

# 耐剪切低伤害线性胶压裂液性能研究与现场应用

杜涛\*, 姚奕明, 蒋廷学, 张旭东, 刘红磊  
(中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

**摘要:**线性胶压裂液是页岩气开采最关键的技术之一。以 SRFP-1 增稠剂、SRFC-1 交联剂、SRCS-1 黏土稳定剂和 SRCU-1 助排剂工业品为研究对象制备 SRFP 线性胶压裂液;评价了该压裂液体系的变剪切性能及对岩心基质伤害性能;将该压裂液在塔里木盆地某重点页岩气探井进行了现场应用。结果表明,SRFP 线性胶压裂液在 70~90℃ 条件下具有良好的抗剪切性能,对岩心基质伤害率小于 20%,现场施工平均砂比为 11.9%,返排液黏度小于 5 mPa·s。

**关键词:**线性胶压裂液;变剪切性能;伤害率;平均砂比;现场应用

**中图分类号:**TE357.12

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2016)02-0095-03

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.02.024

## Performance evaluation and field applications of a shearing-resistant and low-damage linear gel fracturing fluid

DU Tao\*, YAO Yi-ming, JIANG Ting-xue, ZHANG Xu-dong, LIU Hong-lei  
(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Linear gel fracturing fluid is one of the key technologies of shale gas exploitation. A SRFP linear gel fracturing fluid is synthesized by using SRFP-1 gelling, SRFC-1 cross-linker, SRCS-1 anti-swelling agent and SRCU-1 cleanup additive products as raw materials. The shearing resistance performance and the permeability damage rate of core matrix are studied. SRFP linear gel fracturing fluid is used in one important shale gas well which is located in Tarim Basin. The results show that SRFP linear gel fracturing fluid has better shearing resistance performance at 70~90℃. The permeability damage rate of core matrix caused by SRFP linear gel fracturing fluid is less than 20%. The average sand ratio is 11.9% and the viscosity of flowback fluid is less than 5 mPa·s.

**Key words:** linear gel fracturing fluid; shearing resistance performance; permeability damage rate of core matrix; average sand ratio; field application

页岩气是世界公认的清洁和高效新能源。我国页岩气资源潜力巨大,在常规能源可开采量逐年递减的情况下,页岩气的大规模商业开发有利于缓解国内天然气缺口带来的压力,保障国家能源安全,改善能源供给结构<sup>[1-2]</sup>。水力压裂技术是页岩气勘探开发最重要的技术之一,线性胶压裂液是水力压裂技术的重要组成部分,其性能的优劣直接影响水力压裂施工的成败。线性胶压裂液主要以水溶性高分子聚合物增稠剂为主剂,其他添加剂(如交联剂、防膨剂、助排剂和破胶剂等)为辅料组成,该类型压裂液具有低伤害、低摩阻、易返排等优点,目前主要应用于低渗透页岩储层的压裂改造。压裂液的变剪切性能及对岩心基质伤害性能是线性胶压裂液最重要的性能,变剪切性能关系到压裂液的输送、携砂、摩阻和压裂效果。压裂液滤液对岩心基质伤害性能主要表现为润湿性能的改变,毛细管力的变化,黏土膨

胀和颗粒运移,水锁和气锁效应<sup>[3-5]</sup>。笔者重点评价了 SRFP 线性胶压裂液在 70~90℃ 的变剪切性能及对岩心基质伤害性能,并将 SRFP 线性胶压裂液在塔里木盆地某重点页岩气探井进行了现场应用。

## 1 实验部分

### 1.1 主要实验样品

SRFP-1 增稠剂,工业品,中国石化石油工程技术研究院生产;SRFC-1 交联剂,工业品,中国石化石油工程技术研究院生产;SRCS-1 黏土稳定剂,工业品,中国石化石油工程技术研究院生产;SRCU-1 助排剂,工业品,中国石化石油工程技术研究院生产;过硫酸铵,工业品,北京化工厂生产。

