

文章编号: 1000-8055(2008)01-0130-04

烧结多孔结构的渗透和流阻特性研究

孙纪国¹, 王建华²

(11 北京航天动力研究所, 北京 100076;

21 中国科技大学 工程学院, 合肥 230026)

摘 要: 为研究粉末冶金多孔结构的渗透性和流阻, 以空气和氢气为介质进行了实验. 实验显示微孔内流雷诺数低于 1 时, 介质流量与穿过多孔结构的压降呈线性关系; 当内流雷诺数高于 1 时, 其流量与压降呈非线性特征. 分析表明: 传统的堆积床经验关系式将低估氢气和空气在烧结材料微孔中的流阻; 相反, 高估烧结多孔结构的渗透性能. 并用粉末烧结结构的氢气和空气渗透实验数据拟合了多孔结构渗透率及摩擦阻力关系式.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 多孔材料; 渗透率; 摩擦阻力; 烧结多孔结构; 发汗冷却

中图分类号: TF122

文献标识码: A

Research on permeability and flow resistance characteristic of sintered porous structure

SUN Jiguo¹, WANG Jianhua²

(11 Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China;

21 School of Engineering Science,

University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: To study the permeability and flow resistance of sintered porous stainless steel, a test was conducted for compressed air and gaseous hydrogen as the medium. The experimental results indicate that, there is a linear relationship between the pressure loss through the porous structure and the medium flow rate, when the flow Reynolds number in the pores is less than 1; or there is a nonlinear characteristics when Reynolds number is larger than 1. This shows that: the flow friction of gaseous hydrogen or air within the pores is underestimated using the traditional correlations based on the experiments of packed beds; but the permeability of the sintered porous structure is overestimated by the Ergun's corrective correlation. The relationship between the friction resistance and permeability of hydrogen or air flowing through the porous structure was simulated with the aid of the experimental data.

Key words: aerospace propulsion system; porous material; permeability; friction resistance; sintered porous structure; transpiration cooling

多孔材料内部的流动现象十分普遍^[1], 发汗冷却就是其中的一例. 近年来, 随着航天航空技术

的发展, 发汗冷却作为一种高效冷却方式, 越来越受到人们的重视. 而高温合金粉末烧结多孔材料

收稿日期: 2006-12-29; 修订日期: 2007-03-05

基金项目: 国家 863 计划; 国家自然科学基金重大研究计划(90305006)

作者简介: 孙纪国(1962), 男, 湖北钟祥人, 研究员, 主要从事宇航动力技术的研究.

作为功能材料, 普遍用于燃气透平导叶及液体火箭发动机燃烧室的发汗冷却研究. 冷却介质穿过结构内的微孔, 均匀地覆盖在结构的高温表面, 使结构免受高温烧蚀. 虽然这种粉末烧结材料所表现的渗透特性与均匀球体堆积床所表现的渗透特性相差较大, 但是多数发汗冷却研究者仍采用堆积床理论中的经验公式来估算烧结材料的渗透率和流阻特性, 这将导致较大的冷却系统设计误差.

本文通过实验, 研究了不锈钢粉末烧结多孔材料对于空气和氢气的渗透特性, 分析比较了实验数据与堆积床经验公式计算结果之间的差别, 并以实验数据为依据, 对传统的经验公式进行了修正. 其目的是为了帮助多孔冷却系统研究者及设计者, 正确评估多孔结构的渗透特性和流阻.

1 实验件及渗透性实验装置

筒状多孔结构在发汗冷却应用中较为广泛. 本实验试样由 304 L 不锈钢粉末冶金烧结成型, 使用的粉末颗粒直径在 40~ 65 Lm 之间, 烧结后的微孔平均孔径 6~ 11 Lm. 一个结构是几何外径 66 mm、厚 18 mm、高 55 mm 的等厚圆筒; 另一个为模拟火箭发动机拉阀尔喷管形状的非等厚圆筒.

图 1 展示了用压缩空气检测渗透性能的实验装置. 为了减少管路沿程压力损失及管内温度造成的测量误差, 测压及测温点都置于多孔结构附近的管壁上. 数字式压力计、温度计及流体流量控制仪分别记录实验压力、温度及流量.

