

文章编号: 1000-8055(2008)07-1174-08

旋流预混预蒸发装置蒸发和排放特性

钟华贵^{1,2}, 朱 涛²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 中国燃气涡轮研究院, 江油 621703)

摘 要: 采用数值模拟和试验两种方法获得了两种结构的贫油预混预蒸发装置(Lean premixing and prevaporizing system, 简称 LPP)出口的油气混合均匀性, 并采用单管燃烧室验证了 LPP 装置的燃烧特性. 径向旋流预混装置出口的油气混合比轴向旋流预混装置更均匀; 旋流器的叶片数和旋流角、预混管长度、气流速度、喷油方式等对油气混合均匀性均有比较显著的影响; 在当量比高至 0.5 左右时, LPP 燃烧室 NO_x 和 CO 排放比传统燃烧室低得多; 只要 LPP 装置出口存在回流, 燃烧时就会出现回火现象.

关 键 词: 燃烧室排放; 贫油预混预蒸发装置; 燃烧室

中图分类号: V231.2

文献标识码: A

Vaporization and discharge characteristics of lean premixing prevaporizing system

ZHONG Hua-gui^{1,2}, ZHU Tao²

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. China Gas Turbine Establishment, Jiangyou 621703, China)

Abstract: Fuel-air mixture uniformity for two sets of lean premixing and prevaporizing system(LPP) was obtained numerically and experimentally, and the combustion characteristics of LPP were verified with a tubular combustor. The results show that, there is a better fuel-air mixture uniformity at the exit of radial swirler premixing facilities than at axial ones. Vane number and swirl angle of a swirler, premixing distance, air velocity and fuel injection methods, etc, have remarkable effects on air-fuel mixture uniformity. When fuel-air equivalent ratio is bigger than 0.5, CO and NO_x emissions of the LPP combustor are significantly lower. In the event of presence of backflow at a LPP facility exit, the flashback takes place during combustion.

Key words: combustor emission; lean premixing and prevaporizin; combustor

燃气涡轮发动机向大功率、高推重比发展, 燃烧室进口温度、进口压力和温升也相应地不断提高, 排气污染有不断增加的趋势; 另一方面, 基于环境保护的要求, 对燃气涡轮发动机排放物(尤其

是 NO_x) 提出了更为苛刻的限制. 因此, 近十几年来, 减少燃气涡轮发动机燃烧室的排气发散成了热门的研究课题, 各种新概念和新结构燃烧室应运而生. 贫油预混预蒸发(LPP)、富油 - 快速混合

收稿日期: 2007-07-11; 修订日期: 2008-01-03

基金项目: 航空基金(03C24007)

作者简介: 钟华贵(1969 -), 男, 四川泸县人, 博士生, 研究员, 主要从事燃烧室设计与试验研究以及发动机高空模拟试验研究.

- 贫油燃烧(RQL)以及贫油直接喷射(LDI)等燃烧方式是典型代表^[1-4]。

贫油预混预蒸发燃烧室的燃料和一部分空气首先在预混装置中混合、蒸发,形成较为均匀的油气混合物后进入燃烧区,燃烧室主燃区局部区域在比传统燃烧室更贫油的条件下工作,火焰温度更低,从而降低 NO_x 的排放水平。贫油预混预蒸发概念可将排气发散降到极低的水平,得到了各国研究人员的广泛关注。

Dodds W.J 和 Ekstedt E. E 研究了压力、温度、当量比和气流速度等工作条件和预混装置的结构对油气混合均匀性的影响。而油气混合均匀性对 NO_x 的排放和燃烧室的工作特性具有决定性的影响。低于 15 % 的油气混合不均匀系数(标准偏差/平均值)可满足现代航空燃气涡轮发动机在典型巡航状态下的工作包线和自燃的需要^[5]。Hayashi S 等人研究发现,参考速度对 NO_x 的排放影响显著,其主要原因是雾化恶化、蒸发不完全和油气混合均匀性差^[6]。

Liedtke O 等人设计了一种微型燃机用 LPP 燃烧室^[7],研究了气流速度、温度、压力和液滴直径等条件对燃油蒸发距离的影响。当气流温度越低和液滴直径越大时,压力和气流速度对燃油蒸发的影响越明显。Ripplinger Th 等人则设计一种带气动雾化喷嘴的 LPP 燃烧室,预混时间在 1.25~1.5 ms 之间则燃油可完全蒸发,该 LPP 燃烧室在满足高燃烧效率(99 % 以上)和稳定燃烧等要求的基础上比传统的低 NO_x 排放扩散燃烧室的 NO_x 排放低 85 %,并且在 820 K 进口温度和 2.0 MPa 的工作压力下不发生回火和自燃^[8]。

