

# 多孔材料气体渗透性的测定

李忠全\* 周桂芬 陈木兰

(冶金部钢铁研究总院,北京 100081)

**摘要** 论述了多孔材料气体渗透性的测量方法、测试仪器和数据处理过程。研究了实验数据与佛切迈尔(Forcheimer)流量方程的吻合性。

**关键词** 多孔材料 渗透性

## 1 前言

多孔材料的材质种类繁多,有金属、陶瓷、塑料和玻璃等。应用范围极其广泛,已在冶金、石油、化工、纺织、医药和酿造等国民经济部门及国防军工部门广泛用于过滤、分离和防爆等方面。流体透过多孔材料的能力称为渗透性,该性能是多孔材料的设计、制造工艺和使用的重要参考数据。流体透过多孔材料的能力与流体的种类和运动状态有关,本文主要描述气体在粘子流条件下透过多孔材料的能力。在多数情况下,选用气体作为试验流体,。而用液体有许多困难:如液体中含有固体小颗粒,使渗透性发生变化;孔中含有气体,导致“气体固锁”;某些材料可能对某些液体有吸附作用,使孔尺寸趋于减小等等。同时,采用液体费用高而且脏。流体的流动有分子流和粘子流,而粘子流又分为层流和紊流,每个状态之间都有过渡流。通常把分子流与层流之间的流动称作滑动流动。实验时,尽量控制在层流状态,在此状态下,流量与压差呈线性关系,从而简化了数据处理过程。但有时,试验也不可避免地要在层流与紊流的过渡状态下进行。为此,本文重点描述了在这一

状态下渗透性的测定,把层流和紊流两种流动状态结合在一起,用两个渗透系数,即粘性渗透系数和惯性渗透系数来表征多孔体透过流体的能力<sup>(1)</sup>,这更接近多孔材料的实际应用条件。

## 2 原理

经验证明,在大多数情况下,流体透过多孔材料的流动涉及到3种主要机理,即粘性流动、惯性流动和滑动流动。

当多孔材料孔尺寸比气体平均自由路程大得多时,流动为粘性流动。达西首先提出了流体透过多孔材料的经验公式:

$$\frac{\Delta P}{E} = \frac{Q\eta}{A\psi_v} \quad (1)$$

式中 $\Delta P$ ——试样前后压力差,Pa

$E$ ——在流体流动方向试样尺寸,m

$Q$ ——在平均压力下的气体流量, $m^3/s$

$\eta$ ——流体的粘滞系数, $N \cdot S/m^2$

$A$ ——垂直于流体流动方向的有效试验面积, $m^2$

$\psi_v$ ——粘性渗透系数, $m^2$

$$\text{即} \quad \psi_v = \frac{QE\eta}{A\Delta P} \quad (2)$$

当流体在较高的压力和流速下通过多孔

\* 李忠全,高级工程师,国家钢铁质检中心粉末室主任  
 收稿日期:1995. 4. 13

材料时,孔中出现局部紊流。由于局部的紊流和流体通过曲折孔流动时方向的变化引起能量损失,此时,压差与流量不再是线性关系,达西定律不完全适用了。佛切迈尔(Forcheimar)对达西定律进行了修正,提出了如下方程:

$$\frac{\Delta P}{E} = \frac{Q\eta}{A\psi_v} + \frac{Q^2\rho}{A^2\psi_i} \quad (3)$$

式中  $\psi_i$ ——惯性渗透系数, m

$\rho$ ——在平均温度和压力下流体的密度, kg/m<sup>3</sup>

式(3)两边同时乘以  $A/\eta/Q$  得方程(4):

$$\frac{\Delta PA}{EQ\eta} = \frac{1}{\psi_i} \frac{Q\rho}{A\eta} + \frac{1}{\psi_v} \quad (4)$$

$$\text{令 } Y = \frac{\Delta PA}{EQ\eta}, \quad X = \frac{Q\rho}{A\eta}$$

便可得到一条斜率为  $1/\psi_v$  (用  $M$  表示), 截距为  $1/\psi_i$  (用  $B$  表示) 的直线方程,  $Y = MX + B$  如图 1 所示。

由一系列的  $Y$  和  $X$  对应值的线性图或最小二乘法求出斜率  $M$  和截距  $B$ , 再由(5)式和(6)式求出粘性渗透系数  $\psi_v$  和惯性渗透系数  $\psi_i$  值。

