doi：10. 12068/j. issn. 1005－3026. 2026. 20240235

干式环辊磨机风环结构数值模拟及参数优化

罗 忠[1,2]，王浩彬[1,2]，李 雷[1,2]，张 震[1,3]
（1. 东北大学 机械工程与自动化学院，辽宁 沈阳 110819；2. 东北大学 航空动力装备振动及控制教育部重点实验室，辽宁 沈阳 110819；3. 大峘集团有限公司，江苏 南京 211112）

摘 要：干式环辊磨机作为粉磨系统的核心设备，其内流场的稳定性决定了粉磨系统性能的优劣，而风环结构作为关键部件之一对内流场影响较大. 然而在实际生产中风环结构的设计依赖于经验，且现阶段缺少针对性的研究. 为了揭示风环结构对内流场稳定性的影响机理，弥补设计缺陷，优化结构设计参数，对干式环辊磨机内流场进行数值模拟分析. 首先，构建干式环辊磨机的全流域计算模型，再结合正交实验设计不同风环下的数值模拟实验；接着对比各组实验的速度场、压力场结果，分析流场的变化趋势；最后，分析实验结果确定了各个结构参数的影响规律. 结果表明，风环结构对流场具有稳压和控制风速的作用，参数优化后的风环提高了流场稳定性，同时确定了最佳结构方案.

关 键 词：干式环辊磨机；风环结构；流场稳定性；数值模拟；正交实验
中图分类号：TD 454 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-3026(2026)04-0062-08

Numerical Simulation and Parameter Optimization of Air Ring Structure in a Dry Ring-Roller Mill

LUO Zhong[1,2], *WANG Hao-bin*[1,2], *LI Lei*[1,2], *ZHANG Zhen*[1,3]
(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion System, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Mountop Group Co., Ltd., Nanjing 211112, China. Corresponding author: LUO Zhong, E-mail: zhluo@ mail.neu.edu.cn)

Abstract: Dry ring roller is the core equipment of the grinding system, and the stability of its internal flow field determines the system's performance. The air ring structure, serving as a key component, significantly influences the internal flow field. However, current air ring structure designs primarily rely on empirical experience in practical production, with insufficient targeted research. To elucidate the influence mechanism of air ring structure on internal flow field stability, address design deficiencies, and optimize structural parameters, numerical simulation analysis of the internal flow field was implemented. Initially, a computational model of the entire flow domain was established, followed by an orthogonal experimental design for numerical simulations under different air ring configurations. Subsequently, comparative analysis of velocity fields and pressure fields across experimental groups was performed to investigate flow field variation trends. Finally, experimental results were systematically analyzed to determine the influence patterns of various structural parameters. Results demonstrate that the air ring structure plays a crucial role in pressure stabilization and airflow velocity control. The optimized air ring configuration significantly enhances flow field stability, with the optimal structural scheme being determined through the study.

Key words: dry ring-roller mill; air ring structure; flow field stability; numerical simulation; orthogonal experiment

收稿日期：2024-12-25
基金项目：国家自然科学基金资助项目(12272089).
作者简介：罗 忠(1978—)，男，内蒙古集宁人，东北大学教授，博士生导师.
通信作者：罗 忠，E-mail：zhluo@mail.neu.edu.cn.

干式环辊磨机(简称磨机)作为粉磨系统的核心设备,具有很强的综合性能,主要用于水泥生料、高炉矿渣等的粉磨,在国内外被应用于建材、水泥、化工、钢铁等多种行业.磨机通过气力输送原理实现物料的转运,其内部流场的稳定性直接影响磨机的工作状态,进而影响整个粉磨系统的生产效率.

近年来,国内外很多学者对磨机的内部流场稳定性开展了研究,并取得了一定的研究成果.研究主要分为两大类:一类是对磨机的选粉机段的局部流场分析,另一类是磨机整机的流场分析.在局部分析方面:文献[1-3]都采用CFD(computational fluid dynamics)技术进行仿真分析,揭示了不同选粉机结构参数对磨机流场稳定性的影响规律;Li等[4]发现分离区挡板角度的增加降低了分离区切向速度、增加了轴向速度,有利于粉体的分级;Yang等[5]、Mou等[6]分析了磨机分离器结构因素对颗粒分级流场的影响,得到了最优结构参数并进行了实验验证;Altun等[7]研究了实验级磨机的选粉机流场状态对颗粒分级性能的影响,并揭示了参数对选粉效果的影响规律.在磨机整机流场分析方面:张伟丽等[8]研究了系统风量对磨机流场的影响规律;文献[9-11]研究了工艺和结构参数对磨机整机流场的影响,并优化了设计方案;文献[12-13]通过构建整机数值模拟模型,揭示了影响因素,优化了磨机流场并进行了实验验证.

综合来看,国内外学者对磨机的流场分析做了详细的研究,然而对于风环这一关键结构缺少相关研究和探讨,其结构参数的变化对流场稳定性的影响机理不清晰.

