

基于 EDM、PDF 和 FR/ED 模型的煤粉燃烧过程适应性研究

程晓磊^{1,2,3}

(1.煤科院节能技术有限公司,北京 100013;2.煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013;3.国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室,北京 100013)

摘要:还原气氛下煤粉反应过程兼具燃烧和气化的特点,是煤粉实现低氮燃烧的关键因素,合适的化学反应模型是准确模拟该过程的基础。笔者基于煤粉双锥燃烧器,对比了 EDM 模型、PDF 模型和 FR/ED 模型在氧化气氛和还原气氛的模拟结果,通过与试验结果的对比验证,确定了不同反应气氛适合的化学反应模型。研究表明,3 种模型在煤粉着火位置和逆喷传播距离的预测上存在差别,PDF 模型着火点更靠近燃烧器逆喷口,EDM 模型一次风和煤粉喷出经过一段升温过程后逐渐燃烧,FR/ED 模型的升温过程更长,壁面低温区域接近前锥长度一半;使用 FR/ED 模型模拟时燃烧器内平均温度最高,EDM 模型次之,PDF 模型最低;EDM 模型中未考虑 CO 反应,燃烧器内基本无 CO 存在,PDF 模型高 CO 浓度区域集中在煤粉燃烧初期,燃烧器出口 CO 含量较低,FR/ED 模型化学反应动力学参数在煤粉燃烧整个区域内均有较高 CO 浓度存在。由于考虑了焦炭与氧气气化反应的影响,FR/ED 模型模拟燃烧器内氧含量明显低于 EDM 和 PDF 模型,当过量空气系数为 1.2 时,燃烧器出口处氧含量为 7.0%,明显低于 EDM 模型的 11.1%和 PDF 模型的 12.0%,燃烧器出口处 CO 含量为 3.5%,明显高于 EDM(0)和 PDF 模型(0.8%);过量空气系数为 0.5 时,EDM 模型对 CO 成分的预测结果偏差较大,燃烧器出口 CO 浓度为 0.05%,采用 PDF 和 FR/ED 模型时燃烧器出口 CO 含量分别为 5.73%和 10.7%。从模拟结果与试验结果的对比来看,在氧化气氛下,主要发生煤粉的燃烧反应,EDM 模型和 PDF 模型在温度、CO 含量上的预测较为准确,与试验数据偏差较小,FR/ED 模型偏差较大;在还原性气氛下,EDM 模型模拟的结果几乎不生成 CO 和 H₂,并不适合还原性气氛,PDF 模型和 FR/ED 模型有较合理的还原气氛模拟结果,两者的差别在于还原性气体的生成位置,PDF 模型喷口位置 CO 浓度较高,出口浓度偏低,FR/ED 模型随着煤粉反应流程的进行,CO 浓度逐渐升高,出口浓度更接近试验结果。综合考虑,氧化气氛下双锥燃烧器适合采用 EDM 模型和 PDF 模型进行模拟,还原气氛下适合采用 FR/ED 模型进行模拟。

关键词:煤粉燃烧;数值模拟;还原气氛;双锥燃烧器;部分气化

中图分类号:TK229 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2020)02-0043-07

Study on the adaptability of EDM, PDF and FR/ED models to pulverized coal combustion process simulation

CHENG Xiaolei^{1,2,3}

(1.China Coal Research Institute Company of Energy Conservation, Beijing 100013, China; 2.State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China; 3.National Energy Technology & Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China)

Abstract: The reaction process of pulverized coal in reducing atmosphere has both the characteristics of combustion and gasification, which is the key factor of low-NO_x combustion for pulverized coal. The appropriate chemical reaction model is the basis for accurate simulation of the process. In this paper, the numerical simulation accuracy was studied based on the double cone burner by comparing results of

收稿日期:2020-02-28;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.20022805

基金项目:天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目重点项目(2018-TD-ZD001)

作者简介:程晓磊(1986—),男,河北邯郸人,助理研究员,博士,主要从事煤粉高效清洁利用研究。E-mail:chengxl328@126.com

引用格式:程晓磊.基于 EDM、PDF 和 FR/ED 模型的煤粉燃烧过程适应性研究[J].洁净煤技术,2020,26(2):43-49.

CHENG Xiaolei. Study on the adaptability of EDM, PDF and FR/ED models to pulverized coal combustion process simulation[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(2): 43-49.



