

# 可控活化热氛围燃烧试验系统的研发

邓俊<sup>1</sup>, 吴志军<sup>2</sup>, 李理光<sup>2</sup>, 黄成杰<sup>1</sup>, 冯威<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200030; 2. 同济大学 汽车学院, 上海 201804)

**摘要:**对可控活化热氛围燃烧器进行了重新设计,并将其用于均质充量压缩着火(HCCI)低温氧化阶段的反应机理研究。该试验装置利用氢气/空气预混合气的高温产物来形成可控活化热氛围,能方便地通过改变协流当量比而改变协流的热氛围、氧氛围和湍流场。试验结果表明,该可控活化热氛围燃烧试验系统的设计达到了安全要求和设计目的。

**关键词:**动力机械工程;燃烧器;可控活化热氛围;温度场

**中图分类号:**TK421.28 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2007)02-0307-06

## Development of experimental system of novel controllable active thermo-atmosphere combustor

Deng Jun<sup>1</sup>, Wu Zhi-jun<sup>2</sup>, Li Li-guang<sup>2</sup>, Huang Cheng-jie<sup>1</sup>, Feng Wei<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China; 2. College of Automobile, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** An experimental system of novel controllable active thermo-atmosphere combustor (CATAC) was redesigned and applied to study the combustion mechanism of homogeneous charge compression ignition (HCCI) under the condition of low-temperature oxidation. The controllable active thermo-atmosphere was created by hot product of H<sub>2</sub>/Air premixed combustion. The system can easily change coflow temperature, oxygen mole fraction and turbulence parameters by changing the coflow mixture equivalence ratio. The experiment results show that the designed CATAC system meets the safety request and design target.

**Key words:** power machinery and engineering; combustor; controllable active thermo-atmosphere; temperature field

均质充量压缩着火(HCCI)燃烧方式因其具有较高的热效率和极低的NO<sub>x</sub>排放而成为国内外内燃机行业的一个研究热点<sup>[1]</sup>。然而,要在实际发动机上广泛应用HCCI燃烧方式,还有许多问题有待解决<sup>[2]</sup>。特别是针对柴油燃料,由于其

燃料的蒸发性不好,实现均质混合气的困难较大,目前所实现的柴油均质压燃的方法基本上是以准均质混合气为主<sup>[3-5]</sup>。此外,冷焰反应条件下的均质混合气的自燃及其相关影响因素和边界条件也是在发动机上实现HCCI燃烧控制的关键。由

**收稿日期:**2006-03-15.

**基金项目:**“973”国家重点基础研究发展计划项目(2001CB209201);国家自然科学基金资助项目(50546014, 50676055).

**作者简介:**邓俊(1978-),男,博士研究生.研究方向:内燃机燃烧优化及排放控制. E-mail: eagledeng@sjtu.edu.cn

**通讯联系人:**李理光(1962-),男,教授,博士生导师.研究方向:燃烧与排放控制及代用燃料.

E-mail: liguang@mail.tongji.edu.cn

于试验方法和手段的限制,目前,有关这方面的详细试验研究还很缺乏(多为模拟计算<sup>[6,7]</sup>),急需找到一种能够模拟 HCCI 第一阶段低温放热的研究装置,以便对其进行深入研究。

在实际发动机和快速压缩机中,要实现稳定的冷焰火焰条件几乎不可能<sup>[8]</sup>,而在定容弹也很难实现稳定连续火焰燃烧<sup>[9]</sup>。对燃烧进行基础研究所采用的燃烧器(如简单喷管燃烧器等)所提供的协流温度低<sup>[10]</sup>,用于模拟 HCCI 低温放热反应研究也不现实。目前出现一种新型可控活化热氛围燃烧器,其开放式的燃烧空间可以很方便地进行激光测量,友善的边界条件及简单的同轴喷射方式有利于开展数值模拟研究。它能提供可控高温区及可控氧氛围<sup>[11]</sup>,实现模拟发动机 HCCI 燃烧第一阶段低温放热的温度,即 700~1000 K 的温度场,从而可以详细研究均质气体燃料混合气

