

厚层稠油油藏蒸汽吞吐后期立体注采井网设计及优化

孙璐¹, 陈民锋¹, 刘月田¹, 葛涛涛², 李晓风¹, 林健³

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司
渤海石油勘探开发研究院, 天津 300450; 3. 中国石油辽河油田公司兴隆台采油厂, 辽宁 盘锦 124000)

摘要: 蒸汽吞吐后期的厚层稠油油藏在平面上和纵向上油层动用不完善, 油藏采用蒸汽吞吐开发潜力小, 单井可采储量低, 很难取得经济效益。为了合理开发厚层稠油油藏蒸汽吞吐后期的未动用储量, 运用热采数值模拟方法, 论证了厚层稠油油藏蒸汽吞吐后期直井—水平井立体注采井网的合理有效性, 分别针对双水平井与直井平面上的井距、双水平井纵向上的井距和水平段长度进行了优化研究。结果表明, 上部水平井(注汽)和直井在生产中起决定作用, 直井扩大了蒸汽平面的波及效率; 下部水平井通过排液发挥调节作用, 扩大了垂向波及效率, 提高了油藏动用程度。对于厚层稠油油藏, 水平井与直井并排的距离为 50 m, 双水平井纵向井距为 25 m, 水平段长度为 350~400 m 时, 开发效果最佳。

关键词: 厚层稠油油藏 开发方式 立体井网 立体注采 优化设计

中图分类号: TE345

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)05-0072-04

稠油油藏是目前中外研究的热点, 其中, 厚层稠油油藏是研究的焦点。该类油藏主力区块已在辽河油区进入高轮次吞吐阶段, 油气比和地层压力普遍较低^[1-4]。平面上, 因储层物性差异大、井网井距和注汽参数设计不合理, 导致油层动用不完善, 井间仍存在大量剩余油; 纵向上, 因蒸汽超覆和油层吸汽不均, 以致动用程度低^[2-4]。若继续蒸汽吞吐, 开发效果差, 提高采收率潜力小, 亟待开展更有效的接替方式。为此, 龚姚进开展了特深厚层稠油油藏蒸汽吞吐开发后转火驱开采技术研究^[5], 任芳祥提出采用不同井型、立体井网架构转蒸汽驱开发深层稠油油藏^[6]。理论和实践表明, 稠油油藏开发中水平井的合理应用能够有效提高单井产能, 是油藏高效开发的有效技术^[7-15]。为解决厚层稠油油藏动用程度不均衡问题, 笔者结合该类油藏的开发现状和水平井开采技术特点, 以辽河油区厚层稠油油藏为研究对象, 研究了直井和水平井组合的立体注采井网模式; 另外, 建立直井—水平井立体注采井网数值模型, 以提高采出程度和油气比作为对比指标, 研究了立体注采井网中各类井之间的关系及油藏宏观渗流规律, 并对注采井网进行了优化。

1 立体注采井网设计

1.1 立体注采井网模型的构建

为提高厚层稠油油藏蒸汽吞吐后期平面和纵向上剩余油控制水平, 并实现整体控制, 以辽河油区某厚层稠油油藏为例, 设计立体注采井网, 并通过热采数值模拟方法来实现。平面上沿蒸汽吞吐直井井排方向钻水平井, 纵向上布置双层水平井(图1)。相对直井蒸汽吞吐阶段, 立体注采井网中直井由蒸汽吞吐井转为连续生产井, 上部水平井注蒸汽, 下部水平井连续生产。模型中, 油藏的埋深

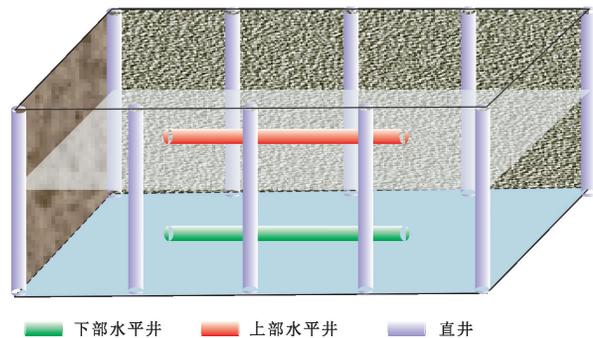


图1 直井—水平井立体注采井网示意

收稿日期: 2013-07-20。

作者简介: 孙璐, 女, 在读博士研究生, 从事油藏渗流机理、数值模拟及开发系统工程方面的研究。联系电话: (010)89732260, E-mail: sun-lustudent@126.com。

