

塔式炉膛烟气流动特性及非线性现象的 数值和实验分析

赵敬帅¹, 王文帅¹, 杨 荣²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海建桥学院, 上海 201306)

摘要: 为研究不同负荷超(超)临界塔式炉膛内燃烧及烟气流动的非线性特性, 以某1 000 MW 塔式炉膛为原型设计出几何结构和边界条件完全对称的三维简化锅炉模型, 运用 FLUENT 软件模拟了锅炉在3种不同负荷(100%, 75%和50% 阀门全开工况(VWO))下炉膛内的速度场、温度场及 NO_x 的分布情况, 并分析了非线性特性, 最后建立了一个三维冷态切圆射流实验模型并进行验证, 提出顺序启动的喷嘴启动方式。结果表明: 不同负荷下, 完全对称的炉膛内烟气流动速度、温度和组分分布均存在非线性现象, 模拟结果得到关于模型几何竖直中心线不对称的解; 喷嘴通过顺序启动方式可使切圆偏斜程度更小, 流动形成的切圆能稳定在一个位置, 实现流动的精准控制。

关键词: 切圆燃烧; 非线性; 数值模拟; 顺序启动; 精准控制

中图分类号: TM621. 2

文献标识码: A

DOI: 10. 16146/j. cnki. rndlge. 2023. 10. 014

[引用本文格式] 赵敬帅, 王文帅, 杨 荣. 塔式炉膛烟气流动特性及非线性现象的数值和实验分析[J]. 热能动力工程, 2023, 38(10): 113-121. ZHAO Jing-shuai, WANG Wen-shuai, YANG Mo. Numerical and experimental analysis of flue gas flow characteristics and nonlinear phenomena in tower furnace[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(10): 113-121.

Numerical and Experimental Analysis of Flue Gas Flow Characteristics and Nonlinear Phenomena in Tower Furnace

ZHAO Jing-shuai¹, WANG Wen-shuai¹, YANG Mo²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093; 2. Shanghai Jiao Qiao University, Shanghai, China, Post Code: 201306)

Abstract: In order to study the combustion characteristics and nonlinear characteristics of flue gas flow in a ultra-super critical tower furnace under different loads, a three-dimensional simplified boiler model with fully symmetrical geometric structure and boundary conditions was designed with a 1 000 MW tower furnace as prototype. FLUENT software was used to simulate the velocity field, temperature field and NO_x distribution in the furnace under three different loads of 100%, 75% and 50% VWO (valve fully open condition), and analyze their nonlinear characteristics. Finally, a three-dimensional cold tangential jet experimental model was established for verification, and a new nozzle startup mode, sequential startup, was proposed. The results show that under different loads, there are nonlinear phenomena in flue gas flow velocity, temperature and component distribution in the fully symmetric furnace, and the simulation results are asymmetric solutions about the vertical centerline of the model geometry; the nozzle can make the tangential circle deflect less through the sequential startup mode, and the tangential circle formed by the flow can be stabilized at a position to achieve precise control of the flow.

Key words: tangential combustion, nonlinear, numerical simulation, sequential startup, precise control

收稿日期: 2022-12-09; 修订日期: 2023-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(51736007)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51736007)

作者简介: 赵敬帅(1991-), 男, 上海理工大学硕士研究生。

通讯作者: 杨 荣(1958-), 男, 上海建桥学院教授。

符号说明

- S —质量源相,通常取 0
- ρ —密度, kg/m^3
- ρ_p —颗粒 p 的密度, kg/m^3
- p —静压, Pa
- g_i —重力加速度, m/s^2
- u —流体速度, m/s
- u_i, u_j —连续相速度的张量形式, m/s
- $u_{p,i}$ —颗粒 p 的速度, m/s
- τ_{ji}, τ_{ik} —应力张量, Pa
- μ —动力粘度, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$
- α —渗透率, mD
- C —惯性阻力系数
- c_p —比定压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- W_s —流体相中 s 组分反应率
- Q_s —流体相 s 组分单位体积的反应热
- n_a —固体相中 a 组分反应率
- Q_a —固体相中 a 组分单位体积的反应热
- T —温度, K
- ε —换热器换热效率
- $C_{\min}$ —工作流体与烟气两者之间热容最小值, J/K
- $T_{\text{in,aux}}$ —换热区工作流体进口温度, K
- $T_{\text{in,prim}}$ —换热区烟气进口温度, K
- m_l —组分 l 的质量分数
- $J_{l,j}$ —组分 l 的扩散通量
- R_l —组分 l 的化学反应生成率
- δ_{ij} —克罗内克变量
- 下标 ji, ik, i, j —张量形式,表示不同变量