和均质液体燃料混合气的自燃着火规律和影响其稳定燃烧的主要因素,进而为实际发动机的均质压燃的控制提供理论依据。

作者在对新型燃烧器进行重新设计的基础上,搭建了一套可控活化热氛围燃烧试验系统。介绍了该试验系统各子系统组成及其特点,并通过实验和模拟计算的方法对可控活化热氛围燃烧器的特性进行了研究,揭示了该燃烧器在活化热氛围燃烧机理及其控制技术方面的潜力。

### 1 试验系统及其特点

可控活化热氛围燃烧试验系统如图 1 所示。该试验系统主要由可控活化热氛围燃烧器、三维坐标定位系统、供气系统、冷却系统、安全控制系统、测量及采集系统组成。

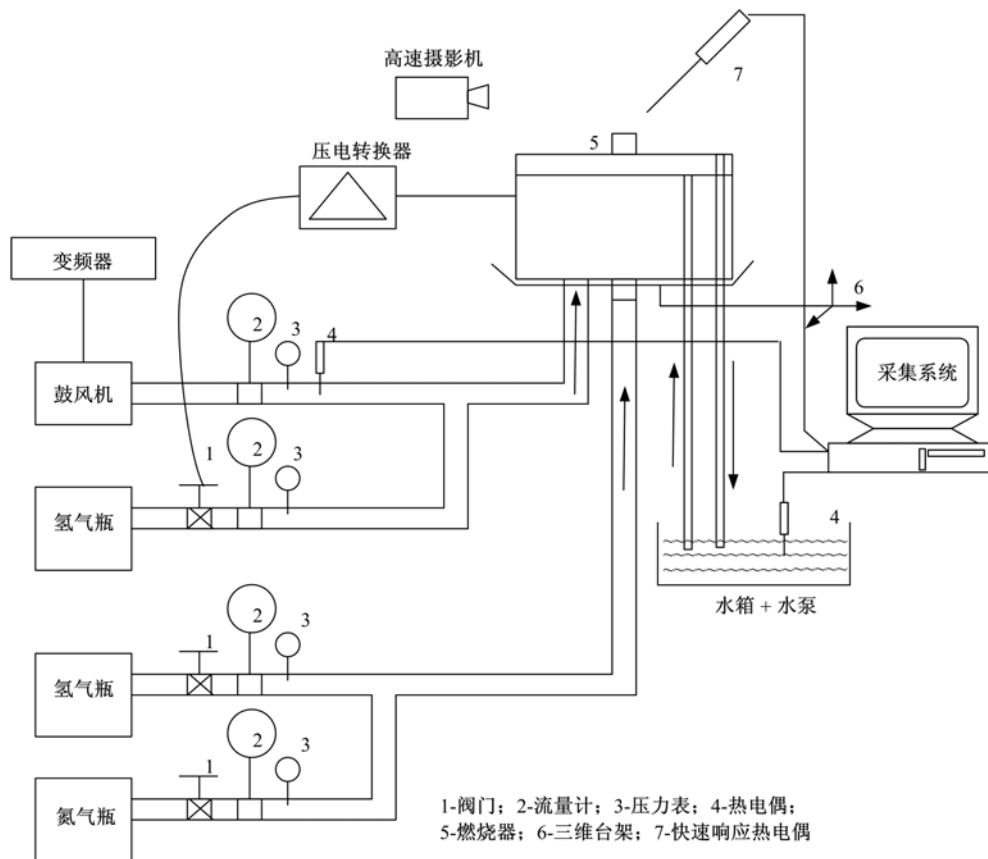


图 1 可控活化热氛围燃烧试验系统图

Fig. 1 Controllable active thermo-atmosphere combustion system

#### 1.1 可控活化热氛围燃烧器

环绕该燃烧器中央射流的是预混合稀薄燃烧平坦火焰的高温产物,装置示意图如图 2 所示。目前,美国加州大学 Berkeley 分校燃烧分析实验

室<sup>[12]</sup>及澳大利亚悉尼大学燃烧实验室<sup>[11]</sup>分别拥有一套燃烧模拟装置,该燃烧装置得到了湍流扩散燃烧国际学术组织 TNF (Turbulent Non-premixed Flames) Workshop 的肯定<sup>[13]</sup>。本文设

计制造的可控活化热氛围燃烧器为世界上第 3 台可控活化热氛围燃烧器<sup>[14,15]</sup>,其装配图及实物图片如图 3 所示。该燃烧器主要由火焰稳定总成、回火控制室和火焰捕集器组成。



图 2 可控活化热氛围燃烧器示意图

Fig. 2 Sketch map of the burner

