

DOI: 10.19666/j.rlfed.202308127

分离器转速对中速磨煤机风粉分配的影响

屈子尧, 陈敏, 姚啸林

(西安热工研究院有限公司苏州分公司, 江苏 苏州 215153)

[摘要] 针对磨煤机内部流场复杂且不均匀的问题, 通过建立完整的中速磨煤机模型, 采用 CFD 软件求解磨煤机内部流动方程, 利用 DPM 迭代获取颗粒流动参数, 探究了不同动态分离器转速下中速磨煤机内部流动情况和出口风粉分配特性。研究表明: 一次风在磨煤机出口 4 根出粉管处分配特性较好且与试验结果相吻合; 煤粉粒径较小时, 4 根出粉管的煤粉质量流量偏差较小, 且随动态分离器转速提高变化不明显; 随着粒径的增加, 煤粉颗粒运动轨迹呈现为贴壁运动, 4 根出粉管的煤粉质量流量偏差逐渐增大; 同时对于大粒径煤粉颗粒, 随着动态分离器转速提高, 4 根出粉管煤粉质量流量偏差逐渐降低。

[关键词] 中速磨煤机; 动态分离器; 风粉分配; DPM

[引用本文格式] 屈子尧, 陈敏, 姚啸林. 分离器转速对中速磨煤机风粉分配的影响[J]. 热力发电, 2024, 53(4): 141-149. QU Ziyao, CHEN Min, YAO Xiaolin. Influence of separator rotation speed on air-powder distribution in medium-speed coal pulverizer[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(4): 141-149.

Influence of separator rotation speed on air-powder distribution in medium-speed coal pulverizer

QU Ziyao, CHEN Min, YAO Xiaolin

(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. Suzhou Branch, Suzhou 215153, China)

Abstract: Aiming at solving the problem of complex and uneven flow field inside the coal pulverizer, a complete model of medium-speed coal pulverizer was established. The CFD software was used to solve the internal flow equation of the coal pulverizer. Moreover, DPM iteration was used to obtain particle flow parameters, and the internal flow of the medium-speed coal pulverizer and distribution characteristics of outlet air-powder at different rotation speeds of dynamic classifier were explored. The results showed that, the distribution characteristics of primary air at four pulverizer outlets were good and consistent with the test results. When the powder diameter was small, the powder mass flow deviation at four pulverizer outlets was small, and the fluctuation was not obvious with the increase of the rotation speed of the dynamic classifier. With the increase of powder diameter, the motion trajectory of powder showed a wall adherent motion, and the powder mass flow deviation at four pulverizer outlets gradually increased. Furthermore, for coal particles with large diameters, with the increase of the rotation speed of the dynamic classifier, the powder mass flow deviation at four pulverizer outlets gradually decreased.

Key words: medium-speed coal pulverizer; dynamic classifier; distribution of air-powder; DPM

磨煤机由于结构的不对称性, 如单侧进风、磨辊与出粉管数量不对等, 致使其内部流场复杂且不均匀。同时, 磨煤机内风粉流动剧烈, 致使局部静风环区域磨损严重, 增大了风环区域漏风率^[1], 使得磨煤机内部流场均匀性进一步降低。磨煤机内部流场不均匀将导致磨煤机输粉管中煤粉质量浓度产生偏差, 进

而引起锅炉内燃烧中心发生偏斜, 带来局部水冷壁高温腐蚀; 还将造成两侧烟道流量偏差, 导致主蒸汽和再热蒸汽的温度偏差, 影响整体发电效率。此外, 风粉分配不均匀导致单一燃烧器附近区域气氛调整困难, 容易造成 NO_x 排放质量浓度超标^[2-4]。

工程实践证明, 对锅炉一次风送粉管道内的风

收稿日期: 2023-08-30

第一作者简介: 屈子尧 (1998) 男, 硕士研究生, 主要研究方向为磨煤机内部流场数值模拟, quziyao@tpri.com.cn。

速和煤粉浓度进行实时调整,可以降低一次风速和煤粉浓度的分配偏差,从而满足炉膛内煤粉分布均匀性要求^[5-7]。目前,工程上一次风送粉管道内风速和煤粉浓度的均衡调节主要通过 2 种方式实现:一是采用节流元件,如可调缩孔和节流孔板等^[8],通过平衡各支管间的流动阻力,实现支管间的风速与煤粉浓度均衡,但这种方式可能会造成一些不利影响,如可调缩孔壳体积粉、易卡涩,并且长期积粉还易导致自燃,调节线性差,以及无法连续调节等^[9-10];二是在煤粉进入并列支管前,设置煤粉分配器,将煤粉颗粒均匀分散^[11]。

同时,通过改进分离器改善出粉管风速与煤粉分配性能的相关研究也吸引了科技工作者的关注。Barranco 等人^[12]针对不同性能静态分离器和动态分离器对锅炉燃烧的影响进行试验,通过选取高性能动态分离器,改善了煤粉粒径分布,从而使燃烧效率得到了明显提高。Li 等人^[13-14]提出通过提高一次风量和磨辊载荷改善分离器性能,对于粒径较大的颗粒具有良好的效果。解其林^[15]在 MPS 中速磨煤机静态挡板式分离器上增加转子动叶轮,通过增加煤粉分离过程的离心力作用调节分离器性能。邹磊等^[16]对电厂磨煤机进行改造,将离心式分离器替换为动态分离器,各粉管煤粉分配偏差明显减小。叶如祥与刘川槐^[17]对分离器结构进行改造,采用固定叶片分离结构和流道设计,使进入分离器的风粉混合物经历 2 次分离,风粉混合物在分离器中的流动路径和停留时间均有减少,显著降低了磨煤机的平均压差和一次风母管压力。王涛等^[18]采用单因素试验方法,通过实验测量和计算得出直吹式制粉系统风量和煤粉浓度的分配特性,结果表明,分离器转速的提高能够有效降低磨煤机出口输粉管道的风速和煤粉偏差。

