

弱凝胶体系成胶性能影响因素研究

张 宇

中国石油辽河油田公司金马油田开发公司,辽宁 盘锦 124010

摘 要:弱凝胶体系调驱作为一种提高采收率的新技术已在国内各大油田得到应用,研究表明弱凝胶体系成胶性能的好坏直接决定调驱效果。通过实验研究了影响弱凝胶体系成胶性能的主要因素。结果表明,聚合物分子量、聚合物/铬交联剂浓度、温度、pH 值对弱凝胶体系的成胶性能影响较大,剪切作用对弱凝胶体系成胶性能有一定影响,含油、油砂对弱凝胶体系成胶性能影响较小,水质对弱凝胶体系成胶性能基本没有影响。研究结果为矿场试验中应用弱凝胶体系进行深部调驱提供了依据。

关键词:弱凝胶体系;成胶性能;调驱

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2013.04.019

0 前言

所谓弱凝胶体系^[1]是由较低浓度的聚合物与交联剂形成的以分子间交联为主、分子内交联为辅,具有三维网络结构的弱交联体系。其驱油机理为:一方面,弱凝胶是一种可动凝胶,其特性介于本体凝胶和分散凝胶之间,注入地层后优先进入高渗透层,完全交联后即可产生一定强度的封堵作用,降低高渗透层吸水能力,在纵向上改善注水井吸水剖面吸水能力。后续注入流体将对弱凝胶产生驱替作用,使弱凝胶被剪切、破碎,形成更小的凝胶团,并向地层深部运移,堵塞地层深部孔道,改变后续注入流体微观和宏观流向,扩大注入流体波及体积。另一方面,由于弱凝胶可移动,能在后续注入流体前缘形成高黏度驱油界面,降低原油与驱替液流度比,提高驱油效率^[2-3],主要应用于油田三次采油及深部调驱提高采收率技术中^[4-6]。

海外河油田海1块为一注水开发普通稠油油藏,目前已进入高含水、高采出程度阶段,采出程度36.5%,综合含水86.5%,长期水驱开发加剧了储层非均质性,注入水波及体积难以提高,依靠常规注水技术难以大幅度提高油藏采收率。针对上述矛盾,该油藏2012年开展了弱凝胶体系深部调驱先导试验,取得了

一定效果。现场应用过程中发现,弱凝胶体系的成胶性能(包括成胶强度、稳定性等)会受到多种因素影响,成胶质量直接影响深部调驱效果。为此,针对影响弱凝胶体系成胶性能的主要因素进行研究,为矿场应用弱凝胶体系进行深部调驱提供了依据。

1 实验材料和仪器

1.1 实验材料

研究中采用的聚合物为部分水解聚丙烯酰胺(HPAM),由辽河油田海澜化工有限公司生产,实验样品编号P1、P2、P3,各自相对分子量分别为1 500、2 000、2 500,水解度为23%~35%。交联剂采用山东东营芳华石化科技有限责任公司生产的羟酸铬乳液,Cr³⁺浓度≥40%,实验用编号为NJ-5,Cr³⁺浓度为2.5%。

1.2 实验仪器

黏度测定使用 Brookfield DV-II+pro 布氏黏度计,转速为20 r/min。

2 弱凝胶体系交联反应机理

弱凝胶体系采用的交联剂一般有Al³⁺、Cr³⁺、酚醛等^[7]。Cr³⁺交联剂由于原料易得,合成工艺简单,成本低

收稿日期:2013-01-16

基金项目:中国石油辽河油田公司项目“海外河油田普通稠油注水油藏提高采收率配套技术研究与应用”(2012147)

作者简介:张 宇(1981-),男,辽宁义县人,工程师,学士,主要从事油田开发地质研究工作。

廉,常用于弱凝胶体系研究中。未经处理的铬离子与聚合物交联反应几乎在瞬间完成,无法满足现场应用需要。 Cr^{3+} 预先与羧酸等形成配位络合物(羧酸铬),可以有效控制成胶速度^[8]。铬交联剂与聚合物的交联反应机理可看作是 Cr^{3+} 的配位体与聚合物的官能团 ($-\text{COO}^-$) 争夺水合 Cr^{3+} 离子的结果;通过调整配位络合物的类型、用量,铬交联剂和聚合物的浓度等因素,能有效减缓 Cr^{3+} /聚合物交联反应速度和成胶强度^[9-11]。

