

平圩电厂 600 MW 机组锅炉烟气中 NO_x 的测试及其降低效果的研究

苑晓波 (哈尔滨电站设备成套设计研究所)

吴半秋 (哈尔滨工业大学)

〔摘要〕 本文论述了平圩电厂 1[#] 炉烟气中 NO_x 的测定过程,采用了顶部二次风摆动喷嘴方法来降低烟气中的 NO_x 对这一技术措施的实际效果进行了分析研究。

关键词 NO_x 测试 NO_x 降低 机组锅炉

分类号 TK224

1 锅炉概况

平圩电厂 1[#] 机组是我国引进技术生产的首台 600 MW 机组,其中锅炉由哈尔滨锅炉厂引进美国燃烧工程公司(CE 公司)技术生产。厂家保证“在任何负荷和燃用设计煤种条件下,烟气中最大 NO_x 含量不超过 0.258 mg/kJ。

锅炉是 NO_x 的主要排放源之一,许多发达国家制定了严格的标准来限制燃煤锅炉 NO_x 排放量,本文对该机组的现场测试及降低 NO_x 效果进行了论述。

平圩 1[#] 炉(HG—2008/186—M型)是我国生产的首台配 600M 机组的锅炉,锅炉主要设计参数如下:(最大连续出力工况)

| | |
|--------|------------|
| 过热蒸汽流量 | 2 008 t/h; |
| 过热蒸汽压力 | 18.29 MPa; |
| 过热蒸汽温度 | 540.6 °C; |
| 给水压力 | 20.10 MPa; |
| 给水温度 | 278.3 °C。 |

锅炉采用 CE 传统技术,摆动式燃烧器,四角布置,切向燃烧。制粉系统配备 6 台 RP—1003 中速磨,直吹式正压运行。

2 分析方法的选择

2.1 测试要求

2.1.1 正式试验前三天,锅炉必须连续稳定运行。在正式试验开始前 3 小时,应在试验负荷下稳定运行。

2.1.2 对 NO_x 测试的工况:MCR 工况(最大连续出力工况,设计值为 653.5 MW)、额定负荷工况(600 MW)两次和控制负荷工况(450 MW)。

2.1.3 NO_x 在每个工况的测试频率为 15 分钟一次,测试持续时间大于 2 小时。

2.2 按照哈尔滨锅炉厂对锅炉性能提供的保证“在任何负荷下烟气中最大 NO_x 含量不超过 0.258 mg/kJ”,估算测量上限。

收稿日期 1993 04 14 修改稿 1993 06 03

本文联系人 苑晓波 男 35 助工 150046 哈尔滨市动力区旭升街 9 号

2.2.1 设计煤种为淮南烟煤,煤质特性如表 1 所示。

表 1 淮南烟煤设计成分

| 名 称 | 碳 C | 氢 H | 氧 O | 氮 N | 硫 S | 水 分 | 灰 分 | 高位热值 HHV |
|-----|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|----------------|
| 含 量 | 53.86% | 3.28% | 6.34% | 0.82% | 0.60% | 9.82% | 25.28% | 21 911.6 kJ/kg |

2.2.2 其它有关数据

空气预热器后烟气中氧的体积浓度为 5%。由于烟气中 NO_x 主要组分是 NO 占 90% 以上,所以 NO_x 的摩尔质量按 NO 的摩尔质量

计算($M_{NO} = 30 \text{ g/mol}$)。

2.2.3 按 $W_{NO_x} = 0.258 \text{ mg/kJ}$ 估算烟气中 NO_x 的可能最大含量为

$$\begin{aligned}
 (\text{ppm})_{NO_x} &= \frac{HHV W_{NO_x} (20.95 - O_2\%)}{M_{NO} \left[\left(\frac{79.05}{20.95} \right) \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) + \left(\frac{C}{12} + \frac{S}{32} + \frac{N}{28} \right) \right] \times 20.95} \\
 &= 21\,911.6 \times 0.258 \times (20.95 - 5) \times 100 / \left[30 \times \left[\left(\frac{79.05}{20.95} \right) \left(\frac{53.86}{12} + \frac{3.28}{4} + \frac{0.60}{32} - \frac{6.34}{32} \right) + \left(\frac{53.86}{12} + \frac{0.60}{32} + \frac{0.82}{28} \right) \right] \times 20.95 \right] = 600.6 \text{ ppm} \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中:

W_{NO_x} —燃料每发出 1 kJ 热量所产生的 NO_x 重量, mg;

$(\text{ppm})_{NO_x}$ —烟气中 NO_x 的含量, ppm;

M_{NO} —NO 的摩尔质量, kg/(k mal);

$O_2\%$ —烟气中氧的体积百分含量;

C—燃料中碳的重量百分含量, %;

H—燃料中氢的重量百分含量, %;