移动阅读

EDM model, PDF model and FR/ED model under the conditions of oxidation atmosphere and reducing atmosphere. Also, by comparing with the experimental results, the chemical reaction models suitable for different reaction atmosphere were determined. The results show that, there are differences among the three models in the prediction of pulverized coal ignition position and back-flow injection distance. The ignition point of PDF model is closer to the back-flow injection nozzle of burner. For EDM model, the primary air and pulverized coal gradually burn after a period of temperature rise process, and the temperature rise process for FR/ED model is longer, and the low-temperature area of wall nearly covers half of the front cone length. When FR/ED model is used to simulate the combustion process, the average temperature is the highest, the EDM model is the second, and the PDF model is the lowest. The CO reaction is not considered in the EDM model, and there is almost no CO in the burner. The high CO concentration area for PDF model is concentrated in the early stage of pulverized coal combustion, and the CO content at the outlet of burner is low. While the kinetic parameters of chemical reaction in FR/ED model, the high CO concentration in the whole area of pulverized coal combustion is found. Considering the effect of gasification reaction of coal and oxygen, the oxygen content in the burner simulated by FR/ED model is significantly lower than that of EDM and PDF model. When the excess air coefficient is 1.2, the oxygen content at the burner outlet is 7.0%, which is significantly lower than 11.1% of EDM model and 12.0% of PDF model. The CO content at the burner outlet is 3.5%, which is significantly higher than ~0% of EDM model and 0.8% of PDF model. When the excess air coefficient is 0.5, the prediction results of the EDM model for CO composition are quite different. The CO concentration at the burner outlet is 0.05%. The CO content at the burner outlet is 5.73% and 10.7%, by using PDF and FR/ED models, respectively. Through the comparison between simulation and experimental results for the oxidation atmosphere, the combustion reaction of pulverized coal mainly occurs. The prediction of temperature and CO content of EDM model and PDF model is more accurate, and the deviation of FR/ED model is larger with less deviation from the test data. Under the reducing atmosphere, the simulation results of EDM model hardly generate CO and H₂, which is not suitable for reducing atmosphere, while the PDF model and FR/ED model have reasonable simulation results. The difference is mainly the generating position of reducing gas. The CO concentration at the nozzle of PDF model is higher than that at the outlet, while the CO concentration of FR/ED model increases gradually with the process of pulverized coal reaction, which is closer to the test results. Considering comprehensively, EDM model and PDF model are suitable for the simulation of biconical burner in oxidation atmosphere, and FR/ED model is suitable for the simulation in reduction atmosphere.

Key words: pulverized coal combustion; numerical simulation; reducing atmosphere; double cone combustor; partial gasification

0 引言

随着大气污染物排放的日益严格,几乎所有燃煤电站锅炉和大量工业锅炉开始执行超低排放标准。低氮燃烧技术可以在燃烧过程中大幅减少 NO_x 排放量,先进的煤粉低氮燃烧技术可控制 NO_x 初始排放至 200 mg/m³ 以下。目前常用的低氮燃烧技术包括空气分级技术、燃料分级技术、烟气再循环技术、无焰燃烧技术等抑制方法,以及旋流燃烧器、浓淡燃烧器、钝体燃烧器等设备结构形式。这些常用的低氮燃烧技术共同特点是,在燃烧初期采用低过量空气系数进行反应,形成还原性气氛来抑制煤粉燃烧过程的 NO_x 生成。部分学者研究表明,在还原性气氛条件下煤粉的燃烧特性、NO_x 生成特性与常规燃烧过程有较大区别,需针对实际应用条件进行专门研究^[1-3]。

对于煤粉燃烧过程的研究,由于计算流体力学(CFD)具有成本低、周期快的特点,加之数值模拟模型的不断发展,逐渐成为不可或缺的研究工具。其中,化学反应模型的选取对数值模拟精度有重要影响,不同的化学反应模型适用于不同的煤粉燃烧模拟过程。工业应用过程中,不同学者常用的数值模

拟模型主要包括 EDM 模型(Eddy dissipation model)、PDF 模型(Non-premixed model)和 FR/ED 模型(Finite rate/eddy dissipation model)。在煤粉燃烧方面,王通^[4]采用 PDF 模型模拟对比了 2 种旋流燃烧器的温度分布 NO_x 生成情况;朱天宇^[5]使用 EDM 和 PDF 模型模拟煤粉掺烧污泥的过程,认为 EDM 模型比 PDF 模型更好地模拟污泥掺混条件下的模拟;马文明等^[6]采用 EDM 模型模拟了工业锅炉低氮燃烧器的燃烧特性;汪延鹏等^[7]研究了 EDM 模型中反应常数 A 对数值模拟结果的影响;陈登高等^[8]采用 EDM 模型进行了煤粉空气分级条件下的数值模拟,认为 EDM 模型未考虑焦炭气化反应会导致还原性气体成分偏低,影响对 NO_x 排放的模拟;张勇等^[9]、段艳松等^[10]分别使用 FR/ED 模型模拟了褐煤半焦和水煤浆 MILD 燃烧过程;刘敬樟等^[11]通过与 IFRF 实际试验结果对比,认为 FR/ED 模型在炉内温度、组分、火焰结构的预测均较准确。在煤粉气化的模拟方面,刘臻等^[12]认为 EDM 模型对合成气组分的浓度分布预测误差较大,PDF 模型对喷嘴附近温度场和浓度场的预测结果不合理;李涛^[13]使用 FR/ED 模型进行了 Shell 气化炉的模拟。对于还原性气氛下的煤粉燃烧过程,介于传统煤粉燃烧和