3 影响弱凝胶体系成胶性能的主要因素

弱凝胶体系自配制、注入到从油井中采出,需经过一个复杂过程,会受到聚合物分子量、聚合物/铬交联剂浓度、温度、pH 值、机械剪切、岩心剪切等多种因素影响。

3.1 聚合物分子量

实验给出了恒温放置 16 h、不同凝胶体系黏度变化曲线,见图 1。从图 1 可见,在相同温度条件下,聚合物分子量越高,成胶后凝胶体系黏度越大,成胶效果越好。因此在确定聚合物品种时首选高分子量的聚合物。

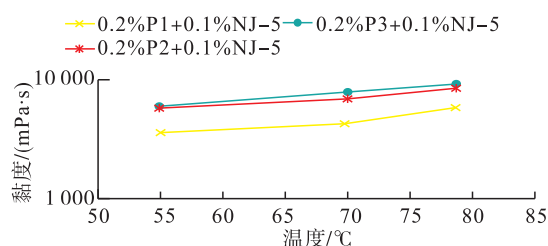


图 1 聚合物分子量对弱凝胶体系黏度影响图

3.2 聚合物/铬交联剂浓度

实验选用分子量为 $2\,000 \times 10^4$ 的聚合物 P2, 分别从高、低两方面拓宽聚合物/铬交联剂浓度,将二者进行交联反应,通过长期热稳定实验来考察凝胶稳定性,确定性能较稳定的弱凝胶体系组合见表 1。

测试结果表明:

a) 高、低浓度交联体系 1 d 后均可成胶,区别在于高浓度交联体系交联反应快,黏度大,成胶后强度大,但容易脱水,低浓度交联体系成胶 7 d 后黏度会大幅度下降;对于同一交联体系,温度越高,体系黏度越大,成胶反应越强烈。

b) 可成胶的聚合物浓度范围在 0.05 %~0.2 % 之间,交联剂浓度范围在 0.03 %~0.4 % 之间,在合适的聚交比下均可成胶,聚交比 >80 :1 时成胶效果最好。

3.3 温度

温度是影响弱凝胶体系成胶性能的重要因素之

表 1 不同浓度弱凝胶体系成胶性能对比表

弱凝胶体系	55 °C 黏度		70 °C 黏度		78.8 °C 黏度	
	10 d	40 d	10 d	40 d	3 d	10 d
0.2%P2+0.4%NJ-5/(mPa·s)	9 800	8 810	11 050	9 967	3 260	580
0.2%P2+0.2%NJ-5/(mPa·s)	9 100	8 520	11 200	9 900	6 520	1 320
0.2%P2+0.15%NJ-5/(mPa·s)	8 600	7 102	9 260	8 080	5 960	1 055
0.2%P2+0.1%NJ-5/(mPa·s)	8 050	5 500	4 200	2 900	6 500	220
0.1%P2+0.2%NJ-5/(mPa·s)	6 520	5 950	9 302	8 120	3 200	260
0.1%P2+0.1%NJ-5/(mPa·s)	5 600	5 210	8 560	6 320	6 550	1 530
0.1%P2+0.05%NJ-5/(mPa·s)	2 500	1 830	3 620	2 105	3 260	302
0.1%P2+0.03%NJ-5/(mPa·s)	1 800	1 150	2 080	205	1 050	65.1
0.05%P2+0.1%NJ-5/(mPa·s)	1 200	850	2 900	230	1 105	102
0.05%P2+0.05%NJ-5/(mPa·s)	1 380	920	1 420	265	820	50.2
0.05%P2+0.03%NJ-5/(mPa·s)	750	162	910	58.3	602	39.1

一。实验给出了不同凝胶体系、不同温度下黏度变化结果见表 2、图 2。从表 2、图 2 可以看出,在 55 °C 下放置 24~40 h 后,各体系均成胶。在 70 °C 下放置 24~40 h 后,各体系成胶强度增大,表现在黏度增加,到 40 h 后黏度略增。在 78.8 °C 下放置 24~40 h 后,各体系成胶强度有所下降,结果表明:有机铬交联剂与聚合物组成的弱凝胶体系,在温度 55~78.8 °C 下放置 16 h 左右即可成胶,且温度越高,成胶反应越强烈。温度在 55~70 °C 时,弱凝胶体系较稳定,当温度升高到 78.8 °C 时,体系成胶时间虽明显缩短,但存在破胶现象且凝胶稳定性变差。

表 2 不同温度下弱凝胶体系黏度对比表

弱凝胶体系	55 °C 黏度		70 °C 黏度		78.8 °C 黏度	
	24 h	40 h	24 h	40 h	24 h	40 h
0.2%P2+0.1%NJ-5/(mPa·s)	8 580	11 010	9 520	12 820	11 320	8 210
		倒不出		倒不出	倒不出	
0.2%P3+0.1%NJ-5/(mPa·s)	10 151	12 286	11 825	12 650	12 062	9 350
		倒不出		倒不出	倒不出	

