

# 可降解纤维压裂液性能评价

薛丹<sup>1\*</sup>, 张晗<sup>1</sup>, 吕伟<sup>2</sup>

(1. 西安石油大学化学化工学院, 陕西 西安 710065;  
2. 长庆油田公司油气工艺研究院, 陕西 西安 710018)

**摘要:**在瓜胶体系中加入合成的可降解两性性聚酯类纤维,可以在降低稠化剂浓度的条件下,保证压裂液的携砂能力。研究纤维不同加量、不同长度对体系中支撑剂沉降速度的影响,发现对于给定流体黏度,质量分数为0.2%,长度为6 mm的纤维能使支撑剂沉降速度降为原来的1/3,携砂性能优异。有机硼交联0.3%瓜胶压裂液(HPG),加入过硫酸铵50 mg/L并在80℃放置5 h后,破胶残渣量为315 mg/L,而该体系加入0.2%可降解纤维DF-1后,破胶残渣量可减至160 mg/L;同时岩心伤害率也由17.45%降至12.31%;在70℃、170 s<sup>-1</sup>下剪切40 min,其黏度仍保持在70 mPa·s以上,抗剪切性能良好,能够满足现场施工需求。

**关键词:**可降解纤维;瓜尔胶压裂液;沉降速度;低残渣量;低岩心伤害率

中图分类号:TQ426.6

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2015)08-0101-04

## Performance evaluation of biodegradable fiber fracturing fluid

XUE Dan<sup>1\*</sup>, ZHANG Han<sup>1</sup>, LV Wei<sup>2</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;  
2. Oil & Gas Technology Research Institute, Changqing OilField Company, Xi'an 710018, China)

**Abstract:** The addition of biodegradable fiber to guar gum fracturing fluid can both reduce the amount of thickening agent used and ensure the proppant carrying capability. The effects of the amount and length of fiber on the settling velocity of proppant are studied. The result shows that with a viscosity of the fluid, the settling velocity of proppant could be reduced to 1/3 of the original by adding 0.2 wt% of the fiber with 6 mm of length, indicating the good proppant carrying capability. For an organo-boron crosslinked hydroxypropyl guar (HPG) fracturing fluid with introduction of 50 mg/L of ammonium persulfate and being placed at 80℃ over 5 hours, the residue from gel breakdown is 315 mg. By contrast, the incorporation of 0.2% of fiber DF-1 can lead to the decrease of residue to 160 mg/L. At the same time, the viscosity is still kept above 70 mPa·s after shearing at 70℃ for 40 minutes with shearing rate of 170 s<sup>-1</sup>, which indicates that this biodegradable fiber fracturing fluid has the great potential in sand fracturing jobs of medium scale.

**Key words:** biodegradable fiber; guar gum fracturing fluid; settling velocity; low residue; low rate of core damage

纤维压裂液不但能够有效地防止支撑剂回流,还可提高携砂液的携砂能力,改变支撑剂的沉降速度,改善支撑剂铺砂剖面,使支撑剂输送到更远位置形成较长的水力裂缝<sup>[1-3]</sup>,并且有助于控制支撑剂沉降高度,增强裂缝缝高的控制,从而获得更好的裂缝形态。同时,还具有降低裂缝伤害、施工摩阻等作用<sup>[4-5]</sup>。

目前压裂液多以添加玻璃纤维、聚丙烯、聚丙烯腈等传统纤维为主,但是,在一定条件尤其是高闭合应力下,玻璃纤维将占据支撑剂孔隙,降低了裂缝的导流能力。加之现场操作时人体皮肤接触的不适应性等,研究环境友好型可降解纤维逐渐受到了学者的关注。笔者成功合成生物可降解纤维,研究评价了其作为纤维压裂液的主要性能。所合成两性性可降解纤维能够在储层温度和环境下完全降解成二氧化碳和水,因此不会对压裂裂缝导流能力造成伤害。压裂施工时这种纤维既可表现出玻璃纤维所具有的

降阻、防止支撑剂回流等特点,又具有降低滤失、破胶及清洁支撑裂缝的功能。该纤维作为多功能添加剂可满足一般规模的压裂要求。

## 1 实验部分

### 1.1 主要材料与仪器

稠化剂羟丙级瓜尔胶 HPG,工业级;交联剂有机硼,自制;过硫酸铵,分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司生产;可降解纤维,实验室合成。

