

CO₂ 泡沫压裂液粘弹性与触变性的表征研究^{*}

卢拥军^{1,2} 方波² 江体乾² 房鼎业² 舒玉华¹ 张汝生¹

(1. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院 2. 华东理工大学化工学院)

卢拥军等.CO₂ 泡沫压裂液粘弹性与触变性的表征研究. 天然气工业, 2005; 25(7): 78~80

摘要 文章针对低效油气藏存在低压、水敏等问题, 开发了 CO₂ 泡沫压裂液技术。该压裂液以气液两相组成, 外相为液态交联瓜尔胶, 内相为气态二氧化碳。实验仪器为控制应力流变仪, 分析了 CO₂ 泡沫压裂液的流变学特性, 包括泡沫流体的粘弹性和触变性, 并采用粘弹—触变性本构方程描述典型的泡沫压裂液流体的触变环, 采用广义 Maxwell 粘弹性本构方程描述泡沫压裂液流体的粘弹性。泡沫压裂液同时具有剪切变稀、粘弹性和触变性, 采用 5 个参数粘弹触变性本构方程可描述典型的泡沫压裂液流体的触变环, 用广义 Maxwell 粘弹性本构方程可描述泡沫压裂液流体的粘弹性, 模型计算值与实验值吻合良好, 本构方程具有良好的适应性。

关键词 二氧化碳 泡沫压裂 粘弹性 方程 实验

一、引言

泡沫压裂技术是油气藏压裂改造的重要措施之一, 在改善压裂液流变性能、降低滤失、加快压裂液返排和低伤害方面作用显著^[1~2]。CO₂ 泡沫压裂液是泡沫压裂施工的重要工作液, 主要由交联高分子多糖凝胶(如羟丙基瓜尔胶)和二氧化碳组成。泡沫压裂液为多相态非牛顿流体^[3], 具有复杂的流变特性(如剪切变稀、粘弹性和触变性等), 并受多种因素的影响, 包括压力、温度、泡沫质量、剪切历史、化学组成和工程条件等。目前, 还未见泡沫压裂液体系的本构方程报道。笔者着重考察泡沫压裂液流体的触变性和粘弹性, 并采用适当的本构方程描述其触变性和粘弹性。

二、实验部分

1. 主要材料与仪器

羟丙基瓜尔胶, 工业一级品, 山东金岭集团公司; FL-100 起泡剂、AC-8 酸性交联剂、BCL-61 有机硼交联剂和 DL-12 助排剂, 中国石油廊坊分院中试厂; 氯化钾(KCl), 工业品; RS-75 控制应力流变仪, 德国 Haake 公司。

2. 压裂液配方体系

泡沫压裂液水相以 0.7% 羟丙基瓜尔胶、1.0% KCl、0.75% FL-100、0.3% DL-12、1.5% AC-8 (或 0.3% BCL-81) 和适度的破胶剂组成。气相介质为 CO₂。在特殊的泡沫发生器中, 形成以交联植物胶水溶液为外相, CO₂ 气体为内相的不同泡沫质量的泡沫压裂液流体。

3. 实验方法

使用 RS-75 控制应力流变仪, 在流动模式下, 将剪切速率从 0.01 上升到 200 s⁻¹, 然后连续降低到 0.01 s⁻¹, 测得泡沫压裂液的触变环(剪切应力与剪切速率曲线); 在动态振荡模式下将振荡角频率从 0.01 rad/s 逐渐增加到 100 rad/s, 测得泡沫压裂液的储能模量(G')和损耗模量(G'')随角频率变化曲线。

三、酸性交联泡沫流体的触变环及其表征

典型泡沫压裂液的触变环如图 1-a、b、c 所示。由图可知, 泡沫压裂液同时具有粘弹性和触变性, 为粘弹—触变性流体。对粘弹—触变性流体尝试用如下 5 参数时变性本构方程表征^[4]。

^{*} 本文为国家“十五”科技攻关课题“低渗透油田增产改造关键技术研究”(2003BA613A-07)内容。

作者简介: 卢拥军, 1965 年生, 高级工程师; 1989 年毕业于西南石油学院油田化学专业, 2001 和 2004 年分获华东理工大学化学工程专业硕士和化学工艺专业博士学位, 现从事石油天然气增产改造方面研究与应用。地址: (065007) 河北省廊坊市 44 号信箱。电话: (010) 69213437。E-mail: lyj222@263.net

$$\tau = \eta \dot{\gamma} = \mu \dot{\gamma} + G \int_0^t \dot{\gamma} dt + C_1 B \dot{\gamma}^n \exp\left(-C_1 \int_0^t \dot{\gamma}^n dt\right) \quad (1)$$

