

基于有限元数值模拟的裸眼射孔完井产能评价

翁昊阳¹, 王晓鹏¹, 张启龙¹, 董平华¹, 高斌¹, 刘伟^{2*}, 谭强²

1 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459

2 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

* 通信作者, liuwei@cup.edu.cn

收稿日期: 2020-11-24

国家科技重大专项渤海油田高效开发示范工程(2016ZX05058)资助

摘要 随着油气勘探开发的不断推进, 非常规油气资源被愈发关注。对于测试、开发过程, 提产工作是其中关键一环, 然而常规的完井方式已经不能满足油田对产能的需求。为提高渤海某油田致密砂砾岩储层测试产能, 依据降低地层污染和增大井筒暴露面积的原理, 本文提出了裸眼射孔的新完井方式。基于有限元方法建立了产能评价的三维模型, 并对特定工况下裸眼射孔、裸眼、套管射孔等完井方式的产量进行分类评价。之后对影响裸眼射孔完井方式产能的参数进行了敏感性分析, 最终利用二维平面射孔井模型揭示了射孔井增产机理, 利用产能评价的室内实验验证了数值模拟所得规律。研究表明, 裸眼射孔完井方式能有效提高测试产能, 提产效果受地层条件和射孔参数组合控制, 较裸眼完井的提产比例约 40%~80%, 较套管射孔完井的提产比例约 10%~130%。本研究为非常规油气井完井方式的选择提供了新思路, 为现场提产方案制定提供了依据和参考。

关键词 测试产能; 裸眼射孔; 有限元; 室内实验; 提产效果

Productivity evaluation of open-hole perforation completion based on finite element numerical simulation

WENG Haoyang¹, WANG Xiaopeng¹, ZHANG Qilong¹, DONG Pinghua¹, GAO Bin¹, LIUWei², TAN Qiang²

1 Tianjin Branch of CNOOC(China) Ltd., Tianjin 300459, China

2 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract With the continuous advancement of oil and gas exploration and development, unconventional oil and gas resources have been paid more and more attention. The production improvement is a key part of the well-test and development process, but conventional completion forms can no longer meet the oilfield's production requirements. Therefore, in order to improve the well test productivity of tight glutenite reservoirs in Bohai Oilfield, based on the principles of reducing formation pollution and increasing the exposure area of the wellbore, a new completion form was proposed, namely open-hole perforation. Using the finite element theory, a three-dimensional model of productivity evaluation was established, and the production of different completion forms, such as open-hole perforation, open-hole and casing perforation, under specific working conditions were classified and evaluated. Afterwards, the sensitivity analysis of the parameters affecting the productivity of open-hole perforation completion

引用格式: 翁昊阳, 王晓鹏, 张启龙, 董平华, 高斌, 刘伟, 谭强. 基于有限元数值模拟的裸眼射孔完井产能评价. 石油科学通报, 2023, 02: 152-165

WENG Haoyang, WANG Xiaopeng, ZHANG Qilong, DONG Pinghua, GAO Bin, LIUWei, TAN Qiang. Productivity evaluation of open-hole perforation completion based on finite element numerical simulation. Petroleum Science Bulletin, 2023, 02: 152-165. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.02.011

was carried out. Finally, a two-dimensional planar model for perforated well was used to reveal the production improvement mechanism, and the indoor experimental results for productivity evaluation verified the laws obtained by numerical simulation. Studies have shown that the open-hole perforation completion can effectively increase the well test productivity, and the productivity improvement effect depends on the formation conditions and perforating parameter combination. Compared with the open-hole completion, the rate of productivity improvement is about 40%~80%. Compared with the casing perforation completion, the rate of productivity improvement is about 10%~130%. This study provides a new idea for the selection of unconventional oil and gas well completion forms, which can provide basis and reference for the formulation of on-site production improvement plans.

Keywords well test productivity; open-hole perforation; finite element; indoor experiment; production improvement effect

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.02.011

0 引言

随着全球社会经济飞速发展,许多国家将非常规油气作为保障能源安全和改善环境的途径而给予大力支持^[1]。致密气作为我国最具发展前景的非常规天然气之一,其储量已经超过天然气总量的三分之一^[2],是未来现实且重要的接替能源。同时致密气分布广泛,国内主要分布于四川、鄂尔多斯、柴达木、渤海湾、松辽、塔里木、吐哈等 10 余个盆地中,因此这些地区也是未来勘探开发的重要领域。

致密气的开发需要多种技术的交叉,其中选用合适的完井技术非常重要^[3]。在特定的产层特性条件下,不同的完井方式对产能的影响很大,众多研究已经对此作出了解释^[4-9]。因此,油田为了提高产能,在测试和开发时会根据不同地质条件优选合适的完井方式。渤海某油田砂砾岩储层岩石具有致密和高强度等特点,其井壁稳定性良好,但现有完井方式在测试时不能释放其最大产能。因此,从提高井筒暴露面积和降低储层污染的原理出发,在维持井壁稳定的基础上提出了裸眼射孔的新完井方式来提升产能,并对其增产效果进行评价。

本研究中对不同完井方式的井进行产能评价主要采用了有限元数值模拟方法。利用数值模拟来分析预测单井产能由来已久。就套管射孔井举例,自 1981 年 Locke^[10]第一次利用三维有限元模型预测不同射孔参数下射孔完井的产能(用产率比表示),国内外诸多学者针对套管射孔的产能评价做了大量的研究^[11-15],描述了不同射孔参数和污染条件对产能的影响规律,并取得了不错的实践效果。例如,薛世峰等人^[16]利用 COMSOL 软件建立 3D 有限元模型验证并完善了射孔参数对产率比的影响,王茜^[17]又对直井、斜井和水平井等多种井型的射孔井产能进行了系统评价,同时利用灰色关联法对各影响因素的重要程度进行排序。牛超^[18]对柴达木盆地 HTG 油田进行了射孔参数、射孔工

具、射孔工艺、射孔液等一体化设计和研究。综上所述,利用有限元数值模拟对裸眼射孔井进行产能评价是可行的。但是,国内外对裸眼射孔完井的提法还比较陌生,产能评价的相关研究还较少,这正是本研究开展的重要意义。

1 裸眼射孔井产能评价模型的建立

1.1 裸眼井与射孔井产能评价的数学模型

对于裸眼井产能评价解析模型,已经有较成熟的理论^[19]。测试过程的油气流动,可看作圆形定压边界油层中心井的稳态渗流,可推导出代表裸眼井的产能模型式(1)。对于套管射孔井,同理可以得到产能模型式(2)。

$$q_0 = \frac{2\pi kh(p_e - p_w)}{\mu [\ln(r_e / r_w)]} \quad (1)$$

$$q_p = \frac{2\pi kh(p_e - p_w)}{\mu [\ln(r_e / r_w) + s_t]} \quad (2)$$

实际上为了更好地对比不同完井方式的产能,通常采用产率比 PRI(Productivity Ratio Index,指各完井条件下实际产量值与裸眼完善井的产量值之比)来评价^[17]。例如套管射孔井的 PRI 值可由式(3)给出。对于裸眼射孔井,产能评价模型和产率比也可以由式(2)(3)表示,不过其中的表皮因子与套管射孔井的不同。

$$PRI = \frac{q_p}{q_0} = \frac{\ln(r_e / r_w)}{\ln(r_e / r_w) + s_t} \quad (3)$$

式中, q_0 为裸眼完善井产量, cm^3/s ; q_p 为套管射孔井产量, cm^3/s ; k 为地层渗透率, μm^2 ; h 为油层厚度, cm ; p_e 为边界孔隙压力, atm ; p_w 为井底流动压力, atm ; μ 为地层流体粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; r_e 为供给边界半径, cm ; r_w 为井眼半径, cm ; s_t 为总表皮系数,也称为井底阻力系数,表示井的完善程度。

对于套管射孔井的总表皮系数,又可以分为射孔孔眼表皮系数和射孔损害表皮系数,其中射孔孔眼表皮系数又可以分为平面流表皮系数,垂直流表皮系数和井筒效应表皮系数。需要注意的是,通常表皮系数并没有一个确定的解析解,因此一些学者利用数值解反演的方法提出了表皮系数的半解析模型^[14,17,20]。

1.2 裸眼射孔井产能评价的数值模型

为了评价裸眼射孔这种新完井方式提高产能的效果,利用有限元理论建立了流固耦合的三维模型,借助ABAQUS软件的CAE模块可以将模型可视化。图1展示了该三维模型及其网格划分,模型整体包括地层、井筒和孔眼部分。

