

低NO_x改造方案中煤粉再燃风喷口位置的选择

苟 湘, 周俊虎, 周志军, 杨卫娟, 刘建忠, 岑可法

(能源清洁利用国家重点实验室(浙江大学), 浙江省 杭州市 310027)

Selection of Position of Pulverized Coal Reburning Injector in Low NO_x Retrofit Schemes

GOU Xiang, ZHOU Jun-hu, ZHOU Zhi-jun, YANG Wei-juan, LIU Jian-zhong, CEN Ke-fa

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization (Zhejiang University), Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: Numerical simulation was performed on the combustion and contamination generation process under the original scheme and four retrofit schemes with different positions of coal reburning injector using conventional pulverized coal as reburning fuel with the rated load in a 410 t/h tangentially fired furnace in a domestic thermal power plant with CFD software platform. Results show that thermal NO_x can be restrained since the highest temperature decreases when the volume heat load q_v of burner zone decreases due to extending the burner zone in the reburning retrofit. The better NO_x reduction can be achieved since the lower NO_x concentration from the main combustion zone where the low oxygen combustion can restrain the NO_x. The lower position of reburning injector, the less NO_x reduction can be achieved due to the disturbance effect from main combustion zone. On the other hand, the higher position of reburning injector, the less NO_x reduction, the higher temperature of the outlet of furnace and the higher unburned carbon of fly ash can also be achieved due to the shorter settle time of reburning coal, but the better NO_x reduction can be achieved through choosing an appropriate position of reburning injector. The NO_x reduction of 47.66% can be achieved by using low oxygen primary combustion zone, appropriate position of reburning injector, and OFA. Further more, all parameters of the boiler run well and thermal efficiency of the boiler is increased slightly. Therefore, the satisfied NO_x reduction can be achieved using conventional pulverized coal as reburning fuel for the low ash content and flammable bituminous coals. Engineering testing shows that the results from numerical simulation are in conformity with real operation condition.

KEY WORDS: reburning; position of injector; NO_x; numerical simulation

摘要: 针对国内某热电公司410 t/h四角切圆燃烧锅炉, 基于CFD软件平台, 采用常规煤粉做再燃燃料, 在额定负荷下分别对原有方案和4种不同再燃风喷口位置的改造方案的炉内燃烧及污染物生成进行数值模拟, 选择出最优方案实施改造。结果表明, 再燃改造燃烧器区间增大, 燃烧器区域容积热负荷 q_v 降低, 可以有效降低炉膛最高温度, 从而抑制热力型NO_x的生成。主燃区低氧燃烧可以抑制NO_x的生成, 使得进入再燃区具有较低的NO_x浓度, 还原效果更好。再燃风喷口位置越低, 受主燃区的干扰越大, 还原效果差; 再燃风喷口位置越高, 停留时间短, 还原效果也差, 同时炉膛出口烟温越高, 飞灰含碳量也越高; 选择合适的再燃风喷口位置, 可以取得较好的还原效果。通过采用主燃区低氧燃烧, 选择合适的再燃风喷口位置, 以及燃尽风的作用, 使得改造脱硝率达到47.66%, 而且锅炉各参数运行稳定, 同时锅炉热效率也略有增加, 因此对于灰分较低的易燃尽烟煤来说, 实施常规煤粉再燃改造可以获得比较满意的效果。工程实践表明, 数值计算结果与实际运行数据吻合良好。

关键词: 再燃; 喷口位置; NO_x; 数值模拟

0 引言

燃煤污染物NO_x排放问题日益受到人们的关注, 使得环境保护要求不断提高, 对燃煤电厂NO_x排放控制日趋严格, 各种低NO_x技术和运行方式得到广泛研究和应用。煤粉再燃技术对于煤粉炉来说是比较好的低NO_x技术之一, 国内外较多研究者^[1-7]对煤粉再燃进行了大量研究, 对于影响再燃效果的再燃区过量空气系数、再燃燃料比例以及再燃区停留时间是很重要的3个参数, 这些参数的确定是再燃技术是否取得成功的关键。再燃喷口的位置直接影响再燃区的停留时间, 从而影响NO_x的还原效果,

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(50525620); 国家重点基础研究发展规划基金项目(2006CB200303)。

Scientific Funds for Outstanding Young Scientists of China (50525620); Project Subsidized by the Special Funds for Major State Basic Research Projects of China (2006CB200303).

