

适于湘西北页岩储层的携砂液的性能实验研究

张政^{1,2}, 曹函^{1,2,3}, 王天一^{1,2}, 倪准林^{1,2}

(1. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南长沙 410083; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083; 3. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川成都 610500)

摘要: 湘西北页岩气储层致密, 具有低孔、低渗等特点, 需要对储层进行压裂改造, 而携砂液的携砂能力实验, 对其性能进行了研究。研究表明: 携砂液属于假塑性流体, SDBS 浓度为 0.03% 时, 其流性指数最小, 稠度系数最大, 而且结构粘度相对其流阻比值最大, 适合于湘西北页岩储层压裂改造; 携砂液粘弹性携砂能力与其结构粘度有关, 而且结构粘度(η_s)与沉降速率(v)满足 $v = -0.016\eta_s + 2.304$ 。

关键词: 湘西北页岩储层; 携砂液; 结构粘度; 粘弹性携砂

中图分类号: TE371 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2018)10-0083-04

Experimental Study on Performance of Proppant-carrying Fluid Based on Shale Gas Reservoir in North-western Hunan/ ZHANG Zheng^{1,2}, CAO Han^{1,2,3}, WANG Tian-yi^{1,2}, NI Zhun-lin^{1,2} (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Changsha Hunan 410083, China; 2. School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China; 3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichun 610500, China)

Abstract: Shale gas reservoirs in the northwestern Hunan are dense, with low porosity and low permeability, and it is necessary to fracture the reservoir. The proppant-carrying capacity of the fracture fluid is the key to successful fracturing. In view of the characteristics of shale gas reservoirs in northwestern Hunan, the rheological properties and viscoelastic sand-carrying experiments were conducted to optimize the concentration of SDBS used as the main sand-carrying medium. The results show that the proppant-carrying fluid belongs to pseudo plastic fluids. When the concentration of SDBS is 0.03%, it provides the smallest fluidity index, the largest consistency coefficient, and the largest ratio of the structural viscosity/the flow resistance, and is ideal for the shale reservoir fracturing in the northwestern Hunan. The viscoelastic sand carrying capacity of the proppant-carrying liquid is related to its structural viscosity, and the structural viscosity (η_s) and precipitation rate (v) satisfy $v = -0.016\eta_s + 2.304$.

Key words: shale reservoir in the north-western Hunan; proppant-carrying fluid; structural viscosity; viscoelastic carrying

由于页岩孔隙度和渗透率极低, 开采时须进行压裂改造, 而水力压裂技术是页岩气开采的核心技术^[1], 支撑剂在裂缝中的铺展质量是实现页岩气藏压裂增产的关键, 然而携砂液对支撑剂的悬浮和运移能力直接影响支撑剂的铺置^[2-3]。除此之外, 清洁压裂液通过表面活性剂分子在水溶液中形成胶束进而相互缠绕形成了网状结构, 靠其粘弹性携砂, 能有效控制裂缝高度, 被广泛应用于低渗储层压裂改造^[4]。国内外学者对其进行了大量的研究。Baker Hughes 公司^[5]和 BJ Service 公司^[6-7]相继研制了

耐高温且具有较强携砂能力的清洁压裂液。卢拥军等^[8]针对吉林油田油藏特点, 优化了一种由 VES-70 表面活性剂和 A-25 粘土稳定剂组成的清洁压裂液配方体系。陈馥等^[9]设计并合成的阴离子表面活性剂 VES-J 与水杨酸钠的水溶液具有较好的粘弹性、耐剪切和携砂能力。丁昊明等^[10]开发了一种新型的两性离子表面活性剂压裂液体系, 该体系适合油藏温度不超过 120 °C 的低渗储层改造^[12]。但是目前国内学者对适于湘西北页岩储层的浆液的研究极少, 尤其是携砂液。冯科玮, 曹函等^[13]研究了

收稿日期: 2018-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目“含煤层气储层物性与压裂液微观特性动态耦合作用机理研究”(编号: 41302124); “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室开放基金项目“多尺度下页岩气储层脉冲水力压裂造缝时空效应研究”(编号: PLN201607)

作者简介: 张政, 男, 回族, 1993 年生, 硕士研究生在读, 从事非常规能源钻采等方面的研究工作, 湖南省长沙市岳麓区麓山南路 932 号中南大学校本部地学楼 305 室, 175011077@csu.edu.cn。