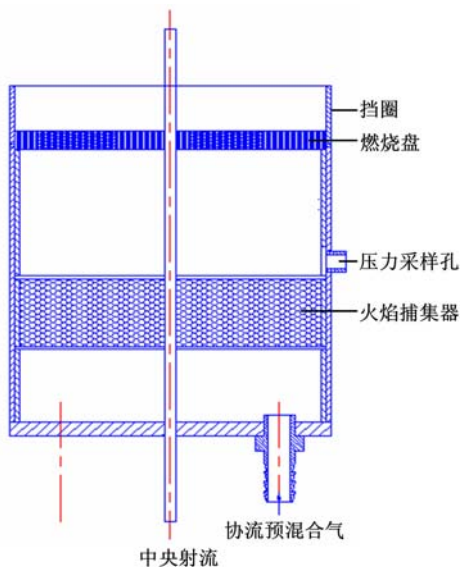


图 3 燃烧器装配示意图

Fig. 3 Sketch map of the burner of SJTU

火焰稳定总成由多孔燃烧盘、外层挡圈、中央喷嘴 3 个部分组成。

多孔燃烧盘的基本结构参数为:直径 200 mm,厚度 13 mm,孔数 1819 个,孔径 1.6 mm,屏蔽率达到 88%。多孔燃烧盘由黄铜制成,具有良好的导热性能,散热快。这台燃烧器能使多种碳氢化合物和空气混合气的火焰稳定在多孔燃烧盘上,而且燃空比(燃料质量和空气质量比值)的范

围也很宽。外层挡圈的作用之一是一个屏障,阻碍实验室环境的空气对多孔燃烧盘上协流火焰的影响。外层挡圈外缠绕冷却环,冷却环中以水作冷却剂,使外层挡圈的辐射降低,同时对外层挡圈及铜盘进行冷却。中央喷嘴是一内径为 5 mm、壁厚为 1 mm 的无缝不锈钢管。其喷嘴出口延伸到燃烧盘上方 70 mm 处,大约为协流燃烧火焰最大高度的 3 倍,有利于喷嘴出口处协流湍流的稳定,也保证了中央射流火焰不受协流火焰的干扰。

回火控制室位于多孔燃烧盘的下方,用于实时监测并控制回火现象的发生。因为在特定的情况下,协流预混合火焰有可能经燃烧盘细孔传播回燃烧器内部,从而发生回火现象。通过回火控制室的压力采样孔可以控制控制室内部的细微压力波动,经过压电转换器输送控制信号至燃料控制电磁阀,在回火发生的瞬间可迅速切断协流燃料的供应,从而最大限度地保证燃烧器的运行安全。

火焰捕集器位于回火控制室的下方,其中填充直径为 2~3 mm 的小玻璃珠,其作用是保证即使在特殊情况下,协流混合火焰经燃烧盘传回回火控制室,在该火焰捕集器的作用下,火焰也不可能继续向燃料源传播。火焰捕集器的另一作用是促进由下方进来的协流混合气均匀混合。

