

多孔介质结构参数对表面火焰熄火特性的影响

张 龙, 许全宏, 张 弛, 林培华, 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国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 为优化基于多孔介质头部的微型燃烧室,以甲烷/空气预混气为燃料,针对多孔介质结构参数(当量孔径、孔隙率)在不同预混气初始温度下,对表面火焰熄火特性进行实验研究.研究表明:当量孔径为 $120\mu\text{m}$ 的多孔介质表面火焰两侧同时发生脱火,当量孔径为 $80\mu\text{m}$ 时先发生一侧脱火.随孔隙率或当量孔径的减小,熄火速度提升.当量孔径为 $80\mu\text{m}$,孔隙率为 0.55,0.50,0.45 的多孔介质在当量比为 1.0,预混气初始温度为 300K 时的熄火速度分别为 1.11,1.22,1.31 m/s.孔隙率为 0.50,孔径为 120, $80\mu\text{m}$ 的多孔介质在当量比为 1.0,预混气温度为 300K 时的熄火速度分别为 0.73,1.22 m/s.预混气初始温度的升高对当量孔径为 $120\mu\text{m}$ 或孔隙率为 0.45 的多孔介质影响更加明显,预混气初始温度从 300K 升至 500K 时,熄火速度分别增加了 120%,76%.

关 键 词: 微型燃烧室; 多孔介质; 当量孔径; 孔隙率; 预混气初始温度; 熄火特性

中图分类号: V23

文献标志码: A

Effect of porous media structure parameters on surface flame blow-out performance

ZHANG Long, XU Quan-hong, ZHANG Chi,
LIN Pei-hua, LIN Yu-zhen

(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: To optimize a micro combustor with dome made of porous media, the influences of porous media structure parameters (equivalent aperture, porosity) on the surface flame blow-out performance were investigated experimentally under different premixed gas initial temperatures. Methane and air premixed gas was used as fuel in this experiment. The results show that both two sides of the porous media surface flame go out at the same time when equivalent aperture equals $120\mu\text{m}$. One side goes out firstly when equivalent aperture equals $80\mu\text{m}$. With the decrease of equivalent aperture or porosity, equivalent ratio equals 1.0, premixed gas initial temperature equals 300K, the blow-out velocity increases. When equivalent aperture equals $80\mu\text{m}$, and porosities equal 0.55, 0.50 and 0.45, the blow-out velocities of porous media surface flame turn out to be 1.11, 1.22 and 1.31 m/s, respectively. When porosity equals 0.50, and equivalent apertures equal 120, $80\mu\text{m}$, equivalent ratio equals 1.0, premixed gas initial temperature equals 300 K, the blow-out velocities turn out to be 0.73 m/s and 1.22 m/s, respectively. The increase of premixed gas initial temperature has obvious influence on porous media with equivalent aperture of $120\mu\text{m}$ or porosity of 0.45. When the

premixed gas initial temperature increases from 300 K to 500 K, the blow-out velocities increase by 120% and 76%, respectively.

Key words: micro combustor; porous media; equivalent aperture; porosity; premixed gas initial temperature; blow-out performance

目前微动力系统在航空航天、微小型日用电子产品、便携式仪器等方面广泛使用。随着技术的进步,对电源高能量密度的要求日益严格,太阳能电源极易受天气条件影响,一次性化学电池能量密度低。基于燃料燃烧的微动力系统同以上两者相比,具有更高的功率密度和能量密度,可以稳定、持久、不间断地提供动力。装有微型发动机的微型飞行器在军事和民用方面都有极其广阔的应用前景^[1-3]。

随着燃烧空间的缩小,微型燃烧室的表面积体积比增大,燃料的驻留时间缩短,燃烧室壁面热损失急剧增大,导致火焰不稳定、熄火、热效率降低等一系列问题,这已成为制约微型燃烧室开发和设计的关键问题^[3-6]。London 等^[7-9]对多种类型发动机的微型燃烧室进行设计和实验,通过分区燃烧和增加回热通道的方法,提高燃烧效率。国内学者对微尺度燃烧进行了很多基础研究,徐涛等^[10]总结了国内外现有研究微尺度燃烧的实验方法和计算模型,强调了理论模型建立的重要性。王国锋等^[11-12]确定了甲烷/氧气预混气火焰在细管中稳定传播的当量比极限,并指出辐射散热量最大可达总散热量的 65%。

