

超临界对冲旋流燃烧锅炉低氮改造

魏增涛¹,程智海²,郭永红³

(1. 上海发电设备成套设计研究院,上海 200240;2. 上海电力学院 能源与机械工程学院,上海 200093;
3. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院,北京 102206)

摘要:为了降低进入 SCR(选择性催化还原)装置的 NO_x 浓度,拟对某电厂 600 MW 超临界锅炉进行低氮燃烧器改造,在改造前对 NO_x 排放浓度高的原因进行分析,同时提出 3 种备选改造方案并进行数值模拟研究,最后确定最优方案,即:保持原来燃烧器数量、位置不变,减小各次风的通流面积(风速不变),使主燃烧器区域过量空气系数为 0.85,更换先进的低氮燃烧器,在原来的位于 34.724 m 标高位置的 16 只 SOFA(分离燃尽风)风口中只保留两侧墙的 6 只,并在标高 39.350 m 处布置一层 SOFA 燃尽风(12 个喷口)。改造后进入 SCR 的 NO_x 平均质量浓度约为 400.7 mg/m^3 ,与数值模拟计算结果误差为 12.8%,说明数值模拟计算结果具有参考意义。

关键词:旋流燃烧; NO_x 排放;数值模拟;低氮燃烧器;SOFA 燃尽风

中图分类号:TK223.2 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2017)03-0106-06

Low NO_x improvement scheme of supercritical swirling combustion boiler

Wei Zengtao¹, Cheng Zhihai², Guo Yonghong³

(1. Shanghai Power Equipment Research Institute, Shanghai 200240, China; 2. College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200093, China; 3. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to reduce the NO_x concentration entering the SCR (selective catalytic reduction), a 600 MW supercritical boiler was tentatively retrofitted to be a low nitrogen burner. Primarily, the factors causing high concentration NO_x emission were investigated. Accordingly three kinds of retrofit schemes were made by a numerical simulation, and eventually, an optimized implementation scheme was selected. The detailed retrofit scheme is maintaining the original burner number and position, reducing the primary air flow area (constant wind speed) and obtaining the main burner region of excess air coefficient being 0.85. The replacement of advanced low NO_x burners are recommended, and only 6 separation overfire air outlets (initial elevation 34.724 m) are left in the two sides of the wall, and a layer of separated overfire air (12 nozzle) is set at the elevation of 39.350 m. Over a period of operation after retrofitting, the average concentration of NO_x entering SCR is about 400.7 mg/m^3 , which is about 12.8% higher than the numerical simulation results indicating the appropriate significance of numerical simulation.

Key words: swirling combustion; NO_x emission; numerical simulation; low nitrogen burner; separation overfire air

0 引 言

火电厂大气污染物排放问题越来越受到各国政府的关注和重视。我国在 2012 年 1 月 1 日起开始实施的《火电厂大气污染物排放标准》对氮氧化物排放提出了更严格的要求。但国内火电厂早期投运

锅炉低氮燃烧技术落后, NO_x 排放浓度偏高, 燃煤锅炉 NO_x 排放质量浓度通常在 600 mg/m^3 以上。目前炉内脱硝技术主要有低氮燃烧技术、SNCR(选择性非催化还原技术), 尾部烟道脱硝有 SCR(选择性催化还原技术), 本文主要研究低氮燃烧, 即低氮燃烧器与低氮燃烧调整。为了响应国家对火电厂大气

收稿日期:2016-11-02;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.03.021

作者简介:魏增涛(1986—),男,湖南邵阳人,工程师,硕士,从事煤燃烧与电厂节能研究。E-mail:weizengtao@163.com

引用格式:魏增涛,程智海,郭永红.超临界对冲旋流燃烧锅炉低氮改造[J].洁净煤技术,2017,23(3):106-111.

Wei Zengtao, Cheng Zhihai, Guo Yonghong. Low NO_x improvement scheme of supercritical swirling combustion boiler[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(3):106-111.

