

◀ 试井与开采 ▶

# 用油田回注污水配制水基压裂液的研究与应用

王满学<sup>1</sup> 王 奎<sup>2</sup> 刘雪锋<sup>2</sup> 张建利<sup>3</sup>

(1. 西安石油大学化学化工学院,陕西西安 710065;2. 陕西延长油矿管理局延川钻采公司,陕西延安 681132;3. 吐哈油田分公司钻采院,新疆鄯善 838200)

**摘要:** 为了解决陕北油田压裂施工用水短缺的问题,研究应用油田回注污水配制水基压裂液。在分析陕北油田回注污水水质的基础上,进行了回注污水pH值对压裂液性能的影响试验、回注污水与压裂液添加剂的配伍性试验及用回注污水所配制压裂液性能的评价试验。试验结果表明:回注污水与压裂液添加剂配伍性较好;用回注污水配制压裂液时,回注污水的pH值应为7~8,稠化剂加量不小于0.5%,稠化剂与水混合时间不小于20 min;用回注污水配制压裂液的使用最佳时间在配制好后8 h以内,回注污水压裂液与清水压裂液相比除破胶快外,其余性能指标基本相当。陕北油田应用油田回注污水配制的压裂液进行了20余井次的压裂施工,施工效果表明,该压裂液能满足陕北油田低洼地层对压裂液性能的要求。

**关键词:** 污水; 水基压裂液; 滤失; 陕北油田

**中图分类号:** TE357.1<sup>+2</sup>   **文献标识码:** B   **文章编号:** 1001-0890(2006)06-0067-04

目前陕北油田压裂施工存在的问题主要有两个方面:一方面是压裂施工用水紧张,尤其是进入冬夏季,水源短缺的矛盾更显突出;另一方面是原油脱出的污水被大量排放,不但污染了环境,而且影响了油田的生产。为了解决压裂施工用水不足,保护生态环境,维持油田的可持续发展,西安石油大学与延长油矿管理局合作,开展了用油田回注污水配制水基压裂液的研究。

## 1 室内试验

### 1.1 仪器和原料

Rv30 Haake旋转粘度计、四孔恒温水浴、高温高压滤失仪;增稠剂羟丙基胍胶粉、过硫酸铵(CP)、助排剂CF-1、破乳剂SP-169、粘土稳定剂COP-1、杀菌剂S-1、油田回注污水。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 回注污水与压裂液各种添加剂的配伍性试验

常温下,在盛有回注污水的烧杯中,分别加入一定量的增稠剂、破乳剂、助排剂、粘土稳定剂、pH值调节剂,搅拌5 min后分别观察其与回注污水的相溶性情况。然后测试其在清水和回注污水中的增稠、破乳、助排和防膨等效果。

#### 1.3.2 压裂液的配制

在一定量的回注污水中按比例加入增稠剂、破乳剂、助排剂、粘土稳定剂、pH值调节剂等,搅拌5 min后,按交联比100:2~5的比例加入交联剂和不

同加量的破胶剂,再搅拌1~2 min后即可形成水基冻胶压裂液,然后测定各种性能。

#### 1.3.3 破胶剂破胶性能的测定

将配制好的压裂液装入瓶中密封,置于35℃的恒温水浴中,观察其静态破胶情况。用乌氏毛细管粘度计测定压裂液在不同时间的粘度,当胶液粘度小于5 mPa·s时认为破胶。

#### 1.3.4 压裂液性能的测定

按照SY/T5107—2005“水基压裂液性能评价推荐做法”的有关规定,对压裂液剪切性能进行评价。

## 2 用污水配制压裂液的可行性研究

### 2.1 不同水源的水质分析

水是制备水基压裂液的主要组分,水质在一定程度上影响水基压裂液的性能。由于油田回注污水组分复杂,性质特殊,因而用油田回注污水配制压裂液有其特殊性。表1、2列出了不同水源的淡水和油田回注污水的组分、pH值、矿化度、水型等数据。

