

油相微颗粒堵水技术研究与应用

马 剡, 杨 阳, 杨宗杰, 陈友梦

(中国石化 西北油田分公司 采油一厂, 新疆 轮台 841600)

摘要:塔河油田底水砂岩油藏以水平井开发为主,底水能量充足,非均质性强,底水易沿高渗段点状锥进水淹,导致大量剩余油无法采出。运用数值模拟结合生产测井得出底水易延高渗段突破。在此认识基础上结合前期堵水研究,创新性地将颗粒架桥封堵与分散相携带沟通的作业有机结合,并进一步优化堵水工艺,形成油相微颗粒堵水技术体系,并在现场实践中取得较好的效果。

关键词:底水砂岩油藏;水平井产出特征;油相微颗粒;堵水技术;塔河油田

中图分类号:TE35

文献标识码:A

Research and application of oil-based particle agent for water plugging

Ma Yan, Yang Yang, Yang Zongjie, Chen Youmeng

(No.1 Oil Production Plant, SINOPEC Northwest Company, Luntai, Xinjiang 841600, China)

Abstract: The bottom water sandstone reservoirs in the Tahe Oil Field are mainly developed by drilling horizontal wells. They have sufficient natural energy of bottom water and serious reservoir heterogeneity. Bottom water cones along high permeability zones, which makes it difficult for remaining oil recovery. Applying numerical simulation and production logging data, a conclusion was drawn that bottom water breakthrough from high permeability zones easily. Furthermore, based on earlier research, we combined particle bridging plugging with dispersed phase for the first time. Oil-based particle agents for water plugging were proposed. This technique was fairly effective in field application and worth promoting.

Key words: bottom water sandstone reservoir; production rule in horizontal well; oil-based particle agent; water plugging; Tahe Oil Field

1 油藏概况

塔河油田底水砂岩油藏主力层系为三叠系中、下油组。储层具有埋藏深(垂深 4 200~4 600 m),非均质性强,底水活跃(油水体积比 100 以上),地层水矿化度高(大于 21×10^3 mg/L),中孔(平均孔隙度 19%~27%),中高渗(渗透率为 $56 \times 10^{-3} \sim 899 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)等特点。鉴于水平井具有泄油面积大,生产压差小,能减缓水锥等有利条件,塔河油田底水砂岩油藏主力区块一区、二区、九区和 YT2 区块等均以为水平井开发为主,在开采初期取得了较好效果。随着油田开发的深入,层内矛盾日益突出,底水沿高渗段点状锥进,水平井含水率上升加剧,高含水低效水平井不断增多。目前砂岩主力区块水平井开井 113 口,日产油 650.4 t,平均含水 81.3%,其中高含水($f_w \geq 90\%$)水平井开井 35 口,占总开井数的 31%,而日产油占 9.5%,仅 61.7 t(平均单井日产油 1.8 t),高含水形势严峻。

2 水平井产出特征

水平井出水原因主要有地质因素、油水性质、井身结构、工作制度 4 个方面,其形成的主要出水类型表现为底水脊进。通过数模研究认为,非均质油藏水平井见水模式为:高渗突破,沿井扩展,次高突破,全井水淹^[1]。物模研究表明:由于油藏的非均质性,高渗段主出液,低渗透段剩余油丰富。

通过塔河油田底水砂岩油藏 13 口井 15 井次产液剖面测试研究表明:产液段比例小,最长的仅占水平段长度的 68.2%,而最短的仅有 24.5%;平均出液段占水平段的 34.5%,大部分井段未得到动用;同时产液段主要与高渗段相对应,占出液段的 71%,高渗段即为主要出水层段^[2]。

3 水平井前期堵水工艺

塔河油田底水砂岩油藏水平井主要采用筛管完井和射孔完井 2 种完井方式,前期水平井堵水以

表 1 2010–2013 年砂岩水平井机械及水泥堵水效果统计

Table 1 Effects of mechanical and cement water shutoff technologies in 2010–2013

类型	施工井次	有效井次	有效率/%	累增油/t	有效井有效期/d	平均单井增油/t
机械堵水	22	13	59.1	28 254	132	1 284.3
水泥堵水	10	3	30.0	4 240	87	424.0
小计	32	16	50.0	11 832	/	369.8

