

# 合成气—甲醇掺烧火焰研究

张文兴, 穆克进, 王 岳, 肖云汉

(中国科学院工程热物理研究所 先进能源动力重点实验室, 北京 100190)

**摘 要:** 对合成气—甲醇掺烧火焰进行了实验研究及数值分析。实验观测了火焰形态, 测量了火焰温度及烟气中  $\text{NO}_x$  污染物的浓度。实验表明: 相同功率条件下, 相比于合成气火焰, 合成气—甲醇掺烧火焰尺寸略显细长、高温区温度略低、烟气中  $\text{NO}_x$  排放较少。通过数值计算分析指出, 合成气—甲醇掺烧火焰尺寸变长缘于火焰中甲醇未能及时消耗完, 火焰温度降低缘于甲醇火焰温度较低, 烟气中  $\text{NO}_x$  排放减少缘于火焰中加入甲醇有利于抑制热力型  $\text{NO}$  及中间型  $\text{NO}$  的生成。

**关 键 词:** 合成气; 甲醇; 掺烧;  $\text{NO}_x$

中图分类号: TK16 文献标识码: A

## 引 言

煤炭是我国的主要一次能源, 在能源消费结构中占据着极大的比重, 并且在未来很长一段时期内, 煤炭仍将是我国的主要能源。煤炭多联产能从系统的高度出发, 结合各种生产技术路线的优越性, 与生产过程耦合到一起, 彼此取长补短, 具有资源利用率高、能耗低、投资和运行成本低、全生命周期污染物排放量最少等优点<sup>[1~3]</sup>。甲醇—电联产是我国较为现实的煤炭联产方式, 在此联产系统中燃气轮机是其动力核心, 通过系统优化集成, 煤制合成气一部分用于燃气轮机联合循环发电; 另一部分用于合成甲醇, 弛放气再送入燃气轮机发电。甲醇除作为产品销售外, 还可以作为联合循环调峰发电的燃料。在此系统中燃气轮机的燃料包括合成气、弛放气和甲醇及杂醇。

将甲醇引入燃气轮机燃烧室与合成气掺烧可以大大提高联产系统的柔性, 在电力紧张时, 利用甲醇和合成气同时发电, 而在电力富裕时, 可以多生产甲醇以储存能量。但对于甲醇—合成气掺烧的研究工作很少, 要在联产中实际运用, 必须对其火焰形态、污染物排放及火焰稳定性等进行研究。

通过对合成气—甲醇掺烧火焰进行实验及数值研

究, 分析了甲醇的加入对合成气燃烧特性的影响, 为在联产系统中进行合成气—甲醇掺烧提供一定的基础。

## 1 实验装置及数值模型

### 1.1 燃烧器及测量仪器

实验所用燃烧器结构如图 1 所示。燃烧器由喷嘴、石英玻璃罩和烟气缩口段 3 部分组成。喷嘴中心为甲醇流道, 其出口装有压力旋流雾化喷嘴, 甲醇经喷嘴雾化后以液态喷雾的形式喷出; 外侧是环形的空气流道; 合成气环形流道位于甲醇流道与空气流道之间, 在其出口处的旋流器用以稳焰, 旋流器可以更换。实验所用旋流器的通流槽与轴向的夹角为  $30^\circ$ , 可产生旋流数  $S=0.54$  的旋流。烟气缩口段用于烟气整流, 其侧面开有测量孔, 可进行烟气温度测量及烟气取样。

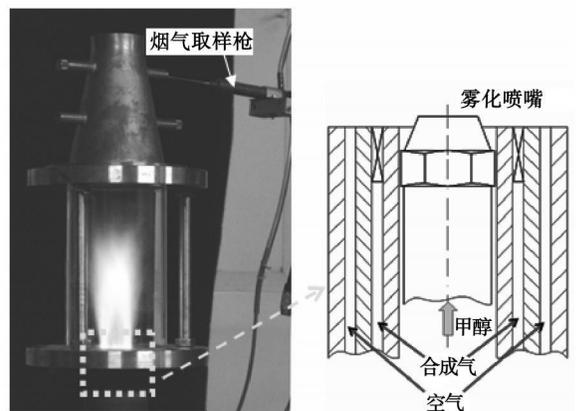


图 1 实验用燃烧器装置

实验使用数码相机拍摄了火焰形态图像, 使用烟气分析仪 (VARIO plus) 测量了烟气中  $\text{NO}_x$  污染物的浓度 (体积分数), 并使用热电偶测量了开放式火焰 (未加石英玻璃罩及烟气缩口段) 高温区的温度分布。

