

0Cr18Ni9Ti 金属橡胶过滤材料最大孔径研究

姜洪源¹, 国亚东¹, 陈照波¹, А. И. Белоусов²

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

(2. 俄罗斯萨马拉国立航空航天大学, 俄罗斯 萨马拉 443086)

摘要: 在对金属橡胶微观孔隙结构进行一定合理简化的基础上, 采用统计学方法推导出金属橡胶过滤材料最大孔径的理论公式, 并利用气泡试验孔径测定法加以验证。结果表明, 该公式准确地反映出金属橡胶过滤材料最大孔径的影响因素及其相互关系, 为设计金属橡胶过滤器提供可靠的理论依据。

关键词: 最大孔径; 金属橡胶; 过滤材料

中图分类号: TB383

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)12-2116-05

20 世纪 60 年代, 原苏联为了满足国防用空间飞行器上的特殊需求, 解决高温、高压、高真空、超低温及剧烈振动等环境下的减振、过滤、密封、热传导等问题, 成功研制出多孔金属橡胶材料。在随后 40 余年的发展中, 俄罗斯, 尤其是俄罗斯萨马拉国立航空航天大学, 在金属橡胶的研制与应用方面一直走在世界的前列^[1]。金属橡胶材料是一种均质弹性多孔物质, 采用一定方法将质量配好的拉伸开的螺旋状态的金属丝堆放好, 然后用冷冲压工艺成型。它具有渗透性好、孔径和孔隙可控、比表面积大、形状稳定、抗震及抗脉冲、纳污能力强等优异性能。金属橡胶材料内部组织结构是金属丝之间相互交错勾联的网状结构(见图 1)。这种材料本身所具有的许多固有特性决定了其应用于过滤领域的合理性和优越性: 金属橡胶材料的有效孔隙度高, 纳污能力强, 过滤寿命较其他过滤材料长; 由于是弹性体, 当受压变形时, 金属橡胶元件可改变其自身透过性和孔隙度, 从而可借助于螺

旋副将过滤元件微调至所需要的流量和所期望达到的过滤精度, 即其过滤性能可调^[2]。

将金属橡胶应用到液压或者气动系统中作为过滤或节流元件使用时, 需要考虑其孔隙特征参数, 例如孔隙率、平均孔径、最大孔径以及孔径分布等。准确地掌握上述参数是研制、开发金属橡胶过滤材料的基础。孔隙直径是多孔材料的重要性质之一。虽然它对多孔材料的许多力学性能和热性能等依赖关系较小, 但对多孔材料的透过性、渗透速率、过滤性能等其他一系列性质均具有显著影响。例如, 过滤材料的过滤作用是通过其内部孔径通道来实现的, 过滤精度和截污能力在很大程度上取决于其孔径尺寸及分布, 其中最大孔径反映了过滤材料可有效截留粒子大小的性能, 是衡量材料过滤性能的重要指标。根据它可以检查过滤元件制备的质量和功效^[3], 因而对多孔材料孔径的研究一直受到很大关注。本文旨在对金属橡胶过滤材料最大孔径的影响因素及其相互关系进行研究。



图 1 金属橡胶材料内部组织

Fig1 Inner structure of metal rubber materials

1 金属橡胶最大孔径理论公式的推导

关于多孔材料微观组织结构的描述有很多模型。其中应用最早且最多的是球堆积模型和毛细管模型。随后人们相继提出了单球模型、球池模型、喉管模型等。这些模型都是对多孔介质有规律组织结构的一种理想化。然而多孔材料的孔道大小和形状是各种各样的, 其性质也是无序和混乱的。众多研究者一致认为, 精确地描述多孔介质是不现实的, 更多的则是在一定

收到初稿日期: 2008-11-30; 收到修改稿日期: 2009-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(50675042)

作者简介: 姜洪源, 男, 1960 年生, 博士, 博士生导师, 教授, 哈尔滨工业大学机电学院, 黑龙江 哈尔滨 150001, 电话: 0451-86418028, E-mail: guoyd98@163.com

