

引用格式:李萌,王文东,苏玉亮,等.考虑岩石和流体特性的页岩油流动规律模拟[J].油气藏评价与开发,2025,15(4):694-703.

LI Meng, WANG Wendong, SU Yuliang, et al. Simulation of shale oil flow patterns considering rock and fluid properties[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(4): 694-703.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.04.020

## 考虑岩石和流体特性的页岩油流动规律模拟

李萌<sup>1,2</sup>,王文东<sup>3</sup>,苏玉亮<sup>3</sup>,张建<sup>1,2</sup>,范振宁<sup>1,2</sup>,梁海宁<sup>1,2</sup>

(1.中石化石油工程设计有限公司,山东东营 257026;2.中国石化碳捕集、利用与封存(CCUS)重点实验室,山东东营 257026;3.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛 266580)

**摘要:**相较于常规油气储层,页岩储层呈现出孔渗极低、有机质丰富、应力敏感性强、岩性叠置现象明显和流体赋存形式多样等特点。现有页岩油流动规律研究往往仅针对单一特征开展,导致结论认识存在局限性。以纹层状页岩储层为研究对象,充分考虑岩石物性变化,同时引入反应模型刻画流体赋存特征,实现对页岩油渗流过程的精细表征。在此基础上分析了页岩油流动规律,探讨不同因素对页岩油产量的影响,并结合渤海湾盆地黄骅坳陷沧东凹陷页岩储层特征开展了实例分析。研究表明:发育的层理构造对页岩油开采具有积极作用。对于游离态油,层理构造为其流动提供了高渗通道;对于吸附态油,发育的层理构造有利于提高解吸速率。纹层状储层中采出的页岩油主要为纹层中的游离态油,且多通过砂岩纹层流出。此外,砂岩纹层应力敏感性对流动的影响主要体现在生产初期,而页岩纹层应力敏感性对流动的影响主要体现在生产中后期。该研究揭示了纹层状储层中页岩油的流动规律,可为实现陆相页岩油的高效开发提供理论支持。

**关键词:**页岩油;流动规律;赋存状态;纹层状储层;应力敏感

**中图分类号:**TE349

**文献标识码:**A

### Simulation of shale oil flow patterns considering rock and fluid properties

LI Meng<sup>1,2</sup>, WANG Wendong<sup>3</sup>, SU Yuliang<sup>3</sup>, ZHANG Jian<sup>1,2</sup>, FAN Zhenning<sup>1,2</sup>, LIANG Haining<sup>1,2</sup>

(1. Sinopec Petroleum Engineering Design Co., Ltd., Dongying, Shandong 257026, China; 2. Sinopec Key Laboratory of Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS), Dongying, Shandong 257026, China; 3. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China)

**Abstract:** With the development of fractured horizontal well technology, shale oil exhibits great exploration and development potential. Compared with conventional oil and gas reservoirs, shale reservoirs are characterized by extremely low porosity and permeability, abundant organic matter, strong stress sensitivity, well-developed laminated structure, and diverse fluid occurrence states. Previous studies on shale oil flow patterns have typically focused on individual characteristics, inevitably leading to an incomplete understanding. This study aims to further explore the coupling mechanism of different factors on the shale oil flow patterns, thereby providing theoretical support for the efficient exploitation of terrestrial shale oil.

A novel model was established to accurately characterize the oil flow patterns in shale reservoirs, integrating vertical heterogeneity and stress sensitivity of shale formation, as well as considering the adsorption-desorption effects of shale oil. The boundary conditions were simplified based on the shale oil reservoir properties to ensure both the calculation efficiency and accuracy. Taking laminated shale reservoirs—a primary target for exploitation—as a case study, the physical process of shale oil flowing from the matrix to the hydraulic fracture was investigated systematically using the proposed model. The seepage mechanism of shale oil during primary depletion was clarified, and the combined influence of vertical crossflow and formation stress sensitivity on the production of free oil and adsorbed oil was discussed. Subsequently, the proposed model was applied to the Paleogene Kong-2 member shale in the Cangdong Sag, revealing significant differences in oil production among different lithofacies and further predicting their respective production trends. Practical development strategies for shale oil were formulated based on lithofacies-dominated production characteristics.

Neglecting the vertical heterogeneity in shale formations and adsorption-desorption effects of shale oil may significantly distort simulation results, leading to inaccurate shale oil production predictions. Comprehensive analyses through numerical simulations and field case studies demonstrated that: (1) During the primary depletion, well-developed laminated structures enhanced shale oil recovery. Free oil

收稿日期:2024-10-03。

第一作者简介:李萌(1991—),女,博士,工程师,从事CO<sub>2</sub>管输特性模拟、非常规油气运移规律模拟方面的研究工作。地址:山东省东营市东营区济南南路49号,邮政编码:257026。E-mail:mengli\_upc@163.com

基金项目:国家自然科学基金面上项目“页岩混合润湿多尺度孔隙渗吸多相渗流模拟方法”(52274056)。

primarily migrated through laminated channels, while adsorbed oil benefited from accelerated desorption within these structures. (2) In laminated shale reservoirs, free oil mainly migrated from the shale matrix to hydraulic fractures in shale layers, and it mainly exited through sand layers. This established shale layers as oil sources and sand layers primarily as flow channels. (3) The strong stress sensitivity of shale layers enhanced oil recovery, while that of sand layers exerted adverse effects, with shale layers dominating during mid-to-late production stages and sand layers influencing early stages most significantly. The proposed model accurately simulated the physical process of oil flowing from the shale matrix to hydraulic fractures. The simulation results showed strong consistency with field observations, validating the model's applicability for shale formation development planning and optimization.

Numerical simulations investigated the shale oil flow patterns in laminated shale reservoirs by incorporating rock and fluid properties. The proposed model was utilized to characterize vertical crossflow and the desorption process of adsorbed oil in shale formations, while quantitatively evaluating the significant effects of laminated structure and stress sensitivity on shale oil production. These findings provide crucial insights for enhancing recovery in continental shale formations.

**Keywords:** shale oil; flow pattern; occurrence state; laminated reservoir; stress sensitivity

随着水平井压裂改造技术的发展,页岩油展现出巨大的勘探开发潜力<sup>[1-3]</sup>。与北美海相页岩不同,中国陆相页岩成熟度较低,储集层纵向上厚度不均,砂岩泥质纹层、页岩层理等结构发育,岩性叠置现象显著<sup>[4-8]</sup>。其中,砂岩、白云岩、灰岩等薄夹层物性明显优于页岩,其分布特征对页岩储层的有效动用具有重要意义<sup>[9-10]</sup>。受岩性变化控制,陆相页岩储层流体分布更加复杂<sup>[11]</sup>。考虑岩石物性及流体特征对渗流的影响,明确页岩油的流动规律,是实现陆相页岩油高效开发的基础。