## 1.2 测量及采集系统

利用安装在鼓风机排气口后的涡街流量计测量协流空气流量,而氢气(包括协流氢气、中央喷射氢气和引燃氢气)和氮气流经稳压开关后使用转子流量计进行测量。流量计后的气体压力使用压力表进行监测,用于补偿修正流量计的读数。

系统使用了 2 个低温热电偶,一个用于测量涡街流量计后的空气温度,因为空气经过鼓风机后,在一定的背压(由于燃烧器的火焰捕集器而产生)下,空气被加热至 60~80 °C,此时如果直接采用流量计读数将出现很大的偏差;另一个用于监测冷却水的温度,衡量冷却水温度对燃烧器操控特性的影响。

协流温度场的监测是通过快速响应热电偶实现的。它的响应速率小于 100 ms,测温范围为 300~1300 K。它能够迅速地测量燃烧器温度场的温度脉动。当然,这种快速瞬变信号不可能人工记录下来,所以采用了高速采集卡进行采集。

采集软件的界面如图 4 所示。该程序能够记

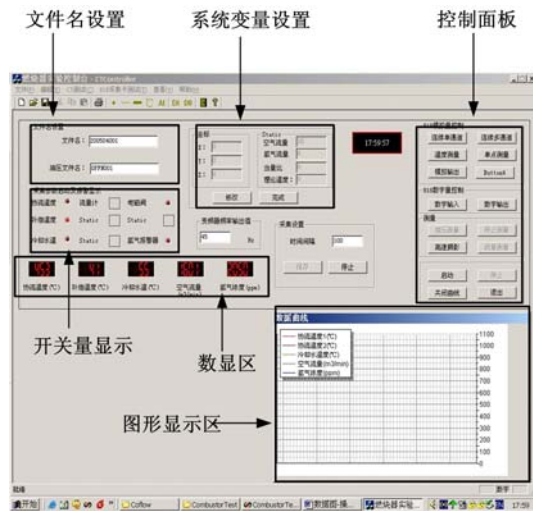


图 4 燃烧器系统控制台界面

Fig. 4 Interface of the control software

录 3 个热电偶的温度变化,并将它们输入文件保存。同时,涡街流量计的流量读数和氢气报警器所显示的浓度值也通过采集卡采集进来,便于操作人员及时地了解这些信息。采集到的温度、流量以及浓度信号均能以曲线的方式显示,方便实验人员进行分析。

燃烧火焰的可视化通过高速摄影仪实现,它能拍摄记录中央喷射火焰自燃着火的全过程。通过对拍摄图像进行分析处理,可以得到如起升火焰高度等有意义的的结果。

### 1.3 三维坐标定位系统

该燃烧器的一个优点在于其开放式的空间为激光测量提供了方便。为了对该燃烧器所提供的温度场及协流燃烧所产生的高温产物的成分分布进行测量,需要精确定位测量系统与被测系统之间的空间位置。三维坐标定位系统由一台铣床构成,其调节精度在 X、Y、Z 三个方向上均达到了 0.05 mm。

### 1.4 供气系统

供气系统主要包括协流预混合气的提供以及中央喷射可燃混合气的提供。实验过程中协流预混合气采用的是氢气/空气混合气,中央喷射混合气主要由氢气和氮气构成。协流空气由一台离心式鼓风机供应,其运转平稳,出口流量稳定,流量范围可达 3.6 m<sup>3</sup>/min。协流氢气及中央喷射混合气中的氢气由氢气瓶组供应。此外,还有一路燃烧器点火源,其所用的氢气也来自于氢气瓶组。氮气由氮气瓶提供。