Hayashi S 等人研究发现,采用反旋的两级轴向涡流器可抑制预混管出口回流区或者中心低速区的形成,从而避免回火的产生^[9]。

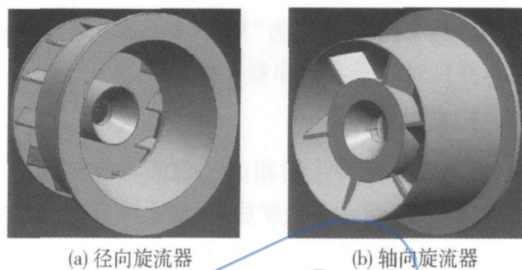
国内从前几年开始才关注低排放燃烧问题,并进行了一些尝试性的工作。对于 LPP 燃烧室的研究则鲜见报道。

本文对几种简单结构 LPP 装置出口的油气混合均匀性进行了数值模拟,并采用当量比燃气分析系统测量得到了 LPP 装置出口的当量比分布数据。在 LPP 装置后面加装壁面水冷的钝体火焰稳定单管燃烧室,获得了 LPP 燃烧系统的燃烧性能和排放特征。

1 试验件

预混预蒸发装置由旋流器、预混管和喷油装

置构成。旋流器包括径向旋流器和轴向旋流器,旋流器的结构如图 1 所示。每种旋流器包括 30° 、 45° 和 60° 三种旋流角,叶片数有 6 片和 12 片两种。预混管是圆管,与旋流器出口直径相同,长度分别为 112.5 mm、150 mm 和 187.5 mm。燃油喷射装置包括离心式喷嘴和喷油杆,其结构分别如图 2 和图 3 所示。离心式喷嘴的喷油孔直径为 $\phi 0.7$,喷雾锥角 80° ;喷油杆由 3 个 $\phi 0.4$ 的简单直射式喷油孔喷油,喷射方向沿预混管径向。



(a) 径向旋流器 (b) 轴向旋流器

图 1 两种旋流器结构示意图

Fig. 1 Schematics of two swirlers

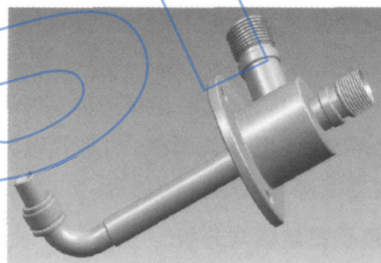


图 2 离心式喷嘴模型

Fig. 2 Pressure-swirler atomizer model

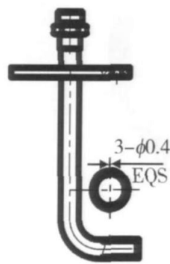


图 3 喷油杆

Fig. 3 Fuel injection bar

2 数值模拟

2.1 网格

预混装置为轴对称结构,为减少计算量,将预混装置的 $1/N$ 切片(N 是旋流叶片数)作为计算单元,该切片将一个旋流叶片包含其中,剖切面设为周期性边界。由于叶片处结构比较复杂,网格分

区设置,采用三角形非结构网格.

2.2 数学模型

鉴于存在比较强的旋流,采用 $k-\varepsilon$ 两方程 Realizable 湍流模型. 燃油粒子在空气中的蒸发、沸腾和扩散以及两相间的动量、质量和能量的交换采用离散相模型(DPM). 离散相(燃油)和连续相(空气)之间相互作用,连续相处于定常状态,离散相非定常跟踪,采用随机游走模型(DRW). 粒子喷射采用“pressure-swirler atomizer”的碰撞和断裂模型,其中断裂模型为“WAVE - BREAKUP”模型,并且对粒子实施非稳态跟踪.

2.3 计算方法

首先求解模型连续相(气流)的稳态流场,当气流流场收敛到一定程度后,再加入喷雾粒子. 然后连续相(气流)采用稳态算法,喷雾粒子非稳态跟踪,最终获得喷雾粒子轨迹和当量比分布.

