

文章编号:1000-8055(2011)04-0822-07

离心条件下后台阶贫油熄火特性

李 林, 林宇震, 郭新华, 孙 强

(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: 利用气流通过弯管产生的离心效应来模拟高速旋转的工况, 研究高位后台阶火焰稳定器的关键几何参数对液雾燃烧贫油熄火特性的影响. 通过控制后台阶高度, 台阶板长度, 后台阶到上壁面的距离三个几何参数, 考察它们对后台阶火焰稳定器贫油熄火特性的影响. 试验得到的结果表明在离心条件下, 后台阶高度和台阶板长度对贫油熄火特性的影响较大, 随着后台阶高度和台阶板长度的增加, 贫油熄火极限降低, 范围拓宽; 而后台阶到上壁面的距离对贫油熄火特性影响很小; 对于同一个后台阶而言, 随着离心力的增加, 后台阶火焰稳定器的贫油熄火极限也降低, 熄火范围拓宽.

关 键 词: 弯曲管道; 离心力; 后台阶; 贫油熄火; 火焰稳定

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Characteristics of lean blowout limit for backward step-stabilized flame with centrifugal force effect

LI Lin, LIN Yu-zhen, GUO Xin-hua, SUN Qiang

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

Abstract: Using the centrifugal force effect of a whirl flow through a curved pipe to simulate the working conditions in the rotor combustion system, this thesis investigated the effect of the geometric parameters on lean blowout limit of spray combustion for the backward step flame holder. On the basis of a curved flow channel experiment rig, a backward step flame holder was designed with variable geometric parameters. The geometric parameters include: the height, length and distance between backward step and wall surface. The effect of these three geometric parameters on the lean blowout limit of spray combustion was investigated. Test results indicate that, the height and length have great effect on flame blowout limit. With the increase of the height and length, the lean blowout limit decreases; but the distance between backward step and wall surface has little effect on flame blowout limit. For each backward step flame holder, while centrifugal force effect increases, the flame lean blowout limit is reduced and flameout range is broadened. This research work has laid a foundation for investigation of spray combustion on the rotor combustion system.

Key words: curved pipe; centrifugal force; backward step; lean blowout limit; flame holding

收稿日期:2010-03-12; 修订日期:2010-09-21

作者简介:李林(1986—),男,四川成都人,博士生,主要从事航空发动机燃烧研究.

冲压转子发动机转子上的燃烧室,由于其内部受到强离心力场的作用,使燃烧室火焰的稳定燃烧以及传播都会受到很大的影响。在强离心效应条件下,燃油雾化和火焰传播会产生很大的变化。美国的 Lewis 等人曾对离心力对火焰传播的影响做过一些理论研究,他们发现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,其中既有体积效应也有界面效应^[1]。而美国的 Ramgen 公司以天然气和氢气为燃料,对强离心条件下的火焰稳定进行了研究^[2]。在强离心力场下,冲压转子发动机燃烧室中燃料燃烧产生的火焰会以类似“焰泡飘逸”的方式向冲压转子发动机的转子的中心处传播。而 Lapsa 等对气体燃料在高离心条件下靠后台阶稳定的湍流预混火焰进行了研究,发现在有离心力的情况下,火焰的吹熄速度增大,贫油熄火边界拓宽,如图1所示^[3]。

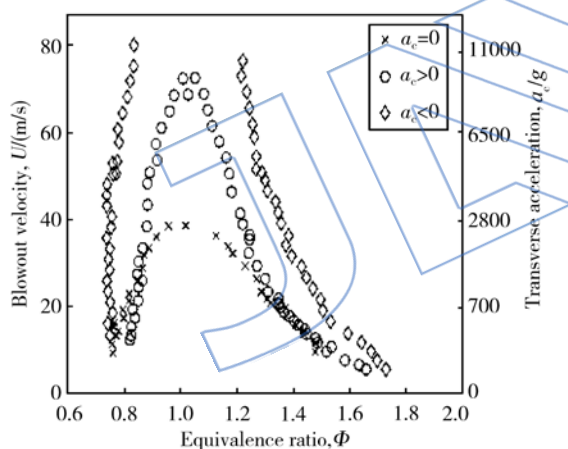


图1 离心力对火焰吹熄速度的影响

Fig.1 Centrifugal force effect on flame blowout velocity

目前,国内外对强离心条件下的液体燃料燃烧研究较少,本文对这一方向进行一些基础性的研究。

试验中利用气流通过弯管产生的离心效应来模拟高速旋转产生的离心效应,研究高位后台阶式火焰稳定器的几个关键几何参数对其两相液雾燃烧贫油熄火特性的影响。后台阶火焰稳定器的作用是依靠台阶内的驻涡回流区形成稳定点火源,将高温燃烧产物传播到新鲜来流,以点燃剪切层,并且后台阶剪切层的扩散率很重要,为了保证

