

引用格式:朱诗杰,叶仲斌,施雷庭,等.驱油用聚合物溶液的流变模型应用优化研究[J].油气藏评价与开发,2022,12(4):677-683.

ZHU Shijie, YE Zhongbin, SHI Leiting, et al. Application and optimization of rheological model of polymer solution for oil displacement [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(4): 677-683.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.04.016

驱油用聚合物溶液的流变模型应用优化研究

朱诗杰^{1,3},叶仲斌^{2,3},施雷庭³,宋瑞^{3,4},徐建根¹,刘哲知^{1,3}

(1.重庆科技学院石油与天然气工程学院,重庆 401331;2.成都工业学院,四川 成都 611730;3.西南石油大学油气藏地质与开发工程国家重点实验室,四川 成都 610500;4.中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司,天津 300452)

摘要:流变测试手段的进步推进了研究人员在较广的测试区间内对黏弹性流体的认识。驱油用聚合物溶液呈现“三段式”的流变曲线特征(零剪切段、剪切变稀、极限剪切段),极其需要一个更为准确的描述模型和限定条件。以部分水解聚丙烯酰胺和疏水缔合聚合物为研究对象,通过分析较广范围(0.01~10 000 s⁻¹)的流变曲线,结合黏弹性模量变化进行研究。结果表明:在实验条件下,两种聚合物的流变曲线可以用Carreau流变模型进行描述;疏水缔合作用形成的结构黏度,大幅度增强了溶液的弹性作用,使聚合物溶液AP-P4的弹性模量占据主导。考虑弹性特征对流变曲线的影响,应用小幅振荡实验数据推导的松弛时间谱,限制特征松弛时间(λ)的取值范围,最后通过Carreau流变模型的非线性回归拟合曲线高度匹配了实验数据。研究黏弹性溶液流变本构方程时,需充分考虑溶液特性,搭建不同测试参数间的相互关系,建立合理的限制条件,是优化和改进黏弹性流体流变本构方程的有效手段。

关键词:疏水缔合聚合物;黏弹性;流变性;本构方程;特征松弛时间

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Application and optimization of rheological model of polymer solution for oil displacement

ZHU Shijie^{1,3}, YE Zhongbin^{2,3}, SHI Leiting³, SONG Rui^{3,4}, XU Jiagen¹, LIU Zhezhi^{1,3}

(1. Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China; 2. Chengdu Technological University, Chengdu, Sichuan 611730, China; 3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 4. CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co., Tianjin 300452, China)

Abstract: The progress of rheological testing methods has promoted the researchers' understanding of viscoelastic fluids in a wider testing range. The polymer solution used for oil displacement has the characteristics of "Three-stage" rheological curve (zero shear section, shear thinning section, and ultimate shear section), so a more accurate description model and limiting conditions are extremely needed. Taking partially hydrolyzed polyacrylamide and hydrophobically associating polymer as the research objects, the rheological curves in a wide range (0.01 ~ 10 000 s⁻¹) have been analyzed, and the changes of viscoelastic modulus have been studied. The results show that under the experimental conditions, the rheological curves of the two polymers can be described by Carreau rheological model. The structural viscosity formed by hydrophobic association greatly enhances the elasticity of the solution, and makes the elastic modulus of the polymer P-P4 dominant. Considering the influence of elastic characteristics on the rheological curve, the relaxation time spectrum derived from the experimental data of small amplitude oscillation is used to limit the characteristic relaxation time (λ). Finally, the experimental data are highly matched by the nonlinear regression fitting curve of Carreau rheological model. When studying the rheological constitutive equation of viscoelastic solution, it is necessary to fully consider the solution characteristics, establish the relationship between different test parameters, and establish reasonable limiting conditions, which are effective means to optimize and improve the rheological constitutive equation of viscoelastic fluid.

