

低 NO_x 高温空气燃烧技术

朱彤¹, 饶文涛², 刘敏飞¹, 张毅勤¹, 张鹤声¹

(1. 同济大学热能工程, 上海 200092; 2. 上海宝钢研究院设备研究所, 上海 201900)

摘要: 低 NO_x 高温空气燃烧技术将传统的低 NO_x 燃烧技术与高温蓄热式燃烧系统有机地结合起来, 具有热效率高、炉内温度分布均匀、 NO_x 排放量低等特点。本文介绍了高温空气燃烧技术, 重点分析了高温空气燃烧技术中的低 NO_x 排放的原理, 并对两种采用烟气再循环和分级燃烧技术的低 NO_x 高温空气燃烧器进行阐述。

关键词: 低 NO_x ; 高温空气燃烧; 蓄热式燃烧器; 燃烧技术

中图分类号: TK223.23 文献标识码: A

1 引言

80年代初, Hot Work公司和British Gas公司开发了一种在工业炉和锅炉上节能潜力巨大的陶瓷蓄热式燃烧器(RCB—Regenerative Ceramic Burner), 用于小型玻璃熔炉上。其后, RCB被应用于美国和英国的钢铁和熔铝行业中。尽管当时这种燃烧器具有 NO_x 排放量大和系统可靠性差等问题, 但由于它能使烟气余热利用达到接近极限的水平, 节能效益巨大, 因此在美国、英国、日本等国家得以推广应用^[1]。

90年代初, 蓄热式空气预热技术在我国工业炉窑上得到成功的应用, 并研制出了自己的专利技术, 取得了显著的经济效益。有关高校、研究部门还对蓄热体材料、结构、传热机理等进行了研究^[2]。但当时人们并没有把它和新型燃烧技术联系起来, 仅仅当作研制一种用于余热回收的特殊烧嘴, 因此, 也就没有把这种燃烧方式与高温燃烧所可能导致的大量 NO_x 排放相联系^[3]。本文着重介绍高温空气燃烧技术中的低 NO_x 技术及其原理。

2 高温空气燃烧技术

蓄热式燃烧系统(High-cycle Regenerative combustion System 简称为HRS)一般要求烧嘴成对安装,

可相对布置, 也可在同一侧, 见图1。当烧嘴A工作时, 加热工件后的高温废气经由烧嘴B排出, 加热蓄热体B, 将排烟温度降低到 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 以下甚至更低。经过一定时间间隔(20 s~200 s)后, 切换阀使助燃空气流经蓄热体B, 充分吸收废气所排放的显热, 通过烧嘴B完成燃烧过程; 同时, 烧嘴A和蓄热体A转换为排烟和蓄热装置。通过这种交替运行方式, 实现蓄热式燃烧和空气的高温预热, 可见, 助燃空气吸收废气的显热愈多, 则系统热效率愈高。日本研究人员用蜂窝式蓄热体回收废气余热, 使被加热的空气温度达到 $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ ~ $1\ 100\text{ }^\circ\text{C}$, 而加热炉的排烟温度降为 $150\text{ }^\circ\text{C}$ ~ $200\text{ }^\circ\text{C}$, 大大提高了炉子的热效率。

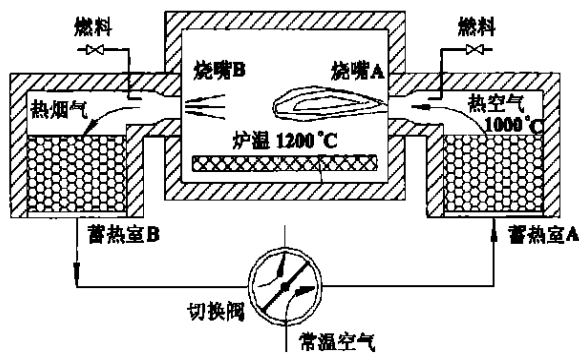


图1 蓄热式燃烧系统原理图

然而依据现有理论可知, 随着送入炉膛的空气温度提高, 势必提高燃料燃烧的理论燃烧温度, 将使热力型 NO_x 的排放量急剧增大, 与环境保护的要求背道而驰。如何解决这个矛盾是摆在热能工作者面前的一个攻关课题。

