方案,减轻了分选机的质量,提高了分选机的效率。

**关键词:** 永磁辊式分选机; 涡流分选; 有限元; 磁系空间

中图分类号: TM 273 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)04-0077-04

doi: 10.12177/emca.2019.182

## Structural Optimization for the Magnetic System Space of Eddy Current Sorter

HUA Li, ZHANG Bo, CAI Zhiyuan

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** Permanent magnet roller eddy current sorter is an important device for extracting metal slag at the fire site, but the existing sorting equipment has problems such as low sorting efficiency and large volume and weight, and it needs to be optimized. The magnetic system space of the core components of the sorter is studied. The magnetic system space structure model of the sorter is established. The working principle of the sorter is explained, and the calculation equation of the magnetic system space of the magnetic block for a certain magnetic roller is given. Then, the law of the magnetic induction intensity distribution of the original magnetic system space is analyzed by using the finite element method, and the magnetic induction intensities of the magnetic roller under different outer diameters, different inner diameters, and different iron ring thicknesses are compared. An optimization design scheme for the original eddy current sorter is proposed, which reduces the weight and improves the efficiency of the sorter.

**Key words:** permanent magnet roller sorter; eddy current sorting; finite element; magnetic system space

## 0 引言

根据公安消防的统计数据表明,中国电气火灾事故频繁。2011年至2016年,中国共发生电气火灾52.4万起,占到了全国火灾总量的30%以

上。在24起重特大火灾中,电气火灾占到了70%以上<sup>[1]</sup>。这些已让人们了解查明电气火灾事故原因,预防类似事故发生刻不容缓。对火场金属熔落物成分的鉴别是查明事故成因和电气火灾综合治理的关键。

收稿日期: 2019-12-24; 收到修改稿日期: 2020-02-23

作者简介: 华力(1994—),男,硕士研究生,研究方向为智能电器。

张博(1987—),男,博士,副教授,研究方向为大型电力变压器电磁计算。

蔡志远(1962—),男,博士,教授,研究方向为智能电器。

目前,一般采用永磁辊式涡流分选机进行金属熔落物分选工作,而现有设备大多通过增大磁辊磁场强度和变化速度的方式提高分选效率,导致体积、质量的增加,限制了分选设备的适用范围。因此,需要在保证原有分选效率的情况下,对设备进行减重优化,使其适应火场环境。

国内外已有很多关于涡流分选技术的研究。文献[2-4]建立了涡流分选机多种解析模型,其中包括受力公式和运动轨迹方程等。文献[5-7]在计算模型基础上,对磁辊进行数值仿真,验证模型并给出优化方案。

由此可见,研究涡流分选理论及应用的主流方案是运用数值分析方法对磁辊的磁系空间进行模拟。本文的研究内容主要分为3个方面:首先,建立了涡流分选机的参数化模型并对其工作原理进行了阐述;然后,改变磁极个数、内外径等参数,讨论其改变对磁系空间电磁特性的影响;最后,给出优化设计指导意见。

## 1 涡流分选机参数化模型与工作原理

### 1.1 涡流分选机参数化模型

以1台SYFRI-RZFX03型火灾现场电气熔落物分选机为例,该涡流分选机的结构简图如图1所示。涡流分选机中的磁辊为分选功能核心部件。

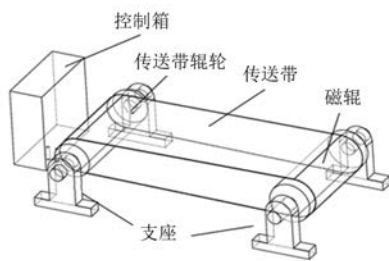


图1 涡流分选机的结构简图

磁辊采用N-S交替排列的八块磁阵列加铁心结构。磁块采用永磁铁NdFe30,密度为 $7.6\text{ g/cm}^3$ ,相邻磁块充磁方向依次为指向圆心和背离圆心;铁心材料采用纯铁,密度为 $7.86\text{ g/cm}^3$ ;内径30 mm,外径45 mm。详细参数如表1所示。