污染排放控制的要求并提高电厂的经济效益,某电厂计划在2013年9—11月大修期间对2号炉进行低氮改造,目标是使省煤器出口 NO_x 质量浓度降低30%~50%,以便节省尾部脱硝装置氨水用量。本文提出了3种低氮改造方案,为了选择最优方案,在改造前对锅炉存在的 NO_x 排放浓度高的原因进行分析,同时对提出的3种改造方案进行数值模拟,最终确定最优改造方案加以说明与论证。

1 设 备

1.1 锅炉设备

山西某电厂600 MW锅炉是超临界参数变压运行直流锅炉,单炉膛、一次再热、露天布置、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构 Π 形锅炉,型号为MB-1944-24.7-571/569。锅炉燃烧方式为前后墙对冲燃烧,前后墙各布置3层低 NO_x 轴向旋流燃烧器,每层各有5只,共30只。在煤粉燃烧器的上方,前后墙和侧墙布置一层燃尽风口,前后墙各布置5只燃尽风口,左右侧墙各布置3只燃尽风口,共16只。每只燃烧器配有一只油枪,用于点火和助燃。

锅炉配有2台高速燃尽风机,从热二次风取风,升压后送至16只燃尽风风口。OFA(燃尽风)风口包含两股独立的气流:中央部位的气流是非旋转的气流,直接穿透进入炉膛中心;外圈气流是旋转气流,用于和靠近炉膛水冷壁的上升烟气进行混合。

1.2 燃烧器设备

燃烧器采用前后墙布置,对冲燃烧。前后墙在标高20.830、25.461、30.093 m上布置3层燃烧器,每层各有5只LNASB(低 NO_x 轴向旋流燃烧器)燃烧器,共30只LNASB燃烧器。在最上层煤粉燃烧器上方,炉膛四周标高34.724 m处各布置1层燃尽风口,如图1所示,前后墙各布置5只,两侧墙各布置3只,共16只燃尽风口。燃烧器层间距为4.630 m。燃烧器有分风箱。风箱分为前后墙风箱,根据燃烧器前后墙布置的层数,前后墙风箱又各分为3个小的风箱,即每层燃烧器一个小风箱,每层风箱从炉膛两侧进风。

每只LNASB燃烧器装有1支油燃烧器用于点火、暖炉和低负荷稳燃并配有自身的高能点火器。高能点火器、油燃烧器及其各自的推进器组合为一体。油燃烧器采用蒸汽雾化,出量为1.346 t/h。

1.3 锅炉煤种

实际燃用的煤质较设计煤质存在一定的偏差,

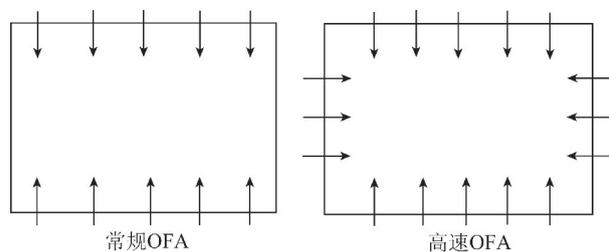


图1 燃尽风口布置

Fig. 1 Layout of overfire air

统计2012年实际燃煤情况见表1,实际燃用煤种的灰分低于设计煤种,收到基全水分高于设计煤种,干燥无灰基挥发分高于设计煤种,其低位发热量略低于设计煤种。因此煤的着火性能比设计煤种好,有利于控制 NO_x 的生成。

表1 电厂实际煤质与设计煤质工业分析对比

Table 1 Proximate analysis comparison between actual coal and design coal

项目	$A_{ar}/\%$	$M_{ar}/\%$	$M_{ad}/\%$	$V_{ad}/\%$	$V_{daf}/\%$	$Q_{net,ar}/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$
设计煤种	22.30	7.96	0.47	10.93	14.42	23 600
实际煤种	17.68	14.20	1.92	23.71	30.42	21 530

2 锅炉存在的问题及改造方案

2.1 锅炉存在的问题

1)过量空气系数偏高。锅炉炉膛出口的过量空气系数为1.19,有助于煤粉的燃尽,但是富氧环境不利于抑制 NO_x 的生成,而且实际燃用的煤收到基灰分为17.68%,干燥无灰基挥发分为30.42%,属于较易着火的煤种,因此可以适当降低过量空气系数。