80年代末, 日本人提出了一种新概念燃烧技术——高温空气燃烧技术^[4](High Temperature Air Combustion 简称为HTAC, 或Highly Preheated Air Combustion 简称为HPAC), 该技术主要包括两项基本技术手段: 一是燃烧用空气最大限度回收(或称极

限回收)废气的显热;二是采用燃料在低氧气氛下燃烧技术来降低NO_x的生成量。

为防止蓄热器和切换阀的烟尘粘污,目前应用HTAC技术的工业炉中绝大部分使用的是气体燃料。在日本一些现代化冶金企业的商业应用结果表明:HTAC技术可节能40%~50%,单位能耗量减少30%,NO_x排放量降低到40~70 mg/m³的水平,炉膛内温度分布均匀,相关生产设备的尺寸大幅度减小,燃烧噪音降低。

3 低NO_x燃烧技术

燃料燃烧过程中生成的NO_x,按其形成可分为三种:热力型NO_x、快速型NO_x和燃料型NO_x。气体燃料燃烧过程主要生成的是热力型NO_x。传统的抑制热力型NO_x的燃烧技术有:低氧燃烧法、分段燃烧法、烟气再循环法等。这三种方法均可理解为偏离化学当量燃烧法,即在局部的燃烧区域中化学当量比不在燃烧反应化学当量比范围,从而抑制NO_x的生成。

在高温空气燃烧技术中,由于燃烧用空气被预热到很高的温度(≥800℃),大大超过了燃气的着火温度,因而燃气只要遇到氧就可发生剧烈化学反应,着火、燃烧的稳定性极好,日本长谷川敏明对丙烷燃烧过程的研究表明:当空气温度高于900℃、含氧量5%时,仍可获得稳定的燃烧火焰^[3]。假如助燃空气中氧浓度比较高,则燃料中的C、C_mH_n、CO、H₂等可燃成分与氧混合加快,反应生成CO₂和H₂O,同时也将大量生成NO_x。假如助燃空气中氧浓度比较低,则燃烧过程将受到燃气与氧的混合过程控制。由于燃气与氧气的燃烧反应活化能低于氧原子与氮气的反应活化能,所以,燃气首先与氧气发生燃烧反应;只有当氧气有剩余时,才进行氧原子和氮原子的反应,生成NO_x。只要合理控制炉内氧浓度的分布,使氧浓度在整个炉膛空间分布均匀且较低,则燃烧过程将充满整个炉膛空间,不会出现局部炽热点,抑制了燃烧过程的最高温度,使整个炉膛内温度分布均匀。Jianwei Yuan和Ichiro Naruse的数值模拟结果表明:氧浓度为4%时(采用氮气稀释空气),火焰最高温度与平均温度的比值不大于1.1,而氧浓度为21%时,燃烧器出口附近火焰最高温度与平均温度的比值为1.57^[6]。与传统火焰温度分布相比,高温低氧燃烧过程中火焰的最高温度相对较低,但整个炉膛内的平均温度较高,强化了炉内换

热。实际研究表明,当燃烧温度低于1300℃时,热力型NO_x生成量比较少。这样,尽管空气被预热到很高温度,但由于火焰的最高温度相对较低,则抑制了NO_x的生成,如空气预热到1150℃,空气含氧由21%降到2%时,NO_x的生成量由3750 mg/m³减少到54 mg/m³,见图2^[7]。