式中： τ 为剪切应力； $\dot{\gamma}$ 为剪切速率； η 为表观粘度； G 为弹性模量； μ 为粘性参数； C_1 为聚集体解离速率常数； n 为聚集体解离速率方程中关于 $\dot{\gamma}$ 的级数； B 是表征聚集体触变特性的一个参数， $B = \xi \beta$ ，其中 β 为

体系中聚集体的平衡浓度， ξ 为触变系数。

ξ 按下式定义：

$$\pi = -\xi \frac{d\beta}{dt} \quad (2)$$

式中： π 为用于聚集体解离的应力； β 为体系中聚集体的浓度。

若对流体施加三角波剪切速率，对上行线：

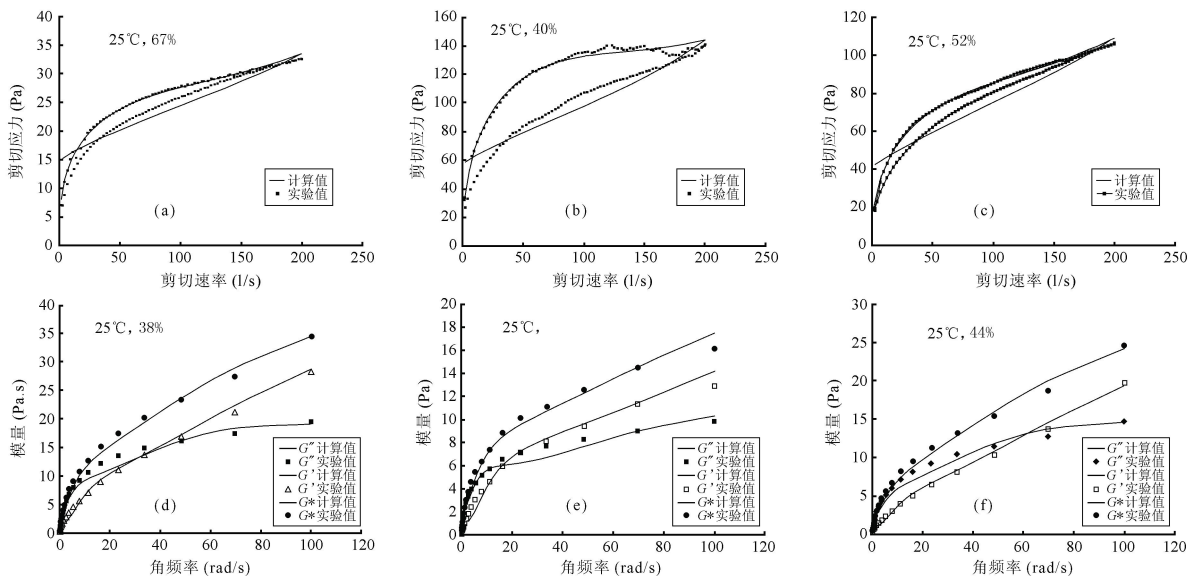


图1 0.5%、0.7%羟丙基瓜胶有机硼中性、羟丙基瓜尔胶酸性交联泡沫触变特性及流体粘弹性对振荡频率的依赖性曲线

$$\tau = \mu \dot{\gamma} + C_1 B \dot{\gamma}^n \exp\left[-\frac{C_1 \dot{\gamma}^{n+1}}{K(n+1)}\right] + \frac{C_2 \dot{\gamma}^2}{2K} \quad (0 \leq t \leq t_1) \quad (3)$$

对下行线：

$$\tau = \mu \dot{\gamma} + C_1 B \dot{\gamma}^n \exp\left[-\frac{C_1}{K(n+1)} [2(Kt_1)^{n+1} - \dot{\gamma}^{n+1}]\right] + \frac{G}{2K} [2(Kt_1)^2 - \dot{\gamma}^2] \quad (t_1 < t \leq 2t_1) \quad (4)$$

式中： K 为剪切速率上升速率常数； t_1 为剪切速率上升时间。

式(3)、式(4)即为具有粘弹性和触变性流体滞后环的本构方程。参数 μ 、 G 、 C_1 、 B 、 n 可使用Powell最优化方法进行参数估值。

典型酸性交联剂交联泡沫压裂液的触变环与模拟计算值对比如图1-a、b、c所示。由图可见，交联泡沫流体为粘弹触变性流体，具有显著的触变环。首次采用5参数变时变性本构方程模拟表明，在较宽的剪切速率范围内，计算值与实验值吻合良好。模型参数值如表1所示。