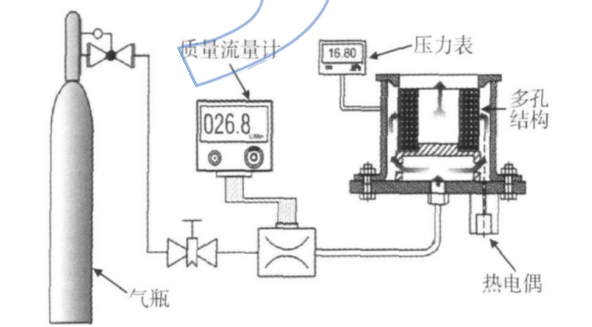


图 1 空气渗透性实验装置简图
Fig. 1 Air permeability test scheme

氢在液体火箭发动机中既是燃料又是冷却介质. 作为冷却介质的氢主要以气态形式存在, 即使氢以液态进入冷却腔, 也会迅速变成气态, 故本文只研究气态氢的特性. 目前还没有参考文献报道以气态氢作为冷却介质的渗透性数据. 鉴于气态氢试验的危险性, 本文特别研制了在高反压下测量气态氢渗透流阻特性的装置(图 2). 该装置用

等离子电弧加热器加热空气产生高反压, 并将排放的氢气烧掉. 由于电弧加热产生较高的温度, 还必须对电弧室壁面进行水冷却.

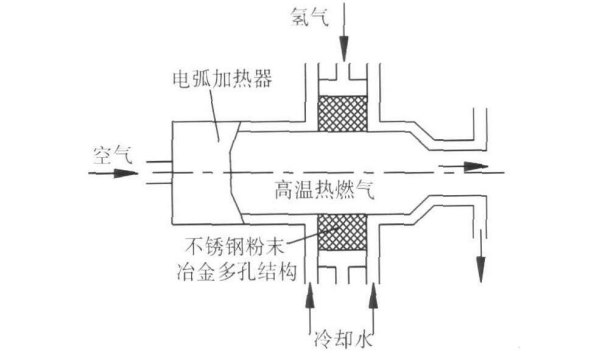


图 2 气氢渗透实验装置简图
Fig. 2 Hydrogen permeability test scheme

2 烧结多孔结构渗透率及流阻性能研究

通过多孔材料的冷却介质的流动特性可以用连续方程和动量方程来描述. 如果把穿过多孔材料的介质看成是连续的, 则流速 u 为

$$u = \frac{G_r}{AQ} \tag{1}$$

这里, 它是质量流率 G_r , 密度 Q 和流通面积 A 的函数. 考虑孔隙率 E 的影响, 多孔结构内的平均流速为: $v = u/E$ 对于一维不可压缩流动, 用柱坐标表示的压降与流速的关系^[2] 为

$$\frac{dp}{dr} = - \frac{L_r}{A} u - \frac{Q}{B} |u| u \tag{2}$$

其中 L_r 是流体的动力粘度, 它和 Q 相仿, 取决于流体温度. A 为渗透系数, 也称第一渗透系数; B 为第二渗透系数; 在不可压流中, 两者均为常数.

公式(2)右边的第一、二项分别考虑了摩擦力与惯性力的影响. 只有在微孔内雷诺数 $Re_d = uQd/L_r < 1$ 的条件下, 上述第二项可忽略. 这时, 在给定的 Q 和 A 情况下压降与流速或质量流率呈线性关系.

利用图 1 所示装置对实验件进行了常温空气流阻渗透实验. 图 3 展示了不同孔隙率下空气渗透实验件时压降与质量流率的对应关系, 实验雷诺数约为 10^{-2} 量级. 可见, 渗透质量流率和压降基本呈线性关系. 随着孔隙率增大, 多孔结构内的平均流速降低, 流阻减小, 因此压降减小.

图 4 给出了孔隙率为 0.35 的烧结多孔不锈钢在雷诺数为 10^0 量级时的实验结果. 可见, 当 $Re > 1$ 时, 压降与质量流率的关系已具有明显的

非线性特征, 此时惯性力的影响已不能忽略. 这与德国宇航研究院的碳- 碳纤维多孔发汗材料渗透实验数据的变化趋势^[2] 是相吻合的.