由表1可看出,不同水源的水质不同。陕北地表淡水中阳离子主要以Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>为主,阴离子以

收稿日期: 2006-04-04

作者简介: 王满学(1965—),男,1991年毕业于西北工业大学,高级实验师。

联系电话: (029) 88383643

$\text{SO}_4^{2-}$  具多, 属于  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  水型, 并且水的矿化度也比较低, 显中性。然而在地层水中, 阳离子以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  为主, 阴离子以  $\text{Cl}^-$  为主, 属于  $\text{CaCl}_2$  水型, 其矿化度、悬浮物和细菌等指标都较淡水高, 偏酸性。

表 1 不同水源的水质分析数据

水样	离子质量浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$						矿化度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	水型	pH 值
	$\text{K}^+ + \text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{CO}_3^{2-}$			
淡水 1	7 601.20	405.22	49.8	580	5 545.0	163.70	1 278.0	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	6.7
淡水 2	7 893.10	678.2	74.7	948	4 147.0	62.03	23 810.0	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	7.0
方 26 井	15 437.00	10 720.1	329.9	23 840	2 838.3	0	43 914.3	$\text{CaCl}_2$	6.9
方 79 井	14 828.00	18 930.8	480.0	26 764	879.0	0	45 064.7	$\text{CaCl}_2$	7.3

表 2 油田回注污水的数据

水类	清水	污水	回注污水 <sup>①</sup>	注入水标准
pH 值	6.8	7.3	8.4	7.0~8.0
含油量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0	100	3.33	$\leq 5.00$
悬浮物/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	19.0	46.3	4.5	微量
TGB /个· $\text{mL}^{-1}$	22	100	0	$10^2$
SRB /个· $\text{mL}^{-1}$	12	10	0	$10^2$
铁细菌/个· $\text{mL}^{-1}$	0	0	0	$10^2$
含硫/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.50	0.80	0.25	$\leq 0.30$
颗粒直径/ $\mu\text{m}$	0.32	10.00	0.35	$\leq 0.50$
透光度, %	98.0	71.0	98.3	

注: ①为油田污水进行了处理。

由表 2 可看出, 污水与淡水比较虽然具有含油量高、有机物含量高、pH 值变化大、悬浮物高、矿化度高、存在大量的铁细菌、硫酸盐还原菌及腐生菌等特点, 但这种高矿化度的污水不但能与地层水配伍性好, 而且能防止粘土膨胀<sup>[1-2]</sup>, 经过物理和化学方法处理后的回注污水达到了注水工艺对水质的要求。由此可见, 用处理后的污水配制压裂液较清水更加有益于对储层的保护。

## 2.2 pH 值对稠化剂增稠能力的影响

回注污水 pH 值的大小影响到稠化剂在水中的增稠效果和压裂液的性能。油井采出水的水质受油井开采时间和各种增产措施的影响(如酸化和压裂), 回注污水的 pH 值随之变化很大。表 3 为不同 pH 值的水对稠化剂增稠能力以及原胶液稳定性影响的试验结果。

表 3 压裂液稠化剂在不同 pH 值水中的溶解情况

水样	pH 值	在 10 min 内的粘度/ $\text{mPa} \cdot \text{s}$			在 35 °C 下静置 6 h 粘度/ $\text{mPa} \cdot \text{s}$
		0.35% <sup>①</sup>	0.40% <sup>①</sup>	0.50% <sup>①</sup>	
清水	6.8	39	51	70	83
	8.5	30	48	68	
污水	6.1	33	40	55	65
	8.2	22	36	40	

注: ①稠化剂的质量分数。

由表 3 可以看出, 在稠化剂质量分数一定时, 增稠剂在低 pH 值水中的增稠效果明显好于在高 pH 值水中的增稠效果。但是用低 pH 值水配成压裂液的抗

剪切性能和储存性较差。在温度为 35 °C、pH 值小于 7 时, 用淡水配制的原胶液粘度可维持 48 h 以上不变化, 而用污水配制的原胶液粘度, 当放置时间大于 8 h 后其粘度开始由 65 mPa · s 急剧降至 12 mPa · s。配制压裂液时, 回注污水的 pH 值维持在 7~8 为宜。配好的原胶液的最佳使用时间是在配液后 8 h 以内。

