

基于水平井的径向井开采页岩油产能模拟和参数分析

戴佳成, 李根生*, 孙耀耀, 李敬彬, 王天宇

中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

* 通信作者, ligs@cup.edu.cn

收稿日期: 2022-11-20; 修回日期: 2023-03-25

中国石油大学(北京)科研启动基金项目“二氧化碳强化径向井压裂页岩油产能预测及参数优化研究”(No.2462023BJRC025)资助

摘要 中国页岩油资源储量丰富, 潜力巨大。实现页岩油资源的高效开发对于保障国家能源安全, 加快行业战略转型具有重要意义。本文提出了一种结合水平井和径向水射流钻井的技术, 以高效开采页岩油资源。该技术通过在水平井周围钻进一个或多个径向分布的钻孔, 穿透井邻污染区, 增加与储层的接触面积, 并建立高导流通道以提高生产和注入性能。本文创建了一个考虑地层损伤的耦合流动模型, 可以对由水平井和径向射流钻井开发的页岩油生产性进行预测, 该模型使用双精细网格, 能够描述页岩油储层的压力响应, 并分析径向井长度、直径、起始角度、侧向数量、钻井位置和簇数对生产性的影响。文章进一步比较了在相同条件下, 由径向射流钻井或水力压裂开发的储层的生产性。结果表明: 径向井可显著减小水平井附近流体渗流阻力, 增加储层有效泄流面积; 径向井长度、分支数、簇数和直径的增加可提升页岩油累产油量; 径向井的簇数增加, 虽然泄流区域扩大, 有利于提升产油量, 但是井间的干扰随着簇数的增加而增强, 使得累计产油量的增加趋势逐渐减弱; 径向井起始角度受渗透率各向异性和重力影响, 应以穿透垂向储层为目标; 当径向井长度较大时, 打开位置对产量影响不大; 等簇数下四分支长 30 m 径向井累产油量略大于水力裂缝缝高 15 m 时累产油量, 其与缝高 15 m 水力裂缝结合时, 累产油量略大于水力裂缝缝高 25 m 时累产油量。研究发现, 该开发模式不仅可以作为水力压裂技术的有效替代或补充, 还能以更高效、成本更低的方式实现页岩油的高效开采。研究成果表明“水平井+径向井”页岩油开发模式具有一定的可行性, 为页岩油资源高效开采提供了一种高效低成本的新方法。

关键词 页岩油; 水平井; 径向井; 产能模拟; 水力压裂

中图分类号: TD231; TE328

Productivity simulation and parameter analysis of shale oil production in radial wells based on horizontal wells

DAI Jiacheng, LI Gensheng, SUN Yaoyao, LI Jingbin, WANG Tianyu

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

Received: 2022-11-20; Revised: 2023-03-25

Abstract There are significant reserves of shale oil in China, which has substantial potential. The efficient development of

引用格式: 戴佳成, 李根生, 孙耀耀, 李敬彬, 王天宇. 基于水平井的径向井开采页岩油产能模拟和参数分析. 石油科学通报, 2024, 04: 604-616

DAI Jiacheng, LI Gensheng, SUN Yaoyao, LI Jingbin, WANG Tianyu. Productivity simulation and parameter analysis of shale oil production in radial wells based on horizontal wells. Petroleum Science Bulletin, 2024, 04: 604-616. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.04.045

these resources is crucial for ensuring national energy security and accelerating strategic transformation in the industry. This study introduces an innovative extraction technique that combines horizontal wells with radial water jet drilling, aimed at optimizing the recovery of shale oil. The approach involves drilling radially distributed boreholes around the horizontal well to penetrate the adjacent contamination zone, which can increase the contact area with the reservoir and establishing highly conductive pathways to enhance production and injection performance. A coupled flow model considering formation damage was developed to enable accurate predictions of productivity from shale oil reservoirs developed via horizontal and radial jet drilling. The model, employing dual refined grids, accurately describes the pressure dynamics within shale oil reservoirs and analyzes the impact of radial well parameters such as length, diameter, initial angle, number of laterals, drilling locations, and cluster numbers on productivity. Comparative analyses between reservoirs developed under identical conditions by radial jet drilling versus hydraulic fracturing were conducted. Findings reveal that radial wells significantly mitigate near-well fluid flow resistance and expand the effective drainage area of the formation. Enhancements in radial well dimensions, including length, number of branches, clusters, and diameter, are shown to increase cumulative shale oil production. Although increasing the number of clusters in radial wells expands the drainage area and benefits oil production, the interference between wells intensifies with more clusters, leading to a diminishing trend in the increase of cumulative oil production. The initial angle of radial wells, influenced by anisotropic permeability and gravity, is crucial for targeting vertical formations. Longer radial wells demonstrate that opening positions have a minimal impact on output. Under equal cluster conditions, a radial well with four 30 m laterals slightly outperforms a hydraulically fractured well with 15 m fracture height; when combined with a 15 m hydraulic fracture, the output slightly exceeds that of a 25 m fracture height. This study reveals that the horizontal plus radial well model not only serves as an effective alternative or supplement to hydraulic fracturing techniques but also facilitates more efficient, cost-effective shale oil extraction. The technique proposed herein combines the horizontal well and radial jet drilling technology and has higher economic feasibility, which can serve as a supplementary technology for the hydraulic fracturing approach and provide reference for efficient development of shale oil resources.

Keywords shale oil; horizontal wells; radial wells; productivity simulation; hydraulic fracturing

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.04.045

0 引言

页岩油主要存储在富有机质和以纳米级孔径为主的页岩地层中,是非常规油气“有序聚集”体系的重要类型之一^[1-2]。中国陆相页岩油资源丰富,国家能源局在2021年页岩油勘探开发推进会指出,我国陆相页岩油可采资源量在 $30 \times 10^8 \sim 60 \times 10^8$ t之间,储量位居世界前列^[3-4]。随着油气地质理论的创新突破和工程技术进步,中国陆相页岩油勘探取得了重大突破^[5]。近年来在准噶尔盆地二叠系、鄂尔多斯盆地三叠系和松辽盆地白垩系等地层取得了多个重大产量和技术突破^[6-8]。页岩油高效勘探开发,是推动中国石油工业可持续发展、筑牢国内油气产量“底线”、保障国家能源安全“压舱石”作用的重要战略接替方向^[9-10]。

中国陆相页岩油藏多属低渗或特低渗储层,地层能量低,非均质性强^[11-14]。水平井多段压裂是开发页岩油的常用方法^[15-16]。其所形成的缝网降低了流动阻力,可提高油气产能^[17-18]。但该方法在页岩油储层仍面临压裂缝高不足和压裂成本高等问题^[19-21]。中国页岩油水平井压裂单井钻井和完井成本介于4000~6000万元人民币之间^[22-23],每吨页岩油生产成本约为1500元人民币。水力压裂技术不能满足所有的页岩油藏开发需求^[24-26],故仍需探索一种能够低成本、高效率开

发页岩油藏的新技术。

针对上述问题,本文提出了利用“水平井+径向井”技术开发页岩油的新思路:如图1所示,在水平井上呈辐射状钻出多个沿径向分布的分支井眼,可突破水平井周边污染带,扩大泄流区域,大幅提高单井

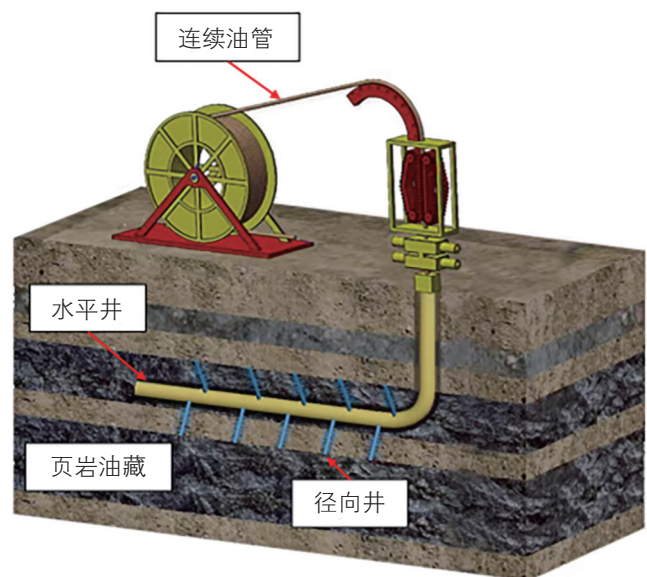


图1 “水平井+径向井”示意图

Fig. 1 Demonstration of radial-borehole combined with horizontal well

产量。径向井的部署灵活,可突破常规水力压裂在陆相页岩油储层缝高较低的问题;且该方法用水量小,钻采成本低,安全环保,有望成为页岩油储层安全高效开发的新方法。目前,该数值模拟方法论证了径向井在稠油^[27]、天然气水合物^[28-29]、地热^[31-32]和煤层气^[30-31]等资源的开发前景。但涉及径向井开发页岩油资源的报告较少,且影响径向井产能的因素限于单分支或单簇范围内^[32-33],故页岩油藏应用径向井产能理论仍有待丰富。