国内外学者针对页岩油赋存及动用机理开展了大量研究。在实验研究方面,桑茜<sup>[12]</sup>采用流体饱和法对济阳拗陷页岩样品中游离态油和吸附互溶态油含量进行测试,发现页岩储层中以吸附互溶态油为主,且其含量与总有机碳(TOC)含量呈正相关;蒋启贵等<sup>[13]</sup>对已有Rock-Eval热解和热解色谱法进行改进,基于实验数据建立了不同赋存状态页岩油的定量表征方法,分析结果同样表明页岩吸附油含量与有机质丰度呈正比;CHALMERS等<sup>[14]</sup>、李睿姍等<sup>[15]</sup>、王鑫朋等<sup>[16]</sup>通过实验均观察到页岩具有强应力敏感性;张少杰<sup>[17]</sup>测试了页岩孔隙度、渗透率随有效应力的变化规律,认为页岩渗透率与有效应力呈指数关系,孔隙度与有效应力呈线性关系。在理论研究方面,WANG等<sup>[18]</sup>采用分子模拟方法研究了液态烷烃在富有机质页岩孔隙内的赋存状态,根据烷烃在孔隙中的非均匀密度分布特征区分游离态油和吸附态油,并建立了页岩油资源量估算方法;ZHANG等<sup>[19]</sup>基于液态烃在页岩有机和无机纳米孔隙中的不同运移机制,推导了页岩油微观流动表征模型,在此基础上,结合迂曲度、孔隙度和总有机碳含量的影响,提出了页岩油表观渗透率表征方法;董明哲等<sup>[20]</sup>从渗流理论和理论计算角度开展页岩油流动机理研究,通过建立宏观储层概念模型,分析了纹层状页岩储层中流体的流动机理,验证了窜流机制的重要作用。以往研究多聚焦于对页岩油单一特征的探讨,在实际工程应用中,

需要综合考虑多因素协同作用,因此,有必要深化对页岩油多因素耦合作用机制的研究,以形成更全面、更深入的认识。

在深入分析现有文献实验结果的基础上,构建了融合储层岩石物性与流体特征的页岩油流动表征模型。以纹层状页岩储层为例,通过数值计算与理论分析相结合的方法,对页岩油从基质流入水力裂缝物理过程中的流动规律展开分析,探讨不同因素对基质中页岩油动用量的影响,形成页岩油流动模拟表征新方法。同时,结合实际数据分析了不同组构相中页岩油的产量特征,为进一步明确页岩油动用机理、提高页岩油流动模拟精度提供理论支持。

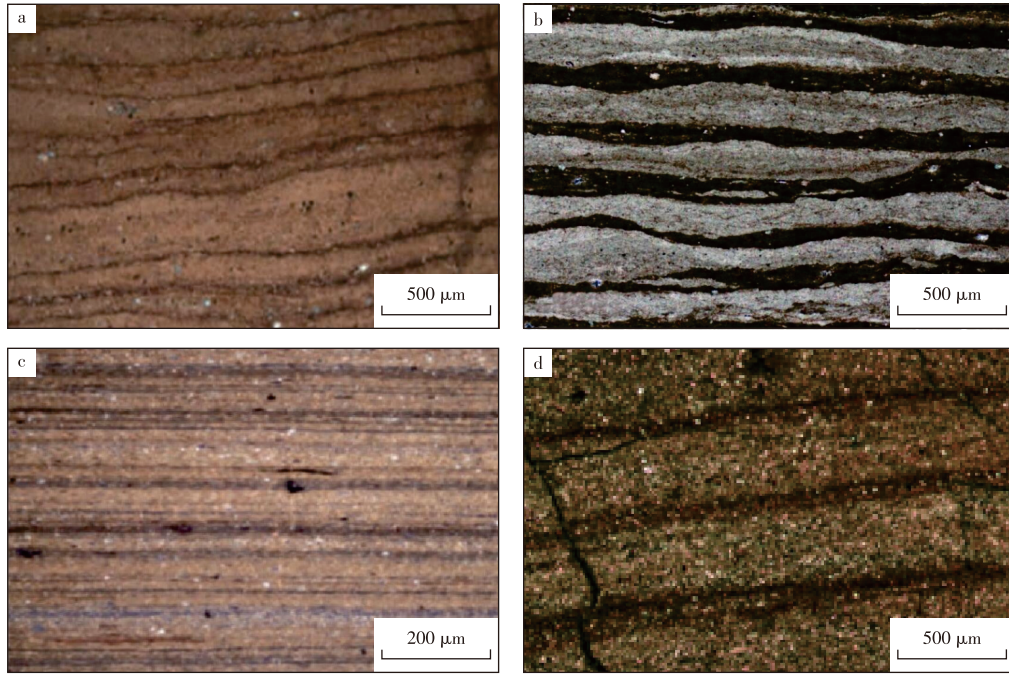
## 1 页岩油流动表征模型

### 1.1 页岩储层岩性分布特征

页岩储层层理构造发育,垂向非均质性较强(图1),岩性分布特征对储层渗流能力的影响不容忽视<sup>[20-21]</sup>。以页岩-砂岩互层型纹层状储层为例,该类储层以页岩为主,夹薄层状砂岩,单层厚度小于1 cm<sup>[22-23]</sup>。由于矿物组成和沉积特征不同,砂岩纹层与页岩纹层在含油性和渗流能力方面存在较大差异,等效介质模型难以准确刻画流体在纹层状储层中的流动特征<sup>[20,24]</sup>,需要根据页岩储层岩性分布特征建立精细模型,以实现不同赋存状态页岩油流动规律的准确表征。

### 1.2 页岩储层应力敏感性

岩心应力敏感实验表明,在不考虑温度变化的情况下,随着有效应力改变,页岩孔隙度、渗透率均呈现明显变化。当天然微裂缝和层理构造发育时,储层应力敏感性更加明显,渗透率与有效应力呈指数关系<sup>[28-29]</sup>,可通过以下方程描述:



注:a为东濮凹陷页岩;b为沾化凹陷页岩;c为沧东凹陷页岩;d为歧口凹陷页岩。

图1 页岩储层纹层构造<sup>[23,25-27]</sup>

Fig. 1 Laminated structure of shale reservoirs<sup>[23,25-27]</sup>

$$k_0 = k_i e^{-a_k(p_i - p)} \quad (1)$$

式中: $k_0$ 为孔隙压力为 $p$ 时的渗透率,单位 $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $k_i$ 为有效应力为0时的渗透率,单位 $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $a_k$ 为渗透率应力敏感系数,单位 $\text{MPa}^{-1}$ ;  $p_i$ 为原始储层压力,单位 $\text{MPa}$ ;  $p$ 为孔隙压力,单位 $\text{MPa}$ 。

孔隙度与有效应力的关系可采用指数关系式或线性关系式描述,当不考虑压缩系数随有效应力的变化时,采用线性关系更加简便。根据实验研究结果,当有效应力从2 MPa增大至25 MPa时,页岩孔隙度的变化范围始终保持在一个数量级内<sup>[17]</sup>,线性拟合效果可满足精度要求,因此,采用线性关系描述孔隙度与有效应力的关系:

$$\varphi_0 = \varphi_i [1 - C_\varphi(p_i - p)] \quad (2)$$

式中: $\varphi_0$ 为孔隙压力为 $p$ 时的孔隙度,%; $\varphi_i$ 为有效应力为0时的孔隙度,%; $C_\varphi$ 为岩石压缩系数,单位 $\text{MPa}^{-1}$ 。