本文以某型干式环辊磨机的风环结构为研究对象,采用数值模拟结合正交实验法对其结构参数展开研究,通过对比分析不同结构参数风环的速度场、压力场结果,结合正交实验的极差分析,揭示了各个结构参数对磨机流场稳定性的影响规律,优化了风环结构参数,为开发设计大型干式环辊磨机提供了分析方法和思路.

1　计算模型与控制方程

1.1　计算模型

本文所采用的干式环辊磨机模型由大峘集团有限公司提供,基于ANSYS2024平台,针对风环这一关键结构展开研究,探究其各个结构参数对磨机内部流场的影响规律,并进行参数优化设计.风环结构位于磨机的磨盘边缘,该处的风速大小直接决定了磨机分级选粉稳定性,风速过大会造成选粉机“跑粗”现象[14],影响产品质量,同时粗颗粒会重新落入磨盘被重复研磨,增加磨机能耗;而风速过小则符合粒径要求的颗粒无法被直接吹出,选粉效率因此降低,所以需要将磨盘边缘处风速控制在目标值.该磨机主要由进风管、磨盘、磨辊、中心锥斗、转轴、保护罩、动态选粉机、壳体和风环组成,简化后物理模型以及磨机内部流体运动方向如图1所示.磨机在工作时高速气流从两侧进风管处进入磨机腔体,经过风环后产生一个初始旋流,将磨盘边缘溢出的颗粒吹起,然后继续向上吹至选粉机处,颗粒在选粉机处被筛选,符合粒度要求的颗粒则在气流的曳力作用下被带着穿过选粉机静叶片、动叶片后从磨机出口吹出,进入外部收尘器被收集起来.

由于磨机体积庞大,几个关键部件中含有大量的薄片结构,结构尺寸相差较大,内部流道复杂,为了简化数值模拟的计算量,对磨机物理模型进行合理的结构简化,构建磨机内部全流域流场有限元模型进行仿真.

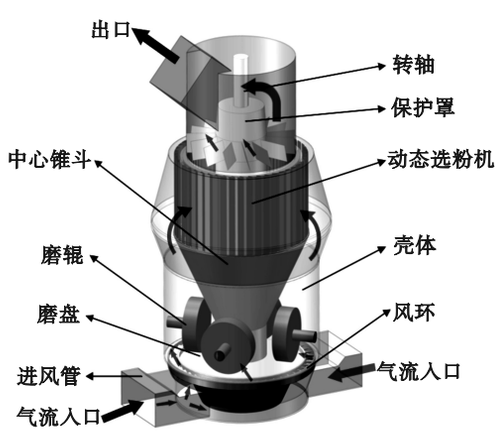


图1　干式环辊磨机简化后物理模型

Fig. 1　Simplified physical model of dry ring-roller mill

将简化几何模型导入SpaceClaim中抽取出磨机整机全流体域模型.动叶片属于薄片结构,为了在网格划分阶段尽可能提高网格的整体质量,将动叶片附近区域切分成单独的转动区域,采用多参考坐标系法[15]进行模拟,用转动区域的旋转模拟动转子的转动,则流体域模型由转动区域和静止区域两部分组成.接着将流体域模型导入Fluent中构建有限元模型进行仿真分析.为了减少网格数量,采用Fluent中的多面体网格进行网格划分.在相同网格分辨率下,采用多面体网格类型可以极大减少网格数量,数量通常为全四

面体网格的1/3左右,且有着很好的收敛性和求解精度.为了提高求解精度,在叶片、风环、导流片等薄壁结构处进行网格加密处理.磨机有限元模型如图2所示.

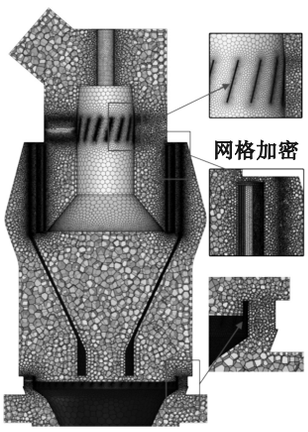


图2 干式环辊磨机有限元模型

Fig. 2 Finite element model of dry ring-roller mill

在有限元仿真中,划分的网格数量对数值模拟结果会产生很大影响,网格数量过少则模拟误差过大,网格数量过多则模拟时间较长,对计算资源要求较高,因此需要进行网格无关性验证[16].为此,本研究改变网格划分方案,划分了5种不同数量网格如表1所示.通过对比磨机进出口压差判断网格数量对数值模拟结果的影响.

表1 网格无关性验证

Table 1 Grid independence verification

网格数量/万个	403	459	501	556	612
进出口压差/Pa	2 237.2	2 280.6	2 331.6	2 335.8	2 337.4

由表1可知,当网格数量在501~612万个时,进出口压差变化不大,考虑到计算精度和计算资源,选择网格数量为556万个的网格划分方案进行模拟,网格全局正交质量控制在0.4以上.

