

# 乏气风布置对“W”型火焰锅炉低氮燃烧特性的影响

兰艳旭<sup>1</sup>,王 晖<sup>1</sup>,邱福岗<sup>1</sup>,孙路石<sup>2</sup>,王 贲<sup>2</sup>,于 洁<sup>2</sup>,王 科<sup>2</sup>,徐林林<sup>3</sup>

(1. 广东省粤电集团有限公司 沙角 A 电厂,广东 虎门 523936;2. 华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室,湖北 武汉 430074;  
3. 武汉华喻燃能工程技术有限公司,湖北 武汉 430074)

**摘要:**为了满足日益严苛的低氮排放标准,对“W”型火焰锅炉低氮燃烧特性的进行了深入研究。以一台燃用贫煤的“W”型火焰锅炉为研究对象,对其乏气风布置方式对燃烧及 NO<sub>x</sub> 排放影响规律进行了数值模拟研究。采用 CFD 数值计算方法对炉膛原始工况进行了计算,并将结果与实际运行参数进行对比,验证了模型的准确性。通过分析不同的乏气风布置方式对低氮燃烧的影响,确定了最佳的乏气风布置方式。数值模拟结果表明,乏气风的布置对于炉内的燃烧及 NO<sub>x</sub> 生成有重大影响。方式 1 和方式 2 的 NO<sub>x</sub> 生成量均超过 800 mg/Nm<sup>3</sup>,方式 3 飞灰含碳量高达 6.85%,方式 4 高温区靠近水冷壁易引起结焦结渣,以上 4 种布置方式各有缺陷。而布置方式 5 的 NO<sub>x</sub> 生成量为 762 mg/Nm<sup>3</sup>,飞灰含碳量为 4.51%,温度分布合理是最佳的布置方式。

**关键词:**乏气风布置;W 锅炉;低氮;燃烧

中图分类号:TK221 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2017)06-0076-07

## Influence of tertiary air arrangement on low-NO<sub>x</sub> combustion characteristics for a "W" type flame boiler

LAN Yanxu<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>1</sup>, QIU Fugang<sup>1</sup>, SUN Lushi<sup>2</sup>, WANG Ben<sup>2</sup>, YU Jie<sup>2</sup>, WANG Ke<sup>2</sup>, XU Linlin<sup>3</sup>

(1. Shajiao A Power Station of Guangdong Yudean Group Co., Ltd., Humen 523936, China; 2. State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China; 3. Wuhan Huayu Combustion and Energy Engineering Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to meet the increasingly stringent of low nitrogen emission standards, research on low nitrogen combustion characteristic of the down-fired "W" type boiler is an urgent task. In this study, a down-fired with lean coal boiler was taken as test object. On the basis of the boiler characteristics, the numerical simulation study was performed in different tertiary air arrangements of burner, and the effects of combustion and NO<sub>x</sub> emissions were analyzed. Firstly, the original boiler conditions were analyzed by numerical method, and it was compared with the actual operation datum. In Down-fired boiler, low-NO<sub>x</sub> combustion design was performed by the comparison of parameters of different tertiary air arrangements to ensure the optimum tertiary air arrangement. The numerical simulation results show that the arrangement of tertiary air has a great influence on the combustion and NO<sub>x</sub> formation in the furnace. The amount of NO<sub>x</sub> produced by arrangement mode one or two is more than 800 mg/Nm<sup>3</sup>, and the carbon content of fly ash produced by arrangement mode three is up to 6.85%. High temperature area near the water wall of arrangement mode four could easily lead to slagging. The above four arrangements all have defects. The arrangement mode five is the best arrangement, which produces low content of NO<sub>x</sub> (762 mg/Nm<sup>3</sup>), and the carbon content of fly ash is 4.51%, as well the temperature distribution is reasonable.

**Key words:** tertiary air arrangement; W type flame boiler; low-NO<sub>x</sub>; combustion

## 0 引 言

2011 年国家对燃煤电厂 NO<sub>x</sub> 的排放提出了更

为严格的指标,要求自 2014-07-01 起,现有火力发电锅炉氮氧化物排放限值 100 mg/m<sup>3</sup>(W 型火焰锅炉为 200 mg/m<sup>3</sup>)<sup>[1]</sup>,近年更是提出了燃煤火电机组

收稿日期:2017-05-18;责任编辑:刘淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.06.015

基金项目:武汉市科技计划资助项目(2015070504020228);煤燃烧国家重点实验室开放基金资助项目(FSKLCCA1607)

作者简介:兰艳旭(1987—),男,湖南新宁人,工程师,从事火电厂技术研究和管理工作。E-mail:714311132@qq.com。通讯作者:王晖,高级工程师,从事火电厂技术研究和管理工作。E-mail:Wangcao719@sohu.com

引用格式:兰艳旭,王晖,邱福岗,等.乏气风布置对“W”型火焰锅炉低氮燃烧特性的影响[J].洁净煤技术,2017,23(6):76-82.