页岩储层岩性叠置现象明显,不同岩石类型交替分布,导致储层应力敏感性呈现组合特征。室内岩心实验结果表明<sup>[17,28]</sup>,页岩孔隙度、渗透率随有效应力的变化幅度明显大于砂岩,因此,在模拟过程中需分别定义页岩纹层和砂岩纹层的物性参数,从而精确描述储层应力敏感性对页岩油流动的影响。

### 1.3 页岩油赋存状态

页岩油以游离态、吸附态、溶解态3种形式赋存于

富有机质储层中,由于现有技术条件下溶解态油难以动用,模拟中仅考虑游离态油和吸附态油。通过实验方法可确定不同赋存状态页岩油含量<sup>[12-13]</sup>。游离态油与吸附态油的流动机理不同,需采用反应模型,分别建立数学方程和化学反应方程来描述不同赋存状态页岩油的流动规律。

根据实验研究结果,随孔隙压力降低,页岩岩心中吸附态油量逐渐减少,即少量吸附态油解吸为游离态油,且最终解吸量与孔隙压力变化整体呈线性关系<sup>[12,30]</sup>。页岩油降压开采过程中理论上可以解吸的吸附态油量可通过以下方程描述:

$$S_a = k_a(p_i - p) \quad (3)$$

式中: $S_a$ 为可吸附的吸附态油量,单位 $\text{mg/g}$ ;  $k_a$ 为吸附态油解吸常数,单位 $(\text{mg/g})/\text{MPa}$ 。

分别定义游离态油组分( $O_f$ )和吸附态油组分( $O_a$ ),其中吸附态油为不可流动的固相,通过化学反应模型描述吸附态油解吸为游离态油的过程,通过拟合实验结果得到吸附态油的解吸速率。游离态油赋存于页岩孔隙和裂缝中,其含量通过孔隙度( $\varphi_0$ )表征。在确定游离态油量和吸附态油量后,对模型孔隙度进行修正,使模型能够同步考虑游离态油和解吸后的吸附态油的流动特征:

$$\varphi_e = \varphi_0 + \varphi_a \quad (4)$$

根据质量守恒关系,  $\varphi_a$  的表达式为:

$$\varphi_a = 0.001 \times \frac{S_a \rho_s}{\rho_a} \quad (5)$$

通过物质的量浓度定义孔隙中吸附态油的含量:

$$C_a = 0.001 \times \frac{S_a \rho_s}{M_o \varphi_e} \quad (6)$$

式中:  $\varphi_e$  为页岩修正孔隙度, %;  $\varphi_a$  为页岩中吸附态油体积百分数, %;  $\rho_s$  为页岩密度, 单位  $g/cm^3$ ;  $\rho_a$  为吸附态油密度, 单位  $g/cm^3$ ;  $C_a$  为吸附态油物质的量浓度, 单位  $mol/cm^3$ ;  $M_o$  为吸附态油相对分子质量, 单位  $g/mol$ 。

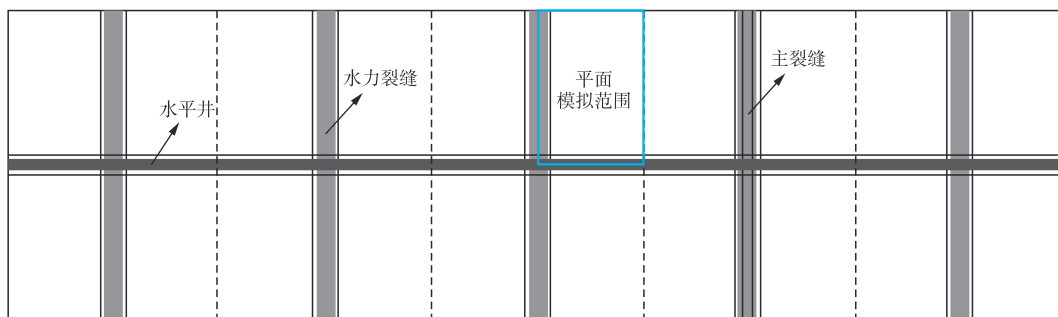


图2 多级压裂水平井示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multi-stage fractured horizontal wells

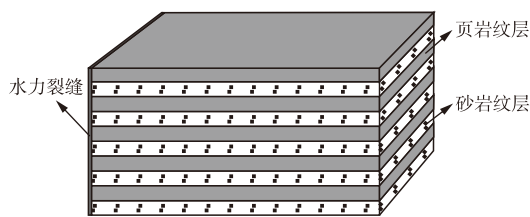


图3 页岩油流动模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of shale oil flow model

考虑水力裂缝的强导流能力, 将内边界(水力裂缝)简化为定压力边界, 基于流动对称性, 将其余边界定义为封闭边界, 采用数值方法求解模型。需要说明的是, 根据水电相似原理, 垂向流动过程中砂岩纹层与页岩纹层呈串联关系, 即流体在渗透率差异较大的纹层间流动时, 渗透率较低的纹层起主导作用。由于当前关于不同纹层垂向渗透率与水平渗透率比值的差异研究较少, 尚未形成明确结论, 因此, 参考同类模拟研究<sup>[20]</sup>, 对砂岩纹层和页岩纹层采用相同的垂向渗透率与水平渗透率比值, 且该处理方式经分析表明不会对模拟结果产生明显影响。页岩纹层中赋存游离态油和吸附态油, 砂岩纹层中以游离态油为主, 吸附态油的可解吸量受孔隙压力变化影响, 而实际解吸量同时受解吸速率制约。室内实验中孔隙压力下降较快, 实际解吸量由解吸速率主导; 油藏生产过程中孔隙压力下降速度较慢, 实际解吸量由孔隙压力变化主

### 1.4 页岩油流动表征模型

在传统渗流方程基础上考虑上述特征, 以刻画页岩储层内流体的流动规律。目前页岩油主要开发方式为水平井压裂改造后依靠弹性能量开采, 多级压裂水平井示意图如图2所示。假设水力裂缝等间距分布且裂缝半长一致, 基质中砂岩纹层与页岩纹层交替均匀分布, 根据模型对称性, 平面上选取一段裂缝的四分之一、垂向上选取20个纹层开展研究, 建立页岩油流动模型(图3)。定义水力裂缝半间距为50 m, 纹层厚度为1 cm, 垂向渗透率与水平渗透率比值为0.001, 其他参数及来源如表1所示。