简化基础上借助于统计学方法进行研究。本研究以毛细管模型为基础, 利用统计学方法来确定金属橡胶过滤材料最大孔径的理论公式。

设孔径分布密度为 $f(d)$, 其中 d 为孔径, 乘积 $f(d) \cdot dd$ 为孔径 d 到 $d+dd$ 孔道的相对数量。如果在单位面积上多孔介质含有 N 个孔道, 采用各向同性的毛细管模型, 则多孔介质的孔隙率 ε 可表示为:

$$\varepsilon = \frac{\pi}{4} N \int_0^{\infty} d^2 f(d) \alpha' dd \quad (1)$$

式中, α' 为多孔介质中考虑到相对于直孔道的流道弯曲系数, 例如 $\alpha' = 2^{[4]}$ 。

对于由金属丝直径 d_w 制备的金属橡胶过滤介质, 取其平均直径 d_a 为水力直径 d_h 。金属橡胶作为多孔材料, 可认为是由许多不同直径的流道组成, 其水力直径 d_h 可表示为^[5]:

$$d_h = \frac{4\tau_k}{S_k} \quad (2)$$

式中: τ_k ——金属橡胶孔隙体积 (mm^3); S_k ——金属橡胶孔隙全部表面积 (mm^2)。

对于金属橡胶过滤介质, 存在如下关系式:

$$\left. \begin{aligned} \tau_k &= \frac{1}{4} \pi d_w^2 l \cdot \varepsilon \\ S_k &= \pi d_w l \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: d_w ——金属橡胶丝线直径 (mm); l ——金属橡胶丝线总长度 (mm); ε ——金属橡胶孔隙率。

其中, $\frac{1}{4} \pi d_w^2 l$ 为金属橡胶过滤材料内部丝线总体积, 将式(3)代入到式(2)中, 可以得到金属橡胶过滤介质水力直径 d_h 表达式为:

$$d_a = d_h = \frac{\varepsilon d_w}{1 - \varepsilon} \quad (4)$$

设单位面积的多孔金属橡胶过滤介质横截面上含有 N 个孔道, 其孔隙率也可以写为:

$$\varepsilon = \frac{\pi \alpha' N d_a^2}{4} \quad (5)$$

将式(4)代入到式(5), 可以得到单位面积上金属橡胶过滤介质孔道数量为:

$$N = \frac{4(1 - \varepsilon)^2}{\pi \varepsilon \alpha' d_w^2} \quad (6)$$

在确定金属橡胶过滤介质最大孔径时, 设其孔径分布规律为正态分布:

$$f(d) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(d-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

μ 和 σ ——孔径的数学期望和均方偏差。

引入符号 λ 和 γ , 其中:

$$\lambda = \frac{d - \mu}{\sigma}; \quad \gamma = \frac{\mu}{\sigma} \quad (8)$$

将式(7)和式(8)代入到式(1)可得:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\sqrt{2\pi}}{8} N \alpha' \int_{-\gamma}^{\infty} (\sigma \lambda + \mu)^2 e^{-\frac{\lambda^2}{2}} d\lambda \\ &= \frac{\sqrt{2\pi}}{8} N \alpha' (\sigma^2 I_1 + 2\sigma \mu I_2 + \mu^2 I_3) \end{aligned} \quad (9)$$

式中:

$$I_1 = \int_{-\gamma}^{\infty} \lambda^2 e^{-\frac{\lambda^2}{2}} d\lambda; \quad I_2 = \int_{-\gamma}^{\infty} \lambda e^{-\frac{\lambda^2}{2}} d\lambda; \quad I_3 = \int_{-\gamma}^{\infty} e^{-\frac{\lambda^2}{2}} d\lambda$$

对于 I_1 , 写出 $x = \lambda e^{-\frac{\lambda^2}{2}}$, 那么

$$dx = (1 - \lambda^2) e^{-\frac{\lambda^2}{2}} d\lambda$$

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_{-\gamma}^{\infty} [(\lambda^2 - 1) e^{-\frac{\lambda^2}{2}} + e^{-\frac{\lambda^2}{2}}] d\lambda \\ &= - \int_{x_1}^{x_2} dx + \int_{-\gamma}^{\infty} e^{-\frac{\lambda^2}{2}} d\lambda = -\lambda e^{-\frac{\lambda^2}{2}} \Big|_{-\gamma}^{\infty} + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \phi(z) \Big|_{-\gamma}^{\infty} \end{aligned} \quad (10)$$

式中:

$$\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{\lambda^2}{2}} d\lambda \quad (11)$$