LAN Yanxu, WANG Hui, QIU Fugang, et al. Influence of tertiary air arrangement on low-NO<sub>x</sub> combustion characteristics for a "W" type flame boiler[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(6): 76-82.

氮氧化物排放浓度不超过  $50 \text{ mg/m}^3$  的目标<sup>[2]</sup>。随着氮氧化物排放标准的不断提高,传统燃煤污染物控制技术将面临升级换代的巨大挑战。电站锅炉炉内的物理化学反应耦合了气固两相流的湍流流动、煤粉颗粒的着火及燃烧、各组分及水冷壁之间的热传导、对流换热及辐射换热过程等,反应过程极为复杂。通过数值模拟计算,可以对整个燃烧、流动、换热及污染物的生成过程进行描述,提高了炉内燃烧研究的效率和经济性<sup>[3-5]</sup>。

“W”锅炉由于其自身结构特点,延长了煤粉在炉内的停留时间,对于劣质煤的燃烧有着不可取代的地位<sup>[6]</sup>。但是其  $\text{NO}_x$  排放水平远高于四角切圆锅炉和前后墙对冲锅炉,在日益严苛的  $\text{NO}_x$  的排放标准下,对“W”型火焰锅炉低氮燃烧的深入研究刻不容缓。主流的 W 型火焰锅炉共有 4 种,其中 FW 的市场占有率最高<sup>[7]</sup>,对 FW 的 SOFA 风及二次风参数设置的影响已有大量相关文献研究:Liu 等<sup>[8]</sup>研究了不同 OFA 风率对福斯特惠勒型 W 炉流动、燃烧以及氮氧化物排放的影响规律。马仑等<sup>[9]</sup>研究发现,控制合理的拱上二次风比例和风门开度可以提高 W 型锅炉运行经济性并降低  $\text{NO}_x$  排放。魏小林等<sup>[10]</sup>研究 300 MW 容量 W 火焰锅炉的风量配比,提出炉内组织型流场和形成型流场的条件。本文在拱上 2.7 m 处设置 20% 风率的 SOFA 风喷口,

喷口位置与一次风喷口对应,下倾  $30^\circ$  送入炉膛以实现空气分级燃烧。乏气风布置方式对燃烧及  $\text{NO}_x$  生成的影响较大,但鲜有相关研究。因此,本文将将以一台燃用贫煤的 FW 锅炉为研究对象,研究乏气风布置方式低氮燃烧特性的影响。

### 1 研究对象

本文的研究对象为 600 MW 亚临界压力“W”型火焰锅炉;锅炉型号为 DG2030/17.6-Ⅱ3,额定工况下主要参数如下:锅炉蒸发量为  $1\,778 \text{ t/h}$ ,主汽压力为  $17.27 \text{ MPa}$ ,主汽温度为  $541 \text{ }^\circ\text{C}$ ,再热蒸汽流量为  $1\,746 \text{ t/h}$ ,再热蒸汽出口温度为  $541 \text{ }^\circ\text{C}$ ,再热蒸汽出口压力为  $3.29 \text{ MPa}$ ,锅炉热效率为  $90.7\%$ 。

锅炉双拱单炉膛,燃烧器布置于炉膛前后拱上、燃烧器出口煤粉组成“W”型火焰的燃烧方式。炉膛总高度  $50.15 \text{ m}$ ,分为拱上、拱下 2 部分,上部炉膛尺寸  $34.48 \text{ m} \times 9.906 \text{ m}$ ,下部炉膛尺寸  $34.48 \text{ m} \times 16.012 \text{ m}$ 。制粉系统采用正压直吹式制粉系统,6 台双进双出磨煤机与锅炉前后拱上的 36 组燃烧器相对应。在拱上布置有乏气风燃烧器、一次风燃烧器、油风喷口及对应的二次风喷口,在拱下为 D、E、F1、F2 层二次风,拱下二次风从水冷壁拉稀管喷出,风速较低,双旋风筒燃烧器结构及一、二次风喷口布置如图 1 所示。