1.2 控制方程

流体动力学涉及流体运动和相互作用,其过程错综复杂,但所有流体流动现象都遵循两个基本的物理定律:质量守恒定律和动量守恒定律.其中反映流体运动质量守恒的表达式称为质量守恒方程,又称为连续性方程[17],其表达式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho u_x\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\rho u_y\right)}{\partial y}+\frac{\partial\left(\rho u_z\right)}{\partial z}=0. \quad (1)$$

式中:u_x, u_y, u_z分别为x, y, z方向上的速度分量;t为流动时间;ρ为流体密度.

反映动量守恒的表达式为动量守恒方程,又称纳维-斯托克斯方程(N-S方程),其表达式为

$$\frac{\partial\left(\rho u_i\right)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho u_i u_j\right)}{\partial x_j}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\overline{\rho u_i' u_j'}\right). \quad (2)$$

式中:$-\overline{\rho u_i' u_j'}$为雷诺应力项,下标$i$,$j$分别为1,2,3;$\mu$为动力黏度,Pa·s.

这两个守恒定律为流体流动提供了理论基础,在工程应用中具有重要指导意义.

2 湍流模型建立与边界条件确定

2.1 湍流模型建立

流体的流动状态分为层流和湍流,通常通过计算流体的雷诺数Re来判断流动状态:

$$Re=\frac{\rho u d_{\mathrm{h}}}{\mu}, \quad (3)$$

$$d_{\mathrm{h}}=\frac{4S}{L}. \quad (4)$$

式中:ρ为流体密度,kg/m^3;u为流速,m/s;d_{h}为水力直径,m;S为边界截面积,m^2;L为边界流动域湿周长度,m.磨机内部空气温度取平均值100 ℃,此时μ=2.19×10^{-5} Pa·s.由于磨机内部为变直径结构,计算得出磨机各段流场雷诺数如表2所示.

表2 磨机内部流场雷诺数

Table 2 Reynolds number of flow field inside mill

位置	磨盘段	磨辊段	中间段	出口段
直径/m	7.16	8.41	7.96	5.96
风速/(m·s^{-1})	19.79	12.76	14.28	20.25
雷诺数	5.78×10^6	4.38×10^6	4.64×10^6	4.93×10^6

由表2可知,磨机内部流场的雷诺数远大于临界雷诺数2 300,以高雷诺数湍流为主.鉴于κ-ε模型在工程计算中对高雷诺数完全湍流具有良好的适用性,且磨机内部流场伴有中等强度的旋流,所以最终选用Realizable κ-ε湍流模型进行模拟.同时,采用可扩展壁面函数(SWF)以提高流场预测的计算精度与收敛性.

2.2 边界条件确定

1)入口定义.磨机入口边界条件类型定义为质量流量入口,空气密度ρ=0.95 kg/m^3,工作时两个进风管进风量Q=8.5×10^5 m^3/h,则单个磨机入口的空气质量流量q_1=Q·ρ/2=152.29 kg/s,进风口压强0 Pa.已知入口边界截面积S=5.28 m^2,边界流动域湿周长度L=10.46 m,u=Q/S=22.34 m/s.由式(3)和(4)得d_{h}=2.02 m,Re=19.58×10^5,由此可得湍流强度I=0.16$Re^{-0.125}$=0.026,湍动能κ=1.5$(uI)^2$=

0.51 m^2/s^2.

2）出口定义.磨机的出口边界条件类型定义为压力出口,出口压强为−2 300 Pa.

3）动叶片转动区域.对旋转区域进行多参考坐标系法设置,将转动区域转速设置为80 r/min,动叶片壁面设置为随相邻区域运动.在动转子叶片区域进行了网格加密,导致和磨机整体静止的流体域网格密度不同,无法共节点,所以在动叶片转动区域和静止区域的4个面上分别创建interface界面,实现两个区域重合面之间的数据传递,达到模拟流场流动的效果.

3　数值模拟结果及分析

将所建立的磨机有限元模型导入Fluent中,设定好边界条件后进行求解计算,待计算收敛后进行结果分析.

3.1　数值模拟实验设计

由于流场具有放大效应,即细微的结构变化会引起流场一些特定区域的能量和速度的显著变化,因此风环的各个结构参数如叶片数量、叶片偏转角度、叶片形状和叶片长度均会对流场稳定性产生较大影响.

考虑到磨机数值模拟计算时间较长,风环结构的影响因素较多,若全部展开仿真分析则工作量较大.为了节约计算资源和时间成本,采用设计正交实验的方式进行数值模拟分析.

本研究中有4个变量因子:风环的叶片数量、叶片偏转角度α、叶片形状和叶片长度L[18],每个变量分别取3次即为三水平,所以选取L9(3^4)的四因子三水平正交实验表.表3为考虑风环结构各个设计因子和水平的因子水平表.将各个影响因子和水平以及仿真所得风环处平均风速填入L9(3^4)正交实验表中得到表4.风环3种叶片结构的形状及设计参数如图3所示.

