

# 船用增压锅炉 NO<sub>x</sub> 的生成机理及其排放量的近似计算方法

秦晓勇 李 军 张晓东

(海军工程大学 动力工程学院 湖北 武汉 430033)

**摘 要:** 在分析船用增压锅炉 NO<sub>x</sub> 生成的化学反应机理基础上,提出了一种船用增压锅炉 NO<sub>x</sub> 排放量的近似计算方法。船用增压锅炉中 NO<sub>x</sub> 的生成主要包括热力型和燃料型两种。热力型 NO<sub>x</sub> 生成量可通过炉膛中有效温度、N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 在炉膛有效温度下的平衡浓度、燃烧产物在炉膛中的平均停留时间来近似计算;燃料型 NO<sub>x</sub> 生成量可通过燃料中氮的含量和平均转变率来近似计算。炉膛有效温度系数  $m'$  为 0.9,燃料型 NO<sub>x</sub> 生成量平均转变率为 0.36。对某船用增压锅炉 NO<sub>x</sub> 生成量的实际测量结果和计算结果的最大误差为 5.6%,表明该计算方法可以满足船用增压锅炉 NO<sub>x</sub> 排放量的近似估算要求。

**关 键 词:** 增压锅炉; NO<sub>x</sub>; 排放量; 近似计算方法; 有效温度

中图分类号: TK229; O242 文献标识码: A

## 引 言

船用增压锅炉是蒸汽动力装置的“心脏”<sup>[1]</sup>,随着船用增压锅炉技术的迅速发展,增压锅炉性能参数的日益提高,排到大气中的污染物也不断增加,对环境造成的污染也更加严重。因此,在保持良好燃烧稳定性和增压锅炉性能的同时,降低污染物排放是一个迫切需要解决的问题。

燃烧产物中 NO<sub>x</sub> 是大气污染的主要来源,而 NO<sub>x</sub> 生成的湍流反应实际上是一种特殊的湍流燃烧。因此,NO<sub>x</sub> 生成量的计算方法与湍流燃烧的模拟方法是一致的<sup>[2]</sup>。船用增压锅炉中的燃烧是一种复杂的三维湍流扩散燃烧过程,针对这样的燃烧过程,一些学者分析了旋流燃烧器的冷态流场和雾化特性<sup>[3~4]</sup>;一些学者也尝试对其内部的燃烧与传热过程进行数值模拟研究<sup>[5~6]</sup>。但截至目前,由于炉膛内部流场的复杂性,还不能得出炉膛内部流场的准确值,更无法通过数值模拟得到 NO<sub>x</sub> 排放量的准确值。

本研究在分析船用增压锅炉 NO<sub>x</sub> 生成机理基础上,结合炉膛内部燃烧和传热过程的热平衡计算,建立了一种 NO<sub>x</sub> 排放量的近似计算方法。该方法避免了数值模拟的复杂计算,仅利用简单的热平衡计算和一些经验系数,即可近似计算出船用增压锅炉在不同使用条件时 NO<sub>x</sub> 排放量的变化情况,这对船用增压锅炉的科学管理和使用具有重要意义。

## 1 NO<sub>x</sub> 生成的化学反应机理

燃烧过程中形成的氮的氧化物主要是 NO 和 NO<sub>2</sub>,通常把这两种氮的氧化物通称为氮氧化物 NO<sub>x</sub>。现在已经确定氮的氧化物的形成机理主要有热力型、快速型和燃料型 3 种不同途径。

### 1.1 热力型 NO<sub>x</sub> 的生成

热力型 NO<sub>x</sub> 的生成是空气中的氮分子在高温下氧化产生的,通常发生在已燃区,故称为热力型 NO<sub>x</sub>。热力型 NO<sub>x</sub> 的生成可用扩展的捷里多维奇反应机理来表示<sup>[7~8]</sup>:



反应式(1)中  $M$  表示一个能量大的分子。式(3)的反应比式(2)的反应快得多,原子 N 的生成反应即式(2)是影响 NO 生成速率的关键反应链。这是由于原子 O 和 N<sub>2</sub> 生成 NO 的反应活化能比原子 O 在火焰中与燃料可燃成份的反应活化能大得多。由于原子 O 在火焰中的生存时间较短,但它和可燃成份的反应很容易进行,因此火焰中不会产生大量的 NO<sub>x</sub> 和其它成份相比,NO 的生成反应在相当晚时才进行,基本上是在燃料燃烧后的高温区中进行的。经过推导并代入试验结果,可以得到捷里多维奇机理下 NO 的生成速率  $d[NO]/dt$  与生成浓度

