

高温空气燃烧若干因素对 NO_x 生成量的影响

张福宝, 罗永浩, 胡元, 段佳

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 高温空气燃烧的关键技术之一是获得低氧环境, 以降低 NO_x 生成量。通过对与高温空气燃烧技术有关的稀释剂、燃料射流和空气射流速度、燃料射流倾斜角度、燃烧空气散布角、燃料喷嘴和空气喷嘴之间的距离、空气预热温度、燃料预热温度和过量空气系数等因素进行分析, 总结了一些因素对 NO_x 生成量的影响, 可以为工程技术改造提供建议, 实现节能和环保的双重效果。

关 键 词: 高温空气燃烧; NO_x ; 环保

中图分类号: TK16
文献标识码: A

1 引 言

高温空气燃烧(High Temperature Air Combustion, HiTAC)是 20 世纪 90 年代初, 日本工业炉协会(Nippon Furnace Kogyo Kaisha Ltd., NFK) 在田中良一领导下所开发出来的一项新型燃烧技术, 其主要特征就是充分利用排烟余热将送入空气加热至 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 以上(有的已达到 1 600 K), 同时排烟温度降低到 200 $^{\circ}\text{C}$ 以下, 使得燃料的热利用率提高了 40% 左右^[1]; 此外, 通过对烧嘴以及燃料、空气射流一些参数的优化, 可以使燃气在氧气浓度较低的环境中燃烧, 达到降低 NO_x 的目的。目前, 此项技术在国际上已经引起了广泛关注, 我国是从 20

世纪 90 年代末期开始研究应用此技术, 但与国际发达国家相比, 还有很大的差距, 同时我国是一个耗能大国, 因此, 很有必要对与高温空气燃烧技术有关的技术因素进行总结, 以指导工业炉的改造, 达到节能和环保双重目的。

2 NO_x 排放量的影响因素分析

影响 NO_x 排放量的因素很多, 主要有稀释剂、燃料射流和空气射流速度、燃料射流倾斜角度、燃烧空气散布角、燃料喷嘴和空气喷嘴之间的距离、空气预热温度、燃料预热温度和过量空气系数等。下面将详细介绍这些因素的影响。

2.1 稀释剂

稀释剂是一种惰性气体, 文献[2]中, 在相同的空气预热温度和氧气浓度条件下, 分别采用了氮气、二氧化碳、氦气、氩气和烟气做为稀释剂, 证明了最大火焰温度和 NO_x 生成量与稀释剂的选取有很大关系。其中二氧化碳抑制 NO_x 生成的能力最强; 其次是烟气、氮气和氦气(如图 1)。其原因是二氧化碳的热容最高, 热容是影响 NO_x 排放量的最重要因素; 氮气和氦气的热容相差不多, 但氦气稀释火焰最大温度

较高。文献[3]中也得到了类似的结果, 指出了在抑制 NO_x 生成能力方面, 二氧化碳最强, 氮气居中, 氦气最差。

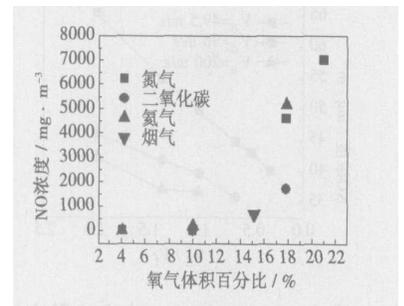


图 1 稀释剂对 NO_x 浓度的影响

2.2 燃料射流和空气射流速度

工业炉中低氧环境产生的原因是高速空气射流卷吸周围烟气, 使空气在与燃料接触反应之前先与烟气混合, 这样就延缓了空气与燃料的混合, 避免了在喷口附近产生局部高温区, 减少了热力型 NO_x 的产生^[4]。在文献[5~6]中, 研究了速度梯度对气体混合的影响, 指出: (1) 当燃料和空气的比例分数相接近时, 混合速率最慢; (2) 最大混合时间与速度梯度成反比; (3) 速度梯度对燃料向空气中扩散的影响程度要大于对空气向燃料流中扩散的影响程度。在文献[7~8]中阐述了速度对 NO_x 排放量的影响, 指出在空气和燃料速度比一定的条件下, 空气速度越大, NO_x 排放浓

