

文章编号:1000-4092(2020)04-623-06

环保型耐盐降阻剂的研制与应用*

刘倩^{1,2}, 管保山^{2,3}, 刘玉婷³, 梁利³

(1. 中国科学院大学化学科学学院, 北京 100190; 2. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北 廊坊 065007;

3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:为实现高矿化度盐水直接配制滑溜水进行体积压裂, 解决常规W/O反相乳液降阻剂存在的成本较高和环境污染问题, 通过分散乳液聚合, 在聚合反应中引入极性亲水单体和耐盐阳离子单体, 得到了一种环保型耐盐W/W分散乳液降阻剂PADD, 分别考察了PADD的溶解性能、耐温性能、降阻性能以及对岩心的伤害情况, 并报道了现场应用情况。研究表明, 质量分数为0.1%的PADD在清水、40 g/L和80 g/L的矿化水中均可以快速均匀分散, 在高矿化度(80 g/L)条件下, PADD分子结构依然稳定; 质量分数为0.1%的PADD溶液在80℃下老化72 h后的黏度保持率大于90%, 在3种不同矿化度下质量分数0.1%的PADD溶液降阻率均在70%以上, 且对岩心的伤害较小。以PADD为主剂采用返排液配制的耐高矿化度滑溜水已在威202H16平台成功应用。图4表3参16

关键词:降阻剂; 滑溜水; 耐盐; 聚合物; 降阻率

中图分类号:TE348 **文献标识码:**A **DOI:**10.19346/j.cnki.1000-4092.2020.04.010

0 前言

近年来, 我国石油天然气勘探开发正处于全球油气价格下调和对外依存度持续攀升的双重压力之下, 非常规油气资源开发变得日趋重要。非常规储层的物性差、孔隙度小、渗透率低, 滑溜水体积压裂具有大排量、低砂比、高泵压的特点, 可以形成更为复杂的地层裂缝网络, 为非常规储层的主要施工方式^[1]。滑溜水是在清水中添加降阻剂、表面活性剂、pH调节剂、杀菌剂、黏土稳定剂等形成的, 含水96%~99%, 因此也被称为清水压裂液和减阻水压裂液。采用滑溜水进行储层改造用水量巨大, 为促进水相循环利用, 缓解用水压力, 将返排液、湖水、海水等高矿化度盐水用于压裂液的配制是必要的,

而实际滑溜水施工作业时, 水源、水质等均会影响其作用效果^[2]。降阻剂作为核心添加剂, 决定了压裂液的性能, 主要依靠自身黏弹性和分子链的伸缩来实现降阻。然而, 盐水中的阳离子会使降阻剂的分子链发生卷曲, 导致降阻效果变差, 故开发高效耐盐降阻剂是未来的重要发展方向^[3-4]。

按照来源和分子结构可将降阻剂分为3种类型, 分别是天然多糖、表面活性剂和聚丙烯酰胺, 其中, 天然多糖的降阻效果有限, 而表面活性剂的价格较高, 聚丙烯酰胺的各方面性能较好, 目前应用最多^[5]。干粉型聚丙烯酰胺的溶解时间较长, 为满足现场大排量压裂液的即配即用, 应用最多的乳液型聚丙烯酰胺。传统W/O型反相乳液聚丙烯酰胺聚合时表面活性剂用量较大, 成本较高, 且含有大

* 收稿日期:2020-09-26;修回日期:2020-11-03。

基金项目:国家重大科技专项“储层改造流体综合性能研究与模拟实验”(项目编号2017ZX05023-003-001)。

作者简介:刘倩(1996-),女,中国科学院渗流流体力学研究所在读硕士研究生(2018-),从事油田化学剂研发与评价工作,E-mail:liuqian01@petrochina.com.cn。管保山(1968-),男,高级工程师,本文通讯联系人,成都理工大学油气田开发工程博士(2009),研究方向为油田化学剂研发、评价与应用,通讯地址:100083 北京市海淀区学院路20号勘探开发研究院油田化学所,电话:010-69219156,E-mail:gbs7611@163.com。

