聚合物溶液黏度影响因素分析及控制对策

董林林

（中油辽河工程有限公司）

摘 要 文章分析了聚合物溶液性质、配制水源水质和机械剪切对聚合物溶液黏度的影响。分别用辽河油田欢三联软化清水和软化污水配制聚合物母液，用水驱污水和二元驱污水配制目的液，并测定目的液黏度；在相同搅拌时间下，测定不同转速对母液黏度的影响。结果表明："软化清水＋水驱污水"配制的目的液黏度最大，"软化污水＋二元驱污水"配制的目的液黏度最小，且在目的液中增加表面活性剂，对目的液黏度基本无影响；搅拌时间相同时，转速越小母液黏度越大。提出控制聚合物黏度的主要方法，一是筛选出适合油藏特性的聚合物类型，并通过改变聚合物分子结构增强其抗剪切和抗盐性能；二是选择合理的化学驱污水处理工艺，降低不利因素对配制液黏度的影响；三是优化从配制、注入到运行操作的全过程工艺方案，保证聚合物的充分熟化及聚合物溶液的流态稳定、改变双螺带搅拌器的运行方式和内部结构可以提高母液的熟化效率。

关键词 聚合物溶液；黏度；影响因素；对策

DOI：10.3969/j.issn.1005-3158.2021.06.006 **文章编号**：1005-3158(2021)06-0028-05

Analysis on the Influencing Factors and Measures of Viscosity for Polymer Solution

Dong Linlin

(*CNPC Liaohe Engineering Co.*, *Ltd.*)

ABSTRACT The effects of the properties of polymer solution, water quality and mechanical shear on the viscosity of polymer solution were analyzed. In this paper, polymer mother liquor was prepared by using Huansanlian softening water and softening wastewater from Liaohe Oilfield, and target liquor was prepared by water flooding wastewater and binary flooding wastewater, and viscosity of target liquor was measured. Under the same stirring time, the influence of different speed on the viscosity of mother liquor was measured. The results showed that "softened water + water flooding wastewater" had the highest viscosity of the target solution, and "softened wastewater + binary flooding wastewater" had the lowest viscosity of the target solution, and adding surfactant in the target solution had little effect on the viscosity of the target solution. At the same stirring time, the smaller the speed, the greater the viscosity of mother liquid. The main methods to control polymer viscosity were proposed. One was to select the polymer type suitable for reservoir characteristics and enhance its shear resistance and salt resistance by changing polymer molecular structure. The second was to choose a reasonable chemical flooding wastewater treatment process to reduce the influence of adverse factors on the viscosity of the preparation solution. The third was to optimize the whole process plan from preparation, injection to operation to ensure full curing of polymer and stable flow state of polymer solution. Changing the operation mode and internal structure of twin screw stirrer could improve the curing efficiency of mother liquor.

KEY WORDS polymer solution; viscosity; influencing factors; measure

董林林，2007 年毕业于天津大学环境科学专业，硕士，高级工程师，现在中油辽河工程有限公司从事油气田地面工程给排水、污水处理、消防、注水等设计和科研工作。通信地址：辽宁省盘锦市兴隆台区石油大街 93 号，124010。E-mail：donglinlin1983@163.com。

0　引　言

油藏进入高含水期后，残余油高度分散且难以波及，储量动用程度十分有限。以聚合物驱油技术为主导的三次采油技术是现有技术条件下最重要的提高石油采收率技术[1]，已在国内各大油田实现了工业化应用，取得了较为理想的增产效果。聚合物驱油的机理是通过在注入水中加入高分子量的聚合物，并配以表面活性剂或碱，以改变驱替流体的物化性质及驱替流体与原油和岩石矿物之间的界面性质，从而有利于原油采收[2-3]。黏度是聚合物溶液从地面配注到地下驱替全过程中最主要的考核指标，黏度降低将影响聚合物溶液的波及效果，增加聚合物投加量，降低聚合物驱油的经济效益。根据测算，二元驱地面工艺每增加 1%的黏度损失率，开采 1 t 原油将增加 5.37 元的聚合物成本[4]。从水量平衡角度考量，如果将化学驱污水处理后用作母液掺水水源，可以实现系统内污水的循环利用，不产生剩余污水，避免因污水外排或无效回注对水环境的污染。因此，对影响聚合物溶液黏度的因素进行分析并提出有效控制对策，对实现聚合物驱油的降本增效以及对水环境的保护具有重要意义。

