

污泥掺混煤粉燃烧过程的数值模拟模型适应性研究

王海川¹, 李德波², 曾祥浩¹, 廖艳芬¹

(1. 华南理工大学 广东省能源清洁利用重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 广东省电科院能源技术有限公司, 广东 广州 510080)

摘要:针对某300 MW四角切圆锅炉煤粉掺烧污泥运行情况,采用FLUENT软件,基于单混合分数和双混合分数PDF模型,对锅炉炉膛内的烟气流动、燃烧过程和污染物 NO_x 排放进行数值模拟。结果表明:与单混合分数相比,双混合分数PDF模型能更好地模拟污泥的高挥发分和水分对燃烧的影响,出口烟气误差在4%以内,更加符合炉内实际燃烧过程;随着污泥掺混比例的增加,污泥中水分蒸发吸热造成炉膛内的整体燃烧温度下降;当污泥含水量为40%时,掺混比例在6%以内对锅炉的燃烧情况影响不大,在技术上是可行的;由于污泥的含氮量显著高于煤粉,对于含水量为40%的污泥,随着掺混比例的增加, NO_x 排放量增加;含水量为80%污泥掺混煤粉后,随着掺混比例的增加, NO_x 排放由于燃烧温度急剧降低而减少。

关键词:锅炉;污泥掺混;数值模拟;PDF模型

中图分类号:TK224

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2020.02.025

[引用本文格式]王海川,李德波,曾祥浩,等.污泥掺混煤粉燃烧过程的数值模拟模型适应性研究[J].热能动力工程,2020,35(2):179-186. WANG Hai-chuan, Li De-Bo, ZENG Xiang-hao, et al. Adaptability of numerical simulation model for the combustion process of sludge mixed with coal[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(2):179-186.

Adaptability of Numerical Simulation Model for the Combustion Process of Sludge Mixed with Coal

WANG Hai-chuan¹, Li De-Bo², ZENG Xiang-hao¹, LIAO Yan-fen¹

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Clean Utilization, South China University of Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510640; 2. Guangdong Electric Power Research Institute Energy Technology Co. Ltd., Guangzhou, China, Post Code: 510080)

Abstract: With a 300 MW tangentially fired boiler furnace as the research object, the numerical simulation was carried out using single-mixture/probability density function model and double-mixture/probability density function model. The flow and combustion process of combustible component and NO_x emission were obtained through numerical simulation using the fluent software. According to the results, compared with single mixing fraction, the simulation results of double mixing fraction/PDF model could better simulate the effect of high volatile matter and moisture of sludge on combustion. The error of outlet flue gas is less than 4%, which is more in line with the actual combustion process in the furnace. With the increase of sludge mixing ratio, the overall combustion temperature in the furnace decreases due to water evaporation and heat absorption in sludge. When the sludge moisture content is 40%, the mixing ratio within 6% has little effect on the combustion of the boiler, which is technically feasible. When the nitrogen content of sludge is significantly higher than that of pulverized coal, for the sludge with 40% water content, the NO_x

收稿日期:2019-04-03; 修订日期:2019-05-30

基金项目:2018年广州市科学研究计划重点项目专题(201804020082);国家质量监督检验检疫总局科技项目(2017QK152)

Fund-supported Project: Guangzhou Science Research Program (Key Project 201804020082), the General Administration of Quality Supervision, Inspection of Public Projects(2017QK152)

作者简介:王海川(1995-),男,黑龙江哈尔滨人,华南理工大学硕士研究生。

通讯作者:廖艳芬(1976-),女,湖北汉川人,华南理工大学教授, E-mail: yfliao@scut.edu.cn.

emission increases with the increase of mixing content. When the sludge with 80% water content is mixed with pulverized coal, the NO_x decreases sharply due to the decrease of combustion temperature, as the mixing content increases.

Key words: boiler, sludge co-combustion, numerical simulation, PDF transport model

