

孔隙型储层的孔隙系统三维量化表征

——以四川、塔里木盆地白云岩为例

张天付^{1,2,3}, 谢淑云¹, 王鑫^{2,3}, 王莹^{2,3}

(1 中国地质大学(武汉)研究生院; 2 中国石油杭州地质研究院)
(3 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室)

摘要 以四川盆地和塔里木盆地孔隙型白云岩样品为例,通过CT扫描、数字岩心、分形与多重分形等方法,讨论了典型白云岩储层不同孔隙系统(如晶间孔、粒间孔、铸模孔等)的结构特征,并用量化参数对孔隙结构进行数值表征。结果表明:晶间孔和粒间孔样品的孔隙形状多为三角形,孔隙相对细长,喉道发育,连通性较好;铸模孔样品的孔隙形状较为规整,二维平面上表现为圆形,三维空间上近似球体,这类样品往往孔隙较为发育,但是孔喉系统连通性差;由多种类型孔隙组成的“混合孔”样品则非均质性较强,受岩石结构特征影响显著。进一步利用分形与多重分形方法对孔隙的非均质性进行研究发现:不同孔隙类型的结构差异在分形盒子维数上有明确响应,维数的均值相对大小表现为:铸模孔 > 粒间孔 > 晶间孔 > 混合孔。孔隙度可能也对盒子维数产生影响。

关键词 白云岩储层; 孔隙结构; 孔隙特征; 储层量化表征; 四川盆地; 塔里木盆地
中图分类号: TE122.2 **文献标识码**: A

相对于裂缝型、缝洞型等储集体,以晶间孔、粒间孔等为主要储集空间的孔隙型储层分布更为广泛,如孔隙型白云岩储层等^[1-3]。特别是近年来,随着塔里木盆地鹰山组、四川盆地飞仙关组和龙王庙组等不同地区、不同层位孔隙型白云岩油气勘探的不断突破,这种储层在油气勘探中的地位愈加突出^[4-5]。

然而,这类白云岩储层的非均质性较强,储集空间类型多样,孔隙结构复杂多变。以四川盆地普光气田飞仙关组鲕粒白云岩储层为例,相同岩性的同一层段往往发育晶间孔、粒间孔、各类溶孔和溶洞等^[6]。又如罗家寨气田部分地区的储层孔隙度虽然很高(达20%),渗透率却仅为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,甚至更低;有的储层在岩性、孔隙类型、孔隙度相同的情况下,渗透率却相差数十倍,甚至百倍^[7]。因此,为深刻理解储集空间类型的多样性和结构的复杂性,需要对不同孔隙类型白云岩储层的孔隙系统进行三维刻画和量化表征。

以高分辨率微纳米CT为核心的三维表征技术,不仅能全面、形象地展示孔隙与喉道的展布特征和结构形态,而且能通过数值化分析,获取孔隙度、孔喉半径、形状因子等参数,对复杂的孔隙和喉道进行量化表征。本次实验以塔里木盆地和四川盆地典型孔隙型白云岩样品为例,借助CT扫描、数字岩心、分形与多重分形等技术手段,对孔隙型白云岩的孔隙系统进行解剖。

1 实验样品

塔里木盆地塔中地区中一下奥陶统鹰山组热液细晶白云岩和四川盆地东北部下三叠统飞仙关组滩相(残余)鲕粒白云岩,作为典型的孔隙型白云岩储层,是普光等特大型气田的主力油气产层^[2-3]。本次实验分别对塔里木盆地中古9井、四川盆地罗家2-5井等高产井的7个白云岩样品进行解剖,样品信息见表1。实验开始前,先对样品进行基础的孔隙度、渗透率测定及铸体薄片图像分析。

收稿日期: 2016-03-07; 改回日期: 2016-05-31

本文受国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”的子课题“寒武系—中新元古界碳酸盐岩规模储层形成与分布研究”(编号: 2016ZX05004-002)资助

张天付: 1983年生,工程师,博士,主要从事实验地质和储层地质研究工作。通讯地址: 310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号; E-mail: 290328259@qq.com

表 1 实验样品基本信息及三维量化表征参数

样品号		1	2	3	4	5	6	7	
样品概况	地区	塔里木盆地	四川盆地	四川盆地	四川盆地	四川盆地	四川盆地	四川盆地	
	层位	O ₁₋₂ y	T ₁ f	T ₁ f	T ₁ f	T ₁ f	T ₁ f	T ₁ f	
	井位	中古 9 井	罗家 2-5 井	罗家 1-1 井	罗家 2-1 井	罗家 5 井	渡 5 井	罗家 2-2 井	
	岩性	细晶白云岩	鲕粒白云岩	鲕粒白云岩	鲕粒白云岩	鲕粒白云岩	鲕粒白云岩	鲕粒白云岩	
	孔隙描述	晶间孔 晶间溶孔	晶间孔 粒间孔	主要为粒间孔、粒间 溶孔，重结晶强烈， 粒间充填沥青	粒间孔 粒间溶孔	粒间孔、铸模孔， 部分铸模孔充填 方解石	粒间孔、铸模 孔，粒间孔充 填沥青	铸模孔 粒间孔 溶孔	
基础物性	孔隙度 (%)	实测 (氮气体积法) CT模拟法	11.4575 11.27	10.7340 10.11	14.6724 15.63	12.7838 10.01	21.3090 20.94	8.3929 11.63	12.6098 11.34
	渗透率($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)		24.8607	11.8076	258.4209	94.4806	0.2364	0.0053	1.9447
	孔隙特征	孔喉总体积($\times 10^{10} \mu\text{m}^3$)	5.99	5.67	8.31	5.32	11.1	6.18	6.57
孔喉特征	连通 体积	体积大小 ($\times 10^{10} \mu\text{m}^3$)	3.57	3.78	8.00	4.33	1.60	0.48	2.22
		占孔喉体积 (%)	59.65	66.40	96.35	81.41	14.43	7.76	33.75
	孔隙参数	数量	数量	34128	24622	19985	13161	19220	19006
体积($\times 10^{10} \mu\text{m}^3$)			4.74	4.62	5.69	4.21	10.40	6.06	5.85
半径 (μm)			最小值	4.968	4.836	6.189	5.664	4.978	4.854
		最大值	143.6	202.4	175.7	266.3	258.7	152.8	608.2
		平均	40.62	43.18	50.67	46.02	55.12	57.00	40.24
连通性		最小值	0	0	0	0	0	0	0
	最大值	35	43	32	82	62	57	106	
	平均	2.44	2.33	3.47	2.67	2.61	0.69	1.69	
喉道参数	数量	数量	40442	27818	32948	17083	23773	6452	19082
		体积($\times 10^{10} \mu\text{m}^3$)	1.240	0.724	2.620	1.110	0.663	0.122	0.724
	半径 (μm)	最小值	4.501	4.537	4.547	4.691	4.514	4.624	4.346
		最大值	102.0	130.4	121.2	207.4	167.5	87.24	256.7
		平均	28.74	31.99	33.98	35.01	28.44	25.71	31.99
分形 盒子 维数	最小值	1.58	—	1.66	—	1.73	—	1.53	
	最大值	1.67	—	1.72	—	1.88	—	1.61	
	平均	1.648	—	1.691	—	1.757	—	1.563	
孔隙类型		晶间孔		粒间孔		铸模孔		混合孔	