机械卡封和水泥挤注复射为主,但机械卡封无法精细地对多段高渗段实施封堵,水泥挤注复射只能封堵储层表皮,后期易水窜,且工艺难度大,费用高(表 1)。

4 油相微颗粒堵水技术

在前期堵水研究与实践的基础上,创新并应用了油相微颗粒堵水技术,针对塔河油田碎屑岩油藏孔喉分布,筛选出不同粒径颗粒,将微颗粒(超细碳酸钙)分散于油相中,形成油相微颗粒堵剂,封堵高渗段,调节产液剖面,同时中质油能改善近井含油饱和度,形成连续油相,发挥协同堵水作用。

4.1 油相微颗粒堵水机理

4.1.1 颗粒架桥封堵作用

通过地质研究发现,孔喉半径分布比较分散是造成渗透率非均质性的主要原因,不同的孔喉对应不同的渗透率,储层高渗段具有较大的孔喉半径,是水平井主要出水段。

利用“ $1/3 \sim 1/7$ 颗粒架桥原理”^[3],通过多套颗粒堵剂复配,可以形成不同粒径、不同固含量的固相颗粒体系,封堵高渗段出水孔道,从而改变封堵段孔隙性,降低渗透率级差,迫使底水绕行井周未动用的低渗段,实现控制底水脊进,从而提高底水波及体积,达到了提高采收率的目的。

4.1.2 分散相携带沟通作用

在乳状液堵水和水相微颗粒堵水技术的基础上,将水相微颗粒中的水相改为使用粘滞阻力高的塔河中质油(50 mPa·s)作为固相颗粒的悬浮液,利用注入原油与近井地带孔隙中的游离油滴和分散油相形成连续油相,降低孔隙中两相流的水相流度,提高孔隙中的含油饱和度,在相同生产压差下,使原油能够克服摩阻,流入井筒。通过 Stokes 公式计算:

$$V = \frac{2(\rho - \rho')gr^2}{9\eta}$$

式中: V 为粒子的沉降速度, ρ 为颗粒的密度, ρ' 为介质的密度, r 为颗粒的半径, η 为介质的粘度, g 为重力加速度。

计算微颗粒在中质油中的沉降速度小于水相中沉降的 114 倍,其具有较好的悬浮携带效果,有利于颗粒对水平井多出水段的封堵,且向地层注入中质油后部分原油通过孔喉与水混合剪切形成乳状液滴,起到了一定的孔喉物理封堵作用,并且部分中质油填充孔道后在水流孔道壁吸附,使壁面岩石由亲水转变为亲油,且使孔道缩小,阻碍水的流动。体系兼具产液剖面调节和流度调整作用达到协同堵水,对水平井多点出水具有较好的堵水适应性。

4.2 堵水工艺

4.2.1 堵剂优化

油相微颗粒堵剂由中质油和微颗粒组成,油相选用密度为 0.91 g/cm³、粘度在 140 mPa·s 内的中质油,微颗粒选择分选较好的超细碳酸钙,在堵水设计过程中根据孔道半径和绝对渗透率经验公式:

$$r = \left(\frac{8K\tau^2}{\phi} \right)^{\frac{1}{2}}$$

式中: r 为岩石孔道半径, K 为岩石绝对渗透率, ϕ 为孔隙度, τ 为迂曲度^[4]。

根据上式计算出塔河油田碎屑岩油藏孔喉半径分布范围为 20.2~36.8 μm (表 2)。

根据“ $1/3 \sim 1/7$ 颗粒架桥原理”^[2],封堵该孔喉所需粒径约在 5.8~24.5 μm ,考虑长期生产过程中液流冲刷可能导致孔喉扩大,选择 1000 目、600 目和 300 目的超细颗粒^[5](表 3)。通过多套粒径组合,保证对高渗大孔喉的封堵。并在段塞组合上使用由小到大的多段塞组合方式,达到架桥封堵孔渗性较好的通道。

4.2.2 用量设计

根据储层水平和垂直渗透率,堵剂用量采取椭球体概念模型计算:

$$V = \frac{4}{3}\pi Kabc\phi$$

式中: V 为堵剂用量, K 为吸液系数; a 为椭球

表 2 绝对渗透率和孔喉半径的关系

Table 2 Relationship between pore/throat radius and absolute permeability

层位	渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	孔隙度/%	孔喉半径/ μm	τ 迂曲度	1/3 孔喉/ μm	1/7 孔喉/ μm
T-III	5 245.5	26.3	36.8	2.91	24.5	10.5
T-III	809.3	21.9	20.2	3.54	13.4	5.8

