

海上稠油聚合物驱关键技术研究 与 矿场试验

张凤久¹, 姜伟¹, 孙福街^{1,2}, 周守为¹

(1. 海洋石油高效开发国家重点试验室, 北京 100027; 2. 中海油研究总院, 北京 100027)

[摘要] 在深入分析海上稠油聚合物驱提高采收率的难点与挑战的基础上, 通过近 10 年的攻关和矿场试验, 研制出适合海上稠油油藏条件的驱替液技术、平台聚合物配注技术、海上稠油含聚采出液处理技术及早期注聚效果评价等一系列技术, 初步形成了海上油田聚合物驱油技术体系, 并在渤海绥中 36-1、旅大 10-1 及锦州 9-3 等 3 个油田进行了不同规模的现场试验, 取得了明显的增油降水效果。证明了聚合物驱提高采收率技术在海上稠油油田应用的技术可行性和经济有效性, 为海上油田高效开发探索出了一条崭新的道路, 具有广阔的应用前景。

[关键词] 海上油田; 稠油; 聚合物驱; 驱替液; 聚合物溶液配制; 采出液; 驱油效果

[中图分类号] TE53; TE345 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2011)05-0028-06

1 前言

我国海上油田已发现稠油占总地质储量的 69% 以上, 主要集中于渤海油田, 稠油油田开发方案标定水驱采收率 18% ~ 25%, 实际平均采收率仅为 20.2%, 对于渤海油田, 采收率提高 1%, 就相当于无需任何勘探投入就可获得一个亿吨级储量的大油田。因此, 海上稠油油田提高采收率潜力巨大。但是海上油田平台寿命一般在 20 ~ 25 年, 平台到期后地层中的原油将难以经济动用, 大量原油仍残留在储层中, 所以, 如何进一步提高海上油田采收率迫在眉睫^[1]。

对于稠油油田, 提高采收率技术包括热力采油、气驱、化学驱和微生物驱等, 但是由于海上油田储层疏松易出砂、储层非均质性强、大位移井、井距大、平台空间小、缺少淡水资源、气源不足、平台施工困难、安全风险以及提高采收率技术发展水平等因素的制约, 使得热力采油、气驱和微生物驱等技术在海上油田难以规模化应用和取得高效益。聚合物驱技术相对成熟, 技术参数容易调控, 施工相对简单, 该技术

作为陆地油田主要的提高采收率技术之一在大庆油田^[2,3]、胜利油田^[4]及河南油田^[5]等陆地油田大规模应用, 有效遏制了原油产量递减的趋势, 但在国内外海上油田^[6,7]由于技术和经济的制约, 仅开展了小规模先导试验, 且未见明显效果。室内研究及矿场试验表明聚合物驱可大幅度提高渤海稠油采收率, 但迫切需要攻克海上油田聚合物驱关键技术。中海油在国家“863”计划和重大专项等项目的支持下, 历经近 10 年, 在驱替液技术、平台聚合物配注技术、海上稠油含聚采出液处理技术和早期注聚效果评价等方面开展了系统攻关, 初步形成了海上油田聚合物驱油技术体系, 在渤海油田进行了不同规模的现场试验, 并取得了明显的增油降水效果。

2 海上稠油聚合物驱提高采收率的难点与挑战

聚合物驱提高采收率方法的原理是在注入水中添加少量聚合物, 提高注入水粘度, 扩大波及体积, 达到提高采收率的目的。该技术已成为我国陆地油田最主要的提高采收率技术手段之一。海上油田与

[收稿日期] 2011-01-28

[基金项目] 国家科技重大专项(2008ZX05024, 2008ZX05057); 国家“863”计划项目(2007AA090701)

[作者简介] 张凤久(1964—), 男, 吉林扶余县人, 高级工程师, 主要从事海上油气田开发工程、油气资源开发战略和油气资产评估等领域的技术研究和管理工作; E-mail: zhangfj@enooc.com.cn

