

# 儲集岩物性研究的理論和方法

## 儲集层研究中毛細管压力測量的应用

(西德) V. D. 勃茨

### 引言

在儲油层儲气层的评价中，仅仅知道孔隙率与渗透率是不够的。对于理想的等砂粒结构的儲集岩更重要的是要通过毛細管压力測量了解孔隙流体的分布情况。

可以用一个水銀毛細管压力仪来进行上述的測定工作。这一方法的优点还在于可以在一个较寬的压力范围内进行測量和不太費时间。

把一块无油的干燥的岩样（大多数是小岩心）通过抽真空让水銀压进孔隙空间中。在压力小时，一般是用充水銀的大口径毛細管，而在压力大时用小口径毛細管。

通过一定的計算，将侵入儲集岩的水銀数量占孔隙容积的百分比作为压入压力的函数，用曲线画出来(图 1)。

这样取得的曲线常常包含一段平坦区和一段猛烈上升几乎平行于纵轴的线段。

表面张力，接触角以及介质的密度应该尽可能地少，以便通过这种方法从水銀空气体系中取得的数据能够換算为儲集层的状况。因为儲集层实际上是处于水和油的体系或水和气的体系中，感兴趣的是水头、孔隙直径、尤其是湿润相的饱和度：

$$P_c = r \cos \Theta \left( \frac{2}{r} \right) = g(D_{水} - D_{油})h$$

$P_c$ ——毛細管压力(达因/平方厘米)

$r$ ——水-油的表面张力(达因/厘米)

$\Theta$ ——水与岩石的接触角(在油/水介质中等于  $0^\circ$ )

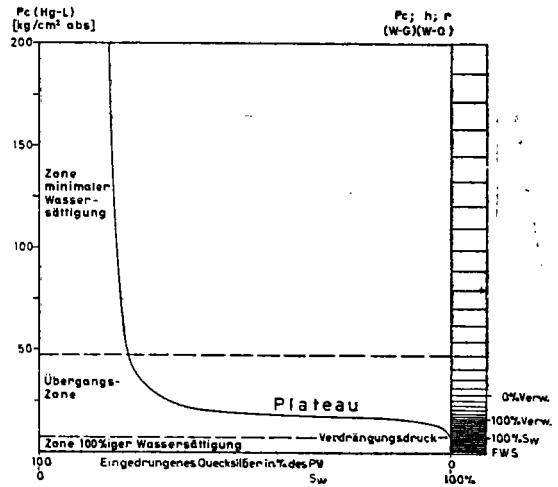


图 1 一个儲油层的毛細压力曲线和流体分布

注:  $P_c$  毛細管压力  
 $Hg-L$  汞-空气体系  
 $W-G$  水-气体系  
 $W-O$  水-油体系  
 $Sw$  水饱和度

图左方自上往下为最低水饱和度带过渡带, 100%水饱和度带  
 图右方自上往下为平坦区, 排代压力  
 横座标是压入的汞占  $P_w$  的%

$r$ ——连通孔隙的半径(厘米)

$g$ ——980 厘米/秒<sup>2</sup>

$D_{水} - D_{油}$ ——水和油(气)的密度差

$h$ ——水头(米)

通过合适的換算，可以从毛細压力曲线上  
 读出：

纵座标 水-油的毛細管压力  $P_c(D_{水} - D_{油})$

水-气的毛細管压力  $P_c(D_{水} - D_{气})$

水头 (h)  
 孔隙半径 (r)  
 横座标 水饱和度 ( $S_w$ )

近年来关于换算因子讨论得很多, 然而经验表明在大多数的实际情况下, 根据这一些已经运用的因子可以得到足够的正确度。表1列出了一些根据水银-空气体系换算的例子。水头应该根据储集层实际条件下的密度值计算。

考虑到相对渗透率, 可以根据毛细压力曲线划分出油和水(或气和水)的区域。在图1上画出30%到100%的水饱和区。

表1 根据水银-空气体系的换算例子

r	$p_c$	$p_c$	$h_1$	$h_2$	$p_c$	h
孔隙半径 (厘米)	水银-空气 [kg/cm <sup>2</sup> ]	水-油 [kg/cm <sup>2</sup> ]	$D_{油}=0.75$ $D_{水}=1.15$ (米)	$D_{油}=0.90$ $D_{水}=1.05$ (米)	水-气 [kg/cm <sup>2</sup> ]	$D_{气}=0.2$ $D_{水}=1.2$ (米)
$1 \times 10^{-2}$	-0.07	0.0068	≈0.17	≈0.45	0.014	≈0.14
$1 \times 10^{-3}$	-0.71	0.068	≈1.7	≈4.5	0.14	≈1.4
$1 \times 10^{-4}$	-7.15	0.68	≈17	≈45	1.4	≈14
$1 \times 10^{-5}$	-71.5	6.8	≈170	≈450	14	≈140

