

国内油田注水开发技术研究现状与展望

姜 垚, 马贵阳*

(辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘要: 分别从中高渗透油藏、低渗透油藏 2 大部分入手, 概述了近几年来国内油田注水开发的技术方案, 并对超前注水、周期注水等技术进行了总结分析, 为今后更加深入的进行油田注水开发提出了建议。

关键词: 注水开发; 中高渗透油藏; 低渗透油藏

中图分类号: TE341

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2014)12-0041-04

Current situation and prospect of oilfield water-injection technology in China

JIANG Yao, MA Gui-yang*

(College of Petroleum Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China)

Abstract: The oilfield water injection programs in China are introduced from the following two aspects: middle-high permeability reservoir and low-permeability reservoir. The advanced water injection, cyclic water injection, etc, are summarized. Some suggestions on the development of oilfield water-injection. are proposed in the end.

Key words: water-injection; middle-high permeability reservoir; low-permeability reservoir

油田注水开发, 即油藏的二次采油。国内注水始于 20 世纪 50 年代, 1954 年玉门老君庙油田^[1]在 L 层边部 MN27 井开始注水, 标志着国内油田注水技术进入实施阶段。国外油田对注水方面的研究比较早, 在中高渗透油田开发调整方法研究方面处于先进行列。目前, 世界油气田每天的注水量达数千万立方米, 而我国石油 80% 以上产量来自注水开发油田, 由此可见, 注水是油田采油的重要方式。本文中介绍了国内中高渗、低渗油田在注水开发方面的技术, 对油田注水开发近几年的发展进行了一个总结, 为进一步研究确立注水方案提供一定的参考。

1 中高渗透油藏注水开发

中高渗透率油田地层岩石渗透率较好, 原油开采难度相对较小, 采用注水的开发方式是可行的。随着注水开采的进行, 地层中原油的比例减小, 水的比例增加, 储层的物性也在变化。例如大港油田^[2]在长期注水开发后, 其中孔、中渗的官 104 断块储层物性普遍变差, 对该油田的进一步采油增加了难度。面对这种情况, 技术人员应该对该油田地层中剩余油的分布规律进行研究分析, 调整注水方式, 以提高采收效率。刘飞^[3]综合分析了中高渗油藏锦 16 兴(东)高含水期油水运动规律, 通过小层对比, 针对储层动用不均的井组, 重组注水层段 1 口(锦 2-3-325), 细分注水 4 口(锦 2-4-205, 锦 2-4-316、欢 2-

21-207、欢 2-20-207)。合理调整了纵向注采结构, 控制了强水淹层、高压层注水, 加强了低渗透层、弱水淹层注水, 注水吸水层数由 7 段增加到 15 段, 提高了水驱控制程度。

进入注水开发后期的油田, 剩余油分布十分零散, 平面上分流线 and 主流线的剩余油饱和度差别明显, 常规的周期注水对最佳参数难以把握。针对此类情况, 曾祥平等^[4]提出隔井脉冲注水提高采收率的新方法。该方案在隔井停注期间, 邻井提水, 在确保稳定地层能量的基础上, 调整流线分布以达到提高采收率的目的。并在孤岛油田南区渤 19 块试验 2 年, 取得了良好的降水增油效果, 阶段含水下降 1.3%, 累计增油 1.9 万 t, 水驱采收率提高 5.8%, 为全区展示了良好的应用前景。

另外, 针对老油田的注水开发还应及时跟进, 对其油藏进行精细描述, 李长胜^[5]对八面河面 1 区沙三上高含水期油藏进行精细描述, 并针对几种剩余油赋存模式制定了一套细分层开发的调整方案, 共部署新油水井 12 口, 其中油井 11 口(水平井 2 口), 水井 1 口。利用老井 16 口(油井 10 口, 水井 6 口), 可提高采收率 5%, 该实践的成功表明, 细分开发是提高特高含水期水驱采收率的有效手段, 也对类似的油藏开发具有较好的借鉴意义。

随着水的不断冲刷, 地层中也形成了许多大孔道^[6], 影响着油藏渗透率, 对其大孔道发育特征研

收稿日期: 2014-06-10; 修回日期: 2014-10-15

作者简介: 姜垚(1989-), 女, 硕士生; 马贵阳(1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事热工及流体数值计算以及燃烧方面的研究, guiyangma@163.com。

