

多孔壁风耦合空气分级条件下 煤粉燃烧的数值模拟

马红和¹, 李军¹, 周璐¹, 赵军²

(1. 太原理工大学热能工程系, 310024, 太原; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为阐明多孔壁风耦合空气分级对煤粉燃烧的作用特性,利用商业软件 Ansys Fluent 进行了数值模拟研究,并采用用户自定义函数法(UDF)编译写入了焦炭气化反应和 NO 被焦炭异相还原的宏文件。探究了燃烧炉中流场、温度场和主要组分浓度场的分布规律,分析了多孔壁风对 NO_x 排放和燃烧效率的影响。结果表明:多孔壁风系数存在优化值,此时不会明显影响炉内的燃烧组织;多孔壁风可在主燃区和还原区壁面形成空气膜,其中,主燃区空气膜中氧气体积分数大于 4%,还原区不低于 2%,阻止了还原性气体的腐蚀;多孔壁带入还原区的氧气能够与焦炭结合,在焦炭表面生成含氧络合物 C(O),既能强化 NO 的异相还原,又能促进焦炭在燃尽区燃烧。

关键词: 煤粉燃烧;空气分级;多孔壁风;数值模拟

中图分类号: TK223.2 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202010017 **文章编号:** 0253-987X(2020)10-0137-07



Numerical Simulation of Pulverized Coal Combustion in Staged Air Coupling with Multi-Hole Wall Air

MA Honghe¹, LI Jun¹, ZHOU Lu¹, ZHAO Jun²

(1. Department of Thermal Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Numerical simulation using Ansys Fluent software is performed to clarify the combustion characteristics of pulverized coal in staged air coupling with multi-hole wall air, and a user defined function method (UDF) is used to compile and write macro documents of char gasification reaction and NO dissimilar reduction by char. The distributions of flow field, temperature field and concentration field of major species are investigated, and the influence of multi-hole wall air on NO_x emission and combustion efficiency is analyzed. Calculating results show that: there exits an optimal multi-hole wall air ratio, and in this case the combustion is not affected adversely; an air film is formed near the wall, and the oxygen concentrations in the primary and reduction zones are above 4% and 2%, respectively, thus the corrosion due to the reducing species is prevented; the complex C(O) is produced on the char surface in the reduction zone, which enhances the reduction of NO and promotes the char combustion after the ejection of the over-fired air.

Keywords: pulverized coal combustion; air staging; multi-hole wall air; numerical simulation

为了减少 NO_x 的生成,空气分级燃烧技术在燃煤锅炉中得到了广泛应用。其理念是将炉膛分为主

燃区、还原区和燃尽区^[1-2]，并使主燃区生成的部分 NO_x 在还原区被 NH₃ 和 HCN 等还原为 N₂^[3-4]。但是，这也导致了主燃区和还原区水冷壁附近形成了高浓度的 H₂S、CO 等腐蚀性物质，容易引发水冷壁高温腐蚀^[5-6]；而且，由于主燃区燃烧不充分，使得燃烧效率下降。为解决这一问题，技术人员开发了贴壁风技术。实践表明，贴壁风虽然能在一定程度上改善水冷壁面的还原性气氛，但会导致飞灰中碳的质量分数增加和 NO_x 排放浓度升高等问题^[7]。

在此背景下，多孔壁耦合空气分级的煤粉燃烧技术得以发展^[8]，其特征是在主燃区壁面引入少量从燃尽风分离来的空气，垂直吹入炉膛并在壁面形成一层空气膜，防止高温腐蚀；同时改善还原区烟气成分，强化焦炭还原 NO_x 的能力，降低 NO_x 排放。研究表明^[9]，引入适量多孔壁风，可以改善主燃区和还原区壁面的还原性气氛，保护壁面；相比空气分级燃烧，多孔壁风的引入，能够增强焦炭的还原能力，降低 NO_x 排放浓度，并且提高燃烧效率。但是受实验研究的局限，难以构建炉内速度场、温度场和浓度场等，不能全面揭示多孔壁耦合空气分级对煤粉燃烧的作用机制。基于计算流体力学(CFD)的数值模拟在研究流场、温度场和浓度场分布等方面更加直观，能够更加清晰地揭示燃烧、污染物等的连续演变过程^[10]。目前，多孔壁风耦合空气分级尚处于实验研究阶段，有必要通过数值模拟分析其对煤粉燃烧的影响。

