

湿度对 HAT 循环燃烧室旋流扩散燃烧特性的影响

周见广, 臧述升, 翁史烈

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030)

摘 要: 为研究湿度对燃烧特性的影响, 采用湍流雷诺应力模型和层流小火焰模型, 对湿空气透平(HAT)循环燃气轮机带有旋流器的燃烧室内甲烷扩散燃烧过程进行了数值模拟。对比了在 4 种不同空气含湿量(0, 100, 200, 300 g/kg(DA)) 情况下的燃烧室内温度场、速度场以及 NO 组分分布的情况, 分析了湿度对 HAT 循环燃烧室扩散燃烧特性的影响。结果表明, 加湿降低了整个燃烧室的温度, 并使其内部温度分布更加均匀; 加湿使燃烧室的 NO 浓度大大降低; 加湿减小了回流区长度。

关键词: 燃烧室; 扩散燃烧; 湿空气燃烧; 燃烧模拟

中图分类号: TK473 文献标识码: A

1 前 言

湿空气透平(HAT)循环燃气轮机的燃烧室在工作中处于高湿度状态, 这将会对燃烧室的燃烧特性产生较大的影响。Blevins 和 Boly 以及 Meyer 和 Grinche 等人对扩散燃烧下湿空气对燃烧产物 NO 和 CO 的影响进行了研究^[1-2]。Bhargava 对 HAT 循环的燃烧过程, 在不同湿度和燃/空比下的预混燃烧中 NO 生成问题进行了实验和模拟研究^[3]。其结果表明在扩散火焰中, 只有部分高温区域是主要的 NO 产生区; Miyauchi 通过对一维层流甲烷-空气预混燃烧的实验研究表明在保证最高火焰温度不变的情况下, 湿空气也能降低 NO 的生成^[4]。然而, 除了对燃烧产物的研究外, 湿空气对燃烧室内火焰结构的影响, 也是 HAT 循环燃气轮机燃烧室设计中考虑的重要问题。本文对不同湿度的入口空气下, HAT 循环带有旋流的燃烧室中甲烷扩散燃烧特性进行了数值模拟, 比较了不同进口空气湿度下的速度场、温度场以及 NO 的分布情况。

2 研究对象

本文的计算对象是一个非绝热的轴对称突扩旋

流燃烧室, 如图 1 所示。燃料为 CH₄。为了保证燃烧室内持续稳定的燃烧, 模型安装了平面旋流器, 旋流器的叶片安装角为 54°, 旋流数为 1.0。燃料喷嘴喷射角为 74°。燃烧环境压力为 2 MPa, 环境温度为 650 K。

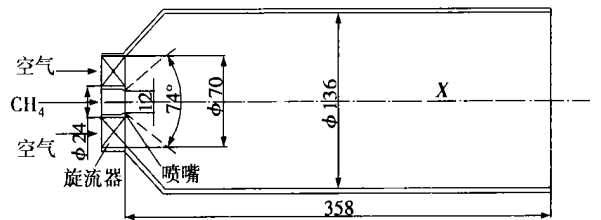


图 1 燃烧室模型示意图

3 数值模拟方法

3.1 流体流动模型

描述流动过程的控制方程如方程式(1)~(3)所示。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \Delta(\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \Delta(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\Delta P + \Delta \times \left\{ \mu [(\Delta \vec{v} \vec{v} + \Delta \vec{v} \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \Delta \vec{v} I] \right\} \quad (2)$$

其中: P —静压; μ —分子粘度; I —单位张量。

能量方程: 令 Lewis 数(Le) = 1, 则有:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \Delta(\rho \vec{v} H) = \Delta \left[\frac{k_t}{c_p} \Delta H \right] + S_h \quad (3)$$

其中: $H = \sum_j Y_j H_j$; Y_j —组分 j 的质量分数;

$$H_j = \int_{T_{ref,j}}^T c_{p,j} dT + h_j^0(T_{ref,j});$$

$h_j^0(T_{ref,j})$ —组分 j 在参考温度 $T_{ref,j}$ 的焓; k_t —湍流导热率; S_h —化学反应热。

雷诺应力输运方程:

由于旋流数较高 ($S = 1$), 湍流模型采用雷诺应力模型。湍流雷诺应力输运方程按 Favre 平均给出:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u u_j}) + C_{ij} = D_{T,ij} + D_{L,ij} + P_{ij} + \phi_{ij} - \epsilon_{ij} \quad (4)$$

其中: 迁移导数项: $C_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u u_j})$

应力产生项:

$$P_{ij} = -\rho \left[\overline{u u_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial u}{\partial x_k} \right]$$

分子扩散项:

$$D_{L,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u u_j}) \right]$$

湍流扩散项:

$$D_{T,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \overline{u u_j}}{\partial x_k} \right];$$

湍流粘性: $\mu_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\epsilon}$;

压力应力项:

$$\phi_{ij} = \phi_{j,1} + \phi_{j,2} + \phi_{j,\omega};$$

其中: 慢压力应力项:

$$\phi_{j,1} = -C_1 \rho \frac{\epsilon}{k} \left[\overline{u u_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \bar{\epsilon} \right];$$

快速压力应力项:

$$\phi_{j,2} = -C_2 \left[(P_j - C_j) - \frac{2}{3} \delta_j (P - C) \right];$$

这里, $P = 1/2 P_{kk}$, $C = 1/2 C_{kk}$,

壁面应力项:

$$\phi_{j,\omega} = C'_1 \frac{\epsilon}{k} \left[\overline{u_k u_m n_k n_m} \delta_j - \frac{3}{2} \overline{u u_k} n_j n_k - \frac{3}{2} \overline{u_j u_k} n_j n_k \right] \frac{K^{3/2}}{C_1 \epsilon d} + C'_2 \left[\Phi_{k_m, 2} n_k n_m \delta_j - \frac{3}{2} \Phi_{i_k, 2} n_j n_k - \frac{3}{2} \Phi_{j_k, 2} n_j n_k \right] \frac{K^{3/2}}{C_1 \epsilon d}$$

这里 $C_1 = C_\mu^{3/4}/K$, K 是 Karman 数, n_k 是垂直于壁面单元的 x_k 分量, d 为垂直距离。

耗散张量项: $\epsilon_{i,j} = \frac{2}{3} \sigma_{i,j} (\rho \epsilon)$

$$\text{状态方程为: } \rho = \frac{P}{RT \sum_i \frac{Y_i}{M_{w,i}}} \quad (5)$$

其中: R —通用气体常数; $M_{w,i}$ —组分 i 的化学分子量。

混合分数的输运方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \Delta \cdot (\rho \vec{v} \bar{f}) = \Delta \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \Delta \bar{f} \right) \quad (6)$$

混合分数偏差输运方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}'^2) + \Delta \cdot (\rho \vec{v} \bar{f}'^2) = \Delta \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \Delta \bar{f}'^2 \right) + C_g \mu_t (\Delta^2 \bar{f}) - C_d \rho \frac{\epsilon}{K} \bar{f}'^2 \quad (7)$$

这里, 混合分数 $f = \frac{Y_i - Y_{i,ox}}{Y_{i,fuel} - Y_{i,ox}}$; Y_i 为组份 i 的质量分数, 下脚标 $ox, fuel$ 分别表示在氧化剂进口和燃料进口处的值。混合分数偏差 $f' = f - \bar{f}$ 。

以上的方程中的经验常数为: $C_\mu = 0.09$; $\sigma_k = 0.82$; $C_1 = 1.8$; $C_2 = 0.6$; $C'_1 = 0.5$; $C'_2 = 0.3$; $k = 0.4187$; $\sigma_t = 0.85$; $C = 2.86$; $C_d = 2.0$ 。

3.2 燃烧模型

本文采用层流小火焰模型。该模型将湍流火焰看成嵌入湍流流场内, 局部具有一维结构的薄层流火焰。在该模型中, 化学反应时间尺度与湍流流动的 Kolmogorov 时间尺度相比要小, 即燃烧是在湍流最小涡团的一个脉动周期内完成。因此, 湍流燃烧的层流小火焰模型是一种基于快速反应假设的模型, 在火焰面内以分子扩散和输运过程为主。