Keywords: hydrophobically associating polymer; viscoelasticity; rheological property; constitutive equation; characteristic relaxation time

收稿日期:2021-04-29。

第一作者简介:朱诗杰(1989—),男,博士,讲师,从事化学驱提高采收率、多孔介质渗流、调剖堵水等方向的研究。地址:重庆市高新区大学城东路20号重庆科技学院,邮政编码:401331。E-mail:zhusj@cqust.edu.cn

基金项目:重庆市基础研究与前沿探索项目“黏弹性流体动态吸附量与滞留量的量化界定及数学模型表征研究”(cstc2021jcyj-msxmX0522);重庆市基础研究与前沿探索项目“页岩气地层水基钻井液专用热致形状记忆智能封堵剂研制及作用机理”(cstc2020jcyj-msxmX0163);重庆市教育委员会科学技术研究项目“封堵与抑制协同作用的微纳米页岩稳定剂制备及其作用机理”(KJQN202001518)。

驱油用聚合物溶液的完整剪切流变曲线特征应该包括零剪切段、假塑段、极限剪切段、黏弹段、降解段5个部分(图1a)^[1-2];假塑段是驱油用聚合物最为常见的“剪切变稀”特征段^[3-5];零剪切段是指在很小的剪切速率下,流动对分子结构无影响,聚合物溶液黏度不随剪切速率变化而变化,即牛顿段,此时测定的黏度就是零剪切黏度,对应的剪切速率就是零剪切速率^[6-8];极限剪切段是因为剪切速率增加到一定程度后,大分子取向达到极限状态,取向程度不再随剪切速率变化而变化,聚合物溶液遵守牛顿流动定律,表观黏度又成为常数,这就是极限牛顿段^[9-11];流变仪的测定中,极限牛顿段这个区域也是能够获取的,虽然黏弹段和降解段在常规研究中较为少见,但是依然有相关文献证实了其存在。

综上所述,采用可以表征零剪切黏度段、剪切变稀段、极限剪切黏度段3个部分的数学模型(图1b),是目前描述驱油用聚合物流变性最为完整的,主要有 Cross 模型和 Carreau 模型^[12-13]。对比两个公式,Carreau 模型是驱油用聚合物较为适宜的表征模型^[14]。

目前对于本构方程的拟合应用存在一个明显的问题,就是采用最小二乘法的非线性拟合过程中所得的数据与实际数据之间误差的平方和为最小,求取的未知参数组合数据较多,没有限定条件的特征松弛时间在拟合结果参数中数值波动较大,难以表征出黏弹性流体的弹性特征,特别是拟合不同聚合物溶液质量分数时的流变曲线,表征溶液特征参数值的准确度较低。因此,有必要建立一种解析驱油用聚合物流变模型的方法,提高其数值模拟的准确度。针对两种成

熟工业化应用的聚合物溶液部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)和疏水缔合聚合物(HAWP)开展室内实验获得溶液的流变性和黏弹性,以 Carreau 模型为基础,通过应用黏弹模量实验数据,建立聚合物溶液的特征松弛时间约束条件,进行非线性回归不同质量分数的聚合物流变曲线,建立具有规律梯度的特征参数,确保拟合的准确度。

1 实验和理论基础

1.1 实验条件

实验用聚合物^[15-16]:部分水解聚丙烯酰胺(HPAM),黏均分子量 $2\,000 \times 10^4$,固含量 88.9%,特性黏数 1 855.7 mL/g,水解度 26%,大庆炼化公司生产,分子式见图 2a。疏水缔合聚合物(HAWP),黏均分子量 $1\,800 \times 10^4$,固含量 88.0%,特性黏数 2 447.0 mL/g,水解度 23.6%,四川光亚公司生产,分子式见图 2b。

实验盐水:3 000 mg/L 的氯化钠,模拟溶液中的阳离子对聚合物溶液的影响;实验仪器:RS600 哈克旋转流变仪,机械搅拌器,1 000 mL 容量瓶,0.1%精度的电子天平,干燥皿;实验温度:20 °C;溶液的流变性测定^[17]:配制两种聚合物溶液,质量分数分别为 0.10%,0.14%,0.20%,0.25%,设置剪切速率从 $r'=0.01 \text{ s}^{-1}$ 到 $r'=10\,000 \text{ s}^{-1}$ 。

溶液的黏弹性的测定^[18]:对两种聚合物溶液进行溶液配制,质量分数分别为 0.10%,0.14%,0.20%,0.25%,设置角频率从 10 rad/s 到 0.01 rad/s,步长设置为 4。