### 1.2 主要实验仪器

HAAKE MARS III 型流变仪,德国 Thermo Fisher 公司生产;IKA RW20 digital 数显型顶置式机械搅拌

收稿日期:2015-07-29

基金项目:国家重大科技专项资助(2011ZX05031-004-003);中国石化石油工程技术服务有限公司重点项目(10010099-13-ZC0607-0037);国家自然科学基金重大项目(51490653);中国石化科技攻关项目资助(P15042)

作者简介:杜涛(1982-),男,博士,副研究员,研究方向为储层改造工作液研究工作,通讯联系人,dutaosongzi@163.com。

器,德国艾卡公司生产;长岩心酸化驱替伤害试验装置,法国万奇公司生产。

### 1.3 SRFP 线性胶压裂液制备

向一定量的水中加入 0.35% 的 SRFP-1 增稠剂,充分搅拌一段时间,然后加入 0.3% 的 SRCS-1 黏土稳定剂和 0.1% 的 SRCU-1 助排剂,制备 SRFP 线性胶压裂液基液。向上述基液中加入 0.16% 的 SRFC-1 交联剂,制备 SRFP 线性胶压裂液体系。

### 1.4 SRFP 线性胶压裂液性能评价实验

#### 1.4.1 变剪切实验

采用 HAAKE MARS III 型流变仪评价压裂液的耐剪切性能,流变仪程序设定分以下 5 步:①25℃ 稳定 5 min;②以 3℃/min 的升温速率从 25℃ 开始升温至实验温度;③稳定实验温度,剪切速率从 170 s<sup>-1</sup>减小到 25 s<sup>-1</sup>,再从 25 s<sup>-1</sup>增加到 170 s<sup>-1</sup>;④稳定实验温度,在 170 s<sup>-1</sup> 条件下,剪切 20 min;⑤再重复步骤③和步骤④实验 2 次。评价 SRFP 线性胶压裂液耐剪切性能。

#### 1.4.2 压裂液滤液对岩心基质伤害实验

选取直径为 2.5 cm,长度为 3.75 cm 的天然岩心,采用长岩心酸化驱替伤害试验装置,按照 SY/T 5107—2005 中 6.10 所述评价方法<sup>[6]</sup>,测定压裂液滤液对岩心基质伤害率,岩心基质伤害率为:

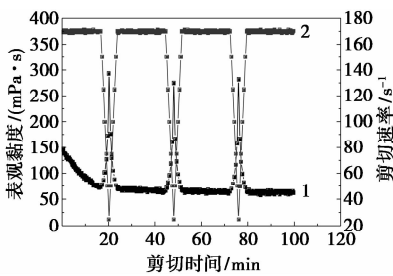
$$\eta_d = [(K_1 - K_2) / K_1] \times 100\%$$

式中: $\eta_d$  为岩心基质伤害率,%; $K_1$  为岩心挤压裂液滤液前的基质渗透率, $\mu\text{m}^2$ ; $K_2$  为岩心挤压裂液滤液后的基质渗透率, $\mu\text{m}^2$ 。

## 2 结果与讨论

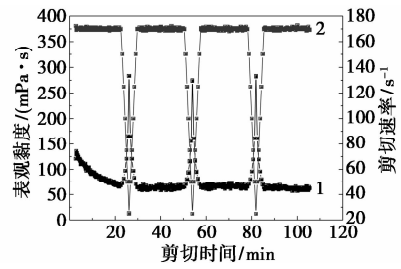
### 2.1 变剪切实验

线性胶压裂液的分子结构不同于常规交联胍胶压裂液,常规交联胍胶压裂液为立体网状结构,而线性胶压裂液是一种线型结构,线性胶压裂液的流变性能是影响页岩气压裂施工成败的主要因素之一。



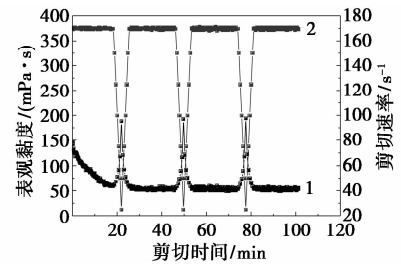
1—表观黏度;2—剪切速率

图 1 实验室配制 SRFP 线性胶压裂液耐剪切实验(70℃)



