

利用 CCD 测量炉膛温度场及 NO_x 排放特性试验研究

郭建民, 刘石, 姜凡, 李志宏

(中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080)

摘要: 炉膛火焰中的局部高温是 NO_x 排放量升高的重要原因, 利用 CCD 摄像机对炉膛温度进行了测量, 测温原理为双色法。在各种不同工况下, 对锅炉负荷、过量空气系数、煤种、炉膛温度和燃烧器运行方式等因素同锅炉 NO_x 排放特性之间的关系进行了实验研究。实验结果表明: 随着各种影响因素的改变, 炉膛温度相应发生变化, NO_x 排放亦表现为不同的变化规律。CCD 能有效地实时监测炉膛温度, 诊断局部高温, 从而有助于改进燃烧, 调节运行工况, 有效降低 NO_x 排放。

关键词: CCD; NO_x; 锅炉; 炉膛温度场

中图分类号: TK224.1 文献标识码: A

1 引言

近年来, 随着我国电力行业的发展, NO_x 排放量逐年增加。氮氧化物危害人体健康、污染环境。因此, 研究燃煤电站的污染物排放特性, 对实现锅炉的清洁燃烧是十分重要的。

煤粉燃烧过程中所产生的 NO_x 主要是 NO 和 NO_x, 其中的 NO 约占 90% 以上。根据 NO_x 的不同生成机理, 可分为热力氮、快速氮和燃料氮 3 种。热力 NO_x 是由空气中的 N₂ 在高温下氧化生成; 快速 NO_x 是燃料中的碳氢化合物与空气中的 N₂ 在过量空气系数为 0.7~0.8 时, 由预混燃烧产生, 反应时间极短; 燃料 NO_x 是燃料所含的氮化物在燃烧过程中氧化生成的氮氧化物。对于燃煤, 通常燃料 NO_x 占 70%~85%; 热力 NO_x 占 15%~25%, 它的生成受温度影响极大, 特别是温度大于 1 500 °C~1 600 °C 后, 生成量大幅度增加; 其余为快速氮, 其比例很小。

本文针对某电厂 300 MW 旋流对冲燃煤锅炉进行了 NO_x 排放特性实验。火焰中的局部高温是

NO_x 排放量升高的重要原因, 局部高温必须通过温度场的检测得以发现。考虑温度对 NO_x 生成的影响, 利用 CCD 摄像机对炉膛温度进行了测量^[1]。在各种不同工况下, 对锅炉负荷、过量空气系数、煤种、炉膛温度和燃烧器运行方式等因素同锅炉 NO_x 排放特性之间的关系进行了研究。

2 试验设备

2.1 锅炉燃烧设备

某 300 MW 锅炉为亚临界参数、单炉膛、固态排渣煤粉炉。炉膛燃烧系统采用冷一次风机热风送粉、对冲燃烧方式, 24 只标准 EI-DRB 双调风旋流燃烧器分三层对称布置在矩形燃烧室的前、后墙上, 炉膛尺寸宽 13.25 m、深 12.3 m、高 46.4 m。

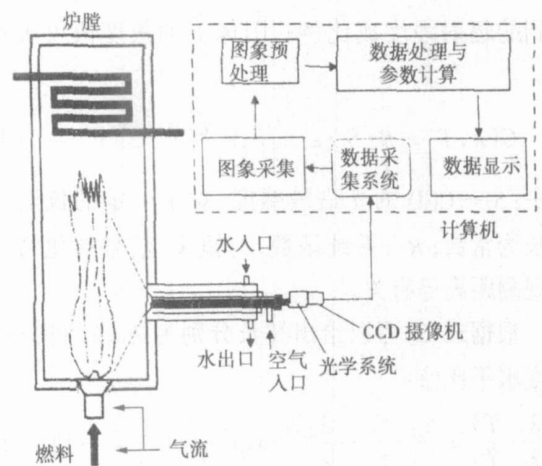


图 1 火焰测量系统简图

2.2 CCD 炉膛温度场测量系统

系统由光学探头、滤光镜、CCD 摄像机、图像采

收稿日期: 2005-05-09

基金项目: 国家 863 高技术基金资助项目(2003AA 529290)

作者简介: 郭建民(1971-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 中国科学院博士研究生。

集卡和微型计算机组成。CCD 摄像机以每秒 50 幅的速度采集火焰图像。摄像机中的模拟图像信号通过图像采集卡以每秒 132M 字节的速度转变为二维数字信号。光学探头的物镜具有很宽的视角,通过气流清洗防止表面积灰。光学探头外有特别设计的水冷套管,以便保护摄像机免受炉内过强热辐射。该系统利用黑体炉进行了标定,其测温原理为双色法。该系统可正确、实时跟踪燃烧火焰的温度变化,定量给出火焰温度变化^[2]。

