

储层孔隙结构的分形几何描述

贺承祖 华明琪

(成都理工学院二系, 四川成都 610059)

储层岩石在 $0.2 \sim 50 \mu\text{m}$ 的尺度范围内具有良好的分形特征。根据分形几何原理, 可推导出储层岩石孔隙分布、毛管压力、 J 函数和相对渗透率曲线以及岩石孔隙表面接触角的分形几何公式。前人指出, 岩性相近岩石的 J 函数曲线相近, 而推导出的 J 函数曲线分形几何公式表明, 相近的实质是指孔隙的分维数和毛管弯曲度。根据毛管压力曲线和 J 函数曲线的分形几何公式计算孔隙的分维数, 该法比扫描电镜法简便易行, 便于广泛应用。根据毛管压力曲线, 计算的孔隙分形参数, 可用以了解储层水敏损害及酸化作用的程度。

关键词 分形几何 孔径分布 毛管压力 J 函数 相对渗透率 接触角

第一作者简介 贺承祖 男 58 岁 教授 油藏物理化学

储层孔隙结构及物性研究在石油与天然气地质学中具有重要的理论与实际意义^[1,2]。十几年前, 这类研究还几乎都是基于欧几里得几何学进行的。由于经典的欧几里得几何学难以对储层岩石不规则的孔隙结构给出恰当的描述, 故长期以来人们不得不借助于如正态分布等数理统计方法, 用诸如均值、分选性及歪度等统计学参数来说明储层的孔隙结构及毛管压力曲线的特征, 用各种经验公式关联储层的各种物性^[1]。

本世纪 80 年代初期, 法国著名数学家 Mandelbrot^[3] 创立了一门新的学科——分形几何学, 突破了经典几何学的框架, 为解决各种复杂的自然现象开辟了一条简单而有效的途径。

Avnir 等^[4] 最早用分子吸附法指出储层岩石孔隙具有分形结构的性质, 后来 Katz 等^[5] 及 Krohn^[6,7] 用扫描电镜观察岩石断面, 发现各种砂岩、页岩及碳酸盐岩在从 $0.2 \mu\text{m}$ (仪器分辨率) 至 $50 \mu\text{m}$ 宽广的孔隙尺寸范围内具有良好的分形性质, 分维数在 $2.27 \sim 2.89$ 之间变动。前人发现, 储层的电导率^[5]、接触角^[8] 及采收率^[9] 同孔隙分维数有关; 孔隙分维数的大小反映了成岩作用的机理^[5,10]。

本文根据分形几何理论, 推导出储层的孔径分布、毛管压力曲线、 J 函数曲线、相对渗透率曲线及接触角的分形几何公式, 并论述了这些公式的理论及实际意义。

1 孔径分布及毛管压力曲线

根据分形几何原理, 若储层孔径分布符合分形结构, 则储层中孔径大于 r 的孔隙数目 $N(>r)$ 与 r 有如下幂函数关系^[3]

$$N(> r) = \int_r^{r_{\max}} P(r) dr = ar^{-D} \quad (1)$$

式中 $r_{\max}$ 为储层中最大孔隙半径; $P(r)$ 为孔径分布密度函数; a 为比例常数; D 为孔隙分维数。

(1) 式对 r 求导, 可得到孔径分布密度函数 $P(r)$ 的表示式

$$P(r) = \frac{dN(> r)}{dr} = a' r^{-D-1} \quad (2)$$

式中 $a' = -Da$ 为比例常数。

将(2)式代入下式积分, 可得到储层中孔径小于 r 的孔隙累积体积 $V(< r)$ 的表示式

$$V(< r) = \int_{r_{\min}}^r P(r) \cdot \alpha r^3 dr = a'' (r^{3-D} - r_{\min}^{3-D}) \quad (3)$$