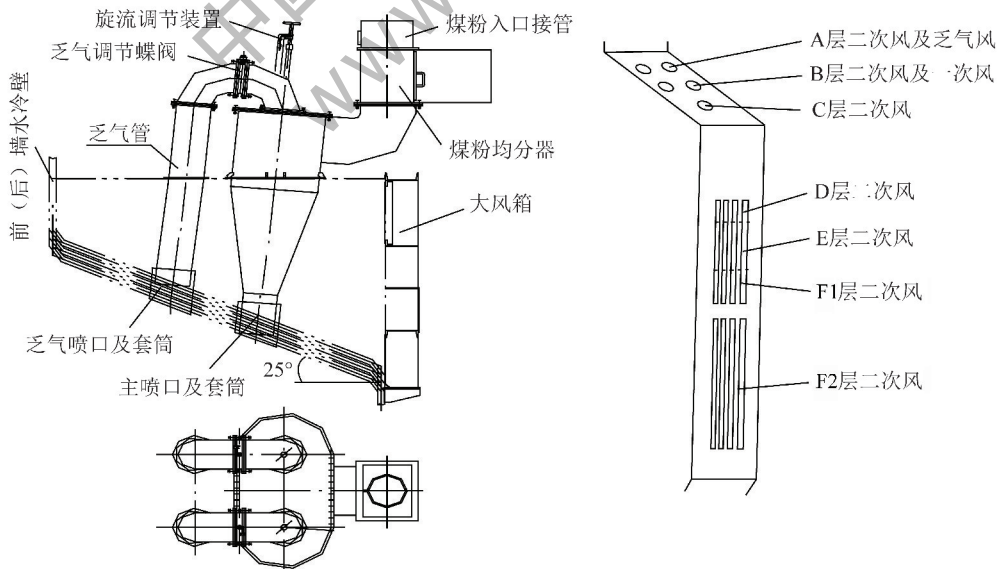


图 1 燃烧器结构及喷口布置

Fig. 1 Structural diagram of the burner and nozzle

锅炉在 BMCR 工况下燃烧器的设计参数见表 1。可以发现拱下二次风由于采用了拉稀管作为入

射喷口,所以风速均很低,虽然可以保护水冷壁,但不利于风煤的混合。

表1 BMCR工况下燃烧器设计参数

Table 1 Design parameters of burner under BMCR condition

项目	速度/(m·s <sup>-1</sup> )	温度/°C	风率/%
乏气风	18.0	120	11.11
一次风	15.8	120	11.11
A层二次风	30.0	321	10.00
B层二次风	30.0	321	10.00
C层二次风	30.0	321	15.00
D层二次风	5.4	321	4.00
E层二次风	5.4	321	5.00
F1层二次风	5.4	321	5.00
F2层二次风	8.3	321	23.78
漏风	—	30	5.00

该锅炉燃用无烟煤或贫煤,设计煤种、校核煤种与实际煤种对比见表2。根据电厂提供的资料及现

表2 煤质分析

Table 2 Proximate and ultimate analysis of coal samples

煤种	元素分析/%					工业分析/%				$Q_{ar,net}$ / (kJ·kg <sup>-1</sup> )
	$C_{ar}$	$H_{ar}$	$O_{ar}$	$N_{ar}$	$S_{ar}$	$A_{ar}$	$M_{ar}$	$V_{ar}$	$FC_{ar}$	
设计煤种	53.12	1.71	1.53	0.58	0.80	32.87	9.39	4.62	53.12	19 569
校核煤种	47.55	1.50	1.40	0.98	0.80	38.24	9.53	4.70	47.53	17 412
实际煤种	48.31	2.09	2.28	0.63	1.15	37.89	7.65	8.27	46.19	17 370

3)气相燃烧模型:混合分数/概率密度函数模型被用来计算气相湍流燃烧,并且结合非预混燃烧模型来计算煤粉燃烧过程中化学反应以及各组分的运输,此模型考虑了湍流流动与化学反应之间的耦合,可以在求解某个物质的运输方程后根据预测的混合分数分布来推测出其他物质的分布。

4)煤粉燃烧模型:挥发分析出的过程采用两步竞争反应模型来计算,该模型在不同温度范围内用2个不同的方程来计算挥发分析出速度<sup>[12]</sup>;在焦炭燃烧阶段采用动力/扩散控制燃烧模型,该模型考虑了扩散过程和反应动力学对煤粉表面燃烧速率的影响,与煤粉燃烧过程相符<sup>[3-5]</sup>。

5)NO<sub>x</sub>生成模型:由于快速型NO<sub>x</sub>生成量很小,本文不考虑快速型NO<sub>x</sub>的生成;热力型NO<sub>x</sub>的产生遵循Zeldovich机理<sup>[13]</sup>,为受温度支配的化学反应过程;燃料型NO<sub>x</sub>生成过程极为复杂,本文采用总体反应速率模型,只需对中间产物HCN和NO

