

致密砂岩气藏微观结构及渗流特征*

杨建^{1,†} 康毅力¹ 李前贵^{1,2} 张浩¹

¹ 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 西南石油大学, 成都 610500

² 中国石化西南分公司博士后科研工作站, 成都 610081

摘要 随着常规油气资源的减少, 致密砂岩气藏逐渐成为勘探开发的热点. 然而致密砂岩气高效产出机理研究还相对滞后, 已经成为目前制约致密砂岩气大规模经济有效开发的瓶颈. 致密砂岩由于其特殊的地质特征, 基质微观结构复杂, 天然裂缝一定程度发育, 投产一般需要水力压裂等增产措施, 气体在其中渗流存在跨尺度效应. 研究揭示出致密砂岩气在多孔介质中的流动分为解吸、扩散、渗流等几个方式, 包括浓度场下的扩散、压力场中的渗流等. 综述了致密砂岩存在的非常规地质特征及其研究描述方法, 并依据克努森数大小, 对致密砂岩气的渗流状态进行流态区域划分, 为更好的理解和模拟致密砂岩气的流动状态提供了理论依据, 并指出建立一种高效、简洁的微观结构精细描述方法, 以及解决致密砂岩气在多尺度条件下的传质优化等是今后研究的重点方向.

关键词 致密砂岩, 气藏, 微观结构, 渗流, 克努森数

1 引言

21 世纪是天然气的世纪, 预计到本世纪中叶, 在世界一次能源消费结构中天然气将超过石油而居第一位^[1]. 随着常规油气资源量日益减少, 致密砂岩气藏的勘探开发工作越来越受到人们的关注. 第 3 轮油气资源评价认为我国致密砂岩天然气资源量近 $2 \times 10^{13} \text{ m}^3$, 并呈现出快速增长的态势^[2]. 根据国内外已有的勘探开发经验, 致密砂岩气是最具现实勘探意义, 具有补偿常规资源储量和产量递减的能力. 而致密砂岩气藏普遍存在单井日产量低, 稳产期短或者没有稳产期, 产量递减快, 采出程度低等问题, 通常需要采取水力压裂改造储层, 然而有的增产效果并不明显, 有的还造成减产, 经济有效开发该类非常规天然气资源难度大.

致密砂岩气藏开发难度与其非常规的地质特征是分不开的, 孔隙度一般分布于 4%~12% 之间, 原地渗透率值低于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 喉道半径一般小于 $0.5 \mu\text{m}$, 压汞饱和度中值压力可达 3~50 MPa, 存在异常高压或者异常低压, 部分具有超低含水饱和度等. 另外, 致密砂岩储层自生黏土矿物含量高且类型丰富是造成储层致密以及微观结

构复杂的主因, 而复杂的微观结构与流体之间的相互作用又是影响气体高效产出的关键因素之一^[3,4]. 人们熟知的达西定律描述其气体的渗流规律不再准确, 滑脱效应研究表明, 气体在致密基块孔喉中存在两种传递方式: 浓度场作用下的扩散和压力场作用下的渗流, 分为解吸、扩散、渗流等几个方式^[5].

2 致密砂岩微观结构

致密砂岩岩性致密, 孔隙和喉道的几何形状、大小、分布及其相互连通关系十分复杂, 其存在的微观结构多样 (图 1), 且存在跨尺度效应 (表 1). 储层主要孔隙类型包括: 缩小粒间孔、粒间溶孔、溶蚀扩大粒间孔、粒内溶孔、铸模孔及晶间微孔等, 孔径的尺度范围 $10^{-8} \sim 10^{-4} \text{ m}$; 喉道类型主要以片状、弯片状、管束状喉道为主, 喉道的延伸长度在 $10^{-5} \sim 10^{-1} \text{ m}$. 致密砂岩由于其岩性坚硬, 受构造作用而形成的微裂缝发育, 包括构造微裂缝、解理缝、层面缝等, 缝宽一般 $10^{-6} \sim 10^{-4} \text{ m}$, 缝长 $10^{-2} \sim 10^1 \text{ m}$. 解理缝主要发育在长石颗粒

收稿日期: 2007-01-25, 修回日期: 2008-01-11

* 中国石油天然气股份公司科技风险创新研究项目和四川省杰出青年学科带头人培养基金 (07ZQ026-113, 02ZQ026-042) 资助项目

† E-mail: y2000w@sina.com

内. 构造微裂缝缝宽一般 $1\sim 15\ \mu\text{m}$.

