

利用数字图象处理系统研究 孔隙结构及其应用

高雅明 沈平平

(石油勘探开发研究院)

涂富华

(胜利油田地质研究院)

摘 要

利用图象分析仪提取岩样染色铸体薄片的孔隙特征,用截面弦法求得孔隙大小分布及特征值。

从所研究的样品中得到:

1. 同一样品存在着完全不同的喉道分布和孔隙分布,喉道分布基本相同的两块岩样,可能存在着不同的孔隙分布,而孔隙分布基本相同的两块岩样,喉道分布也可以有很大差异。因而,要完整地研究孔隙结构,就必须同时研究孔隙和喉道的大小与分布。

2. 喉道半径对岩样渗透率的影响比孔隙半径对岩样渗透率的影响要大。孔隙和喉道的大小对孔隙度的影响不大,它们的分选对孔隙度的影响也不大。

3. 孔隙分选和喉道分选均影响水驱采收率。但影响较大的还是孔喉比。孔喉比小、孔隙和喉道分选好的,采收率高,反之就低。

引 言

石油储集在岩石的孔隙空间中并在其中流动。孔隙结构对流体(油、气、水)的储集和开采有着十分重要的影响。由于储集岩的孔隙结构十分复杂,因此,常规物性不一定能完全反映岩石的特征。在自然界的沉积岩系中,除了具有常规物性与孔隙结构一致性而外,还有不少岩石,其孔隙结构特征和常规物性参数呈现出不一致性。例如:有同一渗透率的砂岩和裂缝孔隙砂岩,它们的渗透率一致,但有明显不同的储集和渗流特性。因此,必须开展对孔隙结构的研究。

七十年代以前,研究孔隙结构的主要手段是压汞毛细管压力曲线方法,其理论基础是平行毛细管理论,即把进入该喉道的水银体积量均作为此喉道组成的均匀毛细管所占有的体积。显然,这种理论有其一定的局限性,它未反映出真正孔、喉大小分布,特别是所谓“孔”的大小分布。

七十至八十年代,许多学者把储集层孔隙空间划分为孔隙、喉道两部分。将岩石颗粒包围着的较大空间定义为孔隙,而将仅仅在两个颗粒之间连通的狭窄部分定义为喉道。关于喉

道的研究主要有半渗透隔板法、压汞法和离心机法。关于孔隙的研究,许多学者提出各种理论和方法。主要有手工法^{[1][2][3][4]}和数字图象处理方法^{[5][6][7][8]}。前者直接在铸体薄片或电镜扫描照片上测定一定数量具有代表性的孔隙的最大外接圆直径,由此求得平均孔径值及其它统计参数。这一方法直观地、简单地反映了真实孔隙大小,但是人为因素大,工作量大。后者是利用数字图象分析仪分辨颜色的能力和高速度的计算功能,迅速而有效地提取铸体薄片的孔隙特征,并测算它的大小和分布特征。在铸片工艺上,有的是将岩石灌注伍德合金后切成薄片,用土酸溶掉砂岩颗粒,留下伍德合金的孔隙骨架,再灌注环氧树脂,然后磨成薄片^{[5][6][7]},也有的采用荧光显微镜,将灌注了溶有荧光粉的环氧树脂的岩石薄片的信息输入计算机^[8]。也有使用backscatter mod1输入岩石薄片信息^[8]。在处理资料上,有的用Ferret直径表征孔隙大小^[8],也有用体视学理论模型进行拟合的。

本文采用灌注染色环氧树脂的制片工艺,使用数字图象处理系统提取岩石孔隙特征,测定孔隙弦长分布,从而获得孔隙分布。

用该方法对胜利等油田岩样进行研究表明:孔隙大小及其分布与喉道大小及其分布的研究有着同等重要的意义,是完整研究孔隙结构必不可少的参数。研究表明,在其它条件相同的前提下,孔喉比是影响岩样水驱油采收率的一个重要参数,同时孔隙和喉道的分选对水驱采收率也有一定的影响。

实验方法

1. 样品的准备

将选取的胜利等七个油田共34块砂岩岩心各分成两块。大的一块用做常规物性分析,压汞和水驱实验(部分岩样做了水驱实验)。小的一块用做岩石铸体薄片。首先将岩样放入脂肪抽提器,用酒精苯在70~80℃下抽提约10小时,然后取岩,在104℃下烘干约4小时。将预处理后的岩样在高温高压下灌进溶有油溶染料的环氧树脂,冷却固化后磨制成薄片。

2. 孔隙特征参数的提取

利用数字图象处理系统提取孔隙特征,方法是利用Leize显微镜直接输入染色环氧树脂铸体薄片的信息。输入数量的选择原则是:孔隙分布均匀的薄片,可选择具有代表性的视域;孔隙分布不均匀的,则根据其不均质性类型及其出现的频率选择几个视域。输入放大倍数的选择原则是:孔隙相对小的取高倍,孔隙相对大的取低倍。输入信息的照片见图1。每个视域输入红、绿、兰三个通道信息,经模数转换后,形成三个图象数据文件,根据每一个灰度直方图,找出阈值,将其变成两值图象,再利用这三张两值图象,或其中两张两值图象的逻辑运算,获得岩石孔隙两值图象。处理出来的图见图2。由此可求得面孔比值及孔隙大小分布图。

