

页岩气藏清水压裂减阻剂优选与性能评价

肖博¹,张士诚¹,雷鑫¹,周彤¹,曾博²,陈来军³

(1.中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室,北京 102249; 2.中国石油勘探开发研究院廊坊分院,河北廊坊 065007; 3.西部钻探国际钻井公司,新疆乌鲁木齐 830000)

摘要:针对页岩气藏清水压裂时由于施工排量大,导致液体所受剪切速率较高的现状,利用大型摩阻测定仪,对4种阴离子型减阻剂进行室内评价。结果表明,4种减阻剂的降阻效果均随着剪切速率的增大而趋于变好,其中XT-65B的降阻效果最好。通过分析剪切速率、剪切时间和剪切路径等对减阻剂降阻效果的影响可知:随着剪切速率的增加,减阻剂降阻率呈下降趋势;在低速剪切(500 s^{-1})条件下,减阻剂降阻率对剪切时间不敏感,而在高速剪切($5\,000\text{ s}^{-1}$)时,减阻剂降阻率随剪切时间的增加而急剧下降;不同剪切路径对减阻剂降阻效果影响显著,较高的剪切速率会对减阻剂分子结构造成不可恢复的伤害。由电子显微镜对XT-65B减阻剂剪切前后的分子结构微观观测结果可见:当剪切速率较低(500 s^{-1})时,分子结构被轻微破坏;当剪切速率较高($5\,000\text{ s}^{-1}$)时,分子结构破坏较为严重。

关键词:页岩气藏 清水压裂 减阻剂 性能评价 降阻率 高速剪切

中图分类号: TE357.12

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2014)02-0102-04

页岩气藏基质渗透率极低,一般小于 $0.0001\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,通常无自然产能,须使用清水压裂液进行体积压裂^[1-3]。清水压裂液由98%~99%的清水和极少量的添加剂混配而成,与常规冻胶压裂相比,其产生的裂缝几何形态更为复杂,极易与天然微裂缝沟通,产生复杂裂缝网络,从而实现较大的压裂增产改造体积^[4-5]。为了克服低粘清水压裂液携砂不足的弱点,国外页岩气藏压裂改造通常采用高排量施工,排量一般大于 $16\text{ m}^3/\text{min}$,甚至高达 $19\sim 24\text{ m}^3/\text{min}$ ^[6-8]。在紊流流态下,管柱的沿程摩阻损失与流速的1.75~2次方成正比^[9],说明高速泵注不仅使能量损失较大,且对地面泵注设备的要求较高。为此,现场常采用在液体中添加减阻剂的方法来减小压裂液在管柱中的摩阻损失,以降低地面施工压力,从而减小施工规模^[10]。效果较好的减阻剂的降阻率高达50%~70%。常见减阻剂的成分主要是聚合物和表面活性剂。由于表面活性剂类减阻剂具有加量大和不经济等原因^[11],施工现场常采用聚合物类减阻剂,用量一般为0.01%~0.1%。根据聚合物分子水解后所呈现的电性特征,一般分为阳离子型、阴离子型和非离子型3种减阻剂。阳离子型减阻剂价格较高;要达到相同的降阻效果,非离子型

减阻剂用量要比阴离子型减阻剂高一个数量级;因此,工业上通常选用阴离子型减阻剂^[12-13]。压裂施工泵注常规冻胶压裂液时的施工排量较小^[14],而页岩气藏用清水进行压裂时,由于施工排量较大,流体在管柱内雷诺数(数量级为 $10^5\sim 10^7$)和剪切速率(约为 $500\sim 5\,000\text{ s}^{-1}$)均较大,因此,须在较高剪切速率条件下进行降阻效果评价。

1 减阻剂降阻机理

减阻剂的降阻机理非常复杂^[15-16],目前尚未完全定论。在紊流流态下,由于流体流动中的径向扰动会产生漩涡,漩涡与管壁之间的动量传递及大漩涡向小漩涡的转化均伴随着能量耗散,宏观表现为摩阻压降损失^[17]。减阻剂降阻原理的主要观点有:
①抑制紊流。减阻剂分子依靠自身粘弹性,使分子长链顺着液体流动方向延伸,利用分子间引力抵抗流体微元的扰动影响,改变流体微元作用力的大小和方向,使一部分径向力转化为轴向推动力,抑制漩涡的产生及大漩涡向小漩涡的转化,从而降低了能量损失。
②粘弹性与漩涡相互作用。湍流漩涡的一部分动能被聚合物分子吸收,以弹性能的形式