多孔介质当量孔径小,表面积体积比大,蓄热能力强。因此,多孔介质燃烧技术有负荷调节比大、燃烧器体积小、稳定性好、燃烧极限变宽等优点^[4,13-14],能较好地适应微尺度燃烧。Kim 等^[15]发现低温下表面处理对多孔介质表面火焰的熄火性能未产生影响,而高温区内,熄火距离随表面温度分为 3 个不同的区域。Konnov 等^[16]发现,出口流场不均匀以及预混气的扩散作用会导致低压下火焰传播速度降低,扩散过程中氢原子的影响显著。在 80% 多孔介质半径内,可以认为火焰为一维火焰。Li, Timothy 等^[17-18]研究发现在当量比接近 0.8 时多孔介质燃烧器效率最高,可达到 99.5%,热损失小于 15%。中国科学院广州能源研究所冯耀勋、王勇等^[19-20]对预混气初始温度、多孔介质材料对表面火焰的影响进行了实验研究,发现低当量比下预混气初始温度对平面火焰的形成有较大影响,材料变化引起导热系数改变,从而对火焰产生影响。

为更好地了解多孔介质表面预混火焰的燃烧

特性,并为微型燃烧室稳火结构的设计提供基础实验依据,本文以甲烷/空气预混气为研究对象,就多孔介质结构参数对表面火焰熄火特性的影响进行实验研究。重点考察当量孔径 D 、孔隙率 P 、预混气初始温度 T 对熄火过程火焰形态、熄火速度的影响。

1 实验方法及系统

实验选用不锈钢烧结金属多孔介质作为表面火焰载体,结构参数主要包括当量孔径 D 和孔隙率 P ,两者的定义参见国标《GB/T 5249-2013 可渗透性烧结金属材料——气泡试验孔径的测定》和《GB 5250-1985 可渗透性烧结金属材料——流体渗透性的测定》。实验用多孔介质结构参数详见表 1。

表 1 多孔介质结构参数
Table 1 Porous media structure parameters

编号	当量孔径 $D/\mu\text{m}$	孔隙率 P
1	120	0.50
2	120	0.45
3	120	0.40
4	80	0.55
5	80	0.50
6	80	0.45

多孔介质表面火焰熄火特性实验系统如图 1 所示。空气、甲烷、预混气的质量流量(以下简称流量)采用精度为 $\pm 0.35\%$ 的 CS200A 型流量控制器控制。预混气初始温度采用实验段下部的电加热系统控制,在收缩段进口采用 K 型热电偶测温。采用 ADAM4019 型多通道数据采集模块对实验过程中的流量、温度数据进行采集。熄火过程采用 FASTCAM SA4 型高速摄像机记录,拍摄频率为 125 Hz。

实验过程中,甲烷、空气分别经流量控制器 1、流量控制器 2 调节流量以保证预混气当量比不变,预混气经流量控制器 3 和旁路调节参与燃烧的气量。预混气速度为 0.2 m/s 时,在多孔介质上

方 1 mm 处点火, 形成稳定表面火焰后, 逐渐增大预混气速度, 直至熄火发生. 高速摄像机同采集模块共用一个时钟, 准确记录熄火时间, 结合流量数据获得熄火速度值. 实验段简图和实物图如图 2 所示. 在改变多孔介质结构参数的同时, 还考察了预混气初始温度 T 的影响. 调节电加热系统, 使 T 分别达到 300, 400, 500 K.