3. 测定孔隙大小分布

本文测定孔隙大小分布采用的方法是Dullien^{[6][9][10]}根据定量立体学提出的,基于球形孔隙模型的截面弦法。具体的做法是:首先统计每一样品各个视域的六个方向(0°、30°、60°、90°、120°、150°)的孔隙弦长分布,采用最小二乘法将实验数据拟合成连续函数 $n(t) = f(t)$,然后根据公式:

$$V_v(D)_{D=t} = \frac{t}{3} n(t) - \frac{t}{3} \frac{dn(t)}{dt} \quad (1)$$

推算孔隙大小分布。

本文平均孔径定义为：孔隙体积累积概率分布密度为50%的那点的孔隙直径。

本文孔隙分选系数定义为：孔隙直径的均方差。公式为：

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^N (D_i - \bar{D})^2 - \rho_i} \quad (2)$$



图 1 岩石铸体薄片显微放大照片

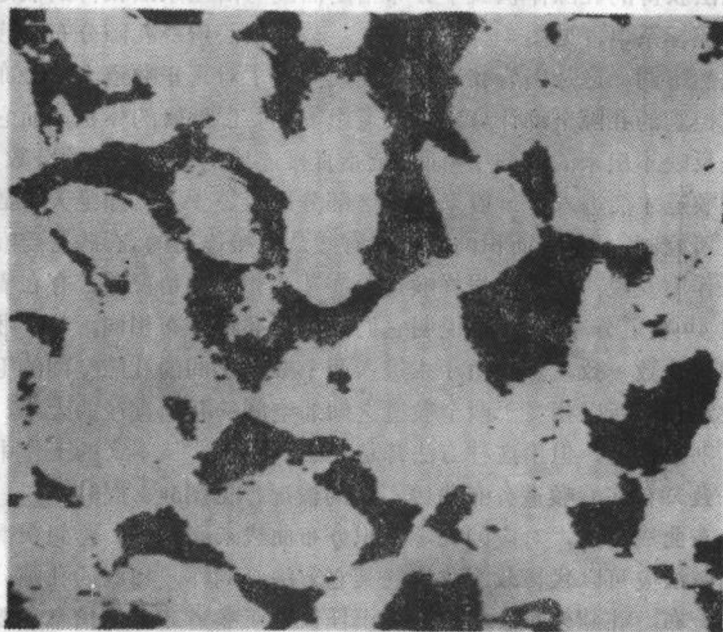


图 2 孔隙和岩石图象

4. 压汞实验

压汞实验在标准压汞仪上进行。由此获得孔喉大小分布及其特征参数。孔喉体积分布用分布函数 $\mathcal{D}(D_1)$ 来表示,其定义为

$$\mathcal{D}(2r_1) = \frac{dv}{v_{\text{总}}d(2r)}$$

平均喉径与分选系数的定义同上节。

5. 水驱油实验

水驱油实验的岩样直径为3厘米、长度10厘米,驱动条件满足相似准数 $LV\mu_w \geq 1$ 。油的粘度为2.94厘泊,水的粘度为0.747厘泊,岩样处理成强亲水。

结果和讨论

1. 截面弦法与压汞法的对比讨论

截面弦法与压汞法是研究孔隙结构的两种不同方法,它们考虑问题的基点是不同的,截面弦法着眼于孔隙,认为喉道占总体的分数很小而将其忽略。压汞法着眼于喉道,而将孔隙归属于控制该孔隙的喉道所具有。截面弦法与压汞法是从两个不同的角度来看待描述同一事物的。

压汞法理论模型是等径毛管束。它是将岩石中千差万别、相互连通的孔隙喉道假想成由喉道直接控制的等径管束,它与实际孔隙系统有偏差。几十年来,压汞法一直做为研究孔隙结构的常规方法,关键在于喉道是控制流体在多孔介质中流动的重要因素。

截面弦法的理论模型是球形孔隙段带模型。球形孔隙与实际孔隙形态也有偏差^[6]。但它较毛管束模型来讲更接近于实际孔隙系统。

将由截面弦法获得的孔隙体积概率分布密度曲线与由压汞法获得的喉道体积概率分布密度曲线绘在同一坐标系中,见图3。可以看到:截面弦法所得孔隙分布曲线与由压汞法所得喉道分布曲线截然不同。这是因为喉道分布曲线提供了对真正喉道大小分布的一个曲解的观点,它把此喉道控制的孔隙全部计算成该喉道组成的毛细管的体积,而它所控制的孔隙大小、形态变化是反映不出来的。图中b面积是不直接连通的孔隙空间的分数,也就是说这一部分孔隙必须通过喉道才能进入。一般来说,这部分近似等于1,即绝大多数孔隙都是由连通这些孔隙的喉道所控制。图中a面积内的孔隙有些是直接连通的,有些是受喉道控制的。

从本文的工作中发现:在两块岩样喉道分布基本相同的情况下,存在着孔隙分布不同的情况,见图4a图4b喉道分布相同,只说明它们的控制喉道分布相同,某一喉道直径间隔内所控制的孔隙体积百分数一致,然而由于汞进入两个喉道之间的孔隙空间的毛管压力是由第一个喉道大小所决定的,所以相当于两个喉道之间的空间的孔隙直径的大小、分布、分选等可以存在着千差万别的变化,但用这种方法却是无法查明的。从本文的工作中还发现:两块岩样的孔隙分布一致却存在着喉道分布曲线不同的情况,见图5a、图5b。