场调研显示,机组自投产以来,燃烧器系统运行正常,无较大的缺陷,高负荷燃烧稳定性好,但着火和低负荷稳燃性能偏差,出口烟温偏高导致减温水投运量大,炉膛出口NO<sub>x</sub>质量浓度通常达1 500 mg/m<sup>3</sup>以上。

## 2 数值计算模型与计算网格

### 2.1 数学模型

1)湍流模型:考虑到锅炉炉内的气体流动存在较强的旋流气流,Realizable  $\kappa$ - $\epsilon$ 能更好地描述旋转均匀剪切流、自由流和分离流,因而采用的湍流模型为Realizable  $\kappa$ - $\epsilon$ 模型。

2)辐射模型:采用P1辐射模型来模拟锅炉内的颗粒、烟气及壁面之间的辐射传热,该模型源于对局部辐射强度的球调谐正交展开,联合边界条件和能量方程可以求得辐射换热量及温度场<sup>[11]</sup>。

的控制方程进行求解即可。文中假设煤挥发分中的N是以HCN和NH<sub>3</sub>的形式释放出来被氧化生成NO,而焦炭中的N则直接反应生成NO<sup>[14-15]</sup>。

### 2.2 网格划分

根据对象锅炉的实际尺寸对炉膛冷灰斗底部至水平烟道部分进行三维建模,如图2所示。由于炉膛燃烧器区域为燃烧反应与换热剧烈区域,对此部分网格进行了加密,进行网格无关性测试后,“W”型火焰锅炉网格总数约为184万<sup>[16]</sup>。在对网格进行分区时,将整个炉膛的受热面分为冷灰斗、主燃区下部、主燃区、主燃区上部、折焰角区和水平烟道几部分,并根据实际参数设定各自的温度,锅炉的屏式换热器简化为换热面,根据介质侧的温度设定壁面边界条件。

## 3 结果与讨论

### 3.1 模拟结果验证

图3为炉膛燃烧器纵截面与高过入口截面典

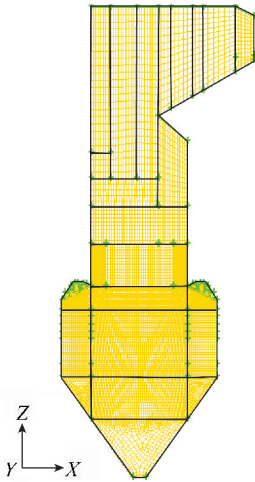


图2 “W”型锅炉网格划分示意

Fig. 2 Geometry of the CFD and grid division

型计算结果。由速度分布云图可知,一次风及乏气风在拱顶进入炉膛后下冲行程较短,有过早折向的趋势,拱下二次风以拉稀管作为喷口,进入炉膛速度低,与一次风及乏气风混合效果差。由温度分布云图可知,沿着煤粉从一次风及乏气风中进入炉膛的轨迹,经过了较长的低温区后温度才上升,说明煤粉着火较晚。拱下火焰充满度低,高温区较少,说明煤粉在拱下燃烧不充分,结合流场

分析,是由于一次风和乏气风过早折向并且拱下二次风与煤粉混合效果差引起的,进而大量未燃尽的煤粉在炉膛上部继续燃烧,导致炉膛上部温度较高。由  $O_2$  体积分数分布可知,一次风、二次风在炉拱及拱下喷入炉膛,在拱下形成了高  $O_2$  区域,但是由于拱下二次风为拉稀管喷口,刚性不足,所以大量二次风分布在近壁面区域,虽然有利于防止水冷壁结焦,但是与一次风混合效果较差。 $CO$  体积分数分布与  $O_2$  体积分数相反,在拱下中部由于缺氧, $CO$  体积分数较高,而在水冷壁区域由于大量二次风的存在  $CO$  体积分数很低,随着烟气上扬,煤粉逐渐燃烧完全, $CO$  体积分数下降,在炉膛出口处, $CO$  主要集中在烟道中部,两侧墙区域基本没有  $CO$  存在。由于 W 型火焰锅炉燃烧温度高,有大量热力型  $NO$  生成,炉内整体  $NO$  体积分数要明显高于四角切圆锅炉。由  $NO_x$  云图可知,炉内的  $NO$  分布与温度分布较为相似,在煤粉着火后  $NO$  体积分数逐渐变高,在拱下高温区达到最高值,尽管在近壁面区域的  $O_2$  很高,但煤粉的主要燃烧区域集中在炉膛中心区域,因而生成的  $NO_x$  较少。在炉膛出口, $NO$  体积分数较高,分布比较均匀,中间稍高于两侧区域。