表3　风环结构正交实验因子水平表

Table 3　Factors in orthogonal experiments of air ring structure

因子水平	叶片数量(*A*)/片	偏转角度(*B*)/(°)	叶片形状(*C*)	叶片长度(*D*)/mm
1	45	30	直线形	420
2	50	45	圆弧形	500
3	55	60	S形	580

由此得到了9组不同数值模拟实验方案,按照9组模型对应参数修改模型后进行求解计算和结果分析.

表4　风环结构数值模拟正交实验表

Table 4　Orthogonal experiments for numerical simulation of air ring structure

实验号	因子				风环平均风速/(m·s^{-1})
	A	*B*	*C*	*D*	*V*
1	1(45)	1(30)	1(直线形)	1(420)	27.32
2	1(45)	2(45)	2(圆弧形)	2(500)	31.51
3	1(45)	3(60)	3(S形)	3(580)	43.43
4	2(50)	1(30)	2(圆弧形)	3(580)	29.36
5	2(50)	2(45)	3(S形)	1(420)	30.53
6	2(50)	3(60)	1(直线形)	2(500)	42.47
7	3(55)	1(30)	3(S形)	2(500)	28.37
8	3(55)	2(45)	1(直线形)	3(580)	30.81
9	3(55)	3(60)	2(圆弧形)	1(420)	40.99

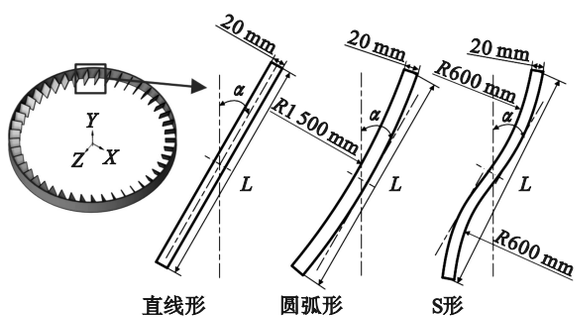


图3　风环叶片类型与尺寸参数

Fig. 3　Type and size parameters of air ring blades

为了探究风环对磨机流场的影响规律,参照文献[19]的方法,分别在磨机选粉机内和风环处进行数据采集分析.在选粉机内部创建两条中心对称线L_1L_2和L_3L_4,起止点坐标为L_1:(0,3 000,−1 400),L_2:(0,3 000,−2 850);L_3:(0,3 000,1 400),L_4:(0,3 000,2 850).在风环处也创建两条中心对称线P_1P_2和P_3P_4,起止点坐标为P_1:(−50,−7 500,−3 700),P_2:(1 100,−6 500,−3 700);P_3:(300,−7 500,3 700),P_4:(−850,−6 500,3 700).4条数据采集线位置分布如图4所示.其中,P_1P_2和P_3P_4下半段在风环内,上半段在风环外部,方便对比风环内和风环外的模拟结果.通过采集这4条线上的速度和压力分布信息对流场进行分析.

3.2　速度场分析

对比图5和图6磨机内部气流流动迹线图可以看出,有风环时磨机内部流场的流动比无风环时更加稳定,由此可见风环对入磨气流具有很好

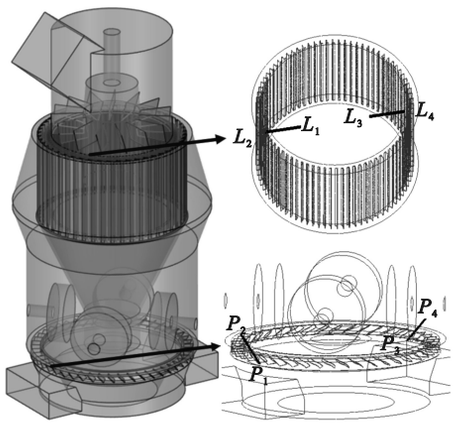


图4 4条数据采集线位置分布图

Fig. 4 Location distribution map of four data acquisition lines

的导流作用,可以改善风场分布,使气流流动更加均匀,减少了强迫涡流,而且让进入磨机的空气产生了一个初始的顺时针旋流,这将更有利于空气顺利地从静叶片缝隙间进入选粉机内部,减少了空气在静叶片附近撞击叶片时带来的大量能量损失,有利于提高磨机的整体运行稳定性.

从数值模拟结果可以看出风环对磨机内部风速的调控极为重要,尤其是在风环附近靠近磨盘边缘处,风环可以有效控制吹起物料时的初始风速,风环处风速的控制和稳定决定了磨机生产过程中产品的质量和工作效率.

风环处的风速分布范围较大,为了能够定量分析不同风环处的风速大小,所以采取在风环中心截面求取平均值的方式进行分析.在Fluent后处理模块CFD-Post中,可以通过插入截面来计算风环中间截面上的平均风速.图7为9组实验风环处速度云图和平均风速.