该模型将燃烧的温度和组分质量分数可由标量耗散率和混合分数 f 唯一确定。

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} = \frac{1}{2} \rho x \frac{1}{Le_i} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial \eta^2} + S_i - \frac{1}{2} \times \frac{\partial Y_i}{\partial \eta} \left[\rho x \frac{1}{Le_i^2} \frac{\partial Le_i}{\partial \eta} - \frac{1}{2} \frac{\partial Y_i}{\partial \eta} \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{Le_i} \right) \times \left(\frac{\partial \rho x}{\partial \eta} + \rho x \frac{c_p}{k} \frac{\partial (k/c_p)}{\partial \eta} \right) \right] \right] \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{2} \rho x \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2} - \frac{1}{c_p} \sum H_i^* S_i + \frac{\rho x}{2 c_p} \times \frac{\partial T}{\partial \eta} \left[\frac{\partial c_p}{\partial \eta} + \sum_i \frac{1}{Le_i} c_{p,i} \frac{\partial Y_i}{\partial \eta} \right] - \frac{1}{c_p} [4 \delta \sum_i X_i a_i (T^4 - T_b^4)] \quad (9)$$

$$x(f) = \frac{a_s}{4\pi} \frac{3(\sqrt{\rho_\infty/\rho} + 1)^2}{2\sqrt{\rho_\infty/\rho} + 1} \exp \times (-2[erfc^{-1}(2f)]^2) \quad (10)$$

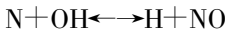
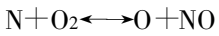
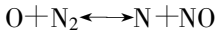
其中: $X_i, Le_i, c_{p,i}, a_i, H_i^*, S_i$ 分别为组分 i 的摩尔分数、Lewis 数、比热、Planck 平均吸收多项式系数、比焓、组分反应率。 $k, c_p, p, T, T_b, \rho, \sigma$ 分别为导热率, 混合物平均比热、压力、温度、壁面温度、密度和 Stefan—Boltzmann 常数。

在化学反应体系中, 采用文献[5] 中的 skeletal 反应机制, 其含 $H_2, O_2, O, H, OH, H_2O, HO_2, CO, CO_2,$

CH₄、CH₃、CH₂O、HCO、CH₃O、H₂O₂、N₂、N 等 17 种组分和 35 个反应(包括 10 个逆反应)。

3.3 NO 生成模型

NO 生成模拟不与流动和燃烧模拟相耦合, 而是采用后处理方法。由于采用的燃料是 CH₄, 主要考虑热力型 NO。为准确预测 NO 的生成, 考虑下列反应:



以及由于回燃反应 $CH_3 + NO \rightleftharpoons HCN + H_2O$ 的影响。

NO 相对于 N₂ 非常少, 可忽略其对 N₂ 浓度的影响。CH₃、O、O₂ 与 OH 的浓度已由前面的燃烧反应模型求出。

3.4 边界条件

根据本燃烧室模型的结构, 采用二维旋流轴对称模型。假设混合气体的导热率和粘性系数为常数; 流体为不可压缩流。

进口边界: 空气进口根据旋流数和叶片安装角给定速度方向(径向速度不变), 大小为 50 m/s。燃料进口根据喷射角给定速度方向。根据保证过量空气系数不变情况确定燃料的流速(由于燃料的流量相对于空气很小, 燃料流速的稍微变化对燃烧室内的流场影响不大), 空气进口温度为 650 K。

壁面边界: 按标准壁面函数处理, 非绝热。

出口边界: 将出口处流体看作充分发展流, 对上游区域没有影响, 故采用流量出口。

计算采用二阶差分格式。

4 结果分析

4.1 湿度对燃烧室温度的影响

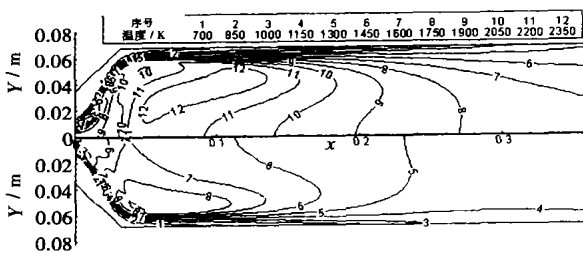


图 2 含湿量为 0 g/kg(DA)和 300 g/kg(DA)下的温度分布

图 2 上半部分和下半部分分别是含湿量为 0 g/kg(DA)和 300 g/kg(DA)下的温度分布。图 3 是沿出口半径上的温度分布。图 4 和图 5 是含湿量为 0、100、200、300 g/kg(DA)的情况下的燃烧室中心轴处和轴向距离 x 等于旋流器外径 D , 即 $x/D = 1.0$ 截面处的径向温度分布。