### 1.5 冷却系统

冷却系统由围绕燃烧器的外层挡圈的铜管及水箱和水泵构成。它的主要目的是使外层挡圈的辐射降低,同时对外层挡圈及铜盘进行冷却,确保系统工作在安全温度范围内。冷却水的流量可以控制,通过标定可使燃烧器产生的高温与冷却水所带走的热量之间达到一个动态的平衡,实现预期目的。

### 1.6 安全操作系统

在燃烧器的设计过程中,已对实验过程中的人身安全及设备安全操作进行了充分考虑,如设计了火焰捕集器和回火控制室来避免回火现象的发生。由于实验系统采用的是氢气这种易燃性气体作为燃料,在实验室安装有氢气报警器和可燃气体报警装置,如果浓度超过设定限值,将触发声光报警。另外,实验室还装有强制通风管路,在不影响协流流场的情况下,将高温产物连同未燃氢气一起强制排出。

## 2 实验结果及分析

图 5 为不同协流预混合气当量比下的协流温度,是利用 STANJAN 软件计算得到的理论绝热温度。从图中可知,氢气/空气协流温度理论上可以在 300~2400 K 内变化,甲烷/空气和丙烷/空气预混合气协流最高温度略低,但变化趋势相同。并且,通过改变协流预混合气的当量比,可以很方便地实现协流温度的改变。考虑到实际应用过程中过稀预混合火焰的吹熄及过高协流温度所带来的系统安全性等因素,将试验可供利用的可控协流温度控制在 700~1500 K 内,只需将协流预混合气当量比  $\phi$  控制在 0.10~0.45 之间,这样也能够满足研究可燃混合气的低温氧化反应及高温化学反应的需求。

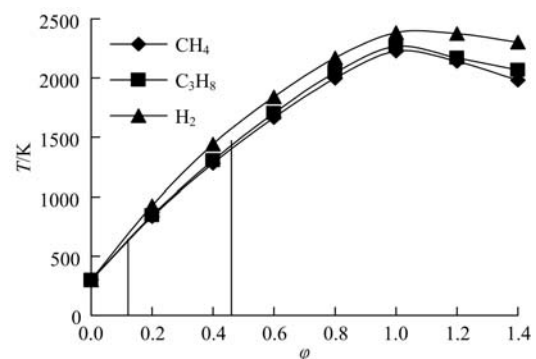


图 5 不同当量比下的协流温度

Fig. 5 Coflow temperature for premixed mixture

改变预混合气的当量比也能很方便地调节协流燃料产物中的氧气的摩尔百分比浓度。图 6 为利用 STANJAN 软件计算得到的氧气摩尔百分比随氢气/空气的当量比的变化。从图中可以看出,在相应的协流预混合气当量比(0.1~0.45)下,协流氧气的摩尔百分比在 10%~19%之间变化,且随当量比的增大基本呈线性下降趋势。

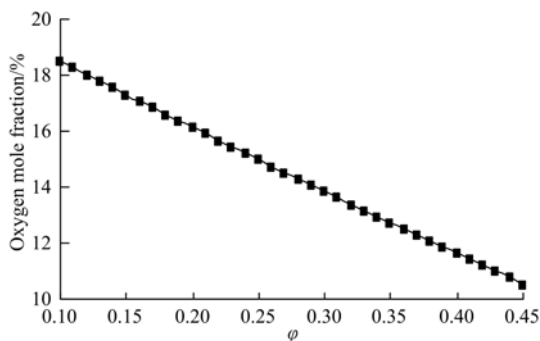


图 6 氧气的摩尔百分比浓度随当量比的变化  
Fig. 6 Oxygen mole fraction with stoichiometry of mixture

