

文章编号: 1001-1986(2010)03-0024-03

VES-18 清洁压裂液性能试验与应用

王维明^{1,2}

(1. 中国地质大学, 北京 100083;

2. 中石油长城钻探工程有限公司煤层气开发公司, 辽宁 盘锦 124010)

摘要: 用阳离子季胺盐和有机盐等复配制备 VES-18 清洁压裂液, 对其主要性能进行了研究, 并进行了现场应用试验。结果表明: VES-18 具有很好的耐低温性和时间稳定性; 在常温、 170 s^{-1} 剪切速率下, 表观粘度为 $11\text{ mPa}\cdot\text{s}$; 在 $200\sim 1\,000\text{ s}^{-1}$ 区间内, 随着剪切速率的增大, 粘度缓慢下降, 且下行粘度高于上行粘度; 在应力扫描范围内, 粘弹曲线中弹性模量一直大于粘性模量, 属于弹性流体; 模拟动态沉降时间大于粘度高的胍胶基液和丙三醇, 体现了很好的携砂性能; 少量的原油和自制破胶剂 PJJ 都可使 VES-18 在 4 h 内完全破胶, 破胶液粘度小于 $3\text{ mPa}\cdot\text{s}$, 破胶液表面张力较低, 无残渣, 破胶效果好, 与地层配伍性良好。

关键词: 清洁压裂液; 低粘度特性; 耐剪切; 粘弹性; 模拟动态沉降

中图分类号: P618.11 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.03.006

Behavior and application of VES-18 clean fracturing fluid

WANG Weiming^{1,2}

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Coalbed Methane Development Company of Greatwall Drilling Company, CNPC, Panjin 124010, China)

Abstract: VES-18 clean fracturing fluid is mixed with cationic quaternary ammonium and organic salt salicylate. The main behavior of VES-18 is investigated and tested on site. The results showed that VES-18 possessed a good temperature resistance and time stability. At room temperature and high shear rate of 170 s^{-1} , the viscosity of VES-18 is about $11\text{ mPa}\cdot\text{s}$. As the shear rate increased from 200 s^{-1} to $1\,000\text{ s}^{-1}$, the viscosity declined slowly. And the viscosity-shear rate-decreasing curve is higher than rate-increasing curve. The curve of viscoelasticity showed that the elastic modulus was always bigger than the viscous modulus at the range of the stress scan. In the test of the simulated dynamic sedimentation, the time of VES-18 is greater than the time of the higher-viscosity guanidine and glycerol, which reflected the good carrying capacity of VES-18. Both a small amount of crude oil and gel breaker PJJ could make VES-18 broken completely within 4 hours. The breaking results are satisfactory. The viscosity of the gel-breaking liquids is reduced to less than $3\text{ mPa}\cdot\text{s}$, and the surface tension is low. The gel-breaking liquids had no residue content and had good compatibility with the formation.

Key words: clean fracturing liquid; low viscosity behavior; shear resistance; viscoelasticity; simulated dynamic sedimentation

在压裂施工过程中, 压裂液的好坏对压裂增产起着关键作用。天然植物胶、纤维素、合成聚合物等制备的压裂液需要添加交联剂、破胶剂、杀菌剂等近 10 种化学添加剂, 破胶后, 具有较多的残渣, 不能全部返排, 对地层伤害很大, 降低了压裂改造效果^[1]。

清洁压裂液是由小分子表面活性剂在一定溶液介质中相互缔合形成的网络结构凝胶体系。与其他压裂液相比, 清洁压裂液具有许多优点, 如不用交联剂, 携砂能力强, 配制方便, 几乎 100%返排, 对岩石裂缝无伤害等特点。清洁压裂液在现场实施中

取得了很好效果^[2-3]。根据现场使用经验, 笔者曾研究了清洁压裂破胶剂与破胶剂时间的关系^[4], 并在施工过程中发现, 清洁压裂液在低温下放置一定时间后粘度明显下降, 使冬季施工无法正常进行。

