

多孔介质钝体火焰稳定特性实验研究

许胜, 刘明侯, 徐侃, 陆游

(中国科学技术大学热科学和能源工程系, 安徽合肥 230027)

摘要:提出采用多孔介质材料制作火焰稳定器, 利用其通透和弥散性能改善钝体后燃空比, 降低钝体引起的压力损失, 提高火焰稳定性. 通过实心钝体、10 和 40PPI(pores per inch)多孔介质钝体火焰稳定特性和冷态尾迹测量对比实验发现: 多孔介质火焰稳定器可获得更宽的火焰稳定范围; 相同燃料和空气伴流条件下, 多孔介质钝体后火焰刚性更强, 燃烧更充分; 实心钝体回流区较靠近钝体, 回流区强度较强; 多孔介质钝体回流区向下游发展, 回流区强度较弱, 但空气燃料混合更好. 因此多孔介质稳定器关键是要确定合适的孔径, 使火焰更稳定燃烧.

关键词: 多孔介质; 火焰稳定器; 熄火极限

中图分类号: TK16 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2011.05.011

Experimental study on flame stability characteristics of porous medium bluff-bodies

XU Sheng, LIU Minghou, XU Kan, LU You

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of science and technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Porous media were investigated for the preparation of flame holders, for porous media's permeability and dispersivity can bring down pressure loss and improve the ratio of fuel and air after the bluff-bodies. Based on the comparative trials of a solid bluff-body and another two with 10PPI (pores per inch) and 40PPI, respectively, it was found that the porous media flame holder can have a wider range of flame stability. Under the same fuel and air co-flow conditions, a porous medium makes burning more complete, and the flame more rigid. The recirculation zone of a solid bluff-body is closer to the bluff-body and the back flow intensity is stronger than that of a body made of porous media. Hence, considering the pressure loss and the effects of fuel and air mixing, an appropriate diameter of porous media is the key to stabilizing flames.

Key words: porous medium; flame holder; extinction limits

0 引言

在航空涡轮及火箭冲压发动机、回转窑等燃烧室中, 由于来流空气速度较大, 导致火焰不稳定, 因

此在实际过程中常常采用火焰稳定器技术提高燃烧室稳定性. 良好的火焰稳定器设计不仅需要满足提高火焰稳定性和燃烧效率的要求, 还需要充分考虑燃料与氧化剂混合效果、流动损失等因素. 典型的 V

收稿日期: 2011-02-25; 修回日期: 2011-05-03

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(50936005)资助.

作者简介: 许胜, 男, 1986年生, 硕士. 研究方向: 多孔介质火焰稳定. E-mail: xusheng@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 刘明侯, 博士/教授. E-mail: mhliu@ustc.edu.cn

型火焰稳定器,由于其结构简单而在工程实际中得到很多应用.其稳定机理在于当流体流经 V 形钝体后,产生附面层分离,因黏性而产生尾迹旋涡,形成回流区.已燃高温的燃烧产物产生回流运动(即与来流方向相反)作为具有自动补偿能力的持续点火源,不断点燃新鲜未燃的可燃混合物,从而达到稳定火焰的目的.然而大量研究表明,V 型火焰稳定器火焰稳定边界相对较窄,燃烧效率不高,火焰稳定性较差.在航空发动机中会使耗油率提高,更可怕的是容易出现振荡燃烧,严重危及飞行安全.

