

CFB 锅炉可调效率的旋风分离器性能数值模拟研究

袁东辉¹, 孙世超², 郑秀平³, 韩 义¹, 王研凯¹, 段伦博²

(1. 内蒙古电力(集团)有限责任公司 内蒙古电力科学研究院分公司, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 东南大学 能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 江苏 南京 210096; 3. 内蒙古京泰发电有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘 要:在旋风分离器锥形筒斜面上距离锥形筒顶端 50 cm 处为中心点开孔, 将分离器入口方向开孔命名为 0° 孔, 俯视顺时针依次旋转 90°, 分别命名为 90° 孔、180° 孔、270° 孔。向上述开孔中通入干扰风能调整分离器效率, 但通入干扰风对压降的影响未知。为了研究通入干扰风对旋风分离器整体性能(压降、分离效率、床温)的影响规律并得到最佳开孔方案, 以某 300 MWe 循环流化床锅炉旋风分离器为对象, 通过数值模拟研究分离效率可调的循环流化床锅炉旋风分离器压降变化特性。在不通入干扰风时模拟不同入口风速下的压降, 并与压降经验模型计算结果进行比较, 结果表明, 压降随入口速度的增大而增大, 且模拟结果与 Chen-Shi 模型计算结果吻合良好。模拟入口速度为 7.48 m/s 时, 在 0°、90°、180°、270° 孔通入干扰风速分别为 10、20、30 m/s 时的压降, 结果表明, 在 0° 孔和 90° 孔中, 压降随干扰风速的增大而减小; 在 180° 孔和 270° 孔中, 压降随干扰风速的增大先增大后减小。结合在不同孔通入干扰风时床温的变化规律, 可认为 90° 孔的改造方案较好。

关键词:循环流化床(CFB); 旋风分离器; CFD 模拟; 压降

中图分类号: TK229

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2020)06-0159-09

Numerical simulation of the performance of cyclone separator with adjustable efficiency in CFB boilerYUAN Donghui¹, SUN Shichao², ZHENG Xiuping³, HAN Yi¹, WANG Yankai¹, DUAN Lunbo²

(1. Inner Mongolia Electric Power Research Institute Branch, Inner Mongolia Electric Power(Group) Co., Ltd., Huhhot 010020, China;

2. Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. Inner Mongolia Jingtai Power Generation Co., Ltd., Ordos 017000, China)

Abstract: The holes are opened at the center point 50 cm away from the top of the conical cylinder on the inclined plane of the cyclone separator. The opening in the inlet direction of the cyclone separator is named as 0° hole which is rotated 90° clockwise from the inlet direction of the cyclone separator, and named as 90° hole, 180° hole and 270° hole, respectively. The separator efficiency is adjusted by introducing interference wind into the opening of conical cylinder of cyclone separator, but the influence of the interference wind on the pressure drop of the cyclone separator is unknown. In order to study the effect of the interference wind on the whole performance of the cycle including pressure drop, separation efficiency and bed temperature change, and get the best opening scheme, the pressure drop characteristics of a 300 MWe CFB cyclone with adjustable separation efficiency were studied by numerical simulation in this paper. Firstly, the pressure drop at different inlet velocities was simulated without interference wind, and the results were compared with the calculation results of empirical pressure drop model. The results show that the pressure drop increases with the increase of inlet velocity, and the simulation results are in good agreement with Chen-Shi model. Then the pressure drop is simulated when the inlet velocity is 7.48 m/s and the interference wind speed is 10, 20 and 30 m/s at 0°, 90°, 180° and 270° holes, respectively. The results show that the pressure drop decreases with the increase of the interference wind speed in the 0° and 90° holes, and the pressure drop first increases and then decreases with the increase of the interference wind speed in the 180° and 270° holes. Combined with the variation of bed temperature when the interference wind is intro-

收稿日期: 2020-06-10; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.20061010

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0605301)

作者简介: 袁东辉(1976—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 高级工程师, 主要从事锅炉燃烧优化和超低排放研究。E-mail: 912160083@qq.com。通讯作者: 段伦博, 教授。E-mail: duanlunbo@seu.edu.cn

引用格式: 袁东辉, 孙世超, 郑秀平, 等. CFB 锅炉可调效率的旋风分离器性能数值模拟研究[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(6): 159-167.

YUAN Donghui, SUN Shichao, ZHENG Xiuping, et al. Numerical simulation of the performance of cyclone separator with adjustable efficiency in CFB boiler[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(6): 159-167.



移动阅读

duced into different holes, it can be considered that the 90° hole is a better reconstruction scheme.

Key words: circulating fluidized bed; cyclone separator; CFD simulation; pressure drop

0 引言

近年来,我国新能源发电量和发电量占比稳步提升,其间歇性和波动性的特点对电网稳定运行影响巨大,要求新能源发电大规模并入电网后需要进行密切协调配合,降低新能源发电不稳定带来的安全调度风险,保证电网稳定运行。为了保证电网的稳定、调度以及最大程度的消纳新能源发电,传统燃煤机组如循环流化床机组等需要参与到深度调峰中。与此同时,深度调峰给循环流化床锅炉带来了低负荷时床温过低的问题。

为了解决这一问题,文献[1]提出了通过降低旋风分离器分离效率减少循环灰量从而提高炉膛温度的方法,有望改善现有锅炉运行中通过密封返料阀放灰的问题,同时,也报道了一种分离效率可调的循环流化床锅炉旋风分离器,其基本工作原理是在旋风分离器锥形筒处通入干扰风,人为控制旋风分离器内的流场,从而调控旋风分离器的分离效率。该文对这种分离效率可调的旋风分离器进行了冷态试验和数值模拟研究,证实了干扰风的通入确实可改变分离效率,但并未研究干扰风通入对旋风分离器的内部流场和压降的影响规律及其对锅炉低负荷床温的影响规律。

