

双区燃烧技术应用于降低NO_x的数值模拟研究

Numerical simulation of a 200MW tangentially fired boiler with double-zone combustion technique for NO_x reducing

邢菲¹ 樊未军¹ 崔金雷² 邓元凯²

(1. 国电科技环保集团有限公司 北京市 海淀区 100083

2. 北京国电科环洁净燃烧工程技术有限公司 北京市 海淀区 100039)

Tel : 010-82317422

E-mail : effie@sjp.buaa.edu.cn

摘要：双区燃烧是降低NO_x排放，防止炉内结渣的一项新技术。利用STAR-CD软件平台，对某电厂200MW四角切圆锅炉改造前后炉内燃烧过程进行研究。计算结果表明：采用双区燃烧技术使炉膛中形成了温度、组分和颗粒相参数显著不同的中心区和近壁区。由于附壁射流的作用，使得高温区集中在炉膛中部，有效的防止了锅炉结渣；改造后炉内有比常规燃烧方式锅炉更大的还原气氛区域，抑制了NO_x的产生，使其排放降低31.2%。

关键词：双区燃烧，附壁射流，改造，数值模拟，STAR-CD

ABSTRACT: Double-zone Combustion is a new technique to reduce NO_x and slagging. Numerical simulation of combustion process in a 200 MW coal-fired boiler is performed on STAR-CD software platform. Results show that after the reconstruction, there are two zones formed in the boiler, central zone and near wall zone, whose distribution of temperature, component and particles are very different. Because of combined-jet flow, the high temperature zone is concentrate on the center of the boiler, and the slagging problem can be ameliorated. The new combustor is applied and the boiler can reach a much lower NO_x emission.

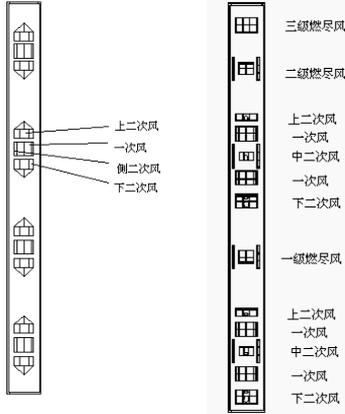
KEY WORDS: Double-zone Combustion ; Combined-jet flow ; Reconstruction ; Numerical simulation; STAR-CD

1. 引言

近年来，随着各国政府对环保工作的日益重视，全世界范围内都兴起了治理污染、保护环境运动。煤粉燃烧在污染排放中占重要地位，也是历来治理污染的重点和难点。控制燃煤造成的污染，其出路无非在于大力发展以煤炭高效洁净利用为宗旨的洁净煤技术。煤在燃烧过程中产生大量的污染物以及粉尘等，特别是氮氧化物，造成严重的环境污染。研究煤燃烧过程中NO_x的形成及其控制方法，并积极开展试验研究，对促进国民经济发展和改善生态环境具有重要的现实意义。

目前降低NO_x技术主要有，低NO_x技术，空气分级技术，燃料再燃技术，及烟气净化技术等。双区燃烧作为降低NO_x排放的新技术被认为是具有发展潜力的。双区燃烧技术在我国电厂改造中还没有大面积实施。本文针对国内某电厂200WM四角切圆锅炉结渣严重，NO_x排放量较高等问题提出双区燃烧改造方案，并利用CFD软件对改造前后燃烧状况进行数值模拟研究，为实施双区燃烧技术提供依据。

2. 锅炉设备简介及煤质分析



改造前 改造后
图 2.1 改造前后燃烧器示意图

本次数值模拟的对象为单炉膛、[]型布置、炉膛四角切向布置的燃烧器、自然循环固态排渣煤粉锅炉。炉膛为单炉膛结构，炉宽 11920mm，炉深 10880mm。

改造前燃烧器为均等配风方式；在一次风的两侧布置二次风。# 1、# 3 角燃烧器在炉膛中心形成一个 $\phi 736\text{mm}$ 的假想切圆，# 2、# 4 角燃烧器为对冲布置。