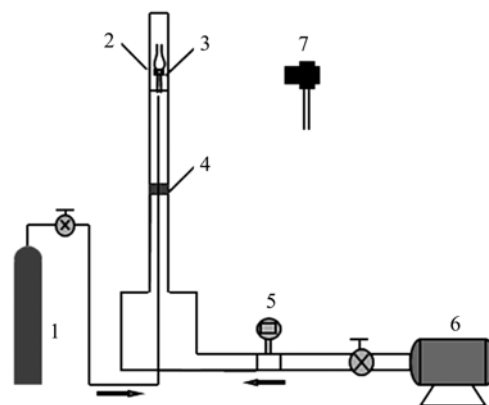
为了改善 V 型稳定器的性能,国内外早期研究大部分工作都集中在回流区流场结构的改进上.1981 年高歌^[1]研制成功了沙丘驻涡火焰稳定器,使燃烧的稳定范围提高,在降低燃油消耗的同时,增大发动机推力,可谓一举多得.Wang^[2]于 1985 年提出在 V 型稳定器的尾部喷出一些气体,可以减少压力损失.钱壬章等^[3]于 1991 年提出将少量粉气由钝体的中心缝隙送入回流区,在高温低速的环境首先着火、再点燃主流的分级着火机制,已广泛应用在提高劣质煤粉和低品质煤气燃烧强度和火焰稳定上.此后杜一庆等^[4]于 2004 年对这种中间开缝 V 型钝体火焰稳定器进行了系统研究.Esquivia 等^[5]于 2001 年提出用郁金香状的火焰稳定器代替平板火焰稳定器,实验研究发现郁金香状结构回流区更加稳定,有利于提高火焰的稳定性,且“层流环形火焰”区的速度范围更大.Yahagi 等^[6]于 2007 年提出在微小燃烧器内加入一块带有均匀小圆孔的挡板.实验表明在低雷诺数下,该挡板有利于气体形成涡旋结构,且在湍流预混火焰模型内产生的流动循环区域有效地提高了燃气混合,使腔内燃烧紧凑.而稳定器的结构形式如吸入式火焰稳定器、驻涡式火焰稳定器、双 V 火焰稳定器、蒸发式火焰稳定器等也受到许多研究者关注.杨茂林等^[7]提出了尾缘吹气火焰稳定器,该稳定器的前部为 U 形壳体,后部为大顶角 V 形,尾缘形成吹气窄缝,前后部形成内腔为混合室,其前端有供气、供油管,上面开多个吹气孔,组成气动雾化喷油装置.试验结果表明由于尾缘吹气作用,回流区变宽,回流量、燃烧性能等都有很大提高.金莉等^[8]对上述几种火焰稳定器的结构特点、流场特征和应用情况进行了比较,总结了各种稳定器的使用范围.从上述研究发现,提高回流区稳定性、减少流阻、调节钝体后空燃比等是提高火焰稳定器性能的关键.

本文提出采用多孔介质材料制作火焰稳定器.

它的大比热容有蓄热作用,相当于固定的高温源,有利于稳定火焰;比表面积较大,有利于气体和固体之间充分热交换,使得燃烧温度分布相对均匀,提高燃烧稳定性^[9].与实心钝体火焰稳定器相比,用多孔介质设计火焰稳定器可以降低流动的阻塞比,减小总压损失;另外,多孔介质的弥散作用和旋涡结构能增强燃料空气的混合,使得回流、主流、预混流三者不同速度、温度和成分的气流可以进行热量、动量和质量的交换,提高火焰稳定性.

1 实验装置

图 1 为丙烷与空气扩散燃烧实验装置示意图.多孔介质置于燃料喷嘴上方,燃料管的内径 5 mm,壁厚 1.5 mm,长度为 1 m.空气伴流管道内径 60 mm,长度 600 mm.石英玻璃管内径为 60 mm,壁厚 2 mm,高度为 600 mm.实验选用三种钝体材料,两组 SiC 材料做成的多孔介质孔钝体,其孔密度分别为 10PPI,40PPI,及一个铜制实心钝体圆盘.其中 10PPI 和 40PPI 多孔介质表述的是每英寸长度范围所包含的孔数(pores per inch).40PPI 多孔介质平均孔径为 0.64 mm,10PPI 多孔介质平均孔径为 2.56 mm.从图 2 可以直观看出,10PPI 多孔介质孔径较 40PPI 大,而后者孔密度大.实验中不同材料钝体结构外形尺寸相同,即均为圆板钝体结构,且端面直径为 40 mm,高度为 8 mm.燃料管与钝体材料几何布置如图 3 所示.实验时,空气压机抽入空气通过涡轮流量计(流量范围:5~100 m³/h,精度等级:±1.5%)进入燃烧室与丙烷燃料进行扩散燃烧.