引 言

电站煤粉炉掺混污泥技术不仅可以实现污泥的无害化处理,也可以利用污泥的燃烧热值发电,具有广泛的应用前景。

目前,污泥和煤粉的掺混化学反应和相互作用机理得到广泛的研究^[1-3]。苏胜等人^[4]通过研究混煤的燃烧过程,发现双混合分数/PDF 模型比单混合分数/PDF 模型具有更强的适应性,因为该模型可以分别跟踪单煤的燃烧过程。朱天宇等人^[5]通过对污泥煤粉掺烧过程的模型适应性研究发现,双混合分数/PDF 模型可以精确地描述污泥高挥发分的扩散燃烧过程。Yao Bin Yang 等人^[6]研究火电厂秸秆燃烧数值模拟过程,预测运行条件变化对于流场特性的影响,燃烧含水率在 25% 以上的污泥会影响可燃气体混合不均与燃烧不稳定等情况。殷立宝等人^[7]采用单、双混合分数 PDF 模型对四角切圆锅炉燃烧单煤和掺烧生活垃圾进行数值模拟,随着掺混比例的增加燃尽率稍有下降,对炉内流动、燃烧和污染物排放没有产生明显影响。张小桃等人^[8]研究燃尽风和生物质气对燃煤锅炉的影响,SOFA 配风比为 15% 并掺混 10% 的松子气最为合理,既能维持稳定燃烧,又能达到氮氧化物减排效果。

由于污泥燃烧的反应机理复杂,目前对于煤粉和污泥掺混过程的数值模型的适应性和反应机理仍处于不成熟的阶段。本文针对 300 MW 四角切圆锅炉内煤粉和污泥混烧情况,分别用单混合分数/PDF 模型、双混合分数/PDF 混合模型进行数值模拟并与现场实验数据进行对比,研究两种模型对于污泥煤粉掺混过程的适应性。同时改变污泥含水率和掺混比例,研究不同工况时的燃烧及排放特性。

1 试验设备和实验条件

研究对象为 300 MW 亚临界参数锅炉、自然循环汽包炉,采用中间一次再热和四角切向燃烧。锅炉的制粉系统采用正压直吹式系统,配备中速磨煤机。锅炉每角布置 6 层二次风口(AA、AB、BC、CD、

DE 和 EE)和 5 层一次风口(A、B、C、D 和 E),采用上下浓淡分离一次风喷嘴、同心反切燃烧技术和分离燃尽风技术(SOFA)。锅炉本体尺寸、炉膛横截面和燃烧器布置如图 1 所示。同时,顶风口设置 3 层分离燃尽风口(SOFA)和 1 层燃尽风口(OFA)。顶层燃尽风口作为消旋二次风口反切 17°,形成逆向旋转气流,降低炉内气流余旋,有利于顶部炉膛内烟气流组织。

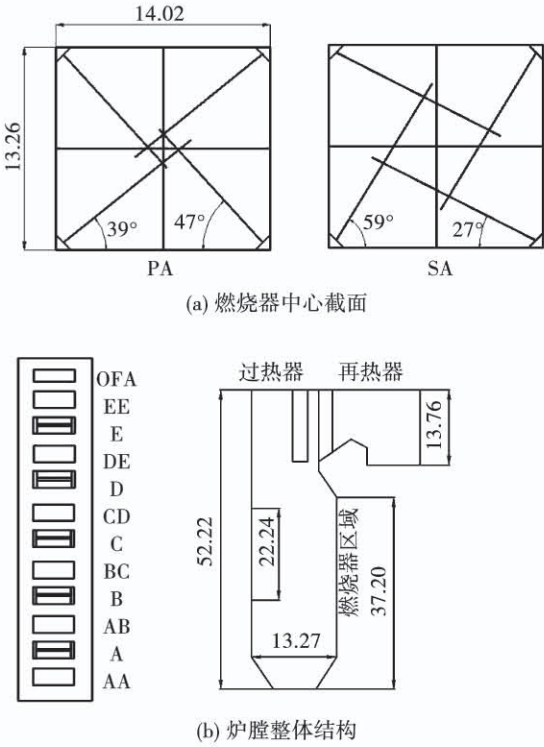


图 1 燃烧器中心截面和锅炉整体结构示意图 (m)
Fig. 1 Structure of the boiler and cross-section of the furnace (m)

2 燃烧特性分析

锅炉燃煤为该电厂实际运行用煤种 (Coal), 掺混污泥为广州 3 个不同区域的市政污泥厂采样的污泥(S₁、S₂ 和 S₃)。工业分析和元素分析结果表明,污泥的热值显著低于煤粉,污泥的含水量和灰分比煤粉要高,所以掺混过程会对炉膛内可燃组分的整体燃烧情况产生影响。热重实验采用 Mettler Toledo

热重分析仪,其附带的微量天平质量灵敏度小于 $\pm 0.1\text{ }\mu\text{g}$,温度灵敏度小于 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,为了降低试验误差,每个样品均进行了 3 次实验,重现性良好。污泥和煤粉的工业分析及元素分析如表 1 所示。