致密砂岩储层中自生黏土矿物发育, 含量比常规储层高, 致密砂岩的极低渗透性很大程度上可直接归因于黏土矿物的作用. 种类丰富的各类黏土矿物充填孔隙空间以及占据颗粒表面, 形成大量的晶间纳微孔隙, 晶间微孔本身即是孔隙又

是喉道. 黏土矿物种类不同、含量不同, 以及黏土微粒之间的接触关系不同都将使晶间孔的数量、大小不一, 其狭窄的流动空间使流体在微孔介质中的流动复杂化. 黏土矿物微观结构特征主要有: 丝缕支架状结构、单片支架状结构、假蜂窝状结构、帚状散开结构等 [6].

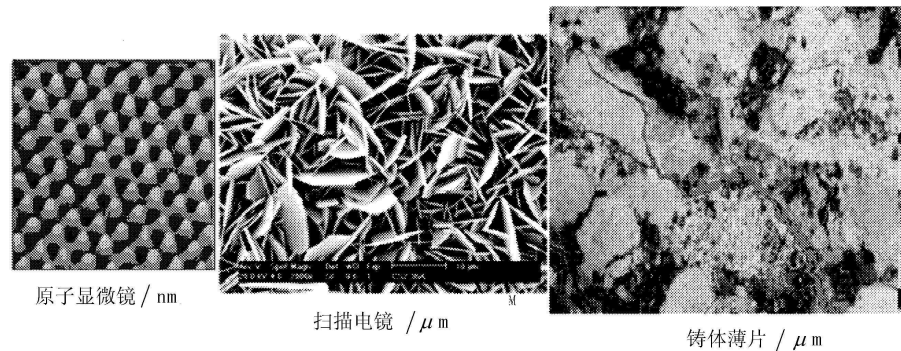


图 1 致密砂岩储层微观结构示意图

表 1 致密砂岩储层存在的多尺度描述

尺度	空间尺度/m
致密基块孔喉	$< 10^{-8}$; 孔喉半径 $10^{-8} \sim 10^{-4}$; 距离 $10^{-5} \sim 10^{-1}$
天然裂缝	缝宽 $10^{-6} \sim 10^{-4}$; 缝长 $10^{-2} \sim 10^1$

3 致密砂岩微观结构的研究方法

3.1 压汞法

压汞法是目前石油工业中研究储层微观结构应用最广泛的方法之一. 常规压汞技术研究岩石孔隙结构具有快速、准确的特点, 且能够涉及较高的毛管压力范围, 便于对细小孔喉分布进行测量. 随着对致密、低渗储层的大规模开发, 恒速压汞技术研究储层微观结构的应用逐渐推广开来.

1949 年 Purcell 首次将压汞技术应用于石油工业 [7]. 1976 年 Wardlaw 利用单向压汞技术对油气储层孔隙结构进行了研究 [8], 之后压汞法研究油气储层孔隙结构得到广泛应用. 常规压汞技术是利用一定压力条件下, 进入岩样的汞体积对应一定大小的孔喉, 进汞压力越高测量的孔喉越小, 最高进汞压力可达 200 MPa. 表征孔隙微结构的参数可分为反映孔喉大小、孔喉分选程度、孔喉连通性和控制流体运动特征的 3 大类参数. 反映孔喉大小的参数有: 最大连通喉道半径 R_d , 喉道半径中值 R_{50} , 平均喉道半径 R_m , 喉道半径均值 J_z , 主要

喉道半径平均值 R_z 等. 反映孔喉分选程度的参数有: 喉道分选系数 S_p , 相对分选系数 D , 歪度 S_K 等. 反映孔喉连通性和控制流体运动特征的参数: 排驱压力 P_d , 饱和度中值压力 P_{50} , 退泵效率 W_r , 视孔喉比 V_{pt} 等.

恒速压汞技术. Gaulier 在 1971 年利用恒速压汞技术研究了多孔介质的孔隙结构 [9], 但是测试精度较低. 真正实际应用恒速压汞技术是 1989 年 Yuan 和 Swanson 在孔隙测定仪 (apparatus for pore examination, APEX) 上首先开展 [10]. 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. 目前国内也引进最新的恒速压汞仪进行微观孔隙结构的研究, 在计算相对渗透率以及确定微观结构参数方面取得较好成果 [11,12].

与常规压汞不同, 恒速压汞是以很低的恒定速度 (通常为 $0.000\ 05\ \text{ml/min}$) 将汞注入岩石孔隙. 恒速压汞通过检测汞注入过程中的压力涨落将岩石内部的孔隙和喉道分开, 恒速压汞测试结果能够分别提供孔隙和喉道的毛管压力曲线, 提供孔隙半径分布、喉道半径分布、孔隙 - 喉道半径比分布等岩石微观孔隙结构特征参数. 相比常规压

汞,恒速压汞不仅能够提供更多的岩石物性参数,而目能够提供更详细的信息.恒速压汞技术进汞速度低,适合孔、喉性质差别很大的低渗透、特低渗透储层微观孔隙结构的研究.