模型中的地层为一个圆的薄层,可近似认为符合平面径向流条件,其地层直径远大于井筒直径,以模拟油田中实际的单井控制范围。井筒周围存在一个污染区,由钻井或固井导致的污染会使其渗透率降低。孔眼周围存在射孔压实带,压实损害会使其渗透率降低,污染系数和压实程度的定义见式(4)。射孔螺旋分布于井筒周围,可灵活的设置不同的射孔参数(孔深、孔径、孔密和相位等)。

$$\begin{aligned} D_c &= k_d/k \\ C_c &= k_c/k \end{aligned} \quad (4)$$

式中, D_c 和 C_c 分别表示污染系数(Damage coefficient)和压实程度(Compaction coefficient), k 、 k_d 、 k_c 分别为地层渗透率、污染区渗透率和压实带渗透率,

μm^2 。

实际上射孔作业完成后,孔眼的几何形状和压实带的形状厚度都是复杂且不均匀的,使得建模无从下手,因此为了分析研究的必要,将实际情况进行一定简化,对模型的建立和运算过程做出如下假设:

- (1)薄层内地层渗透率是各向同性的;
- (2)孔眼为圆柱形且孔内渗透率远大于地层渗透率,其摩阻可以忽略不计;
- (3)开采流体为单相,且在开采至井筒过程中始终保持单相;
- (4)测试过程中,油气径向流至井筒,始终符合达西直线渗流理论;
- (5)钻井和射孔等造成的地层污染集中在井周和孔周地层,均匀地表示为渗透率的降低。

为了保证计算精确性,在近井地带和射孔孔周地带进行了网格加密。在单元设置上,模型采用热传导二阶四面体单元(DC3D10),总数量约33万。由于传热控制方程和渗流控制方程具有相似性^[21],通过单位对应可将求解流量问题转换为求解热流量问题,因此渗流单元(C3D10P)可以替换为传热单元(DC3D10),这样做可以大大提高计算效率。模型的压力边界为井筒内部设置的井底压力和远场的地层孔隙压力,计算结果为模型各节点的流量之和(总产量)。

1.3 数值模型的验证

为验证上述数值模型及计算方法的合理性,分别

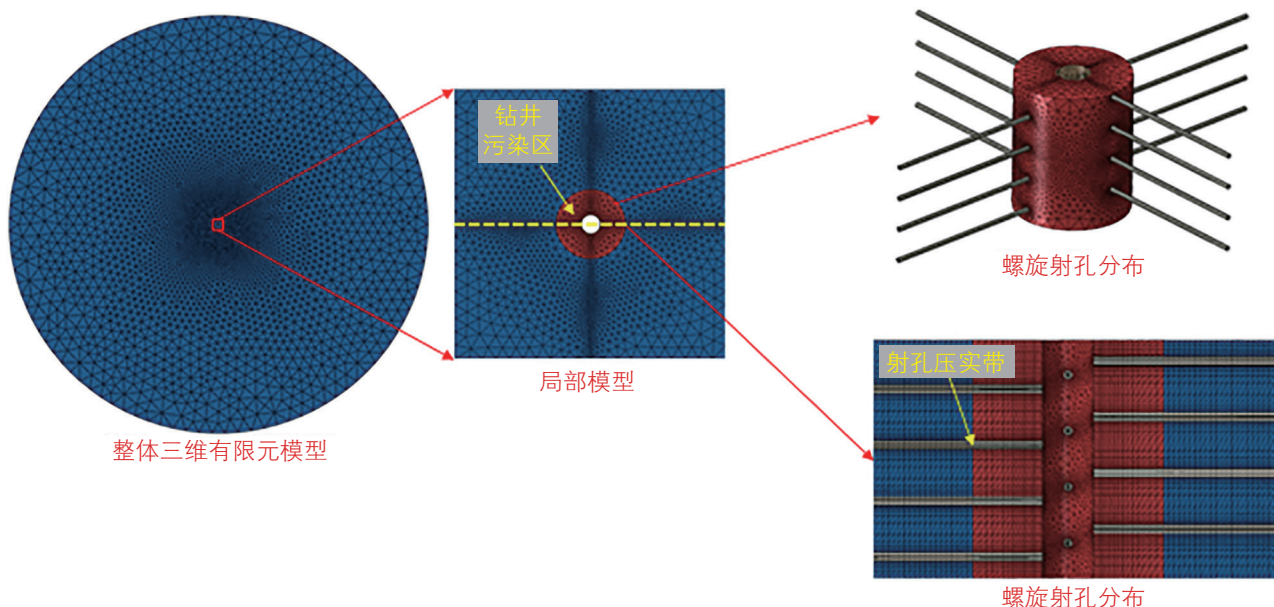


图1 裸眼射孔井三维可视化模型及网格划分

Fig. 1 Three-dimensional visualization model and grid division of open-hole perforated well

对裸眼完善井和套管射孔井进行了产量计算，将结果与 1.1 节中的解析、半解析公式计算结果进行对比。计算参数列在表 1 中，图 2 和图 3 分别为裸眼完善井和套管射孔井稳态测试时的流量分布云图。

模拟结果表明：裸眼井流量与压力梯度成正比，沿井径呈反漏斗状分布，符合式(1)的规律。数值模型产量为 2.03 m³/d，与解析解产量 2.01 m³/d 相比误差小于 1%。套管射孔井流量分布不均匀，主要沿孔眼分

布且越接近井筒流量越小。分别改变孔深和压实程度参数进行数值计算，将所得结果与文献[17]中半解析公式结果进行对比(图 4—图 5)。除孔深很小时略有不同外，产率比结果基本相等。因此，证明了该三维有限元模型和计算程序的可行性，可以用于裸眼射孔完井方式的产能评价模拟。

2 裸眼射孔井与常规完井方式的产能对比分析

实际测试条件下，裸眼射孔井的提产效果备受关注。与常规完井方式(裸眼、套管射孔)相比，裸眼射孔从原理上能获得产能的提升，但如何量化提产效果是产能评价中亟待解决的问题，而这也影响着油田如何综合考虑完井实施风险和产能收益从而制订最优的方案。

表 1 模型验证的计算参数

Table 1 Calculation parameters for model validation

参数	裸眼完善井	套管射孔井
测试压差 /MPa	10	10
粘度 /mPa·s	0.27	0.27
供油半径 /m	40	40
井眼半径 /m	0.108	0.108
地层渗透率 /mD	1.18	1.18
油层厚度 /m	0.5	0.5
污染区半径 /m	/	0.324
压实区厚度 /mm	/	13
孔密 /m ⁻¹	/	20
孔径 /mm	/	20
相位 /°	/	90
污染系数	/	0.4
压实系数	/	0.2

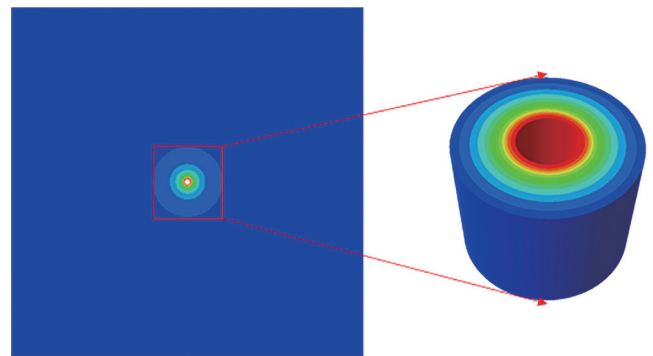


图 2 裸眼完善井稳态测试的流量分布云图

Fig. 2 Contour of flow distribution during steady-state well test in open-hole perfect well

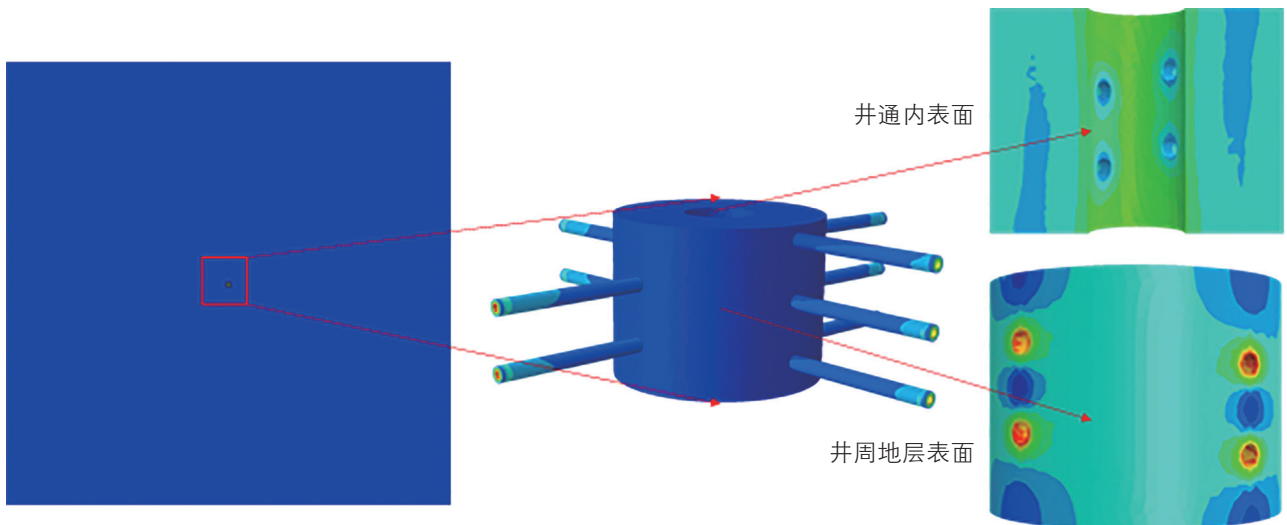


图 3 套管射孔井稳态测试的流量分布云图

Fig. 3 Contour of flow distribution during steady-state well test in casing perforation well