引 言

近年来我国提出了“双碳”的发展目标,这对可持续发展有着至关重要的意义^[1]。在这一发展要求下,针对四角切圆燃煤锅炉的技术改进逐步开展。由于其独特的切向燃烧方式,热偏差问题的出现总是不可避免,因此对降低锅炉热偏差方法的研究成为重要课题。

目前,国内外许多学者针对锅炉及热偏差进行了深入研究。张群力等人^[2]通过实验研究了液气比、助燃空气含湿量、运行模式对燃气锅炉降氮效果的影响。Park 等人^[3]研究发现,炉膛中上部的残余旋转使烟气在水平烟道左右方向上的速度分布不均,导致左右两侧受热面吸热量不同引起热偏差。付忠广等人^[4]和姚志鹏等人^[5]对四角切圆锅炉的热偏差问题进行数值模拟研究发现,合理布置左右

两侧 SOFA 风的速度比值与其反切角度能有效减少炉膛出口处的烟温偏差。文献[6-8]也从各角度提出了减小锅炉热偏差的方法。

部分学者从烟气流动非线性角度阐释切圆锅炉热偏差的形成机理,认为即使把锅炉结构做到完全对称,其切圆也会偏离中心位置,形成不对称的流场与温度场,造成烟气侧热偏差。王文帅等人^[9]建立了炉膛气液两相对冲二维模型,在完全对称的炉膛中得到不对称的气液两相流动,这可能是由非线性原因导致的。文献[10-13]同样研究了四角切圆塔式炉膛内的非对称流动现象,提出了相应减小热偏差的方法。

大部分非线性问题在某些条件下都具有初值依赖特性^[14]。李少华等人^[15]运用数值模拟在研究圆内开缝八边形自然对流换热问题时发现,当开缝度很大或很小时,数值解最终结果是唯一的;当开缝度约为某一特定值时,数值解不唯一,最终结果取决于初始流场。战乃岩等人^[16]在研究底部加热三维方腔内空气的自然对流问题时发现,随着瑞利数的增大,流动状态由稳定态解转为振荡解最后变为混沌解,且当瑞利数满足一定要求时,以不同的初始场进行迭代计算,最终得到不同的流场。

综上所述,目前鲜有学者综合研究超(超)临界三维塔式锅炉在不同负荷下的流动、燃烧、组分分布并分析其非线性特性。因此,根据文献[9-13]的基本观点,进一步研究某 1 000 MW 四角切圆塔式锅炉在不同负荷(100%、75%和 50% VWO)下的燃烧及其非线性特性。文献[13]通过数值模拟发现,相较于传统的四角“同时启动”方式,采用“顺序启动”和“对角启动”的控制策略能够缓解炉膛内烟气流场与温度场的偏斜情况,可以有效减小炉膛出口处的热偏差。本文通过实验验证了三维炉膛内的非线性流动特性,发现通过“顺序启动”方式可改善炉膛切圆的偏斜情况,进一步验证了文献[13]的观点。本文的研究内容将为未来的工程应用与实验提供重要的理论指导。

1 数值模拟

1.1 物理模型

基于某电厂 1 000 MW 塔式切圆锅炉,设计了

简化的三维模型,如图 1 所示。为了便于对结果进行分析,表 1 中列举出了图 1 中几个研究截面的名称及具体位置。其中,L1 ~ L4 分别是 P1 ~ P4 截面沿炉膛宽度方向上的中线。模型关于轴线中心对称,计算域出口高度为 109 m,长度和宽度相同,均为 21.48 m,炉膛出口高度为 71.4 m。炉膛四角共布置了 48 个燃烧器,每个角上的燃烧器主要包括下部燃烧器区、中部燃烧器区、上部燃烧器区和 SOFA 风区 4 个区域。该锅炉采用四角切圆燃烧,切圆示意图如图 2 所示。图中,一次风喷嘴轴线与壁面夹角 α 为 51° ,偏置二次风喷嘴轴线与一次风喷嘴轴线夹角 β 为 22° 。考虑到锅炉模型的复杂性,为了简化计算,在建模时不考虑受热面管路的具体结构,在 Fluent 中采用多孔介质模型^[17]进行传热计算。

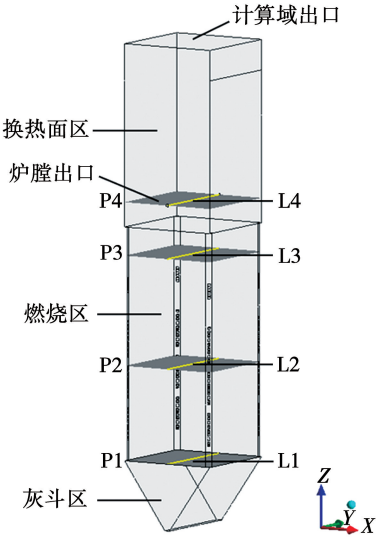


图 1 塔式锅炉简化模型

Fig.1 Simplified model of tower type boiler

表 1 各研究截面位置及名称

Tab.1 Location and name of each section

研究截面	高度/m	名称
P1	18.47	冷灰斗区顶部截面
P2	39.07	中部燃烧器第 4 层煤粉喷嘴截面
P3	63.00	燃烧区上部截面
P4	74.60	三级过热器出口高度截面