所以喉道分布曲线一致,对应的孔隙体积分布曲线未必一致。要想获得真实孔隙大小分布,必须用截面弦法或可以代替截面弦法的其它方法。同样,相同的孔隙分布也可以对应着各种各样的喉道分布。孔隙分布本身不能给出任何关于喉道分布的信息,要想得到喉道分布就必须利用压汞法或可以代替压汞法的其它方法。

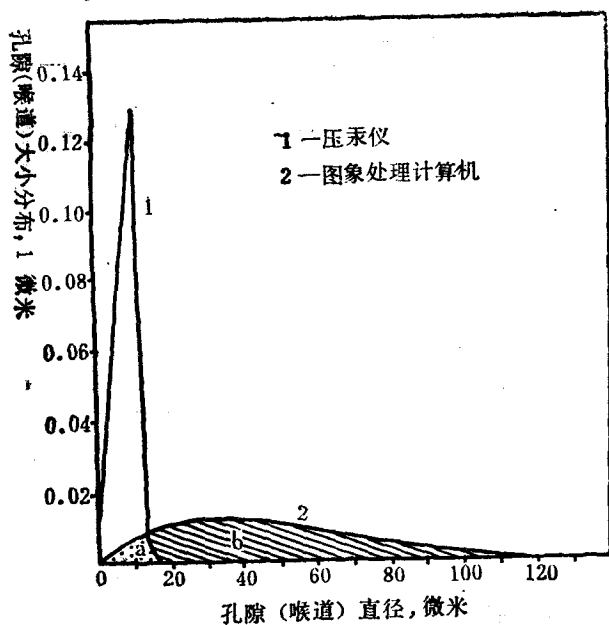


图 3 孔隙和喉道分布曲线对比

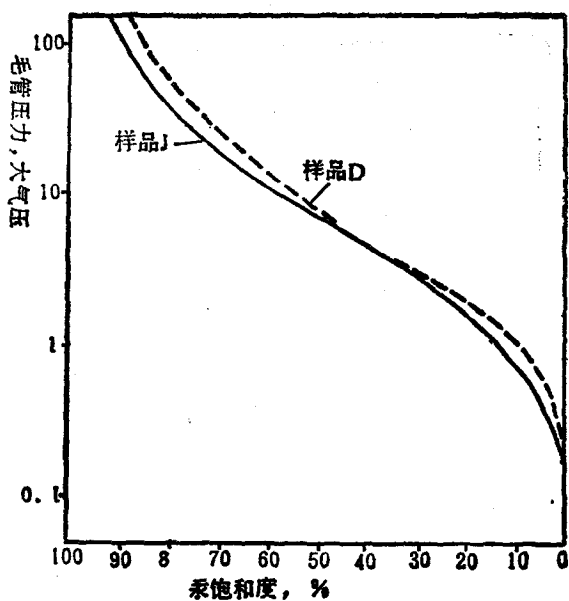


图 4a 毛管压力曲线

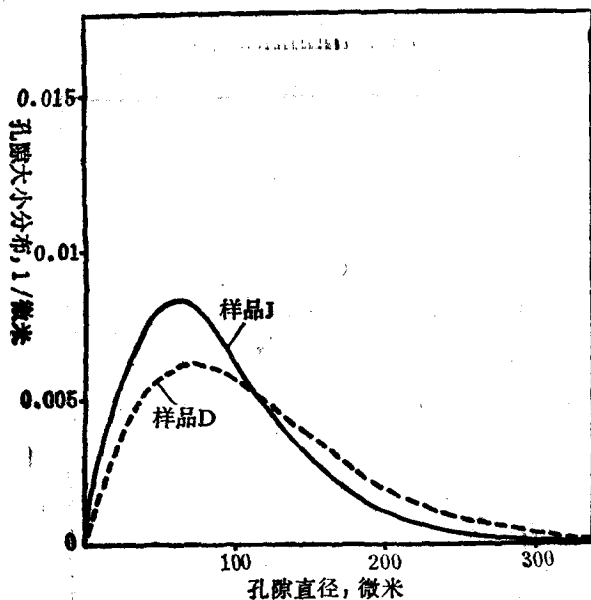


图 4b 孔隙大小分布曲线

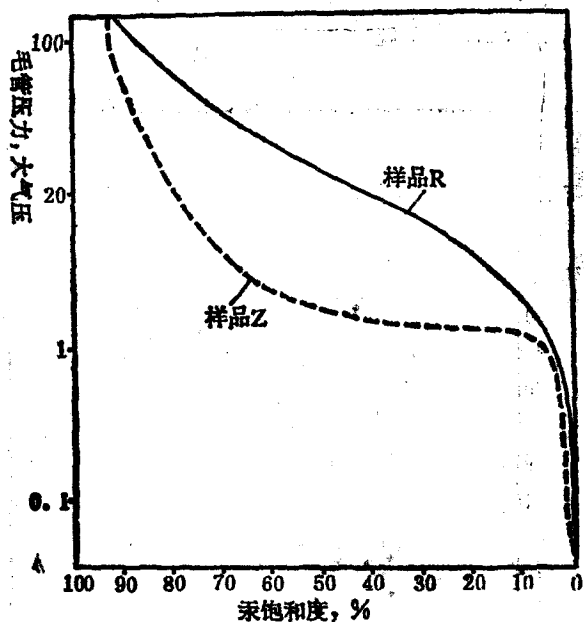


图 5a 毛管压力曲线

2. 孔隙和喉道特征参数之间的关系

从本文所研究的样本发现：平均孔隙半径与平均喉道半径、孔隙分选系数与喉道分选系数之间没有明确的关系。见图6、图7。

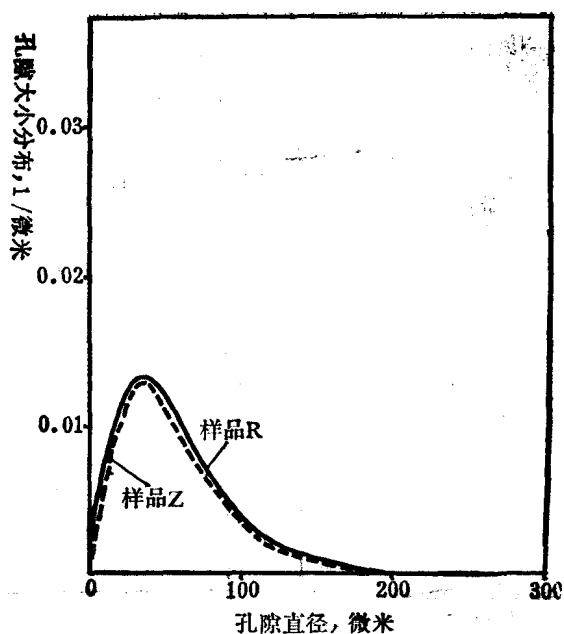


图 5b 孔隙大小分布曲线

从图 6 可以看到：样点是无规分布的。同一平均孔径下，存在着不同的喉道半径；同一平均喉道半径下，存在着不同的平均孔径。如平均孔隙半径约为 80μ 时，平均喉道半径范围 $6.8\sim 25\mu$ ；平均喉道半径约为 8.5μ 时，平均孔隙半径范围为 $14.9\sim 121.4\mu$ 。从图 7 同样可以看到这种无规分布。

