

射流对高温空气燃烧过程中  $\text{NO}_x$  生成的影响

王皆腾, 祁海鹰, 李宇红, 由长福

(清华大学 热能工程研究所, 北京 100084)

**摘要:**总结了燃料燃烧过程中  $\text{NO}_x$  的生成机理和各种影响因素, 并结合高温空气燃烧(High Temperature Air Combustion-HiTAC)的特点和射流的基本原理, 研究了燃料和空气射流的卷吸作用对该燃烧方式  $\text{NO}_x$  生成量的影响。为选择合理的设计与运行参数, 实现该燃烧方式的超低  $\text{NO}_x$  排放和高效节能, 也为更好地在我国推广和应用这一先进技术提供理论基础。

**关键词:**射流; 高温空气燃烧;  $\text{NO}_x$  排放

中图分类号: TQ038.1 文献标识码: A

## 1 概述

众所周知, 在人类使用化石燃料的过程中会产生氮氧化物、烟炱和 CO 等污染物。氮氧化物包括  $\text{N}_2\text{O}$ 、NO、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}_3$ 、 $\text{N}_2\text{O}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}_5$  等多种成分, 其中 NO 和  $\text{NO}_2$  (总称为  $\text{NO}_x$ ) 对环境的危害最大。一般情况下,  $\text{NO}_2$  生成量不大, 约占总容积的 10%。 $\text{NO}_x$  的主要危害是在光的作用下形成光化学烟雾, 严重影响大气质量和危害人体健康; 还会形成酸雨, 影响农作物的生长, 造成很大的经济损失。因此, 控制燃烧过程的  $\text{NO}_x$  生成与排放一直是燃烧技术发展的关键之一。燃料的种类、燃料中氮化物的种类与含量、燃料和空气的化学当量比、燃烧温度、压力等都会影响  $\text{NO}_x$  的生成, 其中最主要的影响因素是燃烧温度

和反应物浓度。

对于工业炉窑, 炉膛出口的排烟温度一般都很高, 如炼钢炉, 在不回收余热(的情况下, 其排烟温度高达 1 000  $^{\circ}\text{C}$  以上。为了更有效地利用能源, 常回收其一部分余热用于预热空气, 但通常随着空气预热温度的升高, 常规燃烧的火焰温度也随之升高, 生成的  $\text{NO}_x$  量急剧增加。这样虽然可以提高能量的利用效率, 但是对环境的危害增加了。近年来, 发达国家大都对  $\text{NO}_x$  的排放量有非常严格的法规限制。为了解决能量利用率和  $\text{NO}_x$  排放之间的矛盾, 对  $\text{NO}_x$  控制方面的研究也越来越多, 有很多种方法被应用到工程中, 主要有: 分段燃烧、烟气再循环、改善燃烧器、炉膛喷水、高温低氧燃烧等。概括这些方法的共同点都离不开降低氧浓度和最高燃烧温度这两个关键。在这些方法中以高温低氧燃烧(即高温空气燃烧)技术最具有优势和发展前景。

人们环保意识的普遍增强, 天然气和煤气等洁净燃料的大量使用, 正好为我国高温空气燃烧技术的推广应用提供了有利的条件。充分认识这项技术低  $\text{NO}_x$  排放的机理对于相关系统的设计和应用都具有重要的意义。高温空气燃烧技术之所以具有低  $\text{NO}_x$  排放的特点, 主要的原因就是燃料和空气喷嘴的特殊布置方式及其射流所造成的, 因此, 要想研究

收稿日期: 2002-04-04; 修订日期: 2002-07-17

作者简介: 王皆腾(1968—), 男, 山东嘉祥人, 清华大学硕士研究生。

式。这一规律不仅为热探头煤粉浓度测量方法提供了有力的计算公式, 同时表明可应用单相气体标定热探头的两相流特性曲线。以式(15)作为计算公式, 热探头方法对煤粉浓度的测量结果其偏差可在  $\pm 15\%$  以内。

## 参考文献:

[1] CROWE C T, SOMMERFELD M, TSUJI Y. Multiphase flows with

droplets and particles[M]. Boca Raton (U S A. Florida): CRC Press, 1998.

[2] WHITAKER S. Forced convection heat transfer correlations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and flow in packed beds and tube bundles[J]. *AIChE J* 1972, 18(2): 361-371.

