

粉末冶金

多孔材料

下 册

冶金工业出版社

粉末冶金多孔材料

下 册

宝鸡有色金属研究所 编著

冶金工业出版社

内 容 提 要

《粉末冶金多孔材料》(下册)系统地叙述了粉末冶金多孔材料的性能及其检测,包括粉末冶金多孔材料的孔隙特性、透过性能及其它性能;详细地介绍了粉末冶金多孔材料的应用,包括粉末冶金过滤器的典型结构及其在气-固、固-液、气-液与液-液、气-气分离中的应用以及粉末冶金多孔材料在其它领域中的应用。

本书可供从事粉末冶金生产及使用粉末冶金多孔材料制品的技术人员、工人阅读。

粉末冶金多孔材料

下 册

宝鸡有色金属研究所 编著

*

冶金工业出版社出版

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 6 1/2 字数 170 千字

1979年4月第一版 1979年4月第一次印刷

印数 00,001~10,600 册

统一书号: 15062·3409 定价(科三) 0.65 元

前 言

粉末冶金多孔材料是用粉末冶金工艺制得的多孔金属或多孔合金，它既具有普通多孔体因多孔而具备的特性，又具有一定的金属特性，是多孔材料中的一大类别。粉末冶金多孔材料已在冶金、石油、化工、纺织、医药、酿造等国民经济部门以及国防军工部门得到了广泛的应用。

为了适应冶金工业发展的需要，满足粉末冶金多孔材料使用部门的要求，我们在总结粉末冶金多孔材料生产经验的基础上，参考了国外近年来书刊上发表的资料，编写了《粉末冶金多孔材料》一书，供有关技术人员、工人阅读，以期对促进我国粉末冶金工业的发展有所裨益。

书中较系统地叙述了粉末冶金多孔材料的性能、制造工艺、检验方法及其应用。全书包括三篇，分上、下两册出版。上册为第一篇“粉末冶金多孔材料制造工艺”；下册为第二篇“粉末冶金多孔材料的性能及其检测”和第三篇“粉末冶金多孔材料的应用”。

参加本书编写工作的有廖际常、张振德、梅寅年及王世杰同志。

在编写过程中，承蒙冶金工业部钢铁研究院、中南矿冶学院等兄弟单位的具体指导与大力协助，在此表示衷心感谢！

由于我们水平有限，书中可能存在不少缺点，恳请读者批评指正。

编 者

一九七七年十月

目 录

第二篇 粉末冶金多孔材料的性能及其检测

第六章 粉末冶金多孔材料的孔隙特性	1
第一节 多孔材料的孔隙及其测定.....	2
第二节 多孔材料的比表面积测定.....	6
第三节 汞压入法测定多孔材料的孔隙特性.....	10
第四节 透过法计算多孔材料的有效平均孔径.....	22
第五节 冒泡法测定最大孔径及其分布.....	24
第六节 关于过滤精度问题.....	26
第七节 悬浊液过滤法测定孔径分布.....	27
第七章 粉末冶金多孔材料的透过性能	34
第一节 层流条件下流体的透过性能.....	34
第二节 流体透过多孔材料时的雷诺准数.....	37
第三节 气体透过多孔材料时的透气系数.....	40
第四节 关于透过系数计算的问题.....	44
第五节 液体透过多孔材料时的渗透系数测定.....	45
第六节 液体透过多孔材料时的某些特性.....	49
第七节 影响透过性能的若干因素.....	51
第八章 粉末冶金多孔材料的其它性能	58
第一节 机械性能.....	58
第二节 物理性能.....	66
第三节 耐腐蚀性能及电化学性能.....	69