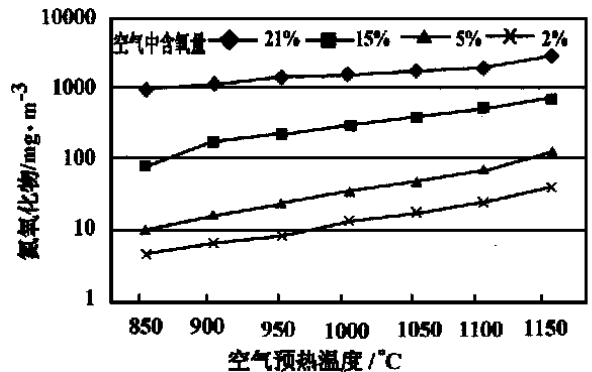


图2 不同含氧量下空气预热温度与氮氧化物生成量关系

4 低NO_x高温空气燃烧器

4.1 FDI型燃烧器和FIOX型燃烧器

FDI(Fuel Direct Injection)型燃烧器是日本研制的低NO_x高温空气燃烧器^[8],热功率多在1MW以下,见图3。它主要是利用一组喷管作为燃烧器的烧嘴,所喷出的高速气流卷吸炉内的烟气,形成炉内烟气再循环,从而降低空气射流中的氧浓度,抑制NO_x的生成。实验研究表明,提高空气射流速度,或者扩大空气喷口之间的间距,并将喷管平行布置(空气喷管交角为0°),以推迟燃气与空气的混合,都可以减少NO_x的排放,试验结果见图4。

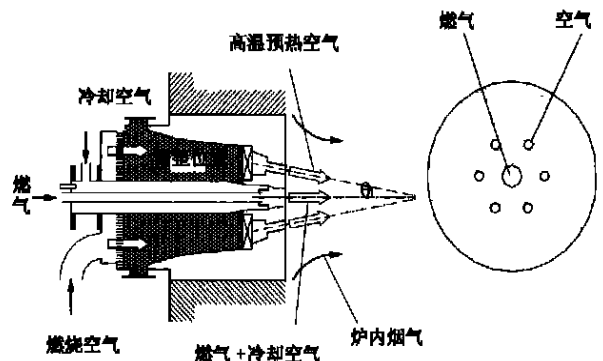


图3 FDI型燃烧器结构

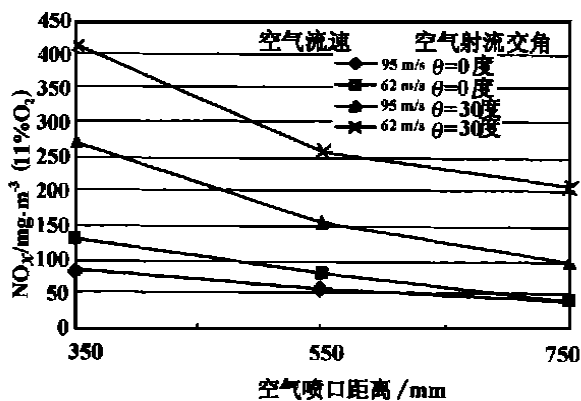


图 4 空气喷口距离与空气流速对氮氧化物生成量的影响

德国研制的 FLOX 燃烧器^[9] (Flameless Oxidation Burner) 与 FDI 燃烧器的工作原理一致, 将普通高速燃烧器的环形空气喷口改为一组围绕燃气喷口的多个小喷口, 扩大空气射流与炉内烟气的接触面积, 增大空气射流对炉内烟气的卷吸量, 降低空气射流中的氧浓度, 并且通过加大空气喷口间距推迟空气与燃气的混合, 从而降低火焰的最高温度。由图 5 可见, 空气预热到 750 °C, 普通高速燃烧器的火焰最高温度高于 2 000 °C, 而 FLOX 燃烧器的火焰最高温度只有 1 400 °C 左右。因此, FLOX 燃烧器的 NO_x 排放量较低是完全可以理解的。

