

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2021.04.018

新型干式永磁筒式磁选机风力因素分析

曹丽英, 靳少康, 张逸

(内蒙古科技大学 机械工程学院, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 为了探究风力因素对分选腔流场特性、磁选机分选性能的影响, 将借助计算流体力学软件 ANSYS fluent 对新型干式永磁筒式磁选机分选腔进行流场特性研究, 并通过整机试验研究风力因素对分选性能的影响。研究表明, 随着风速的增加, 精矿铁品位由 17.78% 提升到 19.63%, 尾矿磁性铁品位由 1.09% 降低到 0.77%, 精矿产能从 2 719.41 kg/h 提升到 2 869.42 kg/h, 铁矿处理量由原来的 28 525.66 kg/h 提升到 30 793.93 kg/h。因此, 风力因素能够改善流场特性, 提升磁选机的分选性能。

关键词: 磁选机; 计算流体力学; 气固两相流; 数值模拟

中图分类号: TD457; TD951

文献标志码: A

文章编号: 1671-9492(2021)04-0104-07

Wind Factor Analysis of New Type Dry Permanent Magnet Drum Magnetic Separator

CAO Liying, JIN Shaokang, ZHANG Yi

(College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to explore the influence of wind power on the flow field characteristics of the separation chamber and the separation performance of the magnetic separator, the flow field characteristics of the separation chamber of the new dry permanent magnet drum magnetic separator have been studied with the help of the computational fluid dynamics software ANSYS fluent, and the influence of wind power on the separation performance through the whole machine test have been studied. The results show that the concentrate grade increased from 17.78% to 19.63%, the magnetic iron grade of tailings decreased from 1.09% to 0.77%, the concentrate capacity increased from 2 719.41 kg/h to 2 869.42 kg/h, and the iron ore treatment capacity increased from 28 525.66 kg/h to 30 793.93 kg/h. Therefore, the wind factor can improve the characteristics of the flow field and improve the separation performance of the magnetic separator.

Key words: magnetic separator; computational fluid dynamics; gas-solid two-phase flow; numerical simulation

据《2019 中国矿产资源报告》显示, 我国已成为全球最大矿产品贸易国和矿产品生产国, 其中钢铁、煤炭等主要矿产品产量跃居世界前列^[1]。内蒙古地区作为国内铁矿石重要产地, 高寒干旱、水资源匮乏、霜冻期长、生态环境脆弱, 且“贫、细、杂”的矿石特点造成开采生产成本低。在传统干式永磁磁选机的基础上研制了新型干式永磁筒式磁选机, 将干式永磁技术应用在铁精粉干选工艺中, 可以减少设备投入, 维护生态环境。新型干式永磁筒式磁选机, 将风引入到铁精粉干选工艺中, 由供风装置为分选提

供风力条件。为了探究风力因素对分选腔流场特性及磁选机分选性能的影响, 本文将通过计算流体力学对分选腔流场进行研究, 并展开整机试验探究风力因素对分选性能的影响。计算流体力学^[2] (Computational Fluid Dynamics, CFD) 是一种对流体流动、传热以及其他相关现象进行分析的研究方法, 主要借助计算机进行数值计算, 并且 CFD 涉及到多学科领域, 例如计算机、流体力学、高等数学和数值分析等^[3-5]。曹晓畅等^[6]使用 CFD 数值模拟软件研究了料浆在高梯度磁选机内部不同位置处的流

收稿日期: 2020-08-16

基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项(2016ZDZX-1); 内蒙古自治区应用技术与开发资金计划资助项目(201702025)

作者简介: 曹丽英(1980-), 女, 内蒙古土左旗人, 博士, 教授, 主要从事农产品加工机械系统的优化设计、矿用机械系统的测试及优化设计等方面的研究工作。

场,并根据计算结果对其内部结构进行了优化;卢东方等^[7-8]使用 CFD 软件 fluent 对旋流多梯度磁选机的流体力场进行仿真,最终确定了分选腔内不同位置处的不同的流速和运动轨迹;高淑玲等^[9]基于 CFD 理论对螺旋溜槽流场进行分析得到不同矿粒分选时的运动规律;胡永会^[10]运用 CFD 与有限元法(Finite Element Method, FEM)、离散元法(Discrete Element Method, DEM)相互耦合的研究方法,研究固-液多相流在磁场-流场-重力场多物理场作用下的颗粒动力学行为;许媛媛等^[11]利用 CFD 原理建立了钢锭内部温度预测模型;江茂强等^[12]对热装高炉高温煤气喷雾降温塔内流场特性进行 CFD 数值仿真分析,为降温塔结构优化提供了参考;郭春牧等^[13]借助 CFD 数值计算,得到了不同中间包构型对钢液混合和流动的影响。