第三篇 粉末冶金多孔材料的应用

第九章 粉末冶金过滤器	81
--------------------------	----

第一节	粉末冶金过滤元件的一般特性·····	81
第二节	粉末冶金过滤器的典型结构·····	101
第三节	气-固分离·····	107
第四节	液-固分离·····	119
第五节	气-液与液-液分离·····	137
第六节	气-气分离·····	141
第十章	粉末冶金多孔材料在其它领域中的应用·····	144
第一节	流体分布元件——均匀分布气体与液体·····	144
第二节	多孔电极与催化剂·····	151
第三节	热交换材料·····	165
第四节	火焰阻止器·····	174
第五节	声阻及消音元件·····	178
第六节	测量装置上的控制与缓冲元件·····	183
第七节	离化器·····	187
第八节	其它·····	191
	比较与展望·····	197

第二篇 粉末冶金多孔材料的 性能及其检测

多孔材料的材质种类繁多，应用范围极其广泛，结构和使用特性涉及到很多方面，并且由于使用目的不同，对材料的性能要求及其表征形式亦各异，因此，在研究多孔材料性能时，了解其检测方法就显得必要了。

目前对于多孔材料的一个重要分支——粉末冶金多孔材料来说，即使是描述同一种性能，由于检测方法和表征形式的不同而导致测试结果具有很大的差异。这种情况反映了测试工作还处在逐渐发展和日趋完善的阶段，也说明检测方法及表征形式有逐步统一的必要。

这里仅对多孔材料最一般的结构特性及其检测加以说明，而在应用特性方面只重点讨论粉末冶金多孔过滤材料。

第六章 粉末冶金多孔材料的孔隙特性

一般多孔材料系指孔隙度约在15%以上的材料。由于大量孔隙的存在，使得它在性能方面与材质相同的致密材料有着很大的差别。例如，较高的孔隙度将导致机械强度、导热、导电与耐腐蚀等性能的下降。然而，多孔材料之所以有广泛的用途也正是由于孔隙的存在。孔隙特性是多孔材料的基本特性之一。可以说，多孔材料的其它若干重要性能都直接或间接的与其孔隙特性相关。甚至一些性能还可以表示为孔隙度的某种函数。因此，正确地测定孔隙度是分析多孔材料性能的重要手段之一。

大量孔隙的存在使多孔材料具有巨大比表面积，尤其是由极细粉末制成的多孔材料。例如，多孔电极、电解质电容器、吸附

剂、催化剂等多孔材料，它们都具有很大的比表面积，而且比表面积大小往往是决定它们使用性能的重要指标。

测定比表面积的方法很多，对多孔材料比较常用的有透过法、气体吸附法，其中特别是B.E.T法。尽管B.E.T理论目前尚有各种说法，但氮吸附法仍被认为是一种经典的方法。

对于多孔材料孔隙结构——孔径及其分布的研究，也是了解材料物理化学性能、使用性能以及机械性能必不可少的。

由于多孔材料材质种类繁多，孔径的分布范围也相当宽，应用方面又各不相同，因此，选择什么样的方法来表征孔径与孔径分布较为合适是值得注意的。

从孔径研究的一般性说，目前还很难说哪一个方法较为理想。因此，对于孔隙结构复杂的材料，往往把几种方法综合起来进行分析研究。

测定孔径的主要方法有：汞压入法、冒泡法、透过法、悬浊液过滤法、吸附法、逆扩散法、X-射线小角度衍射法、电子显微镜直接透射法等等。本书主要介绍测定粉末冶金多孔材料孔径常用的几种方法。

第一节 多孔材料的孔隙及其测定

一、孔形态与孔隙度、密度

多孔材料的密度与孔隙度是相互关联的。为了表征孔形态特点，引进一个最简单的多孔体模型

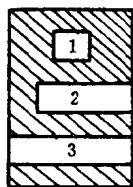


图 6—1 多孔体模型

1—闭孔；2—半通孔；

3—贯通孔

点，引进一个最简单的多孔体模型（图6—1）。多孔体的表观体积用 $V_{表}$ 表示，多孔体内部有与多孔体外表面不连通的闭孔，其体积用 $V_{闭}$ 表示。多孔体内部与外表面相连通的开孔体积用 $V_{开}$ 表示。开孔又可分为连通多孔体两个平行表面的贯通孔和只与一个侧面相通的半通孔两种。