量油相,会带来一系列环境污染问题^[6]。W/W型乳液聚丙烯酰胺降阻剂的合成采用水代替溶剂,合成方法简单,操作方便,成本较低,无需表面活性剂,属于环保型降阻剂,具有更好的溶解和分散能力,较其它降阻剂的优势明显,具有广阔的市场应用前景,已经成为研究的重点^[7]。本文采用稳定性较强的亲水单体2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)和耐盐阳离子单体丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DAC)与丙烯酰胺单体通过分散聚合制备了环保型耐盐降阻剂PAAD^[8],通过单因素实验确定了最佳实验工艺,研究了在不同矿化度下以PAAD为单一添加剂制备的滑溜水的综合性能,并报道了其现场应用效果。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

丙烯酰胺(AM)、丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(DAC)、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)、乙二胺四乙酸二钠(EDTA-2Na),工业级,国药集团化学试剂公司;氢氧化钠、硫酸铵、亚硫酸氢钠、过硫酸铵,氯化钾、氯化镁、氯化钠、氯化钙,分析纯,天津市鼎盛鑫化工有限公司;合成用水为去离子水,配液用水包括清水(矿化度653 mg/L)和矿化水(40 g/L和80 g/L),其中80 g/L矿化水为标准盐水,组成为2.0% KCl+5.5% NaCl+0.45% MgCl₂+0.55% CaCl₂,40 g/L矿化水中矿化物含量为标准盐水的一半。岩心为取自四川盆地南部龙马溪组渗透率相近的页岩岩心,岩心参数见表1。

PVS型全自动乌氏黏度计,德国Lauda公司;VECTOR-22型傅里叶变换红外光谱仪,德国Bruker公司;马尔文3000激光粒度仪,英国Malvern公司;滑溜水摩阻测试仪,实验室自制;K100表面张力仪,德国Krüss公司。

表1 岩心物性参数

岩心 序号	长度/ cm	直径/ cm	水测渗透率/ (10 ⁻³ μm ²)	水测孔隙度/ %
1	5.02	2.51	5.41	8.75
2	5.13	2.48	4.85	9.36
3	5.08	2.52	5.87	8.23

1.2 降阻剂PAAD的合成

向装有搅拌桨、氮气管、温度计的500毫升的四口烧瓶中加入一定量的去离子水,在搅拌下加入一定量的单体AM、AMPS和DAC,完全溶解后用质量分数为25%的氢氧化钠水溶液调节pH值至4~5,然后加入一定量的相分离剂硫酸铵、阴离子稳定剂和螯合剂乙二胺四乙酸二钠,通过水浴锅调节温度,通氮气30 min,缓慢加入一定量的过硫酸铵/亚硫酸氢钠引发单体聚合,反应20 h后结束,即得到环保型耐盐降阻剂PAAD^[9-10]。

1.3 降阻剂PAAD性能评价

1.3.1 降阻剂的红外光谱表征

将合成的耐盐降阻剂PAAD用无水乙醇进行粗提纯,然后用去离子水为透析液,选用透析袋截留相对分子质量大于3×10⁴的聚合物,去除未参与反应的单体和一些低聚物,并于烘箱中干燥得到白色固体。取适量固体产物分别置于清水、矿化度分别为40 g/L和80 g/L的矿化水中,待完全溶解后,将溶液涂于KBr压片上,在红外灯下干燥后将压片置于光路中进行扫描得到降阻剂样品的红外光谱图,扫描波数范围为4000~400 cm⁻¹。

1.3.2 溶解性能和耐温性能评价

用不同矿化度的水配制质量分数为0.1%的降阻剂溶液,利用乌氏黏度计室温下测定样品的起黏时间和最终黏度,完全溶解后利用马尔文激光粒度分析仪测定样品的粒径分布,并置于80℃恒温箱中老化72 h后重新测定黏度。