1.2 数学模型

炉内燃烧过程剧烈,主要包括放热化学反应过程和强烈混合的气固流动过程。燃烧过程虽复杂但

仍符合质量守恒、动量守恒、能量守恒和化学组分平衡的基本定律。

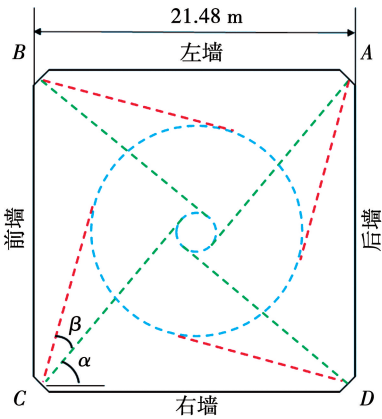


图 2 切圆燃烧示意图

Fig.2 Schematic diagram of tangentially firing

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x} = S \tag{1}$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} + \rho g_i + \sum_p \frac{\rho_p}{\tau_{ik}}(u_{p,i} - u_i) + u_i S - \frac{\mu}{\alpha} u - C \frac{1}{2} \rho |u| u \tag{2}$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j c_p T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + w_s Q_s - q_r + \sum_a n_a Q_a + c_p TS + \varepsilon C_{\min} (T_{\text{in,aux}} - T_{\text{in,prim}}) \tag{3}$$

化学组分平衡方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i m_1 + J_{1,j}) = R_1 \tag{4}$$

式中: ρg_i —考虑浮力影响的重力项; $\sum_p \rho_p (u_{pi} - u_i)$ / τ_{ik} —煤粉颗粒与气体的摩擦应力项; $u_i S$ —控制微元内源项造成的应力项; $-\mu u/\alpha$ —多孔介质造成的粘性损失项; $C_p |u| u/2$ —多孔介质造成的惯性损失项; $w_s Q_s$ —流体相单位体积的反应热; q_r —流体辐射热; $\sum_a n_a Q_a$ —固体相单位体积的反应热; $c_p TS$ —控制体中单位体积流体相与固体颗粒相由于质量改变产生的能量源; $\varepsilon C_{\min} (T_{\text{in,aux}} - T_{\text{in,prim}})$ —烟气与换热器换热量。

应力张量为:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \delta_{ij} \quad (5)$$

1.3 边界条件及煤种

炉膛内燃烧器的喷嘴采用速度入口边界条件,计算域出口采用压力出口边界条件,出口压力设为-20 Pa。所有壁面采用无滑移、无质量交换、定壁

温标准壁面。煤粉粒径和液滴粒径均遵循罗辛-拉姆勒(Rosin-Rammler)分布。其中,煤粉最小粒径为1 μm,最大粒径为100 μm,平均粒径90 μm。表2给出了煤质分析,3种工况下煤粉流量分别为355,265和198 t/h。

表 2 煤质分析

Tab.2 Coal quality analysis

元素分析/%					工业分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$Mt/\%$
C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	O_{ar}	$S_{\text{t,ar}}$	M_{ad}	A_{ar}	V_{daf}	FC_{ad}	干燥无灰基挥发分		
61.45	3.61	0.71	7.81	0.43	10	12	27	47	36.49	23.197	14

1.4 网格划分及独立性验证

通过ICEM软件对网格进行分区域划分,包括冷灰斗区、燃烧器区和换热面区3个区域。冷灰斗区域流动对炉膛上部流动影响较小,采用非结构化四面体网格。燃烧器区和换热面区采用结构化六面体网格,各喷嘴附近的网格均进行了加密,如图3所示。为了减少伪扩散,燃烧器区域横截面进行了对角剖分及Y型剖分,使其与煤粉喷入气流流动方向一致,如图4所示。

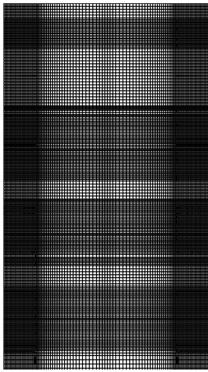


图 3 网格局部加密图

Fig.3 Partial densification of grid

为了确定满足数值模拟计算要求的网格精度,需要对网格进行验证。取150万、195万、253万、330万、429万和557.7万6组不同密度的网格,模拟锅炉100%VWO工况,得到三级过热器出口高度处烟气温度,如图5所示。由图5可知,当网格数为330万时,炉膛出口高度烟气温度趋于稳定,为了节

