

# 燃气轮机催化燃烧室的实验研究

(哈尔滨·第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036) 刘敏 陈艳芬 韩立中 陈洪发  
(哈尔滨海格工业科学仪器有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150036) 李劲松

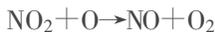
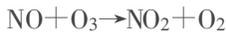
**摘要:**介绍了预混和催化燃烧相结合的燃烧室原理。对此种燃烧室进行实验研究,分析了影响催化燃烧的主要因素。预混与催化燃烧相结合能延长催化剂的使用寿命、改善燃烧室的可靠性、更经济地降低燃气轮机NO<sub>x</sub>的排放。

**关键词:**燃气轮机; 燃烧室; 催化燃烧

中图分类号: TK473.2 文献标识码: A

## 1 前言

NO<sub>x</sub>是燃气轮机排放中最为有害的物质,不仅可以形成酸雨污染环境,而且还会与大气中的臭氧反应,从而破坏臭氧层,反应机理是:



NO<sub>x</sub>的形成分为“热NO<sub>x</sub>”和“燃料NO<sub>x</sub>”两种类型。前者是由空气和可燃气中的N<sub>2</sub>在燃烧室的高温区中先氧化成NO,进一步氧化成NO<sub>2</sub>,热NO<sub>x</sub>的生成以高温为条件,并以首先生成NO为前提。后者是燃料中含有的固定N<sub>2</sub>,在温度较低条件下,有一部分转化出来氧化生成NO<sub>x</sub>。

目前大部分燃气轮机燃烧室中采用了扩散燃烧方式,因而在高温下NO<sub>x</sub>排放较多是必然的,为了降低NO<sub>x</sub>的排放,常采用湿式方法,向燃烧室一次区喷注流量为燃料量的0.6~1倍的高压除盐水,降低一次区的燃烧温度,从而减少了NO<sub>x</sub>的形成。

最近十余年来,人们研究了干式低排放燃烧室,以贫油预混火焰为前提,辅助以其它燃烧方式,选择性催化还原(SCR)就是其中之一。70年代美国和日本积极开展了催化燃烧室的研究,当时催化剂温度高于燃烧室出口燃气温度,因而引起了催化剂的失活和烧毁问题,催化剂的寿命和高度的均匀预混问题突出了,妨碍了高温催化剂的使用。90年代提出

了催化燃烧和预混燃烧相结合的设计,降低了催化剂温度,防止了催化剂的钝化。

从热NO<sub>x</sub>形成机理中知道,要使燃烧室NO<sub>x</sub>排放最低,意味着燃烧室要冒险运行在接近贫油熄火极限。把贫油熄火极限扩大到较低当量比的一个方法是在燃烧室内增加一段燃烧强化催化剂。催化燃烧是一个无火焰过程,它使燃料在通常的燃料-空气混合物可燃极限以下的温度氧化。这样在燃气轮机燃烧室中,使用催化剂代替了一部分热反应,使稳定燃烧发生在比常规燃烧室的温度低约1000K。众所周知,NO<sub>x</sub>的生成是与燃烧温度成指数规律变化,因而随燃烧温度的降低,也就减少了NO<sub>x</sub>的排放。

## 2 催化燃烧室

图1给出了与预混燃烧室相结合的催化燃烧室的原理图。燃烧器系统由催化剂部分和预混喷嘴组成,为了催化剂的机械可靠性和热可靠性,催化剂分成小段,并安装在每个催化燃烧室的扇形体上。催化燃烧温度控制在1000℃以下。将来自预混喷嘴的贫油预混气体喷进催化燃烧排气中进行燃烧,以达到1300℃的燃气温度。通过与贫油预混燃烧相结合,达到较低的NO<sub>x</sub>的排放,并可能减少在催化剂上的负载,使催化剂的温度低于1000℃,因而,催化剂的寿命得到改善,而且喷入的预混气体被催化燃烧的燃气加热,使预混燃烧稳定。