1.3.3 降阻性能评价

依照中国石油天然气行业标准SY/T6376—2008《压裂液通用技术条件》,采用自制循环管路摩阻测试系统测试不同矿化度水配制的质量分数0.1%的降阻剂溶液的降阻效果。对比配液用水和降阻剂溶液在管路中流动的压差,由式(1)计算得到降阻剂溶液的降阻率 D 。

$$D = \frac{(\Delta p_{\text{水}} - \Delta p_{\text{滑溜水}})}{\Delta p_{\text{水}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, D —降阻率,%; $\Delta p_{\text{水}}$ —清水在管路中的压降,MPa; $\Delta p_{\text{滑溜水}}$ —滑溜水在测试系统中的压降,MPa。

1.3.4 岩心伤害性评价

取渗透率相近的龙马溪层页岩岩心,按照中国

石油天然气行业标准 SY/T 5107—2016《水基压裂液性能评价方法》测定岩心基质的渗透率损害。室温下将蒸馏水从一端挤入岩心进行驱替,待出口流量和压差稳定后计算伤害前的渗透率 K_1 ;然后将配好的滑溜水从岩心另一端注入,有液体流出后开始计时,36 min 后关闭夹持器两端阀门,使液体在岩心中停留 2 h;最后重复测定岩心伤害前的渗透率测定步骤,测试伤害后的渗透率 K_2 。最终按式(2)计算岩心渗透率损害率^[11]:

$$\eta=\frac{K_1-K_2}{K_1}\times 100\%$$

(2)

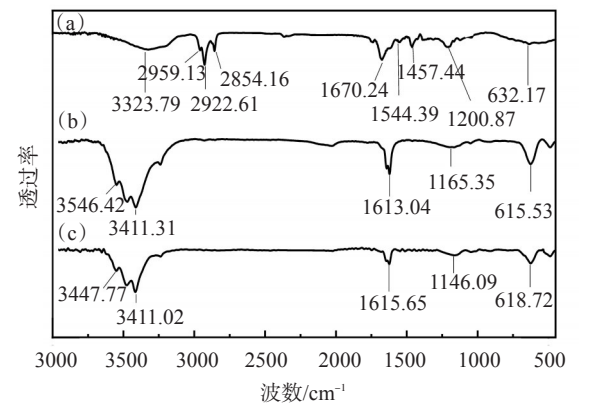
式中, η —损害伤害率,%; K_1 —伤害前测得渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$; K_2 —伤害后用测得渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

2 结果与讨论

2.1 PAAD 红外光谱分析

图 1(a)、(b)、(c)分别为降阻剂 PAAD 在清水、40 g/L 和 80 g/L 矿化度条件下的红外光谱图。图 1(a)中,在 323.79、1544.39、1670.24 cm^{-1} 处分别为酰胺基团中的仲胺(NH)、伯胺(NH_2)和羰基($\text{C}=\text{O}$)的伸缩振动特征吸收峰,表明降阻剂中含有酰胺基团;在 1200.87 cm^{-1} 和 1457.44 cm^{-1} 处分别为 DAC 链段上酯基($\text{C}-\text{O}$)和碳氮键($\text{C}-\text{N}$)的振动吸收峰,表明季铵盐单体参与反应,632.17 cm^{-1} 处为磺酸根($-\text{SO}_3^{2-}$)的特征吸收峰,表明 AMPS 单体参与反应,故 AM、DAC 和 AMPS 单体均有参与反应,合成产物为目标产物^[12]。降阻剂 PAAD 合成过程中无乳化剂和油相的加入,价格低廉且环保,符合发展要求。在 40 g/L 和 80 g/L 矿化度下,酰胺基团中的仲胺(N—H)和碳氢键($\text{C}-\text{H}$)官能团的振动吸收峰较在清水中发生明显蓝移,这是因为溶液离子强度的增加使得降阻剂聚合物分子链上电荷被屏蔽,分子链间静电排斥作用减弱^[13];同时,阳离子片段上酯基($-\text{COO}$)、伯酰胺和酰胺基团中羰基($\text{C}=\text{O}$)吸收

