

引用格式:彭欣苓. 旋转磁场干式预选技术研究与应用[J]. 有色设备, 2024, 38(4): 74-78.

PENG Xinling. Research and industrial application on dry preselection technology of rotating magnetic field[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(4): 74-78.

旋转磁场干式预选技术研究与应用

彭欣苓^{1,2}

(1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160; 2. 北矿机电科技有限责任公司, 北京 100160)

[摘要] 国内磁铁矿品位整体偏低,且随着开采深入贫化率呈现上升趋势,显著增加了选矿成本,制约了铁矿企业的持续发展,因此,“多碎少磨,能抛早抛”仍然是铁矿山选矿工艺设计及改造的重要指导原则。当前铁矿破碎粒级趋细,(超)细碎已成为主流破碎工艺,细粉含量增加,粗粒矿石与细粉之间易产生黏附、夹杂、团聚现象,常规干式预选设备分选效果不佳。针对以上问题,本文介绍了一种旋转磁场干选技术,其通过筒体与磁系的快速异步旋转,实现了高频次磁翻转,可有效打散团聚体,减少黏附、夹杂问题,显著提升分选指标,在铁矿(超)细破碎预选工艺段具有广阔应用前景。

[关键词] 铁矿; (超)细碎; 干式预选; 旋转磁场; 磁翻转; 选矿; 干选机

[中图分类号] TD924 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2024)04-0074-05

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.04.011

我国铁矿资源总体储量大,在世界上排名第5位^[1],但总体铁矿资源禀性相对较差,富矿极少,以贫矿居多。据统计贫铁矿占比约97.5%,平均品位33%^[2],且随着铁矿山开采不断深入,铁矿石贫化率呈现不断攀升态势,因此,国内铁矿石要达到入炉精矿要求,需要经过破磨选别处理。近20年来,国家对铁矿资源开发支持力度日渐增强,铁矿开发规模不断增大,一方面品位相对较高的铁矿开采殆尽,铁矿开采边界不断下移,品位较低的贫磁铁矿进入开发范围;另一方面,高效细碎装备发展促进了选矿工艺变革,特别是超细碎高压辊磨装备的应用,使破碎比增大,矿石破碎粒度也大为减小。目前,高压辊磨机破碎后的矿石,粒度降低至-6 mm,甚至达到-3 mm,其特点是排矿粒度小且30%~60%为粉状物料,这种物料在分选过程中黏附、夹杂、团聚现象非常严重,常规的干式预选设备对这种细粒矿物分离不清,且易造成粉状物料在磁选过程中夹杂跑尾,导致磁性铁流失^[3-5]。矿石性质及破

碎工艺条件的双重变化,造成了常规磁滚筒和箱式干选机已经不能满足新工艺和细粒度的选别要求,需要开发新型的干式预选装备来满足要求。针对行业发展存在的新需求,北矿机电科技有限责任公司近年来研制了一种旋转磁场干选机,取得了较为优异的分选效果。

1 旋转磁场分选原理及其特点

当物料经皮带输送至预选区域时,在磁场作用下粗、细磁性颗粒瞬间被磁化形成磁团聚体,部分非磁性物被裹杂其中。在磁场选别区,磁性较弱的脉石、连生体因受重力和离心力复合作用,在磁力翻滚作用下被不断外移至物料外层,由于运动惯性脱离筒体进入尾矿;磁性团聚体在磁场力作用下吸附于磁筒表面,在磁系和筒体异步高速旋转作用下,实现了快速多次磁翻转,磁性团聚体不断团聚、打散、团聚,实现磁性矿的不断富集,被磁场力吸引至皮带内层最终进入精矿,进而完成分选过程。其分选原理如图1所示。

旋转磁场干选机具有以下特点^[6-7]。

1) 采用360°高磁力磁系结构,使磁系与筒体快速异步转动,大幅提升矿石有效磁翻转次数,可实现磁性矿与非磁性矿的充分分离,分选精度高。

[收稿日期] 2024-06-25

[第一作者] 彭欣苓(1987—),男,山东临沂人,高级工程师,硕士,主要研究方向为磁选设备研发及工程转化应用。

[基金项目] “十四五”国家重点研发计划资助(2021YFC2902400)。

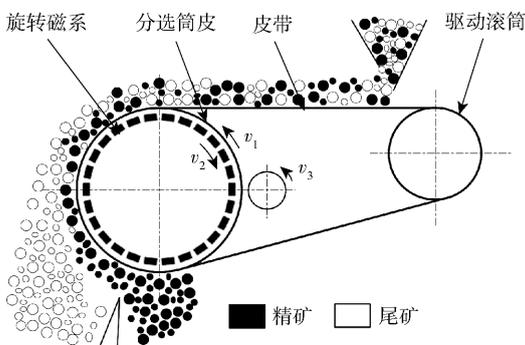


图1 旋磁磁场干选机分选原理

Fig.1 Diagram of separation principle of rotary magnetic field dry magnetic separator