催化燃烧室有两种:外层催化剂(OCT)型燃烧室和中心催化剂(CCT)型燃烧室。这两种燃烧室都有各自的缺点:前者,催化燃气和喷入的预混气体的混合不充分,因此燃烧的稳定性和在燃烧室出口的燃气温度的均匀性不好;后者,如果在催化剂后没有

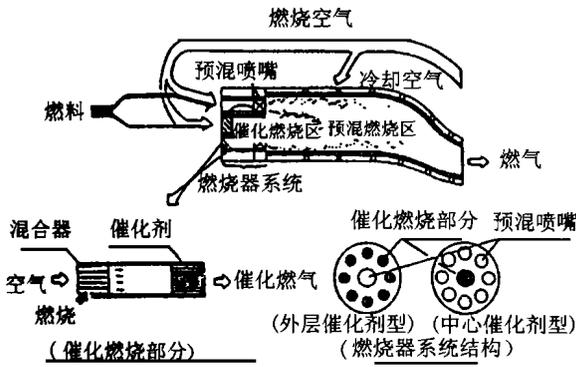


图 1 催化燃烧室原理

陶瓷挡板混合装置, 燃烧室就不能达到稳定燃烧, 并且还会引起压力损失的增加。基于这种原因采用了图 2 所示的先进的催化燃烧室结构。

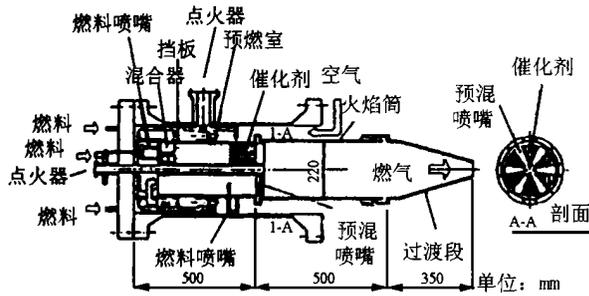


图 2 高压催化燃烧室结构

该燃烧室的预燃室是环形的, 能满足较宽的负荷范围, 宜于选择扩散燃烧。当预燃室点火时, 点火器插在它上面。如果点火成功, 拉出点火器; 燃烧器系统由催化剂扇形体和预混喷嘴组成, 六个催化剂扇形体和六个预混喷嘴交替布置形成一个圆。预混喷嘴的形状构成使得在  $90^\circ$  角下将预混气体喷进催化燃烧燃气中。为了预混气的平缓点着, 点火器插在预混燃烧部分。在位于燃烧室出口后面的测量管道中, 燃气温度和排放由热电偶和气体取样测量。

催化剂重要的活性剂是钯, 它靠由董青石制成的蜂窝形块体支撑在稳定的钢玉制成的清洗罩上。所用的催化剂长为 25 mm、栅距为 1.8 mm 的格栅, 它以分割内径为 40 mm、外径为 200 mm 的圆环形成六个扇形体, 成二级布置。在这个燃烧室中, 去催化剂的燃料份额受到催化剂温度的限制, 剩下的燃料分配到预混喷嘴。为了将燃烧室出口燃气温度提高到  $1300^\circ\text{C}$ , 喷嘴喷出的混合物的燃料浓度要比催化剂的燃料浓度高。另外, 浓的混合物引起  $\text{NO}_x$  形成, 为了增加去催化剂的燃料份额来减少  $\text{NO}_x$  的排放, 在催化剂床中的燃料转换必须适当减少, 因此催

化剂的活性受到控制, 催化剂的长度和栅距要进行选择。并且催化剂燃料受控, 以保持温度在  $800^\circ\text{C}$  左右。催化剂的表面温度由插入并固定在催化剂格栅上的热电偶来测量。

