

文章编号: 1000-8055(2010)09-1978-06

# 离心力场下扩散射流火焰的特性

郭新华, 张 弛, 林宇震

(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科技重点实验室, 北京 100191)

**摘 要:** 以直段空腔和弯曲空腔为研究对象, 在相同的初始条件下试验了两之间火焰传播的特性, 研究了强离心力条件下的扩散射流火焰特性. 通过比较分析, 在弯曲空腔中离心力场的影响下, 扩散射流火焰受到浮升力的作用, 以“火焰迁移”的方式在主流中传播, 加快了火焰传播速度, 削弱了横向气流的干扰作用, 使扩散射流火焰顺利地与空气掺混反应, 增加了其在横向气流中的穿透深度.

**关 键 词:** 扩散射流火焰; 射流穿透; 离心力; 浮升力; 旋流器

中图分类号: V231.2

文献标识码: A

## Study of diffusion jet flame characteristic under centrifugal force

GUO Xinhua, ZHANG Chi, LIN Yuzhen

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero Engines,  
School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,  
Beijing 100191, China)

**Abstract:** The paper adopted the straight and curving passages to investigate the flame characteristic under the same test conditions. The diffusion jet flame characteristic was studied under high centrifugal force. Through comparison and analysis of the test results, it was obviously observed that the flame speed was faster in the curving passages under buoyant force action resulting from a high centrifugal force. The high centrifugal force made the diffusion flame speed faster and weakened the interference of crossflow. The diffusion flame could mix and react with the mainstream much more easily. The penetration depth of jet flame in the crossflow was increased.

**Key words:** diffusion jet flame; jet penetration; centrifugal force; buoyant force; swirler cup

近年来,随着发动机及其燃烧系统的发展,一种非常规环境中的燃烧技术——强离心场燃烧技术,引起国内外研究人员的关注.美国 Ramgen 公司曾以冲压发动机原理为基础提出了一种集冲压发动机技术和燃气涡轮发动机技术为一体的发动机——冲压转子发动机<sup>[1]</sup>,将冲压模型、燃烧室和尾喷管一同安装在高速转子轮缘上组成冲压推进模块,以实现空气压缩、燃烧和膨胀做功三大功能,成为可独立工作的转子式发动机,目前已实现

了气体燃料的原型机验证试验.美国密歇根大学的 Dahm 等人<sup>[2]</sup>也提出了类似的“Inside Out”冲压转子发动机方案,将冲压燃烧膨胀模块安装于转子内缘,中心采用陶瓷静子,利用离心作用将高温燃气从通道内缘排出,在燃烧室进口前采用了电油盘结构将液体燃料雾化蒸发,与空气预混后进入燃烧室燃烧. Zelina 等人<sup>[3]</sup>在 TVC (trapped vortex combustor) 基础上提出的一种应用于涡轮内燃烧器中的燃烧技术——UCC (ul-

收稿日期: 2009 08 05; 修订日期: 2009 11 11

作者简介: 郭新华 (1980-), 男, 山东潍坊人, 博士, 主要从事航空发动机燃烧专业方面的研究.

tra compact combustor), 与冲压转子发动机不同之处在于该燃烧室中离心力是由于气流在空腔内旋转流动而产生. 在国内, 张弛等人<sup>[4]</sup>针对冲压转子发动机和先进紧凑燃气涡轮发动机提出了切向驻涡燃烧室概念——TTVC (tangential trapped vortex combustor), 利用切向空腔的驻涡作用以及强旋流产生的强离心作用提高燃烧效率、拓宽稳定工作范围, 并具有减少污染排放的潜力.

强离心力下的液雾燃烧机理非常复杂, 涉及到燃油的蒸发、雾化、掺混、燃烧等复杂的过程, 本文分别对离心式双旋流器空气雾化喷嘴单头部扩散射流火焰在直段空腔和弯曲空腔横向射流中的传播特性进行试验研究, 比较分析了弯曲空腔中离心力对扩散射流火焰的影响.

1 研究回顾

与依靠热传导和基本扩散传播的层流火焰传播和依靠湍流旋涡微泡褶皱的湍流火焰传播<sup>[5-8]</sup>不同, 高离心力下火焰传播主要依靠浮升力效应产生的“焰泡”迁移增大其传播速度<sup>[3,9-11]</sup>, 其中既有体积效应也有界面效应<sup>[12]</sup>. 与气体燃料的预混燃烧相比, 两相液雾燃烧更加复杂, 因为其燃烧过程包括蒸发、掺混和燃烧, 很明显, 离心力对它们的影响效果是不同的.