收稿日期:2013-12-03。

作者简介:肖博,男,在读博士研究生,从事油气井增产机理方面的研究。联系电话:15210878409, E-mail: victorxiao@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“3000型成套压裂装备应用技术研究及应用示范”(2011ZX05048-006-002)。

储存起来,使漩涡消耗的能量减少,从而达到降低摩擦损失的目的^[18]。

减阻剂的降阻效果取决于溶液中减阻剂分子的旋转半径和主链结构的弹性^[19]。旋转半径越大,主链弹性越强,则减阻剂分子链在溶液中运动变形能力越强,降阻效果越好。此外,分子直链长短也会对降阻效果产生影响。分子直链太短,无法实现有效降阻;若聚合物分子直链太长,在高剪切速率环境中易发生断裂,也会影响降阻效果^[15-17]。

2 减阻剂优选与性能评价

2.1 实验器材

实验材料主要包括:XT-65A,XT-65B,FS-300和RY-300共4种阴离子型聚丙烯酰胺减阻剂,其相对分子质量分别约为 700×10^4 , $1\,000 \times 10^4$, 500×10^4 和 500×10^4 ;实验时,4种减阻剂的质量分数分别为0.1%,0.1%,0.02%和0.08%。

实验仪器主要包括:YMC-1型摩阻测定仪和S360型电子显微镜。

2.2 实验方法

2.2.1 降阻效果评价方法

利用摩阻测定仪,在管径为10 mm、剪切速率分别为500,1 000,1 500,2 000,2 500,3 000,3 500,4 000,4 500和5 000 s^{-1} 的条件下,测定4种减阻剂的管柱摩阻。

2.2.2 减阻剂稳定性评价方法

为了评价减阻剂分子在高速剪切后,其结构是否遭到破坏,须进行减阻剂稳定性评价。在剪切速率递增与剪切速率递减2种剪切路径下,比较每种减阻剂的降阻效果,评价其稳定性。首先按照剪切速率由500—1 000—1 500—2 000—2 500—3 000—3 500—4 000—4 500—5 000 s^{-1} 的递增方式测定4种减阻剂的管柱摩阻;再测定剪切速率由5 000—4 000—3 000—2 000—1 000 s^{-1} 的递减方式测定4种减阻剂的管柱摩阻,对比分析各自的稳定性。

2.2.3 减阻剂剪切前后分子微观结构观察方法

利用电子显微镜观察减阻剂分子在高速剪切(5 000 s^{-1})、低速剪切(500 s^{-1})后的分子形态,并与未经剪切时的分子结构进行对比,观察不同剪切速率下减阻剂分子结构的变化。

2.3 结果与分析

2.3.1 剪切速率对降阻效果的影响

由4种减阻剂在不同剪切速率下的管柱摩阻

(图1)可以看出:4种减阻剂均有明显的降阻效果,当剪切速率较低时(500~1 500 s^{-1}),降阻效果相差不多,而在较高剪切速率下(大于2 000 s^{-1}),4种减阻剂的降阻效果开始出现分化:XT-65B的降阻效果最好,FS-300和XT-65A次之,RY-300降阻效果最差。总体而言,4种减阻剂的降阻效果随着剪切速率的增大而趋于变好。