粉煤气化过程之间,需要综合考虑模型对燃烧和气化的适应性。

本文以双锥煤粉燃烧器为基础,通过在不同反应气氛下对比 EDM 模型、PDF 模型和 FR/ED 模型对燃烧器内燃烧特性的模拟,为还原性气氛条件下煤粉燃烧过程模拟的化学反应模型选择提供依据。

1 燃烧器结构及数值模拟模型

1.1 燃烧器结构

煤科院节能技术有限公司开发的中心逆喷双锥燃烧器^[14-15]具有独特的燃料逆喷、烟气回流和双锥预燃室的特点,在煤粉着火、稳定燃烧方面有明显优势,目前单台燃烧器功率涵盖 2.8~42 MW,已在煤粉工业锅炉上有十多年的应用经验。燃烧器配风分为一次风和二次风,其中一次风为直流风,在双锥交接处逆向喷入燃烧器内,二次风经旋流叶片后进入燃烧器,逐步与一次风混合燃烧后从燃烧器出口喷出。随着低氮燃烧技术的发展,燃烧器的工作条件逐渐由氧化气氛转变为还原性气氛,需要进行还原气氛下的数值模拟工作。本文的数值模拟在 7 MW 双锥燃烧器上进行。中心逆喷双锥燃烧器如图 1 所示。

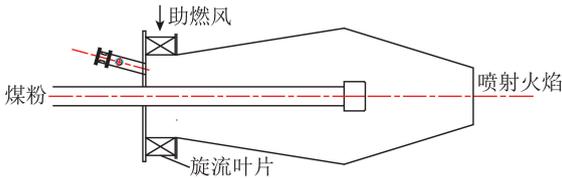


图 1 中心逆喷双锥燃烧器

Fig.1 Double cone combustor with centre reverse spraying

1.2 数值模拟方法

本文的数值模拟计算中,采用煤粉燃烧器实际运行所用煤质数据,见表 1。湍流模型采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型,该模型可相对准确模拟湍流流动中的旋转射流问题;燃烧器符合光学深度大于 1 的条件,辐射模型选用 P1 模型,具有较高的计算效率;煤粉的挥发分析出选用双竞争反应模型,两反应在不同温度范围区间控制析出速率,其反应动力学参数见表 2。气固两相流动选用拉格朗日法的 DPM 离散相模型,该模型适用于离散相体积分分数小于 10% 的模型,DPM 模型使用面源注入。化学湍流相互作用模型分别选用 EDM 模型、PDF 模型和 FR/ED 模型,其中 FR/ED 模型考虑气化过程中涉及的化学反应,反应方程及其反应机理参数见表 3。

表 1 燃用煤种的工业分析和元素分析
Table 1 Proximate and ultimate analysis of utilized coal sample

工业分析/%				元素分析/%				
M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	C_{ad}	H_{ad}	O_{ad}	S_{ad}	N_{ad}
5.13	9.42	32.49	52.96	68.98	3.92	11.22	0.50	0.83

表 2 双竞争反应模型动力学参数
Table 2 Reaction kinetics parameters of two competing rates model

项目	指前因子	活化能/ ($J \cdot (kg \cdot mol)^{-1}$)	生成率 因子
一次(慢速)反应	2×10^5	1.046×10^8	0.3
二次(快速)反应	1.3×10^7	1.674×10^8	1.0

表 3 气化过程的化学反应及反应动力学机理^[9-10]
Table 3 Reaction and kinetic mechanisms for gasification process^[9-10]