2)配风方式不合理。炉膛主燃器区域配风占所有风量的89%,而OFA燃尽风率只有11%,空气分级的效果不明显,主燃器区域 NO_x 的生成无法得到有效的抑制。其次,在OFA燃尽风率只占11%的条件下,燃尽风口多达16个,造成燃尽风气流流量和刚性不足,限制了空气分级燃烧技术对 NO_x 生成的抑制作用^[1]。

3)燃烧器结构设计不合理。通过对燃烧器结构的分析以及数值模拟计算,LNASB型旋流燃烧器存在以下问题:①二、三次风出口没有设置导流装置,二、三次风过早混入一次风,对煤的着火、稳燃不利,对降低煤粉燃烧初期 NO_x 的生成也不利;②浓

淡分离装置效果不好,由于煤粉收集器的原因,导致煤粉气流沿周向分布不均匀,且一次风的旋流调节机构煤粉收集器调节不能满足不同煤种变化^[2];③二、三次风结构不合理,燃烧器内空气分级效果不理想;④OFA燃尽风喷口布置位置不合理,对于炉内深度空气分级燃烧,必须保证下炉膛生成的 NO_x 有足够的时间进行还原反应,300~600 MW对冲燃烧锅炉,燃尽风与上层燃烧器中心距离在5~7 m,对于本锅炉,4.6 m距离偏小^[3]。此外,OFA喷口多达16个,燃尽风的动量和冲量不足,无法形成有效的“火上风”使煤粉燃尽。

4)进入SCR系统 NO_x 浓度高。未投运SCR系统时其 NO_x 的排放质量浓度为 686 mg/m^3 。不同负荷下 NO_2 排放质量浓度在 $400 \sim 760 \text{ mg/m}^3$,燃尽风机在启、停状态 NO_x 相差不到 100 mg/m^3 ,燃尽风机和分离燃尽风的作用并没有体现出来^[4]。

2.2 改造方案的提出

综合目前国内成熟的改造业绩和电厂的实际情况,低氮燃烧器改造思路为:①将主燃烧器区域的过量空气系数降低至0.85~0.90;②增加一层燃尽风,两层燃尽风分别由二次风箱和燃尽风机提供风源。综合以上思路,针对燃烧器区域过量空气系数变化,燃尽风喷口、位置、风速变化,提出了3种改造方案。

1)方案1:保持原来燃烧器数量、位置不变情况下,减小各次风的通流面积(风速不变),使主燃烧器区域过量空气系数为0.9。取消原来的SOFA风,

重新布置两层SOFA燃尽风。

第1层标高36.083 m,第2层标高40.683 m。第1层开8个喷口,左右侧墙各3个喷口,前后墙只投入中间各一个喷口,风量为主燃区过量空气系数减小上移的风量。第2层16个喷口将原来的燃尽风喷口上移,依然由原燃尽风机带动,风量等均不发生变化。

2)方案2:保持原来燃烧器数量、位置不变情况下,减小各次风的通流面积(风速不变),使主燃烧器区域过量空气系数为0.9。

原来位于34.724 m标高位置的SOFA风只保留前后墙的10只SOFA风(取消侧墙的6只SOFA风),并在标高39.350 m处前后墙布置一层SOFA燃尽风(10个喷口)。

位于34.724 m标高位置的10只SOFA风风源来自主燃烧器区域的二次风,位于39.350 m标高位置的10只SOFA风风源来自原燃尽风机。

3)方案3:保持原来燃烧器数量、位置不变情况下,减小各次风的通流面积(风速不变),使主燃烧器区域过量空气系数为0.85,SOFA位置设置如下:①在标高34.724 m位置(锅炉改造前原来的SOFA位置(图2(a)),保留6只SOFA(图2(b)中五角星的字母位置)。该6只SOFA风源从主燃烧器区域取风,也就是将主燃烧器区域的部分二次风引入此SOFA中。②在标高39.350 m位置设置12只SOFA(图2(c)五角星所在位置)。该12只SOFA风源从原来的燃尽风机取风。