对于过滤元件，贯通孔是有效的；对于含油轴承和发汗冷却

材料，开孔则是有直接意义的；但对隔热元件来说，全部孔隙都是有用的。

通常把开孔体积对表观体积之比的百分数叫做开孔孔隙度，简称开孔隙度；同样，把闭孔体积对表观体积之比的百分数叫做闭孔隙度；两者之和叫做总孔隙度。但在很多场合下只要预先没有指明，往往把开孔隙度叫做孔隙度〔1〕。

与孔隙度相应的多孔材料的密度（或相应的比重）也有三种：相应于孔隙度为零的理论密度 $\rho_{理}$ （理论比重 $\gamma_{理}$ ）；包括全部孔隙在内对整个多孔体表观体积来说的表观密度 $\rho_{表}$ （表观比重 $\gamma_{表}$ ）和只包含闭孔隙在内的真密度 $\rho_{真}$ （真比重 $\gamma_{真}$ ）。密度的单位为克/厘米³。并且：

$$\rho_{理} > \rho_{真} > \rho_{表}$$

一般地说，多孔体密度系指表观密度。

相对密度 τ 也是常用的概念，其值为表观密度 $\rho_{表}$ 与理论密度 $\rho_{理}$ 的比，即：

$$\tau = \frac{\rho_{表}}{\rho_{理}} \quad (6-1)$$

二、液体静力平衡法测定孔隙度及密度

在液体中用静力平衡法测定多孔材料的孔隙度和密度已是成熟的方法。很多国家都有标准，其内容也都大同小异。

这里介绍一下真空浸渍法。

首先将清洗干净的试样在空气中称得重量 G_1 。然后在真空状态下，将试样浸入约100°C的石蜡-泵油的混合介质中，使介质浸渍到开孔里，直到试样周围不再冒泡全部开孔为介质饱和为止。将浸渍介质温度降至60~70°C（略高于介质熔点），取出试样放入沸水中充分洗涤，除去表面多余的介质。然后用预先为蒸馏水润湿过的滤纸把试样表面上的水珠吸掉，称重得 G_2 ；再将试样放在蒸馏水中称重得 G_3 。最后按下列各式求出孔隙度与密度。

开孔隙度 $e_{开}$ 为：

$$\varepsilon_{\text{开}} = \frac{(G_2 - G_1)\rho_1}{(G_2 - G_3)\rho_2} \quad (6-2)$$

总孔隙度 $\varepsilon_{\text{总}}$ 为:

$$\varepsilon_{\text{总}} = 1 - \frac{G_1\rho_1}{(G_2 - G_3)\rho_{\text{理}}} \quad (6-3)$$

闭孔隙度 $\varepsilon_{\text{闭}}$ 为:

$$\varepsilon_{\text{闭}} = \varepsilon_{\text{总}} - \varepsilon_{\text{开}} \quad (6-4)$$

而多孔体的表观密度 $\rho_{\text{表}}$ 为:

$$\rho_{\text{表}} = \frac{G_1\rho_1}{G_2 - G_3} \quad (6-5)$$

式中 ρ_1 ——测试温度下蒸馏水的密度;

ρ_2 ——水沸点下的石蜡-泵油介质的密度;

$\rho_{\text{理}}$ ——该材料的理论密度。

上述方法对一般多孔材料的测定可以得到满意的结果。其主要优点是表观体积测定比较准确，且操作简便。

一般常用的浸渍介质有：经过除气的油，二甲苯和苯甲醇。文献[2]指出，应用具有小蒸气压和稳定密度的苯甲醇时，可以得到良好的结果。但用浸渍法测定开孔隙度时，液体分子不可能浸渍到所有的孔隙中去，特别是窄缝部分更是如此，导致部分开孔隙会被当作闭孔隙处理。

三、漂浮法测定低孔隙度试样的密度和孔隙度^[3]

