基于 Ansys 的 ZH 型组合式强磁选机磁场特性三维仿真研究①

荆茂晨[1,2]，安登极[1]，刘任[1]，张雁生[2]
（1.长沙矿冶研究院有限责任公司，湖南 长沙 410012；2.中南大学，湖南 长沙 410083）

摘　要：基于 Ansys Maxwell 建立了 ZH 型组合式强磁选机的三维有限元仿真模型，系统分析齿板、椭圆与圆棒 3 种介质的磁场分布特征以及分选通道中磁场强度变化规律，并结合离散元方法开展了颗粒分选模拟试验。结果表明：齿板介质在齿尖区域形成显著磁场聚焦效应，最大场强达 2.08 T，周期性强梯度波动有利于高效捕获微细粒钛铁矿；椭圆介质磁场均匀性较好，适合粗粒矿物的稳定分选；圆棒介质磁场分布宽泛，适用于宽粒级混合物料的分选。仿真结果与试验实测值高度吻合，验证了模型的可靠性。颗粒模拟进一步揭示，齿板介质能够通过周期性梯度反转破坏颗粒团聚，抑制非磁性矿物夹带，最终实现钛铁矿的高效富集；齿板介质在微细粒钛铁矿分选中具有显著优势，是 ZH 型组合式强磁选机的优选介质。

关键词：高梯度磁选；ZH 型组合式强磁选机；磁场分布；磁介质；齿板介质；椭圆介质；圆棒介质；微细粒钛铁矿；有限元仿真
中图分类号：TD924.5　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.015
文章编号：0253-6099(2026)01-0091-06

3D Simulation Study on Magnetic Field Characteristics of ZH High-Intensity Magnetic Separator Based on Ansys

JING Maochen[1,2], AN Dengji[1], LIU Ren[1], ZHANG Yansheng[2]
(1. *Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd.*, *Changsha* 410012, *Hunan*, *China*; 2. *School of Minerals Processing and Bioengineering*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *Hunan*, *China*)

Abstract: A 3D finite element simulation model of a ZH high-intensity magnetic separator (HIMS) was established based on Ansys Maxwell. The magnetic field distribution characteristics and the variation law of magnetic field intensity in the separation channel of the separator with three kinds of medium (serrated plate, elliptical rod and cylindrical rod) were systematically analyzed. A simulation experiment on separating particles was conducted by using the discrete element method. The results show that the serrated plate medium produces an obviously focused magnetic field effect at the serrated part, with the maximum field intensity reaching 2.08 T. The periodic strong gradient fluctuation is beneficial to the efficient capture of fine ilmenite particles. The elliptical rod medium can bring good uniformity in magnetic field strength, which is suitable for stable separation of coarse minerals. The cylindrical rod medium leads to a wide magnetic field distribution and can be applicable to separation of mixed materials with wide size fraction. The simulation results are in good agreement with the experimental measurement, which verifies the reliability of the model. Further particle simulation reveals that serrated plate medium can break particle agglomeration and suppress non-magnetic mineral entrainment by periodic gradient reversal, and finally realize the efficient enrichment of ilmenite. It is concluded that the serrated plate medium has significant advantages in separation of fine ilmenite and is the preferred medium for the ZH HIMS.

Key words: high gradient magnetic separation; ZH high-intensity magnetic separator (HIMS); magnetic field distribution; magnetic media; serrated plate media; elliptical rod media; cylindrical rod medium; fine ilmenite; finite element simulation

① **收稿日期**：2025-08-28
基金项目：国家重点研发计划(2023YFC2908303)
作者简介：荆茂晨(2000—)，男，陕西渭南人，硕士研究生，主要研究方向为低品位矿产资源综合利用。E-mail：maochenjing1@163.com
通信作者：安登极(1982—)，男，湖南邵阳人，正高级工程师，硕士研究生导师，主要从事选矿技术及装备研究。E-mail：79868750@qq.com

高梯度磁选机是实现钒钛磁铁矿、菱锰矿等弱磁性矿物分选的关键设备,其中 ZH 型组合式强磁选机具有高梯度、高场强、高分选效率、强适应性等优势,已在弱磁性矿物分选中得到广泛应用[1]。但该设备缺乏三维模拟仿真的相关数据支撑[2],设备运行过程中回收的微细粒钛铁矿品位和回收率指标不能直观显示,亟须对其磁选分选过程及分选机理进行仿真模拟研究。

