

煤种对超细煤粉再燃脱硝效率影响的数值研究

贾艳艳, 毕明树, 柳 智

(大连理工大学 化工学院, 辽宁 大连 116012)

摘 要:应用 CFD 计算软件 FLUENT 6.1, 对全尺寸四角切圆锅炉超细煤粉再燃烧过程进行了三维数值模拟。以 5 种煤质差异较大的超细煤粉作为再燃燃料, 研究其 NO_x 排放随再燃区长度、再燃燃料投射位置、再燃区过量空气系数及再燃量的变化规律。结果表明, 对于不同煤种的再燃燃料, 再燃燃料投射位置存在同一最佳值; 煤种挥发分越大, 再燃效果越显著; NO_x 的脱除率随着再燃区长度的增加而增大, 随着再燃量的提高亦增大。再燃区过量空气系数对 NO_x 脱除率有重要影响, 通过分析计算结果, 得到了描述再燃煤粉干燥基挥发分含量 V_d 和再燃区过量空气系数最佳值 α_{op} 关系的经验公式, 为燃烧参数的优化提供了便利的途径。

关 键 词: 超细煤粉; 再燃脱硝; 数值模拟; 全尺寸锅炉

中图分类号: TK229.6 文献标识码: A

引 言

煤作为一次能源, 其利用方式主要是燃烧, 但已造成了严重的大气污染。大量的研究和实际应用表明, 气体燃料再燃可以使 NO_x 排放量降低 50% 以上^[1-6]。随着再燃技术研究的深入, 最近研究表明, 超细煤粉也是、甚至是比天然气更好的再燃燃料^[7-8]。Smart J P, Kichener A 等人的研究结果表明^[9-10], 煤粉作为再燃燃料时, 虽然 NO_x 的还原率随煤种及挥发分含量的不同而有差别, 但效果还是比较显著的, 这对在大量电站锅炉上应用煤粉再燃技术是十分有利的。通过揭示超细煤粉再燃过程 NO_x 的生成和控制机理, 研究工艺参数的最优配置是当前亟待解决的问题。虽然国内外对此进行了不少的实验与计算研究^[11-13], 但都局限在一维的实验炉和小型的中试炉, 这些结果放大的准确性很难把握, 对于实际电站锅炉来说, 它的实用性很差, 因此在全尺寸锅炉三维模拟的基础上进行工艺参数最优配置的研究是很有必要的。煤粉种类是影响超细煤粉再燃降低 NO_x 效率的重要因素之一, 而且还会影响到工艺参数的最优配置。本文全面分析了锅炉

超细煤粉再燃烧的燃烧特点, 运用计算软件 FLUENT 6.1 对全尺寸锅炉的超细煤粉再燃过程进行了三维数值模拟, 以 5 种燃煤的超细煤粉作为再燃燃料, 并分别考察了 5 种再燃燃料情况下, NO_x 排放随再燃燃料投射位置(再燃燃料喷口距上一次风喷口的距离)、再燃区长度(三次风喷口距再燃燃料喷口的距离)、再燃量及再燃区过量空气系数的变化规律。

1 数学模型及数值方法

1.1 数学模型

煤粉在炉膛内的燃烧是一个复杂的过程, 涉及气相流动和湍流燃烧、颗粒运动、挥发分析出、焦炭燃烧和辐射换热等^[14-15], 各模型的选择极大地影响着数值计算的结果。

气相的湍流流动选择 Realizable $k-\epsilon$ 模型^[16]; 气相湍流燃烧采用非预混燃烧模型, 使用 Two mixture fraction/PDF (Probability Density Function) 模型, 选取 β -PDF; 煤粉颗粒相流动采用随机轨道 (Stochastic Tracking) 方法^[17]; 挥发分析出模型为双竞争反应热解模型 (Two Competing Rates Model); 焦炭燃烧采用动力/扩散控制燃烧模型 (Kinetics/Diffusion-limited Char Combustion Model)^[18-19]; 用 P-1 辐射模型 (P-1 Radiation Model) 计算辐射传热^[20]。

NO_x 的生成为 3 部分: 热力型、快速型和燃料型。本计算中对 NO_x 的生成采用后处理的方法。热力 NO_x 采用 Extended Zeldovich 机理计算。利用 DeSoete 给出的通用动力学参数对快速型 NO_x 进行计算。对于燃料型 NO_x , 计算中认为煤粉颗粒中的氮均匀分布于挥发分和焦炭中, 即在两者中浓度相同。采用图 1 的反应机理: 燃料 N 首先转化为中间产物 HCN, 然后部分 HCN 转化为 NO; 煤粉再燃还原 NO 过程包括基元 CH_i 的同相还原反应和焦炭 C 的

