

高温无焰燃烧及其火焰特性的实验研究

艾元方¹, 蒋绍坚¹, 周子民¹, 汪洋洋²

(1. 中南大学 应用物理与热能工程系, 湖南 长沙 410083; 2. 株洲工业炉制造公司, 湖南 株洲 412005)

摘要: 对丙烷的高温低氧空气燃烧及其火焰特性进行实验研究, 并对其工业应用进行探讨。研究表明: 在助燃气流温度高于 800 °C、含氧体积浓度低于 15% 的条件下燃烧, 火焰体积明显增大; 火焰边缘无稳定形态; 火焰亮度减弱, 颜色明显改变; 含氧浓度越低, 稳定燃烧所需助燃气流温度也越高。该种燃烧工业应用的关键在于用高效蓄热体吸收同炉温烟气显热以产生高温空气, 同时组织炉内低氧浓度气流。

关键词: 高温空气燃烧; 火焰特性; 实验研究

中图分类号: TQ038

文献标识码: A

1 前言

在温度高于 800 °C 和含氧浓度低于 15% 条件下燃烧, 即高温空气燃烧或高温无焰燃烧, 可获得与传统燃烧完全不同的火焰类型, 它具有炉内均匀的温度分布、低氮氧化物生成和低燃烧噪声等多重优越性。高温无焰燃烧已在日本获得了广泛的认同, 被认为是节能、减少污染物排放和缩小炉子尺寸的一项革命性的技术, 并正开始受到其它国家的重视^[1]。目前此技术已被广泛地应用于各种热工炉窑中, 如熔炼炉、热处理炉、均热炉、石油化工热重整加热器、玻璃熔化炉、干燥炉、锅炉、陶瓷加热炉等。我国是能源消耗大国, 合理利用能源, 有效地控制污染物的生成与排放具有十分重要的意义。在我国, 开展高温无焰燃烧及其火焰特性的实验研究, 是工业炉窑广泛应用此技术的前提。

2 实验装置及实验方法

实验装置包括助燃气流预热段及加热系统、炉膛及其保温系统、助燃气流供应系统、丙烷供应系

统、温度检测及显示仪表和数码相机, 具体连接见图 1。

为产生高温空气, 采用 $\Phi 5$ mm 电阻丝加热助燃气流。预热段截面尺寸 90 mm × 40 mm, 长 3 m, 电阻丝布置在通道内。助燃气流预热温度由调节供电调压器输出电压控制, 最大加热功率约为 20 kW。

炉膛内腔尺寸为 200 mm × 80 mm × 260 mm。纯度为 99.99% 的丙烷通过出口尺寸为 $\Phi 1.5$ mm 的喷口与助燃气流成 90° 交角进入炉膛。烟道尺寸为 90 mm × 80 mm。助燃气流的预热温度由铂铑 10—铂热电偶测定。为了对燃烧火焰进行观察和照相, 炉

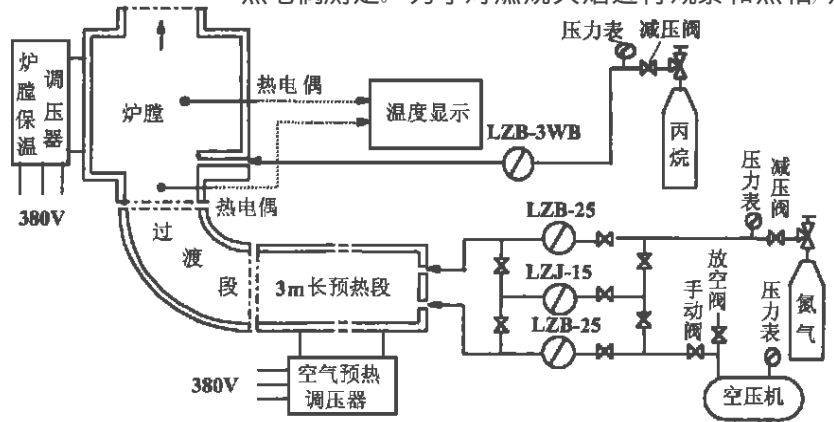


图 1 高温低氧空气燃烧火焰特性研究实验装置图

膛的一个 200 mm × 260 mm 侧面由双层石英玻璃组成, 火焰图象采用数码相机进行拍摄。为防止助燃气流进入炉膛后温度急剧下降, 炉膛四周布置总功率约为 8 kW 的四根保温电阻丝。炉膛的一个 200 mm × 80 mm 侧面正中心开有一个 $\Phi 6$ mm 的测温孔。