低速离心机,TD5G型,江苏盐城凯特实验仪器有限公司生产;滤失仪,ZNS-2A型,青岛同春石油仪器有限公司生产;岩心流动评价装置,XS-6A型,海安石油科研仪器有限公司生产;哈克旋转黏度计 HAKKE RV30,德国哈克公司生产。

### 1.2 实验方法

以瓜尔胶为稠化剂,有机硼为交联剂,过硫酸铵

收稿日期:2015-02-05

基金项目:陕西省教育厅专项科研计划项目(14JK1569);国家级大学生创新创业训练计划资助项目(201310705002);省级大学生创新创业训练计划资助项目(1171)

作者简介:薛丹(1977-),女,硕士,讲师,主要从事生物降解材料及绿色油田化学品的合成与改性研究,通讯联系人,xdxsy@163.com。

为破胶剂,采用室内合成的可降解纤维 DF-1,优化纤维压裂液配方并对体系进行综合性能评价。实验方法主要参照石油天然气行业标准 SY/T 5107—2005。

### 1.2.1 悬砂实验

携砂是压裂液必备能力,携砂能力可以用沉降速度来衡量。其测定方法如下:量取一定量的压裂基液,加入定量的纤维,迅速搅动使纤维均匀分布在压裂基液中,称取定量石英砂加入压裂液中,使砂粒均匀分布,加入交联剂,搅动使体系呈冻胶状,测定一段时间内砂粒的沉降高度,进而计算沉降速度。

### 1.2.2 残渣含量测定

取一定体积已发生交联的压裂液,用过硫酸铵进行破胶,破胶完全后,取一定量的破胶液加入离心试管中,于转速 2 500 r/min 下离心 30 min;用滴管吸取上清液,将沉淀放入真空干燥箱中烘干;测定沉淀质量,即为残渣含量。

### 1.2.3 流变实验

按石油天然气行业标准 SY/T 5107—1995《水基压裂液评价方法》,用流变仪在 60℃,剪切速率为 170 s<sup>-1</sup>下测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 纤维对压裂液携砂能力的影响

#### 2.1.1 纤维质量分数的确定

支撑剂沉降速度与纤维质量分数的关系如图 1

所示。

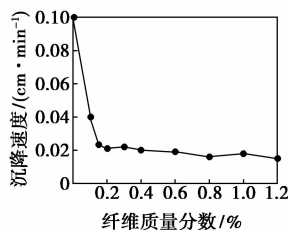


图 1 支撑剂沉降速度与纤维质量分数的关系

由图 1 可见,体系中加入纤维,支撑剂的沉降速度迅速降低,从 0.10 cm/min 下降到 0.04 cm/min,当纤维质量分数达到 0.2% 时,沉降速度减小为 0.02 cm/min,继续增大纤维质量分数,体系沉降速度下降的趋势减缓并逐渐稳定。但当质量分数大于 1.0% 时,不利于纤维分散均匀,故实验选择纤维质量分数为 0.2%。

#### 2.1.2 纤维长度的确定

DF-1 纤维长度对压裂液携砂能力的影响如图 2 所示。由图 2 可见,随着纤维长度的增加,支撑剂的沉降速度迅速降低,当纤维长度大于 6 mm 时,支撑剂沉降速度的下降趋势减缓。从固砂角度看,纤维长度越长越有利于固砂,但在实际应用中应考虑压裂管柱结构及炮眼尺寸,特别是喷砂孔尺寸。此外,不同种类纤维其刚性及长径比不同,也对支撑剂沉降与固砂性能有影响,所以有机酯类纤维 DF-1 最佳长度选择为 6 mm。

(上接第 100 页)

[2] Salgado-Gómez N, Macedo-Miranda M G, Olgufn M T. Chromium VI adsorption from sodium chromate and potassium dichromate aqueous systems by hexadecyltrimethylammonium-modified zeolite-rich tuff[J]. Applied Clay Science, 2014, 95: 197-204.

[3] Aklil A, Mouflih M, Sebti S. Removal of heavy metal ions from water by using calcined phosphate as a new adsorbent[J]. J Hazard Mater, 2009, 112(3): 183-190.

[4] Salgado-Gómez N, Macedo-Miranda M G, Olgufn M T. Chromium VI adsorption from sodium chromate and potassium dichromate aqueous systems by hexadecyltrimethylammonium-modified zeolite-rich tuff[J]. Applied Clay Science, 2014, 95: 197-204.

[5] 郑家传, 张建荣, 刘希雯, 等. 污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究[J]. 环境科学, 2014, 10: 3882-3887.