为验证“水平井+径向井”技术开发页岩油可行性,本文以松辽盆地古龙页岩油参数为基础,建立了储层—径向井—水平井耦合流动模型,开展了该模式降压开采页岩油产能预测,分析了页岩油储层的压力响应,分析了径向井长度、直径、相位角、打开位置和簇数对产量的影响,对比了径向井和水力压裂条件下的产能。研究结果有望促进我国陆相页岩油高效开发。

1 径向井技术简介

水力喷射径向井技术(简称径向井技术)是指在垂直井眼内沿径向钻出呈辐射状分布的一口或多口水平井眼,从而穿透近井污染带,增大与储层的接触面积,建立高导流通道,达到增产增注的目的^[34-36]。该技术最早由Dickinson等^[37]在1985年提出,1993年Carl Landers等^[38]提出套管开窗侧钻径向水平井技术,是研究的主流内容。经过三十多年的发展,该技术已在美国、加拿大、俄罗斯、阿根廷、玻利维亚、埃及等国进行了应用,并取得了较好的应用效果^[39-41]。同时,我国辽河油田、胜利油田、大庆油田、中原油田以及辽宁阜新盆地等地区也进行了径向水平井现场试验^[42-43]。国内外实践表明,径向井技术在近井低渗透区域击穿,储层接触区域面积扩大,桥接高渗透性的断层、节理和天然裂缝等方面具有了实质性的技术突破^[44]。在低渗透油藏、薄层油藏、裂缝性油藏、注水后“死亡区”、岩性包涵矿床、压裂效果较差的探井、开发井的近井段污染严重、堵塞严重地层具有良好应用前景^[45]。现今,径向井技术工艺日臻成熟,具有作业周期短、性价比高且环保的特点,已成为老井改造和非常规资源等开采的有效技术手段^[36]。但是,径向井技术虽然可以有效提高油气产能,在页岩油的产能预测的研究成果较少,且其是否能替代水力压裂仍有待讨论。在此背景下,本文开展了基于“水平井+径向井”的页岩油储层产油产能预测。

2 数值模型与求解

2.1 页岩油储层产能模拟工具

基于MATLAB Reservoir Simulation Toolkit (MRST)平台建模并求解^[46]。该软件由SINTEF Digital主要开发,是一款基于MATLAB的用于油藏建模和模拟的开源油藏模拟软件,提供了全面的黑油和组分油藏模拟器,能够模拟行业标准模型,并包含图形用户界面。不同于封装的商业数值模拟软件,MRST可根据实验结果结合传统达西定律,可以解决油气藏开发过程中难以解析求解的渗流及工程问题,使得模型可以更贴近于测试结果。

2.2 数学模型

本文对模型做出了以下简化:

(1)假设在径向井钻井过程中没有对壁面形成额外的渗透率改变,且所形成的径向井的直径不变,其不随距水平井距离的变化而变化;(2)水平井井指数为0,即使得水平井不直接与油藏进行流体沟通,而是起到沟通径向井的作用;

(3)降压开采为页岩油流动的主要动力,故忽略吸附、扩散、溶解、凝析和毛管力的作用;

(4)由于径向井长度较长,忽略由流体聚集,湍流效应带来的额外表皮因子;

(5)假设在页岩油开发前温度处处一致,且开发过程中储层温度保持不变;

(6)在存在水力裂缝的案例中,忽略天然裂缝的影响,且假设水力裂缝为等大平行的长方形;

(7)为防止径向井和水平井在投入生产后产量迅速降低为0,将油藏上下底面设置为封闭边界,另外四面设置为恒压边界;

(8)评估径向井和压裂施工成本时,假设工程中是否价格不会产生浮动。

页岩油储层孔隙致密,流体在基质内呈非达西流动特征。本文采用考虑重力的指数式非达西流动方程和质量守恒方程结合得^[47]:

$$\nabla \left\{ \lambda_{\alpha} \rho_{\alpha} \left(\frac{1}{1 + a e^{-b|\nabla P_{\alpha}|}} \right) [\nabla(P_{\alpha} - \rho_{\alpha} g Z)] \right\} + q_{\alpha}^w = \frac{\delta}{\delta t} (\phi \rho_{\alpha} S_{\alpha}) \quad (1)$$

式中,下标 α 代表相态,上标 w 代表井筒, λ 为相流度, $D/(Pa \cdot s)$; P 为相压力, Pa; ρ 为相地层密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度,取 $9.8 N/kg$; Z 为深度, m; S 为

相饱和度，无因次； ϕ 为孔隙度，无因次； t 为时间，s； q 代表了耦合质量源项， $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ；非达西项中的无因次非达西系数 a 和 b 可表示为相流度 λ 的函数。

径向井和基质间流体流动耦合关系可表示为：

$$q_{\alpha}^w = J_w \lambda_{\alpha} \rho_{\alpha} [P_{bh} - P_{\alpha} - \rho_{\alpha} g \Delta Z] \quad (2)$$

式中， P_{bh} 为径向井压力，Pa； J_w 为井指数， $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{Pa})$ 。在直角坐标系内，对于井筒—基质井指数可表示为：

$$J_w = \frac{\theta kh}{\ln(r_e / r_w) + S} \quad (3)$$

式中， k 为有效渗透率与净厚度的乘积， $\text{D} \cdot \text{m}$ ； r_w 为径向井半径，m； r_e 为等效半径，m； S 为表皮系数，无因次；无因次参数 θ 随井筒—基质间耦合关系变化而变化。

考虑摩擦阻力和重力，径向井和水平井内流动的能量守恒方程为：

$$\Delta P_{\alpha} - g \rho_{\alpha} \Delta Z - \frac{\rho_{\alpha}}{2} \Delta u_{\alpha}^2 = 0 \quad (4)$$

式中，相流 u_{α} ，m/s， ΔZ 为高度差，m， ΔP_{α} 为压力损耗，Pa。忽略局部压力损耗，摩擦压力损耗可表示为：

$$\Delta P_{\alpha} = \frac{2fL}{D} \rho_{\alpha} u_{\alpha}^2 \quad (5)$$

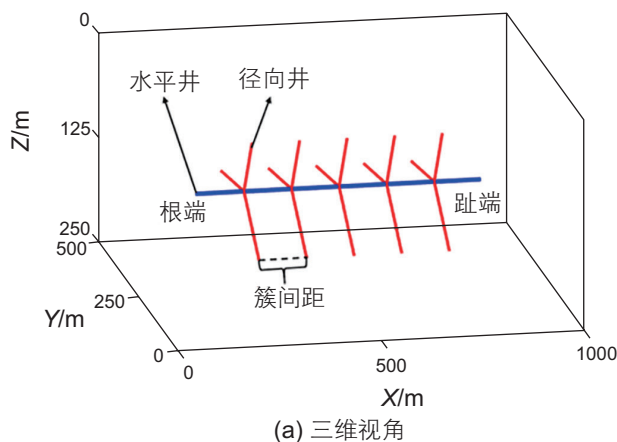
式中， L 为流动长度，m， D 为井筒直径，m， f 为范宁摩擦阻系数：

$$\sqrt{f^{-1}} = -3.6 \log_{10} \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{e}{3.7D} \right)^{10/9} \right] \quad (6)$$

