

周期性注入弱凝胶技术研究与应用

尹丽萍¹, 徐赋海¹, 马代鑫¹, 隋春艳¹, 姚寒梅², 姚燕梅²

(1. 中国石化胜利油田分公司东辛采油厂, 山东东营 257094; 2. 中国石化胜利油田分公司河口采油厂, 山东东营 257200)

摘 要:弱凝胶调驱是改善和提高注水波及效率的主要手段,但由于弱凝胶的强度较低,导致其有效期较短。为此,提出了周期性注入弱凝胶技术。采用岩心平面模型进行了非周期性注入弱凝胶调驱试验和周期性注入弱凝胶调驱试验,结果表明:非周期性注入弱凝胶调驱可以封堵高渗透层,提高注入压力,降低综合含水率,提高采收率;周期性注入弱凝胶调驱可以进一步改善弱凝胶的调驱效果,延长弱凝胶调驱的有效期,从而使采收率得到进一步提高。赵 108 断块采用周期性注入弱凝胶技术进行了两期调驱,注入弱凝胶期间和注入以后,注入压力上升,吸水剖面得到调整,油井含水下降,产油量上升。一期调驱有效期 1.0 a,二期调驱有效期 1.5 a,两期调驱共增油 20 500 t。

关键词:周期性注入 弱凝胶 剖面调整 提高采收率 实验室试验 赵 108 断块

中图分类号:TE357.46 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2011)04-0095-04

Research and Application of Periodic Injection of Weak Gel Technology

Yin Liping¹, Xu Fuhai¹, Ma Daixin¹, Sui Chunyan¹, Yao Hanmei², Yao Yanmei²

(1. Dongxin Production Plant, Shengli Oilfield Branch, Sinopec, Dongying, Shandong, 257094, China; 2. Hekou Production Plant, Shengli Oilfield Branch, Sinopec, Dongying, Shandong, 257200, China)

Abstract: Weak gel profile control is the main way to improve and enhance water flood sweep efficiency, but the low strength of weak gel will cause short period of validity. Therefore, periodic injection of weak gel was put forward. Using core plane model, the experiments of periodic and nonperiodic weak gel injection were conducted. The results showed that nonperiodic weak gel injection can block the high permeability zone, increase the injection pressure, lower the water cut, and enhance the recovery. Periodic injection can improve the profile control results, prolong the period of weak gel validity, and enhance the recovery further. Periodic injection was used in Fault Block Zhao 108, the injection pressure increased during and after gel injection. The intake water profile was adjusted. Field water cut reduced and oil production rate increased. The primary profile control was effective for one year; the secondary profile control lasted for one and half year. The incremental oil production was 20 500 tons.

Key words: cyclic injection; weak gel; profile control; enhanced oil recovery; laboratory testing; Fault Block Zhao 108

弱凝胶调驱技术指采用接近聚合物驱的溶液浓度,加入少量延缓交联剂,使之在地层内产生缓慢、轻度交联,在某种程度上可看作是将聚合物驱和调剖的有机结合^[1-2]。弱凝胶调驱技术已成为我国东部油田提高注水开发采收率的主要技术之一,并取得了很好的效果,但由于弱凝胶的强度不是很高,随着后续注水的进行,其调驱作用就会降低或丧失。为改善弱凝胶现场注入技术应用效果,降低开发成本,提高油田开发的经济效益,提出了周期性注入弱凝胶技术,并在岩心平面模型周期性注入弱凝胶调驱室内试验的基础上,进行了周期性注入弱凝胶调驱的现场应用。

1 试验材料和设备

主要试验材料:部分水解聚丙烯酰胺 HAPM (相对分子质量 1 700 万,水解度 27%),质量浓度 1 200~1 800 mg/L;自制的醋酸铬体系,质量浓度 1 800~2 500 mg/L;硫脲,质量浓度 200 mg/L。将以上材料用模拟地层水在 70 ℃下配制成弱凝胶,黏