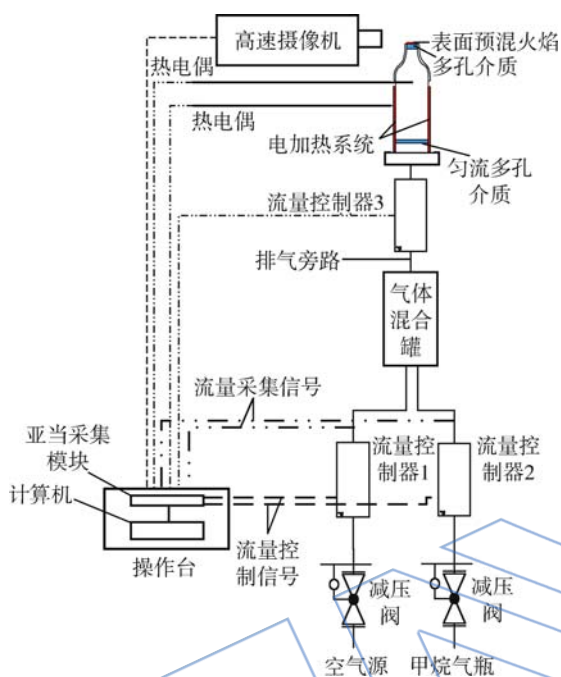


图 1 多孔介质表面火焰熄火特性实验系统

Fig. 1 Experimental system of porous media surface flame blow-out performance

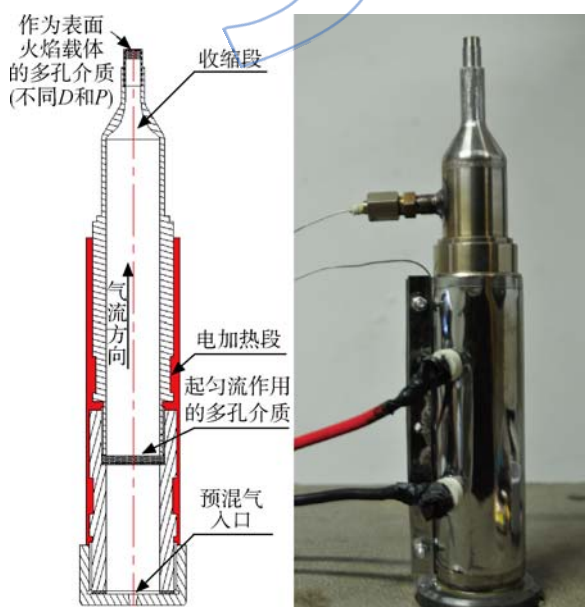


图 2 实验段简图和实物图

Fig. 2 Schematic and physical diagrams of experimental section

2 实验结果及分析

多孔介质当量孔径、孔隙率的变化会引起熄火过程中不同预混气速度对应的火焰形态存在差异. 其中, 当量孔径变化产生的影响更为明显. 预混气当量比为 1.0、预混气初始温度为 300 K, 用高速摄像机拍摄的当量孔径分别为 80, 120 μm , 孔隙率均为 0.50 的多孔介质表面火焰熄火过程如图 3、图 4 所示.

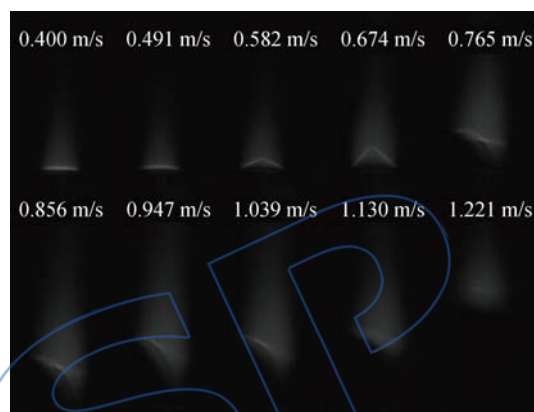


图 3 $D=80\mu\text{m}$ 多孔介质熄火过程高速摄像图片

Fig. 3 Porous media $D=80\mu\text{m}$ blow-out process photograph by high-speed camera