式中 Re 为雷诺 e 为粗糙度。

2.3 模型描述

本文在长宽高 1000 m × 500 m × 250 m 的油藏中心部署了一口长为 700 m 的水平井，水平井直径为



150 mm。水平井上分布有若干簇径向井分支。如图 2 所示的是一种以等簇间距均匀分布在水平井上的 5 簇 3 分支径向井，在一簇径向井内，各个分支间角度一致。当仅有单簇径向井，则定义其距离根端的距离为打开位置。定义径向井与图 2 水平虚线夹角为起始角。水平井不与油藏直接联通，油藏流体流入径向井后再汇入水平井，随后流向地面。本文中基础案例中径向井的长度为 30 m，直径为 30 mm。假设水平井四周因钻井液侵入等原因存在一圈储层伤害区，伤害区半径在根端为最大值 1.5 m，在趾端为最小值 0.2 m，伤害区内储层渗透率为原渗透率的 50%，其他油藏内参数见表 1。为探究径向井的几何尺寸和空间分布对产能的影响，研究了径向井长度、直径、起始角、分支数、打开位置、簇数等参数对径向井产能的影响规律，实验方案如表 2 所示。

根据室内岩石破碎实验^[48]和现场实验数据^[49]，径向井直径范围一般在 $\phi 10$ mm至 $\phi 50$ mm之间，故选取 $\phi 10$ mm、 $\phi 30$ mm和 $\phi 50$ mm共 3 种直径作为代表，受水力喷射钻头水力能量和破岩能力限制，其长度在 50 m 左右^[50]，故选取 0.1~50 m 为径向井长度的范围。为减少径向井间干扰，本文讨论的分支数不超过 4 个。此外为避免径向井钻井时间过长，规定径向井簇数为 20 个。

2.4 网格划分与初始化

在油藏数值模拟中，基质网格是指用来表示油藏中储存和传输流体的基质部分的离散化网格。在进行三维油藏建模时，使用等间距结构化网格具有建模快速，理解直观的优点，但当研究的尺度既包含整个油藏尺度，又需对近井地带精细建模时，等间距结构化网格无法同时满足以上 2 个要求(基质网格太粗或太

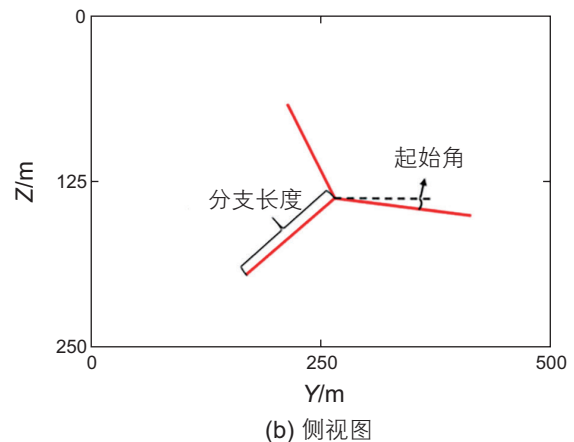


图 2 5 簇 3 分支径向井示意图

Fig. 2 Schematic diagram of radial well of cluster 5 branch 3

表1 页岩油藏参数

Table 1 Shale reservoir parameters

参数	取值	参数	取值
油藏长度/km	1	油密度/(g/cm ³)	0.84
油藏宽度/m	500	水密度/(g/cm ³)	1.00
油藏厚度/m	100	油压缩系数/MPa ⁻¹	0.9x10 ⁻⁴
原始地层压力/MPa	31.56	水压缩系数/MPa ⁻¹	0.4x10 ⁻³
垂向渗透率/mD	0.0001	地层原油黏度/cp	0.8
水平渗透率/mD	0.58	含油饱和度/%	58
有效孔隙度/%	6.2	相对渗透率指数	2

表2 径向井参数分析方案

Table 2 RJD parameter analysis program

参数	取值	参数	取值
径向井长度/m	0.1~50	分支数/个	1, 2, 3, 4
径向井直径/mm	10, 30, 50	打开位置/m	0~700
起始角/°	0~360	簇数/个	1~20

密集)。本文采用双加密半结构化网格进行建模,即在YZ平面中心采用PEBI圆周加密网格,在XZ平面径向井处采用线性加密网格,PEBI圆周网格可以实现对射孔轨道的无锯齿划分,线性加密可以有效分隔各射孔网格,二者结合可以有效减少计算时间。本文中圆周网格总半径为50 m,径向网格长1 m(圆心周围加密为0.1 m),周向网格弧度5°。X方向不加密网格长为50 m,加密网格长5 m,加密范围15 m。Z方向和Y方向不加密网格长均为83.3 m。

在井筒单元中,井筒被分割为若干个离散化单元,每个单元都被赋予了一定的物理特性,如直径、长度和壁面粗糙度。井筒单元通常是一维简化的,即沿着井筒的轴线方向离散化,该简化可以有效降低计算复

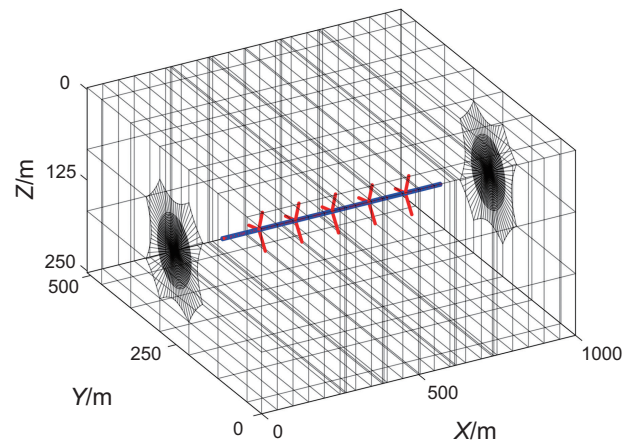
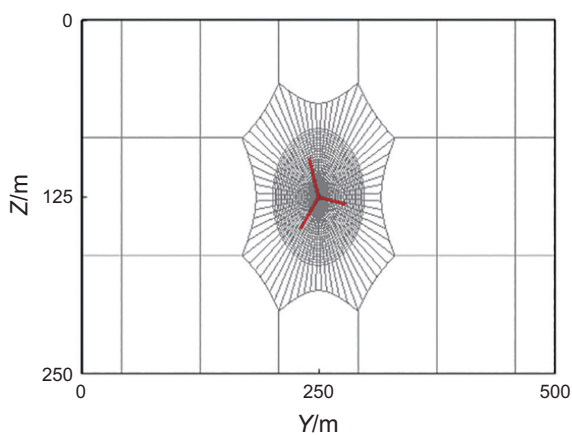
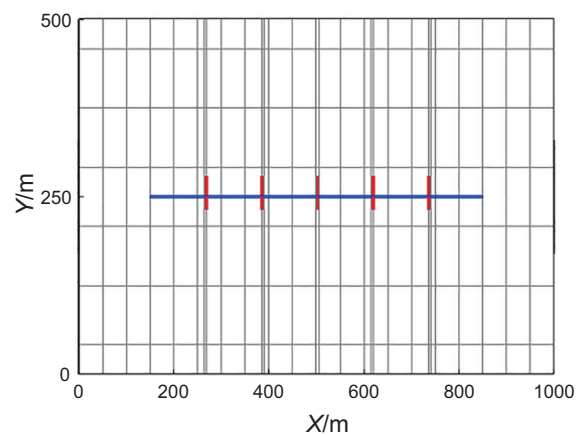


图3 网格划分示意图(3维视角)

Fig. 3 Schematic diagram of grid division (3D perspective)



侧视视角(PEBI圆周加密)



俯视视角(线性加密)

图4 网格划分示意图(2维视角)

Fig. 4 Schematic diagram of grid division (2D perspective)

杂度，且满足计算精度。图 5 展示了径向井和水平井经过的基质网格，井筒每经过一个基质网格，则被划分为一个井筒单元(cell)。如图 6 所示，井筒单元按照拓扑关系连接， N_h 个水平井单元从根端到趾端逐个连接，径向井单元沟通了油藏单元和水平井单元，各单元包含了所在区段的长度、半径、深度和粗糙度等信息。各单元流动规律如图计算后可得出单元流量和压力。根据地层条件，油藏边界设置为恒压边界，模拟开始时地层压力一致，模拟时长为 3 年，步长 30 天。