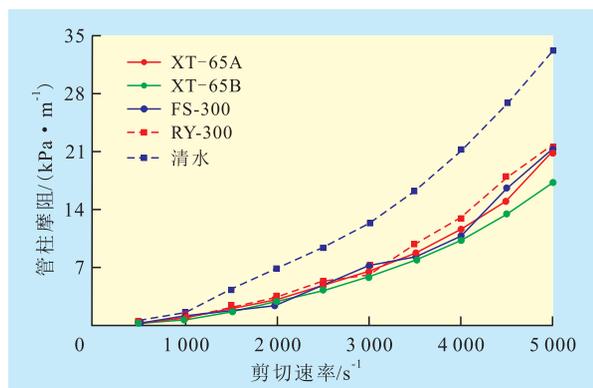


图1 4种减阻剂在不同剪切速率下的管柱摩阻

由图2可知:当剪切速率较小时(500~1 500 s^{-1}),4种减阻剂的降阻效果均较稳定,随着剪切速率的增加,降阻率均呈缓慢减小的趋势;随着剪切速率的进一步增加,尤其是当剪切速率超过4 000 s^{-1} 时,XT-65A,FS-300和RY-300的降阻率呈急剧下降趋势,而XT-65B的降阻率变化不大,保持在50%左右,效果较好。这是因为:随着剪切速率的增加,由于剪切力增大,导致部分减阻剂分子的分子链断裂,使得这部分减阻剂分子分解成为相对分子质量较小的聚合物分子,从而失去降阻的能力;XT-65B的相对分子质量是4种减阻剂中最大的,其长分子链在高速剪切中虽也会断裂,但只要分解后的分子链仍足够长,还可发挥一定的降阻作用,因此,在高剪切作用下,XT-65B表现出相对稳定的降阻能力。

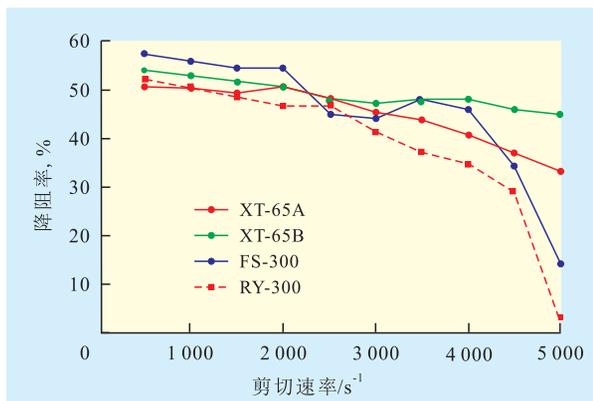


图2 4种减阻剂在不同剪切速率下的降阻率

2.3.2 剪切时间对降阻效果的影响

由4种减阻剂在不同剪切速率下的降阻率随剪切时间的变化(图3)可知:在低剪切速率下,XT-65B的降阻率基本保持稳定,其他3种减阻剂的降阻率随着剪切时间的增加均呈缓慢下降趋势;而在高剪切速率下,随着剪切时间的增加,4种减阻剂的降阻效果均迅速变差。这是因为:在低剪切速率下,减阻剂分子所受的剪切力较小,不会对降阻效果造成较大影响;而在高剪切速率下,由于减阻剂分子所受剪切力较大,随着剪切时间的增加,其分子结构所受破坏愈大,因此降阻效果愈差。

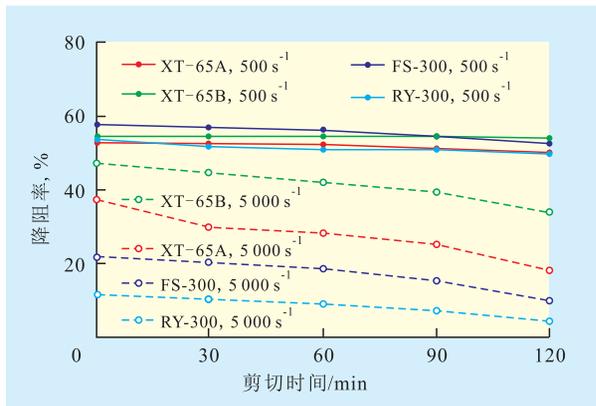


图3 不同剪切速率下4种减阻剂的降阻率随剪切时间的变化

2.3.3 剪切路径对降阻效果的影响

通过对比4种减阻剂在不同剪切路径下的降阻效果(图4)可知:与剪切速率递增路径相比,在同一剪切速率下,剪切速率递减路径中4种减阻剂的管柱摩阻均有所增加,表明减阻剂的降阻效果均呈一定程度的下降趋势;并且剪切速率越高,减阻剂降阻效果下降程度越大;经过高速剪切后,减阻剂XT-