1 新型干式永磁筒式磁选机

针对传统干式磁选机所存在的料层厚度大、分选效率低、粉尘污染严重和精矿品位受限问题,提出三级永磁干式磁选新技术,并依据这种技术研发一台新型干式永磁筒式磁选机,并按照 1:3 的比例制造一台试验样机,其结构如图 1 所示。该磁选机为三级磁选设备,能够实现一台机器同时分选不同磁性大小、不同粒级等级的原矿,减少了设备费用的投入。

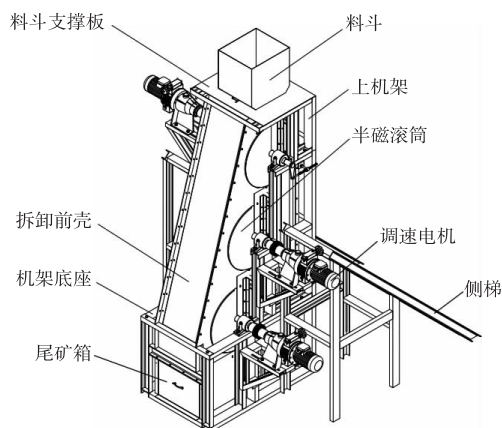


图 1 新型干式永磁筒式磁选机结构图

Fig. 1 Structural diagram of new type dry-type permanent magnet drum magnetic separator

2 流体力学仿真分析

当有风参与铁精粉分选时,分选腔内的流场特性会发生改变,因此需要使用 ANSYS fluent 对分选腔内的流场特性进行理论计算。

2.1 分选腔模型建立

本文使用新型干式永磁筒式磁选机单级分选腔流道模型作为计算模型,使用三维建模软件 Solid Works 对建立单级实体模型,并建立计算区域模型如图 2 所示。经过网格划分后内部网格情况如图 3 所示。

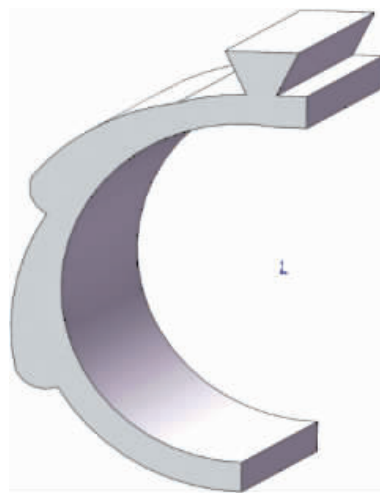


图 2 单级分选腔的三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of single-stage separation chamber

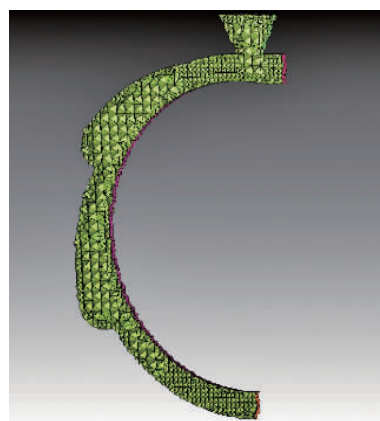


图 3 网格划分结果

Fig. 3 Meshing result

2.2 ANSYS 仿真结果分析

使用 ANSYS fluent 对 air-in 速度分别为 0、5、10、15、20 和 25 m/s, roller 转速为 10.99 r/s 工况下进行计算。计算结束后使用后处理软件 CFD-Post 16.0 对仿真结果进行查看,为了方便查看流场内部压力及速度的分布情况,以 XOY 平面为基准面,沿 Z 轴的正负方向对称设置平面 300、200、100、-100、-200、-300 mm,含有中轴面共设置了 7 个观察平面。后处理结果如图 4~9 所示。