尽管通过对预设测点以及磨煤机出入口进行实验测量可以得到磨煤机改造前后的颗粒粒径分布、一次风速、压力损失,然而,单纯依靠实验研究难以全面掌握磨煤机内部的流态以及磨煤机风粉分配受操作参数和几何结构的影响机制,因此,一些学者针对磨煤机内部流场开展了数值模拟。李小燕等^[19]对 EM125 型磨煤机中下部磨腔流场开展数值模拟,分析了不同风量时的磨粉效率,但对磨煤机构建几何模型时忽略了分离器部分。朱宪然等^[20-21]对磨煤机构建几何模型时忽略了分离器结构以及磨辊结构,仅考虑了入口一次风道、一次风室、风环及上部的流通空间,通过基于欧拉-拉格

朗日方法的数值模拟,得到了颗粒粒径和密度对石子煤排放特性的影响。何亚群等^[22]数值模拟获得了分离比率与煤粉粒径的函数关系,与试验结果吻合良好。张峰彬等^[23]数值模拟了静态分离器处气流和不同粒径煤粉的运动轨迹,指出分离器内锥体上部存在短路气流,下部存在绕中心轴线的涡流,涡流对颗粒具有分散作用。董素艳等^[24]建立了包含动态分离器的较为完整的中速磨煤机几何模型,对磨煤机内部流场和煤粉颗粒的运动特性进行数值模拟,分析了煤粉分离效率随动态分离器转速的变化关系,但并未对风粉分配特性进行研究。

本文将采用数值模拟方法,针对内构件与结构完整的 HP1003 型磨煤机内部气固两相流场开展模拟分析,重点探讨磨煤机内部元件对磨煤机内气流特性和煤粉颗粒运动行为的影响规律,获得一次风和不同粒径煤粉颗粒在出粉管的分配情况,进而探讨动态分离器转速对磨煤机出口风粉分配的影响规律,以期为工程实际中动态分离器转速的选择与调整提供科学依据。

1 模型与方法

1.1 磨煤机几何模型

本文研究对象 HP1003 型中速磨煤机的几何模型如图 1 所示,其中图 1a)、图 1b)、图 1c)分别为磨煤机几何模型中磨煤机主体、动态分离器、静态分离器的结构。由图 1 可见,磨煤机几何模型包含了风环、磨辊、静态分离器、动态分离器、落煤管、出粉管等磨煤机本体重要构件。同时,为节省计算资源,忽略了一次风室以及风环导流板,认为一次风由风环通风截面直接进入,通过设置入口的切向风速模拟导流板的导流作用。气流与煤粉颗粒的运动过程可描述为:一次风从风环直接进入磨煤机内,由于风环导流板使气流发生偏斜,一次风呈螺旋状带动煤粉颗粒向上运动,风粉混合物经过磨辊区域以及内锥体外侧区域到达静态分离器,此时一次风所提供的动能不足以使大粒径煤粉颗粒继续运动,因此部分颗粒在此处返回磨煤机下部区域完成一次分离;同时大粒径煤粉颗粒与静态分离器叶片碰撞概率更大,受碰撞后返回磨煤机下部完成二次分离;随后,风粉两相流到达动态分离器在离心力作用下进行进一步分离,筛选出的合格煤粉随一次风流出磨煤机。此外,图 1b)、图 1c)所示的动态和静态分离器中,挡板叶片数目均为 30 个,叶片倾角均为 45°。