收稿日期:2010-04-05;改回日期:2011-07-04。

作者简介:尹丽萍(1972—),女,新疆塔城人,1996年毕业于石油大学(华东)石油工程专业,工程师,主要从事采油工程方面的研究工作。

联系方式:(0546)8533490, yinlp314@163.com。

度为 500~5 000 mPa·s^[3]。

笔者采用岩心平面模型^[4]来模拟五点井网的注采关系。试验时采用了平面填砂模型流动装置(如图 1 所示),该装置主要由恒速泵、若干高压钢瓶、平面填砂模型、压力表以及若干个收集容器组成。

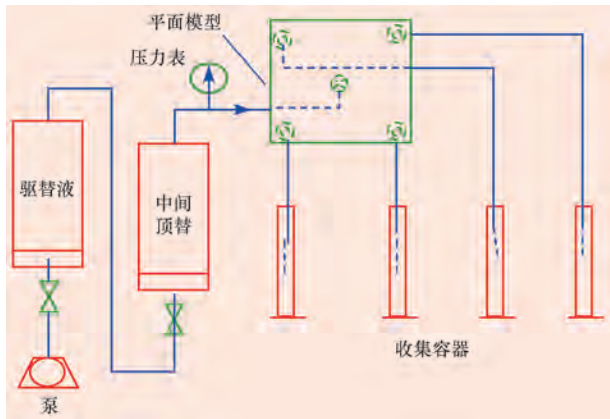


图 1 平面填砂模型流动装置

Fig. 1 The plane sandpack model to simulate the liquids flowing

平面填砂模型长 28 cm、宽 28 cm,有效砂体长 20 cm、宽 20 cm、填砂厚度 0.6 cm,平面填砂模型的 4 个角处分别设有 4 口生产井,平面中心处设有 1 口注入井,井眼直径均为 3 mm,注入井与采油井的距离均为 14.1 cm,整体为五点井网的注采关系。试验时平面填砂模型填入 40~120 目的石英砂,为分析油层平面非均质条件下弱凝胶的流动特性,将 4 口生产井分别编号为 1#、2#、3#和 4#,填砂过程中按顺序改变注入井与生产井连线上粗砂粒的比例,从而形成一定的平面非均质性。

2 非周期性弱凝胶调驱试验

2.1 试验步骤

- 1) 饱和水 以 50 L/h 的恒定流速向平面模型中注入模拟地层水,至压力恒定,记录流量和压力,计算填砂管的渗透率。
- 2) 建立束缚水饱和度 以 50 L/h 的恒定流速向填砂管中注入模拟油,至压力、流量稳定,计算填砂管的束缚水饱和度。

3) 水驱油 以 50 L/h 的恒定流速向填砂管中注入模拟地层水,每隔一定时间记录一次压力、产油量及产水量,水驱至产出液含水率达到 100%。

4) 注入弱凝胶 向填砂管中注入 0.3 倍孔隙体积的弱凝胶段塞,停注候凝 1 d。

5) 后续水驱 以 50 L/h 恒定流速再向填砂管中注入模拟地层水,定时记录压力、产水量和产油量,直至含水达到 100%。

2.2 试验结果分析

图 2 为注入弱凝胶前后采收率、含水率和注入压力变化曲线。从图 2 可以看出,注入弱凝胶后综合含水率下降,采收率上升,注入压力先上升后下降。这说明弱凝胶具有很好的封堵效果,能起到调驱作用。

