

## 新型预燃室的数值与实验研究

官继双 范育新 程晓军 齐海帆 王家骅 张靖周

(南京航空航天大学能源与动力学院, 南京, 210016)

**摘要:**设计了一种双旋流气动雾化喷嘴、中心点火的结构紧凑的小型预燃室。并利用数值和实验手段研究了预燃室内流动特征、油雾的索太尔平均直径(Sauter mean diameter, SMD)及稳定点火范围。数值结果显示:由于采用双旋流设计,在气动雾化喷嘴出口处气流的周向速度很大,在轴向会形成一个稳定的回流区。实验结果显示:该预燃室气油流量比大于3.5时,SMD小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ ;马赫数在0.37~0.84范围内,均可在一定余气系数内完成点火。

**关键词:**双旋流气动雾化喷嘴;预燃室;索太尔平均直径;稳定点火范围

**中图分类号:**V231.2

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-2615(2012)03-0307-06

## Numerical and Experimental Investigation of New Style Precombustion Chamber

Gong Jishuang, Fan Yuxin, Cheng Xiaojun, Qi Haifan, Wang Jihua, Zhang Jingzhou

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics &

Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** A new style precombustion chamber with double swirl air-blast atomizer is designed in order to satisfy the compact structure of combustor. A ignitor is fixed in the center of head of the chamber. The internal flow character of the chamber is obtained using the numerical method. Numerical results display very large circumferential speed and axial recirculation region due to its double swirl. The performance of the precombustion chamber including the Sauter mean diameter (SMD) of the spray and the range of air-fuel ratio (AFR) in which the fuel-air mixture (FAM) can be ignited by spark is given through a series of experiment. The results show that the value of SMD is less than  $10\text{ }\mu\text{m}$  when AFR is greater than 3.5. The range of Mach number in which FAM can be ignited is 0.37~0.84.

**Key words:** double swirl air-blast atomizer; precombustion chamber; Sauter mean diameter; stable ignition range

点火可靠是发动机燃烧室性能的主要指标之一。常用的点火方式有两种<sup>[1]</sup>,即直接点火和间接点火。直接点火常用电火花点火,间接点火常采用预燃室点火。预燃室点火的主要优点在于火炬能量大,但通常预燃室点火系统比较复杂,尺寸比较大、重量大。

目前西方国家航空发动机基本采用直接点火方式,前苏联航空发动机多采用间接点火方式<sup>[1]</sup>。但随着人们对污染问题的关注越来越高,火焰筒头

部设计朝贫油方向发展;加之新的替代燃料的使用,蒸发性能下降,这些都使高空点火性能恶化,采用直接点火变得越来越困难。

设计出结构紧凑、性能可靠的预燃室是解决上述困难的途径之一。目前加力燃烧室预燃室点火器主要分为中心点火和旁路点火两类。如WP6, WP7采用的就是中心点火的预燃室,这种预燃室容积大,是均匀混气的单相燃烧,火舌温度高,加力点火可靠性好;P25, J79发动机中都采用了旁路点

火器,前者为单相燃烧,后者为两相燃烧,后者比前者的贫富油点火范围要宽一些。但无论哪种结构,燃烧室尺寸都比较大,长度都超过20 cm。本文根据燃烧室工作特点和要求,设计了一种新型预燃室,该预燃室将双旋流气动雾化喷嘴与点火电嘴一体化设计,电嘴设计安装在双旋流的中心,使整个预燃室结构紧凑。本文对此结构的预燃室进行了内部流场分析,并试验研究了双旋流气动雾化喷嘴的雾化性能及预燃室点火性能。

本文设计的预燃室既可在传统的航空涡扇发动机、地面燃气轮机上使用,也可在新概念发动机<sup>[2-4]</sup>(如脉冲爆震发动机)上使用。

1 预燃室设计

喷嘴是燃烧室的主要零件之一<sup>[5]</sup>。本文设计的小型预燃室主要特点是采用双旋流气动雾化喷嘴为预燃室提供可燃混气及点火条件,如图1所示。喷嘴由两级旋流器组成,燃油通过喷油杆供入一级旋流器,在气动力作用下,沿着一级旋流器内部流动通道壁面及旋流叶片形成油膜,由于一级旋流器叶片出口设计成整个一级旋流器流动通道的喉道,所以有部分燃油在此处较高气流作用下被雾化,而大部分燃油由于一级旋流器旋流周向气动力及液体表面张力作用,在出口处翻越至文氏管表面形成具有较大周向速度的油膜;二级旋流器与一级旋流器旋向相反,二级旋流器出口与文氏管出口位于同一径向截面,文氏管壁面的油膜在一、二级旋流器