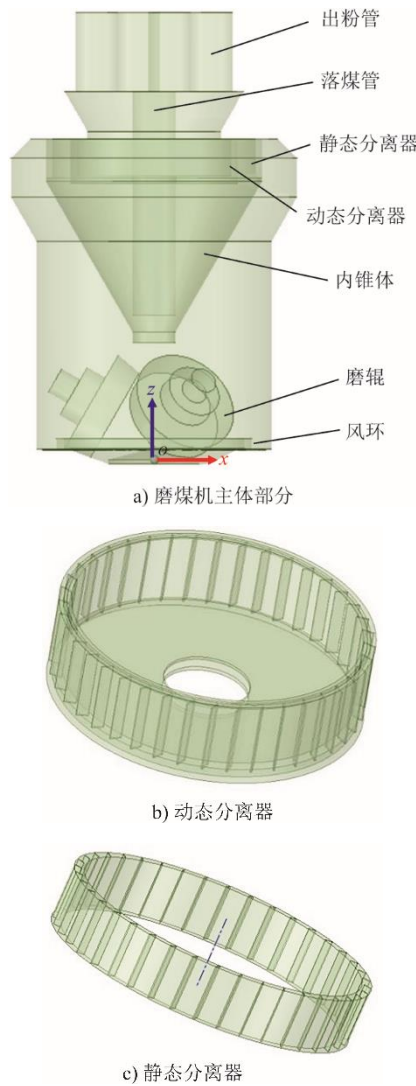


图 1 中速磨煤机几何模型

Fig.1 Geometric model of the medium-speed coal pulverizer

图 2 给出了磨煤机 4 根出粉管及 3 根出粉管沿周向均匀布置的 2 种布置方式，根据各出粉管主体所在象限，依次对其编号。

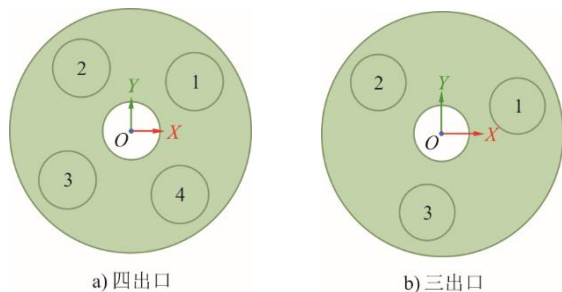


图 2 出粉管编号

Fig.2 The number of pulverizer outlets

1.2 气相场数学模型

磨煤机内部流动为复杂的三维湍流，一次风速

度变化剧烈，部分区域涡流现象明显，基于此，采用 realizable $k-\varepsilon$ 模型对气相场进行建模，其 k 方程与 ε 方程可写为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} P_b + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中： ρ 为气相密度； μ 为动力黏度； μ_t 为湍流黏度； P_k 为由平均速度梯度而产生的湍流动能； P_b 为由浮力影响产生的湍流动能； Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响； S 为平均应变率张量的模量； C_1 、 C_2 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 、 σ_k 为模型常数，其中， $C_2=1.9$ 、 $C_{1\varepsilon}=1.44$ 、 $\sigma_k=1.0$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 取决于主流方向，当主流方向与重力方向平行时 $C_{3\varepsilon}=1$ ，当主流方向与重力方向垂直时， $C_{3\varepsilon}=0$ ； S_k 和 S_ε 为用户自定义源项。对于磨煤机内部气相场的模拟，可将流体视为不可压缩流体，故 $P_b=0$ ， $Y_M=0$ 。

C_1 的表达式为：

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (3)$$

其中，

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (5)$$

μ_t 的表达式为：

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

其中，

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k U^*}{\varepsilon}} \quad (7)$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \Omega_{ij} \Omega_{ij}} \quad (8)$$

$$\Omega_{ij} = \Omega_{ij} - 2 \varepsilon_{ijk} \omega_k \quad (9)$$

$$\Omega_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk} \omega_k \quad (10)$$

A_s 的表达式为：

$$A_s = \sqrt{6} \cos \phi \quad (11)$$

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W) \quad (12)$$

$$W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{S^3} \quad (13)$$

$$S = \sqrt{S_{ij} S_{ij}} \quad (14)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (15)$$

式中： $A_0=4.04$ ； $\overline{\Omega}_{ij}$ 为从角速度 ω_k 的参考系中观察到的时均转动速率张量； S_{ij} 为平均应变率张量。

1.3 煤粉颗粒运动模型

由于磨煤机内煤粉所占体积分数小于 10%，建模时可以忽略颗粒之间的碰撞作用，采用离散相模型（discrete phase model, DPM）描述煤粉颗粒的运动。煤粉在磨煤机内部运动受到曳力、重力、浮力作用，颗粒的运动方程为：

$$m_p \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}_d + \mathbf{g} \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (16)$$

式中： m_p 为颗粒质量； \mathbf{v} 为颗粒速度； \mathbf{g} 为重力加速度； ρ_p 和 ρ 分别为颗粒和空气的密度； \mathbf{F}_d 为颗粒所受到的曳力，其表达式为式(17)。

$$\mathbf{F}_d = \frac{1}{\tau_p} m_p (\mathbf{u} - \mathbf{v}) \quad (17)$$

式中： τ_p 为颗粒弛豫时间，其表达式为式(18)。

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \quad (18)$$

式中： d_p 为颗粒的直径。

1.4 数值模拟方法与条件

动态分离器旋转区域采用多重参考系模型，旋转方向为俯视逆时针方向，基于 Ansys Fluent 软件，采用 SIMPLE 算法求解气相场。在气相场计算收敛后，采用锥面射入方式，在风环喷口截面添加密度为 $1\ 800\ \text{kg/m}^3$ 的煤粉颗粒，并求解煤粉颗粒的运动轨迹。数值模拟采用的边界条件与初始条件见表 1。其中，一次风入口采用极坐标参考系进行设置，轴向速度 v_z 与切向速度 v_t 均为 $23.9\ \text{m/s}$ ，对应的一次风量为 $100\ \text{t/h}$ 。

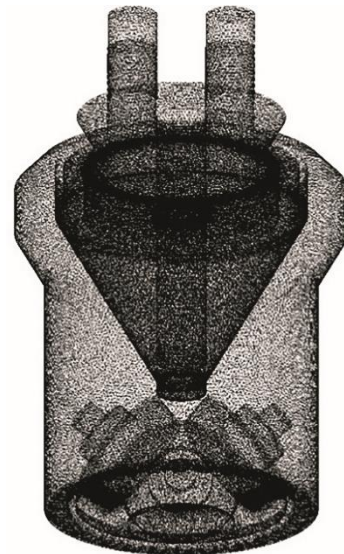
表 1 边界条件
Tab.1 Boundary conditions

	进口	出口	壁面
气相	速度进口 $v_t = 23.9\ \text{m/s}$ $v_z = 23.9\ \text{m/s}$	压力出口 $p=101\ 325\ \text{Pa}$	无滑移边界
颗粒相	锥面入射 $d_p = 5、10、20、50、100\ \mu\text{m}$	自由出流	反弹边界

