

低渗薄互层油藏水平井干层射孔对产能影响分析

孟令强¹, 李伟², 朱金起¹, 陈奎¹, 郭增强¹

1. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司 广东湛江 524057

2. 中海石油(中国)有限公司海南分公司 海南海口 570312

通讯作者: Email: mlqiang88@163.com

项目支持: 中海石油(中国)有限公司科技重点项目“南海西部油田上产 2000 万方关键技术研究”(CNOOC-KJ 135 ZDXM 38 ZJ)

引用: 孟令强, 李伟, 朱金起, 等. 低渗薄互层油藏水平井干层射孔对产能影响分析[J]. 油气井测试, 2025, 34(2): 60-65.

Cite: MENG Lingqiang, LI Wei, ZHU Jinqi, et al. Analysis of impact of perforating dry layers on productivity of horizontal wells in low-permeability thin interbedded reservoirs[J]. Well Testing, 2025, 34(2): 60-65.

摘要 在采用水平井开发低渗薄互层油藏时,为提高储量动用程度和单井产能,水平井纵向上穿过的有效砂岩层一般需全部射开,但对于渗透性极差干层有无必要射开则没有统一的定论。基于水平井渗流原理,以 Borisov 水平井稳态产能公式为基础,考虑干层射孔引起的相邻油层射开长度的影响,建立了考虑干层射孔的水平井产能公式,并依据实际水平油井参数,分析了射开干层引起相邻油层射开对产能的影响规律。结果表明,考虑干层射孔的产能倍数随着射开干层垂厚、射孔深度的增加而增加,但有一个最大值,随着井筒与地层的夹角增加而减小。矿场应用表明,低渗薄互层油藏水平井射开干层可提高单井产能约 1.2 倍,所建立的考虑干层射孔的水平井产能公式可用于指导生产。

关键词 水平井; 低渗油藏; 薄互层; 干层射孔; 产能公式; 动用程度

中图分类号: TE257 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2025.02.010

Analysis of impact of perforating dry layers on productivity of horizontal wells in low-permeability thin interbedded reservoirs

MENG Lingqiang¹, LI Wei², ZHU Jinqi¹, CHEN Kui¹, GUO Zengqiang¹

1. Zhanjiang Company, CNOOC (China) Co., Ltd., Zhanjiang, Guangdong 524057, China

2. Hainan Company, CNOOC (China) Co., Ltd., Haikou, Hainan 570312, China

Abstract: When developing low-permeability thin interbedded reservoirs with horizontal wells, it is common practice to perforate all effective sandstone layers along the wellbore to enhance recovery and increase single-well productivity. However, whether to perforate extremely low-permeability dry layers remains a topic of debate. Based on flow principles of horizontal well and by using the Borisov steady-state productivity equation as a foundation, a horizontal well productivity model that incorporates the impact of dry layer perforation on the effective perforation length of adjacent oil-bearing layers was established. In addition, based on the actual horizontal well parameters, the impact of dry layer perforation on productivity was systematically analyzed. The results indicate that the productivity enhancement multiple increases with greater dry layer thickness and perforation depth but reaches a maximum value before declining as the wellbore-to-formation angle increases. Field applications show that perforating dry layers in low-permeability thin interbedded reservoirs can increase single-well productivity by approximately 1.2 times. The proposed productivity model can provide a practical guidance for optimizing horizontal well production in such reservoirs.

Keywords: horizontal well; low-permeability reservoir; thin interbedded layer; dry layer perforation; productivity equation; recovery degree

对于低渗透薄互层油藏,采用直井开发难以获得较好的经济效益,而利用水平井开发则能取得较好的开发效果^[1-3]。在采用水平井开发低渗薄互层油藏时,为提高储量动用程度和单井产能,水平井纵向上会穿过油层、干层、泥岩隔夹层等多层,因此

完井时水平段一般需要射孔进一步提高产能,射孔原则一般是有效砂岩层(主要包括油层、水层)全部射开,泥岩需要避射,对于渗透性极差的干层则没有统一的定论,一般情况下不射开,但是在经济允许的情况下有些针对注水井也有射开增加吸水能

力的。对于水平井产能预测,国外上世纪50年代起,开始在实验室应用电模型研究水平井生产动态,提出了 Borisov、Giger、Joshi、Renard-Dupuy、Elgaghad、Furui 等各种不同的水平井产能计算公式^[4-6]。郎兆新等^[7]应用拟三维方法和等值渗流阻力法提出了多井底水平井产能的计算公式;范子菲^[8]利用镜像反应原理和复势叠加原理得到无限大底水油藏产;宋付权等^[9]基于水平井椭球流动的思想,推导出具有椭球面供液外边界油藏中一口水平井的产能方程;郭肖等^[10]对顶、底为定压边界的油藏进行了分析;陈元千^[11]在基于原有 Joshi 研究思路的基础之上,利用等面积和等效渗流提出了新水平井产能公式;黄迎松^[12]对流场进行劈分,建立了易求解的水平井产能公式;王新杰^[13]通过对气水两相的研究,提出了新的产能公式适用于气液两相;何军等^[14]利用原有水平井垂直等效模型,建立了封闭地层下的水平井产能方法;孙召勃等^[15]考虑非牛顿流体特性和井筒摩阻的影响,推导出了幂律型稠油油藏水平井产能计算公式;彭琴等^[16]将油、气、水三相渗流区进行微元处理,建立了考虑油气水三相流的水平井产能计算新方法。从以上研究可以看出,前人对水平井产能预测做了大量研究,但是对于低渗薄互层干层射孔对水平井产能有无贡献、干层射孔有无必要并没有直接研究或分析。现以成熟的、适用性和准确度较高的 Borisov 水平井稳态产能公式为基础,建立考虑干层射孔的水平井产能公式,并依据实际水平油井参数,分析射开干层引起相邻油层射开对产能的影响规律,制定低渗薄互层水平井干层射孔的原则,并在矿场进行了应用,所建立的考虑干层射孔的水平井产能公式可用于生产。

1 考虑干层射孔的水平井产能研究

Borisov 公式在南海西部应用较多,适用性较强,因此,本次以 Borisov 公式为基础建立考虑干层射孔的水平井产能公式。1964 年,前苏联学者 Borisov 假设水平井位于顶底封闭的各向同性油层中部,流体在地层中的流动为稳态渗流,且流体不可压缩,忽略井筒中产生的压降,推导出了水平井产能公式

$$J_o = \frac{0.543K_h H}{\mu_o B_o \left[\ln \left(4 \frac{r_{eh}}{L} \right) + \frac{H}{L} \ln \left(\frac{H}{2\pi r_w} \right) \right]} \quad (1)$$

式中: J_o 为水平井采油指数, $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$; K_h 为油藏水平方向渗透率, mD ; H 为油层有效厚度, m ; L 为水平段有效长度, m ; r_{eh} 为拟圆形泄油半径, m ; r_w 为水平井井筒半径, m ; μ_o 为原油黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; B_o 为体积系数, m^3/m^3 。

Borisov 公式中 L 为射开的油层水平段长度,若考虑干层射孔,则水平段有效长度将大于纯油层射开长度,主要原因是当射开干层时,与干层相邻的油层也会被射开(见图1)。当干层垂直厚度较厚时,即 $h > h'$ 时,水平段有效长度 L 应包括与干层相邻油层的射开长度 L' 。

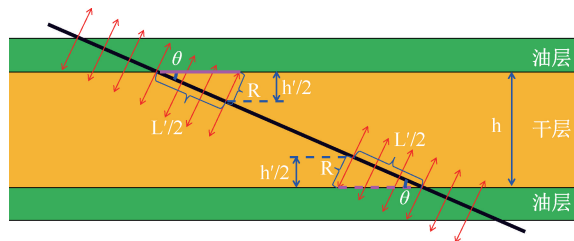


图1 水平井射开干层和油层示意图($h > h'$)

Fig. 1 Schematic diagram of dry layer and oil layer perforation in horizontal wells ($h > h'$)

L' 主要受射孔弹最大射孔深度、井筒与地层的夹角的影响,与射孔弹最大射孔深度大小成正比,井筒与地层的夹角的正切成反比。假定干层的地层夹角为一定值, L' 可由式(2)求得

$$L' = \frac{2R}{\tan \theta} \quad (2)$$

式中: L' 为与干层相邻油层射开的有效长度, m ; R 为射孔弹最大射孔深度, m ; θ 为井筒与地层的夹角, $^\circ$ 。

h' 与射孔弹最大射孔深度大小、井筒与地层的夹角的正弦成正比,成正比。

$$h' = 2R \cos \theta \quad (3)$$

式中: h' 为被射开干层的垂直有效厚度, m 。

当干层垂直厚度较厚时,即 $h > h'$ 时,将 L' 代入到 Borisov 公式中即可得到考虑干层射孔的水平井产能

$$J'_o = \frac{0.543K_h H}{\mu_o B_o \left[\ln \left(4 \frac{r_{eh}}{L + \frac{2R}{\tan \theta}} \right) + \frac{H}{L + \frac{2R}{\tan \theta}} \ln \left(\frac{H}{2\pi r_w} \right) \right]} \quad (4)$$

式中: J'_o 为考虑干层射孔的水平井采油指数, $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ 。

当干层厚度 h 小于或等于 h' 时,射开干层的斜

厚即为有效长度(见图2),则得到考虑干层射孔的水平井产能

$$J'_o = \frac{0.543K_h H}{\mu_o B_o \left[\ln \left(4 \frac{r_{eh}}{L + \frac{h}{\sin \theta}} \right) + \frac{H}{L + \frac{h}{\sin \theta}} \ln \left(\frac{H}{2\pi r_w} \right) \right]} \quad (5)$$

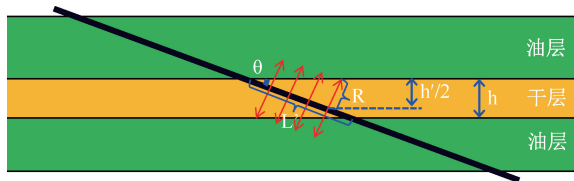


图2 水平井射开干层和油层示意图($h < h'$)

Fig. 2 Schematic diagram of dry layer and oil layer perforation in horizontal wells ($h < h'$)

将考虑干层射孔后的水平井产能公式与Borisov公式进行对比,便可得到考虑干层射孔后水平井产能倍数 n

$$n = \frac{J'_o}{J_o} = \begin{cases} \frac{\ln \left(4 \frac{r_{eh}}{L} \right) + \frac{H}{L} \ln \left(\frac{H}{2\pi r_w} \right)}{\ln \left(4 \frac{r_{eh}}{L + \frac{2R}{\tan \theta}} \right) + \frac{H}{L + \frac{2R}{\tan \theta}} \ln \left(\frac{H}{2\pi r_w} \right)} & (h > 2R \cos \theta) \\ \frac{\ln \left(4 \frac{r_{eh}}{L} \right) + \frac{H}{L} \ln \left(\frac{H}{2\pi r_w} \right)}{\ln \left(4 \frac{r_{eh}}{L + \frac{h}{\sin \theta}} \right) + \frac{H}{L + \frac{h}{\sin \theta}} \ln \left(\frac{H}{2\pi r_w} \right)} & (h \leq 2R \cos \theta) \end{cases} \quad (6)$$

式中: n 为干层射孔后水平井产能倍数。

由式(4)和(5)可知,油层有效厚度、水平段有效长度、油藏渗透率、地层夹角、干层垂厚及射孔深度等参数对水平井产能影响比较明显,矿场应用时需要重视以上参数的获取,若取值不准确会影响产能计算结果,对于油层有效厚度、水平段有效长度、油藏渗透率对产能的影响已有研究,本次重点对地层夹角、干层垂厚及射孔深度对产能影响进行分析。

2 干层射孔对水平井产能影响分析

南海西部涠洲A油田为低孔低渗油藏,主要采用水平井开发提高产能,其中1口水平油井参数如

下:水平段油层长度 L 为 400 m,油层厚度 h 为 10 m,井筒半径 r_w 为 0.089 m,泄油半径 r_e 为 400 m,油藏水平渗透率 k_h 为 10 mD,原油黏度 μ_o 为 0.8 mPa·s,地层原油体积系数 B_o 为 1.2 m³/m³。以此井参数为例进行水平井产能影响分析。

2.1 干层垂厚对产能的影响

假定井筒与地层的夹角为 1°,射孔深度为 1.5 m。分别设置干层垂厚为 0 m、1 m、2 m、3 m、5 m、7 m、9 m。当干层垂厚小于 3 m 时(即干层垂厚 $h \leq 2R/\cos \theta$),随着干层垂厚的增加,产能倍比不断增加;当干层垂厚大于 3 m 时(即干层垂厚 $h > 2R/\cos \theta$),产能倍比不再变化,表明干层垂厚无论再增加,受射孔深度的影响,射开干层后与干层相邻油层射开的有效长度保持不变(见图3)。

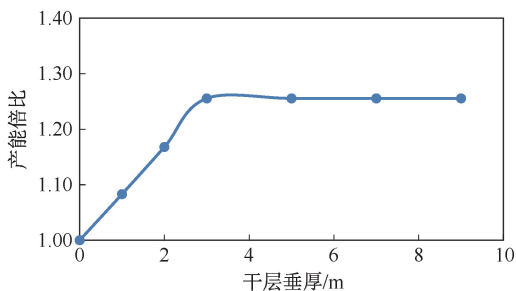


图3 干层垂厚对产能倍比的影响图

Fig. 3 Influence of vertical thickness of dry layers on production capacity ratio

2.2 射孔深度对产能的影响

假定井筒与地层的夹角为 1°,干层垂厚为 3 m。分别设置射孔深度为 0 m、0.5 m、1 m、1.5 m、2.5 m、4 m、5 m。当射孔深度小于 1.5 m 时(即干层垂厚 $h > 2R/\cos \theta$),随着射孔深度的增加,产能倍比不断增加;当射孔深度大于 1.5 m 时(即干层垂厚 $h \leq 2R/\cos \theta$),产能倍比不再变化,表明射孔深度无论再增加,受干层垂厚的影响,射开干层后与干层相邻油层射开的有效长度保持不变(见图4)。

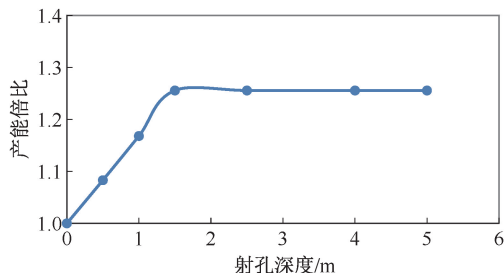


图4 射孔深度对产能倍比的影响图

Fig. 4 Influence of perforation depth on production capacity ratio

2.3 地层夹角对产能的影响

假定射孔深度为 1.5 m, 干层垂厚为 3 m 或 1 m。分别设置井筒与地层的夹角为 0.5° 、 1° 、 2° 、 5° 、 10° 、 20° 、 40° 、 60° 、 90° 。当干层垂厚为 3 m 时(即干层垂厚 $h > 2R/\cos\theta$), 随着井筒与地层夹角的增加, 产能倍比不断降低, 当夹角等于 90° 时, 产能倍比为 1, 表明射开干层对产能无贡献; 当干层垂厚为 1 m 时(即干层垂厚 $h \leq 2R/\cos\theta$), 变化规律与干层垂厚为 3 m 时(即干层垂厚 $h > 2R/\cos\theta$) 一致, 随着井筒与地层夹角的增加, 产能倍比不断降低, 当夹角等于 90° 时, 产能倍比为 1, 表明射开干层对产能无贡献(见图 5)。

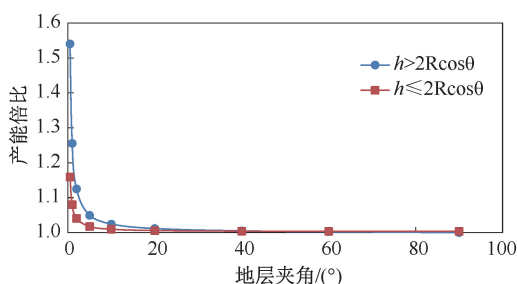


图 5 地层夹角对产能倍比的影响图

Fig. 5 Influence of formation angle on production capacity ratio

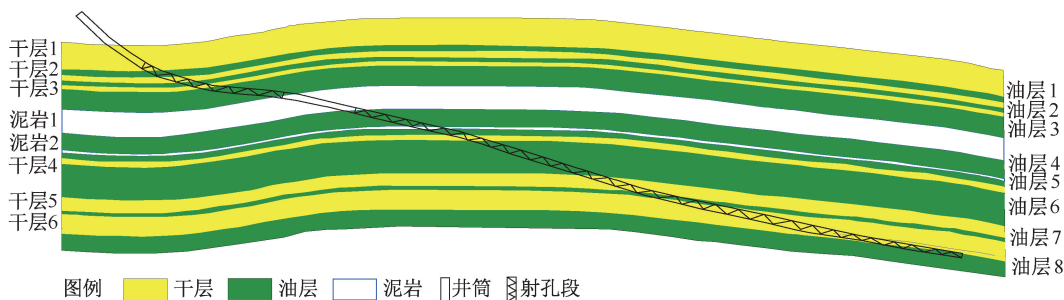


图 6 水平井射孔剖面示意图

Fig. 6 Schematic diagram of horizontal well perforation profile

要包括 8 个小油层(被干层或泥岩隔开), 油层 1、油层 2、油层 3、油层 4、油层 5、油层 6、油层 7、油层 8 射开垂厚分别为 0.57 m、0.34 m、2.62 m、1.70 m、0.61 m、3.70 m、0.20 m、0.63 m; 射开干层垂厚为 10.24 m, 主要包括 6 个干层, 干层 1、干层 2、干层 3、干层 4、干层 5、干层 6 的地层夹角分别 6.4° 、 3.4° 、 3.1° 、 2.6° 、 3.0° 、 2.1° ; 泥岩层没有射开, 主要包括 2 个泥岩层, 即泥岩 1 和泥岩 2, 合计垂厚为 2.20 m(见表 1)。

若不考虑干层射孔的影响, 利用 Borisov 水平井产能公式(1)计算产能为 $6.99 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$, 与实际排量折算产能 $9.89 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ 相比, 相对误差

3 应用成效

南海西部涠洲 A 油田 S 油藏位于南海北部湾海域, 为复杂断块油田, 该油田纵向油层数量多、储层非均质性强, 多发育薄互层油藏, 地质分析认为干层、泥岩层较多, 为提高储量动用率和产能, 主要采用水平井开发, 横向和纵向尽量多穿层, 并使用近钻头地质导向工具以满足随钻井轨迹的优化调整, 提高薄层水平井的钻遇率。在上述技术的指导下, 南海西部涠洲 A 油田 S 油藏钻探了 1 口水平井进行注水补充能量, 主要钻遇薄互层, 井钻后物性相对变差, 理论计算吸水指数较低, 为了尽可能提高砂体的吸水能力, 对部分干层进行了射孔(见图 6), 射开水平段油层长度 L 为 245.7 m, 射开油层垂厚 h 为 10.37 m, 射开水平段干层长度为 252.1 m, 射开干层垂厚为 14.98 m, 井筒半径 r_w 为 0.089 m, 泄油半径 r_e 为 400 m, 水平试井渗透率 k_h 为 2.7 mD, 原油黏度 μ_o 为 0.8 mPa·s, 地层原油体积系数 B_o 为 $1.2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

由于南海西部涠洲 A 油田 S 油藏属于特低渗油藏, 为尽可能提高产能, 将钻遇的油层和相邻干层均射开, 射孔深度为 1 m, 射开油层垂厚为 10.37 m, 主

达到近 30%, 差别较大。

若考虑干层射孔的影响, 按照公式(4)计算得到被射开干层的垂直有效厚度 h' 为 1.99~2.00 m, 干层 5 和干层 6 的射开垂厚大于 h' , 则利用公式(2)计算与干层相邻油层射开的有效长度, 干层 1、干层 2、干层 3 和干层 4 的射开垂厚小于 h' , 则与干层相邻油层射开的有效长度即为射开干层的斜厚(见表 2)。与干层相邻油层射开的有效长度 L' 合计为 133.8 m, 则射开干层后水平段有效长度为 $L+L'$ 为 351.1 m, 将其带入到公式(5), 得到该井产能为 $8.46 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$, 与不射开干层的水平井产能相比, 产能提高约 1.2 倍, 与该井排量实际产能

9.89 m³/(d·MPa) 相比较接近,相对误差仅 14%。以上结果表明本文建立的考虑干层射孔影响的水平井产能公式是可靠的,低渗薄互层油藏水平井射开干层可提高单井产能,所建立的考虑干层射孔影响的水平井产能公式可用于生产。

表 1 南海西部某油田 S 油藏参数表

Table 1 Parameters of S reservoir in an oilfield in the western south china sea

层名	斜厚 /m	垂厚 /m	射开斜 厚/m	射开垂 厚/m	地层夹 角/°
油层 1	9.6	0.57	9.6	0.57	
油层 2	5.6	0.34	5.6	0.34	
油层 3	93.0	2.62	93.0	2.62	
油层 4	43.5	1.70	43.5	1.70	
油层 5	15.2	0.61	15.2	0.61	
油层 6	67.5	3.70	67.5	3.70	
油层 7	4.0	0.20	4.0	0.20	
油层 8	7.3	0.63	7.3	0.63	
小计	245.7	10.37	245.7	10.37	
泥岩 1	49.3	1.73	0.0	0.00	
泥岩 2	12.2	0.47	0.0	0.00	
小计	61.5	2.20	0.0	0.00	
干层 1	46.2	6.01	11.4	1.27	6.4
干层 2	11.1	0.66	11.1	0.66	3.4
干层 3	11.1	0.6	11.1	0.6	3.1
干层 4	13.5	0.62	13.5	0.62	2.6
干层 5	52.6	2.74	52.6	2.74	3.0
干层 6	117.6	4.35	117.6	4.35	2.1
小计	252.1	14.98	217.3	10.24	

表 2 与干层相邻油层的射孔长度计算结果表

Table 2 Calculation results of perforation length for adjacent oil layers with dry layers

层名	射开斜 厚/m	射开垂 厚/m	地层夹 角/°	被射开干	与干层相	备注
				层的垂直 有效厚度 h'/m	邻油层的 射孔长度 L'/m	
干层 1	11.4	1.27	6.4	1.99	5.7	仅底部与 油层相邻
干层 2	11.1	0.66	3.4	2.00	11.1	
干层 3	11.1	0.60	3.1	2.00	11.1	
干层 4	13.5	0.62	2.6	2.00	13.5	
干层 5	52.6	2.74	3.0	2.00	38.3	
干层 6	117.6	4.35	2.1	2.00	54.1	
小计	217.3	10.24			133.8	

4 结论

(1)基于 Borisov 水平井稳态产能公式,建立了考虑干层射孔的水平井产能公式,该公式可用于射开干层的低渗薄互层水平井产能计算,适用条件与 Borisov 公式一致。

(2)干层射孔敏感性分析结果表明,射开干层垂厚、井筒与地层的夹角及射孔深度是考虑干层射孔后水平井产能倍数的主要因素,产能倍数随着射开干层垂厚、射孔深度的增加而增加,但有一个最大值,随着井筒与地层的夹角增加而减小。

(3)矿场应用表明,低渗薄互层油藏水平井射开干层可提高单井产能,所建立的考虑干层射孔的水平井产能公式可用于生产。

致谢:感谢中海石油(中国)有限公司湛江分公司同意本文公开发表。

参考文献

[1] 何竟. 水平气井产能影响因素分析[J]. 西部探矿工程, 2023,35(5):60-62.
HE Jing. Analysis of factors affecting horizontal gas well productivity [J]. West-China Exploration Engineering, 2023, 35(5):60-62.

[2] 胡文亮,罗健,张国栋,等. 低孔低渗储层各向异性研究在增产中的作用——以东海 A 凹陷为例[J]. 海洋地质前沿,2023,39(4):76-84.
HU Wenliang, LUO Jian, ZHANG Guodong, et al. The roles of anisotropy in production increasing in low porosity and low permeability reservoir: an example in sag A, east China sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(4): 76-84.

[3] 汪全林,邓琪,周军良,等. 海上特低渗油藏压裂水平井开发效果评价——以渤海 BZ 油田沙三段 5 井区为例[J]. 复杂油气藏,2022,56(3):74-77.
WANG Quanlin, DENG Qi, ZHOU Junliang, et al. Evaluation of development effect of fracturing horizontal wells in offshore ultralow permeability reservoirs: a case study of well block 5 of Sha3 member in BZ oilfield, Bohai sea[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs,2022, 56(3): 74-77.

[4] 袁淋,李晓平,张璐,等. 水平井稳态产能公式对比与分析[J]. 岩性油气藏,2013,25(6):127-132.
YUAN Lin, LI Xiaoping, ZHANG Lu, et al. Analysis and correlation of steady-state productivity formulas for horizontal wells[J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(6): 127-132.

[5] 李传亮,朱苏阳,柴改建,等. 直井与水平井的产能对比[J]. 岩性油气藏,2018,30(3):12-16.
LI Chuanliang, ZHU Suyang, CHAI Gaijian, et al. Comparison of productivity of vertical wells with horizontal wells[J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(3): 12-16.

[6] 王大为,李晓平. 水平井产能分析理论研究进展[J]. 岩性油气藏,2011,23(2):118-123.
WANG Dawei, LI Xiaoping. Advances in deliverability analysis of horizontal well [J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(2): 118-123.

[7] 郎兆新,张丽华,程林松,等. 多井底水平井渗流问题某

- 些解析解[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1993, 17(4):40-47.
- LANG Zhaoxin, ZHANG Lihua, CHENG Linsong, et al. Solution for multiwellbore horizontal well flow[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 1993, 17(4):40-47.
- [8] 范子菲. 裂缝性气藏水平井稳态解公式研究[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(5):67-71.
- FAN Zifei. Analysis and correlation of steady-state productivity formulas for horizontal wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(5):67-71.
- [9] 宋付权, 刘慈群, 张盛宗. 低渗透油藏中水平井的产能公式分析[J]. 大庆石油地质与开发, 1999, 18(3):35-37.
- SONG Fuquan, LIU Ciqun, ZHANG Shengzong. Analysis on productivity formula of horizontal wells in low permeability reservoir[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1999, 18(3):35-37.
- [10] 郭肖, 伍勇. 启动压力梯度和应力敏感效应对低渗透气藏水平井产能的影响[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(4):539-543.
- GUO Xiao, WU Yong. Influence of start-up pressure gradient and stress sensitivity on productivity of low-permeability gas reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(4):539-543.
- [11] 陈元千. 水平井产量公式的推导与对比[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(1):68-71.
- CHEN Yuanqian. Derivation and correlation of production rate formula for horizontal well[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(1):68-71.
- [12] 黄迎松. 基于流场新劈分的顶底封闭油藏水平井产能公式[J]. 断块油气田, 2018, 25(1):66-69.
- HUANG Yingsong. Productivity formula for horizontal well of top-bottom closed reservoir based on re-splitting flow field[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018, 25(1):66-69.
- [13] 王新杰. 致密气藏压裂水平井产能计算方法[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(5):161-168.
- WANG Xinjie. Calculation method of for productivity of fractured horizontal well in tight gas reservoir[J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(5):161-168.
- [14] 何军, 范子菲, 何聪鸽, 等. 封闭边界压裂水平井非稳态产能评价新模型[J]. 断块油气田, 2021, 28(3):369-373.
- HE Jun, FAN Zifei, HE Congge, et al. Non-steady productivity analysis model for fractured horizontal well in closed boundary[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(3):369-373.
- [15] 孙召勃, 贾晓飞, 杨馥榕. 考虑摩阻损失的稠油油藏水平井产能计算新方法[J]. 非常规油气, 2022, 9(6):94-99.
- SUN Zhaobo, JIA Xiaofei, YANG Furong. A new calculation method of horizontal well productivity in heavy oil reservoir considering friction loss[J]. Unconventional Oil & Gas, 2022, 9(6):94-99.
- [16] 彭琴, 刘斌, 刘春艳, 等. 考虑油气水三相流的水平井产能计算新方法[J]. 复杂油气藏, 2023, 16(4):444-448.
- PENG Qin, LIU Bin, LIU Chunyan, et al. A new method for calculating horizontal well productivity considering oil-gas-water three-phase flow[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(4):444-448.

编辑 吴志力

第一作者简介:孟令强,男,1988年出生,工程师,硕士,2014年毕业于西南石油大学油气田开发工程专业,现主要从事油气田开发方面的研究工作。电话:15218265337, Email: mlqiang88@163.com。通信地址:广东省湛江市坡头区22号信箱,邮政编码:524057。