式中 常数 $a'' = a' \alpha / (3-D)$, α 为与孔隙形状有关的常数(如孔隙为立方体, $\alpha = 1$; 为球体时则 $\alpha = 4\pi/3$, $r_{\min}$ 为储层中最小孔隙半径。同理, 储层的总孔隙体积 V 为

$$V = a'' (r_{\max}^{3-D} - r_{\min}^{3-D}) \quad (4)$$

将(3)及(4)式代入下式, 可得到孔径小于 r 的累积孔隙体积分数 S 的表示式

$$S = \frac{V(< r)}{V} = \frac{r^{3-D} - r_{\min}^{3-D}}{r_{\max}^{3-D} - r_{\min}^{3-D}} \quad (5)$$

由于 $r_{\min} \ll r_{\max}$, r , 上式可简化为

$$S = \left(\frac{r}{r_{\max}} \right)^{3-D} \quad (6)$$

由此得到储层孔径分布的分形几何公式。

若储层孔隙遵守 Laplace 公式^[11]

$$P_c = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (7)$$

式中 P_c 为孔径 r 相应的毛管压力; σ , θ 分别为液体的表面张力和接触角。将该式代入(6)式得到

$$S = \left(\frac{P_c}{P_{\min}} \right)^{D-3} \quad (8)$$

式中 $P_{\min}$ 为储层中最大孔径 $r_{\max}$ 相应的毛管压力, 即入口毛管压力; S 为毛管压力 P_c 时储层中润湿相饱和度。我们由此得到储层毛管压力曲线的分形几何公式。

2 J 函数曲线

Leverett 等^[12, 13] 为消除孔隙度 Φ 和渗透率 K 对毛管压力的影响, 提出了无量纲毛管压力—— J 函数的概念, 该函数的定义式为

$$J = \frac{P_c}{\sigma \cos \theta} \left(\frac{K}{\Phi} \right)^{1/2} \quad (9)$$

他们指出, 岩性相近岩样的数据点将落在同一条 J 函数-润湿相饱和度 S 曲线, 即 J 函数曲线周围, 故可用 J 函数曲线描述岩性相近储层的毛管压力特征。长期以来, J 函数曲线在油层物理学中获得了广泛的应用, 但对于岩性相近的含义人们至今尚不明了。我们发现, 根据上面得到的公式和毛管束模型可解决这一问题, 现推导如下。

按 Poiseuille 定律(文献[11]公式 4.78), 在压差 ΔP 作用下粘度 μ 的流体流过半径 r_i 、长 L 的毛细管 i 的流量 q_i 为

$$q_i = \frac{\pi r_i^4 \Delta P}{8 \mu L} \quad (10)$$

代入毛细管的体积 $V_i = \pi r_i^2 L$, 上式成为

$$q_i = \frac{\Delta P}{8 \mu L^2} V_i r_i^2 \quad (11)$$

设多孔介质是由毛管束组成的, 则由上式得到流量 $q = \sum_i q_i$ 的表示式

$$q = \frac{\Delta P}{8 \mu L^2} \sum V_i r_i^2 \quad (12)$$

将毛细管 i 的体积 V_i 、长 L 、毛细管 i 占总孔隙体积的分数 S_i 、多孔介质的孔隙度 Φ 及横截面积 A 的关系式 $V_i = \Phi A L S_i$ 代入上式, 得到

$$q = \frac{\Phi A \Delta P}{8 \mu L} \sum S_i r_i^2 \quad (13)$$

设多孔介质中的流动服从 Darcy 公式(文献[1]公式 4.15)