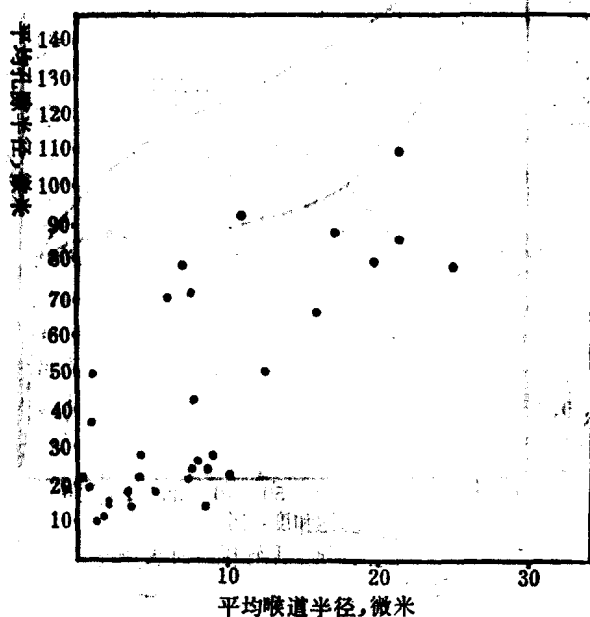


图 6 孔隙半径与喉道半径关系曲线

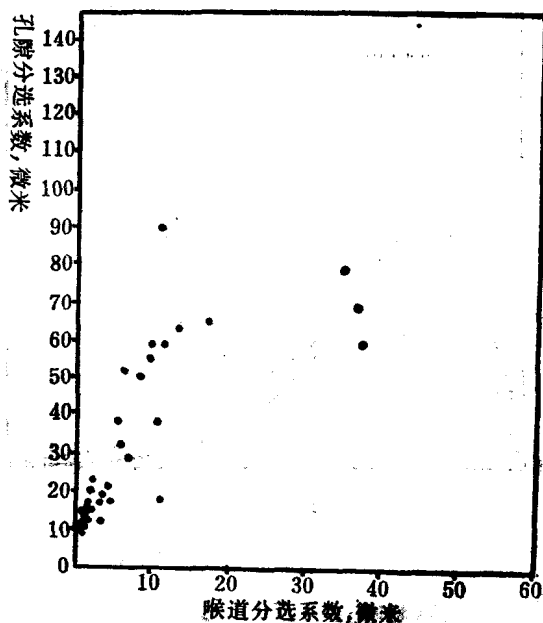


图 7 孔隙分选系数与喉道分选系数关系曲线

表征孔隙和喉道特征参数之间的独立性，又从另一方面说明了分别研究孔、喉的必要性。由于它们相互之间的不依赖关系，不能由一个推得另一个。

3. 喉道和孔隙特征参数与常规物性参数之间的关系

(1) 平均喉道半径和平均孔隙半径与渗透率的关系：

随着渗透率的增加，平均喉道半径有增加的趋势，见图8；随着渗透率的增加，平均孔隙半径稍有增大的趋势，但没有渗透率与喉道半径的关系明显，见图9。由图可见，在某一孔隙

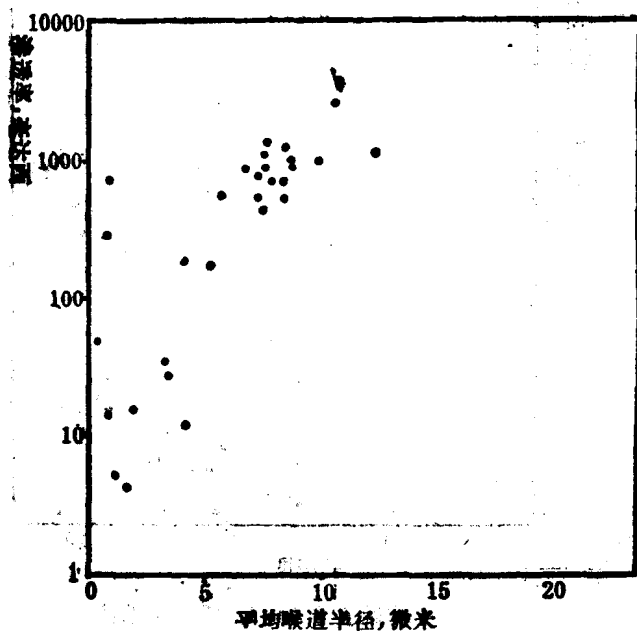


图 8 渗透率与平均喉道半径关系曲线

