

文章编号:1000-0550(2017)01-0151-12

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.01.015

致密气储层孔喉分形特征及其与渗流的关系

——以鄂尔多斯盆地地下石盒子组盒8段为例

吴浩^{1,2}, 刘锐娥³, 纪友亮^{1,2}, 张春林³, 陈胜³, 周勇^{1,2}, 杜威^{1,2}, 张云钊⁴, 王晔^{1,2}

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2. 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

3. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007

4. 中国石油大学(北京)非常规天然气研究院, 北京 102249

摘要 选取鄂尔多斯盆地盒8段16块致密砂岩样品进行恒速压汞测试, 结合同位样品核磁共振实验, 分析了致密气储层孔喉分布特征; 在此基础上, 运用分形几何原理和方法, 开展了致密气储层孔喉分形研究, 并表征了分形与储层渗流特征和孔隙结构参数的关系。结果表明: 致密气储层有效孔隙被亚微米—微米级孔喉所控制, 其中孔隙主要为大孔和中孔, 喉道由微喉道、微细喉道和细喉道所组成; 致密气储层孔隙分布不具分形特征, 而孔喉整体和喉道则符合分形结构, 且分别对应分形维数 D_1 和 D_2 ; 基于储层孔喉分形结构与其渗流特征, 将盒8段致密气储层孔喉分形结构划分为2种类型: I型表现为阶段式分形特征, 以进汞压力1 MPa为界, 大于1 MPa孔喉具有分形特征, 且储层阶段进汞饱和度主要由喉道贡献, 反之, 孔喉不符合分形特征, 其进汞饱和度和增量由孔隙贡献; II型为整体式分形, 进汞饱和度几乎全由喉道贡献。储层孔喉分形维数与渗透率、平均喉道半径和主流喉道半径存在较好的负相关性, 与微观非均质系数呈现较明显的正相关性, 而与孔隙度、平均孔隙半径和平均孔喉半径比之间没有明显的相关性。

关键词 孔隙结构; 分形维数; 渗流特征; 致密气储层; 恒速压汞

第一作者简介 吴浩, 男, 1990年出生, 博士研究生, 沉积学与储层地质学, E-mail: H.Wu1990@outlook.com

通讯作者 纪友亮, 男, 教授, E-mail: jiyouliang@cup.edu.cn

中图分类号 TE122.2 **文献标识码** A

0 引言

常规油气的日益枯竭使得致密油气成为现今国内外油气勘探与开发的重点领域。鄂尔多斯盆地上古生界盒8段是典型的致密砂岩气储层^[1-2], 是国内致密气勘探与开发的主力层系。随着苏里格、乌审旗等一批上万亿方的大型油气田(藏)相继发现^[3-5], 促进了致密气相关领域的研究; 其中致密气储集层孔隙结构一直是研究的热点^[6-10], 因为其不仅控制着储层渗流特征, 且直接影响着致密气井的产量和最终采收率^[7, 11]。

致密气储层孔隙具有纳米级到微米级尺度的较强非均质性, 常规欧式几何理论描述孔隙结构受到一定的约束, 而这一问题被后来 Mandelbrot 创立的分形几何有效解决, 其提出分形维数可以用来定量的描述

孔隙结构的复杂性^[12-13]。储层的孔隙结构具备一定的分形特征, 其对评价致密气优质储层具有指导意义。目前, 针对致密砂岩储层孔隙结构的研究手段多样, 主要包括流体注入法和光电磁辐射技术(图1)^[7, 14-15]。国内外学者应用这些技术对砂岩储层孔隙结构分形特征进行了大量研究, 但主要集中在常规压汞技术^[16]、小角度中子散射法^[17]、扫描电镜法^[18]、核磁共振^[19]等手段。对比这些研究方法, 均无法得到储层的有效孔隙和喉道数量, 影响了研究的可靠性^[20-21]。此外, 对储层孔隙结构分形的研究存在一个根本问题, 就是尚未对所使用实验技术是否能够识别出储层的有效孔喉进行论证, 就直接应用实验结果做分形研究, 其对勘探与开发失去了指导意义。因此, 本文选择鄂尔多斯盆地盒8段致密砂岩作为研究对象, 利用恒速压汞、核磁共振技术首先对储层的有

收稿日期: 2016-02-02; **收修改稿日期**: 2016-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272157); 国家科技重大专项(2016ZX05007-003); 中国石油科技创新基金(2014D-5006-0101); 中国石油大学(北京)科研基金(2462013YJRC038, 2462015YQ0108) [**Foundation**: National Natural Science Foundation of China, No.41272157; Major National Science and Technology Project, No.2016ZX05007-003; CNPC Innovation Foundation, No.2014D-5006-0101; Science Foundation of China University of Petroleum, Beijing, No.2462013YJRC038, 2462015YQ0108]

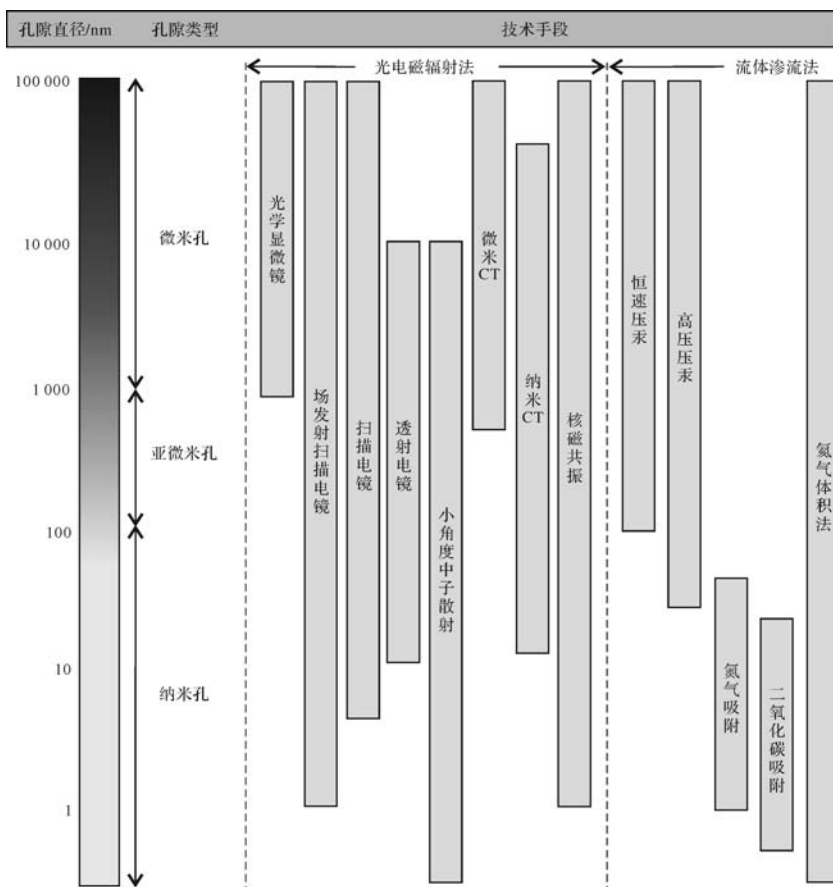


图 1 非常规油气储层孔隙结构表征方法

(据 Clarkson *et al.*^[7]; Bustin *et al.*^[14]; 任晓霞等^[15]修改)

Fig.1 Methods used to characterize the pore structure of unconventional oil and gas reservoirs

(modified from Clarkson *et al.*^[7], Bustin *et al.*, Ren *et al.*^[15])

效孔喉分布特征进行研究,在此基础上,应用分形几何理论开展致密气储层孔喉分形特征,并厘定储层孔隙结构分形与储层渗流特征和孔隙结构参数的关系,旨在为致密气的勘探与开发提供地质依据。