所产生的空气旋流作用下破碎,完成雾化过程。

其中一级旋流器具备3个方面的作用:(1)在叶片出口处将部分燃油雾化;(2)在旋转气流作用下大部分燃油在文氏管上形成均匀油膜;(3)旋转的气流会使中心压力低,形成轴向回流区,回流区内又存在经一级旋流部分雾化的燃油,这就为成功点火创造了条件。

为了使喷嘴出口下游的油气比分布满足着火条件,在喷嘴出口处安装帽罩。

2 内部流场分析

预燃室内部流动是非常复杂的三维流动,本文采用数值研究技术,给出内部流动特点。

2.1 计算模型及边界条件

使用商业建模软件Gambit 建立模拟计算的物理模型,图2给出了计算域并生成计算网格。计算域进口位于预燃室进口的远上游,距离大于10 倍的预燃室最大直径;帽罩出口接一直径为帽罩直径10 倍的圆柱体,长度大于10 倍的帽罩直径,除与帽罩相交的面积外,圆柱体的其他面均设为自由出口边界条件。在生成计算网格时,由于预燃室内部结构比较复杂,在计算域内分了若干块,每块内均采用Hex/Wedge 网格类型、使用Cooper 网格划分方式生成网格。

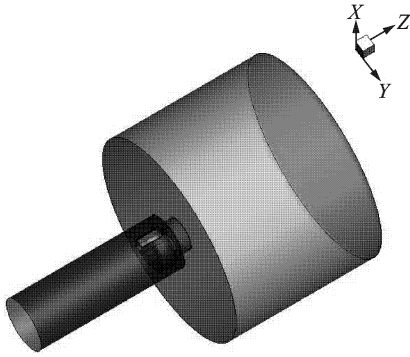


图2 计算模型

数值模拟中采用Fluent 中隐式求解器,使用 $k-\epsilon$ 紊流模型和SIMPLE 算法,各参数的离散均采用二阶迎风格式,解收敛的标准为连续方程残差不大于 $10^{-6}$ 。

进口设为压力边界条件(表压15 000 Pa),出口设为自由边界,即为环境压力。

2.2 计算结果讨论

图3给出了计算结果后处理的4个典型特征图,分别为总压分布图、过轴向切面的平面流线图、三维流线图及平面速度等值线图。

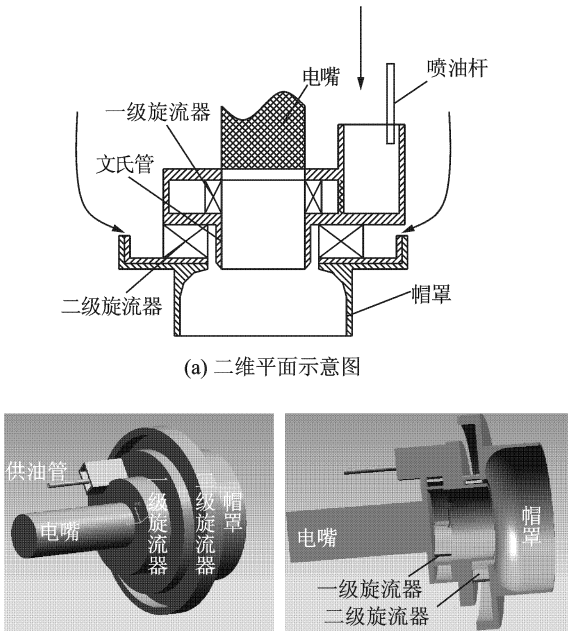
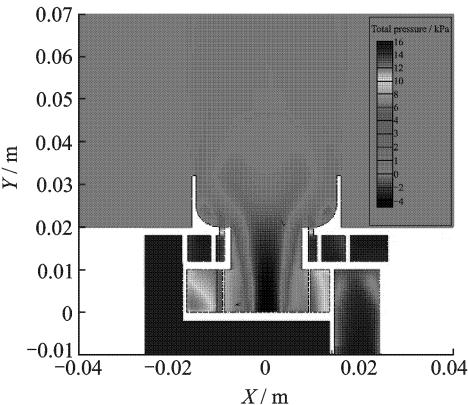
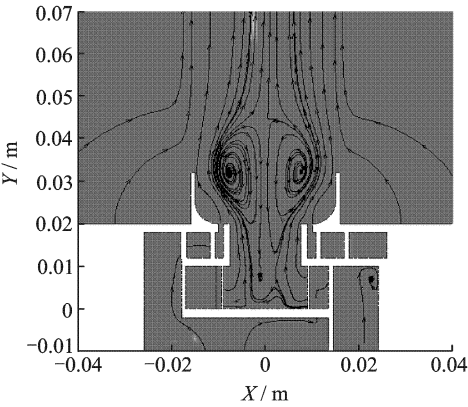