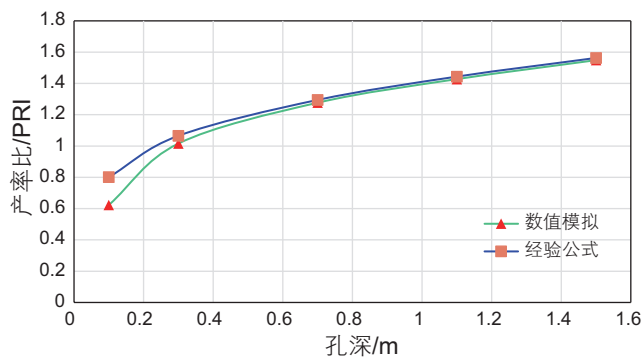


图4 套管射孔井产率比随孔深变化的数值解与解析解对比
Fig. 4 PRI comparison of numerical solution and analytical solution with perforation depth

因此,基于上述有限元模型,根据渤中19-6构造孔店组致密砂砾岩储层资料设置计算参数^[22-23](表2),对特定工况下裸眼射孔、裸眼和套管射孔等完井方式的产能情况进行分类评价。

2.1 无污染条件下

无污染条件是一种理想状况,具体为地层渗透率损伤可忽略不计,仅射孔存在压实区。此外,由于射孔装填火药的能量利用率较低,井下条件射孔穿深往

表2 分类产能对比分析的计算参数

Table 2 Calculation parameters for production comparative analysis under different conditions

参数	裸眼完善井	套管射孔井	裸眼射孔井
测试压差/MPa	10	10	10
粘度/mPa·s	0.1	0.1	0.1
供油半径/m	40	40	40
井眼半径/m	0.108	0.108	0.108
地层渗透率/mD	2.83	2.83	2.83
油层厚度/m	6.5	6.5	6.5
穿透污染带	/	是/否	是/否
压实区厚度/mm	/	13	13
孔深/m	/	0.8	1.1
孔密/m ⁻¹	/	20	20
孔径/mm	/	20	20
相位/°	/	90	90
钻井污染系数	/	0.4	0.4
固井污染系数	/	0.1	/
压实系数	/	0.2	0.2

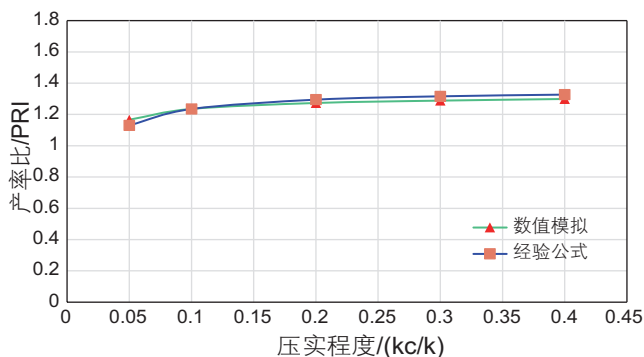


图5 套管射孔井产率比随压实程度变化的数值解与解析解对比
Fig. 5 PRI comparison of numerical solution and analytical solution with compaction coefficient

往达不到地面试验效果(地面试验约1.6 m);且由于套管射孔时,装填火药少并且射孔弹穿透钢板阻力大导致能量利用率更低,因此孔深应比裸眼射孔井更低。结合现场经验,设置裸眼射孔孔深约为地面试验的70%(1.1 m),套管孔深约为地面试验的50%(0.8 m)。

对比分析结果表明(图6),在表2的射孔参数组合下,套管射孔和裸眼射孔完井均能提高产能,但裸眼射孔井的提产效果更好,产能较裸眼完善井提高40%,较套管射孔井提高10%。这说明了地层无污染时,射孔增加的泄流面积和压降点内移有利于产能提升。

2.2 存在钻井(固井)污染

存在钻井(固井)污染的情况,既考虑钻井液的侵害导致渗透率下降,污染系数为0.4,同时考虑水泥浆的二次侵害,污染系数为0.1,即套管射孔带来的井周污染要比裸眼射孔更加严重。此外,污染带厚度被分为2种情况讨论:一种来源于渤海油田的作业经验,污染带厚度约为3倍井眼直径,此时射孔能解除污染;一种为假设的极端情况,固井造成井周大面积污染,

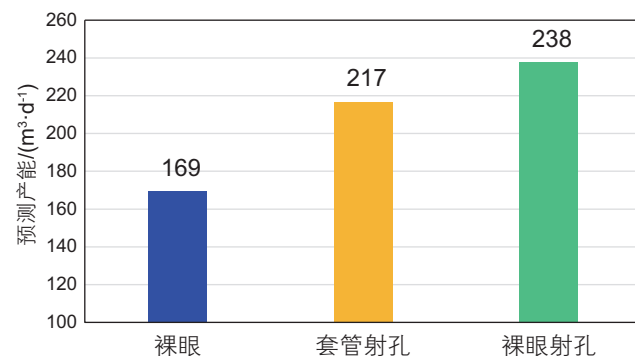


图6 无污染条件各完井方式产能对比
Fig. 6 Production comparison of different completion forms under no-damage condition

孔眼未能射穿污染带。

对比分析结果表明(图 7、图 8):射孔未射穿污染带时,套管射孔井产能最低,裸眼井与裸眼射孔井产能分别是套管射孔井产能的 1.6 倍和 2.3 倍,此时井筒暴露面积对产能的影响更大;射孔射穿污染带时,裸眼井此时产能最低,裸眼射孔井较裸眼井产能提高 1.8 倍,此时孔眼暴露面积对产能的影响更大。

2.3 考虑酸洗、水力喷砂射孔等改造措施

本研究中改造措施主要为酸洗和水力喷砂射孔。酸洗能解除井周地层污染和压实损伤,使地层渗透率恢复为原始渗透率。而水力喷砂射孔相较于常规射孔工艺,其孔深大幅增加(可达 3 m),孔密较低(每米 2~4 孔),孔道较宽(通常 100 mm 以上),几乎不存在压实区,但实施工艺更复杂。

对比分析结果表明(图 9):酸洗能有效提升存在污染的裸眼井产能,但对射孔完井效果有限。而水力喷砂射孔也具有较好的提产效果,但受孔密的控制明显,本研究提供的极限参数下,产能能达到裸眼完善

井的 1.8 倍。

因此,综合所有分类对比结果(图 10),以套管射孔(未穿透污染带)为基准,将其产能提升效果列于表 3 中,可以得出结论:如果实施裸眼完井,酸洗对产能的提升效果明显;如果实施射孔完井,裸眼射孔和水力喷砂射孔都能较好的提高产能。但裸眼射孔的工艺又较水力喷砂射孔简单的多,因此在井壁稳定性良好的前提下,裸眼射孔仍可以作为提高产能的一个重要手段。

3 裸眼射孔井产能评价影响参数敏感性分析

对于裸眼射孔井,由式(2)、式(3)可知,地层渗透率、油层厚度、流体粘度和测试压差的改变会影响产量的绝对值但不会影响产率比,也就不能影响裸眼射孔的提产效果。射孔参数组合是影响提产效果最重要的因素,其次是地层污染程度。因此在采用表 2 所列参数的基础上,依据单因素控制变量法,分别对裸眼射孔井产能评价影响参数进行了敏感性分析。

3.1 孔深和孔径的影响

对射孔井而言,射孔深度仍然是影响产能最敏感的因素,尤其射穿污染带后,产能会进一步大幅提升(图 11,红色框线内为钻井污染带)。若射孔参数组合能解除污染影响,则裸眼射孔和套管射孔的产率比随孔深的增加趋于一致。但如果考虑固井污染,在孔深未穿透污染带时,裸眼射孔产率比大幅高于套管射孔。实际上,裸眼射孔和套管射孔的产能差异主要由射孔深度和污染程度共同控制;且当孔深能射穿钻井(固井)污染带时,相同射孔参数下两者的产能几乎一致(图 11),而原因则在 4.1 节中说明。