省计算资源,本文选用330万网格进行计算。

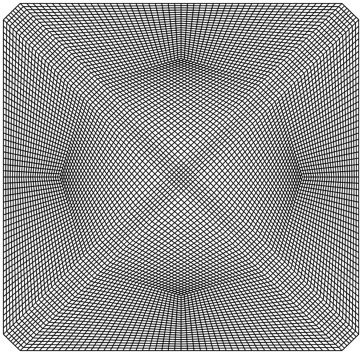


图 4 横截面 Y 型网格划分

Fig.4 Y-type grid division of cross section

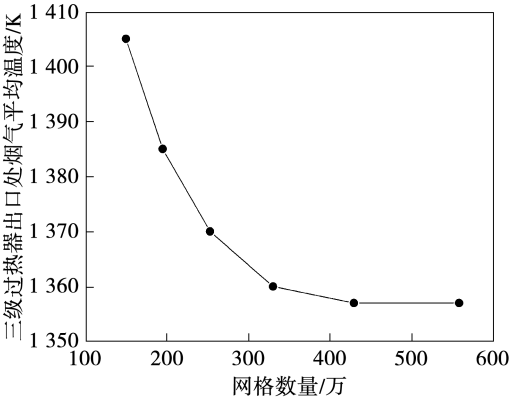


图 5 网格独立性验证

Fig.5 Grid independence verification

1.5 数值方法及准确性验证

采用SIMPLE算法求解压力与速度的耦合,采用PRESTO!格式对压力进行离散,对流项采用

QUICK 格式,扩散项采用二阶迎风格式进行离散。气相湍流模型采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型,该模型采用数学约束改善模型的性能,可以准确模拟燃烧器中存在的中等强度旋流。离散相模型采用拉格朗日随机轨道模型,挥发分的析出采用双步竞争反应热解模型,气相燃烧及 NO_x 生成采用涡耗散模型 (ED),焦炭的燃烧采用动力-扩散控制模型,炉内的辐射换热采用 P1 模型。基于燃烧过程中产生的快速型 NO_x 质量浓度非常小,本文只考虑燃料型及热力型 NO_x 的生成。其中,热力型 NO_x 采用拓展的 Zeldovich 机理^[18]描述,燃料型 NO_x 采用 De Soete 模型^[19]描述。

为了验证数值模拟方法的正确性,将 100% VWO 工况下的仿真结果与设计值进行对比,结果如表 3 所示。尽管模拟值与设计值存在偏差,但误差在合理范围之内,验证了本文所建立数值模拟方法的正确性。

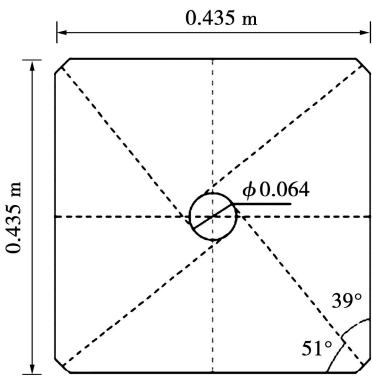
表 3 模拟值与设计值对比

参数	模拟值	设计值	误差/%
烟气平均温度/K	1 360	1 282	6.08
标准工况下炉膛出口 NO_x	264.96	250	5.98
质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$			
炉膛出口 O_2 体积分数/%	3.52	3.5	0.57

2 实验模型

四角切圆塔式炉膛冷态烟气流动实验模型^[20]宽 0.435 m,深 0.435 m,高 1.042 m,实验壁面材料为厚亚克力板,为保证模型刚性,边角用金属折角和螺栓固定。由于研究重点是模型内的流动现象,为了简化问题,仅在高 0.277 m 处设置一层喷嘴,喷嘴设置在壁面的切角处。喷嘴高 0.009 m、宽 0.015 m,喷嘴出口法向与壁面成 51° ,理论切圆直径为 0.064 m。

流动工质为空气,由 2 台高压泵供气,每个高压泵负责邻近 2 个喷嘴的供气,供气流量由泵出口阀门和喷嘴进口阀门共同控制。实验流场示踪装置为轻质聚乙烯飘带,飘带足够窄,对喷嘴出口气流的影响可以忽略。理论切圆与实验装置如图 6 所示。



(a) 理论切圆



(b) 实验切圆



(c) 实验装置

图 6 理论切圆与实验装置图

Fig. 6 Theoretical tangent circle and experimental device diagram

3 数值模拟结果

3.1 不同负荷下炉膛内流场及温度场分析

图 7 和图 8 给出了不同负荷下锅炉沿高度方向不同截面的速度和温度分布等值线图。可以看出,随着负荷的降低,煤粉燃烧强度和烟气流动速度均逐渐降低,从而降低了煤粉气流的刚性和穿透性,导致气流旋转强度减弱,中心低温区扩大,周围高温区缩小,切圆直径增大,可能造成水冷壁过热,影响锅炉的稳定运行。同时,尽管锅炉模型和燃烧器都按

