

# 甲烷/空气在微小型 Swiss-roll 燃烧器内燃烧的实验研究

李军伟, 钟北京, 王建华

(清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

**摘 要:** 为了解微小型 Swiss-roll 燃烧室的工作特点, 进行了甲烷/空气预混气的燃烧实验, 获得了燃烧器的可燃极限, 研究了回热对燃烧器可燃极限的影响。结果表明, 当甲烷流量在 0.8~2.7 mg/s 之间时, 所设计的微燃烧器能够实现 CH<sub>4</sub>/空气的稳定燃烧, 并确保火焰位于燃烧器的中心。存在回热时, 燃烧器的富氧极限减小, 从没有回热时的 0.7 减小到 0.5。但是可燃极限并不关于 ER=1 对称, 富燃极限大, 而富氧极限小。同时, 对微燃烧器进行了数值模拟, 结果表明, 燃烧器中心的回流区使燃烧器能够在较大的可燃极限范围内稳定工作。

**关 键 词:** 微小燃烧室; 预混燃烧; 甲烷; 燃烧特性

中图分类号: TK411 文献标识码: A

## 引 言

随着 MEMS 的迅速发展, 基于 MEMS 技术的微型动力系统也受到了人们的关注。微型动力系统的一个重要特点是利用燃料或者推进剂在微燃烧器中燃烧, 产生高温高压的燃气, 驱动涡轮或其它动力装置, 从而把化学能直接或间接转化为其它形式的能量, 如热能或电能。燃料或推进剂的能量密度大是其最大优点, 因而微动力系统有着非常好的应用前景<sup>[1~3]</sup>。基于燃烧的动力 MEMS 中, 如何实现微尺度条件下燃料的持续稳定燃烧是制约系统成败的关键因素之一。在微尺度燃烧中, 由于燃烧器尺度的减小, 散热表面积与体积的比值变得很大。面积/体积比的增加会导致火焰向燃烧室壁面的热损失增加, 最终导致熄火、燃烧不稳定以及热效率的降低。因此, 为了减小热损失以及扩展可燃区域, 通过回收燃烧产物中的热能来预热未燃气体, 这种产生过量焓火焰的技术受到了广泛地关注<sup>[4]</sup>。过量焓燃烧方

式最开始由 Weinberg 和 Lloyd 提出<sup>[5~7]</sup>。在过量焓燃烧室中, 燃烧产物和反应物在相邻的通道中逆向流动, 燃烧产物通过通道壁面预热反应物, 提高反应物的焓值, 因此在贫燃、低热值以及大的热损失条件下燃料仍然能够维持燃烧。与简单的直线型逆向换热器相比, Swiss-roll 结构具有更大的换热表面积, 因为每两条已燃或未燃通道中间有一条未燃或已燃通道。

目前, 对 Swiss-roll 结构的换热燃烧器的研究中, Jones 等人对 Swiss-roll 结构的换热燃烧器的定量熄火极限进行了模型研究<sup>[8]</sup>。Romney 提出了改进的 U 型逆向流动热循环燃烧模型<sup>[9]</sup>。Kuo 等人对丙烷/空气螺旋型逆流 Swiss-roll 燃烧器建立了二维数值计算模型<sup>[10]</sup>, 研究了辐射换热、湍流流动和壁面导热对回热式燃烧器性能的影响。Ahn 等人在螺旋型逆流流动 Swiss-roll 燃烧器中进行了丙烷和空气混合物的燃烧实验<sup>[11]</sup>, 主要研究了雷诺数对有催化剂和没有催化剂时熄火极限的影响。可是, 他们研究的 Swiss-roll 燃烧器通道的尺寸比较大, 大于标准状态下丙烷/空气的熄火距离。Kim 等人对 3 种不同几何形状的小型 Swiss-roll 燃烧室的燃烧特性进行了实验<sup>[12]</sup>, 研究了不同的保温措施对火焰稳定, 温度分布的影响, 并估算了这种燃烧加热器的热效率。国内尚未有对 Swiss-roll 燃烧器的实验研究。

为了解更小尺寸燃烧器的工质特点, 本文加工了通道宽度仅为 0.6 mm 的平板型 Swiss-roll 燃烧器, 采用甲烷/空气预混气体进行了燃烧实验, 研究了燃烧器在不同甲烷流量下的可燃极限, 并比较了逆流换热对燃烧器可燃极限的影响。另外, 对实验燃烧器进行了初步的数值模拟, 研究了 Swiss-roll 燃

收稿日期: 2007-03-19; 修订日期: 2007-09-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50376027, 50676050)