为了使不同工况条件下所测得的污染物排放量具有可比性, 采用基于单位功率的排放指数  $MSE$

(Mass Specific Emission) 作为污染物排放对比的指标,  $MSE$  可由式(1)进行计算<sup>3~4]</sup>:

$$MSE_i = \frac{\text{组分 } i \text{ 的质量流量}}{\text{总功率}} = \frac{1\,000X_i \cdot Q_g \cdot MW_i}{22.4 \times P} \quad (1)$$

式中:  $X_i$ —组分  $i$  的体积分数;  $Q_g$ —标况下理论烟气的体积流量;  $MW_i$ —组分  $i$  的摩尔质量;  $P$ —总功率。由于  $NO_x$  中  $NO$  所占比例通常达到 90% 以上, 计算  $MSE_{NO_x}$  时可采用  $MW_{NO}$  代替  $MW_{NO_x}$ 。

## 1.2 数值模型

运用 Fluent 软件包中的涡团耗散模型、离散相模型等计算模型, 对合成气湍流扩散燃烧及甲醇喷雾燃烧进行了三维数值求解, 考察了合成气-甲醇掺烧火焰与合成气火焰在温度分布及组分浓度分布上的差异, 并定性分析了合成气-甲醇掺烧火焰尺寸变化的原因; 此外还运用 CHEMKIN 软件包中的对冲扩散火焰模型, 采用 GRI-Mech 3.0 化学反应动力学机理, 对合成气-空气对冲扩散火焰及合成气/甲醇-空气对冲扩散火焰进行了数值计算, 考察了甲醇的加入对于  $NO$  生成速率及与  $NO$  生成有关的部分基元浓度的影响, 并定性分析了合成气-甲醇掺烧火焰  $NO_x$  排放减少的机理。以下分别对各计算模型作简单介绍。

### 1.2.1 涡团耗散模型

涡团耗散模型 (Eddy Dissipation Model, EDM) 是比较常用的湍流扩散燃烧模型, 该模型是在 Magnussen 和 Hjertager 提出的涡团破碎模型的基础上进行改进后得到的<sup>[5]</sup>。模型中, 整体反应速率由湍流混合作用所控制, 组分  $i$  在化学反应  $r$  中的净生成速率  $R_{i,r}$  由下面两个表达式中数值较小的一个给出:

$$R_{i,r} = v'_{i,r} MW_i A \rho \frac{\epsilon}{k} \min \left( \frac{Y_R}{v_{R,r} MW_R} \right) \quad (2)$$

$$R_{i,r} = v''_{i,r} MW_i A B \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{\sum_j P_j Y_j}{\sum_j v''_{j,r} MW_j} \quad (3)$$

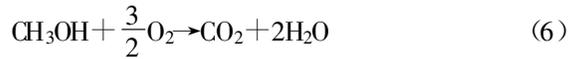
式中:  $v'_{i,r}$ 、 $v''_{i,r}$ —组分  $i$  在化学反应  $r$  中的反应物和生成物的化学恰当比系数;  $MW_i$ —组分  $i$  的分子量;  $\rho$ —混合物密度;  $N$ —系统中化学组分的数目;  $Y_p$ —生成物  $P$  的质量分数;  $A$ 、 $B$ —经验常数, 取值分别为 4.0 和 0.5。

由于涡团耗散模型只考虑单步(或双步)总包化学反应, 而忽略了化学反应中间产物的影响, 因而会导致所预测的温度值偏高, 可以通过对组分的比热进行修正来获得比较合理的温度值<sup>[6]</sup>。由于本文仅作定性计算, 故未进行比热修正。

在合成气的燃烧计算中, 模型仅包含了  $CO$  及  $H_2$  的单步化学反应, 如式(4)和式(5)所示:



在合成气与甲醇的掺烧计算中, 模型又加入了  $CH_3OH$  的单步化学反应, 如式(6)所示。



### 1.2.2 离散相模型

离散相模型 (Discrete Phase Model, DPM) 是用于求解流场中连续相与弥散相相互作用的计算模型。该模型依据对颗粒物理属性及颗粒初始条件(初始位置、速度、尺寸及温度等)的设置, 用来初始化颗粒的轨道和传热/传质计算。当颗粒穿过流体时, 颗粒的轨道、传热量及传质量可以根据该位置流体作用于颗粒的各种作用力及对流、辐射等所引起的热量/质量传递来进行计算。