2.5 模型验证

本文采用了埃及油田 Well#2 径向井施工前后的产液数据验证数值模型^[51]。在该案例中，在一口直井基

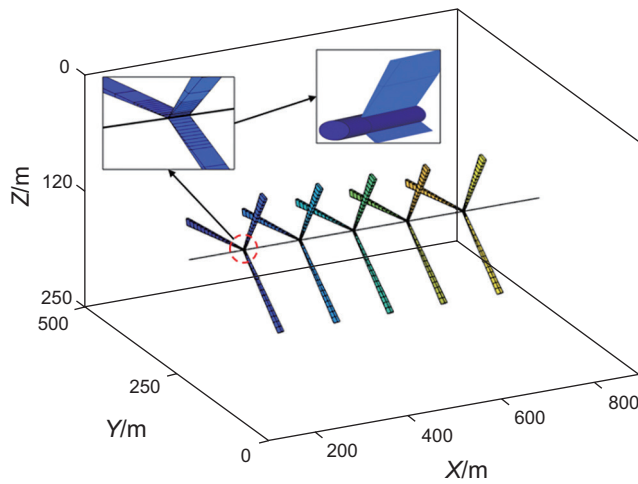


图 5 水平井径向井网格划分
Fig. 5 Grid division of horizontal and radial wells

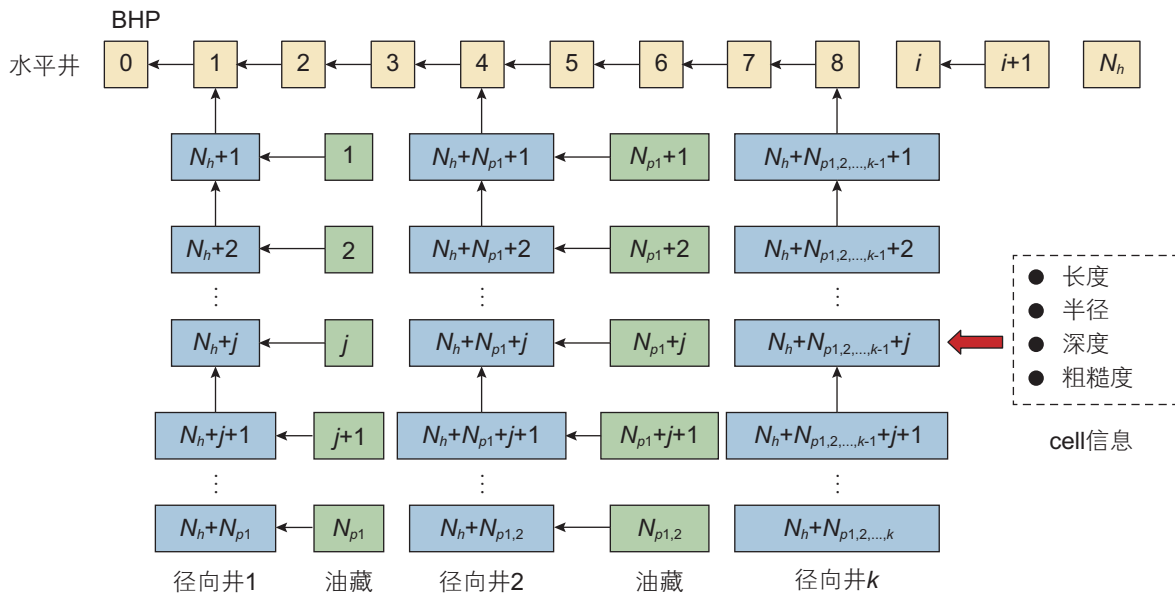


图 6 水平井—径向井网格连接关系
Fig. 6 Grid connection relationship between horizontal well and radial well

础上分 2 层共钻出 6 六口径向井。如图 7 所示，径向井施工后产液量得到显著提升，但由于加速了油藏的压力衰竭，径向井施工后的产液率衰减也较快。模拟数据较好的拟合了实际数据，平均误差低于 15%。误差主要由井底压力的波动造成，如在第 750 天降低井底压力，使产液速率较降压前整体提升。

3 结果与讨论

3.1 压力空间分布

油藏压力分布是判断开发方式效果的关键指标。图 8 展示了在相同簇数和分支数时射孔(1 m)和径向井(30 m)的压力云图。低压区域以射孔或径向井为中心，随时间增长向边界扩散，形成页岩油泄流区域。由于水平井不直接与油藏接触，所以其周围在初始时没有形成低压。云图的高清晰度说明了网格划分的合理性。第三年径向井开发页岩油藏压力低于原始压力 50% 的区域体积是射孔开发的 307.9 倍，证明径向井极大的增加了低压中心范围，减小了流体渗流阻力。

3.2 单簇径向井参数影响规律

3.2.1 长度和直径

径向井的长度和直径随钻头种类和水力能量的变化而变化。图 9(a)展示了径向井的长度和直径对产能的影响。位于水平井中心的单簇单分支径向井的累产油量随其长度的增大而增大。径向井长度是决定水平井周围泄流半区域大小主要因素。当径向井长度小于

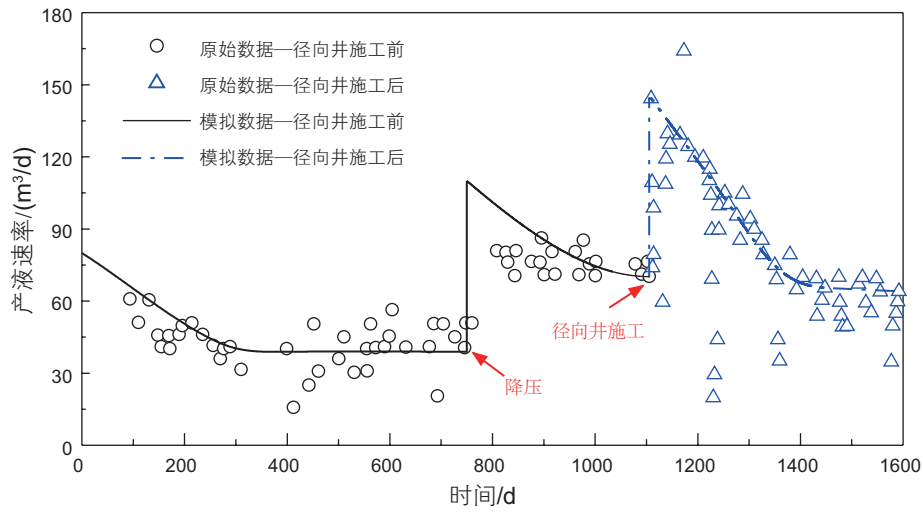


图7 径向井施工前后产液率—时间关系

Fig. 7 Relationship between gross fluid rate and time before and after RJD construction