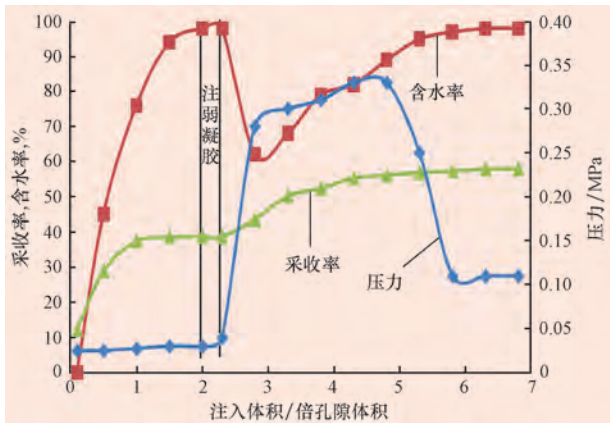


图 2 弱凝胶非周期性调驱采收率和含水率变化曲线

Fig. 2 Variation of water cut and recovery in nonperiodic injection of weak gels

表 1 为弱凝胶注入前后模拟生产井的产油、产水、含水和采收率对比情况。从表 1 可以看出,注入井和 1# 井之间的连通性较好,在注弱凝胶之前 1# 井的产水、产油量均为最大,该井是主产油井也是主产水井,而 4# 井基本上不产水也不产油。注入弱凝胶之后,模拟井 1#、2#、3#和 4# 井的原油采收率提高幅度分别为 11.3%、3.1%、2.5%和 1.7%。其中,4# 井的产液量显著提高,且原油采收率提高 1.7%。对比 4 口井可以看出,原来的高产井 1# 井在注弱凝胶之后增加的油量仍然最多。这说明,注

表 1 弱凝胶注入前后生产井产液情况对比

井号	注弱凝胶前水驱油			注弱凝胶后水驱油(3.5 倍孔隙体积)		
	产水/mL	产油/mL	采收率, %	产水/mL	产油/mL	采收率提高幅度, %
1#	130	30.0	23.0	136	14.7	11.3
2#	55	13.0	10.0	134	4.0	3.1
3#	85	7.5	5.8	100	3.3	2.5
4#	0	0	0	85	2.2	1.7

入井与 1# 井之间连通性较好, 存在高渗透带, 该高渗透带为主产层。弱凝胶进入后并没有将主产层堵死, 这是由于弱凝胶强度较弱, 在高压差下会向前移动, 既能起到调剖的作用又能起到驱替的作用, 因此 1# 井采收率的提高幅度最大。

3 周期性弱凝胶调驱试验

为了考察周期性注入弱凝胶的调驱效果, 笔者利用平面填砂模型流动装置进行了周期性注入弱凝胶调驱试验。

3.1 试验步骤

- 1) 向模型中注入模拟地层水, 当注入压力恒定时, 模型饱和模拟地层水。
- 2) 向模型中注入模拟油驱替模拟地层水, 当注入压力恒定时, 建立束缚水饱和度。
- 3) 向模型中注入模拟地层水驱替模拟油, 直至产出液含水达到 100%。
- 4) 向模型中注入 0.2 倍孔隙体积的弱凝胶段塞。
- 5) 继续注入模拟地层水, 直至产出液含水达到 100%。
- 6) 再向模型中注入 0.4 倍孔隙体积的弱凝胶段塞。
- 7) 继续注入模拟地层水, 直至产出液含水达到 100%。

3.2 试验结果分析

图 3 为周期性注入弱凝胶调驱采收率和含水率变化曲线。从图 3 可看出, 采用周期性注入弱凝胶调驱方式, 可明显改善弱凝胶调驱效果。对于中等非均质油层, 注入的第一个弱凝胶段塞优先进入阻力低、渗透率高的区域, 局部封堵高渗区, 提高高渗区的注水压力, 从而引导后续水驱液流向中低渗透率区, 提高水驱的波及效率, 有效提高水驱采收率^[5-7]。

在进行弱凝胶调驱时, 注入弱凝胶的条件和段塞尺寸将会对驱油效率产生很大影响。因为, 随着弱凝胶的注入, 注入压力升高, 待弱凝胶成胶后, 强度更大, 这势必增大注入难度和风险。但周期注入弱凝胶后, 经过中间水驱过程, 前段弱凝胶被水驱到更深的地层深部, 同时, 弱凝胶在地层中作用一段时间以后, 强度有所下降, 再接后续弱凝胶顶替, 注入压力也不会过高, 从而使施工更安全可靠, 并能降低弱凝胶对地层造成的伤害。此外, 前段弱凝胶、中间