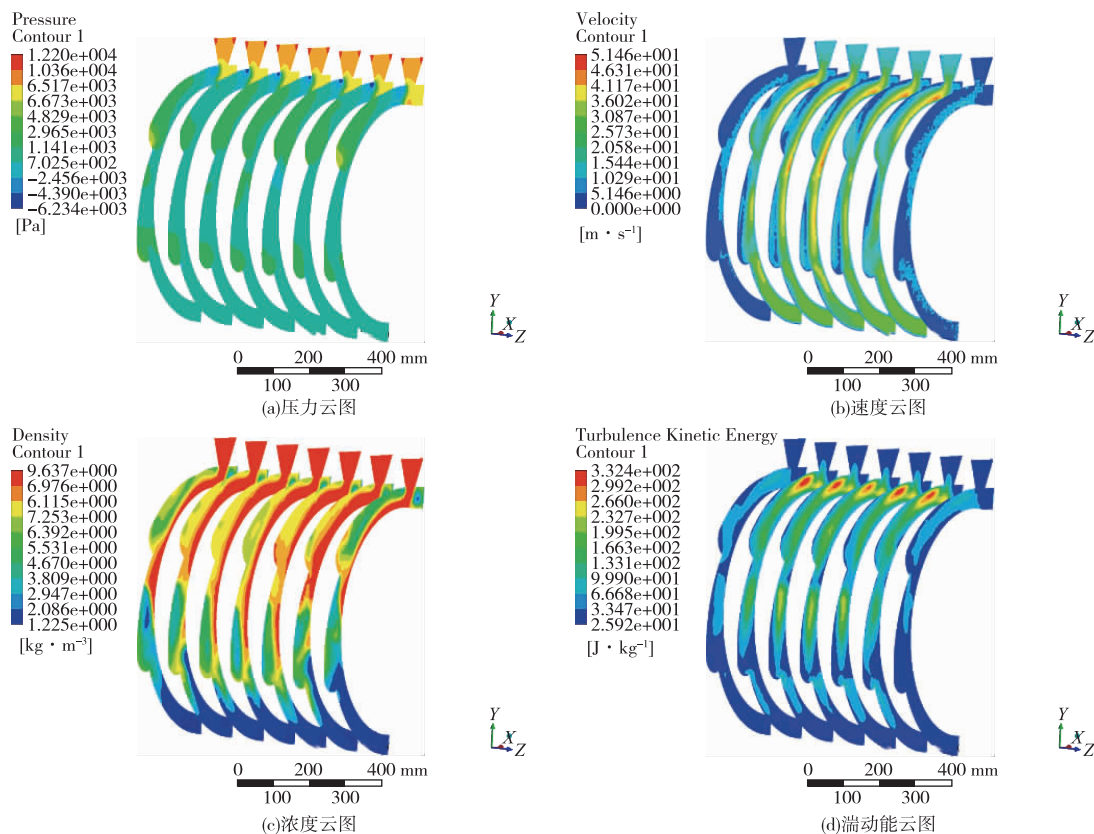


图 4 无风时分选腔内流场特性

Fig. 4 Characteristics of flow field in a windless separation chamber

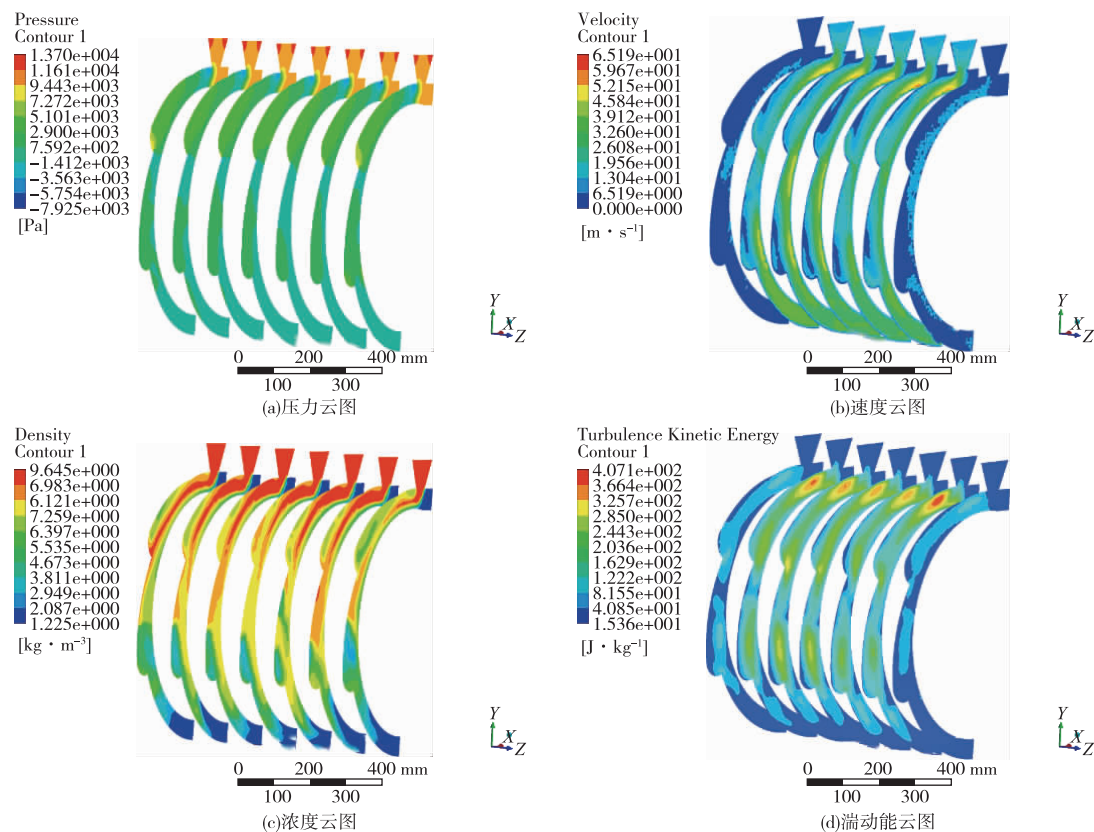


图 5 风速为 5 m/s 时分选腔内流场特性

Fig. 5 Flow field characteristics in the separation chamber when the wind speed is 5 m/s