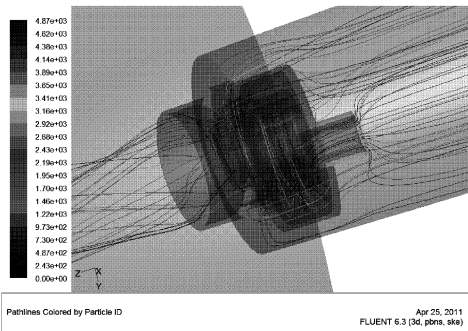
图1 预燃室结构图



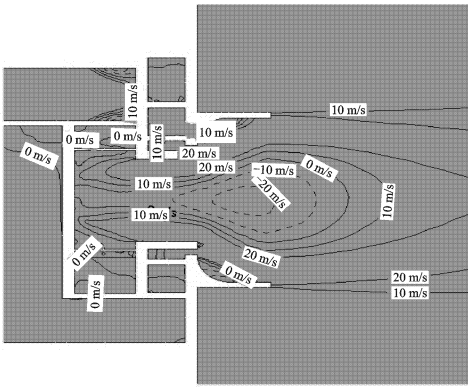
(a) 总压分布云图



(b) 平面流线图



(c) 三维流线图



(d) z向速度等值线图

图 3 数值计算结果

从图中可以看出气流流过预燃室时,气流损失比较大,这是由于轴向气流流过预燃室的一、二级

旋流通道时,首先要沿径向和切向 90°转弯(如图 3(b)和图 3(c)所示),特别是在一级旋流器内,气流在向中心运动过程中,由于通道面积逐渐变小,气流旋转速度越来越快。在流过一级旋流叶片时,通道又变为扩张型式的,从总压分布图上来看,在一级旋流器的叶背处发生了流动分离,造成总压损失;流过二级旋流器的总压损失主要集中于二级旋流器出口处,这是由于二级旋流器叶片排布间隔较大,叶片出口处的面积较大,整个二级旋流器流动通道的喉部位于出口。气流流过二级旋流叶片获得了周向旋转速度,在流向出口之前通道收缩,周向旋流速度变大,在出口处获得最大速度,由于与流过一级旋流器的气流旋转方向相反,因而两股气流在此处发生强烈的紊流交换,造成很大的流动损失,但正是由于这部分流动损失,为燃油很好地雾化提供了帮助,因而这部分流动损失是有益的。

由于流过二级旋流器的流量大于一级旋流器,气流在二级旋流器出口下游仍然具有较强的周向旋转速度,在这种周向旋转速度的剪切作用下,周围环境空气也被带动旋转,轴心会形成低压区,即形成回流区,为形成稳定点火源创造条件。

综上所述,通过数值分析气流在预燃室内的流动特征,认为流过预燃室的两级旋流器的气流既提供了满足气动雾化要求的条件,也提供了满足稳定点火的条件。

### 3 预燃室的燃油雾化及点火特性实验

#### 3.1 燃油雾化特性实验

##### 3.1.1 实验系统、方法及工况

雾化特性是通过实验测量油珠的索太尔平均直径(Sauter mean diameter, SMD)来表征的。实验系统包括供气系统、供油系统、数据测量及采集系统及预燃室等,如图 4 所示。供气系统由一台空气压缩机提供一定压力的空气,最高压力 0.7 MPa,最大流量约为 105 g/s,通过两个阀门控制供给预燃室的空气量;供油系统由一台改装的航空油泵将煤油从油箱泵入供油通路,通过两个调节阀门控制供给预燃室的供油量;空气和燃油流量通过浮子流量计测量,在测量前,燃油流量计都经过标定,空气浮子流量计的读出示数按其说明书提供的公式给予修正;使用激光粒子分析仪测量油珠的 SMD,它是采用信息光学原理,通过测量颗粒群的散射谱来分析其粒度分布,如图 5 所示。