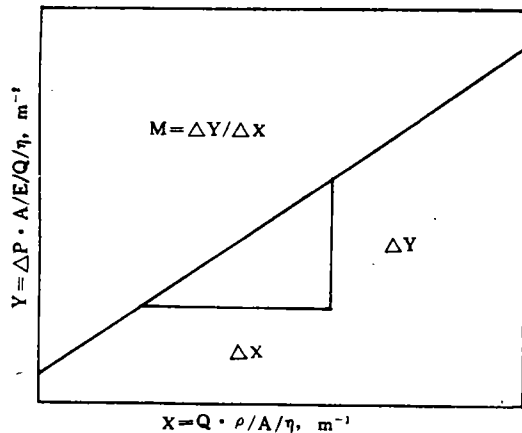


图 1 渗透性曲线

Fig. 1 Permeability curve

$$\psi_v = \frac{1}{B} \quad (5)$$

$$\psi_i = \frac{1}{M} \quad (6)$$

在较低流动速率( $Q/A$ )的情况下,即在纯粘性流动状态下,惯性项与粘性项相比,通常是不重要的,可以忽略。此时,只需要计算粘性渗透系数,可由(2)式直接求出。

在很低的压力和流速下,即孔的尺寸与气体分子自由路程在相同数量级时,产生滑动流动。而在很高的压力和流速下,即雷诺数大于 200 时,产生湍流。在这两种流动状态下,上述的方程都不适用,本文不讨论这两种情况下的气体流动。测量时,可通过调整压差与流量,尽量避开这两种流动状态。

### 3 实验装置

实验装置主要由流量计、压力计和样品室等主要部件构成,其气路系统如图 2 所示。图 2 中所示样品室适用于片状样品,而管状样品采用图 3 所示样品室。

#### 3.1 流量计

通常选用转子流量计。流量计的个数和量程应根据样品的透气性确定,一般选用 3 个具有不同量程的彼此衔接的流量计。

#### 3.2 样品室

通常有两种样品,即片状样品和管状样品。片状样品选用图 2 中所示样品室。管状样品选用图 3 所示样品室。

#### 3.3 压差计

本测量装置气体经样品流出直接进入大气中,即样品出口为大气压,样品前的相对压力也就是气体经样品前后的压力差。本仪器通常安装两个压力计和一个 U 形管压差计,其量程在 0~0.4MPa 范围内。

测量时,把样品夹在样品室(见图 2 和图 3)内。气体,通常采用空气或氮气,从气源通过流量计 1 进入样品室 2,经样品 4 流到大气中。通过一系列的测量,分别记录下相应的