1 丙烷 2 石英玻璃罩 3 钝体 4 空气整流器
5 涡轮流量计 6 空气压机 7 CCD 照相机

图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental devices

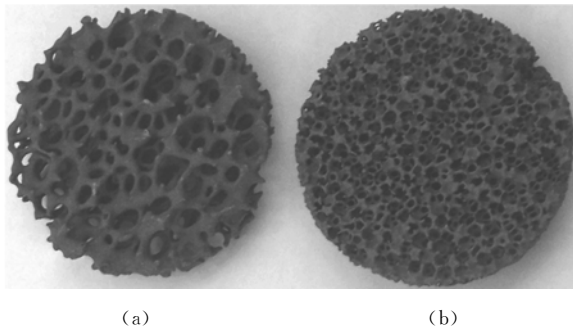


图 2 10PPI 多孔介质(a)和 40PPI 多孔介质(b)

Fig. 2 10PPI Porous media (a) and 40PPI Porous media (b)

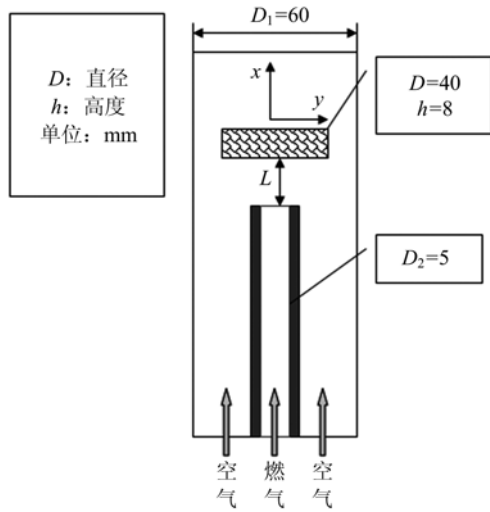


图 3 钝体位置

Fig. 3 Bluff body's position

本实验通过多孔介质与实心钝体火焰对比,分析多孔介质火焰稳定器对钝体冷态尾迹流场结构、火焰温度场和熄火极限等参数的影响,探索采用多孔介质火焰稳定器提高火焰稳定性的可行性。

2 钝体流场尾迹、温度场以及稳定性测试

2.1 钝体尾迹

为初步了解多孔介质钝体与实心钝体尾迹区别,本文首先用热线对各自尾迹的冷态流场进行测试比较.实验采用热线为直径 $5 \mu\text{m}$ wollaston (PT10%RH) 热丝,其速度敏感长度 1 mm ,电阻 5.2Ω ,在恒温工作模式下,热线工作电阻 R_w 与环境温度下电阻 R_0 比值为 1.8 .热线信号经过放大、平移,通过 16 通道 A/D(12 位)板进入计算机.采样频率 3.5 kHz ,采样时间 10 s .实验前,对热线进行速度-电压标定.测试时分别测试 $x/D=1.5, 2.5$ 和

4.5 三个截面流向和径向雷诺正应力分布.另外,为了研究回流区大小和回流强度,还测试了不同火焰稳定器在不同工况下流向速度沿径向分布.其中 x 为距离钝体下表面距离, y 为以多孔介质中心为原点的横坐标(如图 3 所示)。

图 4 和图 5 给出了雷诺数 $Re=8000$ 时,不同钝体轴向平均速度 U/U_∞ 及雷诺正应力 $\overline{u^2}/U_\infty^2$ 在不同截面沿径向的分布.从图 4 发现,多孔介质钝体后 $x/D=1.5$ 处,轴向速度在 $y/D=\pm 0.15$ 范围内依然小于 0 .这说明该处多孔介质钝体尾迹依然有回流区存在,而实心钝体回流区已结束.比较相同 x/D 处实心钝体和多孔介质尾迹,发现实心钝体的流向平均速度的梯度大于多孔介质,由于强的剪切作用,该位置对应的流向雷诺正应力(速度脉动)也大

