

基于数值模拟方法的磨煤机风环均流技术研究

郝田田¹, 刘福², 贾军祥³, 郎颖宏³

(1 大唐东北电力试验研究院有限公司, 吉林 长春 130102; 2. 大唐吉林发电有限公司珲春热电分公司, 吉林 珲春 133399;
3. 辽宁大唐国际葫芦岛热电有限责任公司, 辽宁 葫芦岛 125004)

摘要:基于磨煤机运行过程中存在的风粉分布不均、局部磨损严重问题,采用CFD数值模拟方法,通过改变风环内叶片形状,在同一工况下进行数值模拟试验,研究风环折角叶片垂直部分长度对流场均匀性及风环进出口压差的影响。结果表明:风环内部叶片形状采用45°与垂直叶片链接组合的方式,垂直叶片占比变化对风环出口的均流作用影响较小,但会使一次风入口与风环出口间的平均压差(下称进出口压差)随着垂直叶片占比的增大而大幅减小;随着风环外部导流叶片长度的增加,均流效果先提升后下降,进出口压差小幅增加;通过综合利用两种改变方式,可在风环内提升均流效果,同时调整进出口压差,以达到在不影响磨煤机正常运行的条件下调整优化风环出口流场的目的。

关键词:磨煤机;风环;叶片结构;导流;均匀性

中图分类号:TK221 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.04.014

[引用本文格式]郝田田,刘福,贾军祥,等.基于数值模拟方法的磨煤机风环均流技术研究[J].热能动力工程,2025,40(4):125-131. HAO Tian Tian, LIU Fu, JIA Junxiang, et al. Research on uniform air flow technology of wind ring of coal mill based on numerical simulation method [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(4): 125-131.

Research on Uniform Air Flow Technology of Wind Ring of Coal Mill based on Numerical Simulation Method

HAO Tian Tian¹, LIU Fu², JIA Junxiang³, LANG Yinghong³

(1. Datang Northeast Electric Power Test and Research Institute Co., Ltd., Changchun, China, Post Code: 130102;
2. Hunchun Thermoelectric Branch, Datang Jilin Power Generation Co., Ltd., Hunchun, China, Post Code: 133399;
3. Liaoning Datang International Huludao Thermoelectric Co., Ltd., Huludao, China, Post Code: 125004)

Abstract: Based on the issues of uneven distribution of air and coal dust and severe local wear during the operation of coal mills, a CFD numerical simulation method was employed. Under the same working conditions, the shape of the inner blades of the wind ring was altered for simulation tests to study the impact of the vertical part length of the deflecting blades in the wind ring on the uniformity of the flow field and the pressure difference between the inlet and outlet of the wind ring. The results indicate that adopting a combination of 45° and vertical blades within the wind ring has a minor impact on the uniform flow effect at the wind ring outlet when the proportion of vertical blades changes. However, it causes the average pressure difference between the primary air inlet and the wind ring outlet (hereinafter referred to as the inlet-outlet pressure difference) to significantly decrease as the proportion of vertical blades increases. As the length of the external guide vanes of the wind ring increases, the uniform flow effect initially improves and then declines, with a slight increase in the inlet-outlet pressure difference. By comprehensively utilizing these two modification methods, it is possible to enhance the equalizing flow effect within the wind ring while adjusting the inlet-outlet pressure difference, thereby optimizing the flow field at the wind ring outlet without affecting the normal operation of the coal mill.