商业数值模拟软件 Ansys Fluent 内嵌的煤燃烧模型没有考虑焦炭的气化反应，在低 NO_x 燃烧工况下得到的计算结果往往与实测值存在较大偏差。另外，Ansys Fluent 内嵌的 NO_x 还原模型，仅考虑了 NO_x 与 NH₃、HCN 的同相还原机理，没有考虑 NO_x 与焦炭间的异相还原机理。事实上，还原性气氛下焦炭也可通过异相反应还原 NO_x，而且适量 O₂ 的参与还可大大促进异相还原作用^[11]，这也是引入多孔壁风的主要目的之一。本文在实验研究的基础上，在 Ansys Fluent 软件中采用用户自定义函数法(UDF)编译写入焦炭的气化反应模型、NO_x 与焦炭的异相反应模型，探究多孔壁风对炉内流场、温度场和浓度场的影响，并阐明多孔壁风对煤粉燃烧和 NO_x 排放的作用机制。

1 数值模拟方法

1.1 煤粉燃烧的模拟方法

利用 Ansys Fluent 软件进行数值模拟，气固流

动采用欧拉-欧拉混合模型，将固体相作为高密度的“气体”来处理。选择雷诺平均输运模型求解流动、能量和组分方程，选择标准 *k-ε* 模型计算湍流，按照壁面函数法处理近壁面，采用涡耗散模型(EDC)处理化学反应与湍流之间的相互作用，选择 P-1 模型计算辐射传热。采用固体燃料燃烧的欧拉模拟工具(ESTOS)模拟煤粉的燃烧。由于 Ansys Fluent 内嵌的煤燃烧模型没有考虑焦炭的气化，导致模拟结果与实测值存在较大偏差，因此本文利用 UDF 编译焦炭气化反应的宏文件，其机理如表 1 中 R1 和 R2 所示^[12]。

表 1 煤焦反应机理及 NO 异相还原机理

编号	化学反应方程式	指前因子	活化能/ (kJ·mol ⁻¹)
R1	C+H ₂ O→CO+H ₂	0.024 s/m	135
R2	C+CO ₂ →2CO	0.030 s/m	150
R3	C+ $\frac{1}{2}$ O ₂ →C(O)	0.01 mg/s	125
R4	C(O)+NO→N ₂ +CO ₂	0.008 s ⁻¹	97
R5	C+O ₂ →CO ₂	0.001 s/m	74

1.2 NO_x 生成模型

因为煤粉燃烧过程中 NO₂ 占比较少，所以本文仅考虑 NO 的生成。模拟中忽略快速性 NO 的生成，只考虑热力型和燃料型 NO。热力型 NO 根据扩展版 Zeldovich 模型计算，燃料型 NO 根据 De Soete 模型计算。NO 与 HCN、NH₃ 等反应的同相还原机理，也已考虑在 De Soete 模型中。另外，由于 Ansys Fluent 没有考虑 NO 与焦炭的异相还原反应，因此同样利用 UDF 编译了 NO 异相还原的宏文件，机理如表 1 中 R3 和 R4 所示。需要说明的是，R3 和 R4 的活化能和指前因子分别是根据文献[13]和[14]中实验数据拟合得到的，选用阿累尼乌斯一级反应动力学模型。假定生成 C(O)的临界氧气体积分数为 2.3%^[15]，当局部氧气体积分数小于临界值时，O₂ 与焦炭生成含氧络合物 C(O)，并把 NO 还原为 N₂；当高于临界值时，富余氧气与焦炭进行氧化反应，如表 1 中 R5 所示^[12]。

1.3 实验过程及物理模型

实验用煤为大恒洗煤，平均粒径 32 μm，其工业分析和元素分析见表 2。实验装置为多孔壁风耦合空气分级的煤粉燃烧炉^[16]，主要包括低 NO_x 燃烧器、18 kW 电加热沉降炉、多孔壁和两支对称布置的燃尽风喷嘴。燃烧器为同芯套管结构的直流燃烧

器,芯管内径 8 mm,为一次风入口;套管环隙 3 mm。 Z 表示炉内位置与燃烧器出口之间的轴向距离,燃烧器出口设为 $Z=0$ 。多孔壁为 $Z=100\sim 250$ mm 的筒体部分,其上均匀开设内径 2 mm 的小孔。炉体沿高度方向有若干检测孔,用于气体取样和检测中心线上的温度。燃烧条件见表 3。