[3] 杨世铭. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.

(渠源 编辑)

高温空气燃烧的低  $\text{NO}_x$  排放, 必须首先了解燃料和助燃空气射流对各成分浓度分布以及燃烧的影响。

## 2 高温空气燃烧和常规燃烧射流的区别

高温空气燃烧所采用的燃烧器有多种, 但是其基本的原理是相同的, 如图 1 所示, 无论是燃料射流还是空气射流在离开喷嘴后, 基本不再受壁面约束, 射流在很大的炉膛空间中发展, 由于流体微团的脉动和相互之间的摩擦, 射流和周围介质之间不断地发生质量交换和动量交换, 使得射流的截面逐渐增大, 流量也随之而增大, 速度降低。

### 2.1 常规燃烧的射流

常规的燃烧, 燃料和空气是按比例经同一个燃烧器进入炉膛扩散燃烧的, 工程上常用燃烧设备的射流速度一般都很大,  $Re$  数较高。为保证燃料和空气能够很好地混合, 使燃烧稳定地进行, 燃料喷嘴和助燃空气的喷嘴非常靠近, 这样就必然存在一个过量空气系数接近或等于 1 的区域, 这也就是火焰前锋所处的位置。由于燃烧反应是按照化学当量比进行的, 因此燃烧温度相当高, 而且火焰集中, 导致了很高的热力型  $\text{NO}_x$  排放。如果进一步提高空气的预热温度,  $\text{NO}_x$  排放就会随着燃烧温度的升高而急剧增加。常规燃烧追求的是在有限空间内的高强度燃烧, 因而对燃烧器结构型式及其设计要求很高, 因为这是强化扩散和燃烧过程的关键所在。

### 2.2 高温空气燃烧的射流

这种射流方式又可称为燃料/氧化剂双喷射 (Fuel/Oxidant Direct Injection - FODI), 如图 1 所示。燃料和空气喷嘴相距一定距离  $a$  或偏离一角度  $\theta$ , 分别喷入炉膛, 使两者在混合之前先通过射流的卷吸效应与炉内烟气掺混并被稀释, 延缓它们进入炉膛后的初期扩散混合和燃烧反应, 达到不采取其它专门措施就能降低当地氧浓度的目的。通常氧浓度可以降至 15% 以下, 最低可以降到 2%。这就大大降低了高温燃烧时的  $\text{NO}_x$  排放<sup>[1]</sup>。为了同时保证燃烧稳定性和节能效果, 助燃空气一般预热到 1000 °C 以上, 满足了燃料在低氧浓度下燃烧对温度的要求。总之, 高温空气燃烧方式的特点就是将空气高预热温度与特殊的射流方式相结合, 达到节能和降低  $\text{NO}_x$  生成的双重目的。局部区域的低氧条件显然使燃料不可能象常规燃烧那样在很短的时间和有限空间范围内急剧燃烧, 而会随着流动和浓度扩散,

在更广大的空间中燃烧。

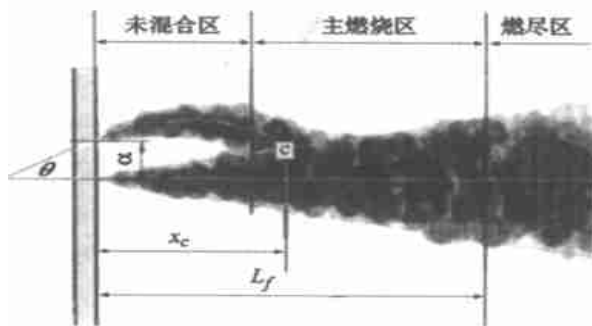


图 1 高温空气燃烧射流示意图

炉膛内的高温空气和燃料射流可分成三个区域:

(1) 未混合区: 如上所述, 燃料和空气以射流的形式分别进入燃烧室, 其卷吸作用会使它们在尚未到达主燃区混合之前先与烟气强烈混合, 从而降低助燃空气中的氧浓度, 燃料和烟气混合并被加热后, 则与烟气中浓度很低的过剩氧气发生富燃料燃烧, 即按照过量空气系数  $\alpha \ll 1$  的方式进行, 燃烧强度取决于当地的氧含量和烟气温度, 由于含氧量极少, 这种燃烧的强度一般都很低。