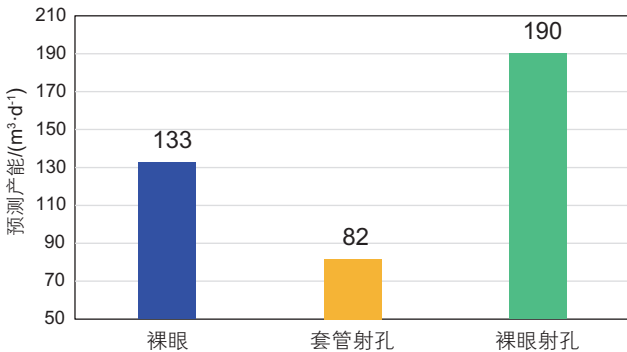


图 7 存在污染且射孔未穿透污染带的各完井方式产能对比
Fig. 7 Production comparison of different completion forms with perforation not penetrating the damage zone

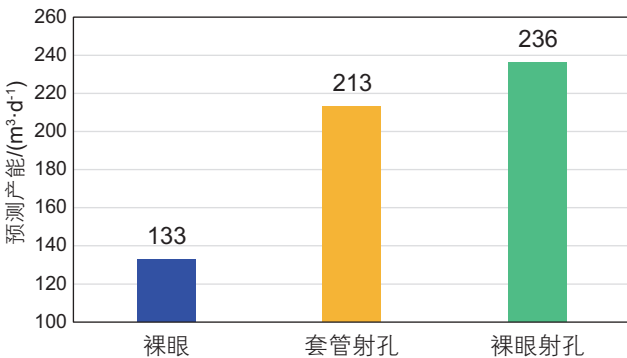


图 8 存在污染且射孔穿透污染带的各完井方式产能对比
Fig. 8 Production comparison of different completion forms with perforation penetrating the damage zone

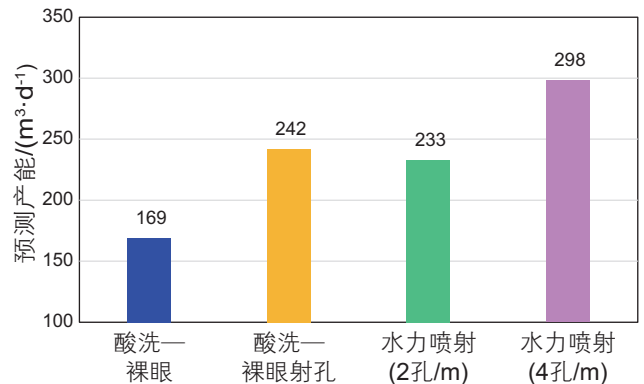


图 9 考虑改造措施的产能评价对比
Fig. 9 Production comparison of different completion forms and reservoir reconstruction measures

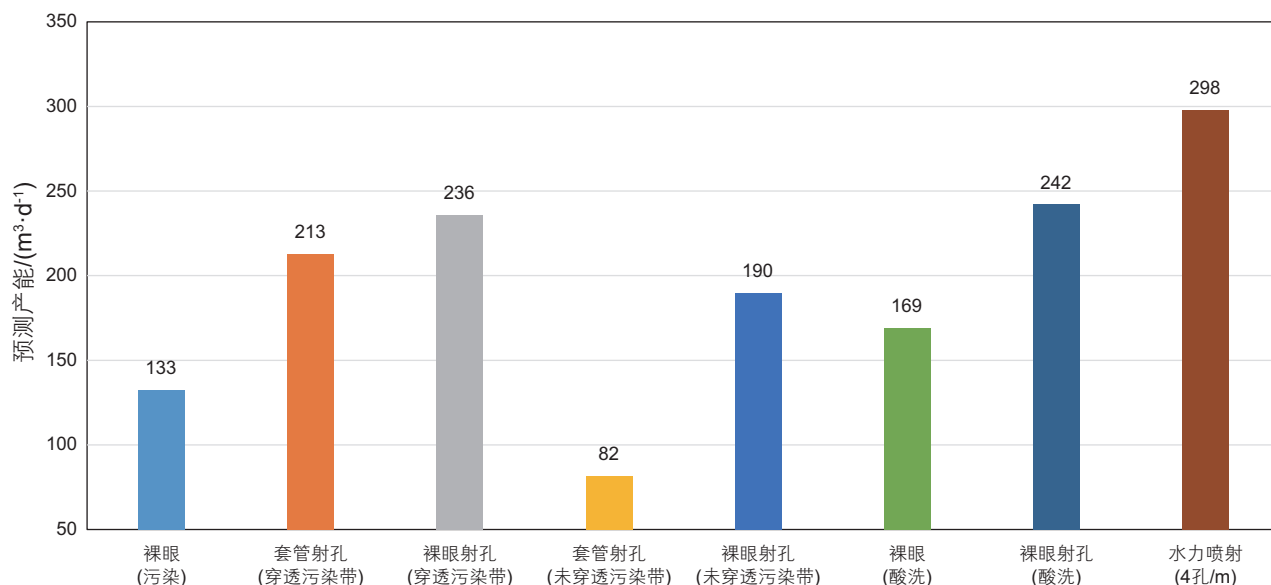


图 10 所有分类条件下产能评价对比汇总

Fig. 10 Production comparison under all classification conditions mentioned above

表 3 所有分类条件各完井方式产能提升效果

Table 3 Productivity improvement effects of all completion forms mentioned above

完井方式	产能提升比例/%
套管射孔 (未穿透污染带)	0
裸眼 (污染)	62
裸眼 (酸洗)	106
裸眼射孔 (未穿透污染带)	132
套管射孔 (穿透污染带)	160
裸眼射孔 (穿透污染带)	187
裸眼射孔 (穿透污染带, 酸洗)	195
水力喷射 (4孔/m, 3m孔深)	263

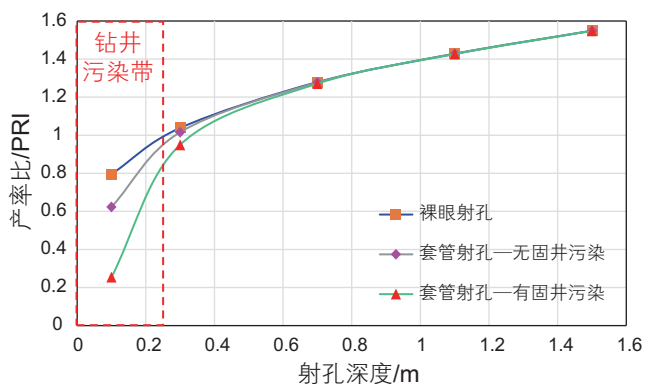


图 11 射孔井产率比随孔深的变化规律

Fig. 11 Variation of PRI with perforation depth in perforated wells

射孔孔径直径在射孔参数中对产能的影响最小, 孔径增加只是增加了产层的接触面积, 并不能够改变流体的流动效率^[17], 因此可使产能增加但增幅较小 (图 12)。射孔作业中不必过分追求大孔径。

3.2 孔密和相位的影响

随着射孔密度的增加, 地层流体流入井筒的通道增多, 同时也等同于增大了孔眼暴露面积, 因此会使产能增加, 但产率比的增幅会随孔密增加而降低 (图 13)。此外, 孔密过大会导致井壁失稳的风险增高, 因而孔密并不是越大越好, 应符合实际生产的需求。

射孔相位角对产能有较大的影响, 因为不同的相位角对应着不同的井底渗流场压力分布。根据现场施工经验可知, 目前主要使用的相位角为 0°、45°、60°、

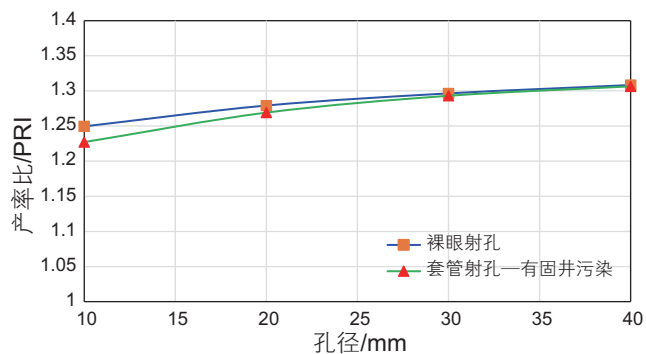


图 12 射孔井产率比随孔径的变化规律

Fig. 12 Variation of PRI with perforation diameter in perforated wells

90°、120°、180°。其中 90° 相位是提高产能的最优选择(图 14)。

3.3 地层污染程度的影响

地层污染程度又分为钻井(固井)的井周污染和压实带的影响。在钻井过程中, 钻井液会在流体压差作用下渗入地层, 从而改变地层渗透率, 其污染程度是由地层敏感性和钻井液的性质共同决定的。在固井过程中, 水泥浆的注入、顶替和凝固可能使地层受到二次污染, 渗透率进一步降低。在射孔过程中, 射孔弹在射开地层的同时对于孔眼周围的地层会有压实作用, 因此孔周压实带的孔渗都会降低。以上这些地层污染对产能评价的影响是不可忽视的。