表 2 煤的工业分析及元素分析

质量分数/%									
工业分析				元素分析					
M_d	A_d	V_d	FC_d	C_d	H_d	O_d	N_d	S_d	
12.60	29.71	23.59	34.10	48.97	3.55	8.70	1.14	0.68	

注: M_d 、 A_d 、 V_d 、 FC_d 分别为煤样的干燥基水分、灰分、挥发分、固定碳; C_d 、 H_d 、 O_d 、 N_d 、 S_d 分别为煤样的干燥基碳、氢、氧、氮、硫。

表 3 燃烧条件

参数	数值
煤粉质量流量/($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)	0.45
总过量空气系数	1.15
燃烧器空气系数	0.80
多孔壁风系数	0.00~0.15
燃尽风系数	0.20~0.35
一次风温度/ $^{\circ}\text{C}$	80
二次风温度/ $^{\circ}\text{C}$	350
多孔壁风温度/ $^{\circ}\text{C}$	350
燃尽风温度/ $^{\circ}\text{C}$	350

图 1 是煤粉炉的网格划分及主要结构。为缩短计算时间并改善计算结果的收敛性,仅就煤粉炉真实几何结构的 1/4 划分计算网格,并将由切割炉体形成的相交平面设置为“轴对称的边界条件”。计算区域为非结构化多面体网格,其中低 NO_x 燃烧器出口、多孔壁和燃尽风入口等附近区域燃烧剧烈,温度场、速度场和浓度场变化较大,因此对网格进行加密处理。入口全部为质量进口,出口为压力出口,壁温

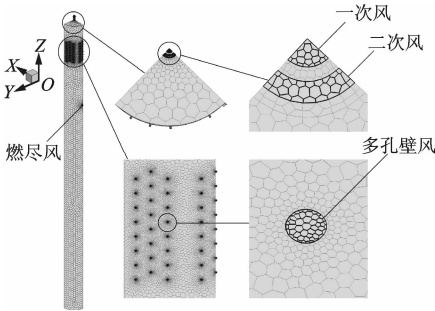


图 1 燃烧炉的网格划分和主要结构

800 K。为证明计算结果与网格数量无关,对比了 130 767、176 875 和 212 584 等 3 种网格数量下煤粉炉中心线温度,结果表明,3 种网格数量下计算的煤粉炉中心线温度的最大偏差小于 5%。因此,选用最小的网格数量 130 767。

2 结果与讨论

前期实验研究表明,综合考虑 NO_x 排放和燃烧效率及高温腐蚀问题,燃烧器空气系数 0.8 对应的多孔壁风系数的优化值为 0.05,燃尽风系数为 0.3^[16]。本文着重对这一燃烧工况开展数值模拟分析。

2.1 模型可靠性验证

为了验证数值模拟方法的可靠性,将部分模拟的计算值与实验值进行对比。图 2 是煤粉炉中心线温度的计算值和实验值的对比,表 4 列出了煤粉炉出口 NO 体积分数及飞灰中碳的质量分数的计算值与实验值。可以看出,温度、 NO 体积分数及飞灰中碳的质量分数等的计算值与实验值误差均在 10% 以内。可见,本文采用的模拟方法能够获得较为满意的计算结果。

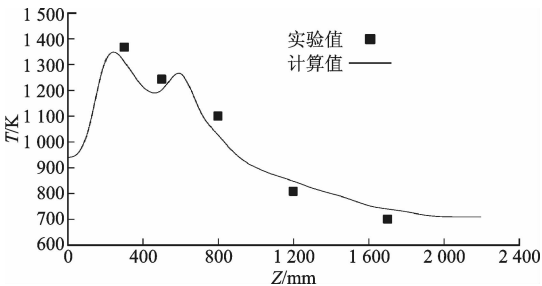


图 2 煤粉炉中心线温度计算值与实验值的对比

表 4 煤粉炉出口 NO 体积分数及飞灰中碳的质量分数的计算值与实验值对比

参数	计算值	实验值
飞灰中碳的质量分数/%	8.67	9.32
$\varphi(\text{NO})/10^{-6}$	348	371

2.2 流场和温度场

图 3 是煤粉炉内速度和温度分布。速度场(图 3a)分布显示,一、二次风从燃烧器射入炉膛,形成水滴状的速度分布,表明引入适量多孔壁风既没有改变主燃区的流场,也没有影响射流沿轴向的向下运动和沿径向的扩散。之后,轴向运动和径向扩散的速度逐渐减慢。在还原区的尾部,流场分布已无明显梯度变化,几乎完全均匀。沿主燃区壁面上,可观察到速度小于 0.5 m/s 的气流向下流动,这是因为