收稿日期: 2012-04-08; 修订日期: 2012-05-10

作者简介: 秦晓勇(1978-),男,河南林州人,海军工程大学副教授,硕士生导师;第三作者单位为:海军工程大学科研部。

[NO]的关系可写为<sup>[7-8]</sup>:

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 3 \times 10^{14} [\text{N}_2][\text{O}_2]^{1/2} \exp\left(\frac{-542000}{RT}\right) \quad (4)$$

$$[\text{NO}] = \int_0^t 3 \times 10^{14} [\text{N}_2][\text{O}_2]^{1/2} \exp\left(\frac{-542000}{RT}\right) dt \quad (5)$$

式中: [NO]、[N<sub>2</sub>]、[O<sub>2</sub>]—分别为 NO、N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 的浓度, mol/cm<sup>3</sup>; T—燃烧温度, K; t—时间, s; 542000—反应活化能, J/mol; R—通用气体常数, 8.314 J/(mol·K)。

分析式(5)可知,当燃烧温度低于 1600 K 时,热力型 NO<sub>x</sub> 生成量极少;当温度高于 1600 K 时,反应逐渐明显,而且随着温度的升高,NO<sub>x</sub> 生成量急剧升高。对于船用增压锅炉而言,全工况时炉膛内平均温度在 2000 K 左右,在此区间会生成大量的 NO<sub>x</sub>;在炉膛外的区域燃烧产物平均温度远远低于 1600 K,在此区间 NO<sub>x</sub> 生成量很少。因此,可认为增压锅炉中的热力型 NO<sub>x</sub> 主要是在炉膛中产生的。从式(4)和式(5)还可以看出,除了反应温度对热力型 NO<sub>x</sub> 的生成浓度有决定性的影响外,NO<sub>x</sub> 的生成浓度还与 N<sub>2</sub> 浓度和 O<sub>2</sub> 浓度的平方根以及停留时间有关。也就是说,船用增压锅炉燃烧过程的空气过剩系数和燃烧产物的停留时间对 NO<sub>x</sub> 的生成浓度也有很大的影响。

## 1.2 快速型 NO<sub>x</sub> 的生成

快速型 NO<sub>x</sub> 是在碳氢燃料过浓、燃烧温度较低时,在火焰面或火焰面附近生成的 NO<sub>x</sub>。对于船用燃油锅炉,燃烧温度较高,而且一般为贫燃料燃烧。因此,可暂不考虑快速型 NO<sub>x</sub> 的生成。

## 1.3 燃料型 NO<sub>x</sub> 的生成

燃料中氮的含量较多时,由燃料氮生成 NO<sub>x</sub>,称为燃料型 NO<sub>x</sub>。对于船用增压锅炉,所用燃料为重油,重油中的这些氮是 NO<sub>x</sub> 排放的一个特别重要的来源。燃料中氮转化为 NO<sub>x</sub> 的程度取决于实际的燃烧特性及含氮化合物的初始浓度。当燃料液滴或粒子液化被加热时,燃料中含氮化合物变为气态。随着这些化合物(如苯胺、氮杂苯、氮杂茂等)在反应区域中的热分解,像 HCN、NH<sub>3</sub>、N、CN 和 NH 这些基能够形成或转化为 NO<sub>x</sub>。这些化学反应过程已经为一些详细的调查研究所描述。研究表明<sup>[9]</sup>,燃料中含氮量并不能全部转变为 NO<sub>x</sub>,在一般燃烧装置中,液体燃料的转变率大约为 32%~40%。

## 2 NO<sub>x</sub> 排放量的近似计算方法

根据前面分析,针对船用增压锅炉的工作条件,可认为在增压锅炉燃烧产物中 NO<sub>x</sub> 主要是热力型和燃料型,燃烧产物中总的 NO<sub>x</sub> 体积含量为热力型 NO<sub>x</sub> 体积含量 NO<sub>x,ther</sub> 和燃料型 NO<sub>x</sub> 体积含量 NO<sub>x,fuel</sub> 之和,即:

$$\text{NO}_x = \text{NO}_{x,\text{ther}} + \text{NO}_{x,\text{fuel}} \quad (6)$$