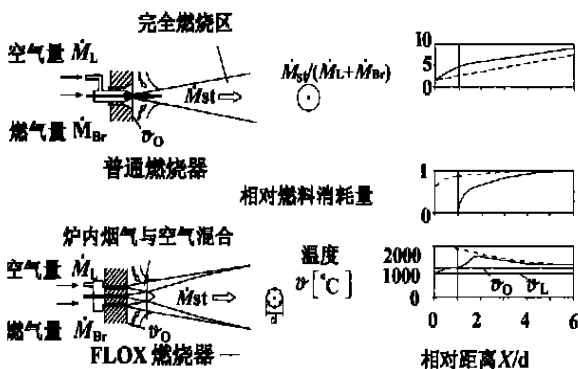


图 5 普通燃烧器与 FLOX 燃烧器的比较

4.2 HRS-DL 型燃烧器

日本研制的 HRS-DL 型燃烧器结构^[10] 见图 6, 热功率多在 5 MW 以下。其特点是: (1) 空气从烧嘴中心区直接以高速喷出, 促进炉内烟气再循环; (2) 燃气喷口不放在烧嘴砖通道内, 而是缩在烧嘴砖的后面, 有效地防止了蓄热期流入的高温烟气对喷口的氧化作用或结焦; (3) 一次燃气 (F1) 沿烧嘴砖通

道的内表面喷出, 二次燃气 (F2) 是在烧嘴通道的端面直接喷向炉内, 调节 F1 和 F2 的比例可以使火焰的形态和炉子的内形相适应。

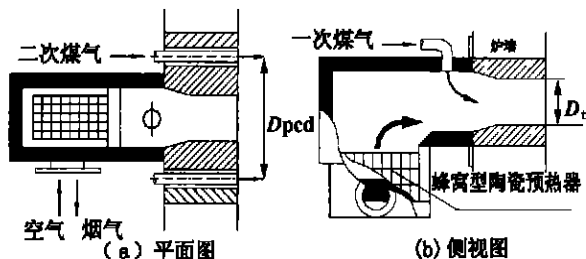


图 6 HRS-DL 型燃烧器结构

从应用结果来看, 空气流速越高, NO_x 含量越低。F1 方式主要用于冷炉升温 (炉温 800 °C 以下), 正常情况下 (炉温 800 °C 以下) 就切换成 F1 和 F2 组合方式。F1 的燃烧属于富氧燃烧, 在高温条件下, 将很快完成, 同时生成一部分 NO_x, 所以, 要求一次燃气量 F1 比 F2 少得多。燃烧后的烟气在流经优化设计的喷口后, 形成高速烟气射流和周围的卷吸回流流动。而大量燃气则通过二次燃气通道 F2 喷入炉内, 此时, 二次燃气将与含氧浓度较低的烟气混合。尽管使用了高温空气, 但没有出现局部的炽热高温区, 燃烧是在温度相当均匀的区域进行, 抑制了 NO_x 的生成。综上所述, HRS-DL 型燃烧器综合采用了分级燃烧和烟气再循环的技术手段。

总之, 低 NO_x 高温空气燃烧器与传统的低 NO_x 燃烧器相比, 其喷口结构基本相似, 但射流速度更高, 喷口间距更大, 以保证燃气与空气混合点的位置在更低的氧浓度范围内, 这是因为空气预热后的温度远高于燃气着火温度, 保证了燃气着火和燃烧稳定性。

5 结语

低 NO_x 高温空气燃烧技术将传统的低 NO_x 燃烧技术与蓄热式燃烧系统有机地结合起来。蓄热式燃烧系统不仅最大限度回收烟气所排放出的显热, 提高助燃用空气的温度, 而且它为燃气低氧燃烧过程中的着火、燃烧稳定性提供了保障, 因而可以组织过量空气系数略大于 1.0 的低氧燃烧, 大幅度降低 NO_x 的排放。高温低氧空气燃烧技术正在全世界引起极大的关注, 在气体、液体燃料燃烧技术开发中具有极大的潜力, 在固体燃料气化、生物质燃料的

(下转第 321 页)

达到某一中间浓度所需的时间,

$$t = \frac{m}{m_s} \cdot \ln \left[\frac{C_\infty - C_{ca}^0}{C_\infty - C} \right]$$

如果一个反应系统 m_s 为 1 kg/s, 循环倍率为 20, 那么系统的物料量 m 应在 100 kg 以上, 并假定初始亚硫酸钙和 CaO 的含量均为零, 由式(10)可粗略计算出亚硫酸钙和 CaO 达到与平衡浓度的不同比值所需时间, 见表 3。