[6] Zhang Li, Zhang Yonggang. Adsorption characteristics of hexavalent chromium on HCB/TiO<sub>2</sub>[J]. Applied Surface Science, 2014, 316(15): 649-656.

[7] 范力, 张建强, 程新, 等. 离子交换法及吸附法处理含铬废水的研究进展[J]. 水处理技术, 2009, 1: 30-33.

[8] 杨国华, 黄统琳, 姚忠亮, 等. 吸附剂的应用研究现状和进展

[J]. 化学工程与装备, 2009, 6: 84-88+83.

[9] 邹照华, 何素芳, 韩彩芸, 等. 吸附法处理重金属废水研究进展[J]. 环境保护科学, 2010, 3: 22-24+108.

[10] 王璟琳, 刘国宏, 张新荣. 纳米材料吸附剂的研究进展[J]. 分析化学, 2005, 12: 1787-1793.

[11] Mahato T H, Prasad G K, Singh, et al. Nanocrystalline zinc oxide for the decontamination of sarin[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 16: 928-932.

[12] 向炜成, 胡鹏, 张星, 等. 纳米多孔二氧化钛空心球的水热法制备及其对 Cr(VI) 的吸附特性[J]. 过程工程报, 2011, 4: 678-683.

[13] 李元. 砷在 TiO<sub>2</sub> 复合材料表面的光促吸附机制[D]. 天津: 天津大学, 2013.

[14] Heather E Byrne, David W Mazyck. Removal of trace level aqueous mercury by adsorption and photocatalysis on silica-titania composites[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 170: 915-919.

[15] 尹洪喜, 张万忠, 高恩君. 纳米二氧化钛对隔离离子的吸附研究[J]. 当代化工, 2007, 5: 482-484+487.

[16] 王琳, 刘国宏, 张新荣. 纳米材料吸附剂的研究进展[J]. 分析化学, 2005, 33(12): 1787-1793. ■

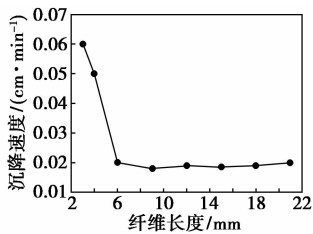


图2 支撑剂沉降速度与纤维长度的关系

### 2.1.3 不同纤维质量分数、不同砂比对携砂性能的影响

纤维质量分数、砂量对沉降速度的影响如表1所示。

表1 纤维质量分数、砂量对沉降速度的影响

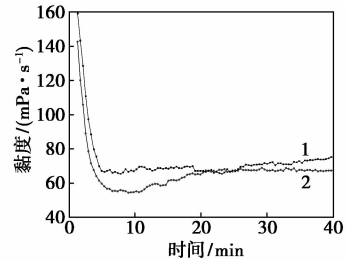
| 编号 | $w(\text{瓜胶})/\%$ | $w(\text{纤维})/\%$ | 砂比/ $\%$ | 沉降速度/ $(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$ |
|----|-------------------|-------------------|----------|---|
| 1  | 0.4               | 0                 | 30       | 0.0583                                  |
| 2  | 0.4               | 0                 | 20       | 0.0496                                  |
| 3  | 0.4               | 0                 | 10       | 0.0385                                  |
| 4  | 0.3               | 0                 | 30       | 0.196                                   |
| 5  | 0.3               | 0.1               | 30       | 0.0761                                  |
| 6  | 0.3               | 0.2               | 30       | 0.0620                                  |
| 7  | 0.3               | 0                 | 20       | 0.1790                                  |
| 8  | 0.3               | 0.1               | 20       | 0.0536                                  |
| 9  | 0.3               | 0.2               | 20       | 0.0439                                  |
| 10 | 0.3               | 0                 | 10       | 0.1660                                  |
| 11 | 0.3               | 0.1               | 10       | 0.0457                                  |
| 12 | 0.3               | 0.2               | 10       | 0.0196                                  |