$$q = \frac{K A \Delta P}{\mu L'} \quad (14)$$

式中 L' 为多孔介质的长度。比较(14)与(13)式得到

$$K = \frac{f \Phi}{8} \sum S_i r_i^2 \quad (15)$$

式中 $f = L'/L$ 为多孔介质中毛细管的弯曲度。

由于孔隙分布是连续的, 上式可写为积分的形式

$$K = \frac{f \Phi}{8} \int_0^1 r^2 dS \quad (16)$$

将(6)式代入上式积分后移项, 得到

$$r_{\max} = \left(\frac{8K}{f \Phi} \frac{5-D}{3-D} \right)^{1/2} \quad (17)$$

再将(6)、(7)及(17)式代入(9)式, 最后得到

$$J = \left(\frac{f}{2} \frac{3-D}{5-D} \right)^{1/2} S^{1/(D-3)} \quad (18)$$

我们由此得到 J 函数曲线的分形几何公式。由该式可以看出, J 函数仅与分维数 D 、毛细管弯曲度 f 及润湿相饱和度 S 有关, 因此分维数 D 及毛细管弯曲度 f 相近岩样的数据点必然分布在同一条 J 函数曲线附近, 这就是岩性相近的含义。

3 计算分形参数

将(8)及(18)式取对数, 分别得到

$$\lg S = (3-D) \lg P_{\min} + (D-3) \lg P_c \quad (19)$$

$$\lg S = \frac{3-D}{2} \lg \left(\frac{f}{2} \frac{3-D}{5-D} \right) + (D-3) \lg J \quad (20)$$

如储层孔隙结构具有分形性质, 则按照(19)式根据毛管压力曲线资料 $\lg S$ 对 $\lg P_c$ 作图得到一条直线, 根据直线的斜率及截距可计算出孔隙分维数 D 及入口毛管压力 $P_{\min}$ 的数值; 按

照(20)式根据 J 函数曲线资料 $\lg S$ 对 $\lg J$ 作图得到一条直线, 根据直线的斜率及截距可计算出孔隙分维数 D 及毛细管弯曲度 f 的数值。也可应用电子计算机计算代替图解法, 由此可获得更为精确的结果, 即 $\lg S$ 对 $\lg P_c$ 或 $\lg J$ 进行线性回归分析。若孔隙结构具有分形性质, 则得到显著相关的回归方程, 并由方程的系数可计算出分形参数 D 及 $P_{\min}$ 或 D 及 f 的数值。我们用这种方法处理了四川盆地三叠系 8 块砂岩的压汞资料, 结果如表 1a 所示。由该表可以看出, 回归方程的相关系数在 0.99 以上, 说明这些岩样的孔隙结构具有良好的分形性质。这 8 块岩样的孔隙分维数为 2.53~2.79, 在 Krohn 用扫描电镜法对各类储层岩石所得结果(2.27~2.89)的范围内。

表 1 根据压汞资料计算出的孔隙分形参数

(a)

编号	$P_{\min}/\text{MPa}$	$r_{\max}/\mu\text{m}$	D	相关系数
1	0.229	3.28	2.79	0.995
2	0.748	1.00	2.64	0.994
3	0.354	2.11	2.72	0.992
4	0.135	5.55	2.77	0.991
5	0.845	0.888	2.59	0.993
6	0.532	1.41	2.66	0.994
7	0.531	1.41	2.68	0.994
8	0.821	0.914	2.53	0.990

(b)

编号	$P_{\min}/\text{MPa}$	$r_{\max}/\mu\text{m}$	D	相关系数
1	0.0417	18.0	2.63	0.999
2	0.107	9.35	2.61	0.999
3	0.293	4.30	2.56	0.999
4	0.610	1.23	2.45	0.995
5	1.786	0.420	2.41	0.996

透率降低的现象叫做储层水敏。Amaefule 等^[17]提出, 可根据水敏等损害或酸化前后储层岩样的毛管压力曲线, 了解水敏与酸化对储层孔隙结构的影响, 还可利用某些经验参数进行定量评价。我们提出, 可用上节方法根据毛管压力曲线计算孔隙分形参数, 由此了解水敏等损害或酸化对储层孔隙分形参数的影响。

文献[17]图 5 给出了 3 种水溶液在同一砂岩样中的气/水毛管压力曲线。溶液 1 含有粘土稳定剂和电解质, 可使岩样中的粘土矿物保持稳定; 溶液 2 中仅含电解质, 使岩样中粘土矿