3.2 二维图像分析

铸体薄片镜下观察.铸体薄片是通过在真空加压条件下向岩心注入染色树脂,待树脂固化后磨制成岩石薄片进行镜下观察.由于样品制备简单、费用低,已经实现利用统计学方法进行计算机自动二维图像分析^[13],因而是研究微观结构的常用技术之一.铸体薄片镜下观察可直观了解孔隙空间横截面积、孔隙大小和孔隙直径和平均孔隙直径、面孔率、比表面、孔隙大小分布等.由于薄片一般厚 0.03 mm,很难观察不透光矿物,同时由于其放大倍数有限,很难对微观结构有一个明晰的观测.

扫描电镜(scanning electron microscope, SEM).储层中黏土矿物一般仅几个微米,其自身微观结构复杂,普通的光学显微镜很难区分黏土上矿物的成分、形态及分布特征.扫描电镜的出现弥补铸体薄片观察的不足,扫面电镜可以清晰直观的观察其微观结构特征.能谱分析技术与扫描电镜的结合使用,不仅能够对样品的形态分布进行微观分析,同时还可以对样品组成成分进行定性及半定量分析.

环境扫描电镜(environmental scanning electron microscopy, ESEM).20世纪80年代末,国外设计成功环境扫描电镜,90年代中期我国就引进该设备 ESEM2020 型环境扫描电镜应用于石油工业科技研究^[14].利用环境扫描电镜可进行油藏岩石在其天然状态下的微观特征研究^[15].环境扫面电镜可以观察含油含水的固体样品、胶体样品及液体样品,同时能够进行微观结构动态变化过程的观察.

原子力显微镜(atomic force microscope, AFM).20世纪80年代发展起来的原子力显微镜具有制样简单、成像分辨率可达到纳米级等优点,是物质表面几何形貌、表面性能及纳米级结构分析的强有力的测量工具.其在石油科技中的应用方兴未艾^[16],将极大的拓宽对储层矿物纳观结构观察的视野.

3.3 三维图像分析

激光扫描共聚焦显微镜(laser scanning confocal microscope, LSCM)是国外20世纪80年代后期开发的新测试仪器,它集显微技术、高速激光扫描和计算机图像处理技术于一体.包括激光光源

和共聚焦扫描探测器、偏光显微镜和 Z 轴聚焦步进马达以及计算机数据和图像处理系统.该显微镜的放大倍数可达 10000 倍,分辨率比一般显微镜高 1.4 倍,可分层扫描,光切片最薄为 0.1 μm ,纵向穿透深度为 100 μm 左右,将每层扫描图像存入计算机,然后可重建三维立体图像.Fredrich^[17]利用该技术研究了真实砂岩样品的微观结构取得较好结果.

核磁共振成像技术(nuclear magnetic resonance imaging, MIR).其实质上就是通过受检物体各种组成成分和结构特征的不同弛豫过程,根据观测信号的强度变化,利用带有核磁性的原子与外磁场的相互作用引起的共振现象而进行实验和检测的.唐巨鹏等^[18]利用核磁共振成像技术研究煤层气渗流规律,建立了核磁渗透率和煤储层渗透率的关系表达式,指出核磁 T_2 分布谱与煤孔隙结构具有较好的对应关系.

X-CT 岩心扫描三维成像技术.利用 X 射线计算机层析(computerized tomography, CT)对岩石样品进行三维成像,空间分辨率达到几个微米,能直观地描述岩石微观孔隙结构特征和流体运动特征,同时可以定量分析.Dunsmuir 等^[19]利用该技术研究了直径为 2.25 mm 的砂岩样品,分辨率达到 7.5 μm .国内应用该技术对孔隙微观结构以及微观渗流机理等方面进行了研究^[20,21].

聚焦离子束成像技术.Tomutsa 和 Radmilovic 报道了利用聚焦离子束辅助岩石亚微观尺寸的三维成像技术^[22].

3.4 虚拟现实技术

二维图像重建三维微观结构.高分辨率的二维图像可以提供岩石微观结构的几何性质,比如孔隙分布以及孔隙的特殊形状.基于这些信息,Bryant、Bakke 和 Pilotti 等人模拟地质过程来重构三维特征^[23~25].但是许多地质过程是很难模拟的,Quiblier 和 Adler 等人利用统计技术来分析二维图像重建三维结构^[26,27],Roberts、Manwart 和 Talukdar 等利用两点统计方法以及其他几何性质提高三维重建图像的质量^[28~30].Hiroshi Okabe 等人建立多点统计方法由二维图像重建三维微观孔隙结构^[31].国内四川大学的唐堂、罗代升等^[32]利用砂岩样品铸体薄片二维图像资料,重建样品的三维微观结构,利用建立的三维模型可以分析储层的微观物性、流体饱和度等.