1 地质背景与样品

鄂尔多斯盆地位于华北地台西缘,北邻阴山褶皱带,南接秦岭造山带,西抵盆缘冲断带,东至晋西挠褶带,属于华北地台的次级构造单元。盆内发育一系列轴向为近东西向的鼻状隆起带,区域断裂构造微弱。在中二叠统下石盒子组盒 8 沉积期主要为河流—三角洲沉积,受多物源控制,盆地大面积富砂,古地理格局表现为一个“敞流型洪泛盆地”,无统一汇水区。沉积岩性以灰色、浅灰色砂岩和泥岩为主,储集岩石类型主要为中粒和中—粗粒石英砂岩、岩屑石英砂岩和少量的岩屑砂岩^[3]。

本次研究选取鄂尔多斯盆地盒 8 段致密砂岩气

富集区苏里格、乌审旗等地区 13 块样品(深度普遍小于 3 500 m),及具勘探潜力前景区的陇东地区 3 块样品(平均深度在 4 000 m 左右),共计 16 块代表性的致密砂岩样品;岩性均为灰色、浅灰色中粒和中—粗粒致密砂岩,且陇东地区的样品整体上相对更加致密。将 16 块样品钻取成直径为 2.5 cm 的标准岩样塞,清洗并烘干,参照 SY/T5336—1996 标准对岩样进行氦孔隙度和渗透率测量,结果显示孔隙度分布在 6.53%~15.45%,平均值为 9.45%;渗透率分布在 $(0.042\sim 1.690)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,平均 $0.470\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ (表 1)。

2 致密砂岩孔喉分布特征

2.1 实验方法

使用美国岩芯实验系统公司研发的 APSE-730 型恒速压汞分析仪,仪器工作压力 0~6.205 5 MPa,进汞速度 0.000 001 mL/s~1 mL/min,接触角 140°,

表面张力 485 dyne/cm;从每个标准岩样塞中选取物性较好部分制成直径为 1 cm 的圆柱体岩芯做恒速压

表 1 取样、实验信息及样品物性数据

Table 1 Samples, experiment information and its helium porosity and air permeability

采样地点	样品编号	井号	深度 /m	孔隙度 /%	渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$	恒速压汞	核磁共振
苏里格中带	1-Sz	S16	3 342.98	10.60	0.631	☆	
	2-Sz	S59	3 509.61	9.79	0.121	☆	☆
	3-Sz	S120	3 639.15	9.50	0.960	☆	
	4-Sz	S315	3 750.65	7.20	0.521	☆	
	5-Sz	T6	3 365.05	10.00	0.659	☆	
	6-Sz	Sn309	3 452.00	8.50	0.377	☆	
苏里格东带	7-Sd	Tg4	2 907.55	15.45	1.690	☆	☆
	8-Sd	Tg31	2 825.32	9.30	0.119	☆	
	9-Sd	M12	1 897.27	11.79	0.290	☆	☆
	10-Sd	Sg11	2 269.79	9.20	0.339	☆	
	11-Sd	Sg52	2 269.32	9.00	0.598	☆	
	12-Sd	Sg54	2 633.96	8.40	0.042	☆	
	13-Sd	Y19	2 285.12	10.40	0.393	☆	
陇东地区	14-Ld	L3	3 773.94	6.53	0.103	☆	☆
	15-Ld	Q4	4 324.20	8.79	0.141	☆	☆
	16-Ld	Sn324	3 859.30	6.80	0.543	☆	

注: ☆指对样品进行的实验。

汞实验。首先对岩芯抽真空后浸泡在汞液中,在 25℃ 条件下,以恒定的极低速度 0.000 1 mL/min 向岩芯中进汞,为模拟地层准静态流体注入过程^[22]。依据进汞过程中压力突然降落—回升来识别储层的孔隙和喉道(图 2)。由于受到实验条件的限制,目前进汞压力最大可至 6.205 5 MPa,对应的喉道半径约为 120 nm,而小于 120 nm 的喉道及所对应的孔隙未能被测出。

核磁共振实验采用中国科学院渗流所研发的 RecCore2500 型核磁共振岩芯分析仪,对 100% 饱和水及离心后的标准岩样塞进行核磁共振 T_2 谱测试。主要测试参数:共振频率 2.38 MHz,回波个数 2 048,扫描次数 128,等待时间 5 000 ms,回波间隔 0.6 ms,增益 50,实验温度为 25℃。离心实验采用 PC-1 型离心机^[23-24],最大离心力下对应的喉道半径为 0.05 μm 。通过核磁共振可获取饱和水和不同离心力下岩芯孔隙 T_2 谱、可动流体饱和度及孔隙大小分布特征等信息^[25-26]。

恒速压汞和核磁共振实验测试过程均在中石油勘探开发研究院廊坊分院渗流所实验中心完成,测试结果见表 2。

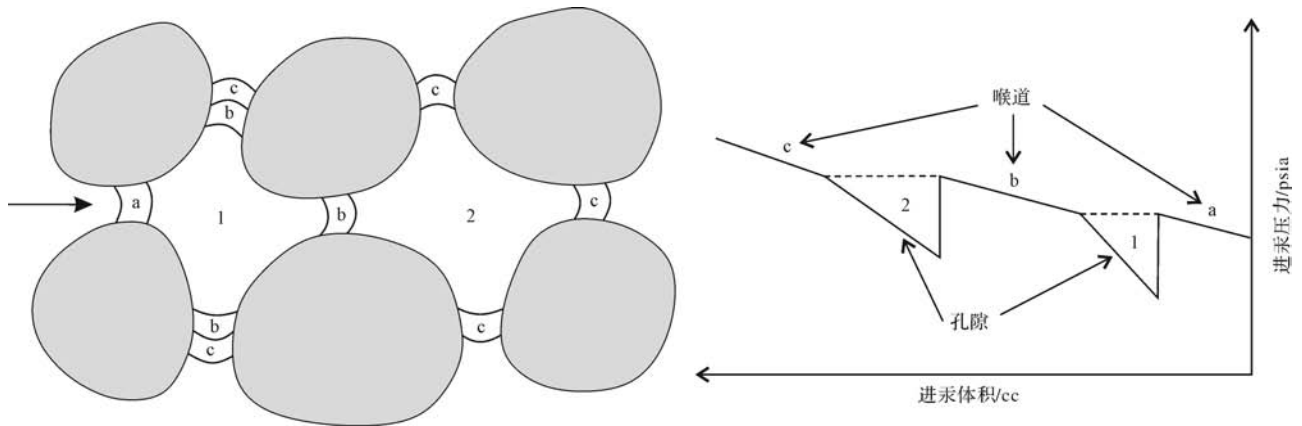


图 2 恒速压汞技术原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of the principle of constant rate mercury intrusion technology

2.2 致密砂岩孔喉分布特征

通过对 16 块岩芯恒速压汞实验测试出的孔喉半径分布特征进行分析(图 3),并参考低渗透储层孔喉类型的划分标准^[27-29],结果表明盒 8 段致密气储层储集空间主要由大孔(孔隙半径大于 100 μm)、中孔(孔隙半径为 100~50 μm) 2 种类型组成;而喉道则主要发育微喉道(喉道半径 $r=0.5\sim 0.025 \mu\text{m}$)、微细喉道($r=1.0\sim 0.5 \mu\text{m}$)和细喉道($r=2.0\sim 1.0 \mu\text{m}$);由

于实验条件限制,吸附喉道($r<0.025 \mu\text{m}$)没有别被识别出。整体上,16 块不同渗透率的岩芯样品平均孔喉半径差异不明显,且孔喉分布特征具有一定的相似性;即孔喉大小分布相对集中,孔隙半径主要以 70~200 μm 占有重要比例,喉道半径则主要分布在 0.3~1.5 μm ,且随着样品渗透率的增大孔喉分布主峰右移(图 3a)。由图 3 中也可看出,个别样品间的孔喉分布特征也存在一定的差异现象;即喉道分布频率呈