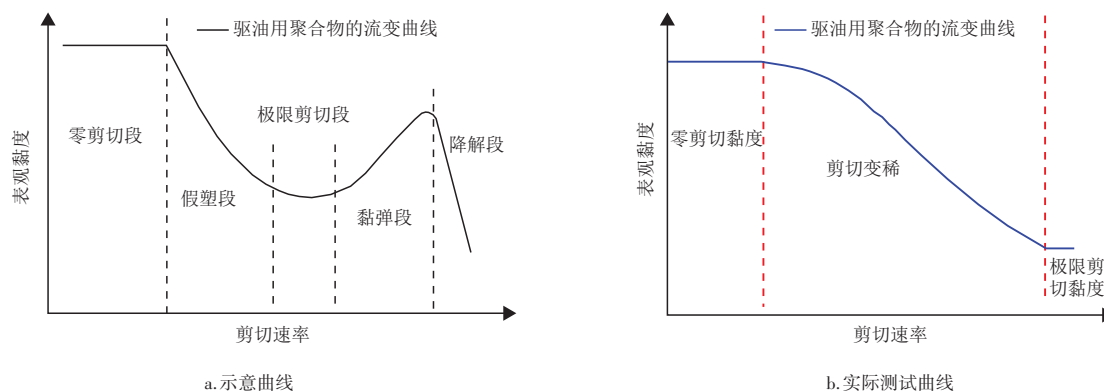


图1 驱油用聚合物的剪切流变特征

Fig. 1 Shear rheological characteristics of polymer for oil displacement

1.2 数学分析理论

1.2.1 松弛时间谱的计算

松弛时间谱是描述材料黏弹性对时间或频率依赖关系最一般的函数关系,流体的全部特性都表现在松弛时间各不相同的所有运动模式和的贡献中^[19]。通过黏弹性模量的测试数据,应用典型线性本构方程(Maxwell模型)分析线性黏弹性区间数据,聚合物熔体的储能模量和耗能模量可表示成离散形式,根据实验所测得的不同频率 ω_j 下的 G' 、 G'' ,采用最小二乘法,添加约束条件, λ_i 和 g_i 大于0,计算方法全局最优,计算出材料的离散松弛时间谱 (λ_i, g_i) ^[20-21]。松弛时间谱是松弛时间和模量的函数关系式:

$$G'(\omega_j) = \sum_{i=1}^N g_i \frac{(\omega_j \lambda_i)^2}{1 + (\omega_j \lambda_i)^2} \quad (1)$$

$$G''(\omega_j) = \sum_{i=1}^N g_i \frac{\omega_j \lambda_i}{1 + (\omega_j \lambda_i)^2} \quad (2)$$

式中: ω_j 为剪切振荡频率,Hz; j 为实验频率节点; N 为不同的Maxwell运动单元数目,采用六参数的计算最为准确^[22], N 组 (λ_i, g_i) 构成材料的离散松弛时间谱。

1.2.2 动态模量的计算

根据聚合物 G' 、 G'' 可以求取动态模量 G^* ,见式(3)^[23]。动态模量是表征材料在不同的外载作用下不同的响应特性,由于相位差的存在,产生了滞后现象,使得应变分成了两部分,第一部分为弹性贡献,与应变呈线性关系,第二部分为黏性贡献,与应变速率呈线性关系:

$$G^* = G' + iG'' \quad (3)$$

式中: G^* 为动态模量,Pa; G' 为弹性模量,Pa; G'' 为黏性模量,Pa; i 为相位角, $^\circ$ 。

将线性黏弹性材料的总应力用广义Maxwell模

型表示并对应变微分^[8],采用傅里叶变换求解微分方程,可得动态模量表达式:

$$G^*(\omega_j) = G' + \sum_{i=1}^N \frac{i(\omega_j \lambda_i) G''}{1 + (\omega_j \lambda_i)^2} \quad (4)$$

松弛模量表示的是材料的松弛性能,是在一定的温度和应力条件下材料应力与应变的比值。采用广义Maxwell模型可以建立松弛模量与动态模量的关系式:

$$g(i) = G' + \sum_{i=1}^N G'' e^{-t/\lambda_i} \quad (5)$$

式中: $g(i)$ 为弹性模量与黏性模量组合的动态模量值; t 为时间变量,s。

1.2.3 非线性回归流变曲线

应用MATLAB软件,将流变实验数据带入Carreau-Yasuda模型式(6)进行拟合,获取表征流变的特征参数:

$$\mu = \left((\mu_0 - \mu_{\text{inf}}) \left[1 + (\lambda x)^a \right]^{\frac{n-1}{a}} + \mu_{\text{inf}} \right) \quad (6)$$

式中: μ 为表观黏度,mPa·s; μ_0 为零剪切黏度,mPa·s; μ_{inf} 为极限剪切黏度,mPa·s; λ 为特征松弛时间,s; x 为剪切速率, s^{-1} ; n 为Carreau指数; a 为Carreau常数。

