

低频振动对聚合物凝胶交联过程的影响

李星红^{1,2}, 刘敏³, 蒲春生^{3,4*}, 郑黎明³, 王成俊⁵

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 陕西延长石油(集团)有限责任公司, 陕西 延安 716000;
3. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 青岛 266580; 4. 重质油国家重点实验室, 山东 青岛 266580;
5. 陕西延长石油(集团)有限责任公司 研究院, 陕西 西安 710000)

摘要: 低频振动采油和聚合物凝胶调驱分别作为一种物理和化学提高采收率技术, 已被广泛应用于油田增产, 如何将这2种技术有机地结合起来, 建立低频振动—聚合物凝胶化学复合调驱技术, 提高整体调驱效果, 成为一个重要的研究方向。通过室内实验评价, 研究了低频振动对聚合物凝胶交联性能的影响规律, 以避免2种采油技术复合应用时综合调驱效果变差; 室内实验采用粘度法评价不同振动参数对聚合物凝胶交联过程的影响规律。实验结果表明, 在振动加速度为0.05~0.08倍重力加速度时, 低频振动可以促进聚合物凝胶交联成胶; 在振动加速度为0.08~0.19倍重力加速度时, 低频振动抑制聚合物凝胶交联成胶; 当振动频率为12~30 Hz时, 振动抑制聚合物凝胶交联成胶。因此, 当现场复合应用低频振动采油技术与聚合物凝胶调驱技术时, 应注意选择合适的振动频率和振动加速度。

关键词: 低频振动 聚合物凝胶 振动参数 交联 粘度

中图分类号: TE357.431

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2014)03-0086-03

振动采油技术起源于20世纪50年代, 已在中国多个油田进行了应用, 取得了一定的效果, 是一种有效的增产增注技术^[1-4]。聚合物凝胶调驱技术, 作为一种先进的二次采油技术, 被广泛应用于高含水油田的调剖堵水, 能达到控水稳油的目的^[5]。然而, 当聚合物凝胶调驱技术和低频振动采油技术复合应用于油田现场时, 低频振动波对于聚合物凝胶的影响机理与规律尚不清楚, 复合应用有可能会降低增产效果。通过室内实验评价, 研究了低频振动波对聚合物凝胶交联过程的影响规律, 并对低频振动—聚合物凝胶化学复合调驱技术的矿场实施提出了建议。

1 实验仪器与方法

实验仪器包括: Brookfield DV-III 流变仪、低频谐振波实验装置、高速搅拌器、电子天平、玻璃棒、秒表和量筒等。

实验材料包括: 聚合物为部分水解聚丙烯酰胺(相对分子质量为 $1\ 400\times 10^4$, 水解度为23%), 交联

剂(Cr^{3+}); 模拟地层水由质量分数为70%的NaCl, 14%的 CaCl_2 和16%的 MgCl_2 组成。

实验方法是: 将配制好的聚合物凝胶平均分到2个相同的烧杯, 标注为振动组和对照组。振动组应用低频谐振波实验装置, 在所需振动参数下振动12 h; 对照组在室温下自然成胶。每隔2 h测一次振动组和对照组的粘度。

为了比较不同振动参数对聚合物凝胶的影响, 引入相对粘度变化率^[6], 对实验数据进行无量纲化处理, 得到无量纲的物理量。相对粘度变化率等于振动组与对照组粘度之差除以对照组粘度, 其值为正值时, 表明振动组粘度大于对照组粘度, 振动具有使粘度增加的作用; 其值为负值时, 表明振动具有降粘作用。

2 振动参数对聚合物凝胶交联过程的影响

根据聚合物凝胶的交联机理^[7], 对聚丙烯酰胺凝胶的成胶过程进行分析, 可将其分为3个阶段: 第

收稿日期: 2014-03-05。

作者简介: 李星红, 男, 在读博士研究生, 从事油田提高采收率、油藏工程等研究。联系电话: 13992176696, E-mail: lixh6696@163.com。