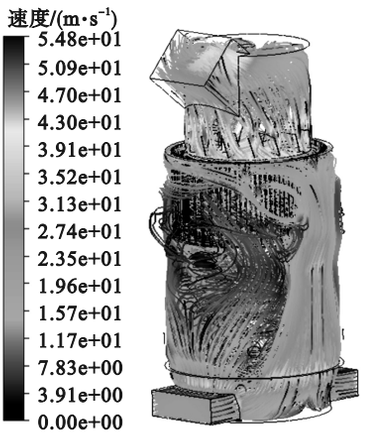


图5 无风环时气体流动迹线图

Fig. 5 Air flow trace diagram without air ring

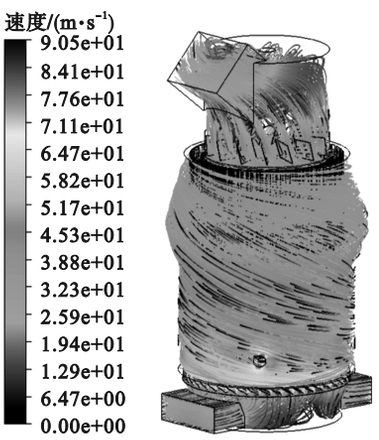
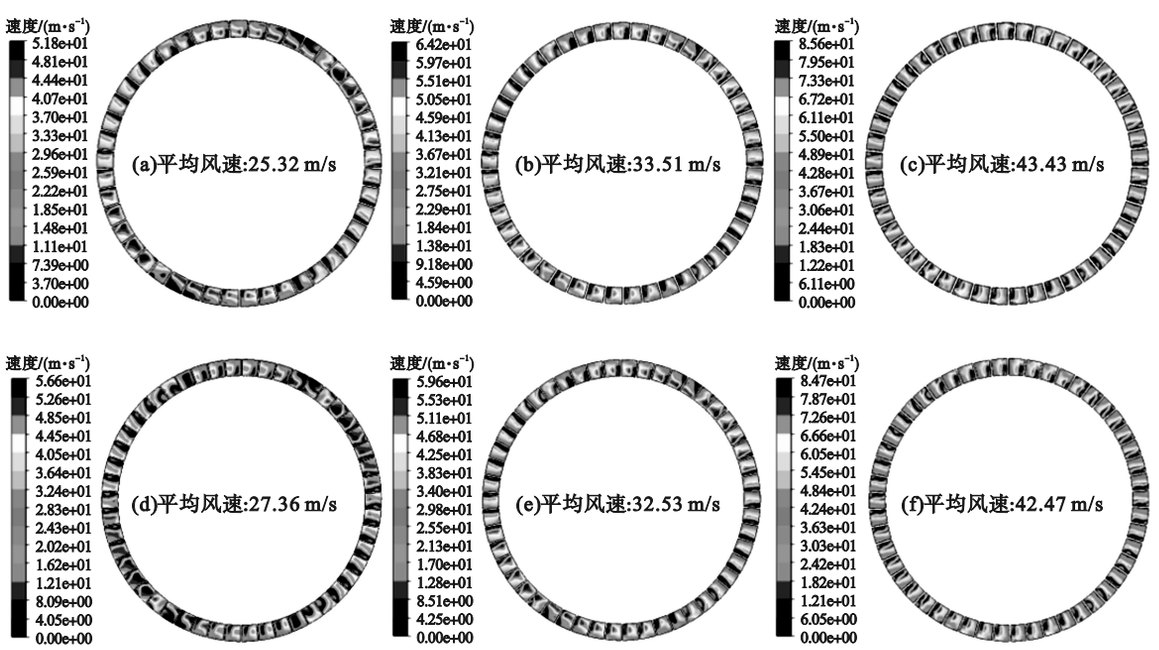


图6 有风环时气体流动迹线图

Fig. 6 Air flow trace diagram with air ring



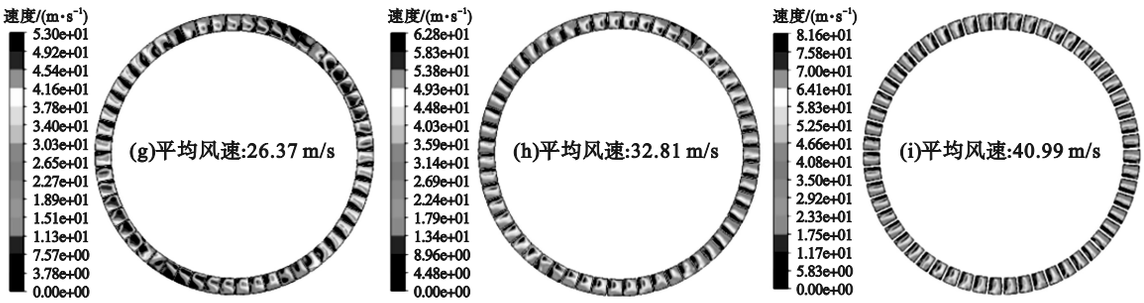


图7　9组仿真风环处平均风速与速度云图

Fig. 7　Average wind velocity and velocity cloud images at nine simulated air rings

(a)—实验1;(b)—实验2;(c)—实验3;(d)—实验4;(e)—实验5;(f)—实验6;(g)—实验7;(h)—实验8;(i)—实验9.