较高的燃烧效率,剪切层必须要扩散到对面壁面以封闭流道^[4]。本文的具体研究方法是设计一个几何参数可调的后台阶式火焰稳定器,控制几个参数不变,只让一个参数变化,考察该参数对贫油熄火特性的影响。

1 试验系统和试验件

1.1 试验系统和试验件

整个试验系统包括气路、油路、弯管试验段、排气段以及测量记录设备。气路采用的是低压气源。油路为单油路,采用油罐和高压气瓶组合的挤压式供油。试验部分为弯管段试验段,试验件为可调式后台阶火焰稳定器。采用测试设备主要有油压表以及水排差压计,观察记录设备是摄像机。试验系统可参见图2。

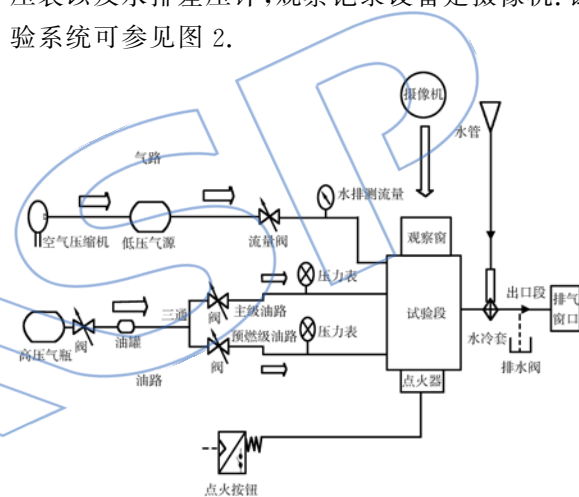


图2 试验系统图

Fig.2 Schematic diagram of test system

试验中弯管试验段采用一个相同矩形截面的弯曲通道作为燃烧室,该弯曲矩形通道为平均半径为158.5 mm的1/4圆弧段,如图3。燃烧室两侧均开置有观测窗,并装置透明耐高温石英玻璃便于观测。在燃烧室之前使用压差计测量压差,用以确定进口速度大小。

为了研究强离心条件下关键几何参数对高位后台阶火焰稳定器火焰稳定特性,本试验中设计了一个几何参数可调的后台阶式火焰稳定器,控制几个参数不变,只让一个参数变化,考察该参数对贫油熄火特性的影响。三个几何参数如图4所示:后台阶高度 H ,后台阶到上壁面的距离 h ,台阶板长度 L 。

这种可拆分的设计是靠更换不同尺寸的部件来调整后台阶的关键几何参数 H , h , L 的。头部的高度,底座和中座的宽度是综合考虑弯管试验

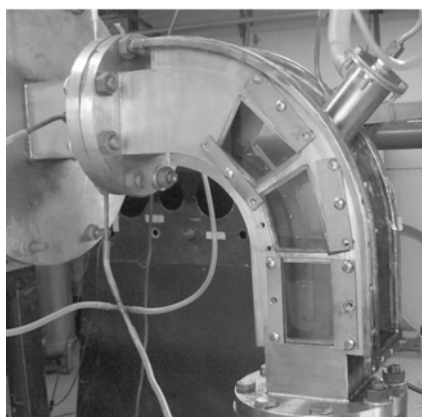


图3 弯管试验段

Fig. 3 Test section of curved channel

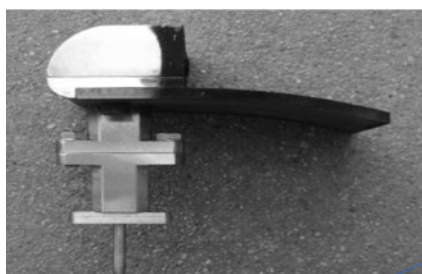


图4 后台阶关键几何参数示意图

Fig. 4 Schematic diagram of key parameters of backward step flame holder

台的尺寸,螺钉螺栓的安装,以及阻塞比要保持在0.4左右等诸多条件确定下来的^[5-6].而台阶板长度则定为后台阶基准型号GH-0的头部高度(20 mm)的2,3,4,5倍,进而来考察离心条件下台阶长度对贫油特性的影响.图5是一些可供替换的部件.