*通讯作者: 蒲春生, 男, 教授, 博导。联系电话: (0532)86981702, E-mail: chshpu@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金“低渗油藏低频振动辅助表面活性剂复合驱油机理研究”(51274229)。

1阶段为成胶前期,聚丙烯酰胺与交联剂混合,首先发生分子内交联,分子形态收缩,形成单分子球,此时对体系粘度影响不大,属于交联的诱导期,因此表现为曲线平缓,粘度基本不变。第2阶段为快速成胶期,单分子球交联,即发生分子间交联,分子间交联会产生一定的空间结构,对凝胶(聚合物凝胶)表观粘度产生较大影响,使粘度变化进入加速期,表现为粘度增大,曲线呈现上升趋势。第3阶段为稳定期,分子间交联结束后,粘度不再变化,表现为曲线再次平缓并停止上升。

根据卢祥国等^[8]对交联聚合物分子结构的分析,认为影响聚合物凝胶表观粘度的主要因素是分子间交联形成的网状结构。交联剂提供的金属或非金属盐离子会增加离子强度,使聚合物无规则线团紧缩,促使发生分子内交联形成聚合物凝胶颗粒,使体系粘度不变或有所下降。而分子间交联是聚合物大分子分子链之间进行的交联^[9-10],可形成空间网状结构,使聚合物凝胶粘度大幅度增加^[11]。

2.1 振动频率

在振动频率分别为5, 12, 13, 15, 18和30 Hz的条件下,对所配制的聚合物凝胶进行振动处理,其中振动加速度均为0.04倍重力加速度。

不同振动频率下聚合物凝胶粘度变化不同,差异较大(图1)。在振动频率为5和12 Hz时,振动组相对粘度变化率较低且变化幅度小,表明振动对于聚合物凝胶的成胶基本没有影响;但是,当振动频率为13 Hz时,振动组相对粘度变化率开始逐渐增大且变化幅度变大;当振动频率为15 Hz时,粘度变化率变化幅度进一步增大;当振动频率为18 Hz时,粘度变化率变化幅度又开始减小;当振动频率为30 Hz时,粘度变化率变化幅度又增大,直到振动组与对照组最终成胶粘度基本一致。

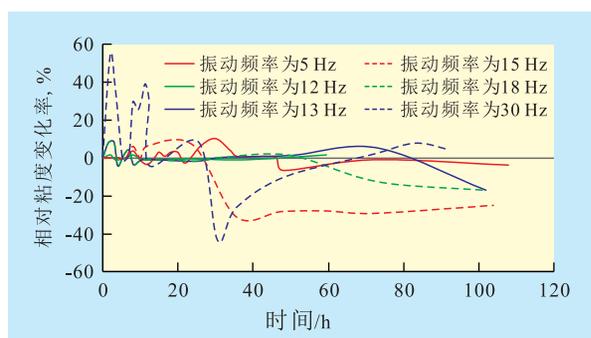


图1 不同振动频率下聚合物凝胶粘度变化

由聚合物凝胶最终粘度变化率与振动频率的关系(图2)可见,当振动频率为5~13和25~30 Hz

时,最终粘度变化率在5%以下,表明振动对聚合物凝胶成胶影响很小;而当振动频率为13~18 Hz时,最终粘度变化率为-25%~-15%,表明振动对聚合物凝胶成胶影响较大,其中振动频率为15 Hz时影响最大。当振动频率为5 Hz时,聚合物凝胶液面基本没有任何波动;当振动频率为15 Hz时,液面振动十分剧烈;当振动频率为30 Hz时,液面振动非常剧烈,但是液面波动形态很密集。结合聚合物凝胶交联机理和不同频率下聚合物凝胶的振动形态,聚合物凝胶粘度变化的原因是:①当振动频率为5~13 Hz时,振动频率较低,不会影响分子交联反应。②随着频率继续增大,低频振动开始影响聚合物凝胶交联反应,当振动频率为13~18 Hz时,粘度下降较大,表明成胶过程中分子内交联反应占主导,分子间交联反应被抑制。即低频振动促进了分子内交联,抑制了分子间交联,从而使聚合物凝胶的粘度下降。③当振动频率大于18 Hz时,低频振动对聚合物凝胶交联的影响开始减小,尤其到25 Hz之后,影响变得很小。因为随着频率越来越大,振动强度也越来越大,聚合物大分子的无规则线团在较高振动强度的影响下,波动十分强烈,聚合物大分子链开始舒展,分子内交联机会减少,单分子球开始减少,分子内部交联减弱,聚合物分子链之间的交联反应增加,形成的最后网状结构开始增多^[12-17],故振动组与对照组粘度差异开始减小。