应用

近年来在布立奇塔岩石物性实验室中用水银毛细压力仪研究了数百个不同的储集岩。

图2是某一地区一个储集层中许多样品毛细压力曲线的总状况。由于每一小层岩石是不同的, 得出的曲线也十分不同, 其孔隙率和渗透性的范围各有明显的特征。Pötrau Dogger-β-砂岩(a)具有典型的砂岩曲线, 渗透率高的储集岩具有一个低平的平坦区, 过渡带很少, “最低水饱和度带”也小, 变化相当少。在这种情况下, 储油性能的计算是相当正确的, 其正确性接近于水饱和度。

Steimbke-ost Dogger-δ-砂岩(b)的“最低水饱和度带”偏高, 与渗透率之间的关系倒很好。比之Potrau的砂岩某些样品的水饱和度使它们失掉了作为储油岩的意义。

Thönse的Dogger-ε-角岩是储气岩, 水饱和度高, 渗透率特别小。对于这些十分特殊的关系如果不掌握毛细压力曲线, 不可避免地会导致错误的结论。

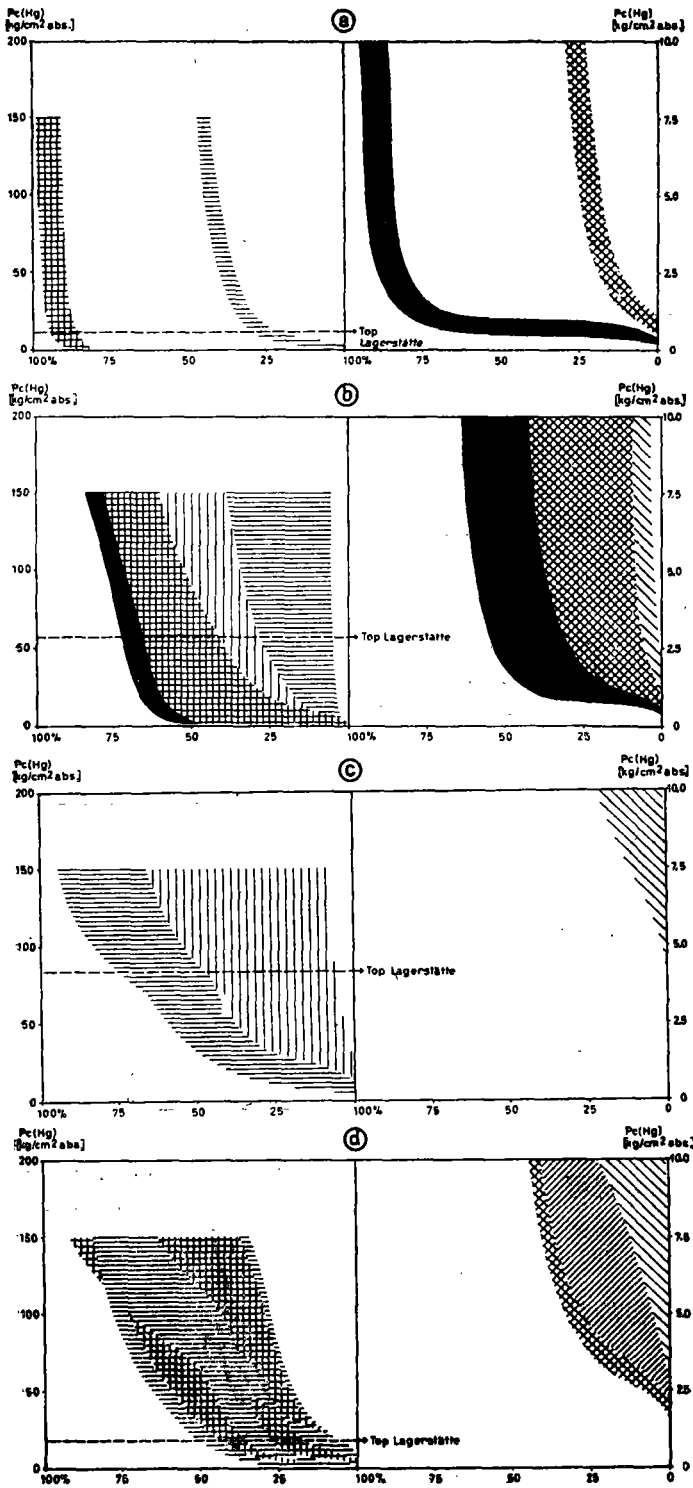
对于Lönigen的Dogger-ζ-砂岩, 人们是

不会立即把它看作生产层的。因为整个区域都在过渡带以上, “最低水饱和度”带很大。尽管如此从这层岩石采出了无水的原油。这些岩石呈薄层状, 与正常的砂岩很不相同。如果不根据毛细压力曲线, 这些异常关系是无法说明的。

