

陶瓷多孔体渗透率的实验研究*

孙惠贤 杜声同 朱文婕 廖 钰

(西北工业大学航空动力及热力工程系, 西安, 710072)

摘 要: 对三种孔隙率不同的陶瓷多孔材料的渗透率进行了实验研究。并根据直毛细管模型对陶瓷多孔材料的某些特性(孔隙平均直径、比表面积)进行了估算。对所得结果作了初步分析并提出了需进一步研究的问题。

主题词: 陶瓷, 多孔材料, 渗透率, 实验, 研究

分类号: V250.2, V254.2

EXPERIMENTAL STUDY OF OSMOSE RATE FOR POROUS CERAMIC

Sun Huixian Du Shengtong Zhu Wenjie Liao Yu

(Dept. of Aeroengine, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an, 710072)

Abstract: The experimental study for osmose rate of porous ceramic material with three different porosity has been carried out in this paper. According to the straight capillary model, some performances (pore average diameter, ratio surface area) of porous ceramic material are estimated. Some experimental results obtained are primary analyzed and several problems which have to be further investigated are presented.

Subject terms: Ceramic, Porous, Permeability, Test, Research

1 前 言

航空推进技术的高速发展,使得陶瓷基材料在航空发动机上的应用变得越来越重要,并将成为能否达到发动机设计性能的关键问题。对陶瓷多孔体在燃烧室中的应用亦已开始有人研究。研究指出,陶瓷多孔体能显著扩大燃烧贫油熄火界限,并由于陶瓷多孔体中毛细孔的巨大表面积,燃油在其中吸热以后形成非雾化蒸发,从而可以改善燃烧性能。为了进一步探索这个问题,我们对陶瓷多孔体的渗透率进行了实验研究。

2 渗透率的测定

渗透率是多孔材料的一项重要性质,它表征在外加压力梯度的作用下流体通过多孔材料

* 本文1994年12月12日收到,本课题系国家自然科学基金资助项目

的容易程度。根据达西定律, 渗透率 K 用下式表示:

$$K = \frac{q\mu}{A \frac{\Delta p}{L}} \quad (1)$$

式中 A ——试件的法向截面积 (cm^2)

μ ——介质的黏性 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)

L ——试件在宏观流向上的长度 (cm)

q ——介质通过主式件的流量 (cm^3/s)

Δp ——试件两端的压差 (Pa)

K ——渗透率 (达西)

渗透率 K 的单位为达西^[1], 1 达西表示 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 的压差将使黏度为 $10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 的流体, 以每秒 1cm^3 的流速流经边长为 1cm 的立方体。根据因次分析

$$1 \text{ 达西} = 9.78 \times 10^{-9} \text{cm}^2$$

渗透率 K 的数值与压差无关。

实验装置主要由压气机、稳压罐、试验件和量筒四部分组成。试验件前装有压力表, 用以确定试件前后的压差。稳压罐的容积较大, 以保证罐内压力保持恒定。

试验时先由压气机向稳压罐压气, 使罐内压力达到一定数值, 靠该压力的作用使流体流过试件。由于通过试件的流体直接流向大气, 因此压力表所显示的数值即为试件前后的压差。记录试件每流过一定体积流体所需的时间, 则通过试件的流量为已知, 利用达西定律就可计算出渗透率 K 值。

3 试片的尺寸及性能

本文实验采用的试件是由西北耐火材料厂烧制的三种孔隙率、三种厚度的圆形试片。试片的编号及尺寸、测得的孔隙率和密度如表 1 所示。由表 1 可以看出: 同一组不同厚度试片的孔隙率稍有差别, 为简单起见, 我们取其平均值作为各组试片的孔隙率。由此第一组试片的平均孔隙率为 19.73%, 第二组试片的平均孔隙率为 26.93%, 第三组试片的平均孔隙率为 33.59%。

Table 1 The size of porous ceramic test piece and its porosity and density

Group and number of test piece		Thickness L (mm)	Diameter d (mm)	Dry weight m_1 (g)	Wet weight m_2 (g)	Volume V (mm^3)	Density ρ (g/cm^3)	Porosity ϕ (%)	Average porosity $\bar{\phi}$ (%)
No. 1	T113	15.19	38.62	39.22	42.78	1.78×10^4	2.20	20.0	19.7%
	T123	10.44	38.60	26.52	28.86	1.22×10^4	2.17	19.1	
	T133	4.76	38.60	12.27	13.39	5.57×10^3	2.20	20.1	
No. 2	T213	15.22	39.06	36.80	41.74	1.82×10^4	2.02	27.1	26.9%
	T223	10.48	39.08	25.06	28.52	1.26×10^4	1.99	27.5	
	T233	5.52	39.24	12.65	14.40	6.68×10^3	1.90	26.2	
No. 3	T313	15.16	39.06	32.63	38.68	1.82×10^4	1.80	33.2	33.6%
	T323	9.94	39.10	20.98	24.93	1.19×10^4	1.76	33.1	
	T333	4.76	39.26	10.20	12.19	5.76×10^3	1.77	34.5	

