

200MW 四角切圆燃烧锅炉改造工况数值模拟

潘 维, 池作和, 斯东波, 阮 涛, 岑可法

(浙江大学 热能工程研究所 能源清洁利用与环境教育部重点实验室, 浙江省 杭州市 310027)

NUMERICAL SIMULATION OF COMBUSTION PROCESS IN A 200MW TANGENTIALLY FIRED FURNACE TO STUDY FURNACE RECONSTRUCTION

PAN Wei, CHI Zuo-he, SI Dong-bo, RUAN Tao, CEN Ke-fa

(Institute for Thermal Power Engineering, Clear Energy and Environment Engineering Key Laboratory of the Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: Coal reburning is a new technique to reduce nitrogen oxides (NO_x) emission. Numerical simulation of combustion process in a 200 MW tangentially fired furnace is performed on CFD (Computational Fluid Dynamics) software platform. Air staging technique is applied in reconstruction project 1 and coal reburning is applied in project 2. Results show that after furnace reconstruction, at 5.26m furnace height, temperature drops to a low lever and so does oxygen concentration but carbon monoxide concentration is the highest. Deoxidization zone is formed. Micronized coal reburning can reduce NO_x emission up to 48.9%. Coal burnout ratio reduces after reconstruction that decreases furnace economy. Coal particle movements in furnace are random. Averagely, particles residence time is longer if they are injected from a higher height position.

KEY WORDS: Thermal power engineering; Furnace; Reburning; Reconstruction; Numerical Simulation

摘要: 煤粉再燃是降低 NO_x 排放的一项新技术。利用CFD软件平台,采用数值模拟方法对某电厂200MW四角切圆燃烧锅炉改造前后炉内燃烧状况进行研究。改造方案1采用空气分级,方案2在1基础上,增加细粉再燃。计算结果表明:改造后在最上面一层一次风喷口的高度区域,温度骤然下降,而CO浓度很高,形成一个相对低氧,低温的还原性气氛区域。再燃降低 NO_x 48.9%左右。改造后煤粉燃尽率下降且燃尽所需时间也增加,降低了电厂的经济性。煤粉颗粒在炉内运动具有很大随机性,停留时间差异很大。平均而言,煤粉喷入高度越高,停留时间也越短。

基金项目: 国家 863 专项经费项目 (2002AA527053); 国家重点基础研究发展规划项目 (G199902204-3)。

The National High Technology Research and Development of China(863 Programme)(2002AA527053). Project Supported by Foundation of the National Programme for Priority Basic Research's Development of China(G199902204-3).

关键词: 热能动力工程; 锅炉; 再燃; 改造; 数值计算

1 引言

煤在燃烧过程中产生大量的污染物 NO_x 、 SO_2 、 CO_2 以及粉尘等,造成严重的环境污染。特别是氮氧化物,从19世纪50年代,大气中 NO_x 的含量至少增加了3倍。随着环境保护要求不断提高,对电厂 NO_x 排放控制日益严格。各种降低 NO_x 排放技术也随之发展起来,例如低 NO_x 燃烧器,空气分级,燃料再燃以及烟气净化技术等。燃料再燃(Reburning)即燃料分级燃烧是一种新型的低 NO_x 燃烧技术,被认为是诸多降低 NO_x 排放的方法中最具有发展潜力的。该技术造价低,易于实现,且脱硝效率较高。再燃技术在我国电厂中还没有真正实施。本文针对国内某电厂200MW四角切圆燃烧锅炉,提出两种改造方案,并利用CFD软件平台对锅炉改造前后燃烧状况进行数值模拟研究^[1-2],为实施再燃技术提供依据。