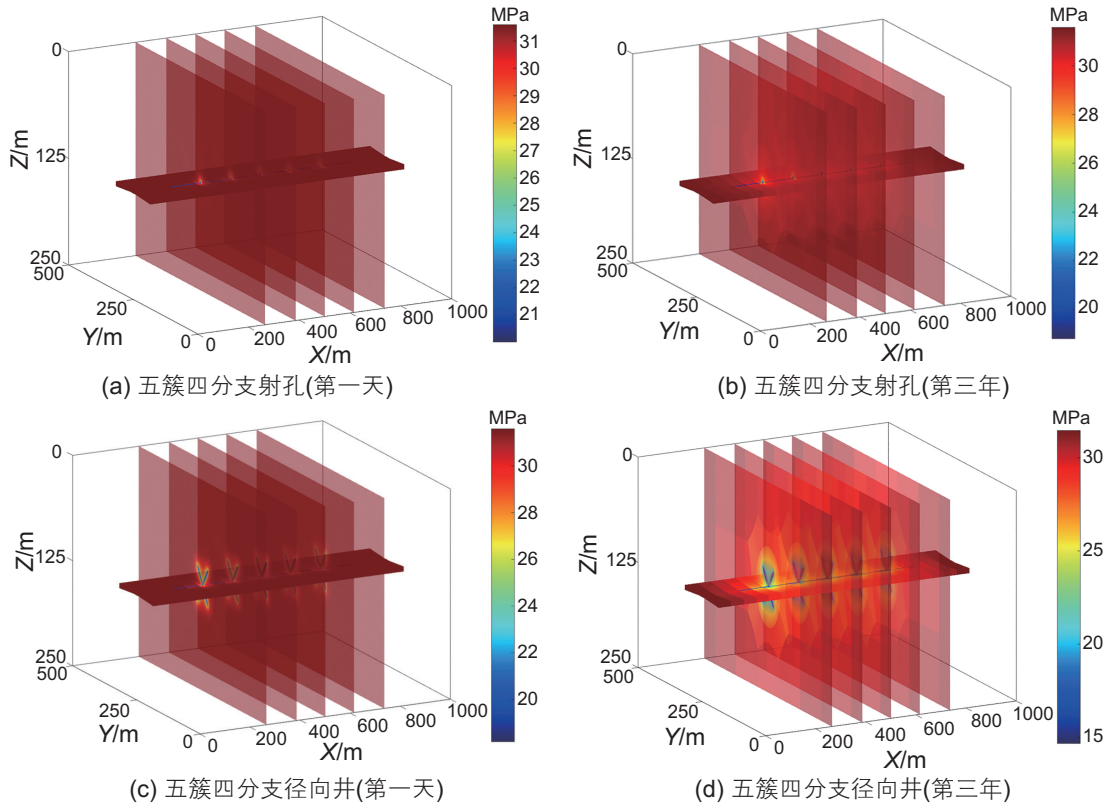


图8 径向井空间压力分布

Fig. 8 Spatial pressure distribution of radial well

所在位置污染带半径时, 累产油量随径向井长度的增长呈指数增长趋势; 大于所在位置污染带半径时, 累产油量随径向井长度的增长呈线性增长趋势。当径向井半径为 30 mm 时, 径向井长度 50 m 时产能是径向井长度 1 m 时 6 倍, 后者对应一般射孔弹的穿透距离。

如式所示, 径向井半径 r_w 的增大对井指数 J_w 的影响较小, 故径向井直径对产量的影响显著弱于长度。

但径向井半径越小, 井内流速越大, 对井内压耗(水平井根端与径向井末端井筒压力之差)影响较大。当径向井直径不变时, 井筒压耗随径向井长度的增大而线性增大。当径向井长度为 30 m, 半径 30 mm 时, 流动压耗是径向井半径 50 mm 时的 7.7 倍。综上, 在确保压耗和成本在可控范围内时, 推荐增大径向井长度和直径保证单个径向井分支的累产油量。

3.2.2 起始角和分支数

当单簇径向井分支数大于1时，为确保径向井间储层干扰最小，假设在一簇圆周内各个径向井分支均

匀分布。受渗透率各向异性和重力影响，径向井的起始角对产能有影响。图10显示了径向井数量在1至4时起始角对产能的影响。当径向井数目为1时，最大

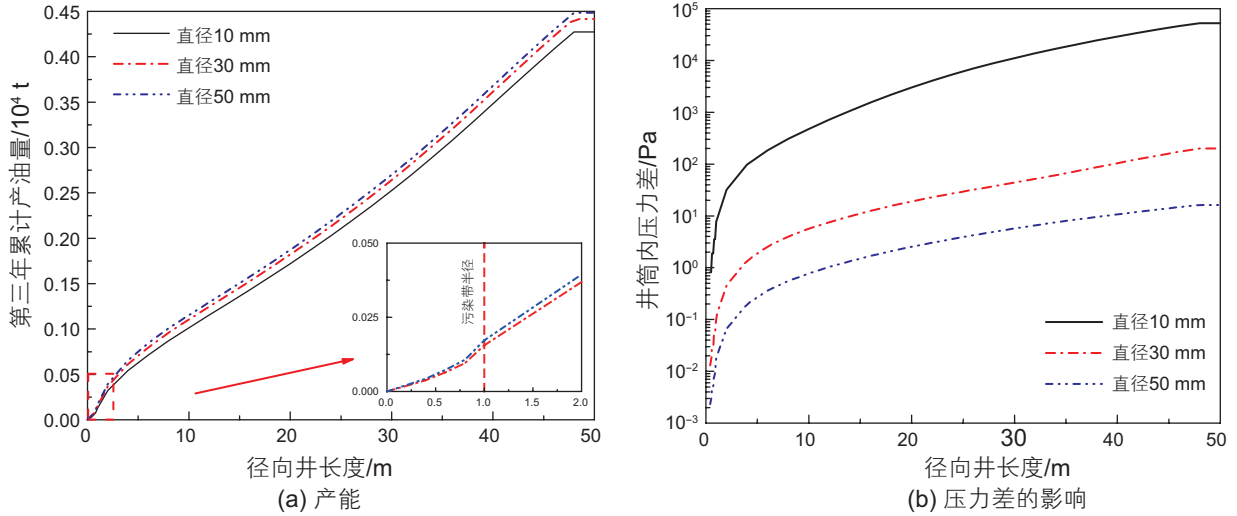


图9 径向井长度和直径对(a)产能和(b)压力差的影响

Fig. 9 Effect of radial well length and diameter on (a) productivity and (b) pressure difference

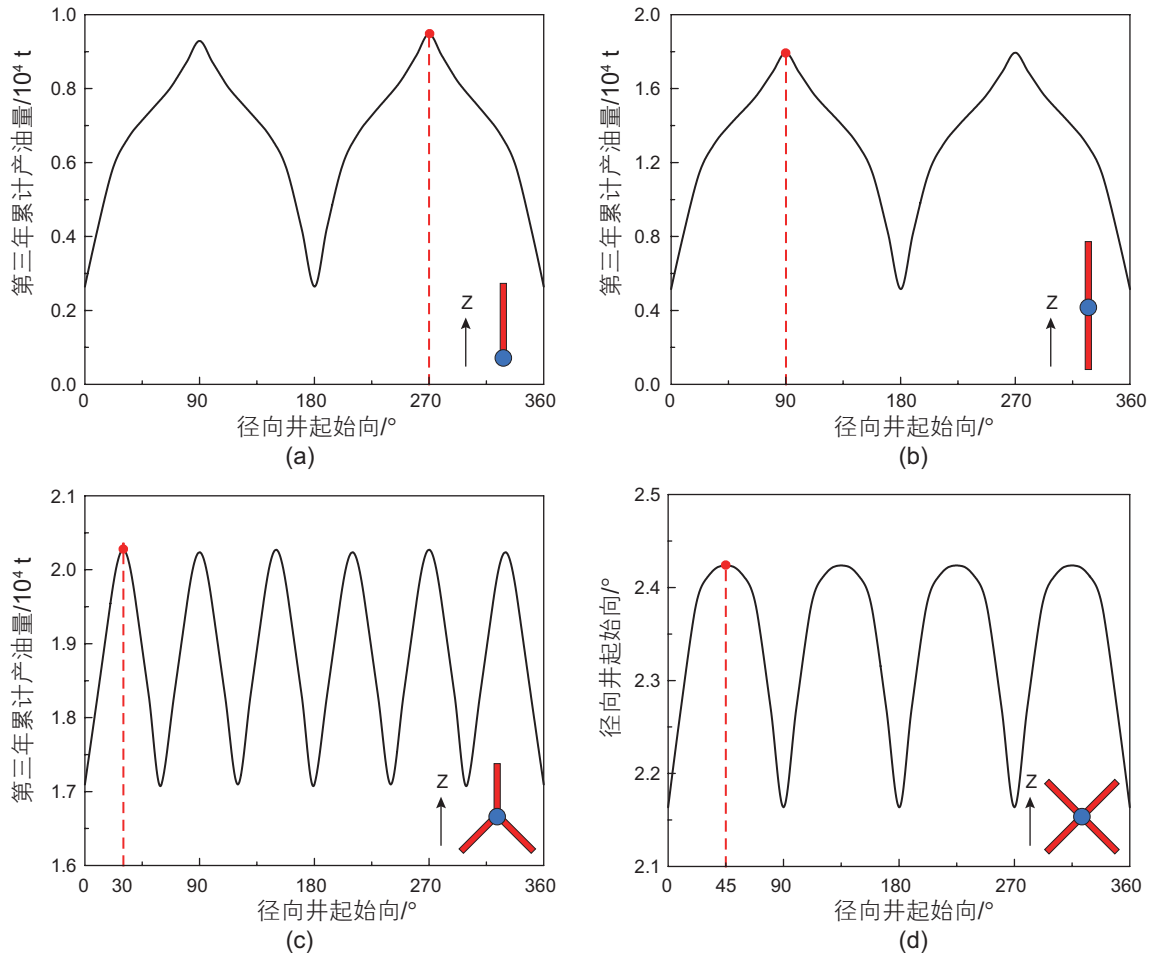


图10 起始井相位角对产能的影响

Fig. 10 Effect of initial well phase angle on productivity

累产油量在起始角为 270° 时(竖直向上)取得最大值,其产能为 0°(水平)时的 3.4 倍。起始角为 270° 时的累产油量大于起始角为 90° 时 0.01 万 t(数值向下)时的累产油量。综上说明了页岩油储层极低的垂向渗透率是制约径向井产能的主要因素,而重力的影响较小。当径向井分支数为 2、3、4 时,其对应最优相位角分别为 90°, 30° 和 45°, 对应的最高产油率分别为径向井分支数为 1 时的 1.89、2.14 和 2.55 倍。径向井分支数越多,水平井周边泄流区域面积越大,累产油量随之增加,但由于井间干扰的影响产油量随分支数的增长趋势逐渐减缓。