作者简介: 李军伟(1978-)男, 河南漯河人, 清华大学博士后

烧器内气体的流动和燃烧特点。

### 1 实验装置和实验模型

实验是在微小燃烧器实验台上进行,实验系统原理如图 1 所示。该实验系统由氧气和甲烷-空气供应分系统,测控和数据采集分系统,点火分系统,微小 Swiss-roll 燃烧器和固定台架等组成。供应系统主要包括高压气瓶、减压器、截止阀、质量流量控制器、电磁阀、单向阀和管路等。实验中,为了达到安全、可靠地点火,采用电火花点火器。在实验时只要调整好氧气和甲烷的混合比(氧气与甲烷的当量比),就能可靠地点火,然后在维持稳定燃烧的情况下逐渐增加空气流量,减小氧气流量直至关闭,最后空气和甲烷的混合气在燃烧器内稳定燃烧。测量的主要参数包括:空气、氧气和甲烷的质量流量、燃烧

室外壁上不同位置的温度。空气和甲烷的流量采用 D07-7A/ZM 质量流量控制器来调节,测量误差小于满量程的 2%。同时,计算机也可以发出指令信号,调节质量流量控制器的流量大小。而氧气的流量使用浮子流量计进行测量,由于氧气只做点火之用,所以不需电子流量计测量和控制。燃烧室外壁的不同位置焊接 0.2 mm 直径的镍铬-镍铝热电偶丝,用来测量通道壁面的温度。K 型热电偶的误差极限为  $\pm 0.75\%$  ( $400 \sim 1300\text{ }^\circ\text{C}$ ),但是在实际使用中由于热电偶自身产生的误差,如热电偶位置测量不准确、由于辐射及导热在导线中的传热损失等。热电偶测点是与壁面焊接在一起的,传热误差很小,总误差估计为  $\pm 5\text{ K}$ 。热电偶的输出电压只有毫伏量级,经热电偶前置调理板滤波、放大后被数据采集卡采集。7 路热电偶的位置如图 2 所示 ( $T1 \sim T7$ ),分别位于两个气流通道两侧的壁面上。

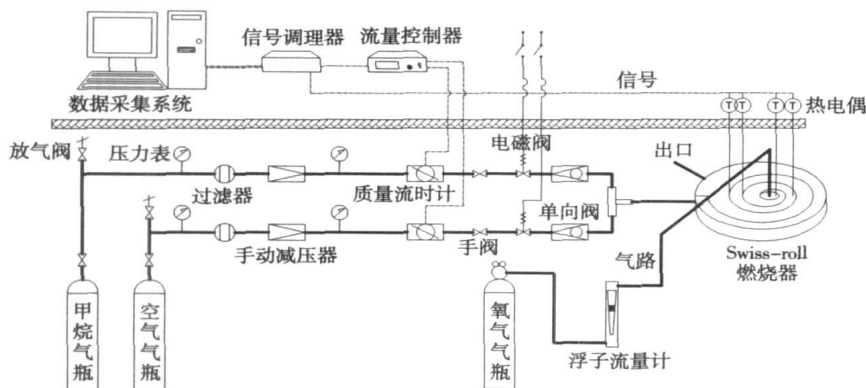


图 1 实验系统简图

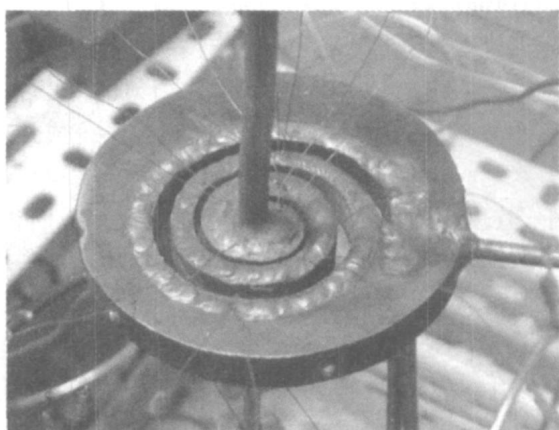
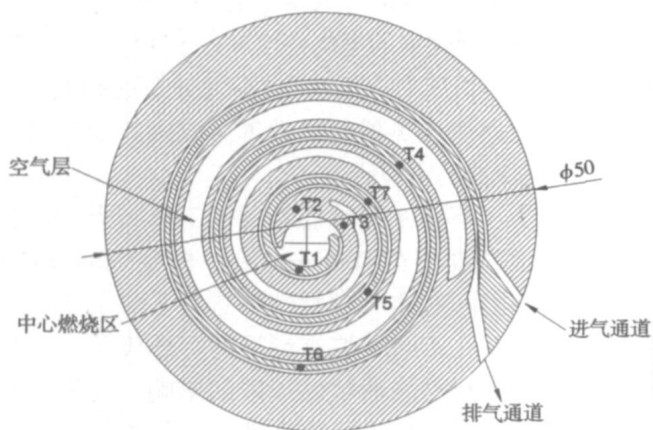