注: O₁₋₂y 中一下奥陶统鹰山组; T₁f 下三叠统飞仙关组。“—”表示本次实验没有计算分形盒子维数

2 技术方法

本次研究主要结合CT扫描、数字岩心技术和分形与多重分形方法，聚焦鲕粒白云岩和细晶白云岩的不同类型孔隙结构在三维空间的展布特征，并用量化的数值参数对其进行表征和探讨。

2.1 数字岩心

数字岩心技术主要利用数字图像或计算机数值模拟的方法，建立一种可进行岩石物理特征和微观渗流模拟计算的、仿真的数字化岩心三维数据体。早期的数字岩心是基于二维扫描电镜图片，通过数值

算法实现三维重构。如: Hazlett等^[8]1997年提出的模拟退火算法, 这种算法首先随机产生孔隙度为 ϕ 的随机多孔介质, 通过不断调整孔隙和骨架的位置, 产生符合条件的多孔介质; Bakke和Øren等^[9]1997年提出过程法; 之后Wu Keijian等^[10-11]提出马尔科夫—蒙特卡罗方法, 该方法首先通过邻域模板对原始图片进行遍历, 获取条件概率函数, 然后用蒙特卡罗算法确定重构图像的每一点的状态。

由于CT扫描可以直接获取岩心三维图像, 并提取孔隙网络模型用于数值分析, 近年来许多研究选择高分辨率CT扫描数据体作为数据来源^[12-15]。本次研究采用的CT扫描与数据处理的方法步骤见参考文献^[16]。

2.2 分形与多重分形

分形与多重分形是定量描述不规则几何形体非均质性的有效手段, 它可用于刻画储层岩石孔隙系统的非均质性^[17-25]。如谢淑云等^[24]通过环境扫描电镜二维数值图像分析, 应用分形与多重分形技术, 系统地研究了碳酸盐岩储层二维孔隙空间分布的分形、多重分形参数与储集性能之间的关系, 研究表明, 分形与多重分形为描述沉积岩微孔隙的空间分布特征提供了新的方法, 分形维数与多重分形谱函数不仅能定量描述孔隙结构的孔隙大小分布、非均质性及其复杂程度, 而且能定量描述孔隙特征, 这对复杂孔隙系统的量化表征具有重要意义。

本次工作采用二维分形中常用的分形盒子维数 D_{box} 对二维CT系列图像进行分形研究, 重点讨论不同类型和不同尺度下孔隙型白云岩储层的孔隙空间分布的分形特征。方法原理参考Tarquis^[26]、方海平等^[27]、谢淑云等^[28]的研究。

