

协流温度对喷射起升火焰燃烧稳定性的影响

邓 俊, 李理光, 吴志军

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 利用活化热氛围燃烧器提供的稳定热氛围场分析了中央喷射液体燃料的起升火焰的基部高度变化, 研究不同协流温度对起升火焰燃烧稳定性的影响, 研究表明, 协流热氛围中液体燃料喷射起升火焰基部的跳变是自燃现象作用的结果; 不同协流温度时中央喷射起升火焰的稳定机理不同; 存在一个火焰基部稳定的临界温度, 低于此温度时起升火焰的稳定受控于燃料的自然现象, 而高于此温度时起升高度的稳定受火焰传播主导; 火焰跳变频率及跳变长度与协流温度有关; 温度越低则火焰基部跳变越频繁; 跳变长度随温度的增加而减小。

关键词: 活化热氛围; 起升火焰; 稳定机理; 自燃

中图分类号: TK421+.2

文献标志码: A

Effect of Coflow Temperature on Combustion Stabilization of Jet Flames

DENG Jun, LI Liguang, WU Zhijun

(College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The effect of coflow temperature on stabilization of lifted turbulent jet flames of liquid fuels in controllable active thermo-atmosphere(CATA) was investigated through analyzing the flame base heights fluctuation. The test results show that a flame base jump is an auto-ignition phenomenon the upward flame base. The stabilization mechanism of the lifted flame varies with co-flow temperature and 1 074 K is considered as a critical point. The lifted flame is controlled by the auto-ignition of fuel upward flame base bet when the temperature is below 1 074K, and the flame stabilization is controlled by the flame spread speed when it is over 1 074 K. Flame-base jump frequency and length are related to the co-flow temperature. As the co-flow temperature increases, the flame base jumps less frequently and the jump lengths are shortened.

Key words: active thermo-atmosphere; lifted flame;

stabilization mechanism; auto-ignition

湍流与燃烧是非常复杂的过程, 两者之间的相互作用更加剧了湍流燃烧的复杂性, 使之成为当今工程研究领域中最复杂的课题之一^[1]。

对于湍流起升火焰的稳定机理, 相关领域学者进行了不懈的研究^[2-8], 但仍存在很大的争议^[2]。文献[3]最早对扩散起升火焰的稳定机理进行了研究, 指出火焰高度稳定在化学当量比区域内湍流火焰速率与燃料供应速率平衡的地方。文献[4]和[5]则将轴对称湍流喷射火焰看成是受湍流控制的层流扩散火焰的系综, 火焰的稳定与作用于层流扩散火焰面上的拉伸率有关。文献[6]在此基础上发展了三重火焰的概念, 认为部分预混小火焰的熄灭对火焰的稳定起着至关重要的作用。文献[7]的试验结果证实起升火焰的稳定高度与雷诺数有关, 雷诺数低则火焰稳定在喷口附近且火焰层薄, 随雷诺数增加起升高度的增加而火焰区域变宽。

Dibble 燃烧器的问世将湍流化学动力学从复杂的回流中解耦出来, 有利于稳定机理的研究^[9-10], 也可用于模拟加力燃烧室中的热氛围和氧氛围, 为该燃烧室中的燃烧稳定提供有利参考^[11]。利用该类型燃烧器, 文献[10]研究了中央喷射气体燃料(CH_4)的起升火焰稳定性与自燃的关系。文献[12]研究了中央喷射 H_2 和 N_2 混合气的起升火焰高度, 推测不同协流温度下火焰的稳定受控于不同的因素: 低温下的自燃或高温下的火焰传播。文献[13]等用联合概率密度函数(PDF)方法对中央射流为 H_2 与 N_2 混合气在活化热氛围中的燃烧现象进行了数值模拟, 研究湍流火焰的结构及起升高度。文献[14]利用 PDF 方法模拟了活化热氛围中 H_2 和 N_2 射流火焰

收稿日期: 2012-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(51006075, 51076118); 教育部博士点基金(20120072110015); 汽车动力传动与电子控制湖北省重点实验室开放基金(ZDK201213)

第一作者: 邓 俊(1978—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制。E-mail: eagledeng@tongji.edu.cn

通讯作者: 吴志军(1972—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制。E-mail: zjwu@tongji.edu.cn

的温度场和 H_2 , O_2 以及 OH 基的质量分布. 在中央喷射液体燃料燃烧方面, Cabra 等^[15] 和吴志军等^[16] 分别针对甲醇和柴油燃料在活化热氛围中的燃烧进行了研究.