模型中, 连续相通过欧拉描述法下的  $N-S$  方程进行求解, 而弥散相则是在拉格朗日描述法下进行求解。在拉格朗日描述法下, 离散相粒子的受力平衡方程如式(7)所示, 通过对其进行积分即可获得粒子的运动轨迹。

$$\frac{d u_p}{dt} = F_D(u - u_p) + F_{other} \quad (7)$$

式中:  $u$ 、 $u_p$ —流体速度和粒子速度;  $F_D(u - u_p)$ 、 $F_{other}$ —单位质量粒子所受的阻力和其它的附加力。

### 1.2.3 对冲扩散火焰模型

在扩散燃烧火焰中, 当对流和扩散的时间尺度远远大于化学反应的时间尺度时, 即  $Da \gg 1$  时, 扩散火焰可以看作是由一系列很薄的层流、局部一维的火焰面所组成, Peters 根据这个观点提出了 Flamelet 模型<sup>[7]</sup>。这些简单的层流一维火焰就是我们通常所说的对冲扩散火焰, 其模型如图 2 所示, 燃料及氧化剂从各自的喷嘴中相向喷出, 在两喷嘴之间形成一个稳定的平面扩散火焰。该模型流场描述简单准确, 便于利用化学反应动力学模型进行数值计算, 被广泛地用于扩散火焰机理的研究<sup>[8~9]</sup>。轴对称柱坐标系下对冲扩散火焰模型的控制方程组为:

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{\rho u}{2} \right) + \frac{\rho v}{r} = 0$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho u v}{r} \right) + 3 \frac{\rho v^2}{r^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v}{r} \right) \right] = 0$$

$$\rho_k \frac{dT}{dx} - \frac{1}{c_p} \frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{dT}{dx} \right) + \frac{\rho}{c_p} \sum_k c_{pk} Y_k V_k \frac{dT}{dx} +$$

$$\frac{1}{c_p} \sum_k h_k \omega_k = 0$$

$$\rho u \frac{dY_k}{dx} + \frac{d}{dx}(\rho Y_k V_k) - \omega_k W_k = 0, k=1, \dots, K$$

以上各式的推导过程及式中各项含义可参见文献[3]及 CHEMKIN 用户手册。

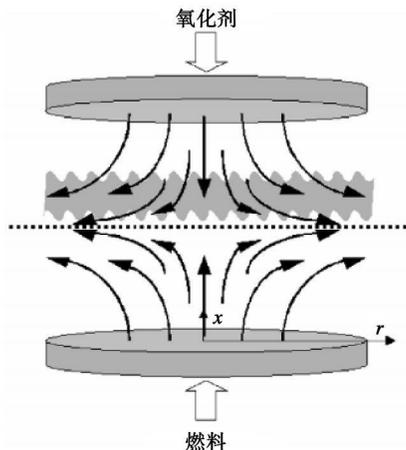


图2 对冲火焰模型示意图

## 2 结果与分析

### 2.1 实验结果

实验所用合成气中, CO、H<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 的摩尔分数分别为 47.8%、37.3%和 14.9%, 合成气的热值约为 10 MJ/m<sup>3</sup>。实验在表 1 中所列各工况条件下, 进行了火焰形态图像的拍摄、烟气中 NO<sub>x</sub> 浓度的测量, 以及开放式火焰中高温区温度分布的测量。

表 1 实验工况表

编号	总功率 / kW	甲醇功率 / kW	甲醇摩尔分数 / %
1-a	11.68	—	—
1-b	11.68	2.43	8.5
2-a	10.22	—	—
2-b	10.22	2.43	10.0
3-a	8.76	—	—
3-b	8.76	2.43	12.0
4-a	7.30	—	—
4-b	7.30	2.43	15.0

图 3 为 10.22 kW 功率条件下火焰形态的对比。由图可以看出, 合成气-甲醇掺烧火焰比合成气火焰略显细长, 且在掺烧火焰的中心处还有一股外伸出主火焰区细小的火焰。

图 4 为 NO<sub>x</sub> 排放指数 MSE<sub>NO<sub>x</sub></sub> 相对于燃烧器功率的变化关系。由图可以看出, 在相同功率条件下, 合成气-甲醇掺烧火焰的 NO<sub>x</sub> 排放指数低于合成气火焰的排放指数; 随燃烧器功率的增大, 合成气-甲醇掺烧火焰与合成气火焰间 NO<sub>x</sub> 排放指数的差

