文章编号:1000-5870(2003)04-0066-04

# 应用恒速压汞实验数据计算相对渗透率曲线

王金勋<sup>1</sup>,杨普华<sup>2</sup>,刘庆杰<sup>2</sup>,郭和坤<sup>3</sup>

(1.石油大学石油天然气工程学院,北京102249; 2.石油勘探开发研究院,北京100083;3.中国科学研究院渗流所,河北廊坊065007)

摘要:截取一段实际储层岩样,利用恒速压汞实验技术测定其孔喉频数分布,并拟合成连续分布函数,该函数符 合伽马函数分布。对剩余岩样进行了油、水相对渗透率的测定。以所拟合的孔喉频数分布为主要输入参数,利用孔 隙网络模型计算了油、水相对渗透率。计算结果与利用 JBN 法处理的实测结果对比表明,恒速压汞实验是确定岩石 微观孔喉分布的一种非常有效的实验手段,可直接为孔隙网络模型提供主要的输入参数,能够得到反映微观孔隙结 构特征的较合理的相对渗透率曲线,这对于用 JBN 法不满足或者处理结果不理想的实验具有重要的意义。

关键词:恒速压汞;喉道数分布;孔隙网络模型;相对渗透率曲线;实验数据

**中图分类号:**TE 311 文献标识码:A

## 引 盲

储层岩石微观结构决定其宏观储渗性质,由微 观孔隙结构参数计算岩石的宏观性质一直是石油工 业中一个重要的研究领域。Purcell<sup>[1]</sup>首次将压汞技 术应用于石油工业,推出了计算绝对渗透率和相对 渗透率的公式,但依据的只是简单的平行毛管束模 型。Fatt<sup>[2]</sup>用二维网络系统研究了多孔介质的动、 静态性质,为网络模型的真正应用做了基础性的工 作。目前,压汞实验仍是获取微观孔隙结构定量资 料的最重要的途径。常规压汞实验采用的是恒压 法,只能得出孔隙大小的体积分布,而网络模型的建 立一般需要的是孔喉频数的分布。恒速压汞技术就 解决了这一问题,可直接获取喉道和孔隙的数目分 布,也克服了恒压法对应同一毛管压力曲线会有不 同孔隙结构的缺陷。笔者利用恒速压汞实验技术测 定实际储层岩样的孔喉频数分布,并将其拟合成特 定的连续分布函数用于计算相对渗透率。将计算结 果与实测结果进行对比,以判定恒速压汞实验方法 的可行性。

#### 1 恒速压汞实验

J. I. Gates 早在 1959 年就在室内用水银孔隙

仪测定溶洞性碳酸盐岩样时观察到了压力波动。 1966年,Crawford和Hoover<sup>[3]</sup>在人造多孔介质的注 水过程中记录下压力波动。1970年,Morrow<sup>[4]</sup>对 非湿相以极低的速度驱替湿相的情况进行了详细讨 论,并且引人了一些术语来描述压力波动特征。 1971年,Gaulier<sup>[5]</sup>也发表了类似实验技术的文章, 但他的测试精度较低。真正实际应用的恒速压汞实 验是Yuan和Swanson<sup>[6]</sup>在孔隙测定仪APEX(Apparatus for Pore Examination)上首先开展的。其关 键设备是与高分辨率压力测量相结合的自动数据采 集系统。

该实验是以极微小的速度向多孔介质注入水 银,假定注入过程中接触角和界面张力保持不变,通 过监测注入过程中水银的压力波动,提供孔隙空间 结构的详细信息。对于相同大小的喉道半径所呈现 的不同孔隙类型,将会有不同的压力反应。笔者使 用 Coretest Systems 公司生产的 ASPE-730 恒速压 汞实验装置,测定了苏丹和冀东油田的砂岩储层岩 样(N101 和 L307)的孔喉分布。表 1 是实验基本参 数,图 1,2 是实验过程中记录的局部压力曲线,由此 可得到喉道频数分布。计算中,水银的界面张力为 485 mN/m,接触角为 140°。实测喉道数频率分布 直方图见图 3,4。

收稿日期:2002-08-30 基金项目:国家重点基础研究专项资助项目(G1999022510) 作者简介:王金勋(1965-),男(汉族),山东莒县人,博士,目前在石油大学博士后流动站从事油藏工程方面的研究工作。



#### 表1 实验基本参数

图 4 岩样 L307 喉道数频率分布直方图 将实测的离散分布资料拟合为Γ分布函数

$$\alpha(r) = \frac{r^{a^{-1}} \exp(-br) b^a}{\Gamma(a)}.$$
 (1)