2 结果与分析

2.1 驱油用聚合物溶液的黏弹特性

2.1.1 动态振荡实验数据

两种聚合物溶液符合线性黏弹性区间的频率为0.1~1.7 Hz。因此,部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)和疏水缔合聚合物AP-P4溶液在线性黏弹区间内的黏弹性实验数据结果见图3、图4。

部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)在不同质量分数条件下的储能/耗能模量存在一定的差异:①质量分

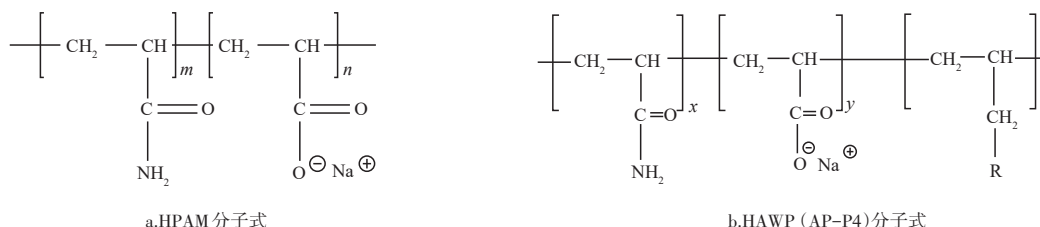


图2 聚合物的分子式

Fig. 2 Molecular formula of polymer

数为0.10%和0.14%的耗能模量 G'' 在整个振荡频率范围内占据主导地位,表现出较强的黏性特征;②质量分数增大至0.20%以后,在低振荡频率范围内,耗能模量占据主导地位,随着振荡频率的增加,储能模量增幅更强,逐渐占据主导地位,质量分数为0.25%时,该现象更为明显。这就说明,HPAM在较高质量分数下,同时振荡频率较好的条件下,其弹性特征的表现才会更加的明显。在其黏弹性的表征中主要是以黏性特征为主导作用,包括其在多孔介质中的流

动时,如果不能产生较强的弹性形变特征,整个流动阻力的建立应该是以黏性黏度作为主导。

对于疏水缔合聚合物AP-P4(图4),低于临界缔合质量分数的黏弹性特征(临界缔合质量分数为0.14%)出现了 G' 和 G'' 的交点;高于临界缔合质量分数的3个溶液质量分数,均表现出储能模量强于耗能模量,这表明在研究的振荡区间内,聚合物AP-P4的黏弹性是以弹性为主的变化特征,弹性特征占据主导地位。相比HPAM,高质量分数条件下AP-P4的弹性模量和储能模量均远大于同质量分数条件下的HPAM,这说明缔合作用明显增强了聚合物分子间的作用力,又特别表现在增加了弹性模量特征。临界缔合质量分数之下,AP-P4依然是以弹性模量占据主导,这是因为分子内缔合加强了聚合物的内聚力,使其抗形变能力大增。