异相还原反应。这一模型由 FLUENT 软件给出^[21]。湍流对 NO_x 生成的影响采用温度和氧浓度的 β 型概率密度函数来模拟。

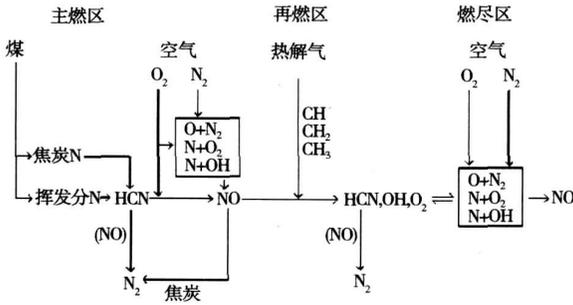


图 1 NO_x 生成反应机理

1.2 数值计算方法

数值模拟采用三维稳态计算。采用有限容积法来离散微分方程, 使用二阶迎风格式, 压力速度耦合采用 Simple 算法。在直角坐标系下的非均匀交错网格系统中求解。采用 TDMA 法求解代数方程组。

入口条件按进口均匀分布取值, 给出各进口气

固两相的流速、质量流量和温度。进口处湍动能 k 取为进口处平均动能的 3%, 进口处湍流能耗散率按进口处的 k 值和进口特征长度计算。出口条件按压力出口条件取值, 壁面边界条件取无滑移条件, 对于流体近壁区域采用壁面函数法。

2 模拟对象及网格划分

2.1 模拟对象

以一台容量为 35 t/h 的四角切圆燃烧煤粉锅炉为研究对象, 其结构如图 2(a)所示。燃烧设备为四角布置切向燃烧, 在炉膛内形成直径为 $\phi 400$ mm 的假想切圆, 炉膛横截面尺寸为 4 200 mm × 4 200 mm, 如图 2(b)所示。燃烧器分为 2 层一次风喷口、2 层二次风喷口、1 层再燃燃料喷口和 1 层三次风喷口, 如图 2(c)所示, 各个喷口进风边界条件如表 1 所示。锅炉燃用的主燃料为安徽淮南烟煤, 采用 5 种不同煤化程度的煤作为再燃燃料, 5 种煤涵盖了无烟煤、贫煤、烟煤和褐煤, 分别为山西阳泉三矿无烟煤、四川芙蓉贫煤、神府烟煤、安徽淮南烟煤和内蒙扎赉诺尔褐煤。煤的工业分析和元素分析见表 2。