表 1 煤和污泥的工业分析和元素分析
Tab. 1 Proximate and ultimate analysis of coal and sludge

项目	工业分析/%				元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
	M_{ar}	A_{ar}	V_{ar}	FC_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	
煤	31.15	3.69	33.61	31.55	60.65	5.25	33.22	0.88	0	26 235.50
S_1	75.46	12.52	10.24	1.76	28.12	4.36	63.03	4.49	0	11 440.00
S_2	75.46	12.52	10.25	1.77	30.18	4.73	59.97	5.12	0	11 935.00
S_3	79.87	10.52	8.29	1.32	31.34	4.30	59.39	4.97	0	12 796.50

污泥和煤样的工业分析表明,污泥的含水量较高,污泥的灰分含量大于煤。同时热值分析表明,污泥的热值显著低于煤粉,由于煤粉和污泥的水分含量存在显著的不同,污泥中水分的蒸发吸热会对锅炉的稳定安全燃烧产生负面影响,同时会增加污染物排放控制设备的负荷。

对 3 种市政污泥和煤的单样进行热重分析,如图 2 所示。

煤粉存在单一而高的失重峰,主要是固定碳和挥发分的燃烧。而污泥均存在两个失重峰,分别是挥发分析出、燃烧失重峰和固定碳失重峰。由于煤的燃烧温度和成熟程度较高,挥发分析出和固定碳燃烧峰合并为一个峰。这表明,煤的成熟程度较高,燃烧特性比污泥要好^[9]。由于污泥的挥发分含量较高,具有明显的低温反应性,着火温度和活化能都低于煤。煤粉燃烧主要是固定碳的燃烧过程,污泥燃烧主要是高挥发分的析出过程。

3 数值模拟方法

3.1 数学模型

煤粉和污泥在炉膛内燃烧是一个复杂的流动、传热和传质过程。流场由时间平均的质量、动量和能量守恒方程来描述,采用 Realize $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟气相湍流流动过程;采用随机轨道模型来模拟煤粉颗粒和污泥颗粒的流动;采用混合分数 PDF 输运模型模拟气相湍流燃烧过程;采用动力/扩散控制反应速率模型模拟焦炭燃烧。采用双平行竞争反应模型模拟煤和污泥的热解过程^[10]。采用单混合分数 PDF 输运模型模拟煤粉污泥掺混燃烧,混合分数 f 定义为:

$$f = \frac{w_i - w_{i,\text{ox}}}{w_{i,\text{fuel}} - w_{i,\text{ox}}}$$

(1)

式中: w_i —某元素的质量分数;下标 ox—氧化剂;fuel—燃料。

采用双混合分数 PDF 方法模拟煤粉污泥的掺混燃烧过程,使用 2 个混合分数 f_1 和 f_2 分别模拟燃煤和污泥对炉内的化学反应过程和组分浓度的影响。 f_1 和 f_2 分别为源于煤粉和污泥排放的气体分别占通过燃烧器进入炉内的总气体和排放气体的质量

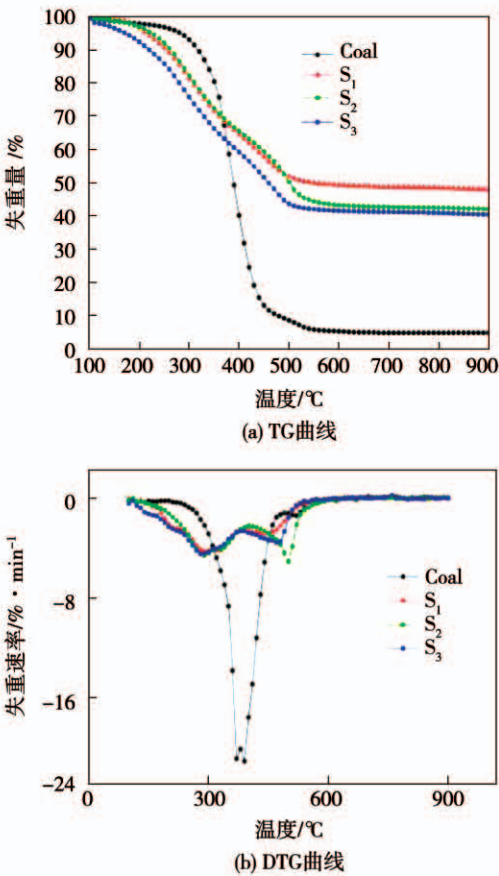


图 2 煤和污泥的 TG\DTG 曲线

Fig. 2 TG\DTG curve of coal and sludge

分数^[11]。组分输运方程源项由两种可燃组分的燃尽过程决定：

$$\frac{\delta}{\delta x_i}(\rho v_i f_j) = \frac{\delta}{\delta x} \left(\Gamma_{f_j} \frac{\delta f_j}{\delta x_i} \right) + S_{f_j} \tag{2}$$