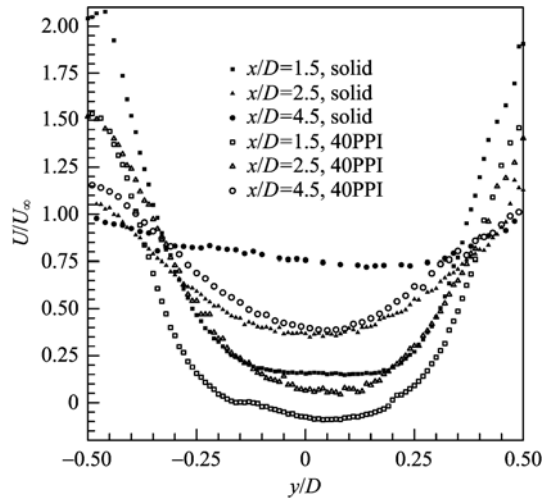


图 4 轴向平均速度沿径向分布

Fig. 4 Radial distribution of axial mean velocity

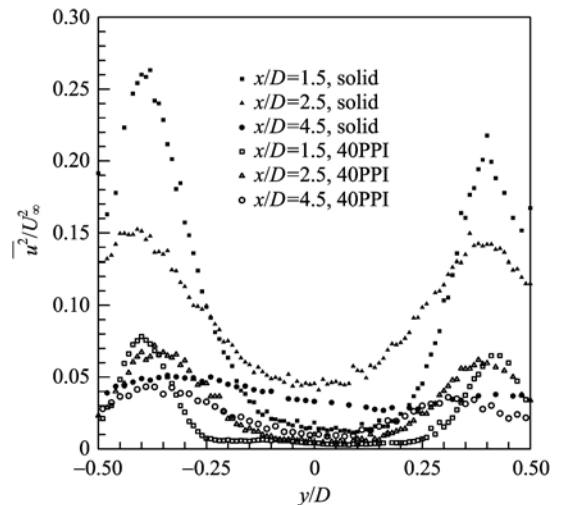


图 5 轴向雷诺正应力随径向分布

Fig. 5 Radial distribution of axial Reynolds normal stress

(如图 5 所示). 在我们检测的 y/D 范围内, 平均速度和雷诺正应力都呈现马鞍形分布, 且随着 y/D 的增大, 最大值减小. 图 6 给出了不同 x/D 处径向雷诺正应力 $\overline{v^2}/U_\infty^2$ 分布. 从该图可以发现, 当 x/D 处于回流区(多孔介质 $x/D=1.5$)和接近回流区(实心钝体 $x/D=1.5$)时, 径向雷诺正应力呈现马鞍形分布. 对于实心钝体, 由于回流强度较大, 径向速度脉动值较大, 但其最大值随着 x/D 衰减较快. 多孔介质由于其渗透性, 回流区回流强度较小, 径向脉动速度因而也较小. 当 $x/D=2.5$ 时, 实心钝体和多孔介质的径向脉动速度呈现单峰性. 当 $x/D=4.5$ 时, 两种钝体尾迹的径向速度脉动都较弱. 这与多孔介质孔密度有很大关联. 考虑到多孔介质能延长燃料空气混合时间, 提高燃料空气混合度, 因此关键是确定合适孔径的多孔介质, 可以同时兼顾回流