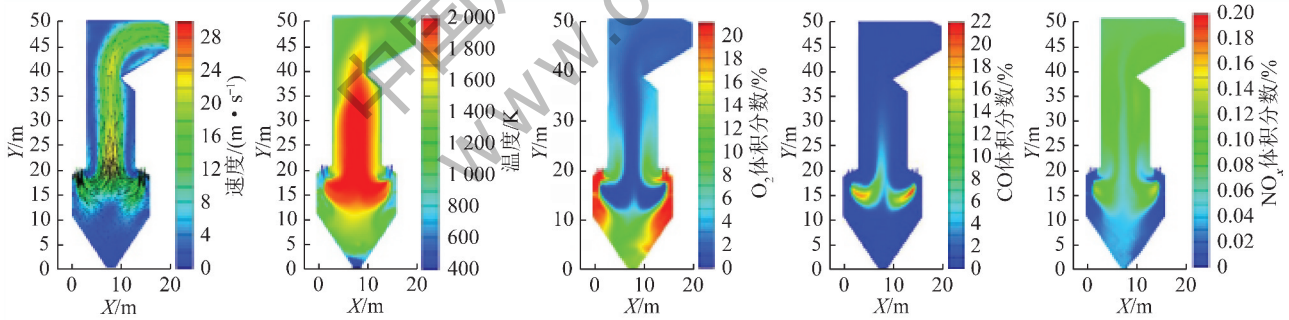


图3 炉膛燃烧器及高过入口截面典型计算结果

Fig. 3 Typical predicted results of the original combustion systems

根据上述分析,炉膛的流场、温度场、组分体积分数和  $NO$  体积分数在分布规律上符合对象锅炉特点和燃烧理论<sup>[13]</sup>。由于测量条件有限,只根据锅炉热力计算 ECR 工况下炉膛出口烟气温度值、尾部烟道测量的  $NO_x$  质量浓度以及在取灰点取得的灰进行测试得到的飞灰含碳量等参数对模拟结果进行验证。锅炉在数值模拟结果与实际测量的结果见表3,模拟工况计算得到的烟气温度稍高于设计值,炉膛出口  $NO_x$  质量浓度以及飞灰含碳量与实际测量

值较近,计算误差较小。因此,采用2.1节的计算模型对后续研究做数值计算分析。

表3 实际工况和模拟工况对比

Table 3 Comparison of actual conditions and simulation conditions

工况	高过进口烟温/K	$O_2$ 体积分数/%	出口 $NO_x$ 质量浓度/( $mg \cdot Nm^{-3}$ )	飞灰含碳量/%
实际工况	1 387	2.25	1 450 ~ 1 600	4.13
模拟工况	1 398	2.22	1 512	3.98

### 3.2 乏气风布置方式对低氮燃烧的影响

1) 方式1:乏气风位置保持不变,下炉膛的D、E层二次风合并为一组E层二次风,合并后的E层二次风和F层二次风由原拉稀管式改为喷口式。

2) 方式2:关闭乏气风喷口,乏气和一次风均从一次风喷口进入炉膛,原乏气周界风A层二次风作为拱上二次风。

3) 方式3:乏气风上引至拱上1.65 m处,并将每个燃烧单元引出的两股乏气风喷口合二为一送入

炉膛,距SOFA风喷口1.05 m,原乏气周界风A作为拱上二次风,原D、E层二次风喷口取消,风量作为乏气风周界风。

4) 方式4:将乏气风喷口合二为一移至原C层二次风处,原C风适当减小风量后作为乏气周界风,原乏气周界风A作为拱上二次风。

5) 方式5:将乏气风喷口合二为一引至原D、E层二次风处,原D、E层二次风作为乏气周界风,原乏气周界风A作为拱上二次风。乏气风布置示意如图4所示,各方案风率分配见表4。