为考察该燃烧器所形成的温度场是否均匀,在以下实验条件下进行实验:协流是当量比为 0.25 的氢气/空气预混合气燃料产物,其平均温度约为 1036 K;中央喷嘴伸出燃烧盘 45 mm,轴向距离定义为至喷嘴的距离。协流温度在轴线上随距离的变化规律如图 7 所示,其中  $z$  为轴向距离变化。从图中可以看出,从喷嘴头至其下游 30 mm 高度内,协流温度变化较大,主要是因为受到中央喷管的影响。从 30 mm 至 150 mm 高度内,协流温度稳定地保持在 1030~1040 K 之间。而从图 8 所示的协流温度轴向均方差变化图可知,其均方差只有 4~7 K,进一步说明了该燃烧器在轴线方向上温度的均衡性。从图 9、图 10 可知,

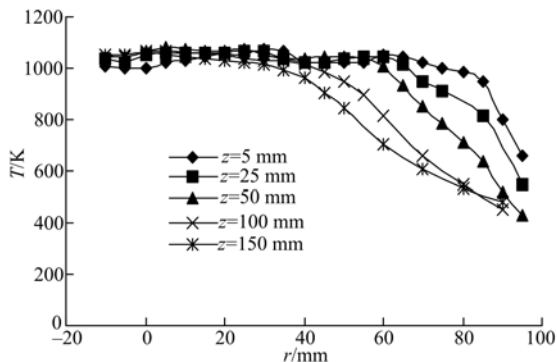


图 7 不同轴向距离下协流温度随径向距离的变化  
Fig. 7 Radial distribution of coflow temperature with different axial distance

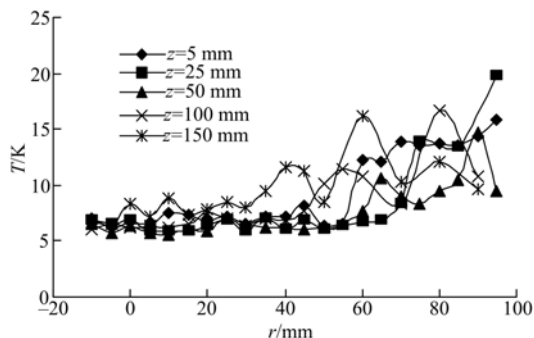


图 8 不同轴向距离下协流温度径向均方差变化  
Fig. 8 Variance of coflow temperature vs radial distance

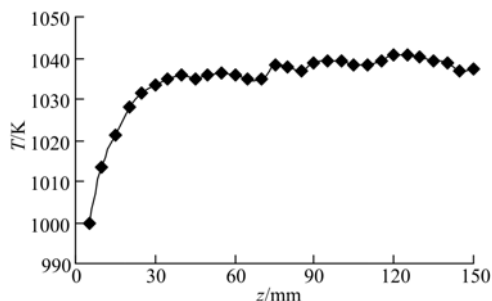


图 9 协流温度随轴向距离的变化规律  
Fig. 9 Axial distribution of coflow temperature

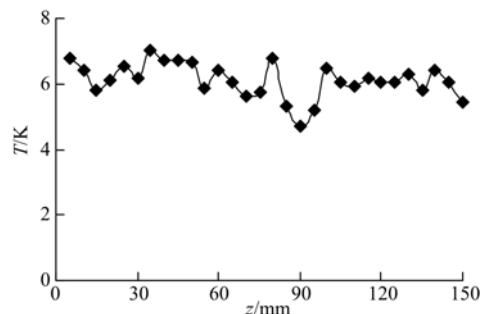


图 10 协流温度轴向均方差

Fig. 10 Variance of coflow temperature vs axial distance 在围绕喷嘴中心半径为 40 mm 的圆柱体范围内,轴向距离从喷嘴口到 30 倍喷嘴直径(150 mm)的喷射下游的空间范围内,协流温度均可以保持均衡而没有太大的变化(温度均方差在 5 K 左右)。

上述实验结果说明,通过调节协流预混合气当量比可以方便地实现协流热氛围、氧氛围以及湍流度的调节。

### 3 结束语

基于对冷焰反应条件下的均质混合气的自燃及其相关影响因素和边界条件的试验需要,对可控活化热氛围燃烧器进行了重新设计。在此基础上建立的试验系统能方便地通过改变协流预混合