而且还影响飞灰含碳量。在运行中,可以通过适当改变配风方式和给粉比例来调整再燃区的过量空气系数和再燃燃料比例,但一旦喷口位置确定,再燃区的大小就基本确定,即使设计摆动的再燃风,但改变再燃区停留时间的范围很受限,因此在低 NO_x 再燃改造中再燃喷口位置的确定显得相当重要。

本文针对国内某热电公司410 t/h四角切圆燃烧锅炉,基于CFD 软件平台,采用常规煤粉做再燃燃料,在额定负荷下分别对原有方案和4种不同再燃喷口位置改造方案的炉内燃烧及污染物生成进行数值模拟,选择出最优方案,然后进行改造工程,并将改造后的运行参数进行验证。分析再燃喷口位置对 NO_x 还原率、飞灰含碳量的影响,为再燃改造设计提供技术资料。

1 研究对象

某热电公司1号炉系哈尔滨锅炉厂生产的HG-410/9.8-YM15型单汽包自然循环、固态排渣、四角喷燃、高压煤粉锅炉,配中间储仓式钢球磨煤机制粉系统,热风送粉。炉膛为正方形,尺寸为 $9\,980\text{mm}\times 9\,980\text{mm}$,炉膛中心形成直径为 $\phi 600\text{mm}$

的逆时针切圆。锅炉燃用煤粉中,一次风煤粉颗粒的直径最小 $30\mu\text{m}$,最大为 $300\mu\text{m}$,平均直径 $70\mu\text{m}$,三次风煤粉颗粒直径最小为 $5\mu\text{m}$,最大为 $30\mu\text{m}$,平均直径为 $15\mu\text{m}$,直径分布均满足Rosin-rammler分布,该煤种的工业分析和元素分析见表1所示。原设计额定负荷下单磨运行,三次风含粉量占总给粉量的5%。原有燃烧器和4种不同再燃喷口位置的燃烧器改造方案如图1所示。原燃烧器特点:单磨运行时只有一组对角有三次风,最上层为三次风,燃烧器总高度为 $4\,665\text{mm}$ 。新方案的特点:下二次风、下一次风和上一次风均对冲布置,中二次风、上二次风、上/下三次风和OFA(燃尽风)均逆时针切圆布置,切圆直径为 $\phi 800\text{mm}$,再燃风逆时针切圆布置,切圆直径为 $\phi 500\text{mm}$,再燃煤粉为常规煤粉,煤粉量占总给粉量的25%。三次风有两层,两台磨煤机分别负责一层三次风,最上层为OFA,三次风在上二次风之上布置,再燃风在三次风和OFA之间布置,下二次风的位置比原有方案下移了 402mm ,OFA也比原有方案的最上层三次风高出 507mm ,燃烧器总高度为 $5\,594\text{mm}$ 。方案A、方案B、方案C、方案D