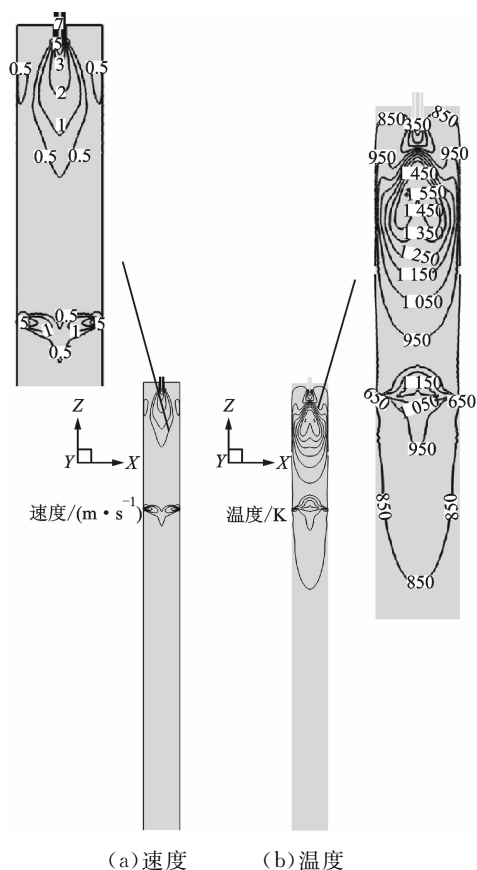


图3 煤粉炉内速度场和温度场分布

引入的多孔壁风在壁面形成一层流动的“气膜”，而该气膜对主气流没有扰动，所以不会对主燃区的组织燃烧产生不利影响；同时，气膜在流动过程中逐渐削弱，渐渐混入主气流，提高了还原区的氧浓度。进入燃尽区，燃尽风以对冲形式喷入，炉内又形成了明显的速度梯度。可以看出，燃尽风对主气流有明显的冲击、混合作用，有利于提高燃烧效率。气流继续向下游运动，炉内流场趋于均匀。温度场(图3b)分布显示，煤粉气流从燃烧器喷出炉内后，温度迅速升高，气流点火成功。在中心线 $Z=150\text{ mm}$ 处，温度达到峰值 $1\,550\text{ K}$ 左右。沿主燃区径向方向，温度逐渐降低，特别是壁面附近，温度梯度更大，壁面温度不足 900 K 。这是因为：①煤粉射流及燃烧集中于中心线附近；②多孔壁风的喷入，产生了气膜冷却的效果，降低了壁面温度。随着燃烧的持续进行，较细的煤粉颗粒燃烧完全，气流向下流动进入还原区，温度稳定在 950 K 左右。残余的焦炭，既可与 CO_2 和 H_2O 等发生气化反应，也可在少量 O_2 的作用下产生络合物 $\text{C}(\text{O})$ 。气流进入燃尽区后，在燃尽风的作用下，温度再次升高至峰值 $1\,200\text{ K}$ ，表明剩余焦炭发生了燃烧。由于燃烧温度较低，因此几乎没

有热力型 NO 产生。至 $Z=900\text{ mm}$ ，燃烧结束，温度场分布逐渐均匀，最终出口温度约 850 K 。

2.3 主要气体浓度场

图4是煤粉炉内 CO 和 H_2 浓度场分布，可以看出二者体积分数分布非常相似。煤粉气流喷出煤粉炉，挥发分迅速热解，大量的 CO 和 H_2 等释放出来，其体积分数快速达到各自峰值的 10% 和 7% 左右。由于多孔壁风对气流的限制，热解主要发生在主燃区中心线附近(见图3)，高浓度的 CO 和 H_2 也出现在中心线附近，沿径向其浓度逐渐降低，以致主燃区壁面附近的体积分数为 0 。可见，多孔壁的确抑制了腐蚀性气体对壁面的侵蚀。另外，主燃区和还原区总体上为强还原性气氛，仅壁面由于多孔壁风的作用形成了局部氧化性气氛。随着气流进入燃尽区，燃尽风带入过量的氧气，剩余焦炭再次燃烧，温度范围为 $1\,050\sim 1\,200\text{ K}$ ， CO 和 H_2 迅速被氧化，体积分数降为 0 。

