

薄层稠油油藏径向钻孔热采开发数值模拟

朱维耀¹, 贾宝昆¹, 岳明¹, 郝爱刚², 宋洪庆¹

1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083
2. 胜利油田鲁胜石油开发有限责任公司, 东营 257077

摘要 以径向钻孔技术应用于薄层稠油油藏热采开发为目标, 采用基于等效渗流连续介质原理及局部网格加密技术的数值模拟方法, 在较高的拟合精度基础上, 研究了径向孔长度、径向孔平面夹角、径向孔数量等因素对薄层稠油油藏蒸汽吞吐采油产量的影响。结果表明, 径向孔能够增加蒸汽波及范围和泄压面积, 有效提升采油产量; 径向孔长度增加时采油产量逐渐增加但增幅逐渐减小, 径向孔长度的最优范围为 100~120 m; 储层同一平面分布的径向孔, 孔间夹角较大时相互干扰作用较弱, 增产效果较好; 同一平面分布的径向孔数量增加时, 径向孔之间的夹角逐渐减小, 相互干扰作用逐渐增强, 产量增幅逐渐变小, 当以平均夹角分布 4 条径向孔时可获得明显的增产效果。

关键词 薄层稠油油藏; 径向钻孔; 蒸汽吞吐采油; 数值模拟

目前, 中国东部油气田已进入中后期, 老井、枯竭井的数量不断增加, 新探明储量严重不足, 未动用储量大多数属于低渗透、稠油、薄油层以及裂缝性油气藏^[1]。薄层稠油油藏由于其油层厚度薄、原油黏度高、泥质含量高、敏感性强等特点, 因此未能有效动用。

径向钻孔技术作为油气井完井工程的重要环节, 过去 10 余年在国内外得到了大力发展^[2-4], 在开采复杂油气藏中已经显示出诸多优势, 为油气井增产起到了至关重要的作用^[5-7]。该项技术借助高压射流的水力破岩作用^[8,9], 可在油层中的不同方向上形成多条深度达 150 m、直径 2~5 cm 水平孔眼, 通过孔眼改善均质、非均质油气层渗流通道, 从而有效提高运移效率, 且可实现稠油直井、定向井深度注汽, 提高蒸汽的波及体积, 增加注汽效率, 增大泄油面积。

径向钻孔技术由于其成本低、作业工期短、储层伤害少等一系列优势, 在低渗透油藏开发中已经应用得较为广泛^[10,11], 但作为薄层稠油油藏整体热采开发的技术还未见报道, 进行相关研究可以为现场生产提供理论依据。本文采用数值模拟方法, 研究径向钻孔技术应用于薄层稠油油藏热采的影响因素。

1 模型建立

1.1 储层概况

胜利油田滨 509 块馆陶组主力含油层厚度薄, 平均单层厚度约为 2 m。试验显示, 该区块 50℃ 地面脱气原油黏度平均为 3979 mPa·s, 泥质含量约占 17.6%, 敏感性较强, 属典型的敏感性薄层稠油油藏。该区块沿用稠油传统热采配套开发技术, 注汽压力达 19.7 MPa, 注汽后峰值日产油仅 5.8 t, 一个吞吐周期平均日产油 2.7 t, 注汽压力高, 产量低, 经济效益差^[12]。

胜利油田滨 509 块馆陶组井网如图 1 所示。

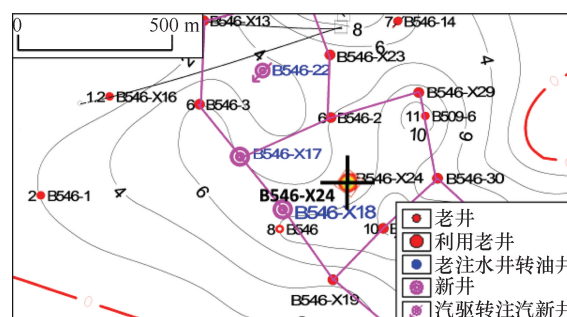


图 1 滨 509 块馆陶组井网示意

Fig.1 Well network map of Guantao in Bin-509

收稿日期: 2015-08-24; 修回日期: 2015-12-30

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05010-002); 中央高校基本科研业务费专项(FRF-TP-15-043A1)