2 研究对象

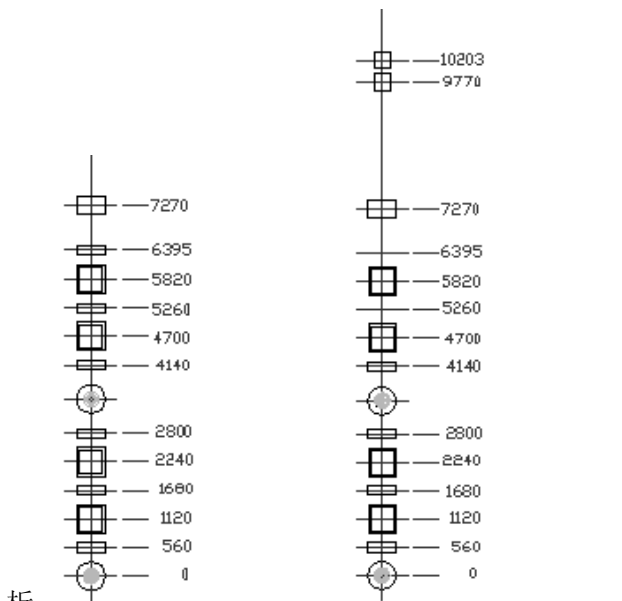
某电厂200MW四角切圆燃烧锅炉系东方锅炉厂生产的DG670/140-8型超高压,中间再热,自然循环煤粉炉。1号角和3号角形成对冲,2号和4号在炉膛中心形成直径为 $\phi 736\text{mm}$ 的切圆。改造前整组燃烧器分为4层一次风喷口,6层二次风喷口和1层三次风喷口,一次风和二次风间隔布置,如图1所示。炉膛横界面为尺寸为 $11920\text{mm} \times 10880\text{mm}$ 。各个喷口进风边界条件如表1所示。为

说明方便，最低一层油燃烧器的高度设为 0m。以后所述高度均是相对于此油燃烧器的相对高度。根据空气分级燃烧降低NO_x的原理，提出了第一个改造方案：将上面 2 个二次风喷口(5.26m 和 6.395m)取消，而在原来三次风喷口之上 9.77m和 10.2m的位置，增加 2 个二次风喷口以送入取消的二次风的风量，实现空气分级燃烧。改造方案 1 的燃烧器布置如图 2 所示。在此基础上，进一步提出实施细粉再燃^[3-4]的改造方案 2，与方案 1 比较，两者的燃烧器布置相同，只是在 5.82m处的一次风喷口送入的是超细煤粉。电厂用的是大同烟煤，煤的工业分

和元素分析见表 2。其挥发份含量比较高，在 30%以上，适合作为再燃燃料。筛分试验得到煤粉粒径分布见图 3。煤粉平均粒径 80μm，均匀性指数为 1.94。图 4 是超细煤粉的粒径分布图，超细煤粉的平均粒径为 28μm，均匀性指数为 0.863。

表 1 燃烧器各层喷口风速
Tab. 1 Each burner injectors velocity

	风速/(m·s ⁻¹)	风率/%	风温/°C
一次风	28	28	222
二次风	48	33.75	291
三次风	52	19.09	60
周界风	45	15	291



析

图 1 改造前燃烧器布置
Fig. 1 Burners
(before reconstruction)

图 2 方案 1 燃烧器布置
Fig. 2 Burners
(reconstruction 1)

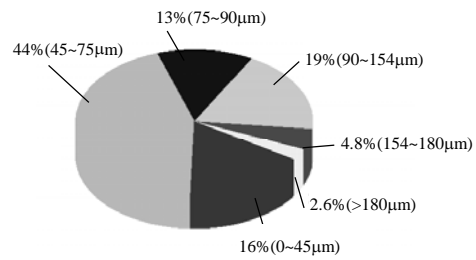


图 3 煤粉粒径分布图 (常规煤粉)
Fig. 3 Coal particle size distribution (ordinary coal)