由图 2~图 5 中的中心轴、 $x/D = 1.0$ 处径向和出口截面处以及整个燃烧区域的计算结果表明, 进入燃烧室的湿空气对燃烧室燃烧区域的温度分布影响很大。由于蒸汽具有较大的比热容, 使得燃烧区域的温度下降明显。湿度的增大, 使火焰传播速度减小, 高温区也大大缩小。这对于降低 CO 以及 NO 的生成将是非常有利的, 但是过分的温度下降可能对燃烧效率以及燃烧稳定性带来负面影响。燃烧室出口处燃气温度场的均匀程度对燃气透平的一级导叶和工作叶片的工作安全性将有密切的影响。其中不均匀系数是一种常用的表示燃烧室出口温度场不均匀程度的方法。

不均匀系数:

$$A = \frac{\text{出口最高温度} - \text{出口平均温度}}{\text{出口平均温度}}$$

通过计算, 入口空气含湿量为 0、100、200、300 g/kg(DA)下, 燃烧室的出口不均匀系数分别为 8.6%, 5.9%, 4.0%, 2.5%。这说明随着湿度的增大, 燃烧室出口的均匀性更好, 且随着湿度的增大,

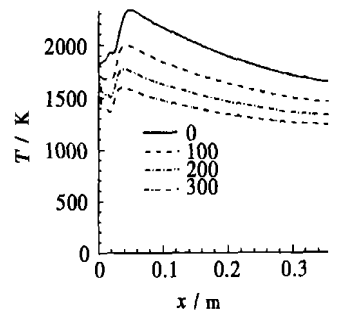


图 3 中心轴温度分布

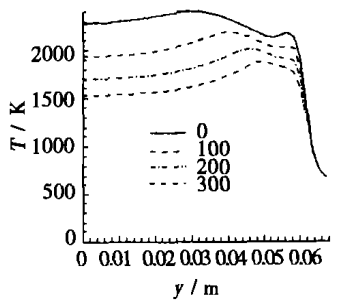


图 4 $x/D = 1.0$ 处的径向温度分布

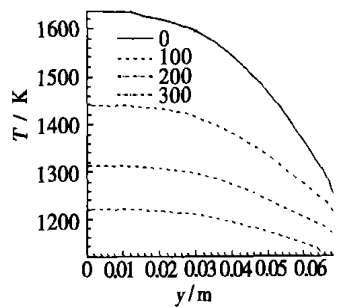


图 5 出口径向上的温度分布

加大湿度对不均系数影响越来越小。这有利于涡轮前温度场的改善,提高涡轮的寿命。

4.2 湿度对流动的影响

图6~图8分别是不同含湿量下,中心轴线上, $x/D=1.0$ 处沿径向和整个燃烧室内的轴向速度分布。

从图中可以看出,在燃烧室进口空气含湿量加大的情况下,回流区的形状受湿度影响不大。回流区的扩张角、回流区的最大直径以及回流区最大直径截面的位置变化不大。但在回流区中回流速度随着湿度的增大而减小,回流区长度也有所缩小。这些特征表明在加湿情况下,燃烧室的轴向尺寸将会减小,有利于燃烧室结构的改善。