(2) 混合区, 即主燃烧区: 被烟气稀释的燃料和助燃空气都以较低的浓度在这个区域发生燃烧反应, 燃烧强度与常规燃烧相比显然要弱, 但火焰体积则大得多, 使得整个炉膛的温度分布更加均匀, 平均温度大幅升高, 但最高燃烧温度却降低了, 最高燃烧温度的降低也是  $\text{NO}_x$  排放降低的一个有利条件。

(3) 燃尽区: 在这一区域, 已经无法分辨燃料射流和空气射流的界限, 它们已经混合形成了单一射流, 燃烧反应也已经基本完成, 形成几乎没有浓度差别的燃烧产物。

从燃料与空气混合的角度看, HiTAC 燃烧也属于扩散燃烧, 但不是原来意义上的扩散燃烧, 而是燃料和空气在混合前都已被烟气稀释后才相互扩散混合的。燃烧区的含氧量普遍远远低于大气中的含氧量。所以没有高温燃烧区, 加上低氧, 从而避免了  $\text{NO}_x$  的大量生成。

## 3 射流对 $\text{NO}_x$ 生成量的影响

高温空气燃烧技术主要适用于燃气燃料的工业炉窑和其它燃烧设备。对于这些设备来说, 一般使用天然气、混合煤气等气体燃料, 其氮化物的含

量一般很低, 因此在热力型 (Thermal)、瞬时型 (Prompt) 和燃料型 (Fuel) 三类 NO<sub>x</sub> 中<sup>[2~3]</sup>, 燃料型 NO<sub>x</sub> 可忽略不计, 而以热力型和瞬时型 NO<sub>x</sub> 为主。有研究表明在不同的空气预热温度下, 常规燃烧、分级燃烧和高温空气燃烧 (FLOX—flameless oxidation) 三种燃烧方式中, 高温空气燃烧的 NO<sub>x</sub> 生成量是最低的<sup>[4]</sup>。空气的预热温度越高, 这种差别就越明显 (如图 2 所示)。例如, 在空气预热温度 1 000 °C 时, 常规燃烧的 NO<sub>x</sub> 排放高达 1 500 mg/m<sup>3</sup>, 分级燃烧为 250 mg/m<sup>3</sup>, 高温空气燃烧约为 140 mg/m<sup>3</sup>。

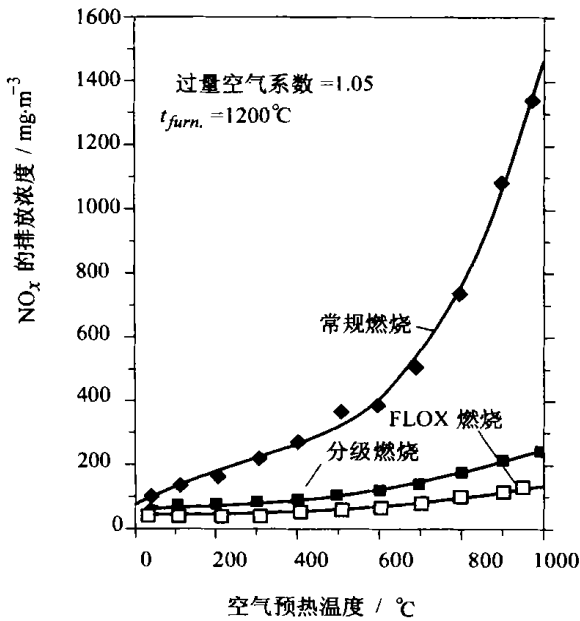


图 2 空气预热温度与 NO<sub>x</sub> 的关系<sup>[4]</sup>

### 3.1 射流引起氧浓度的变化

为简化分析, 我们对高温空气燃烧做如下假定:

(1) 空气射流看作单个圆管在有限空间内的射流, 由于预热空气温度与炉内平均温度相差不大, 故可以近似看作等温射流, 忽略密度的差别, 认为

$$\rho_a = \rho_o.$$

(2) 假设被空气卷吸的气体全部为烟气, 不含过剩的氧。

(3) 射流周围的炉膛气为静止。

(4) 燃料的射流和助燃空气的射流相比较弱, 在卷吸作用下, 燃料射流就会向空气射流方向弯曲。

根据射流的基本理论, 我们可以得到射流基本段某一截面流量和初始射流流量的关系, 如式 (1) 所示<sup>[5]</sup>:

$$\frac{m_e}{m_0} = 0.32 \left( \frac{\rho_a}{\rho_0} \right)^{1/2} \frac{x}{d_0} - 1 \quad (1)$$