孔隙网络模型.利用孔隙网络模型模拟流体在多孔介质中的流动特征最早由 Fatt 开始于 20 世

纪 50 年代, 利用规则的二维格子模拟孔隙和喉道的分布, 研究了不同孔隙截面 (正方形、三角形、蜂窝状、双六边形等) 对多孔介质物性的影响, 指出孔隙的尺寸分布比格子的形状对微观性质影响更大^[33~35]. Chatzis 和 Dullien^[36] 基于 Fatt 的研究指出, 二维网络模型不能很好的预测三维性质. 随着计算机技术的发展, 孔隙网络模型由二维向三维发展. Jerauld 等人^[37] 建立了随机网络模型. Jerauld 和 Salter^[38] 研究指出影响孔隙网络模型结构性质最重要的是孔喉直径比. 目前孔隙网络模型建立一般选择蜂窝状格子和规则立方格子 (honey-combed lattice or a regular cubic lattice).

3.5 微观模型

玻璃球珠微观模型. 该模型是利用有机玻璃板间的缝隙 (约 0.3mm) 充满直径 0.1mm 的玻璃珠, 玻璃珠被密集地压紧以保证其均匀分布^[39]. 利用该模型可以进行微观驱替实验, 自吸实验等, 由于其透光性好, 具有良好的可视性.

玻璃刻蚀微观模型. 实验采用的微观模型是先使用与印刷电路制作中类似的照相技术在玻璃板上刻蚀出孔隙网络, 然后上覆一玻璃, 并在高温炉中烧结在一起^[40]. 这类模型透光度好, 可以得到清晰的图像照片, 适于观察各种界面现象和研究各种多相渗流过程及其物理化学作用. 但是由于没有胶结物及矿物质, 真实性较差.

真实砂岩微观模型. 西北工业大学油藏地质及油层物理实验室创制的真实砂岩微观模型驱替实验系统 (1997 年获得国家专利)^[41]. 模型用实际岩心, 经清洗、烘干、切片、磨平等工序, 做成了真实砂岩微观模型, 这种模型的承受压力为 0.1MPa, 承温能力在 80°C 以下. 刘孔章等^[42] 研究低渗油藏残余水形成机理时采用的真实砂岩微观模型, 模型长、宽分别为 2.5cm, 厚 0.03cm, 研究取得较好效果.

4 致密砂岩气藏渗流特征

物理学中对流体的描述分 3 个层次: (1) 分子层次, 立足分子动力学, 研究分子碰撞微观机理; (2) 动力学层次 (介观层次), 这是用非平衡态统计物理的方法来研究流体, 经典的动力方程是玻耳兹曼方程 (Boltzmann equation); (3) 流体力学层次, 这是宏观层次, 所用的基本方程是连续方程, Euler 方程和 Navier-Stokes 方程有时还用能量方程. 目前储层流体流动描述一般采用第 3 个层次, 然而致密砂岩由于其非常规地质特征, 是既存在纳微孔喉, 也存在天然微裂缝、水力缝等多尺度的流动介质 (图 2), 很难用唯一的流动层次来描述流动特征. 滑脱效应研究表明, 气体在致密基块孔喉中存在两种传递方式: 浓度场作用下的扩散和压力场作用下的渗流, 分为解吸、扩散、渗流等几个方式.

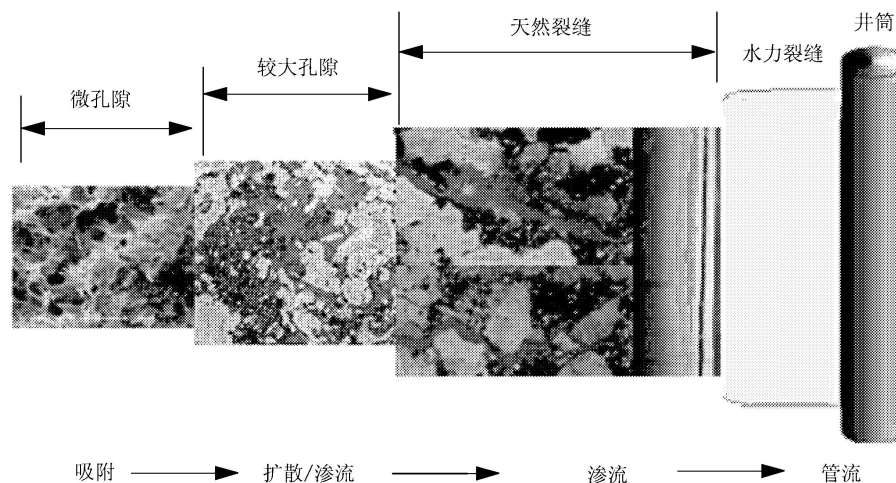


图 2 致密砂岩储层气体传递过程示意图

4.1 启动压力梯度

致密砂岩基块孔喉尺度中存在非达西渗流, 大量的实验表明, 随着储层渗透率的降低, 低速非达西渗流越明显, 当渗透率降低到一定程度时, 存

在着启动压力梯度. 典型的非达西渗流主要表现为: (1) 存在着不为零的启动压力梯度; (2) 当压力梯度大于启动压力梯度时, 渗流速度与压力梯度存在非线性关系.

