

橡胶—聚合物冻胶体系堵水适应性分析

赵修太,董林燕,付敏杰,唐金玉

(中国石油大学(华东)石油工程学院,山东 青岛 266580)

摘要:通过室内评价实验和封堵性实验,对橡胶—聚合物冻胶体系和聚合物冻胶体系进行了对比。实验结果表明,在相同的温度、pH值和矿化度条件下,橡胶—聚合物冻胶体系的粘度和强度均优于聚合物冻胶体系;分别向渗透率相近的2个填砂管注入上述2个体系,封堵率均达97%以上,但是注橡胶—聚合物冻胶体系突破压力梯度为4.97 MPa/m,远大于注聚合物冻胶体系的3.08 MPa/m,而且其耐冲刷性良好,在水驱7倍孔隙体积以后,达到稳定压力2.35 MPa,而聚合物冻胶体系则在水驱4倍孔隙体积后,压力就开始下降,稳定压力为1.12 MPa;不同渗透率的封堵实验则表明橡胶—聚合物冻胶体系在高渗透层的封堵性最好。

关键词:橡胶 冻胶 封堵率 耐冲刷 适应性

中图分类号:TE357.43

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2014)06-0084-03

随着陆上油田开发不断深入,很多油井的水驱含水率已经达到90%以上^[1-5],油井见水越来越严重,油井堵水也随之越来越受到重视^[6],聚合物冻胶一直是应用最广泛的堵剂^[7],但是其有效期较短,耐冲刷能力较差^[8-11],鉴于此,提出将橡胶加入聚合物冻胶体系,以改进其强度和耐冲刷性。通过实验研究了添加橡胶对聚合物冻胶体系性能的影响,并阐述了其对封堵性能的影响。

1 实验准备及方法

1.1 实验药品和仪器

实验药品包括部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)(相对分子质量为 $1\ 500\times 10^4$,工业品)、重铬酸钠(分析纯)、亚硫酸钠(分析纯)、橡胶粉(40~60目)、盐酸(分析纯)、氢氧化钠(分析纯)和氯化钠(分析纯)。实验仪器包括玻璃缸恒温水浴、突破真空度测定装置、高速搅拌器、NDJ-1B旋转粘度计、填砂管和压力表。若不加特殊说明,实验用水均为去离子水。

1.2 实验方法

由于部分水解聚丙烯酰胺难以直接溶解,因此在体系配制时,首先配制高质量浓度的部分水解聚丙烯酰胺母液,然后再加入配制好的交联剂水溶液或者交联剂和橡胶的水溶液,待两者混合后,使其最终浓度达到体系配方的值。

聚合物冻胶体系的配制 聚合物冻胶体系的配制步骤为:①配制质量浓度为5 000 mg/L的HPAM母液,老化24 h;②将pH值调节剂盐酸和氢氧化钠分别配制成质量分数为0.1%的水溶液;③配制交联剂水溶液,其组成为0.17% $K_2Cr_2O_7$ +0.34% Na_2SO_3 ;④经浓度折算,取20 mL配制好的HPAM母液和30 mL交联剂水溶液,搅拌均匀,即配制成50 mL配方为2 000 mg/L HPAM+0.1% $K_2Cr_2O_7$ +0.2% Na_2SO_3 的聚合物冻胶体系。

橡胶—聚合物冻胶体系的配制 橡胶—聚合物冻胶体系配制的前3步与聚合物冻胶体系的配制方法一致,然后取30 mL交联剂水溶液,加入质量分数为0.1%的橡胶,搅拌均匀,再加入20 mL HPAM母液,再次搅拌直至橡胶均匀分散,该体系配方为2 000 mg/L HPAM+0.1% $K_2Cr_2O_7$ +0.2% Na_2SO_3 +0.1% 橡胶。

体系粘度和强度的测定方法 将配制好的样品放入安瓿瓶内,封口,待成胶后,应用突破真空度法测定其强度,应用NDJ-1B旋转粘度计测定其粘度。突破真空度越大,体系强度越高。