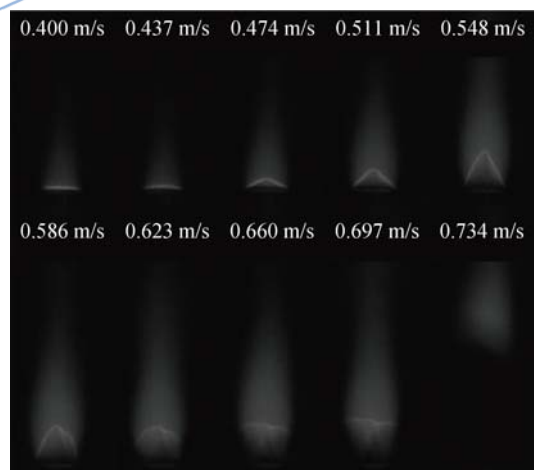


图 4 $D=120\mu\text{m}$ 多孔介质熄火过程高速摄像图片

Fig. 4 Porous media $D=120\mu\text{m}$ blow-out process photograph by high-speed camera

熄火过程中, 随预混气速度的增大, 平面火焰逐渐过渡为锥形火焰, 进而发生吹熄. 在相同预混气流量下, $D=80\mu\text{m}$ 多孔介质的出口流场相比 $D=120\mu\text{m}$ 时孔隙处射流的速度高、速度波动大, 流场两侧附面层差异明显, 火焰在流场边缘的稳定性不同. 因此, 在形成锥形火焰后, 随预混气速

度增大,熄火过程火焰形态的变化不同. $D=120\ \mu\text{m}$ 的多孔介质表面火焰两侧同时发生脱火,而 $D=80\ \mu\text{m}$ 时火焰先发生一侧脱火,继而发展为整个火焰的熄火. 当量孔径 D 不同的多孔介质出口射流速度不同, $D=80\ \mu\text{m}$ 的多孔介质相比 $D=120\ \mu\text{m}$ 时出口射流速度大,速度分布的不均匀性表现明显,表面火焰受流场影响而引发不同的熄火过程.

针对常压,预混气初始温度分别为 300, 400, 500 K 的实验条件,对 6 种结构参数的多孔介质进行多个当量比 ($\Phi=0.6\sim 1.5$) 的熄火速度实验,结果如下所示:

当量孔径相同的多孔介质熄火速度实验结果如图 5、图 6.

当量孔径相同的多孔介质在同一预混气初始温度下,随孔隙率的减小,熄火速度逐渐提升. $D=80\ \mu\text{m}$, $P=0.55, 0.50, 0.45$ 的多孔介质在 $\Phi=1.0$, $T=300\ \text{K}$ 时的熄火速度分别为 1.11, 1.22, 1.31 m/s. 随预混气初始温度增高,多孔介质的熄火速度逐渐提升, $D=120\ \mu\text{m}$ 的多孔介质受预混气初始温度影响更加明显. $\Phi=1.0$ 时, $D=80\ \mu\text{m}$ 和 $120\ \mu\text{m}$, $P=0.50$ 的多孔介质熄火速度分别从 300 K 时的 1.22 m/s 和 0.73 m/s 增加至 500 K 时的 2.08 m/s 和 1.60 m/s,增长幅度分别为 70% 和 120%. 熄火速度存在两个斜率不

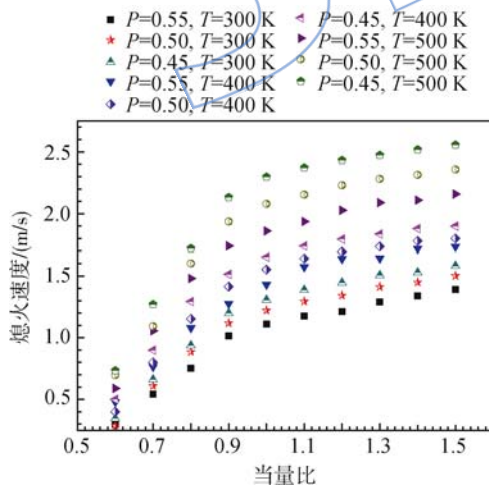


图 5 $D=80\ \mu\text{m}$, $P=0.45, 0.50, 0.55$ 的多孔介质在不同预混气初始温度 ($T=300, 400, 500\ \text{K}$) 的熄火速度