现尖峰,而对应的孔隙分布频率则相对较宽(如2-Sz、14-Ld样品);也有呈现相反的孔喉分布特征(如5-Sz、13-Ld样品)。造成这个差异分布现象的原因主要是由于不同渗透率的样品其孔喉配置关系不同;样品喉道发育相对集中、且平均孔喉比较大,造成孔喉分布呈现尖频喉道、较宽频孔隙的特征,其往往代表渗透率较低的样品;而当样品的喉道发育相对较宽、

且平均孔喉比较小,使得其孔喉分布为宽频喉道、相对尖频孔隙的特征,多为渗透率相对较高的样品。区域上致密气储层孔喉分布特征也具有一定的规律性(图3b),在苏里格中带孔喉分布特征常表现为喉道呈现单峰式、孔隙为双峰式;陇东地区孔喉分布特征常表现为喉道呈现单峰式、孔隙多为锯齿状的单峰式;而苏里格东带这两种孔喉分布模式均存在。

表2 鄂尔多斯盆地盒8段致密砂岩样品孔隙结构参数

Table 2 Pore structure parameters of the He 8 Member tight sandstone samples in Ordos Basin

样品 编号	恒速压汞测试					核磁共振测试	
	平均喉道半径/ μm	平均孔隙半径/ μm	平均孔喉比	主流喉道半径/ μm	非均质系数	$S_{if}/\%$ $r < 0.05 \mu\text{m}$	$S_{mf}/\%$ $r > 0.05 \mu\text{m}$
1-Sz	0.95	146.83	151.74	1.07	0.64		
2-Sz	0.79	150.96	208.17	1.00	0.45	62.33	37.67
3-Sz	1.34	168.74	166.92	1.68	0.43		
4-Sz	1.53	163.42	140.71	2.05	0.37		
5-Sz	0.81	117.38	193.77	1.02	0.48		
6-Sz	0.78	135.20	236.89	0.93	0.54		
7-Sd	1.79	151.64	106.78	2.47	0.28	31.35	68.65
8-Sd	0.91	113.04	146.19	1.09	0.59		
9-Sd	1.21	142.15	132.85	1.48	0.40	52.27	47.73
10-Sd	0.81	138.71	161.28	0.92	0.67		
11-Sd	0.89	138.81	200.19	1.05	0.67		
12-Sd	1.16	110.89	209.80	1.72	0.40		
13-Sd	0.96	117.43	127.44	1.10	0.65		
14-Ld	0.66	152.09	243.19	0.70	0.67	36.36	63.64
15-Ld	1.12	136.14	138.17	1.66	0.39	79.05	20.95
16-Ld	1.23	142.11	184.03	1.65	0.41		

注: S_{if} 为束缚水饱和度; S_{mf} 为可动流体饱和度; r 为最大离心力对应的喉道半径。

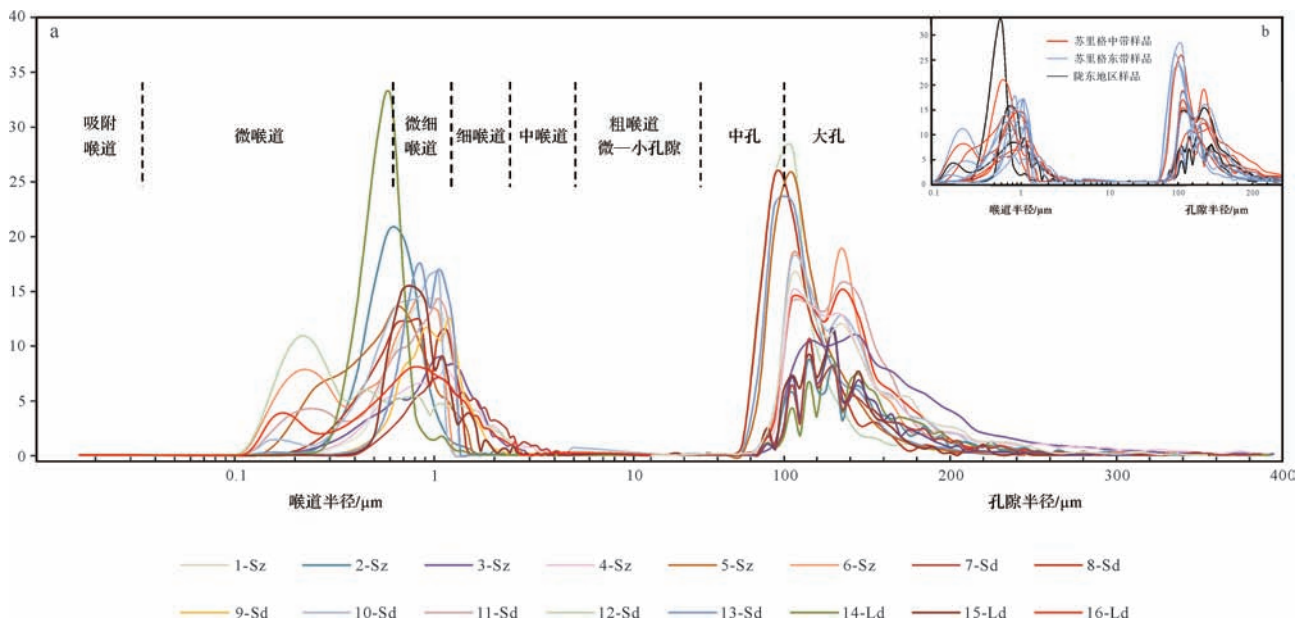


图3 孔隙和喉道分布频率图

a.16块岩芯孔喉分布特征;b.区域的孔喉分布特征

Fig.3 Distribution frequency of pore and throat

核磁共振 T_2 谱原理表明岩芯微小孔隙中的流体经历一个相对大的弛豫表面,弛豫速度比大孔隙较快,因此可以用核磁共振 T_2 谱间接的反映孔隙大小分布;即每一个弛豫时间代表一个孔隙大小,越大的孔隙其弛豫时间相对越长,而孔隙越小弛豫时间则越短^[30]。依据 T_2 谱峰形态、峰数及弛豫时间等可将孔隙划分为吸附孔(孔径小于 $0.1 \mu\text{m}$)、渗流孔(大于 $0.1 \mu\text{m}$)和裂缝^[23,25]。本文通过对同位样品 2-Sz、7-Sd、9-Sd、14-Ld 及 15-Ld 的 100%饱和水和 2.86 MPa 离心后核磁共振 T_2 谱分析(图 4),表明 5 个样品的 T_2 谱均具有相似的双谱峰(P_1 和 P_2),且主要发育微小孔隙和渗流孔(大、中孔隙)。

依据前人研究^[30-31],将核磁共振 T_2 谱弛豫时间相应的转换成了孔隙半径(图 4)。从图中可见,储层中的束缚水主要赋存在纳米级喉道($r < 0.05 \mu\text{m}$)所控制的孔隙中(图 4 中灰色部分);整体上,随着样品渗透率的增大束缚水饱和度 S_{if} 逐渐减小,而大、中孔隙中的流体则在最大离心力后几乎被排驱殆尽。实验测试结果显示(表 2),盒 8 段致密气储层束缚水饱和度 S_{if} 平均可达 52.3%,可动流体饱和度 S_{mf} 则平均为 47.7%;且可动流体饱和度几乎被亚微米—微米级孔喉所控制,孔隙间具有较好的联通性,对储层中气体和水等的流动具有重要意义;而吸附孔一般多为联通性相对较差的纳米级孔喉,不利于流体的流动^[26]。