在离心力及其衍生的浮升力的共同作用下, “焰泡”所受的作用力为

$$F_b = (\rho_a - \rho_b) V_b a$$

其中  $\rho_a$  是周围冷气密度,  $\rho_b$  是燃烧产物密度,  $V_b$  是焰泡体积,  $a$  是离心加速度.

焰泡迁移影响着火焰的传播速度, 针对碳氢燃料, 在常规重力作用下, 焰泡迁移速度小, 主要依靠湍流火焰传播, 但在高离心加速度场中, 焰泡迁移速度受浮升力作用变大, 此时焰泡迁移方式成为火焰的主要传播形式, 其传播速度也比单纯的湍流火焰传播大. 对于湍流火焰传播速度已经很高的氢燃料火焰, 在一定离心力范围内仍然会以湍流火焰传播为主, 要发挥焰泡迁移速度的优势则需要更高的离心加速度<sup>[9]</sup>.

根据美国 Lewis 的早期研究结论, 对于丙烷与空气的预混燃气, 小于  $200g_0$  的离心加速度对火焰传播速度影响不大, 主要还是以湍流火焰的传播方式. 当离心加速度超过  $200g_0$  后, 离心力对火焰传播速度有明显影响, 火焰形状也有较大变化<sup>[9]</sup>.

Cha 等<sup>[13]</sup>使用弯曲管道模拟离心力场, 研究

在弯曲管道中的预混火焰稳定性能. 在 U 型弯管中模拟离心力场, 采用丙烷和甲烷的混合气作为燃料, 试验得到了吹熄和回火当量比与进口速度的关系. 结果表明在直管中吹熄极限要低于弯管中的吹熄极限.

Lapsa 等人<sup>[14]</sup>利用半圆弯曲管道模拟了  $\pm 10\,000g$  的加速度场, 研究了大加速度对后台阶预混火焰的火焰传播和吹熄边界的影响, 甲烷预混气的当量比范围  $0.7\sim 1.9$ . 后台阶位于弯管道的外缘时, 加速度定义为正, 后台阶位于弯管道的内缘时, 加速度定义为负. 当离心加速度为正时, 迫使高密度的反应物进入回流区, 小密度的生成物进入反应流, 离心效应引起的对流输运作用成为火焰传播的主导机理; 当离心加速度为负时, 迫使高温产物流向回流区同时阻止温度相对低的反应物进入此区域, 体积力有效地将低温反应物和高温产物隔离, 形成分层结构, 产生平整的火焰. 在以上两种情况下, 离心力会导致火焰吹熄边界显著高于无离心力的情况.

上述研究针对的主要是预混火焰在离心力条件下的燃烧特性, 本文作者主要研究了扩散射流火焰在有无离心力条件下的传播特性.

2 试验系统

分别在直段和弯段的空腔中试验了航空煤油燃烧时火焰的燃烧特性和传播特性. 扩散射流火焰受到横向气流的影响, 其火焰传播、气动流场、中心轨迹以及几何尺寸等与开放式出口情况有很大差异, 并且随主流速度、温度和氧质量浓度的变化也有所变化. 试验的系统图如图 1 所示.

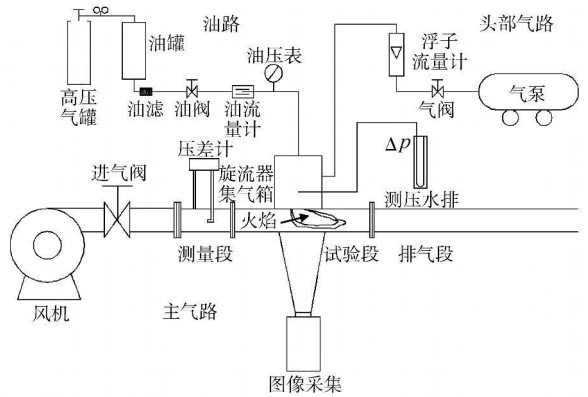


图 1 空腔中扩散射流火焰试验系统图

Fig. 1 Experiment system sketch of the diffusion jet flame in the passages

3 直段空腔中扩散射流火焰试验

首先在一直段空腔内展开对扩散射流火焰的试验研究, 观察与测量其火焰几何尺寸.