压力的离散采用“PRESTO”方法,压力和速度的耦合采用“SIMPLE”算法,动量、密度、湍流动能、湍流耗散率和能量采用二阶迎风格式离散.

进口边界为“mass-flow-inlet”边界,输入固定的进口流量及其它参数. 出口边界为“pressure-outlet”边界. 壁面温度为恒值,与进气温度相同,离散相在壁面采用“wall-jet”边界.

2.4 数值模拟结果与分析

图 4 给出了几种径向旋流预混装置出口当量

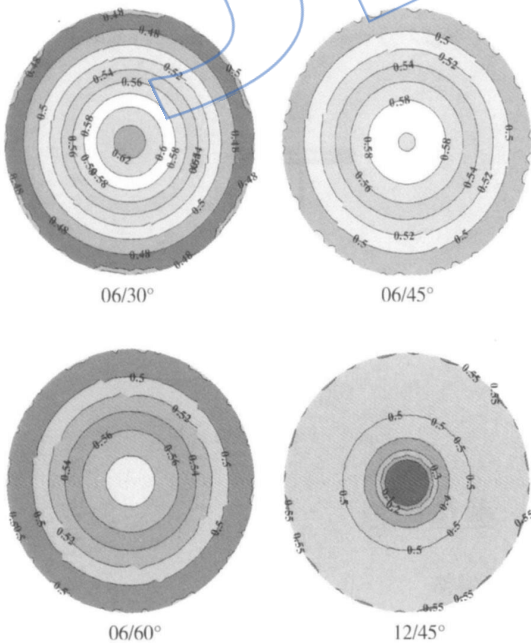


图 4 径向旋流预混装置出口当量比等值线分布
Fig. 4 Fuel-air equivalent ratio contours at radial swirler premixing system exit

比分布云图. 对于 6 叶片的径向旋流器而言,旋流角越大,出口当量比分布越均匀,因为强旋流增强了油气混合的能力;当叶片数为 12,旋流角为 45° 时,由于旋流过强,多数燃油被强旋流带到近壁处,而且在出口发生回流,出口当量比呈现出中心小,边壁大的不均匀分布状态.

表 1 是数值模拟得到的各种旋流器结构预混装置出口当量比分布不均匀系数的对比. 其中当量比分布不均匀系数的定义如下:

$$S = \frac{\sigma_{\phi}}{\phi_{av}}$$

其中 σ_{ϕ} 是当量比 ϕ 的标准偏差.

表 1 数值模拟得到的预混管装置出口当量比不均匀系数

Table 1 Fuel-air mixture uniformity factors at various premixing system exits from numeric simulation						
类型	叶片数	旋流角/ ($^{\circ}$)	管长/ mm	速度/ (m/s)	温度/ K	S
径向	6	30	187.5	75	650	0.090
	6	45	187.5	75	650	0.068
	6	60	187.5	75	650	0.062
	12	45	187.5	75	650	0.316
	6	60	112.5	75	650	0.139
	6	60	187.5	60	650	0.048
	6	60	187.5	58	500	0.056
	6	30	187.5	75	650	0.409
轴向	6	45	187.5	75	650	0.648
	12	45	187.5	75	650	0.730

*注:指预混管中的气流速度

由于在长预混管中油气混合的时间比短预混管长,因而长预混管出口当量比分布比短预混管出口当量比分布更均匀. 当气流速度低时,气流在预混装置中的滞留时间长,燃料蒸发以及燃料和空气混合的时间相应更长. 虽然喷嘴压降降低,燃油雾化略差一些,但其影响比长滞留时间的影响小,因而气流速度越低,油气混合越均匀. 进口温度降低到 500 K 时,燃油蒸发速度变慢,弱化了燃油和空气的混合,油气混合均匀性变差.