基金项目: 国家科技重大专项“裂缝—孔隙型碳酸盐岩稠油油藏渗流机理与数值模拟研究”(2011ZX05031-002-007HZ)。

为1 400~1 550 m,平均有效孔隙度为24.5%,平均渗透率为 $1\ 500\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,油层有效厚度为60 m,50 ℃地面脱气原油粘度为100~10 000 mPa·s,地面原油密度为0.998 g/cm³。油藏采用100 m井距正方形井网,原始地层压力为14.5 MPa,高轮次蒸汽吞吐后(平均17个周期)地层压力为4 MPa。

依据厚层稠油油藏情况,考虑模型的对称性,可取模拟区域尺寸为450 m×270 m×60 m,模型的网格数为53×23×30。油藏模拟过程中,选用STARS模拟器,首先对数值模型的动态进行拟合,得到油藏蒸汽吞吐后期的流体饱和度场、压力场、温度场分布规律;其次,在建立的蒸汽吞吐后期数值模型的基础上,开展立体注采井网与其他开采模式的对比,论证立体注采井网的有效性。

1.2 不同注采井网模式开发效果对比

利用油藏蒸汽吞吐后期数值模型,应用热采数值模拟方法,研究7种注采井网模式下的油藏开发效果。由不同注采井网模式下注蒸汽开发效果对比(表1)可知,在相同区域不同注采井网模式中,无论是蒸汽驱还是蒸汽吞吐,两直井井排—双水平井(立体注采井网)模式提高的采出程度均最高,蒸汽驱开发效果优于蒸汽吞吐。对比结果表明,厚层稠油油藏蒸汽吞吐后期采用立体注采井网进行油藏挖潜,不仅充分利用了原来的直井,解决了井网加密潜力小的问题,而且合理应用水平井,能够有效提高单井产能和储量动用程度。

井网模式	驱替方式	油气比	提高采出程度, %
两直井井排—双水平井	蒸汽驱	0.158	22.528
两直井井排—单水平井	蒸汽驱	0.176	16.730
两直井井排—加密直井	蒸汽驱	0.151	14.381
两直井井排—双水平井	蒸汽吞吐	0.829	3.324
两直井井排—单水平井	蒸汽吞吐	0.739	2.602
两直井井排—加密直井	蒸汽吞吐	0.732	3.006
两直井井排	蒸汽吞吐	0.744	2.183

根据数值模拟计算结果进行驱替效果预测,分析生产动态特征,认为蒸汽腔的动态变化决定着下部水平井与周围直井的见效动态,蒸汽腔外围是热水,内部是蒸汽,即存在由热水驱替和蒸汽驱替产生的2个油墙。在注蒸汽开采过程中,下部水平井的产量,一部分来自上部水平井及周围直井带来的油水下泄,另一部分来自下部水平井周围储层中储量的供给;在驱替过程中,由于周围直井及上部水平井向下部储层泄水泄油,为下部水平井生产提供

了产量。立体注采井网中直井由蒸汽吞吐井转为连续生产井,扩大了蒸汽的平面波及效率,下部水平井起到扩大垂向波及效率的作用,提高了储量动用程度。

2 立体注采井网系统的协调性

通过热采数值模拟方法,研究立体注采井网系统中3类井所发挥的作用以及相互之间的关系。采用立体注采井网,实验模式有3种:上部水平井定注汽量和直井定产液量、定注采比和定直井产液量、定注汽量和定注采比,分别研究了3种模式下的开发效果。