试验在常温常压下进行, 通过调节气量大小, 改变空腔内的主流速度, 并通过测量段的总静压差计确定其大小, 主流保持常温. 在直段空腔试验段的两侧开有观察窗, 安装透明耐高温石英玻璃, 便于记录观察火焰信息. 如图 2 所示.



图 2 直段空腔试验段及扩散射流火焰  
Fig. 2 Schematic diagram of the straight passage and the diffusion jet flame

当进行扩散射流火焰在直段空腔中的传播和几何尺寸试验时, 通过主流测量段压差、供油压力以及头部空气压降和供气量确定扩散射流火当量比和主流速度等参数, 通过石英玻璃观察窗记录下此时的扩散火焰光学信息.

试验中产生扩散射流火焰使用的旋流器<sup>[5]</sup>采用同向径向开孔式双旋流器, 内外旋流器的旋流数分别为 0.74, 0.48, 有效流通面积 20.5, 60 4 mm<sup>2</sup>.

分别在不同的主流速度、不同的旋流器压降和不同的旋流器当量比条件下试验了直段空腔中扩散射流火焰的传播特性.

表 1 试验参数

Table 1 Parameter of the experiment

| 主流速度/( m/ s) | 旋流器压降/ %   | 旋流器当量比      |
|--------------|------------|-------------|
| 20~ 40       | 1. 8~ 3. 5 | 1. 1~ 2. 65 |

火焰信息通过图像处理软件 Matlab 提取, 依据灰度值的不同确定火焰的边界线, 确定火焰的上下边界之后, 把火焰的上下边界通过相等的份的划分来确定火焰的中心线, 如图 3 所示. 其中  $D$  为旋流器外套筒的直径;  $H$  为通道横截面的高度;  $h$  为火焰中心线到外壁面的距离;  $x$  为火焰中心线到旋流器中心线的距离;  $U_g$  为主流速度;  $U_{sw}$  为旋流器气流速度.

如图 4 中的 1, 2 所示, 是在保证旋流器空气压降与当量比不变的情况下, 将直段空腔主流速

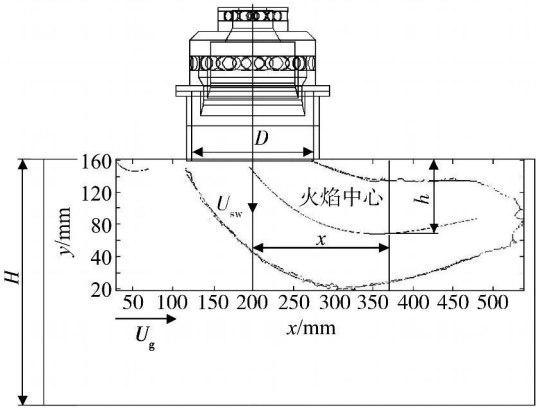


图 3 火焰边界及火焰中心的定义  
Fig. 3 Definition of flame boundary and center

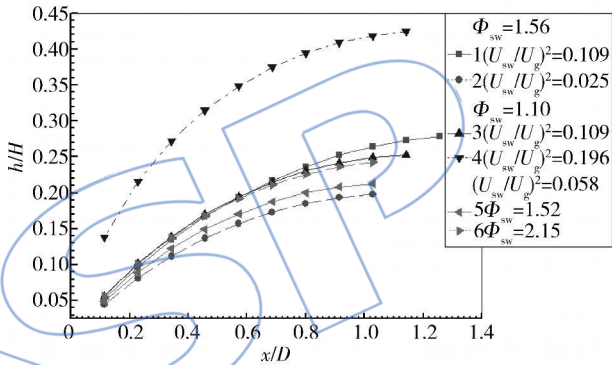


图 4 直管段中不同试验条件下火焰穿透深度的比较  
Fig. 4 Flame penetration depth comparison in different conditions in the straight passage

度从 20 m/ s 增加到 40 m/ s 时, 火焰穿透深度的比较, 从图中可以看到随着主流速度从 20 m/ s 增加到 40 m/ s, 火焰的穿透深度有了比较明显的下降, 这主要是因为射流动量比<sup>[16]</sup>降低的缘故, 旋流器处的扩散火焰射流速度不变, 随着主流速度的增加, 射流穿透的动量比降低, 从而使得扩散射流火焰的射流穿透降低, 随着主流速度的提高, 主流有更多的冷气与富油扩散射流火焰掺混, 扩散射流火焰的几何尺寸包括沿程长度和火焰宽度也有比较明显的减小.