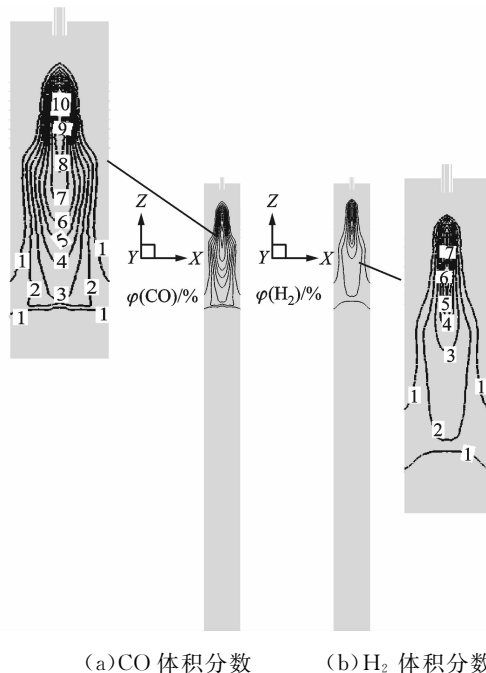
图4 煤粉炉内 CO 和 H_2 浓度场分布

图5是煤粉炉内 O_2 浓度场分布。燃烧器出口 $\varphi(\text{O}_2)$ 高达 16% ，由于燃烧反应的作用， O_2 快速消耗，中心线附近体积分数降低为 0 。由于多孔壁风的作用，主燃区壁面形成了一层空气膜，从 $Z=230\text{ mm}$ 截面可看出，空气膜中 $\varphi(\text{O}_2)$ 为 $4\%\sim 8\%$ 。进入还原区，气膜中 $\varphi(\text{O}_2)$ 逐渐降低，但直至 $Z=450\text{ mm}$ ，壁面 $\varphi(\text{O}_2)$ 仍然超过 2% ，说明还原区壁面也可有效防止还原性气氛的腐蚀。 O_2 浓度场分布直观地证明了多孔壁风可在主燃区和还原区壁面形成