炉膛中心对称布置,烟气的速度和温度切圆却没有保持在炉膛中心位置,各层高度的切圆中心都发生了不同程度的偏斜。在 3 种不同负荷下,在 P2 截面处(39.07 m)切圆中心偏斜均最大,且随着高度的增加,偏斜程度逐渐减小。由于形状受限,在灰斗区无法形成规则切圆。

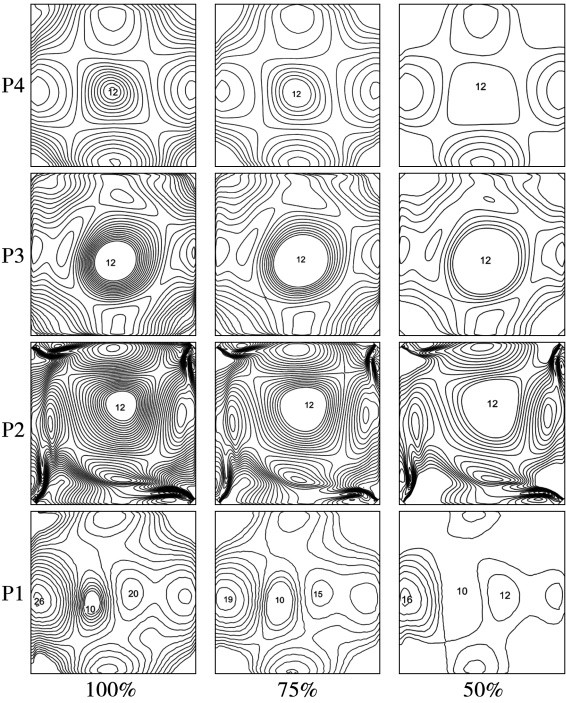


图 7 100%,75%,50%VWO 3 种不同负荷下
各截面速度等值线图

Fig. 7 Velocity isoline diagrams of each section under
three different loads of 100% , 75% and 50% VWO

综上所述,对于四角切圆燃烧锅炉炉膛,即使理论上能够实现完全的几何对称,但模拟结果得到的是关于模型几何竖直中心线不对称的解,即方程求出解的形式为非对称形式。这是一种分岔形式,即切圆中心的偏斜对应着叉形分岔的某个分支。这说明,尺寸完全对称的流动模型内部出现的不对称流场和温度场不是由于物理上的几何因素造成的,而是由解的非线性所导致。而且在实际中,无法实现工程尺寸的偏差,以及所有的射流速度和煤粉浓度的误差为零。锅炉炉膛的火焰测试也表明,实时检测炉膛内某点的温度时出现较大温度波动是正常现象。也就是说,火焰偏向具有不确定性,这符合非线性理论的多解特性。

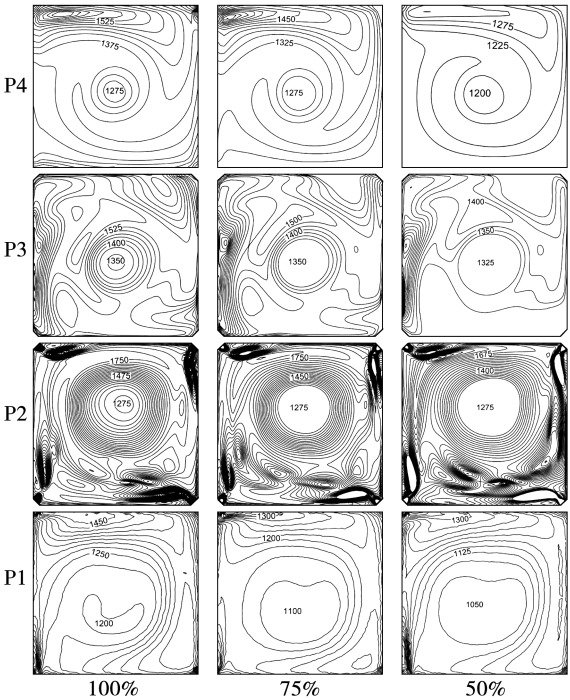


图 8 100%,75%,50%VWO 3 种不同负荷下
各截面温度等值线图

Fig. 8 Temperature isoline diagrams of each section under
three different loads of 100% , 75% and 50% VWO

3.2 不同负荷下炉膛内 NO_x 组分分布

图 9 给出了不同负荷下燃烧稳定时炉膛沿宽度方向 L1 ~ L4 监测线上 NO_x 的摩尔分数分布曲线。可以看出,在同一负荷下,炉膛在不同高度上摩尔分数偏差较大,左右两侧均发生了不同程度的偏斜,且在燃烧区(L2)炉膛中心位置与炉墙附近摩尔分数偏差最大;在不同负荷下,在炉膛相同高度处 NO_x 摩尔分数分布曲线变化规律也各不相同,不同负荷在相同炉膛高度左右两侧的摩尔分数高低出现一定随机性。

