

[引著格式] 吕伟, 杨欢, 王伟华, 等. 五里湾油田裂缝性水淹油井堵剂体系研究与应用 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2015, 37 (7+8): 44~48.

五里湾油田裂缝性水淹油井堵剂体系研究与应用

吕伟 (中石油长庆油田分公司油气工艺研究院, 陕西 西安 710018)

杨欢 (长江大学化学与环境工程学院, 湖北 荆州 434023)

王伟华, 曹瑛 (中石油长庆油田分公司第三采油厂, 宁夏 银川 750006)

[摘要] 五里湾油田三叠系油藏储层微裂缝发育, 具有明显的方向性, 容易造成油井水淹。针对裂缝性水淹油井的特点, 研制了以水膨体颗粒堵剂、油溶性树脂堵剂和高强度地下交联堵剂为主体的化学堵水体系。评价了堵水体现的吸水率、溶胀率、悬浮性、强度等性能。研究结果表明, 水膨体颗粒堵剂的粒径越小, 吸水率和溶胀率越大; 随着温度升高, 水膨体堵剂强度下降, 但在模拟油藏温度 60℃ 时强度仍能保留 50% 以上。油溶性树脂堵剂具有不被溶蚀、能油溶但油溶速率慢的性能。地下交联堵剂稳定性良好且具有很高的强度。通过填砂管模拟堵水性能试验, 得到堵剂成胶后填砂管渗透率较低, 封堵率均在 99.8% 以上, 封堵效果好。以柳 X 井为例, 根据不同体系堵剂的特性, 采用段塞式封堵方式, 措施前日产油为 0t, 措施后日产油为 4.01t, 截至 2015 年 5 月日产油 2.29t, 累计增油 695.72t。

[关键词] 低渗透油藏; 裂缝性储层; 水淹油井; 聚合物颗粒堵剂; 油溶性树脂堵剂; 地下交联堵剂

[中图分类号] TE358.3 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1000-9752 (2015) 07+08-0044-05

油井出水是油田注水开发过程中普遍存在的问题。由于地层原生及后生的非均质性、流体流度差异以及其他原因 (如酸化压裂排量过大、生产参数太大等) 在地层中形成水流优势通道导致水锥、水窜、水指进使一些油井过早见水或水淹水驱低效或无效循环。五里湾油田三叠系油藏是长庆油田第三采油厂的主力开发区块, 储层微裂缝发育, 且具有明显的方向性, 容易造成注入水沿微裂缝发育方向快速推进, 而使油井水淹。目前五里湾油田三叠系油藏已经进入中高含水期, 受储层微裂缝、高渗带、初期压裂规模较大、超前注水等综合因素影响, 水淹井数呈逐年上升趋势。

针对五里湾油田三叠系油藏裂缝性水淹油井的特点, 研制了以水膨体颗粒、油溶性树脂堵剂和高强度地下交联堵剂为主体的化学堵水体系。该体系针对裂缝性、低渗透且非均质性强、层间矛盾突出的油藏特点, 采用化学堵水工艺, 优化堵剂配方, 在油层深部对裂缝性出水孔道进行封堵, 利用堵剂的优良性能, 降低作业成本及风险, 达到了增油降水的目的。

1 试验部分

1.1 试验药品与仪器

1.1.1 试验药品

丙烯酰胺 (AM), 丙烯酸 (AA), N'N'-亚甲基双丙烯酰胺, 过硫酸铵 ($\text{NH}_4\text{S}_2\text{O}_8$), 部分水解聚丙烯酰胺 (HPAM, 相对分子质量 1000×10^4 , 水解度 20%), 十二烷基硫酸钠 (SDS) (均为分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 功能型抗盐单体、有机酸盐 (实验室自制); 石油树脂 (工业级, 中石油

[收稿日期] 2015-06-08

[基金项目] 国家科技重大专项 (2011ZX0503-004)。

[作者简介] 吕伟 (1976-), 男, 工程师, 现主要从事油气田增产与稳产技术研究及生产管理工作; 通信作者: 杨欢, yanghuan76@foxmail.com。