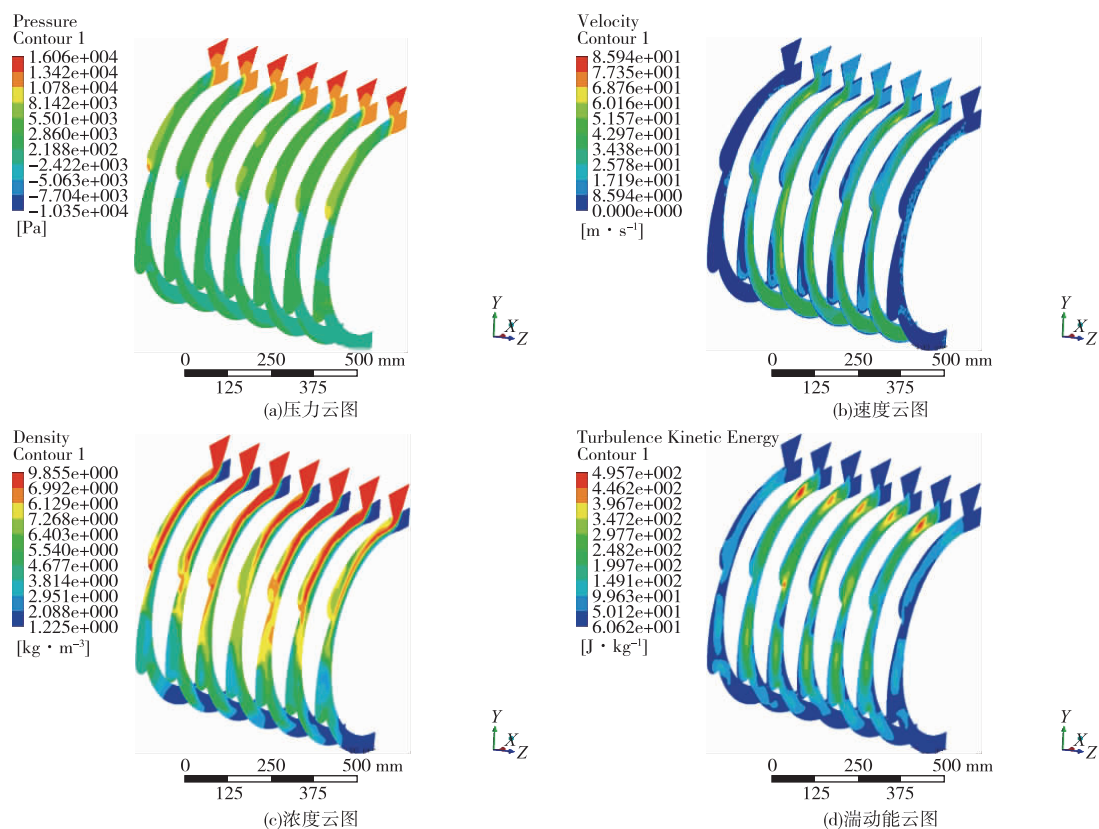


图 6 风速为 10 m/s 时分选腔内流场特性

Fig. 6 Flow field characteristics in the separation chamber when the wind speed is 10 m/s