度就越低；而当空气速度一定时，燃料速度越大，即空气、燃料速度比越小，NO_x 排放浓度就越小，特别是在空气射流速度很低时，这种效果就更加明显，如图 2 所示。在文献[9]中也研究了射流速比对炉内流场的影响，指出了当中心射流与两侧射流的流速为相同数量级时，两种射流在较大的范围内边扩散边燃烧，火焰长度增加，传热改善，炉内分布均匀。

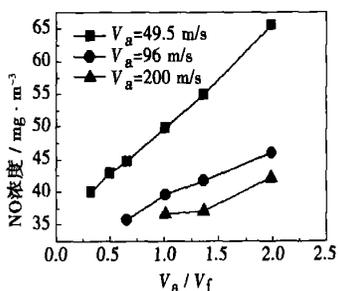


图 2 Va/Vf 对 NO_x 浓度的影响

2.3 燃料射流倾斜角度

目前所使用的大多数烧嘴中，燃料射流和空气射流之间是平行的，但也有些燃烧器将燃料喷嘴倾斜一定的角度，来影响燃料与空气的混合。当向空气侧倾斜时，就会促进燃料与空气的混合，例如美国的 LNI 型燃烧器；反之，当背离空气侧倾斜时，就会延缓燃料与空气的混合，可以使初始阶段燃烧的混合变慢、降低最大火焰温度、燃烧发生在一个稳定的温度范围内。图 3 描述了燃烧丁烷时，空气散布角为 41°，燃料、空气速度比为 1.34，空气预热温度为 1 100 °C，炉温为 1 300 °C 时，NO_x 排放浓度与燃料射流倾斜角度之间的关系，从图中可以看到，随着燃料射流倾斜角度的增大，NO_x 排放量减少。但是当倾斜角 α 过大时，又会造成顶棚温度很低，原因就是角度太大，

燃料冲击顶棚。因此，燃料射流倾斜角度也要受到限制，一般为 10° ~ 20°^[8]。

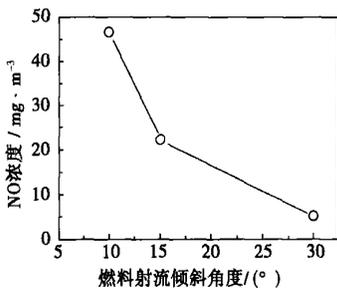


图 3 α 对 NO_x 浓度的影响

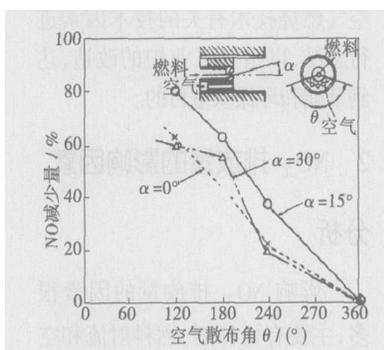


图 4 燃烧空气散布角对 NO_x 减少量的影响

2.4 燃烧空气散布角

空气散布角 θ (Straddle Angle of Combustion Air) 是以燃料喷口为起点，做空气喷口两个边界的切线所得到的夹角。这个夹角 θ = 360° 时，燃烧器就变成了轴流燃烧器。图 4 描绘了在空气预热温度为 320 °C，炉温为 1 300 °C 时，空气散布角对 NO_x 排放减少百分比的关系，纵坐标的物理含义是：与 θ = 360° 时相比，θ 变化对 NO_x 排放减少百分比的影响。从此图中可以看到，在燃料射流倾斜角一定的条件下，空气散布角越小，对减少 NO_x 排放就越有利^[8]。因为 θ 越小，燃料射流与空气射流的可能接触面越小，二者之间的混合受到抑制，NO_x 排放量减少。

2.5 燃料喷嘴和空气喷嘴之间的距离

燃料喷嘴和空气喷嘴之间的距离 L 对 NO_x 排放的影响，这实质上与空气散布角对 NO_x 排放的影响是一致的。因为在燃料射流管径和空气射流管径一定的前提下，增大燃料喷嘴和空气喷嘴之间的距离，必然减小空气散布角，减小 NO_x 排放量，如图 5 所示^[10]。图 5 表明，在允许范围内，要尽量增大燃料喷嘴与空气喷嘴之间的距离，使燃料和空气接触之前，最大限度地被烟气稀释。但是 L 值不能无限度地增大，否则就会对两种射流（为空气喷嘴直径）之间的穿透性造成不良影响，使燃料燃烧不能顺利进行，这一结论在文献 [11] 中得到证明。