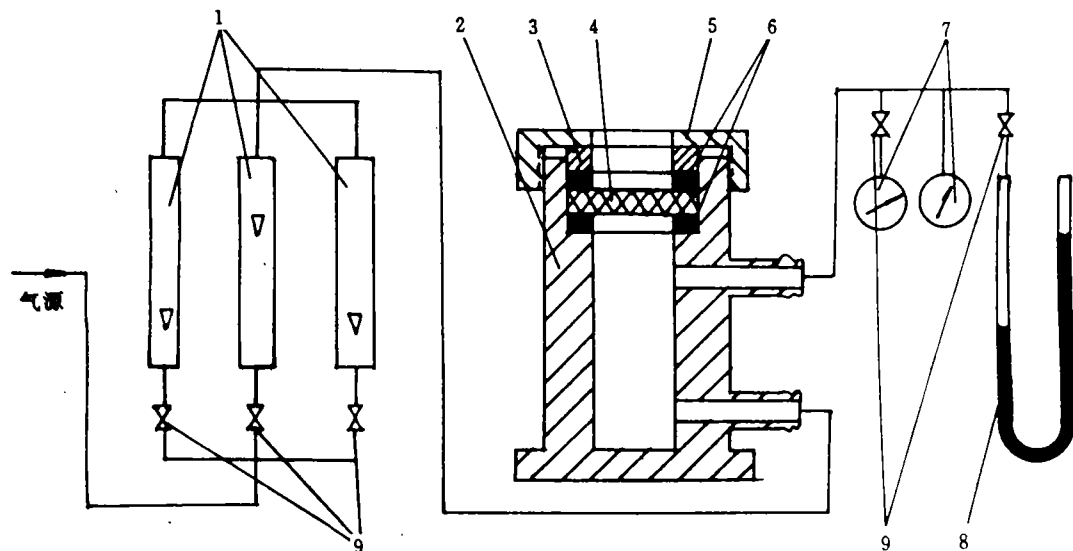


图 2 测量仪气路流程图

Fig. 2 Gas flow chart for the measuring apparatus

1. 流量计 2. 样品室 3. 压头 4. 样品 5. 压盖 6. 密封垫 7. 压力计 8. U形管压差计 9. 阀门

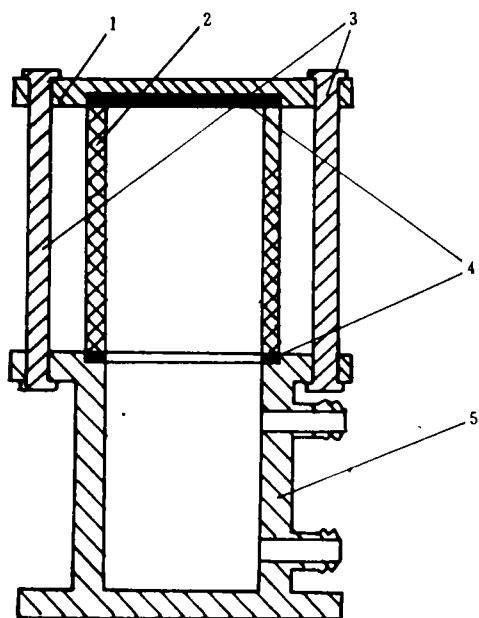


图 3 管状样品室

Fig. 3 Sample cell for hollow cylindrical test pieces

1. 压盖 2. 管状样品 3. 连接杆 4. 密封垫 5. 小室腔

压力和流量值。样品夹在样品室中时,应保证样品的气密性,并要防止过流产生。对应的压力和流量测量点至少取 5 个,并应使得最高流量和最低流量比尽可能地大。

#### 4 数据处理和实验结果

由所测得的压力值和对应的流量值,根据方程(2)或方程(4)进行数据处理。

首先测量样品的几何尺寸和有关参数,即样品的厚度  $E$  和有效的试验面积  $A$ 。对于管状样品,试样厚度  $E$  和有效面积  $A$  应由下式求出:

$$E = \frac{D \cdot (\ln r)^2}{2(r-1)} \quad (7)$$

$$A = \frac{\pi D L \ln r}{r-1} \quad (8)$$

式中  $r$ ——管子的外径  $D$  和内径  $d$  之比值,  
即  $r = D/d$

$L$ ——管子有效长度,  $m$

当壁厚 $(D-d)/2$ 与 $d$ 相比很小时,例如小于 $0.1d$ 时,厚度 $E$ 和有效试验面积 $A$ 可近似地由下式给出:

$$E = \frac{D-d}{2} \quad (9)$$

$$A = \frac{\pi(D+d)L}{2} \quad (10)$$

根据方程(4)处理的一个典型试样的计算实例如表1和图4所示。

T-1#等11个样品,由方程(4)计算的渗透率测试结果列于表2中。

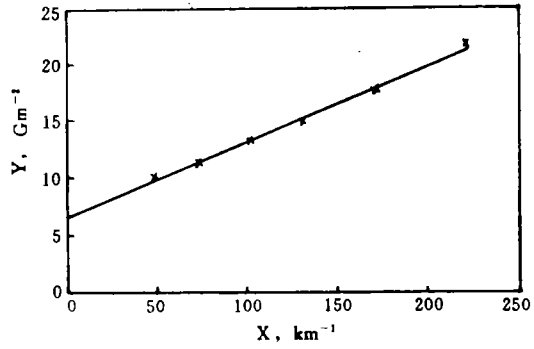


图4 94-19#样品渗透性试验曲线

Fig. 4 The experimental curve of permeability for sample 94-19#

表1 94-19#样品渗透性试验结果

Table 1 The testing results of permeability for sample 94-19#

试样厚度(E): $8.6 \times 10^{-4}m$		有效面积(A): $3.801 \times 10^{-4}m^2$		
环境温度: $19^\circ C$		大气压力: $1.027 \times 10^5 Pa$		
No	压差, Pa	流量, $m^3/s$	X, $m^{-1}$	Y, $m^{-2}$
1	112.7	$0.28 \times 10^{-3}$	$4.845 \times 10^4$	$1.016 \times 10^{10}$
2	189.6	$0.42 \times 10^{-3}$	$7.272 \times 10^4$	$1.139 \times 10^{10}$
3	307.4	$0.58 \times 10^{-3}$	$10.193 \times 10^4$	$1.318 \times 10^{10}$
4	445.8	$0.75 \times 10^{-3}$	$13.123 \times 10^4$	$1.486 \times 10^{10}$
5	686.6	$0.97 \times 10^{-3}$	$17.051 \times 10^4$	$1.763 \times 10^{10}$
6	1086.3	$1.25 \times 10^{-3}$	$22.008 \times 10^4$	$2.165 \times 10^{10}$
M = $6.669 \times 10^4 m$ $\psi v = 153.1 \times 10^{-6} m^2$ B = $6.531 \times 10^9 m^2$ $\psi i = 14.99 \times 10^{-6} m$				