作者简介: 朱维耀, 教授, 研究方向为渗流力学与油气田开发, 电子信箱: weiyao@sina.com; 贾宝昆(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为渗流力学, 电子邮箱: 57714729@qq.com; 岳明(通信作者), 博士, 研究方向为低渗透、致密油气藏渗流理论, 电子信箱: 271126840@qq.com

引用格式: 朱维耀, 贾宝昆, 岳明, 等. 薄层稠油油藏径向钻孔热采开发数值模拟[J]. 科技导报, 2016, 34(9): 108-113; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.09.014

滨509块馆陶组试井储层厚度仅为2.4 m,常规射孔无法投产。现场将径向钻孔技术应用于滨509馆陶组试井,通过实施4个方向的径向钻孔施工,并采用蒸汽吞吐开采方式,生产效果明显,后期受周围老注水井影响,含水量上升,但产油量仍然保持在约2 t/d。现场试验成功,反映出径向钻孔技术在敏感性薄层稠油油藏热采开发中的巨大潜力^[13]。

1.2 单井吞吐模型

单井吞吐模型的建立,参考胜利油田滨509块Ng6馆陶组薄层稠油油藏实测数据:油层中深1100 m,平均油层厚度2 m,地层有效渗透率 $400 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,地层平均孔隙度30%;原油密度平均 0.9722 g/cm^3 ,初始含油饱和度60%,属普通稠油;原始地层压力11 MPa,油层温度 50°C 。原油黏温曲线如图2所示。

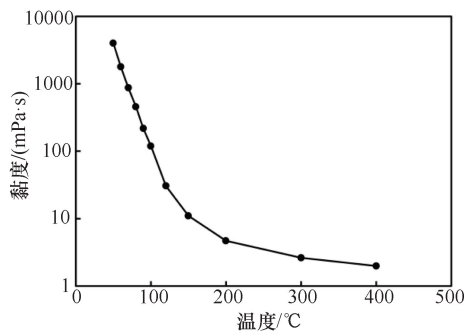


图2 原油黏温曲线

Fig. 2 Crude oil viscosity-temperature curve

采用笛卡尔坐标系的块中心网格,建立单井吞吐网格模型如图3所示, x, y 方向各划分15个网格,平均网格步长20 m,纵向(z 方向)选取1个2 m的数值模拟层,数值模拟三维模型划分为 $15 \times 15 \times 1$ 共225个网格。

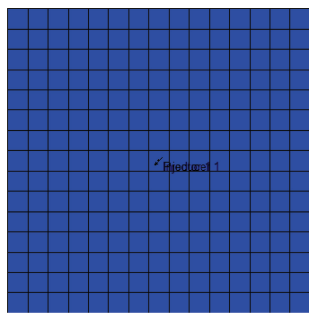


图3 单井吞吐网格模型

Fig. 3 Grid model of single well stimulation

1.3 径向钻孔模型及模拟方法

由于粗网格计算无法满足模拟精度的要求,细网格又会消耗大量的计算机内存及CPU运算时间,甚至由于数值弥散导致计算结果失真^[14]。因此,在模型中的一般区域采用大尺寸网格进行模拟,而在比较重要的区域采用较为密集的网格

进行模拟,这些密集网格可以更为细致地描述流动变化。

径向钻孔实际孔径为2~5 cm不等,在块中心网格模型中,基础网格与径向孔尺度差异较大。采用传统的局部网格加密方式虽然可以有效改进网格间因尺度、地质参数差异导致的流动性较差的问题,但该方法的弊端在于加密网格后计算时间大幅增加,且容易得到非收敛的计算结果。

因此,在局部网格加密(local grid refinement)的基础上^[15,16],结合等效渗流连续介质理论^[17,18],对径向孔进行模拟。径向钻孔网格模型如图4所示,将径向孔网格加密成 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ (实际径向孔规格为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$)。