究和控制油田注水中也十分重要,因此中高渗透油藏的注水开发仍然存在着很大的空间,对其注水技术的改进仍然是相关专业人员的首要任务,不同的含水期采用不同的注采方式,才能将中高渗透油藏注水开发提高到一个新的高度。

2 低渗透油藏注水开发

随着国内勘探程度的逐步深入以及油层改造工艺技术的不断提高,在近几年探明的石油地质储量中,低渗透油层储量占 60% 以上。因此,开发低渗透油藏,对我国石油工业今后的持续稳定发展有着十分重要的意义。对于低渗、特低渗油田的划分,国内外尚无统一标准。李道品^[7]提出了在现有条件下低渗透油田分类的物性标准:第一类为一般低渗透油田,油层平均渗透率为 $10 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;第二类为特低渗透率油田,油层平均渗透率为 $1.0 \times 10^{-3} \sim 10.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;第三类为超低渗透率油田,油层平均渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。我国大部分低渗透油田底水不活跃,弹性能量小,投产压力大幅度下降,产量快速递减,因此需要采用注水^[8]保持压力平衡的方式进行开采。

2.1 一般低渗透油藏注水开发

低渗透油层以小微孔隙和细微细喉道为主,其原油边界厚度大,贾敏效应和表面分子力作用强烈,因此,其渗流规律不遵循达西定律,具有非达西型渗流特征。我国的低渗透油田分布也十分广泛,例如

东西沟油田、新民油田以及我国西部鄯善油田等都属于低渗透油田^[9-11]。

对于低渗透油田的注水开发,美国在 20 世纪 40—50 年代首先提出低渗透油藏注水开发的合理性,1955 年 Guthrie 等^[12]对 73 个完全水驱和部分水驱的砂岩油田的基础数据,利用多元回归分析法得到预测注水开发油田的水驱可采储量的经验公式。1871 年美国发现著名的勃莱德福油田,已有 100 多年历史^[11]。他们一般先利用溶解气驱能量和弹性能量开采,但油层产能递减较快,一次采收率低,只达到 8% ~ 15%。而进入低产期时转入注水开发,用注水保持能量后,二次采收率可提高到 25% ~ 30%。

我国的榆林等油田^[7]根据先前经验,在开发一个油田(区块)时,先打注水井,进行排液,然后在生产井投产时,注水井全面转注,进而达到同步注水采油。对于那些没有裂缝的低渗透砂岩油田,则在地层微破裂条件下注水,适当地提高注采比,来保持地层压力在原始压力附近。西安石油大学的姜晓波^[9]对东西沟油田长 2 油藏的正方形反九点法井网形式做出合理调整,调整后共有采油井 258 口,注水井 83 口,转注 32 口油井,将其采油速度提高了 0.5%,加大注采比至 1.004,增加水井配注量到 $5.199 \text{ m}^3/\text{d}$ 。目前来看,单井日产量仍然较低,预计应该提高单井日采油量至 0.23 t/d 。杨大刚^[13]通过对大庆油田萨中开发区低渗透砂岩储层萨零组油层进行研究,分析其水驱开发驱替剂的合理注入参

(上接第 40 页)

[18] 徐辉. 超高分子缔合聚合物溶液特性及驱油性能研究[J]. 石油与天然气化工, 2014, 43(1): 62-67.

[19] Jiang Weidong, Kang Xiaodong, Xie Kun, *et al.* Degree of the Association of Hydrophobically Associating Polymer and its Adaptability to the oil Reservoir[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2013, 32(4): 103-107.

[20] 杨化彪. 季铵型疏水缔合聚丙烯酰胺的合成及性质研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.

[21] Li Xianjie, Zhang Jian, Zheng Xiaoyu, *et al.* Sealing characteristics of compound system of cross-link polymer microspheres and association polymer[J]. Modern Chemical Industry, 2013, 33(8): 86-89.

[22] Li Ruyin, Tan Guorong, Zhang Jian. Different distribution behavior of hydrophobic associated polymer AP-P4 between oil-water-solid three-phase system and water-solid two-phase[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(3): 80-85.

[23] 宋志瑞. 四种新型驱油聚合物 ASP 体系基础性能对比[J]. 内蒙古石油化工, 2013, 23(23): 26-28.

[24] 李美蓉, 黄漫, 曲彩霞, 等. 剪切作用对功能聚合物微观结构性

能的影响研究[J]. 燃料化学学报, 2013, 41(4): 449-445.

