

文章编号:1000-4092(2019)02-209-06

芥酸酰胺丙基二甲基叔胺改性纤维素溶液的流变性能与交联性能*

樊悦¹,金浩¹,方波¹,卢拥军²,邱晓惠²,孙瑞¹

(1. 华东理工大学化工学院,上海 200237;2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院,河北 廊坊 065007)

摘要:为了改善纤维素溶液的增稠能力和交联性能,合成了一种新型疏水醚化改性剂(3-氯-2-羟丙基芥酸酰胺醋酸铵),并采用该改性剂对羧甲基羟乙基纤维素(CMHEC)进行疏水改性,首次制得了芥酸酰胺丙基二甲基叔胺疏水改性纤维素(ED-CMHEC),研究了CMHEC和ED-CMHEC溶液的流变性能(表观黏度、流动曲线、触变性和黏弹性)和交联性能。研究表明,改性后ED-CMHEC溶液的表观黏度得到显著提升并表现出更显著的触变性与黏弹性。质量分数0.3%的CMHEC和ED-CMHEC溶液在30℃、170 s⁻¹的表观黏度分别为18 mPa·s和71 mPa·s,后者较前者提高了2.94倍。不同质量分数(0.3%~0.5%)的CMHEC和ED-CMHEC溶液均表现出剪切变稀性质,其流动曲线可用Cross模型进行描述。有机锆交联剂FAC-201加量为0.2%时,质量分数0.3% ED-CMHEC溶液交联形成凝胶的黏度是改性前的2.4倍,表现出更强的交联性能。图9表4参22

关键词:羧甲基羟乙基纤维素;芥酸酰胺丙基二甲基叔胺;疏水改性;流变性;压裂液

中图分类号:TE357.1¹2 **文献标识码:**A **DOI:**10.19346/j.cnki.1000-4092.2019.02.004

0 前言

我国的低渗透油气藏分布广、储量大,是当前勘探开发的研究重点^[1-3]。水力压裂技术利用地面高压将带有支撑剂的压裂液经井筒压至储层形成填砂裂缝,通过改善低渗透油气藏的导流能力而达到增产目的,是提高油气井产能和油藏采收率的重要措施之一^[4-6]。在压裂过程中,压裂液的性能好坏对压裂效果起到了关键性作用,常见的压裂液种类包括了水基压裂液、油基压裂液、醇基压裂液和泡沫压裂液等^[7-8]。其中,水基压裂液由于摩阻小、携砂能力强、成本低、操作安全等优点而被广泛应用^[9]。纤维素是D-葡萄糖以 β -1,4-糖苷键结合而成的链状高分子化合物,在自然界中储量丰富,具有可生物

降解、相容性好、价格低廉可再生等优点^[10],在低渗透油气藏储层改造领域具有广阔的应用前景。纤维素及其衍生物可作为增稠剂,起到提高压裂液溶液黏度,悬浮和携带支撑剂的作用^[11,12]。早期纤维素压裂液在大港油田和玉门油田有应用,但由于纤维素具有溶解速度慢、黏度低、交联性能差等缺点而无法得到持续的发展。近两年来,通过化学改性,新型纤维素压裂液在气井压裂的先导实验和现场应用上都取得了较好的增产效果^[13-15]。为提高纤维素溶液的增稠能力并改善其交联性能,本文合成了一种疏水阳离子醚化改性剂(3-氯-2-羟丙基芥酸酰胺醋酸铵),采用该改性剂对羧甲基羟乙基纤维素原料(CMHEC)进行化学改性,首次制备得到了芥酸酰胺丙基二甲基叔胺改性纤维素产物

* 收稿日期:2018-09-28;修回日期:2018-12-16。

基金项目:国家科技重大专项“储层改造关键流体研究”(项目编号2017ZX05023003)。

作者简介:樊悦(1993-),女,华东理工大学化学工程专业在读硕士研究生(2016-),研究方向为纤维素基压裂液的流变性能,E-mail:fyjsanna@163.com。方波(1967-),男,教授,本文通讯联系人,从事化工流变学、流体减阻、油田压裂液流变学等领域研究,通讯地址:200237上海市徐汇区梅陇路130号华东理工大学化工学院,电话:021-64253361,E-mail:fangbo@ecust.edu.cn。