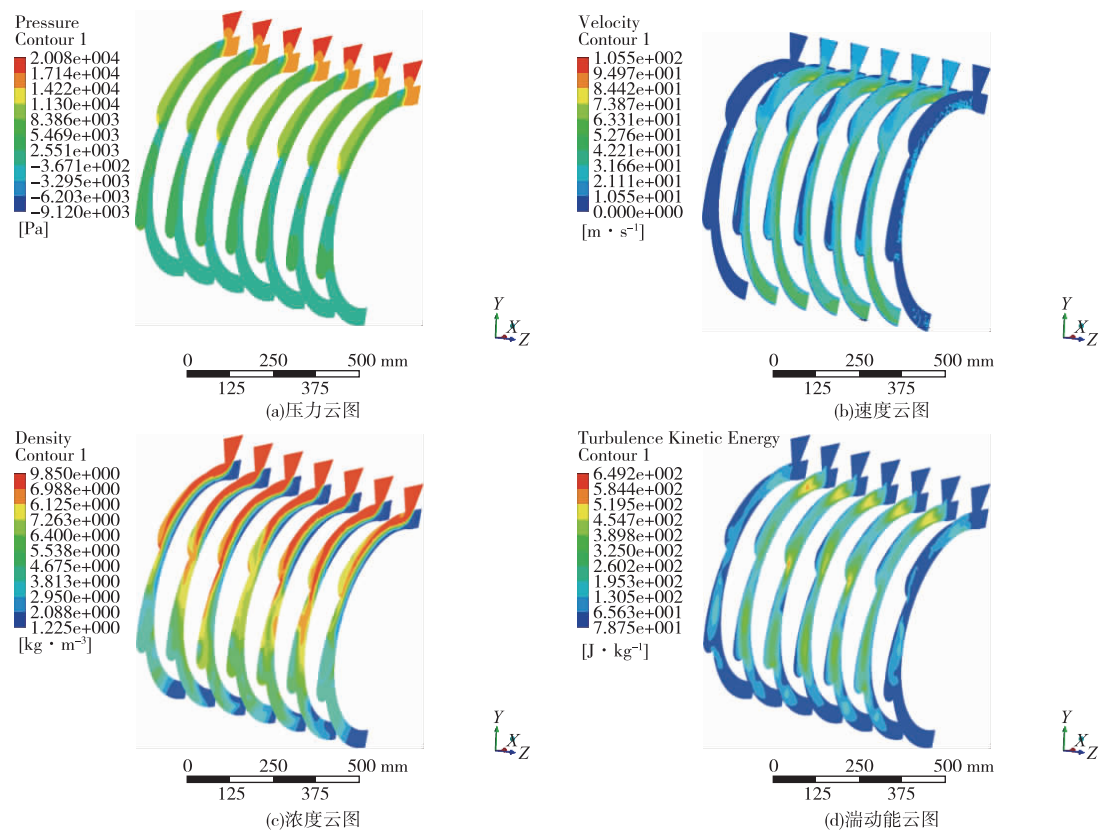


图 7 风速为 15 m/s 时分选腔内流场特性

Fig. 7 Flow field characteristics in the separation chamber when the wind speed is 15 m/s

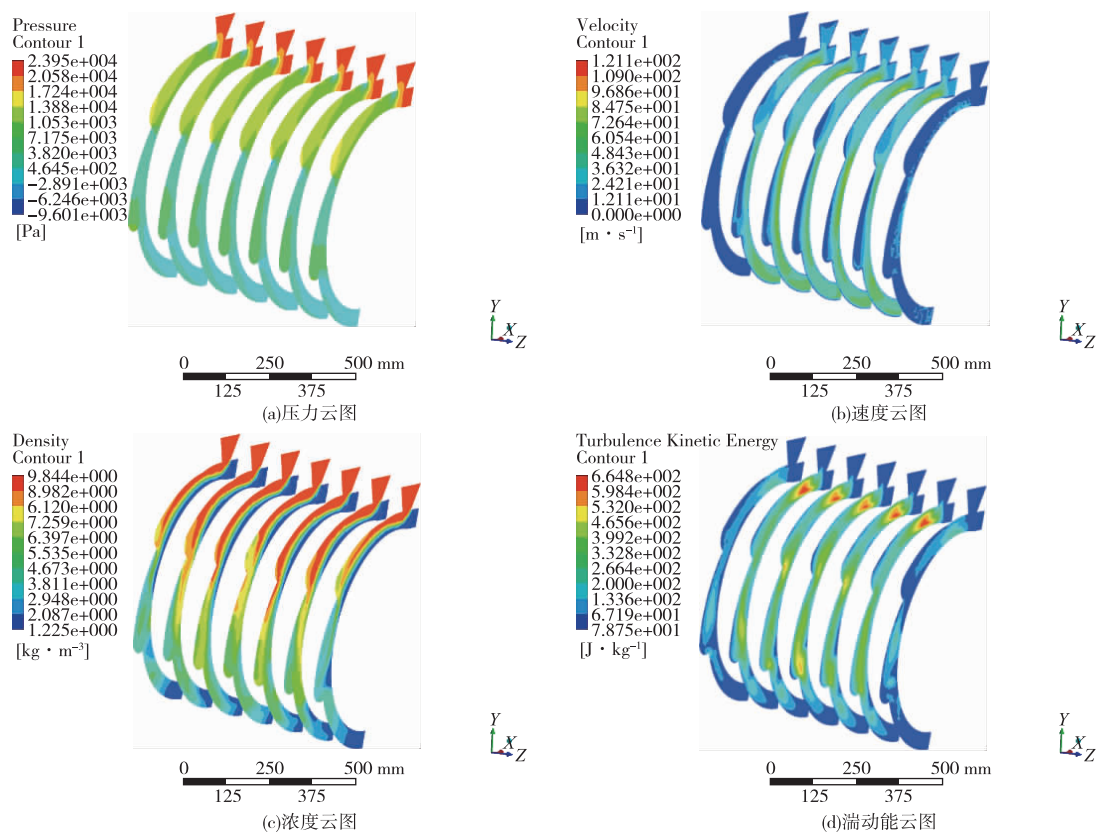


图8 风速为 20 m/s 时分选腔内流场特性

Fig. 8 Flow field characteristics in the separation chamber when the wind speed is 20 m/s