Key words: coal mill, wind ring, blade structure, guide flow, uniformity

引 言

制粉系统是燃煤火电机组的重要组成部分。近年来,随着经济性要求的提高,配煤掺烧技术的广泛应用使锅炉对制粉系统的要求进一步提高。因此,对制粉系统进行升级改造,提高制粉系统对煤质的适应性及风粉均化水平已成为当前研究的新目标^[1]。中速磨煤机正压直吹制粉系统在燃煤机组中应用最广泛^[2-3],但中速磨煤机结构设计存在不足,单侧进风,依靠动环的不同出口对一次风进行均化,导致风环喷口风速分布不均。这种不均匀性增加了低流速区的石子煤排放量^[1,4-7],加剧了高流速区附近区域设备的磨损,降低了气流的煤粉携带能力,导致风粉混合不均,使磨煤机内部流场紊乱,单耗升高,影响磨煤机出力,严重影响磨煤机的安全经济运行^[8]。针对风环出口速度分布不均匀的问题,许多学者通过数值模拟方法进行研究^[9-11],并提出增加一次风进口数量、改变一次风吹入方向、在一次风室加装挡板、堵住部分出风口及加装节流环等方法^[11-14],但磨煤机风环流场优化问题仍未得到根本解决。在现有方法中,在风环叶片下方加装竖直导流板的方法施工难度低,并且均流效果良好^[8]。基于上述问题及研究现状,本研究运用 CFD 数值模拟的方法,探讨了风环折角叶片中竖直侧长度对流场均匀性及风环进出口压差的影响,以期对后续的研究提供参考。

1 研究方法及模型建立

1.1 研究方法

本文以某厂 MPS212-HP-Ⅱ 型中速磨煤机为研究对象,截取磨煤机一次风通道、一次风室、风环喷口部分作为研究区域,运用 Ansys Fluent 模块对该部分进行数值模拟,分析问题成因。通过改变风环内叶片形状,在同一工况下进一步进行模拟试验,对比模拟试验结果,研究风环折角叶片中垂直部分长度对流场均匀性及风环进出口压差的影响。

1.2 物理模型及网格划分

截取磨煤机一次风通道、一次风室、风环喷口部

分作为研究区域,并基于此建立三维模型。本文主要研究参数为风环喷口的流场及压力分布,不涉及煤粉。为方便研究,对模型进行简化,只针对磨煤机一次风入口至磨煤机风环喷口的空气流动分布进行数值模拟分析,并忽略风环叶片厚度。根据磨煤机实际形状在风环上部增加出口空间计算域,其中叶片倾斜角度为 45° ,在结构模型基础上对模型进行网格划分,得到计算网格。分别将模型分为 50 万、100 万和 200 万网格,并在同一工况下分别对不同密度网格模型进行单项流动数值模拟计算,将多次计算结果进行对比,结果误差低于 10%,网格对结果的影响在可接受的范围内,网格合格。综合考虑计算精度和速度,最终选取 100 万网格进行后续计算。磨煤机风环原始结构模型及网格划分如图 1 所示。

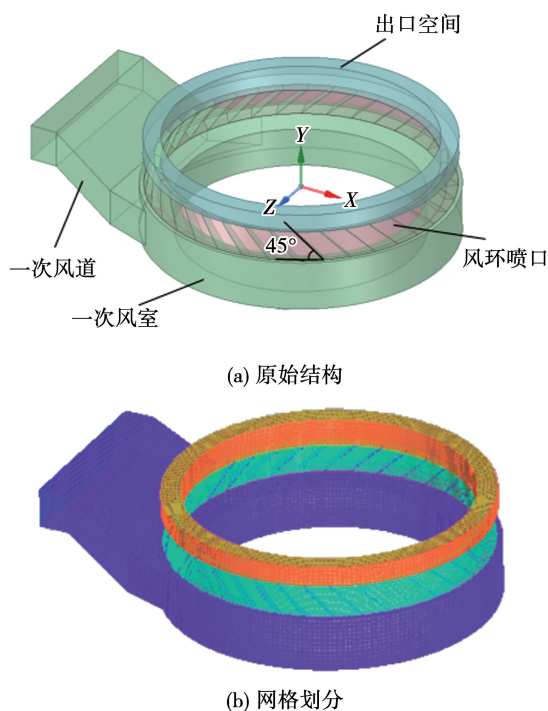


图 1 磨煤机风环原始结构模型及网格划分

Fig. 1 Original structure model and mesh division of wind ring of coal mill

1.3 边界条件

本文以电厂机组额定负荷下的实际运行工况为计算依据,考虑运行实际参数,计算域入口均采用质

量入口,出口选用压力出口,风环转向为顺时针方向,边界条件设置如表 1 所示。

表 1 边界条件设置
Tab.1 Boundary condition setting

参 数	数值
进口总风量/kg·s ⁻¹	24.5
热风温度/℃	272
风环转速/r·min ⁻¹	31.2
出口压力/Pa	0

1.4 数学模型

本文研究过程涉及湍流流动模型,不考虑温度变化,并假设空气为不可压缩流体,则其连续性方程和动量方程为:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\bar{u}'_i \bar{u}'_j) + g_i + Z_{Fi} \tag{2}$$