图 2 微小 Swiss-roll 燃烧室结构

各种传感器输出的都是连续的模拟信号, 为了能够被计算机采集, 需要采用 A/D 转换器把模拟信号转换成计算机能够采集的数字信号。在本数据采集系统中, 选用了 PCI-7422 光电隔离数据采集卡。该采集卡是单端 32 路的 12 位高速采集卡, 采用高性能转换芯片 AD1674 (BB774), 采样最高频率 100 kHz, 转换误差只有电压满量程的 0.1%。

本文设计的微小 Swiss-roll 燃烧室的结构如图 2 所示, 气体通道形状为螺旋线结构, 进排气通道截面尺寸都是  $7 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ , 通道之间的室壁厚度为  $0.6 \text{ mm}$ 。内、外圈间的径向间隙为  $0.9 \text{ mm}$ , 这一间隙既为温度的测量提供了方便, 又减少壁面的散热, 从而提高温度测量的准确性, 而且方便以后热电材料的布置。在燃烧器的中心, 为了保证甲烷/空气能够燃烧, 采用了较大的空间, 大于甲烷/空气的最小熄火直径。中心的形状近似于椭圆形, 长轴方向为  $6 \text{ mm}$ , 短轴方向为  $4 \text{ mm}$ , 这样在无催化剂的情况下保证稳定燃烧。在燃烧器的中心, 有氧气管路与燃烧器相连接。实验时, 先采用氧气和甲烷进行点火, 甲烷和氧气在燃烧器中心稳定燃烧, 把燃烧器进行预热, 然后关闭氧气, 打开空气, 最后甲烷和空气预混气体在燃烧器中心稳定燃烧。

## 2 实验结果和讨论

图 3 是关闭氧气后拍摄的微型燃烧器照片。从图中可以看出, 燃烧器中心壁面的亮度最高, 说明这里的温度也最高。由于燃烧器内通道的尺寸小于甲烷/空气可燃的极限尺寸, 甲烷和空气不能在微小通道内燃烧, 只能在燃烧器中心区域的大空间燃烧。这说明本文设计的燃烧器能够稳定预混甲烷/空气火焰, 并保证火焰位于燃烧器中心, 这样才能充分发挥 Swiss-roll 燃烧器提高未燃气体焓值的作用。



图 3 燃烧器中心实验照片

为了比较预热未燃气体对燃烧器可燃极限的影响, 针对燃烧器设计了有两种实验工况。实验工况一是甲烷和空气在燃烧器中心燃烧, 燃气从出口流出, 高温燃气通道间肋的导热加热未燃气体。实验工况二是把出口堵上, 甲烷和空气在燃烧器中心燃烧, 但是燃气从燃烧器中心流出, 不加热未燃气体。图 4 是不同甲烷流量时, 实验得到的两种工况的可燃极限。从图中可以看出, 对于这两种工况, 可燃的上极限很接近, 当量比  $ER$  在 1.4 附近, 说明甲烷过量导致放热量减小, 甲烷和空气不能维持燃烧。但是下极限, 工况一比工况二低很多, 说明空气能够过量较多。这是由于甲烷流量不变, 燃烧放热量不变, 随着空气流量的增加, 空气带走的热量增多, 但不影响甲烷燃烧。而且燃烧后的气体加热未燃的气体, 提高未燃气体焓值, 使其能在更大的极限下燃烧。