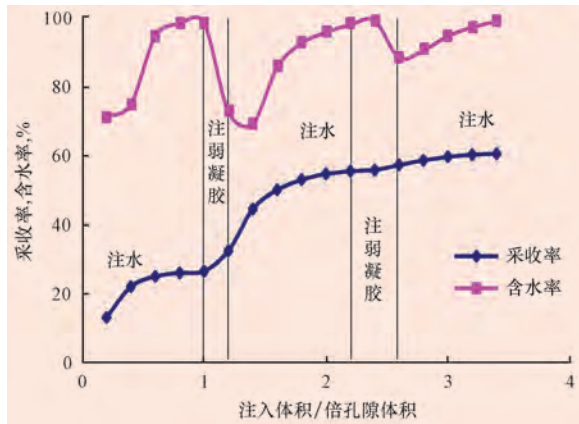


图 3 弱凝胶周期性调驱采收率和含水率变化曲线

Fig. 3 Variation of water cut and recovery with periodic injection of weak gels

水和后续弱凝胶组成一个有机整体, 可以更灵活、更长效地调整油藏的生产。

4 现场应用

赵 108 断块位于晋县凹陷赵县西塌陷背斜核部, 受两条北东向断层夹持, 是以构造控制为主的岩性构造油藏。主要含油层系为 E_{s2+3} , 埋深 1 622.8 ~ 1 796.0 m, 含油面积 1.4 km², 石油地质储量 261×10^4 t, 储层平均孔隙度 25%, 平均有效渗透率 $424 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。 E_{s2+3} 层在纵向发育 3 个油组, II 油组物性好, 横向分布稳定, I、III 油组物性较差, 横向上变化较大。该断块采用注水开发, 到开发后期产油量递减很快, 含水迅速上升, 层间矛盾突出, 水驱效率降低。为解决层间矛盾, 提高水驱效率, 该断块采用周期性注入弱凝胶技术进行调剖驱油。

4.1 一期弱凝胶调驱

设计弱凝胶用量时考虑到注入过程中, 弱凝胶经剪切、热解、地层吸附会有损失, 弱凝胶进入地层后形成的最佳活塞长度, 根据连通油井的孔隙体积, 弱凝胶的用量设计为水驱孔隙体积的 1.0% ($6\ 500 \text{ m}^3$)。赵 108 断块从 1999 年 11 月—2000 年 4 月将 $6\ 500 \text{ m}^3$ 弱凝胶全部注入地层, 在注入过程中及注入以后, 表现出以下效果:

1) 注入压力上升。注入过程中注入压力有所上升, 但由于各井组储层存在物性差异, 弱凝胶注入压力平均上升 2 MPa。完成注入量后, 候凝 5 d 恢复注水, 油压上升 0.2 ~ 9.0 MPa, 平均视吸水指数由 $13.5 \text{ m}^3 / (\text{d} \cdot \text{MPa})$ 降至 $5.1 \text{ m}^3 / (\text{d} \cdot \text{MPa})$ 。

2) 吸水剖面得到改善。通过整体调驱, 使原来

高渗透层的吸水能力得到调整,提高了中、低渗透层的吸水能力,扩大了注入水的波及面积。统计3口调驱井的吸水剖面,不吸水层由调驱前的34.1%降至调驱后的29.2%,吸水强度 $0.1\sim 1.0\text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ 的地层由调驱前的26.8%降至调驱后的14.3%,吸水强度 $1.1\sim 2.0\text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ 的地层由调驱前的25.2%升至调驱后的40.0%,吸水强度大于 $2.0\text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$ 的地层由调驱前的13.8%升至调驱后的16.5%。

3) 油井含水下降和产油量上升。整体调驱后,除3口井因地质状况较差未见效外,其余油井已见到调驱效果,见效率为76.9%。见效前后对比,赵108断块的日产液量由96.0 t升至141.8 t,日产油量由67.0 t升至102.5 t,采油速度由1.10%升至1.43%,综合含水由34.7%降至28.7%。

4) 油藏水驱特征得到改善。整体调驱后,控制了油藏含水上升率,扩大了油藏储量动用程度,保障了区块的稳产。根据水驱特征曲线求得,赵108断块可采储量增加 $7.8\times 10^4\text{ t}$,采收率提高3.0%,油藏存水率增加,水驱指数变好。与同期对比,存水率由79.8%提高至80.9%,水驱指数由0.23增至0.50;油藏自然递减率、综合递减率由1999年6月的5.69%降至0,含水上升率由19.6%降至—8.3%,采油速度由1.07%升至1.43%,使油藏开发形势得到进一步改善。

4.2 二期弱凝胶调驱

赵108断块从2001年1月开始二期弱凝胶调驱,至2001年4月注入弱凝胶8 800 m^3 ,完成二期弱凝胶注入。弱凝胶注入过程中注入压力平均上升2.4 MPa,注入后吸水剖面得到改善,油井综合含水下降,对应油井日产油量上升,油藏水驱特征得到了改善。