前苏联学者布兹列夫斯基 (1924) 指出,在某些情况下,多孔介质中只有在超过某个起始的压力梯度时才发生液体的渗流 [43]. Miller 和 Low [44] 也发现在低渗透介质中流体存在启动压力梯度,非线性渗流. 阎庆来等 [45] 进行岩心流动实验,发现当渗透率很低时,地层水的渗流存在可观的启动压力梯度. 邓英尔等 [46] 探讨了气体非线性渗流力学机理,发现了低渗透岩石微尺度孔隙气体与液体渗流遵循同一形式的运动规律,建立了气体与液体非线性运动规律统一模型.

4.2 滑脱效应

1875 年 Kundt 和 Warburg 第 1 次发现气体流动存在滑脱现象 [47]. 1941 年 Klinkenberg 实验证实滑脱效应的存在,并解释了在相同压力条件下气测渗透率大于液测渗透率的原因 [48]. 大量实验

研究证实,岩心越致密,气体在微孔介质中滑脱效应越明显.

致密砂岩由于其复杂的微观结构,Ertekin 等人 [49] 研究指出描述致密砂岩微孔中气体渗流的过程,只用达西定律来描述是不准确的. Rangarajan 等人 [50] 也指出气体在不同大小的孔隙介质中流动,由于气体分子平均自由程的大小,导致在微孔中的流动是分区域的.

4.3 致密砂岩气体流动状态划分

Civan [51] 研究指出气体在微孔介质中的流动状态取决于介质本身的岩石物理性质和气体分子平均自由程,并总结 Liepmann、Stahl 和 Kaviany 等人利用克努森数划分气体流动区域,把致密砂岩中气体流动分为 3 个区域: (1) 流动区域; (2) 过度流区域; (3) 黏滞流区域. 分类如表 2.

表 2 致密砂岩气体流动 3 个区域划分

流动区域	Liepmann	Stahl	Kaviany
克努森流动	$Kn > 10$	—	$Kn > 1.0$
过度流	—	$0.01 \leq Kn \leq 0.34$	$0.14 \leq Kn \leq 1.0$
黏滞流	—	$Kn < 0.01$	$Kn < 0.14$

1934 年 Knudsen 定义无量纲数 Kn , 其表达式为

$$Kn = \frac{\bar{\lambda}}{D} \tag{1}$$

式中 $\bar{\lambda}$ 为气体分子平均自由程, 单位 m; D 为孔喉直径, 单位 m.

$$\bar{\lambda} = \frac{KT}{\sqrt{2\pi} d^2 P} \tag{2}$$

式中 K 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度, 单位 K; d 为分子直径, 单位 m; P 为压力, 单位 Pa.

4.4 流动状态划分

综合 Civan [51] 和朱光亚等人 [52] 的研究成果, 利用 Kn 数划分致密砂岩储层中气体流动状态及其数学描述方程, 见表 3.

当 Kn 数小于 0.01 时, 利用 Darcy 方程描述流体流动

表 3 Kn 数与气体流动状态划分

Kn 数范围	<0.01	0.01~0.1	0.1~10	>10
气体流动状态	连续介质流动, 无滑脱现象	连续介质流动, 存在滑脱效应	连续介质假设失效, 存在滑脱效应	自由分子流动
描述方程	Darcy 方程	Klinkenberg 方程	陈代珣方程	Fick 定律

$$v = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \tag{3}$$

Klinkenberg 设想一种简单的多孔介质毛管模型, 得出了气体渗透率 K_g 与绝对渗透率的关系式

$$K_g = K_\infty \left(1 + \frac{b}{\bar{p}} \right) \tag{4}$$

$$b = \frac{4c\bar{\lambda}}{R} \bar{p} \tag{5}$$

式中 \bar{p} 为平均压力, b 为滑脱因子, $\bar{\lambda}$ 为气体分子平均自由程, c 为比例系数, R 为孔道半径.