综上所述,核磁共振实验显示致密气储层中的流

体主要赋存在亚微米—微米级的孔喉中,但可动流体饱和度和束缚水饱和度受控于不同的孔喉组合特征。束缚水饱和度主要受纳米级喉道($r < 0.05 \mu\text{m}$)控制的亚微米级孔,纳米孔和微米孔影响较小;而可动流体饱和度则主要受喉道半径大于 $0.05 \mu\text{m}$ 所控制的亚微米—微米级孔喉影响。恒速压汞对致密砂岩孔喉分布的研究表明,孔喉分布主要以喉道半径大于约 $0.1 \mu\text{m}$ 的亚微米—微米级孔为主。因此,对于中粒、中—粗粒的致密砂岩储层而言,恒速压汞技术识别出的孔喉,其对控制致密气储层渗流特征起着主要作用,可将其作为储层的有效孔隙和喉道。

3 致密砂岩孔喉分形特征

以往采用的分形描述和方法不能科学地对储层的孔隙和喉道分形特征分别进行表征,所以本文在恒速压汞技术对致密砂岩有效孔喉识别的基础上,对鄂尔多斯盆地盒 8 段致密气储层孔喉分形特征进行了系统研究。

3.1 分形理论

分形几何原理表明^[32],若储层孔喉分布符合分形结构,则有关系式:

$$N(>r) \propto r^{-D} \quad (1)$$

式中, $N(>r)$ 表示孔喉半径大于 r 的数量, D 为分形维数。

依据毛管压力模型, $N(>r)$ 也可表示为^[33]:

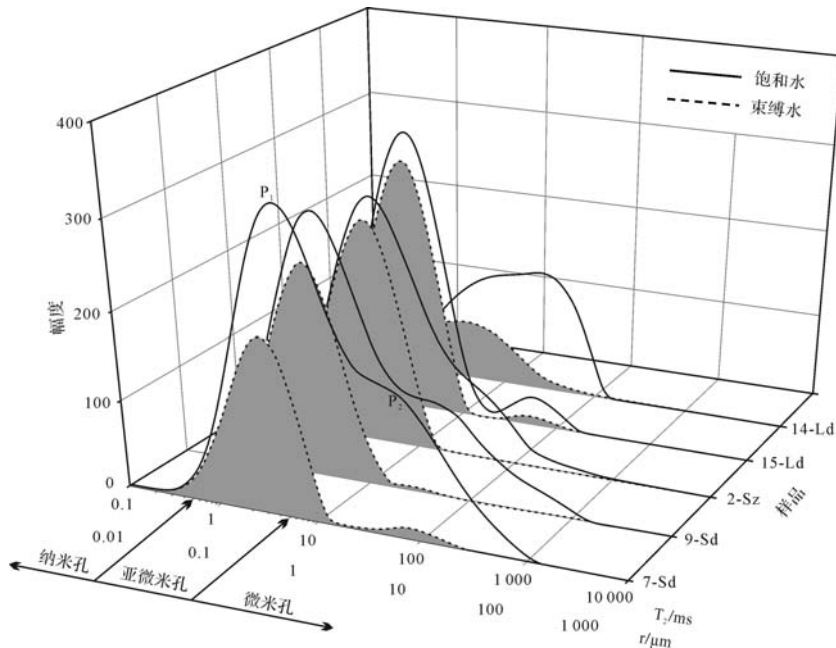


图 4 样品核磁共振 T_2 谱分布特征

Fig.4 NMR T_2 distribution of tight sandstone samples

$$N(>r) = V_{Hg} / (\pi r^2 \iota) \quad (2)$$

式中, ι 为毛细管的长度, V_{Hg} 表示孔喉半径为 r 时对应的累积进汞体积。

由拉普拉斯方程式, 并结合式(1)和式(2), 可得:

$$S_{Hg} = aP_c^{-(2-D)} \quad (3)$$

式中, S_{Hg} 为进汞饱和度, P_c 为毛管压力, a 为常量。

对式(3)两边取对数, 得:

$$\lg S_{Hg} \propto (D - 2) \lg P_c \quad (4)$$

由式(4)可知, 孔喉分形维数可根据 $\lg S_{Hg}$ 与 $\lg P_c$ 作图, 若存在线性关系, 通过拟合曲线计算出斜率 λ ,

则 $D - 2 = \lambda$, 即,

$$D = 2 + \lambda \quad (5)$$

3.2 孔喉分形计算

恒速压汞实验不仅可以得到致密砂岩储层孔喉进汞压力 P_c 和总进汞饱和度 S_{Hg} , 而且可以将孔隙进汞饱和度和喉道进汞饱和度区分开。因此, 按照式(4)对每一个样品孔喉整体、孔隙和喉道分别作对应的 $\lg S_{Hg}$ 和 $\lg P_c$ 散点图分析(图5), 通过拟合直线, 计算出直线的斜率 λ , 进而根据式(5)可得到孔喉的分形维数。