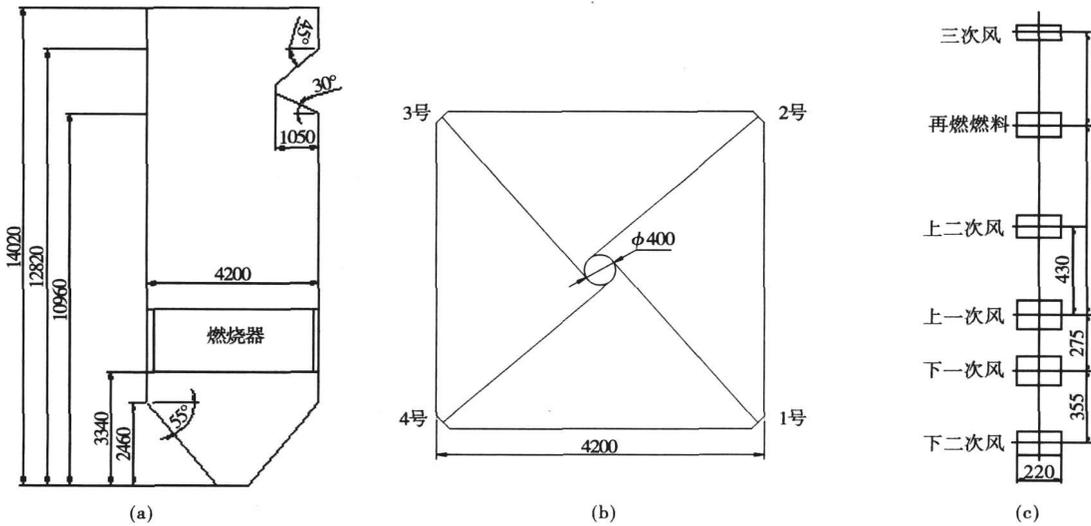


图 2 锅炉结构示意图

表 1 燃烧器各层喷口风速

	风速 / m · s ⁻¹	风温 / °C
一次风	26	350
二次风	44	350
三次风	50	80

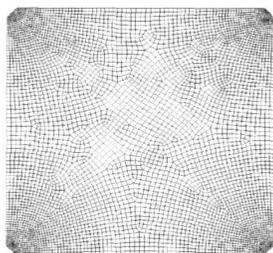
数值计算的标准工况为: 总过量空气系数为 1.2, 主燃区过量空气系数为 1.1, 再燃区过量空气系数为 0.9, 主燃料平均粒径为 90 μm, 再燃燃料平均粒径为 20 μm, 再燃量(再燃燃料燃烧产生的发热量占总发热量的比值)为 20%, 再燃燃料投射位置在距上一次风喷口 1.2 m 处。

表 2 煤质分析结果

	工业分析/ %			元素分析/ %					$Q_{daf, net}$ /MJ·kg ⁻¹
	C _d	A _d	V _d	C _{daf}	H _{daf}	O _{daf}	S _{daf}	N _{daf}	
内蒙扎赉诺尔褐煤	7.04	26.03	66.93	71.66	4.84	21.68	0.64	1.18	26.98
安徽淮南烟煤	34.33	23.45	42.22	82.28	5.46	10.26	0.67	1.33	32.47
神府烟煤	45.88	30.65	23.47	78.79	4.86	14.18	0.75	1.42	30.25
四川芙蓉贫煤	59.42	31.50	9.08	88.54	3.82	2.42	4.03	1.19	34.13
山西阳泉三矿无烟煤	73.10	20.67	6.23	89.96	3.62	4.37	0.69	1.36	33.82

2.2 几何体网格划分

为了降低数值伪扩散,在燃烧器横截面生成了辐射状网格线,如图 3 所示,与四角射流的气流轨迹基本平行,减小了网格线与流线的夹角。同时,网格节点的布置还采用了“27 点差分格式^[23]”,面网格节点采用 9 节点布置方式。在整个模型中尽可能地多采用六面体网格,以加大数值模拟计算的速度和精度,能增强其收敛性。在燃烧器喷口附近的网格相对较密,以模拟该区域各物理量的剧烈变化。在其它物理量变化不是非常剧烈的区域,则选用较粗一些的网格。炉膛网格图如图 4 所示,网格数量约 45 万。



3 燃烧器截面网格划分



图 4 炉膛网格

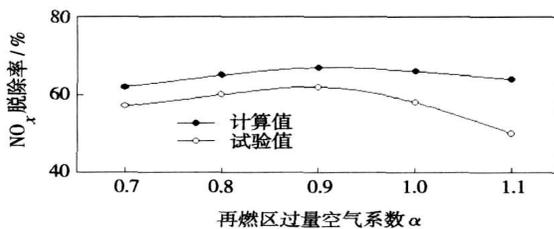


图 5 数值结果与试验结果的对比

3.2 不同煤种的超细再燃煤粉 NO_x 排放随再燃区长度的变化

图 6 为 5 种不同煤种的超细再燃煤粉在不同再燃区长度下再燃脱除 NO_x 的计算结果。从图中可以看出,在相同的条件下,褐煤再燃还原 NO_x 的效果最好,其次是安徽淮南烟煤、神府烟煤、贫煤,无烟煤效果最差。5 种再燃煤种的再燃效果都是随再燃区长度的增大而增强。煤粉再燃还原 NO_x 过程包括挥发分的同相还原反应和煤焦的异相反应,此时的再燃区空气过量系数为 0.9,有利于挥发分的释放,以挥发分还原 NO_x 的同相反应为主。在相同的再燃条件下,挥发分越大的煤种产生的还原性基元(CHi、HCN 等)越多,对再燃脱除 NO_x 就越有利。从表 2 中可以看到,褐煤的挥发分含量最高,其次是安徽淮南烟煤、神府烟煤、贫煤,无烟煤挥发分含量最低,这种挥发分含量不同,是导致再燃脱除 NO_x 效率不同的主要原因。