S—燃料中硫的重量百分含量, %;

O—燃料中的氧的重量百分含, %;

N—燃料中氮的重量百分含量, %;

HHV—燃料中的高位值, kJ/kg。

2.3 选择分析方法及仪器

现已估算出烟气中的 NO_x 浓度小于 600ppm,并要求每 15 分钟测一次 NO_x 的瞬时值。目前常用的分析方法有化学分析法和连续分析法。连续分析法具有快速、测量范围大等优点,适合于我们的测试要求。再考虑到国外法规推荐的方法及设备精度和现场测试的实用性,我们选择了由美国热电子公司生产

的 10AR 型化学发光 NO/NO_x 分析仪和能防止气样进入分析仪前结露的 900 型气样加热稀释仪。

3 标样选定

由于标准气的精度直接影响 NO_x 分析结果的准确性,所以我们选择了北京分析仪器厂配气站配制的标准气。前面已估算出测量范围在 0—600 ppm 之间,同时考虑到烟气中最可能出现的 NO_x 浓度以及调试仪器的需要,我们设计的 NO 浓度值分别为 250 ppm 和 100 ppm; NO₂ 浓度值为 220 ppm。

由于炉烟中存在的 CO₂ 浓度很高,而 CO₂ 对化学发光法分析 NO_x 有负干扰。为消除这一干扰我们在 NO_x 标准气中配入相应浓度的 CO₂ 气体。干烟气中 CO₂ 的浓度估算如下:

3.1 每千克炉前燃料产生的理论干烟气总干摩尔数

$$M_{DF} = \frac{79.05}{20.95} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) + \frac{C}{12} + \frac{S}{32} + \frac{N}{28} \quad (\text{kmal/kg})$$

3.2 每千克炉前燃料生成的实际干烟气总千摩尔数 $M_{DF} + M_A$

$$O_2\% (M_{DF} + M_A) = 20.95 M_A$$

$$\text{所以 } M_{DF} + M_A = \frac{O_2\% M_{DF} + (20.95 - O_2\%) M_{DF}}{20.95 - O_2\%} = \frac{20.95 M_{DF}}{20.95 - O_2\%} \quad (\text{kmal/kg})$$

3.3 干烟气中 CO₂ 的体积浓度 CO₂%

$$CO_2\% = \frac{\frac{C}{12} \times 100}{M_{DF} + M_A} = \frac{\frac{C}{12} \times 100}{\left[\frac{20.95}{20.95 - O_2\%} \right] \left[\left(\frac{79.05}{20.95} \right) \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) + \left(\frac{C}{12} + \frac{S}{32} + \frac{N}{28} \right) \right]}$$

$$CO_2 = \frac{\frac{53.86}{12} \times 100}{\left[\frac{20.95}{20.95 - 5} \right] \left[\left(\frac{79.05}{20.95} \right) \left(\frac{53.86}{12} + \frac{3.28}{4} + \frac{0.60}{32} + \frac{6.34}{32} \right) + \left(\frac{53.86}{12} + \frac{0.60}{32} + \frac{0.82}{28} \right) \right]}$$

$$= 14.3$$

式中: M_A 对应每千克炉前燃料的过剩空气千摩尔数。

上述三瓶标准气中分别配入 14% 的 CO₂ 气体以消除干扰。

4 现场测试及结果计算

4.1 取样系统设计

取样点选在空气预热器后一段平直的烟道上。在两侧烟道的截面中布置了间距小于 0.9 米的测点网格,用氧量场测定法找出其中的代表点,作为 NO_x 的测点。

采用双级过滤器去除烟气中的颗粒物。第一级设在烟道内的不锈钢衬套,能有效去除 20μm 以上的颗粒物。第二级为圆筒滤纸过

滤 1μm 以上的颗粒。采用氯化钙和硅胶双级干燥器去除水份。由设备 900 调控温度防止烟气进入分析仪前结露。取样导管由不易与 NO_x 起反应的聚四氟乙烯管、氟橡胶管和不锈钢管组成。

4.2 NO_x 的测定及结果计算

现场测定了四个工况下(59.51MW, 598.1MW, 451.5MW 和 623.0MW) 炉烟中 NO_x 的浓度。前两个工况各测 3 小时,后两个工况各测 2 小时。锅炉达到稳定工况 3 小时后每 15 分钟测一次 NO 及 NO₂ 浓度。

各工况下煤质分析数据见表 2,NO_x 分析计算结果见表 3。NO_x 由 [ppm] 转换成 [mg/kJ] 的公式如下:

$$W_{NO_x}^{(D)} = \frac{20.95(\text{ppm})_{NO_x} M_{WNO_x}}{(20.95 - O_2\%)HHV} \left[\left(\frac{79.05}{20.95} \right) \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) + \left(\frac{C}{12} + \frac{S}{32} + \frac{N}{28} \right) \right] \quad (\text{mg/kJ})$$