兰州炼化公司)。试验模拟水的离子组成及质量浓度如表 1 所示。

表 1 模拟水的离子组成及质量浓度

离子组成及质量浓度/(mg·L ⁻¹)						pH 值	水型	矿化度 /(mg·L ⁻¹)
Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻			
86.55	92.73	177.84	473.70	326.50	290.85	7.3	Na ₂ SO ₄	1448.17

1.1.2 试验仪器

53500 型激光粒度仪 (美国 Microtrac 公司); SHB-3 型循环水式真空泵 (予华仪器设备有限公司); 多功能岩心流动试验装置 (荆州现代石油科技发展公司); 堵剂强度测定装置 (实验室自制); DV-III⁺ 流变仪 (美国 Brookfield 公司)。

1.2 堵剂体系的制备

1.2.1 水膨体颗粒堵剂的制备

水膨体颗粒堵剂主要以丙烯酸、丙烯酰胺和功能型抗盐单体为原料,将它们按一定比例混合并溶于一定量的水中,搅拌均匀。在一定温度条件下反应 12h,得到胶状产品。将胶状产品制成颗粒状,颗粒粒径大小分 2 种: SPT-I 为 1~2mm, SPT-II 为 5~6mm,烘干,得到 2 种不同粒径大小的水膨体颗粒产品。

1.2.2 油溶性树脂堵剂的制备

油溶性树脂堵剂主要是以松香、石油树脂、有机酸盐、十二烷基硫酸钠等材料按一定比例混合,经过高温熔融、冷却、粉碎,分别过筛 60~100 目和 100~200 目,并将 2 种粒径范围的产品按一定比例级配,得到油溶性树脂堵剂产品。

1.2.3 地下交联堵剂的制备

将丙烯酰胺、丙烯酸、N'N'-亚甲基双丙烯酰胺和油溶性树脂,按一定比例混合后溶于一定量的水中,搅拌均匀,最后加入引发剂过硫酸铵。用泵车打入地层,利用地层的温度和压力,使化学剂在地层中反应并在油溶性树脂的支撑下形成高强度的封口堵剂。

1.3 试验方法

1.3.1 吸水率和溶胀率评价方法

采用吸水率和溶胀率指标来描述体膨型聚合物在水和聚合物溶液中的吸水和溶胀状况,吸水率和溶胀率的定义为:

$$\eta_M = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100\%$$

式中: η_M 为吸水率,%; M_1 为吸水前体膨型聚合物的质量, g; M_2 为吸水后体膨型聚合物的质量, g。

$$\eta_V = \frac{V_2}{V_1} \times 100\%$$

式中: η_V 为溶胀率,%; V_1 为吸水前体膨型聚合物的体积, mL; V_2 为吸水后体膨型聚合物的体积, mL。

1.3.2 油溶性树脂溶解性评价

称取 10g 油溶性树脂堵剂,倒入烧杯后加入 100mL 煤油,并进行搅拌,然后放置于 60℃ 恒温水浴中。24h 后,将烧杯取出,称取干燥滤纸质量 w_1 过滤,对滤出的油溶性树脂及滤纸进行干燥后称取其质量 w_2 , $w_2 - w_1$ 即得出油溶性树脂堵剂样品质量 w 。

$$\eta_o = \frac{10 - w}{10} \times 100\%$$

式中: η_o 为油溶率,%; w 为样品质量, g。

1.3.3 悬浮性评价方法

在 1000mL 烧杯中分别配制 500mL 不同浓度的聚丙烯酰胺溶液,在不断搅拌下分别加入不同量的

堵剂,搅拌均匀后倒入100mL具塞量筒中静置,记录悬浮稳定时间。

1.3.4 堵剂强度的测定

强度测定采用针入度法。自制堵剂强度测定装置,将测试钢针针尖放置在水膨体颗粒堵剂表面上,用放大镜观测。通过调整天平砝码,记录钢针突破压力,在该压力下记录5s时间内钢针进入堵剂的深度。重复3次试验,保证每个测试点之间与样品边缘的距离不应少于10mm。