近年来,有限元仿真因能直观地以图表形式展示结果而被广泛应用于磁场仿真领域[3]。文献[4]利用 Comsol 软件对新型干式永磁高梯度磁选机的磁场特性进行分析,探究了分选间隙对磁系磁场特性的影响,为进一步提升磁选效果提供了理论指导。文献[5]利用 Ansys 软件重新设计了磁浮选柱磁系,解决了磁性夹杂问题,有效提高了资源利用率。文献[6]利用有限元仿真软件对平面挤压磁系结构设计参数进行多目标仿真优化分析,表明有限元仿真具有良好的预测能力。文献[7]利用有限元仿真软件对磁性和非磁性颗粒在磁场中的受力情况进行分析,指出磁流体耦合高梯度磁选可解决常规高梯度磁选中品位和回收率难以兼顾的问题。文献[8]针对干式磁选机和干式磁选工艺品位低、适应性差等缺点,采用 EDEM 和 Fluent 耦合的方法来模拟新型三级干式磁选机的分选过程,得到了最优的工作条件。文献[9]提出一种基于干式磁选法的月壤钛铁矿原位富集装置,利用 Comsol 软件进行多物理场模拟和优化,详细研究了该装置在低重力场下的工作过程。文献[10]认为目前仿真多局限于二维的介质单丝捕获动力学、磁性粒子捕获观察与实验验证,尚不足以支撑由大量介质丝组合形成的复杂磁介质盒的精确设计。基于此,本文以 ZH 型组合式强磁选机为研究对象,借助 Ansys 仿真软件,研究该磁选机的磁介质三维磁场分布特征,然后利用颗粒仿真软件进行验证,旨在揭示颗粒在磁介质盒中的分选机制。

1 ZH 型组合式强磁选机结构及建模

1.1 设备结构

ZH 型组合式强磁选机结构如图 1 所示。它主要由两侧磁场发生装置(线圈和磁轭)、中央分选盘和基座组成。中央分选盘由 13 个介质盒和 13 个隔块交错排列而成。工作时,电机带动中央分选盘旋转,矿浆从给矿口进入分选介质盒。介质盒进入分选区时,磁性颗粒在磁场力作用下吸附至介质盒,非磁性颗粒流入尾矿槽。精矿随介质盒转动至卸矿区后冲入精矿槽。

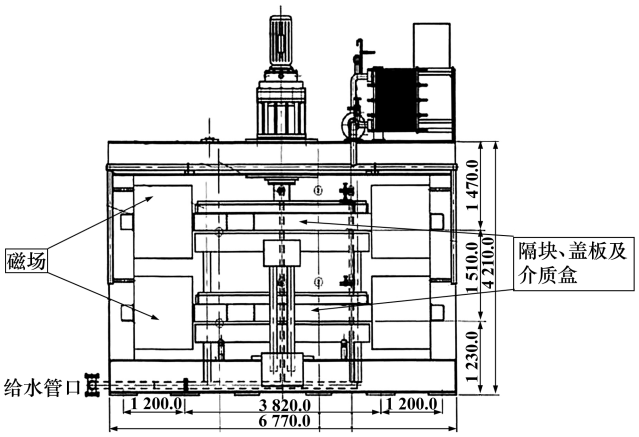


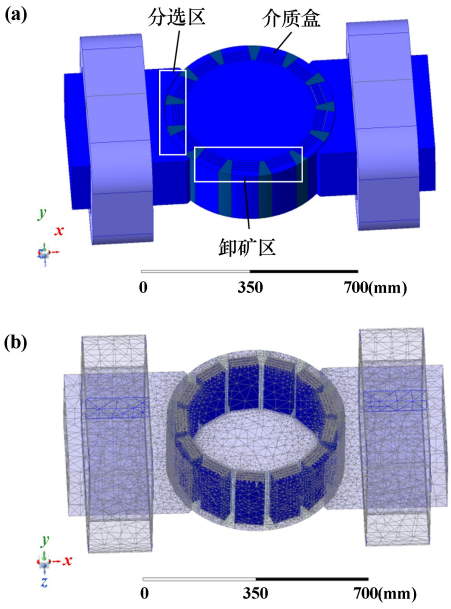
图 1 ZH 型组合式强磁选机结构(单位:mm)