2 网格无关性验证

图 3 给出了磨煤机主体部分、动态分离器、静

态分离器处网格划分情况。采用四面体网格对模拟区域进行网格划分，并对动态分离器、静态分离器挡板叶片处进行局部网格加密，网格数目共计 828 万。



a) 磨煤机主体部分



b) 动态分离器



c) 静态分离器

图 3 中速磨煤机网格划分
Fig.3 Mesh generation for the medium-speed coal pulverizer

在 566 万、828 万、1 109 万、1 283 万网格数目下开展数值模拟，得到的各出粉管竖直方向气流速度分量如图 4 所示。由图 4 可见，当网格数目由 566 万增加到 828 万，磨煤机出粉口竖直方向气流速度分量变化较大，继续增加网格数目，竖直方向气流速度分量几乎不发生变化。因此，为了节省计算资源，采用 828 万网格进行模拟计算。

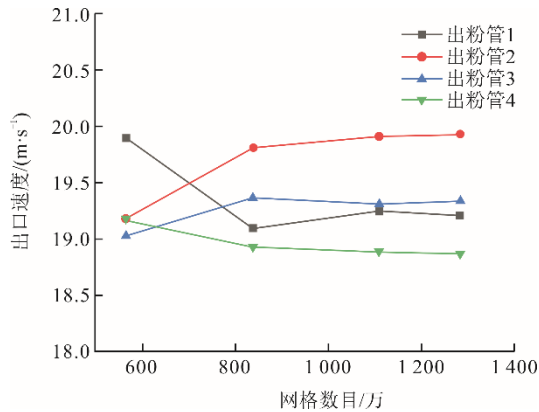


图 4 不同网格数目下出粉管气流轴向速度
Fig.4 Axial velocity of the air at pulverizer outlets with different grid numbers

3 结果与讨论

3.1 磨煤机气相场

图 5 给出了分离器旋转角速度分别为 2、3、4、5 rad/s 时，磨煤机各粉管流量的相对偏差。由图 5 可见：磨煤机各出口一次风流量相对偏差较小，模拟条件下一次风流量相对偏差范围为-0.2%~0.4%；随着动态分离器转速的提高，流量偏差范围进一步缩小。这是因为湍流具有扩散效应，在湍流作用下，流体质点的脉动使得流体分布迅速变得均匀，从而各粉管流量的相对偏差小。

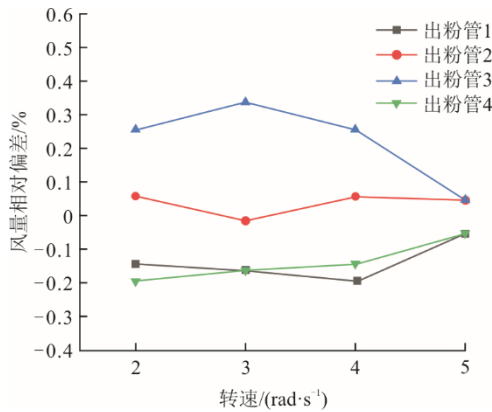
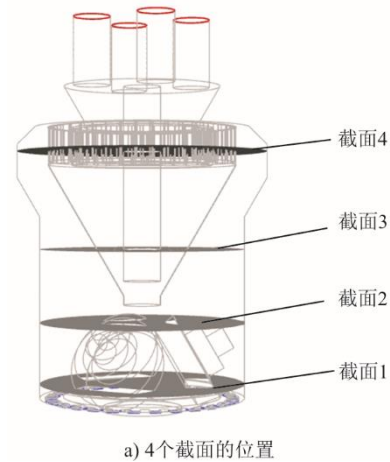


图 5 不同动态分离器转速下粉管出口流量偏差
Fig.5 The flow rate deviation at pulverizer outlets at different rotation speeds of the dynamic classifier

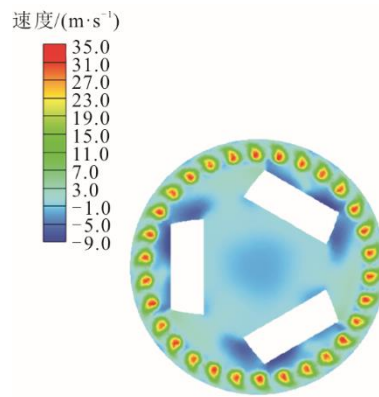
图 6 给出了动态分离器转速为 2 rad/s 时磨煤机粉管横截面垂直方向气流速度分量的分布云图。其中，图 6a)示出了选取的 4 个截面，分别为风环上方截面（截面 1）、磨辊上方截面（截面 2）、内锥体截面（截面 3）以及分离器进口截面（截面 4）。由图 6b)可见，在磨辊区域气流流速分布很不均匀，这是风环结构和磨辊结构共同作用的结果，已有

研究也发现在风环上部存在流场分布不均匀的问题^[25-26]。由图 6c)可见，受磨辊安装位置的影响，中心区域存在回流，受风环喷嘴布置的影响，在壁面附近存在向上的高速气流区。图 6d)的结果表明，气流到达内锥体区域截面 3 位置时，其在周向的分布已趋于均匀。图 6e)的结果表明，在分离器进口截面，气流速度周向分布已完全分布均匀。分离器进口截面的气流均匀是磨煤机粉管出口气流偏差小的直接原因。

