

致密砂岩储层孔喉结构研究进展

刘广峰^{1,2*}, 王连鹤¹, 孙仲博¹, 王俊涛³, 姜帆¹

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)气体能源开发与利用教育部工程研究中心, 北京 102249

3 中国石油长庆油田公司油气工艺研究院, 西安 710018

* 通信作者, lgf@cup.edu.cn

收稿日期: 2021-03-26

国家自然科学基金项目“致密砂岩脆性控制机理与声发射评价方法研究”(51404282)和中国石油大学(北京)科研基金“气体能源开发与利用教育部工程研究中心”(ZX20200060)联合资助

摘要 产状、大小分布和连通性等微观孔喉结构决定了致密砂岩储层的物性和油气水渗流特征, 其定量和科学表征对储层评价和渗流机理研究具有重要意义。系统总结了图像型和反演型2类10种主要孔喉结构测试技术的原理、特点与适用性, 分析了致密砂岩孔喉大小、分形、连通性及网络结构等特征及其表征方法, 讨论了基于应力变化的动态孔喉结构特征、基于孔喉结构特征的提高采收率技术等2方面研究趋势。致密砂岩孔喉尺度跨度大且结构复杂, 需综合采用多种测试技术与表征方法以全面准确厘定孔喉结构特征; 随着开发过程中油气藏压力的降低, 孔喉结构发生动态的变化; 较大喉道及其连通的孔隙体积是决定储层渗流能力及开发效果的关键因素; 降低可动喉道半径是提高喉道波及效率、提升致密储层开发效率的重要途径。动态孔喉结构的表征方法及相应的渗流特征、降低可动喉道半径下限的方法尚需开展深入研究。

关键词 致密砂岩; 孔喉结构; 分析技术; 表征方法; 动态孔喉结构; 可动喉道半径

Research progress of pore-throat structure in tight sandstone formation

LIU Guangfeng^{1,2}, WANG Lianhe¹, SUN Zhongbo¹, WANG Juntao³, JIANG Fan¹

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 Engineering Research Center of Gas Resource Development and Utilization of Ministry of Education, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 Research Institute of Oil and Gas Technology, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

Abstract The physical properties and the seepage characteristics of oil, gas and water in tight sandstone reservoir are significantly determined by occurrence, size distribution and connectivity of pore-throat structure. In this paper, the principle, characteristics and applicability of image analysis technology and inversion analysis technology including 10 kinds of the main pore-throat structure analytical techniques were summarized; the characteristics and characterizing methods of pore-throat size, fractal, connectivity and network structure were analyzed; and the research tendency of dynamic pore-throat structure characteristics based on various stress and enhance oil recovery technology based on pore-throat structure characteristics was estimated. Due to the complexity of pore-throat size distribution and pore-throat structure of tight sandstone, a variety of testing techniques and characterization methods should be adopted to achieve the comprehensive and accurate determination of pore-throat structure. During the development, as a decrease of reservoir pressure, the pore-throat structure changes dynamically. Moreover, the

引用格式: 刘广峰, 王连鹤, 孙仲博, 王俊涛, 姜帆. 致密砂岩储层孔喉结构研究进展. 石油科学通报, 2022, 03: 406-419

LIU Guangfeng, WANG Lianhe, SUN Zhongbo, WANG Juntao, JIANG Fan. Research progress of pore-throat structure in tight sandstone formation. Petroleum Science Bulletin, 2022, 03: 406-419. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.03.035

seepage and development are determined by the large throats and pore volume connected by large throats. Decreasing the cutoff throat radius is an important way to improve the sweep efficiency of throat and the development efficiency of tight reservoir. The characterization method of dynamic pore-throat structure and its corresponding seepage characteristics as well as the method to decrease the cutoff throat radius still need to be further studied in the future.

Keywords tight sandstone formation; pore-throat structure; testing technique; characterization method; dynamic pore-throat structure; movable throat radius

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.03.035

0 引言

随着油气消费量的持续增加,致密砂岩储层的开发受到了越来越多的重视。致密砂岩基质的储渗空间包括孔隙和喉道两部分,以残余粒间孔、溶蚀孔等形式存在的孔隙是主要的储油气空间,贡献了岩石主要的孔隙度;喉道是孔隙间连通的渠道,决定了岩石的渗透率^[1-2]。孔隙与喉道的类型、大小分布、连通性等孔喉结构特征是影响储层储存和渗流能力的关键,直接决定着致密砂岩油气的渗流规律和开发效果^[3]。孔喉结构已逐渐成为致密砂岩储层研究的重点和热点,并在研究方法、成果认识等方面取得较大进展^[4-7]。

在大量文献调研的基础上,本文总结了适用于致密砂岩储层纳—微米级孔喉结构确定技术,阐述了不同技术的优缺点和适用条件,分析了当下主流的致密砂岩储层孔喉结构表征方法,探析了致密砂岩动态孔喉结构、降低可动喉道下限提高采收率两方面的发展趋势。本研究有助于全面了解致密砂岩孔喉结构的研究方法、成果及趋势,今后开展相关的研究可为致密砂岩储层评价、渗流机理、开发方式及提高采收率研究提供参考。

1 孔喉结构测试技术

致密砂岩储层孔隙与喉道识别技术及相应的特点列示于表1,根据原理可分为图像分析和数据反演2种类型。图像型技术是通过仪器设备对岩心截面进行图像采集,然后基于图像分析孔喉特征,主要包括铸体薄片、扫描电子显微镜、场发射扫描电镜、聚焦离子束扫描电镜和X-CT扫描等技术。反演型技术则通过间接手段来推导孔喉结构属性,主要包括高压压汞、恒速压汞、气体吸附/脱附和核磁共振等技术^[8-9]。多通过岩石样品的毛管压力、 T_2 弛豫时间等信息推演孔喉分布信息^[10-11]。图像与数据型技术的结合使用可以高精度、多尺度、多维度获取致密砂岩孔喉结构信息,为致密砂岩储层物性评价提供依据。

1.1 图像型技术

(1) 铸体薄片技术

岩石铸体薄片是将染色树脂或液态胶在真空下灌注到岩石的孔喉空间中,在一定的温度和压力下使树脂或液态胶固结,然后磨制成岩石薄片,并在偏光显微镜下观察孔隙及喉道特征。该技术的优点是孔喉空

表1 致密砂岩储层孔隙与喉道识别技术及特点^[12-15]

Table 1 Recognition technology and corresponding characteristics for pore and throat in tight sandstone formations^[12-15]

技术类型与方法	识别效果	识别精度	识别内容
图像型	铸体薄片	二维定性	孔喉大小、形态; 矿物种类
	扫描电子显微镜	二维定性	
	场发射扫描电镜	二维定性	
	聚焦离子束扫描电镜	三维定量	孔喉形态、连通性
	微米CT扫描	三维定量	
	纳米CT扫描	三维定量	
反演型	高压压汞技术	一维定量	孔喉体积、孔喉分布
	恒速压汞技术	一维定量	
	气体吸附/脱附技术	一维定量	
	核磁共振技术	一维定量	

间被染色的树脂或液态胶所灌注,能够方便直接地观察真实形貌及含量、类型及大小分布^[16]。但经过洗油和灌注,粒间一些细小松散的黏土杂基可能会运移,影响对部分孔隙喉道的认识,应结合其他测试技术,综合分析填隙物和孔隙喉道特征。

(2) 扫描电子显微镜技术

扫描电镜的原理是聚焦电子束在岩样表面逐点扫描时,会产生背散射电子、二次电子、X射线、俄歇电子和透射电子等反应信号,二次电子、背散射电子对试样表面形貌变化敏感,可作为显像管的调制信号,得到形貌衬度像^[17-18]。相比偏光显微镜,扫描电镜下的矿物具有图像立体、分辨率高和景深大等特点,不但可以对样品中微孔隙和喉道的立体形态、连通性、孔喉配置关系、黏土矿物类型及其赋存形态等进行分析,还可以通过调整样品的倾斜角度,获取一系列不同倾斜角度下岩石表面微观图像,再经图像处理技术获得岩石表面的三维立体图像。扫描前,需在岩石表面蒸镀金属膜,以防聚焦电子束产生的电流在岩石表面积累,产生的充电放电效应影响电子信号的传递,但蒸镀的金属导电膜会影响孔喉的形貌特征。

(3) 场发射扫描电镜技术

场发射扫描电镜成像原理与扫描电镜相似,具有分辨率更高的优势(分辨率在0.5 nm左右),同时兼备扫描电镜景深长和细节丰富等特点^[19],可以对纳米孔喉系统进行显微形貌表征,可以定性、定量测量微观区域内岩心的化学成分。该技术需用氩离子抛光技术对岩样进行预处理,以预防样品磨制过程中的次生孔隙对观察结果的影响。针对岩石等不导电样品,样品室可以采用低真空模式,低真空的气体在电子束作用下会产生电离,正离子最终与带负电的样品表面中和,在一定程度上缓解了充电放电效应。此外,还可以通过缩短每点扫描驻留时间以及混合一定比例的背散射电子像来避免荷电现象,从而无需对岩石样品蒸镀导电膜。