1.3.5 物理模拟堵水评价方法

将五里湾油田长6油层组天然岩心粉碎后填入2个 $\varnothing 30\text{mm} \times 300\text{mm}$ 规格的填砂管(A管原始渗透率1000mD,B管原始渗透率100mD),并采用多功能岩心流动试验装置,同时测量高、低2种渗透率填砂管注入堵剂前后的进液分布情况,测定并记录注入压力和流量。试验温度 60°C 。

2 试验结果与讨论

2.1 水膨体颗粒堵剂性能评价

1) 溶胀性评价 吸水率和溶胀率评价结果见表2,可以看出水膨体颗粒在自来水中的吸水率和溶胀率均高于地层水,这是因为矿化度越大,吸水倍数下降越显著。颗粒大小对体膨型聚合物的吸水率和溶胀率也存在一定程度的影响。颗粒在相同质量的情况下,颗粒粒径越小与水的接触面积也就越大,吸水率和溶胀率越大。

表2 水膨体颗粒堵剂吸水率和溶胀率试验数据

样品	时间/h	吸水率/%		溶胀率/%	
		自来水	地层水	自来水	地层水
SPT-I	3	69.5	19.8	12.9	3.3
	6	80.2	24.8	15.1	4.2
	12	85.6	31.5	15.6	5.1
	24	85.6	35.3	16.5	5.8
SPT-II	3	85.2	37.8	17.2	5.5
	6	83.9	37.4	16.8	5.5
	12	79.4	35.2	15.2	5.4
	24	77.1	34.1	14.3	5.4

2) 抗压强度评价 水膨体堵剂强度受温度的影响是不能忽略的,因此将水膨体堵剂分别在20、40、 60°C 下养护并测试抗压强度,试验数据如表3所示。可以看出随着温度升高,水膨体堵剂强度下降, 20°C 时钢针突破压力0.78N,在模拟油藏温度 60°C 时强度仍能保留50%以上。

表3 水膨体堵剂抗压强度试验数据

不同温度下的钢针突破压力/N			不同温度下的针入度/0.1mm		
20 $^\circ\text{C}$	40 $^\circ\text{C}$	60 $^\circ\text{C}$	20 $^\circ\text{C}$	40 $^\circ\text{C}$	60 $^\circ\text{C}$
0.78	0.49	0.4	15	24	30

2.2 油溶性树脂堵剂性能评价

1) 油溶率评价 油溶性树脂堵剂酸溶、油溶评价性能数据及试验结果如表4所示。试验结果表明,油溶性树脂堵剂在土酸和煤油中不被溶蚀,且能油溶但油溶速率慢,也就是说具有暂堵酸

表4 油溶性树脂堵剂在土酸和煤油中的溶解率

溶剂	不同时间的溶解率/%			
	4h	8h	24h	168h
煤油	5.76	12.80	16.13	94.21
土酸	3.35	4.23	5.98	5.98

化的基本要求。油溶性树脂堵剂在煤油中初期的溶解率很低（24h 的溶解率仅为 16.13%），但 168h 溶解率很高（达到了 94.21%），因此进入地层的油溶性树脂堵剂对地层暂时性封堵并进行酸化施工，当措施完毕后与原油接触时可在较短时间内溶解，而失去堵塞作用，也不会对地层造成永久性损害。