由表 3 可见, 负荷越高炉烟中的 NO_x 浓度越大。最大负荷 623.0 MW 下烟气中 NO_x 的排放浓度为 0.14 mg/kJ 小于 0.258mg/kJ 合格。

表 2 各工况下煤质分析数据

| 名 称 | 单 位 | 598.1 MW 负荷 | | | 595.1 MW 负荷 | | | 451.5 MW 负 荷 | 623.0 MW 负 荷 |
|------|-------|-------------|----------|---------|-------------|----------|---------|--------------|--------------|
| | | 哈成套所 分 析 | 西安热工 所分析 | 平 均 | 哈成套所 分 析 | 西安热工 所分析 | 平 均 | | |
| 碳 C | % | 56.56 | 59.30 | 57.93 | 57.66 | 59.80 | 58.73 | 58.73 | 57.93 |
| 氢 H | % | 3.81 | 4.04 | 3.93 | 3.88 | 4.11 | 4.00 | 4.00 | 3.93 |
| 氧 O | % | 6.55 | 6.63 | 6.59 | 7.07 | 6.02 | 6.84 | 6.84 | 6.59 |
| 氮 N | % | 1.00 | 1.01 | 1.005 | 1.01 | 0.95 | 0.98 | 1.00 | 0.99 |
| 硫 S | % | 0.20 | 0.23 | 0.215 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.215 |
| 水 分 | % | 5.68 | 5.84 | 5.76 | 6.19 | 6.13 | 6.15 | 6.16 | 5.76 |
| 灰 分 | % | 26.20 | 22.95 | 24.58 | 23.99 | 22.19 | 23.09 | 23.09 | 24.59 |
| 高位热值 | kJ/kg | 23196.1 | 24907.4 | 24053.8 | 23995.2 | 24652.1 | 24325.8 | 24325.8 | 24053.8 |

表 3 各工况炉烟中 O₂, NO_x 分析计算值

| 工况负荷 MW | NO | | NO ₂ | | NO _x | | O ₂ % |
|------------|-------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|---------------------|
| | ppm | mg/kJ | ppm | mg/kJ | ppm | mg/kJ | |
| 598.1 | 253.6 | 0.110 | 24.0 | 0.0150 | 277.6 | 0.125 | 5.27 |
| 595.1 | 252.3 | 0.109 | 24.4 | 0.0155 | 276.7 | 0.125 | 5.2 |
| 451.5 | 181.1 | 0.0826 | 22.0 | 0.0147 | 203.1 | 0.0973 | 5.99 |
| 623.0 | 281.0 | 0.124 | 25.0 | 0.0162 | 306.0 | 0.140 | 5.50 |

5 降低 NO_x 效果分析

这台锅炉采用四角布置切向摆动燃烧器, 单炉膛 CE 雷蒙式中速磨, 正压直吹系统。顶部风喷嘴是根据分级送风原理作为这台锅炉降低 NO_x 生成量的主要措施。此喷嘴可上下摆动, 设计的摆动角度为向上 30°, 向下 5°,

摆动是为了调一最佳角度使 NO_x 生成量最少。顶部风量占二次风量的 15%, 二次风量占总风量的 79.8%, 过量空气系数设计值为 1.25(在 600 MW 工况下)。

在锅炉燃烧过程中生成的 NO_x 90% 左右是 NO, 其余是 NO₂。锅炉燃烧生成的 NO_x 有如下两种: (1) 温度型 NO_x, 由燃烧用空气中的氮在高温下氧化而成。(2) 燃料型 NO_x, 由燃料

中含有的氮化物在燃烧过程中氧化而成。煤在燃烧过程中生成的NO_x，燃料型占(80~90)%^[5]。这台锅炉选用两段燃烧法控制NO_x的生成。按配风量推算，其中一段燃烧空气的过剩系数是1.10，燃料燃烧不完全，因而火焰温度较低；另一方面由于有不完全燃烧产物存在，而氧和氮反应的活化能高于氧碳之间反应的活化能，所以氧优先和燃料反应这就限制了温度型NO_x的生成。同时由于过剩空气系数低，氧不充分中间产物也不能进一步氧化成燃料型NO_x。在第二段燃烧空气(顶

部风)送入时，由于炉内的冷却作用，烟气温度的大大降低。虽然氧气充足但温度太低，NO的生成很慢，这就有效地降低了NO_x的生成。这台锅炉一、二次风分六层送入，当负荷下降时，上部一次风煤粉喷嘴停投，上部二次风也可起到降低NO_x的作用。所以烟气中NO_x的浓度随负荷降低而下降。