旋风分离器压降关系到系统的能量消耗以及风机的合理设计,在旋风分离器的设计及改造中对旋风分离器的压降进行预测具有重要意义。前人提出了一系列旋风分离器压降计算模型,如 Shepherd & Lapple 模型^[2]、Cascal & Martinez 模型^[3]、Dirgo 模型^[4]、First 模型^[5]、Chen-Shi 模型^[6]等。上述模型均是基于试验结果、理论分析提出的,在建立的过程中进行了一定程度的简化,且模型的使用有前提条件。

近年来,采用计算流体力学(CFD)研究旋风分离器的压降发展迅速。杜慧娟等^[7]利用数值模拟对 280 t/h CFB 锅炉中入口收缩角度分别为 14° 、 20° 、 25° 、 30° 、 34° 的旋风分离器进行研究,结果表明,分离效率随着收缩角度的增大先增加后减小,收缩角越大,分离器压降越高。黄中等^[8]模拟结果表明,随着中心筒直径减小,循环流化床锅炉旋风分离器进出口压降差减小了 16%。由洋等^[9]采用 Fluent 研究循环流化床锅炉旋风分离器的不同结构对压降的影响,结果表明,除了入口截面积和中心筒直径对压降有影响外,中心筒的插入深度、中心筒底端与折

流板之间的距离、折流板几何尺寸以及入口流速等均会对压降产生影响。张建等^[10]也通过 Fluent 软件并借助其中的 RSM 模型研究旋风分离器的压降,通过与压降经验公式对比,得出 CFD 数值模拟能够较好地预测旋风分离器的压降。李敏等^[11]以旋风分离器切向速度模型为研究对象,通过 CFD 模拟方法研究了分离器的压降,CFD 模拟结果与压降理论计算模型的计算结果基本吻合。Ashry 等^[12]采用数值模拟研究非球形颗粒对旋风分离器压降的影响并与试验结果进行对比,结果表明,CFD 模拟能够有效反映旋风分离器内非球形颗粒流的压降特性和分离效率。

本文以某 300 MWe 循环流化床锅炉旋风分离器为研究对象。首先采用 CFD 模拟研究不通干扰风时不同入口风速下的压降变化规律,并将压降变化规律与前人提出的分离器压降计算模型的计算结果进行对比;然后研究通入干扰风后分离效率可调旋风分离器的内部流场和压降的变化规律;最后结合热力计算,考察了通入干扰风对锅炉低负荷运行床温的影响规律,为循环流化床锅炉旋风分离器改造提供数据支撑。

1 研究内容

1.1 研究对象

本文的研究对象为国内某 300 MWe 循环流化床锅炉的旋风分离器。首先利用 SolidWorks 软件对旋风分离器进行几何构建,规定竖直方向向上为 y 轴正方向,中心筒出口圆心处为坐标系原点,并利用 ICEM 软件进行网格划分。经网格无关性验证,并结合计算精度和计算成本,最终确定网格数为 114.7 万。旋风分离器具体结构及网格划分如图 1 所示。

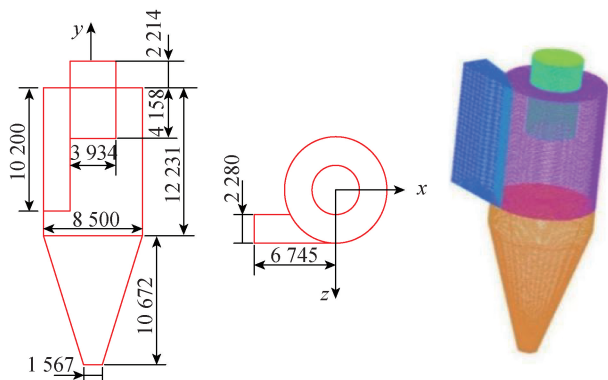


图1 循环流化床锅炉旋风分离器结构及网格划分

Fig.1 Structure and grid of cyclone separator in CFB boiler

图 1 中,旋风分离器的锥形筒开孔,4 个孔的直径均为 120 mm,开孔圆心所在平面距中心筒出口平面 14 900 mm。将旋风分离器入口方向的开孔命名为 0°孔,从入口方向俯视顺时针依次旋转 90°,分别命名为 90°孔、180°孔、270°孔,如图 2 所示。

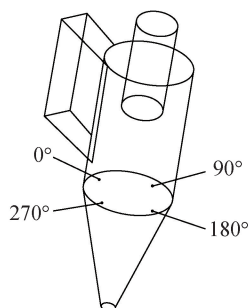


图 2 循环流化床旋风分离器开孔

Fig.2 Opening of cyclones in CFB

文献[1]通过冷态试验和数值模拟报道了向上述孔通入干扰风对旋风分离器分离效率的影响规律,本文在此基础上分析压降的变化情况并结合热力学计算,研究通入干扰风对锅炉低负荷运行床温的影响规律。

1.2 旋风分离器数值模拟

旋风分离器工作时内部的流场是复杂的三维强旋流,研究表明^[12-16],雷诺应力模型(RSM)能够较好地反映流场内部的各向异性,因此可用来模拟旋风分离器内部的三维强旋流,因此本文湍流模型选用雷诺应力模型。