峰较清水出现红移,且磺酸根基团吸收峰变宽,这是因为引入的阳离子与溶液中的金属阳离子相互排斥,聚合物分子处于平衡状态,链段间的相互作用增强,降阻剂分子更为稳定。同时,在 80 g/L 矿化度下较在 40 g/L 矿化度下的红外光谱吸收变化小,说明降阻剂 PADD 在高矿化度下的分子结构基本不发生变化,稳定性较强^[13]。



(a)清水;(b)矿化度 40 g/L;(c)矿化度 80 g/L

图1 降阻剂在不同矿化度水中的红外光谱图

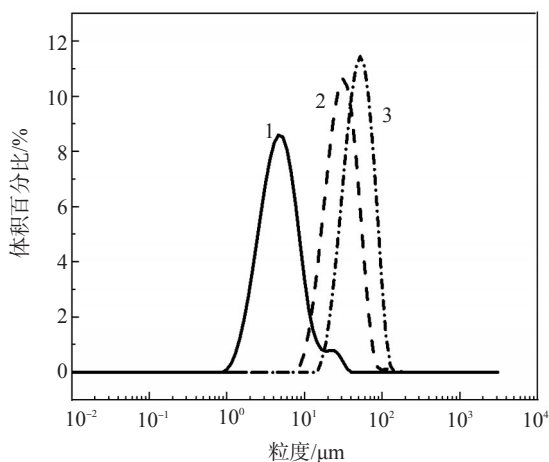
2.2 PADD 的溶解性能和耐温性能

降阻剂需要能够在溶液中快速均匀地分散,在短时间内表现出良好的降阻能力,提升配液效率,增大作用效果,并具有一定的耐温能力,以满足地下油藏施工需求^[14]。降阻剂 PADD 分别在不同矿化度水中的溶解性能、耐温能力和粒径分布见表 2 和图 2。降阻剂的起黏时间可表征降阻剂的溶解速率,粒度分布可表征降阻剂的最终溶解效果,将配制好的溶液置于恒温箱中老化观察黏度变化可表征其耐温能力。可以看到,降阻剂在不同矿化度下的表观黏度无明显差别,在高矿化度盐水中的起黏时间有所降低,但均小于 60 s。这表明降阻剂 PADD 具有良好的溶解性和增稠能力,可快速分散在水中发挥作用,能满足压裂现场快速配液要求。PADD 完全溶解后,不同矿化度下溶液的粒径分布

表 2 降阻剂 PADD 分别在不同矿化度的水中的溶解性能和粒径分布

配液用水	起黏时间/ s	表观黏度/ (mPa·s)	80℃老化 72 h 后黏度/ (mPa·s)	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	径距	一致性	平均粒径/ μm
清水	14	1.39	1.25	3.36	1.707	0.592	9.030
40 g/L 矿化水	38	1.12	0.97	0.814	1.220	0.386	25.087
80 g/L 矿化水	45	1.07	0.93	0.37	1.109	0.343	29.332

径距均较小,说明降阻剂分子分散均匀,无明显的黏并现象,且一致性较小,不同粒径乳化液滴占比接近正态分布。在高矿化度条件下,由于水相中的离子含量增大,比表面积减小,分散性能略微变差,粒径有所增加,但径距和一致性均无明显变化,表明在高矿化度条件下,降阻剂PADD分子结构依然稳定,未出现明显卷曲与坍塌,仍可在水中均匀分散。且各体系置于80℃下老化72 h后黏度无明显降低,保持率均在90%以上,具有较好的耐温效果,能够满足大多数油藏的开采要求。