原海涵^[14]提出用幂函数经验关系式(21)表示毛管压力曲线

$$P_c = b S^c \tag{21}$$

并用计算机回归分析方法处理了陕甘宁盆地三叠系 5 块砂岩的压汞资料, 计算出这些岩样经验常数 b 与 c 的数值(原文中 S 的指数为 $-D$, 为不与分维数混淆, 上式中用 c 来代替), 其相关系数均在 0.995 以上。比较(8)与(21)式可以看出, 经验常数 b, c 与分形参数有如下关系: $b = P_{\min}, c = 1/(D - 3)$ 。将经验参数换算为分形参数, 结果如表 1b 所示, 分形参数在 2.41~2.63 之间, 得到与表 1a 类似的结果。

前人^[15, 16]已用压汞资料计算了煤及活性炭孔隙结构的分维数, 但在油、气层地质学中至今未见到有关的应用报道。该法比目前常用的扫描电镜法不但简便易行, 而且可直接得到三维孔隙空间的信息, 故较扫描电镜法优越, 值得进一步研究和推广应用。

4 水敏及酸化对孔隙分形参数的影响

淡水或低盐度水侵入储层, 置换地层水后, 引起地层中粘土矿物(如蒙脱石)水化膨胀或(如高岭石)分散运移, 堵塞孔隙喉道, 使地层渗

物的稳定性有所下降; 溶液 3 为淡水, 使岩样中粘土矿物的稳定性进一步明显下降。随着溶液由 1 至 3 的顺序, 毛管压力曲线随孔隙堵塞程度的增加向右上方移动。根据该图计算出这三种溶液与岩样接触时, 岩样孔隙分形参数的数值如表 2 所示, 随着溶液由 1 至 3 的顺序 $r_{\max}$ 降低, 而 D 增加。 $r_{\max}$ 降低说明随着水敏性增加, 孔隙堵塞程度加剧, 这是预料之中的事实; 但 D 随之增加则是一值得重视的新现象。我们认为, D 增加说明粘土矿物对小孔隙的堵塞比对大孔隙要大, 使孔隙分布的不均匀程度增加; 也可认为, D 增加是由于粘土矿物水化膨胀或分散运移之后, 使储层中小孔隙的数目增加所致。

表 2 水敏对孔隙结构分形参数的影响

编号	水溶液	$P_{\min}/\text{MPa}$	$r_{\max}/\mu\text{m}$	D	相关系数
1	粘土稳定剂电解质	1. 03	0. 282	2. 44	0. 998
2	电 解 质	1. 23	0. 236	2. 55	0. 992
3	淡 水	2. 59	0. 083 4	2. 59	0. 991

根据储层岩样酸化前后气/水毛管压力曲线, 计算出相应的孔隙分形参数(表 3)。由该表可以看出, 碳酸盐岩和砂岩酸化后 $r_{\max}$ 均有不同程度的增加; 但 D 的变化则有所不同, 前者使 D 增加, 后者则使 D 减小。我们认为, 上述现象可能同酸化机理有关。碳酸盐岩酸化的注入液为盐酸, 当酸化液注入岩样后, 按 Poiseuille 定律, 在大孔隙中比在小孔隙中流动要快, 由于传质速度随流速增加而增加, 故大孔隙中酸蚀速度比小孔隙中要快, 使孔隙分布不均匀程度增加, 故分维数 D 随之增加; 砂岩酸化的注入液为土酸, 当它注入岩样后, 优先与比表面较大的小孔隙反应, 使孔隙不均匀程度降低, 故分维数 D 随之减小。用分形几何研究储层损害、保护与酸化增产措施, 是一值得重视的研究方向。