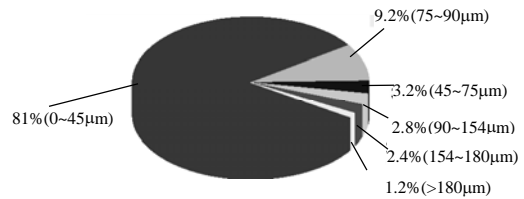


图 4 煤粉粒径分布图 (超细煤粉)
Fig. 4 Coal particle size distribution
(micro-pulverized coal)

表 2 煤的元素分析和工业分析

Tab. 2 Fuel elemental and industrial analysis

项目	空气干燥基水分						收到基			干燥无灰基挥发份V _{daf} %
	M _{ad} %	C _{ar} %	H _{ar} %	O _{ar} %	N _{ar} %	S _{ar} %	A _{ar} %	Q _{net,v,ar} /(MJ·kg ⁻¹)	Q _{gr,v,ar} /(MJ·kg ⁻¹)	
数值	3.62	55.78	3.34	8.11	1.14	0.59	21.94	21.32	22.22	35.48

3 几何体网格划分

网格是数值计算的基础。网格质量的好坏直接影响到数值解的计算精度，而且这种影响在许多情况下甚至是决定性的。质量高的网格才有可能实现流场解的高质量，CFD 的研究成果才能应用于工业设计中。

锅炉近似为长方体，外形比较简单，先生成炉膛横截面的网格，然后沿着高度方向延伸，生成炉膛体网格。炉膛横截面用Paving方法^[5-7]生成非结构四边形网格，Paving方法是在 19 世纪 80 年代由

Blacker 和Stephenson提出的。其原理是先沿着边界（对于多连域包括外边界和内边界）按照顺序布置四边形单元，并一直向区域内部发展，直到网格覆盖整个空间。Paving方法生成非结构的四边形网格能较好地拟合边界形状，得到的边界网格质量比较高，不规则的网格节点数目少。用Paving方法生成的网格如图 5 所示。生成炉膛横截面网格之后，网格沿着高度方向延伸，采用一种生成六面体网格的方法——Cooper方法，生成六面体网格。炉膛网格图如图 6 所示，网格数量约 50 万。

计算时，如果采用有限差分法对方程进行离

散, 由于截断误差会产生数值计算的伪扩散。De Vahl Davis 和Mallinson曾针对二维流动在垂直于流动方向上的伪扩散^[2-3,8-9], 给出了一个近似的表达式, 即

$$\Gamma_f = \frac{\rho U \Delta x \Delta y \sin 2\theta}{4(\Delta x \cos^3 \theta + \Delta y \sin^3 \theta)}$$

其中, Γ_f 为伪扩散系数, Δx 、 Δy 表征网格的大小, U 是合速度, θ 是合速度与网格线方向的夹角。

从公式可知: 当流动方向与网格线方向夹角为45°时, 伪扩散最大, 当流动和网格线成一条直线的时候, 伪扩散最小。图7为冷炉试验烟花示踪的照片, 从图中可以看出, Paving方法生成的辐射状网格线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, 降低数值伪扩散。

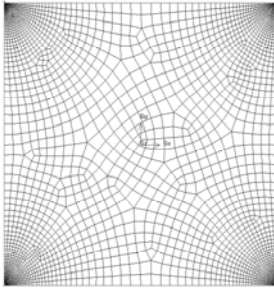


图5 四边形网格

Fig. 5 Quadrilateral mesh



图6 炉膛网格

Fig. 6 Furnace mesh

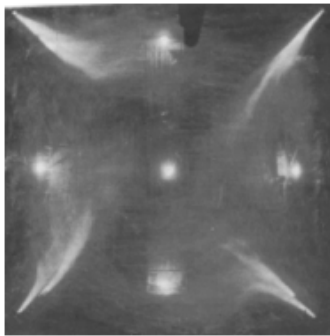


图7 气流射流轨迹照片

Fig.7 Flow track photo

4 计算结果分析

4.1 计算方法

数值模拟^[10-12]采用三维稳态计算, SIMPLE算法。湍流模型采用可实现 $k-\varepsilon$ 双方程模型(Realizable $k-\varepsilon$ Model), 用混合分数-概率密度函数(Mixture-Raction/PDF)模拟气相湍流燃烧, 用P-1 辐射模型(P-1 Radiation Model)计算辐射传热, 采用双匹配速率模型(The Two Competing Rates Model)模拟