在前期研究的基础上^[16-17], 本文利用活化热氛围燃烧器提供的稳定协流热氛围场, 围绕中央喷射液体燃料的起升火焰的基部变化, 深入分析协流热氛围对液体燃料起升火焰燃烧稳定性的影响, 从而为均质压燃燃烧过程控制提供参考依据.

1 试验装置及研究方法

可控活化热氛围燃烧试验系统详见文献^[17], 其主体是可控活化热氛围燃烧器(图 1), 其协流成分为氧气体积分数在 10%~19% 可变的氢气/空气稀燃燃烧产物, 可为中央喷射燃料提供燃烧所需的氧气和热氛围, 在半径为 40 mm、高为 150 mm 的近似圆柱形区域内沿中心轴线提供 700~1 500 K 的均衡温度场^[17]. 协流温度仅受协流预混合气当量比控制, 并采用快速响应热电偶对协流温度进行实时监控, 稳定条件下的协流温度变化约 2 K^[18]. 试验过程中协流氧气体积分数为 14.7%~15.5%, 协流流速为 $3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 雷诺数约为 16 300.

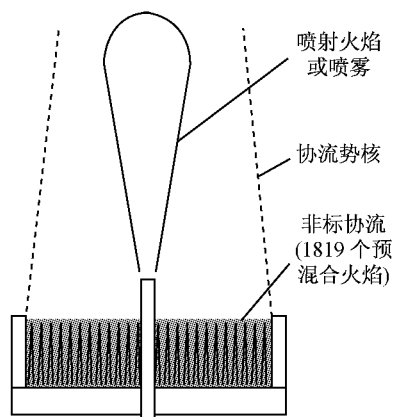


图 1 可控活化热氛围燃烧器示意
Fig.1 Schematic of the CATA burner

中央射流由连续喷射系统实现. 连续喷射系统由氮气瓶、蓄能器、高压管路、喷嘴以及电磁阀等组成, 系统简图如图 2 所示. 蓄能器内的液体燃料(本试验中为柴油)在高压氮气瓶内高压气体的作用下以恒定的压力通过喷嘴喷入燃烧器所形成的热氛围中, 形成自燃火焰. 喷嘴为自制的单孔喷嘴, 孔径为 0.20 mm. 由于液体燃料燃烧存在蒸发和扩散过程, 并且受燃烧器热氛围稳定高度的限制, 蓄能器的压力维持在 0.5 MPa, 液体喷射速率较小(约 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 以便将着火区域限制在稳定热氛围内, 由于喷射时间较短, 试验过程中喷射压力保持不变. 喷嘴伸出燃烧盘上方 45 mm, 处于燃烧器的预混湍流火焰充分发展的区域, 喷雾特性可参考文献^[18].

以便将着火区域限制在稳定热氛围内, 由于喷射时间较短, 试验过程中喷射压力保持不变. 喷嘴伸出燃烧盘上方 45 mm, 处于燃烧器的预混湍流火焰充分发展的区域, 喷雾特性可参考文献^[18].

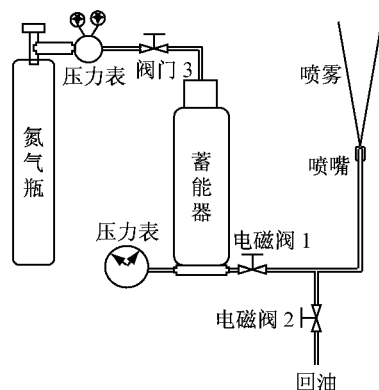


图 2 连续喷射系统

Fig.2 Continuous injection system

中央喷射起升火焰使用 Photron 公司生产的 FASTCAM-ultima APX 高速摄影系统记录, 分辨率为 512×128 , 表征 $600 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的拍摄范围, 帧速率为 $6\,000 \text{ 帧} \cdot \text{s}^{-1}$. 液体喷射及着火过程记录控制时序图如图 3 所示, 其中 t_1 为喷油延迟时间, t_2 为自燃延迟时间, 启动喷油电磁阀 1 的同时触发高速摄影系统. 所拍摄的图片通过自行编制的后处理软件作了对比度增强、去噪以及轮廓提取处理, 以减少肉眼识别带来的误差. 稳定火焰起升高度指可见火焰基部距喷嘴的高度, 是通过后处理软件从图像序列中自动提取的.