本文根据清洁压裂液的成胶机理和流变特性^[5-7], 研制出 VES-18 清洁压裂液, 并对其主要性能进行研究。

1 试验仪器与药品

试验仪器包括 RV20 旋转粘度计、K12 全自动张力仪、Rheometrics 系列 AR1000 高级拓展流变仪、

收稿日期: 2009-07-18

作者简介: 王维明(1963—), 男, 河北石家庄人, 博士研究生, 从事油气田开发研究。

恒温电热干燥箱; DK-98-1 型恒温水浴锅; 模拟动态沉降装置(自制)。

试验药品为清洁压裂液 VES-18(由烷基季胺盐及有机盐等组成), 自制品; 破胶剂 PJJ(非离子或阴离子表面活性剂前体), 自制品。

2 试验结果与讨论

2.1 基本性能

在室内实验基础上, 研制出 VES-18 清洁压裂液, 其使用浓度 0.8%, pH 值 8.0~8.5, 外观为白色透明流体, 水溶性好, 无残渣。

2.2 耐高温性

2.2.1 低温稳定性

将 VES-18 放入 0~4 °C 的低温环境下 24 h, 研究其耐低温性(见表 1)。表中可以看出, 此清洁压裂液 24 h 后仍能保持很好的粘弹性, 即使在严寒的天气条件下, 也不影响其正常使用。

表 1 VES-18 的耐低温性(0~4 °C)
Table 1 Low temperature resistance of VES-18

低温持续时间/h	0	6	12	18	24
粘度	+++	+++	+++	++	++

注: +++——粘度很大; ++——粘度较大。

2.2.2 高温稳定性

对清洁压裂液进行了热稳定性实验, 压裂液分别在 25 °C、40 °C、55 °C、65 °C 和 70 °C 下恒温放置 5 h, 结果如表 2 所示。实验表明, VES-18 在 55 °C 以下, 耐高温性较好, 温度高于 65 °C 时, 粘弹性极速下降, 在 70 °C 左右就不能够保持其原有粘弹性。VES-18 如果要应用到高温, 必须改进配方, 加强抗高温性。

表 2 VES-18 的耐高温性
Table 2 High temperature resistance of VES-18

温度/°C	25	40	55	65	70
粘度	+++	+++	+++	++	+

注: +++——粘度很大; ++——粘度较大; +——粘度较小。

2.3 低粘度特性

在许多领域中, 粘弹性表面活性剂溶液不要求具有很高的粘度^[8]。在压裂施工中, 在很低的粘度(20 mPa·s)下也能对支撑剂起到悬浮稳定作用。这一性质是聚合物无法比拟的。表 3 为常温、170 s⁻¹ 剪切速率下, VES-18 和胍胶基液的表现粘度对比结果。

表 3 VES-18 与胍胶基液表现粘度对比表
Table 3 Apparent viscosity of VES-18 and guanidime gel

压裂液体系	粘度/mPa·s
VES-18	11.0
胍胶 0.5%	35.0

由表 3 可知, VES-18 的表现粘度远小于胍胶基液的粘度。较低的粘度使其可以有较低的摩阻和低泵注压力, 避免了使用大功率设备; 同时, 还可以有效地避免因粘度高而带来的裂缝高度过大的问题, 较易形成长而宽的裂缝, 提高压裂效果。

2.4 剪切稀释特性和结构的自动恢复性

VES 溶液的粘弹性是由 VES 在溶液中形成的蠕虫状胶束得到的, 类似于交联聚合物的空间网架结构, 这种缠结结构在剪切作用下会发生拆散, 使缠结的胶束团重新转变为单个或较少胶束缠结结构, 使粘度有所下降; 当剪切消失, 结构又自动恢复。用 RV20 旋转粘度计对清洁压裂液的抗剪切性能进行评价, 结果如图 1 所示。