表 3 不同超细颗粒粒径分布及封堵性能

Table 3 Diameter distribution and plugging capability for different particles

项目	配制固含量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	颗粒 D50/ μm	颗粒 D90/ μm	阻力系数	封堵率/%
1000 目超细碳酸钙颗粒	1 000	13	31	1.69	24.9
600 目超细碳酸钙颗粒	1 000	19	47	5.3	55.2
300 目超细碳酸钙颗粒	1 000	23	54	7.17	60.7

径向剖面的垂向深度, b 为椭球径向剖面的水平半径, c 为水平段吸液长度, ϕ 为有效孔隙度。其中, b 与 a 的比值是水平与垂向渗透率比。通过椭球公式计算出油相微颗粒堵剂堵水需使用的液体用量, 该类堵水技术仍需考虑固相微颗粒浓度的用量, 通过对前期水相微颗粒堵水的总结分析, 当水平井渗透率大于 200 mD 井段颗粒进入量大于 5 kg/m 以上时堵水有效率较高。因此堵剂中固相含量优化设计大于 5 kg/m 保证堵水有效率。

4.2.3 注入方式

该类堵剂不会发生稠化固结, 因此注入方式较灵活, 自喷井采用油管注入、机抽井采用不动管柱反注堵水, 有效降低了堵水的投入成本。

4.2.4 注入速度

通过室内填砂管实验显示: 低压低速注入有利于堵剂选择性进入。分析认为低压低速注入减少对低渗潜力段污染, 使潜力段的堵后采收率增值大幅度提高。且前期现场针对水平井产出剖面调整的堵水采用小排量 (200 L/min) 注入施工时成功率较高, 复合室内实验设计, 针对塔河底水砂岩水平井堵水宜选用小排量注入。

5 现场应用

TK1-9H 井位于油藏高部位, 油层厚度 25.9 m, 避水高度 18.1 m, 该井水平段趾端下方发育一套夹层, 对产出有一定影响, 跟、中端相对高渗是主要的采出段。前期经过 3 轮水相微颗粒堵水, 堵剂用量逐次增大, 但效果逐渐变差, 只分别增油 1 673, 226, 221 t, 至 2013 年 9 月日产液 71.2 t, 日产油 1.7 t, 含水 97.6%。

2013 年 9 月采用油相微颗粒堵水, 累计注入

1000 目油相微颗粒 100 m³ + 600 目油相微颗粒 80 m³ + 后置中质油 46.5 m³, 排量 100 L/min, 施工过程中爬坡压力明显。堵水后日产液 65 t, 日产油 14 t, 含水 78%, 日增油 12.3 t, 有效期 490 d, 累增油 4 574 t, 效果较前三轮堵水得到明显改善, 油相微颗粒对多轮次堵水具有更好的适应性。

2010-2014 年底水砂岩油藏水平井油相微颗粒堵水共实施 83 井次, 有效 59 井次, 有效率 71.1%, 累计增油 89 816 t, 平均单井增油 1 082 t, 平均单井费用仅 14 万元, 取得较好的增油效果和经济效益。

6 结论与认识

(1) 塔河油田底水砂岩为非均质油藏, 其水平井的产出受渗透率高低影响, 高渗透段为主出液段; 产剖测试显示水平井大部分井段未得到动用, 剩余油丰富, 堵水潜力大;

(2) 油相微颗粒堵水技术能够有效降低水平段非均质性, 调节产液剖面, 疏通油流通道, 在塔河油田取得较好的增油效果, 具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 徐燕东. 塔河油田底水油藏水平井见水特征[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(2): 167-169.
- [2] 甘振维. 塔河油田底水砂岩油藏水平井堵水提高采收率技术[J]. 断块油气田, 2010, 17(3): 372-375.
- [3] Velzen J F G, Leerooijer K. Impairment of a water injection well by suspended solids: Testing and prediction [A]. SPE23822, 1992.
- [4] 吕道平. 多孔介质中水力学迂曲度因子的求取与应用[J]. 新疆石油地质, 2000, 2(6): 515-517.
- [5] 李亮, 何龙. 碎屑岩水平井选择性堵水工艺及其适应性分析[J]. 长江大学学报, 2012, 9(6): 68-70.

(编辑 叶德燎)