与速度和温度分布类似,炉膛内组分分布也出现了非线性方程的多解形式,表现为即使几何模型和边界条件完全对称,在不同时刻不同负荷下炉膛内的组分分布也始终不对称,发生了多种偏斜情况。一方面是由于软件计算偏差,更重要的原因是炉膛内的湍流射流以及煤粉燃烧过程本身就是非线性的,描述其过程的偏微分方程组也是典型的非线性数学问题,由此造成在实际与模拟中不同时刻炉膛内相同位置也总会出现多解情况。因此,以非线性的观点来看待炉内流动与燃烧问题才是真实的,锅

炉炉膛内具有多个可能的稳定运行状态。

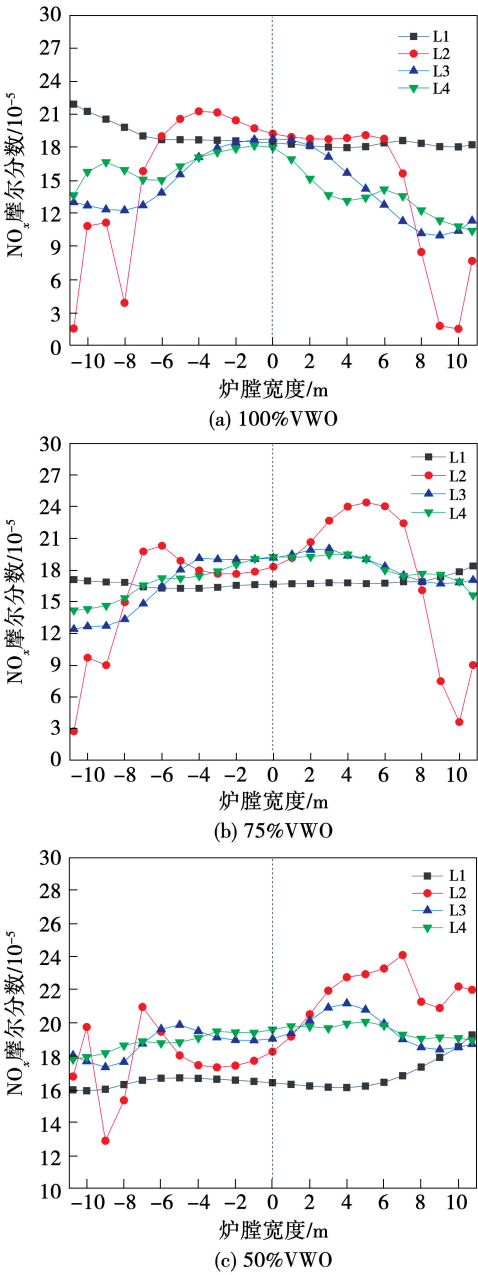


图 9 100%,75%,50% VWO 3 种不同负荷下在 L1 ~ L4 上的 NO_x 摩尔分数分布曲线

Fig.9 NO_x mole fraction distribution curves along L1 to L4 under three different loads of 100% , 75% and 50% VWO

4 实验验证与精准控制

同时打开模型 4 个角的喷嘴,流场稳定后在模型内形成切圆,如图 10 所示。此时,实验得到的流场切圆偏离理想切圆位置,切圆的形状和中心位置表现出随机性,排除实验装置上的微小误差,验证了

3.1 节得出的结论。实际速度切圆中心的偏斜属于分岔形态,对应着叉形分岔的某个分支。同时启动下的实验流场图也验证了速度切圆在中心位置的对称解不稳定,流动切圆的实际状态一定不会稳定在这个位置,而是稳定在速度切圆偏心的非对称解位置。

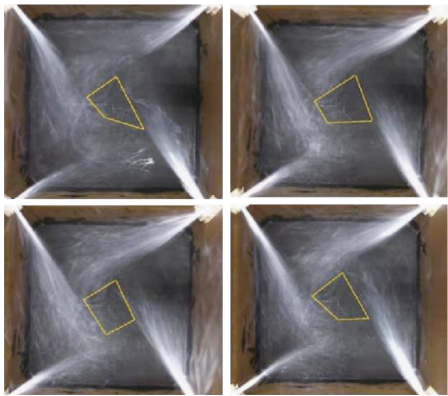


图 10 喷嘴同时启动下的流场切圆

Fig.10 Tangential circles of flow field under simultaneous startup of nozzles

保持喷嘴出口速度和压力不变,分别按顺时针和逆时针方向依次打开 4 个角的喷嘴。两种顺序启动方式都进行了重复实验,得到的速度切圆如图 11 所示。从图 11 可以看出,顺序启动方式下,重复进行实验,尽管流体的实际切圆位置不在几何中心,但得到了流场稳定且唯一的切圆位置。说明在此四角切圆的流动模型中,按一定顺序启动 4 个角的喷嘴,可以控制流场切圆位置唯一,实现了精准控制。