漂浮法测定多孔材料的密度和孔隙度的精度比真空浸渍法为高，其测定偏差可以控制在 0.1% 以下，特别是对低孔隙度（即高相对密度）烧结制品密度和孔隙度的测定更为适用。

漂浮法是基于下面的原理：

假若将一试样与一浮体组成一个系统，并且将此系统置于液体（例如水）中，如果此系统的密度恰与此时液体的密度相等，那么系统将静止在水中不动；相反如果此系统的密度比液体的密度大（或小），则系统将下沉（或上升）。由于系统对浮力的微小差异也就是对液体密度的微小变化非常敏感，这就使测定具

有很高的灵敏性。同时由于液体的密度又随温度而精确地变化着，因此只要能准确地知道该液体在那种温度下的密度，就可以精确地得出系统的密度来。

实测中，首先将一基准的已知密度的试样与浮体组成这种系统，使之产生漂浮，然后将欲测密度的试样代替基准试样，也使之产生漂浮。通过比较就可以求出未知试样的密度和孔隙度。

其计算方法也很简单。假设对一个常温下发生漂浮的系统，分别以 $M_{\text{样}}$ 、 $M_{\text{基}}$ 和 $M_{\text{浮}}$ 代表未知试样、基准试样和浮体的质量；以 $\rho_{\text{样}}$ 、 $\rho_{\text{基}}$ 、 $\rho_{\text{浮}}$ 和 $\rho_{\text{水}}$ 分别代表未知试样、基准试样、浮体和水的密度；以 $V_{\text{样}}$ 和 $V_{\text{基}}$ 分别代表未知试样加浮体与基准试样加浮体的体积和。则当基准试样与浮体一起发生漂浮时有下面关系：

$$\frac{M_{\text{基}}}{\rho_{\text{基}}} + \frac{M_{\text{浮}}}{\rho_{\text{浮}}} = V_{\text{基}}$$

而
$$V_{\text{基}} = \frac{M_{\text{基}} + M_{\text{浮}}}{\rho_{\text{水}}}$$

故
$$\frac{M_{\text{基}}}{\rho_{\text{基}}} + \frac{M_{\text{浮}}}{\rho_{\text{浮}}} = \frac{M_{\text{基}} + M_{\text{浮}}}{\rho_{\text{水}}} \quad (6-6)$$

同样对于未知试样也有类似的关系：

$$\frac{M_{\text{样}}}{\rho_{\text{样}}} + \frac{M_{\text{浮}}}{\rho_{\text{浮}}} = V_{\text{样}}$$

$$V_{\text{样}} = \frac{M_{\text{样}} + M_{\text{浮}}}{\rho_{\text{水}}}$$

$$\frac{M_{\text{样}}}{\rho_{\text{样}}} + \frac{M_{\text{浮}}}{\rho_{\text{浮}}} = \frac{M_{\text{样}} + M_{\text{浮}}}{\rho_{\text{水}}} \quad (6-7)$$

由公式(6-6)、(6-7)可得：

$$\rho_{\text{样}} = \frac{M_{\text{样}} \rho_{\text{水}} \rho_{\text{基}}}{M_{\text{样}} \rho_{\text{基}} + M_{\text{基}} (\rho_{\text{水}} - \rho_{\text{基}})} \quad (6-8)$$

通过此式可以求得未知试样的密度。

如果基准试样为同质料的致密材料，则孔隙度可以表示如下：

$$\varepsilon_{\text{总}} = \frac{(M_{\text{基}} - M_{\text{样}}) (\rho_{\text{水}} - \rho_{\text{基}})}{M_{\text{样}} \rho_{\text{基}} + M_{\text{基}} (\rho_{\text{水}} - \rho_{\text{基}})} \quad (6-9)$$

测试中只要仔细地将试样的质量调整适宜，并适当地调节水温即可发生漂浮现象。如果事先已经求得基准试样的质量与漂浮温度的关系，那么，可以根据实测试样发生漂浮时的温度，找出对应着基准试样的质量，代入公式中即可计算。