可以看出,AP-P4的黏性特征变化中,弹性模量十分重要,研究过程中不可忽视弹性作用带来的影响,在后续的研究中应该考虑弹性模量的影响。

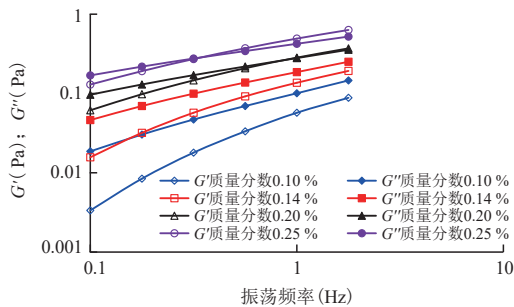


图3 HPAM的弹性模量和黏性模量

Fig. 3 Elastic modulus and viscosity modulus of HPAM

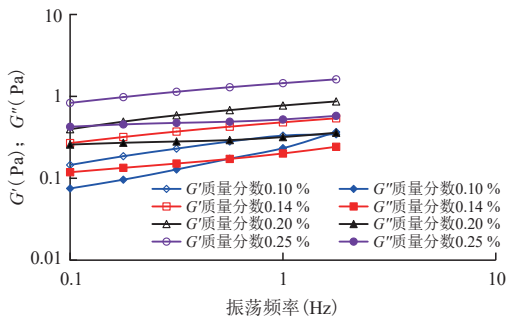


图4 AP-P4的弹性模量和黏性模量

Fig. 4 Elastic modulus and viscosity modulus of polymer AP-P4

2.1.2 松弛时间的特征参数限定优化

1) HPAM、AP-P4的动态模量数据见表1。表1中的HPAM和AP-P4都是随着溶液质量分数增加,振荡频率增加,动态模量呈现上升趋势。根据其拟合的幂律公式,计算可得研究质量分数范围内的两种聚合物HPAM和AP-P4,溶液 G^* 变化分别为0.01~1.00 Pa和0.15~2.00 Pa。其中,AP-P4动态模量表现出的上升趋势规律性没有HPAM强,临界缔合质量分数(0.14%)以下的0.10%规律不同于临界缔合质量分数以上的规律特征,这是聚合物的缔合作用对其复数模量特征的影响。质量分数0.25%的AP-P4在0.1 Hz下的复数模量超过1 Pa,相较于HPAM,其具备更强的模量特征。

表1 不同质量分数下聚合物的动态模量

Table 1 Dynamic modulus of polymer at different concentrations

质量分数(%)	HPAM		AP-P4	
	公式	拟合精度	公式	拟合精度
0.10	$G^* = 0.115 2f^{0.7606}$	$R^2 = 0.9974$	$G^* = 0.407 1f^{0.3886}$	$R^2 = 0.9991$
0.14	$G^* = 0.229 8f^{0.6465}$	$R^2 = 0.9955$	$G^* = 0.522 3f^{0.2418}$	$R^2 = 0.9972$
0.20	$G^* = 0.395 6f^{0.5209}$	$R^2 = 0.9966$	$G^* = 0.835 9f^{0.2355}$	$R^2 = 0.9945$
0.25	$G^* = 0.645 9f^{0.4677}$	$R^2 = 0.9973$	$G^* = 1.542 7f^{0.2092}$	$R^2 = 0.9961$

注: f 为振荡频率,Hz。

2) HPAM和AP-P4的松弛时间谱见表2。部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)的松弛时间谱具有较为明显的规律,随着松弛时间的增加,松弛模量呈现下降的趋势,达到100 s时,松弛模量呈现数量级的下降;而随着聚合物溶液质量分数的增加,均呈现出类似的特征。分析认为这是线性聚合物HPAM的分子结构特征决定的,其聚集行为是呈现“颗粒”堆积的现象,溶液质量分数的增加使其聚集行为增大,堆积体变大,但并没有改变本质的分子间作用力,所以其具有较为明显的规律性^[24]。AP-P4的松弛时间谱呈现的特征明显区别于HPAM,不再存在明显的松弛模量随着松弛时间增加而下降的规律性。通过表2可以归纳为:①在低松弛时间条件下,保持较高的模量特征;②在较高松弛时间下依然具备一定的模量值,说明其弹性能量较大;③与HPAM对比,AP-P4具有更大的松弛时间数学变量。缔合作用增强的弹性模量和黏性模量很好地表现在了松弛时间谱上。

通过松弛模量与动态模量的公式转化,利用实验数据计算的动态模量范围限制即可获得两种聚合物在实验条件下的松弛时间范围(表3)。

2.2 驱油用聚合物溶液的流变特性

2.2.1 聚合物的流变曲线特征

HPAM和AP-P4的流变曲线实验结果见图5和图6。从图5可以看出,当剪切速率为2 500 s⁻¹左右时,不同质量分数条件下HPAM的流变作用特征均发生变化,这表明聚合物溶液达到了临界剪切速率,而且HPAM的临界剪切速率范围并没有受到溶液质