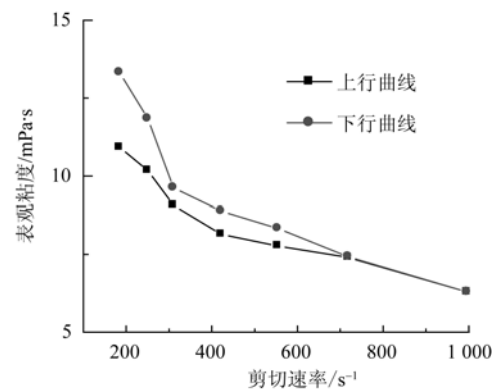


图 1 VES-18 剪切性

Fig. 1 Shear resistance of VES-18

由图 1 可以看出, 随着剪切速率的增大, VES-18 粘度逐渐下降, 最后趋于稳定; 当剪切速率逐渐变小, 粘度又开始恢复, 而且下行(剪切速率减小)曲线高于上行(剪切速率增加)曲线。可见, VES-18 具有极好的剪切恢复性。在压裂作业中, 在从高速流动的井筒进入低速流动的地层时, 压裂液能迅速恢复高粘度和携带支撑剂的能力。

2.5 时间稳定性

一般压裂液体系的表现粘度是随时间增加而降低的。图 2 是 VES-18 于 40 °C、170 s⁻¹ 剪切后的粘度-时间曲线。可以看出, 静止 30 s 后体系的表现粘度甚小而趋于稳定。故 VES-18 的时间稳定性很好。

2.6 粘弹性

粘弹性是指物质对施加外力的响应表现为粘性和弹性的双重特性^[7]。在施工范围内和一定剪切速率下, 具有一定的粘度是对压裂液的硬性要求。清洁压裂液的粘弹性可视为弹性和粘性两部分的综合表现。在 28 °C 时, 对 VES-18 体系进行频率扫描, 测得剪切储能模量(弹性模量 G')和剪切耗能模量(粘性模量 G'')与频率(f)的关系见图 3。