其中, $S_{f_j} = \sum (M_j^{\text{out}} - M_j^{\text{in}}), j = 1, 2$ 。

假设 f_1 和 f_2 的输运方程的扩散系数相同, 即 $\Gamma_{f_1} = \Gamma_{f_2}$ 。考虑到湍流对于 f_1 和 f_2 的影响, 引入 f_1 和 f_2 的脉动均方值 g_1 和 g_2 , 其输运方程为:

$$\frac{\delta}{\delta x_i}(\rho v_i g_j) = \frac{\delta}{\delta x} \left(\Gamma_{g_j} \frac{\delta g_j}{\delta x_i} \right) + S_{g_j} \tag{3}$$

$$S_{g_j} = C_{g1,j} \mu_t \left[\left(\frac{\partial f_j}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_j}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_j}{\partial z} \right)^2 \right] - C_{g2,j} \rho \varepsilon \tag{4}$$

式中: μ_t —有效粘性系数。

假设脉动量 g_1 和 g_2 的各对应量相等, 即 $\Gamma_{g1} = \Gamma_{g2}, C_{g1} = C_{g2}$ 。求解 f 和 g 的输运方程得到 f_1 和 f_2 以及 g_1 和 g_2 。煤和污泥的可燃成分将以 $f_1:f_2$ 的比例在炉内混合燃烧, PDF 采用高斯截断分布。

由于煤粉和污泥主要以颗粒的形式从一次风口进入炉膛中, 流动过程采用离散相模型(DPM)。燃煤 NO 生成/还原模型主要是考虑到热力型 NO_x 和燃料型 NO_x。热力型 NO_x 的生成采用经典的广义 Zeldovich 原理; 燃料型 NO_x 分为挥发分 NO_x 和焦炭 NO 两部分; 热解中间产物为 HCN, 挥发分 N 全部转化为 HCN, HCN 被氧化成 NO, 也可以还原 NO 生成 N₂, 焦炭 N 则全部转化为 NO^[12]。

3.2 网格划分

采用分区划分网格法, 如图 3 所示。将数值计算区域分解成冷灰斗、燃烧器和炉膛上部烟道区; 为减小压力出口边界条件对于燃烧器核心燃烧区的影响, 将出口段区域适当延长^[13]。采用六面体结构化网格, 为避免伪扩散现象对数值模拟结果的影响, 对燃烧射流部分和一次风、二次风入口处进行适当加密^[14]。考虑到数值计算能力的限制和数值模拟结果的合理性, 确定总体网格数量在 300 万左右。

3.3 边界条件

一次风和二次风均采用质量入口边界条件, 离散方法采用二阶迎风方法。流量和温度采用设计参数, 燃尽风周界风和炉膛内部的屏式过热器进行适当地简化和调整。采用压力出口边界条件, 出口压力为 -80 Pa。炉膛壁面采用标准壁面方程, 无滑移边界条件。热交换采用第二类边界条件, 即给定壁

面温度和发射率。分别对单混合 PDF 模型、双混合 PDF 模型和组分输运燃烧模型进行验证; 同时研究不同污泥含水量和不同掺混比例对煤粉污泥掺混燃烧的影响。模拟工况如表 2 所示。

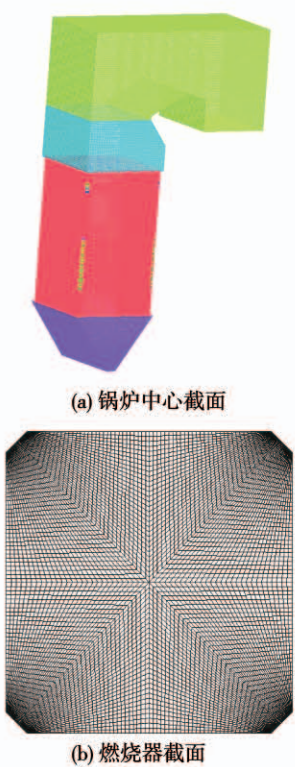


图 3 锅炉的网格划分
Fig. 3 Mesh generation of the furnace

表 2 模拟工况
Tab.2 Operating Conditions

工况	污泥含水量/%	掺混比例/%	反应模型
1	40	10	单混合分数 PDF
2	40	10	双混合分数 PDF
3	80	6	单混合分数 PDF
4	80	6	双混合分数 PDF
5	40	4	双混合分数 PDF
6	40	6	双混合分数 PDF
7	40	8	双混合分数 PDF
8	40	10	双混合分数 PDF
9	80	4	双混合分数 PDF
10	80	6	双混合分数 PDF
11	80	8	双混合分数 PDF
12	80	10	双混合分数 PDF