这种方法对较高孔隙度的试样只要用一涂层将试样包涂起来也可适用。

第二节 多孔材料的比表面积测定

一、B.E.T法测定比表面积

B.E.T理论是1938年勃鲁纳尔 (Brunauer)、爱梅特 (Emmett) 和泰勒 (Teller) [4] 将朗格缪尔 (Langmuir) 的单分子层吸附理论加以推广，并考虑到在吸附分子上的继续吸附而得出的多分子层吸附理论 (简称B.E.T理论)。它不仅有理论上的意义，而且也提出了测定固体表面积的方法。目前广泛采用在液氮或液态空气温度下的吸附是为了避免化学吸附的干扰。

关于B.E.T理论的推导过程可参考文献 [5]。

实验时首先测出吸附量，并使用如下的B.E.T公式：

$$\frac{x}{v(1-x)} = \frac{1}{v_m c} + \frac{c-1}{v_m c} x \quad (6-10)$$

式中 x —— 吸附气体的相对压力；

v —— 平衡时的吸附量；

v_m —— 相应于表面积为 S 的单分子层吸附量；

c —— 常数。

为了求得 v_m ，以 $x/v(1-x)$ 作纵轴，以 x 作横轴，绘B.E.T图。求出此直线的截距 $I (=1/v_m c)$ 和斜率 $L [(c-1)/v_m c]$ 后，即可算出 v_m ：

$$v_m = \frac{1}{I + L} \quad (6-11)$$

许多实验证明，当相对压力 x 在0.05~0.35之间时，公式与实际很好吻合。为了求得表面积，只要在此压力范围内测定几个

点即可。为了节省作业时间，也可采用所谓“一点法”，即测定相对压力约为0.3左右的一个实验点与B.E.T图之原点连成直线，作图计算表面积。此法的根据是：因为用氮作吸附质时，一般截距（ I ）都很小，接近B.E.T图之原点。因此以原点代替，在 $x \approx 0.3$ 附近测定一点，将此点与原点连线（所引起的误差不大），再取其斜率〔由公式（6—11）〕的倒数即为 v_m 。一点法与详细实验所得到的结果比较，一般误差不超过5%〔5〕。

若吸附量 v_m 已经求得，且为在0°C及1大气压下的体积（毫升）数，则只要知道表面上每个分子所占的横断面积，即可按下式计算表面积 S ：

$$S = A_m \frac{N v_m}{22400} \quad (6-12)$$

式中 N ——阿佛加德罗常数；

A_m ——一个吸附分子的横断面积。

具有代表性的几种吸附物的分子横断面列于表6—1。

表 6—1 吸附物的分子横断面积〔1〕

气体种类	N ₂		Ar	Kr	CO	CO ₂	O ₂	CH ₄	NH ₃	正-C ₄ H ₁₀	H ₂ O
温度(°C)	-196	-183	-183	-196	-183	-78	-183	-183	-36	0	25
饱和蒸气压 (毫米汞柱)	760	2700	250	3	1900	1000	760	82	660	810	24
分子横断面积 (Å ²)	16.2	17.0	14.4	20.8	16.3	19.5	14.6	16.0	12.9	32.1 ^①	10.8

① 文献〔5〕中曾经说明，对于使用象正丁烷这样的吸附物，为了得到和吸附氮所得的结果一样， A_m 值不能按密堆积形式计算，而应采用46.9 Å²或49 Å²，以及其它经验数据。