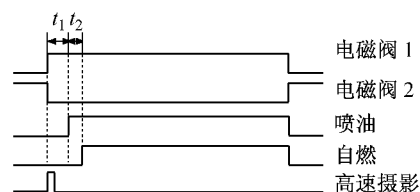


图 3 液体喷射及着火过程记录控制时序

Fig.3 Control timing diagram of liquid injection and ignition recording

2 试验结果及讨论

可控活化热氛围燃烧器提供的是高温的稀燃燃烧产物, 中央喷射液体燃料进入热协流以后受热蒸发, 在高温及氧氛围的共同作用下而发生自燃, 从而最终形成湍流起升火焰. 然而这种湍流起升火焰的基部高度并不是稳定不变的, 而是受协流温度、燃料的供应速率、湍流强度以及部分预混火焰的传播等

多因素的共同影响。

图 4a 为柴油燃料喷入温度为 1 022 K 的热协流中发生自燃后形成的起升火焰基部的高度随时间的变化,表现为火焰升高一定高度后逐渐趋于稳定. 将图片中火焰基部高度的变化量定义为跳变长度,其随时间的变化如图 4b 所示. 从图 4 可以看出,火焰高度起伏比较大,并且在 A—E 各点火焰的基部发生了明显的向下跳跃,基部高度减小 20 mm 以上,在点 D 跳变量甚至达到了 65 mm,远远超过了火焰传播所能达到的距离. 以点 D 附近火焰的发展过程为例,将点 D 时刻定义为 $t=0$ ms,点 D 及后续的燃烧图片如图 5 所示. 在点 D 以前,火焰的基部高度慢

慢升高(图 4). 在 $t=0$ ms 时刻,在主火焰(明亮火焰)的上游较远处出现了燃料的自燃现象,从而将火焰分为上、下两部分(图 5a). 此后,围绕着自燃点,下部火焰迅速发展(图 5b, 5c, 5d),并最终与上部火焰连成一片(图 5e, 5f),从而降低了整个火焰的基部高度. 当然,火焰并不会稳定在这一高度,基部位置逐渐升高,直至下一次跳变发生. 因此,火焰上游燃料的自燃现象对火焰起升高度的稳定性起着重要作用. 从图 4 中还可看出,自燃发生位置和自燃时间并不固定,存在很大的随机性,这和当地的燃烧温度、湍流强度及燃空比均有直接的关系.