(ED-CMHEC), 并对 ED-CMHEC 溶液的流变性能(表观黏度、触变性、流动曲线和黏弹性)以及交联性能进行了研究。

1 实验部分

1.1 材料和仪器

羧甲基羟乙基纤维素(CMHEC), 工业级, 湖北金祥瑞科技有限公司; 芥酸酰胺丙基二甲基叔胺, 分析纯, 上海银聪新材料科技有限公司; 氢氧化钠、环氧氯丙烷, 分析纯, 上海凌峰化学试剂有限公司; 无水乙醇、冰醋酸, 国药集团化学试剂有限公司; pH 调节剂 FAJ-305, 有机铝交联剂 FAC-201, 工业级, 中国石油勘探开发研究院廊坊分院。

MCR 302 型高级旋转流变仪, 奥地利安东帕(中国)有限公司; Nicolet 6700 红外光谱仪, 美国尼高力仪器公司; TGA-4000 热重分析仪, 美国珀金埃尔默仪器有限公司; VARIO EL III 元素分析仪, 德国 ELEMENTAR 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 疏水改性纤维素(ED-CMHEC)的合成

改性剂的合成原理见图 1。在 60% (wt/wt) 乙醇/水溶液中加入一定量芥酸酰胺丙基二甲基叔胺, 用冰醋酸调节体系的 pH 至 6.0~7.0, 升温至 60℃ 后少量多次滴加环氧氯丙烷, 滴加时间控制在 1 h, 继续反应 3 h 后得到改性剂 3-氯-2-羟丙基芥酸酰胺醋酸铵(见图 1)。

将 CMHEC 粉末悬浮于 90% (wt/wt) 乙醇/水溶液中, 30℃ 条件下滴入一定量氢氧化钠溶液碱化反

应 30 min, 然后升温至 80℃, 加入改性剂后再继续反应 2 h, 产物分别用 80% 乙醇和无水乙醇进行洗涤, 抽滤, 干燥后得到改性产物(ED-CMHEC)。

1.2.2 结构表征

采用 Nicolet 6700 型红外光谱仪, KBr 压片法对 CMHEC 和 ED-CMHEC 进行表征, 波长范围 4000~500 cm^{-1} ; 采用 TGA-4000 热重分析仪对 CMHEC 和 ED-CMHEC 进行表征, 以 N_2 作为保护气, 温度变化范围 30~500℃, 升温速率为 10℃/min; 采用 VARIO EL III 元素分析仪对 CMHEC 和 ED-CMHEC 进行 N、C、H 元素分析。

1.2.3 流变性能测定

在 30℃、恒定剪切速率(170 s^{-1})下采用 MCR 302 型高级旋转流变仪测定不同质量分数的 ED-CMHEC 和 CMHEC 溶液的表观黏度。

在 0℃ 下, 剪切速率从 0.1 s^{-1} 按对数规律变化至 170 s^{-1} , 得到不同浓度 ED-CMHEC 和 CMHEC 溶液的流动曲线。

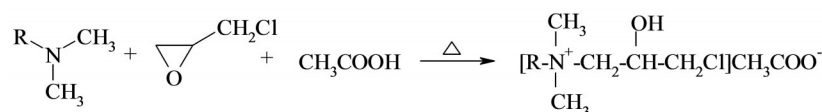
在 30℃ 下, 对待测溶液施加三角波剪切, 在 100 s 内剪切速率从 0 线性变化至 170 s^{-1} , 再由 170 s^{-1} 降为 0, 得到不同质量分数的 ED-CMHEC 和 CMHEC 溶液的触变性曲线。

在 30℃ 下, 在小振幅振荡流场中对待测溶液进行应变扫描, 设定角频率 10 rad/s, 应变 1~1000%, 得到不同质量分数的 CMHEC 和 ED-CMHEC 溶液的应变扫描曲线。

1.2.4 交联性能测定

分别在质量分数 0.3% 的 ED-CMHEC 和 CMH-

合成改性剂:



合成 ED-CMHEC:

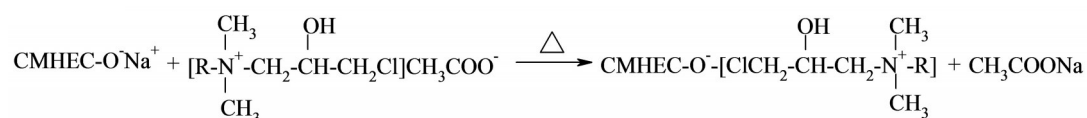
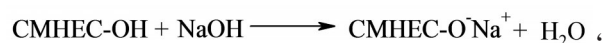


