·油气采收率·

缔合聚合物在多孔介质中的渗流运移特征

宋新旺[1,2], 李 哲[3]

(1. 中国石油大学(北京) 化工学院,北京 102249; 2. 中国石化股份胜利油田分公司 地质科学研究院,山东 东营 257015; 3. 山东大学 数学学院,山东 济南 250100)

摘要: 为了探讨缔合聚合物在多孔介质中能否保持较高的有效粘度,并指导其矿场应用,进行了不同类型缔合聚合物溶液性能评价和物理模拟实验。测试了不同类型聚合物在不同的质量浓度和剪切速率条件下的增粘性能,在高质量浓度条件下,缔合聚合物的增粘性较常规驱油用聚合物好,但其表观粘度受剪切速率影响大。在多孔介质中的有效视粘度和渗流运移特征及驱油效果表明,具有超高相对分子质量且分子间存在缔合作用的聚合物表现出了较好的增粘性和在多孔介质中均匀的压力传递特征,其作为驱油剂具有较好的应用前景,而仅靠分子间缔合作用增粘的普通缔合聚合物作为驱油剂的应用有待进一步改进和完善。

关键词: 缔合聚合物 增粘效果 多孔介质 渗流运移特征 注入压力 驱油效果

中图分类号: TE357.431 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-9603(2012)04-0050-03

化学驱油藏的开发几乎全部动用了胜利油区的Ⅰ类和Ⅱ类储量,以Ⅲ类储量为主的高温高盐油藏因其资源丰富将是今后三次采油的主阵地,但常规驱油用聚合物不能满足高温高盐的油藏条件,开发高效增粘、耐温抗盐聚合物是突破该类油藏化学驱的技术关键。疏水缔合水溶性聚合物因其具备较强的增粘性,近几年成为驱油用聚合物研发的热点[1-5]。它是通过将少量疏水基团引入亲水性大分子中,在溶液的分子间通过疏水基团之间的缔合作用形成动态物理网状结构,其溶液具有很强的增粘性和耐温抗盐性,在高温高盐油藏具有较大的应用潜力。关于驱油缔合聚合物的研发、溶液性能及在多孔介质中渗流特征的研究多见报道[6-11],但其缔合粘度是否适于驱油,缔合聚合物能否顺利注入地层、能否产生均匀的压力梯度等诸多问题还存在争议。为此,笔者系统考察了不同类型缔合聚合物的溶液特性及在多孔介质中的渗流运移特征,以期为缔合聚合物的矿场应用提供指导。

1 实验材料及方法

实验材料包括:相对分子质量为 $2\ 300\times10^4$ 的常规驱油用聚合物部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)、相对分子质量为 800×10^4 的普通疏水缔合水溶性聚合物(HAWP)、相对分子质量为 $1\ 800\times10^4$ 的超高分子缔合聚合物(AP-P5)、氯化钠(AR 级)、氯化钙(AR 级)和矿化度为 21 338 mg/L 的模拟地层水。实验仪器包括 MCR301 多功能剪切流变仪、PET-1 多功能聚合物评价测定仪和 ISCO 高压柱塞泵。

流变性测试 在实验温度为 85 ℃的条件下,采用模拟地层水配制质量浓度为 1 500 mg/L 的聚合物溶液,利用 MCR301 流变仪测试其剪切流变性。

有效视粘度表征 在 PET-1 多功能聚合物评价测定仪的测试管中装填 30~50 目的石英砂,形成模拟多孔介质环境,把质量浓度为 1 500 mg/L 的聚合物加入测试管,施加 0.02 MPa 压力,电脑同步精密检测聚合物溶液流过多孔介质时的瞬时流量,利用达西定律计算溶液在多孔介质中的有效视粘度。

渗流运移特征及驱油效果 在实验温度为 85 ℃的条件下,首先评价了 3 种聚合物在填砂管岩心和天然岩心中的注入性、压力传播性以及后续水驱时压力与注入量的变化关系;然后考察了不同聚合物在填砂管中的驱油效果。