式中:  $m_e$  为射流基本段中任一垂直于射流轴线的截面上的质量流量,  $m_0$  为初始射流的质量流量,  $\rho_a$  是周围介质密度,  $\rho_0$  是初始射流介质的密度,  $x$  是沿射流方向的坐标,  $d_0$  是喷嘴直径。  $m_e - m_0$  为某截面为止的周围介质混入射流的量, 以无量纲长度 ( $x/d_0$ ) 为横坐标, 取大气中的氧含量为 20.9%, 我们可以得出没有化学反应时, 沿射流方向上不同截面的平均氧浓度的变化 (如图 3 所示), 从中可以看出  $x/d_0$  越大, 氧浓度就越低, 高温空气燃烧系统的设计应尽量使燃烧反应发生在  $x/d_0$  较大的区域。

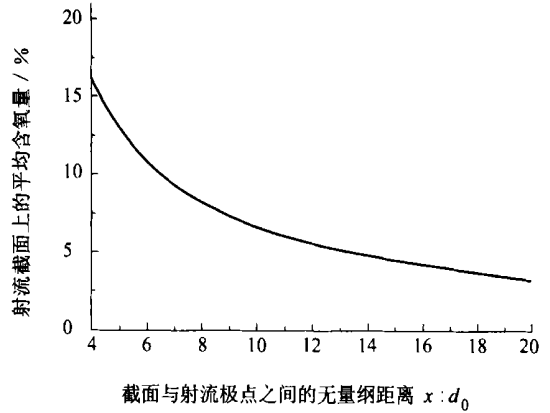


图 3 射流所引起的含氧量的变化

### 3.2 射流对火焰长度的影响

高温空气采用分离的燃料和空气喷嘴, 使得刚刚进入炉膛的燃料还不能燃烧, 只有当经过一段距离后燃料和空气才能够到达混合区, 并发生燃烧。有研究按强弱射流模型, 采用冷态实验和数值模拟的方法给出了 FODI 燃烧火焰的一般位置和火焰长度<sup>[6~7]</sup>, 对于只有一个空气喷嘴和一个燃料喷嘴的高温空气燃烧装置, 其火焰长度可用如下公式计算<sup>[8~9]</sup>:

$$x_c = 6.5 a_1 \Psi^{0.1} \exp(0.0125 \theta^2 \Psi^{1/2}) \quad (2)$$

$$y_c = 0.194 x_c \quad (3)$$

$$L_f = 13 a \Psi^{0.1} \exp(0.0125 \theta^2 \Psi^{1/2}) \quad (4)$$

对于多喷嘴的情形, 有:

$$L_f = 13 a (\Psi/N)^{0.1} \exp[0.0125 \theta^2 (\Psi/N)^{1/2}] \quad (5)$$

式中:  $a$  为燃料和空气喷口的距离,  $\theta$  为燃料和空气射流轴线夹角 (degree),  $C$  为燃料射流的轴线与空气射流外边界的交点,  $x_c$ 、 $y_c$  分别为该点的横、纵坐标,  $L_f$  为燃料和空气射流完全混合所需的长度,  $\Psi$  为燃料和空气的质量比,  $N$  为喷嘴个数 (空气喷嘴和燃料喷嘴的个数均为  $N$ , 在一个圆环上均布)。该公式的误差随  $\theta$  的增加而逐渐增大, 可靠性降低。我们

也可以得出火焰的起始位置即未混合区的长度  $x_i$ :

$$x_i = 0.75x_c \tag{6}$$

图4给出了不同射流夹角下,火焰的起始位置和完全燃烧所需的长度。当炉膛空间的宽度相对较小时,由于受到四周壁面的限制,会使得  $x_i$  和  $L_f$  小于上述公式的计算值。