轴向旋流器形成了比径向旋流器更加强烈的旋流,部分燃油被卷吸到壁面,而且在预混管出口存在强烈的回流,因此,在轴向旋流预混管出口出现了中间燃油少,壁面燃油多的当量比分布极端

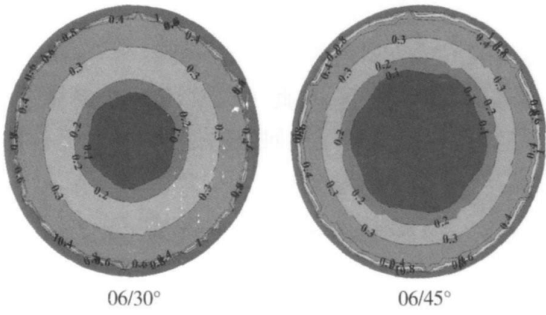


图 5 轴向旋流预混装置出口当量比等值线分布

Fig. 5 Fuel-air equivalent ratio contours at axial swirler premixing system exit

不均匀情况,而且漩涡越强,分布越不均匀,如图 5 和表 1 所示。

3 预混装置出口油气混合分布测量

3.1 试验装置

测量预混装置出口油气分布特性的试验空气流程如图 6 所示。由一台柱塞式压缩机提供流量为 0.25 kg/s 的压缩空气,压力可达 2.5 MPa,但该试验在常压下进行。电加热器的设计能力为:将 $W_a = 0.2 \text{ kg/s}$ 的空气加热到 500 °C 空气流量测量采用符合国家标准流量孔板,燃油流量用 CL G-4 涡轮流量计测量。

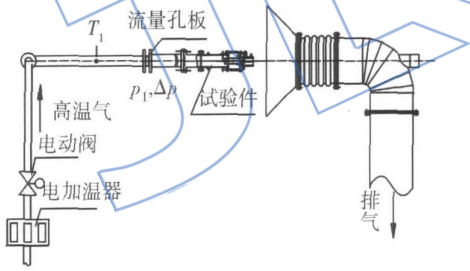


图 6 试验设备简图

Fig. 6 Schematics of the test facility

测量预混装置出口的当量比分布时,在预混装置出口周向 135° 范围内每间隔 45° 布置一个安装座(共 4 个),用于安装一维位移机构。位移机构上带单点采样探头,可手动调节位移机构的旋塞,使采样探头沿预混管径向移动测量径向不同点的当量比。每完成一个周向位置的测量,将位移机构换装到其它的安装座上,以完成相对应的周向位置的测量,最终获得预混管出口的当量比分布。试验件和出口测量装置如图 7 所示。

测量预混管出口的当量比分布时,采样探头收集到的油气混合物经过两个串联的催化燃烧器加热燃烧后送到 CO₂, CO 分析仪,测量燃气的

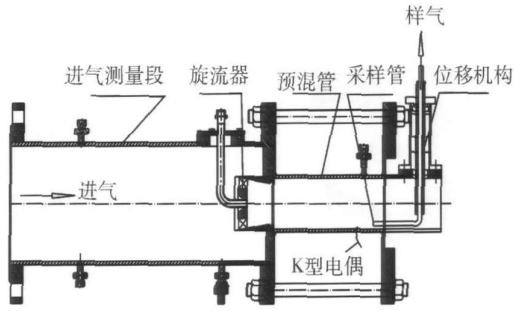


图 7 试验件和出口测量装置

Fig. 7 Object tested and exit measurement facility

CO₂, CO 含量,从而计算获得油气混合物的当量比。两个催化燃烧器中装有铂铑丝,管壁通 220 V 电压,可将管壁温度加热到 1 000 °C 左右,使油气混合物氧化。为验证催化燃烧器的氧化能力,利用火焰离子探测器对催化燃烧器后燃气中的 UHC 含量进行了监测,UHC 质量分数在 50×10^{-6} 以下,可忽略不计。燃气分析测量当量比的流程如图 8 所示。

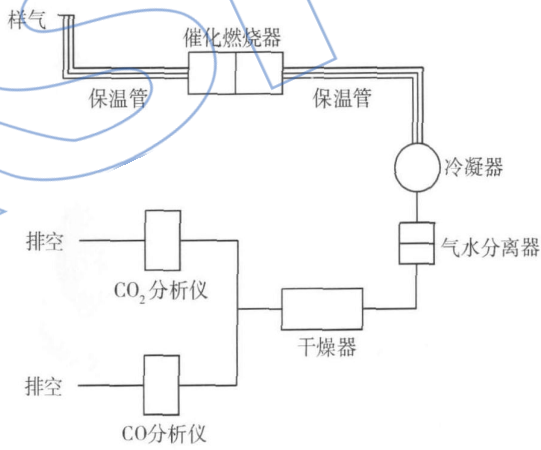


图 8 当量比分析系统

Fig. 8 Fuel-air equivalent ratio analysis system diagram

3.2 试验结果及分析

3.2.1 旋流器结构的影响

图 9 和图 10 是部分径向旋流和轴向旋流预混装置在相同试验条件下获得的出口当量比分布。当径向旋流器叶片数为 6 时,随着旋流角的增大,预混管出口油气分布越来越均匀。对于叶片数为 12,旋流角为 45° 的径向旋流器以及所有轴向旋流器,在预混管中心出现燃油空洞,主要原因是旋流过强,中心出现回流,燃油向边壁集中。