2 结果与讨论

2.1 增粘性及剪切流变性

由 3 种聚合物在不同质量浓度条件下的表观粘

收稿日期:2012-05-10。
作者简介:宋新旺,男,教授级高级工程师,博士,从事三次采油研究。联系电话:(0546)8716450,E-mail:songxinwang.slyt@sinopec.com。
基金项目:国家科技重大专项"胜利油田特高含水期提高采收率技术"(2011ZX05011)。

度测试结果(图 1)可见,表观粘度随着聚合物质量浓度的增加而增加,但增长的幅度却不同。在低质量浓度条件下,3 种聚合物增粘性基本相当;当质量浓度增加到 1 000 mg/L 之后,HAWP 的表观粘度急剧增加,出现明显拐点,即缔合聚合物分子间发生缔合作用的临界缔合质量浓度点;虽然 AP－P5 没有出现明显的拐点,但在较高质量浓度条件下,HAWP 和 AP－P5 的表观粘度都高于 HPAM。

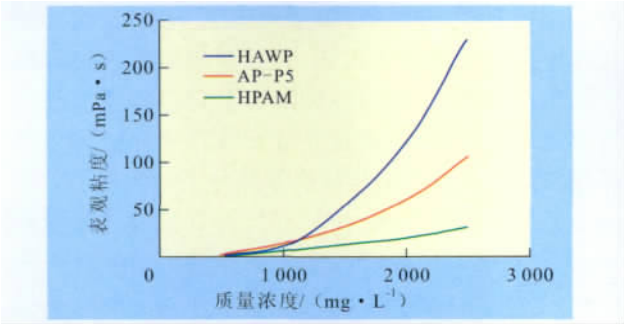

图 1　不同质量浓度对聚合物增粘性的影响

由 3 种聚合物的剪切流变性测试结果(图 2)可见,三者均表现出剪切稀释的假塑性流体特性。在低剪切速率下,缔合聚合物表观粘度远高于 HPAM,但随着剪切速率增加,HPAM 的表观粘度下降幅度较小,而缔合聚合物的表观粘度下降较快,尤其是 HAWP 在高剪切速率下测试的表观粘度甚至低于 HPAM。实验结果表明,缔合聚合物较 HPAM 表现出更强的剪切稀释特性。

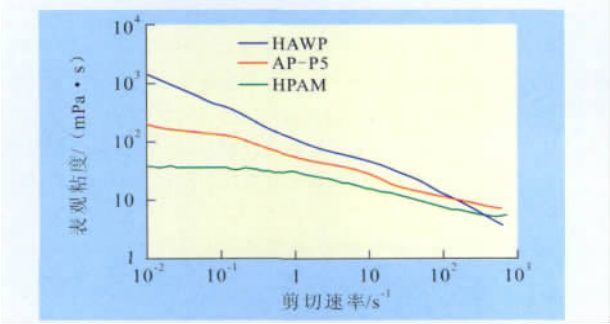

图 2　剪切速率对聚合物粘度的影响

2.2　有效视粘度

由 3 种聚合物在多孔介质渗流运移过程中的有效视粘度测试结果(表 1)可见,在同样的质量浓度条件下,HAWP 的表观粘度最大,但其在多孔介质中渗流运移的有效视粘度却很低;AP－P5 的表观粘度和有效视粘度都较高。出现这种现象的原因可能是不同类型聚合物的微观增粘机理不同,HAWP 自身相对分子质量低,其高表观粘度主要通过分子间缔合作用形成动态物理网状结构实现,多孔介质连续的剪切、拉伸作用使其动态物理网状结构被破坏,导致有效视粘度大幅度降低;而 AP－P5 通过自身高相对分子质量和分子间缔合的共同作用实现了其在多孔介质中较高的有效视粘度。

表 1　聚合物有效视粘度与表观粘度对比　mPa·s

聚合物	表观粘度	有效视粘度
HPAM	12.9	24.3
HAWP	53.7	9.6
AP－P5	31.2	27.5

2.3　渗流运移特征

由 HAWP 和 AP－P5 在填砂管长岩心中运移时的沿程压力变化(图 3)可见,HAWP 溶液的注入造成入口处的压力(p_0)急剧增加,出口的压力(p_1,p_2,p_3,p_4)较低,表现出端口明显封堵和压力传递不均匀的现象;而 AP－P5 溶液注入时,入口至出口处的压力(p_0—p_4)呈缓慢递减趋势,压力在岩心沿程均匀传递,出现这种现象的原因也是不同类型聚合物溶液的分子存在状态及分子间相互作用的强度和速度不同。在岩心高剪切速率下,HAWP 分子间的动态物理网状结构一旦被破坏,其粘度急剧降低,造成聚合物在岩心中更快速的窜流,同时聚合物受到的剪切、拉伸作用力也就越强,使其分子间缔合作用难以恢复;而 AP－P5 溶液的高增粘性是通过自身高相对分子质量和分子间缔合的共同作用实现的,当进