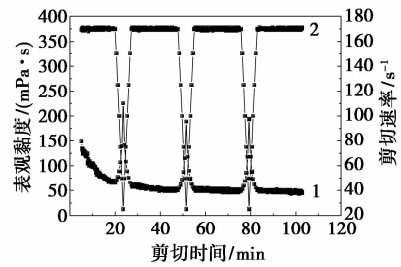
1—表观黏度;2—剪切速率

图 2 实验室配制 SRFP 线性胶压裂液耐剪切实验(75℃)



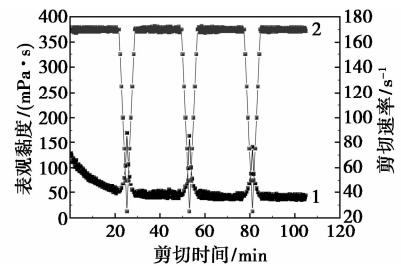
1—表观黏度;2—剪切速率

图 3 实验室配制 SRFP 线性胶压裂液耐剪切实验(80℃)



1—表观黏度;2—剪切速率

图 4 实验室配制 SRFP 线性胶压裂液耐剪切实验(85℃)



1—表观黏度;2—剪切速率

图 5 实验室配制 SRFP 线性胶压裂液耐剪切实验(90℃)

考察了 SRFP 线性胶压裂液在 70~90℃ 的变剪切实验,结果如图 1~图 5 所示。由图 1~图 5 可知,当温度分别为 70、75、80、85℃ 和 90℃,经 170 s<sup>-1</sup> 剪切

100 min 后的平均黏度分别为 72、68、56、52 mPa·s 和 40 mPa·s;随着温度的升高,黏度降低,当体系黏度降低到一定值之后趋向稳定。说明该体系具有良好的耐温耐剪切性能,在低砂浓度的情况下有利于压裂液携带支撑剂移动至较远的距离。因此,SRFP 线性胶压裂液适合 90℃ 以下储层温度的施工要求。

## 2.2 岩心基质伤害实验

压裂液滤液对岩心基质的伤害以岩心渗透率的变化来表征,影响因素主要有岩心的矿物组成、岩心渗透率大小和压裂液破胶程度等。利用长岩心酸化驱替伤害试验装置测定压裂液滤液对岩心基质的渗透率,从而计算伤害率。岩心基质伤害实验结果如表 1 所示。由表 1 可知,对于 1<sup>#</sup>岩心,SRFP 线性胶压裂液滤液对岩心基质伤害前的渗透率为  $4.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,伤害后渗透率为  $4.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,经计算,伤害率为 10.9%;对于 2<sup>#</sup>岩心,SRFP 线性胶压裂液滤液对岩心基质伤害前的渗透率为  $3.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,伤害后渗透率为  $3.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,经计算,伤害率为 13.9%;对于 3<sup>#</sup>岩心,SRFP 线性胶压裂液滤液对岩心基质伤害前的渗透率为  $8.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,伤害后渗透率为  $6.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,经计算,伤害率为 14.8%,符合行业标准 SY/T 6376—2008 要求<sup>[7]</sup>。

表 1 SRFP 线性胶压裂液对岩心基质伤害实验

岩心 编号	岩心 直径/ cm	岩心 长度/ cm	岩心基质渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$		伤害 率/%	技术 指标/ %
			伤害前	伤害后		
1	2.5	3.75	4.6	4.1	10.9	≤20
2	2.5	3.75	3.6	3.1	13.9	
3	2.5	3.75	8.1	6.9	14.8	

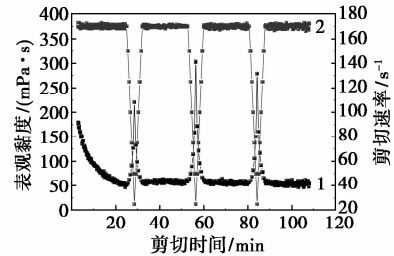
## 3 现场试验

SRFP 线性胶压裂液室内主要性能测试符合页岩气压裂施工技术指标要求。选择塔里木盆地某重点页岩气探井进行现场试验。该井属于低渗透页岩气藏,井深 3 475 m,压裂井段 3 400 ~ 3 420 m,井温为 75℃。