对参数 G 、 μ 、 B 而言，0.7%羟丙基瓜尔胶酸性交联泡沫流体大于0.5%羟丙基瓜尔胶酸性交联泡沫流体，并大于0.5%羟丙基瓜胶有机硼中性交联泡沫体系；而对参数 C_1 而言，0.7%羟丙基瓜尔胶酸性交联泡沫流体则小于0.5%羟丙基瓜尔胶酸性交联泡沫体系，并小于0.5%羟丙基瓜胶有机硼中性交联泡沫体系，说明模型参数合理。

四、泡沫流体的粘弹性及其表征

典型泡沫流体的粘弹性指标随角频率的变化关系如图1-d、e、f所示。

为表征其粘弹性，采用广义Maxwell本构方程^[5]。该本构方程在小振幅震荡流场中的解为：

$$G' = \sum \frac{g_i \lambda_i \omega}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (5)$$

$$G'' = \sum \frac{g_i \lambda_i \omega^2}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \quad (6)$$

$$G^* = (G'^2 + G''^2)^{1/2} \quad (7)$$

$$\lambda_i = \eta / g_i \quad (8)$$

式中： g_i 为广义Maxwell模型中第 i 个弹性元件的

弹性模量; η 为第 i 个粘性元件的粘度; λ 为第 i 个 Maxwell 元件的松弛时间。

用式(5)~式(8)描述泡沫流体的粘弹性,取 $i=1,3$ 。结果分别如图一d、e、f 所示。由图可见,计算

值与实验值吻合良好,说明该模型可表征材料的粘弹性。模型参数示于表 2 中,泡沫压裂液存在松弛时间谱。研究表明,单纯使用 Maxwell 线性粘弹性模型,不能描述各模量随频率的变化曲线。

表 1 0.5% 羟丙基瓜胶交联泡沫压裂液触变环的特性参数值

泡沫压裂液组成	G (Pa)	μ (Pa·s)	G_i (s ⁻¹)	B (Pa·s)	n
0.5% 羟丙基瓜胶有机硼中性交联泡沫流体(25℃,67%)	2.35×10^{-4}	7.711×10^{-2}	1.02×10^{-3}	6985.4	0.307
0.7% 羟丙基瓜胶酸性交联泡沫流体(25℃,40%)	9.250×10^{-4}	0.312	8.374×10^{-4}	32543	0.3827
0.5% 羟丙基瓜胶酸性交联泡沫流体(25℃,52%)	6.744×10^{-4}	0.317	1.004×10^{-3}	16609	0.357

表 2 用广义 Maxwell 方程描述泡沫流体粘弹性的模型参数

泡沫压裂液组成	G_i (Pa)	λ (s)	g_2 (Pa)	λ (s)	g_3 (Pa)	λ (s)
0.7% 羟丙基瓜胶泡沫流体	36.256	1.003×10^{-2}	10.636	1.132×10^{-1}	3.556	1.90
0.7% 瓜胶水溶液	20.613	6.512×10^{-3}	8.084	9.410×10^{-2}	2.209	1.85
0.5% 羟丙基瓜胶泡沫流体	28.00	9.445×10^{-3}	6.162	1.047×10^{-1}	2.027	1.550

五、结 论

泡沫压裂液为同时具有剪切变稀、粘弹性和触变性的非牛顿流体。首次采用 5 参数粘弹触变性本构方程可描述典型的泡沫压裂液流体的触变环,模型计算值与实验值吻合良好。用广义 Maxwell 粘弹性本构方程可描述泡沫压裂液流体的粘弹性,证明泡沫压裂液流体具有松弛时间谱。

参 考 文 献

1 Harris P C. Foamed fracturing fluid. US5990052, 1999

2 卢拥军,陈彦东,曾斌等. CO₂ 泡沫压裂液体系研究与应用. 见:2002 流变学进展. 北京:中国科学技术出版社, 2002:329~333

3 Harris P C, Heath S J. Rheology of crosslinked foams. SPE 28512, 1994

4 Fang Bo, Jiang Tiqian. A novel constitutive equation for viscoelastic-thixotropic fluids and Its application in the characterization of blood hysteresis loop. Chinese J Chem Eng, 1998; 6(3): 264-270

5 江体乾. 工业流变学. 北京:化学工业出版社, 1995

(收稿日期 2005-05-11 编辑 韩晓渝)