表1 磁辊原始设计参数

参数名称	参数值
内径/mm	30
外径/mm	45
磁极个数/个	8
磁块(钕铁硼永磁体)密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	7.6
铁心(纯铁)密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	7.86

涡流分选机的磁辊结构简图如图2所示。箭头的方向为N极指向S极。

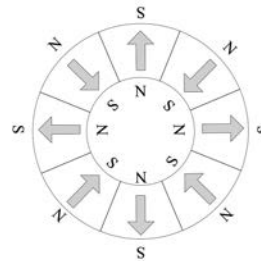


图2 涡流分选机的磁辊结构简图

### 1.2 涡流分选机工作原理

涡流分选机工作原理主要依据电磁感应定律和比奥-萨伐尔定律。由传送带辊轮带动传送带转动,使其上方的小熔珠能向收集盒方向水平移动。磁辊独立于传送带辊轮转动,由于不同金属材料之间的电气特性存在差异,磁辊上方会产生作用在不同种类的非铁磁性熔珠上的不同的电磁斥力。不同电磁斥力使不同材料金属熔珠的运动轨迹发生改变,从而实现了不同熔落物的分离。涡流分选机工作原理简图如图3所示。图3中,空白小球为熔珠1,阴影小球为熔珠2。

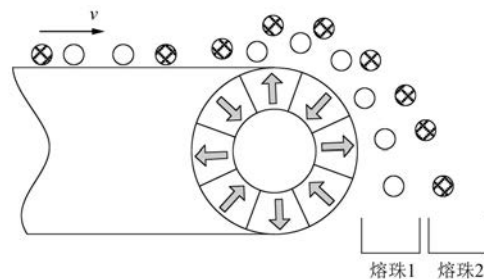


图3 涡流分选机工作原理简图

## 2 涡流分选机磁辊磁场计算理论方程

在应用麦克斯韦方程的时候,通常假设应用场景为线性、各向同性的均匀介质中。其安培定

律的微分形式为

$$\nabla \times B = \mu_0 J \quad (1)$$

式中:  $B$  为磁感应强度;  $\mu_0$  为真空磁导率;  $J$  为电流密度。

对于永磁材料这一特定情况来说, 全电流密度  $J$  代表的是单位空间中涡电流的电量。因为  $J$  是无散的, 所以  $J$  一定是某种量的旋度, 把这个量定义为磁化强度。  $J$  的计算式为

$$J = \nabla \times M \quad (2)$$

式中:  $M$  为每单位体积内所有粒子磁矩的矢量和。

将式(2)代入式(1)的安培定律可得:

$$\nabla \times (B/\mu_0 - M) = 0 \quad (3)$$

为了更直观地表示式(3)中的旋度, 设一辅助变量为  $H$ , 定义式为

$$H = B/\mu_0 - M \quad (4)$$

由于  $H$  是无旋矢量场, 可以推断一定存在某一标量, 称为磁标势, 定义式为

$$H = -\nabla\phi \quad (5)$$

代入式(4)得:

$$\nabla\phi = M - B/\mu_0 \quad (6)$$

结合高斯定律  $\nabla \cdot B = 0$  得到式(7), 即为泊松方程:

$$\nabla^2\phi = \nabla \cdot M \quad (7)$$

由于讨论的问题是极坐标对称的,  $\nabla^2\phi$  用极坐标表示为

$$\nabla^2\phi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial\phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2\phi}{\partial\phi^2} \quad (8)$$

用分离方法<sup>[8]</sup>可得:

$$\Phi = [Ar^{-\lambda} + Br^\lambda][C\cos(\lambda\phi) + D\sin(\lambda\phi)] \quad (9)$$