2.1 上部水平井定注汽量和直井定产液量

由10 a内定注汽量(400 t/d)与产液量(直井单井产液量为30 m³/d)时立体注采井网的开发效果(图2)可知:随着下部水平井排液量的增大,提高采出程度和油气比先增大后减小。当下部水平井排液量高于100 t/d后,提高采出程度和油气比逐渐减小。因为下部水平井排液量不同时,立体注采井网系统具有不同的注采比,当注采比偏大时,产液量过大造成地层压力偏低,地层能量不充足,引起产液能力下降;注采比偏小时,地层能量充足,易导致注入难度加大而出现停注现象。因此,下部水平井排液量控制为上部水平井注汽量的0.3~0.4倍,整体效果相对较好。

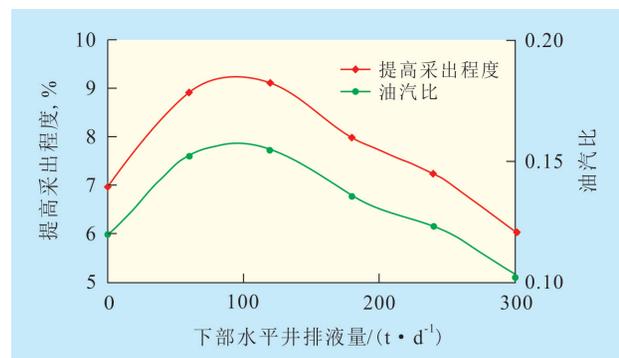


图2 定注汽量与产液量时立体注采井网的开发效果

2.2 定注采比和定直井产液量

由10 a内定注采比(0.95)与产液量(直井单井产液量为30 m³/d)时立体注采井网的开发效果(图3)可知:随着下部水平井排液量的增大,提高采出程度和油气比先不断增大;当下部水平井排液量大于40 t/d后,提高采出程度的增幅减小,油气比不断减小。随着注入时间的延长,地层中产生的蒸汽腔在平面和纵向上逐渐扩展,体积增大。上部水平井

注汽量越大,下部水平井排液量也越大。当下部水平井排液量偏大(明显大于直井单井产液量)时,将有利于蒸汽腔纵向扩展,但蒸汽腔平面上的扩展受到限制,影响了上部水平井注蒸汽的效率。

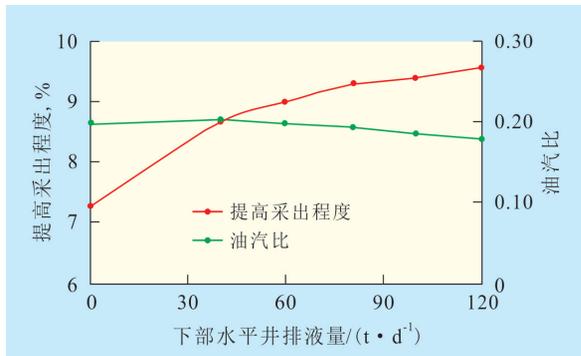


图3 定注采比与产液量时立体注采井网的开发效果

2.3 定注汽量和定注采比

由10 a内定注汽量(400 t/d)与注采比(0.95)时立体注采井网的开发效果(图4)可知:随着下部水平井排液量的增大,提高采出程度和油气比先增大;当下部水平井排液量大于45 t/d后,提高采出程度和油气比不断减小。直井产液与上部水平井注蒸汽时,下部水平井排液存在合理的排液速度。上部水平井注蒸汽产生蒸汽腔,下部水平井的排液速度需与蒸汽腔的泄油速度相匹配,使汽液界面恰好在直井周围和下部水平井上方才能保证蒸汽腔的形成和扩展,从而使洗油效率和热效率达到最高。