对比试验结果和数值模拟结果可以看出:虽然当量比的分布形态有所差别,但对于预混器结构对油气混合分布均匀性的影响规律,数值模拟

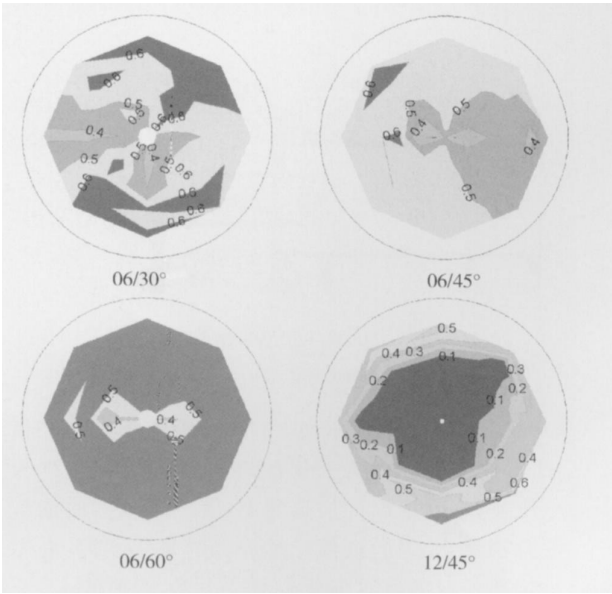


图 9 测量的径向旋流预混管出口当量比等值线分布
Fig. 9 Fuel-air equivalent ratio contours at radial swirler premixing system exits from test

得到的结果和试验结果一致. 当量比分布形态和绝对量值存在差别的主要原因是实际喷雾锥角的不均匀性以及旋流器的加工误差等因素造成的.

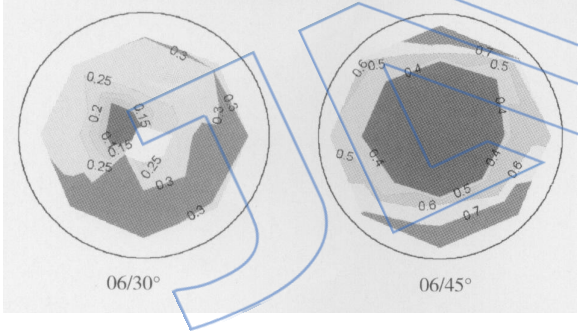


图 10 测量的轴向旋流预混管出口当量比等值线分布
Fig. 10 Fuel-air equivalent ratio contours at axial swirler premixing exits from test

表 2 给出了各种结构旋流装置在各种条件下的当量比分布不均匀系数的对比.

从表 2 的试验结果中可以看出,对于径向旋流预混装置,旋流角为 30 时,12 个叶片的径向旋流器比 6 个叶片的均匀. 一方面,叶片数越多,流通面积小,在相同的空气流量下,旋流速度增强,有利于油气混合;另一方面,叶片数增加,气流流动更均匀. 综合图 9 和表 2 可以看出:对于 6 个叶片的径向旋流器,旋流角从 30°,45°变化到 60 时,预混装置出口的油气混合越来越均匀. 旋流角为 30 时,12 个叶片比 6 个叶片的预混装置油气分布均匀,旋流角为 45 叶片数 12 时,由于旋流太强

在预混装置出口产生了回流(数值模拟也证明了这一点),试验测量的油气分布极不均匀,在中心出现了当量比空洞. 由此可认为:对于径向旋流预混装置,在出口不出现回流的前提下,旋流越强,出口当量比分布越均匀.