煤粉挥发份的析出, 焦炭燃烧采用动力/扩散控制燃烧模型(Kinetics/Diffusion-limited Char Combustion Model), 煤粉颗粒跟踪采用随机轨道(Stochastic Tracking)方法^[13]。

NO_x 生成模拟用后处理方法^[4,14]计算。按照 NO_x 生成机理^[15], 分为热力型 NO_x , 快速型 NO_x 和燃料型 NO_x 。在煤粉燃烧炉内快速型 NO_x 一般量很少, 可以忽略不计。热力 NO_x 的可根据广义的Zeldovich机理计算。燃料型 NO_x 根据De Soete机理分为挥发份 NO_x 和焦炭 NO_x 两部分。热解中间产物为HCN, 挥发份中N全部转化为HCN, HCN可以被 O_2 氧化成NO, 也可以被NO还原为 N_2 。焦炭中的N直接转化为NO。考虑流场中温度脉动和氧原子脉动的双标量用PDF模型求解湍流下 NO_x 的生成特性。

4.2 各个工况温度和气体组分分布

图8为3个工况(改造前, 改造1, 改造2)沿着炉膛高度方向, 各个截面的平均温度。从图中可以看出: 改造前, 随着炉膛高度的增加, 温度逐渐增加, 最高温度约在炉膛高度的10m左右, 最高温度达到1773K, 然后又逐渐下降。改造后, 随着炉膛高度增加, 炉膛温度也增加, 但在最上面一层一次风喷口(5.82m)附近, 温度水平骤然下降到1650K, 改造2 工况下降到1750K, 然后温度再增加, 最后又逐渐降低。出现温度骤然下降的主要原因是改造后空气分级, 最上一层一次风携带煤粉进入炉膛后, 没有二次风补充氧量, 燃烧不充分, 且一次风本身温度水平比较低。改造前后相比, 在炉膛中下部的燃烧器段, 改造前炉膛截面平均温度比改造后两个工况的温度低, 而在高度高于7.27m——三次风喷口高度附近后, 改造前的炉膛截面平均温度水平略高于改造后。对于改造后两个工况, 尤其是改造2 工况的截面平均温度要高一点, 这是由细粉良好的燃烧特性造成的^[4]。

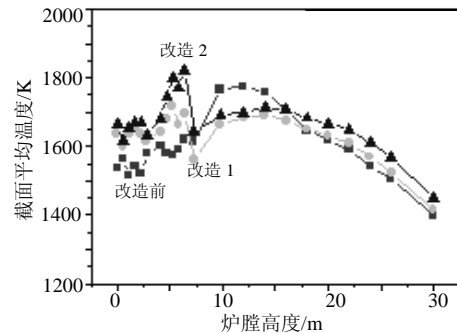


图8 炉膛截面平均温度沿着炉膛高度变化
Fig. 8 Average temperature along furnace height

图 9 为 3 个工况不同炉膛高度截面上平均氧量 (体积百分比) 沿着炉膛高度的分布。从图可以看出, 改造前随着炉膛高度增加, 燃烧器送入风量, 氧气浓度增加, 到燃烧器最上一层三次风 (7.27m), 氧气浓度开始降低。此时并没有达到炉膛温度最高水平, 最高温度出现在三次风喷口上面, 约在 10m 的位置 (图 8)。此时氧量已经开始下降。氧量衰减比较快, 到 14m 左右, 就只有 2.1%。改造后, 随着炉膛高度增加, 氧量先是增大, 在关闭的二次风喷口 (6.395m) 附近, 氧量急剧下降, 特别是改造 2 工况, 氧量下降更多, 只有 1.7%。然后, 由于三次风和最上面的两个再燃二次风的送入, 氧量回升, 最后又逐渐下降。在最上面一层一次风喷口上部出现氧量骤然下降: 对于改造 1 工况, 是因为空气分级, 改造 2 工况, 不仅空气分级而且由于最上面一层一次风携带的是超细煤粉, 细粉燃烧迅速且完全, 所以氧量消耗的更快。改造后, 在炉膛内均形成了相对低温, 低氧的区域, 这对还原 NO_x 具有十分重要的意义。