表2 佛切迈尔公式计算的渗透系数

Table 2 Permeability data given by Forchheimer equation

样品编号	几何尺寸		测试条件		渗透系数	
	厚度 E cm	有效面积 A $cm^2$	室温 $^\circ C$	大气压 $\times 10^5 Pa$	粘性 $\psi_i \times 10^{-12} m^2$	惯性 $\psi_v \times 10^{-6} m$
T-1#	0.075	7.069	19.0	1.027	1.40	0.986
SH-5#	0.185	9.076	15.5	1.027	24.46	1.523
CH-1#	0.060	3.801	17.5	1.031	30.66	27.951
32#	0.040	3.801	17.5	1.031	31.86	11.611
SH-2#	0.326	21.880	15.5	1.027	34.15	1.818
SH-1#	0.326	21.880	15.5	1.027	48.13	1.656
95W-2#	0.138	19.630	19.0	1.022	49.11	1.988
21#	0.780	7.069	19.0	1.027	70.30	6.336
HN-B1#	0.076	3.801	17.5	1.031	80.02	22.189
95W-3#	0.149	19.630	19.0	1.022	95.45	5.029
94-19#	0.086	3.801	19.0	1.027	153.11	14.994

## 5 讨论

### 5.1 样品

WB-21<sup>#</sup>、CH-10<sup>#</sup>、NH-32<sup>#</sup>和94-19<sup>#</sup>4个样品的渗透率试验曲线如图5所示。WB-21<sup>#</sup>为不锈钢管状样品,用一般的压制烧结方法制成。其余3个为片状样品,其中CH-10<sup>#</sup>和NH-32<sup>#</sup>由金属纤维制成,94-19<sup>#</sup>样品由金属丝网压制成的。图中曲线是依据方程(4)绘制的,4个样品的所有试验点几乎都落在曲线上,数据点吻合很好。实验结果表明不同形状的样品以及不同工艺条件下制成的样品都获得了比较好的测试结果。

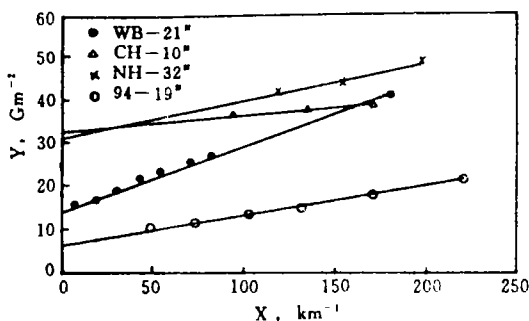


图5 渗透性试验曲线

Fig. 5 The testing curve of permeability

### 5.2 数据处理方法

由达西公式(2)求出的两个样品的渗透系数测试结果列于表3中。94-19<sup>#</sup>样品的测试结果表明,当流速较高时,所测结果受压差的影响很大,不同的压差下得到不同的测试结果。而由佛切迈尔公式(4)求出的两个渗透系数,即粘性渗透系数和惯性渗透系数(见表1),在较高的流速下,其结果也不受压差的影响,得出唯一的渗透系数值。

但是,对于孔径比较小的样品,例如T-1<sup>#</sup>样品,在较高的压差下,由达西公式(2)求出的渗透系数,其结果也不受压差的影响。此时流动状态为单一的粘性流(层流),在这种

情况下,采用达西公式处理数据,大大简化了测试过程。为此,本文推荐对于这类样品尽可能采用达西公式处理数据。

表3 达西公式计算的渗透率

Table 3 Permeability data given by Darcy equation

样品	试验点 No	压差 $\Delta P$ Pa	流量 Q $m^3/h$	渗透系数 $\mu \times 10^{-12} m^2$
94-19 <sup>#</sup>	1	112.7	1.0	98.4
	2	189.6	1.5	27.8
	3	307.4	2.1	75.9
	4	445.8	2.7	67.3
	5	586.6	3.5	56.7
	6	1086	4.5	56.2
T-1 <sup>#</sup>	1	230.6	0.063	1.42
	2	520.0	0.154	1.39
	3	1019.7	0.272	1.39
	4	1429.8	0.350	1.38
	5	1829.3	0.479	1.39
	6	3043.6	0.799	1.39