从云图中可以看出,9组风速的分布状态基本一致,每个风环的最大风速都大致位于风环的右上角和左下角,不在垂直方向上,这是由于气流在进入磨机两侧入口后产生了对撞,加上风环给气流提供了一个初始旋流,所以最大风速位置产生了一个顺时针方向上的中心对称的偏移.9组风环按照平均风速的大小分布大致可分为3类趋势:实验3,6,9高平均风速的为一类,均速都在40 m/s以上;实验5,8,2为一类,均速在32 m/s左右;低平均风速的实验1,7,4为一类,均速都不超过28 m/s.结合正交实验表可以看出,每类趋势中3个风环的叶片偏转角度都相同,由此可推断风环叶片偏转角是造成实验出现3种不同趋势的主要原因.

3种趋势对应的偏转角度分别为30°,45°和60°.随着叶片偏转角的增大,风环处的平均风速也越来越大,所以在实际工程运用中,当磨机进风量和转速不变时,可以通过调节风环叶片偏转角来调节风环处的风速,从而控制选粉质量范围和精度.从云图中还可以看出,低风速的3组实验,其风速的分布最不均匀,当叶片偏转角过小时,风环处的风速分布很不均匀,风环所起到的作用较小,对风速的控制作用较小,这将导致磨盘处颗粒的分级不稳定,影响边缘料层的均匀性,降低分选效率和成品合格率.

3.3　压力场分析

将4条数据采集线分为2 000个采样节点,并将所得压力和速度导出绘制成相应的曲线.图8为对称线L_1L_2和L_3L_4导出的选粉机段压力变化曲线图,从图中可以看出选粉机内部压力均为负压,这与实际情况相符,且压力曲线关于中心轴近似呈左右对称,但磨机为单侧出口,所以两边的压力曲线存在一定差值.L_2,L_4点处靠近动转子叶片,由于叶片的高速旋转对附近的空气进行强烈的挤压和碰撞,导致外侧压力高于中心L_1,L_3点处的近壁面压力.从高压到低压的压力分布有利于空气带动粉尘颗粒进入达到选粉的效果.图9和图10分别为对称线P_1P_2和P_3P_4上压力变化曲线图,从图中可以看出,对称位置上的压力分布趋势近似,气流在刚进入风环时由于流通空间很小,导致此处压力值最大,由于各组风环的结构不同,导致风环内的各组压力也不同.当气流穿过风环到达风环外后,压力出现趋于平稳的趋势,这是由于风环外的磨机腔体直径较大且保持不变,所以流体流动较为稳定,这说明风环对流场具有一定稳定作用.