1　聚合物类型及溶解过程

聚丙烯酰胺是线型水溶性高分子聚合物，根据其分子链上的官能团在水溶液中的离解性质，可分为阳离子型(CPAM)、阴离子型(HPAM)、两性离子型和非离子型(NPAM)[5]。目前广泛应用于油层驱替液增黏的是阴离子型聚丙烯酰胺，又叫部分水解聚丙烯酰胺。聚合物溶解过程可分为两个阶段，首先是分子量小、扩散速度快的溶剂分子向聚合物中渗透，使聚合物体积膨胀；其次是聚合物分子向溶剂中扩散，进而形成完全溶解的聚合物分散体系，整个过程持续 2～3 h。聚合物溶解完成的判断标准是溶液黏度不再发生变化。

2　聚合物溶液黏度影响因素

2.1　聚合物溶液性质

在目的油藏确定的前提下，聚合物的分子量与浓度直接决定体系的黏度，也决定了其与目标储层物性的适应性[6]。有研究针对不同储层渗透率分别采用不同分子量的聚合物进行驱油试验，得出了采收率的变化趋势，但没有明确储层渗透率与聚合物分子量的对应关系[7-9]。

2.1.1　聚合物分子量

在聚合物浓度相同的条件下，聚合物分子量越大，溶液黏度越大，驱油效果越好。但分子量越大，受物理剪切的影响越大，黏弹性恢复能力也越差，且分子量过大会给注入带来困难。因此，在设计聚合物分子量时应结合区块的具体情况进行合理设计[10-11]。由于聚合物溶液黏度除了与聚合物分子量有关，还与聚合物浓度、储层配伍性等因素有关，因此，无法确定普遍适用的聚合物分子量范围。

2.1.2　聚合物浓度

溶液黏度随聚合物浓度的增加而增加，两者近似呈对数关系。在溶液黏度相同的条件下，聚合物浓度和聚合物分子量呈负相关性，即聚合物分子量越大，聚合物浓度越低，反之亦然。聚合物注入浓度是根据油层渗透率曲线及最佳油水流度比所需要的地下黏度值通过室内模拟实验得出的[6]。

2.1.3　聚合物水解度

溶液黏度与聚合物水解度呈正相关性，但随着聚合物水解度的增加，受分子链上官能团的分布及溶液中金属阳离子的影响，聚合物之间形成的稳定结构遭到破坏，溶液黏度开始下降。当水解度大于 30%时，溶液的热稳定性变差，耐盐性也下降[12]。

2.2　配制水源水质

不同的配制水源对聚合物溶液黏度的影响很大，分别用辽河油田欢三联站内软化清水及软化污水(水驱净化污水)配制聚合物母液，分别掺水驱(净化)污水及二元驱(净化)污水配制目的液，不同配制水源水质指标见表 1，母液与掺水的比例是 1∶1，再加入不同浓度的表面活性剂，测定目的液黏度，结果见表 2。聚合物采用阴离子型聚丙烯酰胺，分子量 3 000 万，有效物含量 88%；表面活性剂采用十二烷基苯磺酸钠，有效物含量 50%。主要水质指标依据 SY/T 5329—2012《碎屑岩油藏注水水质指标及分析方法》确定，其他指标由地质部门根据污水与储层的配伍性试验确定。

由表 2 可知，“软化清水＋水驱污水”配制的目的液黏度最大；“软化污水＋二元驱污水”配制的目的液黏度最小；在目的液中增加表面活性剂，对目的液的黏度基本无影响。由于二元驱污水处理达标外排或进一步软化处理回用尚无成熟可靠的技术，因此，实际工程中通常采用化学驱污水作为聚合物溶液的掺水水源实现注采平衡，避免环境风险，但化学驱污水的各项水质指标会对溶液黏度造成不同程度的影响。

表 1 不同配制水源水质指标

检测项目	软化清水	软化污水	水驱污水	二元驱污水
总铁/(mg·L^{-1})	未检出	未检出	0.3	0.5
$Na^+ + K^+$/(mg·L^{-1})	207.8	570.4	768.1	1 124.9
Mg^{2+}/(mg·L^{-1})	未检出	未检出	7.2	11.1
Ca^{2+}/(mg·L^{-1})	未检出	未检出	19.3	31.2
总硬度(以 $CaCO_3$ 计)/(mg·L^{-1})	未检出	未检出	77.1	124.1
溶解氧/(mg·L^{-1})	0.5	0.1	0.22	0.1
悬浮物/(mg·L^{-1})	未检出	1.1	30	37
含油量/(mg·L^{-1})	未检出	0.6	0.8	1.6
铁细菌(IB)/(个·mL^{-1})	5	1.0×10^3	1.1×10^4	1.1×10^4
腐生菌(TGB)/(个·mL^{-1})	未检出	未检出	2.5×10^1	1.1×10^2
硫酸盐还原菌(SRB)/(个·mL^{-1})	未检出	未检出	25	70

