

## 多级旋流预燃区补氧对常压点火特性的影响

王柏森, 张 弛, 林宇震, 姜文彬

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

**摘 要:** 在常温常压进口条件下开展点火试验, 研究对象为多级旋流空气雾化喷嘴模型燃烧室, 在火焰筒压降为 1%~6% 工况下分别采用 20J 和 12J 点火能量的电火花点火器进行点火试验, 控制预燃区补氧空气流量比在 0~0.04 范围内, 研究了多级旋流空气雾化喷嘴的点火油气比变化规律。结果表明: 在点火油气比足够小的情况下, 预燃区补氧流量越高, 临界进口速度越大; 在相同点火能量和火焰筒压降下, 预燃区补氧空气流量比越高, 点火油气比越小; 随着预燃区补氧空气流量比增大到一个阈值(20J 点火能量时为 0.01, 12J 点火能量时为 0.015), 点火油气比曲线的发展趋势将发生变化; 当预燃区补氧空气流量比继续增大到另一个关键阈值(20J 点火能量时为 0.025, 12J 点火能量时为 0.03), 点火油气比不再发生明显改变。

**关键词:** 燃烧室; 点火; 多级旋流; 预燃区; 补氧; 临界进口速度; 油气比

中图分类号: V23

文献标志码: A

### Influence of oxygen addition in multi-swirl pilot zone on atmospheric pressure ignition characteristics

WANG Bo-sen, ZHANG Chi, LIN Yu-zhen, JIANG Wen-bin

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,  
School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The ignition experiments were conducted on atmospheric pressure and normal temperature. The experimental research object was a model combustor with multi-swirl air atomizing nozzle. The systematic parameters for study consist of atmospheric pressure, normal temperature, pressure drop of chamber of 1%—6%, ignition energy of 20J and 12J, mass flow ratios of oxygen and air in pilot zone of 0—0.04. The change rule of ignition fuel-air ratio of multi-swirl air atomizing nozzle. The results indicate that when ignition fuel-air ratio is small enough, maximum ignition air flow velocity at combustor inlet increases with the rising oxygen addition mass flow in pilot zone. On the condition of the same ignition energy and pressure drop of chamber, while the mass flow ratio of oxygen and air in pilot zone increases, the ignition fuel-air ratio reduces. When the mass flow ratio of oxygen and air in pilot zone increases to a threshold value (20J-0.01, 12J-0.015), the trend of ignition fuel-air ratio of curve changes. When it continues rising to another threshold value (20J-0.025, 12J-0.03), the ignition fuel-air ratio will not change.

**Key words:** combustor; ignition; multi-swirl; pilot zone; oxygen addition; maximum ignition air flow velocity at combustor inlet; fuel-air ratio

对于航空燃气涡轮发动机, 在常温常压下点火起动是个基本要求, 对于当今所需要的飞行器

来说,飞行高度均在 7 km 以上,甚至 20 km 以上的高空,因此还存在一个迫切需要解决的问题,那就是高空再点火问题<sup>[1]</sup>. 由于高空点火的空气温度和压力很低,燃油雾化差<sup>[2]</sup>,降低化学反应速率,导致最小点火能量大幅度增大,点火很难成功<sup>[3]</sup>. 国内的陈能坤等通过试验研究发现对燃油加温加宽了低压下可点燃的贫油范围,但是高空再点火多在富油状态进行,供油量较大,供油压力较高,燃油蒸气量供应充足,此时点火的关键已不是燃油蒸气不足,而是氧气质量浓度不足<sup>[4]</sup>. Chen 等通过相关研究发现在燃烧室进口气流中局部补氧有利于高空点火的成功<sup>[5]</sup>. 如果为了得到各级低压工况下的补氧点火特性,需要分别对低压点火和补氧点火特性进行研究,然后对低压和补氧相互耦合对点火特性的影响进行试验研究. 因此,研究常压下补氧对燃烧室点火特性的影响是必要的.