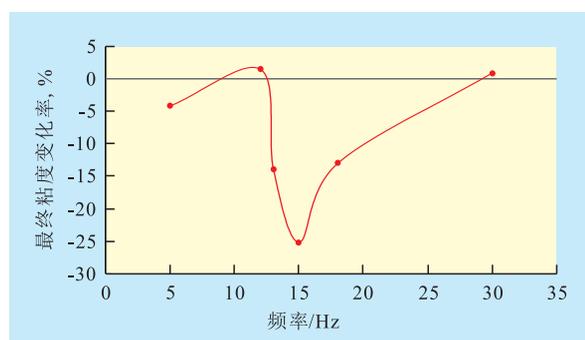


图2 最终粘度变化率与振动频率的关系

2.2 振动加速度

当振动频率为18 Hz时,分别对聚合物凝胶进行加速度为0.04, 0.07, 0.1和0.2倍重力加速度的振动。由聚合物凝胶相对粘度变化率与时间的关系(图3)可见,随着振动加速度的不断增加,振动组的相对粘度变化率呈现先增大后减小的变化规律。

对比4种加速度下的最终粘度变化率(图4)可见,当振动加速度为0.05~0.08倍重力加速度时,振动使最终成胶粘度增加,对于成胶具有促进作用;

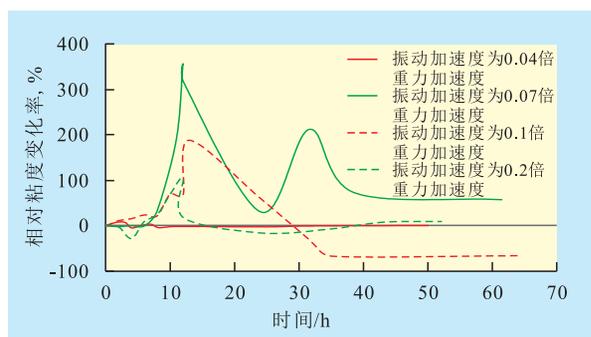


图3 不同振动加速度下聚合物凝胶相对粘度变化率

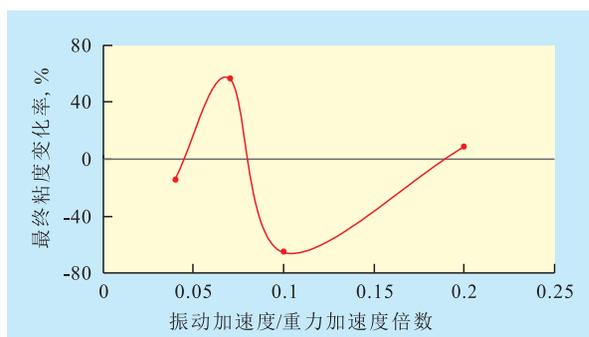


图4 不同振动加速度与最终粘度变化率的关系

当振动加速度为0.08~0.19倍重力加速度时,振动使最终成胶粘度降低,对成胶具有抑制作用;当振动加速度小于0.05倍重力加速度和大于0.19倍重力加速度时,振动组相对于对照组的粘度变化率在10%以内,表明在此范围内的振动对聚合物凝胶的影响较小。