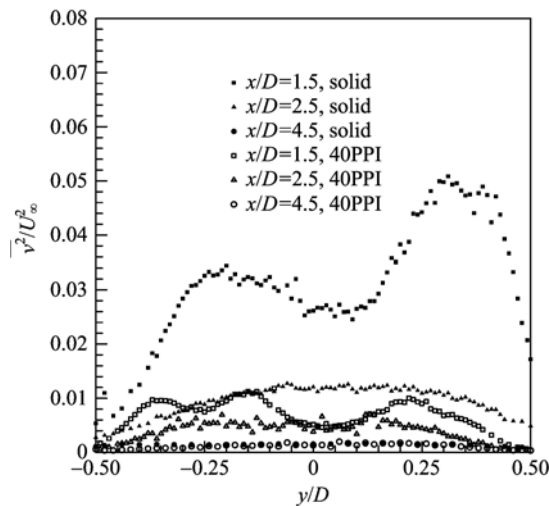


图 6 径向雷诺正应力沿径向分布

Fig. 6 Radial distribution of radial Reynolds stress

区的强度和多孔介质通透与弥散性特点, 提高火焰稳定性. 由于钝体或多孔介质钝体堵塞比较大, 并且很难保障将其放置在管道正中间, 另外多孔介质本身孔径不均匀等导致尾迹中接近钝体处雷诺正应力不对称, 但不影响实心钝体与多孔介质两者尾迹主要特征比较.

2.2 火焰温度场测量

为了研究相同工况下不同钝体火焰稳定性, 实验中采用德国 BASLER A601fc-2 CCD 成像仪(感应器尺寸: 656×490 , 帧频: 60 fps), 配备日本 COMPUTAR MLM3X-MP 镜头, 对不同工况火焰成像. 通过拍摄的图像(图 7)可以定性看出火焰图像. 火焰所发射的辐射能量大小取决于两个主要因素, 即火焰温度和火焰的发射率. 如果要把火焰图像进行火焰温度量化, 就要对图像数据作特殊处理. 本文中, 通过读取图像颜色值数据, 采用热电偶标定对应空间颜色值所对应的温度, 经处理后颜色值分布转化成为温度分布, 绘制成云图, 从而可以定量测量火焰温度分布. 数据处理过程中, 假定: ①火焰的发射率为定值; ②亮度与温度呈线性关系. 具体温度测量与标定方法参见课题组早期研究文献 [10-11].

实验在相同工况下 ($V_f = 2.4 \text{ m/s}$, $V_a = 4.0 \text{ m/s}$, 燃料出口距离钝体距离 $L = 15 \text{ mm}$) 分别对三种钝体燃烧温度场进行测量. 为了能够更加准确地捕捉温度分布云图, 实验采用多次成像取平均的方法进行处理. 实验时对火焰进行 10 次成像, 然后取平均值, 绘制的图像如图 8.

从图 8 发现, 实心钝体和多孔介质钝体火焰结构有较大区别. 实心钝体高温区域紧连钝体, 而多孔

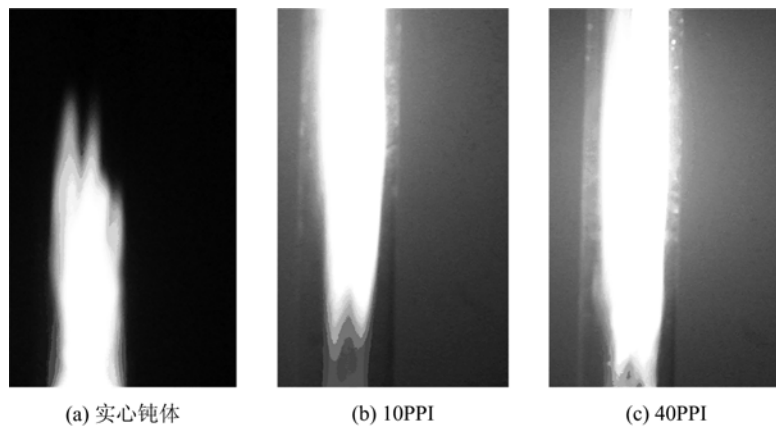


图 7 三种钝体火焰结构

Fig. 7 Flame structures of three types of bluff body

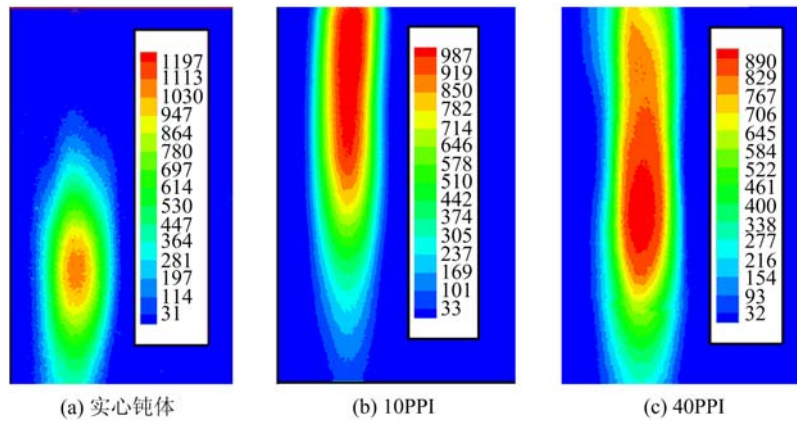


图8 三种钝体对应火焰温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of three types of bluff body