### 3.1 现场配制 SRFP 线性胶压裂液

首先缓慢匀速加入 0.35% SRFP-1 增稠剂,禁止突然提高加料速度或 1 次加入,这样会形成大量“鱼眼”;加完后循环 3 ~ 5 min,然后缓慢匀速加入 0.3% SRCS-1 黏土稳定剂和 0.1% SRCU-1 助排剂,循环 1 min,配制成 SRFP 线性胶压裂液基液备用。施工过程中,再加入 0.16% SRFC-1 交联剂。

现场配制 SRFP 线性胶压裂液流变曲线如图 6 所示。比较图 2 和图 6 数据可知,现场施工配制的线性胶压裂液的抗剪切性能与室内配制线性胶压裂液抗剪切性能相当,表明线性胶压裂液性能稳定。

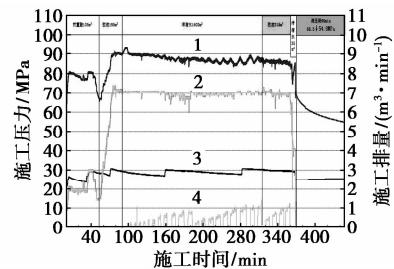


1—表观黏度;2—剪切速率

图 6 现场配制 SRFP 线性胶压裂液耐剪切实验(75℃)

### 3.2 压裂施工参数

该重点页岩气探井最高施工压力为 93.5 MPa,停泵压力为 68.5 MPa,最高施工排量为 7 m<sup>3</sup>/min,加入 SRFP 线性胶压裂液 521 m<sup>3</sup>,加砂 62.07 m<sup>3</sup>,平均砂比为 11.9%,返排液黏度小于 5 mPa·s。SRFP 线性胶压裂液能显著降低压裂液对低渗透页岩气藏的伤害,提高压裂施工效果。该井压裂施工曲线如图 7 所示。



1—油压;2—排量;3—套压;4—砂比

图 7 塔里木盆地某重点页岩气探井压裂施工曲线

## 4 结论

(1) SRFP 线性胶压裂液在 70、75、80、85℃ 和 90℃,  $170 \text{ s}^{-1}$ , 100 min 内经历 3 次变剪切,平均黏度分别为 72、68、56、52 mPa·s 和 40 mPa·s,表现出良好的流变性能;

(2) 对于 1<sup>#</sup> ~ 3<sup>#</sup>天然岩心,岩心基质伤害率分别为 10.9%、13.9% 和 14.8%,符合行业标准要求,SRFP 线性胶压裂液成功应用于塔里木盆地某重点页岩气探井,平均砂比为 11.9%,返排液黏度小于 5 mPa·s,压裂施工成功。

(下转第 99 页)

因此,笔者系统研究了单体摩尔比、反应温度、反应时间、引发剂用量、链转移剂用量等因素对共聚物阻垢性能的影响,通过红外光谱仪(FTIR)和同步热分析仪确定了聚合产物的化学结构及其热稳定性。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器与试剂

仪器:ZRY型恒温油浴锅,巩义市予华仪器有限公司生产;DW-2型多功能电动搅拌器,巩义市予华仪器有限公司生产;SENCO-R型旋转蒸发器,上海申生科技有限公司生产;DZ-2A型真空干燥箱,天津市泰斯特仪器有限公司生产;DZKW-D-2型电热恒温水浴锅,北京市永光明医疗仪器有限公司生产;FT-IR 200型傅里叶变换红外光谱仪,美国Nicolet公司生产;NETZSCH STA409PC型同步(综合)热分析仪,德国耐驰生产。

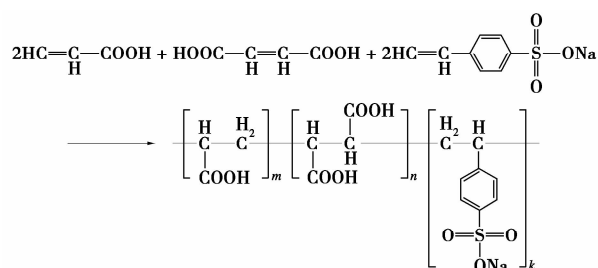
试剂:丙烯酸(化学纯),天津市科密欧化学试剂有限公司生产;马来酸酐(分析纯),天津市科密欧化学试剂有限公司生产;对苯乙烯磺酸钠(分析纯),郑州华文化工有限公司生产;过硫酸铵(分析纯),天津市风船化学试剂科技有限公司生产;异丙醇(分析纯),天津市风船化学试剂科技有限公司生产;硼砂(分析纯),天津市风船化学试剂科技有限公司生产;己二胺四乙酸二钠(分析纯),天津市化学试剂一厂生产。