改造后的燃烧器为双区燃烧器。每组燃烧器从上至下分为高位燃尽风、三级燃尽风、二级燃尽风、上组燃烧器、一级燃尽风和下组燃烧器。附壁射流分 4 层布置在二级燃尽风、一级燃尽风、上组中二次风、下组中二次风同一标高处。另外除了三级燃尽风是对冲布置外，其余燃烧器采用四角切圆布置方式，#1、3 角反向切圆，切圆直径为 $\phi 736$ ；#2、4 角正向切圆，切圆直径为 $\phi 500$ 。

表 1 煤粉工业分析结果

工业分析					元素分析				
Vdaf%	Aar%	Mad%	Mt.ar%	Qnet.ar kJ/kg	Car%	Har %	Oar %	Nar %	Sar %
34.52	15.18	4.10	7.40	25080	65.20	4.21	6.43	0.88	0.70

表 2 煤粉粒径分布(μm)

20	40	60	80	100	120	120 以上
22.8%	40.5%	55.5%	66.4%	75.8%	81.5%	18.5%

3. 数学模型及边界条件

本文应用数值计算软件STAR-CD对炉内燃烧进行模拟，数值模拟采用三维稳态计算，SIMPLE算法。对燃烧的数值模拟涉及到气-固两相流动和化学反应，湍流模型选 $k-\epsilon$ 高雷诺数模型；用拉格朗日方法描述煤粉颗粒的运动轨迹；炉内三维气相流动、热平衡与燃烧的控制方程可写成如下统一形式：

$$\frac{\partial(\rho u \Phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \Phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \Phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right] + S_{\Phi} + S_{p\Phi}$$

式中 Φ 分别代表速度 u, v, w 、湍流动能 k 、湍流耗散率 ϵ 、时均混合分数 f 、混合分数脉动均方值 g 、焓值 h 和组分的质量分数 Y ， Γ_{Φ} 为扩散系数，当 $\Phi=1.0$ 时为连续方程， S_{Φ} 是由气体相引起的源项， $S_{p\Phi}$ 是由固体颗粒引起的源项。

在挥发份析出上采用的是双反应竞争模型，该模型假设挥发份析出速率与颗粒中保持的挥发份含量呈下式关系：

$$\frac{dm_p}{dt} = k \left[m_p - (1 - f_{v0}) m_{p0} \right] \text{ 其中 } k = A_1 e^{-(E/RT)}$$

式中： m_p —煤粉颗粒质量kg
 f_{v0} —煤粉颗粒初始挥发份质量分数
 m_{p0} —颗粒初始质量kg
 k —反应速率常数
 A_1 —指前因子
 E —活化能J/(kg*mol)

挥发份燃烧选mix-is-burnt模型，焦炭的燃烧选1st order effect模型。采用控制容积积分法将控制方程离散，其中扩散项采用中心差分，非线性的对流项采用二阶迎风差分。网格采用六面体/三棱柱混合网格,对燃烧器附近网格进行了加密,网格数量在45万左右,收敛标准 $\epsilon < 1.0 \times 10^{-5}$ 。

表3 数值计算的边界条件

改造前	一次风风率 (%)	一次风风温 ()	一次风风速 (m/s)	二次风风率 (%)	二次风风温 ()	二次风风速 (m/s)
	27.8	60	30.8	67.9	285	49.2 (侧二次风速为54.5)
改造后	一次风风率 (%)	一次风风温 ()	一次风风速 (m/s)	二次风风率 (%)	二次风风温 ()	二次风风速 (m/s)
	28	75	31	69	275	45 (侧二次风速为50)

4. 计算结果分析

4.1 双区燃烧技术原理简介

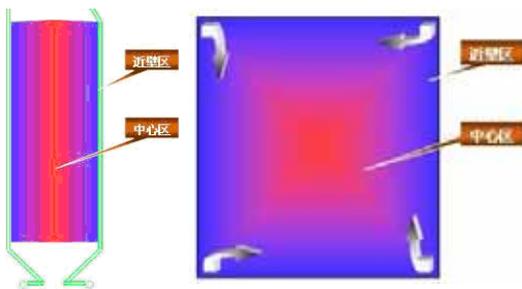


图 4.1 双区燃烧技术示意图

双区燃烧主要原理是在全炉膛通过多种射流组合形成利于防渣，低 NO_x 排放的“中心区”与“近壁区”三场（温度场，气相成份与气固浓度场，流场）特性和双还原氧化区，如图 4.1 所示。