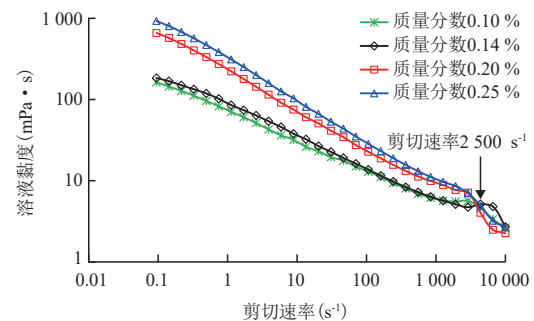


图5 HPAM的流变曲线

Fig. 5 Rheological curve of HPAM

表2 两种聚合物的松弛谱特征

Table 2 Relaxation spectrum characteristics of two polymers

类型	质量分数(%)	$g(\text{Pa})$					
		$\lambda_i=0.01 \text{ s}$	$\lambda_i=0.10 \text{ s}$	$\lambda_i=1 \text{ s}$	$\lambda_i=10 \text{ s}$	$\lambda_i=100 \text{ s}$	$\lambda_i=1\ 000 \text{ s}$
HPAM	0.10	5.12	0.18	0.10	0.01	5.90×10^{-10}	5.79×10^{-10}
	0.14	6.27	0.05	0.21	0.04	1.65×10^{-9}	1.62×10^{-9}
	0.20	3.21	0.89	0.28	0.13	4.83×10^{-9}	4.74×10^{-9}
	0.25	5.04	1.28	0.46	0.25	1.68×10^{-9}	1.65×10^{-9}
AP-P4	0.10	11.89	3.40×10^{-7}	0.15	0.21	5.49×10^{-6}	0.03
	0.14	1.46×10^{-7}	1.04	0.19	0.16	9.38×10^{-8}	0.20
	0.20	6.06	0.79	0.33	0.42	5.26×10^{-6}	0.17
	0.25	5.96	0.94	0.60	0.66	3.52×10^{-6}	0.49

注: λ_i 为松弛时间,s; g 为弹性模量,Pa。

表3 研究质量分数范围内的聚合物松弛时间范围

Table 3 Polymer relaxation time range in study concentration range

聚合物类型	$\lambda(\text{s})$			
	质量分数0.10%	质量分数0.14%	质量分数0.20%	质量分数0.25%
HPAM	$\lambda < 0.01$	$\lambda < 0.01$	$0.01 < \lambda < 0.10$	$0.01 < \lambda < 0.10$
AP-P4	$0.5 < \lambda < 1.0$	$0.5 < \lambda < 1.0$	$0.5 < \lambda < 1.0$	$0.5 < \lambda < 1.0$

注: λ 为特征松弛时间,s。

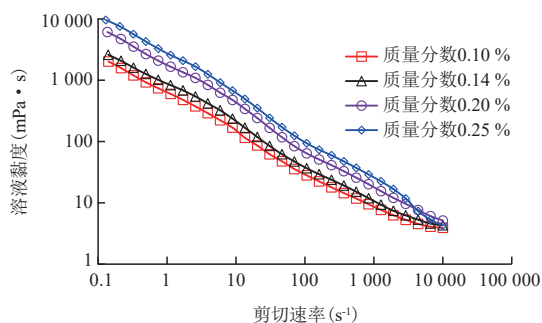


图6 AP-P4的流变曲线

Fig. 6 Rheological curve of polymer AP-P4

量分数的影响,4个溶液质量分数条件下都是该剪切速率下出现黏度大幅度下降的特征。但是不同质量分数聚合物在超过临界剪切速率的流变表现不一样,溶液质量分数较高的0.20%、0.25%在当前条件下溶液黏度直线下降;而较低溶液质量分数的0.14%及以下均表现出剪切增稠区间,再出现降解段。分析认为聚合物溶液的质量分数越高,分子线团越紧密,相互作用力越强,导致主链的相邻键偏离了正常键角的作用力较大,在不可抗拒的剪切外力作用进一步增加时分子链被瞬间扯断,弹性形态没有及时表现就直接断裂降黏;而低质量分数的聚合物分子线团相互之间的作用力较弱,在不断变化的剪切外力作用下,主链的相邻键偏离了正常键角,从而产生弹性恢复力,而表现出黏弹性,使表观黏度增加。HPAM的临界剪切速率不受质量分数和剪切速率的影响,均在 $2\,500\text{ s}^{-1}$ 左右,在当前测定条件下,其质量分数变化的影响会引起胀流段的出现。在临界剪切速率以内未发生机械剪切的HPAM,依然呈现典型的“剪切变稀”的幂律特征。

虽然AP-P4呈现了较好的“剪切变稀”特征,但是不同于HPAM,其流变剪切特征呈现“三段式”,在剪切速率为 $7\sim 100\text{ s}^{-1}$ 时,黏度下降幅度较大,而过低的速率与过高的剪切速率时黏度下降幅度较低,这是疏水缔合作用增强了分子间的作用力,无论是分子内缔合作用,还是分子间的缔合作用均增强了聚合物溶液的内聚力,从而导致其剪切变稀的特征存在一定的变化。缔合作用并没有从本质上改变流变特征,细微的作用变化使其在较低和较高剪切速率条件下的黏度下降较为缓慢,表现出一定的抗剪切性。AP-P4虽然在剪切流变区间中有一定的变化,但是整体上表现出了“三段式”的特征。