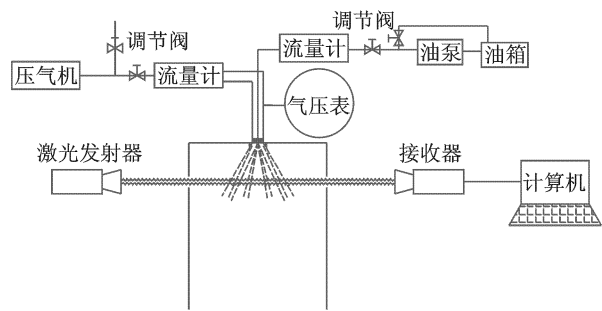


图4 粒径试验示意图

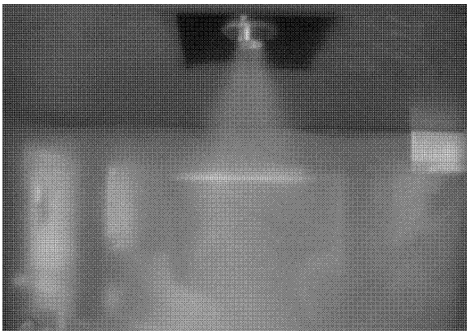


图5 实验实物照片

实验工况:实验在常温下进行,使用航空煤油,分别改变进气压力和供油量,测量不同工况下煤油滴群的SMD值。

3.1.2 实验结果讨论

图6~8表示了典型的试验曲线。由图6可知,SMD随空气量的增加先迅速减小,到一定值以后,SMD不随空气量的变化而变化;当空气量达到15 g/s后,空气雾化喷嘴下游的SMD可达10 μm以下。图7表明,SMD随燃油流量的增加而持续增加。这些实验结果与文献[6]中介绍的空气雾化喷嘴的雾化性能曲线的变化规律一致。这是由于空气雾化喷嘴主要是由气流动能作用于燃油来完成雾化的。在喷嘴内部,即文氏管内表面,油膜在湍流气动力作用下形成

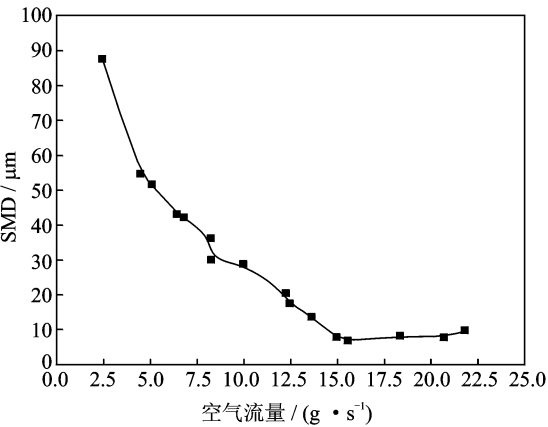


图6 SMD随供气量的变化规律(煤油流量3.428 g/s)