由于固井污染只存在于套管射孔井中, 因此主要针对钻井污染系数和压实程度进行了敏感性分析。随着钻井污染系数和压实程度的降低, 产率比是逐渐降低的, 并且越严重的污染会导致的降幅越大(图 15、图 16)。而实际上, 由于射孔井的孔眼通道此时发挥了更大作用, 钻井的污染对射孔井的影响较裸眼井而

言要低得多, 这也说明了在地层污染程度严重时, 裸眼射孔完井方式是比裸眼更优的选择。

值得注意的是, 当孔深相等, 孔径、孔密、相位、钻井污染或压实程度不同时, 套管射孔与裸眼射孔的产能差异则主要由套管射孔中固井污染使井周地层渗透率进一步降低所决定, 而理想参数条件下这种差异会趋于无限小(图 12 至图 16)。

4 增产效果机理分析及实验验证

4.1 射孔井的增产机理分析

通过第 2、3 章的分析可知, 优选的射孔参数组合下, 射孔井相比于裸眼井在产能释放上更具优势。但需要格外注意的是, 假设裸眼射孔和套管射孔完井的射孔参数组合在井下条件完全一致且能解除井周污染时, 2 种完井方式的增产效果是趋于一致的。为探明射孔井的增产机理并对比无阻流量条件下的裸眼、套管射孔增产效果, 建立了一个带射孔的二维平面有限元模型(图 17), 设置井筒内壁能否进入流体以区分裸

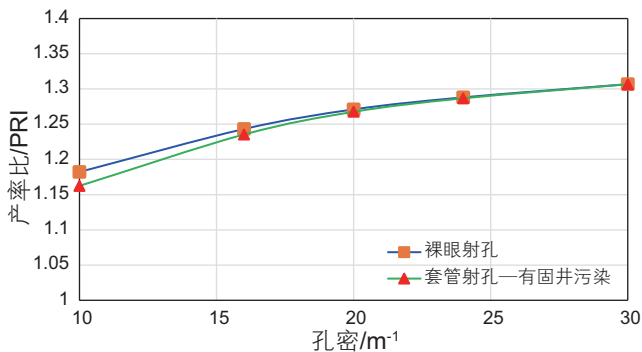


图 13 射孔井产率比随孔密的变化规律

Fig. 13 Variation of PRI with perforation density in perforated wells

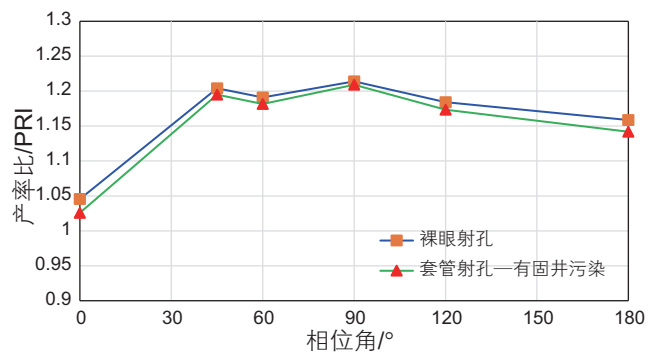


图 14 射孔井产率比随相位角的变化规律

Fig. 14 Variation of PRI with perforation phase angle in perforated wells

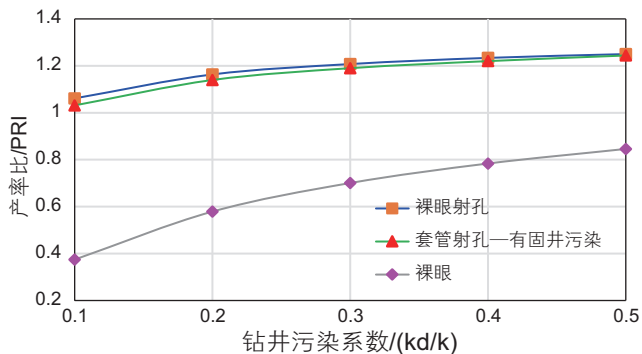


图 15 射孔井产率比随钻井污染系数的变化规律

Fig. 15 Variation of PRI with damage coefficient in perforated wells

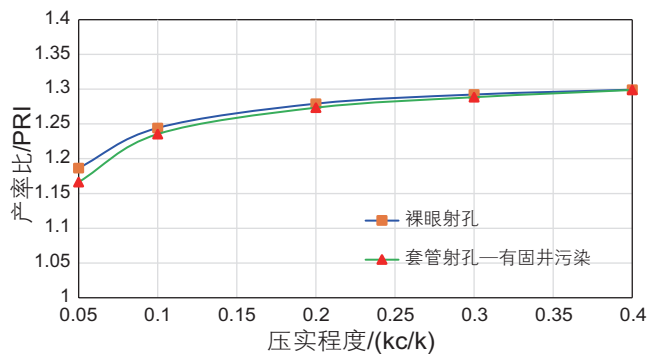


图 16 射孔井产率比随压实程度的变化规律

Fig. 16 Variation of PRI with compaction coefficient in perforated wells

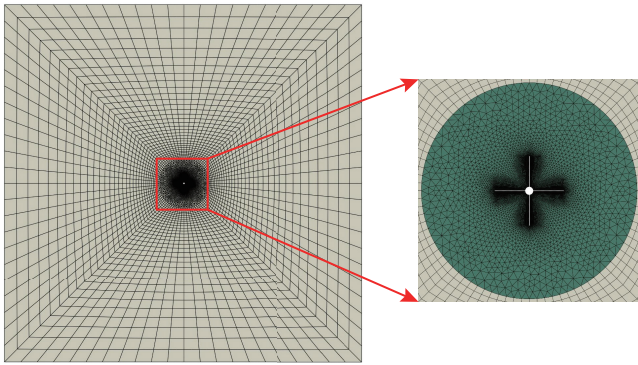
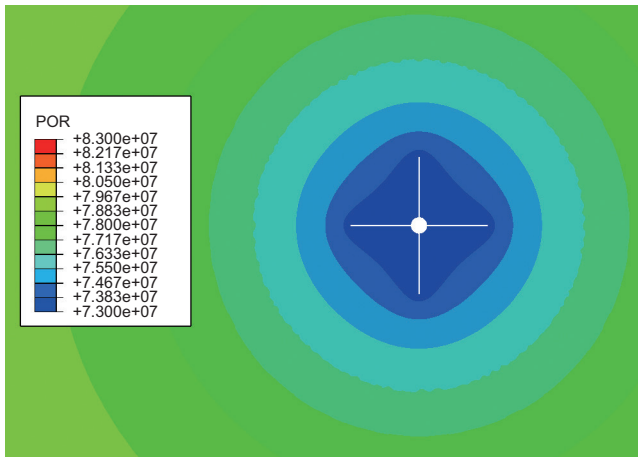
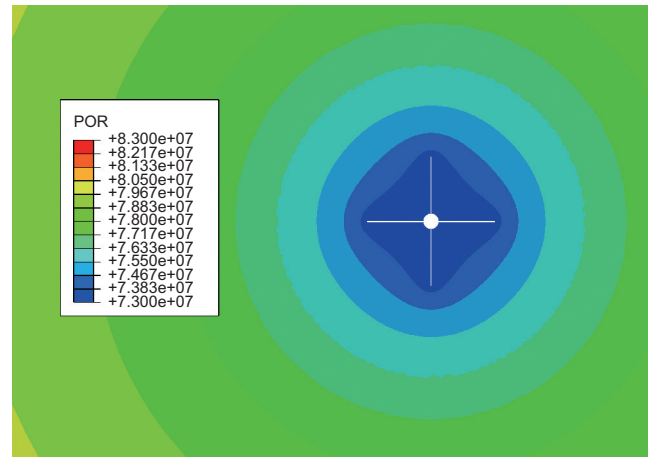


图 17 射孔井的二维平面有限元模型
Fig. 17 Two-dimensional planar finite element model for perforated well

眼射孔和套管射孔。对 2 种完井方式分别开展模拟, 计算中地质条件和射孔参数组合效果完全相同, 发现井周的压降漏斗(图 18)和流速分布(图 19)是基本一致的, 也验证了压降点的外移是射孔井增产的主要机理。通过流线分布观察到(图 20), 尽管裸眼射孔完井可以使少量流体流入井筒(图中红色虚线), 但这相比于孔眼流入的流量是十分微小的, 此外, 流量分布沿孔眼的指端到根端是逐渐衰减的, 最大的流量来自于孔眼指端。因此, 可以对 3.1 节中孔深射穿污染带时, 裸眼、套管射孔完井的提产效果几乎一致的现象做出解释: 裸眼射孔对比套管射孔完井的本质区别在于增加了井筒的暴露面积。但在孔深足够的条件下, 井筒的产量相比于孔眼的产量可以忽略不计(图 20), 也就