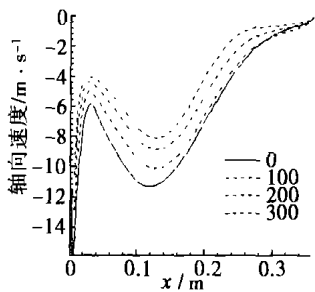


图6 中心轴线轴向速度分布

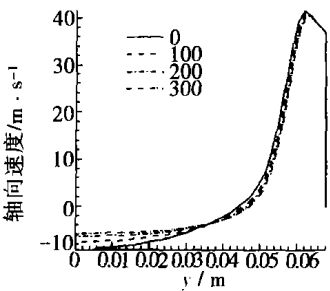


图7 $x/D=1.0$ 处径向轴向速度分布

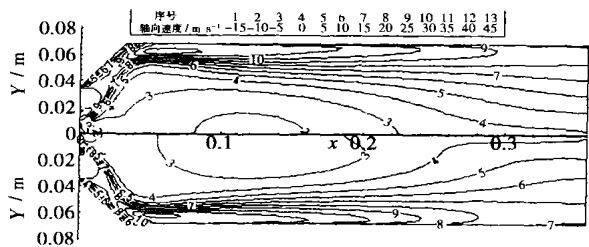


图8 含湿量为 0 g/kg (DA) 和 300 g/kg (DA) 下的轴向速度分布

4.3 湿度对 NO 分布的影响

图9~图11分别是不同含湿量下,中心轴线上, $x/D=1.0$ 处沿径向和整个燃烧室内的 NO 分布。

从图中可以看出,在燃烧室进口空气含湿量加大的情况下,NO的含量大为降低,最高值由 0 g/kg (DA) 时的 4 124 mL/m³ 降至 300 g/kg (DA) 时的 0.9 mL/m³。这主要由于 CH₄ 燃烧生成的热力型 NO 受温度影响较大。随着湿度的增加,燃烧区的温度降低,导致 NO 浓

度的降低。同时,NO的减少还可以归于 O 原子浓度的减少(从 0 g/kg (DA) 时的 267 mL/m³ 降至 300 g/kg (DA) 时的 8 mL/m³),湿空气状态下的 O+H₂O 反应的增加,抑制了 O 原子浓度,根据热力型 NO 的形成机理,这也会促使 NO 的降低。

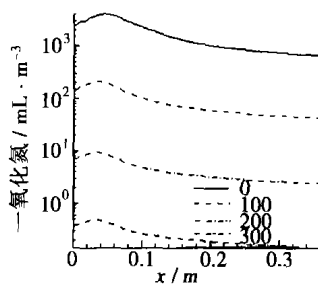


图9 中心轴线上 NO 分布

5 结 论

应用雷诺应力模型和层流小火焰模型模拟湿空气透平(HAT)循环燃气轮机带有旋流器的燃烧室内甲烷扩散燃烧,结果表明:

(1) 随着湿度的增大,蒸汽具有较大的比热容,使得燃烧区域的温度下降明显;由于湿度的增大,火焰传播速度减小,高温区也大大缩小;整个燃烧室内部温度分布更加均匀;尤其燃烧室出口温度

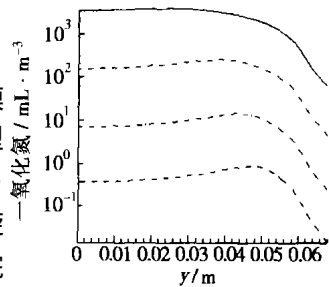


图10 $x/D=1.0$ 处径向 NO 分布

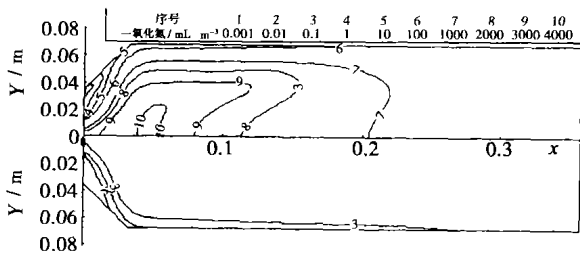


图11 湿度为 0 g/kg (DA) 和 300 g/kg (DA) 下的 NO 分布

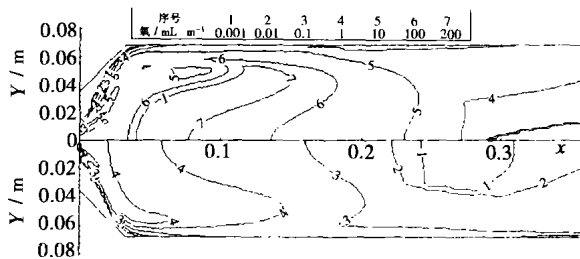


图12 湿度为 0 g/kg (DA) 和 300 g/kg (DA) 下的 O 分布

(下转第 391 页)