### 3 催化燃烧的主要影响因素

#### 3.1 压力的影响

为了检验压力对燃烧室性能的影响, 进行了初步试验, 此时, 预燃室未点燃, 仅用它的燃料喷嘴喷射燃料。压力增加, 燃烧室出口燃气温度保持在  $1200^\circ\text{C}$ , 空气流量与压力成比例增大, 而催化剂进口温度和催化剂温度分别保持在  $370^\circ\text{C}$  和  $800^\circ\text{C}$  左右。

从图 3 示出的试验结果看, 燃烧效率差不多 100%, 表明在 0.3 ~ 1.35 MPa 下稳定燃烧最大的  $\text{NO}_x$  排放放在 16% $\text{O}_2$  下低于  $7\text{ mL}/\text{m}^3$ 。

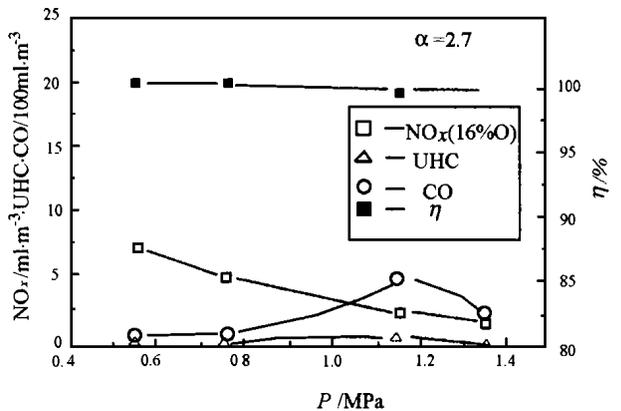


图 3 压力的影响

图 4 分别示出预燃室、催化剂扇形体和预混喷嘴的流量。因为在催化剂床中, 随着压力的增加, 燃料的转换要减小, 为了保持催化剂的温度为  $800^\circ\text{C}$  左右, 催化剂的燃料增加要大于压力的增加, 因此去催化剂的燃料份额要增加, 并且去预混喷嘴的燃料份额随着压力的增加而减少。但是  $\text{NO}_x$  不是在催化剂床中形成, 而是在预混燃烧区中形成。因为从预混喷嘴喷射的混合物的燃料浓度比催化剂的更浓, 当预混喷嘴的燃料浓度减小时, 在预混燃烧区中形成  $\text{NO}_x$  的高温区也减小, 因而可推断, 随着压力的升高,  $\text{NO}_x$  的排放要减少。

#### 3.2 燃料分配的影响

为了弄清去催化剂和预混喷嘴的燃料分配对  $\text{NO}_x$  的排放的影响, 在停止向预燃室供应燃料时,

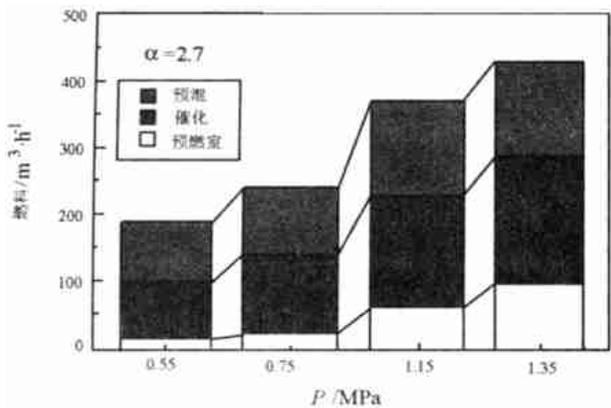


图 4 燃料流量分配与压力的关系

在总燃料流量保持不变及中等压力条件下, 改变对催化剂和预混喷嘴的燃料分配, 结果示于图 5, 横坐标为供向催化剂的燃料对总流量的比。对应于去催化剂的燃料率的增加,  $\text{NO}_x$  排放趋于减小。原因是预混喷嘴的预混物在燃料浓度上高于被稀释的催化剂预混物。燃烧效率不受催化剂燃料率的影响, 它们几乎是常数, 理由是当催化剂燃料率低时, 预混喷嘴的预混物的浓度高, 能稳定燃烧; 当催化剂燃料率高时, 催化燃气温度上升, 也稳定了燃烧。