式中:  $A, B, C, D$  为任意系数;  $\lambda$  为分离常数。

用 Rem 等<sup>[9]</sup>的方法可得磁辊表面磁感应强度为

$$B_r = \sum_{n=0}^2 b_n \left( \frac{r'}{R} \right)^{-(2n+1)k-1} \sin(2n+1) \cdot k(\phi - \omega_m t) \quad (10)$$

$$B_\phi = - \sum_{n=0}^2 b_n \left( \frac{r'}{R} \right)^{-(2n+1)k-1} \cos(2n+1) \cdot k(\phi - \omega_m t) \quad (11)$$

$$B_z = 0 \quad (12)$$

### 3 优化设计变量

磁辊的磁系空间模型磁感应强度云图如图 4 所示。磁感应强度沿磁辊表面圆周呈正弦分布, 且距离磁辊越远, 磁感应强度越低。

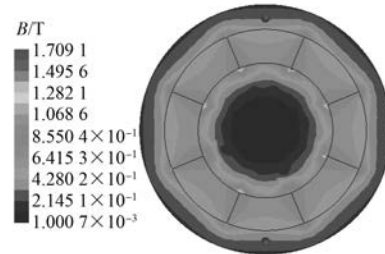


图 4 磁辊的磁系空间模型磁感应强度云图

原有优化的磁辊内径为 30 mm, 外径为 45 mm。现将其铁心结构去除, 计算距离磁辊正上方 5 mm 处上一点的磁感应强度的大小, 如图 5 所示。磁辊正上方 5 mm 处在图中显示为实心圆点, 计算结果显示该圆点磁感应强度约为 0.238 T (未去除时为 0.294 T)。

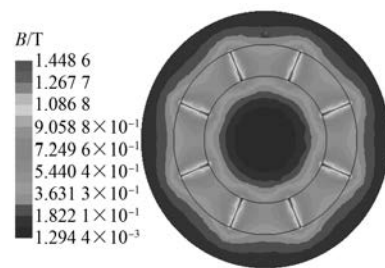


图 5 空心磁辊的磁感应强度图

为了方便对比磁辊外表面的磁感应强度大小, 将新型磁辊中心的铁心结构去除, 即当磁辊全部由磁块构成, 逐步增加磁块的外半径, 观察磁辊正上方的磁感应强度的变化规律, 取变化较小的一点作为磁辊的优化方案。这样既没有浪费材料, 又保证了分选效率, 达到了轻量化的要求。不同极数的磁感应强度, 如图 6 所示。可以看到, 随着外径的增加, 所求点处的磁感应强度在逐渐增加, 且增长幅度放缓; 外径 < 60 mm 磁感应强度变化较大, 外径 > 60 mm 磁感应强度变化较小, 即应该确定外径 60 mm 作为涡流分选设备磁辊最佳的外径设计参数。

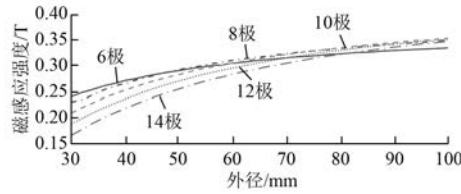


图6 不同极数磁辊正上方 5 mm 处磁感应强度

在外径确定为 60 mm 后,发现最开始挖空内径的时候不会对磁辊正上方的磁感应强度产生影响。对比不同极数的磁辊静态磁系空间发现 14 极且在内径为 50 mm 时磁辊正上方 5 mm 处的磁感应强度达到 0.238 T,如图 7 所示。