压力速度耦合选择 SIMPLE 算法,空间离散化采用 Green-Gauss Cell Based 算法。边界条件中入口采用速度入口(velocity-inlet),中心筒出口采用完全流出口(outflow),壁面采用无滑移边界。分离器入口气体温度为 737 °C,入口颗粒密度为 1 200 kg/m³,质量浓度为 0.36 kg/m³,入口颗粒假设为球形,粒径分布如图 3 所示,气固曳力模型采用 spherical 模型。干扰风温度为 27 °C,干扰风速分别为 10、20、30 m/s。多粒度入口条件下旋风分离器分离效率的计算方法如下:利用颗粒的粒径分布划分若干质量组,每组的质量分数与该组平均粒径下的分级分离效率相乘,全部组的总和即为总分离效率^[17],计算公式为

$$\eta = \sum \eta_x M_x, \quad (1)$$

式中, η 为总分离效率,%; η_x 为平均粒径为 d_x 颗粒的分级分离效率,%; M_x 为平均粒径为 d_x 颗粒质量组的质量分数,%。

本文利用 CFD 模拟研究循环流化床锅炉分离效率可调旋风分离器不通入干扰风且入口速度变化

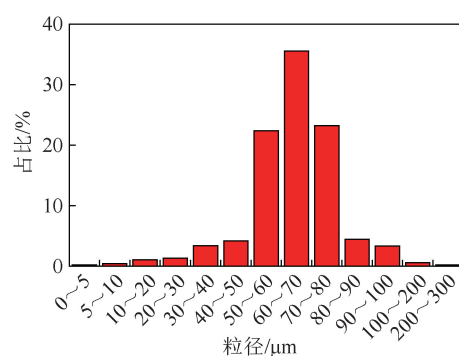


图 3 入口颗粒粒径分布

Fig.3 Particle size distribution of inlet particles

时的压降变化,并与 Shepherd & Lapple 计算模型、Cascal & Martinez 计算模型、Dirgo 计算模型、First 计算模型、Chen-Shi 计算模型等计算结果进行对比。此外利用 CFD 模拟研究循环流化床锅炉分离效率可调旋风分离器在 115 MWe 负荷时(入口速度为 7.48 m/s)通入干扰风的压降变化规律。分离效率可调旋风分离器模拟工况见表 1。

表 1 分离效率可调旋风分离器模拟工况

Table 1 Simulation conditions of cyclone separator with adjustable separation efficiency

位置	干扰风速/(m·s ⁻¹)
无孔	0
	10
	20
	30
0°孔	10
	20
	30
90°孔	10
	20
	30
180°孔	10
	20
	30
270°孔	10
	20
	30

1.3 压降计算模型

旋风分离器压降与旋风分离器入口流速的平方成正比,因此通常将旋风分离器的压降表示为

$$\Delta P = \xi \frac{\rho}{2} v_i^2, \quad (2)$$

式中, ξ 为阻力系数; v_i 为旋风分离器入口流速,m/s; ρ 为进口气体密度,kg/m³。

式(2)为计算旋风分离器压降的通用计算公式,其中 ξ 可以看成除了分离器进出口气流流动压外的其他影响因素的综合影响^[19]。不同计算模型的阻力系数的计算方法不同,本文采用 5 个计算公式,即

Shepherd & Lapple 模型:

$$\xi = 16 \frac{ab}{D_e^2} \quad (3)$$

Cascal & Martinez 模型:

$$\xi = \left[11.3 \left(\frac{ab}{D_e^2} \right)^2 + 3.33 \right] \quad (4)$$

Dirigo 模型:

$$\xi = 20 \left(\frac{ab}{D_e^2} \right) \left[\frac{S/D}{(H/D)(h/D)(B/D)} \right]^{1/3} \quad (5)$$

First 模型:

$$\xi = 24 \left(\frac{ab}{D_e^2} \right) \left[\frac{h(H-h)}{D^2} \right]^{-1/3} \quad (6)$$

Chen-Shi 模型:

$$\xi = \left[\left(1 - \frac{b}{R - r_e} \right)^2 + \frac{4K_A f_0 F_s v_w^3}{0.9\pi D^2 (D_e/D)^{1.5n} + \frac{v_w^2}{(d_r r_e)^n} + \frac{1}{K_A^2 [(D_e/D)^2 - r_e^2]^2}} \right] \quad (7)$$

式中, a 、 b 分别为分离器入口高度和宽度, m; B 为锥形筒底端直径, m; D_e 、 r_e 分别为中心筒直径和半径, m; D 、 R 分别为筒体直径和半径, m; H 、 h 分别为分离器和筒体高度, m; S 为中心筒插入深度, m; K_A 为入口面积比, $K_A = \pi D^2 / (4ab)$; r_e 为核心流半径, m; F_s 为总接触面积, m²; v_w 为筒体半径处的切向速度, m/s; d_r 为中心筒直径与筒体直径之比; f_0 为气流与旋风分离器内壁之间的摩擦因数。

筒半径处的切向速度采用式(8)^[6]进行计算,即

$$v_w = \frac{1.11 K_A^{-0.21} d_r^{0.16} Re^{0.06}}{1 + 4f_0 F_s (K_A d_r)^{0.5} / (\pi D^2)} \quad (8)$$

2 结果与分析

旋风分离器的压降定义为旋风分离器进出口的静压差,即

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (9)$$

式中, P_{in} 为旋风分离器入口静压, Pa; P_{out} 为旋风分离器出口静压, Pa。

2.1 不同入口速度下的压降

由于本文研究的旋风分离器处于 115 MWe 低负荷运行,旋风分离器入口速度较低,因此取入口速度分别为 6、8、10、12、14 m/s。图 4 为不通干扰风的旋风分离器在入口速度为 6~14 m/s 时压降的模型计算结果和模拟结果。可以看出,旋风分离器的压降随入口速度的增大而增大,这与张建等^[10]、李敏等^[11]研究结果相同,且采用雷诺应力模型模拟的结果与计算模型中的 Chen-Shi 模型计算结果吻合较好。