由不同振动加速度下聚合物凝胶在烧杯内振动的形态可知,在振动加速度为0.07倍重力加速度时,聚合物凝胶液面起伏最大,振动得最剧烈;而当振动加速度为0.04和0.2倍重力加速度时,聚合物凝胶液面振动相对平缓,不十分剧烈。

根据曲线变化和振动形态,结合聚合物凝胶交联机理可知,聚合物凝胶粘度变化的原因是:①当振动加速度为0.05~0.08倍重力加速度时,在振动的影响下,聚合物凝胶内分子间交联占主导。表明此时振动会抑制分子内交联,促进分子间交联。在该范围内的振动作用下,聚合物大分子无规则线团开始运动,紧缩和蜷曲减弱,大分子链有所舒展,分子内交联机会减少,聚合物分子间交联反应增加,最终形成的网状结构强度更大。②当振动加速度为0.08~0.19倍重力加速度时,在振动的影响下,聚合物凝胶分子内交联占主导,分子间交联受到抑制。聚合物大分子无规则线团受到更大程度的影响,反而变得更加蜷曲,生成了更多的单分子球,分子内交联增多。由于更多的分子内交联发生,分子间交

联大大减少,最后成胶的内部网状结构大大减少。③当振动加速度小于0.05倍重力加速度时,由于加速度较小,振动强度较小,对于聚合物大分子无规则线团影响较小,聚合物凝胶液面波动较为平缓,故对聚合物凝胶内部影响也较小;而当振动加速度大于0.19倍重力加速度时,由于加速度较大,在惯性作用下,聚合物大分子无规则线团的运动无法与低频振动波同步,出现很大的延迟;虽然加速度很大,但是液面波动程度没有那么剧烈,因此该范围内的振动对于聚合物凝胶成胶过程的交联影响也较小。

3 结束语

在注聚合物凝胶的过程中进行振动,可降低注入过程中聚合物凝胶的粘度,进而降低摩阻和地面注入压力,使聚合物凝胶更容易注入地层。在不同振动频率下,振动对聚合物凝胶交联具有一定的抑制作用。随着振动频率的增加,抑制作用表现出先增强后变弱的规律;随着振动加速度的增加,振动对聚合物凝胶交联的影响由促进到抑制,并且分别存在影响最大的参数值。优选合适的振动加速度和振动频率,利用低频振动技术对聚合物凝胶调驱进行优化,以增强封堵性能。

复合应用聚合物凝胶调驱与低频振动采油技术,通过优选振动频率与振动加速度,可以增强聚合物凝胶封堵效果。反之,会破坏聚合物凝胶调驱效果。

参考文献:

- [1] 时宇,蒲春生,杨正明,等.低频波动条件下流体平面渗流模型研究[J].特种油气藏,2008,15(3):33-38.
- [2] Huh C.Improved oil recovery by seismic vibration: a preliminary assessment of possible mechanisms[C].SPE 103870,2006.
- [3] 杨悦,蒲春生,王萍.低频脉冲波对储层岩心渗流特性影响规律研究[J].西安石油大学学报,2007,22(2):18-23.
- [4] 邢春宇,李化钊,李庆,等.国内外振动采油技术的调研及展望[J].国外油田工程,2006,22(9):41-43.
- [5] 熊春明,唐孝芬.国内外堵水调剖技术最新进展及发展趋势[J].石油勘探与开发,2007,34(1):83-88.
- [6] 郑申声,关立峰,董兰,等.HTPB/N100体系的聚合反应动力学和粘度变化[J].含能材料,2011,19(3):291-294.
- [7] 段洪东.部分水解聚丙烯酰胺/Cr(III)凝胶的交联机理及交联动力学研究[D].杭州:浙江大学,2002.
- [8] 卢祥国,胡勇,宋吉水,等. Al^{3+} 交联聚合物分子结构及其识别方法[J].石油学报,2005,26(4):73-76.

(下转第91页)