3.2.3 打开位置

单簇径向井在水平井中的打开位置是径向井在地质层水平井上的空间开发位置,是径向井钻井作业的关键参数之一。图 11 展示了打开位置对单簇 4 分支径向井的归一化产油量影响。当径向井长度为 30 m 时,产油率在距根端 100 m 内时随打开位置的增加而下降至原先的 97.5%, 打开位置超过 100 m 后产油率随打开位置的增加而逐渐上升至最大值。当径向井长度为 1 m 时,累产油量随打开位置的增大而增大,但趋势逐渐减弱。径向井打开位置距离根端越远,其所在位置的污染带半径越小,同时井内压耗越大。径向井长度为 30 m 时,由于其已突破污染带较长距离故受其影响较小,打开位置在趾端时的产能仅为打开在根端时产能的 1.04 倍;反之当径向井长度为 1 m 时,打开位置主要受到污染带的影响,打开位置在趾端时的产能为打开在根端时产能的 1.58 倍。综上所述,径向井的打开位置选取得当有助于提高长径向井的污染带突破能力,且径向井长度较长时受污染带影响小。

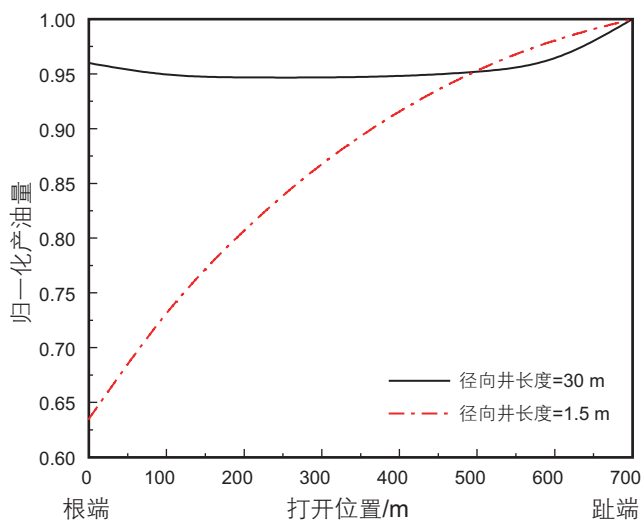


图 11 打开位置对影响产油量的影响

Fig. 11 Effect of opening position on influencing oil production

3.3 多簇径向井参数影响规律

径向井沿水平井方向开发后的效果受径向井在该位置簇数设置的影响较大。图 12 展示了长度 30 m, 直径 30 mm, 初相位 45° 的四分支径向井簇数变化对累产油量的影响。为了减少井间干扰,本文中各簇位置将水平井划分为等分。径向井簇数的增大使得泄流区域增大,故径向井簇数是提升产油量的影响因素之一。但径向井簇数越大,井间干扰越严重,故累产油量随径向井簇数增加的趋势逐渐减弱。簇数为 20 时累产油量是簇数为 1 时的 10.51 倍。

径向井簇数越大,其钻井成本越高。径向井钻井成本可按以下公式计算:

$$\text{成本} = \text{固定成本} + \text{簇数} \times \text{分支数} \times \text{分支单价} \quad (7)$$

根据参考文献^[41, 52],径向井施工的固定成本为 20 万元人民币,分支单价为 15 万元/分支。分支数不变时,径向井钻井成本随簇数线性上升。径向井钻井收益以第三年产油量乘以原油价格计算,本文中采用的原油价格为 111.2 元人民币/m³。将径向井钻井收益除以成本,得到了不同簇数的“性价比”,如图 12 所示。当簇数为 2 至 4 时,性价比较高,收益成本比均最大值 4.7,当簇数大于 4 时,径向井收益成本比逐渐下降。

3.4 案例对比

为进一步验证径向井高效开发页岩油的可行性,本节对比了如图 13 所示的案例产能:水平井+10 簇径向井,水平井+10 簇水力裂缝,水平井+10 簇径向井+10 簇水力裂缝。案例中径向井长度 30 m,直径

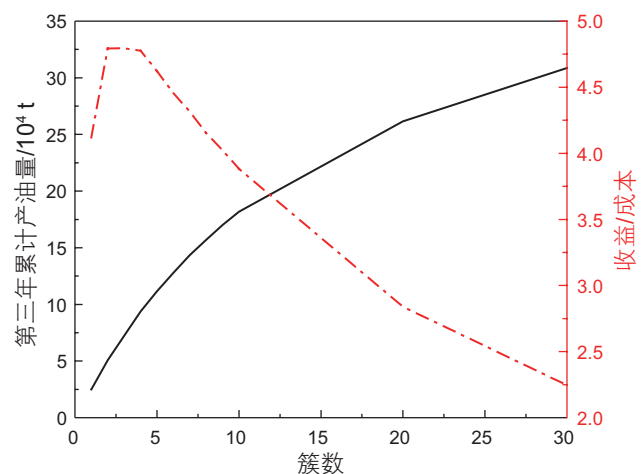


图 12 径向井簇数对产能和性价比的影响

Fig. 12 Effect of radial well cluster number on productivity and cost performance

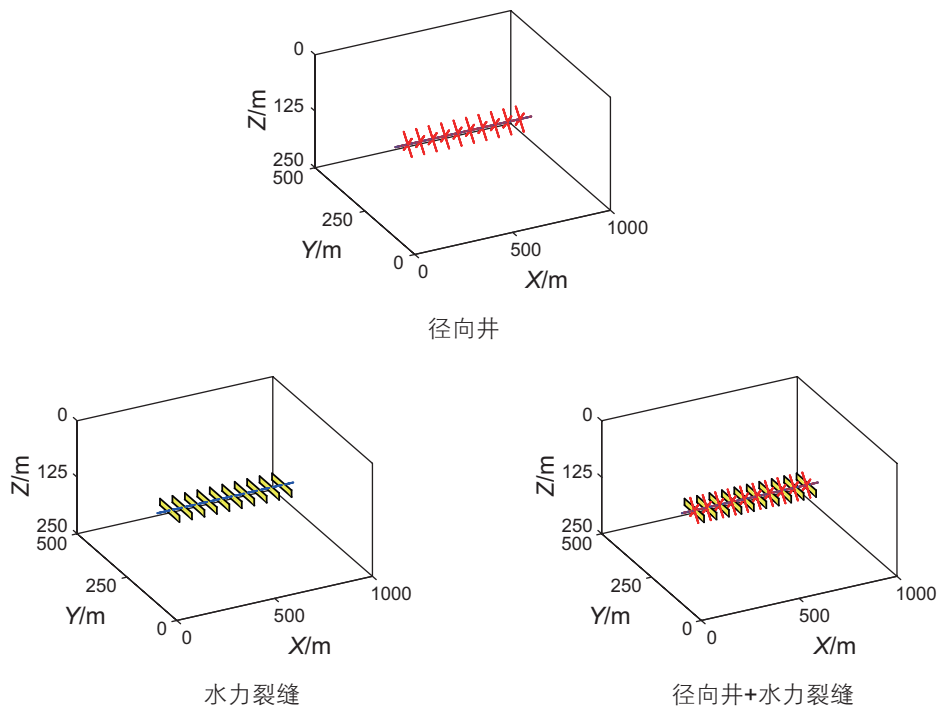


图 13 径向井和压裂裂缝分布图示

Fig. 13 Schematic diagram of radial well and fracture distribution

30 mm，四分支，起始角 45°；水力裂缝半长 50 m，导流能力 50 D·cm。如图 14 所示，缝高是限制水力压裂累产油量的关键因素，相同簇数下水力裂缝缝高 25 m 时累产油量是水力裂缝缝高 15 m 时的 1.6 倍。同等簇数下，四分支径向井时累产油量较水力裂缝缝高 15 m 时大 1.04 万 t，证明径向井技术可作为压裂的替代性方案开发页岩油。径向井技术还可以与水力压裂相结合，进一步提升页岩油产能。当径向井和缝高