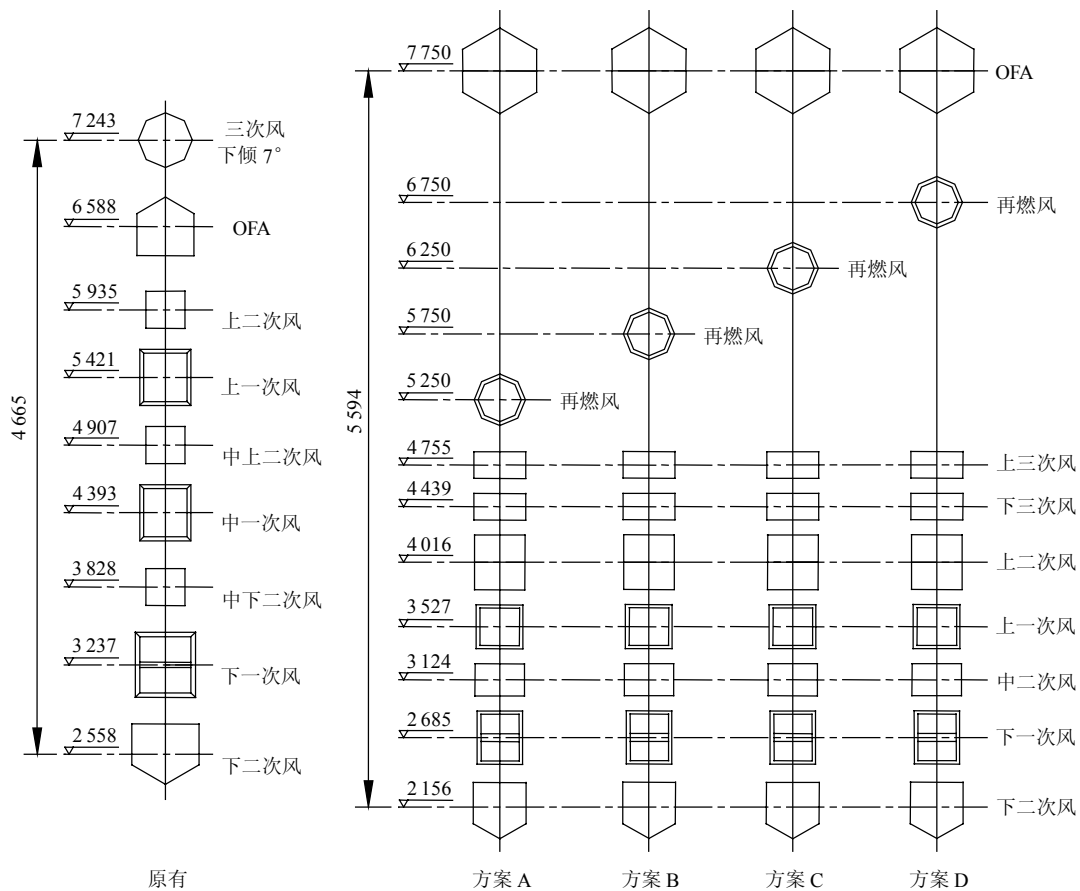


图1 原有燃烧器和4种不同再燃风喷口位置的燃烧器改造方案比较

Fig. 1 Comparison of original burners and four retrofit schemes of burners in different positions of reburning

的4种新方案中相互之间只有再燃风位置不同,各新方案再燃风喷口位置间距为500mm,其它参数均相同,这样有利于研究再燃喷口位置的影响。燃烧器各层喷口参数如表2所示。按照各燃烧器配风情况计算出燃烧器区域过量空气系数沿炉膛高度的变化如图2所示,其中P₁为新改造方案的下一次风位置,P₄为燃尽风位置;P₂为原有下一次风位置,P₃为三次风位置。再燃改造在主燃区的过量空气系数为1.0,再燃区的过量空气系数为0.87,炉膛总体配风的过量空气系数为1.13,原有炉膛总体配风的过量空气系数为1.16。

表 1 煤的工业分析和元素分析

Tab. 1 Proximate and ultimate of coal

工业分析/%				Q _{net,ar} /	元素分析/%				
M _{ar}	A _{ar}	V _{ar}	FC _{ar}	(kJ/kg)	C _{ar}	H _{ar}	N _{ar}	S _{ar}	O _{ar}
13.62	8.7	29.47	48.21	23 197	62.69	3.41	0.83	0.58	10.17

表 2 燃烧器各层喷口参数

Tab. 2 Parameters of injectors of burners

名称	方式	风率/%	风速/(m/s)	风温/℃
一次风	原有	28	35	160
	改造后	23	28	90
二次风	原有	59.6	56	315
	改造后	64.6	45	345
三次风	原有	12.4	60	60
	改造后	12.4	45	60

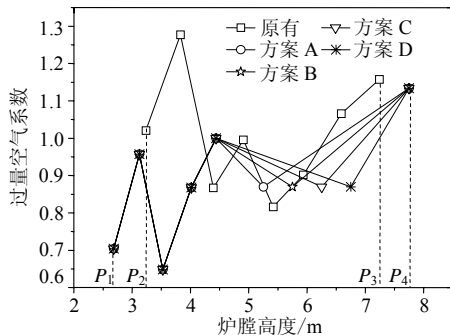


图 2 再燃改造燃烧器区过量空气系数沿炉膛高度的变化
Fig. 2 Air excess coefficient of burner area along furnace height with reburning retrofit

2 计算方法

5种方案(原有方案和4种再燃改造方案)的计算模型的网格总数分别约100万,均对燃烧器区域尤其是在喷口附近各物理量变化剧烈的部位进行了加密,以提高模拟质量。综合比较国内外许多学者^[8-27]对煤粉炉内的流动、燃烧以及污染物形成的经验,本文5种方案的数值模拟均采用三维稳态计算,SIMPLEC算法,湍流模型采用可实现k-ε双方程模型(realizable k-ε model),用混合分数-概率密度函数(mixture-reaction/PDF)模拟湍流燃烧,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。NO_x生成模拟用后处理方法计算。按照NO_x生成机理,分为热力型NO_x,快速型NO_x,燃料型NO_x和再燃还原NO_x。热力NO_x的生成根据广义的Zeldovich机理计算。快速型NO_x采用由De Soete提出的通用动力学参数及其快速型NO_x预测模型来计算。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O₂氧化成NO,也可以把NO还原生成N₂。焦炭中的N直接转化为NO。再燃还原NO_x是通过NO和煤粉热解析出的碳氢基团CH, CH₂和CH₃以及焦炭的还原反应而导致NO减少。