(4) 聚焦离子束扫描电镜技术

聚焦离子束扫描电镜技术耦合了聚焦离子束(FIB)和聚焦电子束(SEM),FIB是利用透镜将离子束聚焦成极小的尺寸,对岩石观测区进行高精度显微加工^[20]。真空系统中,在离子柱顶端加上激发电场和牵引电场以导出离子束,经静电透镜聚焦后通过限束孔,再用质量分析器筛选出所需离子种类,最后通过八极偏转装置及电磁透镜将离子束聚焦在样品上进行扫描轰击,产生的二次电子和离子被收集成像。相比只能提供二维图像的传统扫描电镜,FIB-SEM双束系统可实现对

纳米级微观孔喉系统进行3D重构和孔喉结构的可视立体化表征。

(5) X-CT扫描技术

X-CT扫描是指X射线电子计算机断层扫描,该技术利用X射线束与灵敏度极高的探测器一同围绕岩心作断面扫描,由探测器接收穿过岩心的衰减X射线信息,经计算得出该层面各点的X射线吸收系数值,不同的数据以不同的灰度等级显示,进而实现孔隙结构的重现^[21]。岩心CT扫描无需对岩心进行复杂的加工,保持了岩心的内部结构和外部形态,能够快速观测岩石孔喉分布、连通性以及孔隙度等物性参数。

由于图像型分析技术无法同时满足多尺度与高精度要求,若追求较高的精度与分辨率,所观测的岩石样品视域范围便十分有限,故图像型分析技术仍处于定性观察或简单测量的水平,定量表征误差较大。如何兼具高分辨率与大视域范围是致密砂岩孔喉结构图像型分析技术的发展方向。

1.2 反演型技术

(1) 高压压汞技术

高压压汞是将复杂的孔喉系统看作是一系列相互连通的圆柱型毛细管网络。当汞(非润湿相)注入多孔样品时,毛细管力成为进汞阻力,因此需要一个注入压力来克服毛细管力。目前,高压压汞最高注入压力可达414 MPa,可得到以进汞饱和度和毛管力为纵横坐标的进汞曲线,根据Washburn方程,每个进汞压力均对应一个相应大小的毛管阻力和喉道半径,而进汞量则表示喉道所连接的孔喉体积^[22-24]。同时,退汞毛管压力曲线可用于分析岩石表面润湿性、研究孔隙介质中的驱油机理和采收率等^[25]。但高压压汞受孔隙屏蔽作用,只能给出某一级别喉道所控制的孔喉体积,无法区分喉道与孔隙。

(2) 恒速压汞技术

与高压压汞中控制进汞压力不同,恒速压汞以恒定不变的极小速率向岩心中注入汞,监测毛管压力与进汞量。当汞从直径较大的孔隙中进入喉道时会憋压,毛管压力上升;当汞由喉道进入孔隙中,毛管压力则会突然降低。通过记录毛管压力与进汞体积得到波动信息,可区分孔隙与喉道。恒速压汞技术可直接提供孔隙半径分布、喉道半径分布、孔喉比分布等参数,为研究多孔介质孔喉结构特征提供丰富的信息^[26]。但是由于压力传感器的局限性,现有的恒速压汞仪最大进汞压力约为7 MPa,孔喉测试范围有限^[27]。

(3) 气体吸附/脱附技术

多孔介质对气体具有吸附性, 吸附量是温度、压力的函数。气体吸附/脱附技术通过控制温度监测吸附量与压力的关系反演多孔介质孔喉结构特征^[28]。气体吸附时首先在孔壁形成薄吸附层, 气体压力增大导致吸附层增厚, 局部形成凸镜状, 最终液相接触。脱附时, 从已形成的球形弯月面开始, 凝聚液全部气化, 脱附等温线垂直下降, 即孔发生凝聚时的相对压力比发生蒸发时的相对压力要大, 进而会形成吸附回线。根据吸附/脱附曲线可以将致密砂岩孔隙分为筒型孔、锥型孔、平板裂隙孔、墨水瓶型孔及狭缝孔等类型。针对致密砂岩储层, 基于吸附/脱附实验数据, 常通过BET方程可计算比表面积, 结合BJH理论可计算0.35~200 nm的孔喉分布。但由于气体吸附非均质性的影响, 通常认为氮气吸附技术在测量孔径超过100 nm孔喉时不够准确^[29]。

(4) 核磁共振技术

核磁共振原理是自旋的质子在恒定磁场下会产生能级分裂现象, 在射频磁场作用下处于低能级的会跃迁至高能级, 同时发生共振效应和聚相效应。撤去射频磁场后质子从共振聚相恢复到初始状态所需的时间叫弛豫时间。弛豫时间与岩心中所含流体孔隙的比表面及流体扩散有关, 通过测量质子的弛豫时间, 便可获得丰富的油层物理定量信息。在较小的致密孔喉体系中, 表面弛豫是主要的弛豫机制, 常忽略扩散弛豫的影响。然而在较大的孔隙中, 忽略扩散弛豫机制会造成一定的误差。此外, 核磁共振技术测量结果易受磁场环境、流体性质及岩心中顺磁物质等因素影响^[30]。

对于经历了复杂沉积成岩作用的致密砂岩储层, 孔喉呈多尺度发育, 由于不同测试技术主体测量范围有限, 单一测试技术难以精准测量包括微米级、亚微米级和纳米级全尺度孔喉分布, 可协同利用多种测试技术以实现优势互补。结合核磁共振伪毛管压力曲线和恒速压汞曲线对致密砂岩的完整孔喉结构进行研究, 伪毛管压力曲线所得到的孔喉分布减去毛管压力曲线所得的喉道分布, 可得全孔径的孔隙分布, 从而加深对致密砂岩储集层孔隙和喉道组合关系以及孔喉连通性的认识^[31]。

2 孔喉结构表征方法

通过对孔喉结构的定量评价和表征, 可以量化储层孔隙度、渗透率、饱和度等储层性质或相互关系。孔喉结构表征的主要内容包括孔隙与喉道大小的分布、

孔喉分形特征、孔喉网络结构及孔喉连通性。

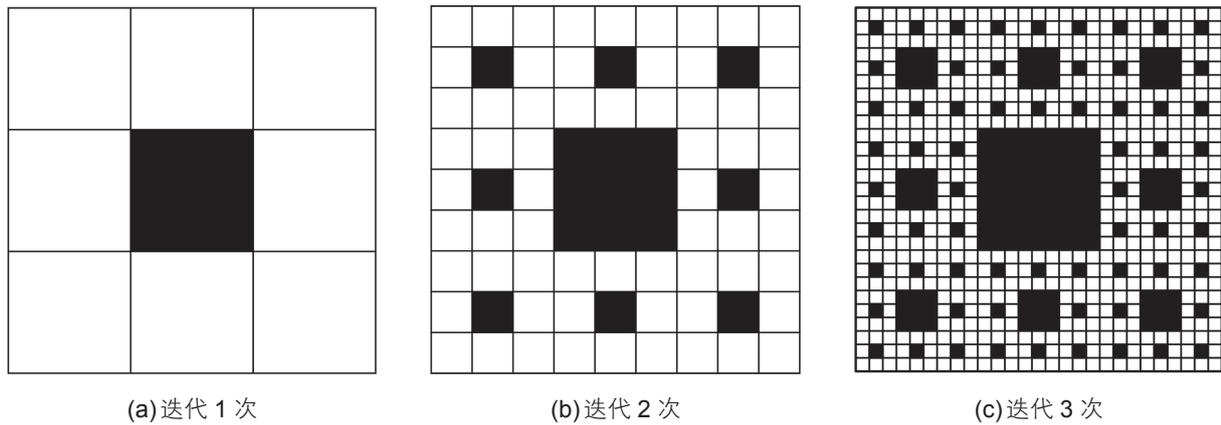
2.1 孔隙与喉道大小分布

孔隙与喉道大小分布对油气充注、成藏及开发有着重要的影响, 是决定油气水复杂赋存关系的重要因素, 是储量预测、产能评价的重要参考因素^[31-32]。孔隙大小分布表征为特定孔隙半径所贡献的孔隙体积含量与孔隙半径的关系曲线, 而喉道大小分布一般表示为特定喉道半径所连通的孔隙、喉道总体积与喉道半径的关系曲线^[33-34]。根据前述孔喉结构测试技术的特点, 孔喉大小分布需要综合不同的测试方法获得的结果进行协同表征^[35]。目前代表性的致密砂岩孔喉大小分布表征方法包括: ① 气体吸附/脱附曲线与毛管压力曲线协同表征, 基于BJH法修正的Kelvin方程和Washburn方程, 反演致密砂岩全孔径分布特征^[36]; ② 核磁共振曲线与高压压汞毛管压力曲线协同表征, 引入核磁共振横向弛豫时间与毛管压力的转换系数C, 得到核磁共振伪毛管压力曲线, 对比分析全尺度孔喉分布特征^[37]; ③ 核磁共振伪毛管压力曲线、毛管压力曲线及氮气吸附曲线协同表征, 利用低温氮气吸附曲线获取微孔、中孔分布, 利用高压压汞毛管压力曲线获取大孔分布, 根据核磁共振及离心实验数据对全尺寸孔喉半径分布数据进行校核和校正, 获取全孔径的孔喉分布^[38]。