	化学反应	指前因子	活化能/ ($J \cdot (kg \cdot mol)^{-1}$)
1	$vol + 1.342 2O_2 \rightarrow 1.289 3CO + 1.999 7H_2O + 0.028 8N_2$	2.119×10^{11}	2.027×10^8
2	$CO + 1/2O_2 \rightarrow CO_2$	2.239×10^{12}	1.7×10^8
3	$C(s) + 1/2O_2 \rightarrow CO$	267	1.26×10^8
4	$C(s) + CO_2 \rightarrow 2CO$	2 100	2.98×10^8
5	$C(s) + H_2O \rightarrow CO + H_2$	36	1.54×10^8
6	$H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$	8.83×10^8	1×10^8
7	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	2.98×10^{12}	3.69×10^8

对 7 MW 双锥燃烧器结构进行简化,分为一次风进口、二次风进口、出口、燃烧器壁面等,采用 ICEM 进行网格划分,网格数量为 23.3 万。双锥燃烧器网格划分如图 2 所示。

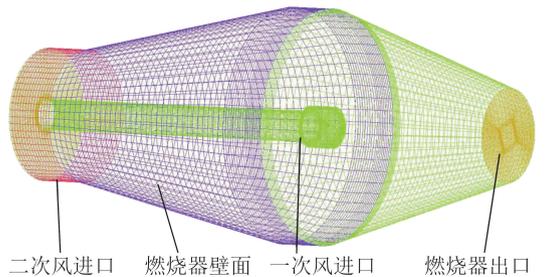


图 2 双锥燃烧器网格划分

Fig.2 Meshing of double cone combustor

2 模拟结果与分析

分别从常规氧化气氛燃烧和还原气氛燃烧 2 种工况下进行不同模型模拟结果的对比。其中常规氧

化气氛燃烧条件下,所有助燃空气均由一次风和二次风通入燃烧器,燃烧器内过量空气系数为1.2;还原气氛下,仅有部分助燃空气进入燃烧器,燃烧器内过量空气系数为0.4。

2.1 氧化气氛燃烧模拟对比

氧化气氛的模拟工况为:7 MW 燃烧器,供料量 0.298 kg/s,一次风 0.25 kg/s,二次风 2.75 kg/s,燃烧器内过量空气系数为1.2。

氧化气氛下3种模型模拟的燃烧器内温度分布如图3所示。燃烧器内高温区集中在回流帽逆喷开始区域和后锥区域。一次风和煤粉经回流帽喷口流出后,沿着一次风管的逆向逐渐升温至煤粉燃烧温度,在一次风与二次风混合后速度为0处的燃烧温度最高,此后气态和固体颗粒随着二次风经旋流进入燃烧器前锥内较大空间和后锥进行燃烧反应。燃烧器后锥和出口附近火焰集中于燃烧器中心,温度分布呈中间高、壁面附近低的趋势。

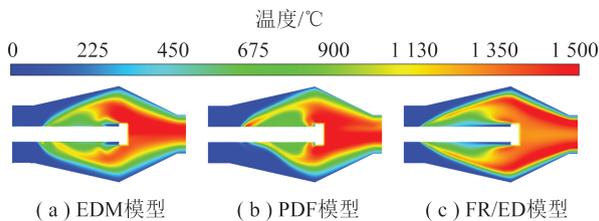


图3 氧化气氛下不同反应模型对温度分布的影响

Fig.3 Influence of different reaction models on temperature distribution under oxidation atmosphere

3种模型结果的区别主要在于煤粉着火的位置和逆喷传播的距离。PDF模型的起火点更靠近逆喷的喷口,EDM模型的一次风喷出经过一段升温过程后逐渐燃烧,FR/ED模型的一次风升温过程更长,壁面的低温区域持续接近前锥长度的一半。该燃烧器的热态燃烧试验结果表明^[16],一次风管从逆喷出口开始到叶片区域依次为煤粉喷射区、煤粉加热区、煤粉着火区、焦炭燃烧区,着火区距离一次风管喷口的相对距离为20%~30%,从着火区域判断,FR/ED模型更接近实际结果。烟气和高温向叶片方向传播的能力由小到大排列为PDF模型、EDM模型和FR/ED模型。叶片附近属于焦炭燃烧区,该位置紧贴一次风管附近,会出现不同程度局部高温区,3种模型的模拟中也有不同程度局部高温区出现。

对燃烧器沿火焰传播方向上不同截面平均温度变化趋势进行对比,如图4所示。FR/ED模型模拟结果平均温度最高,EDM模型次之,PDF模型最低。在前锥部分EDM模型和FR/ED模型结果较接近,