3 结果与讨论

3.1 孔隙分类与描述

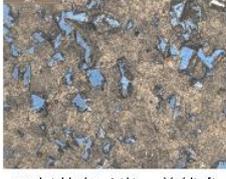
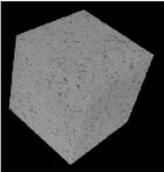
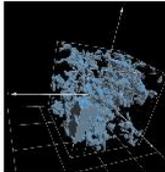
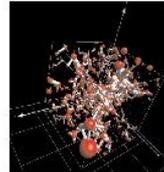
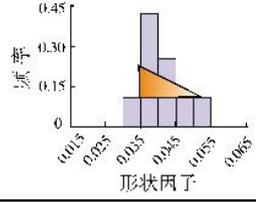
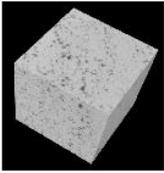
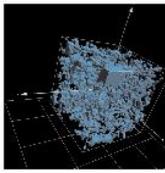
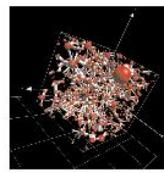
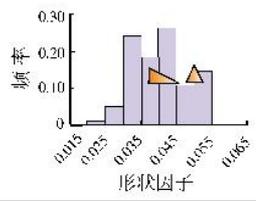
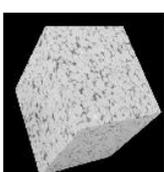
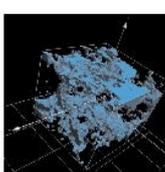
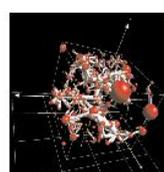
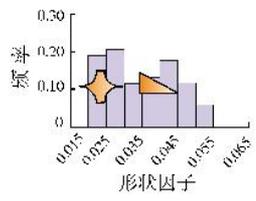
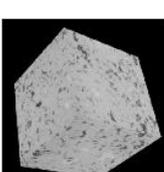
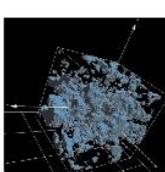
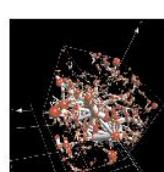
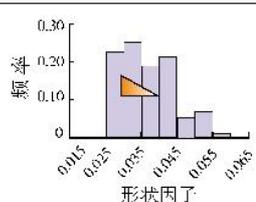
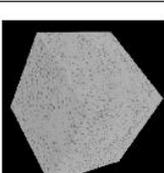
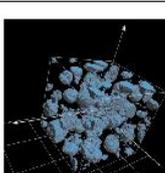
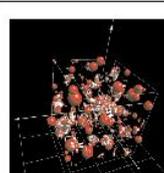
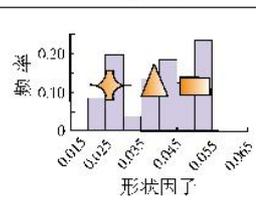
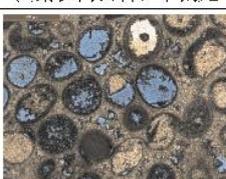
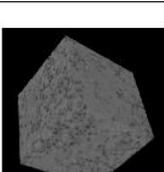
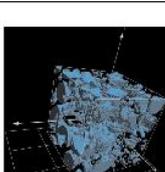
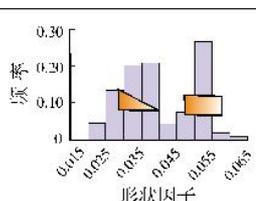
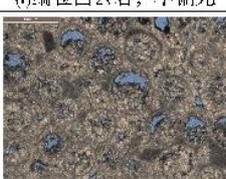
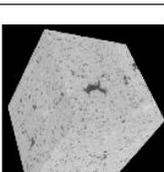
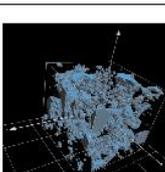
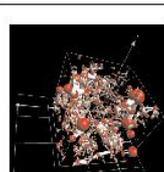
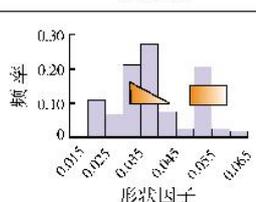
按照Choquette和Pray孔隙分类原则^[29], 本次实验样品的孔隙主要为结构选择性孔隙, 包括晶间孔、粒间孔、粒内孔、铸模孔等, 以及少量非结构选择性的溶孔, 如粒间溶孔、晶间溶孔等。根据样品发育的各类孔隙数量相对多少, 可分为晶间孔型、粒间孔型、铸模孔型和混合孔型这四种类型, 所对应的7个样品基本信息如表1所示。

晶间孔 样品1和样品2, 分别为中古9井的细晶白云岩和罗家2-5井的残余鲕粒白云岩。其中样品1的白云石颗粒大小为粉细晶, 以细晶为主, 晶形半自形至自形, 孔隙以晶间孔为主, 少量为溶蚀孔隙, 见图1中的铸体照片a(简称图1a)。样品2为鲕粒白云岩, 样品颗粒结构清晰可见, 但经白云石化作用, 重结晶强烈, 颗粒组分以粉细晶白云石为主, 晶形多为他形—半自形, 孔隙主要为晶间孔、残余粒间孔和粒间溶孔等(图1b), 孔隙边缘分布沥青。

粒间孔 样品3和样品4, 分别为罗家1-1井和罗家2-1井的鲕粒白云岩。颗粒(鲕粒)结构明显, 孔隙主要为粒间孔, 少量为粒间溶孔和粒内孔。不同的是, 样品4的重结晶较为强烈, 除部分颗粒受重结晶白云石化影响使得结构模糊外, 其粒间孔也相对细小, 如图1c、图1d。而对应的孔隙度和渗透率显示, 样品3和样品4孔隙度较为接近, 渗透率却相差将近3倍(见表1)。

铸(鲕)模孔 样品5和样品6, 分别为罗家5井和渡5井的鲕粒白云岩。鲕粒内部被溶蚀, 形成溶蚀铸模孔。部分铸模孔被方解石充填, 部分为孤立孔, 未被方解石和蓝色铸体充填, 如图1e、图1f。鲕粒与鲕粒之间的粒间孔发育, 部分充填黑色沥青。对比各样品孔隙度和渗透率(表1), 发现样品5的孔隙度最大, 样品6的孔隙度与其余5个样品相差不多, 但是这两个样品的渗透率却极低, 属于中高孔—(特)低渗, 为粗孔微喉型。它们虽然鲕模孔发育, 对孔隙度贡献较大, 但是由于连接孔隙的喉道被堵, 如鲕粒之间的粒间孔和鲕粒壳壁, 导致流体的渗流能力有限。图2为样品6灌注铸体后的扫描电镜照片。图2a、2b显示, 样品存在未被铸体充填的孔隙, 与相邻孔隙不连通。这种不连通的原因主要是由于后期白云石化作用使晶体继续增大, 如图2c中孔隙边缘后期加大的白云石晶体干净整洁, 充填了之前的孔隙, 使得残余孔隙通道宽度仅为33.58 nm(图2d)。粒间孔中充填有黑色沥青, 如图1e, 表明起主要沟通作用的是粒间孔。

混合孔(鲕模孔+粒间孔) 样品7为罗家2-2井的鲕粒白云岩, 孔隙主要为铸模孔、粒间孔、粒内孔、粒间溶孔、晶间孔等。经铸体薄片的图像分析统计, 铸模孔和粒间孔占主导。其中, 鲕模孔占54%, 粒间孔占44.16%, 如图1g。由于粒间孔相对样品6和样品5发育, 故样品的渗透率也较高, 达 $1.9447 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

样品号	孔隙类型	铸体薄片	CT三维图像	孔隙结构	孔喉网络模型	孔隙形状和形状因子
1	晶间孔	 (a) 细晶白云岩, 单偏光				
2		 (b) 鲕粒白云岩, 单偏光				
3	粒间孔	 (c) 鲕粒白云岩, 单偏光				
4		 (d) 鲕粒白云岩, 单偏光				
5	铸模孔	 (e) 鲕粒白云岩, 单偏光				
6		 (f) 鲕粒白云岩, 单偏光				
7	混合孔	 (g) 鲕粒白云岩, 单偏光				