距缩小。由表 1 可以看到随功率的增大掺烧火焰中甲醇的比例在降低, 这也就解释了 NO<sub>x</sub> 排放差距缩小的原因。

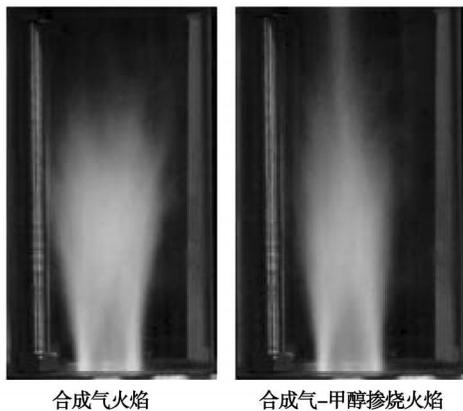


图 3 相同功率条件下火焰形态对比

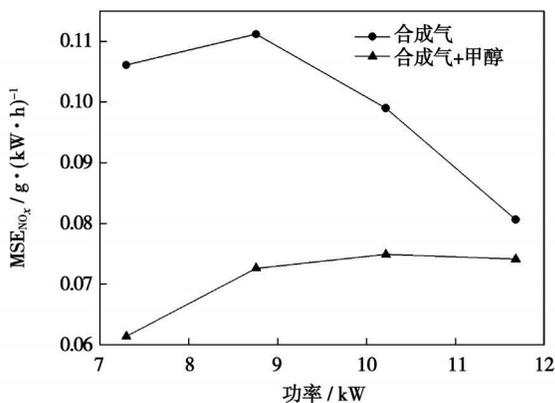


图 4 NO<sub>x</sub> 排放指数随功率变化曲线

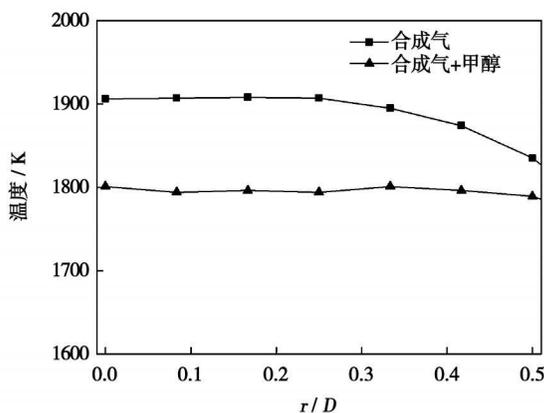


图 5 开放式火焰高温区温度分布情况

图 5 为 10.22 kW 功率条件下, 开放式火焰高温区的温度分布情况, 测量位置在 h/D=4 截面上, 其中 h 为距喷嘴的高度, D 为合成气环形流道的内直径。由图可以看到, 相比于合成气火焰, 合成气-甲醇掺烧火焰中高温区的温度值较低。

### 2.2 火焰三维数值求解及分析

运用 Fluent 软件包中的  $k-\epsilon$ 、EDM、DPM 等模型, 求解了相同功率条件下合成气火焰及合成气-甲醇掺烧火焰中温度分布、组分浓度分布等信息。计算网格划分及边界条件情况如图 6 所示, 该网格是由结构化网格与非结构化网格所组成的混合型网格。计算中未考虑辐射换热的影响, 所有壁面均设为绝热条件, 甲醇喷雾液滴的初始粒径及速度参考文献[10] 分别取为  $40 \mu\text{m}$  及  $10.0 \text{ m/s}$ 。计算结果如图 7~图 9 所示。