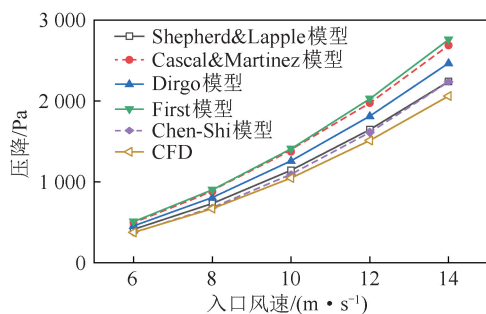


图 4 不同入口速度压降模拟值与压降模型计算值

Fig.4 Simulation value and calculation value of pressure drop at different inlet speeds

许多研究人员将 CFD 压降模拟结果与不同压降计算模型的计算结果进行对比,得到不同的结果。李敏等^[11]利用 CFD 模拟得到的压降计算结果与 Dirigo 模型的计算结果最接近。蔡安江^[22]经分析认为 Shepherd-Lapple 的计算公式简单,但比 First 的计算结果要好。钱付平等^[21]发现,CFD 模拟结果与 Dirigo 模型以及 Cascal& Martinez 模型计算结果较接近。张建等^[10]发现,Cascal& Martinez 模型较精确。杜慧娟等^[7]认为 CFD 计算结果与 Chen-Shi 模型计算结果相符。

本文认为 Chen-Shi 模型考虑了旋风分离器的入口膨胀损失、中心筒入口处的收缩损失、旋流损失、出口处气体动能的耗散损失,在计算压降时考虑较全面,因此该模型较精确,CFD 计算结果真实可信。

2.2 气相流场分析

2.2.1 静压分布

在分析旋风分离器内部流场时需分析静压分布规律,而分析静压分布规律主要考虑其沿径向上的分布。本文以旋风分离器出口水平面为 0 m 面,沿 y 轴负方向向下划分 -6.5、-10.0、-11.0、-12.5、-13.5、-14.4 m 等水平面,用于分析旋风分离器内部的静压径向分布,平面分布如图 5 所示。

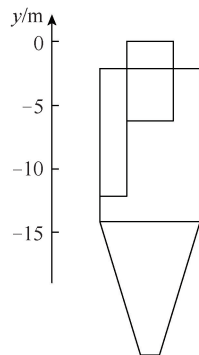


图 5 静压分析面分布

Fig.5 Static pressure analysis surface distribution

分别计算不通入干扰风且入口风速为 7.48 m/s 时沿竖直高度处 6 个截面的静压径向分布,如图 6 所示。

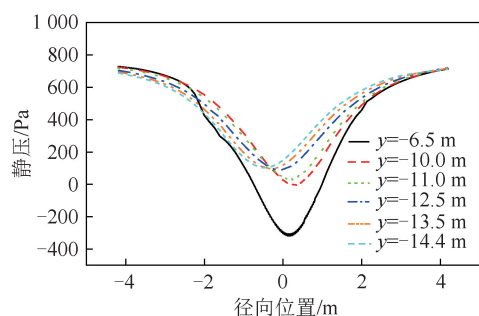


图 6 不开孔分离器不同高度径向静压分布

Fig.6 Radial static pressure distribution in different height of separator without opening

从图 6 可以发现,静压在旋风分离器内部呈边壁较高、中心较低的分布规律,静压随半径的减少而降低,在中心位置附近达到最低。靠近中心筒的中心位置附近存在较低的负压,这与李强^[23]模拟得到的结果一致。此外,不同平面静压分布的最低位置

不同,在中心位置两侧各有分布,这与分离器内的静压旋转分布有关(图 7),与张建^[10]、李敏^[11]等的模拟结果一致。

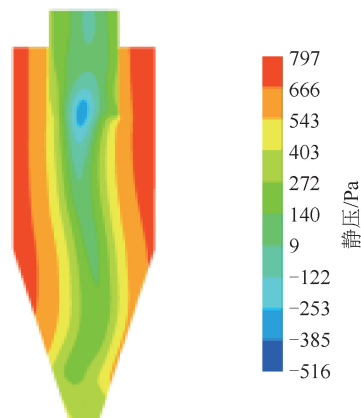


图 7 $z=0$ 平面静压分布

Fig.7 Planar static pressure distribution in $z=0$ plane

通入 20 m/s 干扰风,选取 $y = -6.5$ 、 -11.0 、 -14.4 m 三个截面,静压分布结果如图 8 所示。

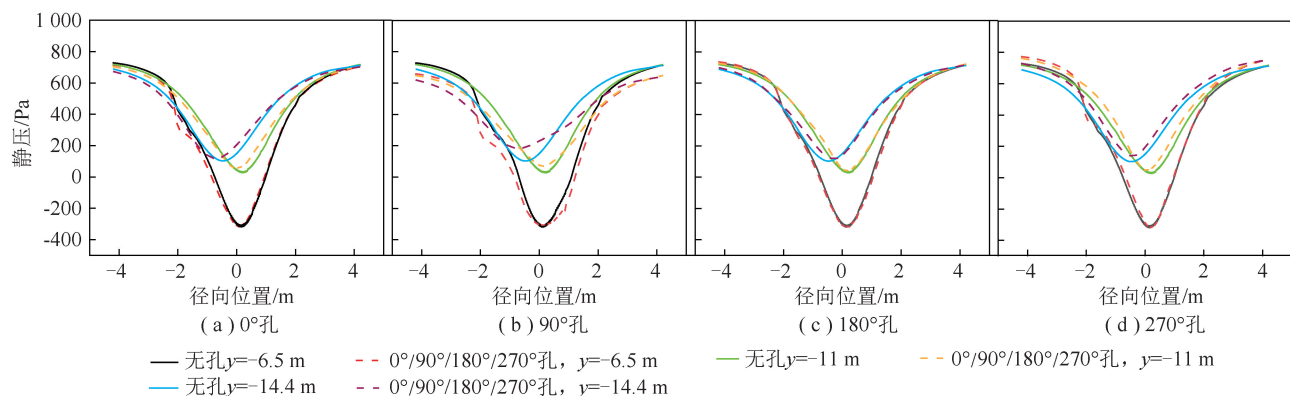


图 8 0° 孔、 90° 孔、 180° 孔、 270° 孔与不开孔静压分布对比

Fig.8 Comparison of static pressure distribution among 0° , 90° , 180° , 270° hole and no hole