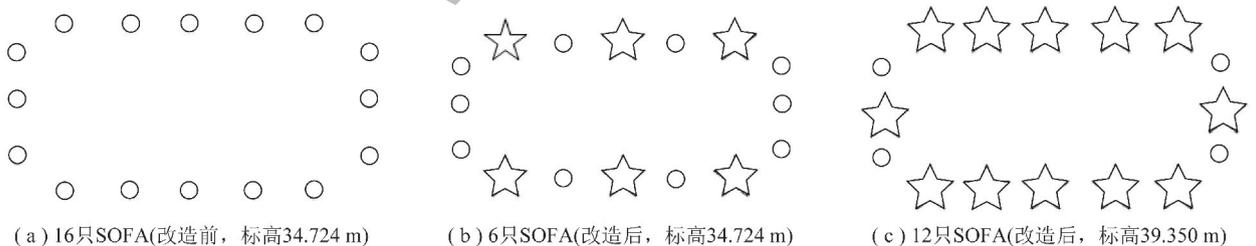


图2 方案3改造前后SOFA布置

Fig. 2 SOFA layout before and after the transformation of scheme 3

2.3 改造方案数值模拟与分析

运用通用流体软件Fluent对锅炉改造前、改造方案1、2、3进行数值模拟。

图3是改造前、改造方案1~3的温度分布,通过比较发现改造前后炉膛出口温度变化不大;但主燃烧区略有不同,图3(d)中由于主燃烧区域变为富燃料区域,瞬间放热量大,温度最高;图3(b)、(c)