目前,关于补氧点火和富氧燃烧,国外已有相关研究成果. Liu 等通过软件 Chemkin 模拟进口压力为 1.7 MPa 和 4 MPa 高压工况下的甲烷补氧点火,研究发现,随着氧气质量浓度的增加,相比于进口压力,氧气质量浓度对点火、火焰温度和燃烧产物成分的影响更大;增大补氧量有利于火焰的稳定,但是当补氧质量浓度增大到一定程度后,火焰温度过高,导致产生的  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  离解,在燃气中产生更多的  $\text{O}_2$ <sup>[6]</sup>. Chen 等主要研究了高空 4~9 km 下补氧对高空点火的影响,研究表明在气流中局部补氧可以拓宽点火工况的临界值,具体表现为最小点火能量减小,点火油气比减小,临界进口空气压力降低,临界进口空气速度增大<sup>[5,7]</sup>,但并未对低压工况下点火特性曲线进行研究,而且其所用补氧结构和逆空气流动补氧方式与本文研究所采用的旋流补氧有所不同. Kutne 等主要对双旋流模型燃烧室中的甲烷富氧燃烧火焰进行研究,通过火焰的 OH 化学发光图像来分析火焰结构与稳定性,发现氧气质量浓度比当量比对火焰的影响更大<sup>[8]</sup>. Ardha 等使用粒子图像测速法 (PIV) 测量技术分析火焰传播速度和湍流度,研究发现氧气质量浓度越大,火焰径向速度和湍流度越小<sup>[9]</sup>. Keating 等研究发现适当增大氧气质量浓度可以提高发动机功率,降低未燃碳氢化合物 (UHC) 和氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ ) 的排放<sup>[10]</sup>. Werles 等主要研究了甲烷和丙烷在高温氧化反应容器内的点火特性<sup>[11]</sup>.

上述文献主要是对高压、常压、低压工况下富

氧燃烧和补氧点火进行了理论和试验研究,其中氧气质量浓度相对压力和当量比对富氧燃烧的影响更大的结论为常压补氧点火特性的研究提供了重要的参考. 考虑到本文研究所采用的中心旋流补氧结构,氧气由补氧环进入第 1 级旋流器,并经第 1 级旋流器通道进入预燃区,预燃区采用单独供油点火,因此预燃区补氧将对点火特性产生最直接的影响. 本文将对常压下多级旋流预燃区补氧对点火特性的影响进行研究,对后续低压和补氧的耦合对点火特性的影响研究有一定的指导意义.

## 1 试验系统及方法

### 1.1 模型燃烧室

研究对象是一个单头部多级旋流空气雾化喷嘴模型燃烧室. 其中,多级旋流空气雾化喷嘴是关键部件,可分为主燃级和预燃级,采用分级进气方案. 喷嘴和预燃级融为一体,成为燃油预膜雾化喷嘴,预燃级包括三级旋流,可加强雾化和掺混. 主燃级为结构简单的轴向旋流. 预燃级与主燃级空气质量分配比为 1:1.3. 采用中心旋流补氧结构,氧气由补氧环进入第 1 级旋流器,并经第 1 级旋流器通道进入预燃区. 燃烧室头部结构如图 1 所示.

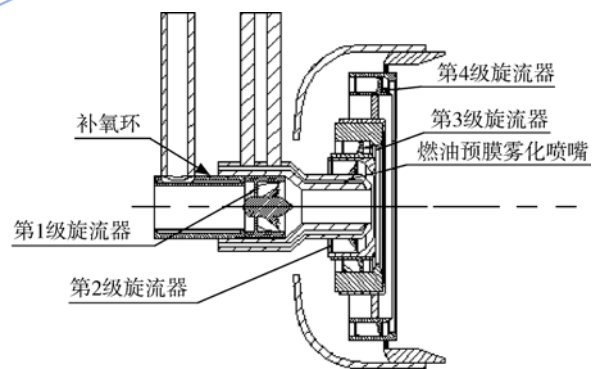


图 1 燃烧室头部结构

Fig. 1 Structure of combustor dome

### 1.2 试验台

本试验在常压点火试验台上进行,试验台主要包括常压空气系统、燃油供给系统、氧气供给系统、测试控制系统,如图 2 所示. 燃烧室进口空气由低压气罐提供,通过截止阀控制燃烧室进口压力和火焰筒压降,采用精密压力传感器及差压变送器负检测,进口空气流量通过测得前测量段总静压差和进口空气温度确定,进口空气流量与进口压力和火焰筒压降一一对应. 燃油供油压力由

氮气瓶提供,通过截止阀控制空气雾化喷嘴前油压来达到控制燃油流量的目的.氧气流量范围为 $0\sim 2.38\text{ g/s}$ ,由精密流量计控制.