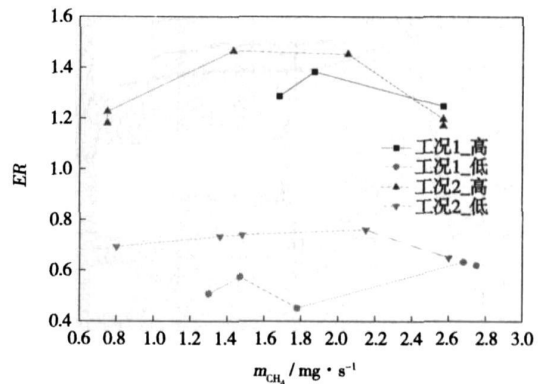
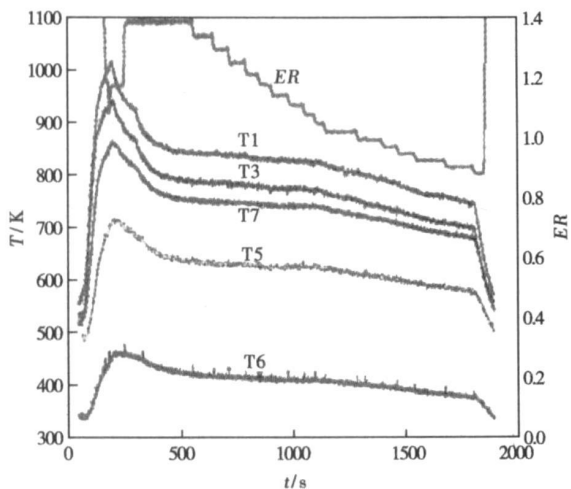
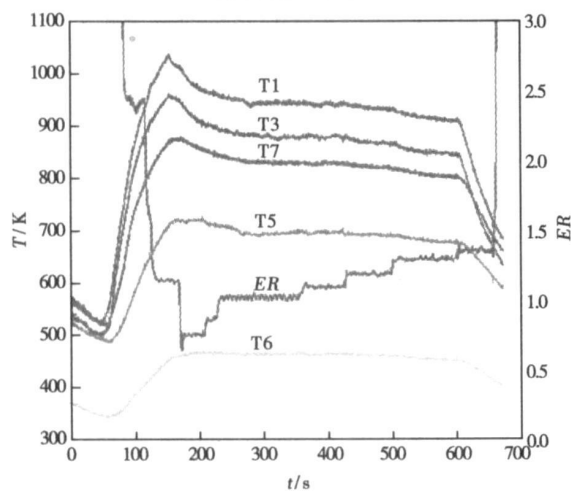


图 4 不同甲烷流量时燃烧器的可燃极限

为了研究微小 Swiss-roll 燃烧器的可燃极限, 实验时固定甲烷流量, 调整空气流量, 得到同一甲烷流量时可燃的上下极限。图 5 是实验过程中, 壁面温度和当量比随时间变化的曲线。图 5(a) 是得到富氧极限的实验曲线。在实验的起始阶段, 为了能够点燃氧气和甲烷的混合气体, 空气流量很小, 因此图 5(b) 是得到富燃料极限的实验曲线。从两幅图中可以看出, 起始时刻空气量很少,  $ER$  远大于 1。随着空气流量的增加,  $ER$  逐渐下降, 在  $ER = 1$  时甲烷和空气达到化学当量比, 此时的燃烧温度最高。随后把甲烷流量调整到实验值, 待甲烷和空气稳定燃烧后, 再逐渐增加/减小空气流量, 观测壁面温度变化。如果空气流量增加/减小后, 壁面温度突然下降, 说明燃烧室的火焰不能稳定, 此时火焰熄灭。火焰熄灭之前的当量比就是该甲烷流量下的熄火极限。



(a) 富氧极限实验



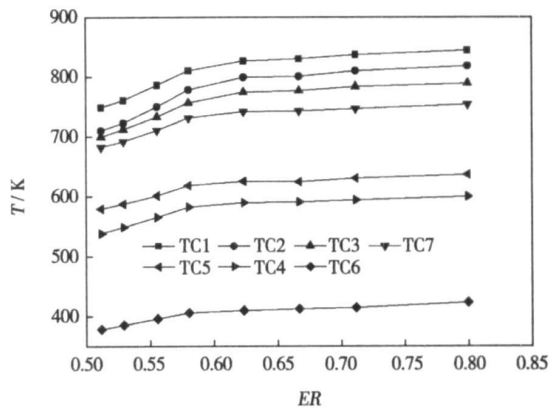
(b) 富燃极限实验

图 5 实时壁面温度测量曲线

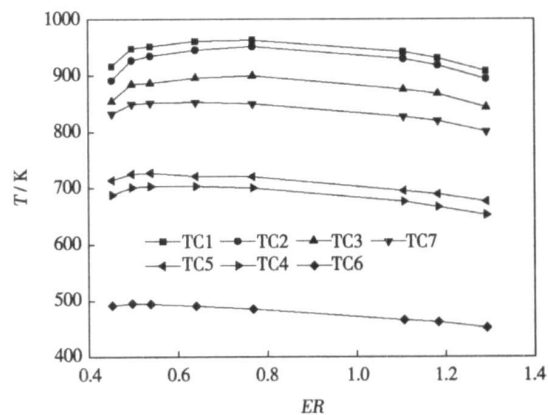
图 6 是对于相同的甲烷流量, 不同当量比时的壁面温度曲线。从图 6(c)中可以看出, 当量比  $ER = 1$  时, 甲烷和空气燃烧最完全, 壁面的温度最高。对于相同的  $ER$ , 随着甲烷流量的增加, 最高壁面温度逐渐升高。  $ER = 0.8$  时, 在甲烷流量为 1.3、1.7 和 2.1  $mg/s$  时, TC1 分别对应的壁面温度为 844、963 和 1 055 K。对于相同的甲烷流量和当量比, 距离燃烧器中心越远, 壁面温度越低。