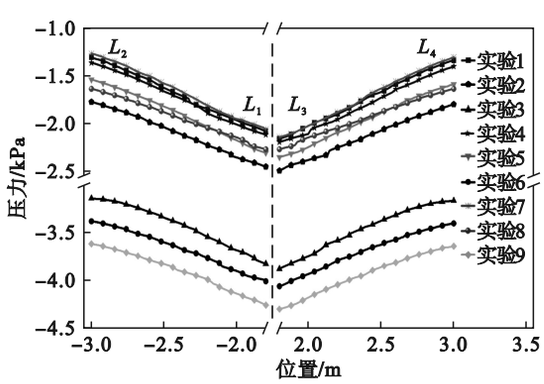


图8　选粉机段压力变化

Fig. 8　Pressure variation of separator section

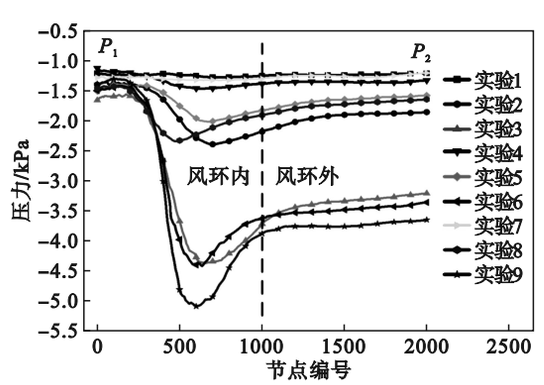


图9　对称线P_1P_2上压力变化

Fig. 9　Pressure variation on symmetric line P_1P_2

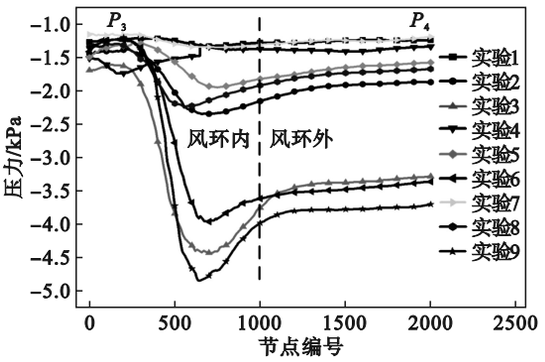


图10 对称线P_3P_4上压力变化

Fig. 10 Pressure variation on symmetric line P_3P_4

从图8~图10不难看出,9组压力分布大致可分为3组:压力最高的实验1,7,4为一组,实验5,8,2为一组,压力最低的实验3,6,9为一组,这与图6中风速反映的规律一致.随着叶片偏转角的增大,风环内部的压力变化幅值越来越大,流过风环后的压力越来越小,这说明压力损失随角度增大而增大.由伯努利方程可知,流体的压强与速度成反比,压力的变化规律也证明了风环对速度的影响规律.

3.4 正交实验结果分析

为量化各因子对实验结果的作用效果,对正交实验结果开展极差分析(range analysis,RA)与方差分析(analysis of variance,ANOVA)[20].通过极差分析计算可以初步判断出各因子的影响大小.仿真结果的极差分析如表5所示.

表5 仿真结果的极差分析

Table 5 RA of simulation results

因子	水平1均值	水平2均值	水平3均值	极差
A	34.09	34.12	33.39	0.73
B	28.35	30.95	42.30	13.95
C	33.53	33.95	34.11	0.58
D	32.95	34.12	34.53	1.58

极差越大,影响程度越大,由表5极差分析结果可以看出,各个影响因子的作用程度从大到小依次为:*B*>*D*>*A*>*C*.

正交实验需要利用方差分析检验各个因子对结果的显著性影响.方差分析中,总平方和、各因子平方和及误差平方和由式(5)~(7)分别计算得到.

$$\mathrm{SS_T}=\sum_{i=1}^{n}\left(V_i-\overline{V}\right)^2, \tag{5}$$

$$\mathrm{SS_{因子}}=r\sum_{j=1}^{k}\left(\overline{V}_j-\overline{V}\right)^2, \tag{6}$$

$$\mathrm{SS_E}=\mathrm{SS_T}-(\mathrm{SS}_A+\mathrm{SS}_B+\mathrm{SS}_C+\mathrm{SS}_D). \tag{7}$$

式中:V_i,$\overline{V}$,V_j分别为9组模拟所得风环平均风速、风速总均值、各因子水平均值;r为每个水平重复次数(此处取3).

总自由度$\mathrm{d}f_\mathrm{T}$=实验次数−1=8,因子自由度$\mathrm{d}f_K$=水平数−1=2,误差自由度$\mathrm{d}f_\mathrm{E}=\mathrm{d}f_\mathrm{T}-\sum\mathrm{d}f_K=0$.由于误差自由度为0,需要对方差进行修正,则将极差最小(最不显著因子)的因素C平方和(SS_C)并入$\mathrm{SS_E}$,即新误差=SS_C+0,新误差自由度=2.修正后结果方差分析如表6所示.查F分布表得临界值$F_{0.05}(2,2)=19$.

表6 仿真结果的方差分析

Table 6 ANOVA of simulation results

方差来源	平方和	均方	F值	显著性(α=0.05)
A	1.02	0.51	1.89	不显著(F<19)
B	330.02	165.01	611.15	显著(F>19)
D	4.06	2.03	7.52	不显著(F<19)
误差	0.53	0.27		

从表6中可以很明显地看出,因素B(叶片偏转角度)是影响最大的关键因素,各个影响因子从大到小依次为:*B*>*D*>*A*>*C*,这与极差分析结果一致.叶片偏转角度对风环处速度影响最大,偏转角在45°左右最好,这与前文的分析一致,因此在设计风环结构时优先要考虑叶片的偏转角度.叶片长度、叶片数量和叶片形状对风环风速的影响较叶片角度小,增加叶片数量和减少叶片长度时风速减小.因此,在入磨风量保持不变以及运行参数不变时,在设计阶段可以根据实际情况适当增加叶片数量和减少叶片长度控制风环处的风速稳定在所需要的值,同时能保证风环处压力的均匀性,减少风环处气流的压力损失,达到改善磨机流场稳定性的作用.叶片形状对风速的影响不大,考虑到加工成本和难度,选用直线形风环叶片.

从实际生产中了解到,该磨机所处工况下风环处的最佳风速为33 m/s,所以各因子水平均值越接近它越符合标准设计要求.由表5可以看出各因子的最优组合为$B_2D_1A_3C_1$,即最优方案的风环结构参数为:叶片数量55,偏转角45°,长度420 mm,直线形叶片.

4 结 论

1)以干式环辊磨机风环结构为研究对象,采用数值模拟方法,结合正交实验法对风环的结构

参数开展研究,发现风环结构对磨机的流场稳定性影响较大,具有稳压和控制风速的作用.