粉气流相比,着火区域要小得多,见图 5。这是由于前者的挥发份含量较后者小得多,因而着火温度较高,所需的着火热也较大,着火区域自然变小。

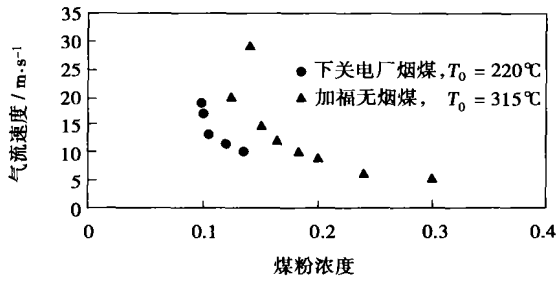


图 5 煤种对着火界限的影响

3.5 旋流点火与直流点火的比较

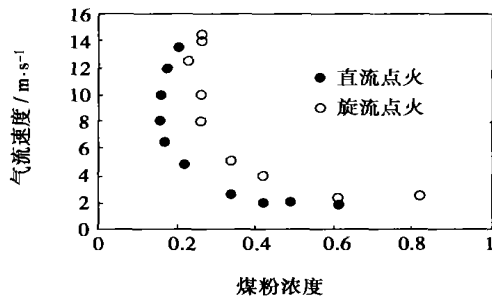


图 6 点火方式对着火界限的影响

对直流($\alpha=0^\circ$)和旋流($\alpha=30^\circ$)两种点火特性进行了试验研究,结果见图 6。由图可见,直流点火比

旋流点火容易。这是因为旋流点火时,煤粉气流具有一定的周向和径向速度,大量的煤粉被甩至点火室内壁而旋转上升,从而造成点火室中煤粉分布不均匀,点火源火炬附近混合区内的煤粉浓度大幅度降低,对着火极为不利。因此,在工况条件相同的情况下,与直流煤粉气流相比,旋转煤粉气流必须在较高的平均煤粉浓度下才能被点燃,即着火范围变窄。

4 结 论

(1) 用火炬引燃煤粉气流时,存在一个对应于最低煤粉浓度的最佳点燃速度,其值随煤粉气流初始温度的升高而增加;

(2) 提高煤粉气流的初始温度和点火源温度,提高煤粉细度,均可使着火范围变宽;

(3) 不同煤种,其点火特性也有所区别,挥发份含量越高,对点火越有利;

(4) 在相同的工况条件下,旋转煤粉气流比直流煤粉气流难以点火。

参考文献:

- [1] 许晋源. 燃烧学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.
- [2] 傅维标. 燃烧物理学基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.
- [3] 陈以理. 火力发电厂锅炉直接点燃煤粉的情况[J]. 动力工程, 1985(6): 13-21.

(上接第 366 页)

的不均匀度变小。

(2) 回流区的形状受湿度影响不大,回流区的扩张角,回流区的最大直径以及回流区最大直径截面的位置变化不大,但在回流区中回流速度随着湿度的增大而减小,回流区长度有所缩小。加湿燃烧将有利于燃烧室轴向尺寸的缩短。

(3) 随着湿度的增加,燃烧区的温度以及 O 原子浓度降低,导致 NO 浓度的显著降低。

参考文献:

- [1] BLEVINS L G, ROBY R J. An experimental study of NO_x reduction in Laminar diffusion flames by addition of high levels of steam[J]. ASME

Paper 95-GT-327, 1995.

- [2] MEYER J L, GRIENCHE G. An experimental study of steam injection in an aero derivative gas turbine[R]. ASME Paper 97-GT-506, 1997.
- [3] ANUJ BHARGAVA, MED COIKET, WILLIAM SOWA, et al. An experimental and modeling study of humid air premixed flames[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2000, 122: 405-411.
- [4] MIYAUGHI T, MORI Y, YAMAGUCHI T. Effect of steam addition on NO formation[A]. Eighteenth symposium (International) on Combustion[C], The Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, 1981, 43-51.
- [5] PEETERS T. Numerical modeling of turbulence natural-gas diffusion flames[D]. PhD thesis, Delft Technical University, Delft, Netherlands, 1995. Table, B1; 262.

whole system. **Key words:** solid oxide, fuel cell, gas turbine, combined power generation.