Fig. 1 Structure of ZH HIMS

1.2 仿真模型构建

1.2.1 磁选机建模

在 Ansys 软件中创建了 ZH 型组合式强磁选机的三维模型。由于原设备零件较多,建模时进行了简化,并只选取其中一盘进行仿真研究。建立 ZH 型组合式强磁选机简化三维模型后,对模型进行网格划分,共计 34 888 611 个网格。Ansys 软件中 ZH 型组合式强磁选机的三维仿真模型如图 2 所示。



(a) 几何模型;(b) 网格划分

图 2 Ansys 软件中 ZH 型组合式强磁选机的三维仿真模型

Fig. 2 3D simulation model of ZH HIMS in Ansys

ZH 型组合式强磁选机的中央分选盘直径为 560 mm。三维仿真计算所采用的主要材料参数见表 1。仿真过程中,介质形状设置成齿板、椭圆和圆棒 3 种,励磁电流设置为 10~100 A。

表 1　仿真计算所采用的主要材料参数

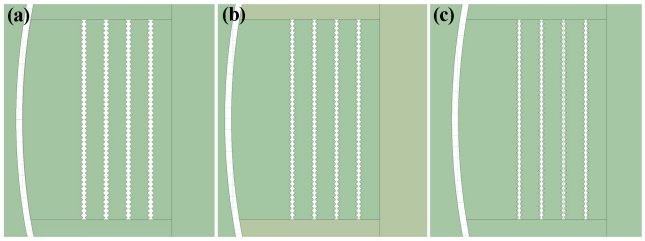
Table 1　Main material parameters in simulation calculation

材料名称	相对磁导率/%	电导率/(S·m^{-1})
铜	0.999 991	58 000 000
不锈钢	1.000	1 100 000
水	0.999 991	0.01
DT-4		2 000 000

注:DT-4 为电磁纯铁(GB/T 6983—2022),用于模型中的导磁结构件,其磁特性由 *B-H* 曲线给定。

1.2.2　介质盒建模

Ansys 软件中 3 种不同形状磁介质的俯视图见图 3。介质盒长 90 mm、宽 49 mm、高 220 mm,介质间隙皆为 1 mm。



(a) 齿板;(b) 椭圆;(c) 圆棒

图 3　Ansys 软件中介质盒俯视图

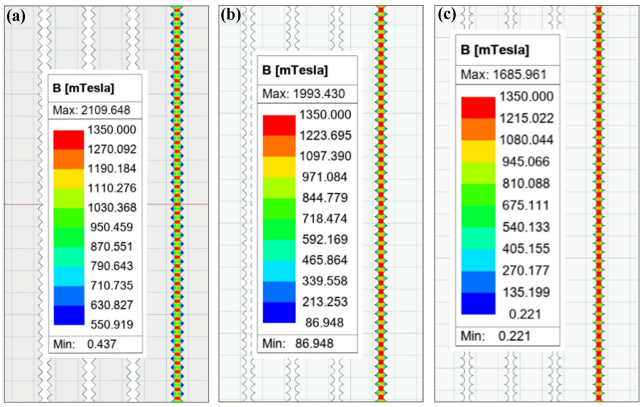
Fig. 3　Top view of media box in Ansys

2　磁场仿真结果与分析

2.1　磁场结构分布特征

利用 Ansys Maxwell 对 3 种不同形状磁介质盒进行磁场仿真,3 种介质盒的磁感应强度分布云图见图 4。结果表明,不同几何形状的介质对磁场强度及梯度分布具有显著影响。齿板介质在齿尖位置形成明显的磁场聚焦效应,最大磁感应强度达到 2.109 T,远高于椭圆与圆棒形状介质,其高场强区域分布广且梯度变化剧烈,表现出对弱磁性细粒矿物的强捕获能力,尤其是在齿尖与齿谷之间形成周期性高梯度区域,为细粒钛铁矿提供了有效的聚集通道。椭圆介质的磁场分布相对均匀,最大场强较齿板介质略低,但低场强区域比例显著减少,高场强带呈连续带状分布,这种均匀性有利于降低粗颗粒分选中的夹带效应,但对于需要高梯度捕获的微细粒钛铁矿,其选择性不足。圆棒介质虽能在棒体表面形成一定强度的局部磁场,但低场强区域范围广,磁能利用率相对较低,其磁场分布更适用于粒度组成复杂的物料,而对微细粒矿物的高效富集能力有限。