表 3 酸化对岩样孔隙分形参数的影响

酸化液	岩 样		$P_{\min}/\text{M Pa}$	$r_{\max}/\mu\text{m}$	D	相关系数
15% HCl	灰 岩	酸化 前	0. 245	3. 06	2. 65	0. 992
		酸化 后	0. 032 0	23. 4	2. 79	0. 995
	白 云 岩	酸化 前	0. 268	2. 62	2. 62	0. 993
		酸化 后	0. 106	7. 08	2. 74	0. 990
3% $\text{HF}/12\%\text{HCl}$	砂 岩	酸化 前	0. 228	1. 27	2. 55	0. 996
		酸化 后	0. 104	2. 80	2. 39	0. 997

5 相对渗透率曲线

根据毛管束模型, 将(7)代入(16)式, 应用适当的积分限, 可得到计算润湿相相对渗透率 K_{rw} 及非润湿相相对渗透率 K_{rnw} 的 Purcell 型公式^[18]

$$K_{\text{rw}} = \frac{\int_0^s \text{d}S/P_c^2}{\int_0^1 \text{d}S/P_c^2}$$

(22)

$$K_{\text{rnw}} = \frac{\int_s^1 \text{d}S/P_c^2}{\int_0^1 \text{d}S/P_c^2}$$

(23)

但此式与实验事实偏差较大。

Burdine^[19]认为:毛管弯曲度不是一定值,而是与润湿相饱和度有关,不应在上述公式中被抵消;润湿相饱和度中束缚润湿相不参与流动,应扣除,从而得到如下的改进式

$$K_{rw} = \frac{\int_0^{S'} dS/P_c^2}{\int_0^1 dS/P_c^2} \quad (24)$$

$$K_{rmw} = (1 - S')^2 \frac{\int_{S'}^1 dS/P_c^2}{\int_0^1 dS/P_c^2} \quad (25)$$

式中 S' 为有效润湿相饱和度,其定义式为

$$S' = \frac{S - S_i}{1 - S_i} \quad (26)$$

式中 S_i 为束缚润湿相饱和度。

将(8)代入(24)及(25)式,积分后得到相对渗透率的分形几何公式

$$K_{rw} = S'^2 S'^{\frac{\lambda-D}{3-D}} = S'^{\frac{11-3D}{3-D}} \quad (27)$$

$$K_{rmw} = (1 - S')^2 (1 - S')^{\frac{\lambda-D}{3-D}} \quad (28)$$

前人曾提出与(28)式相类似的经验式^[20]

$$K_{rmw} = (1 - S')^2 (1 - S')^{\frac{2+\lambda}{\lambda}} \quad (29)$$

并提出将 $\lg P_c$ 对 $\lg S$ 或 $\lg J$ 对 $\lg S$ 作图,可得到一直线,式中的经验常数等于该直线斜率的负倒数。我们比较(19)或(20)式不难看出 $\lambda = 3 - D$;由此说明,前人的经验式(29)可用分形几何加以解释。

6 表面粗糙度对接触角的影响

储层流体在岩石孔壁上的接触角对储层流体的毛管压力、分布及渗流具有十分重要的影响^[2]。通常测量接触角是在磨光的岩面上进行的,而岩石孔壁则是很粗糙的。已知固体表面的粗糙程度对接触角的影响很大,因此为了定量说明接触角对上述储层物性的影响,必须弄清楚孔壁粗糙对接触角的影响^[21]。

早在1936年Wenzel^[22]就提出,将固体表面的真实面积与表观面积的比值 r' 定义为固体表面的粗糙度,其值越大,表面越粗糙。设流体1和2在固体表面 S 达到润湿平衡,接触角为 θ 则如图1所示。若在平衡条件下界面在固体表面 S 上向前推进, S_1 界面的表观面积增加 dS ,使 S_1 界面的真实面积增加 $r'dS$, S_2 界面的真实面积减少 $r'dS$, $S_1, 2$ 界面的真实(也是表观)面积增加 $dS \cos \theta$ 。由于此过程是在平衡条件下进行的,界面自由能变化为零,于是有

$$\sigma_{S1} r' dS - \sigma_{S2} r' dS + \sigma_{1,2} dS \cos \theta = 0 \quad (30)$$