3.4 数值模拟验证

为了验证物理模型、网格模型和数值模型的合

理性和可靠性,将煤粉和污泥掺混的模拟数据与现场试验数据进行对比。分别针对污泥含水量为 40%,掺混比例为 10% (工况 1,2) 和污泥含水量为 80%,掺混比例为 6% (工况 3,4) 两组典型工况进行反应模型适应性验证,模拟数据与现场试验数据的对比如表 3 所示。

表 3 模拟数据与现场试验数据对比

Tab.3 The comparison of the simulation results and the measurement data

工况	模型	数值模拟 温度/℃	现场试验 温度/℃	误差/%
1	单 PDF 模型	1 103.38	1 141.15	3.31
2	双 PDF 模型	1 117.20	1 141.15	2.10
3	单 PDF 模型	1 210.58	1 154.50	4.63
4	双 PDF 模型	1 195.35	1 154.50	3.54

对比采用不同反应模型的数值模拟结果,比较锅炉出口含氧量和出口烟气平均温度。模拟结果显示,炉膛含氧量基本与实际的测量结果相同,均在

(2.3±0.1)%。针对烟道出口的温度对比结果,数值模拟的计算结果均在误差允许的范围之内。与单混合分数 PDF 模型对比,双混合 PDF 模型由于可以更精确地描述污泥和煤粉的燃烧特性差异,所以可以更为合理地模拟炉膛内的传热传质、烟气流动和可燃组分燃烧反应过程。

4 计算结果分析

4.1 速度场和温度场

图 4 为两种计算模型下的二次风口温度场。如图所示,双混合分数 PDF 模型着火距离较短;单混合分数 PDF 模型的可燃组分燃烧过程相对滞后,掺混污泥后着火距离较近。双 PDF 组分模型的高温区更加集中,火焰发展段更加充分,温度分布更加均匀。污泥的水分在进入炉膛高温区基本完全蒸发,污泥的挥发分在炉膛内提前释放造成着火提前,所以双混合分数 PDF 模型燃烧区域更加集中。双混合分数 PDF 模型,火焰中心上移,高温区的面积略微扩大。

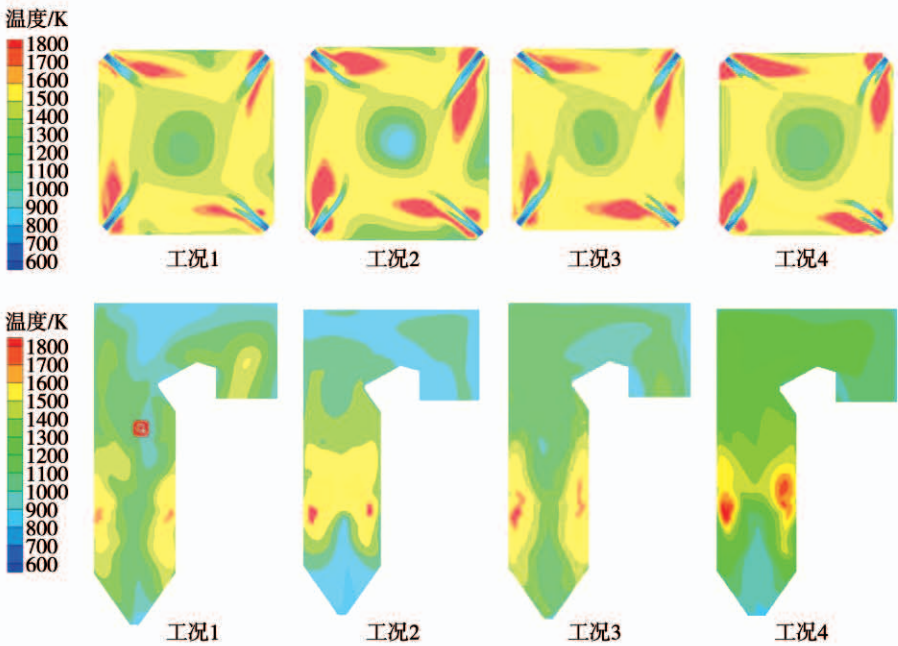


图 4 不同反应模型下锅炉的温度分布

Fig.4 Temperature distribution of boiler under different reaction models

与现场试验结果相比,由于双混合分数 PDF 模型可以更好地描述污泥和煤粉两种燃料的燃烧特性差异,将两种可燃组分的热值和工业分析分别输入到求解器中;而单混合分数模型只是将两种可