表4 两种聚合物溶液的特征松弛时间
Table 4 Characteristic relaxation time of two polymer solutions

聚合物	质量分数 (%)	μ_0 (mPa·s)	μ_{inf} (mPa·s)	λ (s)	a	n
HPAM	0.10	852.9	4.4	0.002	0.155	-0.250
	0.20	2 499.0	4.8	0.005	0.176	-0.306
	0.25	7 542.9	5.3	0.008	0.152	-0.253
AP-P4	0.10	2 592.9	7.5	0.659	0.466	-0.102
	0.20	3 610.1	8.0	0.767	0.766	0.057
	0.25	4 180.1	9.2	0.906	1.226	0.146

2.2.2 聚合物溶液流变模拟结果

对特征松弛时间约束,拟合的计算结果如表4所示。

通过对特征松弛时间范围的强制约束,降低了拟合过程中未知参数变量和算法的影响,特征松弛时间值条件的变化,大幅度地提高了拟合数据的研究意义。上述数据在公式的应用下形成的流变曲线与实验测得的一致性较高。其反向推导出的零剪切黏度,呈现出了聚合物溶液随着质量分数的增加,溶液内的相互作用力增强的特征。

3 结论

1) 疏水缔合作用不仅仅大幅度提高聚合物溶液的表观黏度,其弹性作用也得到大幅度提升,所以实验条件下的黏弹模量实验数据中,AP-P4以弹性模量特征为主导,而HPAM还是以黏性模量为主导。

2) 通过小幅振荡实验数据推导的松弛时间谱,限制聚合物溶液特征松弛时间(λ)的取值范围,再应用Carreau-Yasuda流变模型拟合聚合物溶液(HPAM和AP-P4)流变规律,不仅拟合精确度更高,而且可以避免非线性回归计算手段带来的计算误差,获得高度匹配实验数据的曲线特征。

参考文献

- [1] 周持兴. 聚物流变实验与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
ZHOU Chixing. Polymer rheological experiment and application [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2003.
- [2] 冯茹森, 郭拥军, 吕鑫, 等. 疏水缔合聚物流变学测量方法 II: 零剪切黏度[J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(4): 55-58.
FENG Rusen, GUO Yongjun, LYU Xin, et al. Study on the rheological testing method of water soluble hydrophobically associating polymers II: Zero-shear viscosity[J]. Oil Drilling &