为了进一步了解甲烷/空气在微型 Swiss-roll 燃烧器中的燃烧特性, 还对实验燃烧器进行了二维数值模拟研究。在燃烧器的计算模型中, 采用了层流多组分输运方程组, 甲烷/空气的 35 个可逆基元反应和 17 种组分的反应机理, 考虑了燃气对固体壁面的辐射换热, 以及气体与固体壁面的换热。为了使数值计算模型与实验模型具有可比性, 保证数值计算模型入口的预混气体质量通量和实验燃烧器的相

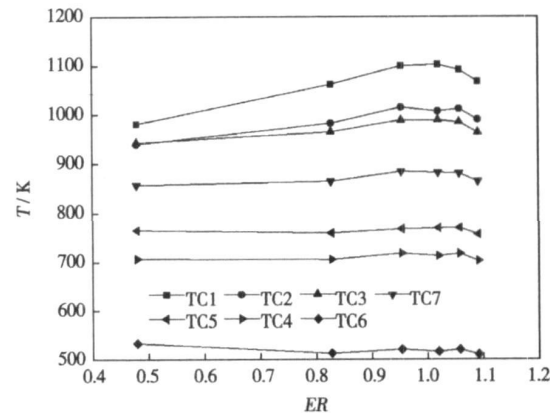
等。



(a)  $m_{CH_4} = 1.3 mg/s$



(b)  $m_{CH_4} = 1.7 mg/s$



(c)  $m_{CH_4} = 2.1 mg/s$

图 6 燃烧器壁面温度分布

图 7 是甲烷流量不变, 不同  $ER$  时燃烧器内部的温度场。数值模拟的流量相当于实验燃烧器内甲烷流量为 1.1  $mg/s$  时的情况。计算得到的燃烧器可燃极限范围为 0.33~1.25, 也是非对称分布, 富氧极限比较小, 而富燃极限较大, 与实验得到规律相同。从计算结果还可以看出,  $ER = 1$  时, 甲烷和空气在燃烧室中心燃烧, 火焰面与流动方向相交, 甲烷

和空气在火焰面上完全燃烧。随着当量比的减小, 空气流量增大, 燃烧室中心的回流区面积扩大, 如图 7(b)和(d)所示。火焰面就位于回流区的外侧, 只有一部分甲烷与空气在回流区外侧燃烧, 其余的气体没有参加反应就流走。回流区使火焰能够在较大的

空气流速下稳定, 所以燃烧器的富氧极限比较小。另外, 从图中可以看出, 随着当量比的减小, 燃烧器中心的最高温度下降, 高温区减小。ER=0.33 时, 燃烧器中心只有很小一块高温燃烧区, 随着空气流量的进一步增大, 火焰就熄灭。