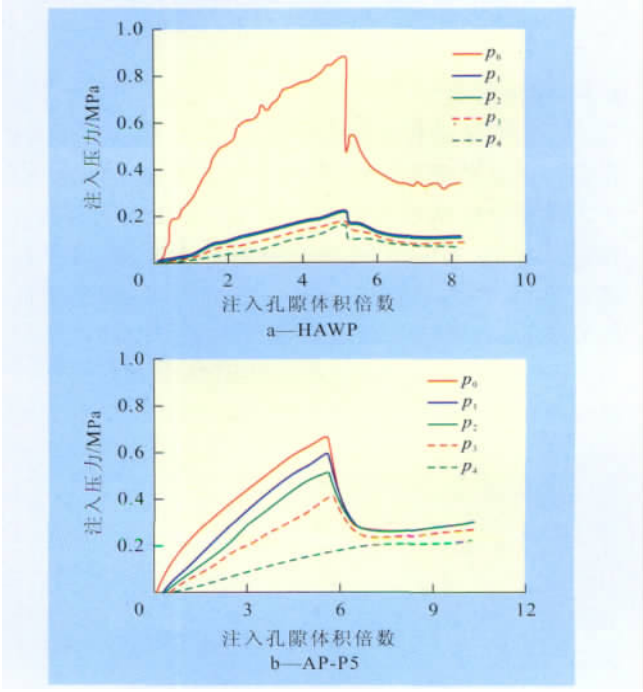

图 3　聚合物注入压力与注入孔隙体积倍数的关系(填砂管长岩心)

入岩心后其粘度不会因为分子间缔合作用的减弱而大幅度降低，可有效控制聚合物在岩心中的渗流速度，为分子间缔合作用的恢复提供了时间，进而实现了聚合物在填砂管长岩心沿程均匀的压力传递。

2.4　注入性及调堵效果

由 3 种聚合物在长度和直径分别为 6 和 2.5 cm 的天然岩心中的注入性实验结果及调堵效果(表 2，图 4) 可见，HAWP 注入困难，出现明显的堵塞岩心现象，AP－P5 和 HPAM 都能够顺利注入岩心，并且 AP－P5 的注入压力、阻力系数及残余阻力系数都高于 HPAM。

表 2　注入阻力系数与残余阻力系数

聚合物	渗透率/10^{-3} μm^2	阻力系数	残余阻力系数
HPAM	1 038	12.2	5.7
HAWP	1 198	堵塞	
AP－P5	1 223	71.5	16.5

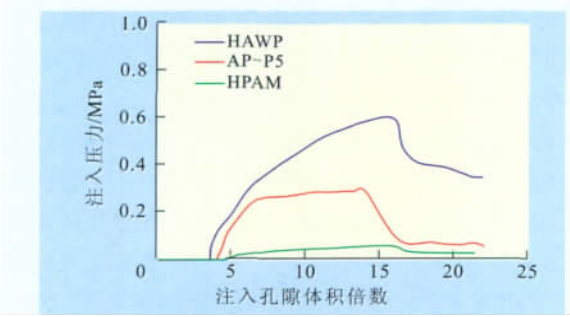

图 4　聚合物注入压力与注入孔隙体积倍数的关系(天然岩心)

2.5　驱油效果

采用均质的长度和直径分别为 30 和 2.5 cm 的石英砂充填模型，模拟胜利油区Ⅲ类油藏条件，比较了 3 种聚合物的驱油效果。结果(表 3) 表明：在 3 种聚合物中，AP－P5 驱油效果最好，而表观粘度最高的 HAWP 驱油效果并不好。由此可见，聚合物具有较高的表观粘度只是保证其具有较好驱油效果的必要条件而非充要条件，在保持聚合物具有较高表观粘度的条件下，如何提高聚合物在多孔介质渗流过程中的有效粘度以及如何使聚合物能够顺利注入地层并产生较好的压力梯度，将是保证聚合物具有良好驱油效果的技术关键。