表 2 不同水源配制的目的液黏度测定结果

序号	配制聚合物母液用水	配制目的液用水	聚合物浓度/(mg·L^{-1})	表面活性剂浓度/(mg·L^{-1})	目的液黏度/(mPa·s)
1	软化清水	水驱污水	2 000	0	700
2	软化清水	水驱污水	2 000	3 000	720
3	软化清水	水驱污水	2 000	5 000	680
4	软化清水	二元驱污水	2 000	0	540
5	软化清水	二元驱污水	2 000	3 000	580
6	软化清水	二元驱污水	2 000	5 000	580
7	软化污水	水驱污水	2 000	0	560
8	软化污水	水驱污水	2 000	3 000	560
9	软化污水	水驱污水	2 000	5 000	560
10	软化污水	二元驱污水	2 000	0	460
11	软化污水	二元驱污水	2 000	3 000	460
12	软化污水	二元驱污水	2 000	5 000	460

2.2.1 溶解氧

溶解氧的存在一方面可以杀灭 SRB，抑制水中 S^{2-}、Fe^{2+} 的生成，或直接进行氧化反应，进而降低水中还原性物质对黏度的影响；另一方面又可以使聚合物发生氧化降解，即通过产生自由基与聚合物分子发生反应，导致聚合物分子链断裂，使溶液黏度降低[13]。因此，溶解氧对溶液黏度的影响是各种因素综合作用的结果，取决于具体的水质情况，但总体起改善作用。

2.2.2 金属阳离子

配制水源中的金属阳离子主要有 Fe^{3+}、Fe^{2+}、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^+、K^+ 等，随着金属阳离子浓度的增加，聚合物溶液的黏度呈现先急后缓的降低趋势，且阳离子所带电荷数越多，这种影响越明显。主要原因是聚合物分子之间依靠官能团—COO—所带负电荷产生的静电斥力而保持舒展状态，随着金属阳离子的浓度增加，这种静电斥力逐渐减弱，聚合物分子由舒展状态恢复为卷曲状态，进而溶液的黏度随之降低[14]。

2.2.3 细菌

含油污水中常见的细菌有 IB、TGB、SRB，其中 IB 能将水中的 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+}，在没有 Fe 的环境中很难存活；TGB 利用污水中的有机物作为养料，可以促进 SRB 的繁殖；SRB 能将硫酸盐还原成硫化氢，一般在有氧环境中存活率低。各种细菌通过酶的作用使聚合物分子链发生断裂，进而降低溶液黏度，而聚合物降解后的产物又可以作为营养物质被细菌利用。实验表明，3 种细菌对聚合物溶液黏度的影响为 IB>SRB>TGB[15]。

2.2.4 化学药剂

采用含油污水配制聚合物溶液时，配制水源中不可避免地含有破乳剂、杀菌剂、缓蚀剂等化学药剂，当这些化学药剂的浓度低于 15 mg/L 时，对聚合物溶液黏度的影响可以忽略不计，但随着化学药剂的浓度逐渐增大，溶液黏度将呈现下降趋势[16]。

2.3 机械剪切因素

在母液配制阶段，搅拌可以促进聚合物干粉在水

中的溶解，但也会对已经溶解的聚合物分子产生机械剪切，进而降低溶液的黏度。选用辽河油田欢三联站内的软化污水配制聚合物母液，聚合物采用阴离子型聚丙烯酰胺，分子量 3 000 万，有效物含量 88%，浓度 4 000 mg/L。聚合物在水中溶胀 2 h 后搅拌 1 h，测定不同转速下的溶液黏度，结果见表 3。

表 3　不同转速下的溶液黏度

转速/（r·min^{-1}）	黏度/（mPa·s）	转速/（r·min^{-1}）	黏度/（mPa·s）
0.5	20 695	5	3 512
1.6	9 673	10	2 130
3	5 695	20	1 556

由表 3 可知，当搅拌时间相同时，转速越小溶液黏度越大，但转速越小意味着熟化时间越长，会导致熟化装置容积过大，进而增加地面工程投资。因此，熟化工艺的关键在于如何在低转速的条件下提高搅拌效率。