为实现低氧燃烧条件, 采用氮气作为稀释气体。助燃气体(空气或空气与氮气的混合气体)的总流量恒定为 15 m³/h。空气与氮气的流量均由 LZB-25 流量计进行调节, 为保证读数精度, 当空气或氮气的流量低于 6 m³/h 时, 用 LZJ-15 流量计进行测量调节。丙烷流量恒定为 0.053 m³/h, 用 LZB-3WB 流

量计进行调节。在混合气体含氧浓度为 2% 时, 空气过剩系数仍然大于 1, 保持了炉膛内发生完全燃烧。

3 实验结果及分析

助燃气流含氧体积浓度的变化范围为 21% ~ 2%, 助燃气流预热温度的变化范围为 560 ~ 1 000 °C, 用相机拍摄的火焰照片整理成图 2。

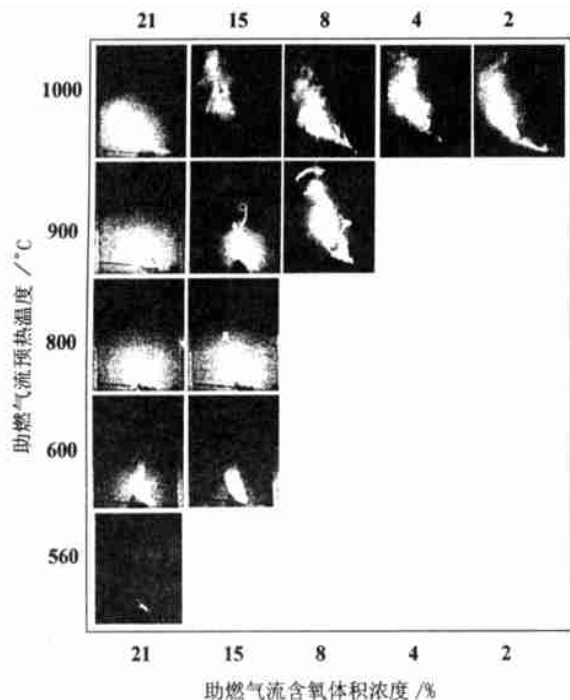


图 2 高温低氧空气燃烧火焰照片图

3.1 火焰体积

助燃气流预热温度及氧气浓度是影响火焰体积的主要因素。氧气浓度为 21% 时, 也即普通空气, 各预热温度下的火焰均短小紧凑, 并不能使火焰体积明显增大。当预热温度高于 800 °C 后, 随着氧气浓度的降低, 火焰逐渐变大; 当预热温度为 1 000 °C, 氧气浓度降为 15% 时的火焰体积已成倍扩大, 进一步降低氧气浓度, 火焰甚至进入了烟道。只有在将预热温度提高到一定温度以上的同时降低氧气浓度, 才能明显增大火焰体积。

3.2 火焰亮度与颜色

助燃气流预热温度及氧气浓度是影响火焰亮度与颜色的主要因素。普通空气燃烧的各火焰亮度均很强, 而且预热温度越高, 火焰越刺眼, 即火焰的发光强度越大。高温低氧空气燃烧的火焰亮度明显减

弱, 明显低于同温度下普通空气燃烧的火焰亮度, 看上去比较柔和。

随着预热温度的升高和氧气浓度的降低, 火焰颜色由黄色变为兰色、兰绿色、绿色、甚至无色。普通空气燃烧的各火焰颜色以黄色为主, 夹杂一些兰色; 氧气浓度降为 15%, 预热温度为 800 °C 时, 火焰颜色则以兰绿为主; 降低氧气浓度至 5%, 助燃气流温度提高到 1 000 °C, 火焰基本上呈绿色; 氧气浓度降至 2% 时, 火焰颜色十分浅, 在炉壁的映衬下, 几乎看不到火焰。只有在提高助燃气流温度时, 同时降低氧气浓度, 才能使火焰亮度明显减弱, 色差减小。

3.3 火焰界面

图 2 各火焰均由喷嘴出口处开始由小变大, 但高温低氧空气条件下的火焰主体在形状上明显不同, 呈浓雾状, 其边缘无稳定的形态, 为动态火焰。普通空气燃烧的各火焰均有基本稳定的形状, 为静态火焰。对普通空气燃烧, 燃料分子在喷嘴附近的较小空间内便与足够多的氧气分子相遇, 来不及扩散到炉膛较大空间就被全部氧化。对低氧燃烧, 由于氧气分子被大量惰性气体分子所分散, 喷嘴附近的氧气分子数量已明显少于普通空气燃烧时的氧气分子数量, 只有少量的燃料分子在喷嘴附近与氧气分子相遇发生燃烧, 而大量的燃料分子须扩散到炉膛大空间中才能与氧气分子相遇发生燃烧。因此, 高温低氧空气条件下燃烧的各火焰体积明显增大。