后锥处EDM和PDF模型结果更接近。其中FR/ED模型燃烧器出口平均温度126℃,比EDM模型的879℃和PDF模型的876℃高约250℃。

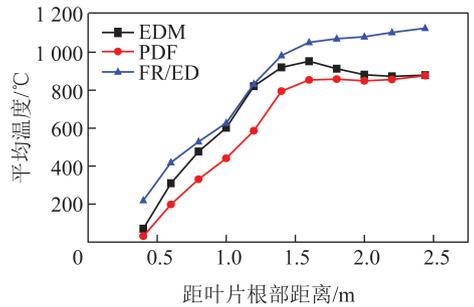


图4 不同反应模型对燃烧器内温度分布的影响

Fig.4 Influence of different reaction models on temperature distribution of combustor

氧化气氛条件下不同反应模型对氧浓度分布的影响如图5所示。可知不同模拟方法条件下燃烧过程的区别。PDF模型回流帽附近氧气很快耗尽,EDM模型和FR/ED模型在逆喷的方向上均持续了一段距离后氧气才耗尽。

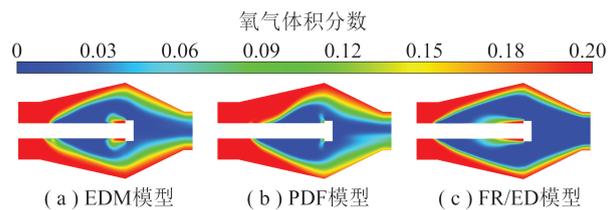


图5 氧化气氛下不同反应模型对氧浓度分布的影响

Fig.5 Influence of different reaction models on oxygen content distribution under oxidation atmosphere

氧化气氛下不同反应模型对CO浓度分布的影响如图6所示。对于CO含量的预测,3种模拟方法的差别较大,EDM模型中只考虑了挥发分与氧气反应释放的CO,且还有CO和O₂的燃烧反应,燃烧器内基本无CO存在;PDF模型中,由于计算的是化学反应平衡状态的参数,在一次风和煤粉逆喷进入燃烧器的燃烧初期缺氧的条件下,CO浓度较高,随着O₂和煤粉的逐渐混合,CO发生反应;FR/ED模型考虑了化学反应动力学参数,在一次风和煤粉混合物升温的开始区域内无CO生成,在逆喷的末端区域有大量CO生成,在燃烧器的大部分区域内CO含量较高,基本与燃烧器的高温区重合,燃烧器出口处CO含量较高。

燃烧器不同区域截面平均气体成分组成对比如图7所示。FR/ED模型由于引入了焦炭与氧气的气化反应,燃烧器内焦炭含量和氧含量明显低于EDM和PDF模型,燃烧器出口处氧含量为7.0%,比EDM模型的11.1%和PDF模型的12.0%低4%~

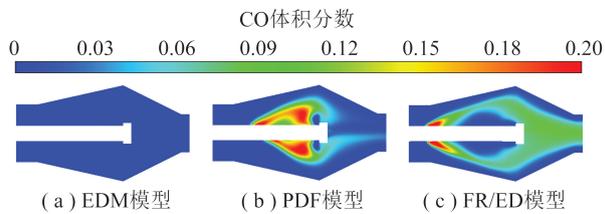


图 6 氧化气氛条件下不同反应模型对 CO 浓度分布的影响

Fig.6 Influence of different reaction models on CO content distribution under oxidation atmosphere

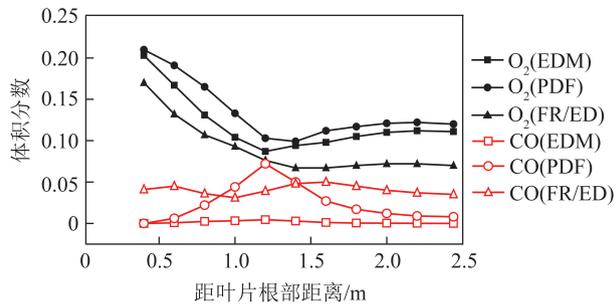


图 7 不同反应模型对燃烧器内气体组成分布的影响

Fig.7 Influence of different reaction models on gas distribution of combustor

5%。而 FR/ED 模型下燃烧器出口处 CO 含量为 3.5%，明显高于 EDM(0)和 PDF 模型(0.8%)。

2.2 还原气氛燃烧模拟对比

还原气氛模拟工况为:7 MW 燃烧器,供料量 0.298 kg/s,一次风 0.25 kg/s,二次风 0.93 kg/s,燃烧器内过量空气系数为 0.5。

还原气氛条件下不同反应模型对温度分布的影响如图 8 所示。在还原性气氛下,煤粉的着火位置和逆喷传播的距离仍是 3 种模拟模型的主要区别。PDF 模型的起火点更靠近逆喷的喷口,EDM 模型的一次风喷出后经过一段升温过程后逐渐燃烧,FR/ED 模型的一次风升温过程更长,壁面的低温区域持续接近前锥长度的一半。烟气和高温向叶片方向传播的能力由小到大排列为 PDF 模型、EDM 模型和 FR/ED 模型,EDM 模型和 FR/ED 模型的烟气高温区域趋于燃烧器端盖位置。