从图 8 可以看出,向 0° 孔、 90° 孔中通入干扰风后,靠近中心筒入口的 -6.5 m 平面左侧有一个明显的静压降,其他平面左侧的静压也有所降低。 0° 孔通入干扰风后选取的 3 个平面右侧的静压变化较小,而 90° 孔通入干扰风后选取的 3 个平面右侧静压降低明显。向 180° 孔、 270° 孔通入干扰风后,靠近中心筒入口的 -6.5 m 平面左侧的静压升高,这与 0° 孔、 90° 孔的情况相反。

2.2.2 速度分布

开孔平面处竖直分速度如图 9 所示。可以发现,在开孔平面处上行流主要向 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的区域偏置,在图 10 中表现更加明显。向 4 个孔内通入 20 m/s 干扰风后,轴向速度的分布如图 11 所示。

由图 11 可知,向 4 个孔内通入 20 m/s 干扰风后,旋风分离器入口速度为 7.48 m/s 。图中左侧对

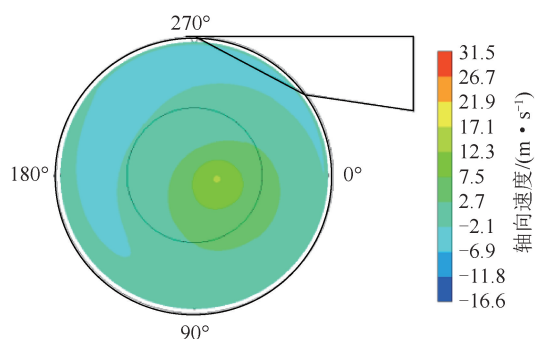


图 9 开孔平面竖直分速度分布

Fig.9 Vertical velocity distribution of the opening plane

应图 12 中的 $0^\circ \sim 90^\circ$ 位置,其上行气流较强。在 0° 孔、 90° 孔中通入干扰风后,该位置靠近壁面处的轴向速度增加,而 180° 孔、 270° 孔中通入干扰风后该位置靠近壁面处的轴向速度略有降低。

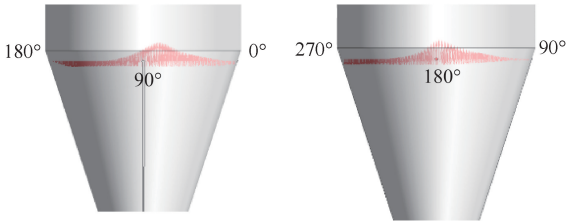


图10 速度垂直分量矢量

Fig.10 Vertical component vector diagram of velocity

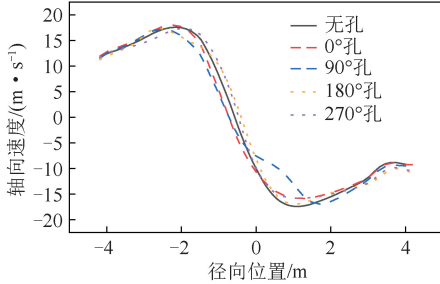


图11 轴向速度分布变化

Fig.11 Axial velocity distribution change

2.3 通入干扰风的压降变化

在文献[1]的基础上研究不通入干扰风旋风分离器在不同入口风速下的压降变化,并与前人的压降经验模型对比。利用同一个网格文件在不同方向的孔进行通入干扰风的计算。分别计算 0°、90°、180°、270°孔在通入 10、20、30 m/s 干扰风的压降,在 115 MWe 负荷下,对应的入口速度为 7.48 m/s。

4个孔通入及不通入干扰风的压降变化规律如图12所示,图中水平线为不通入干扰风且入口速度为 7.48 m/s 时旋风分离器的压降,虚线为文献[1]中分离效率随干扰风的变化。

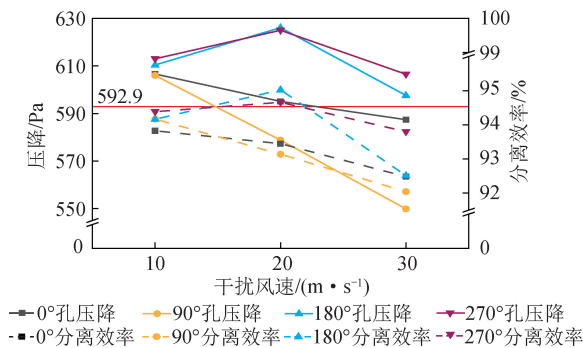


图12 旋风分离器压降及分离效率变化

Fig.12 Pressure drop and separation efficiency change of cyclone separator

文献[1]研究结果表明,向 0°孔、90°孔通入干扰风后,分离效率随干扰风速的增加而降低;而向 180°孔、270°孔通入干扰风后,分离效率随干扰风速的增加先升高后降低。从图12可以看到,0°、90°、180°、270°四个孔中分别通入干扰风后,旋风分离器的压降变化趋势与文献[1]中分离效率的变化趋势相同。向4个孔通入 10 m/s 干扰风时,旋风分离器的压降差距不大,但均大于不通干扰风时的压降。90°孔通入干扰风后的压降比 0°孔通入干扰风下降得快,90°孔通入干扰风能较好地降低旋风分离器压降。180°、270°孔中通入干扰风后的压降变化基本相同。向分离效率可调旋风分离器的4个孔中分别通入 10、20、30 m/s 干扰风后的压降变化趋势与文献[1]中分离效率的变化趋势大致相同,在文献[1]中 90°孔通入干扰风后分离效率变化趋势较好,本文中在 90°孔通入干扰风后压降的变化趋势较好。