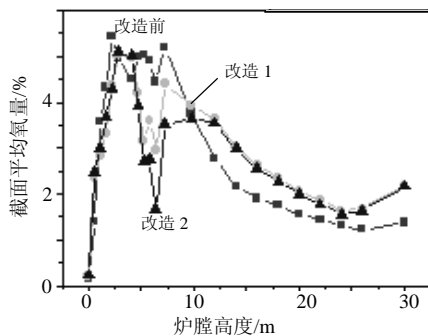


图 9 炉膛截面平均氧量沿着炉膛高度变化
Fig. 9 Average O_2 molar fraction along furnace height

图 10 为三工况的 CO 的浓度 (体积百分比) 分布。比较而言, 改造前 CO 的浓度比较低。改造后, 在图 9 中氧量最低的位置, CO 浓度出现峰值。改造 1 工况最高达到 3.5%, 而改造 2 工况为 4.0%, 可见细粉再燃能形成更为强烈的还原性燃烧气氛。

图 11 为三工况 NO_x 沿着炉膛高度的变化曲线 (折算为 6% 氧量下)。由图可知, 改造前, 在炉膛中下部, 燃烧器集中的区域, NO_x 大量生成, 最高达到 448.4 mL/m^3 , 随着炉膛高度增加, NO_x 浓度降低, 出口处为 363.9 mL/m^3 。改造后, 对于改造 1 工况, NO_x 在底部燃烧器区域也大量生成, 最高达到 402.3 mL/m^3 , 然后在还原区降低, 稍后由于送入燃尽风, NO_x 略有增加, 再降低, 到出口处为 260 mL/m^3 。 NO_x 降低 35.4%。改造 2 和改造 1 曲线变化趋势相

似, 只是曲线变化得更为剧烈, 出口为 205.7 mL/m^3 。 NO_x 降低 48.9%。细粉再燃创造出良好的还原性气氛, 有效降低 NO_x 。

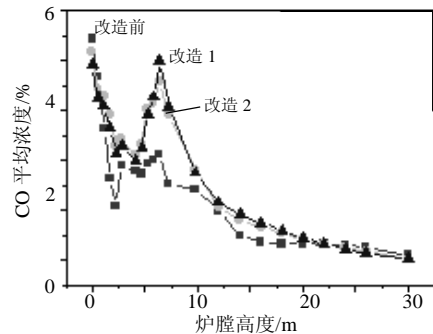


图 10 截面平均一氧化碳浓度沿着炉膛高度变化
Fig. 10 Average CO molar fraction along furnace height

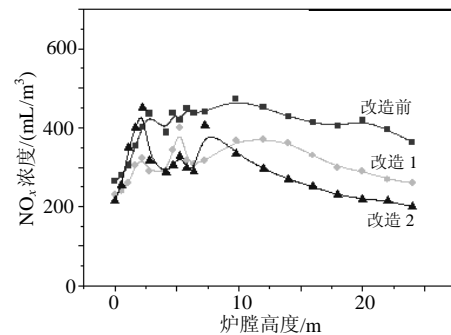


图 11 截面平均 NO_x 浓度沿着炉膛高度变化
Fig. 11 Average NO_x concentration along furnace height