式中: $\bar{u}$ —气相时均速度; x —位置坐标; t —时间; ρ —气相密度; μ —气相动力粘度; $\bar{p}$ —时均静压; $\bar{u}'_i \bar{u}'_j$ —时均雷诺应力张量; g —重力加速度; Z_F —单位质量气相受到的相间作用力引起的源项; 下标 i 和 j —在 i 和 j 方向的分量。

湍流模型选用 Ansys Fluent 提供的 Realizable $k-\varepsilon$ 模型。本文模拟中涉及风环旋转在风环出口形成旋转射流的流动情况,相较于其他模型,带旋流修正的 Realizable $k-\varepsilon$ 模型对圆形射流及旋流流动计算具有更高的精度和更好的旋流预测性能,且对网格的适应性更强,更符合研究需求。Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型的 k 方程和 ε 方程可以写为^[15]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\mu \varepsilon / \rho}} \tag{4}$$

式中: μ_t —湍流粘度; G_k —由平均速度梯度产生的湍

动能; S —平均应变率张量的模量, $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$; C_1 、 C_2 、 σ_k 、 σ_ε —模型常数,其中 $C_1 = \max [0.43, Sk / (Sk + 5\varepsilon)]$, $C_2 = 1.9$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$ 。

为提高计算结果的精度,计算过程中压力项采用二阶离散格式,计算结果收敛的条件为动量方程和连续性方程残差小于 10^{-5} 。动环部分采用动网格方式进行计算,转速设置为 31.2 r/min。

1.5 模型准确性验证

为了验证模拟结果的准确性,在磨煤机冷态条件下进行风环喷口风速测量试验,并与模拟结果进行对比。

首先对磨煤机原始结构进行模拟,得出模拟风环出口流场分布图如图 2 所示。图 2 中数字为喷口位置。由图 2 可知,通过与现场磨煤机磨损位置对比发现,模拟结果显示的高风速区域与实际磨损位置吻合,不同磨煤机磨损位置几乎相同。

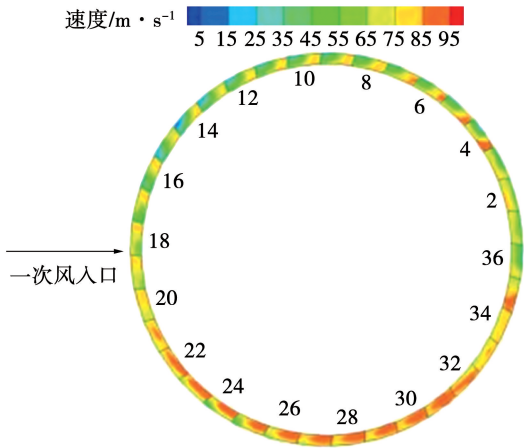


图 2 模拟风环出口流场分布云图
Fig.2 Cloud map of flow field distribution at the outlet of simulated wind ring

为了进一步验证数值模拟结果的准确性,在磨煤机冷态条件下进行风环喷口风速测量试验。磨煤机风环共有 36 个喷口,在磨煤机风环喷口处分别将毕托管焊接在磨煤机内壁上,测点布置位置如图 3 所示。测点按照顺时针顺序布置,共 12 个测点,分布在 3 个磨辊之间。同时,每个测点通过胶管与毕托管连接,并将胶管从磨煤机的人孔门引出,在冷态条件下启动一次风机,通过毕托管测量风环各喷口处的风速。

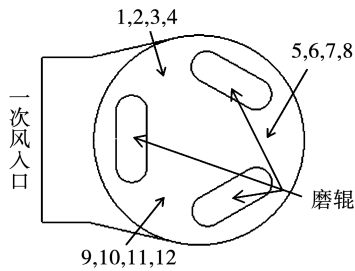


图3 风速测量位点布置示意图

Fig.3 Layout of wind speed measurement site

在磨煤机通风量为 60 t/h 的工况下,通过相应的风速测点测得的风环喷口风速分布与模拟风环各喷口平均风速分布进行了对比,结果如图 4 所示。由图 4 可知,风环喷口风速不均匀,测点 4~8 风速相对偏高,测点 9~12 风速相对偏低。数值模拟与现场试验测试结果风环喷口风速分布趋势吻合,数值误差在 20% 以内,模拟结果的准确性满足工程实际需求。