表 3 亚硫酸钙和 CaO 达到某一中间浓度所需时间(初始浓度均为零)

所达平衡浓度的百分比 / %	70	80	90	95	99
所需时间 / s	120	161	230	300	460

事实上, 在动态过程中, 亚硫酸钙的生成率 N_{sub}^* 和脱硫效率 η_s 不是常数, 一个脱硫反应所生成的固体物也不可能瞬间反应在系统中混合均匀, 因此实际过程中所需要的时间比计算值长, 对实际过程上述计算结果还需进行修正。

4 结论

(1) 只要分离器的效率与设计的循环倍率相匹配, 循环流化床脱硫反应器内固体床料就可以达到质量平衡;

(2) 当有脱硫反应存在时, 只要按脱硫产物的生成量增加一定比例的排料就能维持系统质量平衡;

(3) 循环流化床脱硫反应器内固体床料的化学成分在稳定状态下是平衡的。当工况发生变化时, 床料中亚硫酸钙及 CaO 的含量的变化是一个动态过程, 过渡到某一中间状态的时间与床料的总质量、加入的固体物料、初始亚硫酸钙及 CaO 的含量、脱硫效率及亚硫酸钙的生成率有关。

参考文献:

- [1] 苏红梅. 循环流化床锅炉的模型化分法[D]. 北京: 清华大学热能工程系, 1991.
- [2] 李政. 循环流化床锅炉通用整体数学模型、仿真与性能预测[D]. 北京: 清华大学热能工程系, 1994.
- [3] GU Y P, NIU C S, XU J Y. The establishment of circulating-rate of CFB boiler and its influences upon the combustion[A]. In: Xu X C, Zhou L X, eds. Proceedings of the 3rd International Symposium on Coal Combustion[C]. Beijing: Science Press, 1995. 399~403.
- [4] 岑可法. 循环流化床锅炉理论设计与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [5] 谭天, 梁凤珍. 工业通风除尘技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.
- [6] 樊保国. 循环流化床烟气脱硫技术的实验研究[D]. 北京: 清华大学热能工程系, 1996.

(孙显辉 编辑)

(上接第 330 页)

开发利用中将发挥重要的作用, 它必将促进我国能源利用率的提高和环境保护的全面发展。

*文中的立方米均为标准立方米

参考文献:

- [1] 周怀春. 高温空气燃烧技术——21世纪关键技术之一[J]. 工业炉, 1998(1): 19-27.
- [2] 于娟, 施伯红, 宋玉宝, 等. 低 NO_x 燃烧技术对填充球蓄热室传热性能的影响[J]. 工业加热, 2000(2): 8-11.
- [3] 祁海鹰, 徐旭常. 中国开发应用高温空气燃烧技术的前景[A]. 高温空气燃烧新技术讲座[C]. 北京: 中国科学技术协会工程学会, 1999, 10: 192-205.
- [4] 萧泽强, 蒋绍坚, 周子卫, 等. 高温低氧空气燃烧过程试验研究和数据计算[A]. 高温空气燃烧新技术讲座[C]. 北京: 中国科学技术协会工程学会, 1999, 10: 116-137.
- [5] MASASHI KATSUKI, TOSHIKI HASEGAWA, The science and technology of combustion in highly preheated air[A]. 27th Symposium

(Internation) on Combustion[C]. Pittsburgh: the Combustion Institute 1998, 3135-3146.

- [6] JIANWEI YUAN, ICHIRO NARUSE. Effects of air dilution on highly preheated air combustion in a regenerative furnace[J]. **Energy & Fuels** 1999, 13(1): 99-104.
- [7] GUPTA A K, BOLZ S, HASEGAWA T. Effect of air preheat temperature and oxygen concentration on flame structure and emission[J]. **J of Energy Resources Technology**, 1999(9): 209-216.
- [8] 栗原孝好, 仲町一郎. FDI リゾエネレイテイブバーナの開発[J]. 工业加热, 1996 33(5): 39-47.
- [9] DR-ING, JOACHIM. Bumer design for flameless oxidation with low NO -formation even at maximum air preheat[J]. **Industrial Heating**, 1995(1): 24-28.
- [10] 田中良一, 森田光宣. 高性能工业炉开发プロジェクトの現状と今後の方向[J]. 工业加热, 1997, 34(1): 15-27.
- [11] 须藤 淳 多田 健. 蜂窝型蓄热式燃烧系统的开发和应用[J]. 工业炉, 1999 21(2): 50-53.