4.3 颗粒相分析

携带煤粉的一次风分 4 层送入炉膛, 喷入高度分别为 1.12m, 2.24m, 4.7m, 5.82m。为表述方便, 从下到上每层分别标识为 $i(i=1,2,3,4)$ 。图 12 为第 1 层 ($i=1$) 煤粉颗粒喷入炉膛燃烧, 在不同炉膛高度下的燃尽情况。第 1 层为常规煤粉, 总体来说, 改造前煤粉燃尽程度要高于改造后。这是因为改造前风粉混合早而且充分。到 16m 的高度, 燃尽率达到 99% 以上。改造 1 工况与改造前相比, 开始燃尽速度差不多, 而到 4.14 高度后, 燃尽速度明显降低, 到 12m, 燃尽率仅为 94%, 一直到 28m, 才几乎燃尽。改造 2 与 1 相比, 在 5.26m 以前, 改造 2 的燃尽率都比 1 高, 但是后期, 燃尽速率比改造 1 低。这是因为改造 2 最上面一层 ($i=4$) 喷入的是超细煤粉, 而改造 1 喷入的仍然是常规煤粉, 细粉燃烧速率快, 短暂时间内抢占了大量的氧气, 这从前面图 9 也可以得到证明, 第 1 层常规煤粉经过此还原性气氛, 燃烧速率被抑制。改造 2, 也是在比较高的位置 28m, 第 1 层煤粉才燃尽。图 13 为最高一层

一次风携带的煤粉 ($i=4$) 喷入炉膛后沿着炉膛高度燃尽率的变化。从图可见, 改造前和改造2两个工况燃尽情况比改造1好。改造前工况, 由于其良好的配风, 燃尽情况较好。改造2工况喷入的是细粉, 虽然氧量并不充分, 但是细粉燃烧性能好, 反应迅速, 从喷入 5.82m 到 20m 比较短的距离就完全燃尽。而改造1工况, 由于空气分级, 最上面一层煤粉喷入位置是处于氧量不足的还原性气氛, 燃烧速率比较低, 且燃尽的所需要的高度也大大增加, 到 28m 的高度才燃尽。

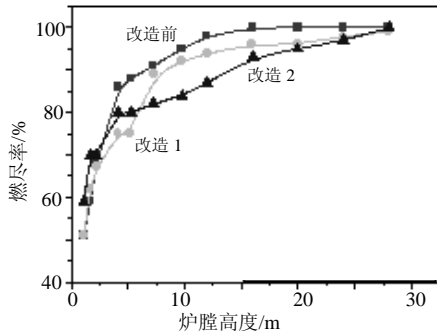


图 12 第一层煤粉燃尽率沿着炉膛高度变化图
Fig. 12 Coal particle burnout ratio along furnace height ($i=1$)

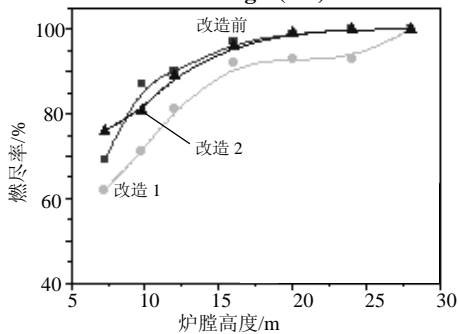


图 13 四层煤粉燃尽率沿着炉膛高度变化曲线
Fig. 13 Coal particle burnout ratio along furnace height ($i=1$)

图 14 为三工况飞灰含碳量统计。从图可以很明显地看出, 改造前各层喷口喷入的煤粉的飞灰含碳量都很低, 均小于 0.12%。改造1工况燃尽程度

最差。煤粉喷入的高度越高, 飞灰含碳量也越高, 这是因为喷入高度越高, 距离炉膛出口越近, 颗粒在炉内停留时间也越短。最上一层的飞灰含碳量达到 2.36%。对于改造2工况, 第3层的煤粉飞灰含碳量最高达到 2.9%, 而最高层由于是超细煤粉, 飞灰含碳量很低。