表1 模型参数

Table 1 Model parameters

参数类别	参数名称	取值	范围	来源	
页岩	$k_f/10^{-3} \mu m^2$	0.10	0.10~0.71	文献[17]	
	$\varphi_f/\%$	8.00	5.89~8.92	文献[17]	
	$a_k/MPa^{-1}$	0.15	0.03~0.49	文献[17]	
	$C_\varphi/MPa^{-1}$	0.01	0.008 5~0.027 7	文献[17]	
	$k_o/10^{-3} \mu m^2$	0.005 0		公式(1)	
	$\varphi_o/\%$	6.40		公式(2)	
	$\varphi_e/\%$	6.425		公式(4)	
	$\rho_o/(g/cm^3)$	2.50	2.45~2.53	文献[31]	
	砂岩	$k_f/10^{-3} \mu m^2$	0.50	0.02~1.83	文献[29]
		$\varphi_f/\%$	8.00	7.52~12.00	文献[29]
$a_k/MPa^{-1}$		0.05	0.037~0.115	文献[32]	
$C_\varphi/MPa^{-1}$		0.001	0.000 7~0.001 9	文献[33]	
$k_o/10^{-3} \mu m^2$		0.183 9		公式(1)	
$\varphi_o/\%$		7.84		公式(2)	
流体物性	$\mu/(mPa \cdot s)$	5.00	0.55~10.00	文献[20]	
	$k_a/[(mg/g) \cdot MPa^{-1}]$	0.005	0.003~0.060	文献[12]	
	$\rho_o/(g/cm^3)$	1.00			
	$M_o/(g/mol)$	170	170~175	文献[30]	
	$C_a/(mol/cm^3)$	$2.3 \times 10^{-5}$		公式(6)	
其他参数	$p_{eff}/MPa$	20			
	$p_i/MPa$	30			
	$p_{wf}/MPa$	10			

注:  $\mu$  为游离态油黏度, 单位  $mPa \cdot s$ ;  $p_{eff}$  为初始有效应力, 单位  $MPa$ ;  $p_{wf}$  为井底流压, 单位  $MPa$ 。

导。因此,在油藏尺度模拟中,通过调整解吸速率,使不同时刻的解吸量与页岩孔隙压力变化相匹配。

## 2 页岩油流动规律及影响因素分析

在页岩储层中,岩石和流体特性均会对流动产生影响。砂岩纹层为页岩油的流动提供了高速渗流通道,是页岩油能够有效动用的重要机理<sup>[20]</sup>。同时,不同类型岩石的应力敏感性差异及其流体赋存状态的不同,使页岩油渗流过程更加复杂。以页岩油流动表征模型为基础开展理论分析,从而明确不同因素对页岩油流动规律的影响。

### 2.1 页岩油流动规律分析

定义生产时间为5 a,计算累积产油量变化曲线,分别记录通过页岩纹层和砂岩纹层流出的油量,同时以块状页岩储层模型(厚度为10 cm)和块状砂岩储层模型(厚度为10 cm)的采出量作为对比(图4a)。纹层状储层中,大部分油通过砂岩纹层流出,页岩纹层流出油量仅占1%左右。与块状储层相比,相同生产条件下,纹层状储层中通过页岩流出的油量减少,通过砂岩流出的油量增加,总产油量明显增加。这是因为砂岩渗透率明显高于页岩,砂岩纹层压力下降较快,而页岩纹层压力下降较慢,层间产生压差,随着生产时间增加,压差愈加明显,层间发生垂向窜流,页岩纹层中的部分油垂直流入砂岩纹层中,再通过砂岩纹层流入水力裂缝,使页岩纹层中的油得到有效动用。

计算纹层状储层中吸附态油的解吸量,并与块状页岩储层的吸附态油解吸量进行对比(图4b)。纹层状储层中,吸附态油的解吸量明显高于块状页岩储层,主要原因为层间窜流导致页岩纹层压降速度加快,而较低的压力有利于吸附态油的解吸,表明纹层状储层更有利于吸附态油的采出。但相较于总采出量,吸附态油的解吸量极少,说明纹层状页岩储层中采出的油主要为游离态油。

分别计算纹层状储层中页岩纹层和砂岩纹层游离态油量的变化,结果如图4c所示。页岩纹层中游离态油量明显减少,砂岩纹层中游离态油量变化不明显。这是由于页岩纹层应力敏感性更强,岩石压缩系数更大,其弹性能量远高于砂岩纹层。可以看出,纹层状页岩储层降压开采过程中,采出的游离态油主要来源于页岩纹层,砂岩纹层虽然有较高的孔隙度和渗透率,但可采出的油较少,主要起导流作用。

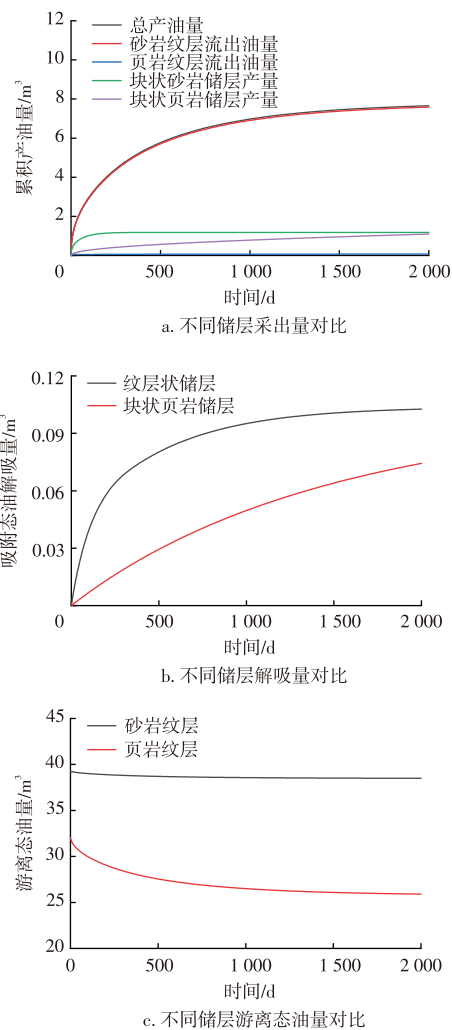


图4 纹层状储层中页岩油流动规律

Fig. 4 Shale oil flow patterns in laminated reservoirs

### 2.2 层间窜流的影响

层间窜流强弱是影响页岩油流动性的重要因素,较强的层间窜流作用可使更多页岩纹层中的油通过砂岩纹层流出,从而提高页岩油的采出速度。分别定义垂向渗透率与水平渗透率比值为 $10^{-6}$ 、 $10^{-5}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-3}$ ,模拟产油量变化规律(图5),可以看出,随着层间窜流作用增强,累积产油量增加(图5a),通过砂岩纹层流出的油量增加,通过页岩纹层流出的油量减少(图5b)。相同生产条件下,层间窜流作用越强,页岩纹层中的油越容易流入砂岩纹层中,而砂岩纹层的渗透率远大于页岩纹层,导致页岩油采出速度加快,累积产油量增加。垂向渗透率与水平渗透率比值为 $10^{-4}$ 时,已有约98%的油通过砂岩纹层流出,当垂向渗透率与水平渗透率比值从 $10^{-4}$ 增大至 $10^{-3}$ 时,累积产油量增加不明显。随着层间窜流作用增强,吸附态油解吸量增加(图5c),这是因为层间窜流越强,页岩纹层压力下降越快,越有利于吸附态油的解吸。