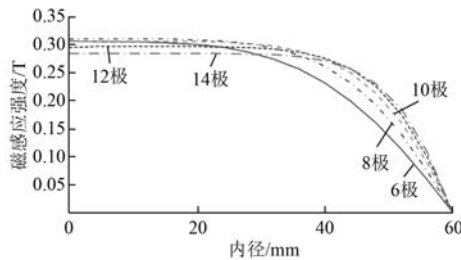


图7 挖空磁辊后正上方 5 mm 处磁感应强度

在该结构的基础上,需要在其上方安装铁环,用于导磁和固定旋转磁块,铁环的最佳厚度约为 2 mm,加上铁环时的磁感应强度约为 0.275 T。图 8 所示为空心圆柱体的内径从 5 mm 增加到 50 mm 时,即逐渐挖空铁心内部 5~50 mm 时,磁辊正上方 5 mm 处上一点磁感应强度变化曲线图。可以看出,掏空铁心时的变化量较小。

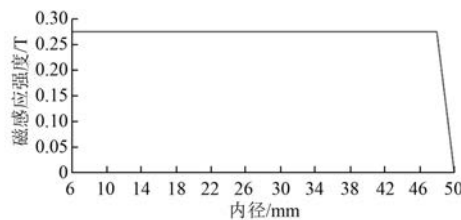


图8 内径 5~50 mm 磁辊正上方 5 mm 处磁感应强度变化曲线(14 极)

高凤芬<sup>[10]</sup>指出排斥力的大小对分选效果起着决定性的作用,排斥力越大,分选效果越好。

因此,排斥力的大小不仅与涡流分选机转子的磁场强度有关,还与磁块交变频率有关。即磁场的磁场强度越高,电磁斥力越大;磁块的转速越

快,电磁斥力越大。

由文献[11]知,涡流斥力的计算式为

$$F_c \propto \frac{H^2 V f \sigma}{s} \quad (13)$$

式中: $F_c$  为涡流斥力; $H$  为磁场强度; $V$  为废料体积; $f$  为磁辊磁场交变频率, $f = \frac{n p}{2}$ ;  $\sigma$  为材料电导率; $s$  为废料颗粒的形状因子; $n$  为磁辊转速; $p$  为磁极数。

可得:

$$\frac{F_{斥1}}{F_{斥2}} = \frac{H_1^2}{H_2^2} \times \frac{p_1}{p_2} \quad (14)$$

假设工作在线性区,即磁导率为常数, $B$  与  $H$  成正比,则:

$$\frac{F_{斥1}}{F_{斥2}} = \frac{B_1^2}{B_2^2} \cdot \frac{p_1}{p_2} = \frac{0.294^2}{0.275^2} \times \frac{8}{14} = 0.653。$$

磁感应强度略有下降,但转速大为降低,且涡流力增加约 2 倍。磁辊的质量式为

$$m = \rho_1 \pi (R^2 - r_1^2) l + \rho_2 \pi (r_1^2 - r_2^2) l \quad (15)$$

式中: $m$  为磁辊的质量; $\rho_1$  为磁块的密度(7.6 g/cm<sup>3</sup>); $\rho_2$  为铁心的密度(7.86 g/cm<sup>3</sup>); $R$  为磁辊的外径; $r_1$  为磁辊的内径; $l$  为磁辊的长度(180 mm)。

原有涡流分选机设备的实心磁辊的质量为

$$m_1 = \pi \times 18 \times [7.6 \times (4.5^2 - 3^2) + 7.86 \times (3^2 - 2.5^2)] = 6\,057.21 \text{ g}。$$

现有涡流分选机设备的实心磁辊的质量为

$$m_2 = \pi \times 18 \times [7.6 \times (6^2 - 5^2) + 7.86 \times (5^2 - 4.8^2)] = 5\,598.6 \text{ g}。$$

由此可见,磁辊优化后的质量减轻了 458.61 g,占原来质量的 7.6%,实现了轻量化的要求。

## 4 结 语

本文针对涡流分选机的磁系空间采用公式计算的方法对原理进行了分析,并用数值仿真的方法进行了优化。仿真优化结果表明,在保证原有磁感应强度的情况下,电磁斥力增加约为原来的 2 倍,减轻的质量为 458.61 g,为原来质量的 7.6%,提高了分选能力,降低了磁辊结构的质量,实现了轻量化的要求。

(下转第 96 页)