

多孔介质表面预混火焰熄火特性实验

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: 对微型燃烧室中多孔介质表面预混火焰开展了不同孔径、孔隙率的多孔介质出口流场特性和熄火特性实验研究. 研究表明: 相对于圆管流, 多孔介质出口流场边界层变薄, 主流区宽度增加约 50%, 速度波动最大可达到前者的 2.2 倍. 多孔介质孔径相同时, 随孔隙率减小, 或孔隙率相同时, 随孔径减小, 主流区的速度波动幅值均减小, 在小孔径下更为明显, 最大速度波动幅值从 2.435 m/s 减小至 1.099 m/s. 多孔介质表面预混火焰的熄火特性受出口流场和火焰形态的影响很大, 孔隙率减小或孔径减小都会使相同当量比下熄火速度增加, 多孔介质参数的影响最大可使熄火速度增加近 1 倍.

关 键 词: 微型燃烧室; 多孔介质; 孔径; 孔隙率; 熄火特性

中图分类号: V23

文献标志码: A

Experiment of blow-out performance of premixed flame on porous media surface

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: Experimental investigation was conducted on the premixed flame on porous media surface used for micro combustor, and the flow field characteristics and blow-out performance of porous media under different pore sizes and porosities were obtained. The research results indicate that the boundary layers of the flow field at the exit of porous media become thinner compared with pipe flow; the width of mainstream region is increased by about 50%, and the maximum speed fluctuation amplitude in this region reaches 2.2 times of the former. When the porosity of porous media decreases with the constant pore size, or the pore size of porous media decreases with the constant porosity, the speed fluctuation amplitude of mainstream region decreases. This becomes more obvious under small pore size condition with the maximum speed fluctuation amplitude decreasing from 2.435 m/s to 1.099 m/s. The flow field at the exit and flame shape have great influence on the blow-out performance of premixed flame on porous media surface. With the decrease of pore size and porosity, the blow-out velocity increases under the same equivalence ratio. The influences of porous media parameters can nearly double the blow-out velocity.

Key words: micro combustor; porous media; pore size; porosity;
blow-out performance

近年来,随着微机电系统技术的发展,发动机有逐渐向微小化发展的趋势.装有微型发动机的微型飞行器有极其广阔的应用前景^[1-2].在众多的动力源中,基于燃料燃烧的微型动力装置同时具有高功率密度和高能量密度的特点^[1],非常适合在微型飞行器上应用.

随着燃烧空间的缩小,燃料在微型燃烧室内的驻留时间缩短;燃烧室壁面温度接近火焰温度,壁面热损失急剧增大,热损失的增加导致火焰不稳定、熄火、热效率降低等一系列问题^[1,3-4]. Spadaccini 等^[5]通过对比常规燃烧室和微型燃烧室,认为微型燃烧室的设计流量较低时性能会受热损失限制,而设计流量较高时则受停留时间短的影响.国内学者徐涛等^[6]指出国内外微尺度燃烧模型的缺乏,强调理论和实验模型建立的重要性.王国锋等^[7]指出微尺度下预混火焰传播速度同流量呈线性关系,并且在数值上比宏观火焰的传播速度大.

多孔介质燃烧技术具有燃烧速率高、负荷调节比大、燃烧强度大、燃烧器体积小、污染物排放低、稳定性好、燃烧极限变宽等优点^[4,8-9],可以较好地解决微尺度燃烧所带来的问题.饶文涛^[10]对近些年国内外多孔介质燃烧技术的实验研究进行了总结.冯耀勋、蒋利桥等^[11-12]通过实验发现预混气在 200℃ 左右时适合组织多孔介质表面火焰燃烧,在当量比为 0.7~0.8 时,热电系统达到最高综合效率.国外学者 Li 等^[13]发现多孔介质燃烧器在当量比接近 0.8 时燃烧效率最高,壁温随来流速度的增大而升高. Timothy 等^[14]针对多孔介质作头部燃烧室进行了燃烧产物以及壁温的实验研究,发现燃烧效率可达到 99.5%,热损失小于 15%.

对于火焰熄火的研究, Glassman 等^[15]和 Law^[16]对稳火机制进行了探讨.而多孔介质的熄火由于热损失大、流场不规则而有所不同,为了更好地了解多孔介质表面预混火焰的燃烧特性,以及为微型燃烧室稳火结构的设计提供基础实验依据,本文就多孔介质表面预混火焰的熄火特性进行实验研究.以甲烷与空气预混气作为可燃气体,重点考察多孔介质出口流场特性以及孔径、孔隙率对熄火特性的影响.