典型孔隙形状与形状因子数值对应关系:  0.013  0.038  0.048  0.055  0.062

图1 实验样品的铸体薄片和三维CT扫描处理结果

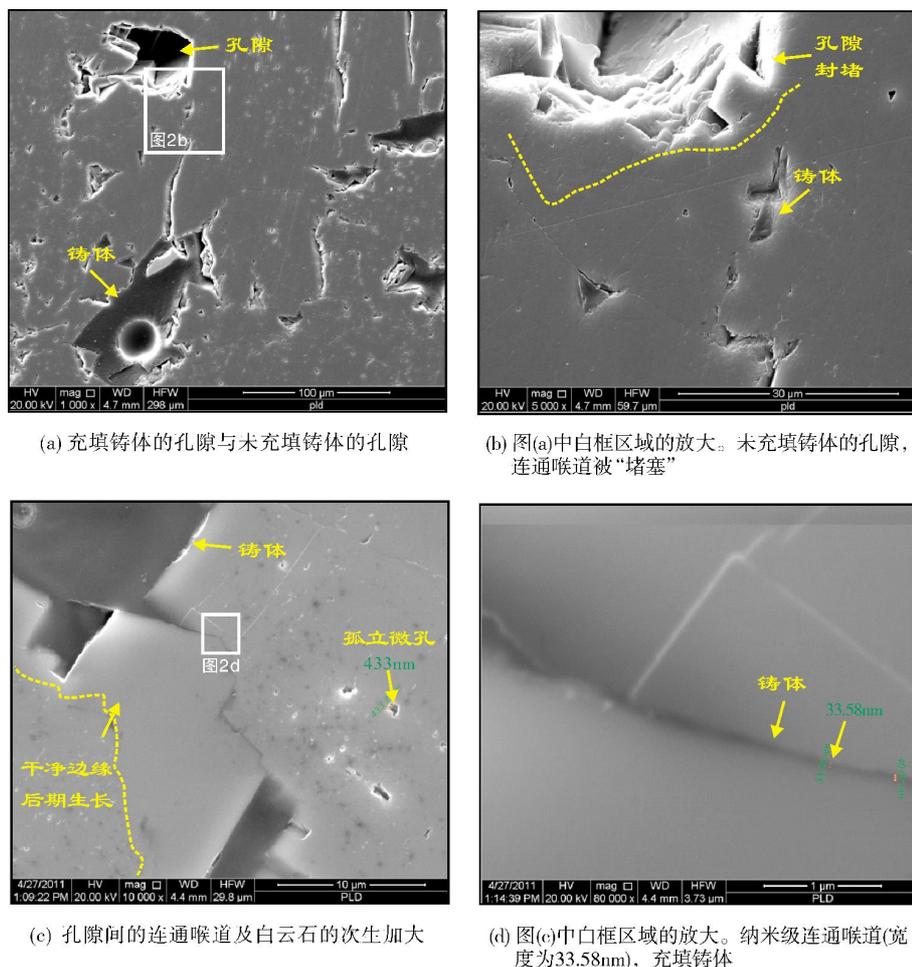


图2 实验样品6的铸体薄片扫描电镜图片

对比四种不同孔隙类型样品的孔隙度、渗透率和孔喉结构,反映出这样的规律:粒间孔样品渗透性最好,如样品3渗透率可达 $258.4209 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其次,为晶间孔和混合孔,铸模孔渗透性最差,如样品6渗透率低至 $0.0053 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3.2 孔喉结构定量表征

借助CT扫描和数字岩心技术,按照文献[16]所述方法对样品进行孔喉提取和数值化表征,结果如图1和表1。图1中由左往右分别为铸体片、CT三维图像、孔隙结构、孔喉网络模型。其中,孔喉网络模型中红色球体代表孔隙,白色棒状代表喉道。孔隙结构和孔喉网络模型图像显示,铸模孔型的孔隙较大,形状近似球体,但较为孤立;晶间孔型的孔隙细小,但是喉道较多,连通性较好;粒间孔型较铸模孔型和晶间孔型的孔隙长度长,而且粒间孔型的孔隙

和喉道数量较多。这一特点与二维铸体薄片分析和定量表征参数呈较好的对应关系。

如表1,孔喉体积数据比较,铸模孔型的样品5孔喉体积最大;其次,为粒间孔型的样品3,孔隙体积数据与之相似,但是喉道体积数据却呈相反规律,如铸模孔型的样品5、样品6的喉道体积最小。孔隙数量上,晶间孔型的样品1具有最多的孔隙数,粒间孔型的样品4最少;喉道数量上,晶间孔型的样品1仍然最多,铸模孔型的样品6喉道数目最少。而就喉道半径大小而言,样品6的平均喉道半径也仅为 $25.71 \mu\text{m}$ 。综合孔喉体积、喉道数量、喉道半径,也说明了样品6特低渗透率的原因。样品3具有最好的平均连通性,最大的喉道体积,第二大的孔喉总体积、喉道数目和平均喉道半径,以及较大的孔隙体积等,直接导致了它具有最好的岩石物性;孔隙度高达21.309%(氮气体积法)的铸模孔样品5,虽然孔喉总体积最大,但

是由于对渗透性起决定作用的参数即喉道体积和平均喉道半径仅好于同类型的样品6, 所以其渗透性也较差, 属于低渗样品。

总体来看, CT模拟计算的三维孔喉结构表征参数与通过铸体薄片法、体积测试法等传统方法表征的样品物性具有很好的一致性, 如表1中CT模拟计算孔隙度与氮气体积法实测孔隙度的相关系数为0.80, 相关性良好(见图3)。

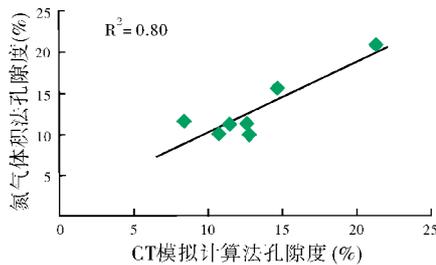


图3 CT模拟计算孔隙度与传统氮气体积法孔隙度相关图

通过有效体积(连通体积在孔喉总体积中的占比)与氮气体积法测试的渗透率数据分析, 更能说明不同孔隙类型的孔隙结构特征和相应的岩石物理特性。如图4所示, 有效体积随着渗透率的增大而快速升高, 两者呈幂函数相关, 如特低渗样品6的渗透率为 $0.0053 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 对应的有效体积仅占总孔喉体积的7.76%; 而渗透率为 $258.4209 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的粒间孔样品3, 96.35%的孔喉体积为有效体积, 另一个渗透率为 $94.4806 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的粒间孔样品4的有效体积也占有81.41%; 晶间孔样品1和样品2, 有效体积则分别占59.65%和66.40%; 混合孔的样品7有效体积占33.75%。