3 计算结果与试验结果讨论

3.1 温度分布

炉膛温度分布状况是表征锅炉燃烧效果的重要参数之一,图3比较了原有方案和4种(方案A、方案B、方案C、方案D)新的再燃改造方案中炉膛截面平均温度沿炉膛高度的变化,4种改造方案中三次风喷口以下的区域炉膛截面平均温度基本相当;在图3中炉膛高度2.5m位置以下的区域,再燃改造方案的温度均高于原有方案,这主要是再燃改造中下一次风位置下移所致。无论是再燃改造的各方案还是原有方案,炉膛最高温度均出现在燃烧器区域,原有方案的燃烧器区域最高温度为1795K,再燃改造的最高温度:方案A为1758K、方案B为1762K、方案C为1760K、方案D为1750K,再燃改造各方案的最高温度均低于原有方案的最高温度33~45K,这有利于抑制热力型NO_x的生成。4种再燃改造方案在燃尽风供给以后温度均略有所上升,这是由于燃尽风的供给使得未燃成分的进一步燃烧释放较多热量所致,其中方案D因再燃风位置最高,进入燃尽区前的未燃尽成分最多而获得较高的温度,方案A的再燃风位置最低从而燃尽风以后的温度相对最低,方案B和方案C分别居其中间。之后随燃尽的逐渐结束和炉膛高度的增加,温度均趋于下降,到炉膛出口4种方案的温度为:方案A为1231K、方案B为1236K、方案C为1243K、方案D为1255K。比较4种方案,再燃风位置越高,炉膛出口烟温越高。

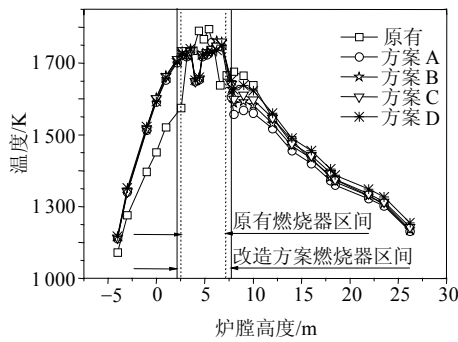


图3 再燃改造炉膛截面平均温度沿炉膛高度的变化
Fig. 3 Average temperature along furnace height with reburning retrofit

3.2 烟气组分分布

图4~7分别比较了原有方案和4种新的再燃改造方案中炉膛截面 CO_2 、 CO 、 O_2 、 NO 体积组分。

在燃烧器区间以下的区域：原有方案和4种改造方案分别是在各自的下二次风喷口位置以下的区域。4种改造方案的温度较高， CO 浓度较高， CO_2 和 O_2 浓度较低。由于原有方案在下一二次风的平均过量空气系数为1.02(图2)，而改造方案却为0.70，使得改造方案在下一二次风以下的区域具有较高的 CO 浓度和较低的 O_2 浓度，虽然温度稍高，但 NO 浓度(图7)仍然较低，也可以说明， NO 的生成对氧气浓度的敏感性强于对温度的敏感性。

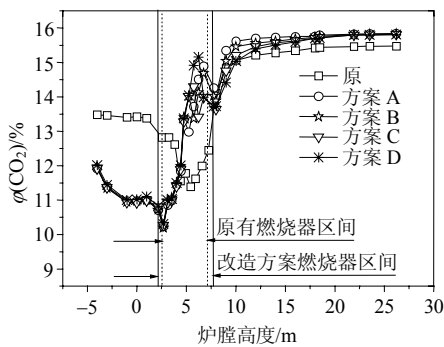


图4 再燃改造炉膛截面 CO_2 浓度沿炉膛高度的变化
Fig. 4 CO_2 molar fraction along furnace height with reburning retrofit