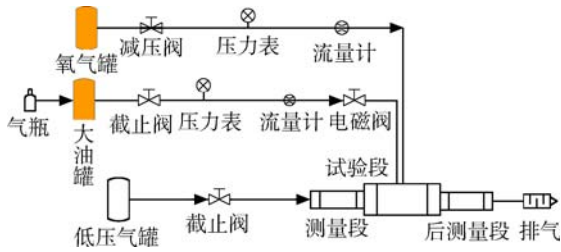


图2 试验系统

Fig. 2 Experimental system

### 1.3 试验方案

控制预燃区补氧流量  $\dot{m}_o$  与空气流量  $\dot{m}_a$  之比,即  $\dot{m}_o/\dot{m}_a$ , 在  $0\sim 0.04$  范围内变化.由于点火前头部流场结构是影响点火特性的主导因素之一,需要对冷态流场进行数值模拟<sup>[12-13]</sup>.对预燃区最大补氧流量,即  $\dot{m}_o/\dot{m}_a=0.04$  试验工况下燃

烧室头部的流场进行数值模拟,与未补氧时的模拟结果比较发现流场并未发生改变,说明试验研究中所采用的补氧流量是合理的,保证了在不影响头部流场前提下研究补氧流量对常压点火特性的影响.这是由于雾化气体及头部流场分布影响火焰结构及稳定<sup>[14]</sup>.

通过改变燃烧室进口空气流量,调节火焰筒压降在  $1\%\sim 6\%$  变化,调节供油流量,分别采用  $20\text{ J}$  和  $12\text{ J}$  的点火能量进行点火试验.电磁阀打开后开始启动点火器,连续工作  $5\text{ s}$ ,最多重复  $3$  次,由火焰筒侧壁观察窗观察火焰筒内火焰情况,产生火焰后关闭点火器,若火焰继续稳定代表点火成功,否则说明点火失败.在每一个工况点火试验之前,需要冷态吹扫试验段,一方面使燃烧室出口温度冷却至常温,防止温度的升高对点火油气比产生干扰,另一方面清除残留在燃烧室中的燃油.在某一试验工况下,获得最小成功点火油气比,或点火油气比高于  $0.05$  还未点着时停止相应工况的试验.试验参数范围如表 1 所示.

表1 常压补氧点火试验工况

Table 1 Test conditions of atmospheric pressure ignition with oxygen addition

进口压力/ (kPa)	总空气流量/ (kg/s)	压降/ %	进口速度/ (m/s)	预燃区空气流量/ (kg/s)	氧气流量/ (g/s)	预燃区 $\dot{m}_o/\dot{m}_a$	油气比
101~108	0.06~0.165	1~6	40~110	0.012~0.033	0~2.381	0~0.04	0.01~0.05

## 2 试验结果与分析

在本次试验研究过程中,试验结果分析的重点是预燃区补氧流量对点火特性的影响以及氧气质量浓度相对于火焰筒压降、点火能量对点火特性的影响.

### 2.1 预燃区补氧流量对点火临界进口速度的影响

保持点火油气比  $f/a$  为  $0.022$  不变,改变预燃区补氧流量,分别使用  $20\text{ J}$  和  $12\text{ J}$  点火能量进行点火试验,点火临界进口速度随预燃区补氧流量的变化趋势如图 3 所示.

当使用  $20\text{ J}$  点火能量时,预燃区补氧流量由  $0.1\text{ g/s}$  增大到  $0.3\text{ g/s}$  时,临界进口速度大致由  $82\text{ m/s}$  增大到  $103\text{ m/s}$ ;在相同的临界进口速度范围内,当使用  $12\text{ J}$  点火能量时,预燃区补氧流量由  $0.3\text{ g/s}$  增大到  $0.5\text{ g/s}$ ,但两条曲线的变化趋势大致相同.需要指出的是,在试验过程中,如果不进行补氧,点火失败.产生这种试验结果可能的原因是:在点火油气比  $f/a$  为  $0.022$  的工况下点