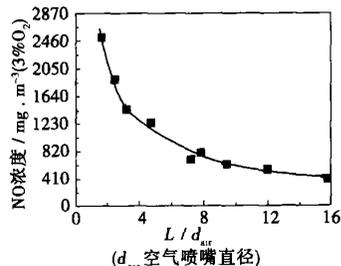


图 5 L 对 NO_x 排放浓度的影响

2.6 空气预热温度

NO_x 排放浓度与温度有关，特别是当炉膛内温度高于 1 350 °C 时，热力型 NO_x 排放量迅速增加，其浓度与温度呈指数关系。当空气没有被稀释，而预热温度升高时，会使炉膛中最大火焰温度升高，导致 NO_x 排放量剧增；当空气被稀释以后，空气预热温度对 NO_x 排放浓度的影响减弱，如图 6 所示。但是，这并不表明空气预热温度可高可低，因为要维持炉内燃烧在低氧条件下稳定进行，需要很高的温度来扩展燃烧范围（如图 7）。国内外对此都进

行了研究, 在文献 [12~15] 中都讨论了此观点。此外, 文献 [5~6] 还研究了初始温度及其变化率对混合时间的影响, 认为最大混合时间与初始温度成正比, 与温度变化率成反比, 因此提高初始温度可以延缓气体之间的混合。

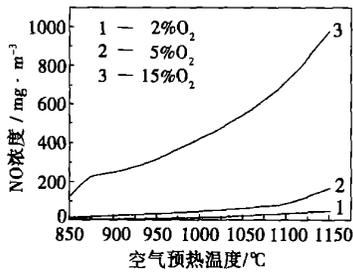


图 6 空气预热温度对 NO_x 的影响图

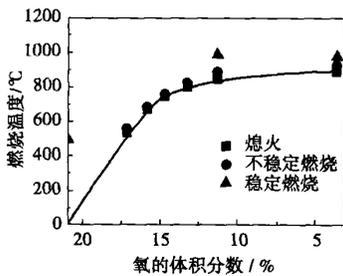


图 7 稳定燃烧区域

2.7 燃料预热温度

在文献 [12, 16] 中, 作者研究了燃料预热温度对火焰体积、停留时间、最大火焰温度和 NO 排放的影响, 表明: (1) 在空气预热温度和氧气浓度不变的情况下, 提高燃料预热温度, 会使最大火焰温度升高, 这会增大 NO_x 排放量; (2) 但是在增大燃料预热温度时, 会使平均停留时间降低, 热力型 NO_x 排放量会得到抑制。从计算结果来看, 后者占主导地位, 最后会使 NO_x 排放量随着燃料预热温度的升高而降低, 如图 8 所示。

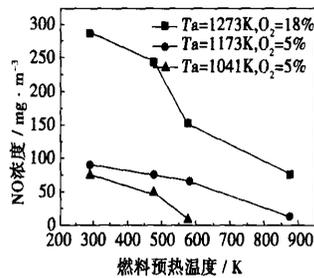


图 8 燃料预热温度对 NO_x 排放的影响

2.8 过量空气系数

同济大学朱彤等人通过数值计算^[17], 证明在不同的过量空气系数下, NO_x 生成量也不同, 当过量空气系数为 1.05 时所生成的 NO_x 最多; 当过量空气系数小于 1.0 时, 会造成不完全燃烧, 燃料的热量不能全部释放出来, 还会产生大量的 CO , 而且 CO 又会还原所生成的 NO_x , 所以此时 NO_x 排放很少; 当过量空气系数远大于 1.0 时, 燃料燃烧所释放出来热量又会被过量的空气和烟气吸收, 炉温受到限制 (如图 9)^[17]。从经济性角度出发, 都希望燃料能够完全燃烧, 所以现行工业炉大多采用过量空气系数大于 1.0。

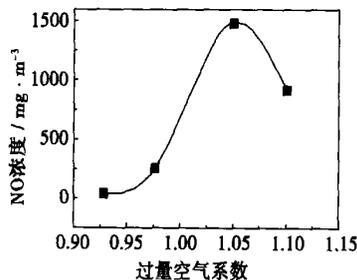


图 9 过量空气系数对 NO_x 排放的影响

3 结论

本文总结了高温空气燃烧技

术的一些因素对 NO_x 生成的影响, 从降低 NO_x 生成的目的出发, 得出了以下结论:

- (1) 稀释剂最好采用烟气, 因为降低 NO_x 排放效果明显, 而且获取容易、经济;
- (2) 在允许的范围内尽量增大空气射流和燃料射流的速度;
- (3) 尽量增大燃料射流倾斜角度, 延缓与空气射流的混合;
- (4) 在不影响燃烧稳定进行的前提下, 尽量增大燃料喷嘴与空气喷嘴之间的距离;
- (5) 为了使燃料可在氧气浓度很低的环境中稳定燃烧, 要适当提高空气预热温度;
- (6) 适当提高燃料预热温度;
- (7) 为了燃料能够完全燃烧, 过量空气系数应适当 > 1.0 。

参考文献:

- [1] SUZUKAWA Y, SUGIYAMA S, HINO Y, et al. Heat transfer improvement and NO_x reduction by highly preheated air combustion[J]. *Energy Conversion and Management* 1997, 38(10/13): 1061-1071.
- [2] YUAN J, NARUSE I. Effects of air dilution on highly preheated air combustion in a regenerative furnace[J]. *Energy & Fuels* 1999, 13(1): 99-104.
- [3] ITO Y, YOSHIKAWA K, SHIMO N. Effect of different kinds of dilution gases on the combustion with highly preheated, oxygen-deficient air[J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (Part B)*, 2003, 69(1): 107-114.
- [4] 马晓茜, 张凌. HTAC 的关键技术及其高效低污染特性分析[J]. *钢铁*, 1999, 34(10): 60-63.
- [5] BRASOVEANU D, GUPTA A K. Analysis of gaseous fuel and air mixing[J]. *Combustion Science and Technology*, 1999, 141(1/6): 111-121.
- [6] BRASOVEANU D, GUPTA A K. Maximum mixing times of methane and air

- [J] . *Journal of Propulsion and Power*, 2000, 16(6): 956—963.
- [7] ISHII T, ZHANG C, SUGIYAMA S. Numerical simulations of highly preheated air combustion in an industrial furnace[J] . *Journal of Energy Resources Technology*, 1998, 120: 276—284.
- [8] NISHIMURA M, SUZUKI T, NAKANISHI R, *et al.* Low-NO_x combustion under high preheated air temperature condition in an industrial furnace[J] . *Energy Conversion and Management*, 1997, 38(10/13): 1353—1363.
- [9] 王力军, 蔡九菊, 邹宗树, 等. 高温低氧燃烧炉内等温流场特性的数值分析[J] . *东北大学学报(自然科学版)*, 2003, 24(2): 159—161.
- [10] 祁海鹰, 李宇红, 由长福, 等. 高温空气燃烧技术的国际发展动态[J] . *工业加热*, 2003(1): 1—7.
- [11] 王力军, 蔡九菊, 邹宗树, 等. 燃气喷射对高温空气燃烧室内流动影响的数值研究[J] . *东北大学学报(自然科学版)*, 2003, 24(3): 276—279.
- [12] YANG W, BLASIAK W. Chemical flame length and volume in liquified propane gas combustion using high temperature and low-oxygen-concentration oxidizer[J] . *Energy & Fuels*, 2004, 18(5): 1329—1335.
- [13] GUPTA A K. Thermal characteristics of gaseous fuel flames using high temperature air[J] . *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2004, 123: 9—19.
- [14] 祁海鹰, 李宇红, 由长福, 等. 高温低氧燃烧条件下氮氧化物的生成特性[J] . *燃烧科学与技术*, 2002, 8(1): 17—22.
- [15] 钟水库, 马宪国, 郑国耀, 等. 高温贫氧燃烧过程中 NO_x 排放的特点[J] . *动力工程*, 2003, 23(4): 2582—2585.
- [16] YANG W, BLASIAK W. Numerical study of fuel temperature influence on single gas jet combustion in highly preheated and oxygen deficient air[J] . *Energy*, 2005, 30: 385—398.
- [17] 朱彤, 张毅勤, 刘敏飞, 等. 低热值煤气高温空气燃烧数值模拟[J] . *同济大学学报*, 2002, 30(8): 932—937.