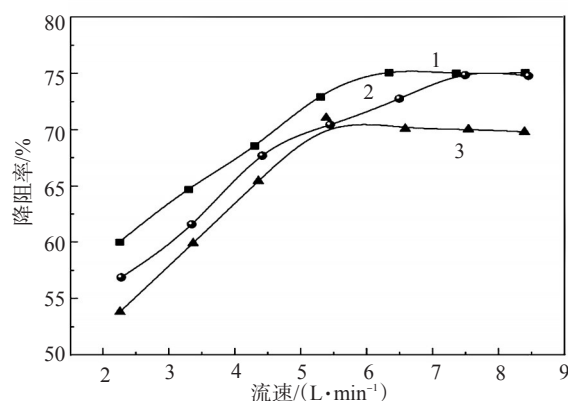


曲线参数为配液用水:1—清水;2—40 g/L矿化水;
3—80 g/L矿化水

图2 降阻剂粒度分析曲线

2.3 PAAD的降阻效果

采用自制循环管路摩阻测试系统测试不同矿化度水配制的质量分数0.1%的降阻剂PADD溶液的降阻效果,结果见图3。由图3可知,降阻剂的作用效果整体随流速的增加呈现先增加后趋于稳定的变化过程。当流速较小时,黏性滑溜水呈层状运动,降阻剂分子呈无序排列,降阻作用较小,随着流速的增加,降阻剂分子充分分散,长链沿流动方向自然拉伸且呈线性排列,降阻效果明显增大。降阻剂PADD具有良好的降阻性能,用清水配制的质量分数为0.1%的降阻剂PADD溶液的降阻率高达75%,随着矿化度的增加,降阻率虽略有减小但也保持在70%以上,表现出优良的抗盐性能,说明合成反应引入的单体可以降低聚合物分子链对金属阳离子的敏感性,从而使降阻剂在高矿化度下仍然保持舒展状态,稳定性变强^[16]。



曲线参数为配液用水:1—清水;2—40 g/L矿化水;
3—80 g/L矿化水

图3 降阻剂降阻性能

2.4 PADD对岩心伤害情况

研究表明,降阻剂聚合物分子在页岩表面的吸附和残余聚合物分子的聚集缠绕会导致页岩流动通道孔径减小甚至堵塞,最终表现为对岩心渗透率的伤害^[11]。利用龙马溪层页岩岩心进行岩心伤害实验,根据岩心渗透率的变化评价降阻剂对储层伤害,实验结果见表3。用清水配制质量分数为0.1%的PADD滑溜水对岩心伤害率为7.02%。随着矿化度增加,对岩心伤害率逐渐降低。由2.2.2的实验结果可知,随矿化度的增大,PADD滑溜水的黏度降低,可能是低黏流体缓解了通道堵塞。中国石油天然气行业标准要求岩心基质渗透率伤害率 $\leq 30\%$,由此可见,降阻剂PADD对地层伤害较小,可满足要求。

表3 滑溜水对岩心伤害实验结果

配液用水	渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)		伤害率/%
	伤害前	伤害后	
清水	5.41	5.03	7.02
40 g/L矿化水	4.85	4.66	3.73
80 g/L矿化水	5.87	5.73	2.34

2.5 滑溜水的综合性能和现场应用效果

威202H16平台位于威远构造中奥顶构造南翼,地层温度72℃,对H16-1井返排液进行了取样分析,该平台返排液总硬度为1866 mg/L,矿化度在20000 mg/L以上,其中含 Ca^{2+} 1481 mg/L、 Mg^{2+} 385 mg/L、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 6186 mg/L、 Cl^- 11188 mg/L、 SO_4^{2-} 2536 mg/L、 HCO_3^- 376 mg/L。室内实验结果表明,所合成的降阻剂能够在80℃、80 g/L矿化度条件下

保持自身结构不发生变化,可快速溶解分散发挥作用,具有良好的降阻能力,对岩心伤害较低。采用威远区块返排液,以制得的环保耐盐降阻剂为基础,和现场常用助排剂、黏土稳定剂和杀菌剂等进行配伍性测试,并进行加量优选,最终形成了满足页岩气体积压裂用的滑溜水体系配方:0.1% PAAD降阻剂+0.1% ZPJ-10助排剂+0.05% KCl+0.05% 黏稳剂 NEJ-15+0.1% 杀菌剂甲醛,所配制的滑溜水无沉淀物,可在34 s内发生增黏,剪切速率 170 s^{-1} 下的表观黏度为 $1.69\text{ mPa}\cdot\text{s}$,表面张力为 26.2 mN/m ,防膨率为80.5%,可降低72.4%的摩阻,用返排液配制的滑溜水各项性能指标均能达到行业标准要求,能够满足现场返排液重复配制滑溜水和体积压裂施工作业需求^[16]。