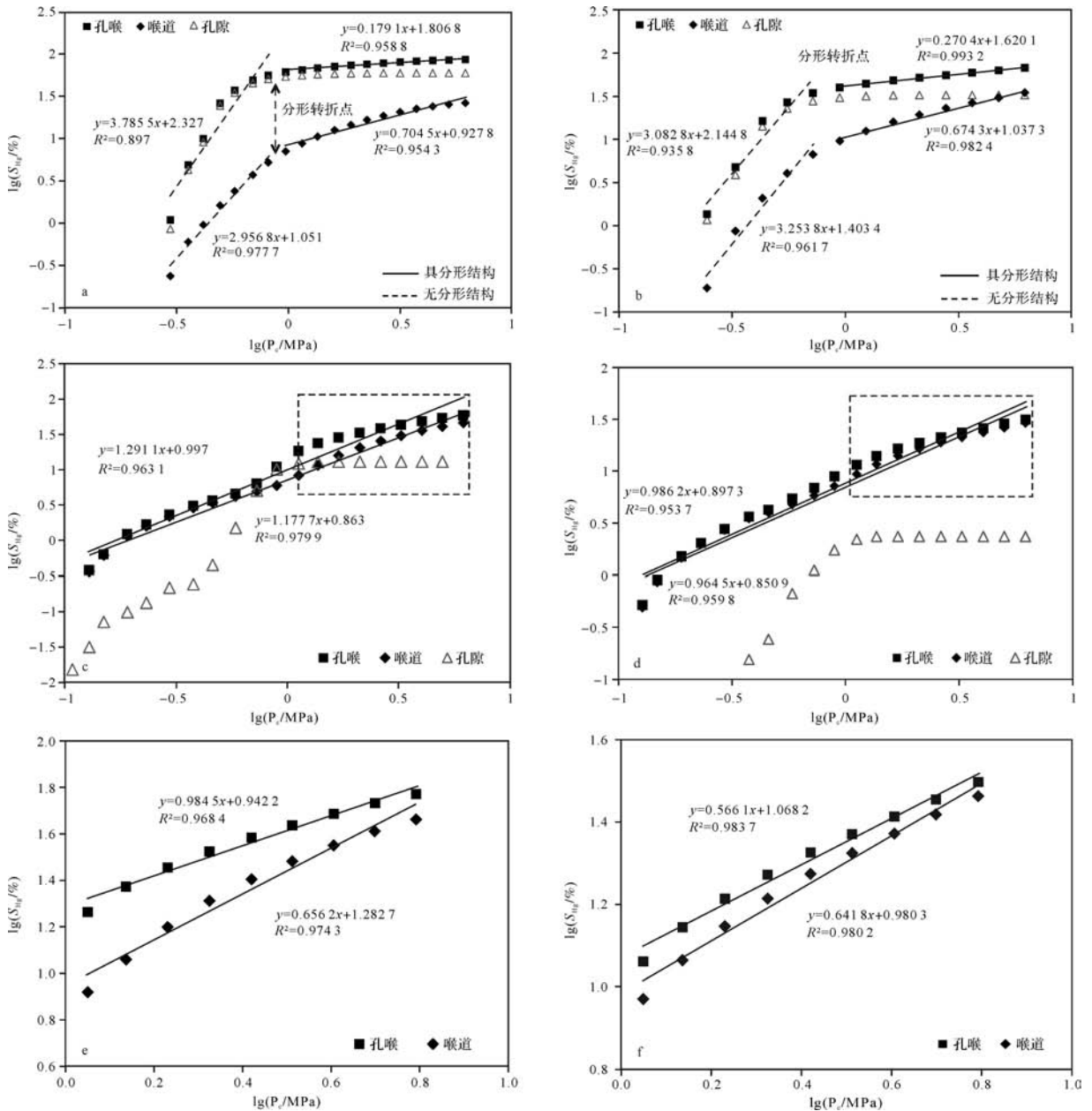


图5 不同样品孔喉分形特征

a. 样品 3-Sz; b. 样品 4-Sz; c. 样品 2-Sz; d. 样品 15-Ld; e, f. 分别为样品 2-Sz 和 15-Ld 孔喉局部(虚线部分)分形示意。

Fig.5 Pore-throat fractal characteristics of different samples

通过对16块样品孔喉分形维数的计算结果分析(表3、图5),显示鄂尔多斯盆地盒8段致密气储层孔喉整体和喉道均具有分形结构,而孔隙不具有分形特征。依据孔喉整体和喉道分形结构特征,将盒8段致密气储层孔喉分形特征划分为2种类型。

孔隙分形类型I(图5a,b),表现为阶段式分形结构。具这种分形特征的孔隙结构是鄂尔多斯盆地盒8段致密气储层的主要孔隙结构类型,主要发育在苏里格中带和东带,其孔喉分布特征常表现为喉道呈现单峰式、孔隙为双峰式(图3)。在进汞压力平均约为1 MPa处,对应的喉道半径约为0.7 μm 时,是分形结构的一个转折点。当进汞压力大于1 MPa,孔喉整体和喉道具明显的分形特征,对应的分形维数分别为2.179 1~2.892 0和2.674 3~3.235 6,平均为2.640 6和3.018 2;然而当进汞压力小于1 MPa,储层孔喉均不具有分形特征。从表3中分析可知,储层孔喉整体的分形维数 D_1 均小于喉道分形维数 D_2 ,说明储层喉道分布比较复杂,非均质性较强。

孔隙分形类型II(图5c,d),表现为整体式分形结构。具该类分形特征的致密气储层发育相对较少,主要在苏里格东带和陇东地区发育,孔喉分布特征常表现为喉道呈现单峰式、孔隙多为锯齿状的单峰式(图3)。在整个孔喉分布范围内,孔喉整体和喉道均具分

形特征,对应的分形维数 D_1 、 D_2 分别为2.829 9~3.312 5和2.794 0~3.286 9,平均为3.391 8和3.096 3。

整体上,II类孔隙分形结构的分形维数 D_1 和 D_2 均大于I类孔隙分形结构,但此时不能依据分形维数的几何意义来解释II类孔隙分形结构的储层其孔喉分布相对更复杂,因为II类是针对储层的整体孔喉分形结果,而I类是孔喉局部的分形结果。倘若按照I类孔隙分形转折点(约1 MPa处)将II类孔隙分形划分为两部分,此时与I类对应的分形结构部分的分形维数也相对较小(图5e,f)。因此,整体上具II类孔隙分形结构的储层孔喉发育反而相对更均匀。

3.3 孔喉分形与渗流特征的关系

研究发现致密气储层孔隙结构的这种阶段式分形和整体式分形结构与储层阶段进汞饱和度曲线具有很好的耦合关系。当致密气储层孔隙分形结构为I类时,储层在渗流特征上具有一定的响应,即具分形结构部分(进汞压力约大于1 MPa)在阶段进汞曲线上往往表现为进汞增量几乎由喉道贡献;反之,储层的进汞增量由孔隙贡献为主(图6a,b)。同样的对于II类孔隙分形的致密气储层而言,对应渗流特征上表现为阶段进汞增量主要由喉道所控制(图6c,d)。因此,储层孔喉分形结构与渗流作用密切相关,今后可用储层的孔喉分形特征来反映和描述致密气

表3 致密气储层孔喉分形维数结果

Table 3 Fractal dimensions of pore-throat and throat of tight gas reservoirs

分形类型	样品编号	分维值				转折分形点		
		D_1	相关系数 R_1	D_2	相关系数 R_2	毛管压力/MPa	喉道半径/ μm	
I	1-Sz	2.576 8	0.980 5	3.019 8	0.964 8	0.927	0.793	
	3-Sz	2.179 1	0.979 2	2.704 5	0.976 9	0.973	0.755	
	4-Sz	2.270 4	0.996 6	2.674 3	0.991 2	0.946	0.777	
	5-Sz	2.627 7	0.971 3	2.987 6	0.969 0	1.078	0.682	
	6-Sz	2.892 0	0.992 8	3.138 0	0.986 6	1.172	0.627	
	8-Sd	2.861 1	0.993 9	3.187 4	0.988 2	1.002	0.734	
	10-Sd	2.771 8	0.990 3	3.096 8	0.981 1	1.110	0.662	
	11-Sd	2.819 5	0.982 5	3.122 0	0.978 0	0.864	0.851	
	13-Sd	2.731 0	0.995 0	3.016 2	0.986 4	1.066	0.690	
	14-Ld	2.676 3	0.948 7	3.235 6	0.941 6	1.035	0.710	
	平均值	2.640 6	0.983 1	3.018 2	0.976 4	1.017	0.728	
	II	2-Sz	3.291 1	0.981 4	3.177 7	0.989 9	—	—
		7-Sd	2.829 9	0.942 8	2.794 0	0.991 0	—	—
		9-Sd	3.312 5	0.953 8	3.286 9	0.973 1	—	—
12-Sd		3.245 9	0.988 3	3.123 3	0.984 3	—	—	
15-Ld		2.986 2	0.976 6	2.964 5	0.979 7	—	—	
16-Ld		2.942 5	0.936 1	3.203 1	0.981 5	—	—	
平均值		3.034 7	0.963 2	3.124 9	0.983 3	—	—	

注: D_1 为孔喉整体分维值; D_2 为喉道的分维值。

储层的渗流特征。

3.4 分形维数与孔隙结构参数的关系

孔隙结构的复杂性与非均质性,可以由分形维数进行表征。依据分形理论,分形维数愈大,孔隙结构愈复杂^[26]。为表征分形维数与盒8段致密气储层孔隙结构参数的关系,分别对其与孔隙度、渗透率、主流喉道半径等孔隙结构参数做拟合关系曲线,如图7所示。

喉道大小及分布是影响储层渗透率大小的关键因素^[34]。通过分析表明,整体上盆地盒8段致密气储层孔喉分形维数 D_1 、 D_2 与其渗透率、平均喉道半径和主流喉道半径均存在一定的负相关性(图6b, c, f),且这种负相关性明显程度主要受致密气储层喉道分布非均质性影响。相比之下,具I型孔隙结构的分形维数与主流喉道半径和平均喉道半径的负相关性比II型的负相关性相对明显,这是由于具I型孔隙结构的储层其主流喉道和平均喉道趋向于具分形部分的喉道方向发育,喉道非均质相对较弱,使得分形维数与其负相关较明显。总之,随着分形维数的增大,储层渗透率越小、渗透能力也越差,其非均质性越复杂。