3.4 火焰的稳定性

随着氧气浓度的降低, 稳定燃烧所需的助燃气流预热温度逐渐提高。氧气浓度降低到 15% 时, 最低预热温度为 600 °C; 氧气浓度降为 8% 时, 最低预热温度提高到 900 °C; 而氧气浓度降为 2% 时, 最低预热温度提高到 1 000 °C。这表明, 在以氧气浓度为横轴, 预热温度为纵轴的坐标图上, 存在一条曲线, 以它为界, 左上区域为稳定燃烧区, 右下区域为非燃烧区。

4 高温无焰燃烧的工业应用

4.1 高温无焰燃烧优越性

高温低氧空气燃烧, 尤其是助燃气流温度高于 800 °C、含氧体积浓度低于 15% 的条件下燃烧, 火焰亮度明显减弱, 局部高温区趋于消失, 火焰峰值温度趋于下降, 氮氧化物排放浓度趋于下降。燃烧火焰

体积明显增大, 炉膛内温度分布更均匀, 炉子平均温度提高, 火焰整体对外辐射能力大大增强, 传热效率大大提高, 单位产品能耗可降低, 炉窑尺寸可缩小。因此, 工业炉窑上采用该种燃烧技术可收到节能(也即减少二氧化碳)、降低污染物氮氧化物排放的效果。

4.2 高温无焰燃烧的应用条件

组织高温无焰燃烧, 须稳定地产生 800 °C 以上的助燃空气, 并使得炉内燃烧气流的含氧体积浓度低于 15%, 以实现完全燃烧。

工业应用中, 以同炉温的(超过 800 °C)烟气为热源, 让助燃气流和烟气周期性地通过高效蓄热体, 从而可使助燃气流温度从室温升高到 800 °C 以上。这样一方面要求蓄热体应经济紧凑, 另一方面因助燃气流预热后温度与炉温相差不大(几乎是极限换热), 还应具有高速蓄热和极限换热能力。炉内烟气强循环可降低燃烧气流含氧体积浓度, 且经济性好。在组织炉内气流时, 燃烧和助燃气流的流量、送入方式(速度大小和方向、位置)、炉膛的几何形状和几何参数等至关重要, 但可通过数值计算辅以实验研究来解决。

文献[2]报道, 日本在陶瓷球蓄热体的基础上, 已研制出高效经济紧凑的蜂窝式陶瓷蓄热体, 大幅度地降低了高温空气的生产成本。文献[3]报道了一种结合分区燃烧、炉内烟气强循环的新型蓄热式燃烧嘴, 为高温无焰燃烧的工业应用创造了有利条件。

4.3 高温无焰燃烧的应用范围

对普通空气燃烧, 已有用陶瓷球蓄热体产生

1 000 °C 以上的高温空气的窑炉, 倘若优化燃料与助燃气流的送入方式, 控制两者的流量, 以创造低氧燃烧条件, 可实现高温无焰燃烧, 只是节能降污效果未能达到最大值。由于高温助燃气流的产生要利用同炉温的烟气, 而传统炉窑的同炉温的烟气显热是通过体积庞大的对流换热装置来回收的, 若在传统炉窑上应用高温无焰燃烧技术, 将彻底取消烟气余热回收用的对流换热区段, 导致其结构的根本改变, 故较适用于新建的工业炉窑。另外蓄热体存在烟气粉尘堵塞气流通道问题, 故较适用于燃用清洁或较清洁的气体或液体燃料的工业窑炉。

5 结束语

本实验验证了高温低氧条件下, 尤其是在助燃气流温度 800 °C 以上、含氧体积浓度低于 15% 条件下的燃烧火焰特性。该种燃烧应用的关键在于开发高效蓄热体, 用蓄热体吸收同炉温烟气显热以产生高温空气, 同时组织炉内低氧浓度气流。该种燃烧技术较适用于新建的燃用清洁或较清洁的气体或液体燃料的工业炉窑。

参考文献:

- [1] 周怀春, 盛锋, 姚洪, 等. 高温空气燃烧技术——21 世纪关键技术之一[J]. 工业炉, 1998, 20(1): 19~31.
- [2] 刘夏丹, 于宏, 周琦, 等. 陶瓷蜂窝体的结构特性及其蓄热燃烧系统的应用[J]. 冶金能源, 1999, 18(4): 28~31.
- [3] 马小茜, 张凌. HTAC 的关键技术及其高效低污染特性分析[J]. 钢铁, 1993, 34(9): 60~63.