燃组分的工业分析和元素分析简单的线性叠加,假想成一种燃料进入锅炉炉膛内^[14]。所以双混合分数模型模拟误差更小,更加符合实际的炉内燃烧过程。

4.2 混烧特性

各工况炉膛温度云图如图 5 所示。由于污泥的含水率显著高于煤粉炉的设计值,随着掺混比例的增加,炉膛的整体燃烧温度降低,会影响污染物控制和锅炉的安全稳定运行。基于双/混合分数 PDF 模型,对不同掺混比例下的一次风燃烧器运行中心的

温度场数值模拟云图分析发现,污泥的掺混没有显著改变炉内的四角切圆形态,同时火焰中心燃烧比较稳定。这说明少量污泥的掺入不会显著改变炉膛内的火焰燃烧形态和烟气流动形态,煤粉中掺混少量污泥在技术上是可行的。

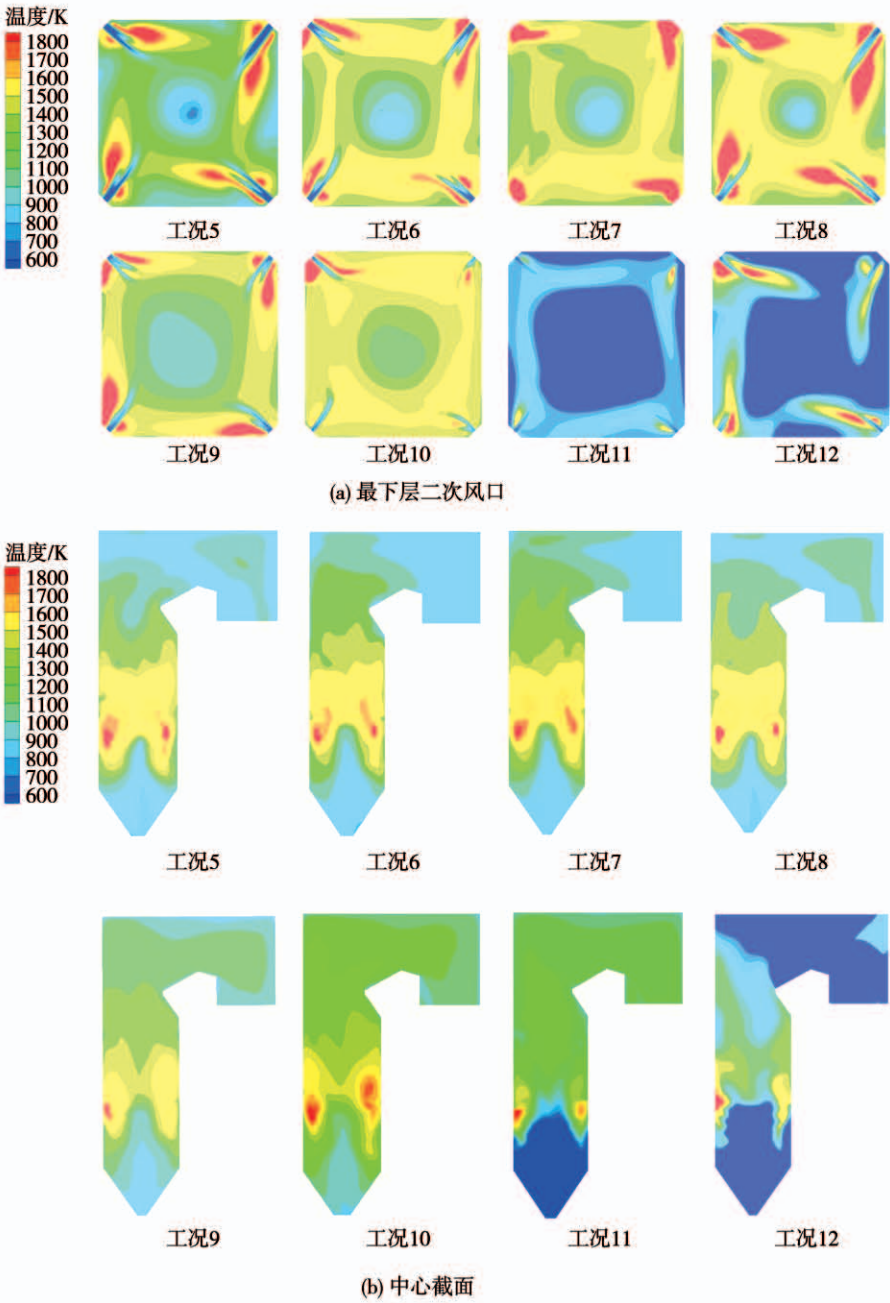


图 5 各工况温度分布云图

Fig. 5 Temperature distribution under different working conditions

通过对含水率为 40% 的污泥掺混煤粉的燃烧温度云图分析发现,污泥和煤粉掺混后均能形成完

整的切圆,且半径较小,与实际情况符合。由于污泥的含水量远高于煤粉含水量,所以随着掺混比例的

增加,水蒸气吸热造成炉膛的整体温度水平下降,同时火焰燃烧高温区下移。由于污泥中的高挥发分提前释放造成燃烧组分的着火提前。使最下层一次风区域温度有增加的趋势,同时主燃烧区域增大。

针对含水率为 80% 的污泥掺混煤粉的燃烧温度云图分析。高水分污泥掺混煤粉燃烧会引起炉膛燃烧的不稳定情况加剧,特别是当掺混比例在 8% 以上时,四角切圆的完整形态已经被破坏。火焰中心区最高温度显著低于低水分掺混煤粉燃烧的状况。这主要是污泥中水分的蒸发带来强烈的吸热,显著降低炉膛的整体燃烧温度,加剧燃烧不稳定。污泥含水量的增加会引起炉膛主燃烧区温度降低,可燃组分燃尽率降低,燃烧过程发生明显滞后。

根据对不同含水率的污泥在炉膛内的燃烧表现和流场分布分析,市政污泥应该经过简单烘干处理和降低含水率后再投送到炉膛内燃烧,否则不利于锅炉的安全稳定运行。

不同含水量污泥燃掺混燃烧污染物排放特性如表 4 所示。

表 4 不同工况燃烧过程结果对比
Tab.4 Comparison of combustng process
under different conditions

工况	污泥含水量/%	掺混比例/%	出口烟气温度/℃	出口 NO _x 含量/mg · m ⁻³
5	40	4	1 276.39	289.92
6	40	6	1 250.25	352.95
7	40	8	1 202.07	340.33
8	40	10	1 160.10	378.15
9	80	4	1 079.71	341.50