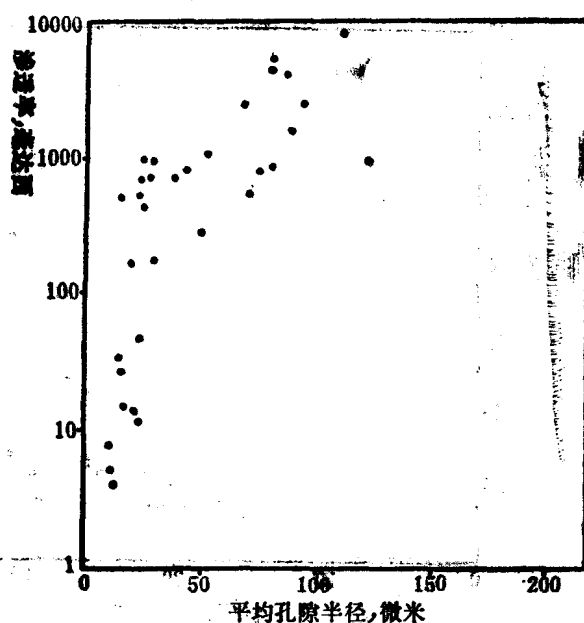


图 9 渗透率与平均孔隙半径曲线

半径下，渗透率变化范围很大。如孔隙半径为 80μ 左右时，渗透率变化范围为 $891\sim 5670\text{md}$ 。这说明了渗透率大小主要受喉道大小的控制，与孔隙大小关系不明显。

(2) 平均喉道半径和平均孔隙半径与孔隙度的关系：

从所研究样本发现：平均喉道半径和平均孔隙半径与孔隙度都没有明显关系，见图10、图11。事实上，喉道、孔隙的大小与其多少是不相关的。

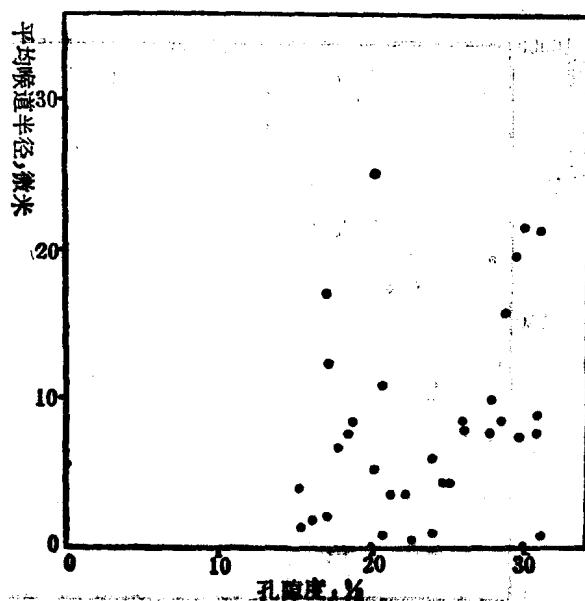


图 10 平均喉道半径与孔隙度关系曲线

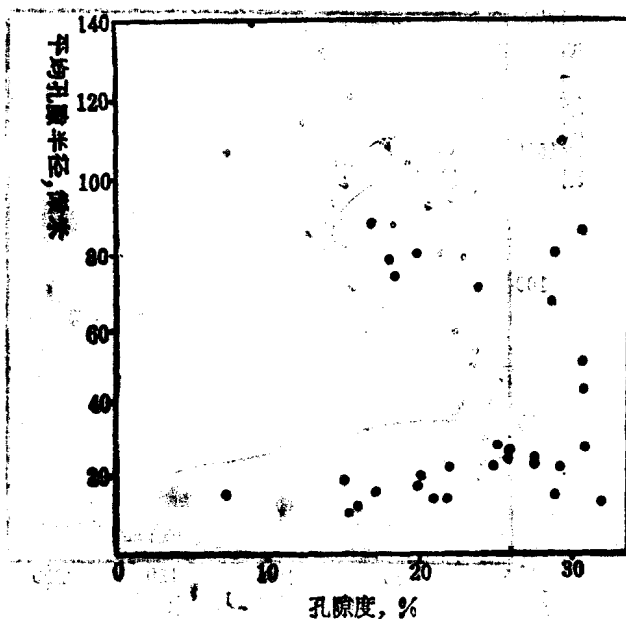


图 11 平均孔隙半径与孔隙度关系曲线

(3) 喉道分选系数和孔隙分选系数与孔隙度的关系:

喉道分选系数和孔隙分选系数与孔隙度的关系是不明显的。见图12、图13。

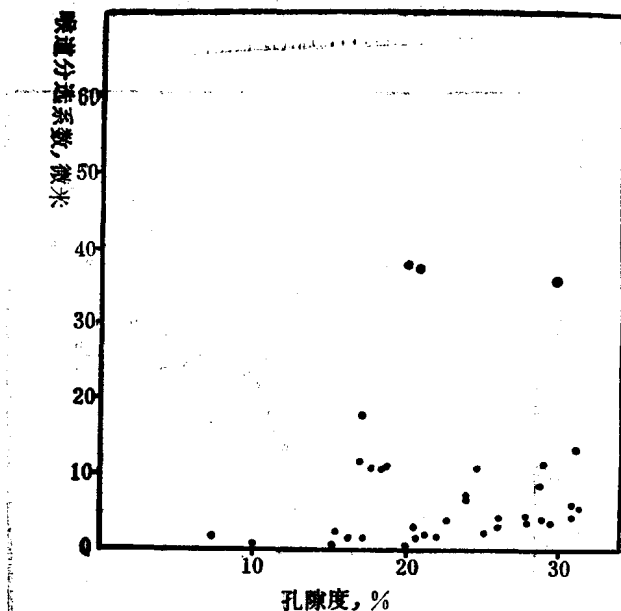


图 12 喉道分选系数与孔隙度关系曲线

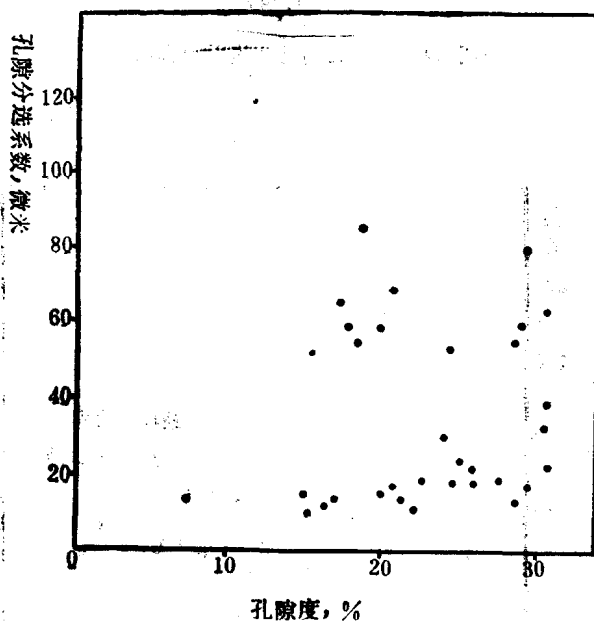


图 13 孔隙分选系数与孔隙度关系曲线

通过上述对比讨论我们可以看到: 喉道半径对渗透率的影响比孔隙半径大; 孔隙和喉道的绝对大小与孔隙度无关, 他们的分选与孔隙度的关系也不明显。

4. 面孔比与孔隙度的关系

从图14中可以看到, 孔隙度与面孔比有较好的关系, 该结论一方面可以用面孔比值来求

孔隙度，另一方面可以用常规孔隙度值来检验所取的视域是否有代表性。

5. 孔隙度和渗透率与采收率的关系

图15表示了孔隙度与采收率的关系，这个关系是正相关的，其相关系数为0.86。

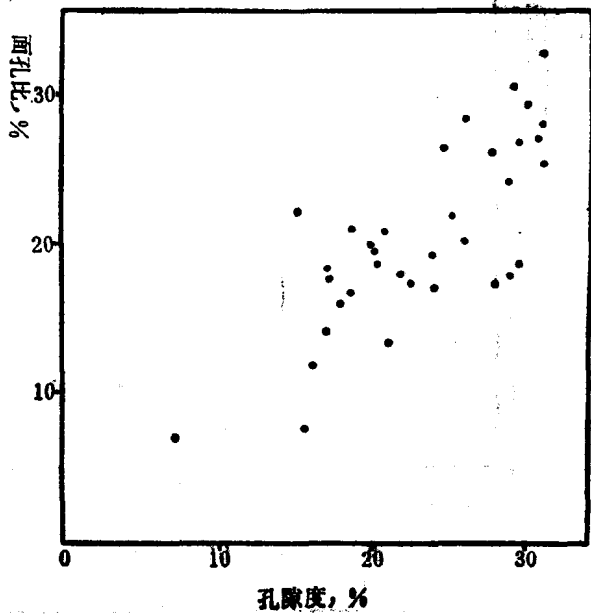


图 14 面孔比与孔隙度关系曲线

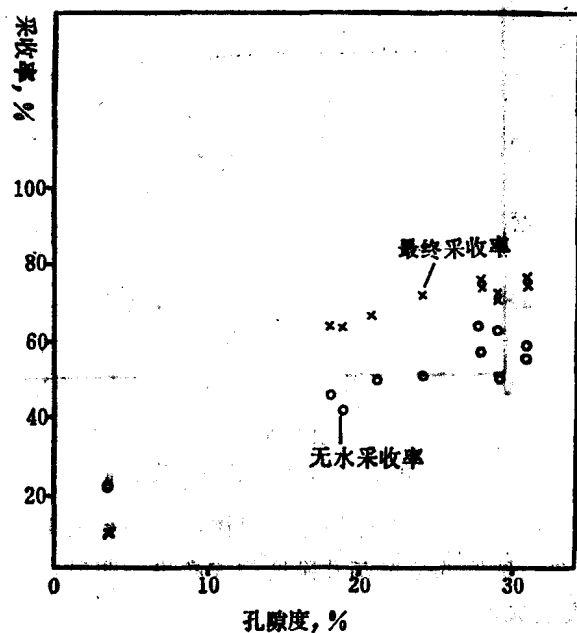