2) 采用高强度复合非金属筒体,有效规避采用金属筒体产生的涡流效应,显著降低装机功率,提高设备可靠性。

3) 采用自感应筒体清扫装置,实现对吸附筒体矿石颗粒自清理功能,提升设备可靠性。

4) 配置皮带,实现给料缓冲、辅助卸料,同时实现均匀布料,为分选提供稳定给料条件。

5) 可实现多参数调节,工况适应性强,保证分选指标要求。

2 旋转磁场中矿物颗粒受力分析

矿粒被吸附于分选筒的皮带表面,并随皮带一起做匀速圆周运动,其受力分析如图2所示。假设分选磁筒半径为 r ,周向转速为 ω ,颗粒在分选磁筒上的位置到分选磁筒中心点的连线与笛卡尔坐标系的 Y 轴正半轴之间的夹角为 α ,不考虑颗粒之间的摩擦力和相互挤压作用,则磁性矿粒所受力主要为:磁场对颗粒的磁力 F_m 、与磁力方向相反的弹力 N 、颗粒自身重力 G 、皮带对颗粒的摩擦力 F_f ^[8]。

颗粒自身重力在分选滚筒沿着切线上的分力会促使矿石磁性颗粒在皮带表面上产生滑动趋势。为避免矿石颗粒产生滑动行为,必须满足的条件为 $F_f \geq G \sin \alpha$,即式(1)。

$$(F_m + G \cos \alpha - r\omega^2) \tan \varphi \geq G \sin \alpha \quad (1)$$

由此式整理可得式(2)。

$$F_m \geq r\omega^2 - G \cos \alpha + G \sin \alpha / \tan \varphi = r\omega^2 + G \sin(\alpha - \varphi) / \sin \varphi \quad (2)$$

式中: $\tan \varphi$ 为皮带与矿石颗粒间的摩擦系数; φ 为皮

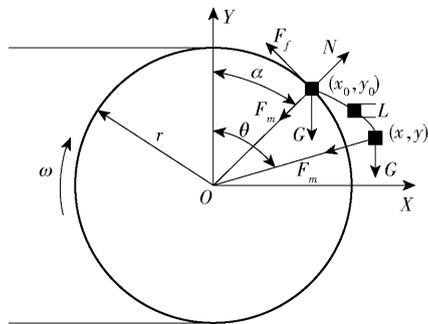


图2 磁性颗粒受力分析示意

Fig.2 Force analysis of magnetic particles

带与矿石颗粒间的静摩擦角。

式(2)左右两边取等号,令 $dF_m/d\alpha = 0$ 时, F_m 有最小值,因此对式(2)求导得式(3)。

$$\frac{dF_m}{d\alpha} = G \{ d[\sin(\alpha - \varphi) / \sin \varphi] / d\alpha \} = G \cos(\alpha - \varphi) / \sin \varphi \quad (3)$$

令 $dF_m/d\alpha = 0$, 由于 $G/\sin \alpha \neq 0$, 必然有 $\cos(\alpha - \varphi) = 0$, 即 $\alpha - \varphi = \pi/2$ 。当 $\alpha = \varphi + \pi/2$ 时, 颗粒所需的磁力最大, 此时式(4)成立。

$$F_m \geq r\omega^2 + G / \sin \varphi \quad (4)$$

磁铁矿的安息角约为 $\pi/6$, 所以式(5)成立。

$$F_m \geq r\omega^2 + 2G \quad (5)$$

当颗粒所在的位置角 α 约为 120° 时所需的磁力最大。

在不均匀磁场中,作用在单位质量磁性颗粒上的磁力计算见式(6)。

$$F_m = \mu_0 \chi_0 H \text{grad} H \quad (6)$$

式中: μ_0 为真空磁导率,取值为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb}/(\text{A} \cdot \text{m})$; χ_0 为颗粒的物体比磁化系数,磁铁矿比磁化系数单位为 m^3/kg ; $H \text{grad} H$ 为比磁场力, A^2/m^3 。