(辉 编辑)

tube connected in series. An experimental study was conducted with air and water serving as working mediums. The results of the study indicate that the pressure drop characteristics of the vertical descending Venturi tube in a ring-shaped flow zone have been found to be more approximate to the calculation results of the uniform-phase flow model. Under the proposed method the relative error of measurement within the range of dryness given in the paper is smaller than $\pm 10\%$.

Key words: gas-liquid two-phase flow, mass gas-content rate, dryness, measurement

“煤气化—无烟燃烧技术”的原理及其应用= **Basic Theory of “Gasification—Smoke-free Combustion Technology” and its Application in the Technical Modification of Boilers** [刊, 汉] / SUN Dong-hong (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), HAO Zhi-jing, WANG Qing (Northeast Electric Power Institute, Changchun, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 325 ~ 327

An analysis is given of the present status of development of Chinese industrial boilers. On this basis briefly covered in this paper is the topic “gasification—a smoke-free combustion technology” and its application in the technical modification of industrial boilers. The implementation of that technology has opened up a new approach for the technical retrofit of industrial boilers, which can contribute not only to smoke-free and low-ash combustion but also to significant energy savings.

Key words: gasification, smoke-free combustion technology, industrial boiler, technical modification or retrofit

低 NO_x 高温空气燃烧技术= **Low NO_x Combustion Technology of High-temperature Air** [刊, 汉] / ZHU Tong, LIU Min-fei (Thermal Energy Engineering Department, Tongji University, Shanghai, China, Post Code: 200092), RAO Wen-tao (Equipment Research Institute under the Baoshan Iron and Steel Corporation-affiliated Research Academy, Shanghai, China, Post Code: 201900) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 328 ~ 330, 321

By organically integrating traditional low NO_x combustion technology of high temperature air with a high-temperature thermal-storage type combustion system, the resulting low NO_x high-temperature air combustion technology features a high thermal efficiency, a uniform distribution of temperature within the furnace, and low NO_x emissions, etc. The present paper deals with the high-temperature air combustion technology with a focus on the analysis of basic principles of low NO_x emissions specific to the high-temperature air combustion technology. In addition, also depicted are two types of low NO_x high-temperature air combustors incorporating respectively gas recirculation and graded combustion technology. **Key words:** low NO_x , high-temperature air combustion, thermal storage type combustor, combustion technology

KA-13D 燃气轮机注水系统的应用= **The Application of a Model KA-13D Gas Turbine Water Injection System** [刊, 汉] / LONG Xian-lin, JIA Xi-long (Desheng Electric Power Plant Co. Ltd., Shunde, Guangdong Province, China, Post Code: 528300) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 331 ~ 333

On the basis of the operating experience of a power plant over the years an analysis was conducted of the influence of water injection or no water injection on the heat resistant pad of combustor components as well as on the components of a post-cycle. The water injection has been applied to the combustor of a gas turbine operating under combined cycle power plant conditions. In this context, expounded are the merits and demerits of employing water injection or no injection into the combustor of the above-mentioned gas turbine. **Key words:** gas turbine, combustor, combined cycle power plant, heat resistant pad

200 t/h D 型锅炉设计技术特点= **Technical Features of the Design of a 200 t/h D-shaped Boiler** [刊, 汉] / YUAN Mei-yan, LI Jing-shi (Harbin Boiler Works Company, Ltd., Harbin, China, Post Code: 150090) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 334 ~ 335

Presented in this paper is the brief description of a 200 t/h D-shaped boiler, highlighting the structural layout of the boiler proper, the system flow path, low steel consumption, high thermal efficiency and water circulation head of the boiler.

Key words: structural design, boiler system, water circulation head of boiler