图 15 采收率与孔隙度关系曲线

图16表示了渗透率与采收率的关系，它们是不相关的。

6. 孔隙、喉道特征参数与水驱采收率的关系

图17表示了孔喉比与水驱岩样的无水采收率与最终采收率的关系。从图中看到：孔喉比

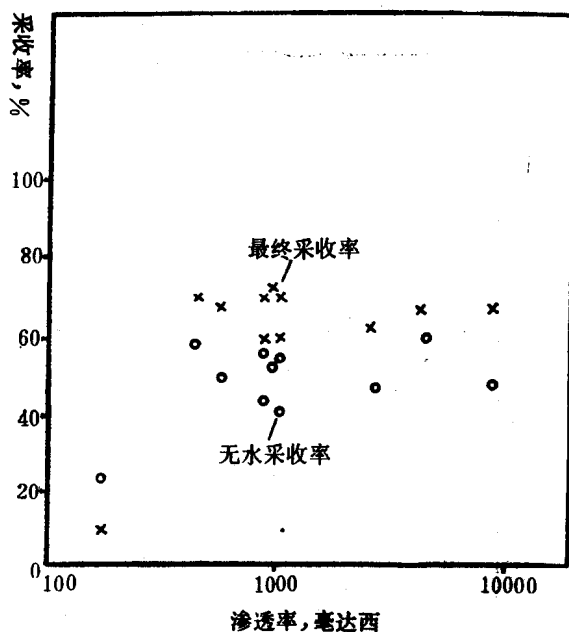


图 16 采收率与渗透率关系曲线

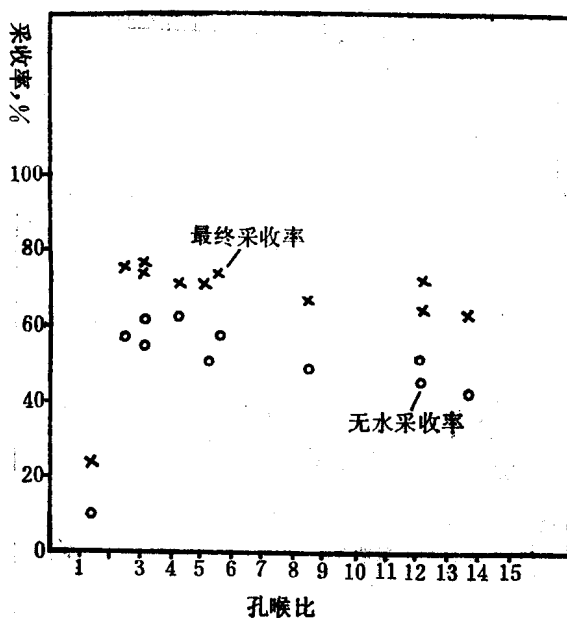


图 17 采收率与孔喉比关系曲线

小，无水和最终采收率高，孔喉比大，无水和最终采收率就低，此现象对最终采收率的符合程度更好些。同样的结论 Wardlaw 在人造的玻璃模型上开展过深入探讨。在天然砂岩上也得出此结论^[2]。

图18表示了孔隙分选系数与水驱采收率的关系。可以看到，随着孔隙分选系数变小，采收率增加了。

图19表示了喉道分选系数与水驱采收率的关系。此关系不是非常密切的。

从图17、18、19中可以看到，相对比较起来，孔喉比对采收率的影响要比孔隙分选和喉道分选对无水采收率的影响要大一些。它们的相关系数分别是0.85、0.79和不相关。