1 实验系统和实验件

实验中使用的不锈钢烧结金属多孔介质是采用不同目数的金属丝网压制成型,经线切割至所

需尺寸后,在真空炉中烧结制成.多孔介质外径为 8 mm,厚度为 5 mm,其他参数见表 1,其中惯性渗透性系数和黏性渗透性系数分别同多孔介质的惯性阻力与黏性阻力相关.多孔介质实物参见图 1.

表 1 多孔介质参数

Table 1 Porous media parameters

编号	孔径/ μm	孔隙率	惯性渗透 性系数/m	黏性渗透性系 数/ 10^{-10} m^2
1	120	0.50	1.463	3.33
2	120	0.45	1.695	4.00
3	120	0.40	3.237	5.00
4	80	0.55	0.780	1.11
5	80	0.50	1.077	1.25
6	80	0.45	1.356	1.43

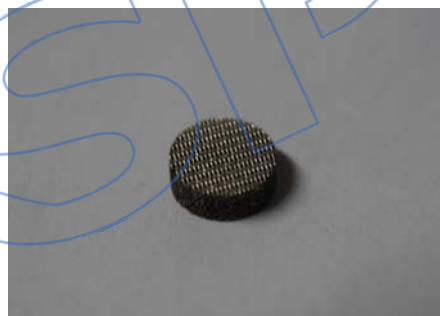


图 1 多孔介质实物图

Fig. 1 Porous media picture

孔径、渗透性系数的测量参见国家标准^[17-18].孔隙率为多孔介质内部空隙体积同总体积之比,测量采用 Mettler Toledo 公司的 XP404S 型电子天平直接称量法,最大质量为 410 g,精度为 $\pm 0.1 \text{ mg}$.

多孔介质出口流场特性实验系统如图 2 所示,整个实验系统主要由空气路、实验段、流量控制及测量系统组成.空气路主要由高压空气气源、截止阀、减压阀组成.实验段包含进气段和多孔介质安装段.空气流量采用 CS200A 型流量控制器

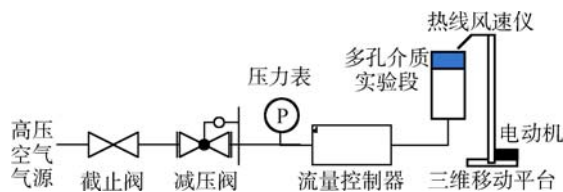


图 2 流场特性实验系统

Fig. 2 Test system of flow field characteristics

调节,多孔介质出口流场采用三维移动平台配合55P11型热线风速仪测量。

多孔介质出口流场特性实验过程中,通过控制精度为 $\pm 0.35\%$ 的流量控制器调节流场主流区稳定在不同的速度,用三维移动平台带动热线对多孔介质表面直径方向进行多点速度测量。其中,热线位置高于多孔介质表面 0.1 mm ,移动精度为 0.1 mm ,测量误差在 0.1 m/s 以内。测量过程中热线从多孔介质边缘外侧 1 mm 处沿直径方向移动,位移范围为 10 mm 。

预混火焰熄火特性实验系统如图3、图4所示,实验系统由气路、混合段、实验段、流量控制及测量系统组成。气路分为空气路、甲烷路以及外围保护气路。保护气采用氮气,可以有效阻止周围环境空气对实验结果的影响。混合段由气体混合罐和排气旁路组成。实验段包含匀流段、收缩段和出口直管段。下部多孔介质起匀流作用,上部多孔介质作为表面火焰载体。空气、甲烷的流量采用CS200A型流量控制器调节,氮气通过浮子流量计控制流量。火焰的熄火过程采用高速摄像机拍摄,拍摄频率为 125 Hz 。