陆地油田差异性很大(见表1),从表1可以看出,与国内外注聚油田相比,海上油田的主要差异在于:井距大、油层厚、矿化度高、二价阳离子含量高、反九点井网、缺乏淡水、工程条件受限、海上投入大等,这将导致海上油田实施化学驱提高采收率技术难度大增。因此,对于海上油田化学驱而言,其挑战包括以下几个方面:

1)海上油藏和完井方式特殊性:要求聚合物性能具有较好的增粘性、耐盐性、抗剪切性和长期稳定性;

2)海上平台空间狭小:聚合物注入装置所占面积大、重量大,对聚合物的剪切降解严重,大幅度提高聚合物配制能力困难,需要改善聚合物的溶解性;

3)海上油田开发环保要求高且平台空间受限,聚合物驱采出液在平台上一次处理达标困难,对污水回注将产生很大影响;

4)海上油田开发政策及注聚时机与陆上油田的差异较大,需要建立海上油田聚合物驱效果评价方法和规范。

表1 海上油田与国内外注聚油田影响聚驱的主要指标比较

Table 1 Comparison of main indexes for different polymer flooding reservoirs

指标	绥中36-1油田	大庆油田	胜利孤岛油田	印度(Sanand油田)
地层原油粘度/(mPa·s)	平均70 (13.3~442.2)	平均8 (7~10)	平均46 (40~80)	20
井网	反九点井网	五点井网	反五点井网	
井距/m	350~590	106~250	150~220	300
平均油层厚度/m	32.4	11~21	12.1	7
地层温度/℃	65	45	70	81
注入水矿化度 (mg·L ⁻¹)	6 540~34 000	4 600	2 000~14 000	9 880
二价阳离子含量	810	20	69~410	<100
注聚时机含水/%	68.0	83~95	90.4	60.0
试验区块特点	原油粘度高、变化大, 二价阳离子含量高	油稀、水好; 整装油田,层薄	块状油藏特高 含水注聚	油稀、水好;温度稍高; 整装油田,层薄

3 海上稠油聚合物驱关键技术

实施海上油田聚合物驱油技术,涉及到高效驱油剂的研发、平台配注装置、采出液处理及驱油效果评价等环节的关键技术研究。

3.1 适合于海上稠油的聚合物驱替液研制

渤海油田具有高原油粘度、大井距、高注入水矿化度、高钙镁离子含量及有限的平台空间等特点,要求聚合物驱油剂具有高增粘性能、抗剪切能力强、老化稳定性好、耐盐性好、快速溶解等特性。广泛调研和初步评价了目前国内外市场销售有代表性的驱油用聚合物在渤海注聚水质条件下的驱油性能,发现这些聚合物都难以满足海上注聚条件下的增粘性能和抗剪切性能需求。因此,为了适应渤海油田大规模注聚,实现海上油田聚合物驱提高采收率的要求,针对海上油田的特点,开展了适合于海上稠油的聚合物驱替液研制工作。为了达到上述技术要求,克

服了以下技术难点:a. 丙烯酰胺与疏水单体(或双亲单体)共聚获得高分子量共聚物的合成技术;b. 水溶性疏水缔合聚合物的干粉速溶技术;c. 高钙镁和高剪切条件下,耐剪切和耐老化的疏水缔合聚合物分子结构的设计和优化及相应合成技术。

借鉴了疏水型丙烯酰胺类聚合物基础研究和超高分子量水解聚丙烯酰胺合成、应用的相关文献^[8-10]中所涉及的一些技术思路,设计出具有适度支化构型和疏水缔合单元具有微嵌段特征的分子结构,并开发出配套的高分子量疏水缔合聚合物工业化合成技术和聚合物速溶技术,从而获得了满足海上油田高效注聚提高采收率技术规模化应用要求的疏水缔合聚合物驱油剂工业化产品。初步获得了适用于海上油田的疏水缔合型聚合物,在渤海绥中36-1油田油藏条件下,疏水缔合聚合物溶液的主要性能与国内同类产品的对比见表2。

表2 疏水缔合聚合物和国内同类产品溶液性能比较

Table 2 Comparison of properties of hydrophobically associating polymer with the conventional polymer