表 2 试验获得的各种预混管出口当量比不均匀系数
Table 2 Fuel-air mixture uniformity factors at various premixing system exits from test

类型	叶片数	旋流角/ (°)	管长/ mm	速度/ (m/ s)	温度/ K	S
径向	6	30	187.5	75	650	0.175
	6	45	187.5	75	650	0.172
	6	60	187.5	75	650	0.109
	12	30	187.5	75	650	0.131
	12	45	187.5	75	650	0.824
	6	60	112.5	75	650	0.370
	6	60	150.0	75	650	0.320
	6	60	187.5	60	650	0.048
	6	60	187.5	58	500	0.056
	6	30	187.5	79	650	0.298
轴向	6	45	187.5	75	650	0.973
	12	30	187.5	75	650	0.990
	12	45	187.5	75	650	1.336
	12	60	187.5	75	650	1.442
	6	45	187.5	54	650	0.569
	12	45	187.5	42	650	0.710

数值模拟和试验结果均表明,对于轴向旋流预混装置,随着叶片数的增加,旋流角的增大,旋流越强,不仅更多的燃油被旋到预混管边壁,而且回流区也越来越大,因而油气分布越来越不均匀.

3.2.2 预混管长短对油气分布均匀性的影响

随着预混管增长,燃油的蒸发以及燃油与空气混合的时间更充裕,因而预混管出口的油气混合更均匀,如图 11 所示.

3.2.3 气流速度对油气分布均匀性的影响

气流速度对油气混合均匀性的影响与预混管长度的影响的机理是一样的,气流速度低,燃料蒸发和油气相互混合的时间长,从而油气混合也更均匀,如图 12 所示.

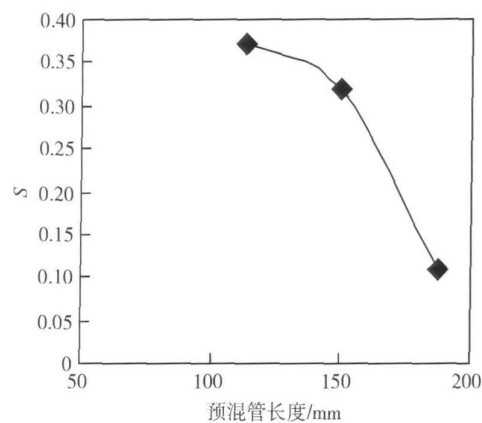


图 11 油气混合均匀性与预混长度的关系
Fig. 11 Relations between fuel-air mixture uniformity and premixing distance

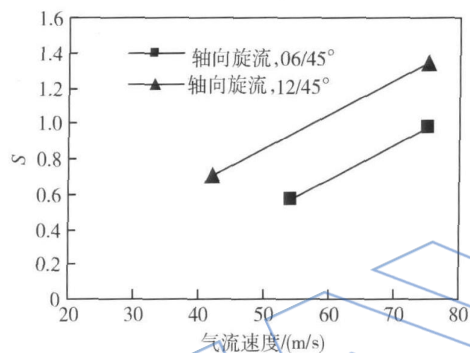


图 12 油气混合均匀性与空气速度的关系
Fig. 12 Relations between fuel-air mixture uniformity and air velocity

3.2.4 喷油方式对油气分布的影响

离心式喷嘴的喷雾更为均匀,粒径更小,更有利于混合和蒸发.使用离心式雾化喷嘴时油气分布的均匀性明显好于使用喷油杆,如图 13 所示.

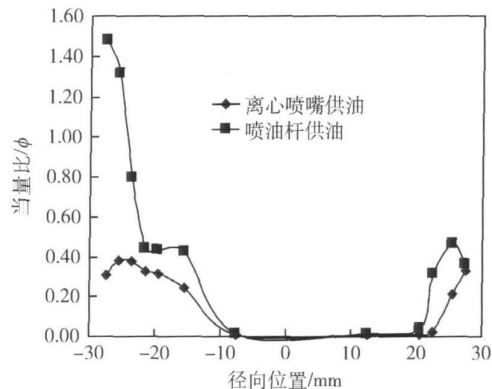


图 13 喷油方式对油气分布的影响
Fig. 13 Effect of fuel injection methods on fuel-air equivalent ratio distributions

4 燃烧性能验证

为了验证预混预蒸发装置的燃烧性能,在图 6 所示的试验装置上,在预混管出口安装水冷的单管燃烧室.该燃烧室采用钝体火焰稳定器,在燃烧室出口安装采样耙测量燃烧室的排气发散和燃烧效率.用埋设在预混管壁面的铠装 K 型电偶监测预混管壁面温度,以判断预混管的回火情况,如图 14 所示.