将式(5)代入式(4)中,即可得磁筒可以分选的矿粒和分选条件,即式(7)。

$$\mu_0 \chi_0 H \text{grad} H \geq r\omega^2 + 2G \quad (7)$$

将式(6)整理设备运行的极限转速计算式见式(8)。

$$\omega \leq \left(\frac{\mu_0 \chi_0 H \text{grad} H - 2G}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

磁性颗粒在随皮带运动过程中,自身也进行着自旋转运动,在此过程中磁性矿粒由磁力扭矩 T_m 产生驱动力,并进一步抵抗所受重力 G 和磁力 F_m 而做功产生自身翻转,如图3所示。

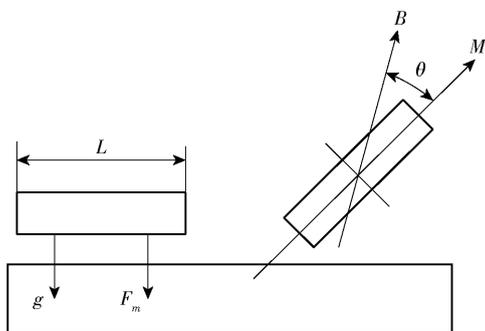


图 3 磁性颗粒自翻转模型

Fig. 3 Magnetic particle turnover model

其中,磁力扭矩计算见式(9)。

$$T_m = MB\sin\omega t\sin\theta \quad (9)$$

式中: T_m 为颗粒磁力扭矩, $N \cdot m$; M 为物体磁矩, $A \cdot m$; B 为磁感应强度, G_s 。

磁性颗粒或磁链磁翻转的重心线速度计算见式(10)。

$$v' = \pi Lf \quad (10)$$

式中: v' 为颗粒重心线速度, m/s ; f 为颗粒自翻转频率, Hz 。

3 旋转磁场中磁性颗粒翻转分析

旋转磁场干选机中磁性矿粒(或者磁团聚体)一方面随着磁筒做旋转运动,另一方面由于受到旋转磁场磁翻转作用自身做翻转运动,如图4所示。

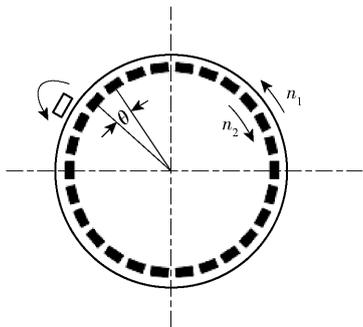


图 4 旋转磁场中磁性颗粒翻转轨迹示意

Fig. 4 Rotation trajectory of magnetic particles in a rotating magnetic field

因此,磁性矿粒的运动是上述两个运动的合运动,即式(11)。

$$v = V - v' \quad (11)$$

式中: V 为筒体转动速度, m/s ; v' 为磁性矿粒自身翻转速度, m/s 。

单个磁性矿粒(或者磁团聚体)的磁翻转速度 v' 可由式(12)计算。

$$v' = \frac{N}{2} \pi d \frac{n_1 + n_2}{60} \quad (12)$$

式中: d 为矿粒(团聚体)直径, m ; n_1 和 n_2 分别为圆筒和磁系的转速, r/s ,当磁系和筒体转向相同时, n_2 取正值。

由以上分析可知,旋转磁场中磁性颗粒的翻转运动是一个较为复杂的复合运动,其受到分选筒转速、转向,磁系转速、转向及磁系结构等多个因素影响。假定磁性颗粒在2个主磁极之间翻转次数为1次,故可得单位时间内磁性矿粒的翻转次数2,计算见式(13)。

$$Z = P(n_1 + n_2) \quad (13)$$

式中: P 为磁系圆周方向主磁极的个数,旋转磁场磁选机一般为20~40;当 n_2 与 n_1 转向相反时 n_2 为正值。

磁性颗粒随皮带在圆筒的正上方进入磁场作用的分选区,大致在圆筒的正下方由于皮带的分离作用而脱离圆筒磁力作用区域。在整个过程中磁性矿粒转过的角度为 π ,在不考虑矿粒打滑的情况下,磁性矿粒完成一个完整的分选过程所需时间 t 由式(14)计算得出。