图 15 为改造前第1层煤粉在炉内的运动轨迹图。从图可知, 四角切圆燃烧锅炉内颗粒运动是随机的, 大部分颗粒随着上升气流运动, 也有一部分下冲到炉膛冷灰斗。表3为改造前各层煤粉颗粒在炉内最长和最短停留时间以及各个工况颗粒平均颗粒停留时间。从表中看, 各层煤粉颗粒的停留时间差异比较大, 大者有几十秒, 小者只有 1~2s, 平均而言, 越低层喷入的煤粉停留时间也越长。

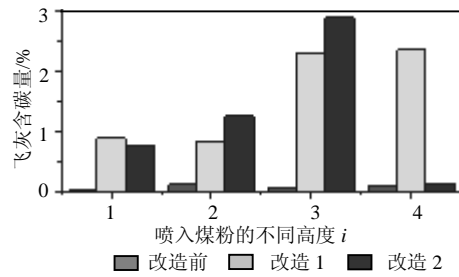


图 14 不同炉膛高度喷入煤粉颗粒飞灰含碳量
Fig. 14 Coal particle fly ash carbon content of different furnace height injections

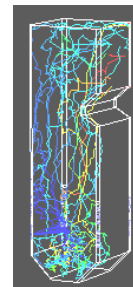


图 15 煤粉颗粒运动轨迹
Fig. 15 Coal particle track

表 3 三工况各层煤粉颗粒在炉内停留时间
Tab. 3 Coal particle residence time in furnace

序号	停留时间/s				
	最短(改造前)	最长(改造前)	平均(改造前)	平均(改造1)	平均(改造2)
第1层($i=1$)	2.57	65.1	8.15	7.38	7.61
第2层($i=2$)	2.14	34.0	5.50	6.13	5.69
第3层($i=3$)	1.60	11.8	3.93	4.07	4.21
第4层($i=4$)	1.50E	10.8	3.47	3.72	3.62

5 结论

针对 200MW 四角切圆燃烧锅炉, 提出空气

分级和细粉再燃两种改造方案。并利用 CFD 软件平台对锅炉改造前后燃烧状况进行数值模拟研究, 得出以下结论。

(1) 对于四角切圆燃烧锅炉, 采用 Paving 方法生成炉膛横界面网格, 网格线尽量与射流轨迹平行, 在保证网格质量的同时降低数值计算伪扩散的影响。

(2) 改造 1 采用空气分级, 改造 2 采用细粉再燃。计算结果表明: 改造前后炉内燃烧状况发生很大改变, 改造后在最上层一次风喷口高度, 温度骤然下降, 且该区域氧量很低, 但是 CO 浓度却很高, 说明形成一个相对低温、低氧的还原区, 这对抑制 NO_x 的生成具有十分重要的意义。

(3) 改造 1 和改造前相比, NO_x 排放降低 35.4%, 而改造 2 的 NO_x 降低 48.8%。超细煤粉再燃比简单的空气分级能更有效地降低 NO_x 排放。