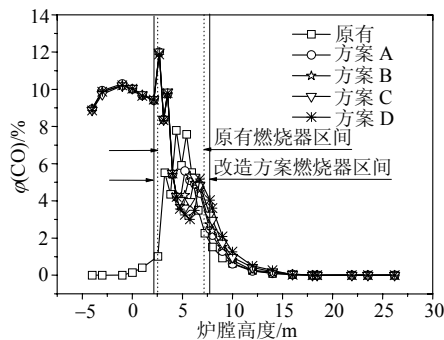


图5 再燃改造炉膛截面 CO 浓度沿炉膛高度的变化
Fig. 5 CO molar fraction along furnace height with reburning retrofit

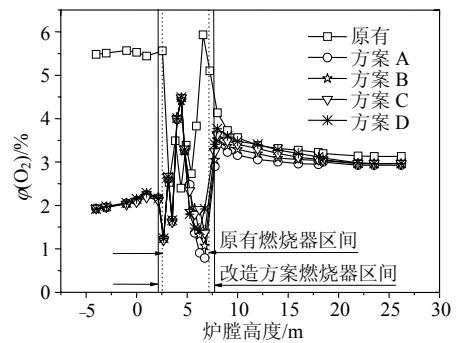


图6 再燃改造炉膛截面 O_2 浓度沿炉膛高度的变化
Fig. 6 O_2 molar fraction along furnace height with reburning retrofit

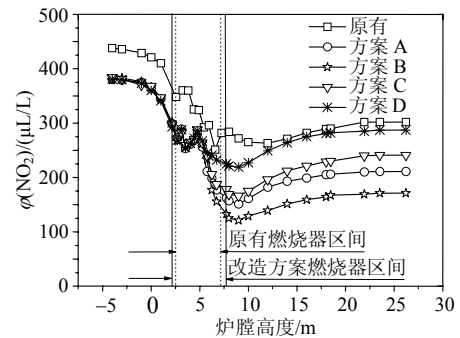


图7 再燃改造炉膛截面 NO 浓度沿炉膛高度的变化
Fig. 7 NO molar fraction along furnace height with reburning retrofit

在燃烧器区间：原有方案是从下二次风到三次风的区域，各改造方案是从下二次风到OFA的区域。由于原有方案和改造方案的配风不同以及各改造方案的再燃喷口位置不同，使得烟气组分有差别。在原有方案，沿炉膛高度方向各一次风位置的过量空气系数逐渐降低(图2)，使得从下二次风到上一次风之间的区域总体趋势是： CO 浓度增加， O_2 浓度降低， CO_2 浓度也因氧量越来越不足而降低， NO 浓度也降低。随着上二次风和OFA的进入，氧量逐渐供给充足，使得 CO_2 浓度上升， CO 浓度减少， O_2 浓度上升，从上二次风到OFA位置， NO 略有下降的主要原因是上二次风进入以后空气量仍然不足，过量空气系数为0.90(图2)，加上OFA进入后的稀释作用，以及温度也从1747K降到1638K抑制了热力型 NO 的生成，到三次风位置时，由于三次风含风量的影响使得氧量充足，加上三次风含粉的燃烧作用，燃料N燃烧使得 NO 略有增加，随后离开燃烧器区。而在4种改造方案中，随着下一次风的进入， CO 的浓度上升， CO_2 、 O_2 浓度都降低， NO 浓度也降低。随后沿炉膛高度的增加，各改造方案在未进入再燃风之前，总体趋势是 CO_2 浓度增加， CO 浓度降低， O_2 浓度增加，由于中一次风位

置的过量空气系数比下一次风的还低，使得 NO 在上二次风位置之前随炉膛高度的增加总体上处于下降趋势，但随着上二次风的进入，NO 浓度开始增加，当到三次风位置，由于三次风含风量的影响使得氧量充足，加上三次风含粉的燃烧作用，燃料 N 燃烧使得 NO 略有增加，对于方案 A，再燃区间为 2.5m，由于再燃风位置最低，受三次风的影响而混入燃烧，部分燃料 N 参与了燃烧而不是还原，使得进入燃尽区之前 NO 达到的最低值为 162 μL/L，再燃区 NO 还原率为 42.35%；对于方案 B，再燃区间为 2.0m，由于受三次风的影响较小，使得进入燃尽区之前 NO 达到的最低值为 133 μL/L，再燃区 NO 还原率为 53.33%；对于方案 C，再燃区间为 1.5m，再燃区停留时间较短使得进入燃尽区之前 NO 达到的最低值为 178 μL/L，再燃区 NO 还原率为 39.19%；对于方案 D，再燃区间为 1.0m，再燃区停留时间最短，使得进入燃尽区之前 NO 达到的最低值为 225 μL/L，再燃区 NO 还原率为 21.33%。综上所述，方案 B 在再燃区的还原效果最好。