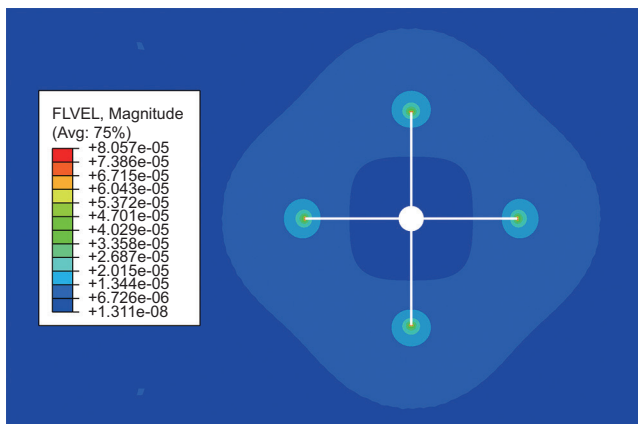
(a) 裸眼射孔



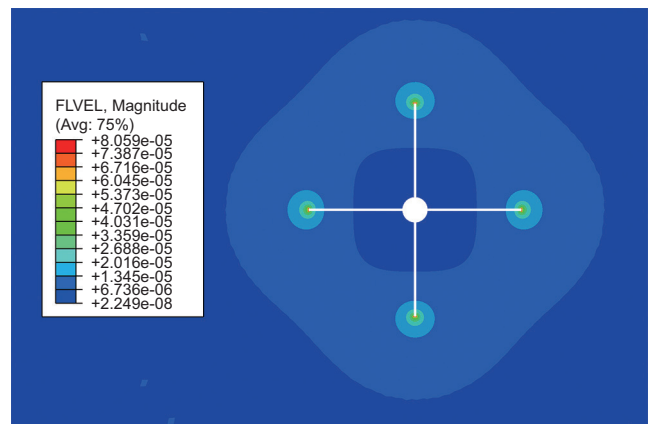
(b) 套管射孔

图 18 2 种射孔完井测试的稳态压力分布云图((a)(b)分别为裸眼射孔和套管射孔, 下同)

Fig. 18 Contour of pressure distribution during steady-state well test in perforated wells ((a) and (b) stand for open-hole perforation and casing perforation respectively, the same below)



(a) 裸眼射孔



(b) 套管射孔

图 19 2 种射孔完井测试的稳态流量分布云图

Fig. 19 Contour of flow distribution during steady-state well test in perforated wells

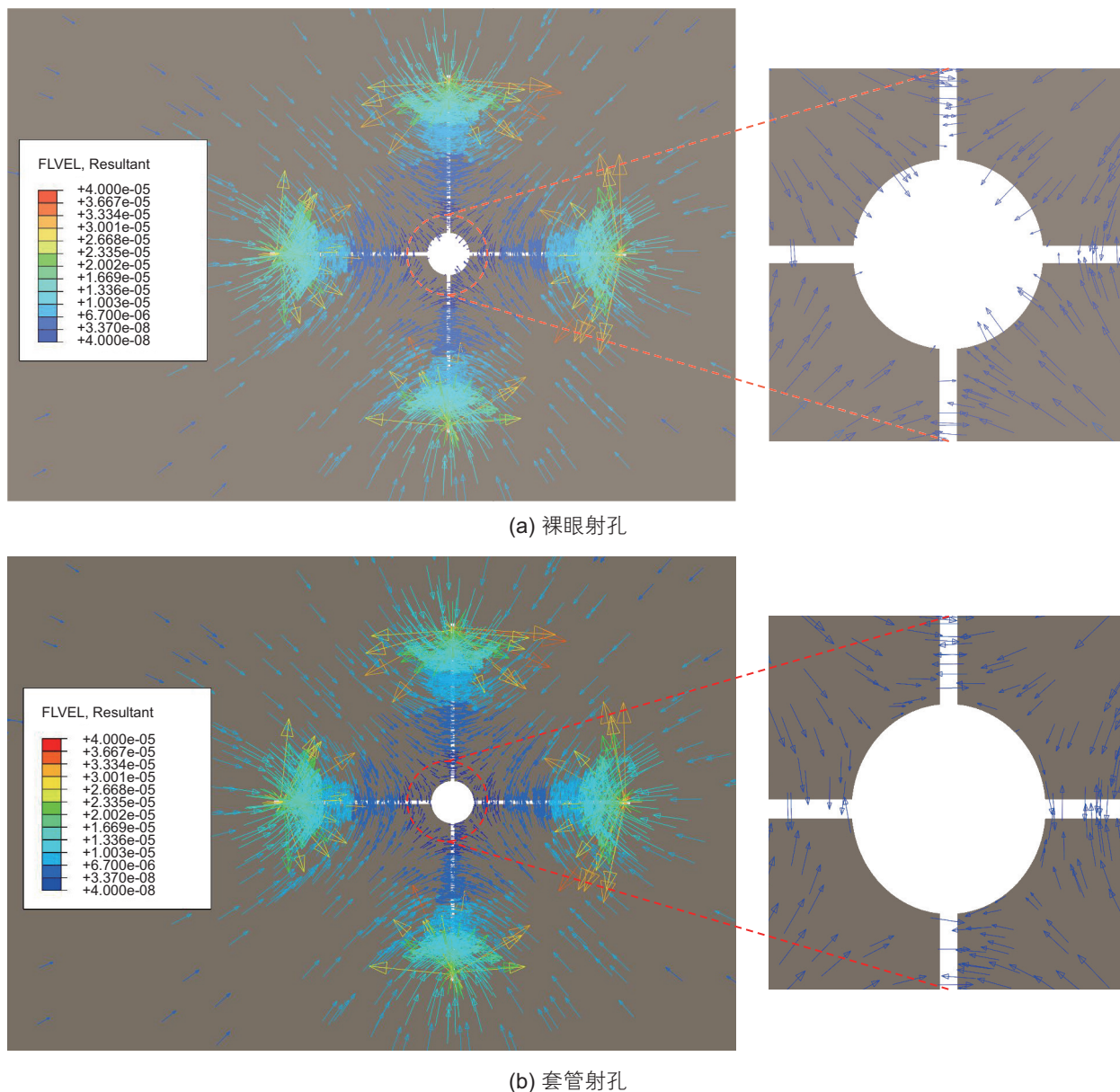


图 20 两种射孔完井测试的稳态流线分布图

Fig. 20 Diagram of streamline distribution during steady-state well test in perforated wells

导致了完全相同的条件下，裸眼射孔产能与套管射孔几乎相等。但不可忽视的是，现场应用中裸眼射孔的经济性更高，更便于达到理想的射孔孔深。

4.2 产能评价的室内实验

为了完善不同完井方式的产能评价，验证裸眼射孔的提产效果，利用砂岩的天然露头进行了测试产能评价室内实验。首先在露头上任取 3 个标准样品进行气测渗透率实验，结果为 0.35~0.46 mD，说明该岩心渗透率存在一定的非均质性。为避免其导致结果失去可比性，产能评价实验中在同一岩心柱上先后进行不同完井方式的产能模拟。

在露头上钻取岩心柱作为岩样，外径为 190 mm，高 200 mm，预钻内孔直径 38 mm。预钻内孔用以模拟裸眼完井方式，进一步利用微型钻头钻孔用以模拟裸眼射孔完井方式(孔深 43 mm，孔径 6 mm，孔密 20/200 mm，相位 90°)，再进一步利用 AB 胶封住井筒内壁模拟套管射孔完井方式(图 21)，分别依次对不同完井方式在相同条件下开展测试产能评价实验。

实验装置主要由氮气瓶、平流泵、高压釜、流量计和计算机等组成，装置流程示意如图 22，实物如图 23 所示。氮气瓶用于提供带压的流体，由平流泵控制其定压流入高压釜。高压釜中放置岩样，岩心上有垫块和橡胶片来保证轴向的固定和密封，使釜内流体只