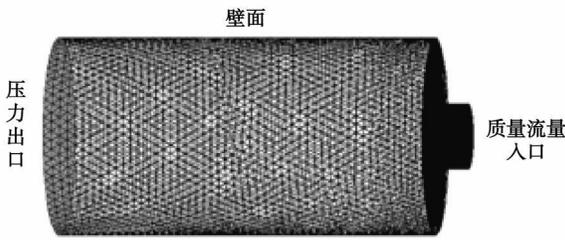


图 6 网格划分及边界条件情况

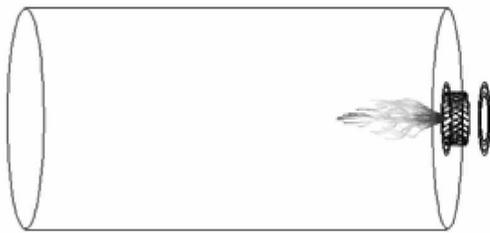


图 7 掺烧火焰中甲醇液滴运动轨迹

图 7 为合成气-甲醇掺烧火焰中甲醇喷雾液滴的运动轨迹。由图可以看出, 甲醇液滴在离开喷射点较短的距离内即蒸发完毕, 而且由于粒径较小, 液滴

的跟随性较好, 在合成气旋流的作用下做旋转运动。

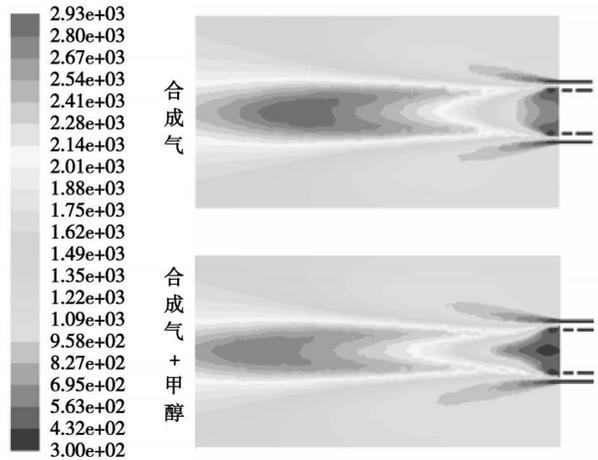


图 8 火焰中温度分布

图 8 和图 9 分别为合成气火焰及合成气-甲醇掺烧火焰中的温度分布图及燃料浓度分布图。结合图 8 及图 9 可以看出, 相比于合成气火焰, 掺烧火焰的尺寸略显细长, 这在趋势上与图 3 所示的实验结果一致。由图 9 可以看到在掺烧火焰中,  $\text{CO}$  及  $\text{H}_2$  离开喷嘴一段距离后即消耗完毕, 而甲醇则迟迟未能消耗完, 这也就说明掺烧火焰尺寸较长是由于甲醇未能及时燃烧完而导致的, 从这个角度分析, 可以推断在图 3 所示掺烧火焰中外伸出主火焰区的细小火焰应该是甲醇火焰。

掺烧火焰中甲醇消耗较慢的原因, 一方面在于甲醇燃烧前需要经历一个蒸发过程, 这就会使甲醇燃烧滞后; 另一方面则在于甲醇处于合成气的包围之中, 合成气的燃烧阻隔了甲醇与空气的混合, 使甲醇得不到充足的氧气进行燃烧。

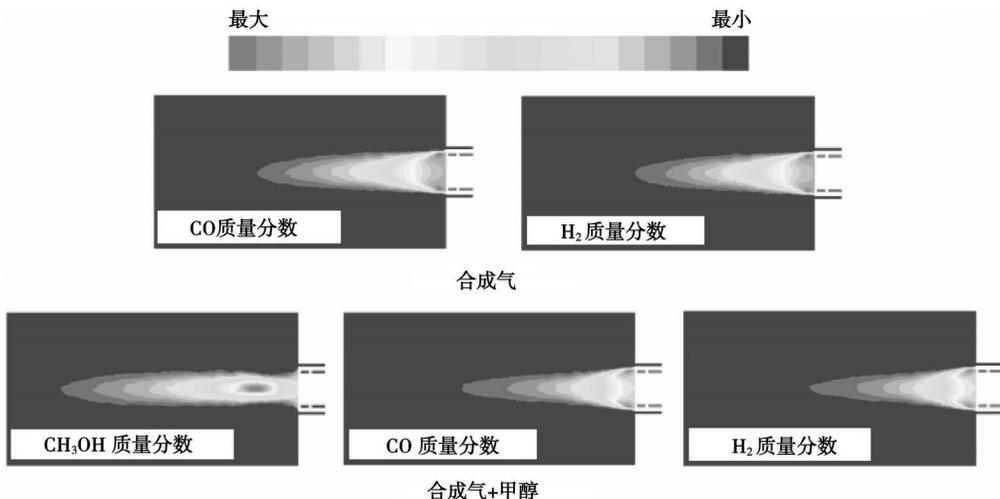


图 9 火焰中燃料浓度分布

由图 8 可以看到,相比于合成气火焰,掺烧火焰中高温区的温度值略低,这在趋势上与图 5 所示的实验结果一致。掺烧火焰高温区温度较低的原因在于甲醇的火焰温度较低,如表 2 所示。

表 2 各燃料等压绝热火焰温度值( $\phi=1.0$ )

燃 料	绝热火焰温度/K
H <sub>2</sub>	2 380
CO	2 383
CH <sub>3</sub> OH (g)	2 220

注:表中数据由 CHEMKIN 软件包中的 Equilibrium 模型使用 GRI-Mech 3.0 化学反应机理计算所得。

需要注意的是,正如前文所说使用 EDM 模型计算所得的火焰温度值偏高,图 8 中所示温度最高值已超过燃料的绝热火焰温度,远远偏离了真实值,只能做定性参考。

### 2.3 掺烧火焰 NO 减排机理分析

合成气-甲醇掺烧火焰中高温区火焰温度较低有利于抑制热力型 NO<sub>x</sub> 的生成,这也从一个方面解释了图 4 所示的掺烧火焰 NO<sub>x</sub> 排放指数较低的原因。但由于 NO<sub>x</sub> 生成机理较为复杂,除温度外,多种基元组分都会对 NO<sub>x</sub> 的生成产生影响,为能更好地分析 NO<sub>x</sub> 排放指数降低的机理,将基于 CHEMKIN 软件包中的对冲扩散火焰模型运用 GRI-Mech 3.0 化学反应动力学机理,分析在合成气火焰中加入甲醇对于 NO<sub>x</sub> 的生成所产生的影响。由于在 NO<sub>x</sub> 中主要成份是 NO,本文仅针对 NO 的生成进行分析。