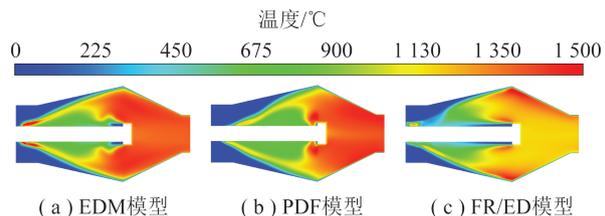


图 8 还原气氛下不同反应模型对温度分布的影响

Fig.8 Influence of different reaction models on temperature distribution under reduction atmosphere

燃烧器的高温区域模拟结果也不相同,EDM 模型模拟的结果高温区域集中在叶片附近和前后锥交

接处较大的区域内;PDF 模型的高温区域集中在一次风逆喷的位置和燃烧器后锥及出口区域;FR/ED 模型的高温区域主要集中在前后锥交接处的壁面附近区域。

不同反应模型对燃烧器内温度分布的影响如图 9 所示。从燃烧器不同截面平均温度分布对比来看,与氧化气氛时结果类似,在前锥处 EDM 和 FR/ED 模型模拟结果接近,在后锥处 EDM 和 PDF 模型模拟结果接近。其主要原因是:PDF 模型为化学反应平衡模型,部分煤粉在一次风喷口处即发生反应,前锥处反应进行程度比 EDM 和 FR/ED 模型小,反应温度低;在燃烧器出口处,使用 FR/ED 模型时会发生生成 CO 的气化反应,放热量减少,其燃烧器出口温度低于 EDM 和 PDF 模型。同时,与氧化气氛的结果相反,FR/ED 模型燃烧器出口平均温度 1 133 °C,比 EDM 模型的 1 307 °C 和 PDF 模型的 1 390 °C 分别低 174 °C 和 257 °C。

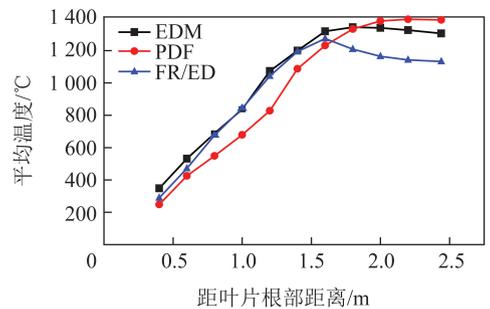


图 9 不同反应模型对燃烧器内温度分布的影响

Fig.9 Influence of different reaction models on temperature distribution of combustor

还原气氛下不同反应模型对氧浓度分布的影响如图 10 所示。可知 PDF 模型在回流帽附近一次风的氧气很快耗尽,EDM 模型和 FR/ED 模型在逆喷的方向上均持续了一段距离后氧气才耗尽。由于处于还原性气氛,燃烧器后锥前锥中心区域和后锥处氧含量基本为 0。

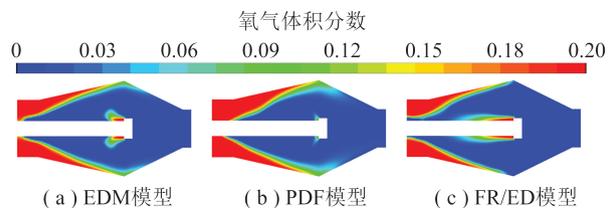


图 10 还原气氛条件下不同反应模型对氧浓度分布的影响

Fig.10 Influence of different reaction models on oxygen content distribution under reduction atmosphere

还原气氛下不同反应模型对 CO 浓度分布的影响如图 11 所示。对于 CO 含量的预测,还原气氛下 3 种模拟方法的差别依然较大,其规律基本类似于

氧化气氛条件,主要区别在CO的组分浓度上,PDF模型和EDM模型CO浓度最高均超过20%。EDM模型几乎无CO存在;PDF模型中CO浓度在煤粉燃烧反应初期最高,出口处浓度逐渐降低;FR/ED模型则在燃烧器的大部分区域内CO含量较高,基本与燃烧器的高温区重合。

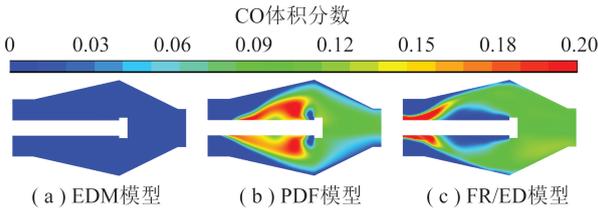


图11 还原气氛下不同反应模型对CO浓度分布的影响

Fig.11 Influence of different reaction models on CO content distribution under reduction atmosphere