综上,齿板介质不仅能提供更高的峰值磁场强度,而且能形成周期性分布的高梯度区,这种结构特征明显优于椭圆和圆棒介质,是微细粒钛铁矿磁选的理想磁介质。



(a) 齿板;(b) 椭圆;(c) 圆棒

图 4　Ansys 软件中介质盒磁感应强度分布云图

Fig. 4　Distribution of magnetic flux density of media box in Ansys

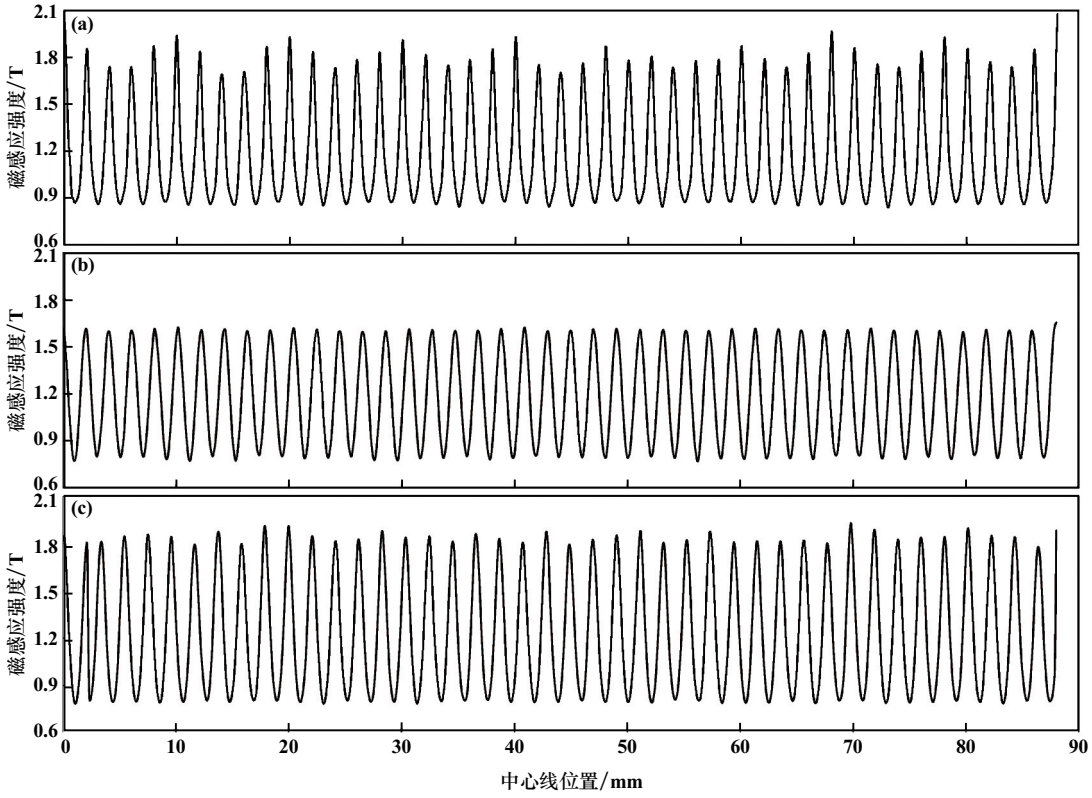
2.2　分选通道磁场分布特性

为定量分析不同介质结构的分选特性,提取了 3 种介质的分选通道中心线上的磁感应强度曲线,见图 5。齿板介质磁感应强度曲线呈现陡峭的周期性脉冲变化,局部峰值场强可达 2.08 T,峰-谷差值超过 1.0 T。强烈的梯度波动虽导致局部低场强区域存在,但其锐利的场强突变使微细粒钛铁矿能够在齿尖区域实现高效捕获与富集。这种结构特征为细粒弱磁性矿物提供了必要的高选择性条件。圆棒介质磁感应强度曲线呈双峰阻尼振荡模式,主峰强度 1.68 T,次峰强度 1.35 T。虽然在较宽范围内保持了中等强度,但局部梯度反转可能削弱对细粒矿物的定向富集作用。椭圆介质磁感应强度曲线变化相对平缓,最大场强为 1.92 T,谷值维持在 0.8 T 以上,峰-谷差值约1.1 T,其分布更利于粗粒连续分选,但对微细粒钛铁矿而言,高梯度捕获能力不足,难以实现有效分离。

对比分析可见:齿板介质通过周期性强梯度峰值实现对微细粒矿物的精准捕获;椭圆介质以均匀性见长,更适合粗粒分选;圆棒介质则具有宽粒级混合物的宽域适应性。需要指出的是,尽管齿板介质在微细粒钛铁矿捕获方面表现更优,但椭圆介质具有较好的磁场均匀性,适用于粗粒稳定分选;圆棒介质磁场覆盖范围较宽,对多粒级混合给矿具有一定适应性。