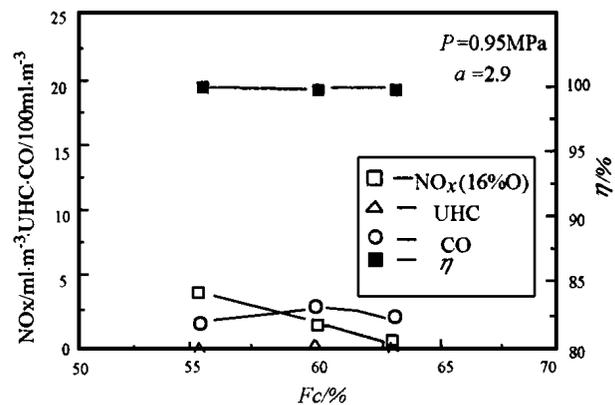


图 5 燃料分配的影响

### 3.3 在全压下的燃烧特点

图 6 表示在 1.35 MPa 下燃烧室出口燃气温度对燃烧特性的影响。在这项试验中, 去预燃室和催化剂的燃料保持不变, 而去预混喷嘴的燃料逐渐增加, 燃烧室出口燃气温度从 1 150 °C 到 1 300 °C。

随着燃烧室出口燃气温度的提高,  $\text{NO}_x$  的排放增加, 但在燃烧室出口燃气温度为 1 300 °C 时, 在 16% $\text{O}_2$  下,  $\text{NO}_x$  排放保持低于 10  $\text{mL}/\text{m}^3$ , 燃烧效率随着燃烧室出口燃气温度增加而增加, 在 1 250 °C 时, 燃烧效率高达 99.9%。

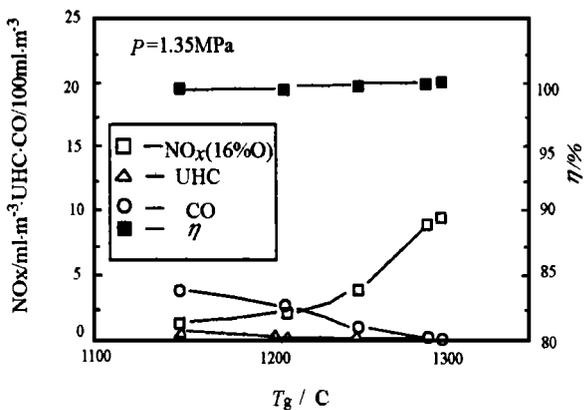


图 6 燃烧温度的影响

### 4 几点看法:

(1) 仅运用预混燃烧方法, 对于 1 300 °C 级干式低  $\text{NO}_x$  排放燃烧室, 在 16% $\text{O}_2$  下  $\text{NO}_x$  的排放约为 21  $\text{mL}/\text{m}^3$ 。采用催化与预混相结合的燃烧方法, 在燃烧室出口燃气温度为 1 300 °C 时, 在 16% $\text{O}_2$  下  $\text{NO}_x$  的排放降低 10%。在燃气轮机燃烧室中, 使用催化燃烧, 在不恶化燃烧室性能的情况下, 降低  $\text{NO}_x$  的效果是显著的。

(2) 全部燃料供给催化剂, 在催化剂中部分燃烧控制催化剂温度, 未燃气在催化剂后的气相燃烧区中燃烧。这种燃烧室能产生少量的  $\text{NO}_x$ , 但燃烧室运行范围窄; 因为, 为了反应长期进行, 催化温度不能太高, 为了促进催化剂后的气相燃烧, 催化温度又不能太低。相比之下与预混相结合的催化燃烧室虽  $\text{NO}_x$  排放比上述方法稍高, 但燃烧室运行范围宽。

(3) 使用陶瓷纤维型火焰筒和过渡段, 冷却空气量可减少约 10%, 可使  $\text{NO}_x$  排放更加降低。但要考虑到催化剂和燃烧室的长期使用性能。