结合 2.2 节旋风分离器内部不同高度处静压分布可以发现,靠近旋风分离器入口空间的静压分布变化趋势与旋风分离器的压降变化趋势相同。

2.4 不同工况下密相区温度变化

热力计算研究对象为东方锅炉厂生产的 DG1089/17.4-Ⅱ1 型亚临界循环流化床锅炉,该锅炉采用单汽包、单布风板、单炉膛、M 型布置、平衡通风、一次中间再热、循环流化床燃烧方式,采用高温冷却式旋风分离器进行气固分离。

根据目标机组的结构尺寸和运行数据,针对 CFB 锅炉进行了耦合炉侧和锅侧的全流程热力计算,热力计算的设计燃料采用电厂提供的入炉煤质报告(表2)。

全流程热力计算程序被划分为多个单元模块,主要包括锅炉结构计算模块、燃料计算模块、烟气特性模块、水蒸汽焓值温度计算模块、锅炉热平衡模块和各个相关的受热面换热计算模块,程序的技术路线如图13所示。对于给定的机组发电功率和煤质信息,先假设排烟温度再进行热力计算,当假定排烟温度与计算排烟温度误差 $<2^{\circ}\text{C}$ 时,认为此时热力计算已达到平衡。

表2 热力计算设计煤种的元素分析和工业分析

Table 2 Proximate and ultimate analysis of design coal for thermal calculation

元素分析/%					工业分析/%				低位发热量/ (MJ·kg ⁻¹)
C _{ar}	H _{ar}	O _{ar}	N _{ar}	S _{ar}	A _{ar}	M _{ar}	V _{ar}	FC _{ar}	
45.67	3.33	4.54	0.90	0.53	32.73	12.30	21.79	33.18	15.52

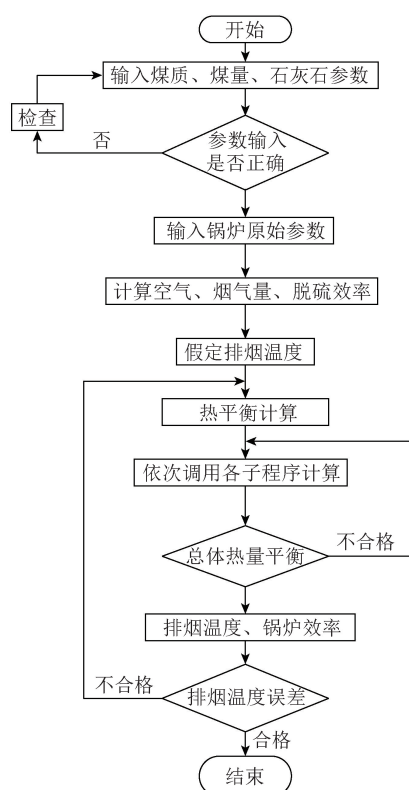


图 13 锅炉热力计算程序技术路线

Fig.13 Roadmap of the thermal calculation program of boiler

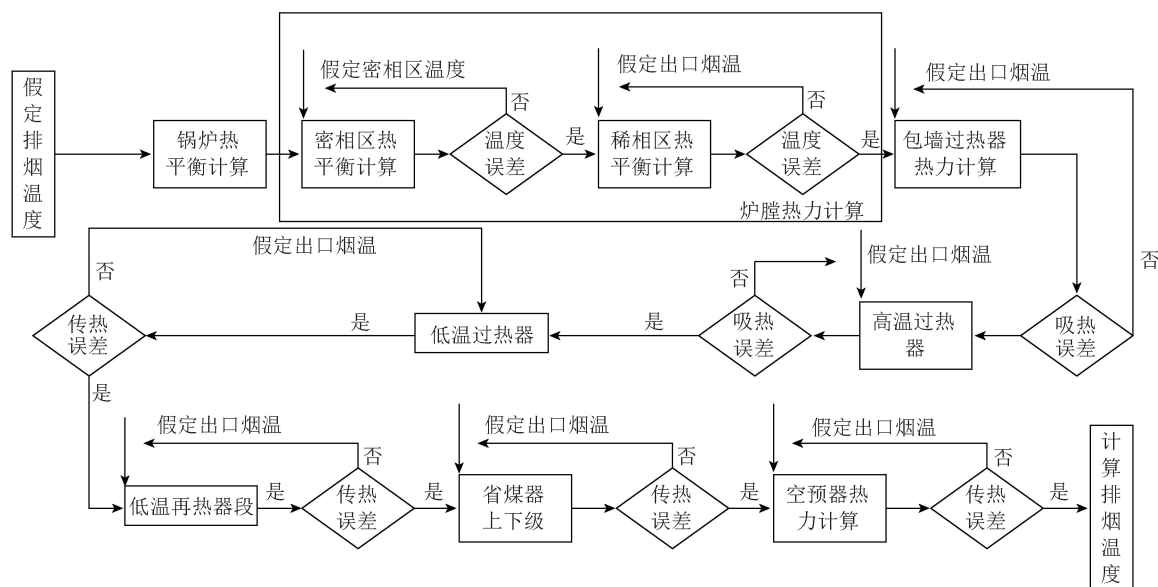


图 14 受热面换热计算模块流程

Fig.14 Flow chart of heat transfer calculation module for heating surface

通过改变 115 MWe 负荷下的旋风分离器的分离效率,研究分离效率改变后循环倍率与密相区床温变化规律,如图 15 所示。

物料的循环倍率随分离效率的下降而降低,使单位时间内进入密相区的循环灰量和由循环灰带走的热量随之降低,有利于在低负荷下维持锅炉的稳定运行。从图 15 可看出,分离效率从 95% 降至