微观非均质系数用来反映孔喉分布的均匀程度,

从图6g可以看出,分形维数 D_1 、 D_2 均与微观非均质系数呈现较好的正相关性。随分形维数的增大,储层非均质系数增大,导致孔喉分布复杂、不均匀,微观非均质性增强。该认识同前人关于低渗透储层孔喉分形维数对孔喉分选关系的研究结果规律相似^[20,35]。

分形维数同孔隙度、平均孔隙半径和平均孔喉半径比之间没有明显的相关性(图6a, d, e),这是由于致密气储层孔隙不具有分形结构,而 D_1 、 D_2 分别反映的是储层孔喉整体和喉道大小分布的分形维数,孔隙度则主要是由储层孔隙大小等控制。

4 讨论

通过对致密气储层孔喉分形的系统研究,明确了致密气储层孔隙结构分形特征具有多样性,对于鄂尔多斯盆地盒8段而言,主要可分为两种类型。这个认识与时宇等^[19]使用恒速压汞对低渗透砂岩孔喉分形研究的结果产生了一定的相同和不同之处。相同点是均认为储层的孔隙不具有分形结构,这可能是由于低渗透储层孔隙类型多样且大小分布不均匀所造成;不同在于笔者认为储层孔喉整体和喉道具有阶段式和整体式分形结构,不是所谓的喉道均具有分形特征。

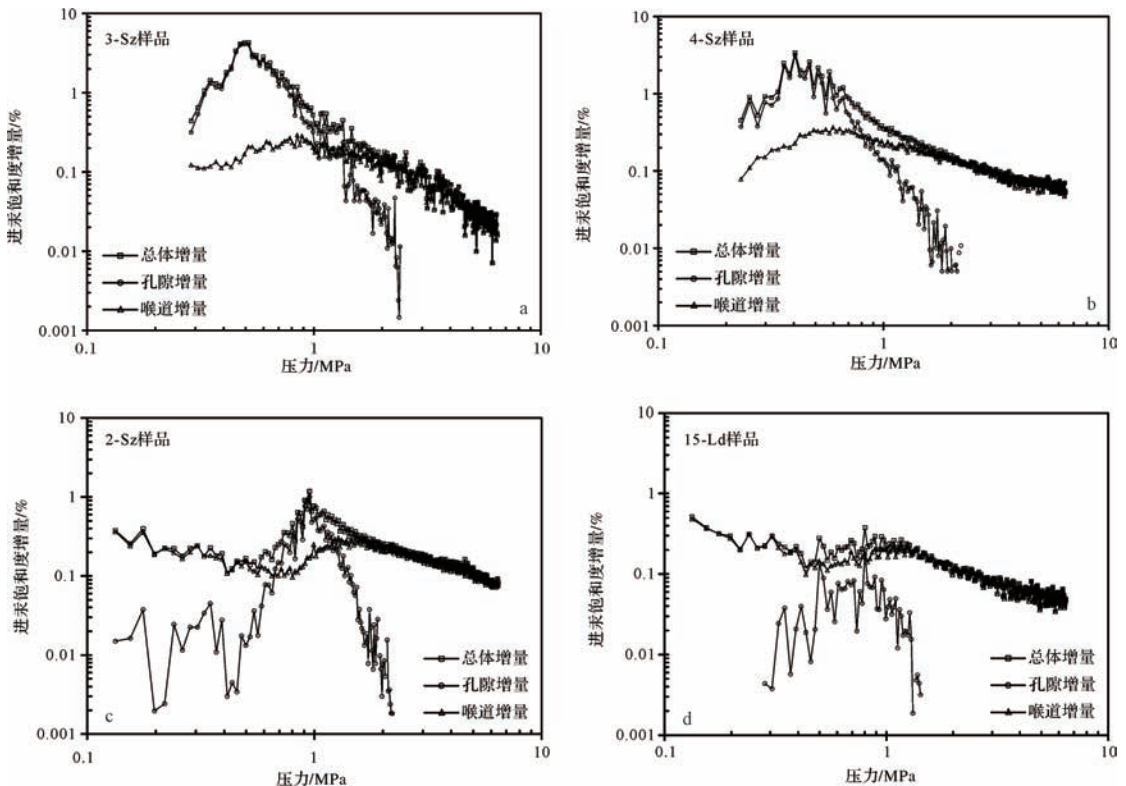


图6 致密气储层阶段进汞饱和度曲线综合图

Fig.6 Mercury incremental intrusion curves of tight sandstone reservoirs

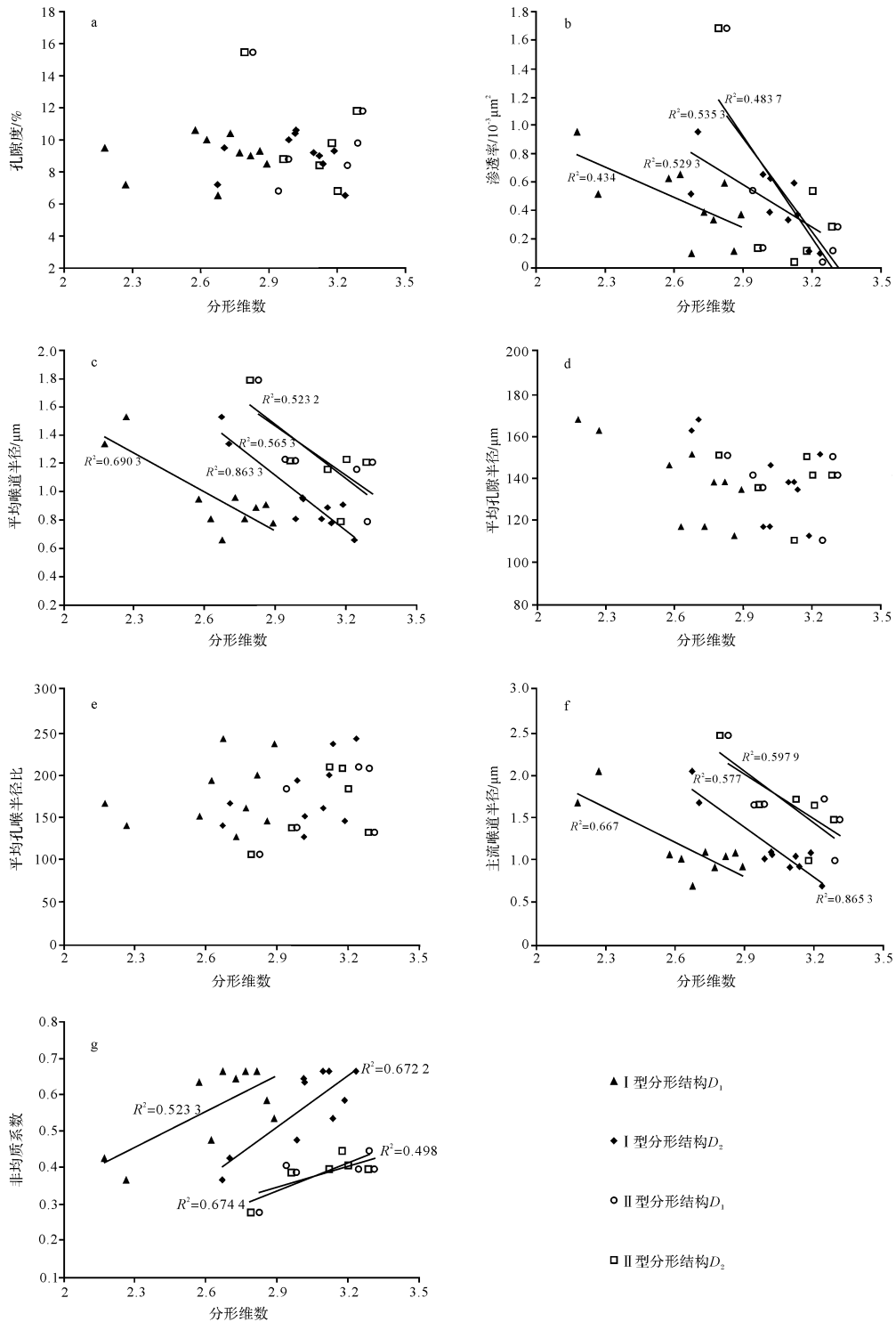


图 7 致密气储层孔喉分形维数与孔隙结构参数关系

Fig.7 Plot of pore (pore and throat) fractal dimensions vs. pore structure parameters of tight gas reservoir