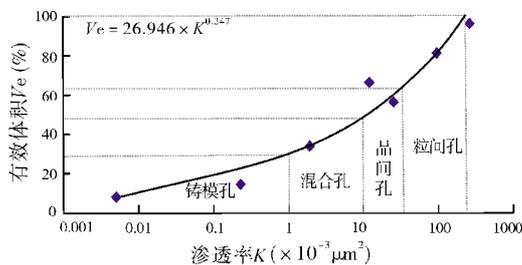


图4 不同孔隙类型白云岩的有效体积比模型

经过拟合分析, 可得有效体积 V_e 与渗透率 K 数据模型:

$$V_e = 26.946 \times K^{0.247} \quad (1)$$

式中: V_e 为有效体积, 单位: %; K 为渗透率, 单位: $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

形状因子是定量表征孔隙形状的参数, 可将定性描述的各类孔隙形状(晶间孔、粒间孔、铸模孔)以数据和对应图像模式形象化地展示, 在孔喉网络模型中多用孔隙截面的几何形状 G 表示^[30]:

$$G = A/P^2 \quad (2)$$

式中: A 为孔隙或喉道的截面面积, 单位: μm^2 ; P 为周长, 单位: μm 。

由公式(2)推算圆的形状因子 $G = \pi r^2 / (4\pi^2 r^2) = 0.0796$, 正方形的 G 值为0.0625, 三角形的 G 值为0~0.0481, 形状越规则, 形状因子越大, 圆的 G 值最大。

图1中列出了晶间孔、粒间孔、铸模孔和混合孔(粒间孔+铸模孔)样品的孔隙形状因子参数和对应的孔隙形状。由图可知, 晶间孔型以三角孔为主, 形状因子参数主要分布在0.03~0.05, 这与晶间孔型样品的矿物组成主要为菱形白云石有很好的对应关系。张天付等^[16]在讨论川东北飞仙关组鲕粒白云岩的孔隙结构时指出, 以菱形白云石为主的各类晶间孔白云岩中, 由于晶体间的接触关系, 导致各类三角孔发育, 如图5。粒间孔型样品中除了部分晶间孔外, 还有由于近圆形的碳酸盐颗粒堆积而成的“管束状”孔隙, 形状因子大小分布峰值也向左(小)偏移, 而铸模孔的形状因子大小分布范围更宽, 数值为0.02~0.062, 特别是右偏的数值增多, 形状向正方形和正圆形转换; 混合孔型也具有类似特征, 其形状因子分布为双峰状。白云岩基本的矿物构成——四面体的白云石晶体, 导致了这四类孔隙形状因子分布图中均出现三角孔。

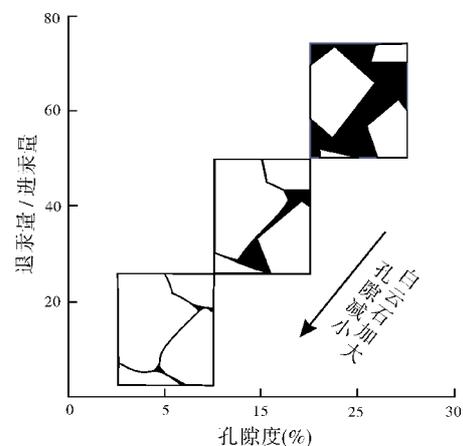


图5 白云石生长过程中的孔隙结构变化及孔隙度减小演化示意图

3.3 孔喉分布校验

高压压汞是主要用于判定储层岩石喉道大小和喉道结构的常规方法。图6是晶间孔样品1的压汞曲线。从曲线形态可以判断,样品1的孔隙和喉道大小分布不均,尺寸分布范围宽,属于略粗歪度。由图6可知,排驱压力和中值压力小,孔隙和喉道尺寸较大,其中喉道尺寸主要分布在1~40 μm之间,峰值为4~16 μm。

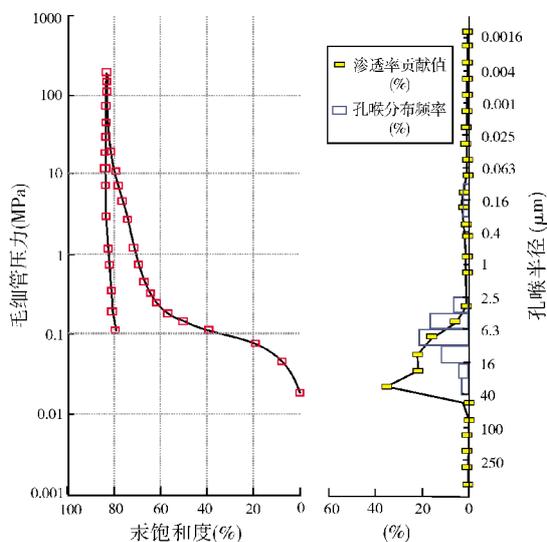


图6 实验样品1的高压压汞数据结果

对比基于CT法提取的孔隙和喉道半径分布(图7a),可知,样品1的孔隙和喉道半径为左倾分布,且向右延伸较远,分布在0~25 μm,主峰值为10 μm左右,而大孔占据一定比例。将压汞曲线中的喉道分布以频率与半径大小分布的方式作图7b,显示样品1的CT法孔喉半径分布曲线与压汞法获得的曲线较为一致。

3.4 分形分析

研究工作中分别选取四种不同孔隙类型的样品各一个(样品1、样品3、样品5和样品7)进行分形分析,结果如图8和图9。

图8是晶间孔、粒间孔、铸模孔和混合孔样品的二维系列CT扫描图片的分形盒子维数结果。图8a为各样品的CT扫描图像,图8b为分形分析结果。分析过程中,选取不同孔隙样品的CT二维连续切片200张,对应厚度2mm,依次计算各图层的分形盒子维数(图8b)。