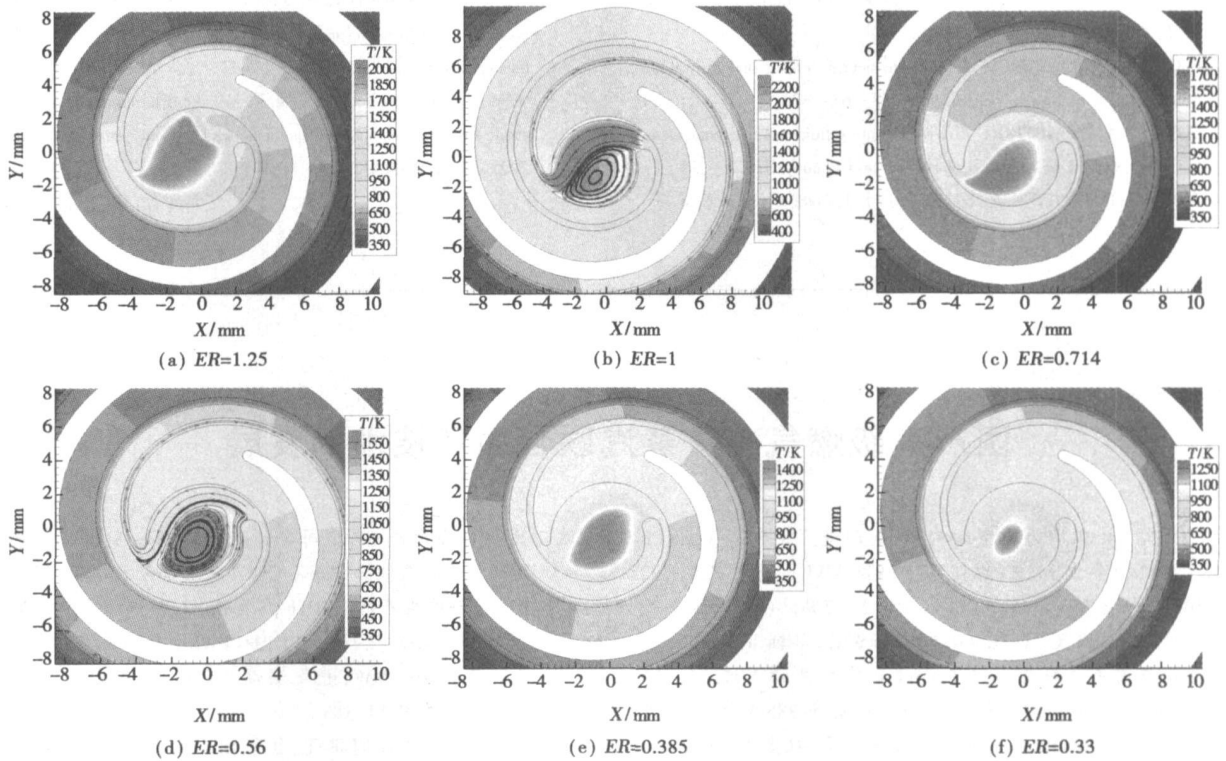


图 7 燃烧器内温度分布图

### 3 结 论

对微小 Swiss-roll 燃烧器进行了实验研究和数值模拟, 研究了甲烷/空气预混气体在燃烧器内的可燃极限和燃烧特点, 得到了以下结论:

(1) 本文设计的二维 Swiss-roll 微小燃烧器能够实现逆流换热, 保证甲烷-空气预混气体的稳定燃烧, 在进行的甲烷流量范围和燃烧工况条件下, 预混气体可以通过逆流换热提高未燃气体的初始温度, 并在燃烧器中心实现稳定燃烧, 温度分布呈现燃烧器中心高, 沿径向逐渐降低的趋势。

(2) 最高的火焰温度在理论当量比附近, 且随着空气流量的增大, 火焰温度逐渐下降, 因此可以通过控制空气的流量实现低温燃烧。

(3) Swiss-roll 燃烧器能够在大的当量比范围内

稳定工作, 但是上下极限并没有在  $ER=1$  两侧对称分布, 富燃极限比较大, 而富氧极限比较小。有逆流换热时, 燃烧器的可燃极限比没有逆流换热时要宽, 尤其是富氧极限比较小。

(4) 当 Swiss-roll 燃烧器中的气流速度较小时, 甲烷/空气火焰停留在燃烧器中心区的入口, 所有进入燃烧器的甲烷都参加反应; 如果气流速度较大, 火焰被吹开, 在燃烧器的中心形成一个回流区, 火焰就发生在回流区的外边界, 只有部分甲烷气体流入回流区参加反应, 其余的直接从回流区外侧流走, 不参加反应。

### 参考文献:

- [1] CARLOS F A. Micro-power generation using combustion: issues and approaches // Twenty-ninth International Symposium on Combustion [C]. Sapporo, Japan, 2002.
- [2] JACOBSON S A, EPSTEIN A H. An informal survey of power MEMS //

The International Symposium on Micro-mechanical Engineering [ C]. Tsukuba, 2003.

[ 3] 黄俊, 薛宏, 潘剑锋等. 微动力系统的若干研究动态和进展[ J]. 世界科技研究与发展, 2005, 1(1): 5-9.

[ 4] JU Y, CHOI C W. An analysis of sub-limit flame dynamics using opposite propagating flames in mesoscale channel[ J]. Combustion and Flame, 2003, 133: 483-493.

[ 5] WEIBERG F J. Combustion temperatures; The future[ J]. Nature, 1971, 233: 233-239.

[ 6] LLOYD S A, WEINBERG F J. Limits to energy release and utilisation from chemical fuels[ J]. Nature, 1975, 257: 367-370.