试验针对用到的流量数为7.75 L/h(2.0 gal(美)/h)的丹佛斯离心喷嘴进行了标定,喷嘴的喷雾张角为60°.喷嘴的流量 $\dot{m}_f$ 与压力差 Δp 存在这样的变化规律 $\dot{m}_f = K\Delta p^{0.5}$.可以把 $\dot{m}_f$ 和 $\Delta p^{0.5}$ 看成是线性变化的,把通过试验得出的数据

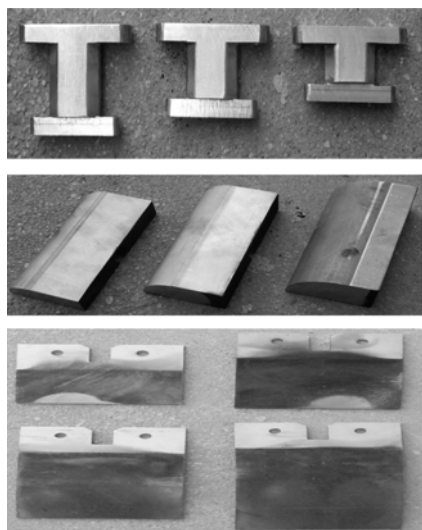


图5 后台阶可更换部件

Fig. 5 Replaceable parts for backward step

拟合得出K值,此后在使用此喷嘴时只要测出压力差就可以求出油的流量了.本试验中离心喷嘴流量系数 $K=6.33453$.

1.2 试验条件和方案

试验在常温常压下进行,设计进口空气流速范围为10~70 m/s.燃烧室内气流由低压气源提供,并且通过进气阀调整进气量大小从而改变进口气流速度.实际操作时先调节气量,使得进口空气流速达到试验条件,然后供油,待喷嘴雾化稳定之后,通过点火器点火,并记录下点火成功和失败的点.随后调整油路阀门减小供油量,观测油压表示值,在熄火点记录此时油压.完成一组试验后调整空气流量,重复以上操作,并记录下一工况的贫油熄火油压值.

试验考察后台阶高度 H ,后台阶到上壁面的距离 h ,台阶板长度 L ,三个参数.试验中适当组合,保持其中2个参数的值不变,改变另一个参数进行不同空气流速下的贫油熄火特性试验,观察该特征参数对贫油熄火特性的影响,得到规律性结论.具体方案见表1~表3.

表1 后台阶高度 H 影响的试验方案

Table 1 Test scheme considering step height effect

后台阶 型号	后台阶高度 H/mm	后台阶到上壁面 的距离 h/mm	台阶板长度 L/mm
GH-0	20	15	57
GH-H1	15	15	57
GH-H2	25	15	57

表2 后台阶到上壁面的距离 h 影响的试验方案

Table 2 Test scheme considering effect of the distance between step and upper wall

后台阶 型号	后台阶高度 H/mm	后台阶到上壁面 的距离 h/mm	台阶板长度 L/mm
GH-0	20	15	57
GH-h1	20	10	57
GH-h2	20	20	57

表3 台阶板长度 L 影响的试验方案

Table 3 Test scheme considering effect of length of the curved board

后台阶 型号	后台阶高度 H/mm	台阶到上壁面 的距离 h/mm	台阶板长度 L/mm
GH-0	20	15	57
GH-L1	20	15	38
GH-L2	20	15	76
GH-L3	20	15	95

2 流量的数值计算

本试验的重点是测量高位后台阶式火焰稳定器试验件的贫油熄火当量比,以得到其贫油熄火特性曲线。而想知道贫油熄火当量比就必须知道每个试验件在各个空气流速下的回流量。但是,由于本文研究的是强离心条件下高位后台阶式火焰稳定器的火焰稳定特性,国内外可以借鉴的经验较少,很难找到一个可靠的经验公式,所以本文采用数值模拟的方法来计算强离心条件下高位后台阶式火焰稳定器的回流量。