表 3　不同聚合物的驱油效果对比

聚合物	表观粘度/(mPa·s)	气测渗透率/10^{-3} μm^2	孔隙体积/mL	饱和油量/mL	提高采收率,%
HPAM	12.6	1 495	51.1	44	9.3
HAWP	53.7	1 505	52.7	45	8.9
AP－P5	31.2	1 485	47.5	41	15.6

3　结束语

普通缔合聚合物 HAWP 通过分子间缔合作用虽然使其溶液具有高的表观粘度，但这种表观粘度受剪切、拉伸等外界条件的影响较大，使其渗流运移过程中的有效视粘度较低，并且渗流运移性能和驱油效果都不理想，所以这种缔合聚合物作为驱油剂还有待改进和完善；而超高分子缔合聚合物 AP－P5 不仅自身相对分子质量较高并且分子结构中引入了一定的缔合功能基团，使其不仅具有较高的表观粘度，同时还表现出较好的多孔介质渗流运移特性和驱油效果，该类缔合聚合物作为驱油剂可能具有很好的应用前景。

参考文献：

[1] 赖南君，叶仲斌，贾天泽. 新型疏水缔合聚合物溶液性质及提高采收率研究[J]. 油气地质与采收率，2005，12(2)：63－65.
[2] 王业飞，徐怀民，于海洋，等. 疏水缔合聚合物/Cr^{3+} 冻胶在多孔介质中动态成胶研究[J]. 油气地质与采收率，2011，18(6)：59－62，66.
[3] 吴文祥，张向宇. 不同分子量聚合物溶液在多孔介质中的渗流特性研究[J]. 西安石油大学学报，2007，22(2)：103－106.
[4] 卢祥国，王伟，孙刚. 电解质对聚合物溶液渗流特性影响及作用机理研究[J]. 大庆石油地质与开发，2007，26(1)：104－108.
[5] 张继风，叶仲斌，杨建军，等. 两种聚合物在多孔介质中的渗流特性[J]. 新疆石油地质，2004，25(6)：659－661.
[6] 施雷庭，贾天泽，叶仲斌，等. 剪切作用对疏水缔合聚合物溶液分子聚集行为的影响[J]. 油气地质与采收率，2011，18(2)：49－51.
[7] 施雷霆，叶仲斌，罗平亚，等. 疏水缔合水溶性聚合物 AP－P3 在多孔介质中的缔合行为研究[J]. 天然气勘探与开发，2004，27(4)：40－43.
[8] 程仲，徐荣强，程昆，等. 疏水缔合聚合物在孔隙介质中的渗流阻力模拟分析[J]. 特种油气藏，2010，17(4)：91－93.
[9] 张立娟，岳湘安，郭分乔. 驱油剂在多孔喉中的微观流动和宏观渗流特性[J]. 油气地质与采收率，2008，15(3)：57－59.
[10] 朱怀江，罗建辉，孙尚如，等. 两种新型驱油聚合物在多孔介质中的粘弹性[J]. 油田化学，2006，23(1)：63－67.
[11] 舒政，汤思斯，叶仲斌，等. 分子间缔合作用对缔合聚合物溶液阻力系数与残余阻力系数的影响[J]. 油气地质与采收率，2011，18(6)：63－66.

编辑　刘北羿

China

Tong Minbo, Gao Fei, Li Chunxia et al. Pre-stack density inversion in reservoir and hydrocarbon prediction application in Yong block, Subei Basin. *PGRE*, 2012,19(4):42-45.