Kn 数在 0.01~0.1 时, 气体稳态渗流遵循以下方程

$$Q = \frac{T_a}{z P_a T_t} \frac{K_g A (P_1^2 - P_2^2)}{2 \bar{\mu} L} = \frac{T_a}{z P_a T_t} K_\infty \left(1 + \frac{b}{\bar{p}} \right) \frac{A (P_1^2 - P_2^2)}{2 \bar{\mu} L} \tag{6}$$

式中 Q 为大气压下气体的体积流量, T_a 为标准温度, P_a 为大气压, \bar{z} 为地层温度及地层平均压力下的气体压缩因子, T_t 为地层温度, K_g 为气测渗透率, A 为岩心样品截面积, $\bar{\mu}$ 为地层温度及地层平均压力下气体黏度, L 为岩心样品长度, P_1 为进口压力, P_2 为出口压力。

K_n 数介于 0.1~10 时, 气体遵循陈代珣^[53] 推导的数学模型

$$Q = -\frac{A}{\mu} \frac{dp}{dL} K_{\infty} \left(1 + \frac{29}{3} e^{-K_n^{-1}} \right) \quad (7)$$

式中 Q 为流量, A 为岩心样品截面积, K_{∞} 为绝对渗透率, μ 为黏滞系数。

K_n 数大于 10 时, 气体在纳微孔中主要是浓度场下的扩散, 呈自由分子流动。扩散遵循 1855 年 Fick 提出的扩散定律

$$Q_d = -DA \frac{dc}{dx} \quad (8)$$

式中 Q_d 为质量流量, A 为岩心样品横截面积, D 为扩散系数, c 为质量浓度, x 为长度。

气体分子的扩散效应与温度、压力以及气体的性质有关。对特定的油气藏, 其扩散系数必须经过实验测定。在没有实验测定数据时, 可用经验公式确定气体的扩散系数^[49]

$$D = 0.339K^{0.67}/M^{0.5} \quad (9)$$

式中 K 为渗透率, M 为气体分子量。

5 展 望

微观结构是影响致密砂岩气体渗流的重要因素之一, 目前的研究仍处于探索阶段, 有必要在今后的研究工作中重点研究以下几方面的内容, 微观结构精细描述技术, 定量描述微孔介质的形态、性质、分布以及微孔介质物理参数的精确数据和三维描述, 为渗流模拟提供重要基础数据; 分形理论与微孔介质精确描述的结合, 利用分形维数对微孔介质进行定量表征, 从而更真实客观地理解和把握多孔介质中孔隙结构对吸附或渗流过程的影响, 开发出更精确、简洁、实用的孔隙结构模型; 模拟研究储层条件下有效应力变化、储层损害等对微观结构的影响。

低渗、特低渗储层中影响油气渗流的不是孔隙度、渗透率而是孔隙结构^[54], 致密砂岩中气体流动与微孔介质的耦合作用, 以及致密基块中气体扩散速度、路径、扩散效率的影响因素, 将是致

密砂岩气体在基块中渗流的研究重点^[55~57]。由于致密砂岩中天然裂缝一定程度发育, 后期多采用水力压裂人工造缝, 因而跨尺度之间的传递过程将是影响致密气高效产出的决定因素, 有必要深入研究多尺度之间的关联、优化配置关系等对气体高效产出的影响, 为经济有效开采该类非常规油气资源提供理论依据。

参 考 文 献

- 1 李士伦, 郭平等. 拓展新思路、提高气田开发水平和效益. 天然气工业, 2006, 26(2): 1~5
- 2 李景明, 李剑, 谢增业等. 中国天然气资源研究. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 15~18
- 3 Rudolf M, Ter-Sarkisov, Valery M Buleiko. New approach to development of tight low-permeable reservoirs. In: VNIIGAZ. Strategic Field Development Conference Stavanger, 2003-01-27~28, Norway. 2003
- 4 童敏, 李相方, 程时清. 近井地带凝析油聚集机理研究综述. 力学进展, 2003, 33(4): 499~506
- 5 李前贵, 康毅力, 罗平亚. 致密砂岩气藏多尺度效应及生产机理. 天然气工业, 2006, 26(2): 111~113
- 6 沈明道. 黏土矿物及为组构与石油勘探. 成都: 电子科技大学出版社, 1993. 3~15
- 7 Purcell W R. Capillary pressure their measurement using mercury and the calculation of permeability there from. *Trans AIMI*, 1949, 186: 39~46
- 8 Wardlaw N C, Taylor R P. Mercury capillary ressure curves and the interpretation of pore structure and capillary behavior in reservoir rocks. *BCPG*, 1976, 24(2): 225~262
- 9 Gaulier C. Studying vugular rocks by-constant-rate mercury injection. In: The 46th Annual Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, New Orleans, La., 1971-10-03~06. SPE14892, 1971
- 10 Yuan H H, Swanson B F. Resolving pore-space characteristics by rate-controlled porosimetry. In: SPE Formation Evaluation, 1989-03-17~24. SPE14892, 1989
- 11 王金勋, 杨普华, 刘庆杰等. 应用恒速压汞实验数据计算相对渗透率曲线. 石油大学学报 (自然科学版), 2003, 27(4): 66~69
- 12 于忠良, 熊伟, 高树生等. 低渗透储层应力敏感程度及敏感机理分析. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2007, 22(S1): 157~159
- 13 翁大丽. 铸体薄片图像的计算机自动分析. 河南石油, 1994, 8(1): 46~50
- 14 王宝锋, 赵忠扬. 环境扫描电镜及其在石油技术中的应用. 油田化学, 1999, 16(3): 278~280
- 15 Enaud Gauchet, Pascal Cheneviere, Tricart J P. Visualization of rock samples in their natural state using environmental scanning electron microscope. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1993-10-03~06, Houston, Texas. SPE26620, 1993
- 16 罗宪波, 武海燕, 蒲万芬等. 原子力显微镜对二次交凝胶脱水脱水机理的研究. 西南石油学院学报, 2006,