主燃器区域过量空气系数相同,故燃烧温度相当;至于OFA燃尽区域,则温度按改造前至改造方案1~3依次降低,原因是大量燃尽风吹入此区域后降低了此区域的温度^[5]。

图4是改造前、改造方案1~3的氧含量分布,主燃烧区域氧气浓度按照图4(a)~(d)的顺序依次降低,这是因为在改造前主燃烧器区域的过量

空气系数为 1.1,而改造方案 1、2 的过量空气系数为 0.9,改造方案 3 的过量空气系数为 0.85;在这 4 种情况中,改造前炉膛出口氧含量最低,这是由

于改造前燃烧器区域燃烧空气充足,煤粉充分燃烧,燃烧效率较好^[6],改造方案 1~3 的炉膛出口氧含量相差不大。

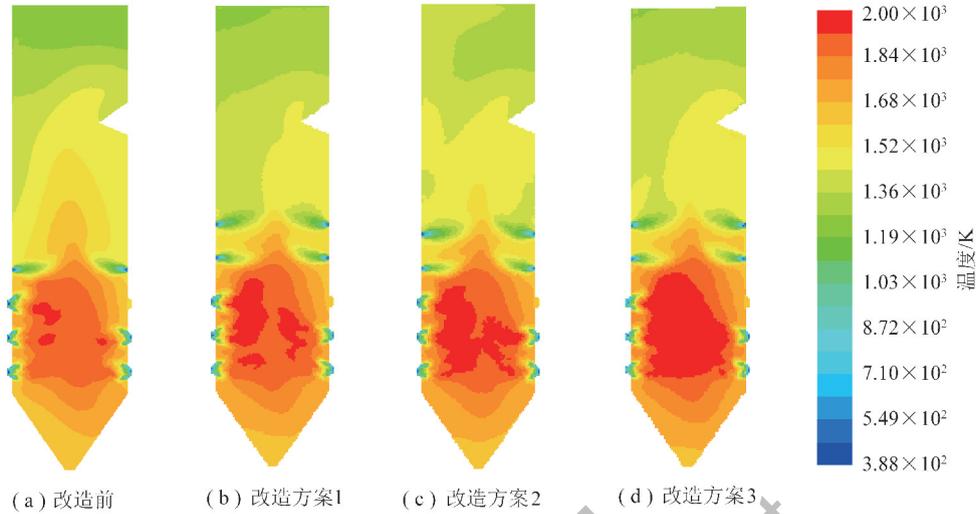


图 3 改造前改造方案 1~3 温度分布

Fig. 3 Temperature distribution before transformation of scheme 1 to 3

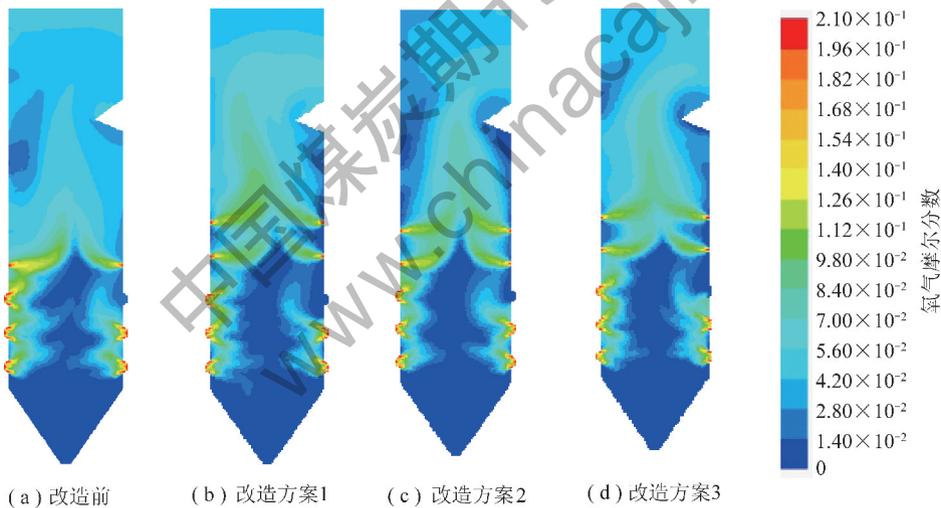


图 4 改造前改造方案 1~3 氧含量分布

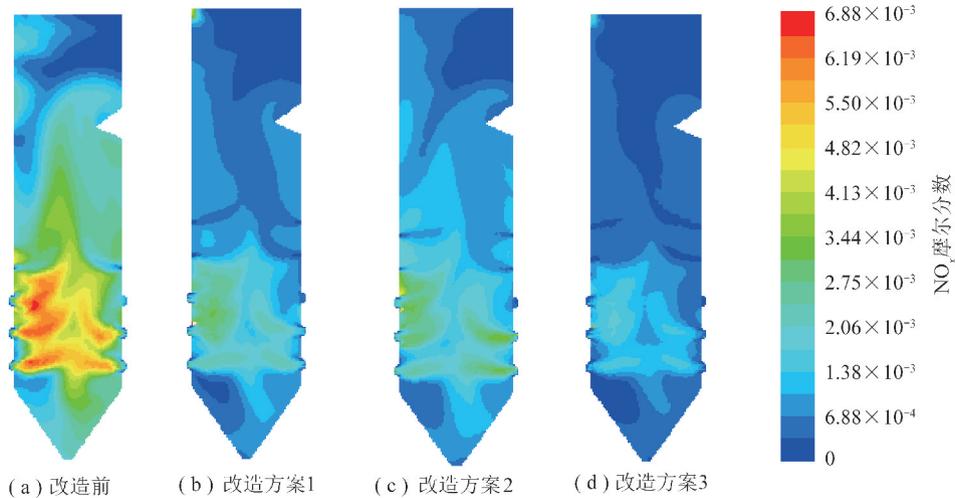
Fig. 4 Oxygen distribution before transformation of scheme 1 to 3

图 5 为改造前、改造方案 1~3 NO_x 的浓度分布,4 种情况中,主燃烧器区域 NO_x 的浓度按图 5 (a)~(d) 的顺序依次降低;而改造方案 3 的炉膛出口的 NO_x 浓度最低,接着依次是改造方案 1、2,改造前炉膛出口 NO_x 摩尔分数最高。

其原因可以从 2 方面来加以分析:① 主燃区还原性气氛影响燃料型 NO_x 的生成^[7]。方案 3 中主燃烧区过量空气系数为 0.85,实现的是缺氧燃烧,大部分氮被氧化为 NO ,通过空气分级、燃料分级,燃烧中已经生成的 NO ,在遇到 CH_4 和未完全燃烧

产物 CO 、 H_2 、 C 时,会发生 NO 的还原反应,减少了 NO_x 的生成^[8]。② 炉膛出口温度影响热力型 NO_x 的生成。大量燃尽风吹入 OFA 燃尽区域后降低了此区域的温度,而热力型 NO_x 生成机理可用 Zeldovich 反应式来表示^[9],在反应式中反应速率随温度的升高按指数规律增加^[10],因此方案 3 中炉膛出口温度降低抑制了热力型 NO_x 的生成速率。