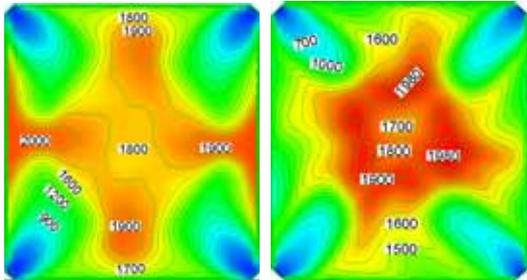
在炉膛内形成的中心区（红色区域）有较高煤粉浓度，较高温度，适宜氧浓度，较高的燃烧强度；近壁区（蓝色区域）为较低温度，较低 CO 浓度，较高的氧气浓度和有利于阻止灰粒附壁，延长冷却路径的流场结构。

4.2 温度场分析

在实际的燃烧过程中，炉内三场特性参数随机性很强，各向不均匀性在高度和水平方向上，尤其是中心区和近壁区存在很大的差异。双区燃烧是通过组织空气与燃料射流组合设法扩大两大区三场特性的差异。

图4.2为模拟计算得到改造前后同一次风炉膛截面温度分布（单位为K）。改造前水冷壁附近烟气温度的最大值处，即结渣的可能区域位于旋转火焰的下游，最高温度达到2000K。改

造后加入附壁射流，整个高温区域相对集中在双区燃烧中的“中心区”。可能结渣区域的温度也由改造前1900K降低到1400K。由于改造后有部分二次风作为燃尽风从炉膛上部送入，燃烧器区域的高温区面积很大，火焰充满度好，因此改后的燃烧是稳定的。



改造前 改造后
图 4.2 某一次风水平截面温度分布

实际上“中心区”火焰对水冷壁有效辐射热量首先进入近壁区，再经水冷壁灰层金属管壁的导热被工质吸收。实施“双区燃烧技术”之前的水冷壁近壁区即为火焰边部区。其“三场”特性完全取决于火焰边部区“三场”特性，这样就存在很大的随机性。双区燃烧的特点是通过各类射流的控制，进而控制水冷壁附近的“三场”特性。

实际上这样的近壁区对火焰辐射热的“散射屏蔽”作用很强。其中固相颗粒浓度颗粒粒径影响很大，流场形式，温度场也是影响因素。

图4.3是数值模拟得到改造后炉膛内部的温度分布（单位为K），所取的截面为平行于前后墙的中间截面以及平行于侧墙的中间截面。改造后采取多点多次送风后，炉膛断面温度分布趋于均匀，主燃烧区域沿高度方向温度偏差也很小，炉膛最高温度为1800K~1900K，这对于最大限度的实现分区优化燃烧过程、防止炉膛结焦、降低NO_x排放十分有利。计算得到的结果与双区燃烧技术原理的示意图（图4.1）相符，很好的验证了双区燃烧理论的可行性。