在燃烧器区间以上的区域：原有方案是从三次风喷口位置(7.243 m)开始往上的区域，4 种改造方案是从 OFA 喷口位置(7.750 m)开始往上的区域。原有方案在三次风进入以后，携带少量煤粉和大量的空气，此时过量空气系数达到 1.16(图 2)，同时燃烧三次风煤粉和下面一次风带入的未燃尽的产物，使得 CO₂ 迅速上升，CO 浓度也随燃尽的进行逐渐降低。而在 4 种改造方案中再燃风位置越低，在到达燃尽风喷口位置时，未燃尽的成分就越少，随着燃尽风的补充，使得 CO₂ 浓度越早达到稳定。如图 4 的 4 种改造方案中，方案 A 的 CO₂ 浓度最先达到稳定，其后依次是方案 B、方案 C，方案 D 的 CO₂ 浓度则最后达到稳定。CO 浓度随燃尽的进行而逐渐降低，到炉膛出口位置几乎为零，达到完全燃烧，O₂ 浓度则随燃尽的进行而被消耗，随炉膛高度的增加而逐渐趋于稳定。改造各方案的炉膛出口 CO₂、CO、O₂ 浓度基本相等。改造各方案的 CO₂ 浓度比原有方案略高 0.35%，O₂ 浓度比原有方案略低 0.17%，这主要是改造方案的配风量减少所致。原有方案的 NO 浓度由于三次风携带煤粉的还原作用和空气分级效果，使之在经过三次风喷口截面以后就开始下降，而随炉膛高度的增加，燃尽的进行，还原产物 HCN 和焦炭 N 的氧化而使得 NO 浓度开始上升。在 4 个改造方案中，在 OFA 进入的最初，由于空气的大量进入，开始略微稀释了 NO 浓度，随

后都因为还原产物 HCN 和焦炭 N 的氧化而使得 NO 浓度逐渐上升到一个稳定值。由于各改造方案再燃风位置的不同，进入燃尽区的初始浓度不同，使得燃尽结束后到达炉膛出口的浓度也不同，其中方案 A 为 211 μL/L，方案 B 为 171 μL/L，方案 C 为 241 μL/L，方案 D 为 287 μL/L，其中方案 B 最低。原有方案到炉膛出口 NO 浓度为 302 μL/L，各改造方案的 NO 浓度均低于原有方案。

3.3 飞灰含碳量比较及改造方案选择

将原有方案和各改造方案的炉膛出口飞灰含碳量计算结果进行比较如图 8 所示，改造各方案的飞灰含碳量均高于原有方案，再燃风位置越低，飞灰含碳量越低。方案 C 和方案 D 由于炉膛出口 NO 浓度和飞灰含碳量都比较高，不宜选择。方案 A 比方案 B 的飞灰含碳量低 1.37%，但炉膛出口 NO 浓度比方案 B 高 40 μL/L，由表 1 可知，该煤质的灰分较低，所以方案 B 比方案 A 多带来的机械未完全燃烧热损失(q_4)较小，考虑到低 NO_x 改造的需要，并且综合比较炉膛出口烟气组分、烟温、NO 浓度和飞灰含碳量，选择方案 B 作为实施的改造方案。

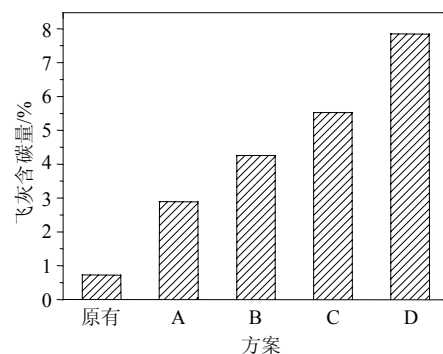


图 8 再燃改造飞灰含碳量比较
Fig. 8 Comparison of unburned carbon of fly ash with reburning retrofit

3.4 计算结果与工程运行结果比较

锅炉热效率比较：改造前为 92.02%，改造后为 92.27%，改造后锅炉热效率增加了 0.25%，虽然在飞灰含碳量方面有所增加，但是由于该煤种含灰量少，对机械未完全燃烧热损失(q_4)增加较小，相反，由于改造方案对配风总量进行了减少，配风总量的过量空气系数从 1.16 降低到 1.13，带来的排烟热损失(q_2)减少较多，从而使得实际改造后锅炉热效率略有提高。而且改造后锅炉各参数运行稳定。