假若分子以密堆积排列，并且具有其液体的密度，则对广泛使用的氮在-196°C下 A_m 为16.2 Å²。因此有：

$$S(\text{米}^2) = 4.35 v_m(0^\circ\text{C}, 1 \text{ 大气压下的毫升数}) \quad (6-13)$$

这就是氮吸附法测定表面积的具体计算公式。进而可以求得比表

面积。

重要的吸附装置有采用容量法的，也有采用重量法的。前者为吸附达到平衡后，对未被吸附的残留气体的压力和体积进行测定。这里又分为气体的体积保持一定，测定压力变化的恒容法和气体的压力保持一定，测定体积变化的恒压法。B.E.T 法测定时，所需仪器复杂，接触大量汞、操作和计算也较烦琐。为克服上述缺点已出现电子吸附天平自动化仪器。值得提出的还有用气相色谱法测定吸附量的仪器。这种仪器是把氮-氮混合气体流过试样，为试样所吸附的氮通过热导池作检测元件，用记录仪记录下来，从而测得吸附量。

但应指出，由于B.E.T方法一般测定每克只有十分之几平方米比表面积的试样已相当困难，因此对一般常见的由粒度在微米以上的粉末制取的多孔材料就不大适用，对这种材料往往采用透过法。

二、透过法测定比表面积

透过法测定比表面积是通过对流体透过多孔层时的透过系数的测定来求得表面积的方法。通常使用比较多的是以气体（特别是空气）为介质，在层流条件下，对试样进行测定。由于它的操作简单、迅速，得到了广泛应用。这个方法的原理是依据所谓科泽奈 (Kozeny) - 卡曼 (Carman) 公式。由这个基本公式出发，设计出的定型仪器就有很多种。下面将此公式的导出概述如下：

假若把颗粒充填层（多孔材料）中的孔道看作是孔径为 d 的毛细管，并以 m 表示其水力半径，则：

$$d = fm \quad (6-14)$$

式中 f ——取决于颗粒形状及充填状态的系数。

$$\text{而 } m = \frac{\text{毛细管的断面积}}{\text{毛细管的湿周}} = \frac{\text{充填层的孔隙体积}(V_{\text{孔}})}{\text{充填层孔隙的表面积}(S)} \quad (6-15)$$

如果以 $V_{\text{表}}$ 表示充填层的表观体积，则孔隙度可用下式表示：

$$\varepsilon = V_{\text{孔}}/V_{\text{表}} = 1 - V_{\text{固}}/V_{\text{表}} \quad (6-16)$$

式中 $V_{\text{粒}}$ ——颗粒所占的体积。

由 (6-15、16) 式可得：

$$m = \frac{V_{\text{粒}}}{S} = \frac{\varepsilon V_{\text{粒}}}{S} = \frac{\varepsilon}{(S/V_{\text{粒}})(1-\varepsilon)} = \frac{\varepsilon}{S_v(1-\varepsilon)} \quad (6-17)$$

式中 S_v ——单位体积的表面积，即比表面积。

由 (6-14) 式可得：

$$d = \frac{f\varepsilon}{S_v(1-\varepsilon)} \quad (6-18)$$

当流体透过多孔充填层时，如果充填层的毛细管与充填层的轴线间的夹角为 θ ，那么流体在毛细管中的流速 v_e 与透过充填层的表观流速 v 的关系为：

$$v_e = \frac{v}{\varepsilon \cos \theta} \quad (6-19)$$

而毛细管的长度 L 与充填层厚度 δ 的关系为：

$$L = \frac{\delta}{\cos \theta} \quad (6-20)$$

将上述三式代入泊稷叶方程

$$v_e = \frac{d^2 \Delta P}{32 \eta L}$$

式中 ΔP ——压差；

η ——流体粘滞系数。

若以充填层截面积 A 及流量 Q 表示流速 v_e ，整理后可得所谓科泽奈-卡曼公式：

$$\frac{\theta}{A \varepsilon \cos \theta} = \frac{f^2 \varepsilon^2 \Delta P \cos \theta}{S_v^2 (1-\varepsilon)^2 32 \eta \delta}$$

$$\therefore \frac{\Delta P}{\delta} = \frac{32}{f^2 \cos^2 \theta} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\theta}{A} \cdot \eta S_v^2 \quad (6-21)$$

令 $\frac{32}{f^2 \cos^2 \theta} = K$ ，并把它叫做科泽奈常数，它的大小取决于颗粒的形状、大小及其分布以及充填层的孔隙等。科泽奈根据对多