2 适应性评价

2.1 温度

由聚合物冻胶体系和橡胶—聚合物冻胶体系

收稿日期:2014-09-20。

作者简介:赵修太,男,教授,硕士,从事提高采收率与采油化学研究。联系电话:18669885033,E-mail:zxt1667@126.com。

基金项目:国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2011ZX05002)。

在不同温度下粘度和强度的变化(图1)可以看出,2种体系成胶后的粘度和强度均随着温度的升高先增大后减小,这是由于重铬酸钾和亚硫酸氢钠的反应是氧化还原反应,反应吸热,温度升高加快反应进程,从而有利于多核羟桥络离子的形成,体系的粘度和强度也就较高;在温度为60℃时强度和粘度均达到最大值;当温度高于60℃时,其强度和粘度由于聚合物的降解而呈现下降趋势。橡胶—聚合物冻胶体系与冻胶体系相比,不论是成胶强度还是粘度都略有增加,这是因为复合体系中加入的橡胶均匀分散在冻胶中,起到了骨架支撑的作用,有助于其强度的增加。

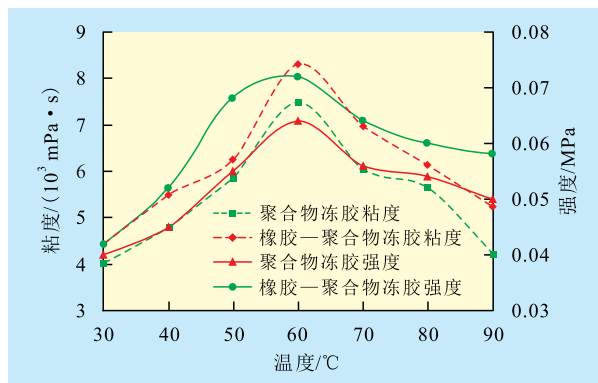


图1 温度对体系成胶粘度和强度的影响

2.2 pH值

考察了温度为25℃,pH值分别为3,5,7,9和11时2种体系成胶后的粘度和强度,由结果(图2)可知,随着pH值的增加,粘度和强度呈现先增加后减小的趋势。这是由于pH值较低时,形成的多核羟桥络离子多,产生过交联,使网络结构脱水收缩,因此出现2种体系成胶强度变差的现象,pH值的增大不利于多核羟桥络离子的形成。当pH值大于7时,体系不容易成胶,这是由于在碱性条件下, Cr^{3+} 将易于形成沉淀,不利于成胶。从图2可以看出最佳pH值为6~7。与冻胶体系相比,橡胶—聚合物冻胶体系成胶强度和粘度都相对较高。