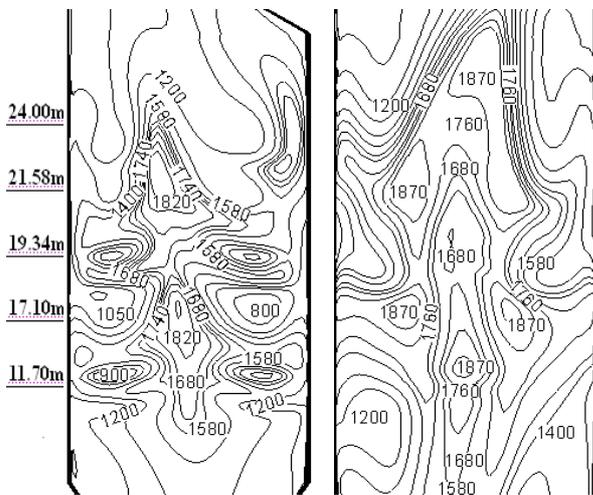


图 4.3 数值模拟炉膛内部温度分布分布

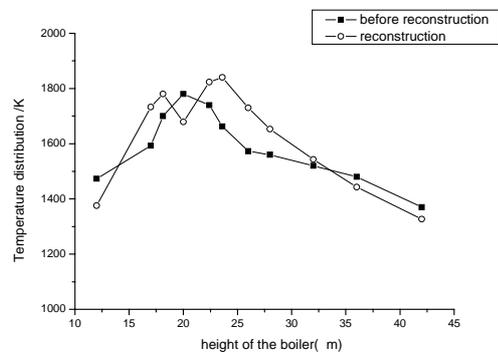


图 4.4 沿炉膛高度各截面平均温度分布

图4.4是改造前后平均温度沿炉膛高度分布图。沿着炉膛高度方向，各个截面的平均温度。从图可以看出：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20m左右，最高温度达到 1782K，然后又逐渐下降。改造后，随炉膛高度增加，炉膛温度也增加，但在一级燃尽风喷口附近，温度水平下降到1679K，出现温度下降的主要原因是双区燃烧器中，一级燃尽风的喷入使得大量的低温度水平气体喷射进入炉膛，该区域过剩空气系数突然增大。改造前后对比达到最高温度后的温度变化可以看出改造前温差较小。这是由于改造采用双区燃

烧技术，煤粉颗粒燃烧效率提高，整个炉膛内的颗粒相减少，进而增强了辐射换热强度，相对增大了高温气体与水冷壁及过热器的换热。出口处改造后温度相对较低也是由于这个原因。

4.3 组分场分析

图4.6表示的是改造前后炉膛内O₂的浓度分布（质量百分比）。改造前燃烧器由于是均等配风方式，在22m处到达最大值后氧量逐步的降低。最低的氧量并不是与最高温度相对应，而是出于最高温度上方。采用双区燃烧技术后，在下组燃烧区域的O₂分布比改造前较小。这是因为一部分氧气随燃尽风在更高位置投入到炉膛中，该区域氧量不足。在22m处，氧量有明显的下降，这是下组燃烧器煤粉喷入后进行燃烧的结果。在上组燃烧器的一次风和二次风喷入后，氧量逐步增大。在26m和28m的燃尽风处，氧量有显著的增加，反映出各级燃尽风喷入后的氧气分布特点。对比燃烧器上部氧气的消耗，可以发现改造后氧气消耗更加剧烈，这样可以形成相对低氧的区域，有利于对NO_x的抑制。

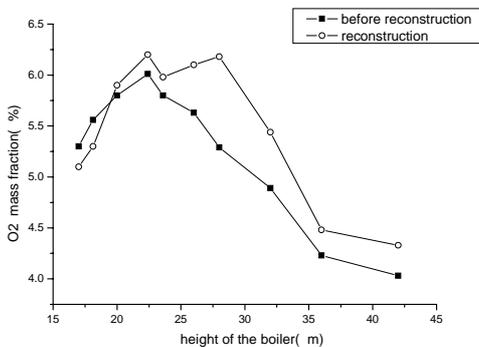


图4.5 沿炉膛高度各截面平均O₂质量分数

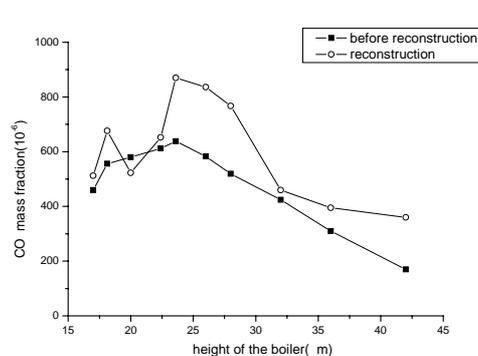


图4.6 沿炉膛高度各截面平均CO质量分数

图4.6表示的是改造前后炉膛内CO的浓度分布（质量百分比）。改造前CO分布曲线较为平缓，从氧量充足的区域，CO开始下降。改造后的双区燃烧器在下组燃烧器投入的氧量较小导致CO量在到达二级燃尽风前有最高值。同时，中心区域含氧量低，形成的CO不能完全被氧化为CO₂，这样也造成了该低氧区域CO含量较高。在26m-28m处，随着燃尽风的吹入使得CO的量逐步减小。

图4.7是改造前后NO_x质量分数沿炉膛高度分布曲线。改造前煤粉喷燃器与二次风喷嘴分层布置的，一次风和二次风是分批加入射流火焰。由于燃烧本身的不稳定性和不均匀性，在高温燃烧区局部会产生NO_x的富集地带，如图4.7改造前22m区域中NO_x值达到最大。随着氧量的降低，炉内还原气氛增强，NO_x的量在整个炉膛内的疏运过程中逐渐降低。