- Production Technology, 2011, 33(4): 55-58.
- [3] SERIGHT R S, FAN T G. New insights into polymer rheology in porous media[J]. SPE Journal, 2011, 16(1): 35-42.
- [4] JOUENNE S, CHAKIBI H, LEVITT D. Polymer stability after successive mechanical-degradation events[J]. SPE Journal, 2018, 23(1): 18-33.
- [5] 孙全力,王爱蓉,张军,等.疏水缔合聚合物 APP4 流变性能实验研究[J].成都理工大学学报(自然科学版),2012,53(1): 104-106.
- SUN Quanli, WANG Airong, ZHANG Jun, et al. Rheological properties of hydrophobically associative polymer APP4[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2012, 53(1): 104-106.
- [6] 舒政,齐勇,程飞豹,等.海上油田聚合物超重力速溶技术研究[J].油气地质与采收率,2021,28(3):142-146.
- SHU Zheng, QI Yong, CHENG Feibao, et al. Research on high-gravity instant dissolving technology of polymers in offshore oilfields[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(3): 142-146.
- [7] 冯茹森.疏水缔合聚合物分子结构与溶液结构及流变特性的关系研究[D].成都:西南石油大学,2008.
- FENG Rusen. Relationship between molecular structure and solution structure and rheological properties of hydrophobically associating polymers[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2008.
- [8] 吴其晔,巫静安.高分子材料流变学[M].北京:高等教育出版社,2002.
- WU Qiye, WU Jing'an. Rheology of polymer materials[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [9] 康万利,王芳,杨红斌,等.两亲聚合物设计合成及其增效体系研究(VIII)——剪切降解与恢复特性[J].日用化学工业,2020,50(8):516-522.
- KANG Wanli, WANG Fang, YANG Hongbin, et al. Study on the design and synthesis of amphiphilic polymers and their synergistic systems(VIII): Shear degradation and recovery characteristics[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics Chemical Industry, 2020, 50(8): 516-522.
- [10] 谭鑫.岩心中聚合物溶液性质变化的影响因素及规律[D].北京:中国石油大学(北京),2017.
- TAN Xin. Influencing factors and laws of polymer solution properties in core[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [11] 孟令伟,康万利,张磊,等.两亲聚合物溶液的流变规律及影响因素[J].高分子材料科学与工程,2012,28(10):55-58.
- MENG Lingwei, KANG Wanli, ZHANG Lei, et al. Rheological rules and influencing factors of amphiphilic polymer solution[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2012, 28(10): 55-58.
- [12] 孙刚,李长庆,张新民,等.十二烷基苯磺酸钠对疏水缔合聚合物溶液流变性的影响[J].大庆石油地质与开发,2012,31(5):132-136.
- SUN Gang, LI Changqing, ZHANG Xinmin, et al. Effect of sodium dodecylbenzene sulfonate on rheology of hydrophobically associating polymer solution[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2012, 31(5): 132-136.
- [13] 吴淑云.驱油用聚合物溶液黏弹性评价方法研究[J].长江大学学报(自科版),2013,10(32):140-142.
- WU Shuyun. Evaluation methods of properties of polymer solutions used for EOR[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2013, 10(32): 140-142.
- [14] 孟令伟,康万利,张磊,等.两亲聚合物溶液的流变规律及影响因素[J].高分子材料科学与工程,2012,28(10):55-58.
- MENG Lingwei, KANG Wanli, ZHANG Lei, et al. Rheological rules and influencing factors of amphiphilic polymer solution[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2012, 28(10): 55-58.
- [15] SHI L T, ZHU S J, YE Z B, et al. The seepage flow characteristics of hydrophobically associated polymers with different aggregation behaviours in porous media[J]. Royal Society Open Science, 2020, 7(1): 191270.
- [16] SHI L T, ZHU S J, YE Z B, et al. Effect of microscopic aggregation behavior on polymer shear resistance[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137(19): 48670.
- [17] 施雷庭,朱诗杰,薛新生,等.不同聚集行为的聚合物耐盐性能评价研究[J].精细石油化工,2019,36(6):80-84.
- SHI Leitong, ZHU Shijie, XUE Xinseng, et al. Evaluation of salt tolerance of polymers with different aggregation behaviors[J]. Speciality Petrochemicals, 2019, 36(6): 80-84.
- [18] 叶仲斌,杨梅,施雷庭,等.疏水缔合聚合物 APP5 的性能研究[J].应用化工,2018,47(6):1150-1153.
- YE Zhongbin, YANG Mei, SHI Leitong, et al. Study on the properties of hydrophobic associative polymer[J]. Applied Chemical Industry, 2018, 47(6): 1150-1153.
- [19] LANG C. Regularization methods for finding the relaxation time spectra of linear polydisperse polymer melts[J]. Rheologica Acta, 2018, 57(4): 339-347.
- [20] 王立军.聚合物溶液黏弹性对提高驱油效率的作用[D].大庆:大庆石油学院,2003.
- WANG Lijun. The action that viscoelasticity of polymer solution on enhancing oil displacement efficiency[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2003.
- [21] 孙玉学.黏弹性聚合物溶液提高驱油效率的机理研究[D].大庆:大庆石油学院,2009.
- SUN Yuxue. The research on the mechanism of oil displacement efficiency by polymer flooding with viscoelasticity[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2009.
- [22] 秦青,张敏革,林兴华,等.部分水解聚丙烯酰胺溶液的黏弹性数学模型及其松弛时间谱的研究[J].石油化工,2015,44(1):64-69.
- QIN Qing, ZHANG Minge, LIN Xinghua, et al. Viscoelasticity model and relaxation time spectrum of partially hydrolyzed polyacrylamide solution[J]. Petrochemical Technology, 2015, 44(1): 64-69.
- [23] 曹宝格,罗平亚.缔合聚合物溶液在多孔介质中的流变性实验[J].石油学报,2011,32(4):652-657.
- CAO Baoge, LUO Pingya. An experimental study on rheological properties of the associating polymer solution in porous medium[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(4): 652-657.
- [24] 朱诗杰,施雷庭,王晓,等.聚集行为对聚合物溶液性能的影响研究[J].应用化工,2020,49(3):597-601.
- ZHU Shijie, SHI Leitong, WANG Xiao, et al. Study on the effect of aggregation behavior on the properties of polymer solutions[J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(3): 597-601.

(编辑 黄颖)