样品 14-Ld 与其他四个样品核磁共振 T_2 谱的形态差异可以用分形结构来解释,相比之下 14-Ld 样品其 T_2 双谱峰不明显,谱峰 P_1 和 P_2 峰值差异较小,峰值相对都较高,说明其对应的大、中孔隙较为发育,进

而导致孔隙差异性较强,具阶段式分形结构;而其他四个样品其 T_2 谱峰中的 P_1 峰值高,说明相对的储层微小孔隙最为发育,而 P_2 谱峰代表的大、中孔隙相对发育较少,这样的组合发育模式使得孔喉之间相似程

度增强,使得孔喉具有整体式分形结构。

针对中粒、中—粗粒的致密砂岩气储层孔喉分形的研究,今后应加强应用恒速压汞技术。而且在实验条件允许的情况下,应开展针对不同沉积环境下的储集层孔喉分形特征研究,探讨沉积环境对孔喉分形结构的控制,进步来应用储层的孔喉分形结构特征来预测有利的致密气甜点区。

5 结论

(1) 恒速压汞技术较好的识别出盒8段中粒、中—粗粒致密砂岩气储层的有效孔隙为亚微米—微米级孔喉所控制,其中孔隙主要为大孔和中孔,喉道由微喉道、微细喉道和细喉道所组成。

(2) 明确了致密气储层孔隙分布不具分形特征,而孔喉整体和喉道则符合分形结构特征;基于储层孔隙分形结构和其渗流特征,将孔隙分形结构划分为2种类型。I型表现为阶段式分形特征,以进汞压力1 MPa为界,大于1 MPa具有分形特征,且储层的阶段进汞饱和度主要由喉道贡献,反之,孔喉不符合分形特征,阶段进汞饱和度主要由孔隙贡献;II型为整体式分形,其阶段进汞饱和度几乎全由喉道所贡献。

(3) 分形维数与渗透率、平均喉道半径和主流喉道半径存在较明显的负相关性,与微观非均质系数呈现较好的正相关性;而与孔隙度、平均孔隙半径和平均孔喉半径比之间没有明显的相关性。

本文对于苏里格庙地区和陇东地区储层孔喉分布与分形的关联性只是进行了初步认识和阐述,在今后大量样品分析的基础上,有待进步厘定和总结其特征。

致谢 论文得到了两位审稿专家和编辑部老师给予的宝贵修改意见,在此一并感谢。

参考文献 (References)

- [1] 陈大友,朱玉双,夏勇,等. 鄂尔多斯盆地高桥地区盒8段砂岩储层致密成因[J]. 沉积学报,2015,33(6):1217-1223. [Chen Dayou, Zhu Yushuang, Xia Yong, et al. Origin mechanism of tightness from the He 8 section sandstone reservoir in Gaoqiao area of Ordos Basin, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(6): 1217-1223.]
- [2] 吴浩,刘锐娥,纪友亮,等. 典型致密砂岩气储层孔隙结构分类及意义——以鄂尔多斯盆地盒8段为例[J]. 天然气地球科学,2016,27(5):835-843. [Wu Hao, Liu Rui'e, Ji Youliang, et al. Classification of pore structures in typical tight gas reservoir and its significance: A case study of the He 8 member of Upper Palaeozoic Shihezi Formation in Ordos Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(5): 835-843.]
- [3] 刘锐娥,吴浩,魏新善,等. 酸溶蚀模拟实验与致密砂岩次生孔隙成因机理探讨:以鄂尔多斯盆地盒8段为例[J]. 高校地质学报,2015,21(4):758-766. [Liu Rui'e, Wu Hao, Wei Xinshan, et al. Experimental study on the genesis of secondary porosity in tight sandstone with the acid corrosion-model: A case from He 8 Member of Upper Paleozoic in Ordos Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2015, 21(4): 758-766.]
- [4] 胡勇,李熙喆,万玉金,等. 致密砂岩气渗流特征物理模拟[J]. 石油勘探与开发,2013,40(5):580-584. [Hu Yong, Li Xizhe, Wan Yujin, et al. Physical simulation on gas percolation in tight sandstone[J]. Petroleum Exploration & Development, 2013, 40(5): 580-584.]
- [5] 杨华,刘新社. 鄂尔多斯盆地古生界煤成气勘探进展[J]. 石油勘探与开发,2014,41(2):129-137. [Yang Hua, Liu Xinshe. Progress of Paleozoic coal-derived gas exploration in Ordos Basin, West China[J]. Petroleum Exploration & Development, 2014, 41(2): 129-137.]
- [6] Ross D J K, Bustin R M. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(6): 916-927.
- [7] Clarkson C R, Freeman M, He L, et al. Characterization of tight gas reservoir pore structure using USANS/SANS and gas adsorption analysis[J]. Fuel, 2012, 95: 371-385.
- [8] Clarkson C R, Solano N, Bustin R M, et al. Pore structure characterization of North American shale gas reservoirs using USANS/SANS, gas adsorption, and mercury intrusion[J]. Fuel, 2013, 103: 606-616.
- [9] Bai Bin, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Multi-scale method of nano (micro)-CT study on microscopic pore structure of tight sandstone of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3): 354-358.
- [10] Xiao Ling, Zou Changchun, Mao Zhiqiang, et al. An empirical approach of evaluating tight sandstone reservoir pore structure in the absence of NMR logs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 137: 227-239.
- [11] Sakhaee-Pour A, Bryant S L. Effect of pore structure on the producibility of tight-gas sandstones[J]. AAPG Bulletin, 2014, 98(4): 663-694.
- [12] 陈程,孙义梅. 砂岩孔隙结构分维及其应用[J]. 沉积学报,1996,14(4):108-113. [Chen Cheng, Sun Yimei. Fractional dimension of the pore-texture in sandstones and its application[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14(4): 108-113.]
- [13] 解德录,郭英海,赵迪斐. 基于低温氮实验的页岩吸附孔分形特征[J]. 煤炭学报,2014,39(12):2466-2472. [Xie Delu, Guo Yinghai, Zhao Difei. Fractal characteristics of adsorption pore of shale based on low temperature nitrogen experiment[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2466-2472.]
- [14] Bustin R M, Bustin A M M, Cui X, et al. Impact of shale properties on pore structure and storage characteristics[C]//SPE Paper 119892 Presented at the Society of Petroleum Engineers Shale Gas