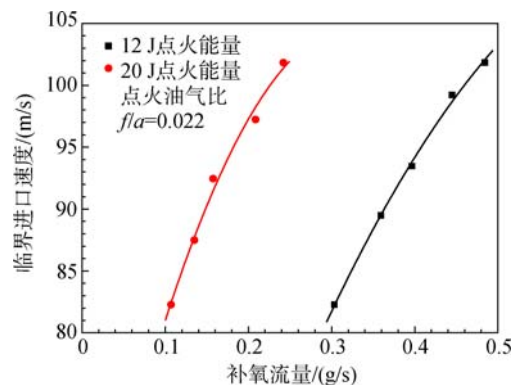


图3 临界进口速度随预燃区补氧流量的变化

Fig. 3 Maximum ignition air flow velocity at combustor inlet varying with oxygen mass flow in pilot zone

火,预燃区补氧是必要条件;燃烧室进口速度增大说明进口空气流量增大,由图 3 所示只有在预燃区补氧流量也随之增大的情况下点火才可能成功,说明了预燃区氧气流量与进口空气流量的比值  $\dot{m}_o/\dot{m}_a$  是决定点火是否成功的关键因素,因此

当点火油气比足够小的时候,增大预燃区补氧流量可以使点火临界进口速度增大.

### 2.2 预燃区补氧对点火油气比的影响

控制预燃区补氧流量与空气流量比,即  $\dot{m}_o/\dot{m}_a$  在  $0\sim 0.04$  范围内变化,在不同火焰筒压降下,使用不同的点火能量,得到点火油气比随预燃区  $\dot{m}_o/\dot{m}_a$  的变化曲线,如图 4、图 5 所示. 使用相同点火能量,各火焰筒压降工况条件下点火油气比会随着预燃区  $\dot{m}_o/\dot{m}_a$  的增加而减小. 这是由于在火焰筒压降保持不变的情况下,燃烧室进口压力和进口空气流量  $\dot{m}_a$  为定值,增大预燃区补氧流量,一方面提高了氧气的质量浓度,增加了单位体积内化学反应氧化剂和还原剂(燃油)分子的碰撞概率,从而加速了化学反应<sup>[15]</sup>;另一方面,本研究采用的旋流补氧方式使氧气直接参与燃油雾化,在相同的燃烧室进口压力条件下,增大补氧流量,使氧气流速相对加大,有助于燃油的雾化与油气混合,同时减小雾化颗粒度,增加燃油蒸气密度,与在进口空气中增加氧气质量浓度相比,该方式对点火过程的影响更为显著<sup>[16-17]</sup>.

如图 4 所示,随着火焰筒压降的增大,点火油气比随预燃区  $\dot{m}_o/\dot{m}_a$  变化的曲线斜率增大,说明预燃区补氧对较大的火焰筒压降工况下的点火油气比影响更大,进一步表明预燃区补氧对点火特性的作用更多地体现在提高氧气质量浓度而加快化学反应速率上. 这是由于火焰筒压降越大,燃油预膜雾化效果越好,而此时预燃区补氧对点火特性的影响更大,说明了预燃区补氧通过提高雾化质量来改变点火特性的作用较小. 如图 5 所示,12 J 点火能量下预燃区  $\dot{m}_o/\dot{m}_a$  对点火油气比的影响

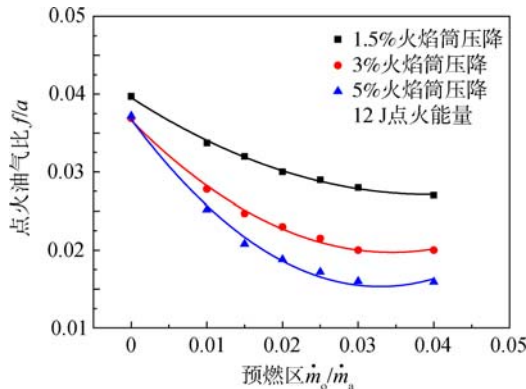


图 4 不同火焰筒压降条件下点火油气比随预燃区  $\dot{m}_o/\dot{m}_a$  的变化

Fig. 4 Ignition fuel-air ratio varying with  $\dot{m}_o/\dot{m}_a$  in pilot zone with different pressure drops of chamber

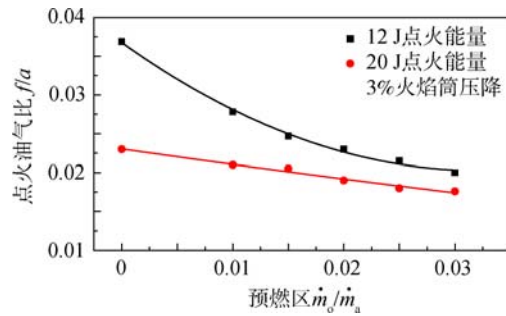


图 5 不同点火能量下点火油气比随预燃区  $\dot{m}_o/\dot{m}_a$  的变化

Fig. 5 Ignition fuel-air ratio varying with  $\dot{m}_o/\dot{m}_a$  in pilot zone with different ignition powers

更大,这是由于燃烧链反应的能量阈值一定,点火能量较小时,通过预燃区补氧来提高释热强度对化学反应的影响更为明显<sup>[18]</sup>.