2.3　仿真模型可靠性验证

为验证所建立有限元仿真模型的可靠性,对齿板介质工作间隙中心点的磁感应强度进行了试验测定,并将结果与仿真值进行对比,结果见图 6。从图 6 可以看出,随着励磁电流增加,仿真值与实测值均呈近似



(a) 齿板;(b) 圆棒;(c) 椭圆

图 5 不同介质分选通道中心线上的磁感应强度曲线

Fig. 5 Magnetic flux density curves on center line of different media separation channels

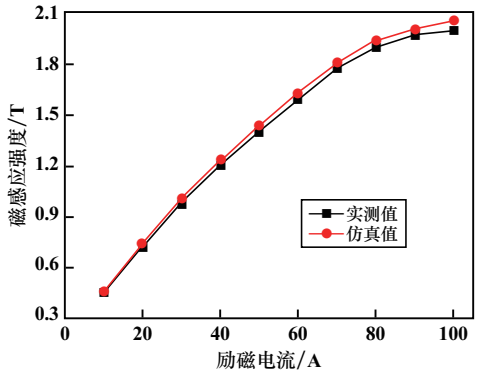


图 6 不同励磁电流下磁感应强度变化

Fig. 6 Variation in magnetic flux density under different excitation currents

线性增长趋势:电流由 0 增至 100 A 时,仿真磁场强度由 0.49 T 升至 2.04 T,实测值由 0.49 T 升至 1.92 T。两条曲线在整个电流区间内高度吻合,最大相对误差不超过 5.9%。这一结果表明,本文所建立的有限元仿真模型能够准确反映磁选机在不同励磁条件下的电磁响应规律,验证了模型在磁场强度与分布预测方面的可靠性。基于此模型进行三维磁场结构分析与颗粒分选模拟,具有较强的工程参考价值。

3 三维磁场特征与颗粒分选机理

3.1 齿板介质 ZH 型组合式强磁选机磁场三维仿真

齿板介质 ZH 型组合式强磁选机的磁感应强度云图见图 7。由图 7 的磁感应强度分布及磁感线走向可知,背景磁场主要由左侧电磁铁(铜线圈励磁单元)产生,穿透左侧分选区介质盒,经中央导磁介质形成主磁路,贯穿右侧分选区介质盒,最终闭合于右侧电磁铁,