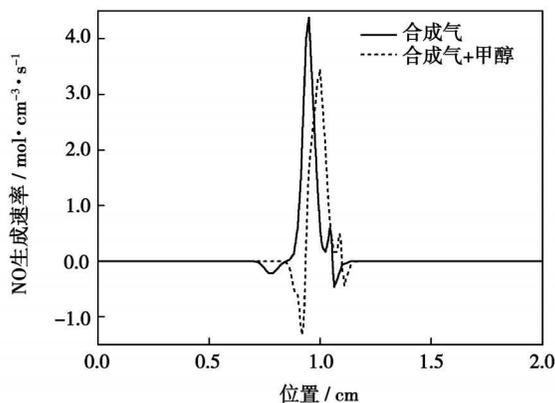


图 10 NO 生成速率分布情况

本文计算了 100% 合成气及 80% 合成气+20% 甲醇(摩尔分数)两种燃料条件下,对冲扩散火焰中 NO 生成速率分布和与 NO 生成相关的关键组分的浓度分布。计算中燃料速度和空气速度均取为 1.0 m/s,燃料出口与空气出口间距取为 0.02 m,所对应

的流场宏观拉伸率为 100 s<sup>-1</sup>。计算结果如图 10~图 14 所示。

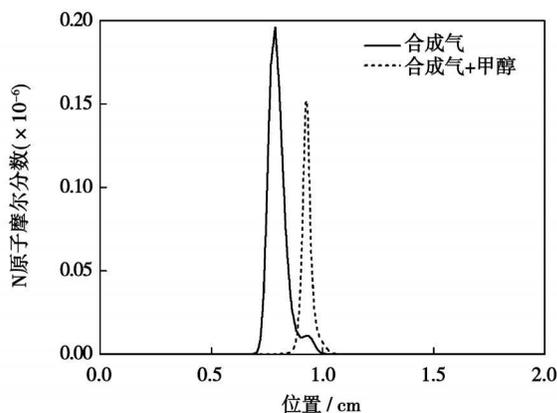


图 11 N 原子浓度分布情况

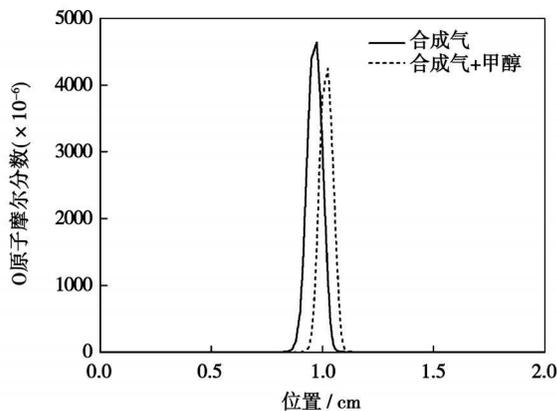


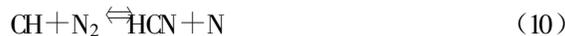
图 12 O 原子浓度分布情况

图 10 为 NO 生成速率的分布情况,由图可以看出,随着甲醇的加入,对冲火焰中 NO 的生成速率降低。NO 的生成主要有 4 种机制:热力型、快速型、N<sub>2</sub>O 中间型以及燃料型。由于所用燃料中不含 N 的化合物,这里仅考虑前 3 种生成机制。

热力型 NO 生成机制主要包括式(8)和式(9)两个化学反应式:



快速型 NO 生成机制主要包括式(10)~式(12) 3 个化学反应式:



N<sub>2</sub>O 中间型 NO 生成机制主要包括式(13)~式(15) 3 个化学反应式:





图 11 ~ 图 14 依次为对冲扩散火焰中 N 原子、O 原子、HCN 基及 N<sub>2</sub>O 基的浓度分布情况图。热力型 NO 的生成主要受 N 原子浓度和 O 原子浓度影响, 由图 11 及图 12 可以看到, 甲醇的加入使得对冲火焰中 N 原子和 O 原子的浓度有所降低, 这就有利于抑制 NO 的生成; 而 HCN 基是快速型 NO 生成机制中的关键基元, 由图 13 可以看到, 甲醇的加入使得对冲火焰中的 HCN 基从无变到有, 有利于促进快速型 NO 的生成; 中间型 NO 的生成主要受 N<sub>2</sub>O 基控制, 图 14 显示甲醇的加入使得 N<sub>2</sub>O 基浓度降低, 有利于抑制 NO 的生成。

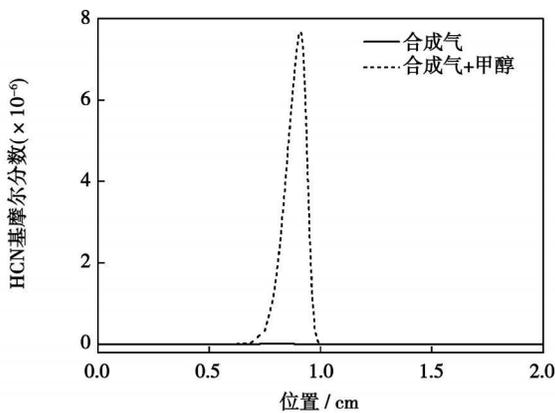


图 13 HCN 基浓度分布情况

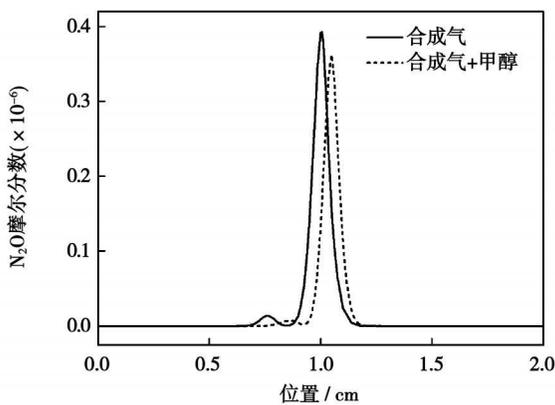


图 14 N<sub>2</sub>O 浓度分布情况

可见, 在合成气火焰中加入甲醇, 有利于抑制热力型 NO 及中间型 NO 的生成, 同时也会促进快速型 NO 的生成, 但总体上, 甲醇的加入有利于抑制 NO 污染物的生成。

### 3 结 论

对合成气-甲醇掺烧火焰进行了实验研究及数值

分析。实验发现, 相比于合成气火焰, 在相同功率条件下, 合成气-甲醇掺烧火焰尺寸略显细长、高温区温度略低, 烟气中 NO<sub>x</sub> 排放较少。通过数值计算分析了火焰尺寸变化的原因及 NO<sub>x</sub> 排放减少的机理。

对火焰的三维数值求解表明, 合成气-甲醇掺烧火焰尺寸变长是由于甲醇未能及时消耗完而导致的, 一方面是由于甲醇燃烧前所经历的蒸发过程使其燃烧滞后; 另一方面是由于甲醇处于合成气的包围之中, 合成气燃烧阻隔了空气与甲醇的混合, 造成甲醇没有充足的氧气进行燃烧。

基于对冲扩散火焰的数值分析表明, 在合成气中加入甲醇除能降低火焰高温区的温度, 有利于抑制热力型 NO 的生成外, 还有利于降低火焰中 O、N 及 N<sub>2</sub>O 浓度, 从而有利于抑制热力型 NO 及中间型 NO 的生成; 同时, 甲醇的加入使得火焰中 HCN 基从无变到有, 有利于促进快速型 NO 的生成。但总体上, 甲醇的加入有利于抑制 NO 的生成。

在实际运用中, 通过改用气动雾化喷嘴一方面可以提高甲醇的雾化质量, 缩短其蒸发时间; 另一方面还能及时供给甲醇燃烧所需的空气, 合成气-甲醇掺烧火焰中甲醇燃烧滞后的问题将会得到较大改善。