(何静芳 编辑)

欢迎订阅 2002 年《燃气轮机技术》杂志

——(ISSN 1009-2889/CN32-1393/TK) 中文核心期刊(动力工程类)

《燃气轮机技术》是我国燃气轮机行业的技术刊物, 该刊由南京燃气轮机研究所主办, 主要刊登与燃气轮机有关的科研开发应用、设计制造、新材料新工艺、安装调试运行中的成果及论文和国内外动态信息。形式多样, 深入浅出, 是燃气轮机发电站、天然气增压站、透平制造厂、科研院所、电力设计院、电力建设公司的科研人员、技术人员、运行人员、管理人员和领导干部的实用读物, 也可供能源、交通、钢铁与石化等部门的工作人员参考。

《燃气轮机技术》为季刊, 季末出版, 全年四期, 为大 16 开 64 页, 全年定价 50 元(含邮费), 欢迎订阅, 欢迎刊登广告及撰稿。需要订阅的单位或个人, 可直接将订款由银行汇入南京燃气轮机研究所(银行帐号: 南京工商银行城东办 4301012019001067469 并注明订阅杂志), 或由邮局汇款, 地址为: 南京中央北路 47 号南京燃气轮机研究所财务部, 邮政编码 210037。

高风温无焰燃烧及其火焰特性的实验研究= Experimental Study of High-temperature Air and Flameless Combustion and Its Flame Characteristics [刊, 汉] / AI Yuan-fang, JIANG Shao-jian, ZHOU Jie-min, et al (Applied Physics and Thermal Energy Engineering Department, Zhongnan Industrial University, Changsha, China, Post Code: 410083), WANG Yang-yang (Zhuzhou Industrial Furnace Manufacturing Co., Zhuzhou, Hunan Province, China, Post Code: 412005) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(6). — 615 ~ 617

An experimental study was conducted of the high-temperature and low-oxygen air burning of propane and its flame characteristics along with a discussion of its possible industrial applications. The results of the study indicate that when burning at a combustion-assisting air temperature in excess of 800 °C and oxygen-containing volume concentration lower than 15% the flame volume was markedly enlarged. Meanwhile, the flame boundary was found to be unstable with the flame luminosity being weakened and its color significantly changed. The lower the oxygen concentration, the higher will be the temperature of the combustion-assisting air, which is needed for achieving a stable combustion. The key to the industrial application of this new combustion process consists in the use of a highly effective regenerator to absorb the latent heat of gases with the same temperature as that of the furnace, thereby producing the high-temperature air. In the meanwhile, low oxygen-concentration airflow is also being created in the furnace. **Key words:** high-temperature air combustion, flame characteristics, experimental study

钙基脱硫剂孔隙分形特性的实验研究= Experimental Investigation on Fractal Properties of Pore Structure in Calcium-based Sorbents [刊, 汉] / MIAO Ming-feng, SHEN Xiang-lin (Education Ministry Key Lab of Clean Coal-based Power Generation and Combustion Technology under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(6)—618 ~ 621

Fractal dimension, as an important parameter describing a fractal structure, reflects the regularity degree of a structure. By way of experiments investigated is the effect on pore structure fractal dimension of calcium-based sorbents under calcination conditions of various temperatures, atmospheres and sintering durations as well as the effect of fractal properties on the sulfating ability of the sorbents. The test results show that calcination temperature has a relatively small influence on CaO pore structure. The fractal dimension of the CaO pore will decrease with the increase in CO₂ concentration in the calcination atmosphere and also decrease with the prolongation of the sintering time. The quantity of inaccessible pores formed during the process of sorbent sulfation will increase with an increase in the fractal dimension. **Key words:** calcium-based sorbent, fractal dimension, pore structure

进水温度对汽液两相流激波升压特性影响的实验研究= Experimental Study of the Influence of Inlet Water Temperature on the Shock Wave Pressure-rise Characteristics of Steam-water Two-phase Flows [刊, 汉] / LIU Ji-ping, YAN Jun-jie, CHEN Guo-hui, et al (Energy and Power Engineering Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(6)—622 ~ 624

Through the use of an experimental method the influence of inlet water temperature on the shock wave pressure-rise characteristics of steam-water two-phase flows has been investigated. During the tests steam was extracted from a cogeneration plant to serve as the power source. A shock-wave pressure-rise device of the two-phase flow is composed of a steam nozzle, a mixing chamber and relevant valves and piping. An inlet water critical temperature has been discovered in the course of the tests. If the inlet water temperature is greater than the critical value, the pressure-rise characteristics of the above-cited pressure-rise device will decrease dramatically. **Key words:** steam-water two-phase flow, shock wave, injector unit

130 t/h 煤粉锅炉风—粉在线监测系统的应用和研究= The Research and Application of an air/pulverized Coal On-line Monitoring System for a 130 t/h Pulverized Coal-fired Boiler [刊, 汉] / WANG Qiang, ZHOU Nai-jun