2.3 火焰温度测量原理^[3]

火焰监测系统对火焰的测量是基于对火焰中高温固体颗粒对外热辐射强度的测量实现的。系统中采用的数码相机后的 CCD 光敏元件阵面输出的信号,正比于镜头前聚集平面上火焰断面出的辐射强度。

根据 Planck 定律,高温物体在任一波长上的辐射强度可以表示为:

$$M(\lambda, T) = \epsilon_\lambda \frac{C_1}{\lambda^5} (e^{C_2/\lambda T} - 1)^{-1} \quad (1)$$

其中: ϵ_λ —波长为 λ 的辐射率; T —温度; C_1 、 C_2 —Planck 常数。对于波长范围在 400~800 nm 和温度在 3 000 K 以下, Planck 定律可以用 Wien 位移定律来表示,即:

$$M(\lambda, T) = \epsilon_\lambda \frac{C_1}{\lambda^5} e^{-C_2/\lambda T} \quad (2)$$

火焰图像的输出,与摄像机里 CCD 传感器上接收到的辐射强度成比例。图像上的灰度值可表示为:

$$G(\lambda, T) = R \cdot S_\lambda \cdot \epsilon_\lambda \cdot \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot e^{-C_2/\lambda T} \quad (3)$$

其中: S_λ —CCD 的光谱敏感度,对于一定的仪器和波长为常数; R —系统函数,与镜头、信号转化特性及观测距离等有关。

根据式(3)可以给出波长分别为 λ_1 、 λ_2 的图像灰度水平比值:

$$\frac{G(\lambda_1, T)}{G(\lambda_2, T)} = \frac{S_{\lambda_1}}{S_{\lambda_2}} \cdot \frac{\epsilon_{\lambda_1}}{\epsilon_{\lambda_2}} \cdot \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 \cdot \exp\left[\frac{C_2}{T} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)\right] \quad (4)$$

其中可以近似认为: $\epsilon_{\lambda_2}/\epsilon_{\lambda_1} = \lambda_1/\lambda_2$ ^[4]。

整理式(4)可得:

$$T = C_2 \cdot \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right) / \left[\ln \frac{G(\lambda_1, T)}{G(\lambda_2, T)} + \ln \frac{S_{\lambda_2}}{S_{\lambda_1}} + \ln \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^6\right] \quad (5)$$

这样,双色法测量火焰温度时,只要知道两波长的辐射率之比,即可由式(5)根据不同波长火焰图像上灰度比值得到。

3 炉膛温度测量

在炉膛高 26 m、32 m、39 m 和 42 m 处利用 Raytek 热辐射测温仪测量炉膛各高度的平均温度。经测量,炉膛高 32 m 处为炉膛最高温度,因此将 CCD 炉膛温度测量系统安置在此进行温度场测量。

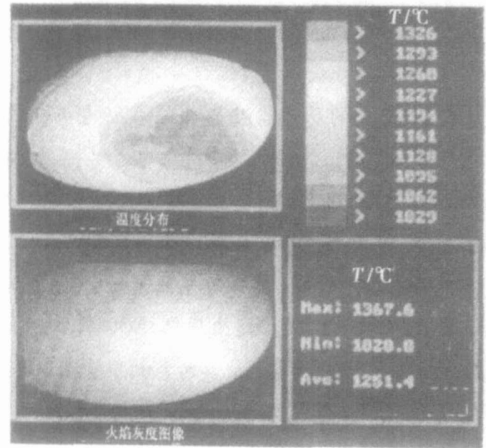


图 2 典型炉膛温度实验结果

图 2 为 CCD 炉膛温度场监测典型实验结果图。利用该系统能够实时定量测量火焰温度场分布,可测得炉膛局部高温区最高温度、最低温度及平均温度,其结果代表炉膛高温区温度分布水平;同时可以获得火焰的闪烁频率及火焰几何形状与位置随时间的变化,并据此进行实时故障诊断。该设备除了用于对熄火现象及火焰对炉壁的冲刷进行监视和判断外,还能对燃烧品质和变化趋势作定量的测量,以便与适当的控制系统联用,实现对燃烧过程的合理调整和控制。