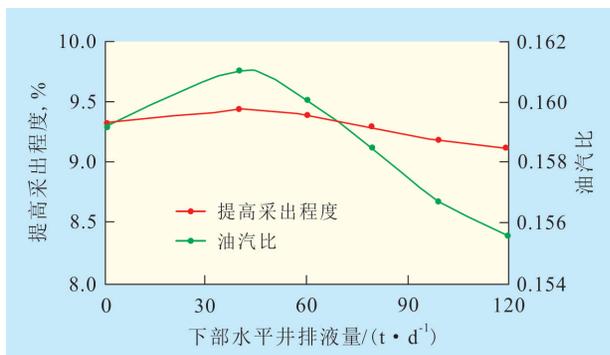


图4 定注汽量与注采比时立体注采井网的开发效果

3 立体注采井网优化

3.1 平面井距优化

平面上设计水平井与直井并排的距离为10, 20, 30, 40和50 m,定液量开采10 a,由不同水平井与直井并排距离生产时的开采效果(图5)可以看出,随着该距离的不断增大,提高采出程度和油气比不断升高。在相同的开采制度下,水平井与直井

井排井距相对较小时,压力梯度偏大,注入流体易沿压力梯度较大的一侧流动,导致井网波及体积偏小,故适合选择双水平井均匀分布在井排中间。

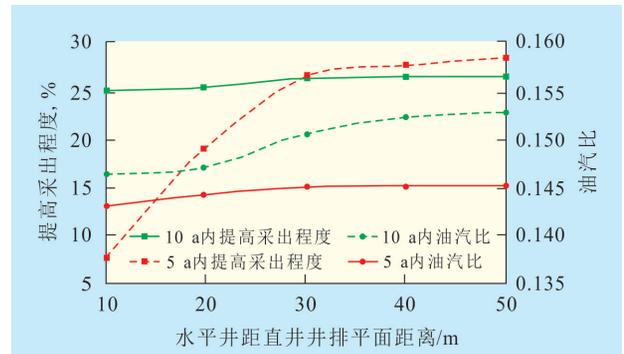


图5 不同水平井与直井并排距离时立体注采井网的开采效果

3.2 纵向井距优化

纵向上设计双水平井间的距离为5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40和45 m共9种方案(下部水平井与油层底部的距离为15 m),定液量开采10 a。

由不同双水平井间距离生产时提高采出程度和油气比的对比关系(图6)可以看出:双水平井纵向上井距为25 m时开采效果最好,井距继续增加,提高采出程度和油气比减小。从注蒸汽开采机理分析,由于纵向上动用范围有限,含油饱和度变化范围较小,实际布井须根据油藏特征及不同储层性质来确定。为了大幅提高纵向动用程度,推荐双水平井纵向井距为25 m。

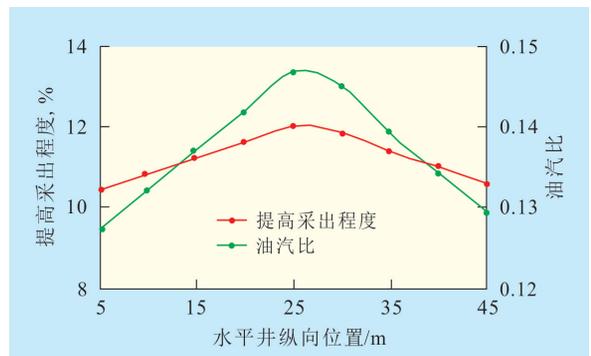


图6 不同双水平井间距离时立体注采井网的开采效果

3.3 水平段长度优化

设计水平井水平段的长度分别为100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450和500 m共9种方案,定液量开采10 a,由不同水平段长度生产时提高采出程度和油气比(图7)可以看出:随着水平段长度的增加,提高采出程度和油气比均增大,当水平段长度超过300 m后,提高采出程度和油气比增幅减小。因为对于砂岩稠油油藏,注蒸汽时在水平井跟