设燃料型NO_x占NO_x生成总量的85%，则可按下式求得623.0 MW 负荷下燃料中的N转换成烟气中NO_x的转换率。

$$\begin{aligned} \text{转换率} &= \left[\left(\frac{20.95}{20.95 - \text{O}_2\%} \right) \left[\left(\frac{79.05}{20.95} \left(\frac{\text{C}}{12} + \frac{\text{H}}{4} + \frac{\text{S}}{32} + \frac{\text{O}}{32} \right) + \left(\frac{\text{C}}{12} + \frac{\text{S}}{32} + \frac{\text{N}}{28} \right) \right] (\text{ppm})_{\text{NO}_x} \right. \\ &\quad \left. \times 10^{-6} \times 85\% \right] / \frac{\text{N}}{14} \\ &= \left[\left(\frac{20.95}{20.95 - 5.5} \right) \left[\left(\frac{79.05}{20.95} \right) \left(\frac{57.93}{12} + \frac{3.93}{4} + \frac{0.215}{32} + \frac{6.59}{32} \right) + \left(\frac{57.93}{12} + \frac{0.215}{32} \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. + \frac{0.99}{28} \right) \right] \times 306 \times 10^{-6} \times 0.85 \right] / \frac{0.99}{14} = 13\% \end{aligned}$$

目前不采取降低NO_x燃烧措施的煤粉锅炉，其燃料型NO_x的转换率在(20~25)%之间^[6]。比较以上数据可见，这台锅炉降低NO_x生成的措施是行之有效的。

参 考 文 献

1 PTC 19.10 Flue and Exhaust Gas Analyses. ANSI, ASME, 1981

2 日本标准协会. 日本环境污染标准分析法手册. 技术标准出版社. 1983

3 哈尔滨锅炉厂设计处. 600 MW 机组锅炉说明书, 哈尔滨锅炉厂. 1987

4 哈电站设备成套所译. 燃煤锅炉低NO_x燃烧技术译文集. 发电行业情报网, 1989

5 张永照, 牛长山. 环境保护与综合利用. 机械工业出版社, 1982

6 宋文彪. 空气污染控制工程. 冶金工业出版社, 1985

7 赫吉明等. 大气污染控制工程. 高等教育出版社, 1989

欢 迎 刊 登 广 告

CONTENTS

- (250) EGT Experience with Gas Turbines Burning Ash-Forming Fuels.....M. Moliere, J. P. Gazonnet, J. P. Vinicersi
- (261) A Dynamic Mathematical Model of SK15HE Gas Turbine And Its Simulation by the Use of a Real-time Simulator.....Lu Zehua, Zhao Shihang, Xu fusheng (*Tsinghua University*)
With SK15HE three-shaft gas turbine serving as an example the authors have set up a dynamic mathematical model for the real-time simulation of a three-shaft gas turbine. On the basis of the special features of the turbine control system a diagnostic detection is conducted of the gas turbine control system with the help of a real-time simulator, thereby solving the contradiction between simulation precision and simulation duration in a satisfactory manner. **Key words:** *gas turbine, mathematical model, real-time simulation*
- (269) Orthogonal Optimization Control of Boiler Thermal Efficiency..... Zhu Jianing (*Nanjing Electric Power Advanced Technical School*)
Through a functional relation for calculating boiler thermal efficiency and by the use of a computation method in mathematical statistics an optimized parameter control value has been determined, which can lead to an enhanced boiler operating efficiency. **Key words:** *boiler efficiency, optimization control*
- (275) The Determination of NO_x Content in Flue Gases of a 600 MW Boiler Installed at Pingwei Power Station and a Study on the Effectiveness of its Reduction..... Yuan Xiaobo (*Harbin Power Plant Equipment Design Institute*), Wu Banqiu (*Harbin Institute of Technology*)
This paper describes the procedures for determining the NO_x content in flue gases of boiler NO_x installed at Pingwei Power Station. A secondary air swinging nozzle has been installed at the boiler top to reduce the NO_x content in boiler flue gases. An analytical study on the effectiveness of such a method was also undertaken. **Key words:** *NO_x determination, NO_x reduction, boiler unit*
- (280) A New Method for Designing the Grate Firing Furnace Arch with a Highly Turbulent a-shaped Combustion Flame..... Huishien, Xu tongmo, Liu Zhongjun, Jiang Huishu (*Si'an Jiaotong University*)
Through an experimental study based on furnace aerodynamics and hydrodynamic theory the authors have come up with a new method for designing a grate firing furnace arch featuring highly turbulent a-shaped combustion flame. When calculated on the basis of an aerodynamic and resultant momentum method, the resultant momentum of the front and rear arch should emerge within the range of $2/3 \sim 4/5$ of the front arch straight section. When an intersection angle of $\delta \geq 110^\circ$ with the front arch straight section is formed the coordination of the front