图 1 改性纤维素的合成原理

EC溶液中加入pH调节剂FAJ-305调节体系的pH=3~4,然后加入0.2%(体积比)的有机锆交联剂FAC-201,在30℃下以20 s⁻¹的剪切速率恒定剪切20 min,得到两种溶液交联过程黏度随时间的变化曲线。

2 结果与讨论

2.1 CMHEC和ED-CMHEC的红外光谱分析

图2为CMHEC和ED-CMHEC的红外光谱图。由图2可知,CMHEC在3421.5 cm⁻¹处出现了强而宽的一OH伸缩振动吸收峰,2880~2925 cm⁻¹处出现了一CH伸缩振动峰,在1062.9 cm⁻¹处出现了C—O—C伸缩振动吸收峰。ED-CMHEC这几个特征峰都存在,但在3422 cm⁻¹处的一OH伸缩振动吸收峰减弱,在1422.2 cm⁻¹处的一OH弯曲振动吸收峰减弱,这是因为ED—CMHEC中的羟基受碱化以及醚化反应影响。此外在1382.8 cm⁻¹和1460.9 cm⁻¹处出现了甲基和亚甲基的弯曲振动峰,说明分子链中烷基基团增加^[16]。

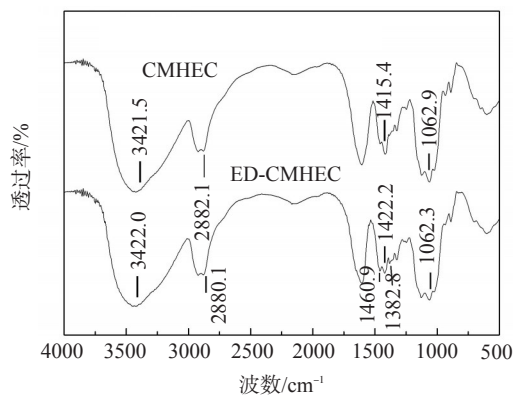


图2 ED-CMHEC和CMHEC红外谱图

2.2 CMHEC和ED-CMHEC的热重分析

图3为CMHEC和ED-CMHEC的热重曲线。

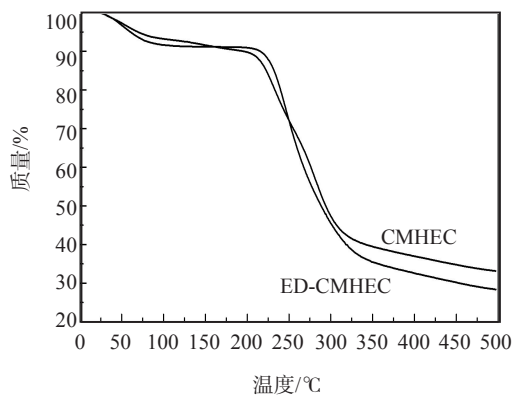


图3 ED-CMHEC和CMHEC热重曲线

由图3可知,CMHEC和ED-CMHEC的失重过程较为相似,随着温度的升高,两者均在200~300℃温度范围内发生热分解从而出现了明显的失重,其中CMHEC的分解温度在232℃,ED-CMHEC的分解温度在247℃;继续升高温度,ED-CMHEC在300~500℃范围内失重现象更显著。

2.3 CMHEC和ED-CMHEC的元素分析

CMHEC和ED-CMHEC的元素分析结果见表1。由表1可知,ED-CMHEC的C、H的含量均高于CMHEC样品C、H的含量,这是因为通过疏水改性,CMHEC分子中引入了少量烷基基团,使得改性产物C、H含量有所提高。

表1 CMHEC和ED-CMHEC的元素分析结果

样品	N百分比/%	C百分比/%	H百分比/%
CMHEC	<0.5	39.65	6.73
ED-CMHEC	<0.5	42.88	7.37

2.4 CMHEC和ED-CMHEC溶液的流变性

2.4.1 表观黏度

不同质量分数的CMHEC和ED-CMHEC溶液的表观黏度见图4。由图4可知,CMHEC和ED-CMHEC溶液的表观黏度均随着溶液浓度的升高而增大,但ED-CMHEC溶液的黏度增幅明显大于CMHEC溶液的。质量分数为0.3%、0.4%和0.5%的ED-CMHEC溶液的表观黏度分别为71、110和138 mPa·s,较相同质量分数的CMHEC溶液的分别提高了2.94、2.79和2倍。改性后芥酸酰胺丙基二甲基叔胺的疏水基团通过环氧氯丙烷连接至CMHEC分子上,溶于水后疏水基团之间缔合形成疏水区域^[17],随着溶液浓度的升高,分子链间的缔合作用增强,表现为溶液表观黏度的显著增加。