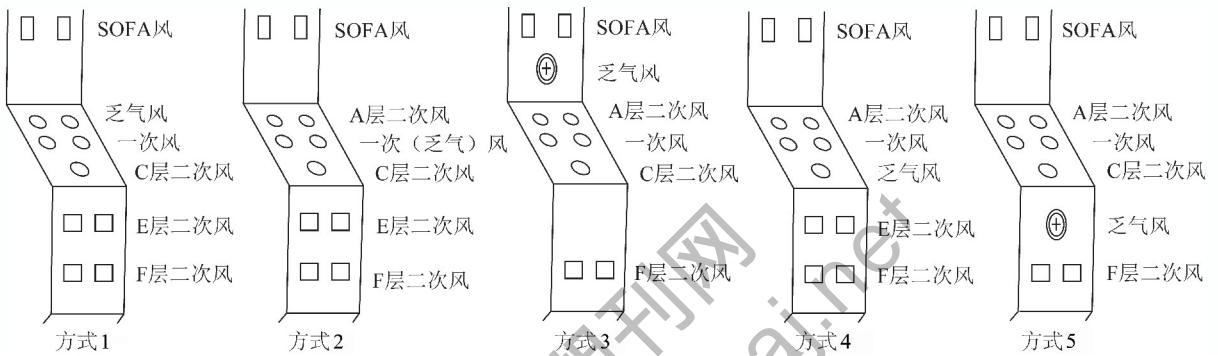


图4 乏气风布置方案

Fig. 4 Different tertiary air arrangements

表4 乏气风布置方案风率分配

Table 4 Operating parameters under different tertiary air arrangements

项目	风率/%					
	原始	方式1 (乏气不变)	方式2 (乏气关闭)	方式3 (乏气上引)	方式4 (乏气至C)	方式5 (乏气下移)
一次风	11.11	11.11		11.11	11.11	11.11
乏气风	11.11	11.11	22.22	11.11	11.11	11.11
一次风周界风	10.00	10.00		10.00	10.00	10.00
乏气风周界风	10.00	7.78	10.00	7.78	7.78	7.78
A风	—	—	10.00	10.00	10.00	10.00
C风	15.00	15.00	15.00	15.00	—	15.00
D风	4.00	—	—	—	—	—
E风	5.00	9.00	7.78	—	15.00	—
F风	28.78			10.00		
SOFA风	—			20.00		
漏风	5.00			5.00		

5种乏气风布置方式下各参数沿炉高变化曲线如图5所示。

由温度分布曲线可知,方式3在拱下整体温度最高,乏气风和SOFA风通入炉膛后,温度迅速下降,因为拱上煤粉燃烧量较少,在炉膛上部温度偏低;方式4和方式5温度分布相似,在拱下两者温度

高于方式1,这是因为两者乏气风移至C喷口或D、E喷口后,与方式1相比,均延迟了乏气风与一次风的混合,有利于煤粉初期的着火燃烧。方式4中乏气风贴近水冷壁,在乏气风中的煤粉燃烧后,拱下靠近前后墙壁面区域形成了局部高温,会引起水冷壁结焦腐蚀。由O<sub>2</sub>摩尔分数变化曲线可知,在炉拱区

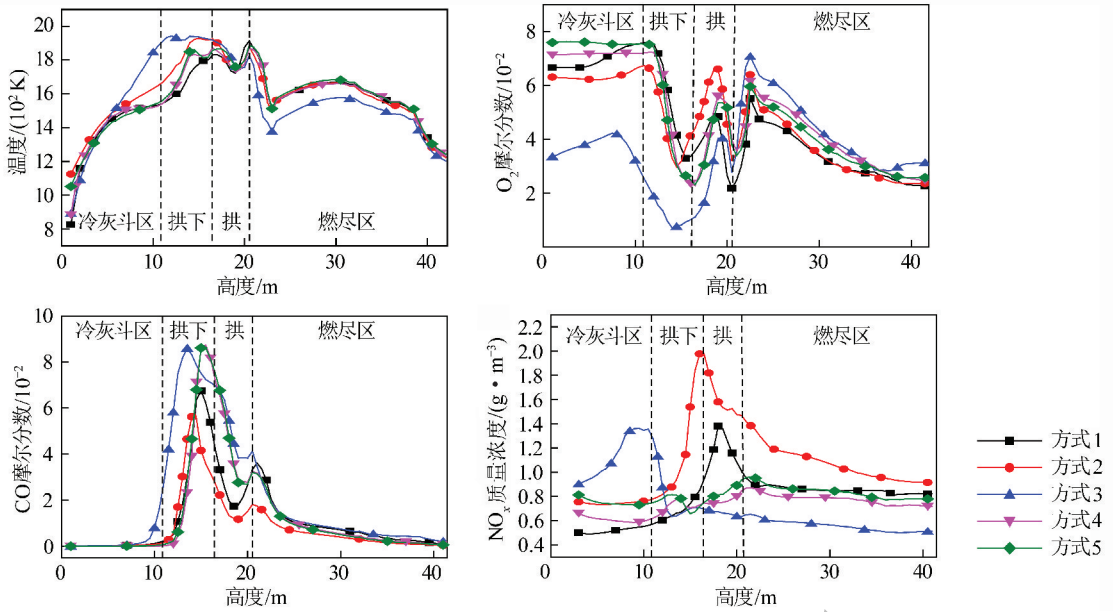


图5 5种乏气风布置方式下各参数沿炉高变化曲线

Fig. 5 Different average parameters along the furnace height under different tertiary air arrangements