式中,a(r)为喉道半径的分布密度函数;r 为喉道 半径; a 和 b 为分布特征参数。

两岩样拟合的参数 a 为 2,参数 b 分别为 0.2 和0.6。由拟合出的分布函数求出相应实测区间的 累积频率。由图 3,4 可见,L307 号岩样拟合的与实 测的喉道分布较接近,而 N101 号岩样实测的喉道

数并不是单峰分布,在有些区间内拟合的与实测的 喉道分布相差较远,但从总的趋势上看,这两块岩样

### 利用孔隙网络模型计算相对渗透率

实际油藏岩石的孔隙是几何形态极不规则、连 通关系极为复杂的网络状结构,很难用数学方法进 行精确描述。一种简便的处理方法是用统一连通关 系的规则网络来代替实际岩石孔隙。Jerauld 等 人<sup>[7]</sup>指出,只要规则网络的连通数等干不规则或无 序网络的平均连通数,则两网络的流动和谕渗特性 在实际意义上是一样的,所以用规则网络来代替随

文中采用具有无穷分支结构、没有闭环的 Bethe 网络(见图 5)来表征岩石孔隙,该网络的惟一特征 参数是配位数 Z。显然,渗透率或相渗透率与相应 的导流能力成正比,只要计算出表征孔隙结构的网 络的导流能力和多相渗流时各相流体的相导流能

流率的定义和计算方法。以任意选定的一点为人 口,以与之相连的远处的所有点为出口端面,定义单 位压降下的流量为 Bethe 网络的导流率。按该定 义,配位数为 Z 的 Bethe 网络内 i 相流体的相导流 率为

$$g_{Bj} = -Zc'(0).$$
 (2)

其中,c(x)是 Bethe 网络导流率的生成函数,可通 过下面的积分方程求解:

$$\int_0^\infty \exp(-tx)c(x)dx = \int_0^\infty dg G_j(g) \left| \frac{1}{t+g} + \right|$$

$$\frac{g^2}{(t+g)^2} \int_0^\infty \exp\left(\frac{-g+x}{g+t}\right) [c(x)]^{Z-1} dx \bigg|.$$
(3)  

$$\pm i \hbar \mathcal{R} \mathcal{S} \mathcal{L} \mathcal{H} : c(0) = 1$$

式中,g 是半径为r的喉道所对应的导流率,可用关系式 $g \sim r^{\prime}$ (一般3 $\leq \nu \leq 4$ )来表示;  $G_j(g)$ 为j相流体在网络中导流率的分布函数,它与网络中喉道分布和润湿性及驱替过程有关<sup>[9]</sup>。

假设只存在单相流体,则可利用 g ~ r 关系和 孔喉在网络中的分布计算出网络的导流率分布函数 G(g),类似地由上式可解出 Bethe 网络的导流率 g<sub>B</sub>。有了网络的导流率 g<sub>B</sub>和相导流率 g<sub>Bj</sub> 后,即可 算出相对渗透率

$$K_{rj} = \frac{g_{\rm Bj}}{g_{\rm B}}.$$
 (4)

j相流体的饱和度由下式计算:

$$S_j = X_j^0 \int_0^\infty a_j^0(r) V(r) \mathrm{d}r \Big/ \int_0^\infty \alpha(r) V(r) \mathrm{d}r.$$
 (5)

式中,  $X_{j}^{\circ}$ 和 $a_{j}^{\circ}(r)$ 分别为 j相流体实际占有的分数 和喉道分布; V(r)是半径为 r 的喉道所对应的孔 隙体积,可用关系式  $V(r) \sim r^{\beta}(-般 0 \leq \beta \leq 3)$ 来 表示<sup>[9]</sup>。

显然,上述相渗透率和饱和度的计算都需要有 关孔喉结构和表面润湿性等方面的资料,所以利用 这种方法计算相对渗透率曲线时,除了上述由恒速 压汞实验确定的喉道分布 $\alpha(r)$ 外,还需要确定岩石 孔隙的配位数 Z、孔隙体积和导流率与喉道半径的 关系(用上述指数形式来表示,就是确定参数 $\beta$ 和 $\nu$ ) 以及表面润湿性。文中用拟合相渗实验端点值的方 法来确定这些参数。

采用非稳态法对两块岩样进行了油水相对渗透 率实验,实验流体是白油和 16% 的标准盐水。实验 测定前,岩样都作了老化处理。实验所用岩样(孔、渗 参数见表 1)和流体的基本物性参数及实验端点参 数见表 2。