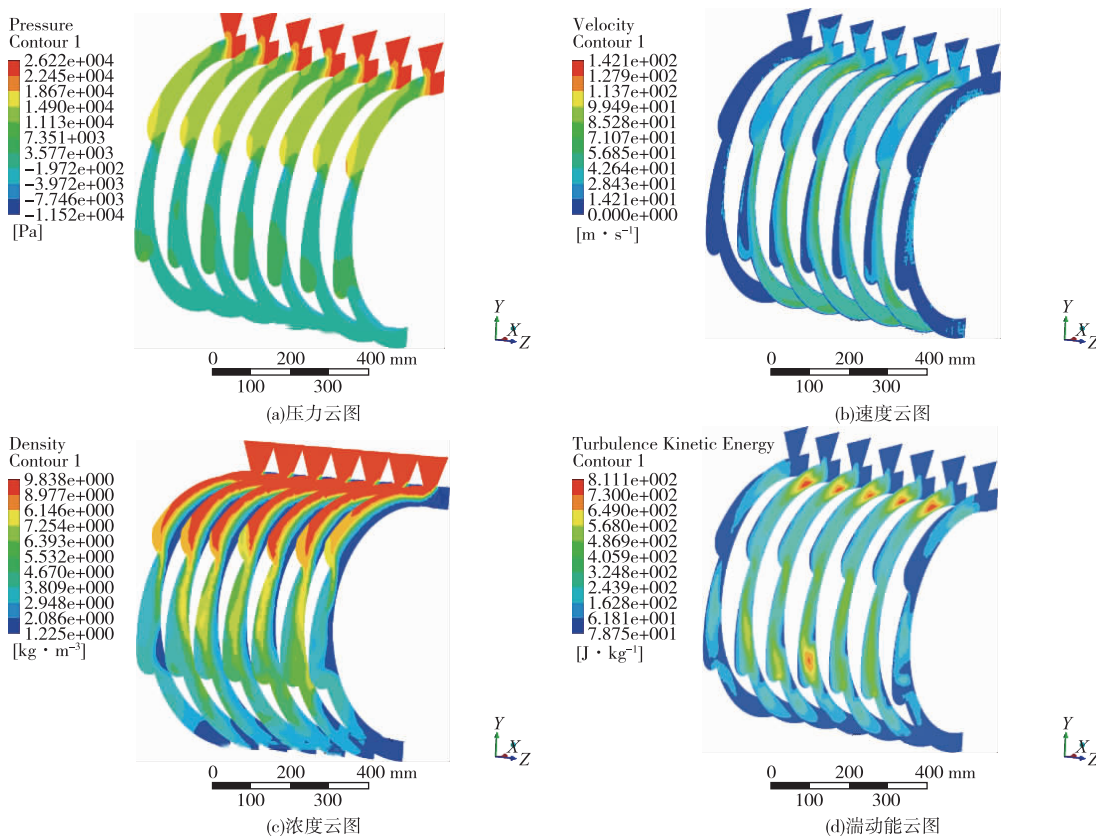


图9 风速为 25 m/s 时分选腔内流场特性

Fig. 9 Flow field characteristics in the separation chamber when the wind speed is 25 m/s

由图4~9(a)分选腔内压力分布云图可以发现,分选腔内压力分布沿轴向对称分布,压力最大均出现在进料口及进风口处,进料口及进风口压力增大,能够提高磁选机的分选效率,而进料口后负压区域的存在,可以降低重力、磁场力对矿物颗粒的影响,能够实现矿物颗粒在分选腔中翻滚跳动,促进磁性颗粒与脉石等非磁性或者弱磁性颗粒快速脱离,提高精矿品位。在分选腔的两处曲率半径变化处,压力突然比上下区域大,这是由于流体在此处与壁面碰撞剧烈所造成的,这种撞击能够使平稳的流动突然受到冲击,打破相对平稳的流动,促进矿物颗粒形成多次翻滚跳跃,促进磁性矿物的分离。

由图4~9(b)分选腔内速度分布云图可以发现,分选腔内速度沿径向逐渐变小,沿轴向对称分布,接近辊筒处的速度最大,在负压区域受到压力差的影响在此处形成涡街。物料颗粒随着流动轨迹由上而下速度逐渐增大,在涡街中心速度为0 m/s,在进料口下方贴近辊筒的位置速度最大。