再燃区长度的增加,固定氮类化合物(HCN、NO、焦炭氮)在还原区停留的时间就增长,NO_x 还原反应就越充分,从而降低 NO_x 的生成量。但在图 6 中的计算工况下,氮氧化物排放浓度的变化不明显,分析其原因是,在全尺寸锅炉炉膛中,烟气在炉膛上升的速度很快,再燃区长度的增长只能使烟气在再燃区停留时间稍有增加。由于受到锅炉燃烧方式和燃尽要求的制约,再燃区长度也不能无限地增长,应该会被控制在一定范围内。文献[23]显示,一般而

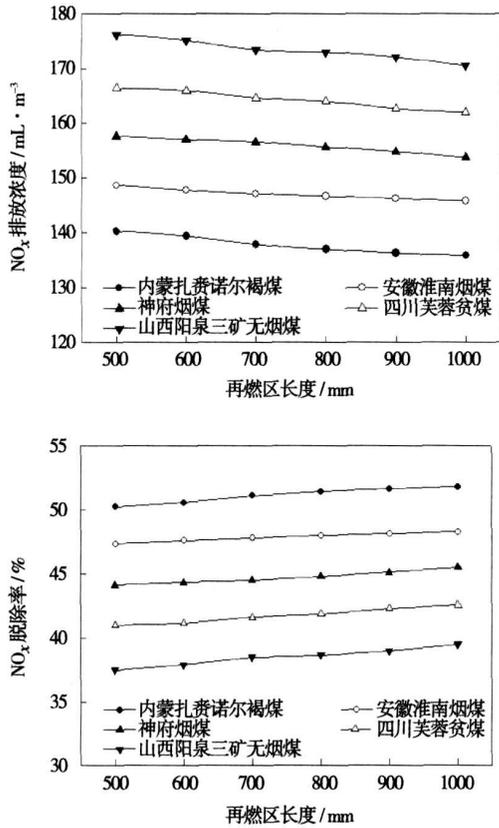
3 计算结果与分析

3.1 数值计算的有效性考核

利用上述数学模型和数值计算方法对文献[12]中所述物理问题进行描述,并与试验数据进行比较,结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,在改变再燃区过量空气系数的情况下,NO_x 脱除率的计算值与试验值的变化趋势基本保持一致,说明数学模型与数值计算方法有效,其计算结果具有工程应用价值。

言, 烟气在再燃区的停留时间在 0.4 ~ 1 s 之间。在实际的工程应用中, 可以在保证燃尽要求的基础上增大再燃区长度。在后续计算中, 再燃区长度均取 800 mm。



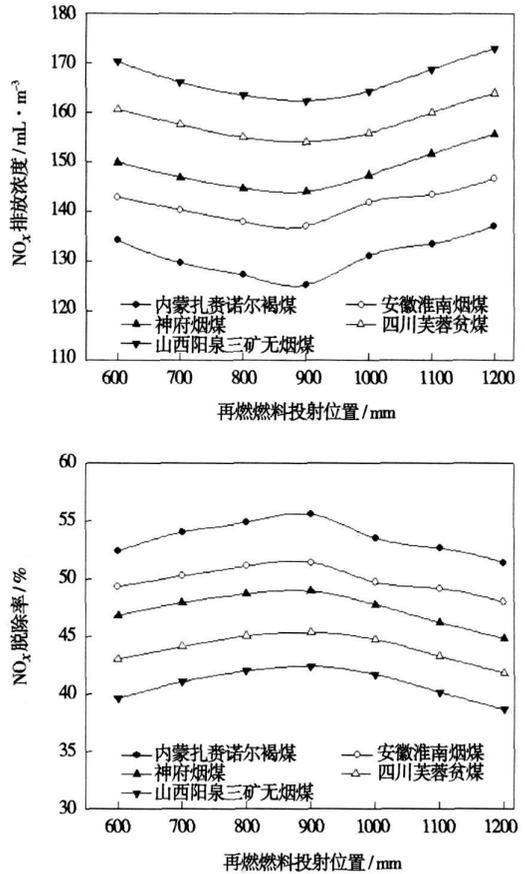
6 再燃区长度对NO_x 排放浓度及脱除率的影响

3.3 不同煤种的超细再燃煤粉 NO_x 排放随再燃燃料投射位置的变化

图 7 为 5 种不同煤种的超细再燃煤粉在不同投射位置下再燃脱除 NO_x 的计算结果。从图中可以看出, NO_x 的排放浓度先逐渐减小, 然后再以较大的梯度增大, 最佳再燃燃料投射位置均是 900 mm。