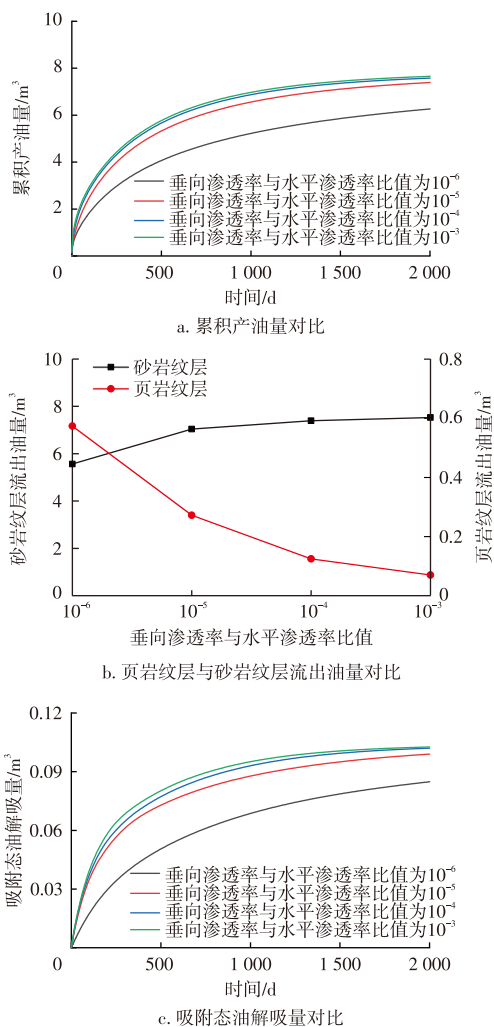


图5 层间窜流的影响

Fig. 5 Effect of interlayer crossflow

### 2.3 储层应力敏感性的影响

弹性开采过程中,储层应力敏感性是影响页岩油流动的重要因素,在实验测定的参数范围内,分别研究了页岩纹层和砂岩纹层应力敏感性对页岩油产量的影响。根据实验认识,应力敏感系数较大的岩心,压缩系数也较大,参考实验数据,分别取页岩纹层应力敏感系数为0.11、0.13、0.15、0.17、0.19 MPa<sup>-1</sup>,对应的页岩纹层压缩系数为0.008、0.009、0.010、0.011、0.012 MPa<sup>-1</sup>,其他参数如表1所示,模拟纹层状储层产油量变化(图6)。可以看出,页岩纹层应力敏感性越强,累积产油量越高(5 a 累积产油量增加约25.7%)(图6a),通过砂岩纹层采出的油量越多,通过页岩纹层采出的油量越少(图6b)。这是因为页岩纹层应力敏感性越强,储层弹性能量越大,累积产油量也相应增大,同时更快速减小的渗透率和更大的压缩性使页岩纹层压力下降速度减慢,层间压差增大,窜流量随之增大,页岩纹层中更多的油流入到砂岩纹层中,页岩

纹层应力敏感性对累积产油量的影响主要体现在生产中后期。另外,随着应力敏感性增强,页岩纹层压降速度减慢,吸附态油的解吸速度也相应减慢(图6c)。

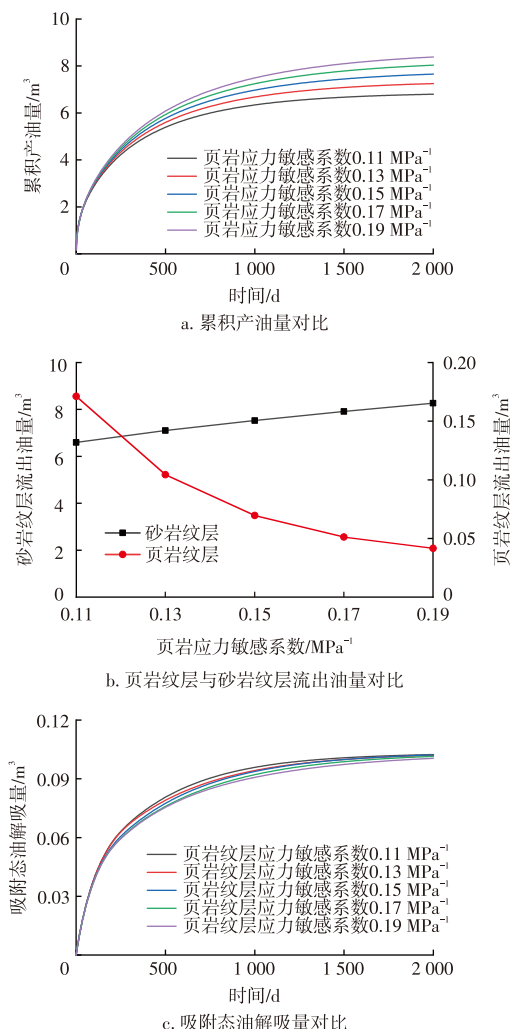


图6 页岩纹层应力敏感性的影响

Fig. 6 Effect of stress sensitivity in shale laminae

根据实验测得砂岩应力敏感性范围,分别取砂岩纹层的应力敏感系数为0.04、0.05、0.06、0.07、0.08 MPa<sup>-1</sup>,对应的压缩系数分别为0.000 9、0.001 0、0.001 1、0.001 2、0.001 3 MPa<sup>-1</sup>,其余参数参考表1,进行页岩油产量模拟(图7)。随砂岩纹层应力敏感性增加,累积产油量减少(5 a 累积产油量减少约5.5%)(图7a),通过砂岩纹层采出的油量减少(图7b),同时砂岩纹层压力下降速度减慢导致层间压差减小,层间窜流减弱,页岩纹层压力下降速度随之减慢,吸附态油解吸速率降低(图7c)。与页岩纹层应力敏感性相比,砂岩纹层应力敏感性对页岩油产量的影响主要体现在生产初期。由此可见,纹层状储层中,较强的页岩纹层应力敏感性有利于提高页岩油产量,较强的砂岩纹层应力敏感性则不利于页岩油的采出。

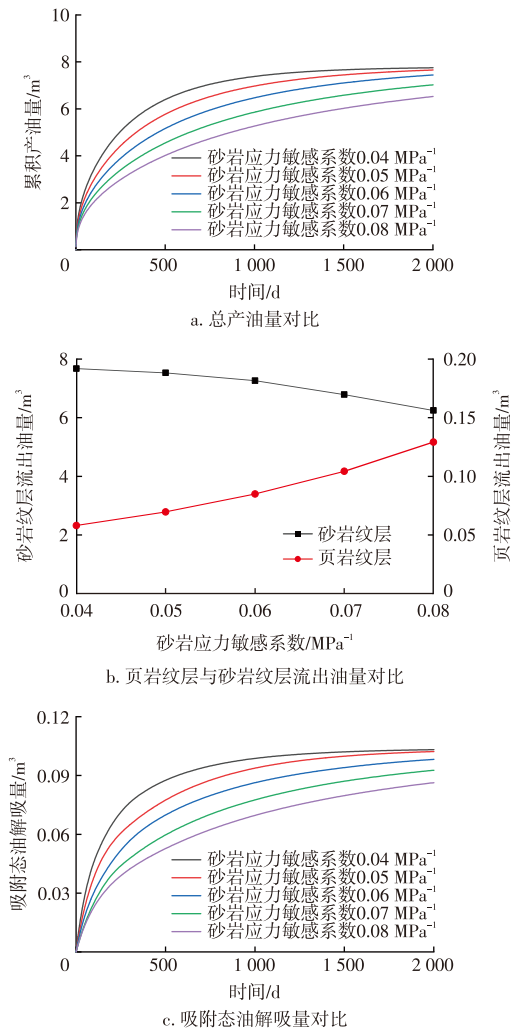


图7 砂岩纹层应力敏感性的影响

Fig. 7 Effect of stress sensitivity in sandstone laminae

### 3 实例分析

渤海湾盆地黄骅坳陷沧东凹陷孔店组二段主要为纹层型页岩储层<sup>[34]</sup>,包含长英质页岩、混合质页岩、灰质白云岩

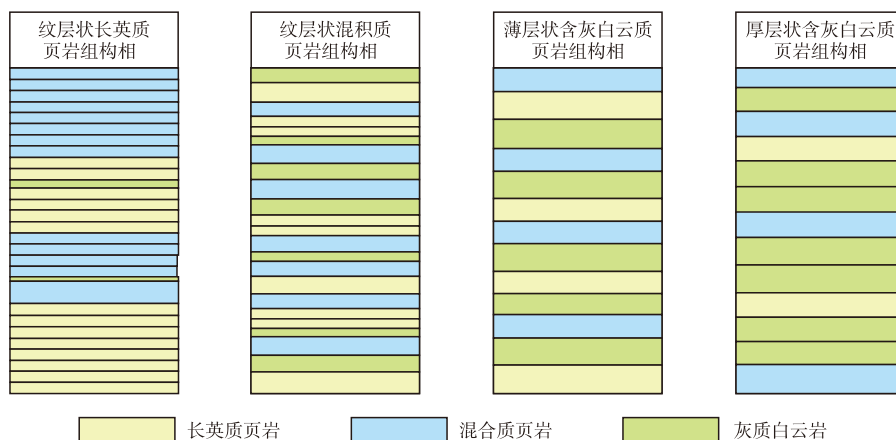


图8 渤海湾盆地黄骅坳陷沧东凹陷孔店组二段页岩优势组构相(据文献[23]、文献[35]修改)

Fig. 8 Dominant fabric facies of Kong-2 member shale in Cangdong Sag, Huanghua Depression, Bohai Bay Basin (modified from references [23] and [25])

云岩3大岩石类型,根据纹层发育程度和岩性纵向叠置关系,页岩层系划分为纹层状长英质页岩、纹层状混积质页岩、薄层状含灰白云质页岩和厚层状含灰白云质页岩4类组构相<sup>[23,35]</sup>(图8)。参考上述4类组构相建立页岩油流动模拟模型(不同类型岩石孔隙度、渗透率、TOC参数取值见表2,其中TOC用于计算不同类型岩石的吸附态油总量,其余在实际矿场研究中未能完全获取的油藏及流体参数参考表1),分析不同组构相的产量(图9)。生产初期,纹层状长英质页岩组构相产油量明显低于另外3类组构相,原因为纹层状长英质页岩组构相的互层现象不如其他组构相明显,且起到导流作用的灰质白云岩较少,导致初期产油量较低。生产中后期,纹层状长英质页岩组构相的累产油量增量高于另外3类组构相,原因为该组构相中长英质页岩和混积质页岩较多,储层弹性能量和吸附态油含量均高于另外3类组构相,导致生产中后期累产油量增量较大。另外3类组构相互层现象较为明显,其中纹层状混积质页岩组构相产油量最高,薄层状含灰白云质页岩组构相次之,厚层状含灰白云质页岩组构相产油量最低,可见层理构造越发育、岩性分布越分散,越有利于页岩油采出。

进一步分析相同生产条件下不同组构相中游离态油和吸附态油的动用量,结果如图10所示。对于游离态油,纹层状长英质页岩组构相和纹层状混积质页岩组构相采出量较高,薄层状含灰白云质页岩组构相和厚层状含灰白云质页岩组构相采出量较低。根据前述分析,纹层状储层中采出的游离态油主要来自于页岩纹层,纹层状长英质页岩组构相的页岩含量最高,因此,游离态油采出量也较高。纹层状混积质页岩组构相、薄层状含灰白云质页岩组构相、厚层状含灰白云质页岩组构相的页岩含量相近,但纹层状混积质页岩组构相的层理构造最为发育,灰质白云岩的导流作用更显著,因此,游离态油采

表2 不同岩石类型物性参数范围及取值  
Table 2 Range and values of physical parameters for different rock types

岩石类型	孔隙度范围/%	孔隙度取值/%	渗透率范围/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	渗透率取值/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	$\omega(\text{TOC})$ 范围/%	$\omega(\text{TOC})$ 取值/%	来源
长英质页岩	0.24~6.03	2.00	0.03~10.00	0.090	1.27~8.76	5.00	文献[8]
混合质页岩	0.28~4.45	3.00	0.02~3.30	0.075	0.82~7.41	4.00	文献[8]
灰质白云岩	0.33~13.22	6.50	0.02~16.20	0.800	0.34~4.62	2.50	文献[8]

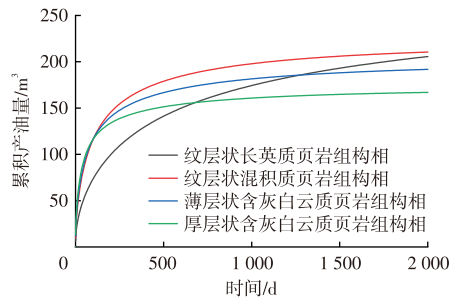


图9 不同组构相累产油量对比

Fig. 9 Comparison of cumulative oil production among different fabric facies

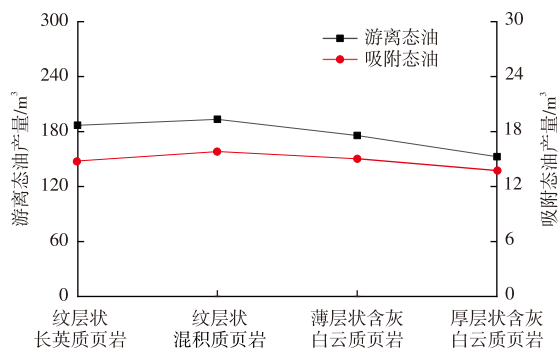


图10 不同赋存状态页岩油动用量

Fig. 10 Mobilized shale oil volumes under different occurrence states

出量较高。对于吸附态油,纹层状混积质页岩组构相和薄层状含灰白云质页岩组构相采出量较高,纹层状长英质页岩组构相和厚层状含灰白云质页岩组构相采出量较低。根据前述分析,吸附态油的解吸量主要受储层压力影响,纹层状混积质页岩组构相和薄层状含灰白云质页岩组构相的层状构造发育程度较高,层间窜流作用明显,储层压力下降速度较快,因此,吸附态油采出量较高。综上,认为纹层状长英质页岩组构相和纹层状混积质页岩组构相是当前页岩油勘探开发的首选类型,模拟结果与实际生产中取得的认识相一致。

## 4 结论

1) 页岩油藏弹性开采过程中,层理构造发育程度和层间窜流作用对页岩油的流动具有重要影响,对于游离

态油,层理构造能够为其流动提供高渗通道,对于吸附态油,层理构造有利于提高其解吸速率。

2) 纹层状页岩储层中,采出的油以页岩纹层中的游离态油为主,且主要通过砂岩纹层流出,页岩纹层应力敏感性越强,越有利于页岩油的开采,而砂岩纹层主要起导流作用,较强的应力敏感性不利于页岩油开采,页岩纹层应力敏感性对流动的影响主要体现在生产中后期,砂岩纹层应力敏感性对流动的影响主要体现在生产初期。

3) 以渤海湾盆地黄骅坳陷沧东凹陷孔店组二段4类典型组构相为例,应用页岩油水平井开采流动模拟模型分析不同组构相页岩油产量,模拟结果与实际生产中取得的认识一致,能够为页岩油开发方案设计及优化提供理论支持。

## 参考文献

- [1] 郭旭升,申宝剑,李志明,等.论我国页岩油气的统一性[J].石油实验地质,2024,46(5):889-905.  
GUO Xusheng, SHEN Baojian, LI Zhiming, et al. Discussion on the uniformity of shale oil and gas in China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(5): 889-905.
- [2] 姜在兴,张建国,孔祥鑫,等.中国陆相页岩油气沉积储层研究进展及发展方向[J].石油学报,2023,44(1):45-71.  
JIANG Zaixing, ZHANG Jianguo, KONG Xiangxin, et al. Research progress and development direction of continental shale oil and gas deposition and reservoirs in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 45-71.
- [3] 马晓潇,黎茂稳,胡克珍,等.渤海湾盆地济阳坳陷古近系异常高压成因及其与陆相页岩油富集的关系[J].石油实验地质,2023,45(1):145-156.  
MA Xiaoxiao, LI Maowen, HU Kezhen, et al. Abnormal pressure genesis and its relationship with continental shale oil accumulation in Paleogene, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(1): 145-156.
- [4] 杨勇,张世明,吕琦,等.中国东部陆相断陷盆地中一低成熟度页岩油立体开发技术:以济阳坳陷古近系沙河街组为例[J].石油学报,2024,45(4):672-682.  
YANG Yong, ZHANG Shiming, LYU Qi, et al. Stereoscopic development techniques for shale oil with low-medium maturity in continental faulted basins in Eastern China: A case study of the Paleogene Shahejie Formation in Jiyang depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(4): 672-682.
- [5] 郭秋麟,米石云,张倩,等.中国页岩油资源评价方法与资源潜力

- 探讨[J]. 石油实验地质, 2023, 45(3): 402-412.
- GUO Qiulin, MI Shiyun, ZHANG Qian, et al. Assessment methods and potential of shale oil resources in China[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(3): 402-412.
- [6] 王燧钊, 侯冰, 王栋, 等. 页岩油多储集层穿层压裂缝高扩展特征[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 402-410.
- WANG Yizhao, HOU Bing, WANG Dong, et al. Features of fracture height propagation in cross-layer fracturing of shale oil reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(2): 402-410.
- [7] 贾梦瑶, 鲍云杰, 李志明, 等. 陆相页岩层系岩心中气态烃井场测定技术初步应用及展望[J]. 石油实验地质, 2024, 46(1): 183-190.
- JIA Mengyao, BAO Yunjie, LI Zhiming, et al. Preliminary application and prospect of well site determination technology of gaseous hydrocarbon in continental shale cores[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2024, 46(1): 183-190.
- [8] 蒲秀刚, 时战楠, 韩文中, 等. 陆相湖盆细粒沉积区页岩层系石油地质特征与油气发现: 以黄骅坳陷沧东凹陷孔二段为例[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 46-58.
- PU Xiugang, SHI Zhannan, HAN Wenzhong, et al. Petroleum geological characteristics and hydrocarbon discovery of shale system in fine-grained sedimentary area of lacustrine basin: A case study of Kong2 Member in Cangdong Sag, Huanghua Depression[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(1): 46-58.
- [9] 朱德顺, 王勇, 朱德燕, 等. 渤南洼陷沙一段夹层型页岩油界定标准及富集主控因素[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(5): 15-20.
- ZHU Deshun, WANG Yong, ZHU Deyan, et al. Analysis on recognition criteria and enrichment factors of interlayer shale oil of Es<sub>1</sub> in Bonan subsag[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(5): 15-20.
- [10] 熊亮, 董晓霞, 王同, 等. 川北地区下侏罗统大安寨段陆相页岩油勘探方向再认识[J]. 石油实验地质, 2024, 46(5): 989-1001.
- XIONG Liang, DONG Xiaoxia, WANG Tong, et al. Reassessment of exploration directions of continental shale oil in Lower Jurassic Da'anzhai Member in northern Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2024, 46(5): 989-1001.
- [11] 卢双舫, 薛海涛, 王民, 等. 页岩油评价中的若干关键问题及研究趋势[J]. 石油学报, 2016, 37(10): 1309-1322.
- LU Shuangfang, XUE Haitao, WANG Min, et al. Several key issues and research trends in evaluation of shale oil[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(10): 1309-1322.
- [12] 桑茜. 页岩油气渗流实验方法及有效动用条件研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- SANG Qian. Experimental methods and effective production conditions of shale oil and gas[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [13] 蒋启贵, 黎茂稳, 钱门辉, 等. 不同赋存状态页岩油定量表征技术与应用研究[J]. 石油实验地质, 2016, 38(6): 842-849.
- JIANG Qigui, LI Maowen, QIAN Menhui, et al. Quantitative characterization of shale oil in different occurrence states and its application[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(6): 842-849.
- [14] CHALMERS G R L, ROSS D J K, BUSTIN R M. Geological controls on matrix permeability of Devonian Gas Shales in the Horn River and Liard basins, northeastern British Columbia, Canada[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 103: 120-131.
- [15] 李睿珊, 李海波, 杨正明, 等. 页岩油藏应力敏感实验研究[J]. 中国科技论文, 2019, 14(9): 969-974.
- LI Ruishan, LI Haibo, YANG Zhengming, et al. Experimental study on stress sensitivity of shale oil reservoir[J]. *China Sciencepaper*, 2019, 14(9): 969-974.
- [16] 王鑫朋, 关富佳, 刘海鹏, 等. 川东龙马溪组页岩渗透率各向异性及应力敏感性实验研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(26): 174-177.
- WANG Xinpeng, GUAN Fujia, LIU Haipeng, et al. Experimental study on permeability anisotropy and stress sensibility of shale of Longmaxi in east Sichuan[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(26): 174-177.
- [17] 张少杰. 页岩油藏应力敏感及渗流特征研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- ZHANG Shaojie. Stress sensitivity and flow characteristics of shale oil reservoirs[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [18] WANG S, FENG Q H, JAVADPOUR F, et al. Oil adsorption in shale nanopores and its effect on recoverable oil-in-place[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 147-148: 9-24.
- [19] ZHANG Q, SU Y L, WANG W D, et al. Apparent permeability for liquid transport in nanopores of shale reservoirs: Coupling flow enhancement and near wall flow[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 115: 224-234.
- [20] 董明哲, 李亚军, 桑茜, 等. 页岩油流动的储层条件和机理[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 636-644.
- DONG Mingzhe, LI Yajun, SANG Qian, et al. Reservoir conditions and mechanism of shale oil flow[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(3): 636-644.
- [21] 刘丽, 闵令元, 孙志刚, 等. 济阳坳陷页岩油储层孔隙结构与渗流特征[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(1): 106-114.
- LIU Li, MIN Lingyuan, SUN Zhigang, et al. Pore structure and percolation characteristics in shale oil reservoir of Jiyang Depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(1): 106-114.
- [22] 华柑霖, 吴松涛, 邱振, 等. 页岩纹层结构分类与储集性能差异: 以四川盆地龙马溪组页岩为例[J]. 沉积学报, 2021, 39(2): 281-296.
- HUA Ganlin, WU Songtao, QIU Zhen, et al. Lamination texture and its effect on reservoir properties: A case study of Longmaxi shale, Sichuan basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(2): 281-296.
- [23] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 断陷湖盆湖相页岩油形成有利条件及富集特征: 以渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段为例[J]. 石油学报, 2019, 40(9): 1013-1029.
- ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Favorable formation conditions and enrichment characteristics of lacustrine facies shale oil in faulted lake basin: A case study of Member 2 of Kongdian Formation in Cangdong sag, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(9): 1013-1029.
- [24] KANFAR M S, CLARKSON C R. Factors affecting huff-n-puff

- efficiency in hydraulically-fractured tight reservoirs[C]//Paper SPE-185062-MS presented at the SPE unconventional resources conference, Calgary, Alberta, Canada, February 15-16, 2017.
- [25] 彭君,周勇水,李红磊,等.渤海湾盆地东濮凹陷盐间细粒沉积岩岩相与含油性特征[J].断块油气田,2021,28(2):212-218.  
PENG Jun, ZHOU Yongshui, LI Honglei, et al. Lithofacies and oil-bearing characteristics of fine-grained sedimentary rocks of salt-layers in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(2): 212-218.
- [26] 张建国,姜在兴,刘立安,等.渤海湾盆地沾化凹陷沙河街组三段下亚段细粒沉积岩岩相特征与沉积演化[J].石油学报,2021,42(3):293-306.  
ZHANG Jianguo, JIANG Zaixing, LIU Li'an, et al. Lithofacies and depositional evolution of fine-grained sedimentary rocks in the lower submember of the Member 3 of Shahejie Formation in Zhanhua sag, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(3): 293-306.
- [27] 周立宏,韩国猛,杨飞,等.渤海湾盆地歧口凹陷沙河街组三段一亚段地质特征与页岩油勘探实践[J].石油与天然气地质,2021,42(2):443-455.  
ZHOU Lihong, HAN Guomeng, YANG Fei, et al. Geological characteristics and shale oil exploration of Es<sup>3(1)</sup> in Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(2): 443-455.
- [28] 张睿,宁正福,杨峰,等.页岩应力敏感实验与机理[J].石油学报,2015,36(2):224-231.  
ZHANG Rui, NING Zhengfu, YANG Feng, et al. Shale stress sensitivity experiment and mechanism[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(2): 224-231.
- [29] 焦春艳,何顺利,谢全,等.超低渗透砂岩储层应力敏感性实验[J].石油学报,2011,32(3):489-494.  
JIAO Chunyan, HE Shunli, XIE Quan, et al. An experimental study on stress-dependent sensitivity of ultra-low permeability sandstone reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 489-494.
- [30] LI M, SU Y L, DONG M Z, et al. A numerical study of fluids desorption and phase behavior in shale oil reservoir using a chemical reaction model[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 196(8): 108050.
- [31] 张明山.页岩油溶解气驱实验研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2018.  
ZHANG Mingshan. Experimental study on solution gas drive in shale [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018.
- [32] 郑玲丽,王思慧,肖文联,等.四川盆地南部地区须家河组致密砂岩应力敏感性特征[J].油气地质与采收率,2024,31(6):1-10.  
ZHENG Lingli, WANG Sihui, XIAO Wenlian, et al. Stress sensitivity characteristics of tight sandstone of Xujiahe Formation in southern part of Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(6): 1-10.
- [33] 田玉明.致密砂岩气藏储层应力敏感性研究[D].北京:中国石油大学(北京),2017.  
TIAN Yuming. Study on stress sensitivity of tight sandstone gas reservoirs[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [34] 周立宏,赵贤正,柴公权,等.陆相页岩油效益勘探开发关键技术与工程实践:以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔二段为例[J].石油勘探与开发,2020,47(5):1059-1066.  
ZHOU Lihong, ZHAO Xianzheng, CHAI Gongquan, et al. Key exploration & development technologies and engineering practice of continental shale oil: A case study of Member 2 of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, East China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 1059-1066.
- [35] 赵贤正,蒲秀刚,周立宏,等.深盆湖相区页岩油富集理论、勘探技术与前景:以渤海湾盆地黄骅坳陷古近系为例[J].石油学报,2021,42(2):143-162.  
ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, ZHOU Lihong, et al. Enrichment theory, exploration technology and prospects of shale oil in lacustrine facies zone of deep basin: A case study of the Paleogene in Huanghua depression, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 143-162.

(编辑 柳超超)

(上接第685页)

- [20] 王新亚.有缆智能分层采油系统井下通信技术研究[D].西安:西安石油大学,2021.  
WANG Xinya. Research on downhole communication technology for intelligent layered oil production with cable [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021.
- [21] 郑忠博.水平井缆控分层采油及测试一体化工艺[J].油气井测试,2020,29(1):28-34.  
ZHENG Zhongbo. Integrated technology of cable controlled stratified oil production and testing in horizontal well[J]. Well Testing, 2020, 29(1): 28-34.
- [22] 付亚荣,陈劲松,张睿荫,等.分层测试和分层采油联作技术[J].石油石化节能,2022,12(3):14-16.  
FU Yaron, CHEN Jinsong, ZHANG Ruiyin, et al. Combined technology of layered testing and layered oil production[J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2022, 12(3): 14-16.
- [23] 孟祥海,夏欢,李彦阅,等.智能分注分采技术应用效果及其影响因素研究[J].当代化工,2022,51(1):156-159.  
MENG Xianghai, XIA Huan, LI Yanyue, et al. Research on application effect and influencing factors of intelligent separate injection and production technology[J]. Contemporary Chemical Industry, 2022, 51(1): 156-159.
- [24] 陈碧波.热洗清蜡油层保护抽油管柱的研制与应用[J].内江科技,2015,36(8):34.  
CHEN Bibo. Development and application of hot cleaning wax oil layer to protect sucker rod string[J]. Nei Jiang Science Technology, 2015, 36(8): 34.

(编辑 李青)