2.2 孔喉结构分形表征

致密砂岩储层孔喉系统具有纳米级到微米级的多尺度分布特征。采用欧式空间理论以及拓扑学理论虽然大大简化了几何特征, 但失去了孔喉结构本质的自然属性。Mandelbrot创立的分形几何是对没有特征长度, 但具有自相似性的图形、构造及现象的总称, 可以利用分形维数来定量的描述孔喉结构的复杂性, 广泛应用于油气勘探开发以及油气资源评价领域^[39]。结合Washburn方程, 利用分形理论可研究致密砂岩储层油水相渗、致密油渗析特征^[40]; 基于X-CT扫描技术可分析各扫描断面分形维数, 定量研究2D、3D孔隙空间分形维数与致密砂岩物性参数之间的关系^[41]。

分形理论原理以典型Sierpinski地毯为例, 将边长为1的正方形等分为边长1/3的9个小正方形, 再去掉中心的1个小正方形, 保留剩下的8个小正方形, 重复迭代 n 次(图1), 这样就形成了一个分形几何图形。此时, 共形成了 8^n 个小正方形, 小正方形的边长为 $(1/3)^n$ 。具有分形特征的图形可表示为 $N(\lambda) = \lambda^{-D}$, λ

图1 自相似性Sierpinski分形图形^[45]Fig. 1 Self-similarity Sierpinski fractal graph^[45]

表示最小元素的尺度, $N(\lambda)$ 表示单位为 λ 的元素个数; D 为该图形的分维数。求对数可得 $D = \ln[N(\lambda)]/\ln(1/\lambda)$, 将Sierpinski分形图形的 $\lambda=(1/3)^n$ 、 $N(\lambda)=8^n$ 代入可得 $D=1.893$ 。图形的分形维数与图形的迭代次数 n 无关, 即分形体的形态、复杂程度及不规则性不会因其放大或缩小而发生变化。

分形体的分形特征由分形维数表征。岩石微观孔隙结构的分形维数是在2~3, 越接近于2, 说明孔隙结构越规则, 孔隙表面越光滑^[42]。目前, 针对岩石微观孔隙结构的分形分析主要有P-A(周长—面积)分形分析方法和N-S(数目—大小)分形分析方法。P-A模型即所谓的“岛弧模型”, 最早由Mandelbrot(1982)提出, 他将具有标度不变性的不规则二维变形几何体的周长与面积综合考虑, 适用于计算岩心二维复杂断面^[43]。N-S模型是利用覆盖法测量分维空间的最基本方法之一, 实现简单。利用不同尺度的盒子单元对孔隙空间进行拓扑填充, 则拓扑所用小方盒的数量与尺度之间存在幂函数关系, 利用该幂函数关系反应孔隙空间分形维数及分形特征。

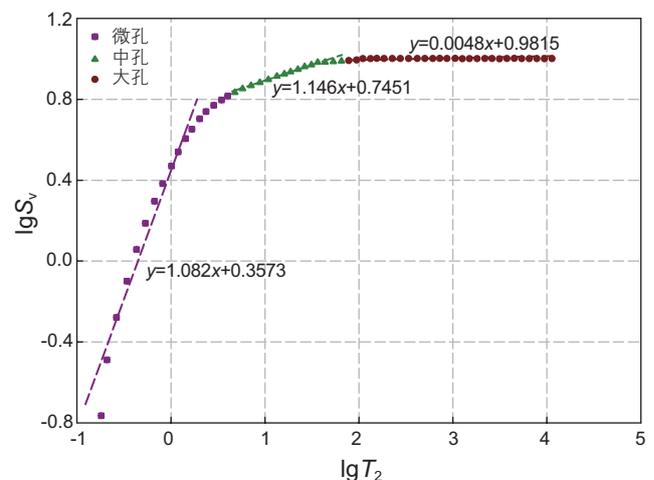
在对孔喉结构进行分形分析时, 孔喉半径为丈量尺度 λ , 该尺度可丈量的孔喉体积为 $N(\lambda)$, 则孔喉结构中孔径大于 λ 的孔隙数目 $N(\lambda)$ 与 λ 的关系为 $N(\lambda) = \int_{\lambda}^{\lambda_{\max}} P(\lambda) d\lambda = a\lambda^{-D}$, λ_{\max} 表示最大孔喉半径, a 为与形状相关的常数^[44](例如孔隙为立方体时, $a=1$; 孔隙为球体时, $a=4\pi/3$)。对于致密砂岩储层, 标度不变性往往只存在一定的标度范围内, 进而在不同的标度下呈现不同的分形维数。图2为利用核磁共振测得的鄂尔多斯盆地长7段致密砂岩油藏不同孔隙类型的分形维数特征曲线, T_2 与 S_v 分别代表横向弛豫时间和大于该横向弛豫时间的孔隙累计体积。由图可

知, 从微孔到大孔分形维数逐渐增大, 这表明随着孔隙尺寸从微孔到大孔, 孔隙结构变得更加复杂和不均匀^[42]。

2.3 孔喉网络结构表征

通过建立数字岩心并提取微观孔喉拓扑结构来近似描述岩心的孔喉网络结构, 为实现储层渗流仿真和模拟搭建了数字平台。孔喉网络结构表征主要包括数字岩心的构建和孔喉拓扑结构的提取2个方面。

(1)数字岩心构建。三维数字岩心技术是利用计算机图像处理技术, 将岩心微观结构以图像或数据的形式刻画出来。数字岩心建模方法可分为物理实验方法和数值重建方法2大类。物理实验方法是借助微米CT扫描和聚集离子束—扫描电镜等高精度实验仪器, 直接获取岩心不同截面的二维图像, 之后采用一定的

图2 鄂尔多斯盆地长7致密砂岩储层分形特征^[46]Fig. 2 Fractal characteristics of Chang 7 member in tight sandstone formation, Ordos Basin^[46]

数学方法对大量二维图像进行三维重建得到三维数字岩心。数值重建方法是借助岩心二维图像等少量资料,通过图像处理技术得到建模信息,之后采用重建算法建立三维数字岩心,包括随机模拟法(模拟退火方法、高斯随机场方法、顺序指示模拟法、多点地质统计方法、马尔科夫链蒙特卡罗方法)和过程法^[47]。

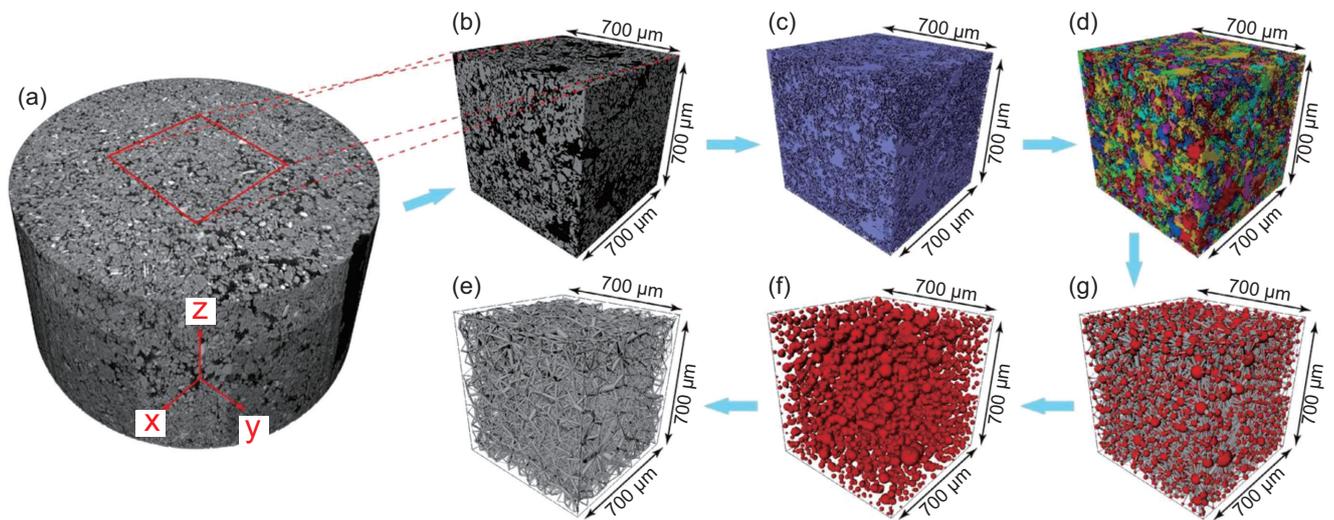
(2)孔喉拓扑结构提取。对孔喉网络结构的提取首先要对三维数字岩心进行阈值分割,再基于特定的算法将二值化数字图像进行处理,提取包含原始岩心孔隙分布特征以及拓扑结构的结构化孔喉网络模型,图3为提取流程示意图。孔喉拓扑结构的提取算法主要包括最大球算法和居中轴线法。①最大球算法:在三维数字岩心的孔隙空间的每个体素中找到最大内接球颗粒,周围可重叠相邻的较小球体,形成一个充满整个孔隙空间的最大球簇。其中把较大的球体定义主球体,半径较小的球体定义为仆球体。若1个球体属于2个最大球簇,这个公共的最大球则被认为是喉道。最大球算法可定量模拟计算孔隙半径、喉道半径、孔隙比、形状因子、配位数等孔隙结构参数。②居中轴线法:以几何拓扑学为基础,将孔隙空间中心位置体素相连接所形成的三维骨架。该算法无法描述孔隙空间的形状等几何特征,但可以反映孔隙的分布情况和连通状况、喉道长度及孔喉半径等信息,并且具有抗噪能力强、运行速度快的优点,产生的拓扑结构能较好代表岩心的延展性。