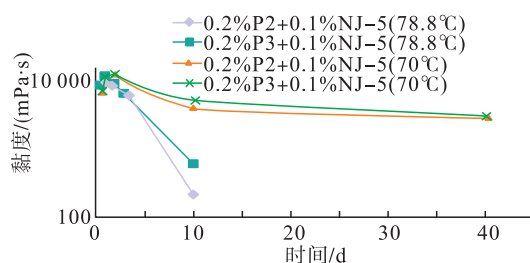


图 2 温度对不同弱凝胶体系成胶性能影响

3.4 pH 值

实验采用海外河油田海 1 块回注污水配制弱凝胶体系(0.2 %P2+0.1 %NJ-5),将 pH 值分别调至 5、6、7、8、9,在 70 °C 下恒温放置,观察体系的成胶情况和凝

胶稳定性,结果见图3。从图3可见,当pH值 <6 时不成胶, $6<pH$ 值 <9 时成胶, $7<pH$ 值 <8 时弱凝胶体系黏度最大,稳定性最好。

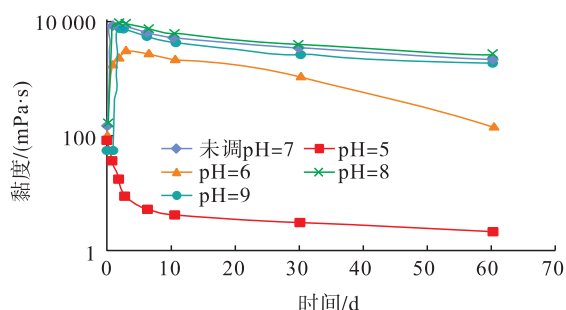


图3 pH值对弱凝胶体系成胶性能影响 (70℃)

3.5 剪切作用

弱凝胶体系经配制、注入到从油井中采出整个过程会受到机械剪切和岩心剪切作用,实验将未成胶的铬交联体系0.2%P2+0.1%NJ-5(黏度为215.2 mPa·s)进行机械剪切,剪切后体系黏度为136.2 mPa·s,黏度保留率63.29%,放在70℃地层温度下观察是否成胶,结果见图4。由图4可见,体系经机械剪切后可以成胶,但强度较弱,成胶性能不如未剪切的。

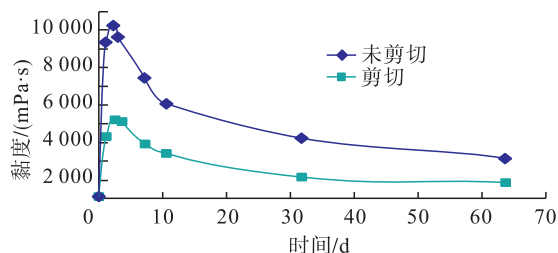


图4 机械剪切对弱凝胶体系成胶性能影响 (70℃)

岩心剪切实验是将未成胶的铬交联体系经过岩心后,收集采出液,同样放在70℃地层温度下观察是否成胶,结果见图5。由图5可见,体系经岩心剪切后仍可成胶,30 d后黏度仍保持 $>1\,000$ mPa·s。

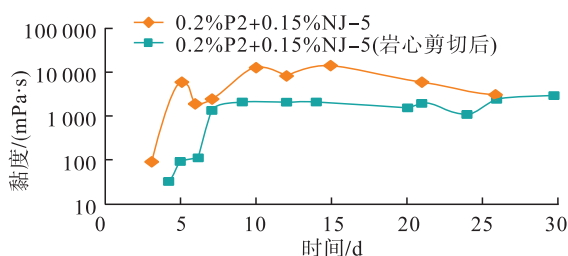


图5 岩心剪切对弱凝胶体系成胶性能影响 (70℃)

3.6 含油、油砂

为了考察有机铬/聚合物溶液在油藏条件下形成弱凝胶的能力,采用海外河油田海1块脱水原油、洗油后的岩心砂及铬交联体系(0.2%P2+0.1%NJ-5),三者按一定比例混合,放在70℃下的保温箱中候凝24 h后混配体系成胶,凝胶体系有一定流动性。结果表明

弱凝胶体系中含油、油砂对成胶性能影响较小。

3.7 水质

实验中采用回注污水、清水、地层采出污水配制弱凝胶体系,评价不同水质对弱凝胶体系成胶性能的影响,结果表明:使用回注污水、清水、地层采出污水配制的弱凝胶体系均可成胶,黏度均达到设计要求,水质对弱凝胶体系成胶性能基本没有影响。