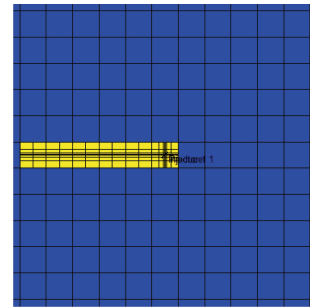


图4 径向钻孔网格模型

Fig. 4 Grid model of radial drilling

考虑储层中只有1条连通径向孔,其基质渗透率为 K_m ,宽度为 b_m ,径向孔渗透率为 K_j ,孔径为 b_j ,对于平行于径向孔方向的流动,如果假定存在1个等效渗透率,使得在同样压力梯度作用下传导相同的流量 Q ,则平行于径向孔方向网格的等效渗透率为

$$K_p = \frac{K_m b_m + K_j b_j}{b_m + b_j} \quad (1)$$

类似地,可导出垂直层面方向的流动,等效的垂向渗透率 K_n 的计算公式为

$$\frac{b}{K_n} = \frac{b_m}{K_m} + \frac{b_j}{K_j} \quad (2)$$

1.4 模型验证

应用建立的单井吞吐模型,根据现场实际径向孔施工情况进行了4个方向的径向钻孔模拟,利用现场实际注采参数进行了1个吞吐周期的蒸汽吞吐模拟开采。现场1个蒸汽吞吐周期的实际注采参数为:注汽时间10 d,注汽压力19 MPa,注汽温度 360°C ,注汽干度70%,日注汽量150 t,累计注汽量1500 t,焖井时间10 d,开采时间365 d。

单井吞吐产量拟合结果如图5所示,通过模拟结果与大量实际生产数据的拟合,主要调整了径向孔的孔渗参数及传导率参数,拟合精度较高。

在实际生产过程中,孔内注汽阻力可以忽略,径向孔接近无限导流能力。通过大量的现场实际生产数据拟合工作,在较高的历史拟合精度上,确定了径向孔的孔渗参数及传导率参数,用于对影响因素进行数值模拟分析。

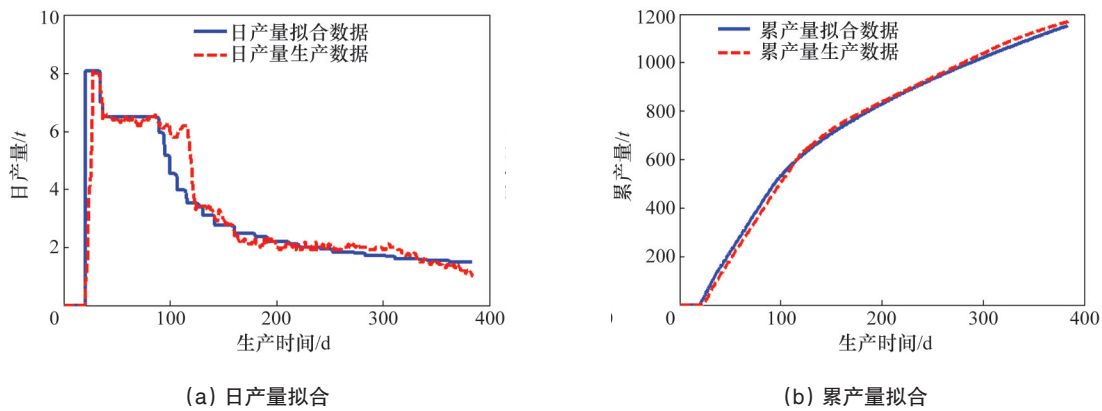


图5 单井吞吐产量拟合曲线
Fig. 5 Historic matching production figure

2 影响因素分析

在所建单井吞吐模型中加入径向孔,利用现场注采参数进行单井蒸汽吞吐开采模拟试验,模拟时间为1个吞吐周期,对径向孔长度、径向孔平面夹角、钻孔数量以及径向孔纵向排布等影响因素进行分析^[9]。