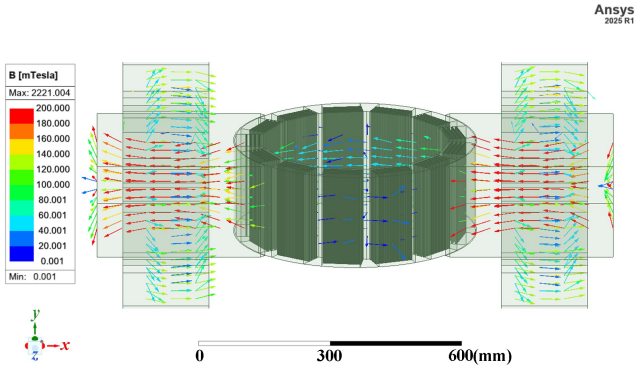
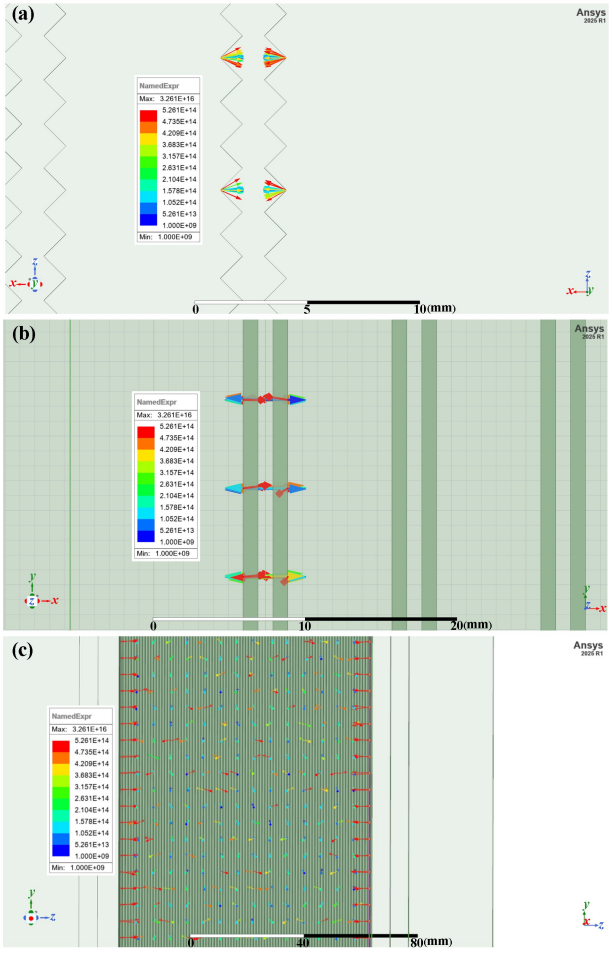


图 7 Ansys 软件中齿板介质 ZH 型组合式强磁选机磁感应强度云图

Fig. 7 Magnetic flux density contours of ZH HIMS with serrated plate media

构成完整磁回路。该磁系结构通过定向导磁设计,使卸矿区介质盒处于磁屏蔽状态(实测磁感应强度不高于 0.001 mT),能有效消除残余磁场对分选过程的干扰,确保磁性矿物在重力和冲洗水的共同作用下高效落入精矿槽,实现非磁性矿物与磁性矿物的精准分离。

根据磁场力理论模型 $F=\chi_0\mu_0 H\mathrm{grad}H$(其中 χ_0 为真空磁导率,μ_0 为颗粒质量比磁化率),矿物分选过程中磁性颗粒所受磁场力由磁场强度 H 与磁场梯度 ∇H 的乘积决定。齿板介质的磁场力分布见图 8。图 8 结果表明:齿谷区域颗粒受指向对侧齿尖的磁场力显著高于指向对侧齿谷的力,齿尖附近形成磁场力聚焦区,证实齿板几何结构对磁力线的定向调控作用。yz 平面矢量沿分选介质盒长度方向,磁场力呈现周期性的方向交替变化,此时交变磁场力场通过动态梯度反转效应,破坏颗粒聚团机制,有效抑制机械夹带。