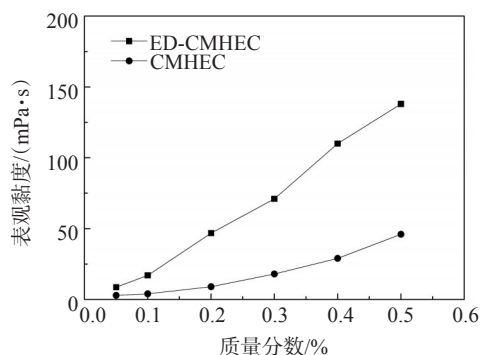


图4 ED-CMHEC和CMHEC溶液的表观黏度(30℃,170 s⁻¹)

2.4.2 流动曲线

不同浓度下 ED-CMHEC 和 CMHEC 溶液的流动曲线见图 5。由图 5 可知,改性前后纤维素溶液的黏度均随着剪切速率的增大而减小,表现出剪切变稀特性。用广义牛顿流体 Cross 模型^[18]可对 CMHEC 和 ED-CMHEC 溶液的剪切变稀行为进行描述(见式 1),结果见表 2。

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^m} \quad (1)$$

式中, η_0 —第一牛顿区黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; η_{∞} —第二牛顿区黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; λ —特征时间,与材料的特性直接相关, s ; m —黏度变化相关系数; $\dot{\gamma}$ —剪切速率, s^{-1} 。

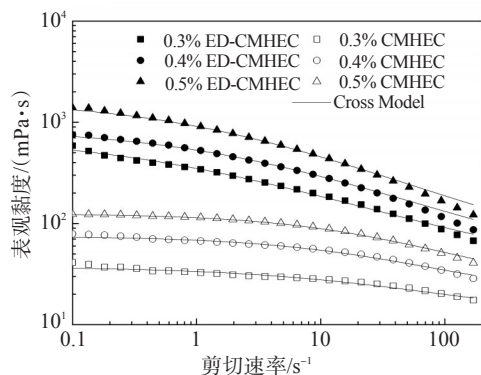


图 5 ED-CMHEC 和 CMHEC 溶液的流动曲线

由图 5 和表 2 可知,不同质量分数的 ED-CMHEC 和 CMHEC 溶液的流动曲线均可用 Cross 模型进行描述,描述结果良好。根据表 1 可知,ED-CMHEC 和 CMHEC 溶液的 η_0 和 η_{∞} 均随着溶液浓度的增加而增大,相同浓度下 ED-CMHEC 溶液的 η_0 和 η_{∞} 值明显大于 CMHEC 溶液的,尤其是 η_0 的增幅更明显,

表 2 不同浓度的 CMHEC 和 ED-CMHEC 溶液的 Cross 模型拟合结果

体系	质量分数/%	模型参数				拟合系数 R
		$\eta_0/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	$\eta_{\infty}/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	λ/s	m	
CMHEC	0.3	37.41	10.79	0.0342	0.5261	0.9675
	0.4	75.13	16.86	0.0381	0.6175	0.9887
	0.5	124.99	20.67	0.0375	0.6483	0.9979
ED-CMHEC	0.3	736.99	27.74	0.4907	0.4639	0.9943
	0.4	868.97	28.14	0.4639	0.5110	0.9974
	0.5	1652.46	35.21	0.7281	0.5273	0.9968