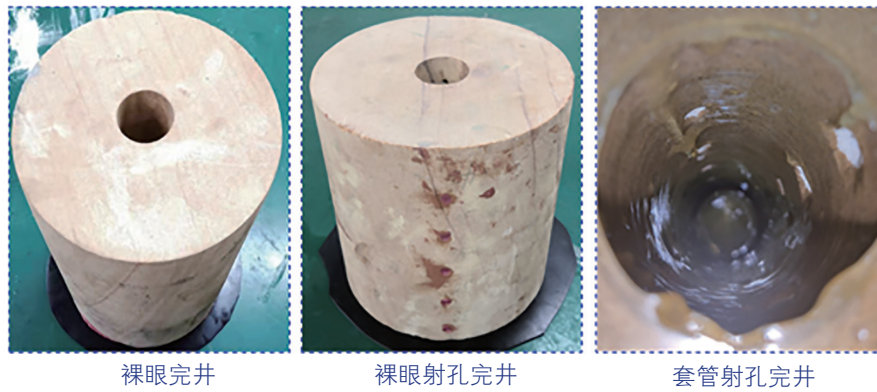


图 21 模拟不同完井方式的岩心柱

Fig. 21 Core pillars for simulating different completion methods

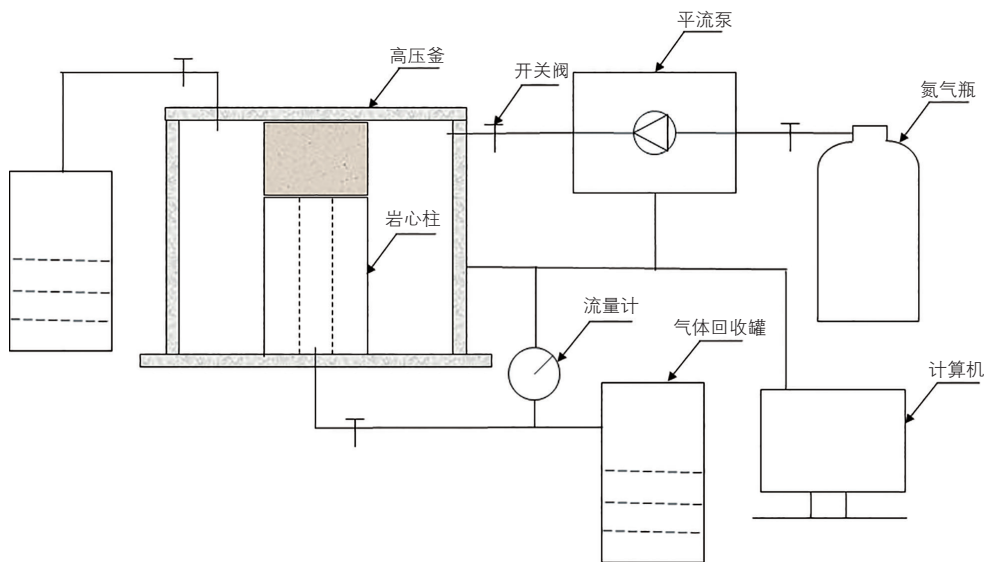


图 22 测试产能评价室内实验装置

Fig. 22 Experimental device for well test productivity evaluation

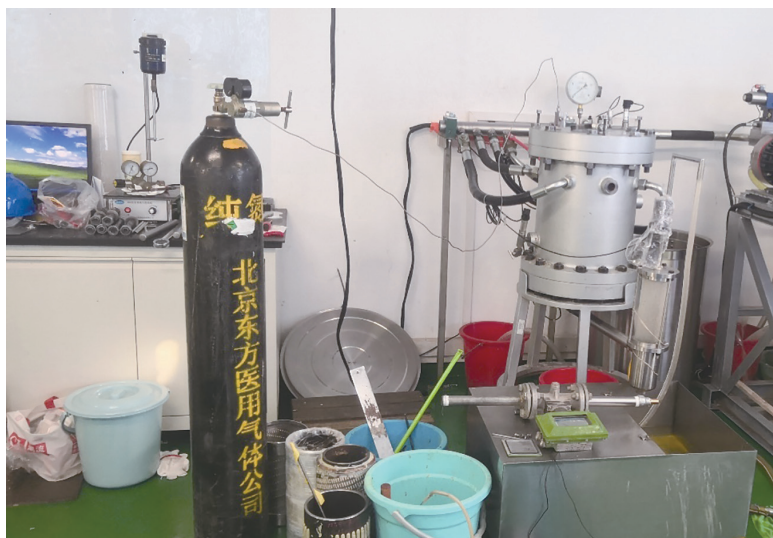


图 23 测试产能评价室内实验装置实物

Fig. 23 The physical object of the experimental device for well test productivity evaluation

能径向流入井筒，从而模拟直井油气生产的过程。高压釜有流体进出口，分别连接平流泵和气体回收罐。釜体内可以进行压力测量，即模拟孔隙压力。高压釜出口管线上连接流量计，可以准确读取产量的平稳值。计算机用于平流泵的控制和数据采集。

实验步骤如下：(1)利用岩心柱制备不同完井方式的模拟井筒；(2)将岩心柱置于高压釜内中心位置，顶底面用环形橡胶垫片密封，将垫块置于岩心柱上以固定岩心位置；(3)以图 22 为参考连接各实验装置；(4)模拟孔隙压力形成过程，打开高压釜入口开关阀和上部出口阀，关闭下部出口阀，待上部出口稳定流出气体后关闭阀门进行憋压；(5)模拟油气生产流动过程，关闭高压釜入口阀，打开下部出口阀，在压差作用下气体稳定产出，并由流量计测得产量；(6)利用计算机记录数据并分析结果。

利用岩样开展了产能评价对照实验，其实验结果

用单位压差产量表示(图 24，出口压力为平流泵的显示压力)。其中 2、3、4 号岩样的实验结果显示，在一定的稳定压力下，裸眼射孔完井方式的单位压差产量大于套管射孔，提升幅度约 1.3%~20%，同时套管射孔完井方式的单位压差产量大于等于裸眼，这与上述有限元数值模拟的结论一致。

对于 1 号岩样，裸眼完井的单位压差产量明显大于射孔井，且裸眼射孔和套管射孔的单位压差产量基本相等。这可能是由于进行裸眼完井方式的实验过程中，气体带动部分微粒造成通道堵塞或射孔不当导致部分孔失效，从而导致了后续实验产量值的失真。但总的来看，虽然可能存在的钻孔污染、射孔污染的因素会使实验结果产生一定的离散性，但实验结果基本能反应出：在一定射孔组合下，裸眼射孔完井方式的产能要优于裸眼和套管射孔，且提产效果明显。

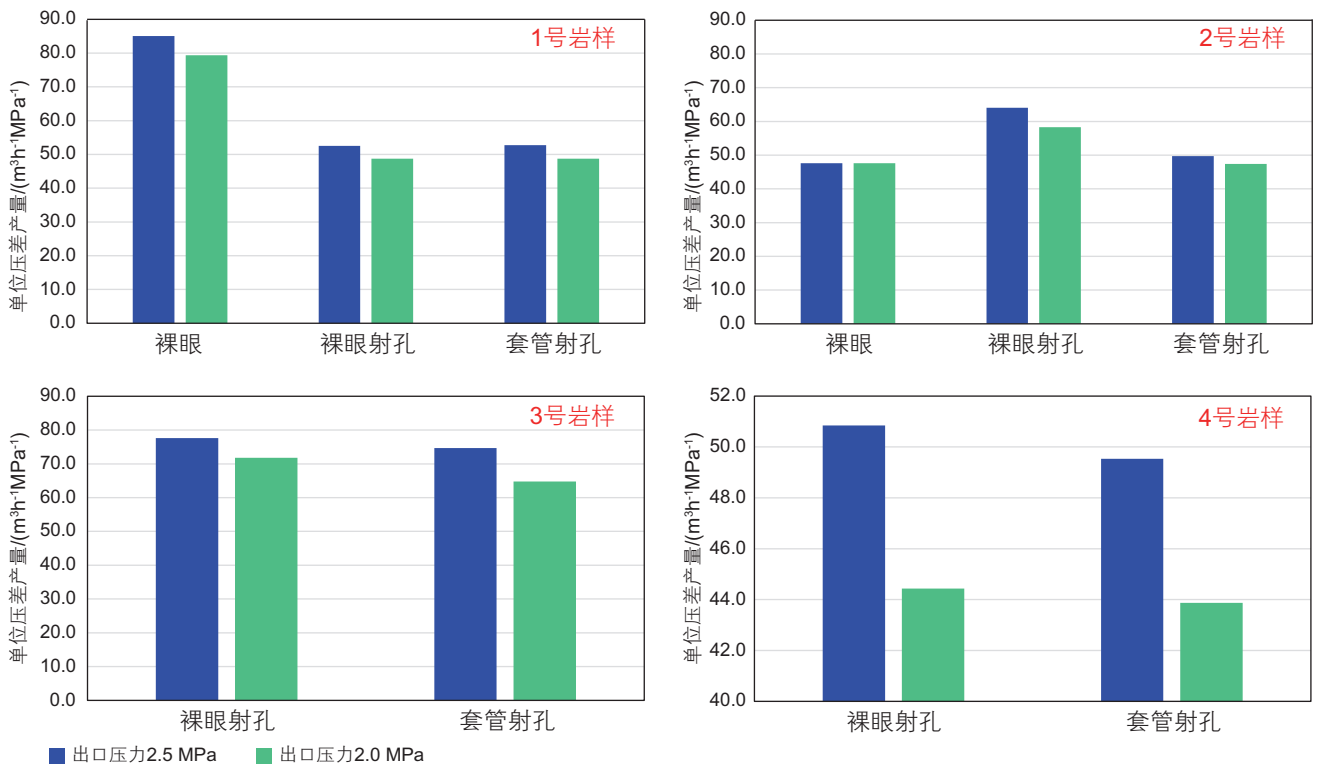


图 24 测试产能评价室内实验结果

Fig. 24 Experimental results of well test productivity evaluation

5 结论

基于有限元理论，建立了一个裸眼射孔井产能评价三维模型，模拟了不同工况下不同完井方式的测试产能，并对影响裸眼射孔完井方式产能的参数进行了

敏感性分析，开展了不同完井方式产能评价室内实验，最终得出以下结论：

(1)油田应用中，无论是否存在地层污染，裸眼射孔完井方式的产能均高于裸眼、套管射孔等常规完井方式，极端条件下产能为裸眼井的 1.8 倍，套管射孔井的 2.3 倍，这是由多种影响参数的叠加效果共同决