4 结论

a) 针对影响弱凝胶体系成胶性能的主要因素进行了实验研究,结果表明聚合物分子量、聚合物/铬交联剂浓度、温度、pH值对弱凝胶体系的成胶性能影响较大,剪切作用对弱凝胶体系的成胶性能有一定影响,含油、油砂对弱凝胶体系的成胶性能影响较小,水质对弱凝胶体系的成胶性能基本没有影响。研究结果对矿场试验中应用弱凝胶体系进行深部调驱具有一定指导意义。

b) 在实验室内开展的弱凝胶体系研究中,聚合物与交联剂是静态条件下的成胶实验;而现场应用过程中,交联反应是在地层多孔介质中流动状态下进行的,交联聚合物中的组分会受到多孔介质吸附、色谱分离及微生物等诸多不可控因素作用,对交联反应产生影响。交联聚合物体系在动态条件下能否成胶,成胶质量如何以及成胶后的弱凝胶体系在多孔介质中能否流动,是制约和影响现场应用的关键因素,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 陈铁龙,周晓俊,唐伏平,等. 弱凝胶调驱提高采收率技术[M]. 北京:石油工业出版社,2006.4-50.
Chen Tielong, Zhou Xiaojun, Tang Fuping, et al. EOR Weak Gel Flooding Technology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.4-50.
- [2] 邱衍辉,王桂杰,刘涛,等. 茨13块弱凝胶注水转向实验及现场实施[J]. 特种油气藏,2007,14(6):48-51.
Qiu Yanhui, Wang Guijie, Liu Tao, et al. Experimental Study and Field Application of Gel for Redirecting Water Injection in Block Ci 13 [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2007, 14(6): 48-51.
- [3] 王桂杰,陈宝钢,邱衍辉,等. 体膨颗粒/弱凝胶水井裂缝半封堵试验[J]. 断块油气田,2006,13(6):30-31.
Wang Guijie, Chen Bogang, Qiu Yanhui. Test of Actualizing Injection-Well Fraction Semiplugging with Volume Expansion Grain or Weak Gel [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2006, 13(6): 30-31.

(下转第75页)

(上接第 72 页)

- [4] 孙尚如,孔柏岭,肖 磊,等. 河南油田微凝胶驱技术的研究和应用[M]. 北京:石油工业出版社,2004. 5-65.
Sun Shangru,Kong Bailing,Xiao Lei,et al.The Study and Application of Microgel Flooding Technique in Henan Oilfield [M]. Beijing:Petroleum Industry Press,2004. 5-65.
- [5] Albonic P. Effective Gelation -Delaying Additives for Cr^{3+} /Polymer Gels[C]. SPE 25221,1993.
- [6] 赵 光,戴彩丽,程明明,等. 石南 21 井区低渗透油藏弱冻胶深部调剖技术[J]. 石油与天然气化工,2011,40(6):594-597.
Zhao Guang,Dai Caili,Cheng Mingming,et al. Study on the In-Depth Profile Control Technology of Weak Gels for Low Permeability Reservoir in Shinan 21 Well Area [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas,2011,40(6):594-597.
- [7] Smith J E. Performance of 18 Polymers in Aluminum Citrate Colloidal Dispersion Gels[C]. SPE28989,1995.
- [8] Tackett J E.Characterization of Chromium (III)Acetate in Aqueous Solutions[J]. Applied Petroscopy,1989,43(3):490-499.
- [9] 肖 磊,孔昭柯,王 琦,等. 河南油田有机铬交联体系配方及影响因素研究[J]. 石油地质与工程,2010,24(3):70-78.
Xiao Lei,Kong Zhaoke,Wang Qi,et al. Henan Oilfield Organic Chrome Crosslinking System Formula and Its Affecting Factors[J]. Petroleum Geology and Engineering,2010,24(3):70-78.
- [10] 翁 蕊,韦 莉. 低浓度 HPAM/ Cr^{3+} 凝胶成胶行为影响因素的研究[J]. 油田化学,1999,16(1):53-57.
Weng Rui,Wei Li. A Study of Influencing Factors for Gel Formation of Low Concentration HPAM/Cromium (III)Aqueous Solutions[J]. Oilfield Chemistry,1999,16(1):53-57.
- [11] 魏兰竹,代加林,王 琳. HPAM/ Cr (III)凝胶体系控制交联技术[J]. 石油与天然气化工,2011,40(3):263-265.
Wei Lanazhu,Dai Jialin,Wang Lin. Crosslinking Control Technology by HPAM/ Cr^{3+} [J]. Chemical Engineering of Oil&Gas,2011,40(3):263-265.