可以看到,火焰的起始位置一般都在约4倍的喷嘴间距以后,以燃料和空气喷嘴的间距为空气喷嘴直径的两倍计算,燃烧起始截面距射流极点约为8倍的空气喷嘴直径,从图3可知,其平均氧浓度被降低到约8%,而且这仅仅是燃烧起始位置,此后的整个燃烧区的氧浓度都要比这一数值更低。上述只是简单的理论分析,而实际情况要更加复杂,燃料进入炉膛后,和周围的烟气互相混合,使得燃料的温度很快地升高,炉膛气中肯定含有少量的氧气,当燃料到达自燃温度后,即发生燃烧,由于这时的氧浓度还很低,故燃烧强度很弱,燃烧所生成的烟气继续和燃料及炉膛气混合,进一步降低氧浓度和燃料的浓度。工程上常用分级燃烧来降低  $NO_x$  的排放,由于设备的原因级数一般不超过三级,而高温空气燃烧过程即相当于一个级数无穷多的分级燃烧。

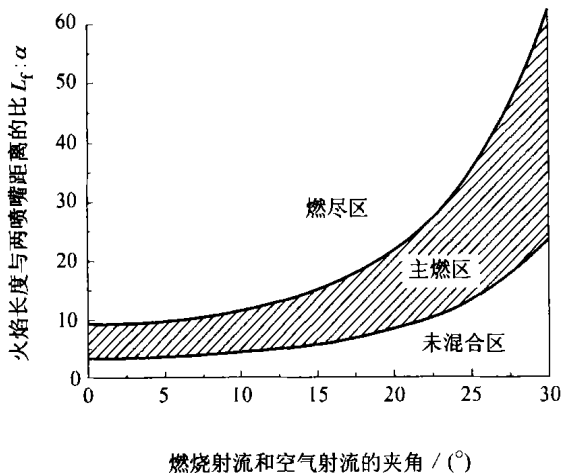


图4 火焰长度和喷嘴距离之间的关系

### 3.3 射流速度和角度对 $NO_x$ 的影响

除了喷嘴的个数、位置和角度等影响因素之外,燃料和空气射流速度、雷诺数也直接影响到燃烧空间的氧浓度分布。通常,湍流射流的动量和质量交换系数比层流大得多,因此其卷吸效果也要好得多。为加速与烟气的混合稀释过程,空气和燃料的射流速度必须达到一定水平,使流动进入湍流状态。研究表明,当空气射流的雷诺数逐渐增大时,  $NO_x$  生

成量会逐渐减少,但达到充分发展的湍流后,雷诺数的进一步增大对减少  $NO_x$  生成的作用就不明显了,图5给出了不同射流速度下高温空气燃烧的  $NO_x$  排放量的对比。燃料射流对氧浓度分布影响较小,其雷诺数的增大对降低  $NO_x$  并不明显。实验证实燃料速度从 70 m/s 变化到 230 m/s 时,对  $NO_x$  排放的改善非常有限,值得注意的是,当燃料低于 90 m/s 时,容易发生不完全燃烧,使 CO 排放增加<sup>[10]</sup>。