### 1.2 MA/AA/SSS三元共聚物的合成

首先称取一定量的MA、AA、SSS、蒸馏水,加入到装有搅拌器、回流冷凝管和温度计的四口反应烧瓶,室温搅拌至固体完全溶解,加入2.210 mL异丙醇,并通入氮气将瓶内空气排出;调整油浴温度为80℃,转速为150 r/min,滴加过硫酸铵溶液(1.96 g过硫酸铵溶于35 mL蒸馏水),使其在50~60 min滴完;保温反应4 h,冷却至室温,得到浅黄色透明液体,即为MA/AA/SSS三元共聚物水溶液。

MA/AA/SSS 3种单体在水溶液中自由聚合反

应方程式如下:



### 1.3 阻碳酸钙垢率的测定

根据《GBT 16632—2008 水处理剂阻垢性能的测定 碳酸钙沉积法》测定共聚物对碳酸钙垢的阻垢率<sup>[14]</sup>。100 mL容量瓶中依次加一定量蒸馏水、氯化钙标准溶液、水处理剂试样溶液、硼砂缓冲液和碳酸氢钠标准溶液并摇匀;放入(80±1)℃恒温水浴中10 h;冷却至室温后过滤,移取25.00 mL滤液,置于250 mL锥形瓶中,依次加入55 mL蒸馏水、5 mL氢氧化钾和0.4 g钙一羧酸指示剂,用乙二胺四乙酸二钠标准滴定溶液滴定至溶液由紫红色变为亮蓝色。

阻垢率计算式为:

$$\eta = [(\rho_4 - \rho_3) / (0.240 - \rho_3)] \times 100 \quad (1)$$

式中: $\rho_4$ 为加入水处理剂的试液试验后的 $\text{Ca}^{2+}$ 质量浓度,mg/mL; $\rho_3$ 为不加水处理剂的空白试液试验后的 $\text{Ca}^{2+}$ 质量浓度,mg/mL;0.240为试验前配置好的试液中 $\text{Ca}^{2+}$ 质量浓度,(mg/mL)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 MA/AA/SSS共聚物红外光谱分析

对提纯后的MA/AA/SSS三元共聚物进行红外光谱分析,溴化钾混合压片,扫描范围为175~4 000  $\text{cm}^{-1}$ ,分辨率为1  $\text{cm}^{-1}$ ,结果如图1所示。

从图1可以看出,在3 448  $\text{cm}^{-1}$ 处是共聚物中的羧基羟基吸收峰;2933  $\text{cm}^{-1}$ 处是亚甲基的伸缩振动吸收峰;1 629  $\text{cm}^{-1}$ 处是苯环的特征峰;1 567  $\text{cm}^{-1}$ 和1404  $\text{cm}^{-1}$ 处是羧酸非对称及对称伸

(上接第97页)

### 参考文献

- [1] 胡庆明. 我国页岩气勘探开发实现重大突破[J]. 石油石化节能, 2014, 4(11): 50.
- [2] 杜凯, 黄凤兴, 伊卓. 页岩气滑溜水压裂用降阻剂研究与应用进展[J]. 中国科学: 化学, 2014, 44(11): 1696-1704.
- [3] 钟安海. 压裂液体系对岩心渗透能力的影响[J]. 钻井液与完井液, 2011, 28(3): 69-71.

- [4] 李钦. 水基压裂液伤害性研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2004.
- [5] 蒋海, 杨兆中, 胡月华, 等. 低压致密气藏压裂液损害关键因素分析[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2008, 30(5): 324-327.
- [6] SY/T 5107—2005 水基压裂液性能评价方法[S]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2005.
- [7] SY/T 6376—2008 压裂液通用技术条件[S]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2008. ■