2.1 径向孔长度

在储层中设置1条径向孔,长度分别为10~150 m,其余参数及生产制度不变,模拟分析不同径向孔长度对采油产量的影响。

模拟试验结果如图6所示,产量随着径向孔长度的增加而增加,但增幅逐渐减小,当径向孔长度小于100 m时产量随径向孔长度的增加显著增长,当径向孔长度大于120 m时产量增长极为缓慢,因此,径向孔长度的最优值域为100~120 m。在实际生产中,还需结合实际油藏物性、不同生产制度等确定最优径向孔长度。

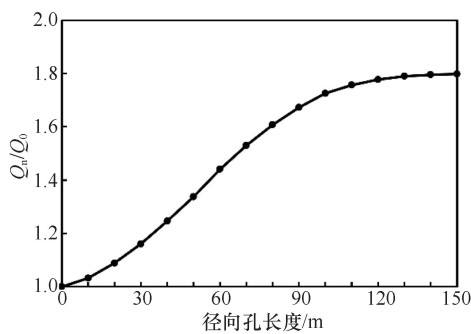


图6 径向孔长度对产量的影响
Fig. 6 Influence of radial hole length on production

2.2 径向孔平面夹角

在储层同一平面上设置2条长度为110 m的径向孔,2条径向孔之间的夹角分别为90°和180°,其余模型参数及生产制度不变,模拟分析不同夹角径向孔对采油产量的影响。

模拟试验数据显示,径向孔夹角为180°时的产量高于径

向孔夹角为90°时的产量,增产幅度近10%。模拟试验得到的不同夹角径向孔的压力场、温度场如图7所示,径向孔之间夹角为180°时的泄压面积、蒸汽波及范围,大于径向孔之间夹角为90°时的泄压面积和蒸汽波及范围,说明在同一储层平面上径向孔之间夹角较大时,相互干扰作用较弱,增产效果较好。

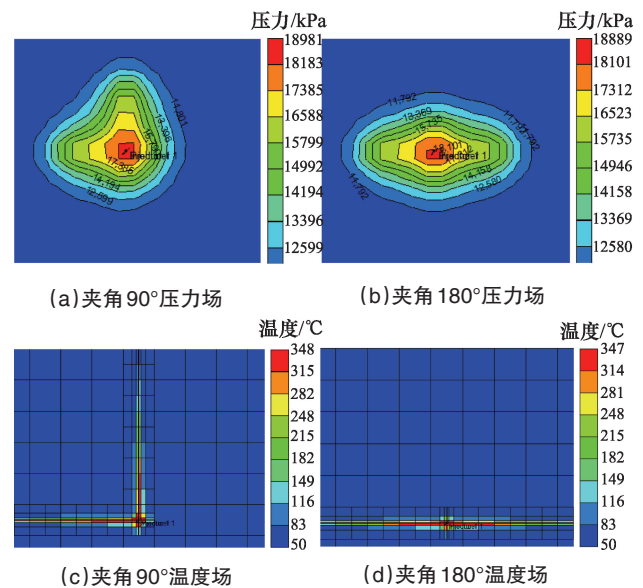


图7 不同夹角径向孔的压力场及温度场

Fig. 7 Diagram of field in different radial hole plane distribution

2.3 径向孔数量

在储层同一平面分别设置1~4条长度为110 m的径向孔,其余模型参数及生产制度不变,模拟分析同一储层平面不同径向孔数量对采油产量的影响。

径向孔数量与产量的关系如图8所示,采油产量随着径向孔数量的增加而增加,但径向孔之间的夹角随之减小,相互干扰作用逐渐增强,产量增加幅度逐渐变小。图9所示的不同数量径向孔的压力场、温度场也反映了同样的结果,当