在各种文献中,对燃烧室进行冷态和热态数值模拟的文献不少。近年,普惠公司使用 Allstar 计算了燃烧室 PW4098, PW6000 的冷态流场,热态流场,以及预测出口温度分布,计算结果表明燃烧室的数值模拟完全可以作为燃烧室设计的辅助工具之一^[7-8]。

2.1 模型简化

在本文中,利用 Fluent 6.3.26 进行冷态的数值模拟只是为了计算离心效应下的后台阶试验件回流量,为计算贫油熄火时的当量比提供条件。在这里对试验件进行的一些简化是去掉了喷嘴和螺栓的连接装置^[9]。如图6所示。

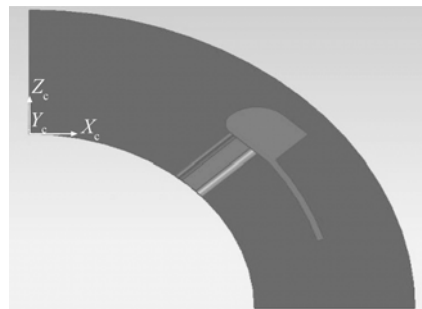


图6 计算简化模型

Fig. 6 Simplified model for simulation

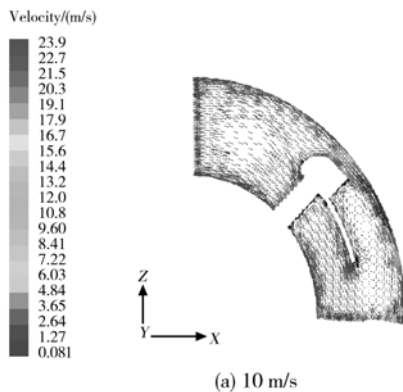
本文计算时采用非结构化的四面体网格,对后台阶处等关键区域网格进行加密,网格数在30万左右,画网格的程序选用 Ansys 11 的 Ansys icem cfd. 使用 $k-\epsilon$ 湍流模型计算,进口设置为质量流量进口,出口设置为压力出口,常温、常压。选取通过回流区涡心的截面(旋涡中间的核心,气体大体绕它旋转,核心中点的速度为零,称之为涡)进行面积分用以计算回流量,回流量计算公式为^[9]

$$\phi = \frac{1}{2} \rho \left(\int |\mathbf{v} \cdot \mathbf{ds}| - \mathbf{v} \cdot \mathbf{ds} \right) \quad (1)$$

其中 ϕ 为回流量, $\mathbf{v}$ 为当地气流速度, $\mathbf{s}$ 为回流区涡心截面,本文中的回流量的计算是通过数值模拟的结果进行后处理,选取了通过涡心的截面后,将公式(1)编写为 Fluent 后处理中的用户自定义函数,然后对该截面进行面积分,从而得到回流量的值。

2.2 计算结果

由于后台阶有多个型号,对每个型号的后台阶都考虑进口空气流速为 10, 20, 30, 40, 50, 60 m/s 六个工况点,看回流量在总流量中所占的比例。利用上面的公式(1)对回流区中心截面进行面积分。图7是不同空气流速下基准型号后台阶的中间截面速度矢量图。



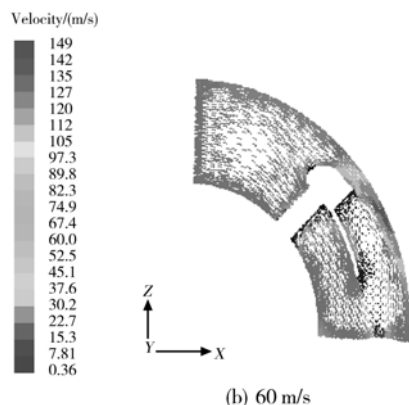


图7 空气流速为10 m/s和60 m/s时中间截面速度矢量图

Fig. 7 Velocity vector profile of the midsection velocity magnitudes at 10 m/s and 60 m/s

表4是该型号后台阶在不同空气流速下回流量占总流量的比例.通过分析表4数据可知:回流比例的平均值为4.57%,最大变化量为1.1%,可认为回流量占总的空气流量的比例与进口空气流速关系很小.所以在后面计算不同型号的后台阶时均选取进口流速为30 m/s,不同型号的后台阶回流量百分比计算结果如表5所示.