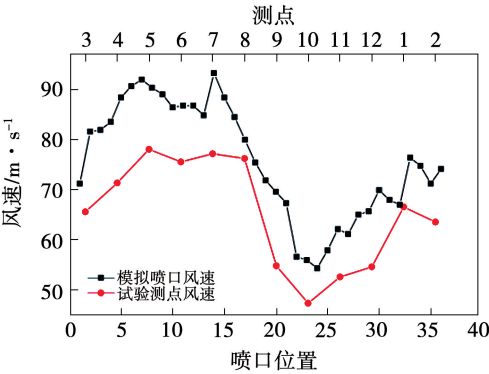


图4 试验与模拟风环喷口风速分布对比

Fig.4 Comparison of wind speed distributions at wind ring outlet between experiment and simulation

2 模拟计算结果分析

磨煤机一次风室采用环形结构设计,一次风从一次风室左右两侧对称进入,随后通过风环各喷口通道进入磨煤机内部。由于磨煤机风环叶片的倾斜角度为 45°~55°,且风环以 25~50 r/min 的速度顺时针旋转,一次风从磨煤机一次风室左右两侧进入,导致气流在风环两侧入口的流动方向各不相同。在一次风室的右侧,风速方向与风环叶片的角度小于 90°,气流受到的阻力相对较小;而在一次风室的左侧,风速方向与风环叶片角度大于 90°,气流

受到的阻力相对较大,因此会出现右侧风速相比左侧风速偏高的现象^[8]。为了消除这种现象,本文基于改造风环叶片的方法,展开了流场均匀性优化研究,研究重点包括风环内部叶片垂直部分比例及风环叶片外部垂直导流板长度对流场均匀性的影响。

2.1 风环叶片结构对风环出口流场均匀性的影响

首先,针对风环叶片结构对风环出口流场均匀性的影响展开研究。由于部分磨煤机一次风室布置较为紧凑,导致在风室内布置导流板困难较大,因此优先研究改善风环内部叶片结构。

风环内部叶片结构如图 5 所示。叶片形状为 45°加垂直叶片组合的方式,其中 a 为垂直部分, b 为 45°部分,分别对 a 占比 1/6、2/6、3/6、4/6、5/6 和 6/6 时的磨煤机内部流场情况进行模拟,得到叶片垂直部分不同占比风环出口流场分布云图如图 6 所示。

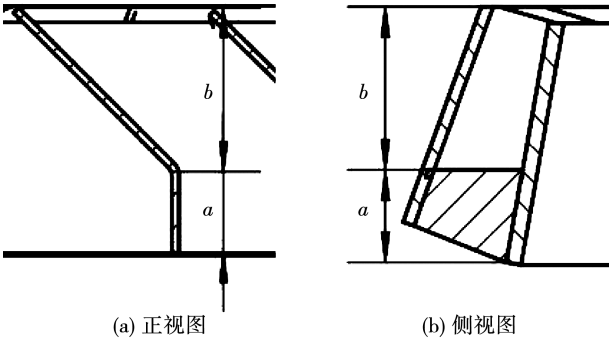


图5 风环内部叶片结构

Fig.5 Internal blade structures of wind ring

由图 6 可知,随着叶片垂直部分占比的增加,风速逐渐下降,当叶片垂直部分占比为 4/6 时,风环出口风速低于 75 m/s,已不满足试验工况下的运行条件;风速分布逐渐从极不均匀转向均匀,达到一定程度后均匀性不再变化,之后开始变差。由此可知,增加垂直部分占比对风环出口风速分布均匀性有一定的优化作用,但效果不明显。风环出口风速会随垂直部分占比增加逐渐下降,但过大的占比会导致风环出口风速过低而无法满足运行条件。因此,采用改变风环内部叶片形状为 45°与垂直叶片链接组合的方式进行优化,在风环出口风速满足运行条件的前提下,对风环出口流场均匀性优化作用有限。