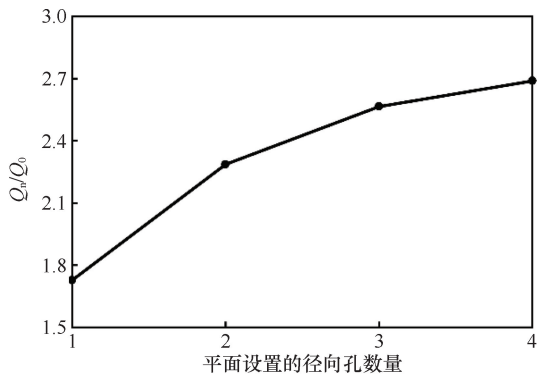


图8 径向孔数量与产量的关系

Fig. 8 Relationship between quantity of radial hole and production

径向孔数量增加时,泄压面积和蒸汽波及范围显著增大。综合图8、图9认为,在储层同一平面以孔间夹角平均分布设置4条径向孔时,增产效果较好。

2.4 径向孔纵向排布

在储层同一方位,纵向设置1~5条长度为110 m、均匀分布的径向孔,其余模型参数及生产制度不变,模拟分析同一方位不同纵向钻孔数量对采油产量的影响。

径向孔纵向排布数量与产量的关系如图10所示,随着纵向钻孔数量的增加,产量逐渐增加但增幅不明显。由于储层较薄,同一方位纵向排布的钻孔数量增加必然会造成相邻径向孔间距减小、相互干扰作用增强。因此,对于薄层稠油油藏,径向孔纵向排布应根据施工工艺水平及储层实际物性设置合理的钻孔数量。