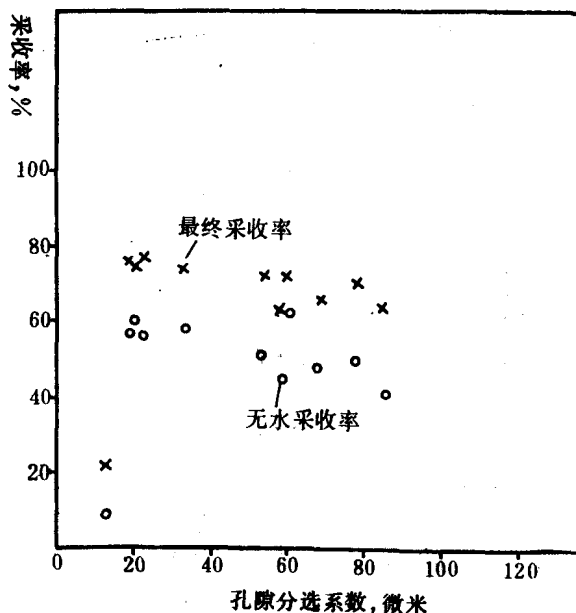


图 18 采收率与孔隙分选系数关系曲线

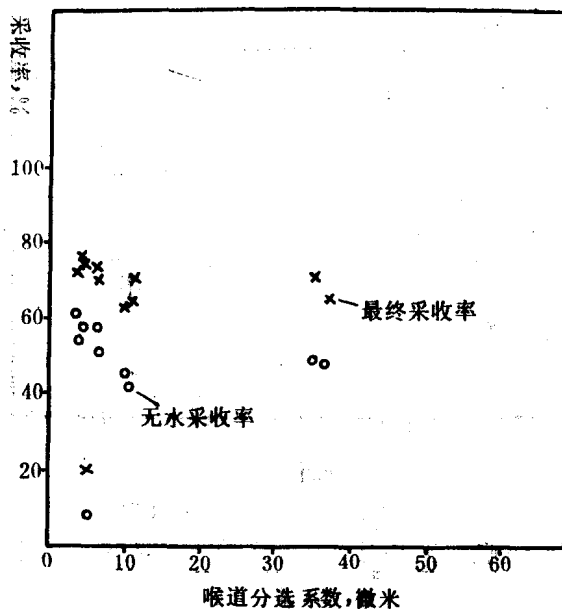


图 19 采收率与喉道分选系数关系曲线

结 论

1. 利用数字图象处理系统, 可以提取岩石铸体薄片中的孔隙特征, 并通过测定孔隙弦长分布推算孔隙大小分布及其特征参数。
2. 同一样品的喉道分布与孔隙分布是不同的; 两块喉道分布基本相同的样品, 其孔隙分布会不同; 同样, 两块孔隙分布基本相同的样品, 其喉道分布也会不相同。
3. 喉道半径大小比孔隙半径大小对渗透率影响大, 孔隙、喉道的绝对大小与孔隙度无关, 它们的分选系数与孔隙度的关系也是不明显的。
4. 面孔比值与孔隙度值基本相关。
5. 孔隙度大采收率高, 而渗透率与采收率的关系不明显。
6. 孔喉半径比小, 采收率高。

符 号 表

- $V(D)$ ——孔隙大小分布;
 D ——孔隙直径;
 t ——弦长;
 $n(t)$ ——弦长分布;
 S ——孔隙分选系数;
 N ——样本数;
 D_i ——第 i 个孔隙直径值;
 $\bar{D}$ ——孔隙直径加权平均值;
 P_i ——孔隙直径为 D_i 的频率;
 $\mathcal{D}(2r_i)$ ——喉道体积概率分布密度函数;
 u ——压汞汞的体积;
 $u_{\text{总}}$ ——压力汞的点体积;
 r ——喉道半径。

参 考 文 献

1. N. C. Wardlaw and J. P. Cassan: "Estimation of Recovery Efficiency by Visual Observation of Pore Systems in Reservoir Rocks," Bulletin of Canadian Petroleum Geology Vol. 26, No. 4 (Dec. 1978) P. 572-585
2. N. C. Wardlaw and J. P. cassan: "Oil Recovery Efficiency and the Rock-Pore Properties of Some Sandstone Reservoirs," Bulletin of Canadian Petroleum Geology Vol. 27, No. 2 (June 1979), P. 117-138
3. N. C. Wardlaw: "Pore Geometry of Carbonate Rocks as Revealed By Pore Cast and Capillary Pressure," Bull. of AAPG Vol. 60, No. 2, 1976
4. J. A. Schrank and E. Hunt: "Improved Reservoir Evaluation with the SEM," Scanning Electron Microscopy 1981 1 P. 573-578

5. F. A. L. Dullien and P. N. Mehta: "Particle Size and Pore (Void) Size Distribution Determination by Photomicrographic Methods," Powder Technol., 5 (1971/72), P 179-193
6. F. A. L. Dullien and G. K. Dhawan: "Characterization of Pore Structure by a Combination of Quantitative Photomicrography and Mercury Porosimetry," Journal of Colloid and Interface Science Vol. 47, No. 2, May 1974, P. 337-349
7. F. A. L. Dullien, et. al.,: "A Relationship between Pore Structure and Residual Oil Saturation in Tertiary Surfactant Floods," SPEJ August 1972, P. 289-296
8. K. Ruzyla: "Characterization of Pore Space by Quantitative Image Analysis," SPE 13133, 1984
9. J. W. Chan and R. L. Fullman: "On the Use of lineal Analysis for Obtaining Particle Size Distribution Functions in Opaque Samples," AIME 1956, Vol. 206, P. 610-612
10. F. A. L. Dullien, E. Rhodes and S. R. Schroeter: "Comparative Testing of Some Statistical Methods for Obtaining Particle Size Distributions," Powder Technol., 3 (1969/70) P. 124-135
11. F. A. L. Dullien "Porous Media Fluid Transport and Pore Structure" Vol. 3 1979