聚合物溶液在输送过程中发生流道断面和流速的变化也会对聚合物分子产生机械剪切，当剪切速率较小时，舒展的聚合物分子链变得卷曲，溶液黏度虽然降低，但可以部分恢复；当剪切速率较大时，会使聚合物分子链发生断裂，降低的溶液黏度也无法恢复。研究表明，向聚合物溶液中加入一、二价金属盐（Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}），因机械剪切引起的黏度损失比不加盐时小[17]。

3　聚合物溶液黏度控制方法

3.1　做好聚合物的选型

通过对聚合物各项理化指标进行检测，并开展聚合物与地层孔隙结构配伍关系评价，筛选出适宜的聚合物类型。研究表明，聚合物分子半径与地层孔喉半径满足一定关系后，聚合物才能够顺利注入[18-19]。聚合物的分子量越大，溶液的黏度越大，但同时受机械剪切的降解越明显。可以通过交联和扩链反应，在聚合物分子链上增加支链或形成网状高分子，以提高聚合物分子链的刚度，增强其抗剪切性能。王云芳等[20]以过氧化物为引发剂，将丙烯酸酯（AFSN）、丙烯酰胺（AM）、丙烯酸（AA）三元共聚合成了共聚物 PAMF，结果表明，PAMF 溶液比 HPAM 溶液具有更优异的增黏性能。还可以在聚合物分子结构中嵌入强亲水基团或两性离子基团提高其抗盐性能。在盐水中，由于盐水对聚合物分子内的阴、阳离子基团间吸引力的削弱或屏蔽，致使聚合物分子比在淡水中更舒展，宏观上表现为聚合物在盐水中的黏度升高或黏度下降幅度减小。

3.2　确定合理的污水处理工艺

为了实现注采平衡，通常采用化学驱污水作为聚合物母液的掺水水源，水质指标需满足含油量≤20 mg/L，悬浮物≤20 mg/L，$Ca^{2+}+Mg^{2+}$≤20 mg/L，而三菌、粒径中值等指标需要根据地层的空气渗透率确定。由于化学驱污水水质不同于常规水驱污水，因此，需要对常规的污水处理工艺进行改造。原水先经混凝沉降和气浮处理，初步去除水中的浮油及悬浮物；接着进入生物接触氧化池，利用生物协同作用，降解水中的有机物，同时曝气充氧可以氧化水中的 S^{2-}、Fe^{2+} 等还原性物质，且抑制 SRB 和 IB 的生长；然后经过滤进一步去除水中的油和悬浮物，如水中含有 Ca^{2+}、Mg^{2+}，还需要对污水进行软化处理将其去除；最后向水中投加化学杀菌剂，将水中的微生物和细菌杀灭，杀菌剂的选择要考虑对聚合物溶液黏度的影响。

3.3　设备及材料选择

针对熟化罐中普遍采用的双螺带搅拌器，在采用低转速的前提下，使内外两层螺带以不同的速度旋转，以实现聚合物的径向和轴向的混合循环，可以显著提高搅拌效率；通过减小螺带的倾斜角度（25～35°）以及加大螺带的桨叶半径（外螺带桨叶半径：熟化罐半径＝0.9～0.95），可以减少聚合物搅拌的滞留区。双螺带搅拌器结构示意见图 1。输送原水、聚合物母液及目的液的管线选用非金属材质，可以避免输送过程中因金属管材的腐蚀对溶液黏度造成不利影响。

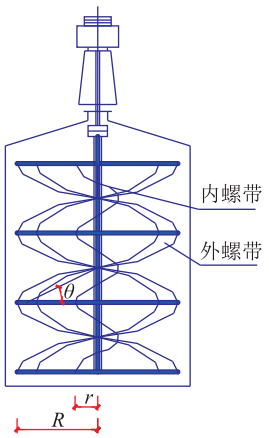


图 1　双螺带搅拌器结构示意

3.4　优化配注工艺及运行管理

利用配制站的外输泵直接为注入站的注入泵输

入聚合物母液，减少聚合物母液因进出缓冲构筑物而导致的黏度损失。外输泵采用恒压变频连锁控制，防止聚合物母液的流态出现波动。母液和稀释用水的混合选用低剪切静态混合器，管线路由的选择尽量减少弯头数量并采用弹性敷设，均能够起到降低机械剪切的作用。配注系统增加扫线流程，定期对聚合物母液管线、目的液管线及掺水管线进行清洗，以降低管线长期运行过程中内壁附着污染物对黏度的影响。