说明 ED-CMHEC 溶液表现出更强的内部结构。

2.4.3 触变性

触变性是结构材料的重要依时特性,可反映非牛顿流体受力后结构随时间或者剪切速率变化的过程^[19]。触变性的强弱可以用滞后环面积法表示,滞后环面积越大,体系的触变性越强,破坏网络结构需要的能量越大^[20]。不同质量分数的 CMHEC 和 ED-CMHEC 溶液的触变性曲线见图 6。由图 6 可知,不同质量分数(0.3%~0.5%)的 CMHEC 溶液的上下行曲线基本重合,触变性较弱;而 ED-CMHEC 溶液的上下行曲线不重合形成滞后环,且随着溶液浓度的增大,滞后环更加显著,触变性逐渐增强。不同浓度 CMHEC 和 ED-CMHEC 溶液的滞后环面积见表 3。根据表 3 可知,ED-CMHEC 溶液的触变性显著强于 CMHEC 溶液的,这说明 ED-CMHEC 引入的疏水基团之间的缔合作用能有效提高溶液的内部网络结构,增强溶液触变性。

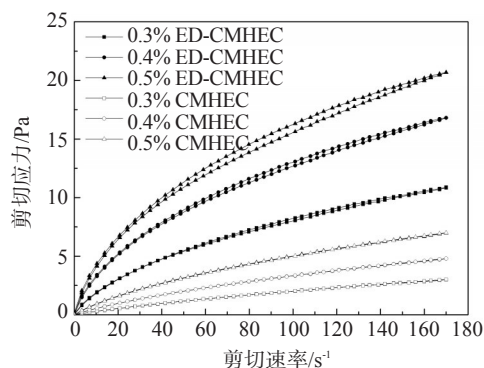


图 6 ED-CMHEC 和 CMHEC 溶液的触变性曲线

表 3 不同质量分数的 CMHEC 和 ED-CMHEC 溶液的滞后环面积

体系	质量分数/%	滞后环面积/ $(\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1})$
ED-CMHEC	0.3	18.69
	0.4	39.12
	0.5	77.21
CMHEC	0.3	0.31
	0.4	1.13
	0.5	3.15

2.4.4 黏弹性

不同质量分数的 ED-CMHEC 和 CMHEC 溶液的弹性模量 G' 和黏性模量 G'' 随应变的变化曲线见图 7。由图 7 可知,ED-CMHEC 和 CMHEC 溶液的 G' 和 G'' 均随着浓度的增大而增大,体系浓度相同时,

ED-CMHEC溶液的 G' 和 G'' 均显著大于CMHEC溶液的。在线性黏弹区范围内,质量分数0.5%的ED-CMHEC溶液的 G' 和 G'' 分别较改性前的提高了12.5倍和3.8倍,说明疏水缔合作用能有效提高溶液的黏弹性,有利于携带、悬浮支撑剂。

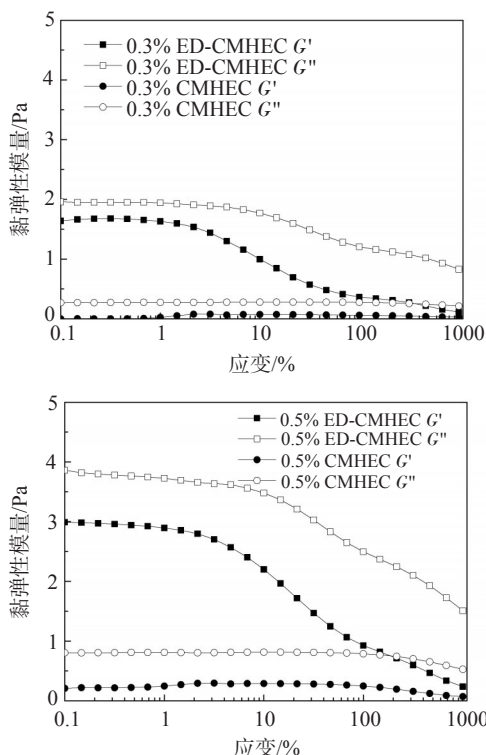


图7 ED-CMHEC和CMHEC溶液的黏弹性曲线

2.5 ED-CMHEC和CMHEC的交联性能

在质量分数0.3%的ED-CMHEC和CMHEC溶液加入0.2%有机锆交联剂FAC-201,表观黏度随反应时间变化见图8。由图8可知,加入交联剂后,ED-CMHEC和CMHEC溶液黏度逐渐升高,体系失去流动性形成凝胶。采用流变动力学方程(见式2)对ED-CMHEC和CMHEC溶液的交联过程进行描述^[21],结果见表4。

$$\frac{\eta - \eta_{\max}}{\eta_0 - \eta_{\max}} = \frac{1}{1 + (kt)^m} \quad (2)$$