4 渗透率

各组试片渗透率的试验结果如表 2 所示。

Table 2 The osmose rate of test pieces

Test piece	Porosity ϕ %	Area A (mm ²)	Thickness L (mm)	Pressure difference Δp ($\times 10^5$ Pa)	Volume of flow q (cm ³ /s)	Ratio Volume of flow q' (cm ³ /s-cm ³)	Osmos rate K (Dacy)
T111	19.7	1169	15.34	0.37	0.156	0.0133	5.53×10^{-2}
T121		1170	10.14	0.37	0.210	0.0179	4.92×10^{-2}
T131		1176	5.06	0.36	0.301	0.0256	3.60×10^{-2}
T212	26.9	1196	15.20	0.37	1.45	0.121	4.98×10^{-1}
T222		1199	10.48	0.37	1.59	0.132	3.76×10^{-1}
T232		1203	5.00	0.37	2.63	0.218	2.95×10^{-1}
T311	33.6	1196	14.90	0.37	5.63	0.470	1.90
T321		1198	10.44	0.37	6.43	0.537	1.51
T331		1201	4.76	0.36	8.97	0.747	0.99

从表 2 的试验结果可以看出, 试片孔隙率从 19.7% 增大至 33.6% 时, 渗透率 K 值从 $(3.6 \sim 5.5) \times 10^{-2}$ 达西增大至 1~2 达西。由此可见, 陶瓷多孔体的渗透率与孔隙率关系很大。孔隙率增大, 渗透率 K 迅速增加。在我们的试验中孔隙率增大 7% 左右, 渗透率大致要增大一个数量级。

需要指出, 陶瓷多孔体渗透率的大小, 不仅与孔隙率的大小有关, 而且与孔隙的结构(孔隙的大小与分布; 孔隙的迂曲度) 有关。因此渗透率与孔隙率之间并不是一种单一的关系。相同孔隙率的各试片, 渗透率并不相同, 反映了影响渗透率的其他结构因素所起的作用。

5 陶瓷多孔材料的平均直径与比表面

陶瓷多孔体中孔隙的结构是复杂无序的, 孔隙实际上具有不同的半径、形状和长度, 要确定陶瓷多孔材料中孔隙的结构是一种相当困难的工作。为了计算方便, 我们假设陶瓷多孔体中的孔隙为直毛细管, 且毛细管直径为均匀分布。即采用直毛细管模型对陶瓷多孔的毛细结构进行简化, 于是可推导出陶瓷多孔体某些特征性质(平均直径、比表面积)与渗透率, 孔隙率之间具有下述关系^[2,3]:

$$\bar{d} = \sqrt{\frac{32K}{\phi}} \quad (2)$$

$$\Sigma = \frac{4\phi}{\bar{d}} \quad (3)$$

$$S_g = \frac{\Sigma}{\rho} \quad (4)$$

式中 $\bar{d}$ ——多孔毛细体的平均直径 (μm) K ——渗透率
 Σ ——多孔毛细体的比表面积 (cm^2/cm^3) ϕ ——孔隙率
 S_g ——多孔毛细体的比表面积 (cm^2/g) ρ ——密度

根据试验结果, 利用上述关系, 可以计算出各种试片的平均直径和比表面积。计算结果如表 3 所示。

Table 3 The average diameter and ratio surface area of test pieces

Test piece	Osmose rate K (Dacy)	Porosity ϕ %	Average diameter $\bar{d}$ (μm)	Ratio surface area Σ (cm^2/cm^3)	Density ρ (g/cm^3)	Ratio surface area S_g (cm^2/g)
T111	5.53×10^{-2}	19.7	2.98	2.64×10^3	2.16	1.22×10^3
T121	4.92×10^{-2}	19.7	2.81	2.80×10^3	2.19	1.28×10^3
T131	3.60×10^{-2}	19.7	2640	3.29×10^3	2.07	1.59×10^3
T212	4.98×10^{-1}	26.9	7.65	1.41×10^3	2.02	0.70×10^3
T222	3.76×10^{-1}	26.9	6.64	1.62×10^3	1.95	0.83×10^3
T232	2.95×10^{-1}	26.9	5.88	1.83×10^3	1.87	0.98×10^3
T311	1.90	33.6	13.36	1.01×10^3	1.78	0.57×10^3
T321	1.51	33.6	11.91	1.13×10^3	1.76	0.64×10^3
T331	0.99	33.5	9.65	1.39×10^3	1.77	0.78×10^3

从表 3 的计算结果可以看出:

(1) 按直毛细管模型计算得出的各试片的孔隙平均直径大致在 $2 \sim 14 \mu\text{m}$ 之间。孔隙率愈大, 相当的孔隙平均直径也愈大。 $\phi \approx 20\%$ 时 $\bar{d} = 2 \sim 3 \mu\text{m}$, $\phi = 27\%$ 时 $\bar{d} = 5.8 \sim 7.7 \mu\text{m}$, $\phi = 34\%$ 时 $\bar{d} = 10 \sim 14 \mu\text{m}$ 。

(2) 陶瓷多孔体各试片的比表面积 Σ 大致在 $1000 \sim 3300 \text{cm}^2/\text{cm}^3$ 之间, S_g 大致在 $590 \sim 1600 \text{cm}^2/\text{g}$ 之间。孔隙平均直径愈小, 比表面积愈大。计算得出结果符合一般文献的统计数据。

6 结论和分析

(1) 本文根据达西定律, 测定了孔隙率在 $19\% \sim 34\%$ 范围内陶瓷多孔试片的渗透度。测定得出渗透率值的范围是 $(3.6 \sim 5.5) \times 10^{-2}$ 至 $1 \sim 2$ 达西。孔隙率增大, 渗透率明显增高。

(2) 若孔隙率 $\phi = 20\%$ 时 K 值按 4×10^{-2} 达西计算 $\frac{\Delta p}{L} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}/\text{cm}$, 则每 1 cm^2 通过燃油的流率 q' 只有 $0.026 \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 。这个流率对工程实用显然太小, 要增大流率可以提高材料的孔隙率, 但这必然要降低材料的强度。因此如何保证大孔隙率时材料的强度是一个值得研究的课题。

(3) 按直毛细管模型计算得出, 孔隙率在 $19\% \sim 34\%$ 之间陶瓷多孔体的平均直径在 $2 \sim$

$3\mu\text{m}$ 至 $10\sim 14\mu\text{m}$ 。由于孔隙很小,因此渗油能力很强,其渗油高度可达几十厘米。可以推断,采用陶瓷多孔体作稳定器时其间会充满燃油的分析是合理的。

(4) 陶瓷多孔体的内表面积达到 $1000\sim 3300\text{cm}^2/\text{cm}^3$ 。小的孔隙直径和巨大的内表面积,使得燃油流过时会产生很大的阻力^[4]。当内部产生气泡时由于表面张力的存在,会产生附加压力。半径为 $10\mu\text{m}$ 的气泡产生的附加压力可达 4600Pa ,这无疑会增大燃油的流动阻力。因此燃油在陶瓷多孔体内的流动将是一个复杂的问题,需要进一步加以研究。

(5) 陶瓷多孔体中的小的孔隙直径和巨大的内壁效应,会使流过介质中的微小质点阻塞孔隙。在我们的实验中曾发生过这种现象,这是多孔毛细陶瓷在应用中需要注意解决的一个问题。

参 考 文 献

- [1] 科林斯 R E 著. 流体通过多孔材料的流动. 北京: 石油工业出版社, 1984. 8
- [2] 谈慕华、黄蕴元编. 表面物理化学. 北京: 石油工业出版社, 1985. 12
- [3] 程征兰等编. 简明界面化学. 大连: 大连工学院出版社, 1988. 4
- [4] 崔国文编著. 表面与界面. 北京: 清华大学出版社, 1990. 11

(上接第 54 页)

- [18] 王福恒, 董雁冰. 拦截器尾焰射流场的计算——尾流对拦截器的干扰和影响. 863-409-5, 推进技术概念研究文集, 1990. 3
- [19] 刘青云, 崔继嵩, 张平. 高空火箭发动机羽流特性的计算机预估. 推进技术, 1993(3)
- [20] 张平, 崔继嵩, 刘青云. 二维火箭喷焰流场的化学组分和电磁特性计算. 推进技术, 1993(2)
- [21] 闫大鹏, 贺安之, 苗鹏程等. 火箭发动机燃气射流流场的光学显示方法研究. 航空动力学报, 1993(1)
- [22] 张涵信, 黎作武. 高超声速层流尾迹的数值模拟. 力学学报, 1992(2)
- [23] 纪永春, 马铁犹, 崔济亚. 二元喷管三维黏性流场的数值模拟. 航空动力学报, 1991(1)
- [24] 杨弘炜. 矢量推力系统内外流场的数值模拟及飞行器尾喷流红外辐射信号的计算: [博士论文]. 北京: 北京航空航天大学, 1991. 9
- [25] 王强. 火箭或导弹底部阻力计算方法研究及燃气羽流远场计算: [博士论文]. 北京: 北京航空航天大学, 1992. 6
- [26] 祖国君. 歼七飞机喷管喷射流场研究. 北京航空航天大学, 科研报告, 1992. 9