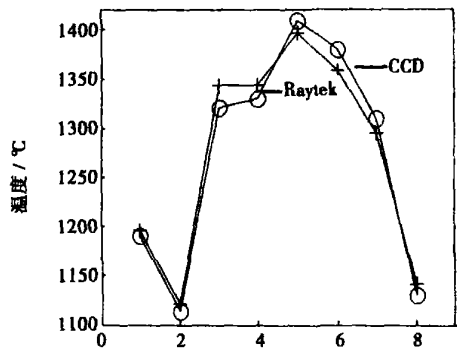


图 3 温度测量比较

图 3 为 CCD 所测量的炉膛平均温度同 Raytek

热辐射测温仪平均温度比较图, 两者相差不大, CCD 测量的温度略高一些。

4 锅炉 NO_x 排放规律试验研究

4.1 锅炉负荷

锅炉负荷变化范围为 260 ~ 300 MW, NO_x 排放量是利用 KM9106 综合烟气分析仪在炉膛烟道测量所得。图 4 为同一煤种下随负荷变化炉膛各层平均温度变化趋势。由图 4 可见, 锅炉负荷增加, 炉膛温度上升。图 5 为 CCD 所测得的炉膛局部高温区中最高温度、最低温度及平均温度变化时, NO_x 变化趋势。炉膛负荷提高, 意味着炉内温度水平的提高, 将促进燃料氮和热力氮的生成。

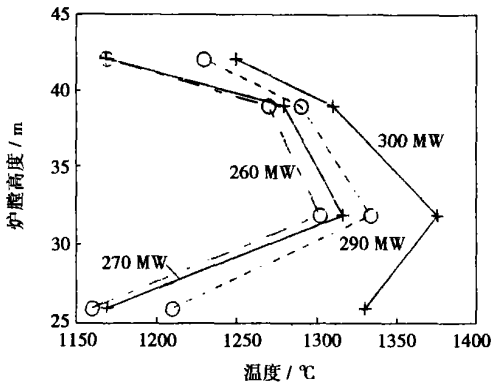


图 4 负荷对炉膛温度的影响

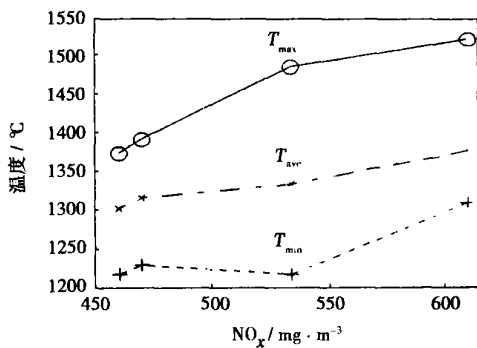


图 5 CCD 测量的温度对 NO_x 排放的影响

4.2 过量空气系数

燃烧过程中氧量增加, 即过量空气系数提高, 对燃料氮和热力氮的影响效果是不一样的。燃料型 NO_x 排放浓度总是随着氧量增加而增加; 热力型 NO_x 排放浓度开始随氧量的增加而增加, 但到一定值后, 氧量继续增加, 会使炉内燃烧恶化, 温度开始

下降; 热力氮对温度特别敏感, 排放量则会随之下降^[5]。因此综合效果是随着氧量增加, 先是促进 NO_x 生成反应, 使排放浓度增加, 但当氧量增加到一定值时, NO_x 排放浓度将不变甚至反而下降, 如图 6 所示。锅炉负荷为 290 MW 时, 氧量为 5.5% NO_x 排放浓度达到最大; 负荷为 200 MW 时, 氧量为 6.1% NO_x 排放浓度最大。图 7 为 CCD 所测量的炉膛平均温度随氧量变化趋势, 反映出氧量的变化对炉膛温度的影响, 从而影响 NO_x 排放。