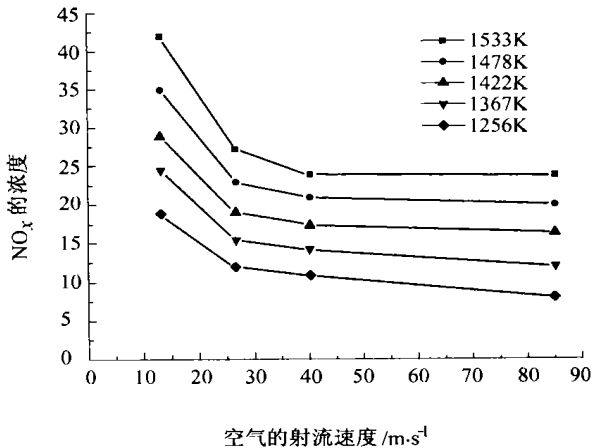


图5 空气射流速度对  $NO_x$  生成量的影响<sup>[10]</sup>

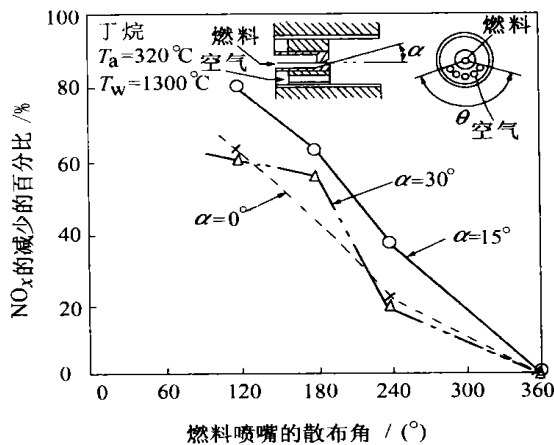


图6  $NO_x$  的减少和射流角度的影响<sup>[11]</sup>

不同的射流角度,会影响炉膛内燃料的浓度分布,进而影响炉膛内燃烧强度的分布,并最终影响到  $NO_x$  的排放,文献[11]给出了一种高温空气喷嘴 ( $\alpha \approx 0$ ) 的  $NO_x$  生成量随喷嘴夹角的变化关系(如图6所示),当射流角从  $0^\circ$  增大到  $15^\circ$  时,  $NO_x$  的生成量明显减少,但是当角度增大到  $30^\circ$  时  $NO_x$  的排放量反而和夹角  $0^\circ$  相差不大。这可能是由于其所采用的燃烧器燃料和空气喷嘴较近,夹角过大影响了燃料

在炉膛的均匀分布所致。

### 3.4 射流的时间控制

此外, 燃料和空气射流时间的协调对于高温空气燃烧也有非常重要的影响, 其对  $\text{NO}_x$  生成的影响尚不太清楚, 但是对于燃料的充分燃烧影响很大。因为高温空气的燃烧器一般是成对设置的, 燃烧过程中要不断地进行阀门切换来保证蓄热体的正常工作。如果射流的时间不能保持同步, 在换向过程中, 燃料已经进入炉膛, 而此时空气的射流还没有开始或已经结束, 燃料就会在炉膛的高温条件下发生裂解生成烟炱等难以燃烧的产物, 其生成后即使再有氧气进入, 也十分难以再燃烧, 其结果是不完全燃烧热损失增大, 过多的烟炱生成甚至会造成蓄热体的堵塞。为了保证燃料的充分燃烧, 应使同侧的空气射流不晚燃料射流进入炉膛, 不早于燃料射流结束。

## 4 结论

(1) 数值模拟和实验研究都表明高温空气燃烧技术的  $\text{NO}_x$  生成量较普通燃烧大幅地减少, 空气射流和燃料射流的入口位置和入射角以及雷诺数会直接影响燃料和氧浓度在空间的分布。而燃料的浓度分布和氧的浓度分布情况将对高温空气燃烧的  $\text{NO}_x$  排放起决定性作用, 高温空气燃烧技术中的低氧浓度主要是由于空气射流造成的, 同时燃料射流也降低了燃料浓度, 燃烧更趋于在整个炉膛内进行。降低了最高燃烧温度, 也从另一个方面降低了  $\text{NO}_x$  的排放。

(2) 由于较高的空气预热温度, 使得高温空气燃烧的反应速度大大加快, 辐射换热增强, 其结果可以使炉膛总容积减少 10%~25% 左右。但是为保证燃料和空气良好的混合和燃料的完全燃烧, 对炉膛的长度有一定的要求, 其最小长度必须大于或等于公式(5)所给出的  $L_f$ 。如果该条件得不到满足就

会发生不完全燃烧, 生成更多的烟炱、CO 或其它有机污染物。我们也可以采用增加喷嘴的个数, 减小其直径的方法加速燃料、空气和炉膛气的混合过程, 使得  $L_f$  的数值减小。