在程序中涉及的换热计算包括各位置的过热器、再热器以及省煤器和空气预热器。受热面的计算流程如图 14 所示。每个换热面都被设计成一个计算模块,按照汽水流程、烟气流程顺序分别迭代计算,直至每个换热面的计算误差在允许范围内,最后求得合适的排烟温度。对于稀相区受热面,考虑炉内物料浓度变化对传热系数的影响,参考颜勇等^[24]的研究,采用颗粒团更新理论对稀相区受热面的传热系数进行计算。

循环倍率的计算公式^[25]为

$$\beta = \frac{G_c}{B} = \frac{\eta_{cyclone} a_{yh} - a'_{yh}}{1 - \eta_{cyclone}} (A_{ar} + A_{De-SO_2}), \quad (10)$$

其中, β 为循环倍率; G_c 为循环灰量, kg/h; B 为燃料消耗量, kg/h; $\eta_{cyclone}$ 为旋风分离器分离效率; a_{yh} 为飞灰份额; a'_{yh} 为回料器排灰份额; A_{De-SO_2} 为脱硫后灰增加份额。在电厂实际运行过程可以通过改变床压、给煤粒径等对飞灰份额 a_{yh} 进行调节。为了获得准确的飞灰份额,需要进行现场试验或对炉膛、分离器和返料阀进行整体建模计算,本文为了简化计算,假设各工况下的飞灰份额保持不变。

92% 时,密相区床温可升高 19 °C 左右。结合文献 [1],密相区床温随干扰风速的变化如图 16 所示。

由图 16 可以看出,0°孔、90°孔密相区床温随干扰风速的增加而增加,这与文献 [1] 一致,且在 90°孔通入干扰风对提高密相区床温效果最好。综合分离效率、压降以及密相区的床温变化,本文认为 90°孔改造方案为所有改造方案里的最优方案。

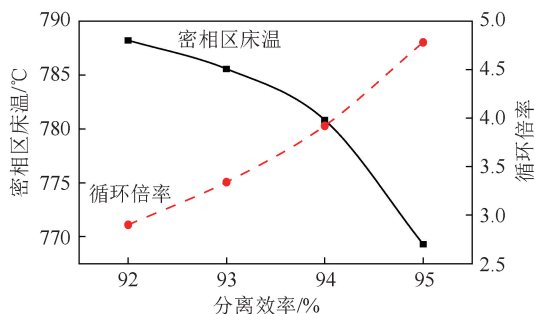


图15 床温与循环倍率随分离效率变化

Fig.15 Variation of bed temperature and circulation ratio with separation efficiency

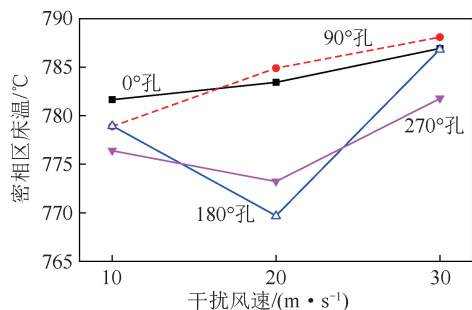


图16 密相区床温随干扰风速变化

Fig.16 Variation of bed temperature in the dense phase region with disturbance wind speed

3 结 论

1) 本文利用雷诺应力模型(RSM)对分离效率可调的旋风分离器进行了压降模拟。未通入干扰风时改变入口流速,将压降模拟结果与压降经验模型计算结果进行对比,发现压降随入口速度的增大而增大,且压降模拟结果与Chen-Shi模型计算结果符合较好。

2) 向0°孔、90°孔通入20 m/s干扰风后,靠近分离器入口的空间内静压降低;而向180°孔、270°孔通入20 m/s干扰风后,靠近分离器入口的空间内静压升高,这与此时旋风分离器压降的变化趋势相同。

3) 向0°孔、90°孔通入干扰风后,压降随干扰风速的增大而降低;向180°孔、270°孔通入干扰风后,压降随干扰风速的增大先升高后降低。90°孔通入干扰风后的压降降低效果较明显,且在90°孔通入干扰风后密相区床温提升较明显,结合文献[1]中对分离效率的研究,可认为在90°孔处进行改造对旋风分离器优化较好。

参考文献(References):

[1] 郑秀平,袁东辉,孙世超,等.循环流化床锅炉效率可调旋风分离器数值模拟与试验研究[J].热力发电,2020,49(5):132-139.

ZHENG Xiuping, YUAN Donghui, SUN Shichao, et al. Numerical simulation and experimental study on efficiency adjustable cyclone separator of CFB boiler[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(5):132-139.

[2] SHEPHERD C B, LAPPLE C E. Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1939, 31(8):972-984.

[3] CASAL J, MARTINEZ M. Better way to calculate cyclone pressure drop[J]. Chemical Engineering, 1983, 90(2):99-115.

[4] DIRGO J. Relationships between cyclone dimensions and performance[D]. Massachusetts: Harvard University, 1988.

[5] FIRSTM W. Cyclone dust collector design[M]. New York: Am. Soc. Mech. Eng., 1949:49-127.

[6] CHEN Jianyi, SHI Mingxian. A universal model to calculate cyclone pressure drop[J]. Power Technology, 2007, 171:184-191.

