注采井网对裂缝形态及压裂规模的影响

王记俊　廖新武　赵秀娟　徐玉霞　石洪福
中海石油（中国）有限公司天津分公司，天津　300452

摘　要：水平井压裂开发技术在低渗薄层油藏开发中已取得了较好效果，注采井网的不同导致水平井的裂缝形态及压裂规模不同，由此导致初期产能及最终采出程度差别较大。为了实现水平井压裂开发的产能和经济效益最大化，应用数值模拟方法设计了三种直平混采七点井网。以增加采出程度、缩短见水时间为目标，优化裂缝形态：对称、三角形和四边形注采井网的水平井裂缝形态分别呈哑铃形、纺锤形和橄榄球形。以经济效益最大化为宗旨，优化压裂规模：对称注采井网，整体压裂采出程度最高；三角形和四边形注采井网，压裂采油井经济效益最好。

关键词：注采井网；水平井；裂缝形态；压裂规模
DOI：10.3969/j.issn.1006-5539.2014.05.013

0　前言

水平井压裂开发技术可有效改善低渗薄层油藏的开发效果。压裂水平井增加了泄油面积，但也会较快消耗地层能量，导致供液不足，使产能快速递减，不利于油田稳产和产能建设。为解决水平井压裂开采过程中压力下降快、产油量递减大的问题，现场一般采用直井注水补充能量，改善其开发效果[1-2]。近年来，水平井压裂参数优化研究大多针对压裂水平井单井衰竭开采，对于水平井与直井联合开采井网参数优化的研究较少[3-4]。研究不同注采井网条件下水平井压裂裂缝形态及压裂规模，对油田的压裂开发更有实际指导意义。

1　模型描述

为了研究直平混采七点井网裂缝形态及压裂规模对采出程度的影响，以葡萄花低渗薄层油藏为例建立模型[5]，地质油藏参数：平均油层厚度 0.8 m，油藏深度 1 500 m，地层原油平均密度 0.846 t/m^3，地层原油平均黏度 12 mPa·s，平均地层压力 13.62 MPa，压力系数 0.874，平均地层温度 64.6 ℃，地温梯度 4.44 ℃/100 m，为正常温度、压力系统，平均孔隙度 0.21，渗透率 10~40 mD，平均值 20 mD，含油饱和度 65 %，水平段长 600 m。

考虑 3 种注采井网模式，见图 1。采用均匀注水、保持井组注采平衡、定井底流压生产：水平井 3 MPa，直井 2 MPa。应用 ECLIPSE 中的 LGR 模块加密网格模拟裂缝，水平井裂缝总长度 1 050 m，裂缝间距 120 m，裂缝宽度 10 mm，针对 3 种注采井网各设计 4 种压裂规模方案，见表 1。

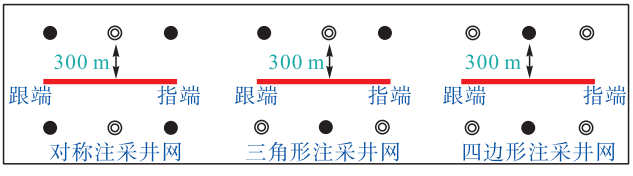

图 1　注采井网模式

表 1　注采井网压裂规模设计

方案编号	内容描述
F 1	压裂水平井
F 2	整体压裂
F 3	压裂水平井 + 注水井
F 4	压裂水平井 + 直井油井

2　对称注采井网

对称注采井网的注水井以水平井为对称轴，位于水

收稿日期：2014-05-03
基金项目：国家科技重大专项“海上油田丛式井网整体加密及综合调整油藏工程技术应用研究”（2011 ZX 05024-002-00）
作者简介：王记俊(1987-)，男，山东莒县人，助理工程师，硕士，主要从事油气藏工程和数值模拟方面的研究工作。

平井中部呈对称分布。为防止注水突进，水平井裂缝形态呈哑铃形[6]。哑铃形裂缝在不同压裂规模方案下的平面分布见图 2。各方案相对于不压裂时的年累积采出程度提高值见图 3。