[25] Wang Ye Fei, Liu Chen, Qi Zi Yuan, *et al.* Polymer flooding in high temperature and low permeability reservoir[J]. Oilfield Chemistry, 2013, 30(2): 202-206.

[26] 王历历, 旷曦域, 任强. 耐温抗盐驱油聚合物性能评价研究[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2013, 15(4): 70-73.

[27] Huff Juergen, Oetter Guenter, Kuehne Angelika, *et al.* Surfactant mixtures for tertiary oil recovery[C]. Engineering Village, 2013.

[28] Iwashita J, Hirayama T, Takagi I, *et al.* Characteristics of main chain decomposable STAR polymer for EUV resist[C]. Conference on Advances in Resist Materials and Processing Technology XXVIII, 2011: 79-72.

[29] Luo Wenli, Han Dong, Wei Li, *et al.* Synthesis and property evaluation of a salt- and alkali-resistant star-polymer[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(4): 477-482.

[30] Benyamin Yadali Jamaloei, Riyaz Kharrat, Farshid Torabi. A mechanistic analysis of viscous fingering in low-tension polymer flooding in heavy-oil reservoirs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011, 78(2): 228-232. ■

数,得出油层的开采井距应在 200 m 左右,净井距在 150 m 左右,达到了初期平均单井日产油 1.8 t,数值模拟预测试验区最终采收率在 15% 以上。该研究系统全面地对萨中开发区进行了认识,将数值模拟与可行性实验数据相结合,使得结论更加可行,具有一定的参考意义。孔繁征等^[14]对陕北低渗透砂岩小油田顺宁油田长 2 油藏进行了精细小层对比分析,采用“旋回对比,分级控制”的对比原则,将各井均进行了单井小层统一划分和横向对比,在油区进行注水开发 1 年。注采井组一线采油井陆续见效,日产油能力得到提高并维持稳定,为注水开发方案的编制和注采井网调整完善及注水调剂等提供详细的基础地质资料。

对异常高压和弹性能量大的低渗透油田,可利用天然能量开采,待地层压力降至静水柱压力或饱和压力附近时再开始注水。徐冬梅^[15]对于史南油田史深 100 区块开发中存在的注采井不完善、层间动用不均匀等主要问题进行了注采方案优化,发现高压注水对提高和改善低渗透油田的开发效果起到了至关重要的作用;开发中后期进行合理的井网加密也是切实可行的重要途径,在史 103 加密区加密后,建议史深 100 区逐渐加密井网,使得该油区开发效果全面得到改善。

2.2 特低渗透油藏注水开发

早期注水可以很好地保证地层压力的延续性,防止区块在开采过程中出现压力骤降,保持区块较长时期的高产稳产,从而缩短开采周期,提高采出率。国内现已在大庆、长庆^[16]、吉林、新疆等油田开展了超前注水^[17]的试验和实际实施,都取得良好的效果。

车起君等^[18]在安塞油田的不同开发区块运用超前注水技术进行现场试验,发现原始地层压力越高,地层物性越差,所需超前注水时间越长;油层物性越好,超前注水效果也越好。超前注水虽然取得了显著的成效,但如果在新区较大规模地运用,就需要先对地面注水系统进行建设,钻成的注水井或采油井不投产,在资金和产量紧张时,实际应用起来问题仍然较多。邓金宇等^[19]对新疆风城油田特低渗透油层研究区的地质模型进行了超前注水、同步注水、推退半年注水、推退 1 年注水和衰竭式开采的对比。结果表明,相同条件下,采用超前注水方式采出程度最高,采用衰竭式采出程度最低。因此,特低渗透油藏通过超前注水可以达到更好的开采效果。超前注水时间的提前程度不同,油井的见水时间也不同,姚慧

山^[20]通过对陕北某油田进行实验发现,超前注水能显著降低油量递减率,延长稳产期,逐渐提高油井产量。注水前期的 3~6 个月产量增长最快,从经济效益角度来看,超前注水的时间最好维持在注水前 3~6 个月。但从本实验中也发现,在油藏含水量高的储层采用超前注水的效果不明显。