2.4 孔喉连通性表征

孔喉连通性是研究孔喉结构的重要部分,它是衡量其潜在渗透率和采收率的一项重要指标。目前,主要通过配位数、网络连通熵和比欧拉示性数来定量表征孔喉连通性。

配位数是指每个孔隙所连通的喉道个数,常用CT扫描技术、FIB-SEM等技术获取岩心的孔喉结构三维图像信息,根据灰度值范围的选取,基于储层岩心的孔隙度获取最佳阈值,通过Data Viewer等图像处理软件,对岩心孔隙配位数进行逐个统计。通过建立不同配位数的孔喉网络模型,并进行模拟流动实验。研究发现,毛管半径和孔隙度不变,渗流能力随配位数的增加而提高^[49]。然而,由于配位数只能有效地评估单个孔隙的连通能力,故只能在一定程度上反映连通性和渗流效果。

熵用来描述和研究自然界中广泛存在的运动形式转化的不可逆性,是系统混乱度的量度,被广泛应用于社会科学、控制理论、数论和概率论中^[50]。在石油地质学中,由于孔隙网络空间为无标度网络,各孔隙节点的配位数分布频率呈现幂律分布,故可利用网络连通熵 E 表征复杂孔隙网络空间的连通性与异质性^[51]。熵的计算方法为 $E = -\sum_{i=1}^N I_i \ln I_i$,其中, $I_i = d_i / \sum_{i=1}^N d_i$, i 为网络空间中任意一节点, N 为节点总数, d_i 为节点配位数。 $R = (\ln n - E) / \ln n$,为连通稳定熵,连通稳定熵的值在0至1之间, R 值越大,则空间的连通稳定



(a)三维数字岩心构建;(b)二值化阈值分割;(c)确定孔隙空间;(d)分水岭算法精确分割孔喉结构;(e)球棍模型提取;(f)(g)孔隙分布、喉道分布。

图3 致密砂岩孔喉网络提取流程示意图^[48]

Fig. 3 Extraction process of pore and throat network in tight sandstone formation^[48]

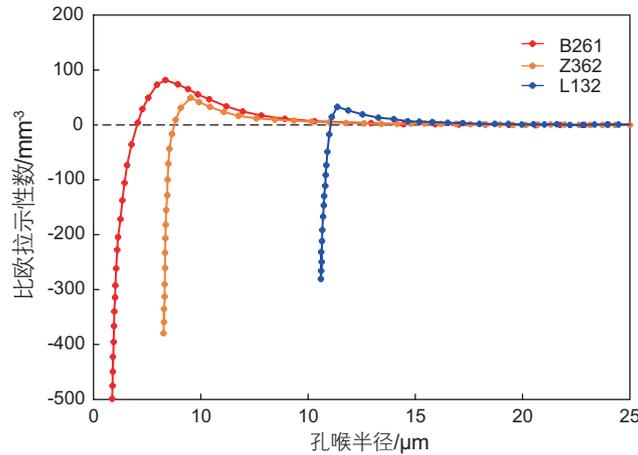


图4 鄂尔多斯盆地长7段致密砂岩储层比欧拉示性数曲线(改自文献[52-53])

Fig. 4 Specific Euler curves of Chang 7 member in tight sandstone formation, Ordos Basin (Revised from [52-53])

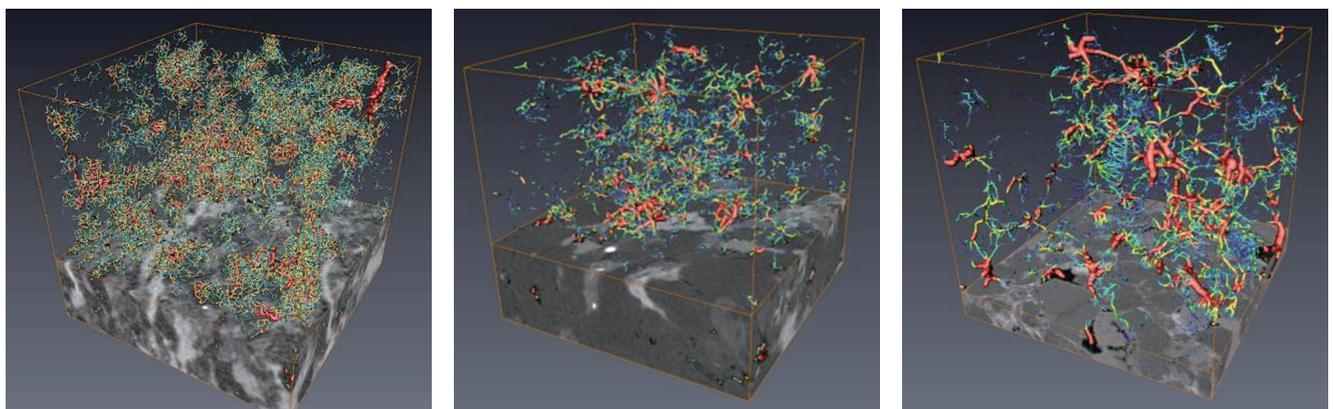
性越强。

在拓扑学中,比欧拉示性数可表征图形的连通性。利用图4所示简洁的比欧拉示性分布曲线,即可包含复杂二、三维复杂多孔介质的连通性信息。图4列示的三块岩心,比欧拉示性数随着孔喉半径的不断增大,达最高值后开始逐步下降,最终趋近于零。岩心B261、Z362、L132的比欧拉示性数变化范围变小,达到最高点后下降趋势变缓,说明随着孔喉半径的增大,岩心孔隙连通性变化逐步变小,微观孔喉结构非均质性变弱。B261号岩心比欧拉示性数变化范围大,达到最高点后下降很快,表明微观孔喉结构非均质性较强,物性较差^[42]。图5为三块样品经CT扫描后的三维孔喉拓扑结构,相比Z362号岩心,L132号岩心孔隙配位数整体偏低,孤立孔喉发育较多,连通性较差,但孔喉整体较为粗大,渗透率较高;B261号岩心配位数整体偏大、喉道数量较多,但整体孔喉较为细

小,且多发育簇状孤立孔喉,渗透率较低^[52]。整体来看,连通性分布曲线与三维孔喉拓扑结构图对应较好,连通性分布曲线峰值越高,岩石整体配位数越大,连通性越好;连通性分布曲线越靠右,临界比欧拉示性数越大,连通的孔喉半径越大。

3 研究展望

随着致密砂岩储层大规模开发的持续推进,孔喉结构对油气水渗流和油气藏开发效果的影响日益引起关注,并呈现出以下两方面的研究趋势:①基于油气藏开发过程中流体压力的持续降低,关注细小复杂孔喉系统的逐渐收缩,研究孔喉结构依赖流体压力的动态变化;②基于孔喉结构对致密储层渗流能力及油气动用的控制作用,关注可动喉道半径的变化规律,研究降低可动喉道下限的提高采收率方法。



(a) B261 岩心孔喉三维模型

(b) Z362 岩心孔喉三维模型

(c) L132 岩心孔喉三维模型

图5 鄂尔多斯盆地陕北地区长7段致密砂岩油储层孔喉网络模型^[53]

Fig. 5 Pore and throat network model of Chang 7 member in tight sandstone formation, Ordos Basin^[53]

3.1 孔喉结构的变化特征

致密砂岩孔喉结构的变化是伴随油气开发和孔喉系统压力降低的必然结果，势必显著影响流体渗流特征与储层开发效果。

渗透率应力敏感性的本质是孔喉结构的变化和喉道的形变，尤其是致密储层中的孔喉形变影响更为显著^[54-55]。2018年，提出了致密砂岩动态孔喉结构的概念，并通过实验手段评价了致密砂岩油气藏开发过程中孔喉结构的变化特征^[2,56]。图6a为苏东致密砂岩气藏不同有效应力下的喉道分布曲线，图6b为不同孔喉结构岩心在不同有效应力下的渗透率变化曲线。随着孔隙压力降低和有效应力增加，最大喉道半径减小到0.9420 μm，微喉道孔隙度占比由94.47%增加到96.51%，中喉道孔隙度降低0.84%，渗透率损失