15 m 水力裂缝结合时，累产油量大于缝高 25 m 时的 4.07 万 t，且产量远远超过单径向井和单水力裂缝开发所得累产油量，说明径向井可与水力压裂技术相结合，成为提高产能的一种有效途径。

4 结论

页岩油资源分布广、潜力大，是常规油气资源转型的新机遇，也是保障国家能源安全的重要战略增长点。本文提出了一种“水平井+径向井”页岩油开发模式，建立了储层耦合流动产能预测模型，得出了储层压力响应和耦合流动规律，分析了径向井参数对产量的影响，对比了径向井和水力压裂条件下的产能。研究表明“水平井+径向井”可作为一种水力压裂技术的替代或补充技术，为页岩油资源高效开采提供了一种高效低成本的新方法。主要结论如下：

(1) 径向井可在主井筒周围提供高导流通道，加速压降向储层内部传播，增加储层有效泄流面积，有效扩大页岩油的采收范围；

(2) 径向井长度、分支数的增加使得页岩油藏泄流面积增大，进而提升是页岩油累产油量的影响因素之一；径向井直径越大，井指数越大，井内压耗越小，页岩油累计产量越大；页岩油储层极低的垂向渗透率是制约径向井产能的主要因素，在分支等角度分布时

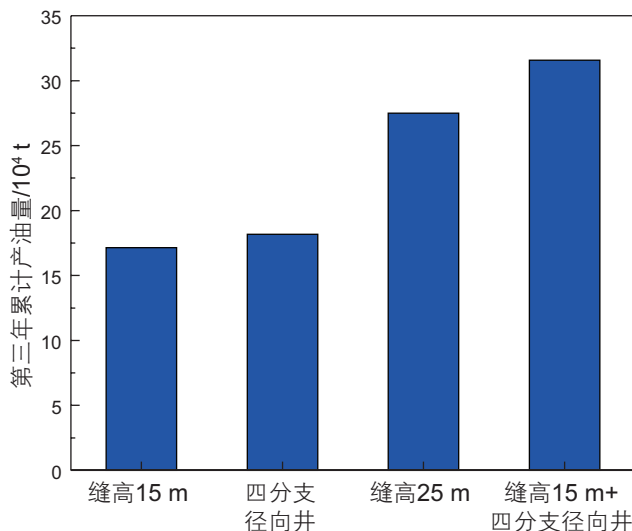


图 14 径向井和压裂案例产能

Fig. 14 Radial well and fracturing case capacity

起始角度的设置应以穿透垂向储层为目标;当径向井长度较大时,打开位置对产量影响不大;

(3) 径向井簇数的增大使得泄流区域增大,是产油量提升的影响因素之一。但径向井簇数越大,将会产生井间干扰,累产油量随径向井簇数增加的趋势逐渐减弱,且存在最优性价比簇数;

(4) 同等簇数下,四分支长 30 m 径向井累产油量

略大于水力裂缝缝高 15 m 时累产油量。径向井和缝高 15 m 水力裂缝结合时,累产油量略大于缝高 25 m。

致谢

感谢由 SINTEF Digital 开发的 MATLAB 油藏模拟工具箱 (MRST) 免费开源软件。

参考文献

- [1] 方圆,张万益,马芬,等.全球页岩油资源分布与开发现状[J].矿产保护与利用,2019,39(5):126-134.[FANG Y, ZHANG W Y, MA F, et al. Research on the Global Distribution and Development Status of Shale Oil[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(5): 126-134.]
- [2] 金之钧,王冠平,刘光祥,等.中国陆相页岩油研究进展与关键科学问题[J].石油学报,2021,42(7):821-835.[JIN Z J, WANG G P, LIU G X, et al. Research progress and key scientific issues of continental shale oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(7): 821-835.]
- [3] 杜金虎,胡素云,庞正炼,等.中国陆相页岩油类型、潜力及前景[J].中国石油勘探,2019,24(5):560-568.[DU J H, HU S Y, PANG Z L, et al. The types, potentials and prospects of continental shale oil in China[J]. China Petroleum Exploration 2019, 24(5): 560-568.]
- [4] 蒋廷学,王海涛.中国石化页岩油水平井分段压裂技术现状与发展建议[J].石油钻探技术,2021,49(04):14-21.[JIANG T X, WANG H T. The current status and development suggestions for Sinopec's staged fracturing technologies of horizontal shale oil wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4): 14-21.]
- [5] MARONGIU-PORCU M, LEE D, SHAN D, et al. Advanced modeling of interwell-fracturing interference: an Eagle Ford shale-oil study[J]. SPE-178925-PA, 2016, 21(05): 1567-1582.
- [6] 谢俊辉,王成平,尹辉,等.吉木萨尔页岩油老井重复压裂技术研究与应用[J].石油与天然气化工,2021,50(04):100-103.[XIE J H, WANG C P, YIN H, et al. Research and application of refracturing technology in old wells of Jimsar shale oil[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2021, 50(04): 100-103.]
- [7] 李凯凯,安然,岳潘东,等.安83区页岩油水平井大规模蓄能体体积压裂技术[J].石油钻探技术,2021,49(04):125-129.[LI K K, AN R, YUE P D, et al. Large-scale energy storage volumetric fracturing technology for horizontal wells in the An 83 shale oil reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4): 125-129.]
- [8] WANG X, ZHANG G, TANG W, et al. A review of commercial development of continental shale oil in China[J]. Energy Geoscience, 2022.
- [9] 李阳,赵清民,吕琦,等.中国陆相页岩油开发评价技术与实践[J].石油勘探与开发,2022,49(5):955-964.[LI Y, ZHAO Q M, LYU Q, et al. Evaluation technology and practice of continental shale oil development in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(5): 955-964.]
- [10] 庞彦明,张元庆,蔡敏,等.松辽盆地古龙页岩油水平井开发技术经济界限[J].大庆石油地质与开发,2021,40(05):134-143.[PANG Y M, ZHANG Y Q, CAI M, et al. Technical and economic limit of horizontal well development for Gulong shale oil in Songliang Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(05): 134-143.]
- [11] 王磊,盛志民,赵忠祥,等.吉木萨尔页岩油水平井大段多簇压裂技术[J].石油钻探技术,2021,49(4):106-111.[WANG L, SHENG Z M, ZHAO Z X, et al. Large-section and multi-cluster fracturing technology for horizontal wells in the Jimsar shale oil reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4): 106-111.]
- [12] 雷群,翁定为,熊生春,等.中国石油页岩油储集层改造技术进展及发展方向[J].石油勘探与开发,2021,48(5):1035-1042.[LEI Q, WENG D W, XIONG S C, et al. Progress and development directions of shale oil reservoir stimulation technology of China National Petroleum Corporation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(5): 1035-1042.]
- [13] MOINFAR A, VARAVEI A, SEPEHRNOORI K, et al. Development of a coupled dual continuum and discrete fracture model for the simulation of unconventional reservoirs; proceedings of the SPE reservoir simulation symposium, F, 2013 [C]. OnePetro.
- [14] 刘庆岭.水力喷射径向水平井控制压裂机理与参数优化研究[D].中国石油大学(北京),2019.[LIU Q L. Study on fracturing control mechanism and parameter optimization by radial jet drilling with hydraulic fracturing[D]. China university of petroleum, Beijing, 2019.]
- [15] 邹才能,朱如凯,白斌,等.致密油与页岩油内涵、特征、潜力及挑战[J].矿物岩石地球化学通报,2015,34(1):3-17+1-2.[ZOU C N, ZHU R K, BAI B, et al. Significance, geologic characteristics, resource potential and future challenges of tight oil and shale oil[J].

- Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(1): 3-17+1-2.]
- [16] KAZEMI M, TAKBIRI-BORUJENI A, HANSEL J R, et al. Enhanced oil recovery of shale oil: a molecular simulation study; proceedings of the Unconventional Resources Technology Conference, Denver, Colorado, 22-24 July 2019, F, 2019 [C]. Unconventional Resources Technology Conference (URTeC); Society of ...
- [17] BOAK J, KLEINBERG R. Shale gas, tight oil, shale oil and hydraulic fracturing [M]. Future Energy. Elsevier. 2020: 67-95.
- [18] 龚迪光. 径向井压裂裂缝起裂扩展规律与产能预测研究[D]. 中国石油大学(华东), 2016. [Gong D G. Study on the law of fracture initiation and propagation and productivity prediction for radial well-fracturing[D]. China university of petroleum, East China, 2016.]
- [19] 杨国丰, 周庆凡, 卢雪梅. 页岩油勘探开发成本研究[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 576-588. [YANG G F, ZHOU Q F, LU X M. Study on the cost of shale oil exploration and development[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 576-588.]
- [20] 周雪. 美国页岩油勘探开发现状及其对中国的启示 [J]. 现代化工, 2022, 42(07): 5-9. [ZHOU X. Current situation of U. S. A. shale oil exploration and development, and enlightenment to China[J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42(07): 5-9.]
- [21] 姜博明, 穆朗枫, 阎逸群, 等. 基于非达西渗流和压力敏感性的页岩油压裂水平井产能计算方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2023, 42(02): 152-159. [JIANG B M, MU L F, YAN Y Q, et al. Calculation method of shale oil fractured horizontal well productivity based on non-Darcy and pressure sensitive features[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2023, 42(02): 152-159.]
- [22] 王香增, 高胜利, 高潮. 鄂尔多斯盆地南部中生界陆相页岩气地质特征 [J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 294-304. [WANG X Z, GAO S L, GAO C. Geological features of Mesozoic continental shale gas in south of Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 294-304.]
- [23] 赵文智, 胡素云, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 1-10. [ZHAO W Z, HU S Y, HOU L H, et al. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1): 1-10.]
- [24] 孙龙德, 刘合, 何文渊, 等. 大庆古龙页岩油重大科学问题与研究路径探析[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 453-463. [SUN L D, LIU H, HE W Y, et al. An analysis of major scientific problems and research paths of Gulong shale oil in Daqing Oilfield, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 453-463.]
- [25] 庞彦明, 王永卓, 王瑞, 等. 松辽盆地古龙页岩油水平井试采分析及产能预测[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(03): 137-146. [PANG Y M, WANG Y Z, WANG R, et al. Production test analysis and productivity prediction of horizontal wells in Gulong shale oil reservoirs, Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(03): 137-146.]
- [26] LUKAWSKI M Z, ANDERSON B J, AUGUSTINE C, et al. Cost analysis of oil, gas, and geothermal well drilling [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 118: 1-14.
- [27] 李小龙, 许华儒, 刘晓强, 等. 径向井压裂裂缝形态及热采产能研究[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(6): 154-160. [LI X L, XU H R, LIU X Q, et al. Fracture morphology and production performance of radial well fracturing[J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(6): 154-160.]
- [28] 张潘潘, 田守增, 张逸群, 等. 径向井降压开采天然气水合物产能模拟[J]. 石油科学通报, 2021, 6(3): 417-428. [ZHANG P P, TIAN S C, ZHANG Y Q, et al. Production simulation of natural gas hydrate using radial well depressurization[J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 03: 417-428.]
- [29] ZHANG P P, TIAN S C, ZHANG Y Q, et al. Numerical simulation of gas recovery from natural gas hydrate using multi-branch wells: A three-dimensional model[J]. Energy, 2021, 220: 119549.
- [30] YANG R Y, LI G S, QIN X Z, et al. Productivity enhancement in multilayered coalbed methane reservoirs by radial borehole fracturing[J]. Petroleum Science, 2022.
- [31] 付宣, 李根生, 黄中伟, 等. 煤层气径向水平井压裂室内试验与产能数值分析[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(2): 99-105. [FU X, LI G S, HUANG Z W, et al. Laboratory testing and productivity numerical simulation for fracturing CBM radial horizontal wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(2): 99-105.]
- [32] GUO B Y, SHAIBU R, YANG X. Analytical Model for Predicting Productivity of Radial-Lateral Wells[J]. Energies, 2020, 13(23): 6386.
- [33] 迟焕鹏, 单衍胜, 李奎, 等. 水力喷射微小井眼水平井流动耦合模型及影响规律[J]. 石油学报, 2018, (8): 947-954. [CHI H P, SHAN Y S, LI K, et al. Coupled flow model and influence rule of hydra-jet micro-hole horizontal well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, (8): 947-954.]
- [34] 李敬彬. 水力喷射径向水平井射流破岩性能与送进能力研究[D]. 中国石油大学(北京), 2016. [LI J B. Research on hydraulic rock breaking capacity and self-propelled ability of the radial jet drilling technology[D]. China university of petroleum, Beijing, 2016.]
- [35] DICKINSON W, DYKSTRA H, NORDLUND R, et al. Coiled-tubing radials placed by water-jet drilling: field results, theory, and practice; proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, F, 1993 [C]. OnePetro.
- [36] 李根生, 黄中伟, 李敬彬. 水力喷射径向水平井钻井关键技术研究[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(2): 1-9. [LI G S, HAUNG Z W, LI J B. Study of the key techniques in radial jet drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(2): 1-9.]
- [37] DICKINSON W, DICKINSON R. Horizontal radial drilling system; proceedings of the SPE California Regional Meeting, F, 1985 [C]. OnePetro.

- [38] BILLINGSLEY R. Method and apparatus for horizontal drilling and oil recovery [Z]. Google Patents. 2006
- [39] CIRIGLIANO R A, TALAVERA BLACUTT J F. First experience in the application of radial perforation technology in deep wells; proceedings of the Latin American & Caribbean Petroleum Engineering Conference, F, 2007 [C]. OnePetro.
- [40] ABDEL-GHANY M A, SISO S, HASSAN A M, et al. New technology application, radial drilling petrobel, first well in Egypt; proceedings of the Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, F, 2011 [C]. OnePetro.
- [41] KAMEL A H. RJD: A cost effective frackless solution for production enhancement in marginal fields; proceedings of the SPE Eastern Regional Meeting, F, 2016 [C]. OnePetro.
- [42] LI Y H, WANG C J, SHI L H, et al. Application and development of drilling and completion of the ultrashort-radius radial well by high pressure jet flow techniques; proceedings of the International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, F, 2000 [C]. OnePetro.
- [43] LI G S, HUANG Z W, TIAN S C, et al. Research and application of water jet technology in well completion and stimulation in China [J]. *Petroleum Science*, 2010, 7: 239–44.
- [44] 毕刚, 李根生, 屈展, 等. 水力喷射径向水平井钻井水力参数计算及优选方法[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2018, 33(5): 76–82. [BI G, LI G S, QU Z, et al. Calculation and optimization of hydraulic parameters for hydraulic jet radial horizontal drilling[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2018, 33(5): 76–82.]
- [45] 李根生, 黄中伟, 田守嵘, 等. 水力喷射径向钻孔与压裂一体化方法[Z]. 2017. [LI G S, HUANG Z W, TIAN S C, et al. Hydraulic fracturing injection radial bore integrated process[Z]. 2017.]
- [46] LIE K A. An introduction to reservoir simulation using MATLAB/GNU Octave: User guide for the MATLAB Reservoir Simulation Toolbox (MRST) [M]. Cambridge University Press, 2019.
- [47] WANG X K, SHENG J J. Effect of low-velocity non-Darcy flow on well production performance in shale and tight oil reservoirs[J]. *Fuel*, 2017, 190: 41–6.
- [48] JIANG T W, HUANG Z W, LI J B, et al. Experimental investigation of internal and external flow fields of jetting nozzles with different structures[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 217: 110891.
- [49] LI J B, HUANG Z W, LI G S, et al. Field test of radial jet drilling technology in a surface formation[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 218: 110928.
- [50] LI J B, ZHANG G Q, LI G S, et al. A method to double the extension ability of radial jet drilling technology[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2018, 140(9).
- [51] ADEL M S R. Improving well productivity in an Egyptian oil field using radial drilling technique[J]. *Journal of Petroleum and Gas Engineering*, 2013, 4(5): 103–17.
- [52] KAMEL A H. Radial jet drilling: a technical review; proceedings of the SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, F, 2017 [C]. OnePetro.

(编辑 马桂霞)