图4.8 双区燃烧技术炉膛内典型区域分布

采用双区燃烧技术后在沿炉膛高度方向上，两组燃烧器为中心区组织了双还原氧化区域（见图4.8），总体上会增加NO_x的还原量。在两个还原燃烧区，燃料中的氮将被分解生成大量的HN，HCN和CN等，它们相互复合生成N₂或将已生成的NO_x还原分解，这样能够有效减少热力型NO_x的生成。同时，在两个还原区上方的氧化主燃烧区，煤粉较快的析出挥发份并开始着火，迅速进入浓相区实现了部分NO_x的分解还原，加大了火焰内还原NO_x的比例。在两个燃尽区，气体

温度较低也抑制了热力氮的生成。

双区燃烧通过改变送风配风方式控制炉内空气分布，实现有计划的分区燃烧。图4.7中，在20m和25m的两组燃烧器截面出现了NO_x的峰值，最大质量分数达到 65×10^{-5} 。而在22m和25m后的区域，NO_x有明显的下降，这就是生成的NO_x进入了还原区和燃尽区，一部分被还原生成其它产物。对比改造前后NO_x从峰值衰减的程度，可以看出采取双区燃烧后的变化更加剧烈。虽然改造后NO_x最大值比改造前略大，但是到了出口处已经变为了 22×10^{-5} ，比改造前的 32×10^{-5} 降低了31.2%。

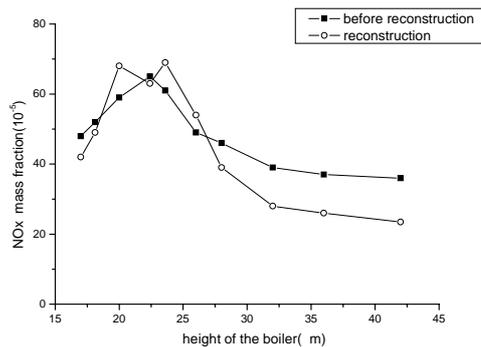


图 4.7 沿炉膛高度各截面平均 NO_x 质量分数

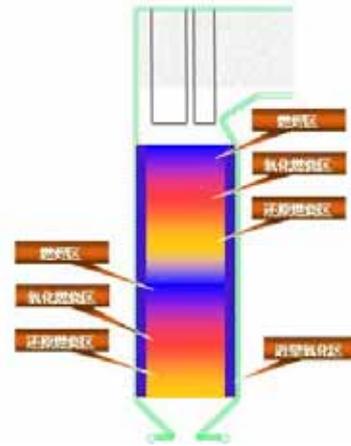
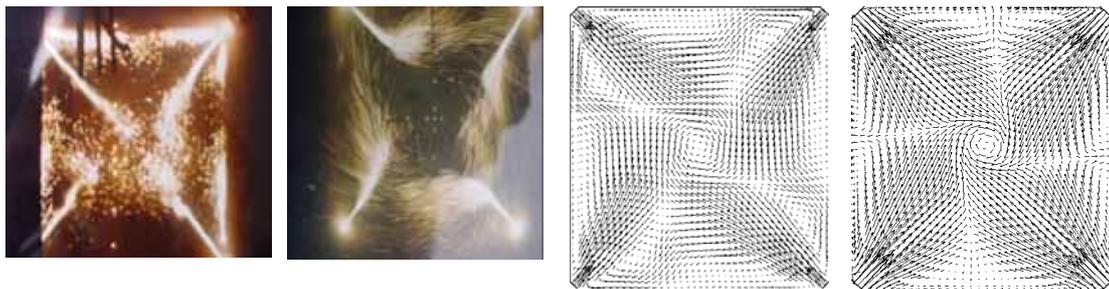