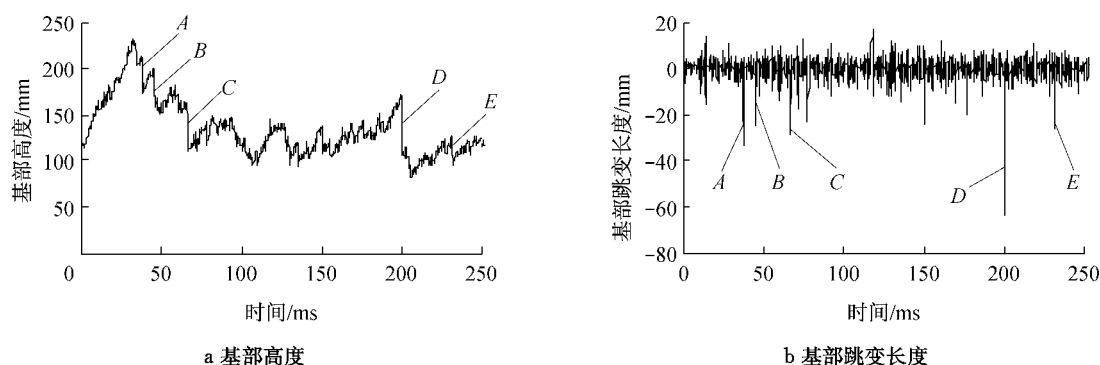


图 4 1 022 K 时火焰基部高度及基部跳变长度随时间的变化

Fig. 4 Flame base height and jump length variation with time at 1 022 K

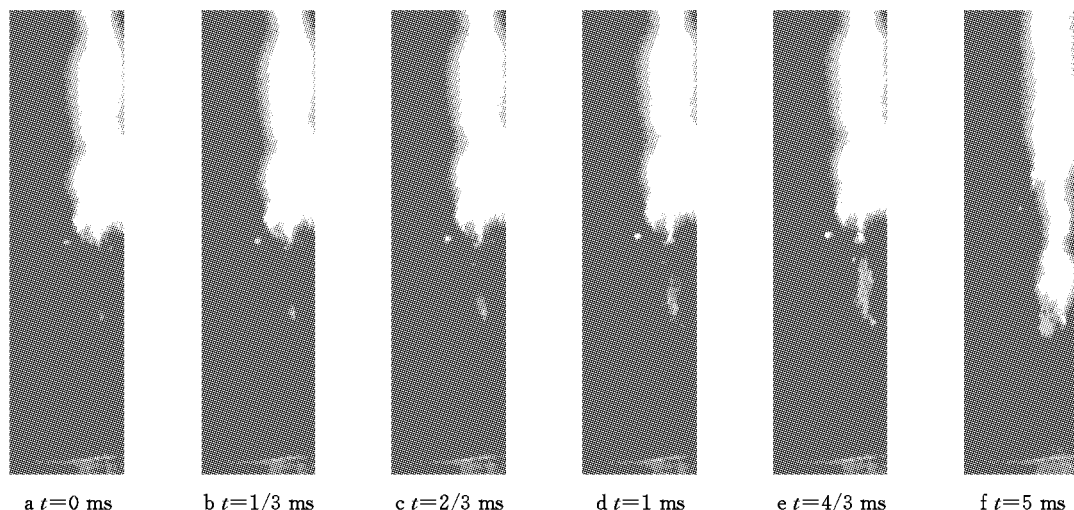


图 5 起升火焰基部自燃现象

Fig. 5 Auto-ignition phenomenon on the flame base

将协流温度适当提高,火焰基部的变化将发生很大的改变. 图 6 是协流温度为 1 074 K 时起升火焰的基部高度及跳变长度随时间的变化. 可以看出,基部高度的起伏并不大,但仍存在火焰基部的跳变现象(图中 A, B),只是其跳变长度与图 4 中的相比略小.

将协流温度提高至 1 101 K,火焰的最大跳变长度相当短(图 7),在 20 mm 左右,考虑到此时温度较高,火焰的传播速率较大,可认为跳变现象已基本不发生. 此时,火焰的稳定主要受控于湍流火焰的传播速率和燃料的供应速率的平衡.

如果对跳变长度设置一个阈值,认为超过此阈

值的基部高度跳变才是一次由于自燃现象而发生的跳变(简称跳变),对 250 ms 内各协流温度条件下跳变的次数进行统计,结果如图 8 所示. 在 3 个不同的跳变长度阈值(15, 20, 25 mm)下,随温度的升高,跳变的频率明显减小. 存在一个温度临界点,协流温度

低于此临界点则跳变次数较大,火焰的稳定取决于火焰区上游燃料的自燃. 而高于此临界点,则跳变次数很少,且只在火焰稳定的初期发生. 如果考虑高温情况下湍流燃烧速率加大,则高温时自燃跳变的阈值要相应提高,从而导致跳变频率更小.