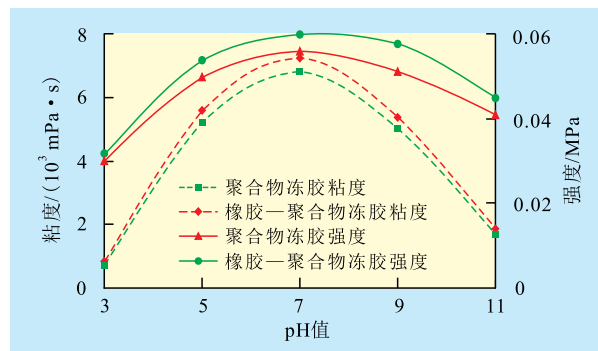


图2 pH值对体系成胶粘度和强度的影响

2.3 矿化度

采用 Na^+ 和 Ca^{2+} 来分析矿化度对体系的影响。实验温度为25℃, Na^+ 的质量浓度分别为5000,10000,20000,30000和50000 mg/L; Ca^{2+} 的质量浓度分别为200,400,600,800和1000 mg/L。由图3可见,随 Na^+ 质量浓度的增加,2种体系的强度和粘度均呈现出先增大后减小的趋势。这是由于 Na^+ 的加入压缩了聚丙烯酰胺分子周围的电层,减小静电斥力,使得交联剂易将聚合物交联起来,因此,随 Na^+ 质量浓度的增加,体系形成冻胶的强度和粘度都增加;但是当 Na^+ 的质量浓度分别大于10000和20000 mg/L以后,2种体系的强度和粘度分别开始减小,这是质量浓度太大使得冻胶失效的结果。与冻胶体系相比,橡胶—聚合物冻胶体系的成胶强度和粘度都略有增加。由图4可看出, Ca^{2+} 的加入会使2种体系的粘度和强度迅速下降,这是 Ca^{2+} 破坏了聚丙烯酰胺的分子结构导致聚合物冻胶失效的结果。

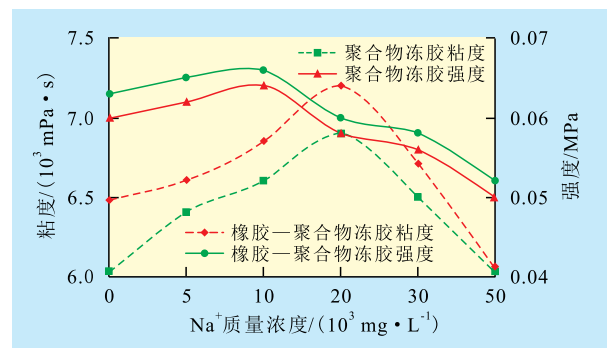


图3 Na^+ 质量浓度对体系成胶粘度和强度的影响

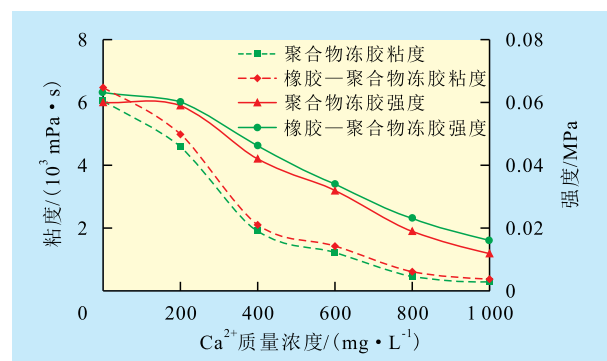


图4 Ca^{2+} 质量浓度对体系成胶粘度和强度的影响

3 封堵及耐冲刷实验

采用岩心流动实验装置,不同目数的石英砂以不同的比例混合均匀后,分别制成不同渗透率的填砂管。4组填砂管分别记为1号、2号、3号和4号,尺寸相同。对所填装填砂管称得干重,以恒定流量对

其进行饱和水实验,待出水稳定、填砂管两端压差恒定后,由数显压力表读出管两端压力值;之后称得饱和水后的填砂管重,可得到其各自的渗透率及孔隙度等参数;最后再注入一定体积的体系,考察体系在不同条件下的封堵性和耐冲刷性。

孔隙度的计算公式为

$$\phi = \frac{M - M_0}{\rho V_f} \quad (1)$$

式中: ϕ 为填砂管填砂后的孔隙度; M 为填砂管饱和水后的质量, g; M_0 为填砂管填砂后的干重, g; ρ 为实验用水的密度, g/cm³; V_f 为填砂管内总体积, cm³。

同时,结合饱和水过程中所得数据,由达西公式反推渗透率,其表达式为

$$K = \frac{Q\mu L}{A\Delta p} \quad (2)$$

式中: K 为填砂管填砂后的渗透率, μm^2 ; Q 为通过填砂管的流量, cm³/s; μ 为流体的粘度, mPa·s;