域,方式2中O<sub>2</sub>摩尔分数最高,这是因为乏气和一次风合并后下冲强度大,着火延迟,O<sub>2</sub>在拱下才被大量消耗。方式1中O<sub>2</sub>分布比较均匀,低O<sub>2</sub>体积分数和高O<sub>2</sub>体积分数区域均较少,分级燃烧效果一般,在一次风喷口区域O<sub>2</sub>体积分数偏高,不利于煤粉初期的着火;方式4和方式5因两者乏气风移至C或D、E喷口后在拱上的风量相近,O<sub>2</sub>体积分数分布相似,方式5因乏气风在拱下,因此拱下区域O<sub>2</sub>体积分数较高而炉拱区域O<sub>2</sub>体积分数较低;方式3因乏气风上引,整个主燃烧区O<sub>2</sub>体积分数均很低,在乏气风和SOFA风补入炉膛后,O<sub>2</sub>体积分数迅速上升,但是在炉膛顶部存在局部低O<sub>2</sub>体积分数区域,是因为上升烟气受乏气风和SOFA风的下压作用流速下降,在炉顶出现了死滞区。由CO分布曲线可知,方式1中因乏气风与一次风混合较早,因此CO体积分数较低;方式2中乏气风与一次风合并因而煤粉燃烧O<sub>2</sub>体积分数最充足,CO体积分数整体均很低;方式3、方式4和方式5中乏气风被移至不同位置,延迟了一次风与乏气风的混合,这3种方式的CO体积分数较高,而方式3因乏气风在主燃区上才通入炉膛,在主燃区过量空气系数最低,因此CO体积分数最高。由NO<sub>x</sub>体积分数分布曲线可知,方式1和方式2因在炉拱区域CO体积分数较低,空气分级燃烧效果较差,因此NO<sub>x</sub>体积分数偏高,尤其是方式2中乏气风喷口关闭后,煤粉的一次

风风率增加了1倍,在煤粉着火后有充足的O<sub>2</sub>燃烧并生成NO<sub>x</sub>;方式3因在拱下及冷灰斗区域温度较高,有比较多的热力型NO<sub>x</sub>生成,但由于乏气风的上引,方式3中在主燃区过量空气系数最低,有利于NO<sub>x</sub>的还原,并且由于拱上乏气与SOFA风的下压作用,延长了烟气在还原区停留时间,NO<sub>x</sub>生成量在拱下迅速下降并所有方案中维持在最低值;方式4和方式5因组分及温度分布均相近,因此NO<sub>x</sub>生成量及变化规律也比较相似,2种方案的分级燃烧效果较好,NO<sub>x</sub>生成量比较低。在炉膛出口处NO<sub>x</sub>体积分数由大到小分别为方式2、方式1、方式5、方式4、方式3。5种乏气风布置方式下计算结果见表5。

表5 5种乏气风布置方式的计算结果(炉膛出口参数)  
Table 5 Calculation results of five kinds of tertiary air arrangements (furnace outlet parameters)

参数	方式1	方式2	方式3	方式4	方式5
温度/K	1 387	1 365	1 333	1 381	1 387
O <sub>2</sub> 体积分数/%	2.37	2.36	2.91	2.62	2.58
NO <sub>x</sub> 质量浓度/(mg · Nm <sup>-3</sup> )	820	904	494	691	762
飞灰含碳量/%	5.12	3.89	6.85	4.82	4.51

综上所述,方式1乏气风布置与改前相同,火焰下冲行程较短,NO<sub>x</sub>生成偏高;方式2关闭乏气风喷口后,一次风风率加倍,火焰下冲动量大,煤粉在拱下燃烧时间变长,燃尽率高,但是分级燃烧效果差,

生成的 $\text{NO}_x$ 多;方式3中乏气风上引后,加大了分级程度, $\text{NO}_x$ 生成量达到最低,但同时飞灰含碳量最高,煤粉燃尽性大幅下降;方式4和方式5的温度、组分及 $\text{NO}_x$ 生成均相似,方式4的出口 $\text{NO}_x$ 体积分数较低而飞灰含碳量更高,这2个方案能在降低 $\text{NO}_x$ 排放同时保证炉膛的经济性,是比较理想的乏气风布置方式,但方式4中乏气风贴近水冷壁,在乏气风中的煤粉燃烧后,拱下靠近前后墙壁面区域形成了局部高温,会引起水冷壁结焦腐蚀,因此,方式5为低氮燃烧下最优的乏气风布置方案。

## 4 结 论

1)方式1中乏气风布置与改前相同,火焰下冲行程较短, $\text{NO}_x$ 生成偏高;方式2关闭乏气风喷口后,一次风风率加倍,火焰下冲量大,煤粉在拱下燃烧时间变长,煤粉的燃尽率高,但是分级燃烧效果差,生成的 $\text{NO}_x$ 多;方式3中乏气风上引后,加大了分级程度, $\text{NO}_x$ 生成量达到最低,但同时飞灰含碳量最高,煤粉燃尽性大幅下降。