(4) 催化燃烧的一个问题是上游燃料的自燃趋势。虽然在催化燃烧室中感兴趣的当量比在贫油可燃极限以下, 在理论上是不应当易于自燃的, 但是在发生燃料空气完全混合前, 在接近燃料喷嘴处, 实际上存在着局部较富的混合物, 有可能产生自燃, 因此在小于自燃延迟的时间内, 获得燃料与空气的均匀混合是非常重要的。最佳的催化剂性能还要求进口燃料空气混合物在温度场、浓度场和速度场方面应该均匀, 这样才能保证有效地使用全部催化剂面积, 防止局部高温损坏支托物。因此燃料准备过程应在进入催化剂前提供均匀的燃料空气混合物。

(下转第 381 页)

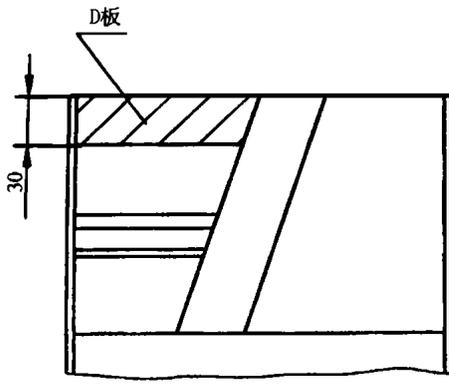


图5 挡板 D 位置

此在中缸中  
分面处, 侧  
板与后板水  
平布置一块  
60 mm 宽的  
挡板 D, 以  
后又把它减  
到 30 mm  
宽。(如图  
5)

采取以  
上一些措

施, 排汽缸的压力损失系数由 2.72 降到 1.16。出口截面负压区由 14.71% 下降到 8.2%。

装上冷凝器喉部后, 气流流动损失由 1.17 增加到 1.43, 出口负压区面积由 8.27% 增加到 21%。其主要原因是在很短的喉部中安装了二层密集格栅。而这些格栅的阻塞面积达到 27.8%, 而且气流冲击到格栅上还造成一定的冲击损失。当把喉部后格栅去除时, 压损系数  $\xi$  下降到 1.34。

## 4 结论

(1) 试验结果表明, 对低压排汽缸原型经过结构上的改进后, 能量损失系数在 1.15 ~ 1.16 之间, 比原型有较大的降低。

(2) 排汽缸上部汽流及倒车汽缸汽流的引导是成功的。

(3) 排汽口出口法兰面处的速度分布不均匀度改善较小。

## 参考文献:

- [1] 周渭镐, 包传福等. 舰船汽轮机结构强度[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985年.
- [2] 沈鸿. 机械工程手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982年.
- [3] 蔡颐年. 蒸汽轮机[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988年.
- [4] 北京空气压力研究所编. 空气动力学发展论文集[C]. 北京: 国防工业出版社, 1995年.
- [5] 李根深. 船用燃气轮机轴流式叶轮机械气动热力学(原理、设计与试验研究)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980年.

(渠源 编辑)

(上接第 378 页)

(5) 催化燃烧与预混燃烧相结合的主要优点是催化剂可运行在比燃烧室出口温度低得多的温度下, 延长了催化剂的使用寿命, 改善了燃烧室工作的可靠性。

## 参考文献:

- [1] Fujii T. High pressure test results of a catalytic combustor for gas tur-

bine[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1998, 120, 509-513.

- [2] Ozawa Y, Saiga M. Test result of low NO<sub>x</sub> catalytic combustor for gas turbine[R], ASME Paper No 93-GT-334.
- [3] Lefebvre A H. Gas turbine combustion[M]. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1983.

(复 编辑)

## 致 作 者

敬爱的作者:

承蒙各位作者的关爱, 本刊来稿较多, 为提高出版质量请在来稿时特别注意:

(1) 文章精炼, 一定突出“新”意, 一定避免重复别人的东西, 引用时不能超过本文的 15%, 引用他人的内容一定在“参考文献”中注明, 以免抄袭之嫌!