### 2.1 热力型 NO<sub>x</sub> 体积含量的计算

从式(5)可看出,要计算出船用增压锅炉燃烧产物中热力型 NO 的浓度就要知道炉膛中各点燃烧产物的温度、各点燃烧产物中 N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 的平衡浓度和燃烧产物停留时间。由于增压锅炉炉膛结构和换热的复杂性,目前还不能得出整个炉膛内部流场的准确值。但我们可以根据炉膛内燃烧产物的有效温度 T<sub>yx</sub>、燃烧产物在炉内的平均停留时间 t<sub>h</sub>、N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 的平均化学平衡浓度 [N<sub>2</sub>] 和 [O<sub>2</sub>],近似计算出 NO 的平均浓度 [NO]。根据式(5),燃烧产物中热力型 NO<sub>x</sub> 的平均浓度 [NO] 可写为:

$$[\text{NO}] = 3 \times 10^{14} [\text{N}_2][\text{O}_2]^{1/2} \exp\left(\frac{-542000}{RT_{yx}}\right) t_h \quad (7)$$

#### 2.1.1 有效温度 T<sub>yx</sub> 的计算

炉膛内燃烧产物的有效温度在理论温度和炉膛出口温度 T<sub>cl</sub> 之间。在大型低热负荷锅炉炉膛中,出口温度 T<sub>cl</sub> 要比理论温度 T<sub>0</sub> 低得多,有效温度 T<sub>yx</sub> 更接近于出口温度。在这种情况下通常认为: T<sub>yx</sub><sup>4</sup> = m' T<sub>cl</sub><sup>4</sup>。在小型高热负荷锅炉炉膛中 T<sub>yx</sub> 和 T<sub>0</sub> 的差别不大,有效温度 T<sub>yx</sub> 接近于理论温度,在计算时可以取 T<sub>yx</sub><sup>4</sup> = m'' T<sub>0</sub><sup>4</sup>, 式中 m'' < 1。对于船用增压锅炉,属于小型高热负荷锅炉,根据其炉膛换热量、炉膛的理论温度和离开炉膛时的烟气温度的热力计算结果,其系数 m'' 取为 0.9,因此炉膛中有效温度的计算式为:

$$T_{yx}^4 = 0.9 T_0^4 \quad (8)$$

炉膛的理论温度取决于燃油的发热量、燃油和空气的进口温度,以及空气过剩系数。它是与传递给燃烧产物的热量储备相适应的,它实际上是燃烧过程在绝热条件下进行所能达到的最高温度。

#### 2.1.2 N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 平均化学平衡浓度的计算

根据炉膛内的压力、炉膛内的有效温度、空气过剩系数值,可以采用商业软件 Fluent 中的平衡假设模型来计算在各种情况下燃烧产物中 N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 的平

均化学平衡浓度。

### 2.1.3 平均停留时间 $\bar{t}_{lt}$ 的计算

燃烧产物在炉膛中停留的平均时间  $\bar{t}_{lt}$  为炉膛容积  $\bar{V}_{lt}$  和单位时间内炉膛内产生的燃烧产物体积的比值,即:

$$\bar{t}_{lt} = \bar{V}_{lt} / BV'_y \tag{9}$$

式中:  $\bar{V}_{lt}$ —炉膛容积,  $m^3$ ;  $B$ —耗油量,  $kg/s$ ;  $V'_y$ —每千克燃油燃烧产生的燃烧产物在炉膛压力和有效温度下的体积,  $m^3/kg$ , 即:

$$V'_y = V_y \frac{T_{yx} \times 0.1031}{273.15 \times P_{lt}} \tag{10}$$

式中:  $V_y$ —每千克燃油燃烧产生的燃烧产物在标准状态下的体积,  $m^3$ ;  $P_{lt}$ —炉膛内燃烧产物的压力,  $MPa$ 。

根据浓度和体积分量的换算关系,可知增压锅炉燃烧产物中热力型  $NO_x$  体积分量和  $NO$  生成浓度的关系为:

$$NO_{x,ther} = \frac{RT_{yx} \times [NO] \times 10^6}{P_{lt}} \times 10^6 \tag{11}$$