端会发生蒸汽的膨胀,热量主要集中在水平井跟端的200 m范围内。从渗流和开发的角度分析,推荐水平段长度为350~400 m。

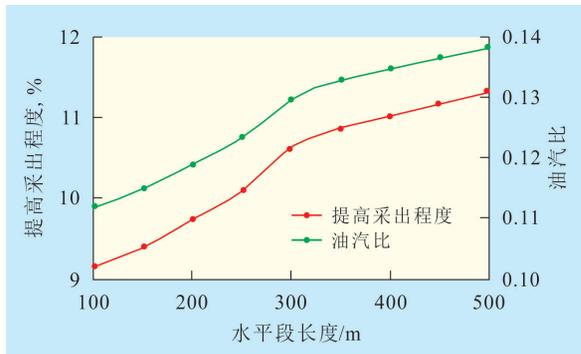


图7 不同水平段长度时立体注采井网的开采效果

4 应用效果

根据所建立体井网及优选结果,对辽河油区某区块开展蒸汽吞吐后期立体井网开发试验。从2009年10月4日转注,截至2010年12月底,试验取得了较好的开发效果:注汽量为247~480 t/d,产液量由152.8 t/d上升到445 t/d,产油量由31.0 t/d上升到96.5 t/d,瞬时油汽比为0.24,注采比为1.0~1.2;累积注汽量为 14.84×10^4 t,累积产油量为 2.60×10^4 t,油汽比为0.18,采出程度为2.4%,转蒸汽驱后生产井增油量明显。油汽比下降,是因为蒸汽驱比蒸汽吞吐措施耗汽量大,但绝对产量增大。

5 结束语

直井—水平井立体注采井网系统在厚层稠油油藏开发过程中,既能够发挥直井作用,降低投资风险,又可以充分动用剩余油。水平井采用蒸汽吞吐的预热方式,在形成蒸汽腔后,直井与下部水平井转为生产井,上部水平井转为注汽井。运用数值模拟方法对直井—水平井立体注采井网的主要设计参数进行了优化,结果表明,水平井与直井并排

的平面距离为50 m,双水平井间的距离为25 m,水平段长度为350~400 m时,开发效果较好。

立体注采井网中,上部水平井注汽和直井生产起决定作用,下部水平井通过排液发挥调节系统的作用,并使系统能够达到最优的生产状态。直井—水平井立体注采井网能够进一步提高厚层稠油油藏注蒸汽波及体积,提高油藏的采收率。

参考文献:

- [1] 王旭.辽河油区稠油开采技术及下步技术攻关方向[J].石油勘探与开发,2006,33(4):484-490.
- [2] 时贤,李兆敏,刘成文,等.稠油油藏多轮次蒸汽吞吐防砂后产能预测模型[J].油气地质与采收率,2012,19(4):56-58.
- [3] 王大为.稠油热采技术现状及发展趋势[J].西部探矿工程,2008,(12):129-131.
- [4] 李培武.提高厚层稠油油藏开发效果研究与实践[J].重庆科技学院学报:自然科学版,2011,13(1):67-69.
- [5] 龚姚进.厚层块状稠油油藏平面火驱技术研究与实践[J].特种油气藏,2012,19(3):58-62.
- [6] 任芳祥.深层巨厚稠油油藏立体井网蒸汽驱机理初探[J].特种油气藏,2011,18(6):61-65.
- [7] 丁一萍.低渗透稠油油藏水平井优化设计研究[J].天然气地球科学,2011,22(3):67-69.
- [8] 杨晓培.河南油区稠油油藏水平井开发技术[J].油气地质与采收率,2012,19(2):72-74.
- [9] 孟巍.超稠油油藏中直井与水平井组合SAGD技术优化地质设计[J].大庆石油学院学报,2006,30(2):44-47.
- [10] 刘永革,刘慧卿,庞占喜,等.底水稠油油藏双水平井泡沫压脊技术及参数优化[J].油气地质与采收率,2012,19(4):74-77.
- [11] 杜殿发.超稠油油藏水平井开发优化设计[J].大庆石油地质与开发,2009,28(6):96-99.
- [12] 孙建芳.氮气及降粘剂辅助水平井热采开发浅薄层超稠油油藏[J].油气地质与采收率,2012,19(2):47-49,53.
- [13] 郑小雄.直井—水平井组合SAGD开发超稠油油藏技术优化研究[C].北京:石油工业出版社,2011:230-237.
- [14] 杜殿发.超稠油油藏水平井产量的预测方法[J].油气地质与采收率,2009,16(5):76-79.
- [15] 王增林,张全胜.胜利油田水平井完井及采油配套技术[J].油气地质与采收率,2008,15(6):1-5.

编辑 武云云