

多层砂岩油藏油井层间干扰机理解析及讨论

耿站立^{1,2*}, 王守磊^{1,2}, 谢晓庆^{1,2}, 郑焱^{1,2}, 高亚军^{1,2}, 宋宣毅^{1,2}

1 海洋石油高效开发国家重点实验室, 北京 100028

2 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100027

* 通信作者, gengzhl@cnooc.com.cn

收稿日期: 2021-03-16

国家科技重大专项“中海油油气开发发展战略研究”(2016ZX05016-006-006)资助

摘要 多层砂岩油藏开发过程中普遍存在层间干扰现象, 众多学者从不同角度开展了层间干扰机理、规律及应对策略研究, 但层间干扰机理的认识程度多数停留在层间干扰系数宏观规律统计及对矿场应用的经验指导层面, 有必要开展深入的定量化解析及讨论。本文首先从矿场油井层间干扰测试资料分析入手, 确定了层间干扰研究的突破点, 然后采用油藏数值模拟方法模拟了考虑启动压力梯度影响的油井产能测试过程, 厘清了油井层间干扰规律, 并综合诸多因素分析揭示了多层砂岩油藏层间干扰机理; 最后深化了储层纵向非均质性认识, 并探讨了油藏非均质性表征研究思路, 为提高多层砂岩油藏油井产能预测精度、制定更加精细的开发对策提供理论、技术指导。

关键词 多层砂岩油藏; 产能测试; 层间干扰; 启动压力梯度; 储层非均质性

中图分类号: TE343; P5

Analysis and discussion on the interlayer interference mechanisms of oil wells in a multilayer sandstone reservoir

GENG Zhanli^{1,2}, WANG Shoulei^{1,2}, XIE Xiaoqing^{1,2}, ZHENG Yan^{1,2}, GAO Yajun^{1,2}, SONG Xuanyi^{1,2}

1 State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, Beijing 100028, China

2 CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100028, China

Abstract Interlayer interference exists commonly during the development of multilayer sand reservoirs. Research into the mechanisms and countermeasures of interlayer interference has been undertaken from various perspectives by many scholars. However, the degree of understanding and its applications are less than adequate. Therefore, it is necessary to further quantitatively analyze and discuss interlayer interference in depth. The phenomenon of the interlayer interference is firstly identified with the production capacity testing of oilfield production wells. Then the simulations of the well productivity testing considering threshold pressure gradient are conducted to deepen the understanding of the producer interlayer interference. Next, the mechanisms of the producer interlayer interference are revealed based on a multiple factor analysis. Finally, an understanding of reservoir vertical heterogeneity is proposed and the way to characterize the reservoir heterogeneity is discussed. This study provides a strong theoretical basis and technical guidance to improve productivity prediction accuracy and make more precise development strategies for multilayer sand reservoirs.

Keywords multilayer sand reservoir productivity testing; interlayer interference; threshold pressure gradient; reservoir heterogeneity

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.024

引用格式: 耿站立, 王守磊, 谢晓庆, 郑焱, 高亚军, 宋宣毅. 多层砂岩油藏油井层间干扰机理解析及讨论. 石油科学通报, 2024, 02: 338-345
GENG Zhanli, WANG Shoulei, XIE Xiaoqing, ZHENG Yan, GAO Yajun, SONG Xuanyi. Analysis and discussion on the interlayer interference mechanisms of oil wells in a multilayer sandstone reservoir. Petroleum Science Bulletin, 2024, 02: 338-345. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.024

0 引言

多层砂岩油藏具有储层非均质性强、纵向跨度大、含油井段长、小层数量多等特点，平面上由于沉积环境和能量的不同，储层微观及宏观非均质性均较强，开发过程中普遍存在层间干扰现象。近 40 年来，仅国内以“层间干扰”为主题的文献多达 200 余篇，众多学者从不同角度开展了层间干扰机理、规律及应对策略研究，但研究重点基本集中于层间干扰规律和应对策略研究，尚未透彻地揭示层间干扰机理，也未能从根本上将其机理应用于油藏工程方法及油藏数值模拟技术改进与完善之中。早在 1981 年，陈元千^[1]根据矿场实际资料统计研究，系统地分析讨论了层间干扰规律，并提出了油井控制厚度的合理标准；随后两年，袁奕群^[2]、陈永生^[3]、赵永胜^[4]、王启民^[5]分别根据矿场试验情况，系统地讨论了注水井层间干扰规律，并提出了优化开发层系组合的策略。上述五位学者基本上从矿场试验资料定量研究及层间干扰规律定性分析的角度，奠定了多层砂岩油藏层间干扰研究的理论与实践基础。后来，更多学者^[6-7]从室内实验、油藏工程方法校正、油藏数值模拟研究、矿场资料分析等角度系统地开展了油井层间干扰规律、产能预测方法及开发策略研究，其中层间干扰机理研究也仅仅是通过室内实验的手段再现矿场试验的过程，进而分析室内实验过程中的层间干扰规律，或者通过敏感性因素的统计规律定量表征层间干扰的程度，这些研究成果是对以往研究成果的加深和有益补充，在很大程度上指导了多层砂岩油藏油井产能预测和开发策略制定。

本文首先从矿场油井层间干扰测试资料分析入手，选取单个油井作为层间干扰研究的突破点，进而通过在数值模拟软件中设置启动压力梯度参数模拟了油井产能测试过程，从而深化了油井层间干扰规律的认识，综合诸多因素分析揭示了层间干扰机理，最终深化了对多层砂岩油藏层间干扰机理认识；在此基础上，深化了储层纵向非均质性认识，并探讨了油藏非均质性表征研究思路，为提高多层砂岩油藏油井产能预测精度、制定更加精细的开发对策提供理论、技术指导。

1 多层砂岩油藏矿场层间干扰现象

关于油藏矿场层间干扰现象，从油田开发工作者关注的角度，可以大致分为 3 类：一是全油藏系统的层间干扰，主要表现为层间水淹程度不同、开发效果差异大，这是广义上的层间干扰，是全油藏宏观

与微观非均质性、开发层系组合方式、井网井型及油田开发技术政策等综合作用的结果；二是油井层间干扰，产液剖面测试过程中主要表现为层间产液比例、含水率差异大，产能测试过程中主要表现为分采与合采产能差异大；三是注水井层间干扰，吸水剖面测试过程中主要表现为层间吸水比例差异大，注入能力测试过程中主要表现为分注与合注吸水能力差异大。本文选取影响因素相对简单的油井产能测试过程作为多层砂岩油藏层间干扰机理的突破口，力争在诸多影响因素中发现层间干扰的主控因素，进而揭示其机理。

1.1 海上油田矿场产能测试情况

海上油田开发成本高，多采用大段合采方式开发，层间干扰程度较陆地油田更为严重。统计海上 SZ 油田矿场 9 口油井产能测试资料发现(图 1)，无论是无水采油期还是中高含水期，多数油井存在显著的层间干扰现象，干扰系数^[8]在 0~0.88 之间，平均为 0.51。由于多数油井层间非均质性强，产能测试得到的比采油指数差异较大，比采油指数反映了储层物性、原油粘度、完井表皮等综合因素的作用结果。由图 1 可知，当分采比采油指数变异系数小于 0.5 时，分采比采油指数变异系数越大，合采干扰系数也越大；当分采比采油指数变异系数大于 0.5 时，分采比采油指数变异系数越大，合采干扰系数就越小，可以理解为部分层段分采比采油指数小到一定程度时，无论合采还是分采贡献均很小，层间干扰程度也就越小。因此，有必要进一步揭示分采比采油指数与合采比采油指数差异的真正原因。

1.2 矿场产能测试典型案例分析

以海上 SZ 油田 L04 井为例，系统分析了产能测试

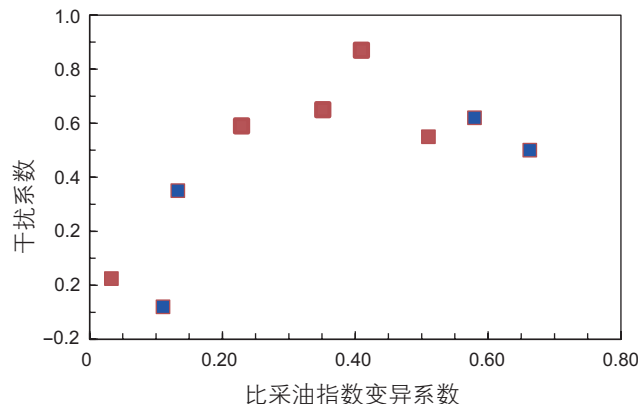


图 1 海上油田矿场油井层间干扰情况
Fig. 1 The offshore oilfield test data of interlayer interference

过程及资料。该井2009年12月28日投产,射开厚度为52.4 m,射开层位东营组的Iu、Id、II油组,分4段防砂,采用Y分管柱分采,下入泵排量350 m³/d。初期30 Hz生产,日产液164 m³/d,综合含水率72%,逐渐提频至50 Hz,正常生产时日产液450 m³/d左右,日产油63 m³/d,综合含水率86%。经分析认为Iu油组的4.2小层出水,2010年10月23至11月2日卡层作业,关第二防砂段(4.2小层)滑套,生产第一、三、四防砂段,作业后日产液212 m³/d,综合含水率80%。正常后计量日产液350 m³/d左右,日产油100 m³/d,综合含水率72%。2011年1月6日至10日测产出剖面,第一防砂段产出液为88.8%,第二防砂段关,第三防砂段不出,第四防砂段产出液为21.2%。

为了掌握该井各防砂段产能状况、确定合理工作制度,对其进行了分段静压、流压及产能测试(表1)。全井段测试与分段测试时,均采用30 Hz、35 Hz、40 Hz、50 Hz该4个频率采用泵排的方式进行产能测试,泵的排量由小到大的顺序连续生产,每个频率排量要求达到稳定状态。

由表1可以看出,该井产能测试具有如下特点和规律:

(1)在同一工作频率下,合采普遍高于分采生产压差,这主要是因为合采时生产层位多、产液能力充足,较低的生产压差即可使电潜泵在相应工作频率下达到

稳定工作状态。

(2)产油能力层间干扰程度处于较高水平,干扰系数在0.44~0.57之间,平均为0.50;值得注意的是,产液能力层间干扰程度几乎在工程误差范围之内,干扰系数在-0.01~-0.05之间,平均为-0.03,说明由于原油粘度远高于地层水粘度,当合采时产油能力被干扰,产水能力相应增加,稳定后与当前电潜泵工作制度相匹配,整体上表现为产液能力未受到干扰。

(3)随着电潜泵工作频率的增加,各防砂段产油能力整体上呈增加趋势,全井段产油能力干扰程度增加;同时,合采时综合含水率上升,分采时部分防砂段(Iu、II)综合含水率整体下降而部分防砂段(Id)综合含水率整体上升,说明当电潜泵工作频率增加时,主力防砂段Id部分小层产水加剧,从而抑制了原油产出。

该井产能测试结果集中体现了油井工作制度变化引起的层间干扰过程及干扰程度,由于测试时间较短,受层系划分组合、井网形式等复杂因素的影响较小,可以作为层砂岩油藏层间干扰机理的突破口。

2 油井层间干扰机理解析

根据前人^[6]研究成果,低流度储层启动压力梯度现象是产生层间干扰的重要影响因素之一。在分析多层砂岩油藏矿场层间干扰现象及规律的基础上,选择

表1 海上SZ油田L04井产能测试情况

Table 1 Well L04 productivity testing data of the offshore oilfield SZ

测试井段	频率/Hz	产量/(m ³ /d)			含水率/%	压力/MPa			比采指数/(m ³ /MPa·d)		干扰系数	
		液	油	油		静压	流压	生产压差	液	油	油	液
全井段	30	166	23	86	11.82	10.51	1.22	136.5	19.1	0.44	-0.01	
	35	248	30	88	11.82	10.10	1.63	152.7	18.3	0.50	-0.05	
	40	329	39	88	11.82	9.59	2.14	153.9	18.5	0.50	-0.02	
	50	446	45	90	11.82	8.84	2.89	154.5	15.5	0.57	-0.02	
Iu防砂段	30	83	30	64	13.35	7.90	5.23	15.8	5.7	/	/	
	35	117	41	65	13.35	6.32	6.82	17.1	6.0	/	/	
	40	146	70	52	13.35	4.48	8.65	16.8	8.1	/	/	
	50	156	81	48	13.35	3.48	9.66	16.2	8.4	/	/	
Id防砂段	30	142	34	76	11.20	9.97	1.23	115.4	27.7	/	/	
	35	209	50	76	11.20	9.51	1.69	123.8	29.7	/	/	
	40	292	64	78	11.20	8.92	2.27	128.4	28.2	/	/	
	50	428	86	80	11.20	7.97	3.27	130.7	26.1	/	/	
II防砂段	30	11	1.7	84	11.37	8.72	2.65	4.1	0.7	/	/	
	35	24	4.9	80	11.37	6.60	4.77	5.1	1.0	/	/	
	40	38	6.9	82	11.37	3.83	7.54	5.1	0.9	/	/	
	50	36	8.7	76	11.37	3.73	7.64	4.7	1.1	/	/	

以模拟油井产能测试过程作为多层砂岩油藏层间干扰机理的突破口,分析了启动压力梯度对层间干扰的影响程度,进而揭示了其机理,并分析了油井层间干扰的基本规律,为开展深入的机理描述及应用研究奠定理论基础。

2.1 低流量储层非线性渗流模型

目前超低渗、特低渗及低渗油藏的非线性渗流机理研究,已成为超低渗、特低渗及低渗油藏开发技术和开发策略制定的根本出发点。对于中高粘及稠油油藏中的低流量储层,根据矿场资料分析^[9]、室内实验研究^[10]及机理分析^[11],也同样存在非线性渗流现象,这主要是因为稠油中的表面活性组分(沥青质和角质)在岩石孔喉表面的吸附,形成边界层,当驱替压力较小时,低流量储层边界层未发生破坏,流体不发生流动。随着驱替压力的增大,边界层发生破坏,流体开始发生流动。

目前研究非线性渗流理论时常用的渗流模型主要有3种,一是引入启动压力梯度项,即非连续模型,二是连续模型,三是分段模型。以非连续模型为基础发展的理论相对成熟,该模型适用于拟启动压力梯度较小的常规低渗透油藏。分段模型的研究有一定的进展,这种模型涉及到线性和非线性渗流的临界点判断,具体应用有一定的难度^[12]。三参数模型是反映非线性渗流规律的连续模型,以此为基础的相关理论也有了初步的进展^[13-15],但无法反映渗流存在最小启动压力梯度的现象。杨清立等人^[16]建立的模型可以对低流量油藏的渗流特征进行准确的描述,本文参照该模型建立了低流量储层非线性渗流连续模型(式1)和非连续模型(式2),可以此为基础进行理论上的深入研究。

$$\bar{v}_o = \begin{cases} 0 & |\nabla\phi_o| < G_T \\ -\frac{KK_{ro}}{\mu_o} \nabla\phi_o \left(1 - \frac{1}{a+b|\nabla\phi_o|}\right) & |\nabla\phi_o| \geq G_T \end{cases} \quad (1)$$

$$\bar{v}_o = \begin{cases} 0 & |\nabla\phi_o| < G_p \\ -\frac{KK_{ro}}{\mu_o} (\nabla\phi_o - G_p) & |\nabla\phi_o| \geq G_p \end{cases} \quad (2)$$

其中: \bar{v}_o 表示油相渗流速度; K 为岩心空气渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$; K_{ro} 油相相对渗透率; μ_o 为原油粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; $\nabla\phi_o$ 为油相压力梯度; G_p 为拟启动压力梯度, MPa/m ; $G_T = \frac{1-a}{b}$,为真实启动压力梯度, MPa/m ; $b = \frac{1}{G_p}$;为非线性系数,是一个常数, $a \geq 0$,当时 $a=0$, $G_T = G_p = \frac{1}{b}$,

方程变为非达西流动,当 $a \geq 1$ 时, $G_T = 0$ 。

本文采用商业数值模拟软件Eclipse模拟低流量储层的油井产能测试过程,其渗流原理如(2)式所示,对于不同流量原油的启动压力梯度,通过恒流法^[17]来测定,具体实验过程可参考文献^[18]。实验采用的7块岩心取自于渤海某稠油SZ油藏,实验用油取自目标油田井口脱水原油,并与航空煤油混合配制到目标油田井区地下原油粘度,实验用水为与地层水矿化度相同的模拟地层水,其中地下原油粘度为 $202\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。根据上述7块岩心的拟启动压力梯度、真实启动压力梯度与流量关系曲线(图2),回归建立了目标油田拟启动压力梯度、真实启动压力梯度与流量的关系(式3、式4)。

$$G_p = 0.6989 \left(\frac{K}{\mu_o}\right)^{-1.1147} \quad (3)$$

$$G_T = 0.3010 \left(\frac{K}{\mu_o}\right)^{-1.3773} \quad (4)$$

由式3、式4可以看出,拟启动压力梯度、真实启动压力梯度主要与原油流量有关^[19-21]。随着流量的降低,拟启动压力梯度、真实启动压力梯度均呈幂指数形式增大。当 $K=2000\text{ mD}$ 、 $\mu_o=200\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 时, $G_p=0.0537\text{ MPa}/\text{m}$, $G_T=0.0123\text{ MPa}/\text{m}$, $a=0.76$, $b=18.63$ 。

2.2 油井层间干扰机理揭示

在分析SZ油田L04井产能测试流程的基础上,使用Eclipse模拟了B06井产能测试过程,并使用THPRES关键字,结合物理实验得到的非线性渗流规律关系式(3),考虑了启动压力梯度,具体过程可参考

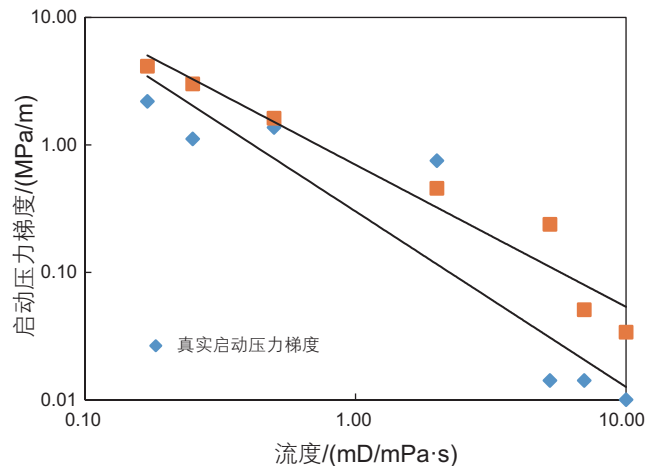


图2 拟启动压力梯度、真实启动压力梯度与流量关系
Fig. 2 The relationship among pseudo pressure gradient, true pressure gradient and mobility

文献^[18]。

模拟过程中依次为改变测试层段、每个工作制度稳定生产、计算当前工作制度下井底流压、停泵计算当前工作制度下井区静压。在产能测试模拟流程和方法的基础上,研究了不考虑拟启动压力梯度和考虑拟启动压力梯度情况下不同测试阶段的层间干扰情况(图3)、不同拟启动压力梯度条件下的层间干扰情况(图4)。

由图3可知,在数值模拟过程中,当仅考虑常规的储层非均质性和流体非均质性时,可以模拟得到部分(约40%)的油井层间干扰效果;当进一步考虑拟启动压力梯度时,可以模拟得到与矿场测试结果(图1)接近的层间干扰效果;在任何测试阶段,考虑拟启动压力梯度以后层间干扰系数均显著增加,并且接近于矿场测试结果。同时,由图3可知,随着拟启动压力梯度的增加,层间干扰程度也相应增加。

综上所述,在多层非均质性砂岩油藏中,油井层间干扰现象是普遍存在的,即便对于非均质性中低粘

油藏,也会存在一定程度的层间干扰现象;对于非均质性中高粘、稠油油藏则会存在显著的层间干扰现象,其中因储层原油流度过低引起的拟启动压力梯度现象是低流度油藏产生层间干扰的最大控制因素。

因此,油井层间干扰是地质油藏非均质性诱发的、受低流度储层启动压力梯度机制主导的储层渗流物理现象。

2.3 油井层间干扰规律分析

为进一步分析多层砂岩油藏油井层间干扰规律,以B06井测井分度点(0.1 m)为单位,建立了纵向上精细油藏数值模型,采用上述数值模拟方法,模拟了无水采油期储层有效动用情况(图5),其中横轴为按照测井分度点精度级别储层渗透率从大到小排序后的累积厚度,紫色和黄色部分分别为生产压差放大至3.5 MPa、5.0 MPa时增加动用的有效厚度。由图5可知,随着生产压差的增加,储层有效动用厚度逐

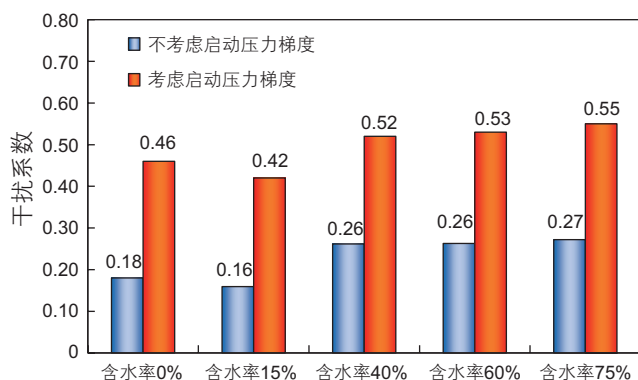


图3 不同含水阶段拟启动压力梯度的影响程度差异

Fig. 3 The influence of threshold pressure gradient on interlayer interference in different water-cut stage

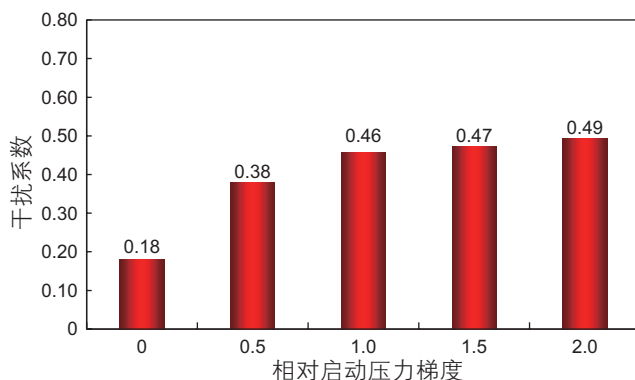


图4 无水采油期拟启动压力梯度敏感性差异

Fig. 4 The sensitivity difference of threshold pressure gradient in water free oil production stage

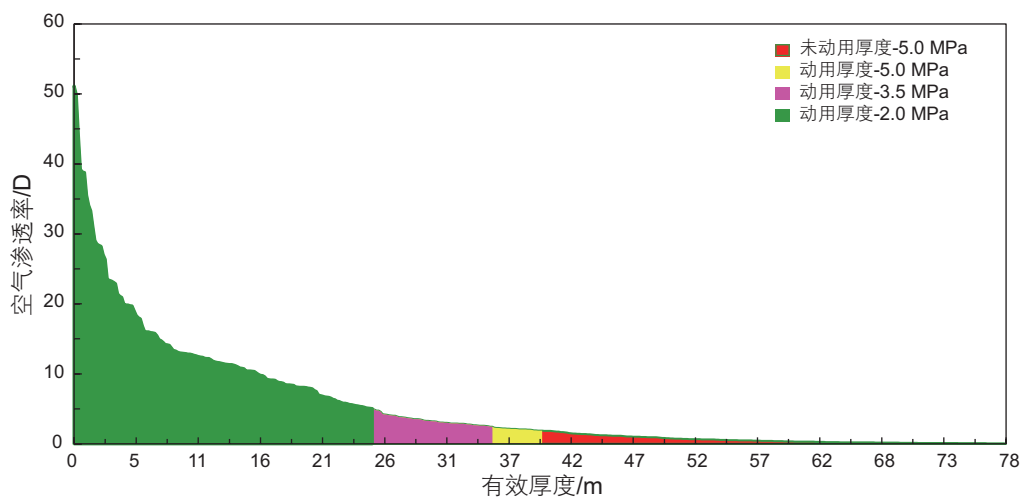


图5 无水采油期储层有效动用情况

Fig. 5 The development state of the reservoir in the water free oil production stage

渐增加，其中当生产压差分别为 2.0 MPa、3.5 MPa、5.0 MPa 时，有效动用厚度仅分别为 32%、45%、50%。由此可见，在合采时较低的生产压差条件下，大部分储层未得到有效动用。同时，对比了生产压差分别为 2.0 MPa、5.0 MPa 时测井分度点精度级别储层的采油指数分布情况(图 6)，其中横轴为 B06 井射开层位自上而下测井分度点精度级别储层的叠加有效厚度。由图 6 可知，当分采时，由于放大生产压差生产，有效克服了启动压力梯度的影响，不同分度点位采油指数均显著增加；经统计发现，储层原油流量越低，采油指数相对增加幅度越大，表明在放大生产压差的过程中，低流量储层克服启动压力梯度后，有效驱替压力梯度增加幅度较大。

3 油井层间干扰机理讨论

通过上述纵向精细油藏数值模拟结果分析，在再现实际油藏油井层间干扰规律的基础上，从深入分析油井层间干扰机理出发，讨论了储层纵向非均质性认识及油藏非均质性表征思路，为开展后续深入理论研究及开发策略研究提供理论、技术借鉴。

3.1 常规的储层非均质性表征方式分析

海上油田一般采用电潜泵进行生产，从短期来看，在某一工作频率条件下，近于定液生产，启泵后，电潜泵排量逐步增加并趋于稳定；从长期来看，随着油井含水率的增加，储层供液能力增加，通过提频提液

控制合理生产压差，近于定压生产。

以 B06 井为例(图 5、图 6)，从传统地质认识角度(以小层为单位)，按照一般地质分层顺序的方式进行分析，小层间渗透率级差为 6.3；而实际油藏生产过程中，只要射开含油层段，是没有地质分层概念的，随着电潜泵的启动，生产压差逐步放大，渗透率高、原油流量大的“点位”优先产出且产量贡献比例高，按照渗透率或者原油流量由大到小排序后，如果分别按照 2 个、3 个、5 个、10 个层段进行划分，渗透率级差分别为 18 倍、65 倍、134 倍、319 倍，远高于传统地质分层方式下的储层非均质性。

因此，基于储层非均质性表征的传统思路，原始精细的测井结果被对应到沉积意义的小层中，再经过地质建模到数值模拟模型的粗化过程，建立了对层间、层内非均质认识；这种“组合化、顺序性”的认识与生产过程中电潜泵启动后储层“点位”动用顺序、组合是不对应的，实际油藏生产动用意义上的强非均质性信息被严重忽略，有必要进一步讨论油藏非均质性表征研究思路。

3.2 油藏非均质性表征研究思路讨论

广义来看，油藏非均质性包括储层非均质性和流体性质非均质性。储层非均质性是指油气储层在漫长的地质历史中，经历了沉积、成岩及后期构造作用的综合影响，使储层的空间分布及内部的各种属性都存在极不均匀的变化。储层非均质性的研究是油藏描述和表征的核心内容。综合考虑储层非均质性的规模、

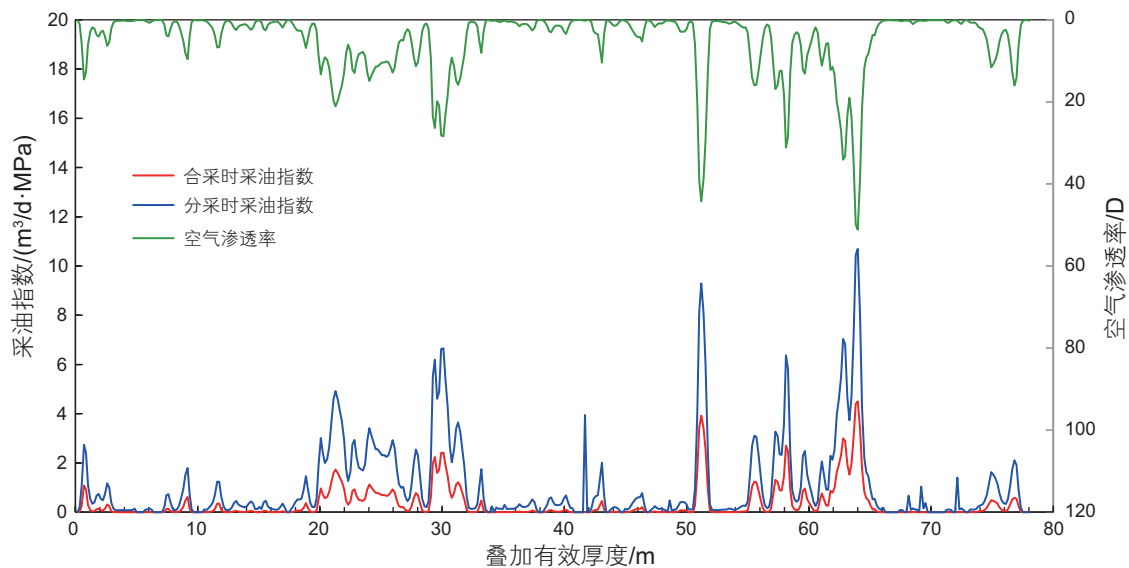


图 6 无水采油期分采与合采条件下采油指数变化情况

Fig. 6 The variation of oil production index under separate layer production and commingled production in water free oil production stage

油藏开发生产研究的实用性, 裘亦楠^[19]将碎屑岩的储层非均质性由大到小分为4类, 即平面、层间、层内及孔隙非均质性, 这也是现代油藏工程及数值模拟研究中储层非均质性表征的重要依据。从油藏开发生产角度, 流体非均质性一般表现为不同储层空间原油粘度的差异, 与储层渗透率共同决定了原油的流动能力。

如前文所述, 本文为确定影响油井层间干扰的主控因素, 选择以模拟油井产能测试过程作为多层砂岩油藏层间干扰机理的突破口, 模拟过程中主要考虑了储层层间、层内及流体非均质性, 未涉及储层平面非均质性, 事实上, 储层平面非均质性及井网的不完善性会导致储层压力梯度存在差异, 也会进一步加剧层间干扰现象。综合考虑油藏全局的非均质性, 国内外学者开展了大量的诸如储层构型^[20]及其等效表征^[21]技术; 同时, 商业油藏数值模拟软件技术及计算能力也达到了极高的水平, 在很大程度上可以精细模拟油藏全局的非均质性。但往往为了实用、灵活起见, 一般情况下, 精细的油藏数值模型仍未能真实刻画油藏非均质性, 尤其是如3.1节所述的生产动用意义的油藏非均质性描述。

从油藏生产动用意义考虑, 笔者基于层内非均质储层的含水上升规律不等同于相同渗透率均质储层的含水规律的认识, 曾探索了多层砂岩油藏层内纵向非均质性表征方法^[22], 即根据具有区域代表性的岩芯规模的相对渗透率曲线计算出任意测井分度点的相对渗透率曲线; 基于层状砂岩油藏动力拟函数的思想, 计算出井点小层规模的动力拟相对渗透率曲线; 研究了岩芯规模的相对渗透率函数与小层规模动力拟相对渗透率函数之间的关系; 采用插值方法得到井间任意网格动力拟相对渗透率曲线; 最后采用等效含水率方法对油藏模型任意网格的原始相对渗透率曲线进行端点标定, 确定不同区域的动力拟相对渗透率曲线。采用上述方法对海上M油田X井组进行了历史拟合, 与传

统数值模拟方法相比, 该方法历史拟合程度更高, 更能精确地描述非均质性储层综合驱替特征。

同时, 从相当程度上来说, 油藏开发过程中原生及次生的大孔道或者优势渗流通道难以描述的问题, 也是层内动态非均质性未能精细描述的结果, 如果能够在低流度储层动用机理机制研究的基础上提出有效的层内动态非均质性等效表征方法, 将能更加精细地描述多层合采油藏大孔道或者优势渗流通道窜流、层间干扰过程, 为提高产能预测精度、制度合理开发策略提供坚实的理论和技术支撑。

4 结论与认识

结合多层砂岩油藏油井层间干扰机理、规律研究及储层纵向非均质性等效表征探索成果, 讨论了油藏全局性非均质性精细表征的研究思路, 得到如下的结论与认识:

(1) 多层砂岩油藏开发过程中存在普遍的层间干扰现象, 是全油藏宏观与微观非均质性、开发层系组合方式、井网井型及油田开发技术政策等综合作用的结果;

(2) 从矿场油井层间干扰测试资料分析入手, 选择以模拟油井产能测试过程作为多层砂岩油藏层间干扰机理的突破口, 揭示了油井层间干扰机理, 即油井层间干扰是地质油藏非均质性诱发的、低流度储层启动压力梯度机制主导的储层渗流物理现象;

(3) 在实际油藏油井层间干扰规律模拟基础上, 从深入分析油井层间干扰机理出发, 认为实际油藏生产动用意义上的强非均质性信息被严重忽略, 进而讨论了储层纵向非均质性认识及油藏非均质性表征研究思路, 建议深入低流度储层动用机理机制和研究油藏全局性动态非均质性表征技术, 为后续深入理论研究及开发策略研究提供理论和技术指导。

参考文献

- [1] 陈元千. 层间干扰对油井产能的影响[J]. 石油钻采工艺, 1981, 5(3): 57-61. [CHEN Y Q. The influence of interlayer interference on oil well productivity[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1981, 5(3): 57-61.]
- [2] 袁奕群, 马志元. 注水井层间干扰现场试验[J]. 石油勘探与开发, 1981, 8(4): 68-72. [YUAN Y Q, MA Z Y. The field test of interlayer interference for the water injection well[J]. Petroleum Exploration and Development, 1981, 8(4): 68-72.]
- [3] 陈永生. 浅谈注水井的层间干扰探讨[J]. 石油勘探与开发, 1983, 4(1): 39-47. [CHEN Y S. A discussion of the interlayer interference in a water injection well[J]. Petroleum Exploration and Development, 1983, 4(1): 39-47.]
- [4] 赵永胜. 注水井层间干扰的探讨[J]. 石油勘探与开发, 1983, 10(1): 64-69. [ZHAO Y S. A discussion on the interlayer interference in water-injection wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 1983, 10(1): 64-69.]
- [5] 王启民, 宋永, 警卫平. 分层开采矿场试验初步总结[J]. 大庆油田, 1982, 1(2): 96-104. [WANG Q M, SONG Y, ZI W P. Preliminary conclusion on field test of exploitation by zonal segregation[J]. Daqing Oil Field, 1982, 1(2): 96-104.]

- [6] 黄世军, 康博韬, 程林松, 等. 海上普通稠油油藏多层合采层间干扰定量表征与定向井产能预测[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(4): 488–495. [HUANG S J, KANG B T, CHEN L S, et al. Quantitative characterization of interlayer interference and productivity prediction of directional wells in the multilayer commingled production of ordinary offshore heavy oil reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(4): 488–495.]
- [7] 刘洪杰. 常规油藏多层合采层间干扰系数确定新方法[J]. 石油地质与工程, 2013, 27(9): 80–82. [LIU H J. New determination method of interlayer interference coefficient among commingling production layers in conventional reservoirs[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2013, 27(9): 80–82.]
- [8] 许亚南, 龙明, 于登飞, 等. 渤海Q油田层间干扰定量表征技术及应用[J]. 石油地质与工程, 2017, 31(2): 79–80. [XU Y N, LONG M, YU D F, et al. Quantitative characterization of interlayer interference and its application in Bohai Q oilfield[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2017, 31(2): 79–80.]
- [9] 罗宪波, 赵春明, 武海燕, 等. 海上油田多层合采层间干扰系数确定[J]. 大庆石油地质与开发, 2012, 31(5): 102–104. [LUO X B, ZHAO C M, WU H Y, et al. Determination of the interference coefficient among the commingled production layers in offshore oilfield[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2012, 31(5): 102–104.]
- [10] 汪伟英, 喻高明, 柯文丽, 等. 稠油非线性渗流测定方法研究[J]. 石油实验地质, 2013, 35(4): 464–467. [WANG W Y, YU G M, KE W L, et al. Experimental study of nonlinear seepage for heavy oil[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(4): 464–467.]
- [11] 姚同玉, 黄延章, 李继山, 等. 孔隙介质中稠油流体非线性渗流方程[J]. 力学学报, 2012, 44(1): 106–110. [YAO T Y, HUANG Y Z, LI J S, et al. Nonlinear flow equations for heavy oil in porous media[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2012, 44(1): 106–110.]
- [12] 阮敏, 何秋轩. 低渗透非达西渗流临界点及临界参数判别法[J]. 西安石油学院学报, 1999, 14(3): 9–10. [RUAN M, HE Q X. Determination of the Critical Point of Nondarcy Flow Through Low Permeability Porous Media and Judgement of Darcy Flow and Nondarcy Flow[J]. Journal of Xian Petroleum Institute, 1999, 14(3): 9–10.]
- [13] 邓英尔, 刘慈群. 垂直裂缝井开发低渗油藏非线性渗流压力分析[J]. 石油勘探与开发, 2003, 3(1): 81–84. [DENG Y E and LIU C Q. Analysis of pressure of nonlinear flow through low-permeability reservoir with vertically fractured well producing[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 3(1): 81–84.]
- [14] 邓英尔, 刘慈群, 王允诚. 垂直裂缝井两相非达西椭圆渗流特征线解、差分解及开发指标计算方法[J]. 石油勘探与开发, 2000, 20(1): 60–66. [DENG Y E, LIU C Q, WANG Y C. Characteristic solution and finite difference solution of two-phase percolation in the direction of normal of ellipse and calculation of development indexes[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 20(1): 60–66.]
- [15] 邓英尔, 刘慈群. 两相流体非线性渗流模型及其应用[J]. 应用数学和力学, 2003, 24(10): 1049–1055. [DENG Y E, LIU C Q. Mathematical Model of Two-Phase Fluid Nonlinear Flow in Low-Permeability Porous Media with Applications[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2003, 24(10): 1049–1055.]
- [16] 杨清立, 杨正明, 王一飞, 等. 特低渗透油藏渗流理论研究[J]. 钻采工艺, 2007, 30(6): 52–55. DRILLING & PRODUCTION TECHNOLOGY. [YANG Q L, YANG Z M, WANG Y F et al. Study on flow theory in ultra-low permeability oil reservoir[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(6): 52–55.]
- [17] 柯文丽. 稠油非线性渗流规律研究[D]. 武汉: 长江大学, 2013. [KE W L. Research on nonlinear percolation law of heavy oil[D]. Wuhan: Yangtze University, 2013.]
- [18] 王守磊, 耿站立, 安桂荣. 海上稠油油藏层间干扰系数确定新方法[J]. 中国海上油气, 2017, 29(5): 90–95. [WANG S L, GENG Z L, AN G R. A new method of determining the interlayer interference coefficient in offshore heavy oil reservoir[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(5): 90–95.]
- [19] 裘亦楠. 石油开发地质方法论(一)[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(2): 43–48. [QIU Y N. The methodology of petroleum development geology (I)[J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(2): 43–48.]
- [20] 邓猛, 邵英博, 赵军寿, 等. 渤海A油田明化镇组下段河—坝砂体储层构型及剩余油分布[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(6): 154–163. [DENG M, SHAO Y B, ZHAO J S, et al. Reservoir architecture and remaining oil distribution of channel-bar: a case from lower Minghuazhen Formation in Bohai A oilfield[J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(6): 154–163.]
- [21] 胡光义, 肖大坤, 范廷恩, 等. 河流相储层构型研究新理论、新方法——海上油田河流相复合砂体构型概念、内容及表征方法[J]. 古地理学报, 2019, 21(1): 143–159. [HU G Y, XIAO D K, FAN T E, et al. New theory and method of fluvial reservoir architecture study: Concepts, contents and characterization of offshore oilfield fluvial compound sand-body architecture[J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21(1): 143–159.]
- [22] 耿站立, 孙福街, 田冀. 多层砂岩油藏层内纵向非均质性表征方法探索[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(4): 96–100. [GENG Z L, SUN F J, TIAN J. Exploration on reservoir heterogeneity characterization in reservoir numerical modeling of multi-sub-stratum sandstone reservoir. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)[J]. 2011, 33(4): 96–100.]