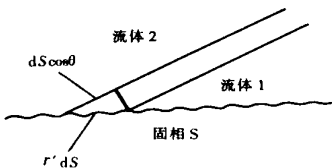


图1 表面粗糙度对接触角的影响

或

$$\cos\theta' = \frac{r'(\sigma_{S2} - \sigma_{S1})}{\sigma_{1,2}} \quad (31)$$

式中 σ_{S1} , σ_{S2} , $\sigma_{1,2}$ 分别为 $S1$, $S2$ 及 $S1, 2$ 界面的表面张力。

若固体表面是平滑的, 则固体表面的粗糙度 $r' = 1$, 于是(31)式成为

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{S2} - \sigma_{S1}}{\sigma_{1,2}} \quad (32)$$

式中 θ 为平滑固体表面的接触角。该式被称为 Young 公式^[11]。

联立(31)及(32)式, 得到 Wenzel 公式^[21]

$$\cos\theta' = r' \cos\theta \quad (33)$$

该式看似简单, 但其中固体表面的粗糙度乃是一个难以获得的量, 因为固体表面的真实面积难以用经典几何学的方法测量出来。

为了测量一个平面的面积, 可用一边长为 l 的小正方形作为码尺进行测量, 即用这个小正方形来覆盖它。设所需小正方形的数目为 N , 则平面的面积 A 为

$$A = N l^2 \quad (34)$$

若所测量的平面为一边长 L 的正方形, 由于 $A = L^2$, 故所需小正方形的数目 N 为

$$N = \left(\frac{L}{l}\right)^2 \quad (35)$$

可以证明, 当所测量的对象为一光滑曲面时, (35)式仍然成立, 测量所用码尺也不限于小正方形。

当所测量的对象为一粗糙的曲面时, 按分形几何原理所需小正方形数目的表示式(35)被修正为

$$N = \left(\frac{L}{l}\right)^D \quad (36)$$

式中 D 为欲测曲面的分维数, D 的取值在 2 与 3 之间。光滑曲面的 D 值为 2, 这时(36)还原为(35)式。

将(36)代入(34)式, 得到粗糙曲面的表面积, 即固体表面的真实面积 A' 的表示式

$$A' = \left(\frac{L}{l}\right)^D l^2 = l^2 \left(\frac{L}{l}\right)^{2-D} \quad (37)$$

由于固体表面的表观面积为 L^2 , 故由上式可得到固体表面粗糙度 r' 的表示式

$$r' = \left(\frac{L}{l}\right)^{2-D} \quad (38)$$

对于光滑的固体表面 $D = 2$, 由该式得到 $r' = 1$, 此结果符合粗糙度的定义。

由(38)式可以看出, 固体表面的粗糙度 r' 不仅与固体表面的分维数 D 有关, 而且与固体表面和码尺的线度 L 和 l 的大小有关。可以看出, 在讨论与润湿性有关的问题时, 流体分子充当着码尺的角色, l 值即为流体分子的线度大小。 L 值表示与流体相接触的固体表面线度的大小, 但因分形性质仅在一定的线度范围内遵守, 因此 L 值总是被分形区域的上限所限制, 故可用后者作为 L 的近似取值。

根据以上论述不难看出, 与流体 1 和 2 相接触的固体表面的粗糙度是不相同的, 故(30)式被修正为

$$\sigma_{s1} r'_{s1} dS - \sigma_{s2} r'_{s2} dS + \sigma_{1,2} dS \cos \theta' = 0 \quad (39)$$

式中 r'_{s1} , r'_{s2} 分别为与流体 1 和 2 相接触的固体表面的粗糙度。将(38)式代入上式, 得到

$$\sigma_{s1} \left(\frac{l_1}{L}\right)^{2-D} dS - \sigma_{s2} \left(\frac{l_2}{L}\right)^{2-D} dS + \sigma_{1,2} dS \cos \theta' = 0 \quad (40)$$