另外, 稠化剂在清水中的增粘程度明显高于在回注污水中的增粘程度, 用回注污水配制压裂液, 要维持原胶液的粘度在 50 mPa · s 左右时, 稠化剂加量应大于 0.5%, 而用清水稠化剂加量只要 0.4% 就能满足原胶液粘度要求。这是由回注污水的特殊性引起的。由此可见, 用回注污水配制压裂液时, 增稠剂的加量较用清水配制压裂液时大。

## 2.3 回注污水与压裂添加剂的配伍性

回注污水与压裂液各种添加剂是否配伍影响到压裂液的质量和压裂效果。回注污水虽然能达到注入水要求, 但因回注污水本身的特殊性, 用回注污水配制压裂液时, 必须考察它与压裂液各种添加剂的配伍性。表 4 为压裂液的各种添加剂与回注污水的配伍性试验结果。

表 4 回注污水对压裂液添加剂性能的影响

指标	稠化剂 CLP-1	粘土稳定剂 COP-1	破乳剂 SP-169	助排挤 CF-5C	杀菌剂 S-1
外观	大约存在 5% 的沉淀	透亮不分层	透亮不分层	透亮不分层	透亮不分层
效能 <sup>①</sup> , %	80	98	95	96	86

注: ①以各种添加剂在清水中测试数据为基准, 回注污水中测试值与清水中测值之比表示其在回注污水中的效能。

由表 4 可看出, 将各种添加剂加入到回注污水中, 大部分能较均匀地分散, 静止 24 h 后溶液清亮, 没有沉淀和分层现象, 说明压裂液添加剂与回注污水配伍性基本良好; 从各种添加剂在回注污水中的使用效能看: 除了稠化剂在回注污水中增稠能力降低了 20%, 杀菌效果降低了 14% 外, 其它各种添加剂性

能基本保持在 95% 以上。另外用回注污水配原胶液搅拌时间较清水长, 一般要 20 min 才可彻底分散溶胀。原因在于回注污水矿化度高和存在一定量憎水基分子(如原油)包裹了少量稠化剂, 降低了其在水中分散溶解的速度。现场用回注污水配制原胶液时必须充分搅拌来尽可能消除稠化剂在回注污水中溶解不完全的问题。另外杀菌剂在回注污水中的杀菌效果降低, 配制好的原胶液不宜久存, 以防腐败变质。

### 3 回注污水压裂液的性能

#### 3.1 抗剪性能

按照试验方法配制压裂液, 按压裂液的评价方法对用清水和回注水配制的压裂液进行抗剪切评价试验。结果见图 1。压裂液的配方: 稠化剂 + 0.2% 粘土稳定剂 + 0.2% 破乳剂 + 0.2% 助排剂 + 0.05% 破胶剂, 其中在清水中稠化剂加量为 0.4%, 回注污水中稠化剂加量为 0.5%。

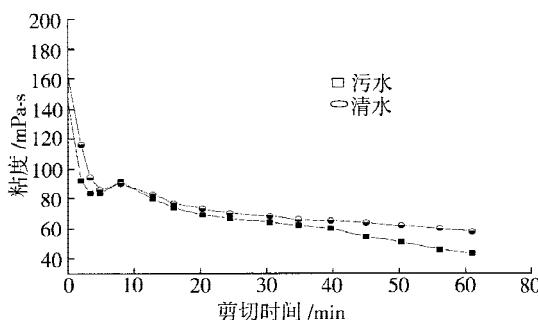


图 1 压裂液的抗剪切性能

由图 1 可看出, 采用清水和回注污水配制的压裂液在 40 °C、170 s<sup>-1</sup>下连续剪切, 在 40 min 前, 两种压裂液的粘度相差不大, 但是当剪切时间大于 40 min 时, 回注污水配制的压裂液的粘度随剪切时间的延长, 其下降速度明显大于采用清水配制的压裂液。当连续剪切 60 min 时, 采用清水配制的压裂液粘度约为 60 mPa·s, 而回注污水配制的压裂液粘度降为 45 mPa·s, 较清水下降了 15 mPa·s。这可能是由于回注污水特殊的性质所决定。在实际施工时, 应根据压裂规模、携砂比和井深情况, 适当调整破胶剂在压裂液中的加量, 以满足施工对压裂液粘度的要求。