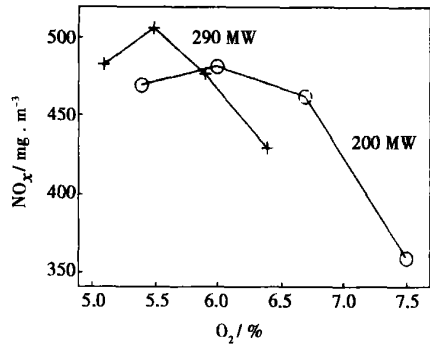


图 6 氧量与 NO_x 排放量的关系

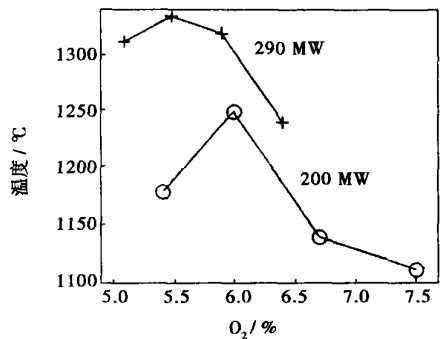


图 7 CCD 平均温度与氧量的关系

4.3 燃烧器投运数

表 1 燃烧器投运数对 NO_x 排放的影响

燃烧器投运数/支	NO _x 排放量/mg·m ⁻³	CCD 平均温度/°C
17	516.3	1338
19	576.4	1371
20	592.7	1381

在锅炉满负荷 (300 MW) 运行条件下, 24 支旋流燃烧器并没有全部投入, 在同一煤种下分别测试投入 17 支 (中下排全投, 前上一支)、19 支 (中下排全投, 前上 3 支)、20 支 (中下排全投, 后上 4 支) 3 种工

况下 NO_x 排放量, 燃烧器投运数对 NO_x 排放的影响如表 1 所示。CCD 所测得的炉膛平均温度在这 3 种工况下随着燃烧器投放数量的增加, 炉膛温度上升, NO_x 排放量也增加。

4.4 煤种对 NO_x 排放浓度的影响

在燃煤锅炉燃烧温度范围内, NO_x 排放物中燃料型 NO_x 排放浓度所占比例很大, 约 80%。因此, 燃料中的氮含量对 NO_x 排放量起着决定性作用。试验所用的煤共有 3 种, 煤粉在给煤机下的煤粉取样装置下采样, 煤分析数据见表 2, 其中 c 煤样含氮量最高。图 8 中 1、2 为在负荷 290 MW 下, a 煤种同 c 煤种相比较, 其排放量相差 46.3 mg/m^3 ; 3、4 为在负荷 260 MW 下 b 和 a 两种煤样相比较, 其排放量相差 27.8 mg/m^3 。

表 2 煤样分析数据 (%)

煤种	C_{ad}	N_{ad}	A_{ad}	V_{ad}
a	50.82	0.87	38.81	13.32
b	67.65	1.03	22.90	12.83
c	59.21	1.05	30.87	12.18

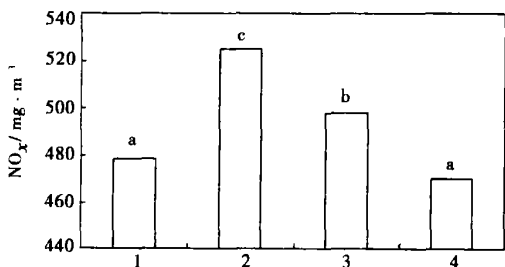


图 8 煤种对 NO_x 排放的影响

5 结 论

(1) 利用 CCD 对炉膛温度场进行了定量测量, 测量系统响应速度快, 系统火焰几何参数和温度场测量响应时间可以达到数十毫秒级, 火焰频闪测量的响应时间可以达到毫秒级。

(2) 火焰中的局部高温是 NO_x 排放量升高的重要原因, 局部高温必须通过温度场的检测得以发现。可以通过 CCD 温度测量系统实时检测温度场、诊断局部高温, 从而有助于改进燃烧, 调节运行工况, 消除局部高温, 有效降低 NO_x 排放。

(3) 煤粉锅炉 NO_x 排放量与许多因素有关, 一般来说, 随负荷提高, 煤种含氮量增加, NO_x 排放量也将增加。

(4) 燃烧过程随着氧量的增加, NO_x 排放量先增加, 而后不变甚至降低, 这同炉膛温度变化有关, 炉膛温度也有相同变化趋势。

参考文献:

- [1] 王 飞, 薛 飞. 用彩色 CCD 测量火焰温度场的实验研究及误差分析[J]. 热能动力工程, 1998, 13(3): 81-84.
- [2] 姜 凡, 刘 石. 双色法火焰监测分析技术用于火焰温度场的实测试验[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 133-137.
- [3] 周怀春, 姜新生, 肖教芳. 炉膛温度场图像处理实验研究[J]. 中国电机工程学报, 1995 15(5): 295-299.
- [4] CHAR JM, YEN J H. The measurement of open propane flame temperature using infrared technique[J]. Quant Spectrosc Radiat Transfer, 1996, 56(1): 133-144.
- [5] 曾汉才. 燃烧与污染[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992.