通信作者: 曹函, 女, 汉族, 1982 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事岩石力学和非常规能源钻采等方面的教学与科研工作, 湖南省长沙市岳麓区麓山南路 932 号中南大学校本部地学楼 100 室, hancock@csu.edu.cn。

pH 值对适于湘西北页岩气储层的 SDBS 压裂液性能的影响。彭灿威,曹函等^[14]研究了不同浓度、pH 值 SDBS 压裂液对湘西北页岩储层的影响,得出通过调整 SDBS 浓度和 pH 值对提高页岩气开采效果是可行的。田明锦,孙平贺等^[15]研究了固结钻井液对湘西北页岩气储层的护壁机理,得出液态离子固结剂有助于增强钻井液维护井壁稳定的能力。

因此,笔者前往湖南常德理公港镇等地采集所属目标层(图 1)的硅质页岩岩样,对其进行了全岩矿物分析,在此基础上,以 SDBS 为主要携砂介质,从结构粘度和粘弹性携砂能力两个角度对适于湘西北页岩储层的携砂液进行了研究。

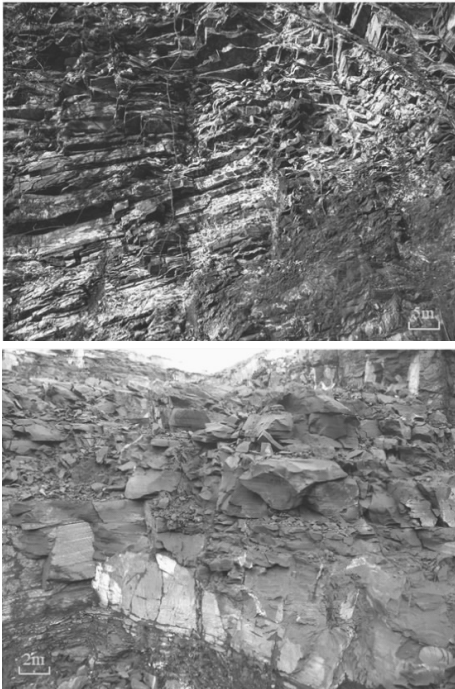


图 1 湘西北牛蹄塘组页岩野外露头

1 地质背景

湘西北位于扬子准地台东南缘上扬子台褶带与江南地轴结合部位的武陵褶断带内,经历了多期次地壳构造运动,褶皱和断裂构造发育^[15]。湘西北下寒武统自下而上依次分为牛蹄塘组、杷榔组和清虚洞组^[16],牛蹄塘组岩性以黑色页岩、炭质页岩、黑色硅质页岩为主,具有分布广泛,沉积厚度大的特点,具有良好的页岩气形成基础条件^[17]。对目标层位的硅质页岩进行全岩矿物成分分析,结果显示其矿物组成为:石英 27.62%,长石 4.75%,白云石 35.10%,云母 12.64%,黄铁矿 17.53%,锐钛矿 2.36%。

从分析结果可以看出:以石英、白云石和长石为

主的脆性矿物占据相当的比重,其平均含量为 67.47%,其次,黄铁矿平均含量为 17.53%,云母平均含量为 12.64%,此外,还含有少量的锐钛矿,平均含量约为 2.36%。从而可得出该硅质页岩的脆性矿物含量高,利于后期水力压裂对于页岩气储层的改造,为页岩气的开采提供运移通道。但其储层较为致密,具有孔隙度小、渗透率低等显著特点^[18-20],这就要求用于水力压裂的携砂液须具有良好的支撑剂悬浮和运移能力,保证裂缝在开采过程中具有较为稳定的导流能力,同时具有较低的施工摩阻。

2 实验设计

2.1 材料和仪器

实验材料:聚丙烯酰胺(PAM);羧甲基纤维素素(CMC);氯化钾(KCl),分析纯;十二烷基苯磺酸钠(SDBS),分析纯;陶粒支撑剂,20/40目。实验仪器:ZNN-D6六速旋转粘度计。

2.2 流变性能实验

在 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 下,量取实验所需的试剂制备粘弹性携砂液,确保溶液内无气泡后,采用 ZNN-D6 六速旋转粘度计测定携砂液在 1022 s^{-1} 、 511 s^{-1} 、 340.7 s^{-1} 、 170.3 s^{-1} 、 10.22 s^{-1} 、 5.11 s^{-1} 转速下的粘度。配方为:0.02%~0.1% SDBS+0.04% CMC+0.08% PAM+0.1% KCl。