#### 3.2 破胶性及残渣

按试验方法在恒温水浴中静态考察压裂液的破胶性能, 具体方法是用毛细管粘度计测定压裂液在不同时间下的粘度, 结果见表 5。

由表 5 可看出, 在同一温度下, 当压裂液配方一定时, 用清水配制的压裂液较回注污水配制的压裂液耐剪切, 破胶时间也长, 但是, 两种压裂液的破胶液

表 5 压裂液的破胶性能及残渣

压裂液类型	温度 / °C	剪切 60 min 后粘度 / mPa·s	破胶时间 / h	残液粘度 / mPa·s	残渣含量 / mg · L <sup>-1</sup>
清水压裂液	30	78	5	5.9	916
污水压裂液	30	62	3	4.6	908

注: 清水压裂液配方为 0.3% 增稠剂 + 0.05% 过硫酸铵; 回注污水压裂液配方为 0.4% 增稠剂 + 0.045% 过硫酸铵。

残渣含量相当。这说明用回注污水配制压裂液不会产生多余的残渣。

#### 3.3 滤失性和伤害性

对回注污水压裂液与清水压裂液的滤失性和对岩心的伤害率进行了测定, 结果见表 6。

表 6 40 °C 时压裂液的滤失性能

压裂液类型	破胶剂加量, %	滤失系数 / 10 <sup>-3</sup> m/min <sup>1/2</sup>	岩心渗透率的恢复率, %
清水压裂液	0.04	1.00	83
	0.06	0.89	
回注污水压裂液	0.03	1.37	85
	0.05	1.05	

由表 6 可看出, 在相同条件下, 回注污水压裂液的滤失系数和对岩心的伤害与清水压裂液基本相当。

### 4 现场应用

在 2003—2004 年期间, 陕北油田采用回注污水配制的压裂液对 20 口井进行了压裂作业, 施工工艺与常规水基压裂相同, 但为了确保压裂质量, 用回注污水配制压裂液必须做到: 1) 检查回注污水的酸碱性, 保证回注污水的 pH 值一定要大于 7, 否则会出现压裂液成胶速度减慢、抗剪切效果差, 原胶液易腐败的现象; 2) 原胶液一定要充分溶胀, 搅拌时间不小于 20 min; 3) 稠化剂加量大于 0.5%, 以保证原胶液粘度大于 50 mPa·s; 4) 配制好的原胶液放置时间不能大于 8 h。压裂施工时原胶液与交联液按 100 : 3~5 的比例混合, 排量为 1.5 m<sup>3</sup>/min, 砂比为 30%~40%, 大约 50 min 压裂施工结束, 然后进行放喷和洗井作业。表 7 为采用回注污水压裂液和清水压裂液压裂井的对比情况。

表 7 回注污水压裂液与清水压裂液现场使用情况

井号	射孔段 / m	排量 / m <sup>3</sup> · min <sup>-1</sup>	平均砂比, %	破裂压力 / MPa	压后增油 / t	压裂液类型
山 85	1 336~1 521	1.2	30	28/30	0.61	回注污水
山 90	1 312~1 509	1.3	31	30/32	0.50	清水
关 50	1 328~1 451	1.2	35	27/30	0.92	回注污水
关 42	1 353~1 466	1.2	32	30	0.88	清水

由表 7 可看出, 用回注污水压裂液和清水压裂液压裂的增产效果相当。然而, 用回注污水配制的压裂液, 破胶快, 不需添加低温引发剂, 降低了生产成本。因此, 用回注污水配制压裂液彻底解决了陕北季节性