### 2.2 燃料型 $NO_x$ 体积分量的计算

每千克燃料燃烧后燃烧产物中燃料型  $NO_x$  在标准状态下的体积分量为:

$$V_{NO_x, fuel} = \lambda \frac{N_{go}}{100} \times \frac{22.4}{18} = 0.016\lambda N_{go} \tag{12}$$

式中:  $N_{go}$ —燃料工作质中  $N$  的含量, %;  $\lambda$ —燃料型  $NO_x$  的转化率,对于增压锅炉的工况条件,认为燃料型  $NO_x$  的转化率可近似为一常数;根据实验测试得到的数据<sup>[10]</sup>,  $\lambda$  取为 0.36。

燃烧产物中燃料型  $NO_x$  的体积分量为:

$$NO_{x, fuel} = \frac{V_{NO_x, fuel}}{V_{gy}} \times 10^6 \tag{13}$$

式中:  $V_{gy}$ —每千克燃油燃烧产生的干燃烧产物在标准状态下的体积分量,  $m^3$ 。

## 3 测量结果和计算结果的对比

利用燃烧产物分析仪可以测量出增压锅炉燃烧产物成份中  $O_2$ 、 $CO$ 、 $NO$  和  $NO_2$  的体积分量,以及燃烧产物的温度;根据燃烧基本方程式,由测出的  $O_2$  和  $CO$  的体积分量计算出燃烧产物中  $CO_2$  和  $N_2$  的含量,以及空气过剩系数  $\alpha$ 。某船用增压锅炉在几种不同工况时  $NO_x$  排放量的测量值和主要参数与计算值的比较如表 1 所示。

表 1 某船用增压锅炉  $NO_x$  排放量的测量结果和计算结果

Tab. 1 Measurement and calculation results of  $NO_x$  emissions of a marine supercharged boiler

工况	空气过剩系数	炉膛压力/ $MPa$	耗油量/ $kg \cdot s^{-1}$	$NO_x$ 排放量的测量值/ $10^{-6}$	$NO_x$ 排放量的计算值/ $10^{-6}$		$NO_x$ 排放量测量值和计算值之间的误差/%
					热力型	燃料型	
1	1.24	0.119	0.6	214	92	134	5.60
2	1.54	0.108	0.3	166	56	107	1.81
3	2.20	0.103	0.1	76	<1	74	2.63
4	2.49	0.103	0.08	67	<1	66	1.45
5	3.45	0.103	0.08	42	<1	44	4.76

该锅炉所用燃料的成分为  $C_{go} = 85.82$ ,  $H_{go} = 12.46$ ,  $S_{go} = 0.17$ ,  $O_{go} = 0.25$ ,  $N_{go} = 0.3$ ,  $A_{go} = 0.04$ ,  $W_{go} = 1.0$ 。测点选为锅炉装置涡轮增压机组烟气排出口处,因为此处烟气温度已较低,  $NO_x$  排放量已基本保持不变。

以表 1 中各测量工况为例,利用近似计算方法可得到各个测量工况时  $NO_x$  排放量的计算结果。表 1 同时给出了 5 种工况下  $NO_x$  的计算值,以及计算值和测量值之间的误差。从表 1 可以看出,在 5 种工况下计算值和测量值之间的最大误差为 5.6%,表明所提出的船用增压锅炉  $NO_x$  排放量的近似计

算方法是正确和合适的。

## 4 结 论

(1) 通过对  $NO_x$  生成机理的分析,得出船用增压锅炉中  $NO_x$  的生成主要发生在锅炉炉膛中,主要的生成机理是热力型和燃料型两种。

(2) 热力型  $NO_x$  的生成量和炉膛内燃烧产物温度、燃烧产物在炉膛内的停留时间、 $N_2$  和  $O_2$  在炉膛内的化学平衡浓度有关;燃料型  $NO_x$  的生成量和燃料类型、燃料中  $N$  的含量、燃料型  $NO_x$  的转化率