表 2 油水相对渗透率实验主要参数

岩样	长度 L/cm	截面积 A/cm <sup>2</sup>	孔隙体积 V <sub>p</sub> /cm <sup>3</sup>	油的粘度 µ₀/(mPa・s)	水的粘度 µ <sub>w</sub> /(mPa・s)	束缚水饱和度 Swi/%	残余油饱和度 S <sub>cr</sub> /%	束缚水饱和度 下的油相渗透率 k <sub>o</sub> (S <sub>wi</sub> )/μm <sup>2</sup>	残余油饱和度下的 水相相对渗透率 k <sub>rw</sub> (S <sub>or</sub> )
N101	4.927	4.834	5.739	17.19	1.13	18.1	46.1	0.515	0.390
L307	5.120	4.889	4.112	17.19	1.14	35.0	33.9	0.011	0.251

按混合润湿体系进行拟合,配位数都取 6,两块 岩样拟合的参数 β 分别为 2.5 和 2.6,参数 ν 分别为 3 和 3.1。JBN 方法处理相渗实验数据时一般采用束 缚水饱和度下油相的有效渗透率作为基准,用网络 模型进行计算时也采用这一基准来计算相对渗透 率。利用这些参数,根据上述计算原理,由 Bethe 网 络模型计算的油水两相相对渗透率曲线见图 6 和图 7。为便于对比,用 JBN 方法处理的实验结果也绘于 相应的图中。



图 6 岩样 N101 的油水相对渗透率曲线



#### 3 结论和认识

由对比结果可见,孔隙网络模型计算的两相相 对渗透率与实验结果吻合得非常好,这表明恒速压 汞实验是确定岩石微观孔喉分布的重要手段,可直 接为孔隙网络模型提供主要的输入参数。由于岩石 结构、表面性质的复杂性和实验技术的局限性,很难 准确地获取所有的特征参数,所以通过拟合易于获取 的实验结果来确定有关输入参数是一种可行的方法。 本文中提出的利用恒速压汞实验数据,通过孔 隙网络模型计算相对渗透率曲线的方法,其主要意 义在于对 JBN 方法不满足或者处理结果不理想的 实验,能够得出反映微观孔隙结构特征的较为合理 的相对渗透率曲线。JBN 方法一般不能得到束缚水 饱和度附近的相对渗透率值,尤其是所用的油、水粘 度比较小或为强亲水体系时,其活塞式推进较显著, 应用 JBN 方法只能计算出靠近残余油饱和度的一 些相对渗透率值,而孔隙网络模型方法则不受饱和 度范围或驱替倍数的限制。

#### 参考文献:

- PURCELL W R. Capillary pressure-their measurement using mercury and the calculation of permeability therefrom[J]. Trans AIME, 1949, 186: 39 – 46.
- [2] FATT I. The network model of porous media[J]. Trans AIMM, 1956,207:144 – 177.
- [3] CRAWFORD F W, HOOVER G M. Flow of fluids through porous medium[J]. Journal of Geophysical Research, 1966, 71:2911 – 2917.
- [4] MORROW N R. Physics and thermodynamics of capillary action in porous media[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1970, 63:32 - 56.

- [5] GAULIER C. Studying vugular rocks by constant-rate mercury injection[R]. SPE 3612, 1971.
- [6] YUAN H H, SWANSON B F. Resolving pore space characteristics by rate-controlled porosimetry [R]. SPE 14892, 1989.
- [7] JERAULD G R, SCRIVEN L E, DAVIS H T. Percolation and conduction on the 3D voronoi and regular networks: a second case study in topological disorder [J]. Journal of Physical Chemistry, 1984, 17:3429 – 3439.
- [8] STINCHCOMBE R B. Conductivity and spin-wave stiffness in disorderrf systems-an exactly soluble model[J].
   Journal of Physics: C Solid State Physics, 1974, 7:179 203.
- [9] HEIBA A A, SAHIMI, MUHAMMAD, et al. Percolation theory of two-phase relative permeability[R]. SPE 11015, 1983.
- [10] MATTAX C C, MCKINLEY R M,等著.岩心分析译 文集[M].杨普华,倪方天,等译.北京:石油工业出版 社,1998.
- [11] DULLIEN FAL著.多孔介质——流体渗移与孔隙 结构[M].杨富民,黎用启译.北京:石油工业出版社, 1990.
- [12] NORMAN R MORROW 编著.石油开采中的界面现象[M].鄢捷年,等译.北京:石油工业出版社,1994.
   (责任编辑 李志芬)