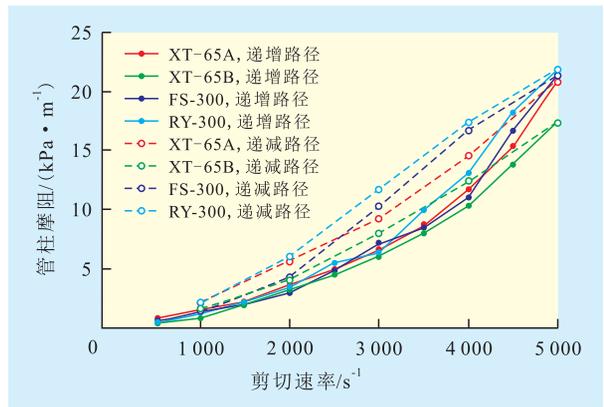


图4 不同剪切路径下减阻剂降阻效果对比

65A, FS-300和RY-300的管柱摩阻增幅较大,而XT-65B的管柱摩阻在2种剪切路径下变化不大。主要原因是:经过高速剪切后,聚合物分子结构会受到不同程度的剪切破坏,降低了减阻剂分子的旋转半径和长度,从而影响其降阻效果;即使当剪切速率逐渐减小后,被破坏的分子结构也无法得到恢复;XT-65B的分子被破坏程度小于其他3种,故其降阻效果较其他3种减阻剂稳定。

2.3.4 剪切前后分子结构的变化

综合分析实验结果,选定XT-65B作为清水压裂液体体系的减阻剂。为了明确剪切作用对减阻剂分子结构的影响,进而对其降阻机理进行研究,利用电子显微镜,观察被低速(500 s⁻¹)和高速(5 000 s⁻¹)剪切前后XT-65B的分子形态。结果(图5)显示:减阻剂被低速剪切(500 s⁻¹)后,分子结构遭到轻微破坏,基本未对其降阻效果造成显著影响;经过5 000 s⁻¹高速剪切后,分子结构破坏较为严重,严重影响其降阻效果;但是,较长的分子链仍然具有一定的降阻效果。这与图2的结果相吻合。

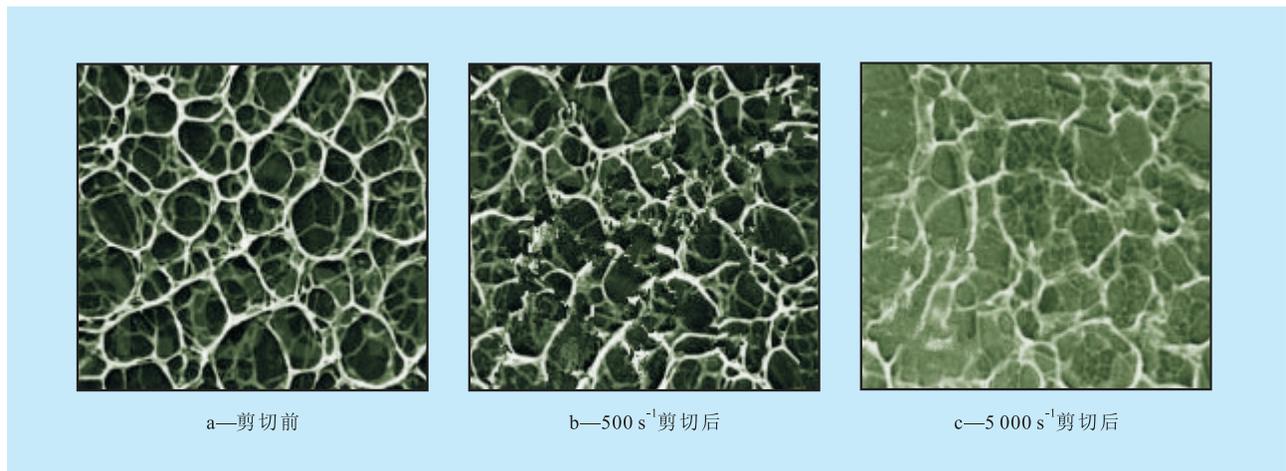


图5 剪切前后减阻剂XT-65B微观分子结构变化

3 结论

XT-65A, XT-65B, FS-300 和 RY-300 共 4 种减阻剂的降阻率实验结果表明, XT-65B 的降阻效果最好, 且性能比较稳定; 随着剪切速率的增加, 其降阻率的降幅较小, 在 $5\ 000\ \text{s}^{-1}$ 高剪切速率条件下的降阻率仍在 50% 左右, 因此确定 XT-65B 为清水压裂液体系的减阻剂。