如果再燃燃料喷口离主燃料喷口太近, 主燃烧区空间缩短, 会造成主燃料燃烧不充分, 主燃烧区较多的剩余氧量进入再燃区, 削弱了再燃区的还原性气氛, 致使 NO_x 被还原效果减弱; 但当再燃燃料喷口离主燃料喷口太远, 主燃烧区空间过长时, 再燃燃料远离炉膛局部高温区, 一方面较低的温度不利于 NO_x 的还原反应, 另一方面由于烟气在氧化性气氛中的停留时间增加, 使 NO_x 的生成量增加。由此可以得出结论: 在燃烧条件一定时, 这一最佳位置主要与主燃料的种类有关。本计算中主燃料始终为安徽淮南烟煤, 因此不同煤种再燃煤粉的投射位置最佳

值均为 900 mm。在后续计算中, 再燃燃料投射位置定位于距上一次风喷口 900 mm。



7 再燃燃料投射位置对NO_x 排放浓度及脱除率的影响

3.4 不同煤种的超细再燃煤粉 NO_x 排放随再燃区过量空气系数的变化

图 8 为 5 种不同煤种的超细再燃煤粉在不同再燃区过量空气系数下再燃脱除 NO_x 的计算结果。从图中可以看出, 不同煤种的再燃煤粉 NO_x 排放随再燃区过量空气系数的变化规律有很大差别。当再燃燃料为褐煤时, 再燃区过量空气系数最佳值为 0.8; 再燃燃料为安徽淮南烟煤和神府烟煤时, 再燃区空气过量系数最佳值为 0.9; 再燃燃料为贫煤时, 再燃区空气过量系数最佳值为 0.7; 再燃燃料为无烟煤时, 再燃区空气过量系数最佳值为 0.6。

前面已经提到, 煤粉再燃还原 NO_x 过程包括挥发分的同相还原反应和煤焦的异相反应。高挥发分褐煤和烟煤以挥发分的同相还原反应为主, 低挥发分贫煤与无烟煤的挥发分同相还原反应和焦炭异相还原反应权重相当。再燃区过量空气系数越小, 再燃燃料挥发分的释放越困难, 但再燃区还原性气氛

增强,有利于焦炭异相还原反应的发生。同粒度的褐煤和烟煤作为再燃燃料时,由于褐煤的挥发分含量大于烟煤的挥发分含量,所以褐煤的挥发分析出所要克服的阻力要小于烟煤,再燃区过量空气系数最佳值亦小于烟煤。同粒度的贫煤和无烟煤作为再燃燃料时,由于无烟煤的焦炭含量大于贫煤的焦炭含量,所以无烟煤的焦炭异相还原反应权重大于贫煤,再燃区过量空气系数最佳值便小于烟煤。在后续计算中,再燃区过量空气系数均取为 0.8。

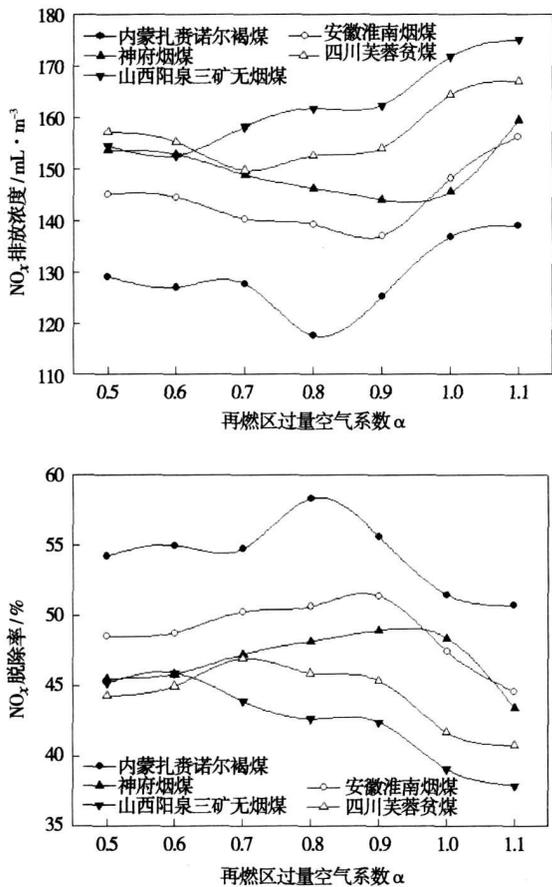


图 8 再燃区过量空气系数对 NO_x 排放浓度及脱除率的影响

为了定量地描述再燃煤粉的特性和再燃区过量空气系数最佳值之间的关系,不同煤种的再燃煤粉干燥基挥发分含量 V_d 及其对应的再燃区过量空气系数最佳值 α_{op} 如图 9 所示,并将图中的数据进行拟合,得出了如式(1)所示的经验公式:

$$\alpha_{op} = 0.517 + 2.01 \times 10^{-2} V_d - 2.40 \times 10^{-4} V_d^2 \quad (1)$$