- Production Conference. Fort Worth, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2008: 16-18.
- [15] 任晓霞,李爱芬,王永政,等. 致密砂岩储层孔隙结构及其对渗流的影响——以鄂尔多斯盆地马岭油田长8储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(5): 774-779. [Ren Xiaoxia, Li Aifen, Wang Yongzheng, et al. Pore structure of tight sand reservoir and its influence on percolation-Taking the Chang 8 reservoir in Maling oilfield in Ordos Basin as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(5): 774-779.]
- [16] 贺承祖,华明琪. 储层孔隙结构的分形几何描述[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(1): 15-23. [He Chengzu, Hua Mingqi. Fractal Geometry description of reservoir pore structure[J]. Oil & Gas Geology, 1998, 19(1): 15-23.]
- [17] Krohn C E. Sandstone fractal and euclide an pore volume distributions[J]. Journal of Geophysical Research, 1988, 93(B4): 3286-3296.
- [18] Katz A J, Thompson A H. Fractal sandstone pores: implications for conductivity and pore formation [J]. Physical Review Letters, 1985, 54(12): 1325-1328.
- [19] 张超谟,陈振标,张占松,等. 基于核磁共振 T_2 谱分布的储层岩石孔隙分形结构研究[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(4): 80-86. [Zhang Chaomo, Chen Zhenbiao, Zhang Zhansong, et al. Fractal characteristics of reservoir rock pore structure based on NMR T_2 distribution [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(4): 80-86.]
- [20] 时宇,齐亚东,杨正明,等. 基于恒速压汞法的低渗透储层分形研究[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(2): 88-90. [Shi Yu, Qi Yadong, Yang Zhengming, et al. Fractal study of low permeability reservoir based on constant-rate mercury injection [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(2): 88-90.]
- [21] Gao Hui, Li Tiantai T, Yang Ling. Quantitative determination of pore and throat parameters in tight oil reservoir using constant rate mercury intrusion technique[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2015: 1-10, doi: 10.1007/s13202-015-0186-6.
- [22] Su Zhixin, Jiang Hanqiao. Study on characteristic parameter of microcosmic pore configuration in low permeability oil reservoirs [C]//Flow in Porous Media-From Phenomena to Engineering and Beyond: Conference Paper from 2009 International Forum on Porous Flow and Applications. 2009.
- [23] 郭和坤,刘强,李海波,等. 四川盆地侏罗系致密储层孔隙结构特征[J]. 深圳大学学报:理工版, 2013, 30(3): 306-312. [Guo Hekun, Liu Qiang, Li Haibo, et al. Microstructural characteristics of the Jurassic tight oil reservoirs in Sichuan Basin [J]. Journal of Shenzhen University: Science & Engineering, 2013, 30(3): 306-312.]
- [24] 吴浩,牛小兵,张春林,等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长7段致密油储层可动流体赋存特征及影响因素[J]. 地质科技情报, 2015, 34(3): 120-125. [Wu Hao, Niu Xiaobin, Zhang Chunlin, et al. Characteristics and influencing factors of movable fluid in Chang 7 tight oil reservoir in Longdong area, Ordos Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(3): 120-125.]
- [25] Kleinberg R L, Straley C, Kenyon W E, et al. Nuclear magnetic resonance of rocks: T_1 vs. T_2 [R]. SPE Paper 26470, 1993: 555-630.
- [26] Yao Yanbin, Liu Dameng, Che Yao, et al. Petrophysical characterization of coals by low-field nuclear magnetic resonance (NMR) [J]. Fuel, 2010, 89(7): 1371-1380.
- [27] 罗蛭潭,王允诚. 油气储集层的孔隙结构[M]. 北京:科学出版社, 1986: 5-260. [Luo Zhetan, Wang Yuncheng. Pore Structure of Oil and Gas Reservoir [M]. Beijing: Science Press, 1986: 5-260.]
- [28] 邸世祥. 中国碎屑岩储集层的孔隙结构[M]. 西安:西北大学出版社, 1991: 10-364. [Di Shixiang. Pore Textures in Clastic Reservoirs of China [M]. Xi'an: Northwest University Press, 1991: 10-364.]
- [29] 李道品. 低渗透油田高效开发决策论[M]. 北京:石油工业出版社, 2003: 3-258. [Li Daopin. Effective Development Technique of Low Permeability Oilfield [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 3-258.]
- [30] 何雨丹,毛志强,肖立志,等. 核磁共振 T_2 分布评价岩石孔隙分布的改进方法[J]. 地球物理学报, 2005, 48(2): 373-378. [He Yudan, Mao Zhiqiang, Xiao Lizhi, et al. An improved method of using NMR T_2 distribution to evaluate pore size distribution [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(2): 373-378.]
- [31] 李海波,朱巨义,郭和坤. 核磁共振 T_2 谱换算孔隙半径分布方法研究[J]. 波谱学杂志, 2008, 25(2): 273-280. [Li Haibo, Zhu Juyi, Guo Hekun. Methods for calculating pore radius distribution in rock from NMR T_2 spectra [J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2008, 25(2): 273-280.]
- [32] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature [M]. San Francisco: Freeman, 1983.
- [33] Lai Jin, Wang Guiwen. Fractal analysis of tight gas sandstones using high-pressure mercury intrusion techniques [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 24: 185-196.
- [34] 马剑,黄志龙,吴红烛,等. 莺歌海盆地东方区黄流组储层微观孔喉特征及对物性的影响[J]. 沉积学报, 2015, 33(5): 983-990. [Ma Jian, Huang Zhilong, Wu Hongzhu, et al. Characteristics of reservoir microscopic pores and throats and their influence on reservoir physical properties in Huangliu Formation of DF area, Yinggehai Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(5): 983-990.]
- [35] 沈金松,张宸恺. 应用分形理论研究鄂尔多斯 ZJ 油田长6段储层孔隙结构的非均质性[J]. 西安石油大学学报:自然科学版, 2008, 23(6): 19-23, 28. [Shen Jinsong, Zhang Chenkai. Study on the heterogeneity of the pore structure of Chang 6 reservoir in ZJ oilfield, Ordos Basin using fractal theory [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2008, 23(6): 19-23, 28.]

Fractal Characteristics of Pore-throat of Tight Gas Reservoirs and Its Relation with Percolation: A case from He 8 Member of the Permian Xiashihezi Formation in Ordos Basin

WU Hao^{1,2}, LIU RuiE³, JI YouLiang^{1,2}, ZHANG ChunLin³, CHEN Sheng³, ZHOU Yong^{1,2}, DU Wei^{1,2}, ZHANG YunZhao⁴, WANG Ye^{1,2}

1. College of Geoscience, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, Beijing 102249, China

3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Langfang Branch, Langfang, Hebei 065007, China

4. Unconventional Natural Gas Research Institute, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract: Constant-rate mercury intrusion (CRMI) was performed on 16 samples from the He8 Member tight sandstone of the Permian Xiashihezi Formation in Ordos Basin, and combined with the NMR experiment, the pore (pore and throat) structure features were investigated finely. Based on the research of the pore structure features, fractal characteristics of pore (pore and throat) in tight sandstone reservoir were carried out, and the relationship between pore fractal and percolation characteristics and pore structure parameters were quantitatively characterized. The results show that the effective pores and throats of tight gas reservoir are controlled by submicron and micron scale pore-throats. The pores are mainly composed of macropores and mesopores, and the throats consist of micro throats, micro-fine throats and fine throats. In the light of effective pores and throats recognized by CRMI and NMR, it is suggested that both pore-throat and throat distribution conform to the fractal structure with dimension value D_1 and D_2 , respectively, while pore distribution does not. Based on the characteristics of pore fractal structure and percolation, pore fractal structures of He 8 Member tight gas reservoir are divided into two categories: type I has the staged fractal characteristic, i.e., there is a clear inflection point with about 1 MPa pressure of mercury injection (MIP). When the MIP is greater than 1 MPa, the reservoir pore-throat has fractal characteristic and the throats contribute to mercury saturation increment (MSI). On the contrary, the MSI is almost entirely contributed by the pores. Type II is the integral fractal, and the MSI is almost all contributed by the throats. The fractal dimensions of tight gas reservoir pore which has a certain correlation with pore micro geometrical parameters where as its relationship with permeability, average throat radius and mainstream throat radius are obvious negative correlation. The fractal dimensions show a positive linear correlation with micro heterogeneity coefficient, while no direct or weak relationships with porosity, average pore radius and average pore-throat radius ratio.

Key words: pore structure; fractal dimension; percolation characteristic; tight gas reservoir; constant-rate mercury intrusion