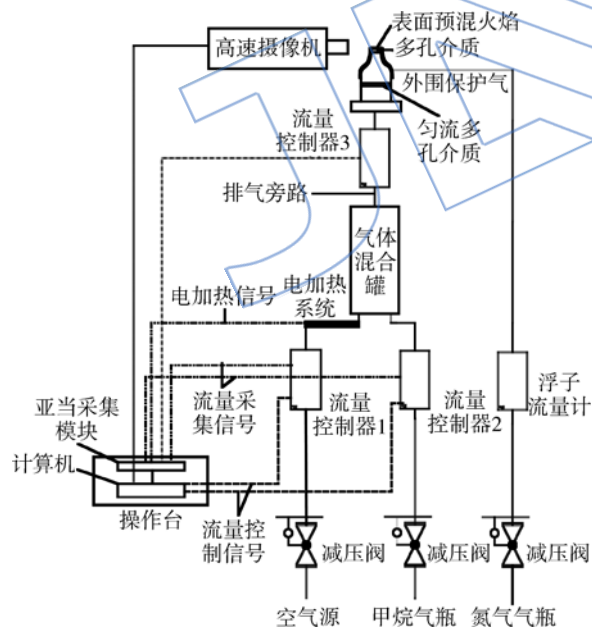


图3 预混火焰熄火特性实验系统

Fig. 3 Test system of premixed flame blow-out performance

熄火特性实验过程中,流量控制器1、流量控制器2分别控制常温常压下甲烷和空气的流量,当预混气速度为 0.2 m/s 时,在多孔介质上方 1 mm 处点火。为保证预混气当量比不变,调节预混

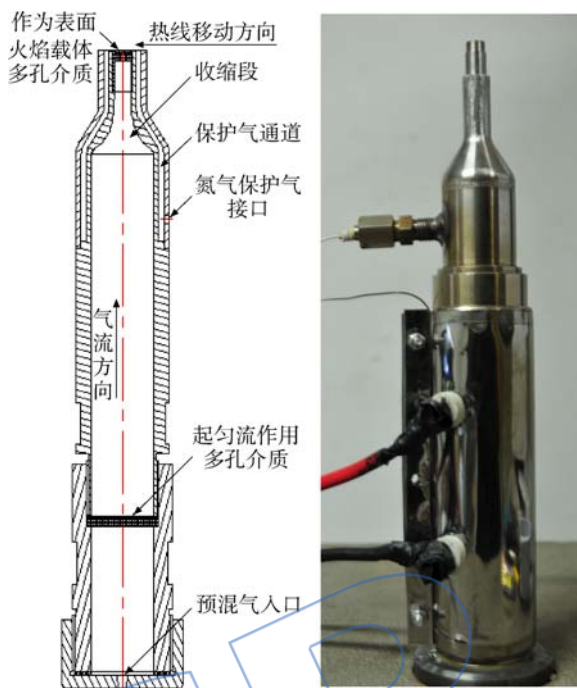


图4 实验段简图和实物图

Fig. 4 Schematic and picture of test section

气流量,需要设计排气旁路,流量控制器3逐渐增大参与燃烧的预混气流量,剩余气体从旁路排出,直至熄火。将高速摄像机同测量系统共用一个时钟,通过高速摄像机记录准确的熄火时间,结合测量系统获取流量数据,进而获得熄火时的速度值。

2 实验结果及分析

2.1 多孔介质出口流场特性

根据55P11型热线标定仪的速度范围限定,实验前对热线进行了小于 5 m/s 的低速标定。拟合热线电压 E 与速度 V 间的四次方曲线为

$$V = -47.1926E^4 + 294.9712E^3 - 641.6785E^2 + 597.4173E - 204.4079$$

选取主流区平均速度为 1.5 m/s 时测量不同孔径、孔隙率多孔介质出口流场,如图5、图6所示。

对流场图中主流区的速度波动幅值进行汇总,见表2。可以看出,添加多孔介质后,出口流场受边界层影响减弱,但进入主流区后,速度的波动较无多孔介质剧烈,速度波动幅值与多孔介质本身特性相关。孔径相同时,随着多孔介质孔隙率的减小,阻力系数增大,主流区的速度波动幅值较小。孔隙率相同,对比不同孔径的多孔介质发现,随着孔径的增大,多孔介质的阻力系数减小,主流区的速度波动幅值相对较大。