Fig. 5 Blow-out velocity of porous media ($D=80\ \mu\text{m}$, $P=0.45, 0.50, 0.55$) at different premixed gas initial temperatures ($T=300, 400, 500\ \text{K}$)

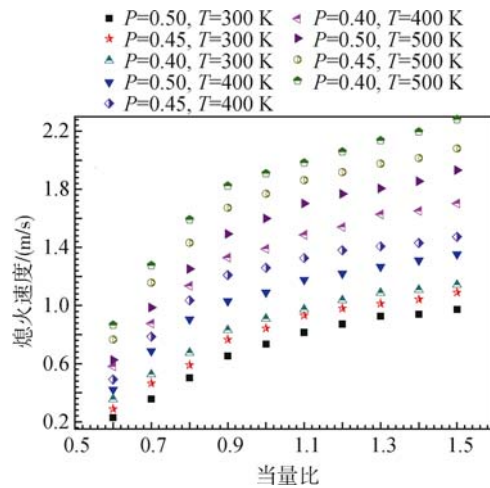


图 6 $D=120\ \mu\text{m}$, $P=0.40, 0.45, 0.50$ 的多孔介质在不同预混气初始温度 ($T=300, 400, 500\ \text{K}$) 的熄火速度

Fig. 6 Blow-out velocity of porous media ($D=120\ \mu\text{m}$, $P=0.40, 0.45, 0.50$) at different premixed gas initial temperatures ($T=300, 400, 500\ \text{K}$)

同的上升过程,预混气初始温度的改变没有对熄火本质产生影响.

孔隙率相同的多孔介质熄火速度实验结果如图 7、图 8.

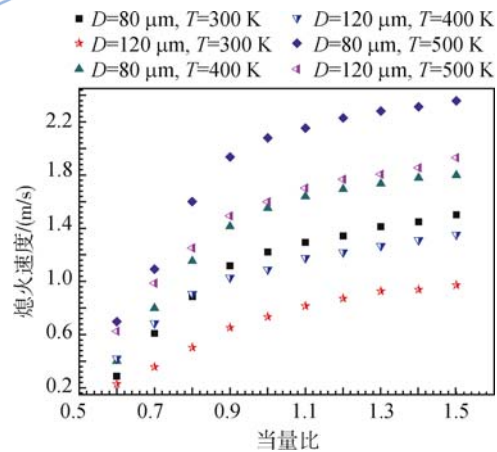


图 7 $P=0.50$, $D=80, 120\ \mu\text{m}$ 的多孔介质在不同预混气初始温度 ($T=300, 400, 500\ \text{K}$) 的熄火速度

Fig. 7 Blow-out velocity of porous media ($P=0.50$, $D=80, 120\ \mu\text{m}$) at different premixed gas initial temperatures ($T=300, 400, 500\ \text{K}$)

孔隙率相同的多孔介质在同一预混气初始温度下,随当量孔径的减小,熄火速度逐渐增加. $P=0.50$, $D=120, 80\ \mu\text{m}$ 的多孔介质在 $\Phi=1.0$, $T=300\ \text{K}$ 时的熄火速度分别为 0.73, 1.22 m/s.

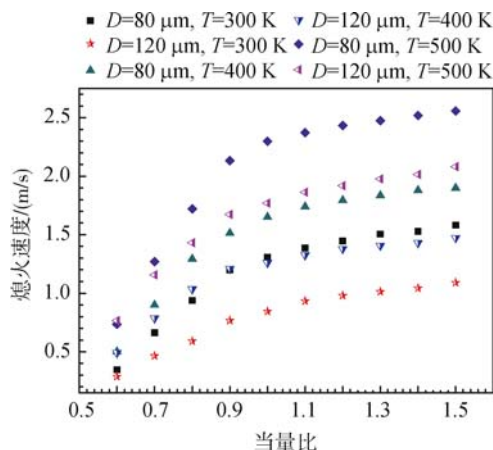


图8 $P=0.45$, $D=80, 120 \mu\text{m}$ 的多孔介质在不同预混气初始温度 ($T=300, 400, 500 \text{ K}$) 的熄火速度