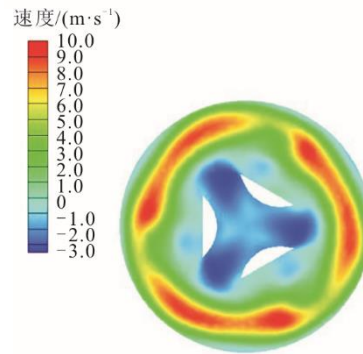
图 7 给出了不同分离器转速下分离器截面速度矢量图。



a) 4 个截面的位置



b) 截面1轴向速度分布



c) 截面2轴向速度分布

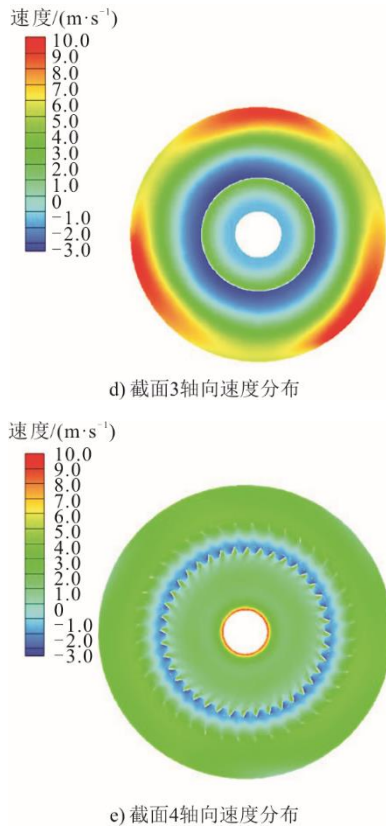


图 6 磨煤机各横截面气流轴向速度分布云图
Fig.6 Contour of axial velocity of the air at different cross sections of the coal pulverizer

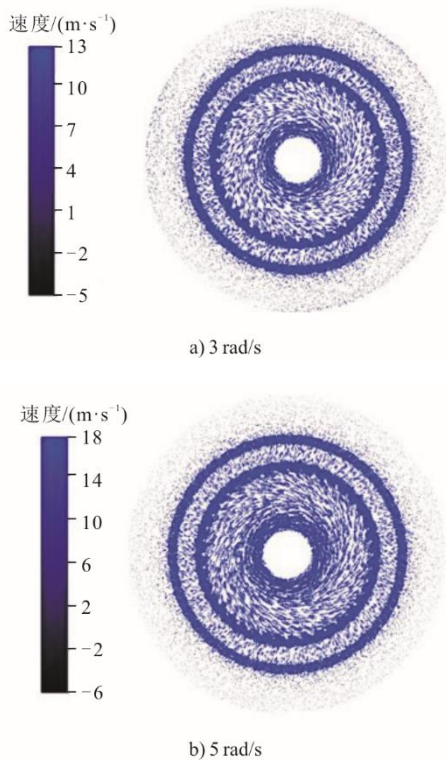


图 7 不同转速下分离器截面速度矢量
Fig.7 Velocity vectors at cross section of the classifier at different rotation speeds of the dynamic classifier

由图 7 可见,气流沿径向进入静态分离器区域,经过动静分离器之间的区域,进入动态分离器。在动态分离器内,气流存在显著的切向运动,且随着动态分离器转速的提高,一次风在进入动态分离器时获得的切向速度增加,气流的旋转效应更加显著。可以推测,分离器在较高的旋转速度下对颗粒的混合作用和吸附作用均有加强。

图 8 给出了模拟数据与某电厂 HP1003 型中速磨煤机冷态试验数据对比。该试验中,磨煤机型号及一次风流量与模拟条件一致。实际上,由于磨煤机内部流动与理想情况存在差异,在试验工况下,磨煤机各出口管道的沿程阻力不全相同,内部结构受煤粉颗粒的碰撞侵蚀也使得磨煤机内部结构在各个方向上存在差异,因此测量结果也会较模拟结果有一定的偏差。在误差允许范围内,试验结果表明磨煤机出口一次风流量分配较为均匀,该趋势与模拟结果吻合。可见在单相流动下,磨煤机出口分配特性较好。

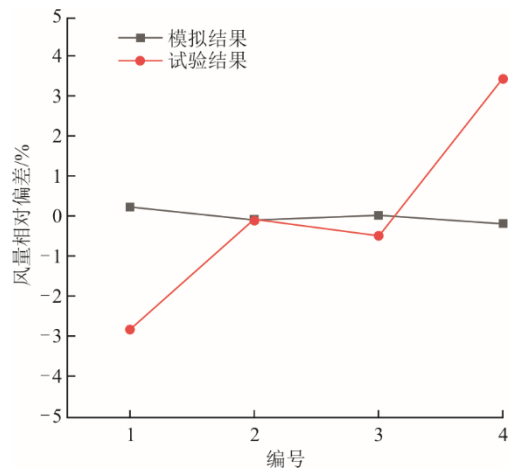


图 8 出粉管流量相对偏差的数值结果与试验结果
Fig.8 The numerical results and experimental results of the relative deviation of flow rate at the pulverizer outlets

3.2 磨煤机煤粉分配分析

表 2 为动态分离器转速为 0,且煤粉直径为 100 μm 时磨煤机各粉管出口的颗粒质量流量。由表 2 可见,当磨煤机出口粉管布置方式采用图 2a)中四出口粉管布置时,各出粉管煤粉流量偏差较大,最大偏差达到 13.83%;而当磨煤机出口粉管布置方式采用图 2b)中三出口布置时,磨煤机粉量相对偏差最大仅为 2.56%,各粉管粉量偏差显著减小。说明磨煤机磨辊结构与出粉管结构相对位置不对称是磨煤机出口煤粉分布不均的原因之一。

表 2 三出口与四出口磨煤机各出口粉量偏差及方差
Tab.2 The deviation and variance of powder mass-flow at each outlet of the three-outlet and four-outlet coal pulverizers

	出粉管 1 /%	出粉管 2 /%	出粉管 3 /%	出粉管 4 /%	方差
三出口	2.56	-0.12	-2.44		0.02
四出口	13.83	-12.10	3.17	-4.90	0.09