当对锅炉实施煤粉再燃技术时,可根据再燃煤粉干燥基挥发分含量由此式估算出再燃区过量空气系数最佳值,为燃烧参数的优化提供了便利的途径。

3.5 不同煤种的超细再燃煤粉 NO_x 排放随再燃量的变化

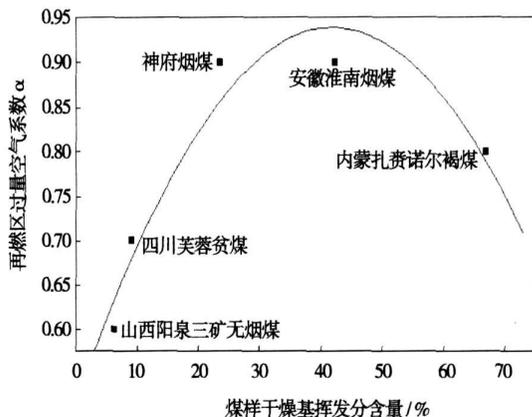


图 9 再燃煤粉干燥基挥发分含量对再燃区过量空气系数最佳值的影响

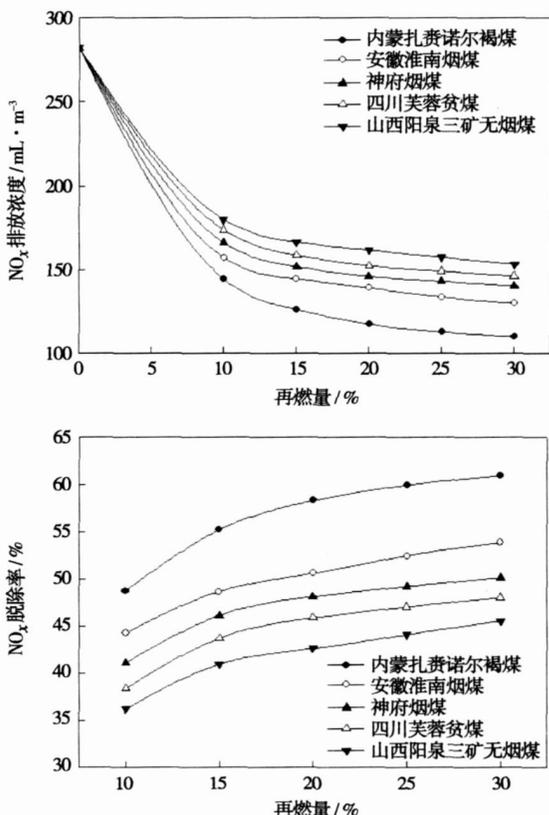


图 10 再燃量对 NO_x 排放浓度及脱除率的影响

图 10 为 5 种不同煤种的超细再燃煤粉在不同再燃量下再燃脱除 NO_x 的计算结果。从图中可以看出,5 种再燃煤种的再燃效果都是随再燃量的增大而增强,当再燃量超过 20% 后,虽然 NO_x 脱除率

仍在增加,但增加率已趋向缓和。

再燃燃料比例在煤粉再燃过程中是一个十分重要的因素。为保证再燃区内对 NO_x 的还原效果,必须送入足够数量的再燃燃料,以保证再燃区内还原 NO_x 所必须的烃根浓度。如果再燃燃料量太小,则在再燃区产生的 CH 基团很少,不能形成较浓的还原性气氛,对 NO_x 的还原效果不够明显;如果量太大,一方面降低 NO_x 的效果已不明显,另一方面会带来燃料燃烧不充分、制备、输送再燃燃料消耗成本等一系列问题。因此,超细煤粉再燃量宜在 20% 左右选择。

4 结 论

(1) 采用 FLUENT 软件选用适当的模型对煤粉炉超细煤粉再燃烧过程进行了数值模拟,计算结果与实验结果吻合,表明了所用数学物理模型的合理性,其计算结果具有工程应用价值。