2)方式4和方式5的温度、组分及 $\text{NO}_x$ 生成均相似,方式4的出口 $\text{NO}_x$ 体积分数较低而飞灰含碳量更高,2个方案能较好地降低 $\text{NO}_x$ 排放同时保证炉膛的经济性,是比较理想的乏气风布置方式,但是方式4中乏气风贴近水冷壁,在乏气风中的煤粉燃烧后,拱下靠近前后墙壁面区域形成了局部高温,将会引起水冷壁结焦腐蚀,因此,方式5为低氮燃烧下最佳的乏气风的布置方案。

## 参考文献 (References) :

[1] 王占山,潘丽波. 火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究[J]. 环境科学,2014,35(3):853-863.  
WANG Zhanshan, PAN Libo. Implementation results of emission standards of air pollutants for thermal power plants: a numerical simulation[J]. Environmental Science, 2014, 35(3):853-863.

[2] 韩文科. 煤电超低排放: 机遇与挑战[J]. 环境保护, 2016, 44(8):39-41.  
HAN Wenke. Coal-fired power plants ultra-low emissions-opportunities and challenges [J]. Environmental Protection, 2016, 44(8):39-41.

[3] 白涛. 燃煤锅炉低 $\text{NO}_x$ 燃烧系统的数值模拟与试验研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.

[4] 方庆艳. 低挥发份煤及其混煤燃烧数值模拟与试验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2007.

[5] 杨文闯,杨卫娟,周志军,等. 不同二次风角度的W炉冷态流场实验研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2013,47(1):139-

145.  
YANG Wenchuang, YANG Weijuan, ZHOU Zhijun, et al. Influence of secondary air angle on flow field in down-fired furnace determined by cold-flow modeling experiment [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(1):139-145.

[6] 车刚. W型火焰锅炉及其应用现状[J]. 电站系统工程, 2004, 20(1):38-40.  
CHE Gang. W-shape flame boiler and its application [J]. Power System Engineering, 2004, 20(1):38-40.

[7] MIN K, LI Z. Review of gas/particle flow, coal combustion, and  $\text{NO}_x$  emission characteristics within down-fired boilers [J]. Energy, 2014, 69(5):144-178.

[8] LIU G, CHEN Z, LI Z, et al. Numerical simulations of flow, combustion characteristics, and  $\text{NO}_x$  emission for down-fired boiler with different arch-supplied over-fire air ratios [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75(1):1034-1045.

[9] 马仑,方庆艳,张成,等. 600 MW W型火焰锅炉拱上二次风 $\text{NO}_x$ 燃烧特性的数值模拟及优化[J]. 燃烧科学与技术, 2016, 22(1):64-70.  
MA Lun, FANG Qingyan, ZHANG Cheng, et al. Numerical simulation and optimization for the influence of the arch secondary air on low- $\text{NO}_x$  combustion characteristics of a 600 MW down-fired boiler [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2016, 22(1):64-70.

[10] 魏小林,徐通模,惠世恩. W型火焰锅炉冷态模型试验及数值计算[J]. 动力工程, 1994(1):27-32.  
WEI Xiaolin, XU Tongmo, HUI Shien. Experimental and numerical studies of aerodynamic characteristics in cold model of downward-fired boilers with W-shape flame [J]. Power Engineering, 1994(1):27-32.

[11] 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 & Combustion Science, 1999, 25(4):387-436.

[12] ZHANG H, JI R. Numerical simulation of pulverized-coal combustion [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 35(5):536-539.

[13] NI Peiyong, WANG Xiangli. Modeling the formation of noand soot emissions in a diesel engine at different humidity [J]. International Journal of Green Energy, 2012, 9(8):815-828.

[14] FENIMORE C P. Formation of nitric oxide from fuel nitrogen in ethylene flames [J]. Combustion & Flame, 1972, 19(2):289-296.

[15] CHEN Y G, HAN H J, LU J, et al. Effects of alkali and alkaline earth metals on  $\text{NO}_x$  reduction in coke combustion [J]. Advanced Materials Research, 2013, 634-638:522-525.

[16] 王志刚, 嵯玉群, 陈昌和, 等. 四角切圆锅炉流场伪扩散效应网格的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(5):22-28.  
WANG Zhigang, ZHUO Yuqun, CHEN Changhe, et al. Mesh investigation about crossflow diffusion of computational flow dynamics in tangential combustion flow field [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(5):22-28.