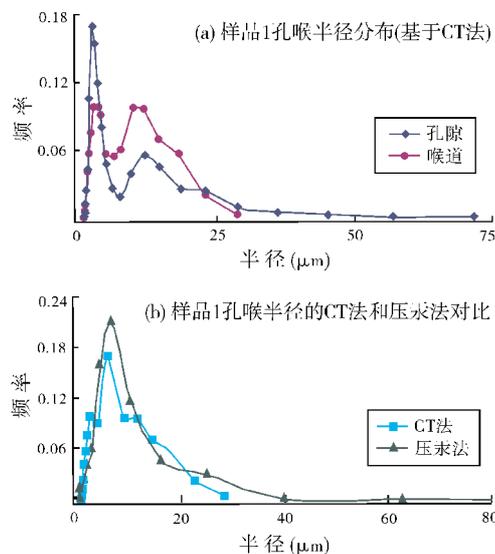


图7 晶间孔(样品1)的孔喉半径分布图

由图可知,不同孔隙类型盒子维数差异明显,盒子维数值相对大小的顺序为:样品5 > 样品3 > 样品1 > 样品7,具体数值分别为:晶间孔的样品1的值为1.58~1.67,均值为1.648;粒间孔的样品3的值为1.66~1.72,均值为1.691;铸模孔的样品5的值为1.73~1.88,均值为1.757;混合孔的样品7的值为1.53~1.61,均值为1.563。盒子维数是反映形状规则度的函数,孔隙形状越规则则该函数值越大,如二维圆形的盒子维数为2,三维球体的盒子维数为3。对应本次研究可知,盒子维数均值最大的样品5,铸模孔发育,而铸模孔孔隙形状较为规整,近圆形分布;盒子维数均值最小的样品7,混合孔发育,其孔隙类型较多,有粒间孔、粒间溶孔、铸模孔和晶间孔等,因此其对应的盒子维数仅为1.563。从盒子维数与孔隙度、渗透率的数据对比可以发现(表1),除了孔隙形态的影响外,孔隙数量和孔隙度可能也对盒子维数产生影响。如表1中盒子维数最大的样品5,其孔隙度同样最大,达21.3090%;而孔隙度相对较低的样品1和样品7对应的盒子维数也相应较低,这与前人的研究较为一致。谢淑云等^[24]在利用扫描电镜图片对江汉盆地碳酸盐岩的孔隙结构研究时,就指出盒子维数与样品的孔隙度存在正线性相关。Tarquis^[26]利用CT扫描对土壤的结构形态进行表征时,同样指出广义维数的距离 w 与土壤的孔隙度成正比。此外,张宸恺等^[31-32]、王瑞飞等^[33]用分形理论研究鄂尔多斯盆地碎屑岩孔隙的非均质性时也发现类似规律。