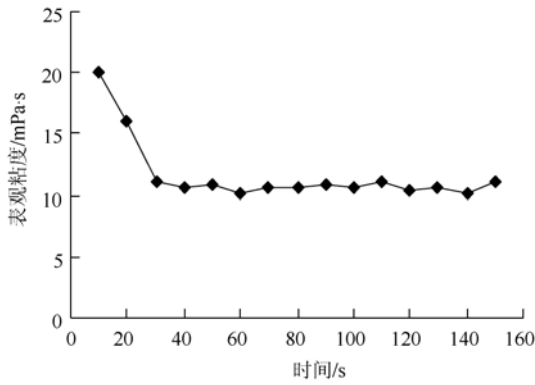


图 2 VES-18 时间稳定性
Fig. 2 Time stability of VES-18

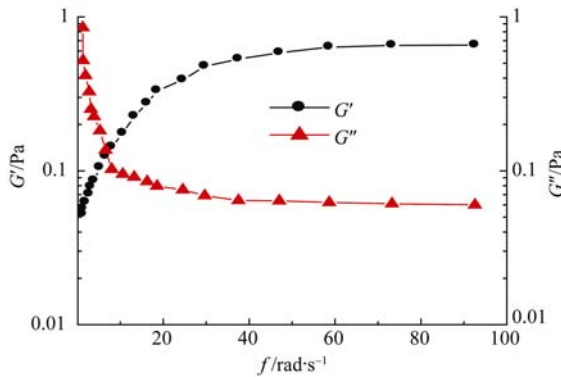


图 3 VES-18 粘弹性
Fig. 3 Viscoelasticity of VES-18

由图 3 可知，该体系的粘性模量(耗能模量) G'' 随频率的增大而减小，弹性模量(储能模量) G' 随频率的增大而增大。一般来说，若 $G' > G''$ ，则流体表现出以弹性行为为主，Hoffmann 提出了判断溶液是否具有粘弹性的方法^[8]：测定 G' 和 G'' ，如果在 $0.1 \sim 10 \text{ rad/s}$ 范围内有 $G' > G''$ ，且 $G' > 10^{-1} \text{ Pa}$ ，则认为在给定温度下溶液具有粘弹性。图 3 中，VES-18 在低频($< 1 \text{ rad/s}$)时，弹性模量低于粘性模量，随着频率的增大，弹性模量明显占优势，具有粘弹性。清洁压裂液独特的弹性表现，是其在相对低粘度时仍具有良好携砂性能的一个重要原因。

2.7 破胶性能

破胶是压裂液的关键技术指标。清洁压裂液与烃(油、气)接触或与大量水接触，能够直接破胶，在煤层气井或含水少的井就需要添加破胶剂，才能对清洁压裂液进行破胶。VES-18 在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 分别遇到少量原油和破胶剂 PJJ 的破胶过程见图 4。

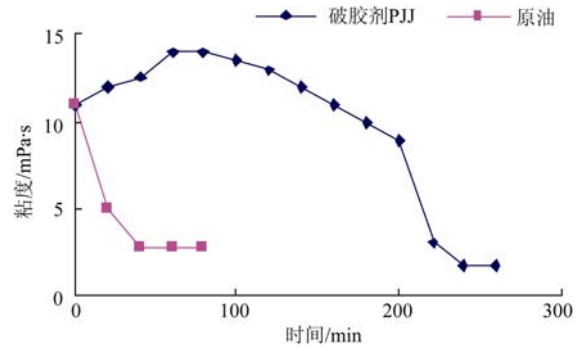


图 4 破胶时间与粘度的关系
Fig. 4 The relation between gel-breaking time and the viscosity

由图 4 可知，VES-18 遇到原油，粘度会急剧降低，用于油井压裂会自动破胶。但 VES-18 与破胶剂 PJJ 配合，破胶时间较长，这不会影响施工过程中压裂液的携砂能力，而且能够在所需的时间内破胶，及时返排，提高返排效率，不会造成裂缝导流能力的损害，为降低压裂液对煤储层的伤害提供了可能。

表 4 为两种破胶液的破胶性能。原油与 PJJ 在 4 h 内均能使压裂液实现彻底破胶，且破胶后粘度下降至 $3 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 以下，可以提高排液速度和排液量，减少返排过程中残液通过裂缝孔道的阻力和滞留时间，达到完全快速返排。破胶液有较低的表面张力，有利于克服水锁及贾敏效应，降低毛管阻力，增加残液的返排能力。同时残渣含量较低，碱性不强，与地层的配伍性良好，说明清洁压裂液在实际使用条件下，不会在地层中留下太多残渣，造成污染和地层伤害。

3 现场应用效果

辽河石油勘探局煤气公司与辽河石油管理局井下作业公司通过合作，将清洁压裂液多次应用于阜新地区的煤层气井压裂施工，成功率 100%。试验井施工排量能够控制在 $3.5 \sim 4.5 \text{ m}^3/\text{min}$ ；施工砂比控制在 25%左右，成功后，后续井平均砂比均在 30%以上。清洁压裂液性能突出，经济效益十分明显。

L6 井为煤层气井，煤层加砂 45 m^3 ，平均砂比 33%，最高砂比 38%；压裂施工 4 h 后，自然喷井，喷井后初期压裂液粘度为 $3.5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ，3 h 后粘度保持在 $3.0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 以下。取得了良好的效果。

表 4 VES-18 破胶液性能
Table 4 Break character of VES-18

破胶液	破胶时间/h	表观粘度/mPa·s	表面张力/mN·m ⁻¹	破胶液pH	残渣含量	与地层配伍性
原油	0.1	2.75	31.2	8.5	无渣	良好
PJJ	4.0	1.75	25.8	8.0	无渣	良好