上面考察了旋流器压降和当量比一定, 不同主流速度条件下扩散射流火焰穿透深度的比较, 接下来试验了主流速度和旋流器当量比一定的条件下, 不同旋流器压降的扩散射流火焰穿透深度的比较, 如图 4 中的 3, 4 所示, 旋流器压降增加, 使得扩散火焰射流速度增加, 因为主流速度保持不变, 因此扩散射流火焰的动量比会随着旋流器压降的增加而增大, 穿透深度随着射流动量比的增大而增大<sup>[16]</sup>, 从图中的试验结果 3, 4 也可以明

显的看到, 在其他条件一定, 随着旋流器压降的增加, 火焰的穿透深度增大。

最后试验了不同旋流器当量比对扩散射流火焰穿透深度的影响, 如图 4 中的 5, 6 所示, 主流速度和旋流器压降保持不变, 通过改变旋流器内的供油量来改变旋流器的当量比, 从试验的结果可以看出, 随着旋流器当量比的改变, 火焰的穿透深度变化并不是十分的明显, 这主要是由于射流穿透的动量比变化不大的缘故, 旋流器当量比的变化对扩散火焰射流动量比的改变贡献很小, 从图中可以随着旋流器当量比的增大, 扩散射流火焰穿透深度略微有所增加, 这主要是由于随着当量比的增大, 扩散射流火焰穿透速度稍有提高, 火焰的刚性有所增强, 使得火焰的穿透深度略微有所增加。

从上面得到的试验结果可以看出, 不管是通过改变主流速度还是改变旋流器压降来改变射流动量比, 都可以起到使扩散射流火焰穿透深度变化的作用。

4 弯曲空腔中扩散射流火焰试验

弯曲空腔内的扩散射流火焰试验系统及试验方法都与直段空腔内的相同, 试验段采用了通道平均半径为 158.5mm 的弯曲空腔, 如图 5 所示, 两侧也开有观察窗, 安装透明耐高温石英玻璃, 通过观察窗记录下火焰信息。弯曲空腔内的扩散射流火焰垂直于壁面入射。

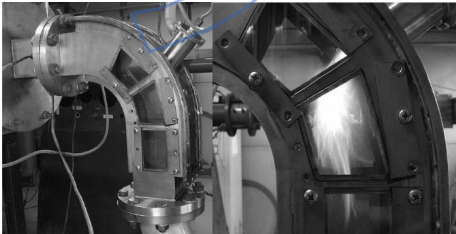


图 5 弯曲空腔试验段及扩散射流火焰照片  
Fig. 5 Experiment segment of curving passage and the diffusion jet flame

火焰形状和中心线的提取同直段空腔中的提取类似, 通过 Matlab 得到火焰信息, 火焰的边界线通过灰度值来确定, 通过把火焰的上下边界划分为相同等份来得到火焰的中心线, 与直段空腔中有所区别的是特征尺寸  $h$  的定义, 弯曲空腔中  $h$  为火焰中心线到弯管外壁面的距离。

首先, 考察了在旋流器压降和旋流器当量比

不变的条件下, 主流速度的变化对扩散射流火焰穿透的影响, 如图 6 中的 1, 2, 3 所示, 弯曲空腔主流速度分别为 20, 30, 40m/s, 根据已有的经验, 射流动量比的减小会导致射流穿透深度下降<sup>[6]</sup>, 但得到的试验结果却与已有的实际经验有所区别, 当主流速度从 20m/s 增加到 30m/s 时, 射流的动量比减小, 按照已有的经验, 射流的穿透应该减小, 但是试验结果却与此相反, 分析其原因, 考虑气流在弯管中流动时会产生离心力, 从而在弯管中形成压力梯度, 使得高温火焰受到气流浮升力的影响, 有向圆心偏移的趋势, 因此虽然射流动量比减小, 但是由于浮升力的影响使得穿透深度加大, 此时, 浮升力的影响占主导, 当主流速度增加到 40m/s 的时候, 扩散射流火焰的穿透深度又有所降低, 虽然高温火焰也受到浮升力的影响, 但此时射流动量比的影响占主导作用, 因此出现了图 6 中所示的结果。