水源短缺对施工的影响,保护了环境,降低了开发成本,对油田可持续发展具有十分重要的现实意义。

## 5 结 论

1) 用油田回注污水作为配制压裂液用水能基本满足压裂液的要求。

2) 配制压裂液所用回注污水 pH 值在 7.0~8.0,稠化剂加量不小于 0.50%,配制原胶液的搅拌时间不小于 20 min 为宜。原胶液的最佳使用时间是配制 8 h 以内。

3) 用回注污水配制压裂液解决了陕北油田夏冬

季严重缺水的问题,减少了污水排放,保护了环境和资源。

## 参 考 文 献

- [1] 李怀印,李宏伟.对我国陆上油田回注污水处理技术现状的认识及发展方向的思考[J].石油化工环境保护,2004,27(1): 11-15.
- [2] 陈健,郑海军.油田回注污水处理回注技术研究[J].北方环境,2004,29(3): 19-23.
- [3] 李升芳,李汉周,徐卫华,等.陈堡油田回注污水回注配伍性分析[J].油气田地面工程,2003,22(8): 22, 30.

〔审稿 吴晓东〕

## Experimental Study and Applications of Preparing Fracture Fluid Using Re-Injected Oilfield Wastewater

Wang Manxue<sup>1</sup> Wang Kui<sup>2</sup> Liu Xuefeng<sup>2</sup> Zhang Jianli<sup>3</sup>

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an Petroleum University, Xi'an, Shanxi, 710065, China; 2. Yanchuan Drilling & Production Company, Yan'an, Shanxi, 716000, China; 3. Drilling & Production Technology Institute, Branch Company of Tuha Oilfield, Shanshan, Xinjiang, 838200, China)

**Abstract:** In order to solve the shortage of fracturing water in the Shanbei Oilfield, a study is initiated, it is intended to prepare water-based fracturing fluid using re-injected wastewater. On the basis of analysis on wastewater quality, wastewater has been experimented with respect to effects of pH on fracturing fluid properties, compatibility with additives, and property evaluation, etc. Experimental data proves its good compatibility. When preparing fracture fluid using re-injected wastewater, its pH should be 7-8, the additive more than 0.5%, mixed time over 20min, the best operation duration is within 8 hours since getting it prepared. Such fracturing fluid, in comparison with one prepared by fresh water, performs equivalent functions except the faster gelout velocity. This technology has been successfully applied in more than 20 cases in the Shanbei Oilfields. Operational effectiveness show that this fracturing fluid can meet demands for fracturing low temperature formations.

**Key words:** sewage; waster base fracturing fluid; filtrate loss; Shanbei Oilfield

## 分支井和智能井系统成功应用于老油田开发

分支井和智能井系统已在海上油气田开发中取得了巨大成就,近日,阿曼石油开发公司成功地在老油田——Mukhaizna 油田开发中应用了该系统。

该油田所产原油以重质粘性油为主,其上部的 Gharif 2 (UG2) 和稍深的 Middle Gharif (MG) 为两个储油层,具有共同的油水界面,Khuff 地层红粘土和致密碳酸岩充当盖层。基本的油井设计包括用来隔离上部漏失层的  $\phi 339.7$  mm 表层套管,和确保水泥浆返回地面的  $\phi 244.5$  mm 生产套管。使用绕丝筛管或割缝衬管对井下 800 m 裸眼井段进行防砂,使用安装在储层部位的电潜渐进腔式泵进行开采。

分支井技术的应用提高了采收率,降低了钻井成本,减少了作业费用,通过防砂维持了产量,减少了修井次数。为了解决油藏监测和管理技术成本高的问题,可以促进低成本、半选择性完井的开发。通过分支井和智能井系统的应用,在出水或出砂的情况下,可以实现机械关井及低成本的生产分配和关闭层。

〔闫循彪摘译自 World Oil, June, 2006〕

欢迎订阅 2007 年《石油钻探技术》