(3) 为提高燃烧效率, 减少烟炱的生成, 应合理控制燃料和空气射流的起始时间。

### 参考文献:

- [1] 祁海鹰, 李宇红, 由长福, 等. 高温空气燃烧技术的研究进展 [A]. 高效蓄热式工业炉应用学术会议论文集 [C]. 北京: 清华大学热能工程研究所, 2001.
- [2] 蔡锐彬, 卢振雄. 燃烧污染与环境保持 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1998.
- [3] 李兴虎. 汽车排气污染与控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [4] MICHAEL F. Low  $\text{NO}_x$  combustion technologies for high temperature applications [J]. *Energy Conversion & Management* 2001, 42(15/17): 1919-1935.
- [5] 王致均, 沈际群. 锅炉燃烧过程 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1987.
- [6] GYUNG M C, MASASHI K. Advanced low  $\text{NO}_x$  combustion using highly preheated air [J]. *Energy Conversion and Management*, 2001, 42(5): 639-652.
- [7] IBRAHIM Y. The strong-jet/weak-jet problem: New experiments and CFD [J]. *Combustion and Flame* 2001, 124(3): 481-502.
- [8] EDWARD W G, IBRAHIM Y, HENRY A B, *et al.* The strong jet/weak jet problem and aerodynamic modeling of CGRI burner [J]. *Combustion and Flame* 1998, 114(3/4): 381-396.
- [9] ANDRZEJ S, SHAHRZAD R, HENRY A B. Performance characteristics of the novel low- $\text{NO}_x$  CGRI burner for use with high air preheat [J]. *Combustion and Flame*, 1998, 115(1/2): 93-125.
- [10] BRUCE C, TOM R, JOHN N. A review of the development and commercial application of the LNI (Low  $\text{NO}_x$  Injection) technique [A]. 4<sup>th</sup> High Temperature Air combustion and Gasification [C]. Italy Rome: 2001. 26-30.
- [11] NISHIMURAM, SUZUKI T, NAKANISHI R *et al.* Low- $\text{NO}_x$  combustion under high preheated air temperature condition in an industrial furnace [J]. *Energy Conversion and management* 1997, 38(10-13): 1353-1363.

(渠 源 编辑)

# 祝 您 新 年 快 乐 !

**Revealing from the Law of Thermodynamics Its Connotation** [刊, 汉] / WANG Jia-xun, WANG Qing-zhao, ZHANG Xiao-dong (Power Engineering Department, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 561 ~ 564

The exposition and seeking of an implicit economic theory from many a law of physics can serve as a new approach for combining a thermodynamics analysis with an economic one. A specific analysis has been conducted of the economic theory of revealing its connotation from the first and second laws of thermodynamics. To this end, it is essential to clarify the existing misguidance of these two laws, especially the deep-seated misguidance of the second law. A further deepening of the understanding has been attained of the reasoning used by Georgescu Roegen in the statement "entropy law per se constitutes in substance the most cost-effective economic process among numerous laws". **Key words:** entropy, entropy law, new classic economics, ecological economics

**地源热泵运行经济性分析 = An Analysis of the Operating Cost-effectiveness of a Ground-source Heat Pump** [刊, 汉] / WANG Yong-biao, LI Bing-xi, JIANG Bao-cheng (Energy Science and Engineering School under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 565 ~ 567

In the light of the excessively low outdoor temperatures prevailing in Chinese northern frigid regions the authors have proposed a space heating system based on the use of ground-source heat pumps. There exist three driving modes for such pumps, namely, by electric motors, diesels and gas engines. In addition, there are three auxiliary heat supply sources, i. e., electric boilers, oil-fired ones and gas-fired ones. The authors have analyzed and compared the operating cost of various systems during a change of primary energy utilization rate and fuel price. The results of this comparison show that the operating cost of the driving modes by using gas engines, electric motors and diesel engines are respectively 6%, 40% and 57% higher than that of a central district heating system using boilers. **Key words:** ground-source heat pump, space heating, primary energy utilization rate, operation cost-effectiveness

**纳米流体强化导热系数机理初步分析 = A Preliminary Analysis of the Intensified Thermal-conductivity Mechanism of Nano-fluids** [刊, 汉] / LI Qiang, XUAN Yi-min (Power Engineering Institute under the Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, China, Post Code: 210094) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 568 ~ 571, 584

The mechanism of an intensified thermal conductivity achieved through the use of nano-fluids is analyzed from the following two aspects, namely, a changed liquid structure due to the addition of nano-particles and the micro-motion of nano-fluids. The results of the analysis indicate that relative to the enhanced thermal conductivity effected by the addition in fluids of millimeter or micrometer-grade particles the enhanced thermal conductivity made possible by nano-fluids has come about mainly due to the micro-motion of the nano-particles. Through the measurement of the thermal conductivity of nano-fluids under various temperatures it has been verified that the micro-motion of the nano-particles represents a major factor contributing to the enhancement of thermal conductivity by the nano-fluids. **Key words:** nano-fluid, intensified heat transfer, thermal conductivity, micro-motion