将 Fluent 计算的结果换算为质量浓度单位,改造前后进入 SCR 系统的 NO_x 质量浓度为 686 mg/m^3 ,改造方案 1、2、3 的 NO_x 质量浓度分别为

图5 改造前和改造方案1~3 NO_x的摩尔分数分布Fig. 5 NO_x concentration distribution before transformation and scheme 1 to 3

4 466、506、355 mg/m³, 可知在4种情况下, 改造方案3降低NO_x的效果最为明显, NO_x的排放质量浓度降为355 mg/m³, 相对改造前降低48.1%。因此建议采用方案3并采用改进的低NO_x燃烧器加上合理的配风最大程度地降低炉膛出口NO_x的排放浓度。

3 改造建议

1) 由于该电厂2号锅炉, 在燃用设计煤种和实际煤种正常负荷下, 锅炉省煤器出口的烟气NO_x排放浓度较高, 根据国家环境保护部《火电厂氮氧化物防治技术政策》: “低氮燃烧技术作为燃煤电厂氮氧化物减排的首选技术, 当采用低氮燃烧技术后, 氮氧化物排放浓度不达标或不满足总量要求时, 再建设烟气脱硝设施”。因此, 建议在该锅炉实施低氮改造。

通过对3种改造方案的数值模拟计算与分析以及对国内外低氮改造的调研, 3种方案都能显著降低NO_x的排放量, 其中改造方案1炉膛出口NO_x排放质量浓度为446 mg/m³, 比原始工况降低34.98%; 改造方案2炉膛出口NO_x排放质量浓度为506 mg/m³, 比原始工况降低26.2%; 改造方案3炉膛出口NO_x排放质量浓度为355 mg/m³, 比原始工况降低48.1%。从降氮效果来看, 方案3最优。

综合比较3种改造方案, 建议电厂采用方案3, 即: 保持原来燃烧器数量、位置不变情况下, 减小各次风的通流面积(风速不变), 使主燃烧器区域过量空气系数为0.85。采用先进的低氮燃烧器, 并在原

来位于34.724 m标高位置的SOFA风只保留两侧墙的共6只SOFA风, 并在标高39.350 m处布置一层SOFA燃尽风(12个喷口)。位于34.724 m标高位置的6只SOFA风风源来自主燃烧器区域的二次风, 位于39.350 m标高位置的12只SOFA风风源来自原燃尽风机。

2) 采用具有煤粉浓度分离、一次风粉可调的燃烧器, 推迟燃烧器出口二、三次风与一次风煤粉的混合实现燃烧器内空气分级^[11], 同时由保证在煤着火后二、三次风及时混入参与燃烧, 为了适应煤种波动造成的燃烧不稳, 燃烧器可设置稳焰齿^[12]。

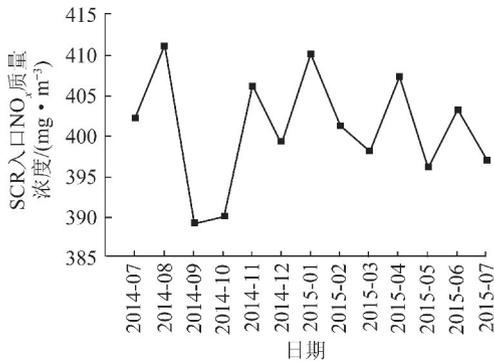
3) 针对燃烧不稳现象, 可以选用具有稳焰装置结合一次风、粉可调的燃烧器^[13]。

4) 在燃烧器改造方案设计过程中对锅炉进行整体的热力计算, 确保改造后不会出现燃烧系统与热力系统不匹配的问题。

4 改造效果

该锅炉最后采用方案3进行低氮燃烧器改造, 并于2013年12月完成改造, 经过1 a多运行, 其月平均SCR入口NO_x浓度有了显著下降, 2014-07—2015-07的月平均浓度如图6所示。

从图6可以看出, SCR入口NO_x质量浓度在400 mg/m³附近波动, 其13个月平均浓度为400.7 mg/m³, 同数值模拟的结果355 mg/m³, 相差12.8%, 处于较小的范围内, 说明数值模拟对其方案研究具有一定的参考意义, 与改造前686 mg/m³相比降低41.5%, 与数值模拟研究大致吻合。

图6 改造后 SCR 入口 NO_x 月平均质量浓度Fig. 6 Average monthly NO_x concentration of SCR inlet after transformation

5 结 论

1)通过对3种改造方案进行数值模拟研究,选出了最优的改造方案,即:保持原来燃烧器数量、位置不变情况下,减小各次风的通流面积(风速不变),使主燃烧器区域过量空气系数为0.85,更换为先进的低氮燃烧器^[14],在原来的位于34.724 m标高位置的16只SOFA风口中只保留两侧墙的6只,并在标高39.350 m处布置一层SOFA燃尽风(12个喷口)。

2)电厂最后选取方案3实施改造,改造后效果较为显著,与改造前686 mg/m³相比降低41.5%,达到了改造的预期目标。

3)选取合适的低氮燃烧器配合合理布置SOFA位置及风量分配,可以显著降低进入SCR的NO_x质量浓度^[15]。在改造前可以通过对备选方案进行数值模拟计算较,用较为经济的方式实现具有参考价值的方案比较。需要根据炉膛的实际情况提出改造方案,力争实现“一炉一策”。

参考文献 (References):

[1] 张玉斌,李争起,任枫.不同配风方式对W型火焰锅炉炉内流动的影响[J].发电设备,2008(8):461-463.
Zhang Yubin, Li Zhengqi, Ren Feng. Design and optimization of W-shape flame boiler combustion systems[J]. Power Equipment,

2008(8):461-463.
[2] 苗长信.600 MW“W”火焰锅炉降低NO_x的调试分析[J].山东电力技术,2004(2):6-9.
Miao Changxin. The commissioning analysis on NO_x reduction in 600 MW W-flame boiler[J]. Shandong Electric Power, 2004(2): 6-9.
[3] 张琦.W型火焰锅炉燃烧系统的设计与优化[J].发电设备,2010(3):180-184.
Zhang Qi. Design and optimization of W-shape flame boiler combustion systems[J]. Power Equipment, 2010(3):180-184.
[4] 陈荣根.W火焰锅炉燃烧系统特点概述[J].锅炉技术,2008,39(2):52-57.
Chen Ronggen. Firing system configuration of double arch boiler [J]. Boiler Technology, 2008, 39(2):52-57.
[5] 王福军.计算流体力学分析[M].北京:清华大学出版社,2004:124-128.
[6] 容鑫恩,袁镇福,刘志敏,等.电站锅炉原理[M].北京:中国电力出版社,1997:52-55.
[7] 王笃奎,曾汉才,柳朝晖.鄂州电厂W型火焰锅炉的燃烧流场与运行研究[J].湖北电力,1999,23(2):11-13.
Wang Dukui, Zeng Hancan, Liu Chaohui. Combustion flow field and operation performance of W type flame boiler of Ezhou power plant [J]. Hubei Electric Power, 1999, 23(2):11-13.
[8] 清华大学热能工程系热能工程教研室.锅炉原理及计算[M].北京:科学出版社,1979:66-168.
[9] John S E, Antonio G, Robert N S. Advanced FW arch firing: NO_x reduction in central power station[C]. Pittsburgh: Pittsburgh Coal Conference, 2002:34-39.
[10] Fan J R, Zha X D, Cen K F. Study on coal combustion characteristics in a W-shaped boiler furnace [J]. Fuel, 2000, 80(3): 373-381.
[11] Lockwood F C, Mahmud T, Yehia M A. Simulation of pulverised coal test furnace performance [J]. Fuel, 1998, 77(12): 1329-1337.
[12] Smoot L D, Smith P J. Coal Combustion and Gasification [M]. New York: Plenum Press, 1986:25-84.
[13] Jones W P, Laundar B E. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1972, 15(2):301-314.
[14] Launder B E, Spalding D E. Mathematical models of turbulence [M]. New York: Academic Press, 1972:56-58.
[15] Xue H, Ho J C, Cheng Y M. Comparison of different combustion models in enclosure fire simulation [J]. Fire Safety Journal, 2001, 36(11):37-54.