这是正态分布积分或者高斯概率积分。

在式(10)中, 第一个右端分量按照洛必达规则, 在 $z = \infty$, $\phi(z) = 0.5$ 时, 可以得到:

$$I_1 = \sqrt{\frac{\pi}{2}} [0.5 + \phi(\gamma)] + \gamma e^{-\frac{\gamma^2}{2}} \quad (12)$$

对于 I_2 , 引入符号 $\lambda^2 = s$, 由此 $ds = 2\lambda d\lambda$, 那么

$$I_2 = \frac{1}{2} \int_{s_1}^{s_2} e^{-\frac{s}{2}} ds = e^{-\frac{s}{2}} \Big|_{s_1}^{s_2} = e^{-\frac{\lambda^2}{2}} \Big|_{-\gamma}^{\infty}$$

所以

$$I_2 = -e^{-\frac{\gamma^2}{2}} \quad (13)$$

按照式(9)积分得到 I_3 的表达式, 如下:

$$I_3 = \sqrt{2\pi} [0.5 + \phi(z)] \quad (14)$$

将得到的关于 I_1, I_2, I_3 的表达式(12)~(14)及 N 表达式(6)代入式(9)并进行核算, 对于正态分布 $\mu = d_{\max}/2, \sigma = d_{\max}/6$ (概率为 0.9973), 则 $\lambda = 3, \phi(3) = 0.49685$, 经过变换后可以得到:

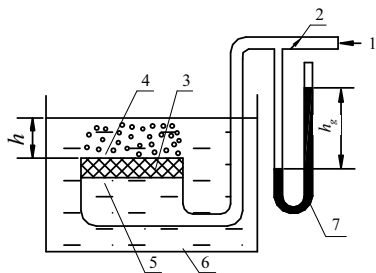
$$d_{\max} = 1.337 \frac{\varepsilon d_w}{1 - \varepsilon} \quad (15)$$

2 实验

实验中金属橡胶过滤介质最大孔径的测量采用国家标准 GB5249-85 进行测定^[6]。气泡检测法测量金属橡胶过滤介质最大孔径的基本原理是：用对滤材具有良好浸润性的液体浸润试样，然后缓慢向试件通入气体。试件孔径与其表面逸出气泡的压力有对应关系。由此，测定试件表面逸出气泡时的压力，即可计算出气泡试验孔径。通常气泡首先应在最大孔径处出现，测量出现第 1 个气泡时的压差就可以计算出最大孔径对应的等效毛细管直径，并以此来作为金属橡胶过滤介质的最大孔径。由于有时该方法测得的最大孔径可能是多孔材料局部缺陷，而不能代表多孔材料的微孔，因此有人用第 3 个气泡出现时的压差所求得的孔径作为最大孔径。

实验装置主要由 U 形管压差计、气瓶和样品室等主要部分组成，其试验原理见图 2 所示。

为了获得金属橡胶过滤介质最大孔径与金属丝直径及试件孔隙率的关系，制备了大量的试件，如图 3 所示。试验中所采用的圆柱形金属橡胶过滤元件材质为 0Cr18Ni9Ti，试件直径 20 mm，厚度分别为 5, 10, 15 和 20 mm，孔隙度的变化区间为 $\varepsilon=0.2\sim 0.7$ 。金属丝直径分别为 0.08, 0.1, 0.12 和 0.15 mm，金属橡胶螺旋卷直径与金属丝直径之比 $d_m/d_w=10$ 。试验液体为 95%乙醇，密度为 0.805 g/cm^3 ，表面张力 γ' 为 0.0230 N/m (常温下)。



1 experimental gas; 2 regulating valve; 3 cylindrical metal rubber filtering; 4 bubble; 5 sample room; 6 experimental Liquid (95% ethanol); 7 U-tube differential pressure meter