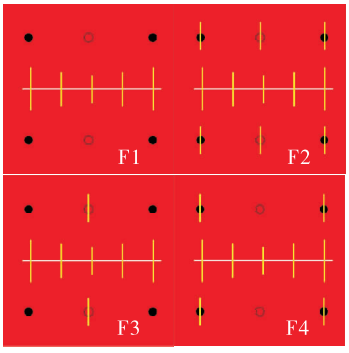

图 2　哑铃形裂缝在不同压裂规模方案下的平面分布

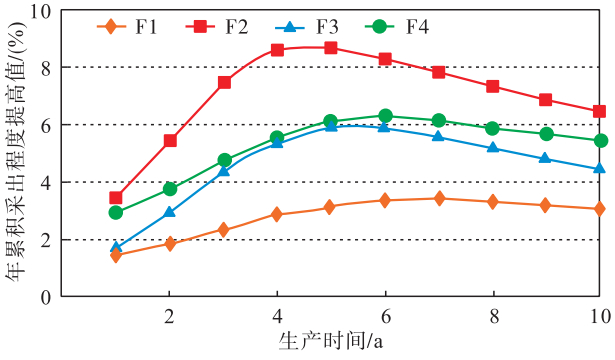

图 3　对称注采井网采出程度提高值

由图 3 可见，F 2 和 F 4 分别在第 5 年和第 6 年采出程度提高值最高，可分别提高 8.67% 和 6.29%；在第 10 年 F 2 和 F 4 分别提高 6.47% 和 5.44%。对称注采井网具有两注五采，地层能量亏空大，所以 F 2 整体压裂不仅初期增加了采油量，使峰值产量高，而且压裂 2 口注水井，增加注水量，补充地层能量，驱油面积增大，提高波及效率。因此对于对称注采井网，综合考虑压裂 2 口注水井增加的成本、提高的采出程度，为增大压裂规模，选择方案 F 2。

3　三角形注采井网

三角形注采井网的注水井呈等腰三角形分布，水平井垂直于底边的高线。为了防止注水突进，水平井裂缝形态呈纺锤形[7]。纺锤形裂缝在不同压裂规模方案下的平面分布见图 4。各方案相对于不压裂时的年累积采出程度提高值见图 5。

由图 5 可见，F 2 效果最好，采出程度提高值最高，其次是 F 4。第 10 年以后 F 2 和 F 4 的采出程度提高值几乎相同。F 2 和 F 4 在第 5 年和第 6 年采出程度提高值最高，分别提高 6.76% 和 6.08%。三角形注采井网具有三注四采，注水能量较充足；虽然 F 2 整体压裂初期注水量大，直井油井和水平井的采油速度都很快，但是油井见水时间早，产油速度逐渐降低。而 F 4 压裂水平井和直井油井虽然初期注水量较少，产油速度低，但是稳产时间长，后期的采出程度和整体压裂相差不大。综合考虑压裂成本和经济效益，对于三角形注采井网，压裂规模不是越大越好，故选择 F 4。

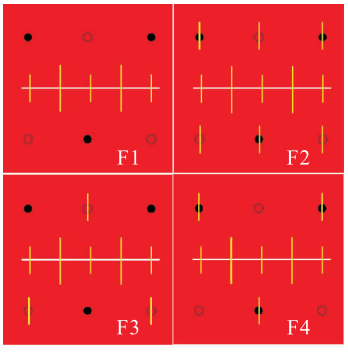

图 4　纺锤形裂缝在不同压裂规模方案下的平面分布

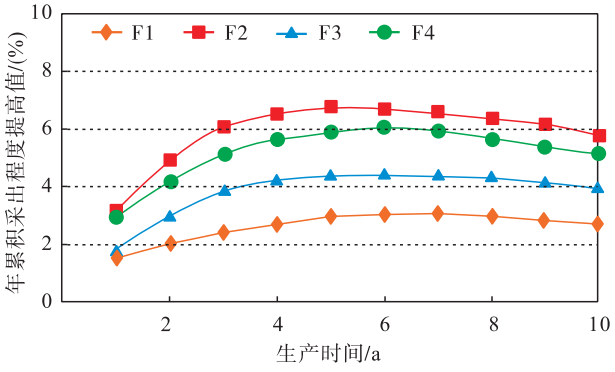

图 5　三角形注采井网采出程度提高值

4　四边形注采井网

四边形注采井网的注水井呈正方形分布，水平井与两平行边的中点相交[8-9]。为了防止注水突进，水平井裂缝形态呈橄榄球形[10]。橄榄球形裂缝在不同压裂规模方案下的平面分布见图 6。各方案相对于不压裂时的年累积采出程度提高值见图 7。

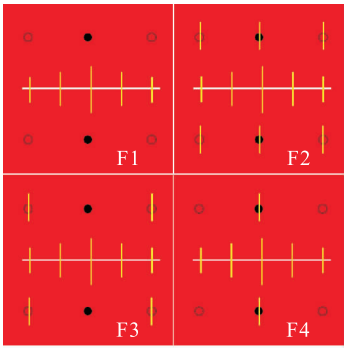

图 6　橄榄球形裂缝在不同压裂规模方案下的平面分布

由图 7 可见，初期采出程度提高值最高的是 F 2，其次是 F 4。F 2、F 4 在第 5 年采出程度提高值最高，分别提

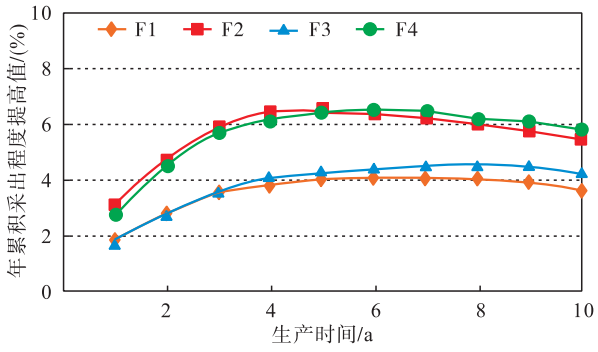

图 7　四边形注采井网采出程度提高值

高 6.59%和 6.51%；第 10 年 F 4 的采出程度提高值略高于 F 2。四边形注采井网具有四注三采，注水能量充足，F 2 整体压裂初期采油速度高，但是稳产时间短，而 F 4 稳产时间长，产油量后来居上。综合考虑经济效益和压裂成本，压裂规模适中最优，故选择 F 4。