2.3 粘弹性携砂实验

携砂液静态携砂实验根据美国石油学会制定的《支撑剂静态悬浮实验》标准开展^[21],将制备好的携砂液装入带刻度的量筒中,将陶粒支撑剂放入携砂液中,待支撑剂沉降到压裂液液面以下 3.00 cm 处时,开始记录,记录支撑剂沉降至量筒底部所用时间 $t(\text{s})$ 以及沉降高度 $h(\text{cm})$ 。沉降速度根据式(1)计算。实验所用陶粒支撑剂参数为:粒径 0.85 mm,球度 0.85,圆度 0.87,体积密度 1.72 g/cm^3 。

$$v = h/t \quad (1)$$

式中: v ——支撑剂下沉速度,cm/s; h ——支撑剂沉降高度,cm; t ——支撑剂沉降时间,s。

3 结果与讨论

3.1 SDBS 浓度对流变性的影响

携砂液在携带支撑剂到达储层的过程中,始终处于动态的流变状态。携砂液的流变性能与其内部微结构及所含粒子间的相互作用有关^[22],而且其流变性能与其携砂能力、支撑剂铺置和造缝紧密关联,

是压裂设计时的重要指标^[23]。因此,对其流变性能的评价必不可少。针对于湘西北页岩储层的特点,主要考察了其结构粘度和粘弹性携砂能力。

3.1.1 SDBS 浓度对流性指数和稠度系数的影响

流变学上,流体的流型一般分为牛顿流体和非牛顿流体两种。而实际中大多数流体都属于非牛顿流体,描述非牛顿流体通常使用幂流模型。图 2 为不同 SDBS 浓度下携砂液流性指数和稠度系数的关系曲线。

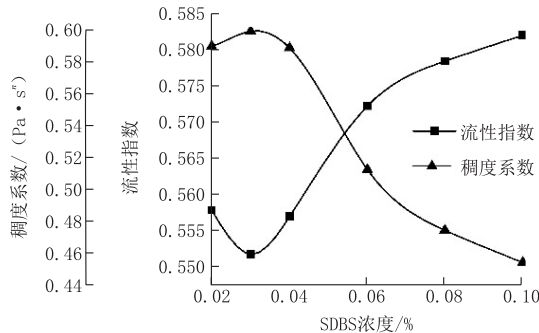


图 2 不同 SDBS 浓度下携砂液流性指数和稠度系数的关系曲线

从图 2 可看出:携砂液流性指数介于 0~1,由此得出其属于假塑性流体,而且当 SDBS 浓度 < 0.03% 时,SDBS 浓度增加,携砂液增稠效果明显,其内部结构弹性增强,流动性下降,假塑性流变特征显著。在 0.03% 时,流性指数最小,稠度系数最大,有利于撑开较宽的裂缝,同时可将支撑剂运送到预定位置,使裂缝闭合后具有较高的导流能力,适合于湘西北页岩气储层的压裂改造。由此可知,0.03% 是表面活性剂 SDBS 的理想用量。

3.1.2 SDBS 浓度对结构粘度/塑性粘度比值的影响

粘弹性表面活性剂携砂液依靠柔性棒状或蠕虫状胶束相互缠绕所形成的高粘弹性空间网状结构而实现造缝和支撑剂的携带^[24],而结构粘度是由于流体空间网架结构所引起的,可用于从粘度的角度描述携砂液空间网架结构。但是在考虑提高粘弹性的同时,还需综合考虑携砂液流阻。对此,结合湘西北页岩气储层特点,用结构粘度和塑性粘度比值这一参数去选择适合其储层的携砂液。图 3 为不同 SDBS 浓度下携砂液结构粘度和塑性粘度的关系曲线。

从图 3 可以看出:随着 SDBS 浓度的增加,体系的塑性粘度降低,由于表面活性剂分子产生的独特定向排列。在 SDBS 浓度为 0.03% 前,结构粘度增大,在 SDBS 浓度为 0.03% 时出现峰值。由于携砂液中表面活性剂分子聚集形成线性的蠕虫状胶束,随着 SDBS 浓度的增加,蠕虫状胶束数量增加,由于溶液中氯化钾的存在,平衡了体系电荷,压缩了聚集