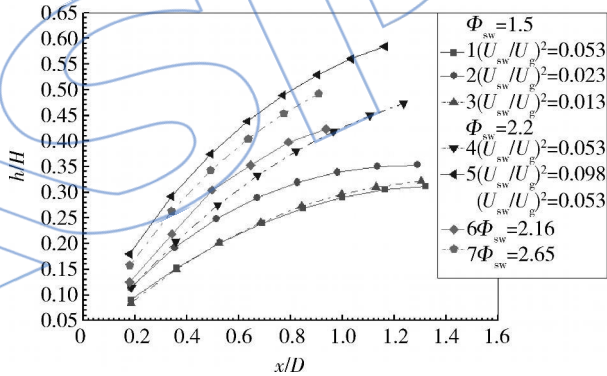


图 6 弯曲空腔内火焰穿透深度的比较

Fig. 6 Flame penetration depth comparison in different conditions in the curving passage

图 6 中 4, 5 显示的主流速度和旋流器当量比一定, 旋流器压降变化对于射流火焰穿透深度的影响, 主流速度一定, 高温火焰受到的浮升力保持不变, 当旋流器压降变大时, 射流穿透的动量比变大, 射流火焰的穿透深度变大, 从图 6 中也可以看到主流速度和旋流器当量比保持不变, 随着旋流器压降变大, 扩散射流火焰的穿透有了明显的增大。

上面考察的是主流速度和旋流器压降对于射流扩散火焰的影响, 下面试验了旋流器当量比对于射流扩散火焰的影响, 如图 6 中的 6, 7 所示, 主流速度和旋流器压降保持不变, 改变旋流器的当量比, 可以看到随着当量比的增大, 火焰的穿透深度也有所增加, 当量比增大, 扩散射流火焰的速度

有所增加, 扩散射流穿透的动量比增大, 同时, 当量比增大, 火焰的刚性也有所增强, 此外, 火焰还受到浮升力的影响, 所以相对于直管段中旋流器当量比变化所引起的穿透深度的改变, 弯管段中要明显的多.

5 结果比较与讨论

在相同的主流速度、旋流器压降和旋流器当量比的情况下进行了直段空腔和弯曲空腔中扩散射流火焰特性对比(图 7).

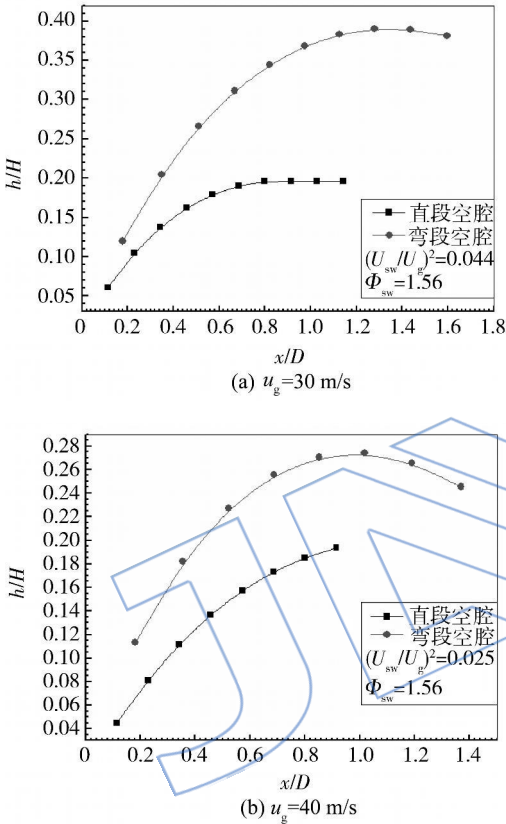


图 7 直段空腔和弯曲空腔中不同主流速度下火焰穿透深度比较

(旋流器压降  $\Delta p/p = 3.3\%$ , 当量比  $\Phi_{sw} = 1.56$ )

Fig.7 Flame penetration depth comparison in the condition of different mainstream velocities in the straight and curving passage

(swirler cup pressure drop 3.3%,  $\Phi_{sw} = 1.56$ )

从上面的试验对比结果中可以看出, 与没有气流离心力的直段空腔中的扩散射流火焰相比, 弯曲空腔中扩散射流火焰穿透深度要比直段空腔中扩散射流火焰穿透深度大, 主要是因为气流在弯管中的流动产生了离心力, 使得弯管中产生了压力梯度, 高温火焰受到气流浮升力的影响, 有向

圆心偏移的趋势, 这是与直管段中有所区别的地方, 扩散射流火焰穿透深度的增加会使火焰与主流新鲜空气接触面增大, 掺混增强, 燃烧反应加快, 导致火焰宽度减小, 在主流速度较高时更为明显.