[ 7] LLOYD S A, WEINBERG F J. A recirculating fluidized bed combustor for extended flow ranges[ J]. Combustion and Flame, 1976, 27: 391.

[ 8] JONES A R, LLOYD S A, WEINBERG F J. Combustion in heat exchangers[ J]. Mathematical and Physical Sciences, 1978, 360: 97-115.

[ 9] RONNEY P D. Analysis of non-adiabatic heat-recirculating combustors[ J]. Combustion and Flame, 2003, 135: 421-439.

[ 10] KUO C H, RONNEY P D. Numerical modeling of non-adiabatic heat-recirculating combustors[ J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31: 3277-3284.

[ 11] AHN J, EASTWOOD C, SHIZKI L, et al. Gas-phase and catalytic combustion in heat-recirculating burners[ J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30: 2463-2472.

[ 12] KM N, KATO S, TAKUYA K. Flame stabilization and emission of small swiss-roll combustors as heaters[ J]. Combustion and Flame, 2005, 141: 229-240.

(编辑 韩 锋)

新技术、新产品

## 国产 F 级燃气——蒸汽联合循环技术的发展

F 级燃气轮机均为重型结构,我国制造厂主要有 3 家:(1) 哈尔滨动力设备公司与 GE 公司合作生产的 PG9351(FA) 型燃气轮机。燃机功率 255 MW, 热耗 9 759 kJ/(kWh), 进气温度 1 327 °C, 单轴燃气——蒸汽联合循环(IGCC) 机组型号 S109FA 功率为 390 MW, 热耗 6 350 kJ/(kWh), 热效率 56.7%。(2) 东方电气集团公司与三菱合作生产的 M701F 燃气轮机, 燃机功率 270 MW, 进气温度为 1 400 °C, 热耗 9 421 kJ/(kWh), 单轴 IGCC 机组型号 MPCP1, 功率 397 MW, 热耗 6 317 kJ/(kWh), 热效率 57%。(3) 上海电气集团总公司与西门子公司合作生产的 V94.3A 型燃气轮机, 燃机功率 265 MW, 进气温度 1 320 °C, 热耗 9 350 kJ/(kWh), 单轴 IGCC 机组型号 IS.V94.3A, 功率 385 MW, 热耗率 6 283 kJ/(kWh), 热效率 57.3%。

3 种型号 IGCC 的燃气轮机机构为双轴承、双支承, 压气机冷端输出功率, 燃气轮机轴间排气, 扩散段与余热锅炉直接相连。压气机通流部分采用先进的设计方法, 故压气机流量大, 压比高。

F 级燃气轮机的燃烧室采用干式低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术, 即燃料与空气均匀预混, 欠氧主燃压火焰控制在 1 690~1 900 K 范围内, NO<sub>x</sub> 降低到 25×10<sup>-6</sup> 以下。PG9351FA 采用逆流分管式、轴向分级式的干式低 NO<sub>x</sub> 燃烧室, M701F 采用环管型结构的多喷嘴预混燃烧室, 并在每个火焰管过渡段上安装一只可调节的旁通阀, 根据机组负荷大小来调节旁通阀的开度, 控制一次燃烧区中的天然空气比, 改善低负荷下的燃烧效率; V94.3A 采用环形燃烧室, 机组结构紧凑, 燃气轮机前的燃气温度场比较均匀。

3 种燃气轮机动静叶片采用高效叶型, 第 1、2 级叶片材料采用耐高温的单晶定向结晶技术, 改善了高温蠕变强度, 叶片表面喷涂有热障涂层, 有效地起着隔热保护作用, 能降低金属的最高温度。PG9351FA 燃机进气 1 327 °C, 三级结构, 焓降较大, 单机效率 36.9%; M701F 燃机进气 1 400 °C, 四级结构, 单机效率 38.2%; V94.3A 燃机进气 1 320 °C, 四级结构, 单机效率 39%。M701F 和 V94.3A 燃机都为四级, 故效率略高。

压气机。PG9351FA 压气机 18 级, 压比 15.4; M701F 压气机 17 级, 压比 17; V94.3A 压气机 15 级, 压比 17。为防止启动过程中发生喘振, 3 种型号的压气机中都装有一级入口可转导叶和中间级放气口, 可转导叶还能在联合循环运行时, 在一定负荷范围内, 保持燃机排气温度不变, 以提高锅炉汽轮机组的热效率。