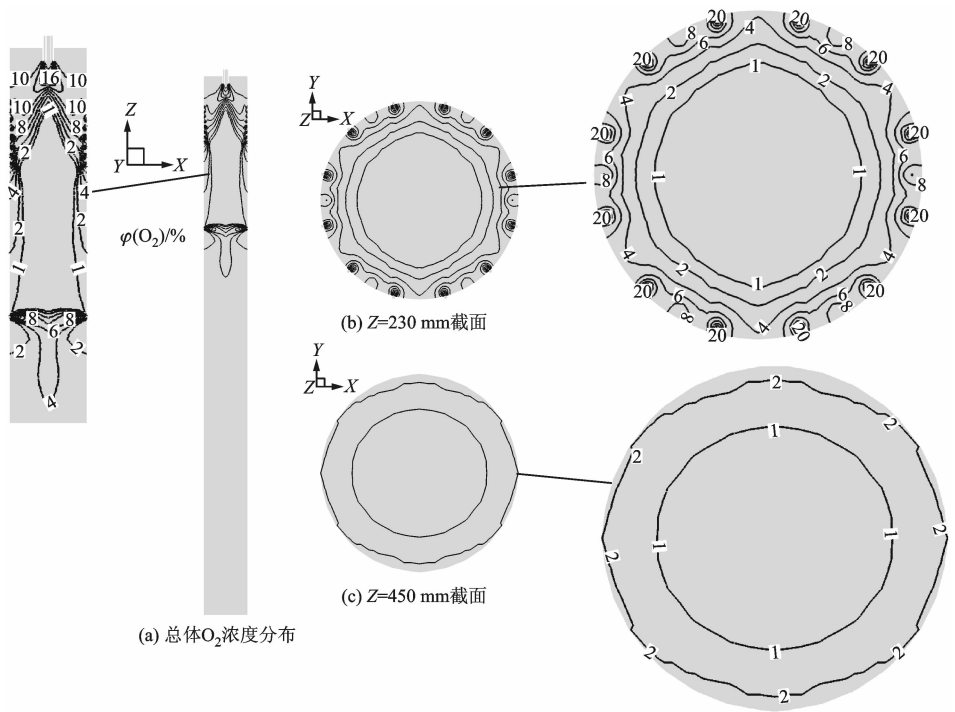


图 5 煤粉炉内 O_2 浓度场分布

一层连续的空气膜,有效防止还原性气体的侵蚀。进入燃尽区,由于燃尽风的喷入, O_2 体积分数快速升高。至燃烧结束, O_2 的体积分数最终稳定在 4% 左右。

2.4 NO 排放和飞灰中碳的质量分数

图 6 是多孔壁风系数 0.05 条件下 NO 浓度场

分布。煤粉燃烧启动以后,生成大量的 NO,中心线附近 NO 体积分数峰值高达 $1\,200\times10^{-6}$,其来源为热力型和燃料型 NO。 $Z=230\text{ mm}$ 处,主燃区截面上 NO 平均体积分数约为 600×10^{-6} 。进入还原区,部分 NO 被还原,还原区截面上 NO 平均体积分数下降至 400×10^{-6} 。NO 的还原,一是来自于同相

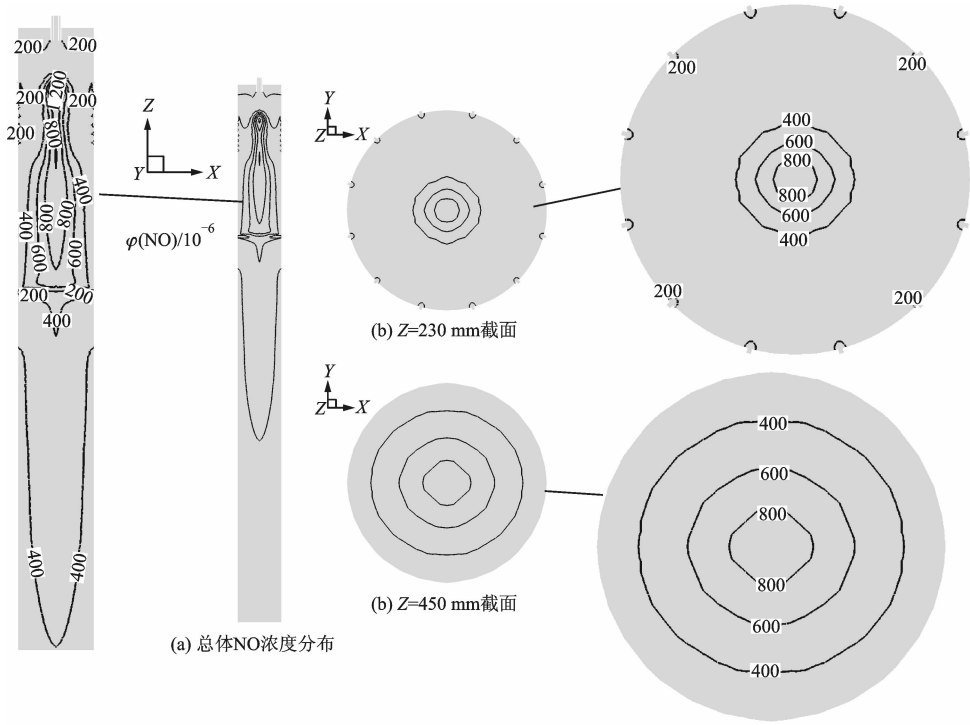
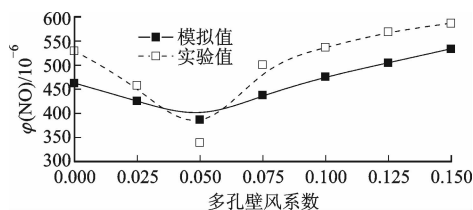