图 9 为磨辊处磨煤机竖直截面速度云图。由图 9 可见，磨辊的存在改变了磨煤机内速度分布情况，煤粉颗粒随气流经过磨辊区域时也受磨辊位置影响，且受磨辊附近回流区的影响在此处进一步聚集。同时煤粉颗粒扩散性相较于空气较差，无法同一次风从图 6c)到图 6d)处般迅速扩散而逐渐趋向于均匀。当出口为四出口通道时，煤粉流出磨煤机时无法均匀分布到 4 根出粉管上。

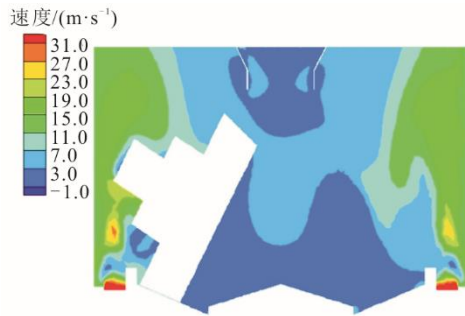


图 9 磨煤机竖直截面速度云图
Fig.9 Contour of velocity at vertical sections of the coal pulverizer

图 10 为各粒径煤粉颗粒在磨煤机内部的流动轨迹，以颗粒运动时间 t_p 进行渲染。由图 10a)可以看到，小颗粒煤粉受气流携带在磨煤机内部空间呈螺旋状向上运动，经过静态分离器和动态分离器到达磨煤机出口。由图 10b)和图 10c)可知，随着煤粉粒径的增加颗粒表现为贴壁运动，这是因为颗粒所受曳力与粒径的平方成正比，而所需的向心力与粒径的立方成正比，随着粒径增大，气流曳力提供的向心力小于颗粒维持圆周运动所需的向心力，因此表现为离心运动。

图 11 为动态分离器旋转角速度为 3 rad/s 时，5、10、20、50、100 μm 煤粉颗粒各出口管道粉量相对偏差。由图 11 可知：对于粒径较小的颗粒，由于其具有较好的气流跟随性，且在螺旋向上运动过程中阻力较小，因此各粉管流量偏差相对较小；而 50、100 μm 粒煤粉质量流量偏差显著增加，流量偏差的方差也随着粒径的增加逐渐增加。这是因为随着煤

粉粒径增大，煤粉具有更大的惯性，不能在流经磨辊区域后随气流迅速扩散，同时煤粉进行贴壁运动，增加了运动的阻力，扩散能力进一步降低。

因此，大粒径煤粉是煤粉质量浓度分配不均的重要因素，在工程实际中合适的粒径分布有利于改善磨煤机出口粉量分配问题。

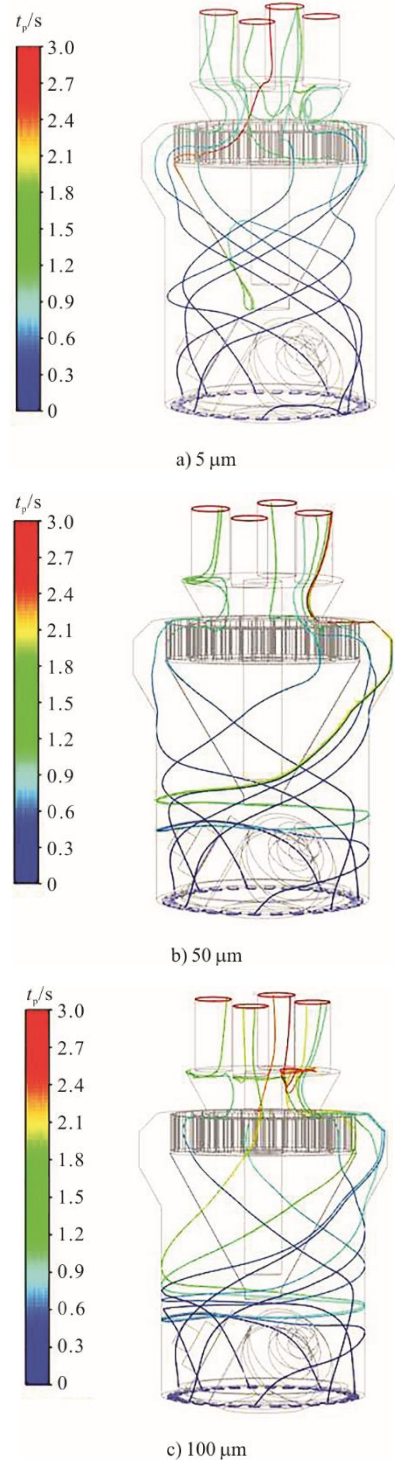


图 10 不同粒径颗粒运动轨迹
Fig.10 Trajectories of the particles with different diameters

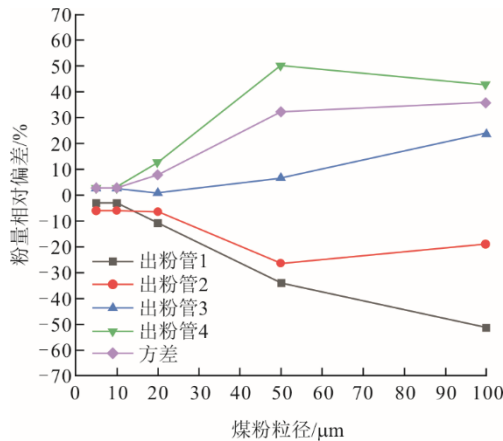


图 11 不同粒径下各出粉管道煤粉质量流量相对偏差
Fig.11 Relative deviation of mass flow rate of the coal particles with different sizes at each outlet