$$t = \pi / (2\pi n_1) = 1 / (2n_1) \quad (14)$$

由式(13)、(14)可知磁性矿粒完成一个完整的分选过程,总计完成的翻转次数 N 计算见式(15)。

$$N = Zt = P(1 + n_2/n_1) / 2 \quad (15)$$

通过式(15)不难发现筒体转速 n_1 与翻转次数 N 呈负相关,其值越小,磁翻次数越多。但是对于具体预选工艺流程来讲,当处理量一定时,筒体转速 n_1 与料层厚度呈正相关,当其值越小,矿物料层越厚;当料层厚度一定,其值越大,则处理量越大。因此在选择筒体转速 n_1 时,要结合工艺条件,考虑处理量与分选料层厚度匹配关系。

铁矿石经细碎或超细碎破碎后,粉矿占比较大,进入磁场后易形成磁团聚体,其磁团聚体形成过程中包裹部分微细粒脉石及贫连生体。在旋转磁场中磁团聚体受到剧烈持续磁翻转作用,不断团聚、打散、团聚,其在运动中相互排斥、吸引(图5)、碰撞、冲击,在破坏中又重新组合,不断抛弃裹杂的脉石及贫连生体,逐步提高自身纯度。

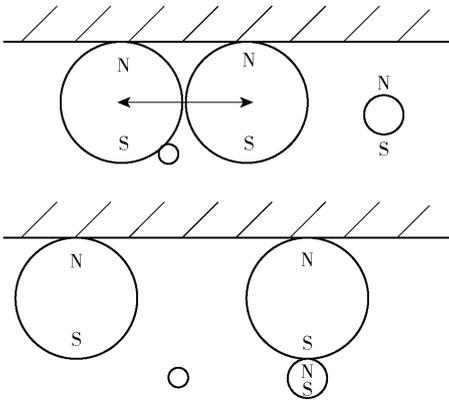


图5 磁团聚体运动示意

Fig.5 Diagram of the motion of magnetic agglomerates

4 工业应用情况

4.1 应用案例 1

河北某铁矿选厂细碎后粒度为 -12 mm , 其中粉矿占比约 30%, 含水量约 0.5%。现场采用永磁滚筒进行预选抛废, 但无法满足抛废率大于 15%、尾矿 MFe 品位小于 2.5% 的综合指标要求。其采用同规格(筒径 $\phi 800 \times$ 筒长 1 200 mm)旋转磁场干选机与永磁滚筒同等条件的分选指标对比见表 1。

由表 1 试验数据可知, 旋转磁场干选机在处理量、原矿品位相当条件下, 其抛废率指标为 17.81%、

表 1 案例 1 分选指标对比

Table 1 Comparison of sorting indicators in case 1

设备	原矿	精矿	尾矿	精矿品	抛废
	品位 (TFe)/ %	品位 (TFe)/ %	品位 (MFe)/ %	位提升 幅度/ %	
永磁滚筒	24.93	27.64	2.56	2.71	13.56
旋转磁场干选机	24.83	28.65	2.30	3.82	17.81

尾矿 MFe 品位为 2.30%, 达到了现场指标要求。与常规干选机指标相比, 其抛废产率提升了 4.25 个百分点, 尾矿 MFe 品位降低了 0.26 个百分点, 精矿 TFe 品位提升幅度提高了 1.11 个百分点, 表明旋磁磁场干选机对细碎后粉矿占比多的工况条件分选指标具有显著的优势。

4.2 应用案例 2

安徽某铁矿选厂原细碎后粒度 -12 mm , 随着现场生产产能提升, 工艺变革, 粒度放粗至 -22 mm , 处理量 80 ~ 120 t/h, 抛废率要求达到 20% 以上, 尾矿磁性铁降低至 0.4% 以下。北矿机电科技有限责任公司提供 XCTG0814 新型旋转磁场干选机, 与现场同规格原旋转磁场干选机开展同条件 72 h 连续对比试验。分选指标如表 2 所示。

表 2 案例 2 分选指标对比

Table 2 Comparison of sorting indicators in case 2

设备	原矿品位/%	精矿品位/%	尾矿品位/%		精矿品位提升	抛废率/%
	TFe	TFe	TFe	MFe	幅度/%	
原旋转磁场干选机	21.33	23.82	10.21	0.45	2.49	18.54
新旋转磁场干选机	21.34	25.69	8.66	0.21	4.35	25.53