消去 dS , 移项得到

$$\cos \theta' = \frac{\sigma_{s2} \left(\frac{l_2}{L}\right)^{2-D} - \sigma_{s1} \left(\frac{l_1}{L}\right)^{2-D}}{\sigma_{1,2}} \quad (41)$$

式中 l_1 , l_2 分别为流体 1, 2 分子的横截面直径。

在讨论油藏流体润湿性时, 所涉及流体分子的尺寸一般相差不大(如水和烃分子横截面直径分别为 3.7×10^{-4} 和 $5.0 \times 10^{-4} \mu\text{m}$), l_1 及 l_2 可用平均值 $\bar{l} = (l_1 + l_2)/2$ 来代替, 这时(41)式可近似写为

$$\cos \theta' = \left(\frac{\bar{l}}{L} \right)^{2-D} \frac{(\sigma_{s2} - \sigma_{s1})}{\sigma_{1,2}} \quad (42)$$

联立(32)及(42)式, 得到

$$\cos \theta' = \left(\frac{\bar{l}}{L} \right)^{2-D} \cos \theta \quad (43)$$

该式可视为 Wenzel 公式的分形几何表示式。

将储层岩石分形结构的上限 $50 \mu\text{m}$ 作为 L 的取值, 将水和烃分子横截面直径的平均值 $4.4 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ 作为 $\bar{l}$ 的取值, 代入(43)式得到

$$\cos \theta' = (8.8 \times 10^{-6})^{2-D} \cos \theta \quad (44)$$

该式计算结果表明, 当分维数 D 为 2.1 时, 可使 $\theta < 72^\circ$ 成为 $\theta' = 0^\circ$, $\theta > 108^\circ$ 成为 $\theta' = 180^\circ$; 当分维数 D 为 2.4 时, 可使 $\theta < 89^\circ$ 成为 $\theta' = 0^\circ$, $\theta > 91^\circ$ 成为 $\theta' = 180^\circ$ 。此结果说明, 由于储层孔壁粗糙, 会使储层润湿性成为完全亲水($\theta' = 0^\circ$)或完全亲油($\theta' = 180^\circ$)的两个极端情况。不过, 上述结论是基于热力学平衡条件推导出来的, 在实际条件下由于润湿滞后而难以完全达到上述情况。

7 结语与讨论

(1) 根据分形几何理论, 推导出储层孔径分布、毛管压力曲线、 J 函数曲线、相对渗透率曲线及粗糙表面上接触角的计算公式, 并与前人的有关经验公式进行了比较, 解释了有关经验常数的物理意义, 特别是 J 函数计算公式, 明确了岩性相近的实质是孔隙分维数和毛管弯曲度相近。

(2) 根据推导出的毛管压力及 J 函数曲线的计算公式, 可计算储层岩石孔隙的分维数。该法比扫描电镜法简便, 易于推广应用。

(3) 比较水敏损害和酸化前后岩样的气/水毛管压力曲线, 可研究水敏损害及酸化作用对储层孔隙分维数及孔径的影响。随着水敏程度增高, 孔隙堵塞程度增高, 特别是小孔隙; 经酸化后, 砂岩和碳酸岩的大孔隙都有不同程度的增加, 但分维数 D 却不一致, 前者 D 降低, 后者 D 增高。