种材料的实验得出： $K=5\pm 0.5$ ，由此可得比表面积的表达式：

$$S_v = 14 \sqrt{\frac{\varepsilon^3 A \Delta P}{(1-\varepsilon)^2 \eta \delta Q}} \quad (6-22)$$

式中 ε ——孔隙度；

A ——充填层的截面积，厘米²；

ΔP ——充填层两端的压差，厘米水柱；

δ ——充填层的厚度，厘米；

η ——通过充填层流体的粘滞系数，泊；

Q ——通过充填层流体的流量，厘米³/秒。

上式是假定流体通过充填层的流动为层流，因此对紊流时并不适用；同时当孔道很细甚至可以与气体分子平均自由程相比时，也不能使用此式。

第三节 汞压入法测定多孔材料的孔隙特性

一、基本原理

根据毛细管现象，如果液体对多孔材料不浸润，即浸润角 θ 大于 90° ，则表面张力将阻止液体浸入孔隙，然而当对液体施加一定压力后，外力可以克服此阻力而使液体浸入到孔隙中。因此，充满一给定孔隙所需要的压力便成为该孔径大小的一种度量。

迫使不浸润液体（如汞）进入某一尺寸的孔隙所需要的压力的关系式导出如下：

设在半径为 r 的圆柱形毛细管中压入不浸润液体，当达到平衡时，则作用在液体上的接触环截面法线方向上的压力为 $P\pi r^2$ ，它与在同一截面上张力在此面法线上的投影 $2\pi r\sigma\cos\theta$ 之和应为零，即：

$$P\pi r^2 + 2\pi r\sigma\cos\theta = 0$$

$$\therefore Pr = -2\sigma\cos\theta \quad (6-23)$$

式中 P ——给予汞的附加压强，公斤/厘米²；

r ——孔的半径，Å 或 μ ；

σ ——汞的表面张力系数，达因/厘米；

θ ——汞对材料的浸润角，度。

因为 $\theta > 90^\circ$ ，所以公式(6-23)右端为正值。

如果 r 的单位为 $\text{\AA}$ 、 σ 取480达因/厘米、 θ 取为 140° 时，公式(6-23)化为：

$$r = \frac{75000}{P} (\text{\AA}) \text{ 或 } = \frac{7.5}{P} (\mu) \quad (6-24)$$

这个关系也可以表6-2表示。

表 6-2 汞的附加压强与孔半径的关系

P (公斤/厘米 ²)	r ($\text{\AA}$)	P (公斤/厘米 ²)	r ($\text{\AA}$)
0.10	750000	32	2400
0.32	240000	100	750
1.00	75000	320	240
3.20	24000	1000	75
10	7500	3200	24

此方法由沃什伯恩(Washburn)开始于1921年，后被里特(Ritter)、德雷克(Drake)完成，近年由鲁塔尔(Rootare)^[6]整理并研究了有关误差问题。乔伊纳(Joyner)等^[7]用吸附法和汞压入法对活性碳的孔径分布进行了测定，其结果较为一致，此时汞的浸润角取 130° 。

汞压入法最初是作为解决用吸附法所不能解决的大孔径(如大于 $300\text{\AA}$)的测量而发展起来的。可是由于目前这种装置的压力可以达到相当高，从而可以测定到达吸附法所测的区间。

在对多孔材料的孔径测定方面，汞压入法测试范围可达5个数量级，其最小限度为 $15\text{\AA}$ ^[8]，里特和德雷克^[9]认为按此原理可以一直用到表面张力和浸润角概念都不成立的那样小的孔隙，即这些孔隙不再比汞原子大多少的程度。乔伊纳等人认为表面张力虽与孔的曲率半径有关，但孔径不小于 $33\text{\AA}$ 则无影响，在文献[10]中认为汞压入法最小可测到 $8.5\sim 35\text{\AA}$ ，而文献[1]认为可测到 $20\text{\AA}$ 左右。