周期注水也可在一定程度上提高特低渗透油藏的采收率。甘文军^[21]从腰英台特低渗透裂缝型油藏入手,对其进行周期注水,发现油层非均质性越严重,流体饱和度差别越大,周期注水效果越好。在腰西区块 DB34 井区选择水井 5-9、5-7、5-5 进行周期注水试验,对应油井含水量下降、产油量上升。该研究为该油田改善注水方式,进一步提高采收率提供了更好的理论依据。

对于中高含水期的特低渗透油田注水开发,我国相关技术人员在努力探索更加合理的开采方式。赵辉等^[22]针对长 6 油藏进入中高含水期后含水上升速度加快、油藏稳产难度加大的现状,进行现场实践,其效果显著。在水驱方面,28 口可对比井单井吸水厚度由 9.41 m 上升到 13.8 m,井组水驱指数由 1.68 上升到 1.85,存水率由 0.70 上升到 0.73,水驱状况明显好转。

2.3 超低渗透油藏注水开发

超低渗透油藏是比特低渗透油藏更难开采的油藏,对于超低渗透油田,超前注水也是其普遍采用的注水方式。朱胜利等^[23]在吴旗油田吴 410 区长 6 油藏进行试验,通过对超前注水规律的研究发现,吴 410 区长 6 油藏超前注水时机在 4~6 个月,超前注水量保持在 2 500~3 500 m³ 时,地层压力保持水平恢复至 100% 以上,油藏整体开发效果较好;该区不同区块生产状况说明油层物性越好,超前注水效果亦越好;油层物性相近时,超前注水时机越长效果越好,但开发实践表明,超前注水时机不宜超过 7 个月。

在我国,超低渗透油藏分布广,同样是油田产能建设的重要区域。樊成^[24]研究总结了长庆油田超低渗透油藏实现高效开发的配套系列技术,对该油田的超前注水技术——0.3 mD 类储层攻关注水开发技术政策开展了 2 种现场试验,根据该试验成果,形成了以菱形井网、小井距、小水量、长周期超前注水为主要的注水开发技术,对大规模开发超低渗透油藏具有重要的指导作用。路向伟等^[25]在胡尖山油田胡 154 区实施精细分层注水,通过补孔、精细注采调整和精细分层注水等措施,水驱控制程度由 90.2% 上升至 92.4%,油藏递减下降 3.8%,地层能

量提高 0.3 MPa, 油井单井产能提高 0.54 t, 水驱动用程度提高 4.1%, 改善了胡 154 区整体注水效果。

随着技术的更新, 相关技术人员也在积极探索新的途径, 项国英^[26]对胜利油田纯梁樊 144 块实施小井距注水, 共投注水井 4 口, 区块水井注水 1 个月后就见到注水效果, 区块已实现增油 2 000 t, 区块小井距实验见到了明显的增油效果。桥式偏心分注工艺^[27-29]在吴仓堡、塞 392、虎狼岭、五里湾等区块 104 口新增分注井得到大规模应用, 简化了偏心分注井调配测试工艺, 降低油井递减, 是油田长期稳产的主要技术之一。

3 结论

(1) 注水技术是油田开发中的基础技术, 已形成了一系列适应于不同油藏地质条件的注水工艺。随着老油田开发进入后期以及特种地质油田投入开发, 需要进一步提高注水工艺的适应性。对于特高含水期的油田, 单纯依靠注水很难进一步提高单井日产量, 须借助三次采油, 通过对水中加入化学剂, 表面活性剂等, 降低流体与原油之间界面性质、渗透率等性质, 进一步提高采收率。

(2) 大力开发采出水回注技术: 油田在生产开发过程中, 随着原油累积采出量增大, 一同采出的伴生水数量也越来越多, 依据油田生产、环境的要求, 开发适宜的技术将采出水深度处理和回用, 从而保障油田的可持续发展, 减少环境污染, 提高经济效益。

(3) 注水技术与计算机数值模拟技术相结合, 大力推广数值模拟在油田注水开发中的应用。注水开发采用新措施后, 要先建立数学模型, 论证该方法的可行性, 如有条件可在该地区进行小规模的前导性实验, 为后续大规模的实施积累经验, 以便更好地进行推广。