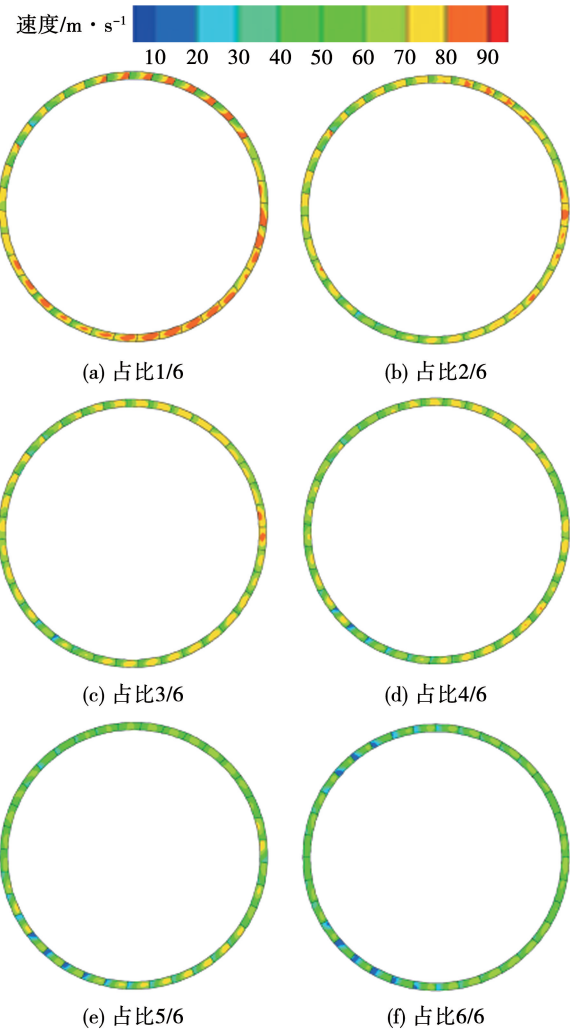


图 6 叶片垂直部分不同占比风环出口流场分布云图

Fig. 6 Cloud maps of flow field distribution at the outlet of wind ring with different proportions of vertical part of blade

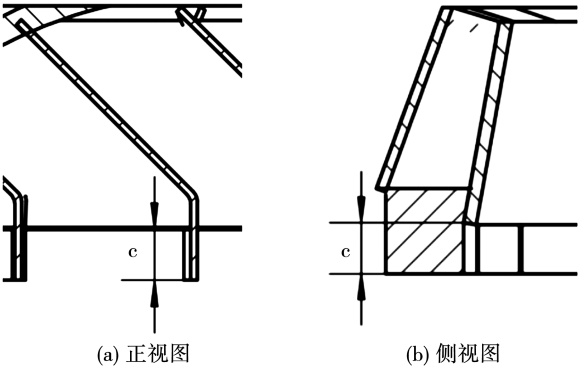


图 7 外部导流叶片结构示意图

Fig. 7 Schematic diagrams of external guide vane structure

结合上述研究结果,在保证风环出口风速满足运行条件的基础上,可以通过向风室方向延长叶片

的方式进一步优化流场均匀性。图 7 为外部导流叶片结构,其中 c 为叶片延长长度。为了研究不同叶片延长长度对流场均匀性的影响,在 60 ~ 160 mm 延长长度范围内,每 20 mm 间隔取样并进行数值模拟计算,得到不同外部叶片垂直导流叶片长度下风环出口流场分布云图,如图 8 所示。