**电厂送粉系统煤粉浓度测量的热探头方法研究 = Research on a Thermal Probe Method for the Measurement of Pulverized-coal Concentration in a Pulverized-coal Transport System of a Power Plant** [刊, 汉] / LIU Lei, ZHOU Fang-de (National Key Laboratory for Power Engineering Multi-phase Flows under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 572 ~ 575

The measurement of pulverized coal concentration represents one of the problems requiring an urgent solution in the area of gas-solid two-phase flows. The authors have developed a measuring system incorporating thermal probes. The feasibility

of measuring pulverized coal concentration by the system was investigated. In consideration of the thermal relaxation effect in two-phase flows a calculation formula is proposed based on a revised Reynolds number and Nusselt number. The test data obtained by using the above two revised numbers to correlate the gas-solid two-phase flow round the thermal probes have shown that the gas-solid two-phase flow and single-phase one have an identical heat exchange relation. On the basis of this mechanism the thermal probe measurement method has made it possible to keep the relative deviation of pulverized-coal concentration measurement results within  $\pm 15\%$ . **Key words:** gas-solid two-phase flow, pneumatic transport, heat transfer, measurement, thermal probe

射流对高温空气燃烧过程中  $\text{NO}_x$  生成的影响 = **The Influence of Jet Flows on  $\text{NO}_x$  Generation during a High-temperature Air Combustion Process** [刊, 汉] / WANG Jie-teng QI Hai-ying, LI Yu-hong, YOU Chang-fu (Institute of Thermal Energy Engineering under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 575 ~ 579

Presented are the  $\text{NO}_x$  generation mechanism during a fuel combustion process and various influencing factors. In addition, in connection with the specific features of high-temperature air combustion (HiTAC) and the basic theory of jet flows the authors have investigated the influence of an entrainment of fuel and air jet flows on  $\text{NO}_x$  generation rate occurring at the HiTAC mode. The results of the investigation may provide a theoretical basis for the selection of a rational design and operating parameters as well as for the attainment of super-low  $\text{NO}_x$  emissions and sizable energy-savings when operating at the HiTAC mode. Furthermore, they can also promote the industrial application and popularization of this advanced HiTAC technology in China. **Key words:** jet flow, high-temperature air combustion,  $\text{NO}_x$  emissions

声空化场下浸没在多孔介质中水平圆管传热的实验研究 = **Experimental Research on the Heat Transfer in a Horizontal Circular Tube Immersed in a Porous Medium under the Action of an Acoustic Cavitation Field** [刊, 汉] / ZHOU Ding-wei, LIU Deng-ying, HU Xue-gong, ZHANG Zheng-fang (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 580 ~ 584

With the outside portion of a horizontal circular tube being packed by solid granules acetone is used to serve as a working medium. Under this condition an experimental research has been performed to identify the influence of various parameters on the single-phase convection and boiling heat transfer, including boiling hysteresis, in the above-cited tube immersed in a porous medium. Such parameters include the intensity and distance of acoustic cavitation, granule diameter, height of a porous layer, fluid subcooling, etc. **Key words:** acoustic cavitation, porous medium, boiling heat transfer, hysteresis

低浓度 CTAC 减阻流体流动性能试验研究 = **Experimental Investigation of the Flow Properties of a Low-concentration CTAC (Cetyl Trimethyl Ammonium Chloride) Drag Reducing Fluid** [刊, 汉] / XU Peng, WANG De-zhong, HU Li-guang, ZHOU Hao-jun (Institute of Mechanical and Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 585 ~ 588

Through the measurement of the drag reducing properties of a CTAC (cetyl trimethyl ammonium chloride) solution obtained were the characteristics of variation of these properties with the change in salt concentration. The results of an investigation indicate that even for one and the same drag reduction mode there exists a limiting value and an optimized selection for drag reduction. Meanwhile, a laser phase Doppler anemometer was employed to investigate the turbulent flow characteristics of a drag reducing fluid and, as a result, speed pulse curves were obtained for 50 kinds of operating conditions. It has also been discovered through the investigation that the transverse and axial speed pulses as well as Reynolds stress of the drag reducing fluid are markedly smaller than those of a Newtonian fluid. The correlation between the axial