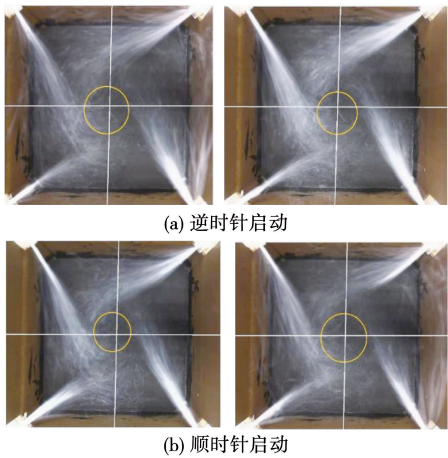


图 11 喷嘴不同方向顺序启动下的流场切圆

Fig.11 Tangential circles of flow field under sequential startup of nozzles in different directions

5 结 论

通过数值模拟分析了塔式炉膛在 3 种不同负荷下烟气的非线性流动特性,并比较了相应的速度、温度及组分场,最后通过实验进行三维炉膛内冷态非线性流动的验证,并提出通过顺序启动的方式对炉膛烟气流动进行精准控制,结论如下:

(1) 不同负荷下,几何结构和边界条件均对称的炉膛内烟气的流动速度、温度和组分分布均存在非线性现象,切圆中心都发生不同程度的偏斜且燃烧区偏斜最大。

(2) 尺寸完全对称的流动模型内部出现的不对称流场、温度场及组分场不是由于物理上的几何因素造成的,而是由于解的非线性所导致;在给定的边界条件下,三维模型内的流动方程具有多解,而且速度切圆在中心位置的对称解不稳定。

(3) 顺序启动下流动形成的切圆能稳定在同一位置,多次实验验证流动切圆的位置是唯一的,证明非线性系统具有初值依赖性。按一定顺序启动燃烧器,可以控制切圆位置的唯一性,实现流动的精准控制。

参考文献:

[1] 李 政,张东杰,潘玲颖,等. “双碳”目标下我国能源低碳转型路径及建议[J]. 动力工程学报,2021,41(11):905-909.
LI Zheng, ZHANG Dong-jie, PAN Ling-ying, et al. Low-carbon transition of China's energy sector and suggestions with the 'carbon-peak and carbon-neutrality' target[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(11):905-909.

[2] 张群力,高 伟,牛 宇,等. 助燃空气加湿式燃气锅炉低氮排放方式研究[J]. 暖通空调,2020,50(9):111-115,127.
ZHANG Qun-li, GAO Wei, NIU Yu, et al. Study on low nitrogen emission mode of combustion supporting air humidification gas-fired boilers[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2020, 50(9):111-115, 127.

[3] PARK H Y, BAEK S H, KIM Y J, et al. Numerical and experimental investigations on the gas temperature deviation in a large scale, advanced low NO_x , tangentially fired pulverized coal boiler[J]. Fuel, 2013, 104:641-646.

[4] 付忠广,王瑞欣,石 黎,等. 300 MW 机组四角切圆锅炉 SOFA 反切消旋数值模拟[J]. 热力发电,2017,46(3):51-58.
FU Zhong-guang, WANG Rui-xin, SHI Li, et al. Influence of SOFA yaw angle on residual swirling of flue gas in a 300 MW tangentially

fired pulverized-coal boiler[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(3):51-58.

[5] 姚志鹏,刘建全,仇中柱,等. 700 °C 四角切圆 Π 型锅炉烟温偏差优化控制[J]. 锅炉技术,2021,52(1):1-8.
YAO Zhi-peng, LIU Jian-quan, QIU Zhong-zhu, et al. Optimal control of flue gas temperature deviation of 700 °C tangentially firing type Π boiler[J]. Boiler Technology, 2021, 52(1):1-8.

[6] CHEN S, HE B, HE D, et al. Numerical investigations on different tangential arrangements of burners for a 600 MW utility boiler[J]. Energy, 2017, 122:287-300.

[7] 孙俊威,葛 铭,戴维葆,等. 燃烧优化对超临界锅炉热偏差影响的试验研究[J]. 热能动力工程,2020,35(7):109-113.
SUN Jun-wei, GE Ming, DAI Wei-bao, et al. Experimental study on the effect of combustion adjustment on thermal deviation of supercritical boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(7):109-113.

[8] XIE J, WEN W, YANG B, et al. Thermal deviation analysis of high-temperature reheater for single-tangential π type boiler[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 192:116846. 1-116846. 7.