2) 粒度分析 油溶性树脂堵剂的封堵效果应与其粒径大小分布有重要关系。对于刚性颗粒堵剂的粒径与地层孔道或裂缝平均孔喉径的最佳匹配关系是 2:3~1:1，而油溶性树脂堵剂属于柔性颗粒堵剂，对于柔性颗粒堵剂的粒径应略大于该值^[5,6]。根据三叠系油藏裂缝性地层孔径分布情况，平均孔径为 65.75 μm ，孔隙以中孔（直径 50~100 μm ）为主，故选择油溶性树脂堵剂粒径分布在 50~100 μm 之间较为适宜。用蒸馏水配制质量分数为 10% 的油溶性树脂溶液，通过激光粒度仪对油溶性树脂堵剂进行了粒度分析，结果如图 1 所示。结果表明粒径在 50~100 μm 的粒子占多数，平均粒径为 100.03 μm ，最大粒径为 200.0 μm 。

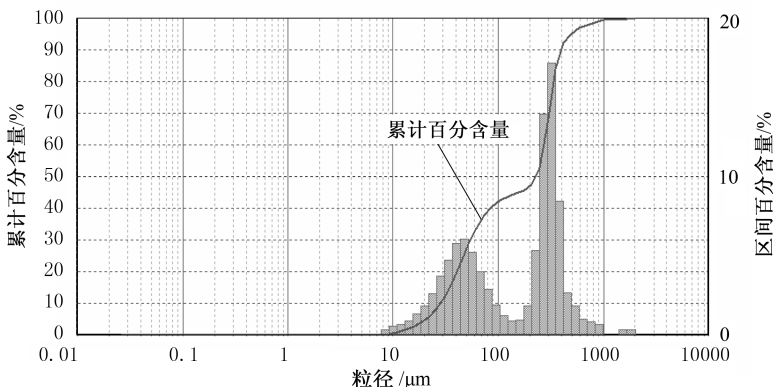


图 1 油溶性树脂堵剂粒度分析

2.3 地下交联堵剂性能评价

模拟油藏温度，将地下交联堵剂分别置于 50、60、70 $^{\circ}\text{C}$ 下养护并测试抗压强度，试验数据如表 5 所示。可以看出地下交联堵剂随着温度升高，钢针突破压力、针入度变化不明显，说明地下交联堵剂稳定性强且具有很高的强度。

表 5 地下交联堵剂抗压强度试验数据

不同温度下的钢针突破压力/N			不同温度下的针入度/0.1mm		
50 $^{\circ}\text{C}$	60 $^{\circ}\text{C}$	70 $^{\circ}\text{C}$	50 $^{\circ}\text{C}$	60 $^{\circ}\text{C}$	70 $^{\circ}\text{C}$
0.97	0.91	0.90	11	9	8.5

2.4 填砂管模拟堵水评价

将不同粒径的石英砂过筛混匀后充填填砂管，一边填一边用刮刀轻轻拍击填砂管，使砂充填压实均匀，充满后标记输入和输出端，加上堵头，称重，以水饱和，测定并计算堵前水相渗透率 K_0 ；将配制好的堵剂反向挤入填砂管中，70 $^{\circ}\text{C}$ 下恒温 48h，测定并计算堵后正向水相渗透率 K_1 及封堵率。试验结果如表 6 所示。堵剂成胶后填砂管渗透率较低，封堵率均在 99.8% 以上，封堵效果好。

表 6 岩心动态模拟试验数据表

岩心编号	K_0 /mD	K_1 /mD	封堵率/%	突破压力梯度/ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$)
1	1120	1.86	99.83	34.5
2	820	0.66	99.91	36.29
3	1010	1.16	99.88	37.3
4	850	0.78	99.91	35.4

3 现场试验及效果分析

从 2013 年 5 月至 2014 年 12 月在五里湾油藏区块共实施复合堵水工艺 20 井次，有效 17 井次，措施有效率为 85%；平均单井日增油 1.2t，截至 2015 年 5 月累计增油 3548.4t，措施效果良好。

柳X井2011年7月投产加密井,位于五里湾长6油藏压裂试验区与北部交界部位,初期产能3.40t,初期含水率64.9%,累计采油965t。措施前该井含水率100%。于2014年11月1日开始对该井长6层(封堵井段:1895.0~1900.0m)进行复合化学堵水,水淹井治理,恢复油井产能。