气当量比来实现稳定可控的协流热氛围、氧氛围以及湍流场,为研究低温氧化反应奠定了基础。试验结果表明,该可控活化热氛围燃烧试验系统设计达到了安全要求和设计目的。

#### 参考文献:

- [1] Su Wan-hua, Lin Tie-jian, Pei Yi-qiang. A new HCCI combustion system for diesel engines based on technologies of multi-pulse fuel injection and the BUMP combustion chamber[C]//Proceeding of the International Symposium on "Clean and High Efficiency Combustion in Engines". Tianjin, China, 2002.
- [2] Olsson Jan-Ola, Tunestål Per, Johansson Bengt. Closed-loop control of an HCCI engine[C]//SAE Paper,2001-01-1031.
- [3] Odaka Matsuo, Suzuki Hisakazu, Koike Noriyuki. Search for optimizing control method of homogeneous charge diesel combustion[C]//SAE Paper, 1999-01-0184.
- [4] Li Li-guang, Hu Zong-jie, Yu Shui. Characteristics of film evaporation for homogeneous charge preparation of typical fuels[C]//SAE Paper,2005-01-1935.
- [5] Kashdan Julian T, Docquier Nicolas, Bruneaux Gilles. Mixture preparation and combustion via LIEF and LIF of combustion radicals in a direct-injection, HCCI Diesel Engine[C]//SAE Paper, 2004-01-2945.
- [6] Gustavsson J, Golovitchev V I, Helmantel A. 3-D modelling of conventional and HCCI combustion diesel engines[C]//SAE Paper,2004-01-2964.
- [7] Noda Toru, Foster David E. A numerical study to control combustion duration of hydrogen-fueled HCCI by using multi-zone chemical kinetics simulation [C]//SAE Paper,2001-01-0250.
- [8] Minetti R, Carlier M, Ribaucour M, et al. A rapid compression machine investigation of oxidation and auto-ignition of n-heptane; measurements and modeling[J]. Combustion and Flame, 1995,102:298-309.
- [9] Edwards C F, Siebers D L. A study of the autoignition process of a diesel spray via high speed visualization[C]//SAE Paper, 920108.
- [10] Brown C D, Wason K A, Lyons K M. Studies on lifted jet flames in co-flow: the stabilization mechanism in the near-and far-fields[J]. Flow Turbulence and Combustion, 1999,62:249-273.
- [11] Wu Z, Stårner S H, Bilger R W. Lift-off heights of turbulent  $H_2/N_2$  jet flames in a vitiated coflow[C]//Australian Symposium on Combustion & the 8th Australian Flames Days. Melbourne, Australia, 2003.
- [12] Catra R, Myhrvold T, Chen J Y, et al. Simultaneous laser raman-rayleigh-LIF measurements and numerical modeling results of a lifted turbulent  $H_2/N_2$  Jet flame in a vitiated coflow [J]. Proc Combust Inst, 2002,29:1881-1888.
- [13] Barlow R S, Pope S B, Masri A R, et al. Sixth international workshop on measurement computation of turbulent non-premixed flames[C]//Proceedings of Sixth International Workshop on Measurement and Computation of Turbulent Non-premixed Flames. Sapporo, Japan,2002.
- [14] Wu Z, Deng J, Li L. Study on characteristics of controllable active thermo-atmosphere of a vitiated coflow combustor [J]. Chinese Science Bulletin, 2005,50(7):704-707.
- [15] 吴志军,邓俊,冯威,等.可控活化热氛围下喷射燃料自燃的研究方法[J].吉林大学学报:工学版,2006,36(1):36-41.
- Wu Zhi-jun, Deng Jun, Feng Wei, et al. Research method for autoignition of fuel jet controllable active thermo-atmosphere[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2006,36(1):36-41.