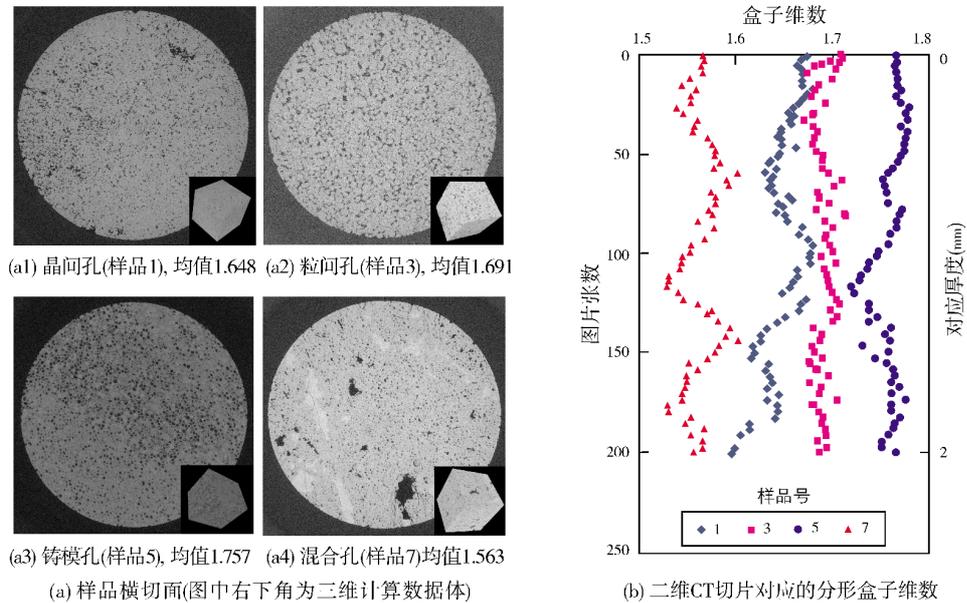


图8 典型孔隙型样品的CT系列切片分形盒子维数分析

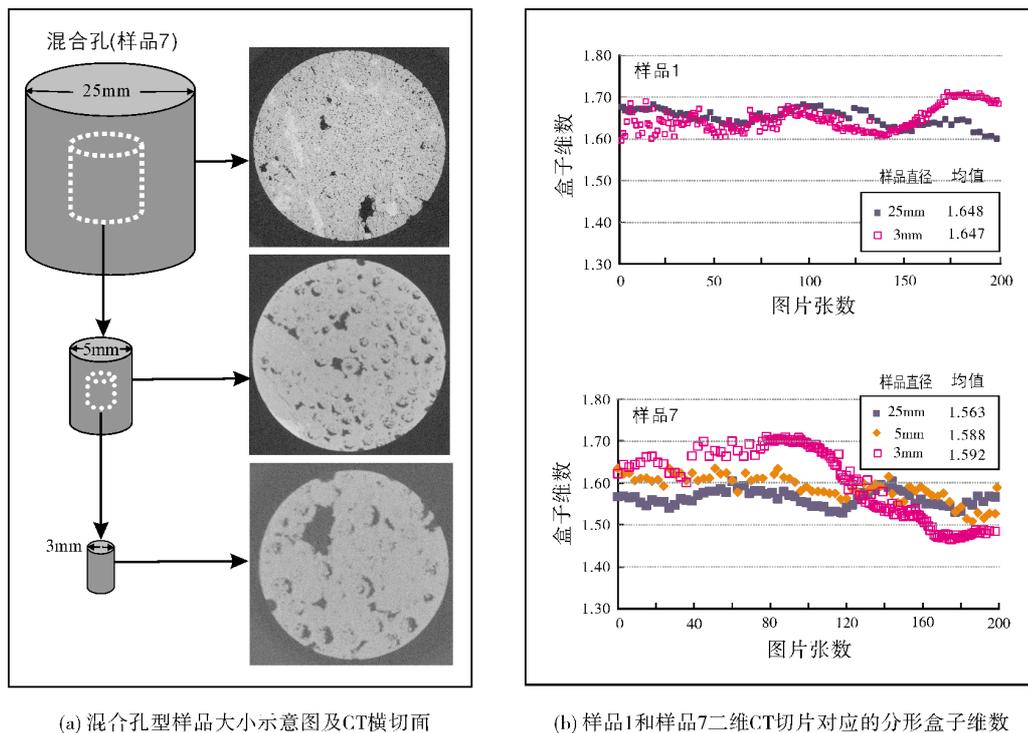


图9 实验样品7和样品1不同尺度二维CT系列切片分形盒子维数分析

分形与多重分形理论的最大特点是描述了物体的“自组织相似性”^[34], 因此, 为考察不同样品尺度对分形维数的影响, 实验过程中分别钻取了三种不同直径尺度的样品, 进行CT扫描和分形盒子维数分析, 结果如图9。实验样品为孔隙度相近的混合

孔(样品7)和晶间孔(样品1), 样品直径分别为25 mm、5 mm和3 mm(图9a)。

图9b显示, 不同样品尺度下, 虽然两个样品的分形盒子维数整体趋势一致, 但是随着尺度的不同, 分形盒子维数都出现了波动。不同的是样品1波动幅度

相对较小,两种尺度样品的分形盒子维数均值也较为一致,分别为1.648(直径25 mm)和1.647(直径3 mm)。样品7三种不同尺度的分形盒子维数波动较大,分形盒子维数均值分别为1.56(直径25 mm)、1.588(直径5 mm)、1.592(直径3 mm)。特别是尺度为3 mm时,样品7的分形盒子维数波动明显。这种现象可能受孔隙形态和样品的非均质性影响:样品1为细晶白云岩,孔隙为晶间孔,样品相对均质,基质为细粒级别的白云石,孔隙也相对均匀,主要为三角孔;样品7为混合孔样品,孔隙类型多样,除了主要的粒间孔和铸模孔外,还发育晶间溶孔、粒间溶孔和晶间孔等,样品的原岩为鲕粒白云岩,遭受后期强烈的白云石化影响,向晶粒状转变,发育了晶粒状的白云石,但是原岩的颗粒组构依旧清晰可见。因此,随着样品尺寸的变小,对应的扫描分辨率的提高,对孔隙的识别能力变高,孔隙结构的刻画也相对细腻,而且由于样品7的主导孔隙为粒间孔和铸模孔,这两类孔隙的结构相对规则,在小尺寸样品中其对整体盒子维数的贡献相对较大。

4 结 论

(1)基于高分辨率工业CT扫描,能对不同孔隙类型碳酸盐岩储层的三维孔喉结构进行有效定量表征。与传统方法相比,CT扫描具有无损、三维可视化并可与计算机应用模拟相结合的特点,可直接对样品进行立体扫描,建立微米—纳米级孔喉三维网络模型,并统计和计算孔喉半径、形状因子、连通性等表征参数。

(2)不同类型孔隙的三维孔喉结构差异明显。晶间孔型和粒间孔型的孔隙形状多为三角形,三维空间上表现为放射状,孔隙细长,喉道发育,连通性好;铸模孔型的孔隙形状规整,二维平面上表现为圆形,三维空间上近似球体,此类样品往往孔隙度较为发育,但是孔喉系统连通性差,渗透率低;混合孔型的孔隙和喉道非均质性较强,受岩石组构特征影响显著。

(3)晶间孔、粒间孔、铸模孔和混合孔的孔隙空间分布在分形盒子维数上有明确的响应,如二维系列图片的盒子维数值相对大小为:铸模孔>粒间孔>晶间孔>混合孔。从盒子维数与孔隙度、渗透率的数据对比中发现,孔隙度可能也对盒子维数产生影响。