弯曲空腔中主流的流动由于曲率的存在产生离心加速度  $U_g^2/R$ , 气流中的随体颗粒物将受到离心力的作用, 其方向背离圆心. 实际上, 离心力是使牛顿第二定律在非惯性系下成立而引入的一个惯性力, 是将动力学问题简化为静力学问题时引入的一个假设力, 它的主要作用是平衡运动规律. 由于此时离心力一般都比重力大上百倍, 因此可以忽略重力. 而火焰在主流中则类似于一团高温气体, 由于两者密度不同, 火焰将受到浮升力  $F_b = (\rho_a - \rho_b) V_b U_g^2/R$  作用, 其方向指向圆心, 因此它有向心运动的趋势. 此时的火焰以“焰泡迁移”为主要传播方式, 与层流或湍流火焰传播模型都不相同, 在一定范围内能够加快火焰传播速度.

6 结 论

通过对直段与弯曲空腔内的扩散射流火焰试验结果的比较和分析, 得到结论: 横向气流对扩散射流火焰具有横吹效应, 阻碍了其在空腔内的传播, 而在高离心力场中, 在浮升力的作用下, 扩散射流火焰以“焰泡迁移”方式在主流中传播, 火焰传播速度加快, 刚性增强, 穿透深度增加, 横向气流的干扰作用被削弱, 扩散射流火焰能够与来流更加顺利的掺混反应.

参考文献:

[ 1 ] Ramgen Power System, LLC. Ramgen technology overview [EB/OL]. [http://www.ramgen.com/tech\\_overview.html](http://www.ramgen.com/tech_overview.html). 2006.

[ 2 ] Dahm W J A, Lapsa A P, Hamlington P E. Inside out rotary ramjet turbogenerator[R]. AIAA 2006-4169, 2006.

[ 3 ] Zelina J, Sturgess G J, Shouse D T. The behavior of an ultra compact combustor (UCC) based on centrifugally-enhanced turbulent burning rates[R]. AIAA 2004-3541, 2004.

[ 4 ] 张弛. 切向驻涡燃烧室基础研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2007.

ZHANG Chi. Fundamental investigation of tangential trapped vortex combustor[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)

[ 5 ] Lefebvre A H, Reid R. The influence of turbulence on the structure and propagation of enclosed flames[J]. Combustion and Flame, 1966, 10(4): 355-366.

[ 6 ] Ballal D R, Lefebvre A H. The structure and propagation

- of turbulent flames[C] // Proceedings of Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical and Engineering Sciences. Great Britain: The Royal Society, 1975, 344(1637): 217-234.
- [7] 毕小平. 预混合燃烧现象学紊流火焰速度模型[J]. 燃烧科学与技术, 2000, 6(1): 44-46.
- BI Xiaoping. Phenomenological turbulent flame velocity model for premixed combustion[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2000, 6(1): 44-46. (in Chinese)
- [8] 傅维镡, 张永康, 王清安. 燃烧学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [9] Lewis G D, Smith C E. Investigation of centrifugal force and Reynolds number effects on combustion processes[R]. F44620-73G-0061, 1975.
- [10] Lewis G D. Centrifugal force effects on combustion[R]. Florida: 14th Symposium (International) on Combustion, 1973: 413-419.
- [11] Zelina J, Greenwood R T, Shouse D T. Operability and efficiency performance of ultra compact, high gravity (g) combustor concepts[R]. GT 2006-90119, 2006.
- [12] 王岳. 重力对稀燃弱湍流预混 V 形火焰的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2002.
- WANG Yue. Influences of gravity on lean premixed flames of weak turbulence[D]. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese)
- [13] Cha M S, Kim H G, Chung S H. Boundary velocity gradient and premixed flame blowoff in U-bend tubes with secondary flow[J]. Combustion and Flame, 2003, 132: 601-609.
- [14] Lapsa A P, Dahm W J A. Hyperacceleration effects on turbulent combustion in premixed step-stabilized flames[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2): 1731-1738.
- [15] 张弛, 汪志强, 林宇震. 自稳火双旋流杯在非受限空间内的燃烧特性[J]. 航空动力学报, 2008, 23(10): 1778-1782.
- ZHANG Chi, WANG Zhiqiang, LIN Yuzhen. Combustion characteristics of self-stabilized dual-swirler cup in the unconfined case[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(10): 1778-1782. (in Chinese)
- [16] 金如山. 航空燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 宇航出版社, 1988.