[7] 杜慧娟,王川保,马红和,等.入口收缩角度对旋风分离器分离性能的影响[J].热力发电,2019,48(11):43-48.

DU Huijuan, WANG Chuanbao, MA Honghe, et al. Influence of inlet necking angle on separation performance of cyclone separator[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(11):43-48.

[8] 黄中,孙献斌,时正海,等.循环流化床锅炉旋风分离器数值模拟及改造[J].热力发电,2008,37(6):38-41.

HUANG Zhong, SUN Xianbin, SHI Zhenghai, et al. Numerical simulation and modification of cyclone separator in CFB boiler[J]. Thermal Power Generation, 2008, 37(6):38-41.

[9] 由洋,杨朝锋.循环旋风分离器的压降性能计算[J].测控技术,2018,37(S1):354-364.

YOU Yang, YANG Chaofeng. Numeration of pressure drop in a recycling cyclone separator[J]. Measurement and control technology, 2018, 37(S1):354-364.

[10] 张建,金有海.旋风分离器压力损失数值模拟研究[C]//第十一届全国计算机模拟与信息技术会议.宜昌:[S.N.],2007:12-14.

ZHANG Jian, JIN Youhai. Numerical simulation of pressure loss in cyclone separator[C]// The 11th National Conference on computer simulation and information technology. Yichang [S.N.], 2007:12-14.

[11] 李敏,贲伟,王维刚,等.旋风分离器压降数值分析[J].科学技术与工程,2010,10(10):2552-2555.

LI Min, BEN Wei, WANG Weigang, et al. Numerical analysis of pressure drop in cyclone separator[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(10):2552-2555.

[12] ASHRY E A, ABDELRAZEK A M, ELSHORBAGY K A. Numerical and experimental study on the effect of solid particle sphericity on cyclone pressure drop[J]. Separation Science and Technology, 2018, 53(15):2500-2516.

[13] 马全.旋风分离器芯管结构改进试验研究[D].北京:中国石油大学,2004.

MA Quan. Experimental study on the improvement of core tube structure of cyclone separator[D]. Beijing: University of Petroleum, 2004.

[14] 钱付平,章名耀.底部加直管旋风分离器的性能预测[J].热能动力工程,2005,20(1):43-46.

- QIAN Fuping, ZHANG Mingyao. Performance prediction for a cyclone separator with an added vertical pipe at its bottom[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 20(1): 43-46.
- [15] 贾俊荣, 刘枫. 横截面形状对旋风分离器性能影响的数值模拟[J]. 工业安全与环保, 2012(4): 20-22.
- JIA Junrong, LIU Feng. Numerical simulation on performance of cyclone separator influenced by figure of cross section[J]. Industrial Safety and Environmental Production, 2012(4): 20-22.
- [16] 王海刚, 刘石. 不同湍流模型在旋风分离器三维数值模拟中的应用和比较[J]. 热能动力工程, 2003, 18(4): 337-342.
- WANG Haigang, LIU Shi. Application and comparison of different turbulence models in the three-dimensional numerical simulation of cyclone separator[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2003, 18(4): 337-342.
- [17] 徐洋. 带直管的旋风分离器的数值模拟和设计研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016: 57.
- Xu Yang. Numerical simulation and design of cyclone separator with straight tube[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016: 57.
- [18] 高助威, 王娟, 王江云, 等. 基于 DPM 模型的旋风分离器内颗粒浓度场模拟分析[J]. 石油学报(石油加工), 2018, 34(3): 81-88.
- GAO Zhuwei, WANG Juan, WANG Jiangyun, et al. Influence factors of the natural cyclone length in cyclone separators[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 34(3): 81-88.
- [19] 吴克明, 石碛, 潘留明, 等. 旋风分离器压力损失的数学模型及在设计中的应用[J]. 化工环保, 2005, 25(2): 156-159.
- WU Keming, SHI Ying, PAN Liuming, et al. Mathematical models for pressure drop in cyclone and their application in cyclone design[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2005, 25(2): 156-159.
- [20] 李战国. 入口烟道布置方式对循环流化床锅炉旋风分离器性能影响的研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2009.
- LI Zhanguo. Study on influence of inlet duct layouts on cyclone performance in CFB boiler[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Science, 2009.
- [21] 钱付平, 章名耀. 旋风分离器分离性能的经验模型与数值预测[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005, 35(1): 35-39.
- QIAN Fuping, ZHANG Mingyao. Empirical model and numerical prediction for separation performance of cyclone separator[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2005, 35(1): 35-39.
- [22] 蔡安江. 旋风分离器设计计算的研究[J]. 化工矿物与加工, 2003(8): 21-23.
- CAI Anjiang. Study on design and calculation of cyclone separator[J]. Industrial Minerals and Processing, 2003(8): 21-23.
- [23] 李强. 循环流化床锅炉旋风分离器气固两相流动特性及性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- LI Qiang. Study on gas-solid two-phase flow characteristics and performance of cyclones in CFB Boilers[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010.
- [24] 颜勇, 段伦博, 段元强. 燃料粒径调控匹配循环流化床富氧燃烧高氧浓度运行研究[J]. 动力工程学报, 2019, 39(9): 693-699.
- YAN Yong, DUAN Lunbo, DUAN Yuanqiang. Study on adjustment of fuel particle size for oxy-fuel combustion with high O₂ concentration in a CFB boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(9): 693-699.
- [25] 周一工. 循环流化床锅炉灰平衡和循环倍率计算方法探讨[J]. 锅炉技术, 1998(4): 3-5.
- ZHOU Yigong. Probe on calculating methods for ash balance and circulation rate of circulating fluidized bed boiler[J]. Boiler Technology, 1998(4): 3-5.