分别将原有方案和实施的改造方案 B 的燃烧器区域的平均燃烧温度、炉膛出口氧量、炉膛出口烟温、飞灰含碳量、炉膛出口 NO_x 的计算值与工程运行数据(均按 $\phi(O_2) = 6\%$ 折合)进行比较，如表 3 所示，

计算值和运行值吻合良好, 误差均在 3%以内, 说明数值模拟的计算方法是有效的。表 3 可知方案B

的改造获得的实际脱硝率为 47.66%。

表 3 计算结果与工程运行结果比较

Tab. 3 Comparison of computational results and engineering practice results

名称	平均燃烧温度/K	炉膛出口氧量/%	炉膛出口烟温/K	飞灰含碳量/%	炉膛出口 $\rho_N(\text{NO}_x)/(\text{mg}/\text{m}^3)$
原有计算值/运行值	1716/1708	3.13/3.10	1233/1219	0.85/0.88	522/535
方案B计算值/运行值	1712/1729	2.96/3.03	1236/1220	4.46/4.58	291/280

4 结论

针对410 t/h四角切圆燃烧锅炉, 利用CFD 软件平台, 采用常规煤粉做再燃燃料, 在额定负荷下分别对原有方案和4种不同再燃喷口位置方案的炉内燃烧及污染物生成进行数值模拟, 选择出最优方案后进行改造工程, 并将计算结果与运行数据进行比较, 得出以下结论。

(1) 再燃改造燃烧器区距离增大, 降低燃烧器区域的容积热负荷, 可以有效降低炉膛最高温度, 抑制热力型 NO_x 的生成。

(2) 主燃区低氧燃烧可以抑制 NO_x 的生成, 使得进入再燃区具有较低的 NO_x 浓度。

(3) 再燃区间的大小对 NO 的还原效果有重要影响。再燃区间过大, 再燃风位置越低, 受主燃区的干扰越大, 还原效果反而变差; 再燃区间过小, 停留时间变短, 还原效果变差。选择合适的再燃区间, 可以带来更好的还原效果。

(4) 再燃风喷口位置越高, 炉膛出口烟温越高, 飞灰含碳量也越高。

(5) 主燃区低氧燃烧, 煤粉再燃加上燃尽风可以获得较好的低 NO_x 改造, 脱硝率达到47.66%, 而且改造后锅炉各参数运行稳定, 同时锅炉热效率也略有增加, 因此对于灰分较低的易燃尽烟煤来说, 实施常规煤粉再燃改造可以获得比较满意的效果。

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] Liu H, Hampartsoumian E, Gibbs B M. Evaluation of the optimal fuel characteristics for efficient NO reduction by coal reburning[J]. Fuel, 1997, 76(11): 985-993.
- [3] Li S, Xu T M, Zhou Q, et al. Optimization of coal reburning in a 1 MW tangentially fired furnace[J]. Fuel, 2007, 86(7): 1169-1175.
- [4] Zhong B J, Shi W W, Fu W B. Effects of fuel characteristics on the NO reduction during the reburning with coals[J]. Fuel Processing Technology, 2002, 79(2): 93-106.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 欧大武, 方磊, 李戈, 等. 利用三次风再燃降低 NO_x 排放研究[J]. 电站系统工程, 2003, 19(1): 24-26.
- [8] 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.
- [9] 潘维, 池作和, 李戈, 等. 四角切圆燃烧锅炉燃烧和污染物排放数值模拟[J]. 浙江大学学报, 2004, 38(6): 762-764.
- [10] Yin C G, Caillat S, Harion J L, et al. Investigation of the flow, combustion, heat-transfer and emissions from 609MW utility tangentially fired pulverized-coal boiler[J]. Fuel, 2002, 81(8): 997-1006.
- [11] Jones J M, Patterson P M, Pourkashanian M, et al. Approaches to modelling heterogeneous char NO formation/destruction during pulverised coal combustion[J]. Carbon, 1999, 37(10): 1545-1552.
- [12] Megalos N P, Smith N L, Zhang D K. The potential for low NO_x from a precessing jet burner of coal[J]. Combustion and Flame, 2001, 124(1): 50-64.
- [13] 金晶, 张忠孝, 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.
- [14] Arenillas A, Backreedy R I, Jones J M, et al. Modelling of NO formation in the combustion of coal blends[J]. Fuel, 2002, 81(5): 627-636.
- [15] 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.
- [16] Li Z Q, Wei F, Jin Y. Numerical simulation of pulverized coal and its application prospects in China[J]. Power Engineering, 2001, 21(4): 1320-1323(in Chinese).
- [17] 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(in Chinese).
- [18] Ou Dawu, Fang Lei, Li Ge, et al. Study on using condensed tertiary-air coal reburning reduction NO_x technology[J]. Power System Engineering, 2003, 19(1): 24-26(in Chinese).
- [19] Liang Xiaohong, Fan 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(in Chinese).
- [20] 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, 38(6): 762-764(in Chinese).
- [21] Jones J M, Patterson P M, Pourkashanian M, et al. Approaches to modelling heterogeneous char NO formation/destruction during pulverised coal combustion[J]. Carbon, 1999, 37(10): 1545-1552.
- [22] Megalos N P, Smith N L, Zhang D K. The potential for low NO_x from a precessing jet burner of coal[J]. Combustion and Flame, 2001, 124(1): 50-64.
- [23] 金晶, 张忠孝, 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.
- [24] Jin Jing, Zhang Zhongxiao, Li Ruiyang. Numerical simulation and experimental study on micronized coal reburning[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 215-218(in Chinese).
- [25] Arenillas A, Backreedy R I, Jones J M, et al. Modelling of NO formation in the combustion of coal blends[J]. Fuel, 2002, 81(5): 627-636.
- [26] 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.
- [27] 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(in Chinese).
- [28] Li Z Q, Wei F, Jin Y. Numerical simulation of pulverized coal