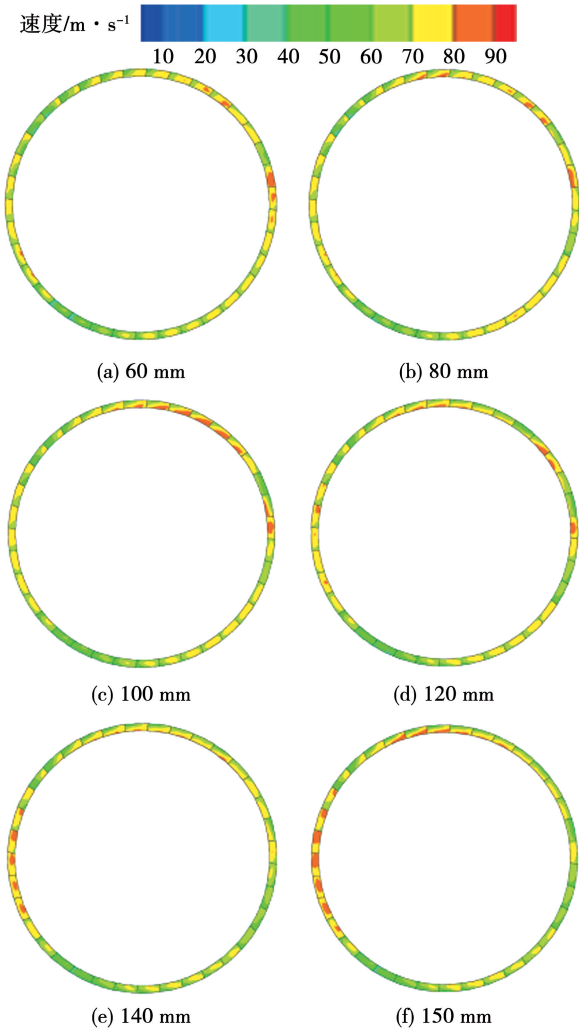


图 8 不同外部垂直导流叶片长度下风环出口流场分布云图

Fig. 8 Cloud maps of flow field distribution at the outlet of wind ring of external vertical guide vanes with different lengths

通过对比图 2 与图 8 发现,随着叶片延长长度 c 的增加,风环出口的高速区域分布逐渐在环形内均匀分布,但在叶片延长长度超过 120 mm 后流场均匀性开始变差。这表明,叶片延长长度在 120 mm 时,风环出口风速均匀性最佳,而当叶片延长长度大于或小于 120 mm 时,均匀性均有所下降。由此可知,在使用风环叶片外部增加垂直导流叶片的方式

来优化流场均匀性时,导流叶片的延长长度存在一个最优值,使流场均匀性最佳。

2.2 风环叶片结构对风环进出口压差的影响

根据模拟研究过程中得到的一次风入口与进出口压差,绘制不同风环叶片结构风环进出口压差变化图,如图 9 所示。

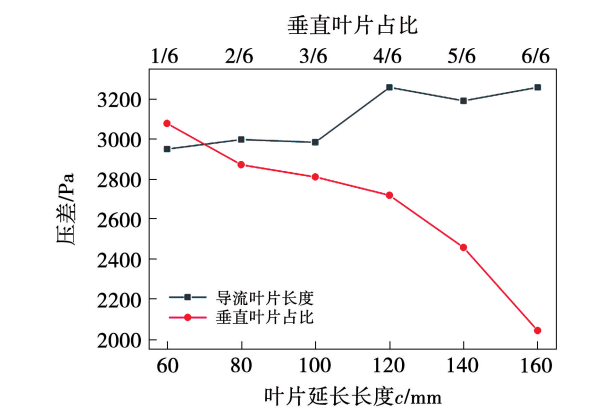


图 9 一次风入口与风环出口之间压差变化
Fig.9 Variation of pressure difference between primary air inlet and wind ring outlet

由图 9 可知,随着垂直部分占比增加,进出口压差逐渐从缓慢下降变为大幅度下降,最终无法满足正常运行条件。结合 2.1 节中的研究结果可知,适当增加垂直叶片占比可以在不影响正常运行的情况下起到一定的均流作用,但过大的内部叶片垂直部分占比会显著降低进出口压差,导致风环出口流体流动状态无法满足运行条件。另一方面,外部垂直导流叶片长度对进出口压差的影响较小,在 60 ~ 100 mm 范围内几乎无影响。当叶片长度超过 100 mm 后,进出口压差开始增加。结合 2.1 节中结论可知,垂直导流叶片长度范围在 60 ~ 100 mm 内时,可以在不影响进出口压差的情况下,有效改善风环出口流场的均匀性。

综上,在不影响磨煤机正常运行的情况下,采用改变内部叶片结构为 45°与垂直叶片链接组合,并结合延长外部导流叶片长度的方式,可以在提高流场均匀性的前提下更好地调整进出口压差,达到调整优化风环出口流场的目的,从而减少石子煤排放量,降低设备磨损程度。