定的, 其中最主要的是射孔深度。即使相较于酸化、水力喷砂射孔等改造措施, 裸眼射孔因其工艺条件简单, 经济性强仍占有优势地位。

(2)分析了孔深、孔密、孔径、相位、钻井污染以及射孔压实等因素对裸眼射孔完井测试产能的影响规律。裸眼射孔与套管射孔的产能差异随射孔参数组合的变化规律基本一致: 孔深是影响产能最敏感的因素, 增大孔径和孔密会提高产能, 但增幅逐渐减小, 90°相位角时的产能最大。裸眼射孔和套管射孔的产能随钻井污染系数和压实程度的增大而升高。但不考虑现场因素和经济限制的理想参数下, 裸眼射孔同套管射孔相比产能几乎相等。

(3)探究了无阻流量下射孔井的增产机理, 即压降点的外移。通过分析测试时裸眼射孔、套管射孔完井的流线分布规律, 揭示了射孔井中流量分布沿孔眼的指端到根端逐渐衰减的规律, 解释了裸眼射孔和套管射孔在一定条件下产能相等的原因。因此, 油田应用中, 应根据地质条件和射孔能力有鉴别的采用裸眼射孔完井。

(4)针对不同完井方式的产能评价室内实验, 验证了有限元数值模拟的结果, 表明裸眼射孔完井在合理的射孔参数组合下能有效提高测试产能, 能够成为部分油田测试生产的优选完井方式。

参考文献

- [1] 吴西顺, 孙张涛, 杨添天, 等. 全球非常规油气勘探开发进展及资源潜力[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(04): 1-17. [WU X S, SUN Z T, YANG T T, et al. Global progress in exploration and development of unconventional hydrocarbons and assessment of resources potential[J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(04): 1-17.]
- [2] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(02): 173-187. [ZOU C N, ZHU R K, WU S T, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. ACTA Petroleum, 2012, 33(02): 173-187.]
- [3] 王静, 赵修太, 白英睿, 等. 我国致密气开发技术现状及未来发展定位[J]. 精细石油化工进展, 2013, 14(06): 16-20. [WANG J, ZHAO X T, BAI Y R, et al. Exploitation technique of tight gas in China and its development orientation[J]. Advances in fine petrochemicals, 2013, 14(06): 16-20.]
- [4] 段玉廷. 产层特性与完井方式的选择[J]. 西南石油学院学报, 1998(03): 3-5. [DUAN Y T. Pay zone properties and selection of well completion techniques[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1998(03): 3-5.]
- [5] 王掌洪, 张士诚, 王玉芳, 等. 低渗气藏水平井不同完井方式产能预测研究[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2003(06): 39-42+90-91. [WANG Z H, ZHANG S C, WANG Y F, et al. Productivity prediction of a horizontal gas well in low-permeability gas reservoir under different well completion forms[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition), 2003(06): 39-42+90-91.]
- [6] 刘向君, 刘洪, 段永刚, 等. 完井方式对砂岩油藏临界生产压差及产能的影响研究[J]. 钻采工艺, 2007(03): 33-35+149. [LIU X J, LIU H, DUAN Y G, et al. Influence of well completion way on critical producing pressure difference and well productivity in sandstone reservoir[J]. Drilling and Production Technology, 2007(03): 33-35+149.]
- [7] 单高军, 杜志敏. 完井方式对适度出砂井产能的影响研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008(03): 72-75+187. [SHAN G J, DU Z M. The influence of well completion way on productivity of reasonable sand production well[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science and Technology Edition), 2008(03): 72-75+187.]
- [8] 陈民锋, 姜汉桥, 郑伟, 等. 渤海BZ25-1油田开发井型及完井方式适应性[J]. 断块油气田, 2010, 17(04): 458-461. [CHEN M F, JIANG H Q, ZHENG W, et al. Compatibility of different development well types and well completion systems with reservoirs in BZ25-1 oilfield[J]. Fault-block Oil and Gas Field, 2010, 17(04): 458-461.]
- [9] 徐梦雅, 廖新维, 何逸凡, 等. 完井方式对致密气藏压裂水平井产能的影响[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(02): 67-71+115-116. [XU M Y, LIAO X W, HE Y F, et al. Study on productivity analysis of fractured horizontal wells based on different completion methods in tight gas reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(02): 67-71+115-116.]
- [10] LOCKE S. An advanced method for predicting the productivity ratio of a perforated well[J]. Journal of Petroleum Technology, 1981, 33(12): 2, 481-2, 488.
- [11] 熊友明, 潘迎德. 各种射孔系列完井方式下水平井产能预测研究[J]. 西南石油学院学报, 1996(02): 58-64. [XIONG Y M, PAN Y D. Study on productivity prediction of the horizontal wells with completion methods of perforation series. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1996(02): 58-64.]
- [12] FURUI K, ZHU D, HILL A. A new skin factor model for perforated horizontal wells[C]//SPE Annual Technical Conference and

- Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2002.
- [13] ANSAH J, PROETT M, SOLIMAN M. Advances in well completion design: A new 3D finite-element wellbore inflow model for optimizing performance of perforated completions[C]//International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control. Society of Petroleum Engineers, 2002.
- [14] SUN D, LI B, GLADKIKH M, et al. Comparison of skin factors for perforated completions calculated with computational fluid dynamics software and a semi-analytical model[C]//SPE European Formation Damage Conference. Society of Petroleum Engineers, 2011.
- [15] 欧阳伟平, 刘曰武, 万义钊. 计算射孔井产率比的三维有限元新方法[J]. 工程力学, 2014(6): 250–256. [OUYANG W P, LIU Y W, WANG Y Z. A new 3D finite element method for calculating the productivity ratio of a perforated well[J]. Engineering Mechanics, 2014(6): 250–256.]
- [16] 薛世峰, 王斐斐, 王海静. 射孔井产率比及其影响因素数值分析[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(02): 102–105+118. [XUE S F, WANG F F, WANG H J. Numerical study of productivity ratio and factors of perforated well[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(02): 102–105+118.]
- [17] 王茜. 射孔井产能预测方法研究[D]. 西安石油大学, 2015. [WANG Q. The research for prediction methods of perforation well's productivity[D]. Xi'an Shiyu University, 2015.]
- [18] 牛超. HTG油田射孔优化技术研究[D]. 西安科技大学, 2018. [NIU C. The research of perforating optimization technology in HTC oilfield[D]. Xi'an University of Science and Technology, 2018.]
- [19] 程林松. 渗流力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011. [CHENG L S. Seepage mechanics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.]
- [20] YILDIZ T. Assessment of total skin factor in perforated wells[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2006, 9(01): 61–76.
- [21] 杨登波, 李妍僖, 张良, 等. 不同射孔完井方式对水平井油气产能比的影响比较[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2020, 17(02): 64–70+91+7. [YANG D B, LI Y X, ZHANG L, et al. Comparison of effects of different perforation completion methods on hydrocarbon productivity ratio of horizontal wells[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2020, 17(02): 64–70+91+7.]
- [22] 谭忠健, 胡云, 张国强, 等. 渤中 19–6 构造复杂储层流体评价及产能预测[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(06): 764–774. [TAN Z J, HU Y, ZHANG G Q, et al. Fluid evaluation and productivity prediction on complex reservoirs in Bozhong19–6 structure[J]. Oil Drilling and Production Technology, 2018, 40(06): 764–774.]
- [23] 施和生, 王清斌, 王军, 等. 渤中凹陷深层渤中 19–6 构造大型凝析气田的发现及勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(01): 36–45. [SHI H S, WANG Q B, WANG J, et al. Discovery and exploration significance of large condensate gas fields in BZ19–6 structure in deep Bozhong sag[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(01): 36–45.]

(责任编辑 林伯韬 编辑 马桂霞)