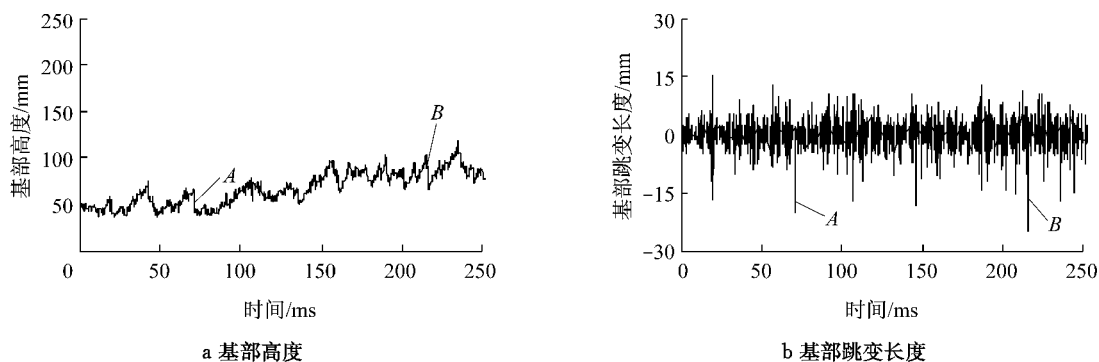


图 6 1 074 K 时火焰基部高度及基部跳变长度随时间的变化

Fig. 6 Flame base height and jump length variation with time at 1 074 K

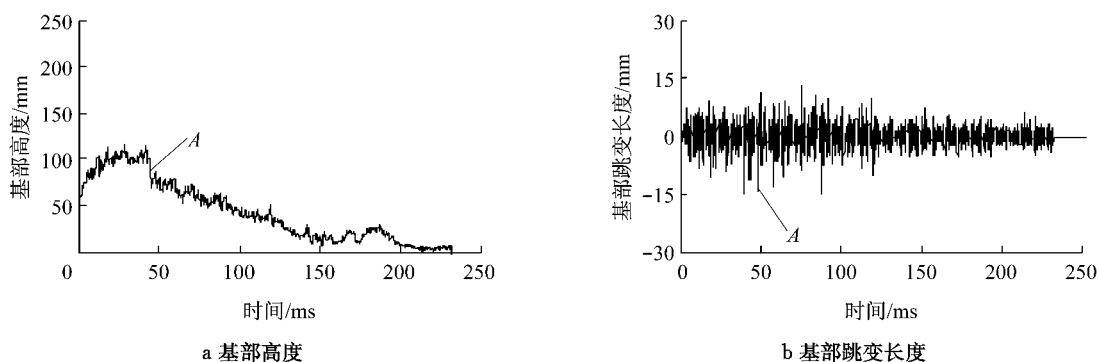


图 7 1 101 K 时火焰基部高度及基部跳变长度随时间的变化

Fig. 7 Flame base height and jump length variation with time at 1 101 K

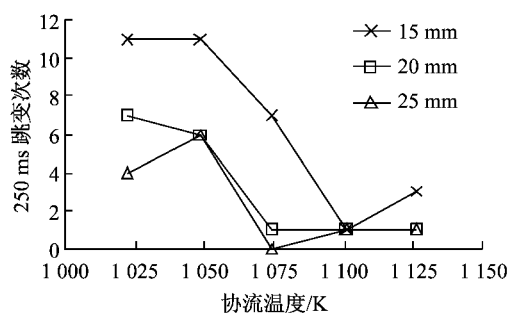


图 8 火焰基部跳变次数随温度的变化

Fig. 8 Jump times of flame base vs. temperature

从图 4、图 6 和图 7 还可看出,协流温度为 1 022 K 时,首次可见火焰的位置高度即自燃点高度约 120 mm(与纵坐标的交点). 随着温度上升,自燃点位置下降. 在超过一定的温度后,该高度值变化不大,在 1 074 K 和 1 101 K 均在 50 mm 左右.

考察火焰的起升高度可以发现,随着协流温度的上升,起升高度变小. 协流温度为 1 022 K 时起升

高度围绕 120 mm 跳动;1 074 K 时起升高度约为 50 mm;而 1 101 K 时火焰稳定在喷嘴口附近,起升高度只有 10 mm 左右.

由以上分析可知,在不同协流温度时热氛围中液体燃料喷射起升火焰的稳定性受控因素不同. 协流温度较低时起升火焰的稳定受控于燃料的自燃现象,而协流温度较高时火焰的稳定受火焰传播主导. Wu 等^[19]利用激光多普勒测速技术对活化热氛围下 H_2 与 N_2 射流火焰的湍流结构研究结果及试验过程中的强烈自燃噪声现象也表明气体燃料射流火焰稳定受控因素亦符合上述规律.