(4) 改造后煤粉飞灰含碳量上升, 降低电厂经济性。

(5) 煤粉炉内颗粒运动是随机的, 停留时间差异显著, 平均而言, 煤粉喷入高度越高, 停留时间越短。

计算结果为实施细粉再燃降低 NO_x 排放技术, 确立改造方案, 提供理论指导。

参考文献

- [1] 丘纪华, 陈刚, 李佛金, 等. 应用计算机模拟技术分析预测炉内煤粉燃烧过程[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(9): 306-310.
Qiu Jihua, Chen Gang, Li Fojin *et al.* Prediction on pulverized coal combustion process in the boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(9): 306-310.
- [2] 李永华, 陈鸿伟, 刘吉臻, 等. 800MW 锅炉混煤燃烧数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 101-104.
Li Yonghua, Chen Hongwei, Liu Ji-zhen *et al.* Numerical simulation of blending coals combustion of 800MW boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 101-104.
- [3] 方建. 280t/h 锅炉三次风超细煤粉作为再燃燃料降低 NO_x 排放的技术方案[J]. 浙江电力, 2004(1): 16-22.
Fang Jian. Micronized coal in offgas as reburning fuel to reduce NO_x for 280t/h boiler[J]. Zhejiang Power, 2004(1): 16-22.
- [4] 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.
Liu Zhong, Yan Weiping, Gao Zhengyang *et al.* The effect of the micro-pulverized coal fineness on nitric oxide reduction by reburning[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 204-208.
- [5] Blacker T D, Stephenson M B. Paving: a new approach to automated quadrilateral mesh generation[J]. Int. J. for Numer. Meth. In Eng, 1991, 32: 811-847.
- [6] Kyu Yeul Lee, Doo Yeoun Cho, Tac Wan Kim. An algorithm for automatic 2D quadrilateral mesh generation with line constraints[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35: 1055-1068.
- [7] Soji Yamakawa, Kenji Shimada. Quad-Layer. A yered quadrilateral meshing of narrow two-dimensional domain by bubble packing and chordal axis transformation[C]. Proceedings of 2001 Design Automation Conference: 1-12.
- [8] 刘向军, 徐旭常. 采用不同网格比较伪扩散对四角切圆型炉膛流场计算的影响[J]. 燃烧科学与技术, 1997, 3(2): 114-117.
Liu Xiangjun, Xu Xuchang. Comparison of the influence of pseudo-diffusion on the numerical simulation of flow field in a tangential-firing furnace with different grid systems[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 1997, 3(2): 114-117.
- [9] 朱彤, 马喜辰, 董鹏, 等. 切向燃烧炉膛中网格划分方法对数值模拟的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1997, 29(5): 59-61.
Zhu Dang, Ma Xichen, Dong Peng *et al.* Effect of methods of dividing grid on numerical simulation for tangentially fired furnace[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1997, 29(5): 59-61.
- [10] 梁晓宏, 樊建人, 岑可法. W 型火焰煤粉锅炉炉内三维流动和燃烧过程的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(7): 243-247.
Liang Xiaohong, Fang Jianren, Cen Kefa. Numerical simulation of the flow and combustion processes in three-dimensional W-shaped boiler furnace[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(7): 243-247.
- [11] 潘维, 池作和, 李戈, 等. 四角切圆燃烧锅炉燃烧和污染物配风数值模拟[J]. 浙江大学学报, 2004(6): 762-764.
Pan Wei, Chi Zuohe, Li Ge *et al.* Numerical simulation of combustion and nitrogen oxides generation process in tangentially fired furnace[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2004(6): 762-764.
- [12] 李永华, 陈鸿伟, 刘吉臻, 等. 煤粉燃烧排放特性数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 166-169.
Li Yonghua, Chen Hongwei, Liu Jizhen *et al.* Numerical simulation on emission characteristics of pulverized coal combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 166-169.
- [13] 陶文铨. 计算传热学的近代进展[M]. 科学出版社, 2000.6: 71-80.
- [14] 向军, 熊友辉, 郑楚光, 等. PDF-Arrhenius 方法模拟煤粉燃烧氮氧化物生成[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 156-160.
Xiang Jun, Xiong Youhui, Zheng Chuguang *et al.* Using PDF-Arrhenius to simulate 3-dimensionally NO_x formation during coal combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 156-160.
- [15] 李振中, 冯兆兴, 王阳, 等. 煤粉双级垂直浓淡燃烧降低 NO_x 排放及稳燃技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 184-188.
Li Zhenzhong, Feng Zhaoxing, Wangyang *et al.* Study on dual vertical dense/lean combustion of pulverized coal in order to decrease NO_x emission and stabilize combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 184-188.

收稿日期: 2004-10-08。

作者简介:

潘 维(1977-), 女, 博士, 从事降低 NO_x 排放技术、计算机数值模拟。