图 12 为煤粉颗粒直径为 50 μm 时不同分离器转速下各出口煤粉质量流量偏差。由图 12 可知, 随着分离器转速提高, 磨煤机各出口煤粉质量浓度相对偏差的方差逐渐减小。这是因为随着动态分离器转速提高, 气流切向速度增加, 旋转效应增强, 气流混合区逐渐扩大, 煤粉在该区域充分混合后随气流离开磨煤机, 从而减小了各出口煤粉质量流量偏差, 优化了煤粉分配情况, 但是各出口的煤粉偏差仍处于一个较高值。

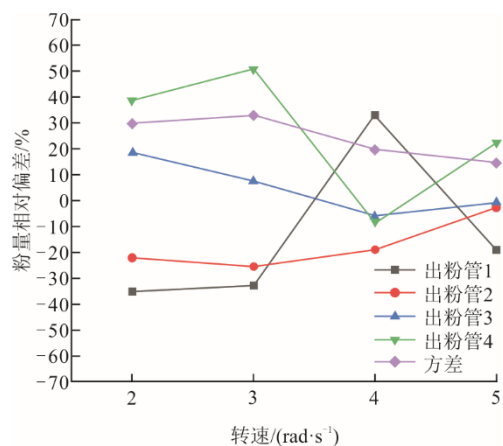


图 12 不同分离器转速下各出口煤粉质量流量偏差
Fig.12 Relative deviation of mass flow of the coal particles at each outlet with different classifier rotation speeds

因此, 动态分离器可以一定程度上改善较粗煤粉在出粉管分布情况, 但无法解决分配不均的问题, 综合考虑分离器转速对分离效率及电耗率影响, 本模拟可以为分离器转速选择提供一定的参考价值。

4 结 论

1) 一次风在流经磨辊区域后趋向均匀, 在 4 根

出粉管出口流量偏差较小, 这与试验结果相吻合。随着动态分离器转速提高, 4 根出粉管的气流流量偏差进一步降低。动态分离器区域内旋转效应增加, 更有利于煤粉颗粒的混合。

2) 中速磨煤机内部结构不对称是磨煤机出口煤粉分配不均的重要原因之一, 且随着煤粉粒径的增加, 气流跟随性降低, 同时曳力不足以提供向心力使煤粉颗粒呈现贴壁运动, 这增大了煤粉运动的阻力, 出口煤粉质量流量偏差进一步增加。

3) 小粒径煤粉颗粒在出分管分布相对均匀。对于大粒径煤粉颗粒, 提高动态分离器的转速可以有效改善各出粉管煤粉分配偏差, 因此寻找合适的分离器转速以及煤粉细度分布是改善磨煤机出口煤粉分配的方法之一。

[参 考 文 献]

- [1] 王士强, 田航, 贺岚清. ZGM113 型中速磨煤机流场优化改造[J]. 发电设备, 2021, 35(4): 292-296.
WANG Shiqiang, TIAN Hang, HE Lanqing. Optimization and retrofit for flow field of a ZGM113 medium-speed coal mill[J]. Power Equipment, 2021, 35(4): 292-296.
- [2] 岑可法, 周昊, 池作和. 大型电站锅炉安全及优化运行技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 1.
CEN Kefa, ZHOU Hao, CHI Zuohe. Boiler safety and optimized operation technology for large power stations[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003: 1.
- [3] 刘富爽, 赵军, 胡寿根. 格栅型煤粉分配器气固两相流的数值模拟[J]. 节能技术, 2017, 35(4): 326-329.
LIU Fushuang, ZHAO Jun, HU Shougen. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow in grille pulverized coal distributor[J]. Energy Conservation Technology, 2017, 35(4): 326-329.
- [4] 张沪香. 改善煤粉分配均匀性措施的研究[J]. 华电技术, 2010, 32(2): 29-30.
ZHANG Huxiang. Research on measures to improve the uniformity of pulverized coal distribution[J]. Huadian Technology, 2010, 32(2): 29-30.
- [5] 张宁. 风粉在线监测系统 in 青山热电厂 8 号炉的应用[J]. 湖北电力, 2003(2): 42-43.
ZHANG Ning. Application of on-line monitoring for air/pulverized coal in No.8 boiler of Qingshan Power Plant[J]. Hubei Electric Power, 2003(2): 42-43.
- [6] 崔方辰, 朱寿军. 锅炉燃烧风粉在线监测与燃烧运行优研究[J]. 中国石油大学胜利学院报, 2006(3): 13-14.
CUI Fangchen, ZHU Shoujun. Online monitoring of boiler combustion powder and excellent research on combustion operation[J]. Journal of Shengli College China University of Petroleum, 2006(3): 13-14.
- [7] 王占平, 杨斌, 杨飞, 等. 电站锅炉直吹式制粉系统一次风速测量与调整[J]. 锅炉技术, 2017, 48(3): 6-10.
WANG Zhanping, YANG Bin, YANG Fei, et al. Power station boiler direct blowing milling system primary