表4 GH-0不同风速下的回流量比例
Table 4 Recirculation flux ratios of GH-0 under different inlet velocities

空气流速/(m/s)	10	20	30	40	50	60
回流量比例/%	4.55	4.55	4.55	4.58	4.62	4.55

表5 各试验件回流量比例
Table 5 Recirculation flux ratios of different testing parts

后台阶型号	回流量比例/%
GH-0	4.55
GH-H1	3.03
GH-H2	5.41
GH-h1	4.38
GH-h2	4.18
GH-L1	3.89
GH-L2	5.00
GH-L3	4.71

定义无量纲特征尺寸,将所有尺寸都除以GH-0的头部尺寸(20 mm).无量纲后台阶高度为 H_w ,无量纲台阶板长度为 L_w ,无量纲后台阶到上壁面距离为 h_w .根据表5的结果,可以看出 H_w 对回流量影响明显, H_w 从0.75增大到1.25,回流比例由3.03%增大到了5.41%,变化量高达78.5%. L_w 对回流量的影响也很明显,回流量随 L_w 的增大明显增大. L_w 由2增大到4,回流量由3.89%增大到5.00%,增量为28.5%.而 h_w 对回流量的影响很小, h_w 由0.5变化到1的过程中,回流比例由4.38%变为4.18%,改变量为4.6%.

3 试验结果

在数据处理中需要用到的一些概念有,离心加速度系数: $G = \frac{v^2}{Rg}$ (取管道平均半径 $R=0.1585$ m, v 为进口空气流速, g 为重力加速度),贫油熄火油气比为燃油流量与回流空气量之比^[11-12].定义无量纲特征尺寸,将所有尺寸都除以GH-0的头部尺寸(20 mm).无量纲后台阶高度为 H_w ,无量纲台阶板长度为 L_w ,无量纲后台阶到上壁面距离为 h_w .

3.1 后台阶参数对贫油熄火特性的影响

本试验中不同台阶板长度的后台阶式火焰稳定器贫油特性结果可参见图8,无量纲化的后台阶特征尺寸 L_w 为横坐标,回流部分当量比 Φ_{we} 为纵坐标.

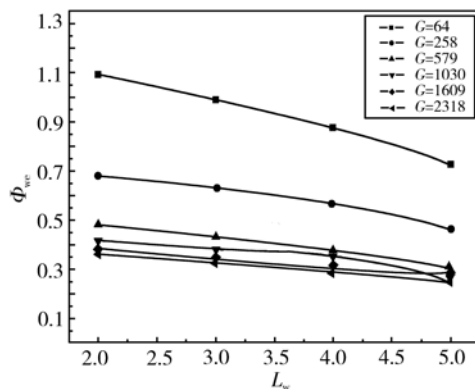


图8 台阶板长度对贫油熄火特性的影响

Fig. 8 Step length effect on flame lean blowout limit

可以看出,在相同的离心加速度系数下,贫油熄火极限是随着台阶板长度增大而降低的.而从回流量数值模拟结果来看,随着台阶板长度的增

加,回流量增大,表5中回流量虽然不是单调增加,但是随着台阶板长度的增加,后台阶形成的低速回流区的面积更大,更为完整。(如图9所示)从而使燃烧更稳定。可以看出,足够长度的台阶板,使整个低速回流区面积更大,这样才更有利于火焰稳定。

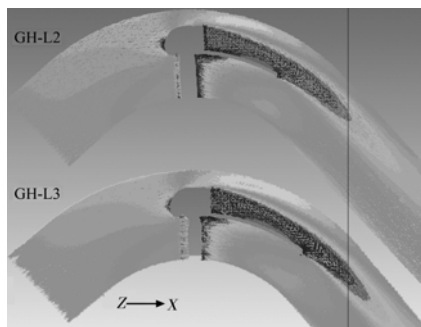


图9 GH-L2和GH-L3的回流区面积比较
Fig. 9 Comparison of recirculation zone area between GH-L2 and GH-L3