- 28(1): 65~67
- 17 Fredrich J T. 3D imaging of porous media using laser scanning confocal microscopy with application to microscale transport processes. *Physics and Chemistry of the Earth. Part A: Solid Earth and Geodesy*, 1999, 24(7): 551~561
- 18 唐巨鹏, 潘一山, 李成全. 利用核磁共振成像技术研究煤层气渗流规律. *中国科学技术大学学报*, 2004, 34(增刊): 423~426
- 19 Dunsmuir J H, Ferguson S R, D'Amico K L, Stokes J P. X-Ray microtomography: a new tool for the characterization of porous media. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1991-10-06~09. Dallas, Texas. Spe22860, 1991
- 20 李玉彬, 李向良, 高岩. 用微焦点 X-CT 成像研究岩石微观特征. *油气采收率技术*, 2000, 7(4): 50~52
- 21 孙卫, 史成恩, 赵惊蛰. X-CT 扫描成像技术在特低渗透储层微孔孔隙结构及渗流机理研究中的应用. *地质学报*, 2006, 80(5): 775~778
- 22 Tomutsa L, Radmilovic V. Focused ion beam assisted three-dimensional rock imaging at submicron-scale. In: International Symposium of the Society of Core Analysts, SCA2003-47, 2003
- 23 Bryant S, Blunt M. Prediction of relative permeability in simple porous-media. *Physical Review*, 1992, A46(4): 2004~2011
- 24 Bakke S, Øren P E. 3-D pore-scale modeling of sandstones and flow simulations in the pore networks. *SPE Journal*, 1997, 2(2): 136~149
- 25 Pilotti M. Reconstruction of clastic porous media. *Transport in Porous Media*, 2000, 41(3): 359~364
- 26 Quiblier J A. A new three-dimensional modeling technique for studying porous-media. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1984, 98(1): 84~102
- 27 Adler P M, Jacquin C G, Thovert J F. The formation factor of reconstructed porous-media. *Water Resources Research*, 1992, 28(6): 1571~1576
- 28 Roberts A P, Torquato S. Chord-distribution functions of three-dimensional random media: approximate first-passage times of Gaussian processes. *Physical Review*, 1999, E59(5): 4953~4963
- 29 Manwart C, Torquato S, Hilfer R. Stochastic reconstruction of sandstones. *Physical Review*, 2000, E62(1): 893~899
- 30 Talukdar M S, Torsaeter O, Ioannidis M A. Stochastic reconstruction of particulate media from two-dimensional images. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2002, 248(2): 419~428
- 31 Okabe H, Blunt M J. Pore space reconstruction using multiple-point statistics. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2005, 46: 121~137
- 32 唐堂, 罗代升, 何小海等. 岩石样本孔隙和颗粒二维图像的三维重建研究. *计算机工程与应用*, 2005, 41(7): 227~229
- 33 Fatt. The network model of porous media I. capillary pressure characteristics. *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*, 1956, 207: 144~159
- 34 Fatt. The network model of porous media II. dynamic properties of a single size tube network. *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*, 1956, 207: 160~163
- 35 Fatt. The network model of porous media III. dynamic properties of networks with tube radius distribution. *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*, 1956, 207: 164~181
- 36 Chatzis I, Dullien F A L. Modelling pore structures by 2-D and 3-D networks with application to sandstones. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1977, 16: 97~108
- 37 Jerauld G R, Hatfield J C, Scriven L E, Davis H T. Percolation and conduction on voronoi and triangular networks—a case-study in topological disorder. *Journal of Physics C, Solid State Physics*, 1984, 17: 1519~1529
- 38 Jerauld G R, Salter S J. The effect of pore structure on hysteresis in relative permeability and capillary pressure: pore-level modeling. *Transport in Porous Media*, 1990, 5(2): 102~151
- 39 Hatiboglu C U, Babadagli T. Experimental and stochastic modeling of diffusion-controlled matrix-fracture transfer in naturally fractured reservoirs. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2005-10-09~12. October 2005, Dallas, Texas. SPE 95474, 2005
- 40 朱华银, 周娟, 万玉金等. 多孔介质中气水渗流的微观机理研究. *石油实验地质*, 2004, 26(6): 571~573
- 41 宋岩, 王毅等. 天然气运聚动力学与气藏形成. 北京: 石油工业出版社, 2002
- 42 刘孔章, 贾红育. 低渗透油藏残余水形成机理试验研究. *江汉石油学院学报*, 2006, 28(3): 114~116
- 43 冯文光. 非线性低速渗流的研究现状与进展. *石油勘探与开发*, 1986, 13(4): 76~80
- 44 Miller R J, Low P F. Threshold gradient for water flow in clay systems. *Soil Sci Soc Am Proc*, 1963, 27(6): 605~609
- 45 杨俊杰. 低渗透油气藏勘探开发技术. 北京: 石油工业出版社, 1993. 91~95
- 46 邓英尔, 谢和平, 黄润秋等. 低渗透微尺度孔隙气体渗流规律. *力学与实践*, 2005, 27(2): 33~35
- 47 薛定谔. 多孔介质中的渗流物理. 王鸿勋等译. 北京: 石油工业出版社, 1982
- 48 Klinkenberg L J. The permeability of porous media to liquid and gas. *API Drilling and Production Practice*, 1941, 3(2): 200~213
- 49 Ertekin T, King G R, Schwerer F C. Dynamic gas slippage: a unique dual-mechanism approach to the flow of gas in tight formations. *SPE Formation Evaluation*, 1986, 1(1): 43~52
- 50 Rangarajan R, Mazid M A, Matsuura T, Sourirajan S. Permeation of pure gases under pressure through asymmetric porous membranes membrane. *Characterization and Prediction of Performance Ind Eng Chem Process Des Dev*, 1984, 23: 79~87
- 51 Civan F. A triple-mechanism fractal model with hydraulic dispersion for gas permeation in tight reservoirs.