根据筛选不同体系堵剂的特性,采用段塞式封堵方式,首先采用强度不大、可动性强、成胶时间较长的聚合物凝胶,做堵水隔板,可注入至远井地层,然后打入强度较大、具有一定抗压强度,且刚柔相济的水膨体堵水剂,最后选用具有较好黏弹性、高强度的地下交联堵剂体系做封口剂。

第1段塞:聚合物悬浮液+水膨体颗粒堵剂 300m^3 。对地层中的裂缝体系和大孔道初步形成深部封堵,从而延长处理的有效期。

第2段塞:聚合物悬浮液+油溶性树脂堵剂 30m^3 。在后续流体的作用下,在油藏多孔介质中连续运移、分配,对裂缝性孔道进行更进一步的有效封堵。

第3段塞:地下交联堵剂 10m^3 。增加封口处的强度,实现封口,并进一步确保对后续酸液的有效隔离。

第4段塞:顶替液(活性水) 30m^3 。避开压力陡降的漏斗区域,延长堵剂有效期。

从柳X井堵水措施效果(表7),可以看出措施前日产油为0t,措施后日产油为4.01t,截至2015年5月日产油2.29t,累计增油695.72t。

表7 柳X井堵水措施效果统计表

措施前(2014年10月)			措施后(2014年12月)			目前(2015年5月)			累计 增油/t
日产液/ m^3	日产油/t	含水率/%	日产液/ m^3	日产油/t	含水率/%	日产液/ m^3	日产油/t	含水率/%	
7.82	0.00	100.0	16.11	4.01	70.70	11.47	2.29	76.5	695.72

4 结论

1) 针对裂缝性水淹油井的特点,研制了以水膨体颗粒堵剂、油溶性树脂堵剂和高强度地下交联堵剂为主体的化学堵水体系。

2) 水膨体颗粒堵剂制备了2种粒径尺寸的堵剂(1~2mm和5~6mm),颗粒粒径越小,吸水率和溶胀率越大。水膨体堵剂强度受温度的影响明显,在 60°C 时强度仅能达到 20°C 时的50%左右。

3) 油溶性树脂堵剂初期的溶解率很低(5.76%),最终的溶解率很高(99.65%),具有能油溶但油溶速率慢的性能。

4) 地下交联堵剂随着温度升高,水膨体堵剂强度变化不明显,且稳定性强。

5) 根据筛选不同体系堵剂的特性,采用段塞式封堵施工工艺,从2013年5月至2014年12月在五里湾油藏区块共实施20井次,有效17井次,措施有效率为85%,平均单井日增油1.2t,截至2015年5月累计增油3548.4t,措施效果良好。

[参考文献]

- [1] 王斌,张国萍,许建华,等.高含水油井堵水用复合颗粒堵剂[J].油田化学,2002,19(3):230~232.
- [2] 展金城,李春涛.高含水期堵水调剖工艺技术探讨[J].胜利油田职工大学学报,2007,21(1):37~39.
- [3] 梁兵,代华,张熙,等.高强度复合凝胶选堵剂CY-98结构与性能研究[J].油田化学,2001,18(1):28~31.
- [4] 刘露,李华斌,霍隆军.一种钛酸盐晶体调堵新技术的研究[J].科学技术与工程,2015,13(4):74~77.
- [5] 杨怀国,刘法杰,王燕娜,等.油井化学堵水工艺技术新进展[J].油气田地面工程,2009,28(5):29~33.
- [6] 由庆,赵福麟,王业飞,等.油井深部堵水技术的研究与应用[J].钻采工艺,2007,30(2):85~87.
- [7] 王天慧,贾云林,吕国胜,等.QHD32-6油田油井堵剂用量的确定[J].石油化工高等学校学报,2015,28(2):58~61.
- [8] 崔思华,张遂安,管保山.耐温耐盐聚合物堵剂的制备及性能研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2012,34(4):147~153.