(渠 源 编 辑)

制造技术

精轧成形生产齿轮

据《Gear Technology》2005 年 7~8 月号报道, 近年来齿轮工业越来越多地应用非切割方法来生产齿轮工件。这些方法中, 精轧成形看来具有最广泛的应用范围。精轧成形是一种改进齿形精度、齿距精度和滚铣齿轮表面粗糙度的加工技术。高的负荷使齿的表面塑性变形、修匀表面并使它们更精确。

齿轮制造商尝试精轧更大尺寸的齿轮, 但未能得到满足要求的质量。大量的研究和开发工作已由许多齿轮制造公司和研究者完成, 以便观察精轧成形能否更广泛地应用于具有更大齿距的更大的齿轮。但是这些研究未能开发出一种产生高质量齿形的新技术。

通过研究, 作者已开发了一种导轨型轧制过程。在此过程中使用导轨工具来轧制齿轮齿。试验和分析结果表明, 提出的方法减少了齿形误差。

(吉桂明 供稿)

利用 CCD 测量炉膛温度场及 NO_x 排放特性试验研究 = **Experimental Study of the Measurement of Furnace Temperature Fields and NO_x Emission Characteristics with the Help of a Charge-coupled Device (CCD)** [刊, 汉] / GUO Jian-min, LIU Shi, JIANG Fan, et al (Institute of Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 39 ~ 42

Local high temperature in a furnace flame is a major cause leading to an increase in NO_x emissions. Furnace temperatures were measured by using a charge-coupled device (CCD) based pick-up camera with the temperature measurement principle pertaining to a dual-color method. Under various operating conditions an experimental investigation was conducted of the relationship between such factors as boiler load, excess air factor, coal rank, furnace temperature, burner operating mode, etc on the one hand and NO_x emission characteristics on the other. The results of the investigation indicate that with the change in various influencing factors the furnace temperature will undergo corresponding changes and the NO_x emissions also follow different variation laws. The charge-coupled device can effectively monitor the furnace temperature on a real-time basis and diagnose local high temperatures, thus resulting in an improved combustion and a better regulation of operating conditions as well as an effective lessening of NO_x emissions. **Key words:** charge-coupled device, NO_x , boiler

CO_2 稀释燃料对富氧扩散燃烧中 NO_x 生成的抑制作用 = **The Role Played by CO_2 Diluted Fuel in Suppressing NO_x Formation During an Oxygen-enriched Diffusion Combustion Process** [刊, 汉] / YANG Hao-lin (Department of Thermal Sciences & Energy Engineering, China National University of Science & Technology, Hefei, Anhui Province, China, Post Code: 230027), ZHAO Dai-qing, LU Guan-jun (Guangzhou Institute of Energy Conversion under the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, China, Post Code: 510604) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 43 ~ 47

The reduction of NO_x emissions in a high-temperature flame is a key factor for furthering the widespread use of oxygen enriched combustion as a new type of energy-saving combustion technology. Based on the theory of NO_x suppression realized through the use of flue-gas recirculation, etc and with a counterflow diffusion flame serving as an object of investigation the impact on flame characteristics and NO_x formation by CO_2 diluted fuel under various concentrations of enriched oxygen was studied using a model of detailed elementary-reaction dynamics. The results of the study indicate that the impact of the CO_2 diluted fuel on combustion characteristics will tend to be conspicuous with an increase in oxygen concentration in an oxidation agent. Moreover, under a relatively high oxygen concentration the CO_2 diluted fuel can, in addition to maintaining a relatively high flame temperature, effectively reduce NO_x formation and NO_x emission index ELNO. **Key words:** oxygen enriched combustion, fuel dilution, NO_x , numerical analysis

预混天然气小尺度燃烧特性的 CFD 研究 = **A CFD (Computational Fluid Dynamics) Study of the Small-scale Combustion Characteristics of Premixed Natural Gas** [刊, 汉] / XU Kao, LIU Zhong-liang, KANG Tian-fang, et al (Education Ministry Key Laboratory of Heat Transfer Intensification & Energy Conservation under the Institute of Environmental and Energy Engineering of the Beijing Polytechnic University, Beijing, China, Post Code: 100022) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 48 ~ 52

A CFD (computational fluid dynamics) two-dimensional model was employed to study the combustion of premixed natural gas in a small-scale space and the impact of wall heat-conductivity factor and outer wall heat loss on the combustion characteristics. The results of the study indicate that the wall heat conductivity factor and the outer-wall heat loss have a direct influence on the ignition and stability of the flame and the formation of NO_x . As for the premixed natural gas there exists only a zone of very small flow velocity, which can maintain combustion in a channel. Finally, the impact of axial and radial temperature gradient on a combustor was analyzed and, an optimum thermodynamic condition under simulated circumstances has been identified, thereby making it possible to achieve the aim of optimizing a small-sized combustor.