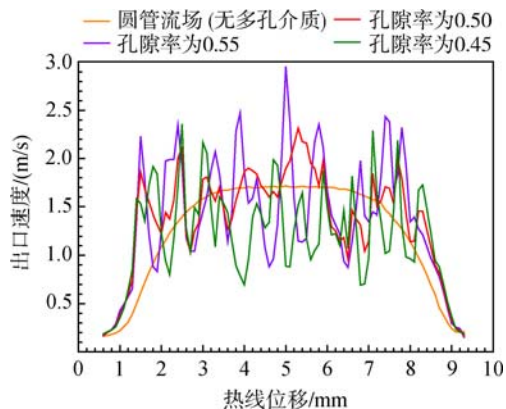
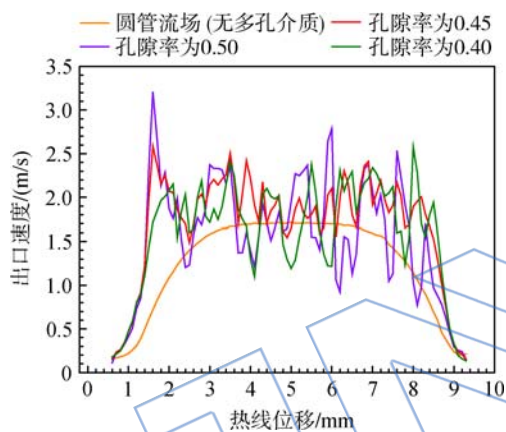
图5 孔径为 $80\mu\text{m}$ 的多孔介质出口流场Fig. 5 Porous media flow field at exit with pore size of $80\mu\text{m}$ 图6 孔径为 $120\mu\text{m}$ 的多孔介质出口流场Fig. 6 Porous media flow field at exit with pore size of $120\mu\text{m}$

表2 主流区速度波动幅值

Table 2 Speed fluctuation amplitude in mainstream region

实验件特性	主流区速度波动幅值/(m/s)
无多孔介质	1.105
孔径为 $120\mu\text{m}$, 孔隙率为 0.50	2.123
孔径为 $120\mu\text{m}$, 孔隙率为 0.45	1.668
孔径为 $120\mu\text{m}$, 孔隙率为 0.40	1.353
孔径为 $80\mu\text{m}$, 孔隙率为 0.55	2.435
孔径为 $80\mu\text{m}$, 孔隙率为 0.50	1.478
孔径为 $80\mu\text{m}$, 孔隙率为 0.45	1.099

2.2 表面预混火焰熄火特性

在多孔介质表面形成稳定的预混火焰后,随着预混气速度的增加,火焰高度逐渐增加,进而从

表面火焰过渡到本生灯火焰.速度进一步增加后,火焰逐渐开始出现不稳定现象直至熄火.

通过高速摄像机记录当量比为 1 时,表面火焰变化至本生灯火焰,进而熄火的图像过程如图 7 所示.

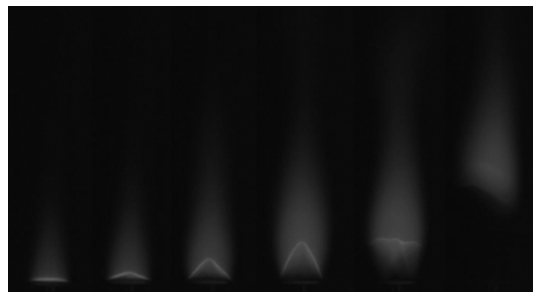
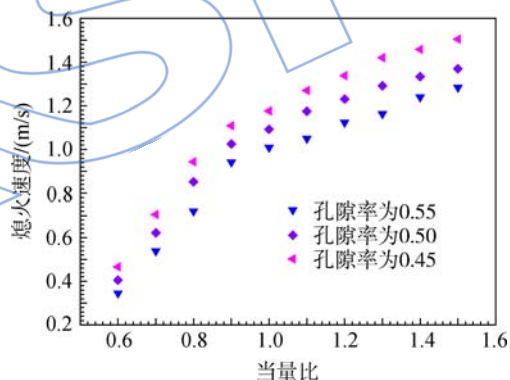
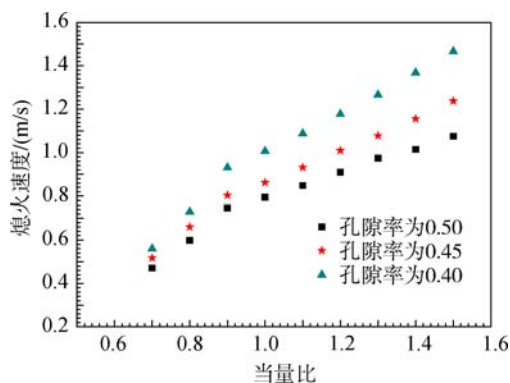


图7 熄火过程高速摄像图片

Fig. 7 Blow-out process photographed by high-speed camera

通过高速摄像机确定火焰从多孔介质表面吹起的准确时间,配合采集系统测得的熄火时预混气速度数据如图 8、图 9 所示.