威202H16平台主体参照威202井区高产井施工工艺,以提高压裂液的波及范围和波及强度为目标,实现压裂液在平台面积内全覆盖,4井8段施工使用全返排液配制得到压裂液体系,外观为乳白色透明液体,运动黏度为 $1.59\text{ mm}^2/\text{s}$,摩阻仪测得降阻率为72.2%。该段施工曲线如图4所示,设计施工排量 $11\sim 14\text{ m}^3/\text{min}$,泵压 $63\sim 75\text{ MPa}$ 。从图4可以看到,所配制滑溜水的施工曲线平稳,降阻率达70%以上,与摩阻测量仪测试结果相符,进一步证实了在高矿化度下合成降阻剂的耐盐能力。

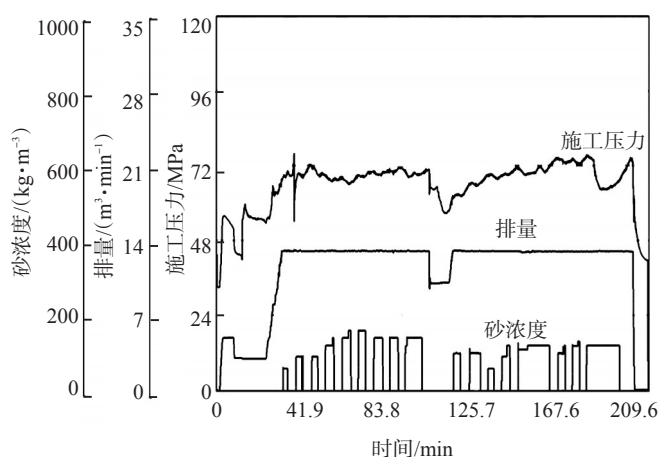


图4 环保耐盐滑溜水施工曲线(施工井段4142~4055 m)

致密储层水平井践行缝控压裂理念,集成密集布缝高效压裂工艺,以增加裂缝复杂程度为目标,以合成降阻剂PADD配制的滑溜水体系已应用于长庆致密油田和四川页岩气的规模开采,累计应用76

口水平井,用液量180万立方米,共节约成本1.26亿元,页岩气、致密油采用滑溜水进行储层改造占比高达60%,年节约成本亿元以上。

3 结论

采用分散聚合法引入稳定性较强和耐盐阳离子单体合成的环保型分散耐盐降阻剂PADD,具有一定耐温性和较好的溶解性能,在高矿化度下能保持稳定的分子结构。PADD降阻率在70%以上,对岩心伤害率较小,适用于高矿化度下配制滑溜水进行体积压裂。

以降阻剂PADD为主剂,用矿化度和硬度分别为 22151 mg/L 和 1866 mg/L 的返排液配制的滑溜水体系在威202H16平台H16-1井的现场施工降阻率达到72.2%。降阻剂PADD已在长庆、四川等地区成功推广应用并取得了良好的效果。

环保型耐盐W/W降阻剂PADD能够解决传统降阻剂所带来的成本和环境污染问题,并缓解用水压力,降低施工难度,节约能源和资源,能够满足非常规储层大型压裂施工需要,适合作为传统降阻剂的替代品使用。

参考文献:

- [1] 管保山,刘玉婷,梁利.页岩油储层改造和高效开发技术[J].石油钻采工艺,2019,41(2):212-223.
- [2] 敬显武,刘友权,许园,等.含高比例疏水单体降阻剂的合成及性能评价[J].精细化工,2019,36(9):1-7.
- [3] THOMAS L, TANG H, KALYON D M, et al. Toward better hydraulic fracturing fluids and their application in energy production: A review of sustainable technologies and reduction of potential environmental impacts[J]. J Petrol Sci Eng 2019, 173: 793-803.
- [4] DAS A, CHAUHAN G, VERMA A, et al. Rheological and breaking studies of a novel single-phase surfactant-polymeric gel system for hydraulic fracturing application[J]. J Petrol Sci Eng, 2018, 167: 559-567.
- [5] 杜凯,黄凤兴,伊卓,等.页岩气滑溜水压裂用降阻剂研究与应用进展[J].中国科学:化学,2014,44(11):1696-1704.
- [6] 刘倩,管保山,刘玉婷,等.滑溜水压裂液用降阻剂的研究与应用进展[J].油田化学,2020,37(3):545-551.
- [7] YANG B, ZHAO J, MAO J, et al. Review of friction reducers used in slickwater fracturing fluids for shale gas reservoirs[J]. J Nat Gas Sci Eng, 2019, 62: 302-313.
- [8] 张汝生,张鹏,田尧,等.耐温抗盐耐剪切型滑溜水降阻剂的制备探讨[J].应用化工,2018,47(4):834-838.

- [9] 颜菲, 于梦红, 罗成, 等. 特低渗储层压裂用降阻剂 CFZ-1 的研制及应用[J]. 油田化学, 2019, 36(1): 63-67.
- [10] 张锋三, 沈一丁, 王磊, 等. 聚丙烯酰胺压裂液减阻剂的合成及性能[J]. 化工进展, 2016, 35(11): 3640-3644.
- [11] 郭粉娟, 谢娟, 张高群, 等. 低伤害高效减阻水压裂液的研究与应用[J]. 油田化学, 2016, 33(3): 420-424.
- [12] SEYMOUR B, FRIESEN D, SANDERS A. Enhancing friction reducer performance in high salt conditions[C]//Unconventional Resources Technology Conference, Houston, Texas, July 23-25, 2018.
- [13] SAREEN A, ZHOU M J, ZAGHMOOT I, et al. Successful slickwater fracturing in ultrahigh TDS produced water by novel environmentally preferred friction reducer [C]//International Petroleum Technology Conference. Kuala Lumpur, Malaysia, December 10-12, 2014.
- [14] 何静, 王满学, 吴金桥, 等. 多功能滑溜水减阻剂的制备及性能评价[J]. 油田化学, 2019, 36(1): 48-52.
- [15] ZADRAZIL I, BISMARCK A, HEWITT G F, et al. Shear layers in the turbulent pipe flow of drag reducing polymer solutions[J]. Chem Eng Sci, 2012, 72: 142-154.
- [16] 张乐, 周福建, 汪杰, 等. 滑溜水减阻剂实验室评价及现场应用[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2018, 20(6): 62-66.

Development and Application of Environment-friendly Salt-tolerant Friction Reducer

LIU Qian^{1,2}, GUAN Baoshan^{2,3}, LIU Yuting³, LIANG Li³

(1. College of Chemical Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, P R of China; 2. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang, Hebei 065007, P R of China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, P R of China)

Abstract: In order to realize the direct preparation of slick-water with high salinity brine for volume fracturing, and to solve the high cost and environmental pollution problems of conventional W/O inverse emulsion friction reducer. An environmentally friendly salt-tolerant friction reducer PADD was prepared through introducing polar hydrophilic monomer and salt-tolerant cationic monomer into the polymer by emulsion dispersion polymerization method. The solubility, temperature resistance, resistance reduction performance and damage to the core of PADD were investigated, respectively, and the field application of PADD slick-water was mentioned. The results showed that PADD with mass fraction of 0.1% could be quickly and uniformly dispersed in clean water, 40 g/L and 80 g/L mineralized water, respectively. Under the condition of high salinity (80 g/L), the molecular structure of PADD remained stable. The PADD solutions with mass fraction of 0.1% under three different salinities were aged for 72 h at 80 °C, and the viscosity retention rate was greater than 90%, the drag reduction rate was above 70%, and there was less damage to the core. The high-salinity-resistant slick-water prepared with the flowback fluid using PADD as the main agent has been successfully applied in Wei 202H16.

Keywords: friction reducer; slick-water; salt tolerance; polymer; drag reduction rate