(2) 在对全尺寸四角切圆锅炉超细煤粉再燃烧过程进行三维数值计算的过程中,采用一种与流动方向较一致的网格体系,网格节点布置采用“27 点差分格式”,再与二阶上风格式相结合,有效地减小了伪扩散的影响。

(3) 在相同的条件下,褐煤再燃脱除 NO_x 的效果最好,其次是安徽淮南烟煤、神府烟煤、贫煤,无烟煤效果最差。

(4) 对于 5 种不同煤种的再燃燃料,再燃燃料的投射位置最佳值均为 900 mm;随着再燃区长度的增加 NO_x 的排放量减少;再燃量的增加使得 NO_x 的排放量减少,再燃量宜在 20% 左右选择;褐煤再燃区过量空气系数最佳值为 0.8,安徽淮南烟煤和神府烟煤再燃区空气过量系数最佳值为 0.9,贫煤再燃区空气过量系数最佳值为 0.7,无烟煤再燃区空气过量系数最佳值为 0.6。

(5) 通过分析计算结果,得到了描述再燃煤粉干燥挥发分含量 V_d 和再燃区过量空气系数最佳值 α_{op} 关系的经验公式,为燃烧参数的优化提供了便利的途径。

参考文献:

[1] SMOOT L D, HILL S C, XU H. NO_x control through reburning[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1998, 24(5): 385-408.
 [2] TREE D R, CLARK A W. Advanced reburning measurements of temperature and species in a pulverized coal flame[J]. Fuel, 2000, 79(13): 1687-1695.
 [3] 徐华东,罗永浩,王恩禄,等.再燃烧技术及其在我国的应用前

景[J].动力工程,2001,21(4):1320-1323.

- [4] WASEEM A N, ROBERT E J, JACOB A P, et al. Detailed measurements in a pulverized coal flame with natural gas reburning[J]. Fuel, 1999, 78(6): 689-699.
 [5] MACAHEY S, MCMULLAN J T, WILLIAMS B C. Techno-economic analysis of NO_x reduction technologies in P F boilers[J]. Fuel, 1999, 78(14): 1771-1778.
 [6] HAN DONGHEE, MUNGAL M G, ZAMANSKY V M. Prediction of NO_x control by basic and advanced gas reburning using the two-stage lagrangian model[J]. Combustion and Flame, 1999, 119(4): 483-493.
 [7] BURCH T E, TILMAN F R, CHEN W Y, et al. Partitioning of nitrogenous species in the fuel-rich stage of reburning[J]. Energy and Fuels, 1991(5): 231-237.
 [8] CHEN W Y, MA L. Effect of heterogeneous mechanisms during reburning of nitrogen oxide[J]. AIChE Journal, 1996, 42(7): 1968-1975.
 [9] SMART J P, MORGEN D J. The effectiveness of multi-fuel reburning in an internally fuel-staged burner for NO_x reduction[J]. Fuel, 1994, 73(9): 1437-1442.
 [10] KICHENER A, SPLIECHOFF H. The effect of different reburning fuels on NO_x reduction[J]. Fuel, 1994, 73(9): 1443-1446.
 [11] 刘忠,阎维平,高正阳,等.超细煤粉的细度对再燃还原 NO 的影响[J].中国电机工程学报,2003,23(10):204-208.
 [12] 金晶,张孝忠,李瑞阳.超细煤粉再燃的模拟计算与试验研究[J].中国电机工程学报,2004,24(10):215-218.
 [13] 金晶,李瑞阳,张孝忠.超细煤粉还原 NO_x 的试验研究[J].热能动力工程,2004,19(6):582-585.
 [14] 岑可法,姚强,骆仲决,等.燃烧理论与污染控制[M].北京:机械工业出版社,2004.
 [15] HILL S C, DOUGLA SMOOT L. Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2000(26): 417-458.
 [16] SHIH T H, LIOU W W, SHABBAR A, et al. A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows[J]. Comput Fluids, 1995, 24(3): 227-238.
 [17] 周力行.湍流两相流动与燃烧的数值模拟[M].北京:清华大学出版社,1991.
 [18] BAUM M M, STREET P J. Predicting the combustion behavior of coal particles[J]. Combust Sci Tech, 1971, 3(5): 231-243.
 [19] FIELD M A. Rate of combustion of size-graded fractions of char from a low rank coal between 1 200 K and 2 000 K[J]. Combust Flame, 1969, 13: 237-252.
 [20] CHENG P. Two-dimensional radiation gas flow by a moment Method [J]. AIAA Journal, 1964(2): 1662-1664.
 [21] Fluent Inc. FLUENT user's guide version 6.1[M]. Lebanon: FLUENT Inc, 2003.
 [22] 段学农,郑楚光,柳朝晖,等.27 点差分格式在锅炉炉内空气动力场模拟计算中的应用[J].动力工程,2000,20(4):754-759.
 [23] SPLIETHOFF H, GREUL U, RUDIGER H, et al. Basic effects on NO_x emissions in air staging and reburning at a bench scale test facility[J]. Fuel, 1996, 75(5): 560-564.