(4) 根据分形几何理论, 推导出表面粗糙度对接触角影响的计算公式。鉴于储层岩石表面

具有分形结构的性质, 在润湿达到平衡时, 总是趋向于完全亲油或完全亲水这两种极端状态。由于润湿滞后, 实际上很难达到这种情形。

参 考 文 献

- 1 罗蛰潭, 王允诚. 油气储集层的孔隙结构. 北京: 科学出版社, 1986. 106~ 123
- 2 贺承祖, 华明琪. 油气藏物理化学. 成都: 电子科技大学出版社, 1995. 66~ 75
- 3 Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature. San Francisco: Freeman, 1982
- 4 Pfeifer P, Avnir D. Chemistry in nointegral dimensions between two and three. J Chem Phys, 1983, 79(7): 3 369~ 3 558
- 5 Katz A J, Thompson A H. Fractal sandstone pores: implications for conductivity and formation. Phys Rev Lett, 1985, 54(3): 1 325~ 1 328
- 6 Krohn C E. Sandstone fractal and euclidean pore volume distributions. Geophys Res, 1988, 93(B4): 3 286~ 3 296
- 7 Krohn C E. Fractal measurements of sandstone, shales and carbonates. Geophys Res, 1988, 93(B4): 3 297~ 3 305
- 8 Haziatt R D. Fractal applications: wettability and contact angle. J Colloid Interface Sci, 1990, 137(2): 527~ 533
- 9 贾芬敏, 沈平平, 李克文. 砂岩孔隙结构的分形特征及应用研究. 断块油气田, 1995, 1(2): 16~ 21
- 10 王域辉, 毛治超, 陈传仁等. 砂岩中准谢尔宾斯基海绵体的发现. 江汉石油学院学报, 1992, 14(3): 108
- 11 周祖康, 顾惕人, 马季铭. 胶体化学基础. 北京: 北京大学出版社, 1987. 13, 130, 216
- 12 Leverett M C. Capillary behavior in porous solids. Trans AIMME, 1941, 142: 151~ 169
- 13 Rose W R, Bruce W A. Evaluation of capillary character in petroleum reservoir rock. Trans AIMME, 1949, 186: 127~ 142
- 14 原海涵. 用函数积分法确定各种孔隙结构的各种实用参数. 西安石油学院学报, 1997, 11(5): 12~ 15
- 15 Fresen W I, Mikula R J. Fractal dimentions of coal particles. J Colloid Interface Sci, 1987, 121(1): 263~ 271
- 16 Ehbunger Dolle F, Lavanchy A, Stoeckli F. Determination of the structure of the surface dimension of active carbons by mercury Porosimetry. J Colloid Interface Sci, 1974, 166(2): 451~ 461
- 17 Amaefule J O, Masuo S T. The use of capillary pressure data for rapid evaluation of formation damage or stimulation. SPEPE, 1996, 1(2): 131~ 142
- 18 Purcell W R. Capillary pressures- their measurement using mercury and the calculation of permeability therefrom. Trans AIMME, 1949, 186: 39~ 48
- 19 Burdine N T. Relative permeability calculation from size distribution data. Trans AIMME, 1953, 198: 71~ 78
- 20 Jennings J B. Capillary pressure techniques: application to exploration and development geology. AAPG Bull, 1987, 71(10): 1 196~ 1 209
- 21 Morrow N R. The effects of surface roughness on contact angle with special reference to petroleum recovery. J Can Pet Tech, 1975, 14(4): 42~ 53
- 22 Wenzel R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water. Ind Eng Chem, 1938, 28(3): 102~ 988

FRactal Geometry Description of Reservoir Pore Structure

He Chengzu Hua Mingqi

(Department of Applied Chemistry, Chengdu Institute of Technology, Chengdu, Sichuan)

Abstract

That the grain sizes are between 0.2~ 50 μm have fractal property. According to the principle of the fractal geometry, the expressions of pore size distribution curve, capillary pressure curve, J function curve, relative permeability curve and equilibrium contact angle of the reservoir rocks could be derived. Leverett. et. al show that the reservoir rocks with the similar properties have unique J function curve. The expression derived for J function curve indicates that the reservoir rocks of this kind have the similar fractal dimension and pore tortuosity. The expression of the capillary pressure and J function curve could be used to calculate the fractal dimension of the reservoir rock pore structure and its change after the water sensitivity or acidizing. This method is simpler than scanning electron microscopy.