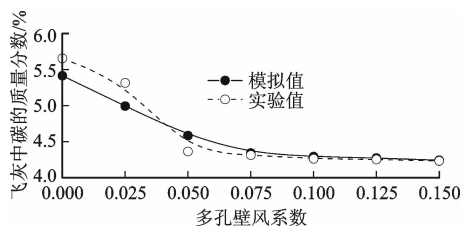
图 6 煤粉炉内 NO 浓度场分布

还原,即热解释放的 NH_3 和 HCN 等将 NO 还原为 N_2 ^[17];二是异相还原,即多孔壁风混入的少量氧气,在焦炭表面形成含氧络合物 $\text{C}(\text{O})$,进而将 NO 还原为 N_2 ^[18]。燃尽风喷入后,虽然炉内温度升高至 1 150 K 左右,但远低于热力型 NO 的生成温度 1 473 K^[19],故燃尽区 NO 体积分数没有明显升高,仍保持在 400×10^{-6} 左右。

图 7 是燃烧器空气系数 0.8 条件下多孔壁风系数对 NO 排放和飞灰中碳的质量分数的影响。可以看出,模拟结果与实验结果的变化趋势吻合较好。就 NO 排放而言,显然多孔壁风系数存在优化值,即 0.05。这是因为多孔壁风引入的 O_2 ,在焦炭表面形成了含氧络合物 $\text{C}(\text{O})$,增强了焦炭对 NO 的还原^[20]。但是,如果多孔壁风系数超过优化值,则带入的富余氧气会强化焦炭的氧化反应,对降低 NO 排放不利。这一结果也与文献[1]的结果一致,说明低 NO_x 燃烧工况下数值模拟应充分考虑焦炭对 NO 还原作用。另外,随着多孔壁风系数的提高,飞灰中碳的质量分数越来越低。这是因为, O_2 与焦炭混合得越早,对燃烧越有利。而且,虽然形成的含氧络合物 $\text{C}(\text{O})$ 没有直接将焦炭氧化,但会促进焦炭在燃尽区的氧化。当多孔壁风系数超过 0.05 时,飞灰中碳的质量分数则没有明显降低。这说明在还原性气氛下,过分提高多孔壁风系数并不能显著增强焦炭的氧化反应。综合考虑多孔壁风对 NO 排放和燃烧效率的影响,多孔壁风系数的优化值为 0.05。



(a) 多孔壁风系数对 NO 体积分数的影响



(b) 多孔壁风系数对飞灰含碳量的影响

图 7 多孔壁风系数对 NO 排放体积分数和灰分含碳量的影响

多孔壁风耦合空气分级技术可用于电站锅炉的防高温腐蚀、低 NO_x 排放和高效燃烧。比如,在相

邻两层燃烧器的水冷壁上布置多孔壁风,可以使壁面形成一层新鲜气膜,限制烟气流的直接冲刷,而且,可根据单层多孔壁风的影响范围和高温腐蚀的易发区域布置多层多孔壁风。多孔壁风带入的氧气,还可在还原区焦炭表面含氧络合物,从而强化 NO_x 的还原。需要说明的是,多孔壁风系数、位置和风速等,还需根据具体的锅炉结构和形式等确定。

3 结 论

在 Ansys Fluent 软件中,利用欧拉-欧拉混合模型进行了多孔壁风耦合空气分级条件下煤粉燃烧的数值模拟研究,并采用 UDF 编译写入了焦炭气化反应和 NO 被焦炭异相还原的宏文件。结果表明:引入适量的多孔壁风,既不会对主燃区流场产生明显干扰,也不会影响燃烧组织;多孔壁风可在主燃区壁面形成空气膜,其中氧气体积分数超过 4% 时,进入还原区空气膜逐渐衰弱,但当氧气体积分数始终超过 2% 时,能够阻止还原性气体的腐蚀;多孔壁风带入还原区的 O_2 能够与焦炭结合,在焦炭表面生成含氧络合物 $\text{C}(\text{O})$,一方面可降低 NO 排放,另一方面有利于焦炭在燃尽区的燃烧。下一步,将针对含硫组分的演化开展数值模拟。

参考文献:

- [1] RIBEIRETE A, COSTA M. Detailed measurement in a pulverized-coal-fired large-scale laboratory furnace with air staged [J]. Fuel, 2009, 88: 40-45.
- [2] RIBEIRETE A, COSTA M. Impact of the air staged on the performance of a pulverized coal and furnace [J]. Proceeding of the Combustion Institute, 2009, 32 (2): 2667-2673.
- [3] 王涌,周屈兰,刘国庆,等. 分离式燃尽风降低锅炉 NO_x 排放的试验研究 [J]. 工程热物理学报, 2011, 32(2): 243-246.
- [4] WANG Yong, ZHOU Qulan, LIU Guoqing, et al. Experimental study of the effects of SOFA on the denitration process in PC boiler [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(2): 243-246.
- [5] YANG Jiancheng, SUN Rui, SUN Shaozeng, et al. Experimental study on NO_x reduction from staging combustion of high volatile pulverized coals: part 1 Air staged [J]. Fuel Processing Technology, 2014, 126: 266-275.
- [6] 吕嗣晨,王川保,赵军,等. 煤粉燃烧过程中 H_2S 生成详细机理研究 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54 (4): 68-75.

- LÜ Sichen, WANG Chuanbao, ZHAO Jun, et al. A study on detailed mechanism of H_2S formation during pulverized coal combustion [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(4): 68-75.
- [6] SHIRAI H, IKEDA M, ARAMAKI H. Characteristics of hydrogen sulfide formation in pulverized coal combustion [J]. Fuel, 2013, 114: 114-119.
- [7] YANG Weijuan, YOU Rongzhen, WANG Zhihua, et al. Effects of near-wall air application in a pulverized-coal 300 MWe utility boiler on combustion and corrosive gases [J]. Energy & Fuels, 2017, 31(9): 10075-10081.
- [8] 马红和, 周璐, 马素霞, 等. 煤粉燃烧过程中 H_2S 生成机理研究进展 [J]. 热力发电, 2019, 48(1): 1-5.
MA Honghe, ZHOU Lu, MA Suxia, et al. Progress in mechanism of H_2S formation during pulverized coal combustion [J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(1): 1-5.
- [9] MA Honghe, ZHOU Lu, MA Suxia, et al. Design of porous wall air coupling with air staged furnace for preventing high temperature corrosion and reducing NO_x emissions [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 124(9): 865-870.
- [10] 张向宇, 杨玉, 白文刚, 等. 准东煤旋风燃烧的数值模拟 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(11): 112-117.
ZHANG Xiangyu, YANG Yu, BAI Wengang, et al. Numerical simulation on the cyclone combustion of Zhudong coal [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(11): 112-117.
- [11] TOMITA A. Suppression of nitrogen oxides emission by carbonaceous reductants [J]. Fuel Processing Technology, 2001, 71(1/2/3): 53-70.
- [12] ZHANG Zhi, CHEN Denggao, LI Zhenshan, et al. Development of sulfur release and reaction model for computational fluid dynamics modeling in sub-bituminous coal combustion [J]. Energy & Fuels, 2017, 31(2): 1383-1398.
- [13] FAN Weidong, LI Yu, XIAO Meng. Effect of preoxidation O_2 concentration on the reduction reaction of NO by char at high temperature [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(18): 6101-6111.
- [14] YANG J, MESTL G, HEREIN D, et al. Reaction of NO with carbonaceous materials: 2 Effect of oxygen on the reaction of NO with ashless carbon black [J]. Carbon, 2000, 38(5): 729-740.
- [15] FAN Weidong, LIN Zhengchun, KUANG Jinguo, et al. Impact of air staging along furnace height on NO_x emissions from pulverized coal combustion [J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91(6): 625-634.
- [16] MA Honghe, ZHOU Lu, MA Suxia, et al. Impact of the multihole wall air coupling with air staged on NO_x emission during pulverized coal combustion [J]. Energy & Fuels, 2018, 32(2): 1464-1473.
- [17] FAN Weidong, LI Yu, GUO Qinghong, et al. Coal-nitrogen release and NO_x evolution in the oxidant-staged combustion of coal [J]. Energy, 2017, 125: 417-426.
- [18] SUZUKI T, KYOTANI T, TOMITA A. Study on the carbon-nitric oxide reaction in the presence of oxygen [J]. Industrial & Engineering Chemical Research, 1994, 33(11): 2840-2845.
- [19] CODA B, KLUGER F, FÖRTSCH D, et al. Coal-nitrogen release and NO_x evolution in air-staged combustion [J]. Energy & Fuels, 1998, 12: 1322-1327.
- [20] YAMASHITA H, TOMITA A. Influence of char surface chemistry on the reduction of nitric oxide with chars [J]. Energy & Fuels, 1993, 7(1): 85-89.

(编辑 亢列梅)