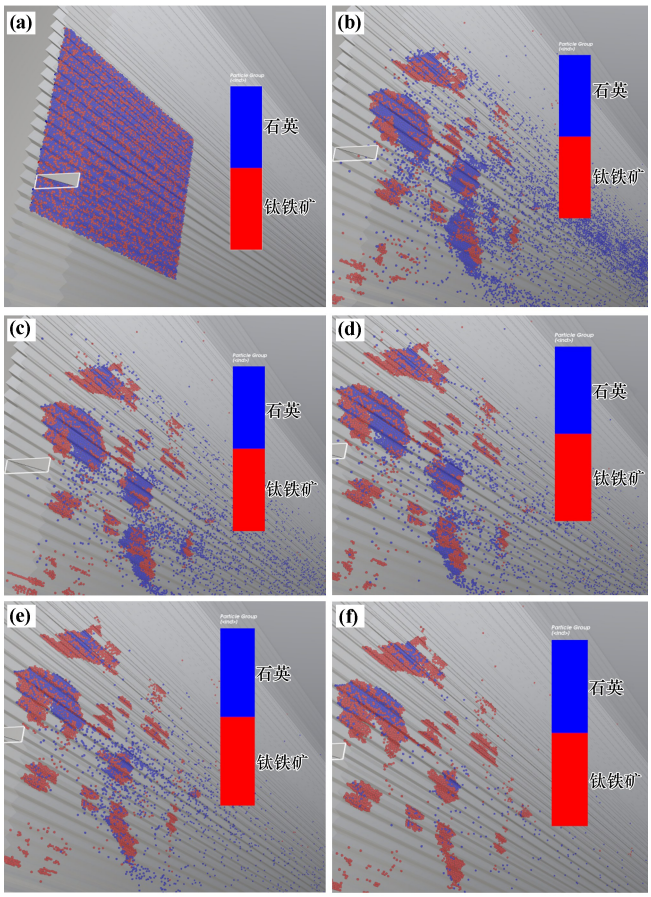
(a) xz 平面;(b) xy 平面;(c) yz 平面

图 8　Ansys 软件中齿板介质磁场力分布

Fig. 8　Magnetic force distribution of separator with serrated plate media in Ansys

3.2　颗粒仿真

以齿板为介质,基于离散元方法对钛铁矿颗粒与石英颗粒的分选过程进行了动态模拟,钛铁矿颗粒与石英颗粒的分选过程动态模拟结果见图 9。初始状态,2 种颗粒在介质盒内呈近似均匀分布,尚未表现出明显的分离趋势。外加磁场作用下(0.1 s),颗粒体系出现扰动,部分磁性颗粒开始向齿尖高场强区域迁移,但整体仍保持混合状态;在分选早期阶段(0.3 s),磁性颗粒与非磁性颗粒之间出现团聚体,形成混合聚集区域,表明磁场力与流体和重力作用存在竞争;随着分选过程继续(0.6 s),齿板介质的周期性梯度反转效应逐渐破坏团聚结构,磁性颗粒从混合团块中逸出并向齿尖区域富集,而非磁性颗粒则逐渐下移并分散;在加速分离阶段(0.9 s),钛铁矿颗粒在齿尖区域形成高浓度富集带,石英颗粒在重力与流体力作用下进一步向下扩散;分选结束时(1.2 s),2 种颗粒在空间上实现明显分离,高场强区域形成钛铁矿富集带,表明齿板介质具有较好的微细粒矿物分选效果。



(a) 初始状态;(b) 0.1 s;(c) 0.3 s;(d) 0.6 s;(e) 0.9 s;(f) 1.2 s

图 9　钛铁矿颗粒与石英颗粒的分选过程动态模拟结果

Fig. 9　Dynamic simulation of separation process of ilmenite and quartz particles

由以上模拟结果可见,齿板介质通过周期性磁场梯度反转,不仅增强了对微细粒钛铁矿的定向捕获,而

且有效削弱了颗粒团聚与机械夹带,实现高效分离。

4 结论

1) 建立了ZH型组合式强磁选机的三维有限元仿真模型,并系统分析了齿板、椭圆及圆棒3种介质的磁场分布特征。结果表明,介质几何形状对磁场强度与梯度分布具有显著影响,其中齿板介质在齿尖区域形成显著聚焦效应,磁场峰值强度可达2.08 T。

2) 分选通道中心线磁感应强度曲线显示,齿板介质呈周期性强梯度波动,具备对微细粒弱磁性矿物的高选择性捕获能力;椭圆介质场强分布平缓,适于粗粒矿物的稳定分选;圆棒介质表现为双峰特征,适合宽粒度物料的中等强度分选。