- combustion and NO formation[J]. *Chemical Engineering Science*, 2003, 58(23): 5161-5171.
- [17] 胡泰来, 姚斌, 曾汉才, 等. 炉膛(CFS系统)燃烧过程的数值模拟及工程应用[J]. *燃烧科学与技术*, 1997, 3(3): 286-292.
Hu Tailai, Yao Bin, Zeng Hancan, et al. Projected application and modeling about combustion furnace system (CFS) in a boiler[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 1997, 3(3): 286-292(in Chinese).
- [18] Dimitriou D J, Kandamby N, Lockwood F C. A mathematical modelling technique for gaseous and solid fuel reburning in pulverised coal combustors[J]. *Fuel*, 2003, 82(15): 2107-2114.
- [19] 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(in Chinese).
- [20] Fan J R, Qian L G, Ma Y L, et al. Computational modeling of pulverized coal combustion processes in tangentially fired furnaces [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2001, 81(1): 261-269.
- [21] 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, Wang Yang, 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(in Chinese).
- [22] Eaton A M, Smoot L D, Hill S C, et al. Components, formulations, solutions, evaluation, and application of comprehensive combustion models[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1999, 25(4): 387-436.
- [23] 丁宁, 曹欣玉, 杨亮, 等. 高长宽比六角切向锅炉缺角流场试验与数值模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(1): 152-157.
Ding Ning, Cao Xinyu, Yang Liang, et al. Experiments and numerical simulation on flow field of hexagonal arranged boiler with a high length-width ratio during absent-angle running[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(1): 152-157(in Chinese).
- [24] Luis I D, Cristobal C, Antonio C. Modelling of pulverized coal boilers: review and validation of on-line simulation techniques[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25(10): 1516-1533.
- [25] Kurose R, Makino H, Suzuki A. Numerical analysis of pulverized coal combustion characteristics using advanced low- NO_x burner[J]. *Fuel*, 2004, 83(6): 693-703.
- [26] 姜秀民, 崔志刚, 马玉峰, 等. 670t/h四角切圆锅炉反切消旋的数值模拟和工程实践[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(18): 109-115.
Jiang Xiumin, Cui Zhigang, Ma Yufeng, et al. Numerical simulation and engineering practice of a 670t/h corner tangential boiler with reverse-tangent and swirling-elimination[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(18): 109-115(in Chinese).
- [27] Hill S C, Smoot L D. Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2000, 26(4): 417-458.



苟 湘

收稿日期: 2007-10-03。

作者简介:

苟 湘(1972—), 男, 四川泸州人, 博士, 主要从事燃煤污染物控制方面的研究, gouxiang@sina.com;

周俊虎(1962—), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士生导师, 主要从事环境及能源清洁利用方面的研究;

周志军(1969—), 男, 安徽蚌埠人, 博士, 副教授, 主要从事煤粉燃烧及煤气化方面的研究, 本文联系作者, zhouzj@zju.edu.cn。

(责任编辑 王庆霞)