从表1可知,在不加纤维情况下,相同瓜胶质量分数,当砂比降低时,其沉降速度减小;相同砂比下,质量分数为0.4%交联瓜胶体系的沉降速度是0.3%的1/3左右,这主要是由于普通压裂液体系,支撑剂的沉降过程一般遵循斯托克斯(Stokes)定律。即支撑剂颗粒在流体中的沉降速度正比于颗粒粒径和密度,反比于流体黏度。压裂液的黏度对支撑剂沉降起到至关重要的作用,提高压裂液的黏度能够使支撑剂沉降速度变慢。加入纤维后,支撑剂颗粒的沉降由于受到纤维的影响,不再遵循斯托克斯(Stokes)定律。纤维与支撑剂相互作用阻止支撑剂下沉,其沉降过程遵循 Kynch 沉降定律<sup>[6]</sup>,即同一水平层内的全部颗粒以同样的速度下沉,其沉降过程与颗粒形状、大小以及成分没有关系。颗粒的沉降速度只是颗粒附近局部悬浮物浓度的函数。因此在纤维压裂液中支撑剂的沉降速度只与纤维支撑剂悬浮物浓度有直接关系,与纤维压裂液黏度没有显性关系。表1中的结果显示,对于质量分数为

0.3%交联瓜胶体系,砂比相同,加入0.2%的纤维沉降速度是原体系的1/3。由此可知,对于给定的流体黏度,纤维能使支撑剂沉降速度大大降低。

### 2.2 流变性能的测定及评价

流变性能反映特定温度下压裂液黏度与剪切力作用时间的关系,在70℃、170 s<sup>-1</sup>的条件下,测定压裂液的流变性能,如图3所示。



1—掺加工纤维;2—不掺纤维

图3 压裂液黏度随时间变化关系曲线

由图3可知,压裂液体系在受到剪切力作用后,黏度均呈下降趋势,剪切10 min压裂液的黏度基本保持稳定,且纤维压裂液比普通压裂液黏度大,这是由于纤维可同时与多个砂粒作用,纤维与砂粒相互缠绕在一起能增强支撑剂砂层移动变形的阻力,增大了支撑剂间的摩擦力,抵抗砂层剪切变形能力提高,在70℃下,170 s<sup>-1</sup>剪切40 min,其黏度仍能保持在70 mPa·s,表现出良好的抗剪切性能,可满足现场压裂施工要求。

### 2.3 滤失实验

压裂液的滤失性能主要受三方面因素的控制,即:压裂液的黏度、地层流体的压缩性和压裂液的造壁性<sup>[7]</sup>。在室温、0.7 MPa下考察不同瓜尔胶质量分数和纤维质量分数对体系滤失量的影响,确定滤失系数,如表2所示。

表2 滤失性能测定

| $w(\text{瓜尔胶})/\%$ | $w(\text{纤维})/\%$ | 滤失量/mL |        |        |        |        |        | 滤失系数 $C/(\text{mL}\cdot\text{min}^{-1/2})$ |
|--------------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
|                    |                   | 5 min  | 10 min | 15 min | 20 min | 25 min | 30 min |  |
| 0.4                | 0                 | 5.0    | 8.8    | 11.4   | 13.9   | 16.0   | 18.0   | $3.1350 \times 10^{-5}$                    |
| 0.3                | 0                 | 8.6    | 12.8   | 16.0   | 19.6   | 22.5   | 25.4   | $4.0776 \times 10^{-5}$                    |
| 0.3                | 0.1               | 7.0    | 11.6   | 15.4   | 18.8   | 21.6   | 24.0   | $4.1643 \times 10^{-5}$                    |
| 0.3                | 0.2               | 6.5    | 10.5   | 13.8   | 16.8   | 19.4   | 21.8   | $3.7255 \times 10^{-5}$                    |

以受造壁性能控制的压裂液滤失系数  $C_w$  作为

压裂综合滤失系数  $C$ 。由表 2 可知,当瓜尔胶质量分数由 0.4% 降至 0.3%,其滤失量明显增大。瓜尔胶质量分数降低,交联所形成的网络结构强度下降,容易失水,故滤失量增大。对于质量分数为 0.3% 瓜尔胶,当纤维质量分数增至 0.2% 时,纤维的引入使瓜胶网络结构更稳定,滤失量有所减小,故滤失系数也有所下降。

## 2.4 伤害性能评价

### 2.4.1 残渣质量浓度的测定

氧化还原破胶体系适用于以瓜尔胶为代表的水基压裂液,以过硫酸铵为破胶剂可使压裂液中的交联冻胶发生化学降解,由大分子变成小分子,有利于破胶后返排<sup>[8]</sup>,减少对地层的伤害。其破胶后,在破胶液中含有一定量的残渣。由于残渣的存在,导致孔隙堵塞、压裂液返排难度增大等问题。可降解酯类纤维的加入,在施工结束后,纤维缓慢水解,主链无规断裂,释放酸类单体,降低压裂液的 pH,破坏交联环境,有利于压裂液返排,同时在支撑剂孔隙中不留有任何残渣。对于瓜胶质量分数为 0.3% 的体系,0.2% 纤维的加入可使残渣质量分数由 316 mg/L 降为 160 mg/L。