再比较不同头部尺寸的后台阶式火焰稳定器贫油特性,见图10。以无量纲化的后台阶特征尺寸 H_w 为横坐标,贫油熄火当量比 Φ_{we} 为纵坐标。

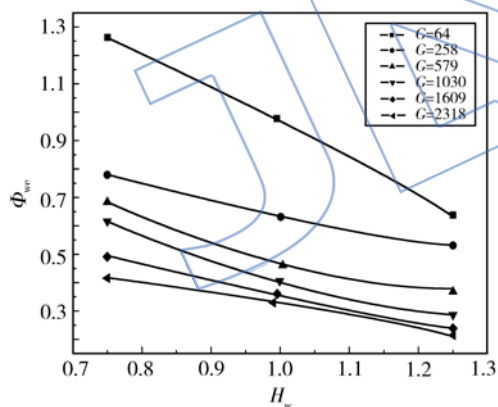


图10 后台阶高度对贫油熄火特性的影响
Fig. 10 Step height effect on flame lean blowout limit

随着后台阶高度 H_w 的增大,高位后台阶的贫油熄火特性明显变好。在相同的空气流速下,增大后台阶高度可以增加回流量,这是前面的数值模拟中得到的结果。 H_w 从0.75增大到1.25,回流比例由3.03%增大到了5.41%。由图10可以看出在离心加速度系数不变的情况下,充分说明了增大后台阶高度可以改善燃烧的稳定性,使得燃烧变得相对来说更加稳定,但是同样要考虑到阻塞比也随之增大。后台阶高度是影响后台阶式火焰稳定器贫油熄火特性的重要因素。图11是后

台阶到上壁面距离 h_w 对贫油熄火特性的影响。

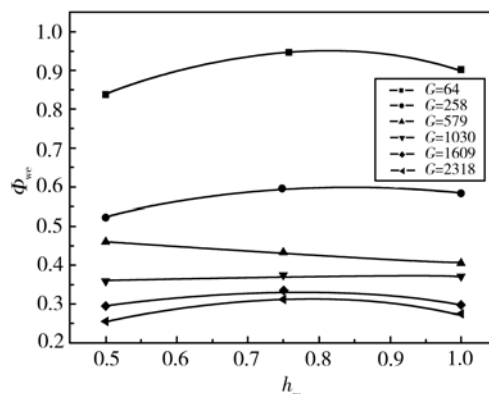


图11 参数 h_w 对贫油熄火特性影响
Fig. 11 Effect of parameter h_w on flame lean blowout limit

由图11曲线可以看出,与前两组试验相比,后台阶到上壁面距离变化,贫油熄火当量比变化较小。这主要是由于后台阶高度和台阶板长度没有变化导致了后台阶上的回流区变化不是很明显,回流量没有明显的变化。这一点也可以从前面的数值模拟中得到印证。数值计算 h_w 由0.5变化到1.0的过程中,回流量比例由4.38%变为4.18%,改变量为4.6%,回流量比例变化很小。所以,可以认为后台阶到上壁面距离对后台阶式火焰稳定器的贫油熄火特性影响很小。

3.2 离心效应对贫油熄火特性的影响

从图8~图11中,观察在不同离心加速度系数下的各曲线可知,对于同一型号的后台阶,其贫油熄火当量比随离心加速度系数的增大而减小。特别是离心加速度系数为64,258两条线之间的差异很大,而当离心加速度增加到一定程度后下降的趋势变小。这是因为离心效应对燃烧的影响只有当离心力系数大到一定的数值的时候才会产生显著的作用。美国Lewis的早期研究结论也有相似的结果,对于丙烷与空气的预混燃气,小于200g的离心加速度对火焰传播影响不大,主要还是以湍流火焰的传播方式。当离心加速度超过200g后,离心力对火焰传播速度有明显影响。

当离心力大到一定的程度后,离心力的增大虽然对整个燃烧区域的密度梯度、掺混过程以及火焰传播速度都会有显著影响,但是针对贫油熄火这一现象来说,其贫油熄火的当量比不会有太大的下降。因为要想维持燃烧,反应放出的热量必须大于热量耗散,当量比的下降会直接导致反应

放热的减少,进而导致熄火.所以离心力增大到一定程度后,贫油熄火当量比基本不再减少,如图12所示.