图2所举的例子说明了“最低水饱和度带”与渗透率的关系。渗透率的界面曲线既可以对应于最小的, 也可以对应于最大的“最低水饱和度带”。于是对应于每一个渗透率区间和每一个毛细压力有不同的水饱和度带, 当然, 渗透率<150md时估计就不可能是正确的了(图3)。

通过许多的毛细压力研究, 可以导出一个总的 $S_w$ 函数。结果并不满意, 因为很分散, 水饱和度、孔隙度、渗透率和其它因素之间的关系十分复杂, 正如Engelhardt指出的, 至少需要再进行内部表面积测量。值得指出的, 上述水银-空气的测定结果与Engelhardt的结论是很符合的。然而, 在较高的压力下, 对于砂岩来说, Engelhardt的线性关系变成了对数函数。

水银毛细压力曲线的一个巨大优点是对于沾污的样品也能测。借助于一个简便的积分计



Zeichenerklärung:

Porosität der Proben

>30%   
  20-30%   
  10-20%   
  <10%

Permeabilität der Proben

>180md   
  15-150md   
  15-18md   
  <18md

图2 毛细压力曲线的运用

a. Pötrau Dogger-β 砂岩

b. Steimbke-Ost Dogger-δ 砂岩

c. Thönse Dogger-ε 角岩

d. Löningen Dogger-ζ 砂岩

图底部的图例左边是岩石的孔隙率，右边是岩石的渗透率。

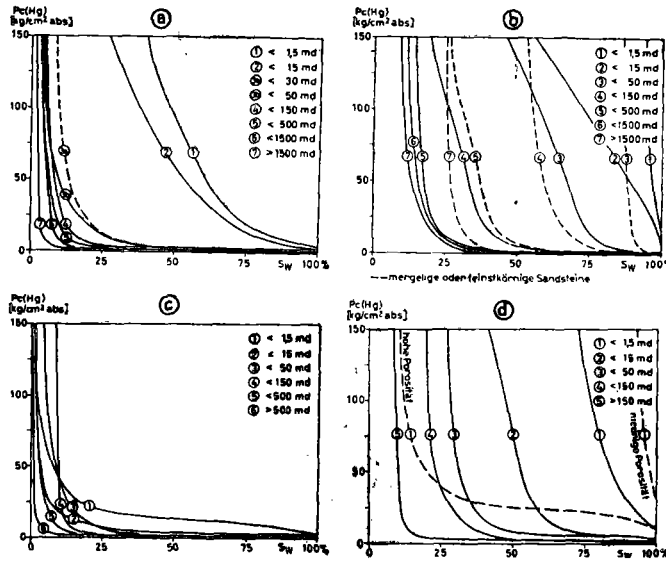


图3 水饱和度的变化带

- a. 砂岩,  $S_w$  最小
- b. 砂岩,  $S_w$  最大, 虚线是泥灰质砂岩或细砂岩
- c. 碳酸岩,  $S_w$  最小
- d. 碳酸岩,  $S_w$  最大。

注: 图3左侧放德文字是高孔隙率 右侧放德文字是低孔隙率

算, 可以根据  $S_w$  (水饱和度) 计算出渗透率。为此, 要用一扎平行的毛细管来作模型, 模型当然是比较简单的, 还要作一些因子的校正。这个因子表明了孔隙空间的复杂性, 并可以与其他模型(例如 Houpeurt 的 c-m 模型)的参数相比较。

正如一开始所说的那样, 水饱和度对于储量估计是重要的, 此外, 对于流体平衡的计算, 测井、试井、注水的解释, 钻井处理也是重要的。“最低水饱和度”应作为岩石的一个部分进行解释。束缚水饱和度高达 50% 的储集岩仍可以采出无水的油流, 这需要用毛细压力曲线来解释。

随天然气采出来的结晶水是不含盐份的。计算盐度时应将结晶水和束缚水混合在一起进行计算。在 Thönse 侧水的盐度是 180g/l; 随天然气采出的水在构造顶部是 10g/l, 在构造谷部是 40g/l, 在构造顶部, 盐度与毛细压力曲线(即与水饱和度的分布)的关系最佳(图 4)。是由于水本身是不变的抑或是由于盐度是可变的, 其原因还没有找出来。