图4为赵108断块周期性弱凝胶调驱效果示意。从图4可以看出,通过两期弱凝胶调驱大大改善了油藏的水驱动态,一期有效期为1.0 a,二期有效期超过1.5 a。

5 结 论

1) 弱凝胶调驱能够改善油藏开发后期的注水效果,增加油井产量,提高油藏最终采收率。

2) 周期性注入弱凝胶可明显改善弱凝胶调驱效果。但对于有一定非均质性的油层,要先注入足量和足够强度的弱凝胶封堵高渗透率层。

3) 弱凝胶调驱的主要作用机理为:弱凝胶选择

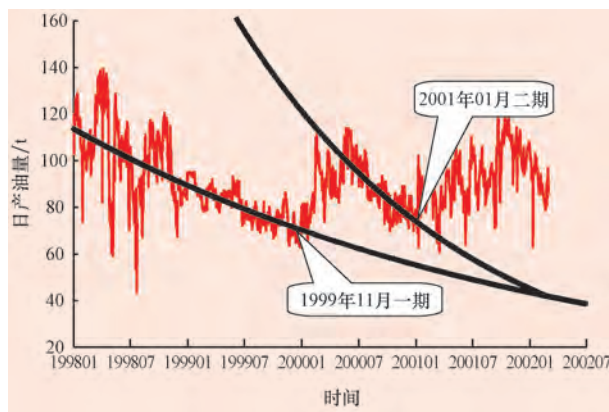


图4 赵108块两期弱凝胶调驱效果

Fig. 4 The profile control results at primary and secondary phases in Fault Block Zhao 108

进入原先被水占据的大孔道,沿大孔道蛇行,封堵大孔道,迫使后续液流改变流向,提高水驱波及体积。

4) 周期性注入弱凝胶调驱是解决高渗透、高油水黏度比油藏含水上升快、产量递减快等问题的重要方法。

参 考 文 献

- [1] 陈铁龙. 胶态分散凝胶在马21断块砂岩油藏调驱中的应用[J]. 油田化学, 2001, 18(2): 155-158.
Chen Tielong. Colloidal dispersion gel in use as permeability adjusting/oil displacing agent for sandstone reservoirs at Fault Block Ma-21[J]. Oilfield Chemistry, 2001, 18(2): 155-158.
- [2] 覃忠校, 张兴建, 彭绪勇, 等. 东辛油田弱凝胶调驱技术研究及应用[J]. 石油钻探技术, 2002, 30(6): 56-58.
Qin Zhongxiao, Zhang Xingjian, Peng Xuyong, et al. Study and application of gelinite profile controlling techniques in Dongxin Oil Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2002, 30(6): 56-58.
- [3] 赵秀娟, 陈铁龙, 王传军. 一种低温铬冻胶堵剂的研制[J]. 油田化学, 2001, 18(3): 225-227.
Zhao Xiujuan, Chen Tielong, Wang Chuanjun. Preparation of HPAM/Cr(III) gelling fluid for water control in low temperature reservoirs[J]. Oilfield Chemistry, 2001, 18(3): 225-227.
- [4] 李洪奎, 刘全稳, 王健, 等. 弱凝胶流动规律及其提高采收率机理新认识[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(4): 85-87.
Li Hongxi, Liu Quanwen, Wang Jian, et al. Flow regularity and new knowledge of enhancing recovery mechanism of weak gel[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2006, 13(4): 85-87.
- [5] Bryant S L, Rabaioli M R, Lockhar T T P. Influence of syneresis on permeability reduction by polymer gels[J]. SPE Production & Facilities, 1996, 11(4): 209-215.
- [6] Moradi-Araghi A, Doe P H. Stability of polyacrylamides in hard brines at elevated temperatures[R]. SPE 13033, 1984.
- [7] 潘伟义, 刘欢, 唐孝芬, 等. 应用多点测压法研究弱凝胶深部调剖性能[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(4): 83-85.
Pan Weiye, Liu Huan, Tang Xiaofen, et al. Research on profile control characteristics of weak gel by multi-spots pressure measurement[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(4): 83-85.