参 考 文 献

- [1] 罗平,张静,刘伟,等. 中国海相碳酸盐岩油气储层基本特征[J]. 地学前缘,2008,15(1): 36-50.
- [2] 金之钧. 中国海相碳酸盐岩层系油气勘探特殊性问题[J]. 地学前缘,2005,12(3): 15-22.
- [3] 马永生,郭彤楼,赵雪凤,等. 普光气田深部优质白云岩储层形成机制[J]. 中国科学D辑: 地球科学,2007,37(增刊II): 43-52.
- [4] 徐世琦,周建文,曾庆,等. 龙门山北段二叠系栖霞组二段白云岩储层特征[J]. 天然气工业,2005,25(增刊A): 59-61.
- [5] 赵雪凤,朱光友,张水昌,等. 川东北普光地区与塔中地区深部礁滩体优质储层的对比研究[J]. 沉积学报,2009,27(3): 390-403.
- [6] 夏明军,曾大乾,邓瑞健,等. 普光气田长兴组台地边缘礁、滩沉积相及储层特征[J]. 天然气地球科学,2009,20(4): 549-562.
- [7] 苏立萍,罗平,罗忠,等. 川东北飞仙关组鲕粒滩储层特征研究[J]. 天然气工业,2005,25(6): 14-17.
- [8] Hazlett R D. Statistical characterization and stochastic modeling of pore networks in relation to fluid flow[J]. Mathematical Geology, 1997, 29(6): 801-822.
- [9] Bakke S, Øren P E. 3-D pore-scale modelling of sandstones and flow simulations in the pore networks[J]. Society of Petroleum Engineers, 1997, 2(2): 136-149.
- [10] Wu Kejian, Numan N, John W, et al. An efficient Markov chain model for the simulation of heterogeneous soil structure [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68 (2): 346-351.
- [11] Wu Kejian, Van Dijke M I J, Couples G D, et al. 3D stochastic modelling of heterogeneous porous media -applications to reservoir rocks[J]. Transport in Porous Media, 2006, 65(3): 443-467.
- [12] Dong Hu. Micro-CT imaging and pore network extraction [D]. London: Imperial College, 2007.
- [13] Dong Hu, Fjeldstad S, Alberts L, et al. Pore network modelling on carbonate: A comparative study of different micro-CT network extraction methods[J]. Society of Core Analysis, 2008, 31: 1-12.
- [14] 赵秀才. 数字岩心及孔隙网络模型重构方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学,2009.
- [15] 姚军,王晨晨,杨永飞,等. 碳酸盐岩双孔隙网络模型的构建方法和微观渗流模拟研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43(7): 896-902.
- [16] 张天付,寿建峰,郑兴平,等. 川东北下三叠统飞仙关组鲕粒白云岩孔喉的空间展布与刻画[J]. 古地理学报,2012,14 (2): 187-196.
- [17] Katz A J, Thompson A H. Fractal sandstone pores: Implications for conductivity and pore formation[J]. Physical Review Letters, 1985, 54(12): 1325-1328.
- [18] Krohn C E, Thompson A H. Fractal sandstone pores: Auto-

- mated measurements using scanning-electron-microscope images [J]. *Physical Review B*, 1986, 33(9): 6366-6374.
- [19] 朱九成, 郎兆新, 张丽华, 等. 砂岩孔隙结构分形模型及随机网络仿真[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 1995, 19(6): 46-51.
- [20] Schlueter E M, Zimmerman RW, Witherspoon P A, et al. The fractal dimension of pores in sedimentary rocks and its influence on permeability[J]. *Engineering Geology*, 1997, 48(3): 199-215.
- [21] 陈传仁, 周熙襄. 储层砂岩孔隙分形性质的研究[J]. *成都理工学院学报*, 1996, 23(4): 65-68.
- [22] 马新仿, 张士诚, 郎兆新. 孔隙结构特征参数的分形表征[J]. *油气地质与采收率*, 2005, 12(6): 34-36.
- [23] Zhang Liying, Bryant S, Jennings J, et al. Multiscale flow and transport in highly heterogeneous carbonates[C]//Proceedings of the 2004 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, USA, SPE 90336.
- [24] Xie Shuyun, Cheng Qiuming, Ling Qichong, et al. Fractal and multifractal analysis of carbonate pore-scale digital images of petroleum reservoirs[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(2): 476-485.
- [25] Jouini M S, Vega S, Mokhtar E A. Multiscale characterization of pore spaces using multifractals analysis of scanning electronic microscopy images of carbonates[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2011, 18(18): 941-953.
- [26] Tarquis A M, Heck R J, Andina D, et al. Pore network complexity and thresholding of 3D soil images [J]. *Ecological Complexity*, 2009, 6(3): 230-239.
- [27] 方海平, 谢淑云, 张天付, 等. 五大连池玄武岩三维孔隙结构的多重分形特征[J]. *地质科技情报*, 2014, 34(3): 24-29.
- [28] 谢淑云, 何治亮, 钱一雄, 等. 基于岩石CT图像的碳酸盐岩三维孔隙结构的多重分形特征研究[J]. *地质学刊*, 2015, 39(1): 46-54.
- [29] Choquette P A, Pray L C. Geological nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates[J]. *AAPG Bulletin*, 1970, 54(2): 207-250.
- [30] 侯健, 李振泉, 张顺康, 等. 岩石三维网络模型构建的实验和模拟研究[J]. *中国科学 G 辑: 物理学力学天文学*, 2008, 38(11): 1563-1575.
- [31] 张宸恺, 沈金松, 樊震. 应用分形理论研究鄂尔多斯MHM油田低孔渗储层孔隙结构[J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28(1): 110-115.
- [32] 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): 19-28.
- [33] 王瑞飞, 陈明强, 孙卫. 鄂尔多斯盆地延长组超低渗透砂岩储层微观孔隙结构特征研究[J]. *地质论评*, 2008, 54(2): 270-277.
- [34] Mandelbrot B B. *the Fractal Geometry of Nature*[M]. San Francisco: Freeman. 1982.

编辑: 黄革萍

3D Quantitative Characterization of Pore Systems in Porous Reservoirs: Cases of Porous Dolostones in Sichuan Basin and Tarim Basin

Zhang Tianfu, Xie Shuyun, Wang Xin, Wang Ying

Abstract: Porous carbonate reservoirs are common in petroleum exploration. Taken as examples from porous dolostones in Sichuan and Tarim basins, the texture of different pore systems in classical dolostone reservoirs, including intergranular pores, intercrystalline pores, moldic pores, etc. are analyzed and discussed, and then the structures of pores and throats are quantitatively characterized in 3D space by high-resolution micro-nano CT scan, digital core technique and fractal and multi-fractal methods. The result has shown that intergranular pores and intercrystalline pores are commonly triangle in shape and radial in 3D space and pores are relatively long with developing throats which lead to well connectivity for whole rock. Moldic pores are regular in shape and almost circular in 2D space but sphere in 3D space. In this type of samples, big pores are usually corresponded to high porosity but the poor connectivity of pore and throats which lead to low permeability. Mixed pores present obviously heterogeneity and influenced by fabric and composition of carbonate rock. It is shown that D_{box} values and regularity index of pore shapes have different response to different pore systems. The D_{box} values exhibit a descending order of moldic, intergranular, intercrystalline and mixed pores from the maximum to the minimum values. Additionally, porosity maybe influence D_{box} values according to analysis of porosity and permeability.

Key words: Dolostone reservoir; Pore texture; Pore characteristics; Reservoir quantitative characterization; Sichuan Basin; Tarim Basin

Zhang Tianfu: DSc., Geology Engineer. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang, 310023, China