

引用格式:王小明,陈军斌,任大忠.陆相页岩油储层孔隙结构表征和渗流规律研究进展及展望[J].油气藏评价与开发,2023,13(1):23-30.
WANG Xiaoming, CHEN Junbin, REN Dazhong. Research progress and prospect of pore structure representation and seepage law of continental shale oil reservoir[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(1): 23-30.
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.01.003

陆相页岩油储层孔隙结构表征和渗流规律 研究进展及展望

王小明^{1,2}, 陈军斌^{1,2}, 任大忠^{1,2}

(1. 西安石油大学石油工程学院, 陕西 西安 710065;

2. 西安石油大学陕西省油气井及储层渗流与岩石力学重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要:目前中国在陆相页岩油勘探开发过程中遇到了诸多难题和挑战。陆相页岩油储层孔隙结构复杂和渗流能力差极大地影响页岩油可动性,是制约陆相页岩油高效开发的突出问题。针对页岩开发面临的突出问题,简要介绍了国内外学者对页岩油储层孔隙结构表征和页岩油渗流规律研究方法和技术手段的现状、存在问题及今后的发展趋势。研究表明:多尺度、精细且连续表征是对陆相页岩油储层孔隙结构表征的关键;建立行业统一孔隙结构表征技术和分类评价标准是陆相页岩油有效开发的地质依据;多物理模型和实验手段相结合是陆相页岩油渗流表征的基础;加强数值模拟和物理模拟及室内实验结合是陆相页岩油渗流机理研究的主攻方向。这为突破陆相页岩油开发瓶颈提供了重要的指导思想,对实现陆相页岩油储层的高效开发具有重要意义。

关键词:陆相页岩油储层;孔隙结构;流动规律;存在问题;发展趋势

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Research progress and prospect of pore structure representation and seepage law of continental shale oil reservoir

WANG Xiaoming^{1,2}, CHEN Junbin^{1,2}, REN Dazhong^{1,2}

(1. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Well Stability and Fluid & Rock Mechanics in Oil and Gas Reservoirs, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: At present, China has encountered many problems and challenges in the exploration and development of continental shale oil. The mobility of shale oil is greatly affected by complex pore structure and poor seepage capacity, and restricts the efficient development of continental shale oil. Therefore, In order to solve such prominent problem, the present situation, existing problems and future development trend of the research methods and technical means of shale oil reservoir pore structure and shale oil seepage law are briefly introduced. The results show that the characterization with the multi-scale, fine and continuous is the key to characterize the pore structure of continental shale oil reservoir. The establishment of the uniform pore structure characterization technology and the classification evaluation criteria is the geological basis for the effective development of continental shale oil. The combination of multi-physical model and experimental method is the basis of the seepage characterization of continental shale oil. Strengthening the combination of numerical simulation, physical simulation and laboratory experiments is the main direction of the study on the seepage mechanism of continental shale oil. It provides an important guideline for breaking the bottleneck of continental shale oil development and is of great significance to realize the efficient development of continental shale oil reservoirs.

Keywords: continental shale oil reservoir; pore structure; seepage law; existing problem; research progress and prospect

收稿日期:2022-09-26。

第一作者简介:王小明(1990—),女,博士,从事油气渗流理论与提高采收率技术研究。地址:陕西省西安市雁塔区电子二路东段18号,邮政编码:710065。E-mail: wxm18392177016@sina.com

通信作者简介:陈军斌(1963—),男,博士,教授,从事油气渗流理论与提高采收率技术研究。地址:陕西省西安市雁塔区电子二路东段18号,邮政编码:710065。E-mail: chenjbxu@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目“陆相页岩井周天然裂隙力学活动性评价方法基础研究”(51874239)。

随着中国国民经济快速发展和能源消费结构转型提速,高品质常规油气资源逐渐开采消耗。相比常规油气资源,非常规油气资源勘探开发潜力较大,开发非常规油气资源将对缓解中国能源供需矛盾至关重要^[1]。页岩油作为一种典型的非常规油气资源,其资源储量丰富,是目前中国加大勘探开发的主攻方向和最重要的能源接替领域。

中国页岩油主要分布在陆相沉积盆地中,以游离态、吸附态和溶解态3种方式赋存于以纳米级孔径为主的有效生烃泥页岩中,具有源储一体、滞留聚集、连续分布聚集特征^[2]。尽管页岩油资源潜力巨大,但受复杂地质和成藏条件影响,造成储层孔隙结构十分复杂,而页岩油的可动性受控于储层内部的孔隙空间分布和几何特征^[3-4]。同时,陆相页岩油密度大、含蜡量高且热演化程度低,致使其流动性极差,而且页岩油赋存方式多样,造成其流动机理极为复杂^[5-6]。因此,只有掌握储层复杂孔隙结构中流体的渗流规律才能有效开发陆相页岩油。

受实验方法、技术手段和计算分析方法的限制,造成陆相页岩油储层孔隙结构表征和渗流规律研究仍不完善,致使页岩油还未实现大规模开发。因此,针对陆相页岩油储层孔隙结构表征和渗流规律研究进展,总结归纳其存在的问题,并结合目前制约勘探

开发的关键因素,讨论分析其发展趋势,以期高效开发陆相页岩油。

1 孔隙结构表征和渗流规律研究现状

1.1 孔隙结构表征研究现状

陆相页岩油储层主要发育纳米级孔隙、微米级孔隙和天然裂缝,极大地影响储层的孔隙性,而孔隙性好坏又直接决定储层页岩油的流动^[7-8]。目前,学者对陆相页岩油储层孔隙结构表征主要从以下3个方面开展:

1) 定性表征法:通过对井下岩心直接观察、薄片观察和扫描电镜等对细宏观尺度储层孔隙类型和孔径大小及分布进行定性描述(图1),表明陆相页岩油储层发育粒间孔、晶间孔、溶蚀孔及裂缝等孔隙类型。储层孔径较小,主要由纳米级和微米级孔隙尺度组成,分布范围较广^[7,9-11]。

2) 定量表征法:由于定性表征孔隙结构,其研究尺度具有局限性,而通过定量表征的范式和标准可以较好地完善这一缺陷,还可以提高微观尺度孔径和分布的表征精度,具体的定量表征方法如下:

①压汞技术+分形理论

压汞技术能够表征 10 nm ~ 950 μm 开放型孔

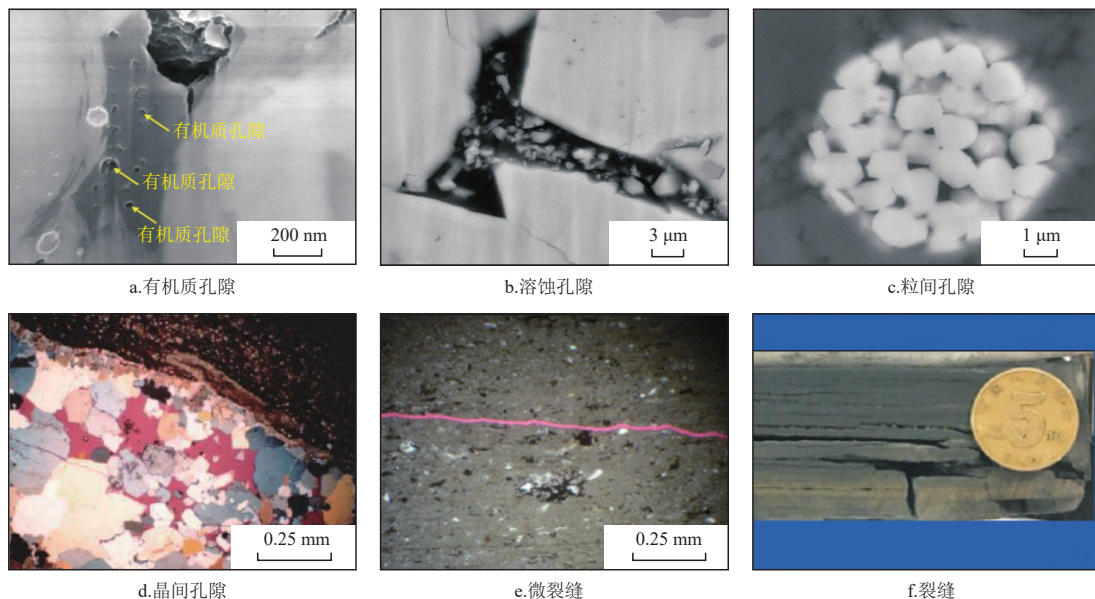


图1 陆相页岩油储层孔隙特征

Fig. 1 Pore characteristics of continental shale oil reservoir

隙。因此,可通过该技术获得微米级孔径大小和分布并对孔径进行分类。结合分形理论,建立累积汞饱和度、毛细管压力和储层孔喉分形维数之间关系式,按照孔隙直径和分形维数的对应关系,对孔隙分布的复杂性进行分析^[12],见式(1):

$$S_{Hg} = ap_c^{-(2-D)} = \frac{V_{Hg}}{V_p} \quad (1)$$

式中: S_{Hg} 为累积汞饱和度,%; a 为比例系数; p_c 为毛细管压力,MPa; D 为孔隙分形维数; V_{Hg} 为一定毛细管压力下汞的累积体积, m^3 ; V_p 为总孔体积, m^3 。

② N_2 和 CO_2 吸附技术+分形理论

考虑储层孔隙发育的不规则性和分散性,基于 N_2 和 CO_2 吸附技术,对小于2 nm和小于200 nm孔径的孔隙进行表征,结合分形理论,建立了分形FHH模型^[13-14],见式(2)。按照吸附气体积和分形维数的对应关系,将开放型纳米级孔隙进行分类,并对孔隙分布复杂性进行分析。

$$\ln V = C + (D - 3) \ln \left(\frac{p}{p_s} \right)^{-1} \quad (2)$$

式中: V 为吸附气总体积, m^3 ; C 为常数; p 为平衡压力,MPa; p_s 为吸附气饱和蒸气压,MPa。

③小角散射技术

针对陆相页岩油储层纳米级孔隙被有机质充填对孔隙大小的测量和孔隙形态描述影响问题,为获得1~100 nm开放孔和封闭孔的全部孔径信息,采用小角X射线散射技术,其散射体能够分散于固态基质纳米尺寸孔隙中,通过对散射图形和曲线的分析可获得散射体的尺寸和分布,由此构建散射体系的孔径分布和散射强度关系^[15],见式(3),进而对纳米级孔径尺度分布和孔隙数量进行定量分析。

$$I(q) = |\Delta\rho|^2 \int_0^\infty |F(q,r)|^2 V^2(r) P(r) dr \quad (3)$$

式中: I 为散射强度,a.u.; q 为散射矢量, nm^{-1} ; $\Delta\rho$ 为电子云密度起伏; $F(q,r)$ 为形状因子; r 为孔隙半径,mm; $V(r)$ 为半径为 r 的孔隙体积, m^3 ; $P(r)$ 为半径为 r 的孔隙发生散射的概率,%; dr 为孔隙半径的微分。

④气体滑移测量技术

针对现有孔隙表征技术分辨率低、可扩展性差且不适用于受压岩样等问题,采用气体滑移测量技术,构建克林伯格滑移参数和孔隙直径之间关系式,准确表征纳微米尺度孔隙大小和分布情况^[16],见式(4):

$$\begin{cases} b = \frac{K_a p_p}{K} - p_p \\ w = \frac{16C\mu}{b} \left(\frac{2RT}{\pi M} \right)^{1/2} \\ d = \frac{8p_p C\lambda}{b} \end{cases} \quad (4)$$

式中: b 为克林伯格滑移系数; K_a 为表观渗透率, m^2 ; p_p 为孔隙压力,MPa; K 为渗透率, m^2 ; w 为缝隙宽度,m; C 为Adzumi常数,取值0.9; μ 为气体黏度, $Pa \cdot s$; R 为气体常数,8.314J/(mol·K); T 为温度, $^{\circ}C$; M 为气体分子质量,g/mol; d 为孔隙直径,m; λ 为平均自由程,m。

3) 定性和定量相结合表征法:为进一步准确且全方位表征储层孔隙结构,将定性、定量表征研究方法和技术分析手段相结合,即综合利用岩心观察、CT扫描技术、场发射环境扫描电镜、聚离子束扫描、高分辨率背散射电子图像、低温氮气吸附和压汞技术等手段并结合相应的数学方法,全方位实现从微观尺度到宏观尺度对储层孔隙发育情况、孔隙类型、孔径大小以及孔径的分布进行表征^[17-18]。

1.2 页岩油的渗流规律研究现状

目前学者主要借鉴页岩气和致密油的渗流机理研究成果,从物理模型选择、实验方法改进、数值计算方法优化、储层流体相态完善以及受力分析等角度细化对陆相页岩油渗流规律的研究,成果如下:

1) 考虑物理模型变化对页岩油流动描述的准确性:物理模型是解决实际科学问题的一种经典方法。因此,为准确地反映页岩油的微观和宏观运移机制,通过对影响渗流因素细化和分类,如考虑储层基质、天然裂缝、人工裂缝、水平井筒的分布方式压裂水平等因素,通过改变渗流物理模型来描述复杂的渗流问题,借助产能差异和储层压力变化对孔隙和裂缝尺度上的页岩油渗流过程进行描述。

①孔隙网络模型

页岩储层基质系统是页岩油的主要赋存空间和渗流通道,由此建立孔隙网络模型^[19-20],揭示页岩油在微观尺度上的流动机制(图2)。

②双孔双渗模型

考虑储层由基质和裂缝(人工和天然)2种介质组成,二者均发生原油的微观运移,因此,建立基质和裂缝跨尺度耦合双孔双渗页岩油流动模型^[21-22](图3)。

③三重孔隙介质模型

考虑储层由基质、天然裂缝和人工裂缝3种介质

组成,是页岩油的主要渗流通道。因此,采用三重孔隙介质模型描述页岩油在基质、天然裂缝以及人工裂缝中流动^[23](图4)。

④分形树状网络模型^[24]

考虑体积压裂后储层所产生的诱导裂缝,且这些诱导裂缝具有明显的分形几何特征,诱导裂缝和人工裂缝是页岩油的主要渗流通道,进而采用分形树状网络模型描述流体的运移机制(图5)。

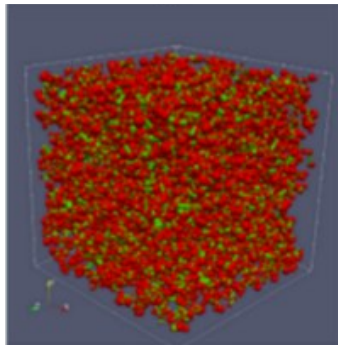


图2 孔隙网络模型
Fig. 2 Pore network model

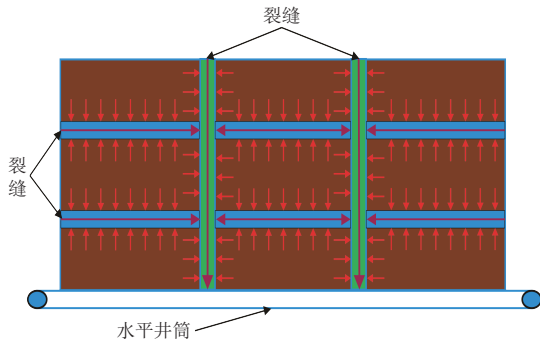


图3 双重孔隙介质模型
Fig. 3 Double porosity medium model

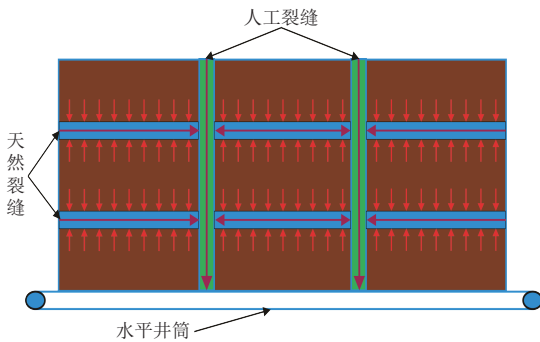


图4 三重孔隙介质模型
Fig. 4 Triple porosity medium model

2) 考虑实验方法改进对页岩油渗流规律分析:实验法可以直观了解页岩油的渗流特征,进一步对实验方法进行改进,更好地对微观和宏观尺度的页岩油渗流机理进行研究。

①室内岩心实验

现有的渗流特征研究方法主要有非稳态法、稳态法及毛细管平衡法等,但实验精度低和误差大。在储层高温高压条件下常规测试方法的提压装置为回压阀,造成渗流装置中流体的流动呈现非连续状态。因此,为更准确地模拟实际储层页岩油的流动情况,将高精度恒压恒速双缸泵、压力传感器、中间容器、恒速围压跟踪泵、烘箱和数据跟踪记录系统连接构成致密储层全封闭式循环渗流系统,使得装置中流体的渗流呈现连续状态。开展不同渗透率岩心渗流特征物理模拟实验^[25],结果表明储层渗透率影响页岩油的渗流方式:当渗透率大于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 或小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,页岩油呈非线性渗流;当渗透率为 $(0.1 \sim 1.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,页岩油呈线性渗流。

②物理模拟实验

由于室内岩心实验仅能反映宏观流动规律,无法获得微观渗流情况。因此,为更接近页岩储层孔隙尺度,且更准确获取岩心内部的流动细节和微观流动机理,基于三维数字岩心图像,采用流场可视化多孔介质微槽道物模系统,构建微观渗流物理模型^[26]。结果表明:陆相页岩油储层的流动能力主要取决于微米级孔隙的数量和大小,流体在微观尺度上的低速流动为非达西流动,并且具有启动压力,随着孔隙尺度的减小,非线性渗流特征越明显,启动压力越大。

③分子动力学模拟实验

针对室内岩心实验误差大且物模实验中试件加

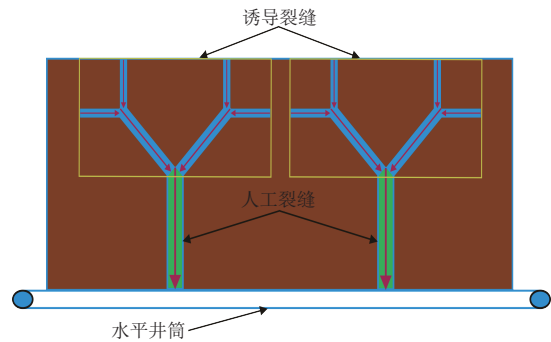


图5 体积压裂分形树状网络模型
Fig. 5 Fractal tree network model for volume fracturing

工和表征困难等问题,且考虑到页岩油主要储存于纳米级孔隙中液固作用较强。因此,为减少液固之间的相互作用,采用分子动力学方法开展不同岩石矿物纳米级孔隙内页岩油流动规律研究并解释液体的滑移现象,揭示分子和孔隙尺度上页岩油的微观流动机理^[20],可以得出:页岩油在有机质孔隙中流动最快,石英孔隙内次之,方解石孔隙内流动最慢。

3) 考虑优化数值计算方法对页岩油渗流规律影响:为提高渗流数学模型的求解精度,更准确地评价缝网对储层增产效果影响,考虑储层压裂后的实际缝网几何形态,并对计算方法不断改进,如扩展有限元法、半解析法、Peacema井模型等效法、有限体积法及均一化处理法等,通过准确求解模型来分析页岩油在储层基质和裂缝系统中的渗流规律^[27-30]。

4) 考虑流体相态对页岩油渗流规律影响:页岩油在储层中流动是多相态流动行为,但多相流理论分析其渗流规律相对困难,所以常将页岩油视为单相流体。同时,考虑流体相态间的界面张力和溶解气会极大影响流体渗流。因此,为准确地描述页岩油在储层中的渗流特征及分析影响渗流因素,逐步从单相流体过渡到多相流体数学建模,准确描述页岩油在储层中的渗流规律^[29-31]。

5) 考虑力学因素对页岩油流动规律影响:陆相页岩油储层纳米级孔隙是页岩油的主要赋存空间和渗流通道,但由于孔隙直径较小,页岩油在流动过程中会受到岩石孔壁、固液界面、液液界面以及气液界面上的表面分子力等作用而影响页岩油的流动。同时随着基质中吸附态页岩油的采出,岩石受到的有效应力逐渐增大,应力差下造成基质中解吸附态页岩油的渗流状态发生改变。因此,在页岩油流动规律研究过程中要充分考虑储层应力敏感、边界效应以及启动压力等力学因素。

①综合启动压力和边界层效应,页岩油渗流模型为^[31]:

$$v = \begin{cases} -\frac{KK_r}{\mu} \left(1 - \frac{G}{|\nabla\varphi|}\right) \nabla\varphi & |\nabla\varphi| > G \\ 0 & |\nabla\varphi| \leq G \end{cases} \quad (5)$$

$$K = K_0 e^{-c(p-p_0)} \quad (6)$$

式(5)一式(6)中: v 为渗流速度, m/s; K 为渗透率, m^2 ;

K_r 为相对渗透率; μ 为流体黏度, Pa·s; G 为启动压力梯度, MPa/m; φ 为势梯度, Pa/m; K_0 为初始渗透率, m^2 ; c 为应力敏感系数; p_0 为初始油藏压力, MPa。

②综合考虑应力敏感和边界层效应,页岩油渗流模型为^[32]:

$$v = \frac{e^{-ab} K_0}{a\mu L} (1 - e^{-a\Delta p}) \left(1 - a_1 e^{-k \frac{\Delta p}{L}}\right)^4 \quad (7)$$

式中: v 为渗流速度, m/s; a 为与岩石孔隙压缩系数和孔渗幂指数有关参数; b 为注入端与围压差值, MPa; μ 为流体黏度, Pa·s; L 为渗流两端长度, m; Δp 为渗流两端压差, MPa; a_1 为边界层厚度, m; k 为与孔隙和流体相关物理常数。

2 存在问题

1) 孔隙结构表征研究存在问题

对于陆相页岩油储层,由于沉积和构造作用的特殊性使得储层孔隙结构分布较为复杂,造成孔隙结构表征较为困难,且表征结果与真实地层具有一定偏差。因此,现有研究方法和手段主要存在以下不足:①对于表征的技术,单一的孔隙结构表征技术仅能对某一特定的孔隙尺度进行表征,无法实现储层多尺度孔隙结构的精细且连续性表征,准确评价储层整体孔隙结构较为困难;②对于表征的孔隙尺度,目前仅能就某一特定范围孔隙尺度进行表征,忽略了其他尺度孔隙且并未对孔隙尺度归类、对研究问题分析,进而对研究问题的信息反馈具有一定的局限性;③岩心尺度小,孔隙结构数据值容易剧烈变化,造成在岩心尺度上的孔隙结构表征不准确。

2) 页岩油渗流规律研究存在问题

由于陆相页岩油储层压裂后具有较强非均质性、多尺度孔隙结构特征。同时,考虑到页岩油的特殊属性、赋存方式以及流固之间的相互作用,加之多种渗流方式并存等因素造成其流动极为复杂,学者尚未明确陆相页岩油的渗流规律。

在物理模型选用方面,压裂后的陆相页岩油储层非均质性增强,不同的储层区域孔隙结构不同。由于考虑因素的不同,所选用的物理模型不同;但缺乏将各个物理模型组合使用,对压裂后的储层结构进行描述。

在实验方法选用方面,页岩油储层压裂后具有多尺度孔隙结构特征,压裂后缝网形态复杂且多种

渗流方式并存。通过室内实验和物模实验表征多尺度孔隙结构渗流规律较为困难。分子动力学模拟主要集中在页岩储层纳米级孔隙尺度内的单相流,忽略了储层压裂后孔隙中油气水三相共存的现实。

在数值计算方法和流体相态完善方面,现有的计算方法较为完善,能够提高计算精度且准确表征多相流体共同作用下的页岩油渗流规律。

在力学因素方面,页岩油在储层流动过程中产生的岩石形变和温度变化以及损伤变化会反作用于流体,而实际建模过程中未综合考虑渗流场—温度场—应力场—损伤场耦合条件下对页岩油渗流规律影响。

此外,在渗流数学建模过程中未考虑页岩油的吸附和解吸过程,忽略多种赋存方式共存下的页岩油的渗流机理。

3 发展趋势

中国对陆相页岩油研究起步较晚,尤其在储层结构特征和页岩油流动机理方面仍面临诸多问题,需要突破页岩油开发瓶颈。

3.1 陆相页岩油储层孔隙结构表征趋势

1) 建立行业统一的表征技术和分类评价标准

当前陆相页岩油储层多尺度孔隙结构特征还没有统一的评价标准和表征技术手段,造成学者在不同尺度上的孔隙结构表征技术和评价方法存在巨大差异且孔隙分类不明确,而这种差异最终会影响陆相页岩油储层孔隙结构表征的准确性。因此,需要建立行业统一的表征技术和分类评价标准。

2) 还原储层条件开展陆相页岩油储层孔隙结构表征

实际储层条件下孔隙结构处于高温高压环境,且储层岩石具有明显的应力敏感性,而当前对储层孔隙结构表征主要是常温常压条件下进行的,此时围压和孔隙压力消失,储层孔隙结构已经发生巨大变化。因此,需要尽可能还原储层条件来表征陆相页岩油储层孔隙结构。

3) 深入挖掘储层孔隙结构数据

单一的孔隙结构表征技术造成表征尺度和空间分辨率受限,而陆相页岩油储层孔隙结构具有多尺

度性,其中纳米级尺度孔隙在页岩油赋存和渗流过程中贡献较大,需引入纳米级孔隙结构表征技术,并与其他尺度孔隙结构表征技术相结合,加强不同尺度间的无缝衔接和融合,深入挖掘孔隙结构数据,特别是“灰色地带”孔隙结构数据。

4) 提高储层陆相页岩油储层孔隙结构表征完整性

陆相页岩油储层孔隙结构表征室内实验研究过程岩心样品较小且数量有限,不能代表整个储层孔隙结构特征。同时,受电镜扫描研究视域限制,部分孔隙结构特征片段缺失,造成孔隙结构二次描述不完整。因此,需将室内实验岩心孔隙结构数据与测井数据相结合,对孔隙结构进行全面准确表征。

3.2 陆相页岩油储层渗流规律研究趋势

1) 考虑陆相页岩油储层多尺度孔隙结构特征对渗流规律的影响

针对目前渗流尺度主要集中在纳米、微米、微裂隙以及裂缝等孔隙尺度,而介观孔隙尺度鲜有提及。因此,需要加强介观尺度孔隙对页岩油渗流规律影响的研究,真正实现从微观尺度、介观尺度到宏观尺度对页岩油的流动规律进行连续且准确描述。

2) 考虑页岩油的赋存状态对页岩油渗流规律的影响

陆相页岩油在储层中渗流是吸附态、游离态和溶解态共同参与整个渗流过程,但赋存和产出机理相对复杂,进而常常忽略了吸附态页岩油的解吸附过程及溶解态页岩油产出和运移。因此,在研究过程中需要充分考虑页岩油的赋存状态。

3) 考虑应力场、温度场和损伤场对页岩油渗流规律的影响

页岩油在储层渗流过程中温度场和压力场会变化,造成储层的孔隙结构改变,进而影响储层渗透性。同时,在渗流过程中会对岩体产生变形破坏,这种损伤变形对岩体渗流的影响也是不可忽视的。因此,需要充分考虑应力场、温度场和损伤场耦合条件下对陆相页岩油渗流规律的影响。

4) 加强数值模拟和物理模拟及室内实验研究相结合对页岩油渗流规律研究

陆相页岩油储层压裂后其孔隙具有多尺度性,同时,由于其储层天然弱面发育及压裂后裂缝的发育

使得储层具有不均匀性、各向异性和不连续性,数值模拟技术无法准确刻画,而通过物理模拟虽能刻画孔隙结构特征,还原储层环境,但无法描述较小孔隙尺度下页岩油的渗流特征。因此,需将数值模拟和物理模拟相结合,准确揭示陆相页岩油的渗流机理。

4 结论与展望

1) 陆相页岩油储层孔隙结构表征目前主要是实验室环境下通过单一的孔隙结构表征技术对孔隙类型、孔径大小、分布情况及连通性进行定性、定量以及定性和定量相结合的特征方式,但未能实现对其储层孔隙结构的多尺度、精细且连续表征。

2) 陆相页岩油储层孔隙结构表征应尽可能还原储层条件,将多种室内岩心尺度孔隙表征技术和测井数据结合,对微观、介观和宏观尺度孔隙结构进行连续、完整及准确表征,最终需建立行业统一的陆相页岩油储层孔隙结构表征技术和分类评价标准。

3) 陆相页岩油储层压裂后会形成更为明显的多尺度孔隙结构特征。页岩油的赋存方式多样,且其渗流过程受控于温度场、应力场和损伤场,仅通过单一的物理模型和实验手段无法准确表征其渗流特征。

4) 陆相页岩油渗流规律需进一步研究页岩油的赋存状态和压裂后储层的多尺度孔隙结构特征及多物理场对渗流的影响,加强数值模拟和物理模拟及室内实验研究相结合对页岩油渗流规律研究。

参考文献

- [1] 张大伟.创新勘探开发模式提升中国油气勘探开发力度[J].中国国土资源经济,2019,32(8):4-7.
ZHANG Dawei. Innovating exploration and development mode to improve oil and gas exploration and development in China[J]. Natural Resource Economics of China, 2019, 32(8): 4-7.
- [2] 邹才能,杨智,崔景伟,等.页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J].石油勘探与开发,2013,40(1):14-26.
ZOU Caineng, YANG Zhi, CUI Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 14-26.
- [3] 王民,马睿,李进步,等.济阳坳陷古近系沙河街组湖相页岩油赋存机理[J].石油勘探与开发,2019,46(4):789-802.
WANG Min, MA Rui, LI Jinbu, et al. Occurrence mechanism of lacustrine shale oil in the Paleogene Shahejie Formation of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(4): 789-802.
- [4] 张世铭,王建功,张小军,等.酒西盆地间泉子段储层流体赋存及渗流特征[J].天然气地球科学,2018,29(8):1111-1119.
ZHANG Shiming, WANG Jianguo, ZHANG Xiaojun, et al. Studies on the reservoir characteristics and the fluid flow in Jianquanzi member of the Jiuxi Basin, northwest China[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(8): 1111-1119.
- [5] 聂海宽,张培先,边瑞康,等.中国陆相页岩油富集特征[J].地学前缘,2016,23(2):55-62.
NIE Haikuan, ZHANG Peixian, BIAN Ruikang, et al. Oil accumulation characteristics of China continental shale[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 55-62.
- [6] 蒲秀刚,金凤鸣,韩文中,等.陆相页岩油甜点地质特征与勘探关键技术——以沧东凹陷孔店组二段为例[J].石油学报,2019,40(8):997-1012.
PU Xiugang, JIN Fengming, HAN Wenzhong, et al. Sweet spots geological characteristics and key exploration technologies of continental shale oil: A case study of Member 2 of Kongdian Formation in Cangdong sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(8): 997-1012.
- [7] 孙超,姚素平.页岩油储层孔隙发育特征及表征方法[J].油气地质与采收率,2019,26(1):153-164.
SUN Chao, YAO Suping. Pore structure and characterization methods of shale oil reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 153-164.
- [8] 高铁宁,杨正明,李海波,等.页岩油储层纳米孔隙结构特征[J].中国科技论文,2018,13(21):2461-2467.
GAO Tiening, YANG Zhengming, LI Haiibo, et al. Characteristics of pore structure in shale oil reservoir[J]. China Sciencepaper, 2018, 13(21): 2461-2467.
- [9] 张顺,刘惠民,宋国奇,等.东营凹陷页岩油储集空间成因及控制因素[J].石油学报,2016,37(12):1495-1507.
ZHANG Shun, LIU Huimin, SONG Guoqi, et al. Genesis and control factors of shale oil reserving space in Dongying sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(12): 1495-1507.
- [10] 许琳,常秋生,冯玲丽,等.准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组页岩油储层特征及控制因素[J].中国石油勘探,2019,24(5):649-660.
XU Lin, CHANG Qiusheng, FENG Lingli, et al. The reservoir characteristics and control factors of shale oil in Permian Fengcheng Formation of Mahu sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 649-660.
- [11] 徐二社,陶国亮,李志明,等.江汉盆地潜江凹陷盐间页岩油储层不同岩相微观储集特征——以古近系潜江组三段4亚段10韵律为例[J].石油实验地质,2020,42(2):193-201.
XU Ershe, TAO Guoliang, LI Zhiming, et al. Microscopic reservoir characteristics of different lithofacies from inter-salt shale oil reservoir in Qianjiang sag, Jianghan Basin: A case study of Paleogene E_{q3}⁴-10 rhythm[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(2): 193-201.
- [12] WANG H, WU W, CHEN T, et al. Pore structure and fractal

- analysis of shale oil reservoirs: A case study of the Paleogene Shahejie Formation in the Dongying Depression, Bohai Bay, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 177: 711–723.
- [13] LIU K, OSTADHASSAN M, ZHOU J, et al. Nanoscale pore structure characterization of the Bakken shale in the USA[J]. *Fuel*, 2017, 209: 567–578.
- [14] LI J J, LIU Z, LI J Q, et al. Fractal characteristics of continental shale pores and its significance to the occurrence of shale oil in china: A case study of biyang depression[J]. *Fractals*, 2018, 26(2): 1840008.
- [15] 孙超,姚素平,李晋宁,等.基于小角X射线散射页岩油储层介孔特征研究[J]. *高校地质学报*, 2017, 23(4): 715–724.
- SUN Chao, YAO Suping, LI Jinning, et al. Characteristics of mesoporous in shale reservoirs by small angle X-ray scattering method[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2017, 23(4): 715–724.
- [16] LETHAM E A, BUSTIN R M. Klinkenberg gas slippage measurements as a means for shale pore structure characterization [J]. *Geofluids*, 2016, 16(2): 264–278.
- [17] 龙玉梅,陈曼霏,陈凤玲,等.潜江凹陷潜江组盐间页岩油储层发育特征及影响因素[J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(1): 59–64.
- LONG Yumei, CHEN Manfei, CHEN Fengling, et al. Characteristics and influencing factors of inter-salt shale oil reservoirs in Qianjiang Formation, Qianjiang Sag[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(1): 59–64.
- [18] 李乐,刘爱武,漆智先,等.潜江凹陷王场背斜潜四下段盐韵律层页岩储层孔隙结构特征[J]. *地球科学*, 2020, 45(2): 602–616.
- LI Le, LIU Aiwu, QI Zhixian, et al. Pore structure characteristics of shale reservoir of the lower Qian 4 Member in the Wangchang Anticline of the Qianjiang Sag[J]. *Earth Science*, 2020, 45(2): 602–616.
- [19] 崔荣浩.基于孔隙网络模型的页岩储层油水两相流动模拟[D].青岛:中国石油大学(华东),2018.
- CUI Ronghao. Pore network modeling of oil/water two-phase flow in shale[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2018.
- [20] 王森.页岩油微尺度流动机理研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2016.
- WANG Sen. Microscale flow mechanisms of oil in shale[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2016.
- [21] TIVAYANONDA V. Comparison of single, double, and triple linear flow models for shale gas/oil reservoirs[D]. Texas: Texas A & M University, 2012.
- [22] 苏玉亮,鲁明晶,李萌,等.页岩油藏多重孔隙介质耦合流动数值模拟[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(3): 645–652.
- SU Yuliang, LU Mingjing, LI Meng, et al. Numerical simulation of shale oil coupled flow in multi-pore media[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 645–652.
- [23] TIVAYANONDA V, APIWATHANASORN S, EHLIG-ECONOMIDES C, et al. Alternative interpretations of shale gas/oil rate behavior using a triple porosity model [C]// Paper SPE-159703-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, October 2012.
- [24] WANG W D, SU Y L, ZHANG X, et al. Analysis of the complex fracture flow in multiple fractured horizontal wells with the fractal tree-like network models[J]. *Fractals*, 2015, 23(2): 1550014.
- [25] 雷浩,何建华,胡振国.潜江凹陷页岩油藏渗流特征物理模拟及影响因素分析[J]. *特种油气藏*, 2019, 26(3): 94–98.
- LEI Hao, HE Jianhua, HU Zhenguo. Physical simulation and influencing factor analysis of the flow characteristics in the shale oil reservoir of Qianjiang Depression[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(3): 94–98.
- [26] 李佳琦,陈蓓蓓,孔明炜,等.页岩油储集层数字岩心重构及微尺度下渗流特征——以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油为例[J]. *新疆石油地质*, 2019, 40(3): 319–327.
- LI Jiaqi, CHEN Beibei, KONG Mingwei, et al. Digital core reconstruction and research on microscale flow characteristics of shale oil reservoir: a case of the shale oil in Permian Lucaogou Formation, Jimsar sag[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2019, 40(3): 319–327.
- [27] YU W, WU K, SEPEHRNOORI K. A semianalytical model for production simulation from nonplanar hydraulic-fracture geometry in tight oil reservoirs[J]. *SPE Journal*, 2016, 21(3): 1028–1040.
- [28] DONG Y, LI P C, TIAN W, et al. An equivalent method to assess the production performance of horizontal wells with complicated hydraulic fracture network in shale oil reservoirs [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019: 102975.
- [29] 高英,朱维耀,岳明,等.体积压裂页岩油储层渗流规律及产能模型[J]. *东北石油大学学报*, 2015, 39(1): 80–86.
- GAO Ying, ZHU Weiyao, YUE Ming, et al. Sapage law and productivity model of stimulated reservoir volume in shale oil reservoirs[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2015, 39(1): 80–86.
- [30] LE T D, MURAD M A. A new multiscale model for flow and transport in unconventional shale oil reservoirs[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2018, 64: 453–479.
- [31] 刘礼军,姚军,孙海,等.考虑启动压力梯度和应力敏感的页岩油井产能分析[J]. *石油钻探技术*, 2017, 45(5): 84–91.
- LIU Lijun, YAO Jun, SUN Hai, et al. The effect of threshold pressure gradient and stress sensitivity on shale oil reservoir productivity[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(5): 84–91.
- [32] 雷浩,何建华,胡振国.考虑应力敏感和边界层效应的页岩油油藏渗流模型研究[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(11): 90–95.
- LEI Hao, HE Jianhua, HU Zhenguo. A mathematical model of shale oil reservoir considering the effects of stress sensitivity and boundary layer[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(11): 90–95.

(编辑 黄颖)