不同反应模型对燃烧器内气体组成分布的影响如图12所示。由于燃烧过程处于还原性气氛,燃烧器内氧含量分布随燃烧的进行逐渐降低,EDM、PDF和FR/ED模型燃烧器出口氧含量分别为0.2%、0.8%和0;EDM模型对CO的生成模拟偏差较大,即使在强还原气氛下,燃烧器出口CO含量仍只有0.05%,采用PDF和FR/ED模型时燃烧器出口CO含量分别为5.73%和10.7%。

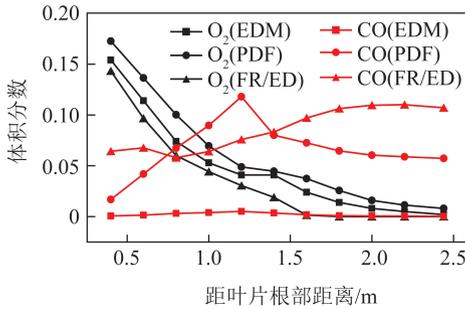


图12 不同反应模型对燃烧器内气体组成分布的影响

Fig.12 Influence of different reaction models on gas distribution of combustor

2.3 模拟结果与试验数据对比

通过与试验数据对比,确定不同模拟模型对双锥燃烧器模拟的准确性。试验数据与模拟结果的对比见表5,其中试验数据来源于同尺寸7 MW燃烧器的实际测试结果^[16], α 为燃烧器内过量空气系数。在氧化气氛下,主要发生煤粉的燃烧反应,EDM模型和PDF模型在温度、CO含量上的预测较为准确,与试验数据偏差较小,FR/ED模型偏差较大;在还原性气氛下,EDM模型模拟的结果几乎不生成CO和H₂,说明该模型不适合还原性气氛,PDF模型和FR/ED模型有较合理的还原性气氛模拟结果,两者的差别在于还原性气体的生成位置,PDF

模型喷口位置CO浓度较高,出口浓度偏低,FR/ED模型随着煤粉反应流程的进行,CO浓度逐渐升高,出口浓度更接近试验结果,从与实际结果的一致性上看,FR/ED模型更准确一些。

表5 燃烧器出口模拟结果与试验数据对比

Table 5 Comparison between simulation results and experiment results on combustor outlet

项目	氧化气氛($\alpha=1.2$)			还原气氛($\alpha=0.4$)		
	温度/ ℃	氧含量/ %	CO含量/ %	温度/ ℃	氧含量/ %	CO含量/ %
试验数据	920	9.5	0.51	1350	0.01	9.28
EDM	879	11.1	0.01	1307	0.20	0.05
PDF	876	12.0	0.80	1390	0.80	5.70
FR/ED	1126	7.0	3.50	1133	0	10.70

3 结论

1)模拟方法原理不同造成模拟结果差别较大。使用EDM模型和PDF模型均未考虑化学反应速率的影响,模拟结果着火区域比较提前;FR/ED模型的着火区域模拟较为合理。

2)氧化气氛下3种模型的温度分布基本类似,均可适用,EDM和PDF模型对燃烧器出口温度预测更准确;PDF模型和FR/ED模型模拟的CO、H₂等还原性气氛浓度较高,尤其是FR/ED模型的结果比实际要偏离较多。

3)EDM模型由于未考虑气化反应,对烟气中CO成分的模拟偏差较大,不适用于还原性气氛条件下的燃烧模拟;PDF和FR/ED模型均可模拟还原性气氛条件下CO的生成过程,FR/ED模型对组分的模拟结果更接近试验数据。

4)综合考虑,对于双锥燃烧器的数值模拟,氧化气氛适合采用EDM模型和PDF模型,还原气氛适合采用FR/ED模型。

参考文献(References):

- [1] 钱彬,周志军,陈立平,等.低氧体积分数下煤粉的NO排放及燃烧特性[J].热力发电,2017,46(2):67-74.
QIAN Bin, ZHOU Zhijun, CHEN Liping, et al. Characteristics of NO emission and combustion during pulverized coal combustion under conditions with low oxygen concentration[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(2): 67-74.
- [2] 程晓磊.低氧气氛下煤粉燃烧特性[J].洁净煤技术,2017,23(3):71-76.
CHENG Xiaolei. Combustion characteristic of pulverized coal in hypoxic atmosphere [J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(3): 71-76.
- [3] 曾柱楷,李国栋,张廷尧,等.低氧稀释条件下煤粉颗粒燃烧特