L 为填砂管长度, cm; A 为填砂管内截面积, cm²; Δp 为填砂管两端压力差, 10⁻¹ MPa。

向1号填砂管中注入21.3 mL的聚合物冻胶体系,向2号、3号和4号填砂管中注入0.3倍孔隙体积的橡胶—聚合物冻胶体系,置于60℃的恒温水浴中24 h,待其成胶,之后以0.3 mL/min的速度进行二次水驱,记录压力随孔隙体积倍数变化的值,其中压力表的极大值就是2个体系的突破压力;待压力稳定后,计算封堵后水相渗透率,进而可计算封堵率;继续水驱4~5倍孔隙体积,考察2个体系的耐冲刷性能。

由表1可知,1号和2号填砂管的渗透率相差不大,2种体系的封堵率都达到了97%以上,但是2号填砂管的突破压力梯度为4.97 MPa/m,明显高于1号填砂管的突破压力梯度3.08 MPa/m,显示出了橡胶—聚合物冻胶体系的优势。由不同渗透率的对比性实验(表1)可以看出,填砂管的渗透率越高,突破压力梯度越小,封堵率呈增加趋势,因而橡胶—

表1 不同渗透率填砂管的驱替数据

编号	堵前渗透率/ 10 ⁻³ μm^2	孔隙度, %	注入速度/ (mL·min ⁻¹)	堵后渗透率/ 10 ⁻³ μm^2	封堵率, %	突破压力/MPa	突破压力梯度/ (MPa·m ⁻¹)	稳定压力/MPa
1	633	24.13	0.3	5.90	97.01	1.85	3.08	1.12
2	625	22.06	0.3	3.35	97.46	4.97	2.35	
3	150	20.4	0.3	1.81	98.80	4.57	7.62	3.62
4	55	16.8	0.3	1.41	97.44	8.75	14.58	7.56

聚合物冻胶体系在高渗透层的封堵效果更好。

由图5可见,橡胶—聚合物冻胶体系的耐冲刷性好,在水驱6倍孔隙体积以后,达到稳定压力2.35 MPa,而聚合物冻胶体系则在水驱3.5倍孔隙体积后,压力开始下降,稳定压力为1.12 MPa,比2号填砂管的稳定压力小得多;由橡胶—聚合物冻胶体系对不同渗透率填砂管的封堵效果(图6)可以看出,2号、3号和4号填砂管都是在6倍孔隙体积以后,达到各自的稳定压力,耐冲刷性好。

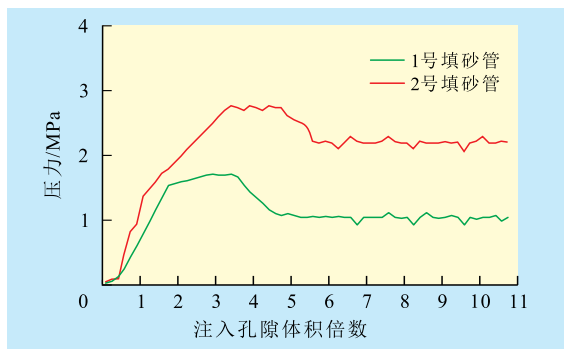


图5 不同体系的封堵效果

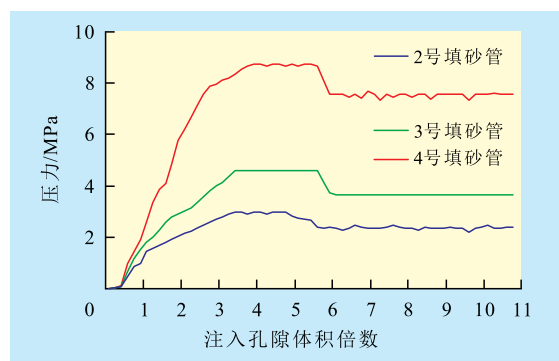


图6 不同渗透率填砂管的封堵效果

4 结论

以成胶后体系的粘度和强度为指标,对比研究了橡胶—聚合物冻胶体系和聚合物冻胶体系的适应性,得出随着温度的升高,聚合物冻胶体系和橡胶—聚合物冻胶体系的粘度和强度均表现出先增

(下转第91页)