通过纵向对比三种井网类型，采用对称注采井网开采葡萄花低渗薄层油藏效果最好。相比于三角形和四边形注采井网，对称注采井网具有采油速度快、高峰年产油量大、稳产时间长、采出程度高等优点。

5　结论

a）为了减缓注入水突进，防止水平井过早水淹，水平井压裂裂缝长度呈非均匀形态，靠近注水井位置的裂缝长度稍短。对称形注采井网水平井裂缝呈哑铃形；三角形注采井网水平井裂缝呈纺锤形；四边形注采井网水平井裂缝呈橄榄球形。

b）综合考虑单井的压裂成本和压裂效果，不同注采井网选择的压裂方式各不相同。对称注采井网注水井数量少，注水强度相对较小，且非均质性严重的地层注水效果不显著，压裂规模越大越好，选择 F 2；对于三角形和四边形注采井网，注水强度大，压裂规模不宜太大，且压裂注水井的增产效果不显著，不需要压裂注水井。

c）纵向对比不同注采井网的开采效果可以看出：对称注采井网由于采油井数多，压裂注水井保持地层能量，具有较好的开采效果，采油速度最快，高峰年产油量最大，采出程度最高。

参考文献：

[1] 杨子清，陈文龙，杨军侠，等. 分段压裂水平井裂缝形态优化及产能特征研究[J]. 石油天然气学报，2014，36(1)：99−102.
Yang Ziqing, Chen Wenlong, Yang Junxia, et al. Optimization of Staged −fracturing Horizontal Wells Fracture Morphology and Research of Its Capacity Features [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(1)：99−102.

[2] 王记俊，郭　平，王德龙，等. 基于 PEBI 网格的水平井裂缝参数优化[J]. 天然气与石油，2013，31(1)：57−59.
Wang Jijun, Guo Ping, Wang Delong, et al. Optimization of Fracturing Parameters of Horizontal Well in Low Permeability Reservoir Based on PEBI Grid [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31(1)：57−59.

[3] 陈民锋，姜汉桥，周　琦. 低渗透砂岩油藏水井压裂参数优化数值模拟研究[J]. 石油钻采工艺，2007，29(1)：55−56.
Chen Minfeng, Jiang Hanqiao, Zhou Qi. Numerical Simulation Research on Parameter Optimization of Water Well Fracturing in Low Permeability Sandstone Reservoir [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2007, 29(1)：55−56.

[4] 尹　建，郭建春，曾凡辉. 低渗透薄互层压裂技术研究及应用[J]. 天然气与石油，2012，30(6)：52−54.
Yin Jian, Guo Jianchun, Zeng Fanhui. Research and Application of Low Permeability and Thin Interbed Fracturing Technology [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(6)：52−54.

[5] Jabbari H, Zeng Zhengwen. Hydaulic Fracturing Design for Horizontal Wells in the Bakken Formation [J]. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 2012, 128−139.

[6] 郝明强，胡永乐，李凡华. 特低渗透油藏压裂水平井产量递减规律[J].石油学报，2012，33(2)：269−273.
Hao Mingqiang, Hu Yongle, Li Fanhua. Production Decline Laws of Fractured Horizontal Wells in Ultra−low Permeability Reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2)：269−273.

[7] 王海涛，张烈辉. 有限导流垂直裂缝产能及影响因素研究[J].西南石油大学学报(自然科学版)，2009，31(3)：78−82.
Wang Haitao, Zhang Liehui. The Productivity and Influencing Factors of Finite −conductivity Vertical Fracture [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31(3)：78−82.

[8] 王军磊，位云生，陈　鹏，等. 分段压裂水平井压力动态分析及特征值方法[J]. 新疆石油地质，2014，35(2)：192−196.
Wang Junlei, Wei Yunsheng, Chen Peng, et al. Transient Pressure Behavior Analysis and Direct Synthesis Technique for Horizontal Well Intersected by Finite Conductivity Fractures [J]. XinJiang Petroleum Geology, 2014, 35(2)：192−196.

[9] 王晓冬，胡永乐，丁一萍. 水平井生产数据分析模型[J]. 石油勘探与开发，2010，37(1)：99−103.
Wang Xiaodong, Hu Yongle, Ding Yiping. A Model of Production Data Analysis for Horizontal Wells [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(1)：99−103.

[10] 张连枝，程时清，付随艺，等. 多分支水平井注采井网波及系数研究[J]. 天然气与石油，2013，31(2)：55−57.
Zhang Lianzhi, Cheng Shiqing, Fu Suiyi, et al. Study on Sweep Efficiency of Well Pattern with Vertical Injector and Multilateral Horizontal Producer [J]. Natural Gas and Oil, 2013，31(2)：55−57.