图 4.8 双区燃烧技术炉膛内典型区域分布

4.4 流场及颗粒场分析

炉内的气固混合流动状态是决定燃烧优劣的决定性因素。图4.1为改造前后某层一次风水平截面速度分布图。从图中可以看出，炉内气流形成强烈旋转，炉膛中心区域存在明显的低速区，数值计算结果与试验动力场示踪结果是一致的。改造后的流场由于附壁射流的影响，整个截面的气流充满度更好。尤其是靠近壁面处，附壁射流使流动增强，可以形成三场参数明显的近壁区，降低了颗粒相掺混高温火焰对壁面的冲刷，有效的防止了锅炉结渣。



a.改造前空气动力场示踪 b.改造后空气动力场示踪 c.改造前数值计算结果 d.改造后数值计算结果
图4.9某一次风水平截面速度分布

图4.10是计算得到改造前后近壁区煤粉颗粒分布。取靠近壁面0.5m, 1.0m, 1.5m和2.0m处，收集煤粉颗粒。通过对比，改造后的壁面0.5m到2.0m这个区域中，煤粉颗粒质量显著降低，从侧面反映的就是近壁区域比改造前变得更加“透明”。颗粒相的降低对于增大高温气体与水冷

壁的辐射换热非常有利，炉膛内辐射换热的增加也会使得过热器出口烟气温度的降低。同时，颗粒相的减少对于炉内防止结渣

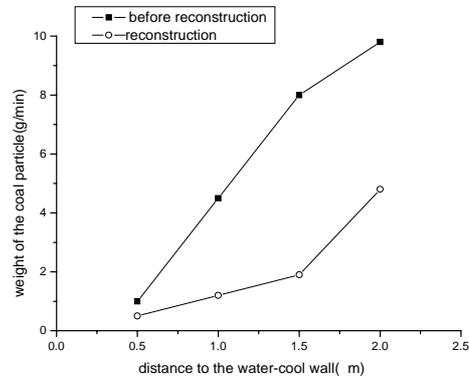


图4.10 改造前后近壁区煤粉颗粒质量分

5. 结论

本文采用数值模拟方法，对某200MW四角切圆锅炉改造前和两种改造后方案的炉内热态工况进行了计算。通过对改造前后炉内“三场”参数的对比表明：

1) 改造后采用双区燃烧技术，附壁射流把高温燃气和火焰包围，降低了高温烟气对水冷壁的冲刷，使得结渣情况得到了改善；

2) 双区燃烧加强了炉内燃烧区的还原性气氛，有利于降低NO_x最终排放浓度和减小水冷壁上可能发生结渣的范围；平均NO_x排放降低了31.2%，有效的降低了锅炉排气污染；

3) 实施双区燃烧技术炉内实现扩大还原区域，深度分级送风，低氧化气氛奠定了基础；

4) 软件自身对辐射模型的修正使其不能正确反映改造后近壁区“三场”参数变化对辐射换热的影响，辐射换热模型有待于进一步深入研究。

参考文献

[1] 邓元凯 徐凤刚 张永和等，GD—LDR宽调节比高效低 NO_x 双区燃烧系统的原理与应用 全国氮氧化物污染控制研讨会论文集 2003.12

[2] 潘 维，池作和，斯东波，等. 200MW 四角切圆燃烧锅炉改造工况数值模拟[J]. 中国电机工程学报,2005,25(8) : 470-10.

PAN Wei , CHI Zuo-he , SI Dong-bo , *et al.* NUMERICAL SIMULATION OF COMBUSTION PROCESS IN A 200MW TANGENTIALLY FIRED FURNACE TO STUDY FURNACE RECONSTRUCTION[J]. Proceedings of the CSEE, 2005,25(8) : 470-10.

[3] 张 波 ,文 军,徐党旗,等. 某电站亚临界直流炉改造前、后炉内燃烧的数值模拟及分析 [J]. 热能动力工程,2005,20(2) : 1001-2060

ZHANGBo , WENJun , XU Dang qi *et al.* Numerical Simulation and Analysis of the Infurnace Combustion of a Subcritical Once-through Boiler of a Power Station Prior to and After its Retrofitting[J]. JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL ENERGYAND POWER, 2005,20(2) : 1001-2060

[4] 刘泰生，周武，叶恩清. 燃尽风对炉内流动和燃烧过程影响的数值模拟[J]. 动力工程, 2006,26(1) : 1000-6761

LIU Tai-sheng , ZHOU Wu , YE En-qing. Numerical Simulation of the Effect of Over-Fire Air on Flow and Combustion in Furnaces[J]. Journal of Power Engineering , 2006,26(1) : 1000-6761