### 2.4.2 对岩心伤害率评价

岩心渗透率的伤害率是评价压裂液性能好坏的重要标准之一,反映压裂液在破胶之后对地层伤害的大小。测定了煤油在压裂液破胶液通过岩心前后的渗透率,进而求得岩心渗透率的伤害率。结果如表 3、表 4 所示。

表 3 岩心以及煤油物性参数

| 岩心             |                |                              |           | 煤油  |   |
|----------------|----------------|------------------------------|-----------|---|---|
| 长度 $L$ /<br>cm | 直径 $d$ /<br>cm | 渗透率 $K$ /<br>$\mu\text{m}^2$ | 孔隙<br>度/% | 密度 $\rho$ /<br>( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) | 黏度 $\mu$ /<br>( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ) |
| 3.060          | 2.510          | $57.4 \times 10^{-3}$        | 16.6      | 0.7224  | 1.2669                                      |

表 4 岩心渗透率的伤害率测定

| 是否含纤维 | 流量/<br>( $\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 注前 $K$ /<br>$\mu\text{m}^2$ | 注后 $K$ /<br>$\mu\text{m}^2$ | 伤害率 $R$ /<br>% |
|-------|--|-----------------------------|-----------------------------|----------------|
| 不含纤维  | 0.12144                                    | 0.005546                    | 0.004578                    | 17.45          |
| 含纤维   | 0.03152                                    | 0.004851                    | 0.004254                    | 12.31          |

由表 4 可知,加入纤维后,破胶液对岩心渗透率的伤害率有所减小。这是由于一方面,纤维的引入,降低了压裂液破胶液中的残渣质量浓度;另一方面,纤维的引入,形成有效的网络结构,包裹住支撑剂及其破碎的碎屑,避免岩心孔隙被堵塞。基于以上两方面的缘故,压裂液中掺入纤维可有效减小岩心渗透率的伤害率。

## 3 结论

(1) 合成的可降解纤维 DF-1 质量分数为 0.2%,长度为 6 mm 时,加入压裂液体系可改善携砂性能;对于给定流体黏度,纤维能使支撑剂沉降速度降为原来的 1/3,携砂性能优异。

(2) 有机硼交联 0.3% HPG 压裂液,加入过硫酸铵 50 mg/L 并在 80℃ 放置 5 h 后,破胶残渣量为 315 mg/L,而加入 0.2% 可降解纤维的压裂液,破胶残渣量减至 160 mg/L;同时岩心伤害率也由 17.45% 降至 12.31%;在 70℃、170  $\text{s}^{-1}$  下剪切 40 min,其黏度仍保持在 70  $\text{mPa}\cdot\text{s}$  以上,抗剪切性能良好,可满足现场施工需求。

## 参考文献

- [1] Bulova M, Nosova K, Willberg D, *et al.* Benefits of the novel fiber-laden low-viscosity fluid system in fractureing low-permeability tight gas formations [C]. SPE 102956, 2006.
- [2] Qasem Dashti, Hai Liu, Todd Cirrincione, *et al.* Combination of chemical diverters and degradable fiber technology enhances the success of stimulation in complex carbonate environments [C]. SPE 123827, 2009.
- [3] Shi Yang, Zhou Fujian, Yang Xianyou, *et al.* Laboratory study and field application of fiber-based fracture reorientation technology [C]. SPE 16736, 2013.
- [4] 刘玉婷,管保山,刘萍,等. 纤维对压裂液携砂能力的影响 [J]. 油田化学, 2011, 29(1): 75-78.
- [5] 周林刚, 纤维加砂压裂工艺研究及应用 [J]. 西部探矿工程, 2010, 11: 92-95.
- [6] 廖波兰, 卢亚平. 纤维压裂液性能的基础性研究 [J]. 矿冶, 2014, (23) 1: 37-42.
- [7] 徐春梅, 低伤害压裂液用疏水缔合水溶性聚合物/表面活性剂复合体系的研究 [D]. 成都: 西南石油学院, 2004.
- [8] 王海荣, 张金生, 李丽华, 等. 水基压裂液性能影响因素的研究 [J]. 现代化工, 2014, (34) 8: 95-97. ■