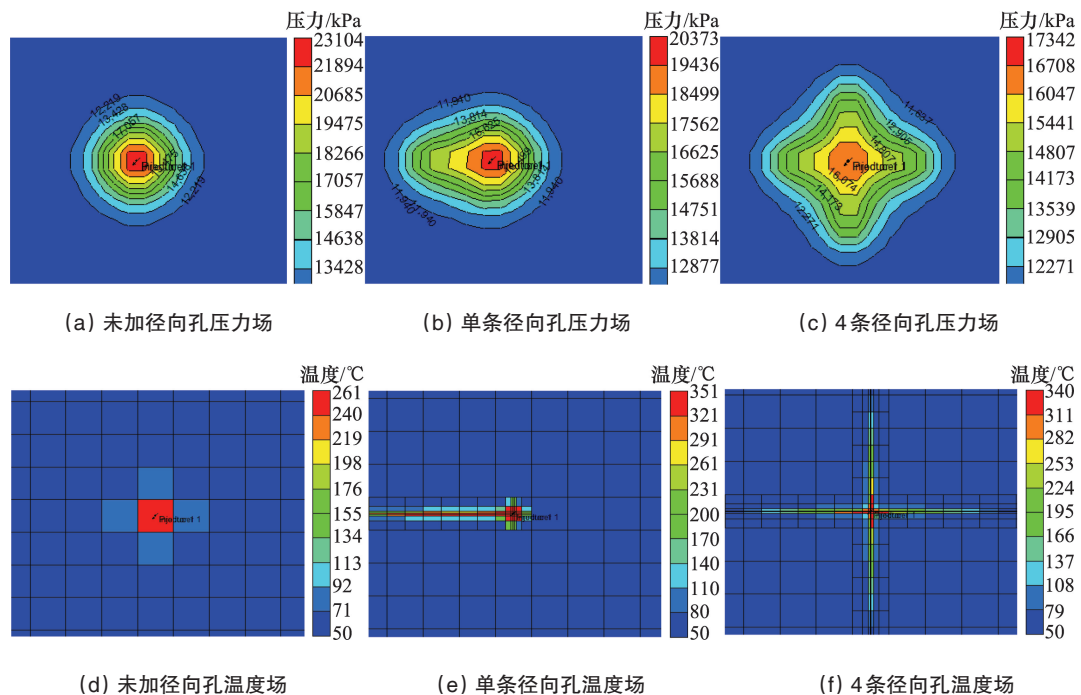


图9 不同数量径向孔的压力场及温度场

Fig. 9 Pressure and temperature fields of different drilling numbers

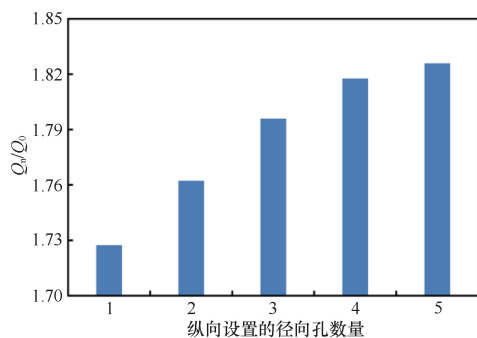


图10 径向孔纵向排布与产量的关系

Fig. 10 Relationship between vertical distribution of radial hole and production

3 结论

1) 在薄层稠油油藏径向钻孔热采中,径向孔长度、径向孔平面夹角及钻孔数量是比较重要的影响因素,利用数值模拟方法分析了这些因素对单井蒸汽吞吐产量的影响,对薄层稠油油藏径向钻孔技术开发具有实际意义。

2) 径向孔长度对单井蒸汽吞吐产量的影响显著,随着径向孔长度的增加产量逐渐增加、增幅逐渐减小,最优钻孔长度范围为100~120 m。

3) 相邻径向孔之间存在一定的干扰作用,在储层同一平面分布的径向孔,当孔间夹角较大时,增产效果较好;在储层同一平面以平均夹角设置4条径向孔时,增产效果较明显。

4) 径向孔纵向排布不是主要的影响因素,厚度小于 3 m 的薄层稠油储层中,纵向不宜设置过多的径向孔,应根据现场施工工艺水平及储层实际物性在纵向上设置合理的钻孔数量。

参考文献(References)