依据以上结论,对该电厂的磨煤机进行了相应的优化改造,改造前后试验风环喷口风速分布对比如图 10 所示。由图 10 可知,改造后风环各喷口出口风速偏差减小,流场均匀性提高。

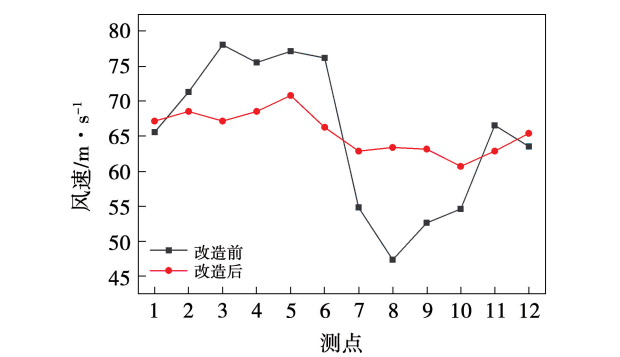


图 10 改造前后试验风环喷口风速分布对比图
Fig.10 Comparison chart of wind speed distribution at experimental wind ring outlet before and after the modification

对改造前后的磨煤机进行性能评估,取磨煤机 20 天的运行数据,每分钟取一次平均值,统计 5 个磨煤机出口区间内的性能数据,结果如表 2 所示。相同磨煤机出力的工况下,改造后磨煤机进出口压差降低,磨煤机所需出力降低,电流减小,性能提高。且运行状态良好,长时间运行后检查局部磨损位置,该位置磨损情况得到缓解,达到了改造目的。

表 2 磨煤机风环改造前后性能试验数据
Tab.2 Performance test data of wind ring of coal mill before and after the modification

区间	参数	磨煤机 1		磨煤机 2	
		改造前	改造后	改造前	改造后
1	平均出力/t·h ⁻¹	56.8	56.9	56.6	56.6
	电流/A	47.2	45.9	49.3	46.8
	进出口差压/kPa	3.83	3.21	3.18	3.10
2	平均出力/t·h ⁻¹	52.1	52.2	52.6	52.4
	电流/A	45.7	44.5	47.9	44.3
	进出口差压/kPa	3.75	3.09	3.07	3.14
3	平均出力/t·h ⁻¹	47.4	47.4	47.8	47.5
	电流/A	43.6	42.9	45.7	42.7
	进出口差压/kPa	3.73	2.95	2.89	2.93
4	平均出力/t·h ⁻¹	42.4	42.4	42.6	42.6
	电流/A	41.4	41.1	43.4	40.7
	进出口差压/kPa	3.61	2.83	2.69	2.87
5	平均出力/t·h ⁻¹	37.6	37.6	37.7	37.5
	电流/A	39.5	39.5	41.5	39.2
	进出口差压/kPa	3.53	2.69	2.60	2.70

3 结 论

为了解决灵活性调峰背景下,中速磨煤机磨损严重、性能降低等问题,采用 CFD 数值模拟方法,在同一工况下,仅改变动环内叶片形状,进行模拟试

验。对风环折角叶片中竖直侧长度对流场均匀性及风环进出口压差的影响进行了系统的研究,结论如下:

- (1) 通过改变磨煤机风环内部叶片结构为 45°与加垂直叶片链接组合的方式,对流场均匀性进行了优化。模拟结果表明,随着垂直部分占比的增加,流场均匀性在小范围内有所提升,但进出口压差随之大幅下降。小部分占比的垂直叶片可以在不影响磨煤机正常运行的情况下起到一定的均流作用,但过大的内部叶片垂直部分占比会导致风环出口流体流动状态不满足运行条件。
- (2) 通过增加外部垂直导流叶片长度的方式进行流场优化时,随着导流叶片长度增加,流场均匀性先升高后降低,进出口压差呈小幅度上升趋势。因此,外部导流叶片长度在 120 mm 左右存在一个最优值,可以在不影响进出口压差的情况下显著改善风环出口流场均匀性。
- (3) 综合应用上述两种结论方式,可以在提高流场均匀性的同时调整进出口压差,从而在不影响磨煤机正常运行的前提下,达到调整优化风环出口流场均匀性的目的。

参考文献:

[1] 孙月巧,郑宏飞,孔 慧. 碳中和背景下煤电转型关键技术与展望[J]. 动力工程学报,2022,42(11):1013-1023.
SUN Yueqiao,ZHENG Hongfei,KONG Hui. Key technologies and prospects of coal power transformation under carbon neutrality background[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022,42(11):1013-1023.