(编辑 滨)

rate $G=400\sim 1200\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ and mass steam content $x=0\sim 1.0$. Through the tests, studied was the impact of working medium pressure, mass flow velocity and mass steam content on the frictional resistance. On the basis of a great deal of data obtained from the tests and related theoretical analyses, a correlation formula of frictional resistance of water-wall tubes was derived, which is suited for design purposes. The relative error between the calculated values and test ones does not exceed 15%. **Key words:** once-through boiler, steam-water two-phase flow, water-wall tubes, frictional resistance

煤种对超细煤粉再燃脱硝效率影响的数值研究 = A Numerical Study of the Influence of Coal Ranks on Reburning-based Denitration Efficiency of Superfine Pulverized Coal [刊, 汉] / JIA Yan-yan, BI Ming-shu, LIU Zhi (College of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, Post Code: 116012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(5). — 542~547

By using CFD (computational fluid dynamics) calculation software FLUENT6.1 a three-dimensional numerical simulation was performed of the superfine pulverized-coal reburning process in a full-size tangentially fired boiler. With five kinds of superfine pulverized coal having a comparatively big difference in coal quality serving as the reburning fuels, studied was the law governing the variation of NO_x emissions with the following factors: the length of the reburning zone, injection location of the reburning fuel, excess air ratio α_{op} in the reburning zone and reburning quantity. The study results show that for different coal ranks serving as reburning fuels there exists an identical optimal injection location of a reburning fuel. The greater the coal volatile content, the more notable the reburning effectiveness. The NO_x removal rate increases with an increase of the length of the reburning zone and the reburning coal quantity. The excess air ratio in the reburning zone has a major influence on the NO_x removal rate. Through an analysis of the calculation results, an empirical formula was obtained, showing the relationship between the volatile content V_d of the dry fuel basis of the reburning pulverized coal and the optimal value of excess air ratio α_{op} in the reburning zone, thus providing a convenient approach for the optimization of combustion parameters. **Key words:** superfine pulverized coal, reburning-based denitration, numerical simulation, full-size boiler

利用电容层析测量煤粉浓度的实验研究 = An Experimental Study of Pulverized Coal Concentration Measurement by Using Capacitance Tomography [刊, 汉] / SUN Meng, LI Zhi-hong, JIANG fan, et al (Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(5). — 548~550

The accurate measurement of pulverized coal concentration in air pipes and its proper regulation are very important to the safe and cost-effective operation of a boiler during its combustion process. By using the capacitance tomography, tested and studied was the concentration of solid conveyed by a dilute-phase pneumatic force at a normal temperature. To overcome the impact of the nonuniformity of the sensitive field of a capacitance sensor on the image formation, a cyclone separator was set up in the test system. The role of the cyclone separator is to concentrate the solid particles mainly in the wall-surface zone with the electrodes of the sensor being located on the straight pipe of the separator. The advantage of the above testing method consists in its not demolishing the operating characteristics of the original system. The method pertains to a non-intrusive type of on-line quick testing technology. The test results obtained from the test stand and relevant on-line measuring system show that the method under discussion is feasible. **Key words:** pneumatic conveyance, capacitance tomography, measurement of flow rate, gas-solid two-phase flow

三偏心快关阀的液压系统设计与动态特性仿真 = Design of a Hydraulic System for a Three-eccentricity Quick Closing Valve and Simulation of its Dynamic Characteristics [刊, 汉] / LAI Xi-de, HE Hai-bin (College of Energy Source and Environment, Xihua University, Chengdu, China, Post Code: 610039), YANG Jiong-bo (Chengdu Huaxi Chemical Engineering Science and Technology Stock Co., Ltd., Chengdu, China, Post Code: 611830), ZHANG Ji-jun