图8 孔径为 $80\mu\text{m}$ 多孔介质熄火速度Fig. 8 Porous media blow-out speed with pore size of $80\mu\text{m}$ 图9 孔径为 $120\mu\text{m}$ 多孔介质熄火速度Fig. 9 Porous media blow-out speed with pore size of $120\mu\text{m}$

由图8、图9可以看出,火焰的熄火速度随着当量比的变化存在两个斜率不同的上升过程,在当量比大于0.9的情况下,上升趋于平缓,熄火相对容易发生。作者认为熄火速度曲线与不同当量比下火焰传播速度的变化趋势相符合,上升过程分为两个阶段是由于在当量比高于0.9的情况下,多孔介质完全从表面火焰过渡成本生灯火焰,火焰形态的改变导致了火焰热损失发生改变,因而火焰稳定性发生变化。另外,本生灯火焰相对于表面火焰卷吸作用增强,会在出口附近形成一个低速涡,卷吸的气体引入了较大的扰动,同时这部分气体也参与燃烧,使得火焰边缘因燃烧引起的不稳定性增强,导致熄火容易发生。

相同孔径的多孔介质,随着孔隙率的减小,各个当量比下熄火速度增加。相同孔隙率的多孔介质,随着孔径的减小,熄火速度也增加。由上文热线风速仪测量得到的多孔介质出口流场数据可以看出,孔径相同时孔隙率减小以及孔隙率相同时孔径减小的情况,多孔介质出口微射流的速度均匀性提高,主流区的速度波动幅值较小。根据Glassman的预混火焰理论,火焰形态和稳定性同流场密切相关。因此,随着孔隙率和孔径的减小,流场波动减小,易于形成稳定的火焰,熄火更难发生。

3 结论与展望

本文针对不同孔径和孔隙率的多孔介质,实验研究了其出口流场特性以及表面火焰熄火特性,得到以下主要结论:

1) 添加多孔介质后,出口流场受边界层影响减弱,但主流区速度的波动较圆管流剧烈。

2) 孔径相同时,随着多孔介质孔隙率减小,主流区的速度波动幅值较小。孔隙率相同,随着孔径的增大,主流区的速度波动幅值相对较大。

3) 火焰的熄火速度随着当量比的增大存在两个斜率不同的上升过程,这与火焰形态从表面火焰变化到本生灯火焰以及高当量比下的卷吸作用相关。

4) 随着孔隙率和孔径的减小,在给定当量比下均能提高熄火速度。

下一步将研究表面火焰和本生灯火焰两种火焰形态的熄火过程,并且拓宽多孔介质孔径和孔隙率范围,或更换其他形式的多孔介质进行实验研究。

参考文献:

[1] Ju Y, Maruta K. Microscale combustion: technology devel-

opment and fundamental research[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2011, 37(6): 669-715.

[2] 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)

[3] 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)

[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] Spadaccini C M, Lee J. High power density silicon combustion system for micro gas turbine engines[R]. ASME Paper GT-2002-30082, 2002.

[6] 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)

[7] 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 Huangzhai. Methane-oxygen premixed combustion in micro-scale tube[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2006, 12(2): 97-100. (in Chinese)

[8] 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)

[9] 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 Chinese Society for Electrical Engineering, 2009, 29(29): 67-71. (in Chinese)

[10] 饶文涛. 多孔介质燃烧技术现状及发展[J]. 世界钢铁, 2011(1): 22-28.

RAO Wentao. Present status and development of porous media combustion technology[J]. World Iron and Steel, 2011(1): 22-28. (in Chinese)

[11] 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 Yaoyun, WANG Yong, JIANG Liqiao, et al. Effect of temperature of premixed gas and porous wall character-

- istic on the flames on porous wall surface[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2010, 30(32): 46-52. (in Chinese)
- [12] 蒋利桥, 赵黛青, 郭琛绵, 等. 平面火焰微燃烧器及其温差热电转换系统[J]. 燃烧科学与技术, 2010, 16(5): 436-441.
- JIANG Liqiao, ZHAO Daiqing, GUO Chenmian, et al. Planar flame micro combustor and its application in thermoelectric power generation system[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2010, 16(5): 436-441. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Glassman I, Richard A Y. Combustion[M]. 4th ed. San Diego, US: Academic Press, 2008.
- [16] Law C K. Combustion physics[M]. New York, US: Cambridge University Press, 2006.
- [17] 中华人民共和国冶金工业部. GB 5249-1985 可渗透性烧结金属材料: 气泡试验孔径的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 1985.
- [18] 国家质量监督检验检疫总局. GB 5250-1993 可渗透烧结金属材料流体渗透性的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.