由表 2 数据可知, 新型旋转磁场干选机在处理量、原矿品位相当条件下, 其精矿品位提升至 4.35%, 尾矿磁性铁降低至 0.21%, 抛废率达到 25.53%, 均优于原旋转磁场干选机指标, 满足了现场新的指标要求。另外, 新型旋转磁场干选机采用了新的磁系结构、新型非金属筒体与高分子耐磨层复合筒体、新自感应卸料辊等新技术, 整机机械可靠性显著提升。

通过应用对比, 进一步表明了新型旋磁磁场干选机不仅分选性能具有显著优势, 而且机械性能更可靠, 因此, 在细碎或者超细碎铁矿干式预选领域具

有广阔应用前景。

5 结论

1) 国内铁矿开采品位呈下降趋势, 破碎工艺中的细碎及超细碎应用已逐渐成为铁矿生产主流破碎工艺, 而常规干选机难以满足新工艺变革指标要求。而旋转磁场干选技术采用磁系与筒体异步转动的独特分选方式, 通过高速磁翻转实现粉矿磁团聚体的有效打散, 分选精度高, 分选指标优异, 为细碎及超细碎干式预选提供了新的设备方案。

2) 旋转磁场干式分选过程中磁性颗粒的翻转

次数与磁极数 P 和磁系转速 n_2 呈正相关,与筒体转速 n_1 呈负相关。分选参数的确定要结合现场工艺条件与分选指标要求综合考虑。

3)应用指标对比表明,旋转磁场干选机在(超)细碎铁矿预选作业中,分选指标显著优于常规干选机,在抛废率和精矿 TFe 品位指标提升的同时,尾矿 MFe 品位也能得到有效控制。因此,旋转磁场干选机是一种高精度分选干式预选设备,在(超)细碎铁矿工艺段具有广阔的市场应用前景。

[参考文献]

[1] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告 2020 [M]. 北京:地质出版社, 2020: 1-6.
[2] 陈雯, 余永富. 铁矿石选矿近十年来技术进步[C]//中国冶金矿山科技大会论文集. 北京: 2013.

[3] 赵海亮,冉红想,魏红港,等. 新型旋转磁场干选机在细粒干选领域的研究及应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2017(S1): 81-84.
[4] 李刚. 水厂铁矿细碎产品干式预选设备升级研究[J]. 金属矿山, 2019(7): 172-176.
[5] 刘剑军,卢东方,王毓华,等. 风力作用下的干式磁选机对铁矿预选的影响[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(10): 2482-2491.
[6] 彭欣苓,史佩伟,尚红亮,等. 干式预选设备在铁矿中的应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(3): 89-94.
[7] 赵海亮,冉红想,王晓明,等. 一种动态磁场干选机的研制[J]. 有色金属(选矿部分), 2017(5): 64-68.
[8] 袁致涛,高太,郭小飞,等. 永磁强磁预选设备的研制与应用[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(8): 1187-1191.

Research and industrial application on dry preselection technology of rotating magnetic field

PENG Xinling^{1,2}

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;

2. BGRIMM Machinery & Automation Technology Co., Ltd., Beijing 100160, China)

Abstract: The domestic iron ore grade is on the low side as a whole, and along with the mining depth dilution rate presents the upward trend, has increased the mineral processing cost obviously, has restricted the iron ore enterprise's sustainable development. Therefore, "More crushing, less grinding, can cast early cast" is still an important guiding principle for the design and transformation of beneficiation process in iron mines. At present, the crushing size of iron ore tends to be fine, (ultra) fine crushing has become the main crushing technology, the content of fine powder increases, the adhesion, inclusion and agglomeration between coarse ore and fine powder are easy to occur, the effect of conventional dry pre-selection equipment is not good. In order to solve the above problems, this paper introduces a kind of rotary magnetic field dry cleaning technology, which can realize high frequency magnetic flip by the fast asynchronous rotation of the cylinder and the magnetic system, and can effectively break up the agglomerate, and reduce the occurrence of adhesion and inclusion, the test results show that it can improve the separation index remarkably, and has a broad application prospect in the pre-concentration section of iron ore (ultra-fine) crushing.

Key words: iron ore; (ultra) fine; dry preselection; rotating magnetic field; magnetic flip; mineral processing; dry separator