介质高温区在下游位置,且随着孔径的增大,高温区域向更下游发展.实心钝体尾迹中火焰最高平均温度大于 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$,而10PPI和40PPI多孔介质最高温度分别为 $987\ ^\circ\text{C}$ 和 $890\ ^\circ\text{C}$.这表明,在较小空气伴流速度时,实心钝体由于堵塞作用使回流区边缘形成较强剪切,导致燃料与空气局部混合优于多孔介质,燃烧更充分,温度较高.但是当空气伴流速度较大时,由于实心钝体的堵塞作用可能会导致混合区强应变率,较多孔介质钝体而言更容易熄火.为此,我们实验比较三种钝体燃烧稳定特性.

2.3 火焰稳定

实验中通过如下两种情况研究火焰静力学稳定性:①空气伴流速度不变,逐渐增加燃料速度(图9);②燃料速度保持恒定,改变空气伴流速度(图10).

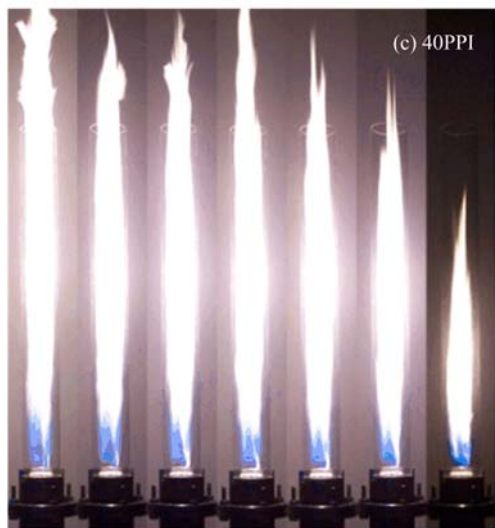
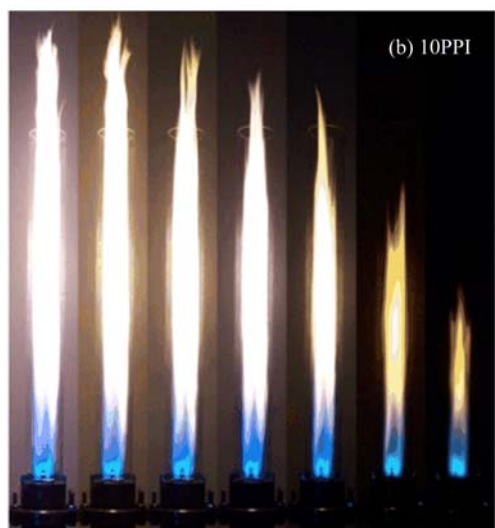
对于实心钝体,在图9(a)中,空气伴流速度较大($V_a=6\ \text{m/s}$)并保持不变,实心钝体组织燃烧时有蓝色火焰存在,并伴随有“嗡嗡”声音.这是由于钝体四周的强剪切强化了燃料与氧气混合,燃烧较好,但大应变率又导致燃烧不稳定.燃料速度 $V_f<3.5\ \text{m/s}$,火焰不能稳定,产生吹熄.这主要由于空气伴流速度较大,加上钝体堵塞作用导致流体局部加速,使得实心钝体两侧横向流动速度梯度较大.局部流场应变率增大可强化混合,也导致更容易熄火.在图10(a)中, $V_f=1.2\ \text{m/s}$ 时,在低速空气伴流条件下,火焰呈红色、抖动、冒黑烟,这是由于实心钝体四周燃料较浓,而剪切又不强烈(混合不好),产生不稳定扩散燃烧.当 $V_a>4\ \text{m/s}$ 时火焰熄火.