- [1] 周卫东, 师伟, 李罗鹏. 径向水平钻孔技术研究进展[J]. 石油矿场机械, 2012, 41(4):1-6.
Zhou Weidong, Shi Wei, Li Luopeng. Advances of techniques of radial horizontal drilling for boring hole[J]. Oil Field Equipment, 2012, 41(4): 1-6.
- [2] Cirigliano R A, Talavera Blacutt J F. First experience in the application of radial perforation technology in deep wells[C]. Latin American & Caribbean Petroleum Engineering Conference, Buenos Aires, Argentina, 15-18 April, 2007.
- [3] Bruni M A, Biasotti J H, Salomone G D. Radial drilling in Argentina [C]. Latin American & Caribbean Petroleum Engineering Conference, Buenos Aires, Argentina, April 15-18, 2007.
- [4] Omrcen B, Brkic V, Dickinson W. Application and results of petro jet multilateral drilling in croatia[R]. Richardson, USA: Society of Petroleum Engineers, 2001.
- [5] 刘合, 王峰, 王毓才, 等. 现代油气井射孔技术发展现状与展望[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(6): 731- 737.
Liu He, Wang Feng, Wang Yucai, et al. Oil well perforation technology: status and prospects[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6): 731-737.
- [6] Li Y, Wang C, Shi L, et al. Application and development of drilling and completion of the ultrashort-radius radial well by high pressure jet flow techniques[C]. International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, Beijing, China, 7-10 November, 2000.
- [7] Ourssegov S, Petrov N. Design and initial performance of pilot cyclic steam stimulations of vertical wells with radial horizontal bores in low-permeable heavy oil carbonates[C]. SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition, Moscow, Russia, October 28-30, 2008.
- [8] 张毅, 李根生, 熊伟, 等. 高压水射流深穿透射孔增产机理研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(2): 38-41.
Zhang Yi, Li Gensheng, Xiong Wei, et al. Stimulation mechanism of oil well using high- pressure water jet deep- penetrating perforation technique[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2004, 28(2): 38-41.
- [9] Guo R, Li G, Huang Z, et al. Theoretical and experimental study of the pulling force of jet bits in radial drilling technology[J]. Petroleum Science, 2009, 6(4): 395-399.
- [10] 唐亮田, 李晓军, 薛巨丰. 低渗透砂砾岩油藏径向钻孔技术优化研究及应用[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(1): 113-117.
Tang Liangtian, Li Xiaojun, Xue Jufeng. Research and application of radial drilling technology in low permeability sandstone and conglomerate reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(1): 113-117.
- [11] 崔传智, 王秀坤, 杨勇, 等. 低渗透油藏高含水期层间径向钻孔油藏工程优化研究[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(5): 61-64.
Cui Chuazhi, Wang Xiukun, Yang Yong, et al. Optimization of radial drilling branch number and length in low permeability reservoirs during high water cut period[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(5): 61-64.
- [12] 朱桂林, 王学忠. 准噶尔盆地春风油田薄浅层超稠油水平井蒸汽驱试验[J]. 科技导报, 2014, 32(31): 55-60.
Zhu Guilin, Wang Xuezhong. Horizontal steam flooding pilot test for thin shallow super heavy oil of chunfengoilfield in junggarbasin[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(31): 55-60.
- [13] 张巧莹. 深井薄层稠油油藏水平井注采参数优化设计[J]. 断块油气田, 2012, 19(1): 53-56.
Zhang Qiaoying. Optimization of injection and production parameters on horizontal well of thin heavy oil reservoir in deep well[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2012, 19(1): 53-56.
- [14] 苏云河, 杜志敏, 陈小凡, 等. 高含水油藏动态局部网格加密技术[J]. 石油学报, 2010, 31(1): 84-86.
Su Yunhe, Du Zhimin, Chen Xiaofan, et al. Dynamic local grid refinement technology for high water cut reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(1): 84-86.
- [15] Maihöfer M, Ruprecht A. A local grid refinement algorithm on modern high-performance computers[C]//Parallel Computational Fluid Dynamics-Advanced Numerical Methods, Software and Applications. Amsterdam, Holland: Elsevier, 2003: 105-112.
- [16] Pruess K, Garcia J. A systematic approach to local grid refinement in geothermal reservoir simulation[C]. World Geothermal Congress, Kyushu, Japan, May 28-31, 2000.
- [17] 程强, 魏敬超, 李立峰. 等效渗透率在底水油藏水平井数值模拟中的应用[J]. 油气藏评价与开发, 2014, 4(2): 34-37.
Cheng Qiang, Wei Jingchao, Li Lifeng. Application of equivalent permeability in horizontal well numerical simulation of bottom water reservoir[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2014, 4(2): 34-37.
- [18] 王臻, 左建平, 戴瑛. 裂隙单元修正等效渗透率模型及其验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 728-733.
Wang Zhen, Zuo Jianping, Dai Ying. A modified equivalent permeability model of fracture element and its verification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 728-733.
- [19] 吴秀田, 田树宝, 张鹏, 等. 水力射流深穿透射孔产能分析及参数优化[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(5): 74-78.
Wu Xiutian, Tian Shubao, Zhang Peng, et al. Productivity analysis and parameter optimization for deep hydraulic jet perforation wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(5): 74-78.

Numerical simulation of radial drilling in thermal recovery and development of thin heavy oil reservoirs

ZHU Weiyao¹, JIA Baokun¹, YUE Ming¹, HAO Aigang², SONG Hongqing¹

1. Civil and Environmental Engineering School, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China
2. Lusheng Petroleum Development Co., Ltd., Shengli Oil Field, Dongying 257077, China

Abstract To apply the radial drilling technique to thermal recovery and development of thin heavy oil reservoirs, a simulation study based on the equivalent continuum principle and local grid refinement technology is carried out. On the basis of historic matching of a higher fitting precision, the influences of the factors of length, plane angle and the quantity of the radial hole on oil production are studied. The results indicate the followings. The radial holes can increase the scope of steam and the area of pressure release and can enhance the production effectively; the oil production gradually increases with the increase of the radial hole length, but the increase rate decreases, with the optimal range of length of the radial hole being 100 to 120 m; a large angle of the distribution of the radial holes in the same plane in the reservoir has weak interference and production grows well; when the number of the radial holes in the same plane increases and the angle between the radial holes gradually decreases, mutual interference gradually strengthens and the output growth gradually declines; and the average angle distribution of four radial holes can obtain an obvious effect on oil production.

Keywords thin heavy oil reservoirs; radial drilling; steam stimulation; numerical simulation

(责任编辑 韩星明)