- wind speed measurement and adjustment[J]. Boiler Technology, 2017, 48(3): 6-10.
- [8] 侯致福, 杨玉环, 高建强. 一次风管风粉均匀性影响因素研究[J]. 东北电力技术, 2011, 32(8): 1-3.
HOU Zhifu, YANG Yuhuan, GAO Jianqiang. Research on uniformity of wind-powder with influencing factor for primary air pipeline[J]. Northeast Electric Power Technology, 2011, 32(8): 1-3.
- [9] 刘福国, 翟慎会. 电站锅炉并联送粉管道阻力平衡方法研究[J]. 发电设备, 2008(3): 185-190.
LIU Fuguo, ZHAI Shenhui. Design method for parallel pulverized coal conveying pipes of power plant boilers based on resistance balance calculation[J]. Power Equipment, 2008(3): 185-190.
- [10] 吕宏彪, 聂涛, 黄孝彬, 等. 基于新型风粉在线监测的锅炉精细调平及优化技术[J]. 华电技术, 2016, 38(11): 35-37.
LYU Hongbiao, NIE Tao, HUANG Xiaobin, et al. Boiler fine leveling and optimization technology based on new wind powder online monitoring[J]. Huadian Technology, 2016, 38(11): 35-37.
- [11] SOMMERFELD M, ANDO A, WENNERBERG D. Swirling, particle-laden flows through a pipe expansion[J]. Journal of fluids engineering, 1992, 114(4): 648-656.
- [12] BARRANCO R, COLECHIN M, CLOKE M, et al. The effects of pf grind quality on coal burnout in a 1 MW combustion test facility[J]. Fuel, 2006, 85: 1111-1116.
- [13] LI H, HE Y, SHI F, et al. Performance of the static air classifier in a vertical spindle mill[J]. Fuel, 2016, 177: 8-14.
- [14] LI H, HE Y, YANG J, et al. Segregation of coal particles in air classifier: effect of particle size and density[J]. Energy Sources Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2018, 40(11): 1332-1341.
- [15] 解其林. 燃煤火力发电厂磨煤机旋转式粗粉分离器应用技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2006: 1.
XIE Qilin. Research on application technology of rotary coarse powder separator for coal pulverizer in coal thermal power plant[D]. Nanjing: Southeast University, 2006: 1.
- [16] 邹磊, 岳峻峰, 宁新宇, 等. HP 中速磨煤机分离器改造后运行特性分析及改造效果评估[J]. 热力发电, 2012, 41(6): 47-49.
ZOU Lei, YUE Junfeng, NING Xinyu, et al. Evaluation of retrofit effectiveness and analysis of running property for HP medium speed coal pulverizer after retrofitting[J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(6): 47-49.
- [17] 叶如祥, 刘川槐. 新型静态分离器在 MPS 型磨煤机上的应用[J]. 热力发电, 2013, 42(6): 72-74.
YE Ruxiang, LIU Chuanhuai. Application of new type static separator in an MPS coal pulverizer[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(6): 72-74.
- [18] 王涛, 黄贵臣, 沈迎, 等. 典型直吹式制粉系统风粉分配特性研究分析[J]. 能源科技, 2020, 18(4): 87-90.
WANG Tao, HUANG Guichen, SHEN Ying, et al. Study and analysis on the distribution characteristics of air-pulverized coal in typical direct fired pulverizing system[J]. Energy Science and Technology, 2020, 18(4): 87-90.
- [19] 李小燕, 蔡改贫, 田小伟. EM 型磨煤机磨腔流场的数值模拟[J]. 煤炭技术, 2019, 37(9): 315-318.
LI Xiaoyan, CAI Gaipin, TIAN Xiaowei. Numerical simulation of grinding cavity flow field in EM-type mill[J]. Coal Technology, 2019, 37(9): 315-318.
- [20] 朱宪然, 赵熙, 赵振宁, 等. 基于数值模拟方法的中速磨煤机石子煤排放研究[J]. 热力发电, 2010, 39(11): 37-40.
ZHU Xianran, ZHAO Xi, ZHAO Zhenning, et al. Study on discharge of pyrites from medium speed mill based on numerical simulation method[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(11): 37-40.
- [21] 朱宪然, 孟庆东, 禹庆明, 等. HP 中速磨煤机内部一次风流场的数值模拟[J]. 华北电力技术, 2010(8): 5-8.
ZHU Xianran, MENG Qingdong, YU Qingming, et al. Numerical simulation of primary air flow field in HP medium speed mill[J]. North China Electric Power, 2010(8): 5-8.
- [22] 何亚群, 周念鑫, 左蔚然, 等. 不同磨煤粒度条件下煤粉分离器分离特性研究[J]. 中国粉体技术, 2012, 18(1): 61-65.
HE Yaqun, ZHOU Nianxin, ZUO Weiran, et al. Study on separating characteristics of pulverized fuel classifier under different ground coal size[J]. China Powder Science and Technology, 2012, 18(1): 61-65.
- [23] 张峰彬, 何亚群, 李红, 等. 静态煤粉分离器中颗粒运动特性数值模拟研究[J]. 中国煤炭, 2017, 43(12): 115-122.
ZHANG Fengbin, HE Yaqun, LI Hong, et al. Numerical simulation study on particle movement characteristic in static pulverized coal separator[J]. China Coal, 2017, 43(12): 115-122.
- [24] 董素艳, 刘松龄, 胡斌, 等. 磨煤机内煤粉颗粒流的数值模拟[J]. 热力发电, 2012, 41(2): 20-23.
DONG Suyan, LIU Songling, HU Bin, et al. Numerical simulation of coal particle flow in the coal pulverizer[J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(2): 20-23.
- [25] 刘爱国, 王曼曼, 王微伟. HP1163 磨煤机流场数值模拟及风环改进[J]. 热力发电, 2022, 51(9): 141-147.
LIU Aiguo, WANG Manman, WANG Weiwei. Numerical simulation on flow field in HP1163 pulverizer and throat improvement[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(9): 141-147.
- [26] ZHU X R, LIU C Y, CHENG L. Numerical investigation for inner flow fields and structure improvements of medium speed mill[J]. Advanced Materials Research, 2013, 732/733: 481-486.

(责任编辑 邓玲惠)