系统和布置。由 F 级燃气轮机组成的 IGCC 都采用单轴布置, 燃气轮机、压气机、汽轮机和发电机都在一条轴线上, 共同驱动一台发电机, 机组采用静态变频启动方式。S109FA 和 MPCP1 是按燃气轮机、汽轮机、发电机的顺序排列, 联轴器内为刚性连接, 启动时需要辅助冷却蒸汽。IS.V94.3A 则按燃气轮机、发电机、汽轮机排列, 燃气轮机和发电机联轴器刚性连接, 而发电机与汽轮机则用 3S 离合器连接, 启动时发电机用作同步电动机, 待达一定转速时, 3S 离合器使汽轮机加入轴系。此系统燃气轮机发电机可简单循环运行, 汽轮机轴向排气, 机组为单层布置。

由于 F 级燃气轮机排气温度高, 故多采用三压余热锅炉。PG9351 排气 603~609 °C, M701F 为 563~588 °C, V94.3A 为 581~588 °C。有关资料统计, 9FA 组成的 IGCC 的 29 台中, 余热锅炉三压的有 24 台, 双压只有 5 台, 三压余热锅炉用得较多的另一原因是它们都使用天然气。使用天然气的余热锅炉允许排烟温度可较低, 例如许多 S109FAIGCC 的锅炉排烟常小于 90 °C。

(赵旺初 供稿)

distribution **Key words:** modified desulfuration agent, CaO, calcination, pore diameter distribution, fractal dimension

氨法脱除燃煤烟气中 CO<sub>2</sub> 的实验研究 = **Experimental Study of the Removal of CO<sub>2</sub> from Coal-fired Flue Gas by Using Ammonia**[刊, 汉] / ZHANG Mao, SAI Jun-cong, WU Shao-hua (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), LI Zhen-zhong (National Research Center of Power Plant Combustion Engineering Technology, Shenyang, China, Post Code: 110034) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 191 ~ 194

The removal of CO<sub>2</sub> greenhouse gas from coal-fired flue gas by spraying ammonia water is a new kind of CO<sub>2</sub> trapping method. To study the influence of such parameters as ammonia water concentration, CO<sub>2</sub> concentration and temperature on the CO<sub>2</sub> removal rate, an experimental study of ammonia water spray has been performed by employing a continuous on-line CO<sub>2</sub> detection in a stepped-ring packed tower operating at different parameters with diluted ammonia water serving as an absorption agent. The study results show that the diluted ammonia water also enjoys a relatively high rate of CO<sub>2</sub> removal. With an increase of the ammonia water concentration, the time required by the reaction to attain an equilibrium state and the CO<sub>2</sub> removal rate achieved at an equilibrium state will also gradually increase. With an increase of the initial CO<sub>2</sub> concentration in the flue gas, the CO<sub>2</sub> removal rate will decrease accordingly. In a temperature range from 22 to 50 °C, the CO<sub>2</sub> removal rate is affected remarkably by the reaction temperature accompanied by a relatively conspicuous fluctuation of the rate in question. The removal rate will attain its maximum value at a temperature around 40 °C. **Key words:** CO<sub>2</sub> greenhouse gas, ammonia water spray, packed tower, ammonium bicarbonate

甲烷/空气在微小型 Swiss-roll 燃烧器内燃烧的实验研究 = **Experimental Study of Methane/air Combustion in a Swiss-roll Miniature Combustor**[刊, 汉] / LI Jun-wei, ZHONG Bei-jing, WANG Jian-hua (Aeronautics and Astronautics College, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 195 ~ 200

To understand the operation features of a miniature Swiss-roll combustor, a methane/air premixed combustion experiment has been performed with the combustion limit of the combustor being obtained. The influence of a heat recirculation on the combustion limit of the combustor has also been studied. The test results show that when the methane flow rate is between 0.8 and 2.7 mg/s, the miniature combustor thus designed can fulfill a stable methane/air combustion and guarantee that the flame is located at the combustor center. With the heat recirculation being enforced, the oxygen enrichment limit of the combustor will be decreased from 0.7 (without heat recirculation) to 0.5. However, the combustion limit is not symmetrical to ER (stoichiometric equivalence ratio) = 1. The fuel enrichment limit is small while the oxygen enrichment limit is large. At the same time, the authors have also conducted a numerical simulation of the miniature combustor. The simulation results show that the flow return zone at the combustor center enables the combustor to secure a stable operation in a relatively large range of combustion limit. **Key words:** miniature combustor, pre-mixed combustion, methane, combustion characteristics

高浓度水煤浆流变特性和稳定性试验研究 = **Experimental Study of High-concentration Coal-water slurry Rheological Properties and Stability**[刊, 汉] / ZHAO Guo-hua, DUAN Yu-feng, XU Feng, et al (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 201 ~ 205