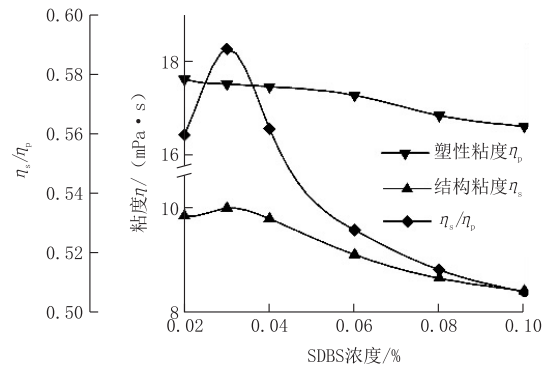


图 3 不同 SDBS 浓度下携砂液结构粘度和塑性粘度的关系曲线

体的双电层结构,体系中的氯离子使得胶束被压缩变细长,致使胶束相互连接、缠绕,使得体系内部形成空间网状结构,表现出一定的粘弹性,结构粘度增加;当 SDBS 浓度为 0.03% 时形成的空间网架结构最为稠密,结构粘度出现峰值;继续增加 SDBS 浓度,体系中过多聚集体的形成,使得空间网架结构开始被拆散,表现出结构粘度急剧下降。还可看出,结构粘度与塑性粘度的比值随着 SDBS 浓度的增加先增后减,在浓度为 0.03% 时,相对流阻而言,比值最优,满足携砂液低流阻高携砂能力的要求。

3.2 粘弹性携砂分析

携砂液应具备较好的携砂能力,将支撑剂带到裂缝中,提高地层裂缝的导流能力^[25]。支撑剂在其中的沉降速度将直接影响到支撑剂裂缝的几何尺寸和裂缝导流能力,从而影响到压裂的最终效果^[26]。而有研究表明,粘弹性表面活性剂携砂液的携砂能力受其内部结构和弹性性质的影响^[27]。本文是采用沉降速率与结构粘度的定量关系来优选携砂剂浓度的。图 4 为 SDBS 浓度与结构粘度和沉降速率的关系曲线。图 5 为结构粘度与沉降速率的关系曲线。

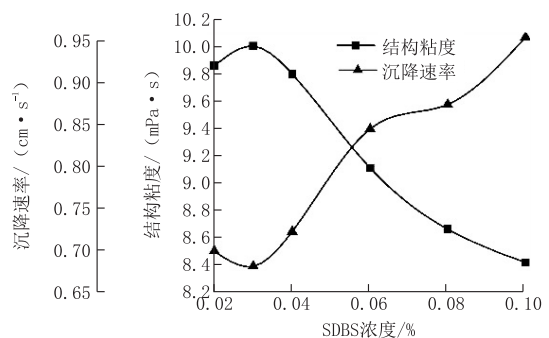


图 4 不同 SDBS 浓度下携砂液结构粘度和沉降速率的关系曲线

从图 4 可以看出:沉降速率和 SDBS 的浓度关系显著。当 SDBS 浓度 < 0.03% 时,SDBS 浓度增加,体系内蠕虫状胶束相互缠绕、连接形成的粘弹性

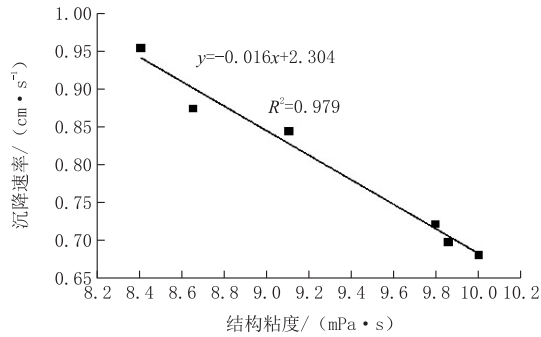


图5 结构粘度与沉降速率的关系曲线

空间网架结构强度增强,即体系的粘弹性和抗应变变能力增加,表现出结构粘度增加,支撑剂沉降速率下降。随着 SDBS 浓度增加,过多聚集体的形成以及体系内部的排斥作用增强,粘弹性空间网架结构受到破坏,其结构强度下降,粘弹性下降,结构粘度减小,支撑剂沉降速率增大。所以,从结构粘度和沉降速率来看,0.03%为 SDBS 最佳浓度,最适合于湘西北页岩气储层的压裂改造。

从图 5 可以看出:携砂液的结构粘度与沉降速率呈现出线性关系。从拟合效果和图 3 可知:结构粘度只是影响其静态悬砂性能的重要因素,并非决定性因素,其携砂能力还与其内部粘弹性结构的强度有关。

4 结论

本文针对湘西北页岩气储层低孔、低渗等特点,以 SDBS 为主要携砂介质,主要从结构粘度和粘弹性携砂能力两个角度对适合于湘西北页岩储层的携砂液体系进行了实验研究,所得结论如下。

(1)携砂液属于假塑性流体,在 SDBS 浓度为 0.03%时,携砂液的流性指数最小,稠度系数最大,有利于将支撑剂携带到预定位置,适合于湘西北页岩气储层的压裂改造;

(2)随着 SDBS 浓度的增加,携砂液塑性粘度降低,减小了其在流动过程中的流阻,同时结构粘度先增后减,在浓度为 0.03%时,结构粘度相对于携砂液流阻比值最优,一定程度上降低了压裂改造时对泵送设备的要求,符合湘西北页岩气储层对压裂改造的要求;