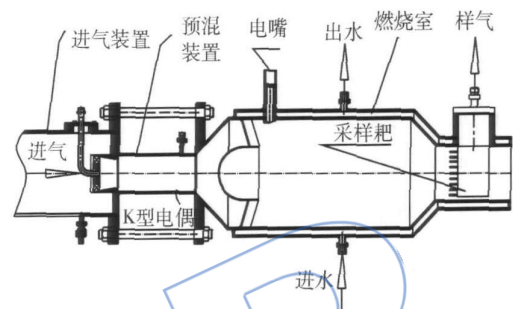


图 14 燃烧性能试验件
fig. 14 Object tested for combustion performance

根据油气混合均匀性试验得到的结果,结合 CFD 分析,选择了部分结构,在部分状态下录取了燃烧室出口的燃烧效率并进行了排气发散测量.

表 3 给出了部分试验组合的燃烧性能和排气发散试验数据.从表 3 中可以看出,在进气温度 500~650 K 范围内,虽然随着进气温度的升高,燃烧越完全,但影响并不明显.气流速度、喷油方式以及预混管的长短对燃烧效率的影响也不显著.也就是说油气混合到一定程度后,均匀性的差别不会对燃烧效率产生质的影响.

对燃烧效率有明显影响的参数是当量比,当量比从 0.5 左右降到 0.44 时,CO 和 UHC 含量急剧增加,燃烧效率从 0.999 降到 0.98.这是因为当量比低,燃烧温度低,从而造成燃烧速率低,油气混合物难以燃烧完全.

对比 LPP 燃烧室、某高温升燃烧室和某高热容燃烧室出口的 NO_x 的排放,LPP 燃烧室的 NO_x 排放指数远低于后二者,如图 15 所示.高温升燃烧室和高热容燃烧室的试验数据是在 5 个大气压下获得的,假定发散指数和压力的平方根成正比,图 15 中将这两者的发散指数折算到了常压状态,以便于对比.

在一定的当量比范围内,LPP 燃烧室出口 CO 含量随当量比的变化与高温升燃烧室和高热

容燃烧室相反,如图 16 所示(图中高温升燃烧室的试验数据是在 808 K 的进口温度下获得的,而 LPP 和高热容燃烧室试验的进气温度为 650 K 和 600 K). 当量比高至 0.5 左右时,LPP 的 CO 排放远低于传统燃烧室.

表 3 LPP 装置燃烧性能和排气发散数据
Table 3 Combustion performance and emiss data of LPP

试验组合	供油方式	T_{in}/K	$V_{air}/(m/s)$	$CO/10^{-6}$	$UHC/10^{-6}$	$NO_x/10^{-6}$	η	ϕ	T_g/K	EI_{NO_x}
A3_L	喷嘴	500	58	142	37	10	0.998	0.49	1607	0.29
A3_L	喷嘴	575	58	51	37	9	0.999	0.54	1762	0.24
A3_L	喷嘴	650	63	29	28	27	0.999	0.53	1809	0.74
A3_L	喷嘴	650	75	35	51	20	0.999	0.53	1798	0.55
A3_L	喷嘴	650	58	729	646	14	0.980	0.44	1608	0.48
A3_S	喷嘴	650	72	77	78	27	0.998	0.56	1858	0.71
A3_S	喷油杆	650	72	56	66	19	0.998	0.54	1826	0.51
A5_L	喷嘴	650	70	72	21	20	0.999	0.52	1787	0.56
A5_S	喷嘴	650	70	63	9	7	0.999	0.53	1810	0.20

A3:径向,06/60°;A5:径向,12/45°;L:长管;S:短管

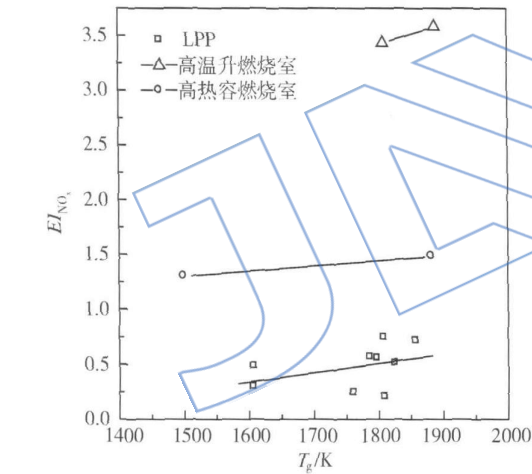


图 15 3 个燃烧室的 NO_x 排放指数对比
Fig. 15 Comparison of NO_x emission index from three combustors