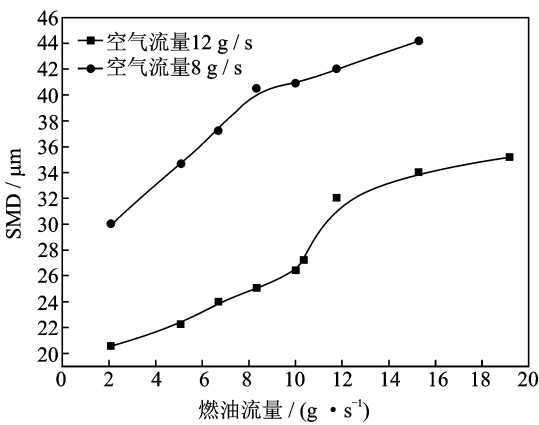


图7 SMD随供油量的变化规律

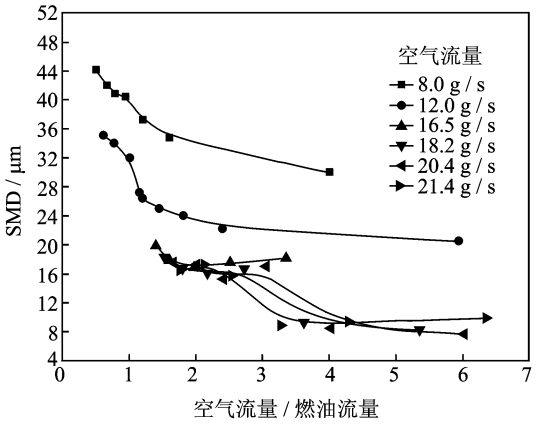


图8 SMD随空燃比的变化规律

表面波,由于湍流脉动的随机性决定了表面波波形的随机性。研究表明,组合参数 $\frac{c_a \rho_a U_a^2 x}{2 \sigma_L}$ 是一个表征气液作用程度的重要参数<sup>[7]</sup>。其中 $\frac{\rho_a U_a^2}{2}$ 是气动力, $x$ 表征了气液作用的距离(时间), $c_a$ 代表气流紊流程度,受控于喷嘴几何结构, $\sigma_L$ 代表液体反抗变形能力大小。该参数越大,液膜表面波波动越剧烈,频率越高。文献[7,8]中给出了液膜波动波谱分布对液膜破碎后的液滴尺寸及尺寸分布的对应关系。由于液膜在波谷处反抗外力变形的能力最弱,在文氏管出口处,液膜破碎首先发生在波谷间,气流速度越大,液膜的破碎距离越短,雾化的颗粒就越细。

文中,当在一定的燃油流量下,气流流量越大,气流的动能也就越大,气体与液体的相互作用越强烈,SMD的值就越小;当在空气流量一定的情况下,燃油流量增加,在文氏管表面油膜的平均厚度增加,相关试验研究表明,油膜厚度与SMD之间的关系为 $SMD = h^{0.39}$ (忽略了量纲关系)<sup>[7]</sup>。油膜厚度越厚,雾化后的颗粒越大。流过喷嘴的空气与燃油

流量比(AFL)也是决定燃油雾化效果的关键参数,图8给出了6种不同空气流量下,燃油液滴的SMD随空燃比的变化情况,总体上看,SMD随空燃比的增加而减小,当空气流量大于18.2 g/s时,空燃比大于3.5后,燃油的SMD值可小到10 μm以下,空燃比增加其实质就是增加了气动力作用,从而使气动雾化性能提高。

### 3.2 预燃室点火性能试验

#### 3.2.1 试验系统、方法及工况

点火可靠是燃烧室设计的要求之一。图9给出了本文设计的预燃室点火范围实验系统示意简图。实验系统由供气系统、供油系统、点火系统及测量系统组成。供气系统由一台罗茨风机及相应的供气管路组成,最大供气量1.5 kg/s,供气压力最大可达0.075 MPa。供油系统由油箱、油泵及相应的管路组成,最大供油压力可到5 MPa。点火采用火花塞点火,点火能量为0.5 J,点火频率50 Hz。测量系统主要是测量流过预燃室的空气和燃油流量;流入预燃室的空气流量可通过总、静压管及温度计示数计算得出;供入预燃室的燃油量通过标定过的燃油流量计直接读出。

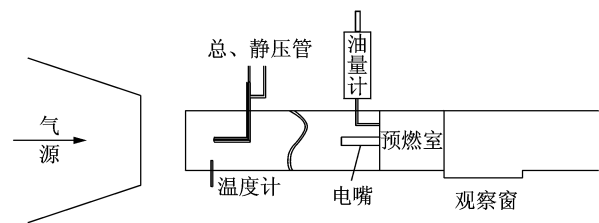


图9 点火范围实验系统示意图

实验时,调节气源压力获得一定马赫数的气流。在来流空气状态一定的情况下,测量贫油点火极限时,先令火花塞打火,然后缓慢调节燃油阀门使燃油量缓慢增加,通过观察窗观测到火焰时,记录下该状态的燃油量;测量富油点火极限时,先打开燃油阀门使燃油量约为该状态下贫油点火极限燃油量5~6倍,然后开启火花塞打火,若能迅速点着,则关闭燃油阀门、电嘴,继续增加燃油量,开启火花塞重复以上步骤,若5 s内仍然点不着火,则关闭点火电嘴、燃油阀门,将预燃室后段的燃油吹除后,开启燃油阀门减小供油量,再开启火花塞,直至点着,记录下此时的燃油量。然后进行下一来流状态的贫、富油点火极限的实验。图10给出不同来流马赫数下的点火范围。