### 2.3 预燃区补氧对点火特性曲线趋势的影响

不同预燃区  $\dot{m}_o/\dot{m}_a$ ,点火油气比  $f/a$  随火焰筒压降的变化曲线如图 6、图 7 所示. 从两张图可以看出,火焰筒压降为 4% 的工况是一个重要的转折点. 没有补氧或者补氧流量很小的情况下,火焰筒压降小于 4% 时最小点火油气比随火焰筒压降的升高而下降;当火焰筒压降超过 4% 时,曲线开始上扬,点火油气比随火焰筒压降的升高而升高. 但这种情况会随着预燃区  $\dot{m}_o/\dot{m}_a$  的增加而发生变化. 对于 20 J 点火能量,预燃区  $\dot{m}_o/\dot{m}_a > 0.01$ ,点火特性曲线趋势发生改变;对于 12 J 点火能量,预燃区  $\dot{m}_o/\dot{m}_a > 0.015$ ,点火特性曲线趋势改变. 这是由于随着预燃区  $\dot{m}_o/\dot{m}_a$  增大,火焰筒压降和点火能量对点火特性曲线的影响越来越小,而

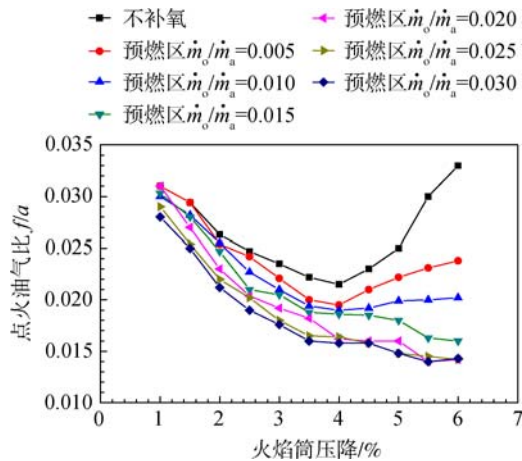


图 6 20 J 点火能量常压补氧点火特性曲线

Fig. 6 Atmospheric pressure ignition characteristic curves with oxygen addition with ignition energy of 20 J

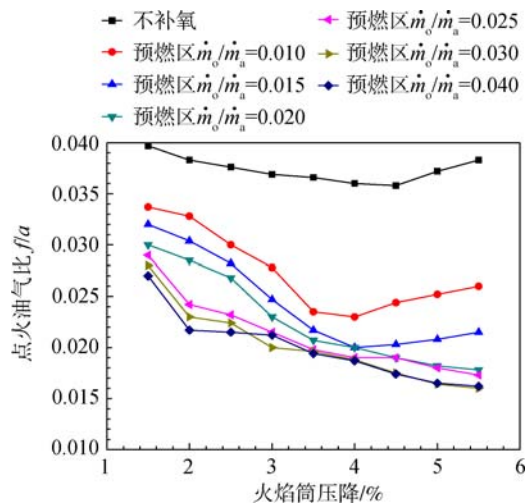


图7 12J点火能量常压补氧点火特性曲线

Fig. 7 Atmospheric pressure ignition characteristic curves with oxygen addition with ignition energy of 12J

氧气质量浓度对其影响越来越大,当增大到一定程度,点火特性曲线不再发生改变.具体表现为对于20J点火能量,预燃区 $\dot{m}_o/\dot{m}_a > 0.025$ ,点火特性曲线不再发生改变;对于12J点火能量,预燃区 $\dot{m}_o/\dot{m}_a > 0.03$ ,点火特性曲线不再发生改变.对于20J和12J点火能量,随着预燃区 $\dot{m}_o/\dot{m}_a$ 增大,点火油气比最终趋近于0.014~0.015.