Fig. 8 Blow-out velocity of porous media ($P=0.45$, $D=80, 120 \mu\text{m}$) at different premixed gas initial temperatures ($T=300, 400, 500 \text{ K}$)

$P=0.45$ 的多孔介质受预混气初始温度升高的影响明显。当 $\Phi=1.0$ 时, $D=80 \mu\text{m}$, $P=0.50$ 和 0.45 的多孔介质熄火速度分别从 300 K 时的 1.22 m/s 和 1.31 m/s 增加至 500 K 时的 $2.08, 2.30 \text{ m/s}$, 增长幅度分别为 70% 和 76% 。

3 结论与展望

本文针对多孔介质结构参数对表面火焰熄火特性的影响进行了实验研究, 得到以下主要结论:

1) 熄火过程中, 随预混气速度增大, 平面火焰过渡为锥形火焰后再发生吹熄。 $D=120 \mu\text{m}$ 的多孔介质表面火焰两侧同时发生脱火, $D=80 \mu\text{m}$ 时火焰先发生一侧脱火。

2) 当量孔径相同的多孔介质在同一预混气初始温度下, 随孔隙率的减小, 熄火速度逐渐提升。 $D=80 \mu\text{m}$, $P=0.55, 0.50, 0.45$ 的多孔介质在 $\Phi=1.0$, $T=300 \text{ K}$ 时的熄火速度分别为 $1.11, 1.22, 1.31 \text{ m/s}$ 。预混气初始温度的升高对 $D=120 \mu\text{m}$ 的多孔介质影响更加明显。预混气初始温度从 300 K 增加至 500 K 时, 熄火速度增加了 120% 。

3) 孔隙率相同的多孔介质在同一预混气初始温度下, 随当量孔径的减小, 熄火速度逐渐增加。 $P=0.50$, $D=120, 80 \mu\text{m}$ 的多孔介质在 $\Phi=1.0$, $T=300 \text{ K}$ 时的熄火速度分别为 $0.73, 1.22 \text{ m/s}$ 。预混气初始温度的升高对 $P=0.45$ 的多孔介质影响更加明显。预混气初始温度从 300 K 增

加至 500 K 时, 熄火速度增加了 76% 。

4) 对比当量孔径 D 、孔隙率 P 、预混气初始温度 T 三个参数, D 和 T 对表面火焰熄火速度的影响更为明显, 不同 D 和 T 条件下, 熄火速度增加的幅度大于不同 P 下的情况。

下一步将结合数值模拟研究多孔介质表面火焰熄火机理, 探究流场条件的不同对表面火焰形态及熄火的影响, 并更换范围更宽的多孔介质结构参数和多孔介质材料进行实验研究。

参考文献:

- [1] Fernandez-Pello A C. Micro-power generation using combustion: issues and approaches[J]. Proceedings of Combustion Institute, 2002, 29(1): 883-899.
- [2] Peirs J, Reynaerts D, Verplaetsen F A. Microturbine for electric power generation[J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2004, 113(1): 86-93.
- [3] JU Yiguang, Maruta K. Microscale combustion: technology development and fundamental research[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2011, 37(1): 669-715.
- [4] Waitz I A, Gauba G, Tzeng Y. Combustors for micro gas turbine engines[J]. Journal of Fluids Engineering, 1998, 120(3): 109-117.
- [5] 李占科, 宋笔锋, 宋海龙. 微型飞行器的研究现状及其关键技术[J]. 飞行力学, 2003, 21(4): 1-4.
LI Zhanke, SONG Bifeng, SONG Hailong. Study on actualities of micro air vehicles and its key technologies[J]. Flight Dynamics, 2003, 21(4): 1-4. (in Chinese)
- [6] 蒋利桥, 赵黛青, 汪小慈, 等. 新型低热损失微燃烧器原型的实验研究[J]. 热能动力工程, 2008, 23(1): 88-91.
JIANG Liqiao, ZHAO Daiqing, WANG Xiaohan, et al. Experimental study of a novel miniature-burner prototype with a low heat loss[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(1): 88-91. (in Chinese)
- [7] London A P, Ayón A A, Epstein A H, et al. Microfabrication of a high pressure bipropellant rocket engine[J]. Sensor and Actuators, 2001, 92(1/2/3): 351-357.
- [8] Mehra A, Waitz I A, Schmidt M A. Combustion Tests in the static structure of a 6-wafer micro gas turbine engine[R]. [S. l.]: Solid State Sensor and Actuator Workshop, Transducers Conference, 1999.
- [9] Spadaccini C M, Lee J. High power density silicon combustion system for micro gas turbine engines[R]. ASME Paper GT-2002-30082, 2002.
- [10] 徐涛, 杨泽亮, 甘云华. 基于微尺度的燃烧特性研究进展[J]. 广州航海高等专科学校学报, 2009, 17(3): 4-7.
XU Tao, YANG Zeliang, GAN Yunhua. The research progress of combustion characteristics based on micro scale[J]. Journal of Guangzhou Maritime College, 2009, 17(3): 4-7. (in Chinese)
- [11] 王国锋, 钟北京, 唐皇哉. 微细通道中甲烷与氧气的预混燃

- 烧[J]. 燃烧科学与技术, 2006, 12(2): 97-100.
- WANG Guofeng, ZHONG Beijing, TANG Huangzai. Methane-oxygen premixed combustion in micro-scale tube [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2006, 12(2): 97-100. (in Chinese)
- [12] 李军伟, 钟北京. 微细直管燃烧器的散热损失研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(20): 59-64.
- LI Junwei, ZHONG Beijing. Investigation on heat loss of microtube combustor[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(20): 59-64. (in Chinese)
- [13] 黄志峰. 在管内核心区插入多孔介质实现强化传热的实验与数值研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- HUANG Zhifeng. Experimental and numerical studies of enhancing heat transfer in a tube by inserting porous media at the core[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [14] 王恩宇, 程乐鸣, 骆仲决, 等. 多孔介质中预混火焰猝熄及自稳定性研究[J]. 热科学与技术, 2005, 4(1): 58-62.
- WANG Enyu, CHENG Leming, LUO Zhongyang, et al. Quenching and self-stability of premixed flame in porous media[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2005, 4(1): 58-62. (in Chinese)
- [15] Kim K T, Lee D H, Kwon S. Effects of thermal and chemical surface-flame interaction on flame quenching[J]. Combustion and Flame, 2006, 146(1): 19-28.
- [16] Konnov A A, Riemeijer R, Kornilov V N, et al. 2D effects in laminar premixed flames stabilized on a flat flame burner[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 47(1): 1-11.
- [17] Li J, Chou S K, Li Z W, et al. Experimental investigation of porous media combustion in a planar micro-combustor[J]. Fuel, 2010, 89(3): 708-715.
- [18] Timothy L M, Ajay K A. Investigation of a miniature combustor using porous media surface stabilized flame [J]. Combustion Science and Technology, 2007, 179(9): 1901-1922.
- [19] 冯耀勋, 王勇, 蒋利桥, 等. 预混气温度及多孔材料特性对多孔介质表面火焰的影响[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(32): 46-52.
- FENG Yaoxun, WANG Yong, JIANG Liqiao, et al. Effect of temperature of premixed gas and porous wall characteristic on the flames on porous wall surface[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(32): 46-52. (in Chinese)
- [20] 王勇, 蒋利桥, 赵黛青, 等. 多孔介质表面火焰的燃烧特性[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(29): 67-71.
- WANG Yong, JIANG Liqiao, ZHAO Daiqing, et al. Combustion characteristics of flames on porous wall surface [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(29): 67-71. (in Chinese)