3) 仿真结果与实测数据高度吻合,验证了所建模型的可靠性。进一步的三维磁场分析结果表明,齿板介质能通过梯度反转效应打破颗粒团聚,优化分选环境。

4) 基于离散元颗粒模拟,直观揭示了齿板介质在分选过程中对钛铁矿颗粒的有效富集作用以及对非磁性颗粒的夹带抑制效果。综合结果表明:齿板介质在微细粒钛铁矿分选中的效果明显优于椭圆与圆棒介质,是ZH型组合式强磁选机的优选介质。

参考文献(References):

[1] 邓永刚. ZH3200E-Ⅲ平环磁选机隔块及盖板的改造[J]. 山西冶金, 2024,47(9):173-174.
DENG Yonggang. Transformation of the partition block and cover plate of ZH3200E-Ⅲ flat ring magnetic separator[J]. Shanxi Metallurgy, 2024,47(9):173-174.

[2] 刘险峰,张志刚. 强磁选机聚磁介质的优化改进[J]. 当代化工研究, 2022(7):168-170.
LIU Xianfeng, ZHANG Zhigang. Optimization and improvement of magnetic collecting medium in high intensity magnetic separator[J]. Modern Chemical Research, 2022(7):168-170.

[3] 程志勇,卢东方,薛子兴,等. 基于COMSOL Mutiphysics的履带式磁选机平面磁系磁场仿真与参数优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021,52(4):1049-1057.
CHENG Zhiyong, LU Dongfang, XUE Zixing, et al. COMSOL Mutiphysics-based magnetic field simulation and parameter optimization of planar magnetic system of crawler magnetic separator[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021,52(4):1049-1057.

[4] 刘松,夏浩,常军,等. 新型干式永磁高梯度磁选机的研制及试验[J]. 有色金属(选矿部分), 2025(8):115-123.
LIU Song, XIA Hao, CHANG Jun, et al. Development and experimental research of the new dry permanent magnet high gradient magnetic separation machine[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2025(8):115-123.

[5] 黄光耀,顾翔宇,曹玉川,等. 线圈磁系在磁浮选分选腔内的磁场特性分析[J]. 矿冶工程, 2016,36(3):31-35.
HUANG Guangyao, GU Xiangyu, CAO Yuchuan, et al. Properties of magnetic field in separation chamber for magnetic flotation generated by electric coils[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2016,36(3):31-35.

[6] 莫民坤,滕家皇,梁超旭,等. 平板磁选机平面挤压磁系结构参数优化研究[J]. 矿业研究与开发, 2025,45(1):230-237.
MO Minkun, TENG Jiahuang, LIANG Chaoxu, et al. Optimization study on the structural parameters of the planar extrusion magnetic system of the flat magnetic separator[J]. Mining Research and Development, 2025,45(1):230-237.

[7] 唐海芬,曙瓦克·赛力克,岳鑫慧,等. 磁流体耦合高梯度磁选高效回收攀西钛铁矿的研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):120-124.
TANG Haifen, SHUWAKE·SAILIKE, YUE Xinhui, et al. Efficient recovery of Panxi ilmenite by magnetic fluid coupling high-gradient magnetic separation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):120-124.

[8] 汪建新,李慧慧,靳少康. 干式磁选机分选品位影响因素研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(3):144-151.
WANG Jianxin, LI Huihui, JIN Shaokang. Study on influencing factors of separation grade of dry magnetic separator[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(3):144-151.

[9] 张鹏,刘欣,刘光辉,等. 月球钛铁矿原位分选富集多物理场仿真与优化分析[J]. 中国科学:地球科学, 2025,55(1):194-206.
ZHANG P, LIU Xin, LIU Guanghui, et al. Multiphysics simulation and optimization of the in-situ beneficiation process of ilmenite minerals from lunar regolith[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2025,55(1):194-206.

[10] 熊涛,陈禄政,黄会春,等. SLon脉动高梯度磁选技术进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024,55(12):4406-4421.
XIONG Tao, CHEN Luzheng, HUANG Huichun, et al. Progress in SLon pulsating high gradient magnetic separation technology[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024,55(12):4406-4421.

引用本文:荆茂晨,安登权,刘任,等. 基于Ansys的ZH型组合式强磁选机磁场特性三维仿真研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):91-96.
JING Maochen, AN Dengji, LIU Ren, et al. 3D simulation study on magnetic field characteristics of ZH high-intensity magnetic separator based on Ansys[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):91-96.