参考文献

- [1] 张玉荣, 闫建文, 杨海英, 等. 国内分层注水技术新进展及发展趋势[J]. 石油钻采工艺, 2011, (2): 102-107.
- [2] 陈聪, 陈容, 陈勇良, 等. 长期注水对大港油田中高渗透层物性的影响[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, (7): 125-126.
- [3] 刘飞. 中高渗透注水油藏开发后期挖潜对策[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013, (18): 156-157.
- [4] 曾祥平, 杨慧燕. 隔井脉冲注水技术在提高油田采收率的应用[J]. 石油勘探与开发, 2003, (6): 95-97.
- [5] 李长胜. 八面河面 1 区沙三上特高含水期油藏精细描述及剩余油分布研究[J]. 江汉石油科技, 2012, (2): 28-33.
- [6] 钟大康, 朱筱敏, 吴胜和, 等. 注水开发油藏高含水期大孔道发

- 育特征及控制因素—以胡状集油田胡 12 断块油藏为例[J]. 石油勘探与开发, 2007, (2): 207-211, 45.
- [7] 李道品. 低渗透油田开发概论[J]. 大庆石油地质与开发, 1997, (3): 36-40, 79.
- [8] Wei Linli, Wang Lijun. Study on advanced Water Injection Time in Low Permeability Reservoir[J]. Energy and Power Engineering, 2011, (3): 102-105.
- [9] 姜晓波. 东西沟油田长 2 油藏注水开发动态分析[D]. 西安: 西安石油大学, 2012.
- [10] 高军. 低渗透油田有效注水工艺技术研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2012.
- [11] 房育金. 善善油田低渗透油藏注水开发技术研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2011.
- [12] Guthrie R K, Greenberger M H. The use of multiple correlation analysis for interpreting petroleum engineering data[J]. Drill and Prod: API, 1985, 31(9): 130-137.
- [13] 杨大刚. 低渗透萨零组油层注水开发技术研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2008.
- [14] 孔繁征, 员克峰, 黄凯生. 小层对比在低渗透砂岩小油田注水开发中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2004, (4): 310-315.
- [15] 徐冬梅. 异常高压低渗透油藏注水优化分析—以史南油田史深 100 区块为例[J]. 断块油气田, 2012, (3): 332-335.
- [16] Wang Xiaolin, Wu Pingang, Han Yaping, et al. Current situation and measures of water injection in chang 8 layer, xifeng oilfield, changqing oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development Online, 2008, (3): 53-55.
- [17] 白瑞婷, 王波, 吴亮, 等. 超前注水技术在低渗透油田中的应用研究[J]. 石油化工应用, 2010, 29(1): 17-18.
- [18] 车起君, 雷均安, 冉玉霞, 等. 超前注水提高特低渗透油田开发效果[J]. 大庆石油地质与开发, 2003, (1): 20-22, 68.
- [19] 邓金宇, 郝波超, 吴宏山, 等. 新疆低渗透油田注水时机的研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013, (18): 51-54.
- [20] 姚慧山. 创新油田开发技术提高特低渗透油田开发效果分析[J]. 中国新技术新产品, 2012, (3): 118-122.
- [21] 甘文军. 腰台台特低渗透油藏改善注水开发效果实践与认识[J]. 石油地质与工程, 2013, (1): 59-61.
- [22] 赵辉, 沈焕文, 王碧涛, 等. 特低渗长 6 油藏中高含水期稳产技术对策研究[J]. 内蒙古石油化工, 2011, (7): 160-163.
- [23] 朱胜利, 王文刚, 毛建文, 等. 吴旗油田吴 410 区超低渗透油藏超前注水技术量化研究[J]. 石油化工应用, 2010, (10): 34-37.
- [24] 樊成. 长庆油田超低渗透油藏开发技术研究与应[J]. 石油化工应用, 2009, (2): 30-35.
- [25] 路向伟, 张翠萍, 李超, 等. 胡尖山油田胡 154 区精细分层注水效果分析[J]. 地下水, 2013, (2): 33-35.
- [26] 项国英. 樊 144 块小井距注水试验探索低渗透油田注水开发新途径[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, (3): 126-127.
- [27] Zhou Wang, Xie Zhaoyang, Li Jingshen, et al. The development and practice of separate layer oil production technology in Daqing Oilfield[R]. SPE 30813.
- [28] Pei Xiaohan, Yang Zhipeng, Ban Li, et al. History and actuality of separate layer oil production technologies in Daqing Oilfield[R]. SPE 100859.
- [29] Yang Ye, Zhang Shujin, Li Chongshu, et al. Case histories of production technologies water floodline in Daqing Oilfield[R]. Separate Gone TPTC 12512. ■