[2] GAO Yaokui,ZENG Deliang,LIU Jizhen. Modeling of a medium speed coal mill[J]. Powder Technology,2017,318:214-223.

[3] 薛飞宇,韩健民,梁双印. 电站锅炉双可调煤粉分配器气固两相流动特性研究[J]. 动力工程学报,2021,41(12):1033-1039,1108.
XUE Feiyu,HAN Jianmin,LIANG Shuangyin. Research on gas-solid two-phase flow characteristics of double-adjustable pulverized coal distributors in power station boilers[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2021,41(12):1033-1039,1108.

[4] 袁岑颢,薛晓垒,俞 刚,等. 风环结构对磨煤机石子煤排放影响的数值模拟[J]. 能源研究与利用,2024(1):13-18,25.
YUAN Cenjie,XUE Xiaolei,YU Gang,et al. Numerical simulation of effect of air ring structure on stone coal emission from coal mill [J]. Energy Research and Utilization,2024(1):13-18,25.

[5] 郑 熙. 火电机组磨煤机动态分离器自动调节控制策略及效果研究[J]. 电站系统工程,2022,38(5):61-63.
ZHENG Xi. Optimization and application of automatic adjustment of dynamic separator of coal mill control strategy for thermal power

units[J]. Power System Engineering,2022,38(5):61-63.

[6] 常玉清,康孝云,王福利,等. 基于贝叶斯网络的磨煤机过程异常工况诊断模型实时更新方法[J]. 仪器仪表学报,2021,41(8):52-61.
CHANG Yuqing,KANG Xiaoyun,WANG Fuli,et al. Real-time updating strategy for Bayesian network-based coal mill process abnormality diagnosis model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021,41(8):52-61.

[7] 张智羽,杨勇平,翟融融,等. 影响富氧燃烧锅炉磨煤机出口温度的运行因素研究[J]. 动力工程学报,2020,40(2):89-95.
ZHANG Zhiyu,YANG Yongping,ZHAI Rongrong,et al. Study on the operating parameters affecting the pulverizer outlet temperature of a boiler with oxygen-enriched combustion[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2020,40(2):89-95.

[8] 李 强. ZGM 中速磨煤机局部磨损问题分析及治理[J]. 热能动力工程,2021,36(2):132-137.
LI Qiang. Analysis and treatment of local wear of ZGM medium speed coal mill[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2021,36(2):132-137.

[9] 闫顺林,滕 龙,刘志巍. 火电厂中速磨煤机旋转风环数值模拟研究[J]. 电力科学与工程,2014,30(8):12-15.
YAN Shunlin,TENG Long,LIU Zhiwei. Study on numerical simulation of medium speed mill rotating nozzle ring of power plant[J]. Electric Power Science and Engineering,2014,30(8):12-15.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 方军庭. ZGM 中速磨煤机风环改造后性能分析及改造效果评估[J]. 热能动力工程,2019,34(2):145-149.
FANG Junting. Evaluation of retrofit effectiveness and performance analysis for nozzle ring transformation of ZGM medium speed mill[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2019,34(2):145-149.

[14] 龚九洲,李 涛,郭 庆,等. 1 000 MW 机组中速磨煤机风环改造分析[J]. 机械设计与制造,2015(2):129-131.
GONG Jiuzhou,LI Tao,GUO Qing,et al. Nozzle ring transformation of medium speed coal mill in 1 000 MW generating unit[J]. Machinery Design & Manufacture,2015(2):129-131.

[15] RATH P C,PATRA J,HUANG H T,et al. Carbonaceous anodes derived from sugarcane bagasse for sodiumion batteries[J]. ChemSusChem,2019,12(10):2302-2309.

(刘 颖 编辑)