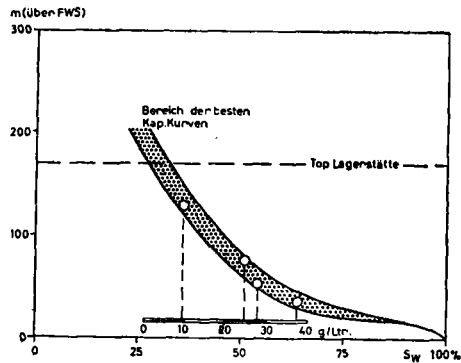


图4 Thönse 天然气田 Dogger-ε 储集岩中含盐度, 毛细压力曲线和构造高度之间的关系。

注: 自左至右的德文字是: 高出水头的米数, 最佳毛细曲线的区域, 储集岩之顶  
g/Ltr——克/公升  
 $S_w$ ——水饱和度

没有毛细压力曲线, 储量的估算可能过高或过低。图 5 是根据毛细压力资料正确估算的水饱和度, 左面是一个储集岩的  $S_w$  中值分布曲线。“最低水饱和度”在生产层顶部是 15%, 在生产层中部是 18%。

决定平均束缚水饱和度的是生产层的几何形态。应该将每一深度的储集表面积乘上相应

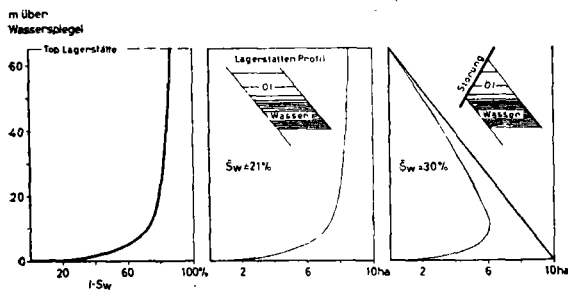


图5 束缚水平均饱和度计算的例子

注：自左至右的德文字为：高出水头的米数，储集层之顶，储集层的剖面，阻挡  
Öl——油      Wasser——水

的  $S_w$  值，得出其与渗油孔隙空间有关的容积。图5的中央及右面图介了一个截面保持为21%的生产层，和一个再生截面为30%的生产层的平均水饱和度。对于另外的生产层来说截面可以是16%或40%。

在普查勘探过程中，油浸岩心即使已被水大大冲淡，借助于毛细压力曲线仍能进行估价。

结 束 语

上面只举了一些毛细压力曲线的例子，但是这已足够表明正确地认识液体的分布是多么重要。这些研究仅仅是一个起点。

(张义纲译自 Erdöl und Kohle Erdgas Petrochemie Vol.17 No.6, 1964)

## 储集岩显微结构的测定方法

(意) 卡罗埃尔夫公司

### 概 论

多孔物质(其中包括储集岩和作为盖层的帽岩)的显微结构通常表现为三种几何性态:比表面,孔隙大小和孔隙容积。

比表面包括颗粒内壁毛细表面的总和及其外表面。多孔物质的毛细表面远大于外表面,例如一个硅酸盐颗粒的外表面是  $1\text{ cm}^2$ , 其内表面可以是  $100\text{ m}^2$ 。

孔隙也是按它们的横截面和开口半径来描述的。通常考虑的范围是2.5到  $10^6$  埃。“孔隙容积”是定义为上述范围内孔隙的总容积。

### 方 法

测定多孔物质显微结构的方法其目的是定量计算比表面,测出孔隙的大小和容积。今天最常用的方法包括电子显微镜, X光角散射,渗透率仪,汞和氦排替法,压汞法和各种吸附法。其中最重要的方法是气吸附法和压汞法。

气吸附法可以测定孔隙的比表面和孔隙大

小的分布,范围是2.5到300埃的孔隙。它是基于各种气体的等温吸附和脱附的性质。一般用氮气,特殊的用氩气和氦气或丁烷之类的烃气。

表面积测定方法的原理是 Brunauer Emmet 和 Teller 提出的,所以叫做 BET 法<sup>[1]</sup>。近年来虽然有了不少的变化,它仍然是最通用的理论。

运用 Foster, Shull 和 Barrett 的方法可以根据等温吸附和脱附的原理测定孔隙的分布。按吸附气体的容积( $V_{\text{吸附}}$ 厘米<sup>3</sup>/克)和压力( $P/P_0$ )作出关系曲线。 $P/P_0$ 是吸附温度下平衡压力  $P$  和饱和压力  $P_0$  之间的比值。通常是在该气体液化的温度下作出等温测定的。

在吸附过程中,由于分压的递升,孔隙表面为越来越多的气体分子所复盖。曾经证明在相对压力为0.25到0.30时形成了一层单分子复盖层。这就用来根据这一条件下吸附气体的体积计算出表面积(图1的下方)。

在  $P/V_{\text{吸附}}$  ( $P_0 - P$ ) 和  $P/P_0$  的关系图上,