4 结 论

1）聚合物溶液黏度作为聚合物驱油的重要指标，从地面配制到注入地下的全过程中受到多种因素的影响，主要包括聚合物溶液性质，配制水源水质和机械剪切，这 3 方面因素往往相互作用，共同影响聚合物溶液的驱替效果。

2）选择高分子聚合物并在聚合物分子链上进行扩链和嵌入等反应，可以提高聚合物溶液的抗剪切和抗盐性能。

3）通过将化学驱污水处理后用于聚合物母液掺水，既可以实现污水在系统内的循环利用，又可以降低污水外排和回注带来的环保风险。

4）内外螺带以不同速度旋转，同时减小螺带倾斜角度和增大桨叶半径，可以提高双螺带搅拌器的搅拌效率；减少聚合物溶液通过的设备及弯头数量，可以降低机械剪切；增加聚合物溶液配注系统的扫线流程，可以减少管道中附着污染物对溶液黏度的影响。

参 考 文 献

[1] 郭春萍，朱慧峰，王皓宇，等. 三元复合体系界面张力与驱油效率相关性研究[J]. 天然气与石油，2011，29(4)：59-61.

[2] 王德民. 走向新世纪的大庆油田开发——王德民院士报告论文集[C]. 北京：石油工业出版社，2001：404-420.

[3] 郭万奎，程杰成，廖广志. 大庆油田三次采油技术研究现状及发展方向[J]. 大庆石油地质与开发，2002，21(3)：1-6.

[4] 乔明. 无碱二元驱配注工艺及粘度损失控制技术[J]. 中国新技术新产品，2014(1(下))：124-125.

[5] 李玉芳，崔小明. 聚丙烯酰胺的生产应用及市场分析[J]. 化学推进剂与高分子材料，2002(3)：16-20.

[6] 苑光宇，罗焕. 聚合物分子量及浓度优化方法研究[J]. 天然气与石油，2018，36(6)：71-76.

[7] 刘晨，王凯，王业飞，等. 针对 A 油田的抗温、抗盐聚合物/表面活性剂二元复合驱油体系研究[J]. 岩性油气藏，2017，29(3)：152-158.

[8] 宋辉. 喇嘛甸油田二类油层聚驱分质分层注入研究[D]. 大庆：大庆石油学院，2009：30-31.

[9] 吴婷婷，侯亚伟，张绍辉，等. 低渗透油层聚合物驱注入参数的确定[J]. 特种油气藏，2009，16(3)：59-61.

[10] PYE D J，GOGARTHY W B，PYE J. Improved secondary recovery by control for water mobility[J]. Journal of petroleum technology，1964，16(8)：911-916.

[11] 程杰成，王德民，吴军政，等. 驱油用聚合物的分子量优选[J]. 石油学报，2000，21(1)：102-106.

[12] 王锦秀. 污水配注聚合物粘损规律及控制技术研究[D]. 大庆：东北石油大学，2011：1-3.

[13] 吕鑫. 采出污水配制聚合物溶液的影响因素研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版)，2010，32(3)：162-166.

[14] 张铁刚. 配聚污水对聚合物溶液粘度影响及对策[J]. 当代化工，2017，46(8)：1582-1584.

[15] 樊剑，韦莉，罗文利，等. 污水配制聚合物溶液黏度降低的影响因素研究[J]. 油田化学，2011，28(3)：250-253.

[16] 林翔. 埕东油田聚驱过程聚合物黏度影响因素[J]. 油气田地面工程，2010，29(3)：34-35.

[17] 雷巧会，田根林，郑德温，等. 聚合物粘度剪切损失与恢复的研究[J]. 西安石油学院学报，1997，12(6)：36-38.

[18] 朱怀江，孙尚如，罗健辉，等. 南阳油田驱油用聚合物的水动力学半径研究[J]. 石油钻采工艺，2005，27(6)：47-50.

[19] 曹瑞波，丁志红，刘海龙，等. 低渗透油层聚合物驱渗透率界限及驱油效果实验研究[J]. 大庆石油地质与开发，2005，24(5)：71-73.

[20] 王云芳，孔瑛，杨金荣，等. 疏水缔合聚合物改性单体(AFSN)的合成与应用[J]. 石油与天然气化工，2004，33(4)：278-280.

（收稿日期 2021-03-17）

（编辑 郎延红）

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告