湿度对HAT循环燃烧室旋流扩散燃烧特性的影响= **The Influence of Humidity on the Swirl Diffusion-combustion Characteristics in a Humid Air Turbine (HAT) Cycle Combustor** [刊, 汉] / ZHOU Jian-guang, ZANG Shu-sheng, WENG Shi-lie (College of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(4). — 363 ~ 366, 391.

A turbulent Reynolds stress model and a laminar small flame model are used to study the influence of humidity on combustion characteristics. A numerical simulation was conducted of a methane diffusion-combustion process in the swirler-equipped combustor of a humid air turbine (HAT) cycle gas turbine. The distribution states of temperature profile, velocity field and NO constituent elements in the combustor are compared for four different air humidity values (0, 100, 200, 300 g/kg [DA]) along with an analysis of the influence of humidity on diffusion combustion characteristics in the HAT cycle combustor. It has been found that moisture addition can lead to a reduction in combustor temperature, a more uniform distribution of temperature and a drastic lowering of NO concentration in the combustor as well as a reduction in the length of a return flow zone. **Key words:** combustor, diffusion combustion, humid air combustion, simulation of combustion.

燃料稀释对富氧空气/甲烷扩散火焰中氮氧化物生成的影响= **Impact of Fuel Dilution on the Formation of NO_x in an Oxygen-rich air/Methane Diffusion Flame** [刊, 汉] / ZHAO Dai-qing, FENG Yao-xun, LIU Qing-cai (Guangzhou Institute of Energy Conversion under the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, China, Post Code: 510070), H Yamashita (Department of Mechanical Informatics & Systems, Graduate School of Engineering, under the Nagoya University, Nagoya, Japan, Post Code: 464-8603) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(4). — 367 ~ 371, 420.

The present study is aimed at revealing the NO_x formation mechanism in an oxygen-rich combustion process. NO_x suppression mechanism is also investigated with the oxygen-rich flame characteristics being taken account of. With a counter-flow diffusion flame serving as an object of research the impact of fuel dilution on the NO_x formation in an oxygen-rich air/methane diffusion flame was studied with the help of a fully developed elementary reaction-dynamics model. The diluent being used is N₂ or CO₂. It is found that with the variation of concentration of dilution constituent elements in fuel there emerged a marked change in flame structure and NO formation mechanism. It is also discovered that with an increase in the concentration of diluent CO₂ the emission index of NO decreases monotonically and the latter index may reach a maximum value when N₂ is used as a diluent. **Key words:** counter-flow diffusion flame, fuel dilution, NO_x, numerical analysis.

脉动供燃料燃烧技术及各参数影响研究= **A Study of Combustion Technology Featuring the Pulsating Feed of Fuel and the Influence Exerted by Various Parameters** [刊, 汉] / ZHAO Hai-liang, LI Yan, YOU Chang-fu, et al (National Key Laboratory of Clean Combustion of Coal under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(4). — 372 ~ 375, 415.

A jet-flow diffusion flame based on the adoption of a pulsating fuel-feed combustion mode is investigated. By making use of a direct photographing technique the characteristics and variation mechanism of the flame are observed and analyzed under various operating conditions and parameters. They include: fuel-rich combustion-time share, average Reynolds number and pipe connecting conditions, etc. The impact of various parameters and the flame characteristics under resonant operating conditions are also analyzed. It was found that with the fuel-rich combustion-time share in the range of 70% - 90% the flame would assume a more or less regular fuel-rich and fuel-lean alternative structure with a clearer picture being observed during resonant frequencies. At a duty cycle of 70% - 80% the flame has a maximum length and the alternative structure assumes a most regular form. At a still lower duty cycle of fuel-rich combustion-time share there emerged under a resonant frequency a collapsed mixing and turbulent flow at the root of the flame accompanied by a flame