(3)携砂液的结构粘度是影响粘弹性携砂液的携砂能力的重要因素,而且结构粘度(η_s)与沉降速率(v)呈现出线性关系,二者满足 $v = -0.016\eta_s + 2.304$ 。

参考文献:

[1] 张东晓,杨婷云.页岩气开发综述[J].石油学报,2013,34(4):

- 792—801.
- [2] Harris P C, Morgan R G, Heath S J. Measurement of Proppant Transport of Fracture Fluids[M]. 2005.
- [3] 陶红胜,王满学,杳毅,等.低黏度清洁压裂液黏弹性与悬砂能力的关系[J].油田化学,2015,32(4):494—498.
- [4] 赖小娟,宫米娜,崔争攀,等.低渗透油气储层压裂液的研究进展[J].精细石油化工,2015,32(4):77—80.
- [5] WILLIAMS C, MCLFRESH P, KHODAVERDIAN M, et al. Non-ionic fracture fluids can recover 90% permeability after proppant run[J]. Offshore, 2001, 61(10):76—80.
- [6] DILULLO G, RAE P, AHMAD A. Well service fluid and method of making and using the same[P]. US7326670, 2004.
- [7] DILULLO G, AHMAD A, RAE P, et al. Toward zero damage: new fluid points the way[Z]. SPE 69453, 2001.
- [8] 刘新全,易明新,赵金珏,等.黏弹性表面活性剂(VES)压裂液[J].油田化学,2001,18(3):273—277.
- [9] 陈馥,李圣涛,刘彝.压裂用黏弹性表面活性剂 VES-J 的合成[J].钻井液与完井液,2008,(4):37—38.
- [10] 丁昊明,戴彩丽,由庆,等.耐高温 FRK-VES 清洁压裂液性能评价[J].油田化学,2011,28(3):318—322.
- [11] 严志虎,戴彩丽,赵明伟,等.清洁压裂液的研究与应用进展[J].油田化学,2015,32(1):141—145.
- [12] 冯科玮,曹函,施皆能,等.pH 值对适于页岩气储层的 SDBS 压裂液性能的影响研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(12):13—17.
- [13] 彭灿威,曹函,冯科玮,等.不同浓度、pH 值 SDBS 压裂液对页岩储层特性影响研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):188—192.
- [14] 田明锦,孙平贺,曹函,等.固结钻井液对湘西北页岩气储层的护壁机理研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):193—196.
- [15] 张琳婷,郭建华,焦鹏,等.湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩气藏形成条件与资源潜力[J].中南大学学报(自然科学版),2014(4):1163—1173.
- [16] 湖南省地质矿产局.湖南省区域地质志[M].北京:地质出版社,1988:41—61.
- [17] 林拓,张金川,包书景,等.湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩气井位优选及含气性特征——以常页 1 井为例[J].天然气地球科学,2015,26(2):312—319.
- [18] 何伟,张金川,李莉,等.湘西北常页 1 井下寒武统牛蹄塘组页岩气储层特征[J].中国煤炭地质,2015,(1):31—39.
- [19] 梁峰,朱炎铭,马超,等.湘西北地区牛蹄塘组页岩气储层沉积展布及储集特征[J].煤炭学报,2015,40(12):2884—2892.
- [20] 肖正辉,王朝晖,杨荣丰,等.湘西北下寒武统牛蹄塘组页岩气储集条件研究[J].地质学报,2013,87(10):1612—1623.
- [21] Dept A P I P. API recommended practices for standard procedures for evaluation of hydraulic fracturing fluids[M]. American Petroleum Institute, 1983.
- [22] 祝成.清洁压裂液的配制及性能研究[D].四川成都:西南石油大学,2010.
- [23] 黄趾海.新型滑溜水压裂液研究[D].四川成都:西南石油大学,2014.
- [24] 曹学军,何兴贵.国外粘弹性表面活性剂压裂液研究进展及应用展望[J].天然气勘探与开发,2014,37(2):76—80.
- [25] 孙哈森,罗陶涛,刘春琴,等.煤层气井用粘弹性表面活性剂压裂液性能评价[J].石油钻采工艺,2010,32(4):112—115.
- [26] 张锋三,沈一丁,任婷,等.磺酸型表面活性剂清洁压裂液的性能研究[J].油田化学,2016,33(1):25—28.
- [27] 李曙光,郭大立,赵金洲,等.表面活性剂压裂液机理与携砂性能研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2011,33(3):133—136.