### 3 结论

本文采用多级旋流补氧结构,试验研究预燃区补氧流量对常压点火特性的影响.研究得出的主要结论有:

1) 在点火油气比足够小且保持不变的情况下,预燃区补氧流量越高,临界进口速度越大.

2) 在相同点火能量和火焰筒压降条件下,预燃区补氧空气流量比 $\dot{m}_o/\dot{m}_a$ 越高,点火油气比越小;在火焰筒压降较大、点火能量较高的工况下,预燃区 $\dot{m}_o/\dot{m}_a$ 对点火油气比的影响更大.

3) 随着预燃区补氧空气流量比 $\dot{m}_o/\dot{m}_a$ 增大,点火特性曲线的趋势发生改变,当其增大到一定程度,点火特性曲线不再发生改变.

### 参考文献:

[1] 林宇震,许全宏,刘高恩.燃气轮机燃烧室[M].北京:国防工业出版社,2008.  
 [2] Caines B N, Hicks R A, Wilson C W. Influence of sub-atmospheric conditions on the performance of an airblast atomiser[R]. AIAA-2001-3573, 2001.  
 [3] Lefebvre A H. Gas turbine combustion[M]. 2nd ed. Philadelphia: Taylor and Francis, 1999.

[4] 陈能坤,周雁.燃油增温对高空低压点火性能影响的实验研究[J].推进技术,1996,17(6):69-72.  
 CHEN Nengkun, ZHOU Yan. Effect of advanced fuel temperature on the high altitude ignition performance [J]. Journal of Propulsion Technology, 1996, 17(6): 69-72. (in Chinese)  
 [5] Chen N K, Zhao Y H, Wu S S, et al. Effect of oxygen addition on ignition of aero-gas turbine at simulated altitude facility[J]. Journal of Energy, 1982, 6(6): 425-429.  
 [6] Liu C Y, Chen G, Sipöcz N, et al. Characteristics of oxy-fuel combustion in gas turbines[J]. Applied Energy, 2012, 89(1): 387-394.  
 [7] Chin J S. Analysis of the effect of oxygen addition on minimum ignition energy[R]. AIAA 82-1160, 1982.  
 [8] Kutne P, Kapadia B K, Meier W, et al. Experimental analysis of the combustion behaviour of oxyfuel flames in a gas turbine model combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 3383-3390.  
 [9] Ardha V R, Dam B, Love N, et al. Characterization of oxy-fuel flames in a swirl based combustor[R]. AIAA-2012-3786, 2012.  
 [10] Keating E L, Gupta A K. Effects of oxygen enrichment on the predicted indicated performance of an IC engine[R]. AIAA 94-3826-CP, 1994.  
 [11] Werle S, Wilk R K. Ignition of methane and propane in high-temperature oxidizers with various oxygen concentrations[J]. Fuel, 2010, 89(8): 1833-1839.  
 [12] 王玉峰,段小龙.冲压发动机点火前内流场数值仿真研究[J].火箭推进,2006,32(6):20-22.  
 WANG Yufeng, DUAN Xiaolong. Numerical study of the ramjet engine inner flow before ignition [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2006, 32(6): 20-22. (in Chinese)  
 [13] 薛鑫,林宇震,张弛.火焰筒压力损失对点火特性的影响[J].航空动力学报,2012,27(10):2229-2235.  
 XUE Xin, LIN Yuzhen, ZHANG Chi. Effects of liner pressure loss on combustor ignition performances [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(10): 2229-2235. (in Chinese)  
 [14] Gupta A K. Effect of swirl and flow distribution on the spray flame characteristics[R]. Las Vegas: Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, 2000.  
 [15] Dagaut P, Cathonnet M. The ignition, oxidation, and combustion of kerosene: a review of experimental and kinetic modeling[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32(1): 48-92.  
 [16] Gupta A K, Damm T, Charagundla S R, et al. Role of oxygen-enriched atomization in kerosene spray flames [J]. Journal of Propulsion and Power, 2000, 16(5): 845-852.  
 [17] Gupta A K, Damm T, Cook C, et al. Effect of oxygen-enriched atomization air on the characteristics of spray flames[R]. Reno: 35th Aerospace Sciences Meeting, 1997.  
 [18] Bane S P M, Ziegler J L, Boettcher P A, et al. Experimental investigation of spark ignition energy in kerosene, hexane, and hydrogen [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(2): 290-294.