减阻剂的降阻率随着剪切速率的增加而下降。在低速剪切 ($500\ \text{s}^{-1}$) 条件下, 减阻剂降阻率对剪切时间不敏感; 而在高速剪切 ($5\ 000\ \text{s}^{-1}$) 时, 减阻剂降阻率随剪切时间增加而急剧下降。不同剪切路径对减阻剂降阻效果影响显著, 较高的剪切速率将会对减阻剂分子结构造成不可恢复的伤害。

低速剪切作用对减阻剂分子结构破坏较小, 不会对降阻率造成显著影响, 而在高速剪切作用下, 减阻剂分子的结构会被剪切降解, 从而影响减阻剂的降阻效果。

参考文献:

- [1] George E K. Thirty years of gas shale fracturing: what have we learned? [C]. SPE 133456, 2010.
- [2] 马宁, 侯读杰, 包书景, 等. 页岩气资源潜力评价方法 [J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(6): 25-29.
- [3] Brent H, William M C. Barnett shale: a resource play—locally random and regionally complex [C]. SPE 138987, 2010.
- [4] Sutton R P, Cox S A, Barree R D. Shale gas plays: a performance perspective [C]. SPE 138447, 2010.
- [5] 孙海, 姚军, 孙致学, 等. 页岩气数值模拟技术进展及展望 [J].

油气地质与采收率, 2012, 19(1): 46-49.

- [6] Sondergeld C H, Newsham K E, Comisky J T, et al. Petrophysical considerations in evaluating and producing shale gas resources [C]. SPE 131768, 2010.
- [7] 孙海成, 汤达祯, 蒋廷学, 等. 页岩气储层压裂改造技术 [J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(4): 90-93, 97.
- [8] Carl A, Javad P. Critical evaluation of biocide-friction reducers interactions used in shale flowback slickwater fracs [C]. SPE 141358, 2011.
- [9] Fredd C N, McConnell S B, Boney C L, et al. Experimental study of fracture conductivity for water-fracturing and conventional fracturing applications [C]. SPE 74138-PA, 2001.
- [10] Javad P, Carl A, Michael H, et al. Critical evaluation of high brine tolerant additives used in shale slickwater fracs [C]. SPE 141356, 2011.
- [11] 田军, 徐锦芬, 薛群基, 等. 粘性减阻技术及其应用 [J]. 实验力学, 1997, 12(2): 198-203.
- [12] 何钟怡. 高分子稀溶液减阻机理的研究进展 [J]. 水动力学研究与进展, 1993, 8(4): 381-387.
- [13] 雷雯婷, 管民, 李惠萍, 等. 高聚物型减阻剂溶液减阻性能的评价 [J]. 石油炼制与化工, 2009, 40(5): 66-69.
- [14] 刘通义, 谭坤, 陈光杰, 等. 交联压裂液抗剪性能评价方法探讨 [C]. 李文阳. 2002 流变学进展. 北京: 中国科学技术出版社, 2002: 409-412.
- [15] 尹国栋, 关中原, 刘兵, 等. 聚合物减阻率与相对分子量关系的研究 [J]. 油气储运, 2001, 20(10): 36-38.
- [16] 管民, 郭凤凤, 马凤云, 等. 高分子减阻剂溶液对非牛顿流体流动特性的影响 [J]. 油气储运, 2006, 25(1): 33-36, 41.
- [17] 袁恩熙. 工程流体力学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1986.
- [18] 马卫荣, 谭芳, 赵玲莉, 等. 减阻剂溶液的发展与应用 [J]. 新疆石油天然气, 2005, 12(1): 71-74.
- [19] Shawn M R, Paul R H, Michael O A. Are you buying too much fire-tion reducer because of your biocide? [C]. SPE 119569, 2009.

编辑 常迎梅

欢迎广大科技人员踊跃投稿