### 参考文献:

- [1] 肖云汉, 张士杰. 煤炭多联产技术和氢能技术[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(6): 5-9
- [2] 胡笑颖, 顾煜炯, 杨 昆. 浅析煤炭多联产技术[J]. 煤炭技术, 2005, 24(12): 7-9.
- [3] TURNS STEPHEN R. An introduction to combustion; concepts and applications[M]. (2nd ed). Singapore: McGraw-Hill Book Co, 2000.
- [4] 鲁冠军, 赵黛青, 杨浩林, 等. 甲烷/富氧射流扩散火焰 NO<sub>x</sub> 的排放特性[J]. 过程工程学报, 2007, 7(1): 29-32
- [5] MAGNUSSEN B F, HJERTAGER B H. On mathematical model of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion // 16th Symp(Int) on Combustion[C]. London: The Combustion Institute, 1976. 719-729
- [6] ROSE J W, COPPER J R. Technical data on fuel[M]. Edinburgh: Scottish Academic Press, 1977.
- [7] PETERS N. Laminar flamelet concepts in turbulent combustion // 21st Symposium (International) on Combustion[C]. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1986. 1231-1250.
- [8] HUI XIN, ZHANG ZHEDIAN, MU KEJIN, et al. Effect of fuel dilution on the structure and pollutant emission of syngas diffusion flames // ASME Turbo Expo 2007[C]. Canada: ASME, 2007. 1-9.
- [9] 张哲巖. 湿空气扩散火焰的实验和数值研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006
- [10] LINCK M B. Spray flame and exhaust jet characteristics of a pressurized swirl combustor[D]. Maryland: University of Maryland, 2006.

(编辑 韩 锋)

to be solved for using low-heat-value fuels. **Key words:** biomass, low heat value, miniature gas turbine

合成气-甲醇掺烧火焰研究= **Investigation of Mixing-dilution Combustion Flames of Syngas-methanol**[刊, 汉]/ ZHANG Wen-xing, MU Ke-jin, WANG Yue, et al (Key Laboratory on Advanced Energy and Power, Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24 (2). — 236 ~ 241

An experimental study and numerical analysis was performed of the mixing-dilution combustion flames of syngas-methanol. During the experiment, the flame morphology was observed, and the flame temperature as well as the concentration of  $\text{NO}_x$  pollutants in the flue gas were measured. The test results show that under the condition of an equal power output, the shape of the mixing-dilution combustion flame of the syngas-methanol seems slightly slender as compared with that of a syngas flame, the temperature in the high-temperature zone is a bit low and the  $\text{NO}_x$  emissions from the flue gas are comparatively small. A numerical calculation and analysis shows that the mixing-dilution combustion flame in question becomes longer, because the methanol in the flame has not been burnt out in time, and the drop of flame temperature comes about from a relatively low temperature of the methanol flame. The decrease of  $\text{NO}_x$  emissions from the flue gas results from the addition of methanol to the flame, which is conducive to suppressing the formation of NO of both the thermal and intermediate type. **Key words:** syngas, methanol, mixing-dilution combustion,  $\text{NO}_x$

湿法脱硫的传质与化学平衡模型研究= **Study of a Model Featuring Mass Transfer and Chemical Equilibrium for Wet Method-based Desulfuration**[刊, 汉]/ ZHANG Xiao-dong, WANG Xiu-yan (College of Energy Source and Power Engineering, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206), ZHENG Yong-gang (College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 242 ~ 246

The technology of limestone-gypsum wet-method desulfuration by using a spray absorption tower is nowadays most widely used in coal-fired power plants. Inside the tower, the sprinkling liquid droplets will fall in an inverse direction against the rising flue gas flow to absorb  $\text{SO}_2$  in the flue gas. Based on a steady-state assumption, the authors analyzed the equilibrium relationship between the chemical reaction process in the droplets and liquid-phase constituents, and also presented a model featuring the dissolution velocity of solid  $\text{CaCO}_3$ . By employing a total mass transfer coefficient, set up was a mass transfer rate model for droplet absorption-phase constituents. Through an analysis of the material quantity equilibrium of various components between the gas and liquid phases, established was an equilibrium equation for the controlled volume in the absorption zone. The model in question can provide guidance for relevant engineering applications, and can also be used for the emulation calculation of absorption towers and flow-field numerical simulation calculations. **Key words:** absorption tower, flue gas desulfuration, controlled volume, mass transfer rate

利用 CFD 技术对城市生活垃圾富氧燃烧特性分析= **Research on the Characteristics of MSW (Municipal Solid Waste) Oxygen-enriched Combustion Based on Computational Fluid Dynamics**[刊, 汉]/ LIU Guo-hui, MA Xiao-qian, YU Zhao-sheng (College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou, Post Code: 510640)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 247 ~ 251

The oxygen-enriched combustion technology enjoys conspicuous benefits of energy-saving and environment protection, and represents an effective measure for achieving a steady combustion of low-heat-value wastes and reducing pollutant emissions. By employing CFD (Computational Fluid Dynamics) technology, studied were the characteristics of MSW (Municipal Solid Waste) combustion in the oxygen-enriched atmosphere of a mechanical stoker. The authors have presented the curves showing the flue gas temperature and constituent concentration over and above the waste-burning bed layer as well