2) 风环叶片偏转角度、叶片长度、叶片数量、叶片形状对流场的影响程度依次降低.叶片偏转角度为45°时效果最佳,增加叶片数量和减少叶片的长度均能够减小风环处的风速,有利于控制风环处的风速稳定在目标值.

3) 通过数值模拟的方式揭示了风环结构参数对流场稳定性的影响规律并提出了最优方案,解决了风环结构设计依赖人为经验的问题,具有一定实际工程意义,并为后续研发大型磨机提供了借鉴方法和参考依据.

参考文献:

[1] 孟俊杰, 曹卫, 李德祥. 进风管尺寸对 V 型选粉机流体分布的影响[J]. 水泥工程, 2021 (2): 52-54.
(Meng Jun-jie, Cao Wei, Li De-xiang. Influence of inlet duct size on fluid distribution of V-type separator [J]. *Cement Engineering*, 2021 (2): 52-54.)

[2] 戴晓兵. V 型选粉机折流板结构对内部流场的影响[D]. 南京:南京航空航天大学,2016.
(Dai Xiao-bing. Effect of V type separator on the internal flow field [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.)

[3] 董汉政. O-SEPA 选粉机转子叶片与导风叶片对内部流场的影响分析[D]. 济南:山东科技大学,2019.
(Dong Han-zheng. Analysis of influence of rotor blades and air guide blades on internal flow field of O-SEPA separator [D]. Jinan: Shandong University of Science and Technology, 2019.)

[4] Li H X, Song Z H, Wang R X, et al. Study on the influence of baffle height and angle on the performance of coarse powder separator in power plant based on CFD-DPM method [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2024, 109: 109523.

[5] Yang D L, Xing B S, Li J P, et al. Experimental study on the injection performance of the gas-solid injector for large coal particles [J]. *Powder Technology*, 2020, 364: 879-888.

[6] Mou X L, Jia F C, Fang Y, et al. CFD-based structural optimization of rotor cage for high-efficiency rotor classifier [J]. *Processes*, 2021, 9(7): 1148.

[7] Altun O, Toprak A, Benzer H, et al. Multi component modelling of an air classifier [J]. *Minerals Engineering*, 2016, 93: 50-56.

[8] 张伟丽, 马国兴, 刘运华. 系统风量对立磨选粉机内部流场及颗粒分级筛选性能影响分析与研究[J]. 陶瓷, 2020 (3): 67-71.
(Zhang Wei-li, Ma Guo-xing, Liu Yun-hua. Analysis and research on the influence of system air volume on the internal flow field and particle classification and screening performance of griding and separator [J]. *Ceramics*, 2020 (3): 67-71.)

[9] 于永杰. 基于气固两相流的立磨整机流场及分级筛选性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2019.
(Yu Yong-jie. Study on flow field and grading screening performance of vertical roller mill based on gas-solid two-phase flow [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.)

[10] 杨宝惠. BGSM6026 型立式磨流场分析与结构优化[D]. 呼和浩特:内蒙古科技大学,2015.
(Yang Bao-hui. BGSM6026 type vertical mill flow field analysis and structure optimization [D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2015.)

[11] Ali M, López A, Pasha M, et al. Optimisation of the performance of a new vertical roller mill by computational fluid dynamics simulations [J]. *Powder Technology*, 2024, 433: 119282.

[12] Ze X B, Sun Y W, Wang W, et al. Analysis of gas–solid coupling flow field in a vertical roller mill under different gas fluxes [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2011, 225(1): 20-28.

[13] Huang R J, Ma Y S, Li H, et al. Operation parameters multi-objective optimization method of large vertical mill based on CFD-DPM [J]. *Advanced Powder Technology*, 2023, 34(6): 104014.

[14] Shang K, Li Y X, Xu X M, et al. Study on the flow field characteristics of bulk grain pipeline based on gas-solid heterogeneous coupling [J]. *Cogent Food & Agriculture*, 2023, 9(1): 2219472.

[15] Franzke R, Sebben S, Bark T, et al. Evaluation of the multiple reference frame approach for the modelling of an axial cooling fan [J]. *Energies*, 2019, 12(15): 2934.

[16] Zhao H C, Du M P, Gu C H, et al. Study on motion characteristics of filamentous biomass particles in a cyclone separator [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2024, 201: 242-256.

[17] Amani H, Alamdari E K, Moraveji M K, et al. Experimental and numerical investigation of iron ore pellet firing using coupled CFD–DEM method [J]. *Particuology*, 2024, 93: 75-86.

[18] Guo M, Yang L, Son H J, et al. An overview of novel geometrical modifications and optimizations of gas-particle cyclone separators [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 329: 125136.

[19] Liu C, Chen Z B, Zhang W L, et al. Effects of blade parameters on the flow field and classification performance of the vertical roller mill via numerical investigations [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020(1): 3290694.

[20] Mäkelä M. Experimental design and response surface methodology in energy applications: a tutorial review [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 151: 630-640.