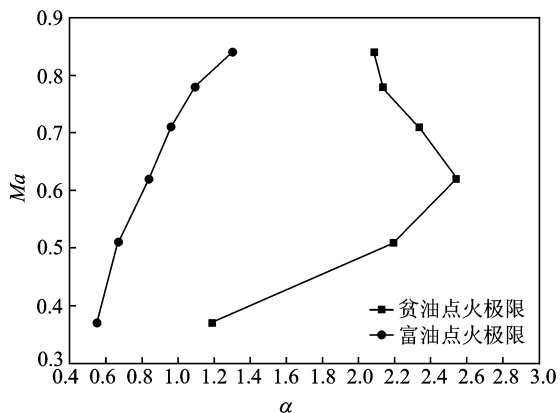


图10 不同来流马赫数时点火范围

#### 3.2.2 实验结果讨论

从图10中可以看出:随来流马赫数从0.85开始减小,点火成功范围呈扩大趋势。但当马赫数较小(小于0.62)时,随马赫数的减小,点火范围反而迅速减小。分析认为,当来流马赫数大时,对燃油的气动力雾化作用强,但不利于火焰的稳定;而当来流马赫数较小时,对燃油的气动力雾化作用减弱,但有利于火焰的稳定。当马赫数大于0.62时,气动力作用已足够大,再增加流速对雾化的改进作用不大(见图6),此时降低流速对火焰稳定有利,因此随马赫数的降低,点火范围扩大了。当马赫数低于0.62时,流过预燃室一、二级旋流器的空气流量均减少,气动力作用下降,在一级旋流出口处气动雾化变差,甚至会有离散的大油滴出现,在离心力作用下,油滴可能会打到壁面上,使得点火点附近油气比比整个混气的平均油气比偏贫,点火环境变得恶劣,为了达到电嘴附近混气点燃的油气比条件,点火极限因而会向富油方向偏转,特别是在贫油时,由于供油量很少,在气动雾化喷嘴出口形不成连续均匀的油膜,此时即使气油比很大,也得不到很好的雾化效果,油气分布很差,造成点火困难。从以上结果可看出,对于带有气动雾化喷嘴的燃烧室点火性能,速度增加,不容易建立稳定的点火源,而另一方面,速度增加使燃油雾化质量改善,有利于提高点火性能,两者的综合表现视不同的燃烧室而变化。该预燃室可在很宽的马赫数范围内实现成功点火,当马赫数为0.62时,预燃室的点火范围最宽。

## 4 结 论

(1)设计了一小型预燃室,该预燃室采用气动

雾化喷嘴和中心点火系统一体化设计,节约了空间;

(2)采用数值模拟研究手段研究了预燃室内部流动特征,数值模拟显示在双旋流气流作用下,在预燃室下游形成一对稳定的回流区,该回流区对稳定点火起到了有益作用;

(3)在双路旋流作用下,燃油能够被很好地雾化,当空燃比大于 3.5 时,油雾的 SMD 小于  $10\text{ }\mu\text{m}$ ;

(4)试验显示,该预燃室能够在马赫数为 0.37~0.84 范围内实现点火,在马赫数为 0.62 时,该预燃室的可实现点火的余气系数范围最宽为 0.62~2.55。

参考文献:

[1] 胡正义. 航空发动机设计手册[M]. 第 9 册. 北京:航空工业出版社,2000:185-217.

[2] Anthony J D. A review of PDE development for propulsion application [R]. AIAA 2007-985, 2007.

[3] Kailasnath K. Review of propulsion applications of detonation waves [J]. AIAA 2000, 38(9): 1698-1708.

[4] 范育新,王家骅,宫继双,等. 壁面蒸发器对脉冲爆震发动机工作性能的影响[J]. 航空学报,2010, 31(1): 82-87.

Fan Yuxin, Wang Jiahua, Gong Jishuang, et al. Effect of wall-evaporator on performance of pulse detonation engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010,31(1):82-87.

[5] 周兵,赵晨光,张宝诚,等. 燃气轮机空气雾化喷嘴工作特性研究及火焰筒头部数值模拟[J]. 航空发动机, 2010,36(2):55-58.

Zhou Bing, Zhao Chenguang, Zhang Baocheng, et al. Investigation of air atomizing injector characteristics for gas turbine and numerical simulation of flame tube dome[J]. Aeroengine, 2010, 36(2): 55-58.

[6] Arthur H Lefebvre. Atomization and sprays [M]. West Lafayette: Hemisphere Publishing Corporation, 1989:238-261.

[7] 甘晓华. 航空燃气轮机燃油喷嘴技术[M]. 北京:国防工业出版社,2006:73-137.

[8] 甘晓华. 空气雾化的机理和模型研究[D]. 北京:北京航空航天大学,1989:4-15.