图 2 气泡法测量孔径试验原理

Fig.2 Principle of bubble test pore size determination method

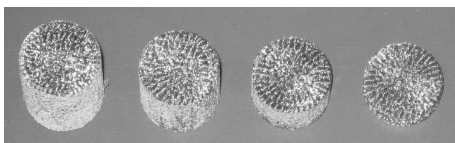


图 3 实验用部分金属橡胶试件

Fig.3 Some metal rubber samples

3 结果及分析

等效圆柱形毛细管的直径和形成气泡的压力之间的关系^[7]如下式所示：

$$d = \frac{4\gamma'}{h_g - 9.81\rho h} \quad (16)$$

式中： d ——等效的毛细管直径 (μm)； h_g ——试验气体压力 (Pa)； h ——试验液体表面到试件表面的高度 (mm)。

当试件表面形成第 1 个气泡时，通过式(16)所计算的等效毛细管直径即是该金属橡胶试件的最大孔径。表 1 列出了部分试验数据。

图 4a, 4b, 4c, 4d 为不同厚度金属橡胶试件最大孔径理论计算值与实验结果的对比。各图中的 4 条曲线分别是丝径 0.08, 0.10, 0.12 和 0.15 mm 金属橡胶试件最大孔径理论值，对应的数据点则是实验值。由图 4 可见，理论计算值与实验结果吻合良好，表明式(15)准确地描述了金属橡胶过滤介质最大孔径的影响因素及其相互关系。同时可以看出，实验结果普遍较理论计算值大，其原因在于：一是理论推导中对金属橡胶孔径分布规律假设与实际孔径分布的偏离；二是理论推导所得的最大孔径式(15)为概率 0.9973 所对应的孔径，与实际最大孔径略有不同。

从图 4 中可以发现，金属橡胶试件最大孔径随着孔隙率增大而增大，并且呈非线性增大。同时增大金属丝直径，金属橡胶最大孔径也会增大。但在孔隙率较小时改变金属丝直径对金属橡胶最大孔径影响较小，在孔隙率较大时改变金属丝直径对金属橡胶最大孔径影响明显。

图 5 为不同厚度金属橡胶试件最大孔径的实验结果对比。其试件参数为孔隙率 $\varepsilon=0.35$ 、金属丝直径 $d_w=0.08\text{ mm}$ 、厚度分别为 5, 10, 15 和 20 mm。从图中可以发现，虽然其厚度差别很大，但金属橡胶最大孔径均处于 $55\sim 60\ \mu\text{m}$ 之间，考虑到实验测量误差，

表 1 气泡试验测得金属橡胶最大孔径部分结果

Table 1 Maximal pore size results of metal rubber gained by bubble test

Porosity, ε	h_g/Pa	h/mm	Test value, $d_{\text{max}}/\mu\text{m}$	Theoretical value, $d_{\text{max}}/\mu\text{m}$
0.192	37.4	15	25.9	25.4
0.352	17.0	15	59.2	58.1
0.447	13.9	15	74.0	86.5
0.560	8.8	15	123.0	136.1
0.681	5.1	15	238.0	227.3