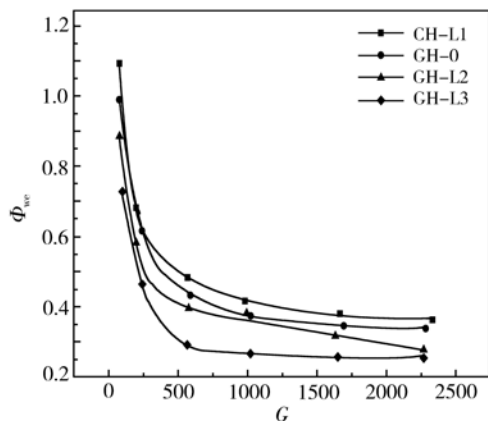


图12 随离心力增大贫油熄火当量比变化趋势

Fig. 12 Change trend of lean blowout equivalence ratio with centrifugal force effect increased

本文试验研究表明气流通过弯管时产生的离心效应拓宽了贫油熄火边界.这是因为强烈的离心效应作用在火焰上,使得密度大的反应物和密度低的生成物的分界面上的大规模的突变从本质上变得不可能.这产生了一个稳定作用,抑制反应物和产物分界面上湍流引起的畸变.这样便阻止了能导致熄火的火焰大规模畸变的形成,从而拓宽了后台阶式火焰稳定器的贫油熄火边界^[3].

本文只是对离心力条件下不同关键几何参数的后台阶式火焰稳定器进行了基础性的研究,而对于强离心力对贫油熄火影响的程度没有进行深入研究,所以还需要对有无强离心力对于后台阶贫油熄火特性的影响规律进行深入研究.

4 结 论

本文主要考查了强离心力条件下不同几何尺寸的后台阶式火焰稳定器对于两相液雾燃烧的贫油熄火特性的影响规律,通过试验和数值模拟可以得出在离心力条件下后台阶高度和台阶板长度对于贫油熄火特性有着很明显的影

参考文献:

- [1] Lewis G D, Smith C E. Investigation of centrifugal force and Reynolds number effects on combustion processes [R]. F44620-73C-0061, 1975.
- [2] Ramgen Power Systems. Development and testing of a pre-prototype Mach 2 Ramgen engine final report [R]. DE-FC26-00NT40915, DOE, 2001.
- [3] 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.
- [4] 汪志强. 弯曲燃烧室强离心力条件下的火焰稳定研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2007.
WANG Zhiqiang. Research on flame-holding in a curved combustor under high centrifugal force conditions [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [5] Lefebvre A H. Gas turbine combustion [M]. 2nd ed. Philadelphia, PA: Taylor & Francis, 1999.
- [6] Mellor M. Design of modern gas turbine combustors [M]. New York: Academic Press, 1990.
- [7] Malecki R E, Rhie C M. Application of an advanced CFD-based analysis system to the PW6000 combustor to optimize exit temperature distribution Part I: description and validation of the analysis tool [R]. ASME Paper 2001-GT-0062, 2001.
- [8] Sivaramakrishna G, Muthuveerappan N, Shankar V. CFD modeling of the aero gas turbine combustor [R]. ASME Paper 2001-GT-0064, 2001.
- [9] 王小华, 樊洪明, 何钟怡. 后台阶流动的数值模拟 [J]. 计算力学学报, 2003, 20 (3): 361-365.
WANG Xiaohua, FAN Hongming, HE Zhongyi. Numerical simulation of backward facing step flow [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2003, 20 (3): 361-365. (in Chinese)
- [10] 安帅, 林宇震, 张弛, 等. 离心力场下 V 型火焰稳定器火焰稳定性的研究 [J]. 航空动力学报, 2009, 24 (5): 1011-1015.
AN Shuai, LIN Yuzhen, ZHANG Chi, et al. Characterization of flame stabilization for V-gutter in centrifugal force field [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24 (5): 1011-1015. (in Chinese)
- [11] 郭新华, 林宇震, 刘高恩, 等. 旋转燃烧准则数的确定 [C]// 中国航空学会第十四届燃烧与传热传质学术交流会. 沈阳: 中国航空学会, 2007: 444-451.
- [12] 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.