(何静芳 编辑)

技术趋势

COGES 系统将驱动下一代 LNG 运输船

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2005 年 7~8 月号报道, 海上运输 LNG(液化天然气)始于 20 世纪 50 年代。至今, 已有 150 艘 LNG 运输船航行于世界各大洋。各大造船厂目前已获得一直到 2006 年交付的 60 艘 LNG 运输船订单。

目前, 对于 LNG 运输船动力装置正从传统的汽轮机转变到往复式发动机, 但统计表明汽轮机动力装置在正在航行的 LNG 运输船动力装置中仍占支配地位。

今天, 在 LNG 运输船动力装置方面已有一个新的趋势, 就是未来的 LNG 运输船的尺寸是非常大的, 使用汽轮机或柴油机可能是不实用的形式。对于在 230 000~250 000 m³ 载货量范围的 LNG 运输船, 在联合循环应用中并以电力驱动螺旋桨的燃气轮机受到了最大的关注。与柴油机比较, 空间和重量的节省十分明显。与传统的汽轮机装置比较, COGES(燃气轮机和汽轮机联合的综合电力推进系统)能使空间节省 10% 以上。

正是基于上述考虑, Qatar Gas(卡塔尔天然气公司)对于其下一代 LNG 运输船已指定 COGES 系统作为优先选用的推进系统。在该系统中, 燃气轮机的排气供入余热锅炉, 余热锅炉产生的蒸汽驱动汽轮机做功; 燃蒸联合循环中的燃气轮机和汽轮机驱动发电机; 发电机生产的电力将驱动推进用电动机, 并向船舶电网供电; 汽轮机的排汽用于生产淡水和生活服务。根据用于船上服务的蒸汽要求, 燃蒸联合循环的效率将为 45%~50%。

(吉桂明 供稿)

传热传质过程和设备的有限时间热力学优化 = **Finite-time Thermodynamic Optimization of Heat and Mass Transfer Process and Relevant Equipment** [刊, 汉] / SHU Li-wei, CHEN Lin-gen, SUN Feng-rui (Postgraduate College under the Naval Engineering University, Wuhan, China, Post Code: 430033) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 111 ~ 114

The important significance of finite-time thermodynamic optimization to a heat and mass transfer process and relevant equipment has been expounded. From the standpoint of physics and engineering a broad overview is given of the present status of research in the above-mentioned arena. With focused attention a description is given of the performance optimization of theoretical and engineering cycle concerning distillation and separation processes as well as the performance optimization of chemical reactors from the following aspects: optimization methods (numerical optimization and optimal control theory), optimization objectives (minimum entropy generation, minimum average heat (work) consumption, maximum productivity, maximum exergy efficiency) and optimization results. Also explored is the development trend of the thermodynamic optimization of the heat and mass transfer process and relevant equipment. It is noted that the major development direction of the current non-adiabatic distillation thermodynamic optimization consists in the non-adiabatic distillation equipped with completely controllable heat exchangers, sequential heat exchangers and heat exchanger network incorporating heat engines. **Key words:** finite-time thermodynamics, optimization, heat and mass transfer process, non-adiabatic distillation, chemical reactor

高温空气燃烧若干因素对 NO_x 生成量的影响 = **The Impact of Several Factors of High-temperature Air Combustion on NO_x Generation Quantity** [刊, 汉] / ZHANG Fu-bao, LUO Yong-hao, HU Li-yuan, et al (College of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 115 ~ 118

NO_x produced in large quantities by industrial production processes is a kind of important substance, which can lead to the formation of photochemical smog and acid rain. In view of this the reduction of NO_x emissions is currently an important task facing us. One of the key techniques of high-temperature air combustion consists in the assurance of a low-oxygen environment to reduce NO_x generation amount. The authors in summing up a few key factors have come to the conclusion that a series of measures should be taken to achieve the aim of reducing NO_x emissions. These measures are: the adoption of diluents of a relatively high heat capacity, an increase in velocity of fuel and air jet flows, the use of a greater inclination angle for the fuel jet flow, an increase in the distance between fuel nozzle and air nozzle and the adoption of a higher fuel preheating temperature. Meanwhile, to achieve a complete combustion of the fuel, the air preheating temperature should be properly increased and the excess air factor also be slightly greater than 1. **Key words:** NO_x , environmental protection, combustion, high-temperature air combustion

MCFC-燃气轮机联合循环系统模拟与优化 = **Simulation and Optimization of a MCFC - Gas Turbine Combined Cycle System** [刊, 汉] / CHEN Yue-hua, CAO Guang-yi, WENG Yi-wu (Fuel Cell Research Institute under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 119 ~ 123

A molten carbonate fuel cell (MCFC) operates at a relatively high temperature. Its high-temperature exhaust gas can be