10	80	6	946.85	323.85
11	80	8	925.36	259.35
12	80	10	893.23	266.75

对含水量为 40% 的污泥掺混燃烧的污染物排放特性研究发现,出口的氮氧化物(NO_x)呈现增加的趋势,这主要是由于污泥的含氮量高于煤粉的含氮量。同时少量污泥的掺混没有改变炉膛内温度场的总体的切圆完整性和燃烧特征,所以对热力型 NO_x 和燃料型 NO_x 的生成机理和分布没有明显影响。含水量为 80% 的污泥掺混后出口的 NO_x 含量

随着污泥掺混比例的增加有减少的趋势,这与 40% 含水量掺混的结果不同,这主要是因为污泥的挥发分 N 生成的中间产物导致 NO_x 还原作用加强,燃料型 NO_x 的含量降低;炉内主燃烧区的温度降低,导致热力型 NO_x 的含量下降。两者共同作用下,导致含水量为 40% 水分污泥掺混后 NO_x 的排放量随着掺混比例的增加而降低。

5 结 论

(1) 与单混合分数模型相比,双混合分数模型可以更好地描述两种可燃组分的燃烧特性差异。双混合分数模型地模拟的温度场和速度场与实际情况更加接近,更符合实际燃烧过程。

(2) 含水量为 40% 的污泥掺混比例对燃烧的稳定性影响相对较小,掺混比例在 6% 以内对锅炉整体运行影响不大;含水量 80% 的污泥掺混比例在 8% 以上时会显著影响炉膛内燃烧的稳定性。所以少量污泥在煤粉炉中掺混在技术上是可行的,高水分污泥在进入炉膛内燃烧需进行干燥预处理。

(3) 不同含水量污泥掺混后的变化趋势有所不同,对于含水量为 40% 的污泥,NO_x 排放量随着掺混比例增加而增大;对于含水量为 80% 的污泥,NO_x 排放量随着掺混比例增加而减少,这主要是由于温度急剧下降导致的热力型 NO_x 减少所致。

参考文献:

[1] 解海卫,张 艳,张于峰.城市生活垃圾焚烧处理工艺的研究[J].可再生能源,2010,28(5): 76-79.
XIE Hai-wei,ZHANG Yan,ZHANG Yu-feng. Study on the incineration technology of municipal solid waste[J]. Renewable Energy, 2010,28(5): 76-79.

[2] MARISAMY M,TOMOAKI N,KUNIO Y. A comparison of co-combustion characteristics of coal with wood and hydrothermally treated municipal solid waste[J]. Bioresource Technology,2010,101(7): 2477-2482.