对于10PPI多孔介质,在图9(b)中, $V_a=6$

m/s ,即使 V_f 降低到 $2.4\ \text{m/s}$ 时,仍能保持相对稳定燃烧.在图10(b)中, $V_f=1.2\ \text{m/s}$, $V_a>5\ \text{m/s}$ 火焰才熄灭.由于多孔介质弥散作用,在尾迹区存在蓝色火焰,且火焰较为稳定.随着空气伴流速度的增加,蓝色火焰部分逐渐增大,表明多孔介质弥散作用使得更大区域适合组织燃料.

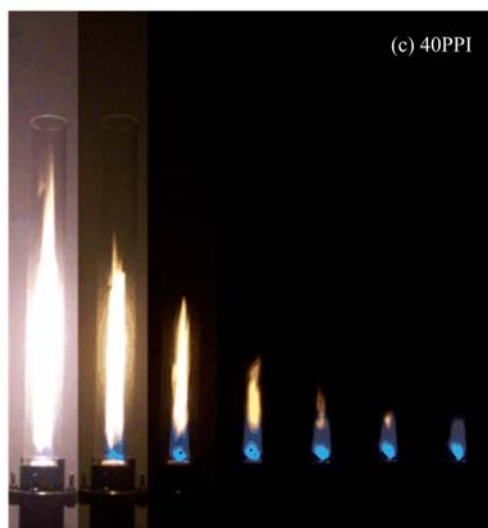
对于40PPI多孔介质,在图9(c)中, $V_a=6\ \text{m/s}$,即使 V_f 降低到 $2.4\ \text{m/s}$ 时,火焰仍有很强的刚性.实验表明, V_f 达到 $0.9\ \text{m/s}$ 的情况下,火焰才熄灭.在图10(c)中, $V_f=1.2\ \text{m/s}$, $V_a=8\ \text{m/s}$ 火焰仍然没有熄灭.这表明多孔介质火焰稳定器在更小的当量比下也能起到火焰稳定的作用.这是由于多孔介质的通透性,使燃料渗透到钝体尾迹回流区,在稳定器后有更符合着火条件的组分分布.

纵向比较图9、图10中三种钝体在同种工况下的燃烧特性发现:在研究的工况范围内,多孔介质均有效提高了火焰静力学稳定极限.40PPI火焰稳定器的火焰最明亮,10PPI次之,实心钝体最差.且实心钝体中后火焰较短小,火焰刚性不强.10PPI较40PPI火焰稳定器的蓝色火焰更长.这是由于10PPI孔径更大,燃料和氧化剂通过稳定器的通透性更好.但由于孔径较大,钝体后回流区后移和回流区强度变低(回流速度降低),使得火焰刚性较弱,火焰没有40PPI时明亮.在相同空气伴流速度下,实心钝体需要更多的燃料才能实现火焰稳定;而在相同燃料速度时,实心钝体需要更小的空气伴流速度实现稳定燃烧.比较三种火焰稳定器发现,40PPI燃烧及稳定效果最佳.这是因为40PPI多孔介质兼顾了通透性(有利于钝体后燃料与氧化剂混合)和回流



5.9 5.3 4.7 4.1 3.5 3.0 2.4 m/s

图 9 $V_a = 6$ m/s 时,不同燃料速度下火焰
Fig. 9 Flame profiles at various fuel velocities
while $V_a = 6$ m/s



2.0 3.0 4.0 5.0 6.0 7.0 8.0 m/s

图 10 $V_f = 1.2$ m/s 时,不同空气速度下火焰
Fig. 10 Flame profiles at various air velocities
while $V_f = 1.2$ m/s