- 性实验研究[J].动力工程学报,2019,39(12):959-965.
- ZENG Zhukai, LI Guodong, ZHANG Tingyao, et al. Experimental investigation on combustion characteristics of coal particles under low-oxygen dilution conditions[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(12): 959-965.
- [4] 王通, 吴家杰. 哈锅新型次烟煤旋流燃烧器的数值模拟[J]. 锅炉制造, 2015(1): 8-11.
- WANG Tong, WU Jiajie. CFD on the new type subbituminous-burners of HBC[J]. Boiler manufacture, 2015(1): 8-11.
- [5] 朱天宇, 殷立宝, 湛志刚, 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 Tianyu, YIN Libao, ZHAN Zhigang, et al. Adaptability of PDF transport model and eddy-dissipation model in simulation of coal combustion and co-combustion with sludge in coal-fired boiler[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(8): 2864-2872.
- [6] 马文明. 工业煤粉锅炉低氮燃烧器的数值模拟研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- MA Wenming. Numerical simulation of low nitrogen burner for industrial pulverized coal boiler [D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [7] 汪延鹏. 涡团耗散模型 A 值对模拟精度的影响[D]. 厦门: 厦门大学, 2014.
- WANG Yanpeng. The impact of the model constant A of the eddy dissipation model on simulation [D]. Xiamen: Xiamen University, 2014.
- [8] 陈登高, 李振山, 蔡宁生. 煤粉空气分级燃烧中还原性气氛的模拟预测与分析[J]. 洁净煤技术, 2019, 23(1): 109-122.
- CHEN Denggao, LI Zhenshan, CAI Ningsheng. Numerical simulation and analysis of reductive atmosphere in air staged pulverized coal combustion[J]. Clean Coal Technology, 2019, 23(1): 109-122.
- [9] 张勇, 张玉斌, 杨天亮, 等. 褐煤半焦旋流燃烧数值模拟[J]. 热力发电, 2017, 46(2): 42-49.
- ZHANG Yong, ZHANG Yubin, YANG Tianliang, et al. Numerical simulation on combustion of lignite semi-char in cyclone furnace [J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(2): 42-49.
- [10] 段艳松, 张立麒, 毛志慧, 等. 水煤浆 MILD 燃烧数值模拟研究[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(4): 36-41, 46.
- DUAN Yansong, ZHANG Lilin, MAO Zhihui, et al. Numerical simulation of MILD combustion on coal-water slurry[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(4): 36-41, 46.
- [11] 刘敬樟, 陈胜, 柳朝晖, 等. 2.5 MW 煤粉氧燃烧旋流火焰数值计算[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(12): 107-111.
- LIU Jingzhang, CHEN Sheng, LIU Zhaohui, et al. Numerical calculation of 2.5 MW oxy-coal swirling flame[J]. Journal of HUST (Natural Science Edition), 2012, 40(12): 107-111.
- [12] 刘臻, 管清亮, 张建胜, 等. 煤气化数值模拟中湍流气相反应模型比较研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(10): 2520-2526.
- LIU Zhen, GUAN Qingliang, ZHANG Jiansheng, et al. Comparison study on three turbulence-chemistry interaction models in numerical simulation of coal gasification[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(10): 2520-2526.
- [13] 李涛. Shell 气流床粉煤气化过程建模与优化分析[D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
- LI Tao. Modeling and optimization of shell entrained-flow pulverized coal gasification process [D]. Xiamen: Xiamen University, 2018.
- [14] 莫日根, 王乃继, 程晓磊. 水煤浆在双锥逆喷燃烧器内燃烧过程的数值分析[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(2): 83-89.
- MO Rigen, WANG Naiji, CHENG Xiaolei. Numerical analysis of coal water mixture combustion in double cone reversed injection burner[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(2): 83-89.
- [15] 姜思源, 王永英, 周建明, 等. 中等挥发分烟煤回燃逆喷式燃烧数值模拟[J]. 煤炭学报, 2014, 36(6): 1147-1153.
- JIANG Siyuan, WANG Yongying, ZHOU Jianming, et al. Numerical simulation on middle volatile coal combustion in reversed injection burner[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1147-1153.
- [16] CHENG Xiaolei, WANG Naiji, ZHANG Xin, et al. The mechanisms and applications of NO_x reduction by low-NO_x burner coupling deep air-staging technology in pulverized coal [C]//9th International Symposium on Coal Combustion (ISCC-9). Qingdao: [s.n.], 2019.