式中, η_0 —初始黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; η_{\max} —交联平衡黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; t —测试时间, s ; k —结构变化速率常数, s^{-1} ; m —黏度随结构变化程度相关系数。

从图8和表4可知,交联剂浓度一定时,ED-CMHEC溶液形成凝胶的黏度远高于CMHEC溶液形成凝胶的黏度。有机锆交联剂中的 Zr^{4+} 在酸性环境下络合、水解、羟桥化作用生成多核羟桥络

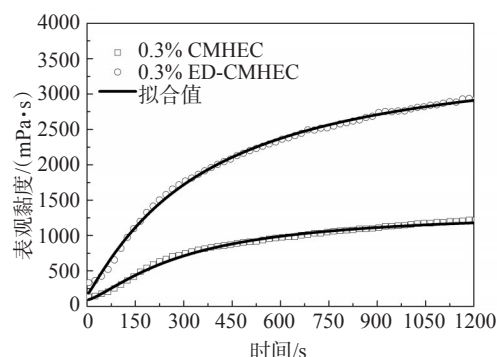


图8 相同交联条件下ED-CMHEC和CMHEC体系黏度随时间的变化(有机锆交联剂FAC-201加量0.2%)

表4 流变动力学模型拟合结果(有机锆交联剂FAC-201加量0.2%)

体系	质量分数/%	模型参数				拟合系数R
		$\eta_0/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	$\eta_{\max}/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	k/s^{-1}	m	
ED-CMHEC	0.3	154.26	3661.88	0.0027	1.0938	0.9989
CMHEC	0.3	88.98	1353.34	0.0032	1.3454	0.9940

离子,分别与羧甲基羟乙基纤维素分子链上的羟基和羧基形成物理交联点和化学交联点^[22],体系内部网络结构增强,实现从溶液到凝胶的转变。对于ED-CMHEC溶液,引入的疏水基团依靠疏水缔合作用将羧甲基羟乙基纤维素分子聚集在一起形成了更强的网络结构,提高了与交联剂的接触机率,有利于交联反应的进行,从而增强溶液的交联凝胶化性能。

3 结论

用3-氯-2-羟丙基芥酸酰胺醋酸铵对CMHEC进行了疏水改性,首次制备得到了改性产物芥酸酰胺丙基二甲基叔胺疏水改性纤维素ED-CMHEC。该产物水溶液表现出更强的增稠性能、剪切变稀性、触变性和黏弹性,表明在纤维素分子中引入疏水基团能够有效加强纤维素水溶液的内部结构,有利于其作为压裂液稠化剂的使用。此外,ED-CMHEC溶液在酸性环境($\text{pH}=3\sim 4$)下与有机锆交联剂FAC-201(用量0.2%)交联形成的凝胶黏度是改性前的2.4倍,证明通过疏水缔合作用溶液的交联性能也得到了显著提高,弥补了纤维素本身增稠能力弱、交联性能差的缺点,研究结果有望提供新的纤维素基压裂液稠化剂并为其进一步应用提供流变学指导。

参考文献:

- [1] 胡文瑞,魏漪,鲍敬伟.中国低渗透油气藏开发理论与技术进步[J].石油勘探与开发,2018,45(4):646-656.

- [2] QI W U, YUN X U, WANG X, et al. Volume fracturing technology of unconventional reservoirs: Connotation, design optimization and implementation [J]. *Petrol Explor Develop*, 2012, 39(3): 377-384.
- [3] 唐波, 唐志军, 耿应春, 等. 国内低渗透油气田高效开发钻井关键技术发展现状[J]. *天然气工业*, 2013, 33(2):65-70.
- [4] 管云刚. 非常规储层压裂改造技术进展及应用分析[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2014, 34(10):184.
- [5] 王永辉, 卢拥军, 李永平, 等. 非常规储层压裂改造技术进展及应用[J]. *石油学报*, 2012, 33(1):149-158.
- [6] 温庆志, 李杨, 徐希, 等. 水力压裂单缝中常用压裂液携砂性能评价[J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(4):123-126.
- [7] 王佳, 李俊华, 雷珂, 等. 压裂返排液处理技术研究进展[J]. *应用化工*, 2017, 46(7):1414-1416.
- [8] 胡忠前, 马喜平, 何川, 等. 国外低伤害压裂液体系研究新进展[J]. *海洋石油*, 2007, 27(3):93-97.
- [9] 侯晓晖, 王煦, 张军, 等. 水基压裂液用聚合物增稠剂评述[J]. *精细石油化工进展*, 2004, 5(1):15-18.
- [10] CHANG C, ZHANG L. Cellulose-based hydrogels: Present status and application prospects [J]. *Carbohydr Polym*, 2011, 84(1):40-53.
- [11] 王煦, 杨永钊, 蒋尔梁, 等. 压裂液用纤维类物质的研究进展[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2010, 32(3):141-144.
- [12] ALIU A O, GUO J, WANG S, et al. Hydraulic fracture fluid for gas reservoirs in petroleum engineering applications using sodium carboxy methyl cellulose as gelling agent [J]. *J Nat Gas Sci Eng*, 2016, 32:491-500.
- [13] 段瑶瑶, 明华, 代东每, 等. 纤维素压裂液在苏里格气田的应用[J]. *特种油气藏*, 2014, 21(6):123-125.
- [14] 段贵府, 牟代斌, 舒玉华, 等. 无残渣纤维素压裂液在苏里格东区致密气藏的应用[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(3):200-203.
- [15] 明华, 舒玉华, 卢拥军, 等. 一种速溶无残渣纤维素压裂液[J]. *油田化学*, 2014, 31(4):492-496.
- [16] 邵自强, 李博, 门爽. 疏水缔合羟乙基纤维素的合成及性能表征[J]. *应用化工*, 2006, 35(7):487-490.
- [17] SUN R, FANG B, LU Y, et al. Rheological properties of hexadecyl dimethyl amine modified carboxymethyl hydroxyethyl cellulose solutions and its gelling process [J]. *J Disper Sci Technol*, 2017, 39(1):1-5.
- [18] CROSS M. Rheology of non-Newtonian fluids: A new equation for pseudoplastic systems [J]. *J Colloid Sci*, 1965, 20(5): 417-437.
- [19] 方波. 化工流变学概论[M]. 中国纺织出版社, 2010:7-9.
- [20] 姜祖明, 曹绪龙, 李振泉. 部分交联聚丙烯酰胺悬浮液的触变性及其屈服应力[J]. *石油学报(石油加工)*, 2015, 31(4): 996-1002.
- [21] 朱仪玫, 方波, 卢拥军, 等. 环氧氯丙烷改性纤维素溶液的流变与减阻性能[J]. *钻井液与完井液*, 2016, 33(6):95-100.
- [22] 王丽伟, 卢拥军, 刘玉婷, 等. 羟乙基羧甲基纤维素与金属离子交联作用机理[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(33): 166-169.

Rheological Properties of Erucamidopropyl Dimethylamine Modified Carboxymethyl Hydroxyethyl Cellulose Solutions

FAN Yue¹, JIN Hao¹, FANG Bo¹, LU Yongjun², QIU Xiaohui², SUN Rui¹

(1. College of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, P R of China; 2. Langfang Branch of Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Langfang, Hebei 065007, P R of China)

Abstract: To improve the thickening ability and crosslinking performance of cellulose, widen its application in fracturing fluid field, a new kind of hydrophobic etherifying agent (3-chloro-2-hydroxypropyl erucylamide ammonium acetate) was prepared to modify carboxymethyl hydroxyethyl cellulose (CMHEC). Hydrophobic erucamidopropyl dimethylamine carboxymethyl hydroxyethyl cellulose (ED-CMHEC) was first prepared. The rheological and crosslinking experiments of CMHEC and ED-CMHEC were carried out. The results showed that ED-CMHEC solutions exhibited higher viscosities, more apparent thixotropy and viscoelasticity, compared to CMHEC solution. At the mass fraction of 0.3%, the viscosity of CMHEC and ED-CMHEC solutions at the temperature of 30°C and at the shearing rate of 170 s⁻¹ were 18.0 mPa·s and 71 mPa·s, respectively. The shear thinning behaviors of CMHEC and ED-CMHEC solutions at different concentrations could be well described by Cross model. Under the same crosslinking conditions that the dosage of zirconium organic crosslinker was 0.2%, the viscosity of gel formed by 0.3% ED-CMHEC solution was 2.4 times than that by 0.3% CMHEC solution, which indicated that ED-CMHEC had a stronger crosslinking performance.

Keywords: carboxymethyl hydroxyethyl cellulose; erucamidopropyl dimethylamine; hydrophobic modification; rheology; fracturing fluid