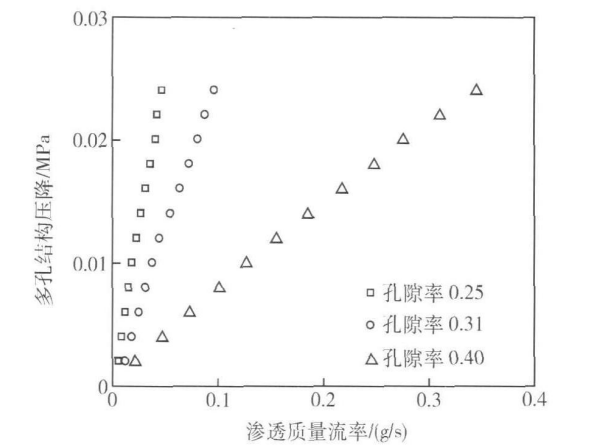


图 3 低压降下等厚多孔圆筒的空气渗透实验数据
Fig. 3 Air permeability data in low pressure drop

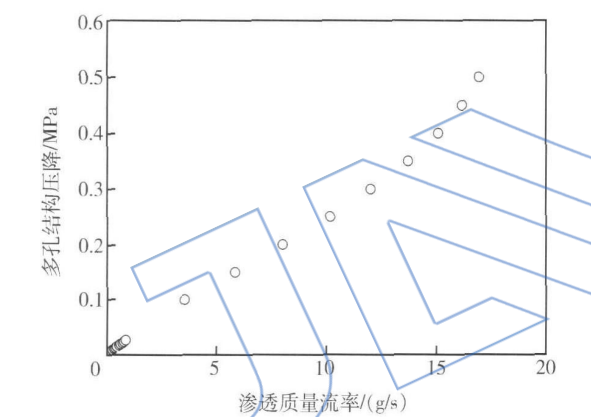


图 4 较高压降下多孔结构的空气渗透实验数据
Fig. 4 Air permeability data in high pressure drop

图 5 展示了雷诺数为 10^1 量级时通过等厚筒状及非等厚拉阀尔喷管的气态氢压降与质量流率关系的实验结果. 实验在图 2 所示设备上进行, 电弧加热的反压为 5~ 8 MPa. 图中展现了两个特点: (1) 随着孔隙率增大, 压力损失降低; (2) 在同一孔隙率下, 压降与质量流率表现出非线性特征.

通常, 多孔材料中摩擦阻力的定义式为

$$f_e = \frac{E^3}{1 - E 3M^2} \frac{Qd_p}{L} \frac{\Delta p}{\rho} \quad (Re_e [2\ 000]) \quad (3)$$

Aerov 和 Tojcek^[3] 提出了如下计算关联式

$$f_e = \frac{361.4}{Re_e} + 0.145 \quad (Re_e [2\ 000]) \quad (4)$$

其中, 微孔中流动的等效雷诺数为

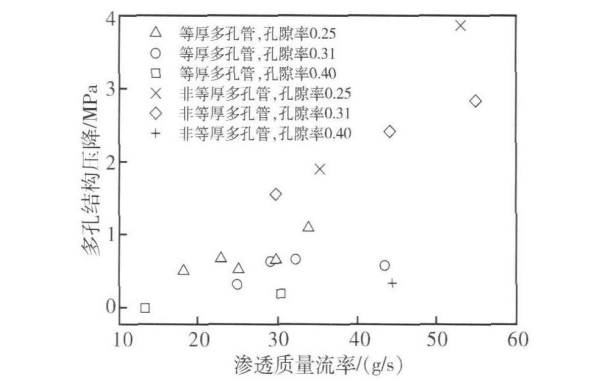
$$Re_e = \frac{2Md_p}{3L(1 - E)} \quad (5)$$


图 5 多孔结构圆筒及拉阀尔喷管气氢渗透实验结果
Fig. 5 Hydrogen permeability data through porous structure

这些公式是建立在堆积床理论基础上的, $M = Q$ 为单位面积上的质量流率, d_p 为堆积球直径; Δp 为流体穿过多孔结构的压降; L 为结构长度.

氢气和空气摩擦阻力系数试验结果示于图 6. 可见, 氢气和空气流经多孔结构的摩擦阻力系数随等效雷诺数的变化趋势与 Aerov/ Tojcek 经验关联式相似, 但是本文的氢气和空气实验数据明显高于 Aerov/ Tojcek 经验关联式计算值, 而且, 氢气和空气的实验结果规律不同, 不遵守同一关联式, 反映出不同的流动工质流经多孔结构的流阻和渗透性能是不同的. 因此, 在多孔结构中流动介质为氢气和空气的经验关系式需修正.