(2) “参考文献”的著录一定要项目齐全, 以便读者, 审编查阅。非公开出版物, 不宜做为参考文献。请在每条参考文献的文题后标出“文献”类型: 专著[M]; 论文集[C]; 论文集中析出的文献[A]; 期刊文章[J]; 学位论文[D]; 报告[R]; 标准[S]; 专利[P]。

多谢合作!

《热能动力工程》编辑部

mechanism

燃气轮机催化燃烧室的实验研究= **Experimental Study of a Gas Turbine Catalytic Combustor** [刊, 汉] / LIU Min, CHEN Yan-fen, HAN Li-zhong, *et al* (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2000, 15(4). — 376 ~ 378, 381

Described in this paper is the working principle of a combustor featuring the integration of catalysis with premixing along with an experimental study of such combustors. An analysis was conducted of the major factors believed to have an influence on catalytic combustion. The integration of premixing with catalytic combustion can lead to an enhancement of the catalyst service life, an improvement of the combustor reliability and a reduction of NO<sub>x</sub> emissions by the gas turbine through a highly cost-effective method. **Key words:** gas turbine, combustor, catalytic combustion

低压汽缸排汽道改进设计的试验研究= **Experimental Study of an Improved Design for the Exhaust Steam Passage of a Low-pressure Turbine Cylinder** [刊, 汉] / QIN Xiao-cheng, GAO Lei (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2000, 15(4). — 379 ~ 381

To enhance the work efficiency as well as the operation reliability and safety of a steam turbine unit, an experimental study was conducted of the various improved design schemes of a complicated exhaust-steam passage for a low-pressure naval steam turbine fitted with an astern unit. The results of the experimental study indicate that the rational layout of a diffusion section and the addition of a flow guide device can be conducive to a reduction of exhaust steam loss and a lessening in flow field non-uniformity. **Key words:** naval steam turbine, low-pressure turbine cylinder, exhaust steam passage, improved design, experimental study

200 MW 汽轮机真空对功率影响特性的试验研究= **Experimental Research of the Effect of 200 MW Steam Turbine Vacuum on Its Power Output** [刊, 汉] / WEI Hao, TIAN Zhi-zhuang (Jilin Provincial Scientific Research Institute of Electrical Power, Changchun, Jilin, China, Post Code: 130021) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2000, 15(4). — 382 ~ 383, 386

Through a series of tests on the variation of vacuum values in a Chinese-made 200 MW steam turbine determined were the turbine vacuum limit values and the general characteristic curves of vacuum variation. With the help of the vacuum correction curves obtained through tests it is possible to reflect in a fairly accurate way the actual performance of the turbine unit. This can serve as a helpful guide for assessing the performance of other similar turbine units. **Key words:** steam turbine, vacuum, test

循环流化床锅炉膜式壁炉衬抗热震性试验研究= **Experimental Study of the Thermal Shock Resistance of Membrane Wall Linings Installed in a Circulating Fluidized Bed Boiler** [刊, 汉] / CHEN Yong-guo, GUO Sen-kui, HE Xiang-yi, *et al* (Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, China, Post Code: 650093) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2000, 15(4). — 384 ~ 386

Thermal shock resistance tests have been conducted for various structural types of membrane wall linings along with a heat transfer analysis of the linings. On this basis the authors have come up with an optimized structural design of the membrane wall lining fit for use in circulating fluidized bed boilers. **Key words:** circulating fluidized bed boiler, membrane wall, furnace lining, heat transfer analysis

模拟工业炉温度特性下的型煤固硫特性的试验研究= **Experimental Study of Coal Briquette Desulfurization Characteristics under the Condition of the Elevated Temperatures of an Industrial Boiler** [刊, 汉] / WU Shu-zhi, ZHAO Chang-sui (Thermal Energy Institute under the Southeastern University, Nanjing, Jiangsu, China, Post Code: