

西湖凹陷探井射孔参数优化方法

王雷¹, 赵洪绪², 景社², 于伟强²

1. 中海石油(中国)有限公司上海分公司 上海 200335

2. 中法渤海地质服务有限公司 天津 300457

通讯作者: Email: wanglei5@cnooc.com.cn.

引用: 王雷, 赵洪绪, 景社, 等. 西湖凹陷探井射孔参数优化方法[J]. 油气井测试, 2023, 32(5): 44-49.

Cite: WANG Lei, ZHAO Hongxu, JING She, et al. Optimization method on perforation parameters for exploration wells in Xihu sag[J]. Well Testing, 2023, 32(5): 44-49.

摘要 西湖凹陷早期探井由于射孔工艺等原因, 导致产能较低, 生产未达到预期。对影响早期探井产能的射孔因素进行分析, 为进一步上产增储、产能释放提供决策依据。从渗流力学原理出发, 考虑双径向流动, 建立射穿和未射穿污染带情况下的直井射孔产能计算模型; 以该区典型井的储层参数为基础研究射孔参数对产能的影响, 并利用室内射孔穿深模拟数据进行射孔参数优化。结果表明, 孔深和孔径是影响该区早期探井产能的主控因素, 压实带影响次之。XX-1 井早期采用的射孔参数未能最大化释放该层产能, 通过射孔参数优化后, 理论计算其无阻流量从早期测试时的 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 增加到 $80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 增幅达到 60%。该方法为决策西湖凹陷早期探井产能释放措施提供了一种研究思路。

关键词 西湖凹陷; 探井; 射孔; 双径向流动; 产能模型; 影响因素; 参数优化; 产能释放**中图分类号:** TE257 **文献标识码:** B **DOI:** 10.19680/j.cnki.1004-4388.2023.05.008

Optimization method on perforation parameters for exploration wells in Xihu sag

WANG Lei¹, ZHAO Hongxu², JING She², YU Weiqiang²

1. Shanghai Branch of CNOOC (China) Ltd., Shanghai 200335, China

2. China-France Bohai Geoservice Co., Ltd, Tianjin 300457, China

Abstract: Due to factors such as perforation techniques, early exploration wells in the Xihu sag showed a lower productivity than expected. An analysis on the perforation factors affecting early well productivity was conducted to provide a basis for decision-making regarding further production increasement and productivity release. Starting from the principles of fluid flow mechanics and considering a bi-radial flow, a productivity calculation model for vertical well perforations was established with both penetrated and unpierced contaminated zones. Based on the reservoir parameters of a typical well in the area, the impact of perforation parameters on productivity was studied, and by using simulated data from laboratory perforation penetration tests, the perforation parameters were optimized. The results show that perforation depth and diameter are the primary controlling factors affecting the early well productivity in the area, following by compaction zones. The perforation parameters used in Well XX-1 during the early stages did not maximize the release of reservoir productivity. After perforation parameter optimization, theoretical calculations indicated that the open flow rate could increase from $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ during the early tests to $80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, with an increasement of up to 60%. This approach provides a research idea for adopting measures to release the productivity of early exploration wells in Xihu sag.

Keywords: Xihu sag; exploration well; perforation; bi-radial flow; productivity model; influencing factor; parameter optimization, productivity release

西湖凹陷中北部老井早期探井受限于钻井、测试工程工艺和管理方式, 普遍存在泥浆过平衡量大、浸泡时间长、储层侵入较深、射孔有效穿深小等问题, 限制了油气层尤其是低渗油气层产能的释放。因此, 对老井低产层测试资料进行系统梳

理和综合研究, 分析影响产能的主控因素, 明确适合目标区地质油藏特征的最优产能释放方案, 对目标区上产增储具有重要意义。

射孔井产能受多种因素影响, 国内外诸多学者从理论和现场测试出发, 建立了射孔产能计算和预

测模型^[1-4]。李龙龙等^[5-6]引入双径向流模型,采用渗流力学原理和等值渗流阻力法研究了射孔斜井、部分射开直井的产能计算方法。唐健程^[7]考虑启动压力梯度、气体滑脱效应、应力敏感效应及高速非达西渗流特征,建立适用于东海低渗气藏射孔完井的产能计算方法。上述研究认为,产能指数对井斜角、孔深、孔密、压实程度、相位、孔径、压实带厚度的敏感性依次降低。关利军等^[8]基于双径向流建立各向异性油藏射孔产能模型,研究发现孔深、孔密、压实程度、垂向渗透率对产能的影响比较大。许峰等^[9]通过测井方法和渗流力学理论分别建立了适用于探井的综合指数产能模型和径向流产能模型,赵洪涛等^[10]考虑稠油储层出砂造成井筒附近渗流能力变化,结合测井及地化热解参数建立了适用于探井的比采油指数预测模型,两者的预测结果与实际结果误差在15%以内,基本能满足现场应用要求。上述模型较少结合储层实际情况和射孔实际参数来研究射孔对探井产能的影响。本文从双径向流模型出发,结合射孔室内模拟数据和实际探井储层参数,分析影响探井产能的主控因素,并以产能释放为目的优化探井射孔参数。

1 射孔井产能计算模型

从渗流力学原理出发,采用双径向流模型,考虑污染带射穿与未射穿两种情况,推导出常规射孔直井的产能计算方法^[11-13]。利用该方法可研究孔深、孔密、孔径、相位角、压实损害等射孔因素以及污染带厚度和污染程度对产能的影响。

(1) 污染带未射穿情况

物理模型描述如下(见图1):①未污染带(I区)内为水平径向流,内、外边界分别为污染带半径和供给半径,渗透率为原始渗透率;②未射穿污染带(II区)内为水平径向流,内、外边界分别为孔深加上井筒半径和污染带半径,渗透率为污染带渗透率(根据钻井液对储层的伤害程度而定);③射穿污染带(III区)内为围绕孔眼的垂直平面径向流,内、外边界分别为压实带半径和两个相邻的相位相同的孔眼之间距离的一半,渗透率为污染带渗透率;④射孔压实带(IV区)内为围绕孔眼的垂直平面径向流,内、外边界分别为孔眼半径和压实带半径,渗透率为射孔压实损害后的渗透率。

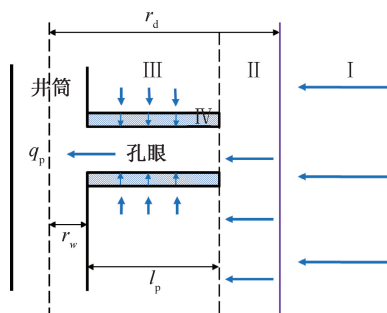


图1 污染带未射穿的双径向流模型

Fig.1 Dual radial flow model without perforating through damage zone

污染带未射穿情况下的产能计算方程为

$$\begin{aligned} \varphi_e - \varphi_{wf} &= Aq_{sc} + Bq_{sc}^2 + C \quad (1) \\ A &= \frac{3.684 \times 10^4 e^{\alpha p_i} p_{sc} T}{K_0 h f T_{sc}} \times \\ &\quad \left[\ln \frac{r_e}{r_d} + \frac{K_0}{K_d} \ln \frac{r_d}{r_w + l_p} + \frac{1}{n_s l_p} \left(\frac{K_0}{K_d} \ln \frac{h_p}{r_c} + \frac{K_0}{K_c} \ln \frac{r_c}{r_p} \right) \right] \\ B &= \frac{1.0216 \times 10^{-3} e^{1.345 \alpha p_i} M_g p_{sc}^2 T}{f^{1.345} T_{sc}^2 l_p^2 \bar{\mu} R} \times \\ &\quad \left(\frac{1}{K_c^{1.345}} + \frac{1}{K_d^{1.345}} \right) \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{h_p} \right) \\ C &= \frac{2 \lambda \bar{p} e^{\alpha p_i} (r_e - r_w)}{\bar{\mu} \bar{Z}} \end{aligned}$$

式中: φ_e 为拟地层压力, MPa; φ_{wf} 为拟井底压力, MPa; q_{sc} 为产气量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; α 为应力敏感性系数, MPa^{-1} ; p_i 为原始地层压力, MPa; p_{sc} 为标准状况下压力, MPa; T_{sc} 为标准状况下温度, K; T 为温度, K; K_0 为未污染带渗透率, mD; h 为储层厚度, m; $f = 1 + b/\bar{p}$, b 为滑脱因子, MPa^{-1} ; \bar{p} 为气藏平均压力, MPa; r_e 为储层边界半径, m; r_d 为污染带半径, m; K_c 为污染区压实带渗透率(污染带未射穿), mD; K_d 为污染带渗透率(污染带未射穿), mD; l_p 为孔眼长度, m; h_p 为两个相邻的相位相同的孔眼之间距离的一半, m; r_c 为压实带半径, m; r_p 为孔眼半径, m; M_g 为气体质量分数, g/mol; $\bar{\mu}$ 为气体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; R 为气体常数, 无因次; \bar{p} 为平均压力, MPa; \bar{Z} 为气体压缩因子; n_s 为射孔密度, 孔/m。

(2) 污染带射穿情况

物理模型描述如下(见图2):①未射穿的未污染区(I区)内为水平径向流,内、外边界分别为孔深加上井筒半径、供给半径,渗透率为原始渗透率;②射穿的未污染区(II区)内为围绕孔眼的垂直平面径向流,内、外边界分别为压实带半径和两个相

邻的相位相同的孔眼之间距离的一半,渗透率为原始渗透率;③射穿的污染带(Ⅲ区)内为围绕孔眼的垂直平面径向流,内、外边界与Ⅱ区相同,渗透率为污染带渗透率;④非污染区的射孔压实带(Ⅳ区)内为围绕孔眼的垂直平面径向流,内、外边界分别为孔眼半径和压实带半径,渗透率为射孔压实损害后的渗透率;⑤污染区的射孔压实带(Ⅴ区),内、外边界与Ⅳ区相同,但渗透率与Ⅳ区不同(压实损害前两区渗透率不同)。

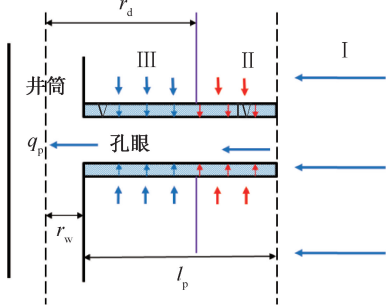


图2 污染带射穿的双径向流模型
Fig. 2 Dual radial flow model with perforating through damage zone

污染带射穿情况下产能计算方程为

$$\varphi_e - \varphi_{wf} = Aq_{sc} + Bq_{sc}^2 + C \tag{2}$$

$$A = \frac{3.6841 \times 10^4 e^{ap_i} p_{sc} T}{K_0 h f T_{sc}} \left(\ln \frac{r_e}{r_w + l_p} + \frac{1}{n_s \xi_1} \right)$$

$$B = \frac{1.0216 \times 10^{-3} e^{1.345ap_i} M_g p_{sc}^2 T}{f^{1.345} T_{sc}^2 \mu R} \left(\frac{1}{K_{23}^{1.345}} + \frac{1}{K_{45}^{1.345}} \right) \times \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{h_p} \right)$$

$$C = \frac{2\lambda \bar{p} e^{ap} (r_e - r_w)}{\mu Z}$$

其中 $K_{23} = \frac{K_0(l_p + r_w - r_d) + K_d(r_d - r_w)}{l_p}$

$$K_{45} = \frac{K_{c1}(l_p + r_w - r_d) + K_{c2}(r_d - r_w)}{l_p}$$

式中: K_{23} 为Ⅱ区和Ⅲ区的整体等效渗透率, mD; K_{45} 为Ⅳ区和Ⅴ区的整体等效渗透率, mD; K_{c1} 为未污染区压实带渗透率(污染带射穿), mD; K_{c2} 为污染区压实带渗透率(污染带射穿), mD。

2 射孔产能影响因素分析

为了获得射孔参数对产能的影响规律^[14-16], 以西湖凹陷早期探井 XX-1 井的射孔数据为基础, 研究各种参数对产能的影响规律(见表 1)。

表 1 射孔参数

Table 1 Perforating parameter

参数名称	数值	单位
射孔孔径	0. 010 92	m
射孔深度	0. 4	m
射孔密度	40	孔/m
相位角	45	度
污染带半径	0. 4	m
污染带渗透率降低倍数	0. 2	无因次
压实带厚度	0. 001	m
压实带渗透率降低倍数	0. 4	无因次

图 3、图 4 分别为孔径、孔深对产能的影响。随着孔径的增大, 产能上升幅度明显; 随着孔深增大, 产能上升幅度很大。因此孔径、孔深是影响产能的两个重要射孔参数。

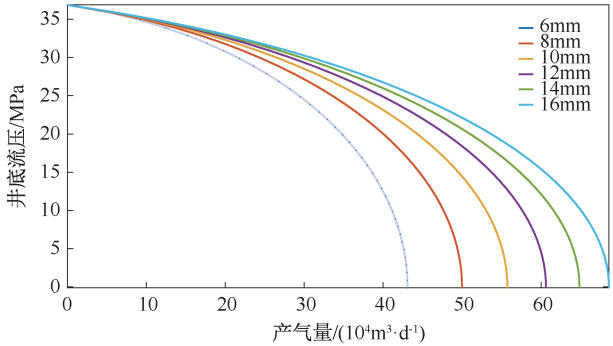


图3 孔径-产能图版
Fig. 3 Productivity chart with different perforation diameters

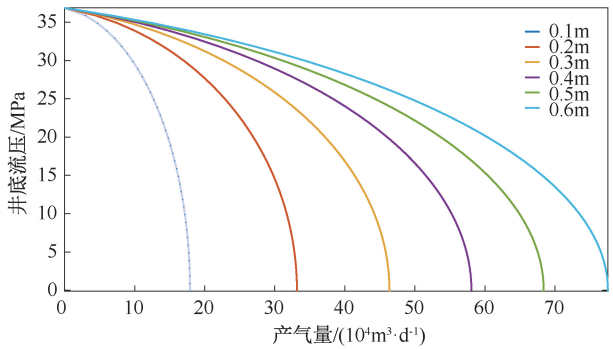


图4 孔深-产能图版
Fig. 4 Productivity chart with different perforation depths

由孔密和相位角对产能的影响图版可知, 随着孔密的增大, 产能的上升幅度不及前两个参数明显; 随着相位角的改变, 产能的变化不明显。在这种地质和射孔条件下, 孔密和相位角是影响产能的次要因素。

图 5 所示为假设污染带渗透率降低 20% 和 80% 时, 污染深度对产能的影响图版。由图可见, 在污染带渗透率改变较小(20%)的情况下(图 5a), 污

染带深度对产能的影响较小;在污染带渗透率改变很大(80%)的情况下(图 5b),污染带深度对产能的影响越来越大。

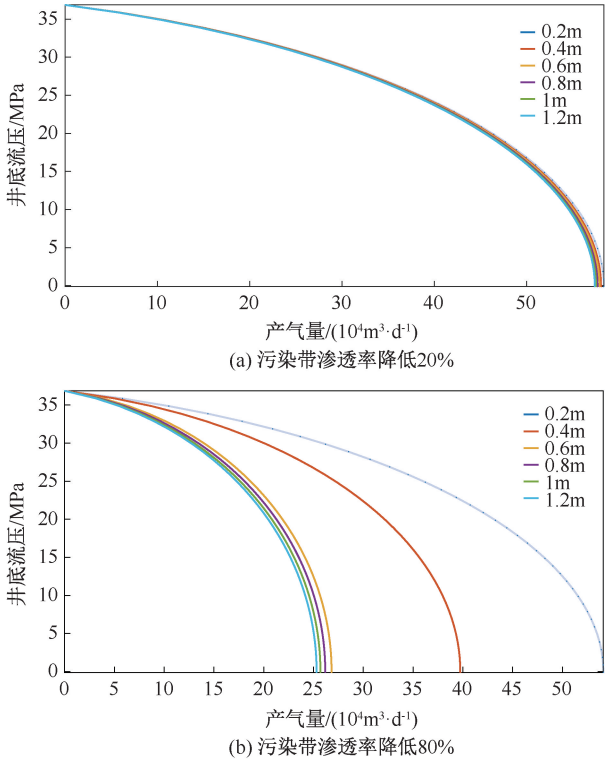


图 5 污染深度-产能图版

Fig. 5 Productivity chart with different damage depths

图 6 所示为不同射孔深度时,污染程度对产能的影响。由图 6a 可见,在刚好射穿污染带的情况下,污染带污染程度对产能的影响较大;当射孔深度大于污染深度时(图 6b),污染带污染程度对产能的影响程度变小,进一步表明,射孔深度是射孔完井应该重点考虑考虑的关键参数;当射孔深度小于污染深度(图 6c),污染带污染程度对产能的影响程度很大,这一结论与前面的图版互相印证,再次表明射孔深度是射孔完井应该重点考虑考虑的关键参数。

综合上述研究,得到以下结论:在相同的射孔参数条件下,未射穿污染带时,污染对产能的影响程度较大;射穿污染带后,产能增加幅度减小。因此,在射孔设计时,应优先保证穿深参数。

采用以上的研究思路,进一步研究压实带参数(压实厚度和压实程度)对产能的影响规律。图 7 为压实带渗透率降低 40% 和 80% 时压实厚度对产能的影响规律,图 8 为压实带厚度为 1 mm 时,压实程度对产能的影响规律。由于压实带压实厚度和压实程度对产能的影响规律与污染带深度和污染

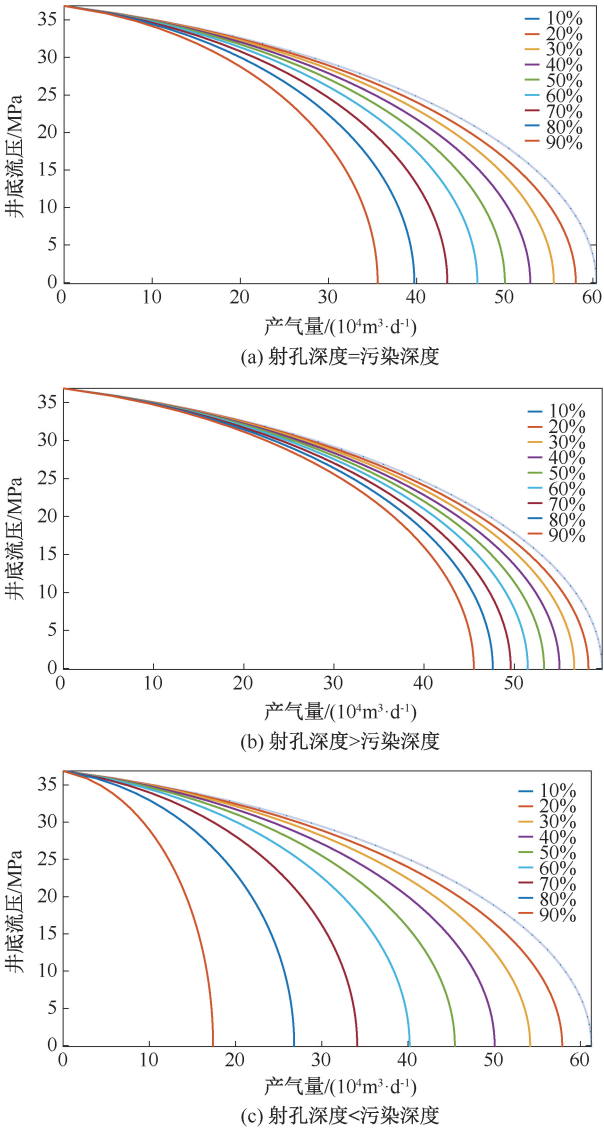


图 6 污染程度-产能图版

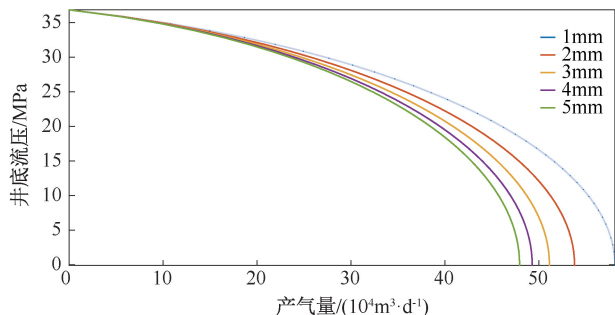
Fig. 6 Productivity chart with different damage levels

程度对产能的影响规律类似。需要指出的是,通过射孔工艺的改善(如负压射孔、爆燃压裂射孔等)来提高测试井的产能具有较大潜力。

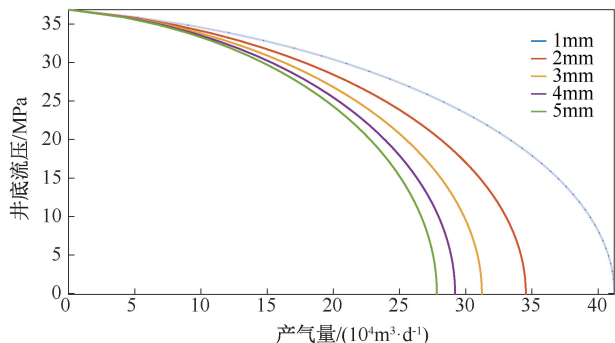
3 现场井射孔参数优化

XX1 井位于西湖凹陷中央反转构造带中北部的宁波构造带内。宁波构造是在中央反转带走滑应力场背景下形成的背斜,呈北东向展布,北北东长轴方向上两翼回倾明显,北西西方向具有低幅度背斜特征。T20 以下背斜圈闭未被后期东西向断层破坏,形态完整、保存条件好,具有良好的成藏条件,有很大的勘探潜力。

测试层位为花港组 H3 上部细砂岩储层、井段深度为 3 709.0 ~ 3 739.0 m,测试下入 TCP+APR+



(a) 压实带渗透率降低40%



(b) 压实带渗透率降低80%

图7 压实厚度-产能图版

Fig. 7 Productivity chart with different compaction depth

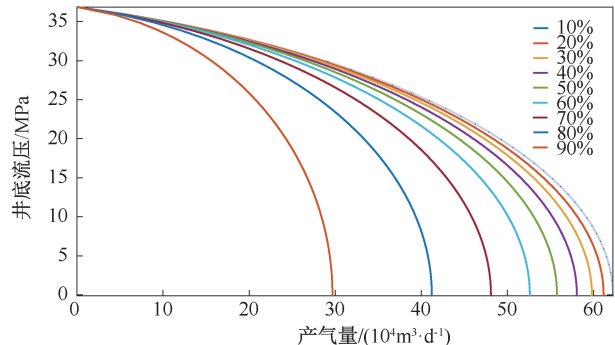


图8 压实带渗透率降低程度-产能图版(压实带厚度1 mm)

Fig. 8 Productivity chart with different degree of permeability reduction in the compaction zone (thickness of the compaction zone is 1 mm)

139.7 mm 钻杆常规测试联作管柱,使用外径178 mm 射孔枪、孔密40 孔/m 的深穿透射孔弹,采用环空加压在16.6 MPa 负压条件下射开储层,进行了两次开关井测试。试井解释结果显示,测试层为品质良好的气层,当前射孔参数下的无阻流量为 $58 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

以前面的射孔井产能模型为基础,将XX-1井地层参数和射孔实验及模拟射孔参数代入产能模型中,计算得到每个射孔参数组合(孔密、相位角、API 孔径、储层有效穿深)下的产能曲线,其中产能最高的射孔参数组合,即为最优的射孔参数^[17-18]。

图9所示为不同参数组合下的产能曲线,绿色

的散点为实测的产能曲线,蓝色菱形的产能曲线为当时射孔完井时射孔参数所对应的产能拟合曲线。由图可见,该井的射孔参数处于中等水平,在优化射孔参数(相位角60度、孔密16孔/m、孔径14.7 mm、穿深378.73 mm)后,无阻流量预计达到 $80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,比测试时($50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)增加60%左右。

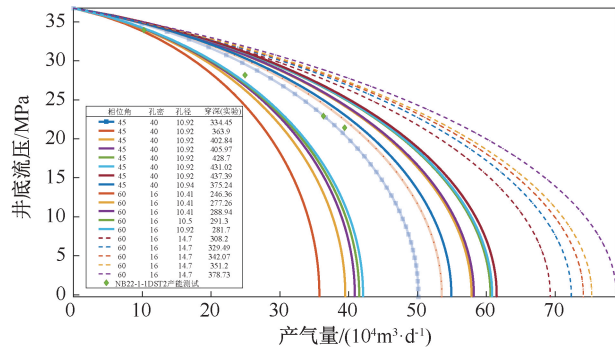


图9 XX1井不同射孔参数下的产能曲线

Fig. 9 The productivity curve of well XX1 under different perforating parameters

4 结论

(1)孔深、孔径是影响产能的主控因素,在射孔参数设计时应优先确保孔深、孔径,在二者不可兼得的情况下,应进行优化。

(2)压实带是影响射孔产能的重要因素,应采用降低压实带影响的新的射孔工艺。

(3)基于地层参数和提供的射穿模拟数据,该井当前采用的射孔参数未能最大化释放该层产能,有待进一步措施优化。

(4)表皮系数对产能的影响大,钻完井期间中应尽量减少泥浆的浸泡时间;对污染严重的井,通过放大生产压差的方法可减少侵入地层的工作液,降低污染,增加产能。

致谢:感谢中海石油(中国)有限公司上海分公司和中法渤海地质服务有限公司对本文的支持。

参考文献

- [1] HARRIS M H. The effect of perforating oil well productivity [C]. SPE1236-PA, 1996.
- [2] KLOTZ J. A, Krueger R. F, PYE D S. Effect of perforation damage on well productivity [C]. SPE 4654-PA, 1974.
- [3] METIN K, TARIQ S. M. Semianalytical productivity models for perforated completions [C]. SPE 18247-PA, 1991.
- [4] 唐愉拉, 潘迎德, 冯跃平. 油气井射孔完井产能预测和优化射孔设计 [J]. 油气井测试, 1991, (2): 102-125. TANG Yula, PAN Yingde, FENG Yueping. Productivity

- prediction and optimization of perforation design for oil and gas wells[J]. Well Testing, 1991, (2):102-125.
- [5] 李龙龙,吴明录,姚军,等. 部分射开直井的产能计算方法[J],石油钻探技术,2014,42(3):80-89.
LI Longlong, WU Minglu, YAO Jun, et al. Calculation method of the productivity of partially perforated vertical well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(3):80-89.
- [6] 李龙龙,吴明录,姚军,等. 射孔斜井产能预测新方法[J]. 科学技术与工程,2014,14(8):145-150.
LI Longlong, WU Minglu, YAO Jun, et al. A new method to forecast the productivity of perforated slant well[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(8):145-150.
- [7] 唐健程. 东海低渗气藏射孔完井直井产能计算方法[J],石化技术,2023,30(5):181-183.
TANG Jiancheng. Productivity calculation method for perforated completion vertical wells in low permeability gas reservoirs in the East China Sea[J]. Petrochemical Industry Technology, 2023, 30(5):181-183.
- [8] 关利军,李纪智,何泽俊,等. 基于双径向流模型的产能计算及射孔优化技术[J]. 石油化工应用,2019,38(5):35-42,60.
GUAN Lijun, LI Jizhi, HE Zejun, et al. Productivity calculation method of perforated vertical well based on dual radial flow model and perforation optimization[J]. Petrochemical Industry Application, 2019, 38(5):35-42,60.
- [9] 许峰,高科超,卢中原,等. 渤南探区明化镇组探井产能评价方法[J]. 长江大学学报(自然科学版),2019,16(7):40-44.
XU Feng, GAO Kechao, LU Zhongyuan, et al. Productivity evaluation of exploratory wells in Minghuazhen formation of Bonan exploration area[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2019, 16(7):40-44.
- [10] 赵洪涛,于喜,于伟强,等. 渤海稠油储层探井产能预测方法[J]. 石油地质与工程,2022,36(3):78-81,86.
ZHAO Hongtao, YU Xi, YU Weiqiang, et al. Research on productivity prediction method of exploration wells in heavy oil reservoir of Bohai oilfield[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2022, 36(3):78-81,86.
- [11] 徐新华,戴宗,朱义东,等. 基于复合油藏模拟的后效射孔产能评价方法[J]. 油气井测试,2023,32(2):63-67.
XU Xinhua, DAI Zong, ZHU Yidong, et al. An aftereffect perforation productivity evaluation method based on composite reservoir simulation[J]. Well Testing, 2023, 32(2):63-67.
- [12] 吴英,马焕英,张子前,等. 基于压力的气井二项式产能方程曲线校正新方法[J]. 油气井测试,2022,31(6):1-5.
WU Ying, MA Huanying, ZHANG Ziqian, et al. A new correction method of gas well binomial productivity equation curve based on pressure[J]. Well Testing, 2022, 31(6):1-5.
- [13] 王茜. 射孔井产能预测方法研究[D]. 西安石油大学,2015.
WANG Qian. The research for prediction methods of perforation well's productivity[D]. Xi'an Shiyou University, 2015.
- [14] 王荣,郭希明,蒋宏伟,等. 水平井射孔产能影响因素分析[J]. 内蒙古石油化工,2012,38(19):33-35.
WANG Rong, GUO Ximing, JIANG Hongwei, et al. Factors analysis on influencing productivity of perforated horizontal well[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2012, 38(19):33-35.
- [15] 姚立春. 射孔对气井产能的影响探析[J]. 化工管理, 2017, 448(14):83-84.
YAO Lichun. Analysis of the impact of perforation on gas well productivity[J]. Chemical Engineering Management, 2017, 448(14):83-84.
- [16] 乔威. 射孔对气井产能的影响[J]. 中国石油和化工标准与质量,2016,36(5):33-34.
QIAO Wei. Impact of perforation on gas well productivity[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2016, 36(5):33-34.
- [17] 幸雪松,邱浩,文敏,等. 基于正交实验法射孔参数优化设计数值模拟[J]. 科学技术与工程,2022,22(25):10952-10957.
XING Xuesong, QIU Hao, WEN Min, et al. Numerical simulation investigation of perforation parameter optimization design based on orthogonal experimental method[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(25):10952-10957.
- [18] 宋时权,李晶晶,许志伟,等. 射孔参数优化设计[J]. 油气井测试,2008,17(5):65-67,78.
SONG Shiquan, LI Jingjing, XU Zhiwei, et al. Optimized design to perforating parameter[J]. Well Testing, 2008, 17(5):65-67,78.

编辑 方志慧

第一作者简介:王雷,男,1976年出生,高级工程师,2005年获中国科学院兰州地质所硕士学位,现主要从事地质作业技术研究及管理工作。电话:021-22830378, Email: wanglei5@cnooc.com.cn。通信地址:上海市长宁区通协路388号海洋石油大厦,邮政编码:200050。