3 结论

对活化热氛围中液体燃料连续喷射所形成的起升火焰的基部高度进行了分析,得到以下结论:

(1) 协流热氛围中火焰基部的频繁跳变是自燃

现象作用的结果。

(2) 不同协流温度时液体燃料中央喷射起升火焰的稳定性受控因素不同。本试验条件下,存在一个火焰基部稳定受控因素的分界点,低于此温度时起升火焰的稳定受控于燃料的自然现象,高于此温度时起升高度的稳定受火焰传播主导。

(3) 火焰跳变频率及跳变长度与协流温度有关,温度越低则火焰基部跳变越频繁,跳变长度随温度的增加而减小。

参考文献:

- [1] Peters N. Turbulent combustion[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [2] William M. Assessment of theories for the behavior and blowout of lifted turbulent jet diffusion flames[C]//22nd Symposium (International) on Combustion. [S. l.]: The Combustion Institute, 1988:809-816.
- [3] L Vanquickenborne, A Van Tiggelen. The stabilization mechanism of lifted diffusion flames[J]. Combustion and Flame, 1966, 10:59.
- [4] Peters N. Local quenching due to flame stretch and non-premixed combustion[J]. Combustion Science and Technology, 1983,30(1/6):1.
- [5] Peters N, Williams F. Lift-off characteristics of turbulent jet diffusion flames[J]. AIAA Journal, 1983, 21:423.
- [6] Muller C M, Breithach H, Peters N. Partially premixed turbulent flame [C]//Proceedings of 25th symposium (International) on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1994: 1099-1106.
- [7] Schefer R W, Goix P J. Mechanism of flame stabilization in turbulent lifted-jet flames[J]. Combustion and Flame, 1998, 112:559.
- [8] Joedicke A, Peters N, Mansour M. The stabilization mechanism and structure of turbulent hydrocarbon lifted flames [C]//Thirtieth International Symposium on Combustion. Chicago: The Combustion Institute, 2005: 901-909.
- [9] Mastorakos E, Markides C, Wright Y M. Hydrogen autoignition in a turbulent duct flow: experiments and modelling[C]//The 12th International Conference on Fluid Flow Technologies, Budapest:[s. n.], 2003:1-8.
- [10] Ricardo Cabra. Trubulent jet flames into a vitiated coflow[D]. Berkeley: University of California, 2003.
- [11] 黄勇. 燃烧与燃烧室[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2009.
HUANG Yong. Combustion and combustion chamber [M]. Beijing: Beihang University Press, 2009.
- [12] Wu Z, Starner S H, Bilger R W. Lift-off heights of turbulent H_2/N_2 jet flames in a vitiated co-flow[C]//2003 Australian Symposium on Combustion & The 8th Australian Flames Days. Melbourne:[s. n.], 2003:1-6.
- [13] Cao R R F, Pope B S, Masri R A. Turbulent lifted flames in a vitiated co-flow investigated using joint PDF calculations[J]. Combustion and Flame, 2005,142:438.
- [14] WANG Haifeng, CHEN Yiliang. A PDF simulation of the lifted turbulent H_2/N_2 jet flame [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2006,23(1):73.
- [15] Hamano R C, Chen J Y, Dibble R, et al. Ensemble diffraction measurements of spray combustion in a novel vitiated co-flow turbulent jet flame burner[C]//Spring Meeting of the Western States Section of the Combustion Institute, Golden: The Combustion Institute, 2000:1-17.
- [16] 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.
WU Zhijun, DENG Jun, FENG Wei, et al. Research method for autoignition of fuel jet in controllable active thermo-atmosphere[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2006, 36(1): 36.
- [17] 邓俊, 吴志军, 李理光, 等. 可控活化热氛围燃烧试验系统的研发[J]. 吉林大学学报:工学版, 2007, 37(2): 307.
DENG Jun, WU Zhijun, LI Liguang, et al. Development of experimental system of novel controllable active thermo-atmosphere combustor [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007, 37(2): 307.
- [18] 邓俊, 吴志军, 李理光, 等. 可控活化热氛围下柴油喷雾自燃特性的研究[J]. 内燃机学报, 2006, 24(4): 315.
DENG Jun, WU Zhijun, LI Liguang, et al. Study on auto-ignition characteristics of diesel fuel spray in controllable active thermo-atmosphere[J]. Transactions of CSICE, 2006, 24(4): 315.
- [19] Wu Z, Masri A R, Bilger R B. An experimental investigation of the turbulence structure of a lifted H_2/N_2 jet flame in a vitiated co-flow[J]. Flow Turbul Combust, 2006, 76(1): 61.