### 5.3 实验数据与佛切迈尔方程的吻合性

通过把流量有理化到大气状态(接近标准状态)下的处理,变换方程(3)得到一个较实际的方程(11)。

$$\frac{\Delta P}{E} = \frac{P_A Q}{\bar{P}} \cdot \frac{\eta}{A^2 \psi_s} + \frac{P_A^2 Q^2}{\bar{P}^2} + \frac{\rho}{A^2 \psi_s} \quad (11)$$

式中  $P_A$ ——大气压力, Pa

$\bar{P}$ ——试样前后平均压力, Pa

再变换方程(11),便可得到一个更加实际的方程(12)。

$$AIQ^2 + BIQ - \frac{(\Delta P)^2 + 2P_A \Delta P}{2EP_A} \quad (12)$$

式中  $AI$ ——系数,  $AI = 273\rho_0 / [A^2 \psi_s (273 + t)]$

$BI$ ——系数,  $BI = \eta / A^2 \psi_s$

$\rho_0$ ——试验气体在标准状态下的密度,  $kg/m^3$

$t$ ——试验环境温度,  $^{\circ}C$

由方程(12)可得到一条流量随压差变化的曲线。94-19<sup>#</sup>等6个样品由方程(12)求出的压力-流量曲线和试验数据点绘于图6中,从图中可以看出试验数据与理论曲线是比较吻合的。

由于受到仪器量程的限制,测量很高的压力和流量是困难的。但是,通过在可测量的压力和流量范围内,测量出两个渗透系数,再由方程(12)求出一条理论的压力-流量曲线,便可推算出更高压力下的流量值,这是很有意义的,当然这种推断也不是无限制的。

R. M. German<sup>(2)</sup>用几种不同气体反复证明,流速在  $0.1 \sim 20 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$  范围内,方程(12)是最符合的。

### 6 结论

(1) 对于孔径不太大的样品,为了简化测试方法和数据处理过程,尽可能采用达西公式处理数据,只用粘性渗透系数来表征样品的渗透性能。

(2) 对于大孔径的样品,不可避免地会产生惯性流动,此时达西公式不再适用了,应采用佛切迈尔公式处理数据,由两个渗透系数,即粘性渗透系数和惯性渗透系数来表征样品的渗透性能。

(3) 由佛切迈尔公式求出的粘性渗透系数和惯性渗透系数所得流量方程,在很宽的压差范围内与试验数据吻合得比较好。从而可以推断出流体在更高的压差下通过样品的流量,这很有实际意义。

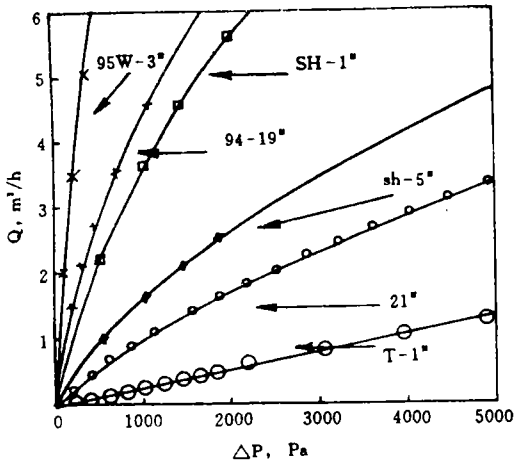


图 6 压差-流量曲线

Fig. 6 The curve of pressure drop vers volumetric flow rate

### 7 参考文献

- 1 ISO 4022. Permeable sintered metal materials——Determcnation of fluid permeability. 1977
- 2 R M German. In ter J Powder Met powder Tech, 1979, 15(1):23~30

## DETERMINATION OF GAS PERMEABILITY OF POROUS MATERIALS

Li Zhongquan, Zhou Guifen and Chen Mulan

(Central Iron and steel Reseacch Institute, Beijing 100081)

**Abstract** The measuring method, measuring instrument and its data treating process of gas permeability of porous materials have been described. The coincidence of experimental data with Forchheimer flow equation has been studied.

**Key words** permeability porous material