有关。

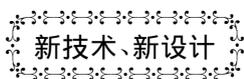
(3) 由于增压锅炉炉膛内部流场的复杂性,目前还不能得到 NO<sub>x</sub> 排放量的准确计算值,但可以采用一种近似的计算方法来估算 NO<sub>x</sub> 的排放量。近似计算中,炉膛有效温度系数  $m''$  取为 0.9,燃料型 NO<sub>x</sub> 生成量平均转变率取为 0.36。

(4) 利用烟气分析仪对某船用增压锅炉 NO<sub>x</sub> 排放量的测试结果和所提出的近似计算方法的计算结果对比表明,两者之间的最大误差为 5.6%,本研究提出的计算方法可用于近似估算船用增压锅炉在不同工况时 NO<sub>x</sub> 的排放量。

#### 参考文献:

- [1] 牛克华. 增压锅炉在舰船上的应用与发展 [J]. 中国修船, 2007 20(5): 17-19.  
NIU Ke-hua. Applications and development of supercharged boilers in warships [J]. China Ship Repair 2007 20(5): 17-19.
- [2] 李志强,魏飞,周力行. 湍流燃烧 NO 生成反应率数值模拟的研究现状与进展 [J]. 燃烧科学与技术 2004 10(5): 471-477.  
LI Zhi-qiang, WEI Fei, ZHOU Li-xing. Status quo and advances in the study of the numerical simulation of NO formation and reaction rate during the turbulent combustion [J]. Journal of Combustion Science and Technology 2004 10(5): 471-477.
- [3] 孙世芳,姚寿广,冯祥等. 舰用增压燃油锅炉旋流燃烧器冷态流场数值模拟 [J]. 船海工程 2010 39(3): 147-151.  
SUN Shi-fang, YAO Shou-guang, FENG Xiang, et al. Numerical simulation of the cold-state flow field in a swirling burner of a warship-purposed supercharged oil-fired boiler [J]. Ship and Ocean Engineering 2010 39(3): 147-151.
- [4] 王建志,王永堂,吴少华等. 船用增压锅炉旋流蒸汽机械喷油器的雾化特性 [J]. 热能动力工程 2007 22(3): 306-309.  
WANG Jian-zhi, WANG Yong-tan, WU Shao-hua, et al. Atomization characteristics of swirling steam-based mechanical oil sprayers for a supercharged marine boiler [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power 2007 22(3): 306-309.
- [5] 岳彭,王加庆,王磊等. 船用锅炉增压燃烧与传热计算方法研究 [J]. 锅炉制造 2008(2): 8-11.  
YUE Peng, WANG Jia-qing, WANG Lei, et al. Research of the methods for calculating the pressurized combustion and heat transfer of a marine boiler [J]. Boiler Manufacturing 2008(2): 8-11.
- [6] 张国磊,朱新源,李彦军等. 船用增压锅炉强化燃烧三维有限元分析 [J]. 热能动力工程 2009 24(2): 192-195.  
ZHANG Guo-lei, ZHU Xin-yuan, LI Yan-jun, et al. Three-dimensional finite element analysis of the intensified combustion in a marine supercharged boiler [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power 2009 24(2): 192-195.
- [7] Bowman C T. Kinetics of nitric oxide formation in combustion processes [C] // In: Proceedings of the Fourteenth Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, 1973 270.
- [8] Zeldovich Y B. The oxidation of nitrogen in combustion and explosions [J]. Acta Physicochim URSS, 1946 21: 577-583.
- [9] 严传俊,范玮. 燃烧学 [M]. 西安: 西北工业大学出版社 2005.  
YANG Chuan-jun, FAN Wei. Combustion [M]. Xian: Northwest Polytechnic University Press 2005.
- [10] 张晓东,秦晓勇,李军等. 舰用高增压锅炉燃烧产物特性分析与控制方法研究报告 [R]. 武汉: 海军工程大学 2011.  
ZHANG Xiao-dong, QIN Xiao-yong, LI Jun, et al. Research report on the characteristic analysis and control method of the products during combustion in a marine highly supercharged boiler [R]. Wuhan: Naval Engineering University 2011.