89.29%；岩石渗透率初始损失较大，随后变化较为平缓；初始渗透率越低，随着有效应力的增加，渗透率损失越大^[57]。图6c、图6d分别为鄂尔多斯盆地长7致密油藏水驱前后的孔隙与喉道分布曲线，可以看出，驱替实验后孔隙尺寸分布几乎没有变化，但大喉道分布频率减少，而相应的小喉道分布频率有所增加，整体上喉道尺寸收缩^[2]。

目前，主要通过改变岩心围压进行渗透率敏感性实验来开展应力变化的影响研究。研究表明，骨架矿物、填隙物成分是影响应力敏感性的重要因素^[58]。对于致密砂岩岩石骨架，应力敏感性主要体现在骨架不同矿物成分的力学稳定性，石英和长石颗粒含量越大，力学性质越稳定，应力敏感性越弱；随着岩屑含量(尤其是片岩、千枚岩和板岩等变质岩屑含量)的增加，力学稳定性变差，应力敏感性增强。对

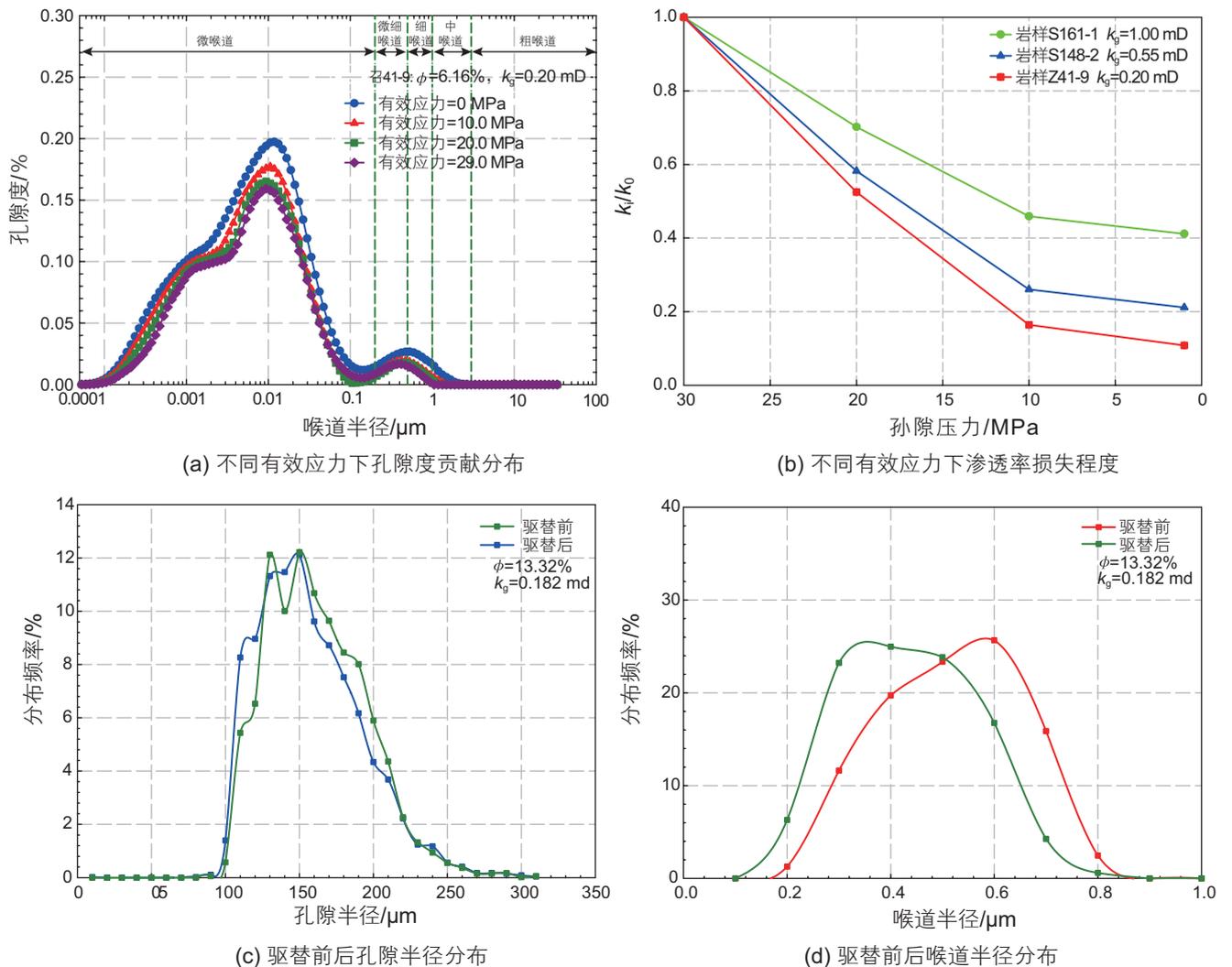


图6 孔喉结构变化特征及对物性的影响^[2,56]

Fig. 6 The variation characteristics of pore-throat structure and its influence on reservoir properties^[2,56]

于填隙物,其组合类型及产状是影响应力敏感性的重要因素。相比伊利石,高岭石及硅质含量越高,应力敏感性越弱。绿泥石会以衬边状或包壳状垂直于壁面发育,增强力学稳定性,应力敏感性较弱^[59]。

后续的研究,应着重于孔喉系统微观变化的定量表征。可在继续完善开发过程中致密砂岩储层孔喉结构动态变化机制的基础上,模拟不同矿物及粒度组成的岩石骨架在应力变化下的微观形变规律。其中,岩石矿物、粒度及骨架拓扑结构可以利用微—纳米CT扫描及数字岩心技术识别并构建;致密岩心骨架微形变模式及规律可以通过开展相应的微观力学性质、岩石宏观力学性质分析实验及弹塑性形变理论实现;最后,结合有限单元法,在获取三维岩石骨架系统的基础上,建立岩石骨架微形变数值模型,模拟岩石骨架在应力变化下的应力场及位移场等,以获取三维孔喉结构变化特征^[60-62]。在耦合渗流方面,可基于建立的动态数字孔喉系统,结合格子玻尔兹曼SC-LBGK模型中的D3Q19网格结构,基于流体平衡态矢量分布数值模型函数、离散速度和权重系数值配置,开展流动仿真模拟,建立依赖孔喉系统流体压力变化流固耦合模型^[63]。进而,形成系统化的四维三相渗流数值模型,为动态孔喉结构及相应渗流理论研究奠定理论基础,对于完善致密砂岩储层的评价与开发理论将有重要意义。

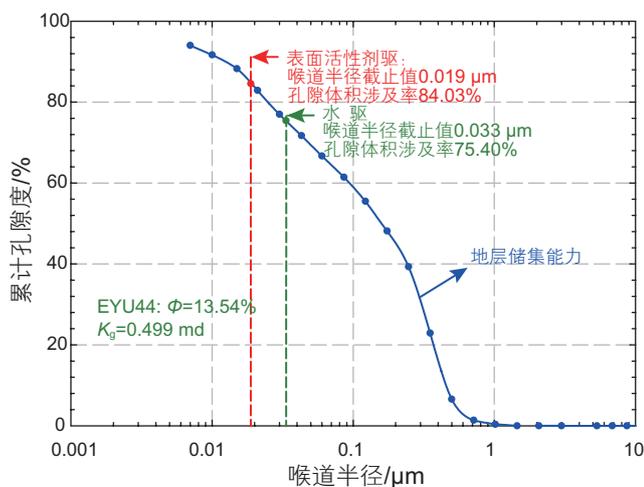
3.2 降低可动喉道半径的提高采收率方法

致密砂岩储层开发的难点在于细小喉道及其所连通的孔隙难以有效动用,降低可动喉道半径是致密

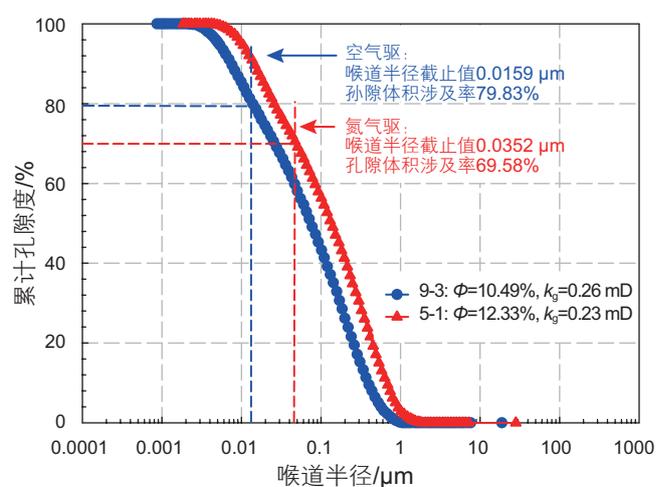
油气提高采收率的必经之路。可动喉道半径定义为在以水、表面活性剂、泡沫、CO₂、空气等为驱替介质的条件下,流体能够克服毛管力流动的最小喉道半径^[64]。在致密砂岩储层复杂细小的孔喉系统中,可通过降低流体的界面张力或润湿性调节降低可动喉道半径。

图7a对比了鄂尔多斯盆地长7层由水驱转变为表面活性剂驱时,原油与驱替剂间的界面张力由29.4 mN/m降低为 5.56×10^{-2} mN/m,可动喉道半径相应由33.0 nm降为19.0 nm,连通的孔隙体积由75.40%上升为84.03%,具有较好的提高采收率潜力。相似的,相对于氮气驱,由于空气中的氧与原油发生氧化反应导致的油气间界面张力的下降,可动喉道半径相应由35.2 nm降为15.9 nm,连通的孔隙体积由69.58%上升为79.83%(图7b)。同时,致密气藏中,防水锁剂的注入也是通过降低气水界面张力和毛管力,缓解气井井筒周围严重的水锁现象。

图8为鄂尔多斯盆地延长组某段致密砂岩渗吸效果曲线。图8a、b为不同界面张力下自发渗吸及动态渗吸对渗吸采收率的影响。对于自发渗吸,随着界面张力的增大,采收率先增加再减小,当界面张力为8.45 mN/m时,渗吸采收率达到37.89%的最高值,提高了10.8%;对于动态渗吸,界面张力对大孔隙采收率影响显著,在2.25 mN/m时采收率达到27.83%的最大值。从不同类型渗吸作用对采油效果影响 T_2 分布图(图8c)可以看出,自发渗吸对微孔的换油效果较好,动态渗吸及表面活性剂主要影响中孔和大孔的采收率。实验表明,在自发渗吸和动态渗吸的综合作用



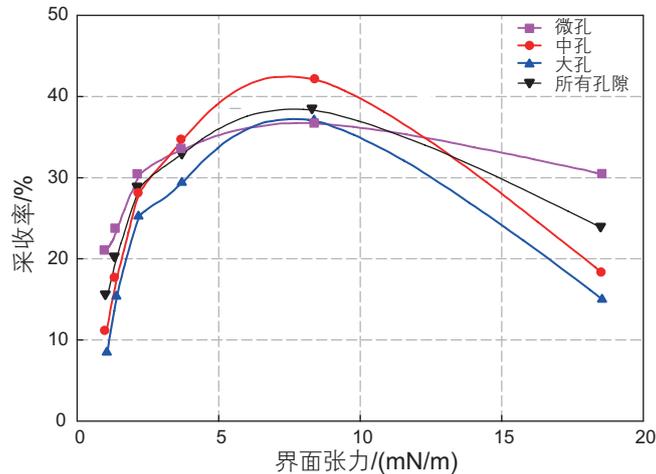
(a) 表面活性剂及水驱作用下可动喉道半径



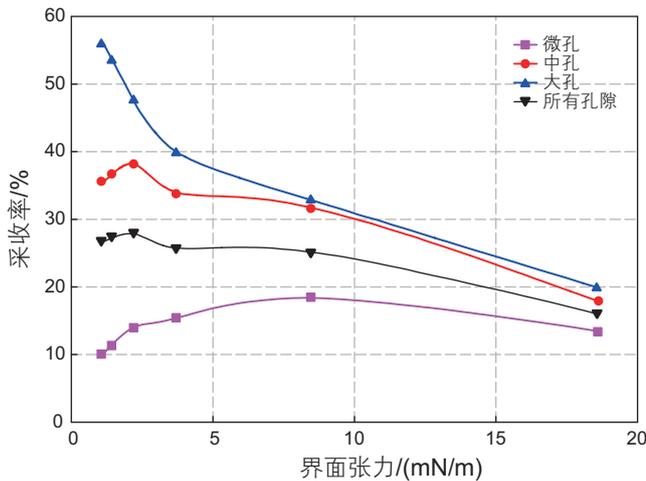
(b) 空气及氮气驱作用下可动喉道半径

图7 不同驱替介质下喉道半径动用下限^[56,65]

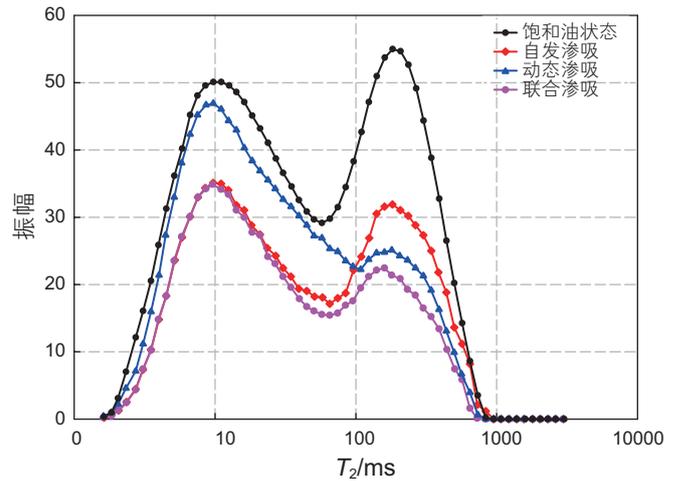
Fig. 7 The cutoff values of movable throat radius with different displacement agents^[56,65]



(a) 界面张力对自发渗吸的影响



(b) 界面张力对动态渗吸的影响

(c) 渗吸作用 T_2 分布图图 8 致密砂岩渗吸作用对采收率的影响^[67]Fig. 8 Influence of imbibition on recovery in tight sandstone cores^[67]

下, 实验采收率可达到 47.18%。

目前, 在实验室条件下, 采用水驱、表面活性剂驱、氮气驱、空气驱及渗吸作用等手段已将致密砂岩油储层岩心尺度的采收率提高到 50% 左右。然而, 现场实验效果并不理想, 采收率仅为 2%~8%^[66]。今后工作重点一方面继续开展致密油藏提高采收率基础科学研究, 深化边界层相关的参数如范德华力、静电力、空间位形力以及与流体相关的表面张力、黏性力等相关的诸多微观作用力对边界层的影响机制研究; 另一方面, 需将实验室内研究成果推广到实际油藏中, 提升驱替介质在储层中的扩散、对流及储层改造的工艺技术研究, 形成完善的提高采收率设计方案。

4 结论

(1) 致密砂岩储层孔喉结构主要有图像型和反演型

2 类 10 余种识别技术, 具有不同的识别效果。图像型技术可以通过二、三维图像对致密砂岩孔喉结构进行精细刻画, 未来需解决高分辨率与视域范围受限的矛盾; 反演型技术可以通过间接数值测定对致密砂岩孔喉结构进行定量分析, 应注重协同利用多种测试技术实现全尺度孔隙及喉道定量表征。

(2) 致密砂岩储层孔喉结构特征主要包括孔喉大小分布、孔喉拓扑网络结构、孔喉结构分形特征和连通性。目前常采用高压与恒速压汞、核磁共振等实验手段确定孔喉的大小分布, 通过微纳米 CT 扫描、聚集离子束—扫描电镜等手段结合最大球算法和居中轴线法提取孔喉网络结构; 分形维数主要采用 P-A 模型和 N-S 模型将微观孔喉结构与宏观岩石物性参数联系起来, 能有效表征孔喉结构的复杂程度和非均质性; 连通性通常表征为配位数、嫡及比欧拉示性数。

(3) 随着致密砂岩储层开发过程中孔隙压力降低,

孔喉结构变化表现为较强的应力敏感性。现已通过测试动态孔隙度、动态渗透率及动态变化的 T_2 谱,初步定量表征了孔喉结构的动态变化规律。由于不同矿物及粒度组成的岩石骨架力学稳定性不同,未来可结合X-CT测试技术、有限元等方法建立孔喉结构动态特征的数值模型。

(4)致密砂岩储层大量存在的小喉道及其所连通的

孔隙难以动用是提高致密储层采收率的瓶颈。现已基于调节流体界面张力、改善润湿性及提高流度等原理开展了表面活性剂驱、 CO_2 驱、空气驱及渗吸作用等室内研究,有效降低了可动喉道半径下限。今后重点加强室内理论研究成果的技术性转化与现场试验,实现致密储层实际开发过程中的可动喉道半径的降低。

参考文献

- [1] TIAN X, CHENG L, CAO R, et al. A new approach to calculate permeability stress sensitivity in tight sandstone oil reservoirs considering micro-pore-throat structure[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 133: 576–588.
- [2] LIU G, BAI Y, GU D, et al. Determination of static and dynamic characteristics of microscopic pore-throat structure in a tight oil-bearing sandstone formation[J]. *AAPG Bulletin*, 2018, 102(9): 1867–1892.
- [3] 代全齐, 罗群, 张晨, 等. 基于核磁共振新参数的致密油砂岩储层孔隙结构特征——以鄂尔多斯盆地延长组7段为例[J]. *石油学报*, 2016, 37(7): 887–897. [DAI Q Q, LUO Q, ZHANG C, et al. Pore structure characteristics of tight-oil sandstone reservoir based on a new parameter measured by NMR experiment: a case study of seventh Member in Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2016, 37(7): 887–897.]
- [4] LAI J, WANG G, WANG Z, et al. A review on pore structure characterization in tight sandstones[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 177: 436–457.
- [5] GAO H, LI H A. Pore structure characterization, permeability evaluation and enhanced gas recovery techniques of tight gas sandstones[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 28: 536–547.
- [6] 陈杰, 周改英, 赵喜亮, 等. 储层岩石孔隙结构特征研究方法综述[J]. *特种油气藏*, 2005, 12(4): 11–14+103. [CHEN J, ZHOU G Y, ZHAO X L, et al. Overview of study methods of reservoir rock pore structure[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2005, 12(4): 11–14+103.]
- [7] 郝乐伟, 王琪, 唐俊. 储层岩石微观孔隙结构研究方法理论与综述[J]. *岩性油气藏*, 2013, 25(5): 123–128. [HAO L W, WANG Q, TANG J. Research progress of reservoir microscopic pore structure[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2013, 25(5): 123–128.]
- [8] WU H, ZHANG C, JI Y, et al. Pore throat characteristics of tight sandstone of Yanchang Formation in eastern Gansu, Ordos Basin[J]. *Petroleum Research*, 2018, 3(1): 33–43.
- [9] 罗顺社, 魏炜, 魏新善, 等. 致密砂岩储层微观结构表征及发展趋势[J]. *石油天然气学报*, 2013, 35(9): 5–10+1. [LUO S S, WEI W, WEI X S, et al. Microstructural characterization and development trend of tight sandstone reservoirs[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2013, 35(9): 5–10+1.]
- [10] 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 H B, ZHU J Y, GUO H K. Methods for calculating pore radius distribution in rock from NMR T_2 spectra[J]. *Chinese Journal of Magnetic Resonance*, 2008, 25(2): 273–280.]
- [11] 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. [WANG R F, CHEN M Q, SUN W. The research of micro-pore structure in super-low permeability sandstone reservoir of the Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Geological Review*, 2008, 54(2): 270–277.]
- [12] 白斌, 朱如凯, 吴松涛, 等. 非常规油气致密储层微观孔喉结构表征新技术及意义[J]. *中国石油勘探*, 2014, 19(3): 78–86. [BAI B, ZHU R K, WU S T, et al. New micro-throat structural characterization techniques for unconventional tight hydrocarbon reservoir[J]. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(3): 78–86.]
- [13] YU S, BO J, MING L, et al. A review on pore-fractures in tectonically deformed coals[J]. *Fuel*, 2020, 278: 118248.
- [14] 尤源, 牛小兵, 冯胜斌, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7致密油储层微观孔隙特征研究[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(6): 18–23. [YOU Y, NIU X B, FENG S B, et al. Study of pore features in Chang7 tight oil reservoir, Yanchang layer, Ordos Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014, 38(6): 18–23.]
- [15] 邹才能, 杨智, 朱如凯, 等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. *地质学报*, 2015, 89(6): 979–1007. [ZOU C N, YANG Z, ZHU R K, et al. Progress in China's unconventional oil & gas exploration and development and theoretical technologies[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(6): 979–1007.]
- [16] 赵明, 郭志强, 卿华, 等. 岩石铸体薄片鉴定与显微图像分析技术的应用[J]. *西部探矿工程* 2009, 21(3): 66–68. [ZHAO M, GUO Z Q, QING H, et al. Application of rock casting thin section identification and microscopic image analysis technology[J]. *West-China*

- Exploration Engineering, 2009, 21(3): 66–68.]
- [17] 于亮, 朱亚林, 闫昭圣, 等. 环境扫描电镜在石油地质研究中的应用[J]. 电子显微学报, 2016, 35(6): 561–566. [YU L, ZHU Y L, YAN Z S, et al. The application of ESEM to the study of the oil geology[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2016, 35(6): 561–566.]
- [18] 吴立新, 陈方玉. 现代扫描电镜的发展及其在材料科学中的应用[J]. 武钢技术, 2005, 43(6): 36–40. [WU L X, CHEN F Y. Development of modern SEM and its application in material science[J]. Electrical Steel, 2005, 43(6): 36–40.]
- [19] 李香庭, 曾毅, 钱伟君, 等. 扫描电镜的试样制备方法及应用[J]. 电子显微学报, 2004, 23(4): 514. [LI X T, ZENG Y, QIAN W J, et al. Sample preparation method and application for scanning electron microscopy[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2004, 23(4): 514.]
- [20] GERKE K M, KOROSTILEV E V, ROMANENKO K A, et al. Going submicron in the precise analysis of soil structure: A FIB-SEM imaging study at nanoscale[J]. Geoderma, 2021, 383: 114739.
- [21] CAO Q, GONG Y, FAN T, et al. Pore-scale simulations of gas storage in tight sandstone reservoirs for a sequence of increasing injection pressure based on micro-CT[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, 64: 15–27.
- [22] 陈悦, 李东旭. 压汞法测定材料孔结构的误差分析[J]. 硅酸盐通报, 2006, 25(4): 198–201+207. [CHEN Y, LI D X. Analysis of error for pore structure of porous materials measured by MIP[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2006, 25(4): 198–201+207.]
- [23] 杨正明, 赵新礼, 熊生春, 等. 致密油储层孔喉微观结构表征技术研究进展[J]. 科技导报, 2019, 37(5): 89–98. [YANG Z M, ZHAO X L, XIONG C S, et al. Research progress on microstructure characterization of pore throat for tight oil reservoirs[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(5): 89–98.]
- [24] 靳继阳, 薛海涛, 田善思, 等. 界面张力与润湿角校正对高压压汞法计算泥页岩孔径分布的影响——以松辽盆地青山口组为例[J]. 现代地质, 2018, 32(1): 191–197. [JIN J Y, XUE H T, TIAN S S, et al. Influence of correction of interfacial tension and wetting angle to the pore size distribution of shale by means of high pressure mercury porosity: A case study of Qingshankou formation in Songliao Basin[J]. Geoscience, 2018, 32(1): 191–197.]
- [25] 朱晴, 乔向阳, 张磊. 高压压汞在致密气藏孔喉分布表征和早期产能评价中的应用[J]. 岩矿测试, 2020, 39(3): 373–383. [ZHU Q, QIAO X Y, ZHANG L. Application of high-pressure mercury injection in pore-throat distribution characterization and early productivity evaluation of tight gas reservoirs[J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(3): 373–383.]
- [26] 何顺利, 焦春艳, 王建国, 等. 恒速压汞与常规压汞的异同[J]. 断块油气田, 2011, 18(2): 235–237. [HE S L, JIAO C Y, WANG J G, et al. Discussion on the differences between constant-speed mercury injection and conventional mercury injection techniques[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(2): 235–237.]
- [27] 于俊波, 郭殿军, 王新强. 基于恒速压汞技术的低渗透储层物性特征[J]. 大庆石油学院学报, 2006(2): 22–25. [YU J B, GUO D J, WANG X Q. Study of microscopic behaviors of low permeable reservoir through constant velocity mercury injection technique[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2006(2): 22–25.]
- [28] JOHNSON M F L. The determination of pore volumes and pore volume distributions[J]. Journal of Catalysis, 1988, 110(2): 419–422.
- [29] 杨正红, THOMMES M. 气体吸附法进行孔径分析进展——密度函数理论(DFT)及蒙特卡洛法(MC)的应用[C]. 2005年上海市颗粒学会年会论文集, 2005: 9–15. [YANG Z H, THOMMES M. Progress in pore size analysis by gas adsorption-application of density function theory (DFT) and monte carlo method (MC)[C]. Proceedings of the 2005 Annual Meeting of Shanghai Granule Society, 2005: 9–15.]
- [30] LIU Z, LIU D, CAI Y, et al. Application of nuclear magnetic resonance (NMR) in coalbed methane and shale reservoirs: A review[J]. International Journal of Coal Geology, 2020, 218: 103261.
- [31] 汪贺, 师永民, 徐大卫, 等. 非常规储层孔隙结构表征技术及进展[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(5): 21–30. [WANG H, SHI Y M, XU D W, et al. Unconventional reservoir pore structure characterization techniques and progress[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(5): 21–30.]
- [32] 张晓辉, 张娟, 袁京素, 等. 鄂尔多斯盆地南梁——华池地区长81致密储层微观孔喉结构及其对渗流的影响[J]. 岩性油气藏, 2020, 33(2): 1–13. [ZHANG X H, ZHANG J, YUAN J S, et al. Micro pore throat structure and its influence on seepage of Chang81 tight reservoir in Nanliang-Huachi area, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 33(2): 1–13.]
- [33] XIAO Q, YANG Z, WANG Z, et al. A full-scale characterization method and application for pore-throat radius distribution in tight oil reservoirs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 187: 106857.
- [34] NELSON P H. Pore-throat sizes in sandstones, tight sandstones, and shales[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(3): 329–340.
- [35] ZHANG F, JIANG Z X, SUN W, et al. A multiscale comprehensive study on pore structure of tight sandstone reservoir realized by nuclear magnetic resonance, high pressure mercury injection and constant-rate mercury injection penetration test[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 109: 208–222.
- [36] ZHAO X, YANG Z, LIN W, et al. Study on pore structures of tight sandstone reservoirs based on nitrogen adsorption, high-pressure mercury intrusion, and rate-controlled mercury intrusion[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2019, 141(11): 112903.

- [37] 公言杰, 柳少波, 赵孟军, 等. 核磁共振与高压压汞实验联合表征致密油储层微观孔喉分布特征[J]. 石油实验地质, 2016, 38(3): 389–394. [GONG Y J, LIU S B, ZHAO M J, et al. Characterization of micro pore throat radius distribution in tight oil reservoirs by NMR and high pressure mercury injection[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(3): 389–394.]
- [38] 肖佃师, 卢双舫, 陆正元, 等. 联合核磁共振和恒速压汞方法测定致密砂岩孔喉结构[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6): 961–970. [XIAO D S, LU S F, LU Z Y, et al. Combining nuclear magnetic resonance and rate-controlled porosimetry to probe the pore-throat structure of tight sandstones[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(6): 961–970.]
- [39] 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 C, SUN Y M. Fractional dimension of the pore-texture in sandstones and its application[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14(4): 108–113.]
- [40] 王建夫, 王秀宇, 董万青, 等. 致密砂岩毛管力曲线计算相渗的分形维数方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(5): 164–168. [WANG J F, WANG X Y, DONG W Q, et al. Calculating method of the fractal dimensions of the relative permeability by the capillary pressure curve of the tight sandstone[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(5): 164–168.]
- [41] WU Y, TAHMASEBI P, LIN C, et al. A comprehensive study on geometric, topological and fractal characterizations of pore systems in low-permeability reservoirs based on SEM, MICP, NMR, and X-ray CT experiments[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 103: 12–28.
- [42] 桑宇, 孙卫, 赵煜, 等. 基于分形理论对马岭油田北三区延10储层微观孔隙结构特征研究[J]. 石油化工应用, 2016(9): 97–102+112. [SANG Y, SUN W, ZHAO Y, et al. Research on characteristics of micro-pore structure of Yan 10 reservoir in northern Maling oilfield based on fractal theory[J]. Petrochemical Industry Application, 2016(9): 97–102+112.]
- [43] HALSEY T C, JENSEN M H, KADANOFF L P, et al. Fractal measures and their singularities: The characterization of strange sets[J]. Nuclear Physics B – Proceedings Supplements, 1987, 2: 501–511.
- [44] 张超谟, 陈振标, 张占松, 等. 基于核磁共振T2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+166–167. [ZHANG C M, CHEN Z B, ZHANG Z S, et al. Fractal characteristics of reservoir rock pore structure based on NMR T2 distribution[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(4): 80–86+166–167.]
- [45] JIN Y, WU Y, LI H, et al. Definition of fractal topography to essential understanding of scale-invariance[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 46672.
- [46] 刘广峰. 致密砂岩油藏非水驱开发方式实验研究[R]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017: 24–30. [LIU G F. Experimental study on non-water flooding development method of tight sandstone reservoir[R]. Beijing: China University of Petroleum-Beijing, 2017: 24–30.]
- [47] 林承焰, 吴玉其, 任丽华, 等. 数字岩心建模方法研究现状及展望[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(2): 679–689. [LIN C Y, WU Y Q, REN L H, et al. Review of digital core modeling methods[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(2): 679–689.]
- [48] WEI T, FAN W, YUAN W, et al. Three-dimensional pore network characterization of loess and paleosol stratigraphy from South Jingyang Plateau, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(11): 1–15.
- [49] AN S, YAO J, YANG Y, et al. Influence of pore structure parameters on flow characteristics based on a digital rock and the pore network model[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 31: 156–163.
- [50] 谢世标. 浅论熵及其应用[J]. 广西民族学院学报(自然科学版), 2004, 10(4): 75–77. [XIE S B. Principle and Application of the Entropy[J]. Journal of Guangxi Minzu University (Natural Science Edition), 2004, 10(4): 75–77.]
- [51] 赵斌, 尚彦军. 基于复杂网络理论的页岩纳米孔隙连通性表征[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 504–509. [ZHAO B, SHANG Y J. Characterizing connectivity of nano-sized pores of shale based on complex network theory[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2): 504–509.]
- [52] 徐永强, 何永宏, 陈小东, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长7致密储层微观孔喉特征及其对物性的影响[J]. 地质与勘探, 2019, 55(3): 870–881. [XU Y Q, HE Y H, CHEN X D, et al. Characteristics of microscopic pore throats and their influence on physical properties of the Chang7 tight reservoir in the Longdong area, Ordos Basin[J]. Geology and Exploration, 2019, 55(3): 870–881.]
- [53] 徐永强. 鄂尔多斯盆地陇东地区长7致密砂岩储层微观孔喉特征及分类评价研究[D]. 西安: 西北大学, 2019. [XU Y Q. Research on characteristics of microscopic pore throat and classified evaluation of Chang7 tight sandstone reservoir in Longdong area, Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2019.]
- [54] LIU G, LI S, GU D, et al. Experimental study of petrophysical properties of a tight formation by considering the clay minerals and flow sensitivities[J]. Earth Sciences Research Journal, 2016, 20(2): 1–6.
- [55] GAO H, CAO J, WANG C, et al. Comprehensive characterization of pore and throat system for tight sandstone reservoirs and associated permeability determination method using SEM, rate-controlled mercury and high pressure mercury[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 174: 514–524.
- [56] LIU G, YIN H, LAN Y, et al. Experimental determination of dynamic pore-throat structure characteristics in a tight gas sandstone formation with consideration of effective stress[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 113: 104170.
- [57] 齐亚东, 战剑飞, 李晓明, 等. 特低渗透砂岩储层应力敏感性实验[J]. 科技导报, 2012, 30(3): 49–52. [QI Y D, ZHAN J F, LI X M, et al. Experiments on the stress sensitivity of ultra-low permeability sandstone reservoirs[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(3):

- 49–52.]
- [58] ZHONG X, ZHU Y, LIU L, et al. The characteristics and influencing factors of permeability stress sensitivity of tight sandstone reservoirs[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 191: 107221.
- [59] 杨孝, 冯胜斌, 王炯, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7段致密油储层应力敏感性及其影响因素[J]. *中国石油勘探*, 2017, 22(5): 64–71. [YANG X, FENG S B, WANG J, et al. Stress sensitivity and its influence factors of tight oil reservoir in Chang 7 Member, Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(5): 64–71.]
- [60] 朱伟, 赵蛮啸, 王晨晨, 等. 基于数字岩心动态应力应变模拟的非均匀孔隙介质波致流固相对运动刻画[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(6): 2386–2399. [ZHU W, ZHAO L X, WANG C C, et al. Characterization of wave-induced pore fluid flow based on dynamic stress strain simulation on digital rocks[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(6): 2386–2399.]
- [61] 赵建国, 潘建国, 胡洋铭, 等. 基于数字岩心的碳酸盐岩孔隙结构对弹性性质的影响研究(上篇): 图像处理与弹性模拟[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(2): 656–669. [ZHAO J G, PAN J G, HU Y M, et al. Digital rock physics-based studies on effect of pore types on elastic properties of carbonate reservoir Part 1: Imaging processing and elastic modelling[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(2): 656–669.]
- [62] 赵建国, 潘建国, 胡洋铭, 等. 基于数字岩心的碳酸盐岩孔隙结构对弹性性质的影响研究(下篇): 储层孔隙结构因子表征与反演[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(2): 670–683. [ZHAO J G, PAN J G, HU Y M, et al. Digital rock physics-based studies on effect of pore types on elastic properties of carbonate reservoir Part 2: Pore structure factor characterization and inversion of reservoir[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(2): 670–683.]
- [63] HOU P, LIANG X, GAO F, et al. Quantitative visualization and characteristics of gas flow in 3D pore-fracture system of tight rock based on Lattice Boltzmann simulation[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 89: 103867.
- [64] 张洪, 张水昌, 柳少波, 等. 致密油充注孔喉下限的理论探讨及实例分析[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(3): 367–374. [ZHANG H, ZHANG S C, LIU S B, et al. A theoretical discussion and case study on the oil-charging throat threshold for tight reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(3): 367–374.]
- [65] LIU G, ZHANG T, XIE Q, et al. Experimental evaluation of live oil oxidation together with its physical properties during air injection in a tight oil reservoir[J]. *Fuel*, 2021, 283: 119121.
- [66] 魏兵, 刘江, 张翔, 等. 致密油藏提高采收率方法与理论研究进展[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(1): 91–102. [WEI B, LIU J, ZHANG X, et al. Advances of Enhanced Oil Recovery Method and Theory in Tight Reservoirs[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2021, 43(1): 91–102.]
- [67] DOU L, XIAO Y, GAO H, et al. The study of enhanced displacement efficiency in tight sandstone from the combination of spontaneous and dynamic imbibition[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 199: 108327.

(责任编辑 李世远 编辑 马桂霞)