由图4~9(c)分选腔内浓度分布云图可以发现,当风速为0 m/s,由内到外分选腔中浓度变化为 $9.837 \sim 7.253 \text{ kg/m}^3$,物料从进料口直接落在辊筒表面,造成物料堆积料层厚度较大,不利于磁性颗粒分选;随着风速增大进料口物料浓度由内之外磁辊表面料层浓度变化为 $1.225 \sim 9.837 \text{ kg/m}^3$,料层分布更合理,物料的松散程度增加,将有利于磁性颗粒分选。当磁感应强度大时,大料层厚度容易造成磁团聚现象,使矿物颗粒形成磁团影响精矿品位和精矿产能。

由图4~9(d)分选腔内湍动能分布云图可以发现,湍动能较大的位置主要出现在负压区域。在负压区域,压力、速度变化较大且有涡街现象产生,湍流强度变化较大,尤其是在涡街出现的地方湍流强度最大。在没有风通入时,分选腔内的物料流动主

要受到辊筒转动的影响,湍流强度弱;当有风通入且风速逐渐增大时,分选腔内物料流动受到风的影响越大,湍流强度逐渐增大。

3 风速试验

本文选用辊筒转速为130 r/min,风速分别为0、5、15和25 m/s时的工况进行试验研究,得到风速与磁性颗粒捕收率(精矿捕收率)、精矿磁性铁品位、尾矿磁性铁品位(抛尾率)、精矿产能和单位时间内矿砂处理量之间的对应关系。试验数据如表1所示,并将此绘制成点线图,如图10所示,能够直接观察风速对分选性能的影响情况。

表1 风速与分选性能对应关系

Table 1 The relationship between wind speed and sorting performance

分选性能	风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)			
	0	5	15	25
精矿磁性铁品位/%	17.78	18.16	19.35	19.63
尾矿磁性铁品位/%	1.09	0.92	0.82	0.77
精矿产能/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	2 719.41	2 790.28	2 865.27	2 869.42
矿砂处理量/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	28 525.66	28 939.10	30 256.13	30 793.93

通过试验探究发现,在分选腔中通入均匀的风速条件能够改善分选性能。精矿磁性铁品位随着风速的增大而提升,没有风速参与分选时,精矿品位为17.78%,当风速为25 m/s时,精矿品位为19.63%;尾矿磁性铁品位,即抛尾率随着风速的增大有所减小,在没有风参与分选时,尾矿磁性铁品位为1.09%,当风速增加到25 m/s时磁性铁品位降至0.77%;精矿产能随着风速的增大而提升,没有风速参与分选时,精矿产能为2 719.41 kg/h,当风速为25 m/s时,精矿产能为2 869.42 kg/h;铁矿处理量随着风速的增加发生明显提高,由原来的28 525.66 kg/h提升到30 793.93 kg/h。

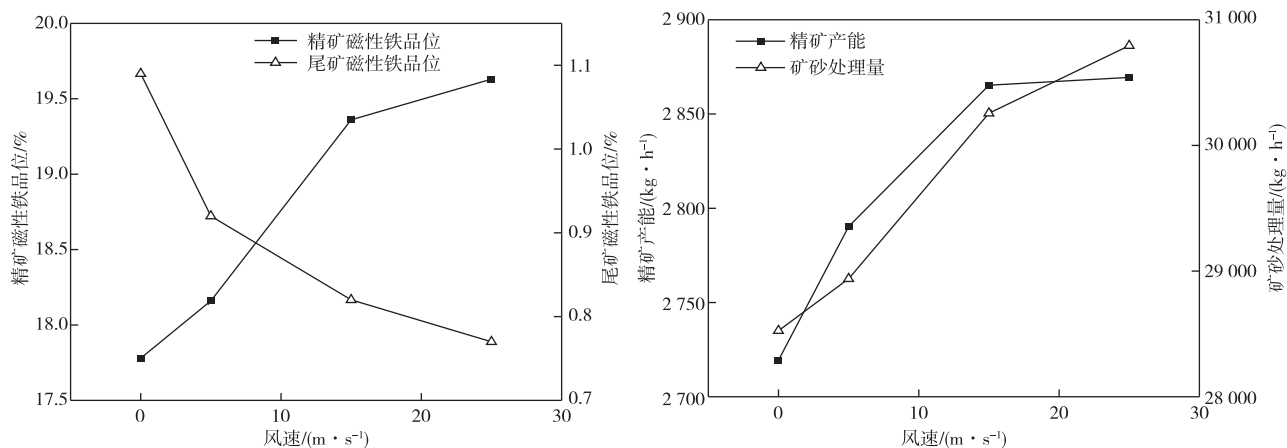


图10 风速大小与分选性能之间的关系

Fig. 10 Relationship between wind speed and sorting performance

4 结论

通过 ANSYS fluent 对分选腔在不同风速条件下的流场变化进行分析,可以得到以下结论:

1) 风速增加使分选腔内压力增大至 22.22 MPa, 在分选腔中形成较大的压力差,造成速度增大至 142.1 m/s 并形成涡街现象,以此提高矿物颗粒在分选腔内的活跃度,使颗粒之间、颗粒与壁面之间形成碰撞,打散磁团释放磁性颗粒,提高铁精粉品位。

2) 风速增加能够避免矿物颗粒因为进入分选腔时直接落在辊筒表面造成料层堆积,而不利于磁性颗粒的分选。

3) 风速增加提高了湍动强度,湍动能增长为 811.1 J/kg,使分选腔内矿物颗粒的松散程度提高,使磁场力能够捕捉更多的磁性颗粒。

4) 通过整机试验可知,新型干式永磁筒式磁选机将风力因素引入到铁精粉的生产中,能够实现分选性能的提高。

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 2019[M]. 北京:地质出版社,2019.
Ministry of Natural Resources, PRC. China Mineral Resources Report 2019 [M]. Beijing: Geological Publishing House,2019.
- [2] DELGADILLO J A, RAJAMANI R K. A comparative study of three turbulence closure models for the hydrocyclone problem [J]. International Journal of Mineral Processing, 2005, 77: 217-230.
- [3] YANG Z L, YU J X, LI Z G, et al. Application of computational fluid dynamics simulation for submarine oil spill[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2018, 37(11): 104-115.
- [4] SARHAN R, NASER J, BROOKS G. CFD model simulation of bubble surface area flux in flotation column reactor in presence of minerals[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2018, 28(6): 999-1007.
- [5] DEGLON D A, MEYER C J. CFD modelling of stirred tanks: Numerical considerations[J]. Minerals Engineering, 2006, 19(10): 1059-1068.
- [6] 曹晓畅, 韩立发. 基于 CFD 数值模拟的磁选机内部结构的优化设计[J]. 东莞理工学院学报, 2013, 20(1): 46-50.
CAO Xiaochang, HAN Lifa. Optimization design of magnetic separator's internal structure based on CFD simulations [J]. Journal of Dongguan Institute of Technology, 2013, 20(1): 46-50.
- [7] 卢东方. 旋流多梯度磁选机的力场仿真、设计及分选性能研究[D]. 长沙:中南大学,2013.
LU Dongfang. Force field simulation, design and study on separating performance of the rotational-flow multiple-gradient magnetic separator [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [8] 卢东方, 王毓华, 何平波, 等. 旋流高梯度磁选机的原理及分选性能预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(1): 1-8.
LU Dongfang, WANG Yuhua, HE Pingbo, et al. High-gradient magnetic separator with rotational flow field and predictions of its separation performance [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(1): 1-8.
- [9] 高淑玲, 魏德洲, 崔宝玉, 等. 基于 CFD 的螺旋溜槽流场及颗粒运动行为数值模拟[J]. 金属矿山, 2014, 43(11): 121-126.
GAO Shuling, WEI Dezhou, CUI Baoyu, et al. CFD-based numerical simulation of flow field of and particles motion behavior in spiral [J]. Metal Mine, 2014, 43(11): 121-126.
- [10] 胡永会. 基于 FEM、CFD 与 DEM 动态耦合模型的磁选全过程仿真浅析[J]. 有色金属(选矿部分), 2016(1): 68-72, 82.
HU Yonghui. Analysis on simulation of magnetic separation process using dynamic coupled FEM, CFD and DEM model [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2016(1): 68-72, 82.
- [11] 许媛媛, 张善伟, 张艳, 等. 钢锭内部温度预测模型的 CFD 建模与应用[J]. 中国冶金, 2015, 25(7): 28-32.
XU Yuanyuan, ZHANG Shanwei, ZHANG Yan, et al. CFD modeling and application of temperature predictive model on steel ingots [J]. China Metallurgy, 2015, 25(7): 28-32.
- [12] 江茂强, 刘丹瑶, 潘宏, 等. 热装高炉高温煤气喷雾降温塔 CFD 数值分析[J]. 中国冶金, 2016, 26(2): 18-24.
JIANG Maoqiang, LIU Danyao, PAN Hong, et al. CFD numerical analysis of flow field in a high temperature gas spray cooling tower of hot charged blast furnace [J]. China Metallurgy, 2016, 26(2): 18-24.
- [13] 郭春牧, 于帆, 张欣欣. 异钢种连浇过程中钢液流动与混合的数值模拟[J]. 中国冶金, 2006, 16(1): 35-38.
GUO Chunmu, YU Fan, ZHANG Xinxin. Numerical simulation of steel flow and mixing during grade transition casting [J]. China Metallurgy, 2006, 16(1): 35-38.