区特性,使得稳定器后速度场、组分场更加适合燃烧,从而火焰稳定性较强,熄火极限拓宽。

3 结论

本文提出采用多孔介质材料制作火焰稳定器,旨在利用其通透和弥散性能改善钝体后燃空比,提高火焰稳定性。用丙烷为燃料,研究同种工况下实心钝体与多孔介质钝体流场结构、燃烧温度场,考察燃料和空气不同速度时钝体火焰稳定特性,得出如下结论:

(I) 多孔介质火焰稳定器的通透与弥散性能通过改变钝体后燃空比可拓宽火焰熄火极限。当燃料速度一定时,与实心钝体相比,其产生熄火的空气伴流速度更大;当空气伴流速度一定时,产生熄火的燃料速度更低。相同工况下,多孔介质钝体后火焰刚性更强,燃烧更充分。

(II) 与多孔介质钝体尾迹相比,实心钝体的回流区更靠近钝体,回流区更大,回流强度更高。由于实心钝体堵塞作用,尾迹两侧剪切更强,横向平均速度和脉动速度梯度更大。强剪切可强化混合,也容易导致熄火。

(III) 多孔介质钝体需要兼顾渗透特性和钝体回流区产生特性,因此,实际设计多孔介质钝体时需要选择合适的孔径。

参考文献(References)

- [1] Gao Ge. Design theory and method of the barchan-dune vortex flame stabilizer [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 1985.
高歌. 沙丘驻涡火焰稳定器设计原理及方法[D]. 北京:北京航空航天大学,1985.
- [2] Wang H Y. Wake flow stabilization by the action of base bleed [J]. J of Fluid Engineering, 1985,107(3): 378-384.
- [3] Qian Renzhang, Zheng Yuanping, Chen Weihai. A new concept for pulverized coal combustion-separation of air from dust [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1991,12(3): 320-323.
钱壬章,郑远平,陈维汉. 粉煤燃烧新概念-粉气分离[J]. 工程热物理学报,1991,12(3): 320-323.
- [4] Du Yiqing, Qian Renzhang, Wang Jianfu, et al. Experimental research on a slitting V-shape flame holder in cold state [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2004,32(2): 67-69.
杜一庆,钱壬章,王健夫,等. 开缝V形火焰稳定器的冷态实验研究[J]. 华中科技大学学报,2004, 32(2): 67-69.
- [5] Esquiva-Dano I, Nguyen H T, Escudie D. Influence of a bluff-body's shape on the Stabilization regime of non-premixed flames [J]. Combustion and Flame, 2001, 127(4): 2 167-2 180.
- [6] Yahagi Y, Sekiguti M, Suzuki K. Flow structure and flame stability in a micro can combustor with a baffle plate [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(4): 788-794.
- [7] Yang Maolin, Quan Zhong, Bai Xingyan, et al. Experimental investigation on EBMC flame holder [J]. Journal of Aerospace Power, 1998, 13(2): 185-188.
杨茂林, 全中, 白兴艳, 等. 尾缘吹气式火焰稳定器试验研究 [J]. 航空动力学报, 1998, 13(2): 185-188.
- [8] Jin Li, Tan Yonghua. Study on flameholders [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2006, 32(1): 30-34.
金莉, 谭永华. 火焰稳定器综述 [J]. 火箭推进, 2006, 32(1): 30-34.
- [9] Xu Kan, Liu Minghou, Jiang Hai, et al. Porous combust or applying in thermophotovoltaic power system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009,30(5):887-889.
徐侃, 刘明侯, 姜海, 等. 应用于热光伏系统中的多孔介质燃烧器 [J]. 工程热物理学报, 2009, 30(5): 887-889.
- [10] Liu Minghou, Lu You, Xu Kan, et al. Experimental study on porous media burner with top radiator [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2011, 17(2): 1-5.
刘明侯, 陆游, 徐侃, 等. 基于多孔介质燃烧的端部辐射器的实验研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2011, 17(2): 1-5.
- [11] Lu You, Liu Minghou, Xu Kan, et al. Experimental study on performance of SiC porous medium radiator [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2010,40(7):739-744.
陆游, 刘明侯, 徐侃, 等. 回热型燃烧辐射器性能实验研究 [J]. 中国科学技术大学学报, 2010, 40(7): 739-744.