[3] MARISAMY M,TOMOAKI N,KUNIO Y. A comparison of co-combustion characteristics of coal with wood and hydrothermally treated municipal solid waste[J]. Bioresource Technology,2010,101(7): 2477-2482.

[4] 苏 胜,蔡兴飞,吕宏彪,等.采用双混合分数/概率密度函数方法模拟混煤燃烧[J].中国电机工程学报,2012,32(2): 45-52.

- SU Sheng, CAI Xing-fei, LYU Hong-biao, et al. Simulation of mixed coal combustion using double mixed fraction/probability density function method[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(2): 45–52.
- [5] 朱天宇, 殷立宝, 湛志钢, 等. 涡耗散模型和混合分数模型模拟锅炉煤粉掺烧污泥过程的适应性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(8): 2864–2872.
- ZHU Tian-yu, YIN Li-bao, ZHAN Zhi-gang, et al. Adaptability of eddy dissipation model and mixed fraction model to simulate boiler pulverized coal mixed sludge process[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2016, 47(8): 2864–2872.
- [6] BIN Yang-yao, ROBERT N, VIDA S, et al. Mathematical modelling of straw combustion in a 38 MWe power plant furnace and effect of operating conditions[J]. Fuel, 2007, 86(1–2): 129–142.
- [7] 殷立宝, 朱天宇, 张成, 等. 掺烧污泥煤粉锅炉燃烧特性的数值模拟[J]. 热力发电, 2015, 44(3): 28–33.
- YIN Li-bao, ZHU Tian-yu, ZHANG Cheng, et al. Numerical simulation of combustion characteristics of blended coal pulverized coal boiler[J]. Thermal Power Generation 2015, 44(3): 28–33.
- [8] 张小桃, 黄勇, 张川, 等. 燃尽风及生物质气对燃煤锅炉燃烧过程及 NO_x 排放影响的数值模拟[J]. 热能动力工程, 2019, 34(2): 39–46.
- ZHANG Xiao-tao, HUANG Yong, ZHANG Chuan, et al. Numerical simulation of the effects of burning wind and biomass gas on combustion process and NO_x Emission of Coal-fired Boilers[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy Engineering and Power, 2019, 34(2): 39–46.
- [9] 楼波, 王芳, 彭晓君. 煤粉炉内掺混废水污泥燃烧的数值模拟与分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2010, 38(10): 153–156.
- LOU Bo, WANG Fang, PENG Xiao-jun. Numerical simulation and analysis of combustion of sewage sludge in pulverized coal furnace[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2010, 38(10): 153–156.
- [10] 刘 燮, 钟文琪, 李 杰, 等. 超超临界锅炉燃烧配风优化的三维数值模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(5): 794–800.
- LIU Xie, ZHONG Wen-qi, LI Jie, et al. Three-dimensional numerical simulation of combustion and air distribution optimization for ultra-supercritical boilers[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(5): 794–800.
- [11] 孙俊威, 戴维葆, 陈国庆, 等. 600 MW 超临界对冲燃烧锅炉水冷壁高温腐蚀运行优化调整[J]. 热能动力工程, 2019(6): 178–183.
- SUN Jun-wei, DAI Wei-bao, CHEN Guo-qing, et al. Optimization adjustment of high temperature corrosion operation of water wall in 600 MW supercritical hedge combustion boiler[J]. Thermal Power Engineering, 2019(6): 178–183.
- [12] 林 海. 基于 CFD 的城市生活垃圾焚烧炉优化运行及烟气排放特性实验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- LIN Hai. Experimental study on optimal operation and smoke emission characteristics of municipal solid waste incinerator based on CFD[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [13] 穆延非, 闫 姝, 马玉华, 等. 锅炉水冷壁腐蚀、结焦问题的数值模拟研究[J]. 热能动力工程, 2019(6): 116–121.
- MU Yan-fei, YAN Shu, MA Yu-hua, et al. Numerical simulation study on corrosion and coking problem of boiler water wall[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy Power, 2019(6): 116–121.
- [14] 王 鹏, 陈寅彪, 廖海燕, 等. 200 MW 富氧燃烧锅炉配风优化数值模拟研究[J]. 动力工程学报, 2019, 39(2): 98–103.
- WANG Peng, CHEN Yin-biao, LIAO Hai-yan, et al. Numerical simulation of air distribution optimization for 200 MW oxyfuel combustion boilers[J]. Journal of Power Engineering, 2019, 39(2): 98–103.

(丛 敏 编辑)