Abstract: Yong block is located in the center of Dongtai depression in north Subei Basin, and its reservoir type is complex and diverse. This paper predicts reservoir and hydrocarbon in study area using pre-stack seismic inversion method which is used to guide the rock-physics analysis. With log data correction and standardization, the log curves perform the real stratigraphic rock characteristics, and then carry out the effective stratigraphic correlation to ensure the accuracy of geological understanding. With different lithology and fluid rock-physics sensibility analysis, we distinguish reservoir sands and hydrocarbon, and then identify the best parameter for pre-stack inversion. According to system analysis of elastic parameters of seismic rock physics, and aimed at the complex reservoir characteristics in study area, we combine the rock-physics analysis with pre-stack seismic inversion technology and using approximate Zeoppritz equation method to predict the reservoir sands and hydrocarbons. Finally, combined the well with seismic correction, the results indicate that: pre-stack inversion results can predict reservoir sands distribution well, because of the limit of reservoir itself complexity, hydrocarbons prediction can't exposit its distribution characteristics completely. The next step of oil and gas exploration should enhance the study of sedimentary facies and sequence stratigraphy.

Key words: petrophysics; sensitivity; pre-stack seismic; density inversion; hydrocarbon prediction

Tong Minbo, Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd, Xi'an City, Shaanxi Province, 710075, China

Wang Jun, Lü Xiaowei, Wang Lixin. Model-based relative-amplitude-preserved estimation methods and application of seismic processing technology. *PGRE*, 2012,19(4):46-49.

Abstract: Now, there are few effective methods in the relative amplitude preserved estimation of seismic processing technology. It is difficult to evaluate the amplitude-preserved feature using real seismic data, which are affected by many factors such as noise, surface condition, and so on. Based on model data, four kinds of amplitude-preserved estimation methods are proposed, including amplitude statistics curve, residual difference, amplitude ratio and AVO attribute-preserved method. In addition, using model data, the amplitude-preserved features of some key processing techniques are estimated by means of methods mentioned above. By the estimation result, processing parameters and flows can be optimized for geometrical spread compensation, predictive deconvolution and surface consistent amplitude compensation techniques. In consequence, the research is very useful for the improvement of amplitude-preserved of seismic processing results.

Key words: forward model data; relative amplitude preserve; residual difference; amplitude curve; deconvolution; amplitude compensation

Wang Jun, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing City, 100871, China

Song Xinwang, Li Zhe. Study on seepage characteristics of hydrophobic associated polymer in porous media. *PGRE*, 2012,19(4):50-52.

Abstract: In order to know whether the hydrophobic association polymer can keep high effective viscosity during migration in porous media, different types of hydrophobic association polymer solution character evaluation and physical simulation test are discussed in the paper to give guidance to the field application. The viscosifying performance is tested for different types of polymer solution with different concentration and shear rate. It shows that hydrophobic association polymer has better viscosifying performance than traditional HPAM in high concentration, but shear rate takes great effect on its pseudo-viscosity. It also shows that ultra high molecular weight hydrophobic association polymer with high molecular weight and some degree of association action performs well viscosifying capacity and even pressure transmitting character in porous media by the test of effective apparent viscosity, flow migration characteristic and displacement characteristics. It perhaps has well application feasibility as oil displacement agent. And, the traditional hydrophobic association polymer with its viscosity generation mainly depending on intermolecular association action perhaps should be further improved as oil displacement agent.

Key words: hydrophobic association polymer; viscosity; porous media; filtering flow; injection pressure; displacement performance

Song Xinwang, College of Chemical Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China

Yuan Shibao, Sun Xiyong, Jiang Haiyan et al. Ignition experimental analysis of in-situ combustion under condition of preheating. *PGRE*, 2012,19(4):53-55.

Abstract: In-situ combustion is an important way of development mode on heavy oil reservoir, and it is increasingly becoming one of the key replacing technologies after steam soaking. Ignition is the first link in the process of in-situ combustion, in order to examine the different impact of reservoir conditions on ignition combustion and improve the thermal efficiency and success rate of ignition, the impacts for crude oil of different preheating temperature (210 ~ 300 ℃), different flow rate and combustion adjuvant with combustion tube experiments are studied. It concluded that, based on a certain air flux, high preheating temperature is beneficial to reservoir fast ignition, and combustion adjuvant can improve the combustion status of crude oil. For in-situ combustion test, preheating, combustion adjuvant technology is a simple and effective combustion ignition technology, so it is worthy of promotion and application.

Key words: laboratory experiment; in-situ combustion; preheating; combustion adjuvant; ignition; thermal recovery

Yuan Shibao, College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an City, Shannxi Province, 710065, China