[9] 王文帅,杨 莱,陈 建,等. 二维炉膛气液两相对冲流动数值模拟[J]. 上海理工大学学报,2021,43(3):235-240.
WANG Wen-shuai, YANG Mo, CHEN Jian, et al. Numerical simulation of gas-liquid two-phase relative impulse flow in a two-dimensional furnace[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2021, 43(3):235-240.

[10] 赵 明,黄 凯,王 慧. 燃烧器四角切圆布置炉膛内非对称冷态流场的数值模拟[J]. 工程热物理学报,2014,35(5):952-955.
ZHAO Ming, HUANG Kai, WANG Hui. Numerical simulation of asymmetrical cold flow in a boiler furnace with four corners tangential firing structure[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(5):952-955.

[11] YANG M, SHEN Y Y, XU H T, et al. Numerical investigation of the nonlinear flow characteristics in an ultra-supercritical utility boiler furnace[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 88:237-247.

[12] 陈 凯,杨 莱. 燃烧器对冲布置锅炉的非对称流动及非线性分析[J]. 动力工程学报,2021,41(4):257-262.
CHEN Kai, YANG Mo. Analysis of asymmetric flow and nonlinear characteristics in an opposed wall-fired boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(4):257-262.

[13] 赵晏锋,杨 莱,王文帅. 塔式锅炉炉内烟气流动的非线性特性分析及热偏差控制[J]. 动力工程学报,2022,42(7):612-621.
ZHAO Yan-feng, YANG Mo, WANG Wen-shuai. Analysis of non-

linear characteristics and thermal deviation control of flow gas in a tower boiler furnace[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2022,42 (7) :612 – 621.

[14] LI Y C. Dependence upon initial conditions[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2019, 70: 74 – 79.

[15] 李少华,陶文铨,邹增家,等. 圆内开缝八边形自然对流换热的数值分析[J]. 西安交通大学学报,1997,31(12) :39 – 43.
LI Shao-hua,TAO Wen-quan,ZOU Zeng-jia,et al. Numerical analysis of natural convection in a cylindrical envelope with an internal concentric slotted octagon[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,1997,31(12) :39 – 43.

[16] 战乃岩,徐沛巍,孙世梅,等. 底部加热长方体腔内空气自然对流的稳定结构及三维特性的研究[J]. 中国科学:技术科学,2010,40(7) :840 – 846.
ZHAN Nai-yan,XU Pei-wei,SUN Shi-mei,et al. Study on the stability and 3-dimensional character for natural convection in a rectangular cavity heated from below[J]. Scientia Sinica Technologica,2010,40(7) :840 – 846.

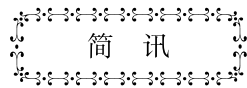
[17] DROSATOS P,NIKOLOPOULOS N,AGRANIOTIS M,et al. Decoupled CFD simulation of furnace and heat exchangers in a lignite utility boiler[J]. Fuel,2014,117:633 – 648.

[18] 刘建全,孙保民,陈晓萌,等. 旋流燃烧器给粉方式对锅炉 NO 排放特性影响的数值模拟[J]. 机械工程学报,2011,47(10) :119 – 125.
LIU Jian-quan,SUN Bao-min,CHEN Xiao-meng,et al. No distribution numerical simulation on different way of fuel feeding for swirl combustion boiler[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011,47(10) :119 – 125.

[19] DE SOETE G G. Heterogeneous N₂O and NO formation from bound nitrogen atoms during coal char combustion[J]. Symposium (International) on Combustion,1991,23(1) :1257 – 1264.

[20] WANG W,YANG M,LIU W. Experimental and numerical studies on the velocity and temperature deviation in a 1 000 MW tangentially fired boiler[C]// Proceedings of 2019 International Symposium on Advanced Mechanical and Power Engineering,2019.

(刘颖编辑)



热电联产在日本实现脱碳目标中的价值

据官网报道,日本热电联产的发电量占全国总发电量的 5%。

2011 年福岛地震后,日本才真正开始扩大热电联产市场,装机量不断增加,以确保在停电期间可以独立供电。从那时起,热电联产在工业部门中发挥了关键作用,占整个工业行业发电量的 80%。

现在涉及的主要热电联产概念是住宅型燃料电池(Ene-Farm)。Ene-Farm 是一种热电联产系统,它可以利用从天然气中提取的氢气和空气中的氧气之间的化学反应来发电,并利用发电过程中的热量来加热水。日前,Ene-Farm 的最新发展可连接互联网实时接收天气预报。例如,由雷暴等原因造成电力中断的可能性很大,Ene-Farm 则可以提前断开连接。智能手机应用程序可远程控制和监控系统,公司正在努力提高系统的能源效率和可靠性,并减少发电装置的零部件数量以减少碳排放量。

(孙嘉忆摘译自 [www. powerengineeringint. com](http://www.powerengineeringint.com))