试验中发现,安装 12 个叶片,45°旋流角的径向旋流预混装置时,燃烧室出现了回火现象. 安装 12 个叶片,45°旋流角的轴向旋流预混装置时,回火更加严重,以致于试验无法继续进行. 这印证了 12 个叶片,45°旋流角径向旋流预混装置和轴向旋流预混装置出口存在回流区的结论. 而且可以得出结论,只要预混装置出口存在回流,燃烧室就会出现回火现象.

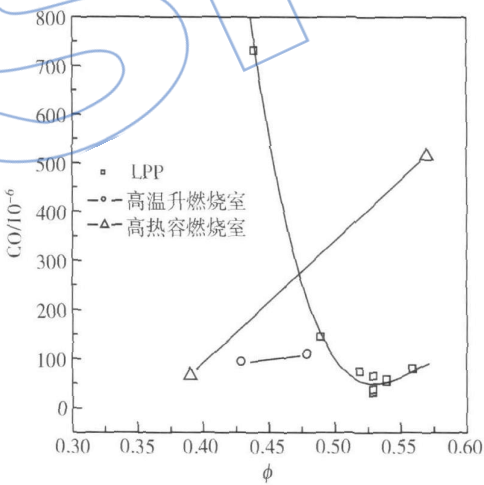


图 16 3 个燃烧室 CO 排放对比
Fig. 16 Comparison of CO emission index among three combustors

5 结 论

对多种结构旋流预混装置进行了油气分布特性的数值模拟和试验研究,并利用简单的单管燃烧室验证了 LPP 装置的燃烧特性. 根据这些研究可以得到以下结论:

- 1) 在出口不出现回流的前提下,旋流越强,预混装置出口油气混合越均匀;
- 2) 当旋流太强时,在预混装置出口出现回流,不仅在中心出现油气混合分布空洞,而且在燃

烧时存在回火现象;

3) 随着预混管长度的增加,预混管出口油气混合趋于均匀;

4) 使用离心式喷油嘴供油,预混管出口油气分布均匀性好于喷油杆;

5) 在本文研究的工作条件下,进气温度、气流速度、喷油方式以及预混管的长短对燃烧效率的影响小;

6) 当量比对燃烧效率影响明显,当量比低至 0.4 左右时,燃烧效率急剧下降;在 500~650 K 进气温度范围内,当量比在 0.5~0.6 之间可获得高燃烧效率;

7) NO_x 排放远低于传统燃烧室,当量比在 0.5~0.6 范围内, NO_x 排放指数 E_{NO_x} 在 0.5 左右;当当量比较高(当量比接近甚至超过 0.5)时,CO 的排放远低于传统燃烧室.

参考文献:

[1] Tacina R R. Flame tube NO_x emission using a lean-direct-wall-injection combustor concept [R]. NSA/ TM-2001-211105 , AIAA-2001-3271.

[2] Holdeman J D , Chang C T. Low emission RQL flametube combustor component test results[R]. NASA/ TM-2001-210678.

[3] Martino P D , Cinque G. Modelling of a lean premixed prevaporized combustor[R]. ISABE-99-7009.

[4] Charest M R J , Gauthier J E D , Huang X. Design of a lean premixed prevaporized can combustor [R]. ASME- GT-2006-91004.

[5] Dodds W J , Ekstedt E E. Evaluation of fuel preparation systems for lean premixing prevaporizing combustors[R]. ASME 85- GT-137.

[6] Hayashi S , Yamada H. NO_x emissions and autoignition in a lean premixedprevaporized Tubular Combustor at inlet air temperatures up to 1050 K[R]. ISABE-2001-1044.

[7] Liedtke O , Schulz A , Wittig S. Design study of a lean premixed prevaporized counter flow combustor for a micro gas turbine[R]. ASME- GT-2002-30074.

[8] Ripplinger Th , Zarzalist N , Meikis G , et al. NO_x reduction by lean premixed prevaporized combustion[R]. RTO MP-4 , 1998.

[9] Hayashi S , Yoshida S , Shimodaira K , et al. Development of an LPP burner for the next-generation sst engine combustor in ESPR program[R]. ISABE-2005-1145.