Note: Diameter of metal wire $d_w=0.08\text{ mm}$, Thickness of sample is 5 mm

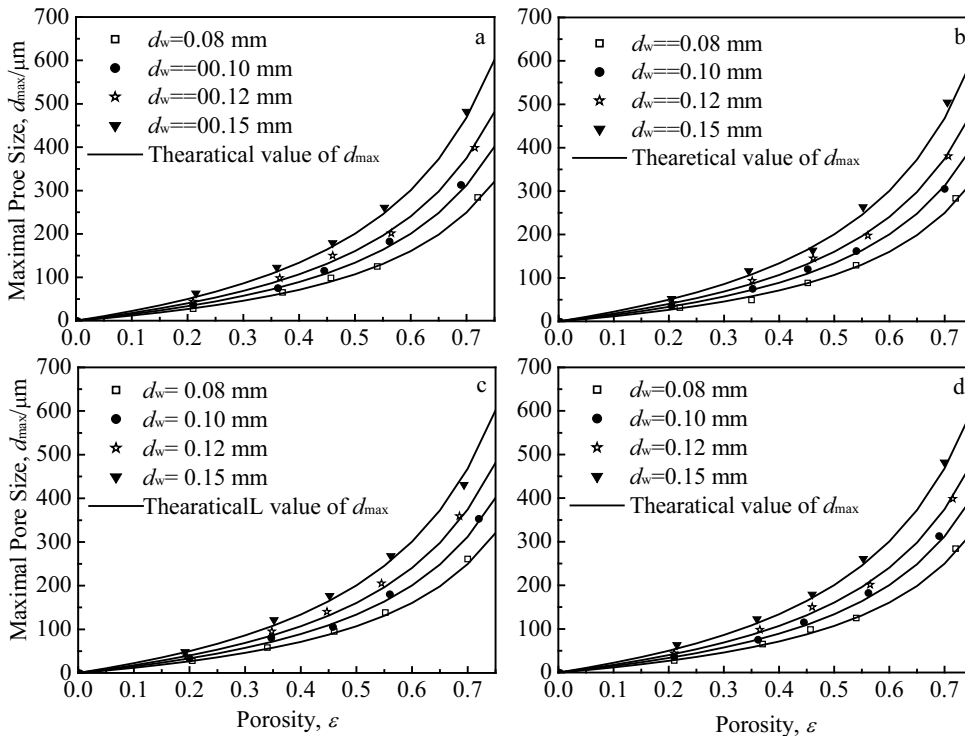


图 4 不同厚度下孔隙率与丝径对金属橡胶过滤介质最大孔径的影响

Fig.4 Influence of porosity and wire diameter on maximal pore size of metal rubber filtering media at different thickness: (a) 5 mm, (b) 10 mm, (c) 15 mm, and (d) 20 mm

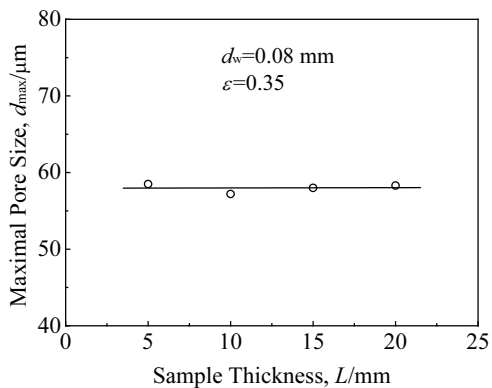


图 5 试件厚度对金属橡胶过滤介质最大孔径的影响

Fig.5 Influence of sample thickness on maximal pore size of metal rubber filtering media

可以认为,对于 ≥ 5 mm 金属橡胶过滤元件,其最大孔径不受厚度影响。

4 结 论

1) 金属橡胶过滤材料的最大孔径随着孔隙率增大而非线性增大。

2) 对于厚度 ≥ 5 mm 的金属橡胶试件,其最大孔径不受试件厚度影响。

3) 在对金属橡胶微观孔隙结构一定简化的基础上,运用统计学方法推导出的最大孔径理论公式,能准确地反映出金属橡胶过滤材料最大孔径的影响因素及其相互关系,并为气泡试验孔径测定法所证实。

参考文献 References

[1] Чегодаев Д Е Translated by Li Zhongying(李中郢). *Design of Metal Rubber Component*(金属橡胶构件的设计)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000

[2] Jiang Hongyuan(姜洪源), Ao Hongrui(敖宏瑞), Xia Yuhong(夏宇宏) *et al. Machinery Design & Manufacture*(机械设计与制造)[J], 2001(2): 85

[3] Wang Zhi(王志), Liao Jichang(廖际常), Han Xueyi(韩学义). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1997, 26(4): 49

[4] Qiu Keang(丘可昂). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 1990, 19(2): 51

[5] Lin Jianzhong(林建忠), Ruan Xiaodong(阮晓东) *et al. Hydrodynamics*(流体力学)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005

[6] GB5249-85[S]. 1985

[7] Liu Peisheng(刘培生), Ma Xiaoming(马晓明). *Detection*

Method of Porous Body(多孔材料检测方法)[M]. Beijing:

Metallurgical Industry Press, 2006

Research on Maximal Pore Size of 0Cr18Ni9Ti Metal Rubber Filtering Material

Jiang Hongyuan¹, Guo Yadong¹, Chen Zhaobo¹, A. И. Белоусов²

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(2. Samara State Aerospace University, Samara 443086, Russia)

Abstract: With reasonable simplification on microcosmic pore structures of metal rubber filtering materials, theoretical formula describing maximum pore size of metal rubber filtering material is derived by statistics and is verified by bubble test pore size determination method. Results illustrate that the formula perfectly reflects influencing factors on maximum pore size of metal rubber filtering material and their interrelation, which will provide reliable foundation in theory for metal rubber filter.

Key words: maximal pore size; metal rubber; filtering material

Biography: Jiang Hongyuan, Ph. D., Professor, School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, Tel: 0086-451-86418028, E-mail: guoyd98@163.com