(陈滨 编辑)



新技术、新设计

## 航改型船舶燃气轮机混合推进系统

据《Gas Turbine World》2012年5-6月刊报道,GE Marine 将为军船和商船用户提供混合电力推进系统,以便降低噪声并提高燃料的经济性。

借助于在设置驱动轮系中的一台电动机,混合配置横向连接船舶装置的动力和推进系统。低速时,断开发动机并且给电动机提供巡航动力。

传统的混合驱动装置配备推进用的 2 台燃气轮机和 2 台柴油机以及典型船舶装置电力用 4 台柴油机。借助于该混合动力装置,可省去 2 台推进用柴油机并用电动机代替。

在减小噪声并提高战斗性能的同时,该装置可以降低船舶建造、推进设备和维护的费用。

GE 声称已给正在使用或正在建造的燃气轮机混合或电力驱动的船舶,包括美国海军的 LHD 8 USS Makin Island 直升机船坞登陆舰,提供了部件。

(吉桂明 摘译)

an increase of the bed temperature ,the conversion rate of methane will increase. However ,to change the concentration of methane will basically have no influence on the conversion rate of methane. **Key words:** methane at an ultra-low concentration ,inert particle ,combustion ,methane conversion rate

船用增压锅炉  $\text{NO}_x$  的生成机理及其排放量的近似计算方法 =  **$\text{NO}_x$  Formation Mechanism of a Marine Supercharged Boiler and a Method for Approximately Calculating Its Emissions** [刊 ,汉] QIN Xiao-yong ,LI Jun ( College of Power Engineering ,Naval Engineering University ,Wuhan ,China ,Post Code: 430033) ,ZHANG Xiao-dong( Scientific Research Department ,Naval Engineering University ,Wuhan ,China ,Post Code: 430033) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28( 1) . - 82 ~ 85

On the basis of analyzing the chemical reaction mechanism governing the  $\text{NO}_x$  formation in a marine supercharged boiler ,presented was a method for approximately calculating the  $\text{NO}_x$  emissions of a marine supercharged boiler. The  $\text{NO}_x$  formation modes in a marine supercharged boiler mainly involve the thermal and fuel one. The  $\text{NO}_x$  formation amount in the thermal mode can be approximately calculated by using the effective temperature in the furnace ,the equilibrium concentrations of  $\text{N}_2$  and  $\text{O}_2$  at the effective temperature of the furnace and the mean residence time of the combustion products in the furnace. The  $\text{NO}_x$  formation amount in the fuel mode can be approximately calculated by using the content of nitrogen in the fuel and the mean conversion rate of nitrogen. The furnace effective coefficient  $m''$  is 0.9 and the mean conversion rate of the  $\text{NO}_x$  formation amount in the fuel mode is 0.36. The maximal error between the actually measured results and the calculated ones of the  $\text{NO}_x$  formation amount in the marine supercharged boiler is 5.6% ,indicating that the method in question can meet the requirements for approximately estimating the  $\text{NO}_x$  emissions of a marine supercharged boiler. **Key words:** supercharged boiler , $\text{NO}_x$  ,emissions ,approximate calculation method ,effective temperature

不同配风方式下层燃炉煤层  $\text{NO}_x$  析出特性研究 = **Study of the Precipitation Characteristics of  $\text{NO}_x$  in the Coal Bed of a Laminar Combustion Boiler Under Different Air Distribution Modes** [刊 ,汉] DU Hai-liang ,ZHANG Pin ,LUO Yong-hao ,LU Yi( Thermal Energy Engineering Research Institute ,Shanghai Jiaotong University ,Shanghai ,China ,Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28( 1) . - 86 ~ 92

The combustion characteristics of coal in large-sized particles in a laminar combustion boiler differ greatly from those of pulverized coal. To precisely master the law governing the precipitation of nitrogen element in a laminar combustion unit boiler ,a contrast test of the precipitation characteristics of  $\text{NO}_x$  from the coal bed surface under different air distribution modes was performed. During the experiment ,the  $\text{NO}_x$  concentrations and the  $\text{O}_2$  , $\text{CO}_2$  , $\text{CO}$  and  $\text{H}_2$  concentrations on the coal bed surface of various coal ranks were tested and the data under different air distribution modes were compared and analyzed with the  $\text{NO}_x$  concentrations along the grate on the coal bed of a laminar combustion boiler featuring a dual peak distribution being obtained. Around 5 min after the boiler has been ignited from the coal bed , $\text{NO}_x$  production formed its first peak value ,the maximal peak value of the amount of  $\text{NO}_x$  formed from