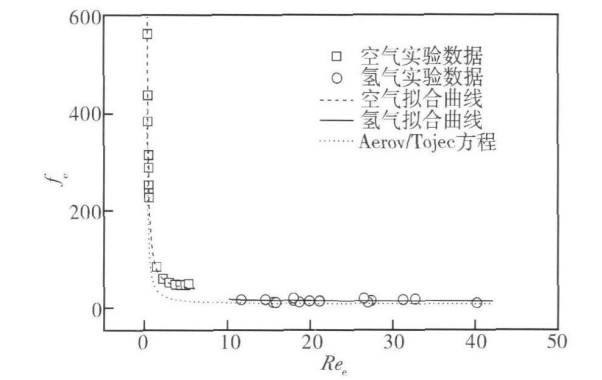


图 6 氢气和空气渗透结果及拟合曲线与经验方程比较
Fig. 6 H₂ and air permeability data and correlation

假设冷却剂通过多孔结构的摩擦阻力关联式为

$$f_e = \frac{A}{Re_e} + B \quad (6)$$

将 f_e 和 Re_e 的表达式代入公式(6)整理可得

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{41.5A}{d_p^2} \# \frac{(1 - E)^2}{E} \# Lu + 3B \# \frac{1}{d_p} \# \frac{1 - E}{E} \# Qu^2 \quad (7)$$

用最小二乘法拟合实验数据可得系数 A, B. 拟合的氢气和空气摩擦阻力关系式分别为

$$f_{e, H_2} = \frac{531.6}{Re} + 51.75 \tag{8}$$

$$f_{e, air} = \frac{601.6}{Re} + 231.5 \tag{9}$$

比较公式(2)和(7)可见: 两者具有相同的形式, 其压降与质量流率为非线性关系. 于是, 对于本文研究的氢气和空气试验结果, 公式(2)中的渗透系数 A 和第二渗透系数 B 分别为

$$A_{H_2} = \frac{d_p^2 E}{24112(1-E)^2} \tag{10}$$

$$B_{H_2} = \frac{d_p E}{17125(1-E)} \tag{11}$$

$$A_{air} = \frac{d_p^2 E}{27217(1-E)^2} \tag{12}$$

$$B_{air} = \frac{d_p E}{7015(1-E)} \tag{13}$$

在发汗冷却数值计算及系统设计中, 多孔材料渗透率是一个重要参数. 文献[425]在研究发汗冷却时, 根据堆积床理论中的经验公式(Ergun 修正^[6]公式)估算第一渗透系数

$$K = \frac{d_p^2 E}{150(1-E)^2} \tag{14}$$

将公式(10)和(12)分别与公式(14)比较可得

$$K_{H_2} = 11.6 A_{H_2} \tag{15}$$

$$K_{air} = 11.8 A_{air} \tag{16}$$

由此可见, 在忽略惯性力影响时, 用堆积床理论经验公式计算的氢气和空气渗透率远大于实验值. 而且, 不同的流动工质流经多孔结构的流阻和渗透性能不同.

Aerov/Tojec 关联式以等效雷诺数为单一变量, 认为不同流动工质的流阻特性一样. 事实上,

由于不同工质的粘性系数不同, 而粘性系数对摩擦阻力和渗透性有显著影响, 则在相同条件下, 不同工质的摩擦阻力和渗透性将不同.

3 结 论

本文实验研究了粉末冶金烧结多孔等厚圆筒及非等厚拉阀尔喷管结构的渗透特性. 研究表明: 多孔结构内流雷诺数低于 1 时, 流阻与质量流量基本呈线性关系; 当流动雷诺数高于 1 时, 应该考虑其非线性特征. 由实验数据与经验公式计算比较可得: 用堆积床经验公式计算, 将高估烧结多孔结构的渗透性能, 相反, 低估流阻. 针对这一现象, 本文用氢气和空气渗透实验数据重新拟合了烧结多孔结构的渗透率及摩擦阻力计算公式. 研究表明, 不同工质通过多孔结构的流阻和渗透性能不同.

参考文献:

[1] Bear Z, Irmay S. Physical principles of water percolation and seepage[M]. Paris: UNESCO, 1968.

[2] Greuel D, Herbertz A, Haidn O J, et al. Transpiration cooling applied to C/C liners of cryogenic liquid rocket engines [R]. AIAA 20043682.

[3] Aerov M E, Tojec O M. Hydraulic and thermal basis on the performance of apparatus with stationary and boiling granular layer[M]. Leningrad: Himia Press, 1968.

[4] Alanzmi B, Vafai K. Analysis of variants within the porous media transport models[J]. ASME J. of Heat Transfer, 2000, 12: 3032326.

[5] Jiang P X, Ren Z P. Numerical investigation of forced convection heat transfer in porous media using a thermal non-equilibrium model[J]. International J. of Heat and Mass Transfer, 2001, 22: 1022110.

[6] Nield D A, Bejan A. Convection in porous media[M]. 2nd ed. New York: Springer-Verlag New York, Inc., 1999.