- In: SPE International Petroleum Conference and Exhibition in Mexico, 2002-02-10~12. Villahermosa, Mexico. SPE74368, 2002
- 52 朱光亚, 刘先贵, 杨正明等. 低渗气藏气体渗流特征机理研究. 见: 中国石油学会第一届油气田开发技术大会论文集——2005年中国油气田开发科技进展与难采储量开采技术研讨会, 2006
- 53 陈代珣, 王章瑞, 高家碧等. 气体滑脱现象的综合特征参数研究. 天然气工业, 2003, 23(4): 65~67
- 54 李道品. 低渗透油田高效开发决策论. 北京: 石油工业出版社, 2003
- 55 樊菁, 沈青. 微尺度气体流动. 力学进展, 2002, 32(3): 321~336
- 56 凌智勇, 丁建宁, 杨继昌. 微流动的研究现状及影响因素. 江苏大学学报(自然科学版), 2002, 23(6): 1~5
- 57 陈冰雁, 姚朝晖, 何枫等. 表面粗糙度对微细管内气体流动特性的影响. 应用力学学报, 2003, 20(3): 1~4

CHARACTERS OF MICRO-STRUCTURE AND PERCOLATION IN TIGHT SANDSTONE GAS RESERVOIRS*

YANG Jian^{1,†} KANG Yili¹ LI Qiangui^{1,2} ZHANG Hao¹

¹State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

²Postdoctoral Research Center, Southwest Branch, SIN OPEC, Chengdu 610081, China

Abstract With the dwindling of conventional gas reservoirs, people are paying attention to the exploration and exploitation of tight sandstone gas reservoirs. However, few studies were directed to the mechanism of high transfer fluid; the exploitation has been very limited. Tight sandstone gas reservoirs are characterized by extended spatial scales, including micro scale, natural fracture scale, and hydraulic fracture scale, and there will be multi-scale effects while gas is percolated through the tight sandstone. Gas transfer processes in the tight sandstone gas reservoirs consist of desorption, diffusion and percolation, including diffusion in the concentration field and percolation in the pressure field. The review of this paper discusses the special characters of tight sandstone gas reservoirs, the descriptions and methodology. The range of gas transfer in tight sandstone is classified on the basis of Knudsen number. It is concluded that some fine descriptive methods should be established to describe tight sandstone micro-structures and the study about tight sandstone gas transfer in the condition of multi-scales should be carried out.

Keywords tight sandstone, gas reservoir, micro-structure, percolation, Knudsen number

* The project supported by the PetroChina Company Limited and Young Science and Technology Fund Committee in Sichuan Province (07ZQ026-113, 02ZQ026-042)

† E-mail: y2000w@sina.com