评价内容	疏水缔合聚合物	国内同类产品
溶解速度/min	≤50	≈120
1 750 mg/L 粘度/(mPa·s)	≈150	≈46
剪切粘度保留率/%	>68	>80
90 天老化粘度保留率/%	>90	>40
特性粘数	1 502	1 276
静态吸附量/(μg·g ⁻¹)	157	205

表3 驱油实验参数

Table 3 Parameters of core flooding experiments

聚合物类型	岩心 宽度/cm	岩心 长度/cm	孔隙 体积/mL	含油 饱和度/%	岩心渗 透率/mD	水驱 采收率/%	聚驱采 收率/%	后续水驱 采收率/%	提高采 收率/%
疏水缔合聚合物	4.5	30	124.5	75.5	1 422	21.7	12.13	19.57	31.7
市场销售同类聚合物	4.5	30	143	78	1 463	20.63	7.35	16.5	23.85

小平台注聚是亟待解决的问题,目前,国内外尚无相关研究。针对上述问题,在海上油田聚合物配注装置设计中提出了“小型化、高效化、模块化”的理念,同时,在聚合物配注技术方法,结合海上平台的特点,从聚合物本身的溶解特性入手,深化研究聚合物溶液的分散溶解规律,优化聚合物分散溶解系统的各个节点,设计配备快速分散溶解单元,并采用连续配注工艺。经过几年的攻关,研制出一套满足海上平台扩大注聚规模要求的现场试验装置,该装置具有以下特点:a. 疏水缔合聚合物溶解时间从 2 h 缩短为 40 min;b. 注入井井口疏水缔合聚合物溶液(1 750 mg/L)粘度高于 30 mPa·s;c. 聚合物快速溶解装置占地面积同比下降 21%,运行载重同比下降 37%。

目前该装置已经应用于绥中 36-1F 平台,运行平稳,最大限度消除了聚合物溶解过程中的“鱼眼”现象,缩短了聚合物的溶解时间,提高了井口聚合物溶解粘度保留率,为海上油田聚合物驱技术规模化应用打下了基础。国内某陆地油田相同处理能力(1 440 m³/d)的聚合物配注装置占地面积为 802.08 m²,约为海上油田注聚装置占地面积 49.46 m²的 16 倍。

3.3 海上平台含聚采出液处理技术

聚合物驱采出液处理已经是海上油田提高采收率技术中所面临的一个瓶颈问题。随着渤海油田聚

合物驱的试验规模扩大,聚驱油田采出液处理的问题日益凸现。

试验结果表明,疏水缔合聚合物溶液的主要理化性能优于国内同类产品。从表 3 的驱油试验结果可看出,在非均质岩心、水驱含水率 70% 左右转注 0.3PV 聚合物溶液,然后后续水驱到含水率 95% 的条件下,疏水缔合聚合物比市售同类产品提高采收率值高 7.85%。

3.2 海上平台聚合物在线溶解装置

海上油田空间有限、载重小、面积小,制约了海上油田聚合物驱的开展和规模应用。如何缩短聚合物溶解时间、减小注聚装置的占地面积和重量,实现

与陆地油田不同,海上油田受平台空间限制,采出液处理工艺设备体积小,处理时间短。以胜利油田孤六联为例,原油系统为 4 级处理,耗时 96 h,污水系统为 2 级沉降处理,耗时 48 h。而渤海绥中 36-1 油田,原油系统三级处理时间累计约 70 min,污水系统处理时间累计约 60 min,远低于陆地油田停留时间。这就要求海上油田必须开发出更高效的化学药剂和处理工艺。

针对渤海油田聚合物驱采出液,开发了系列原油破乳剂、污水处理剂,进行了多次矿场试验;对含聚采出液处理工艺进行了优化研究,提出了优化方案;开展了产出聚合物的降解处理、油泥的回注技术研究。整体上,取得了阶段性研究成果,为现场问题的最终解决奠定了坚实的基础。

1) 原油处理技术。根据聚合物对原油乳状液的稳定机理,以缩短脱水时间,降低破乳剂用量,提高原油脱水率为目标,设计了具有高分子量、高分枝、界面活性高、渗透能力强的星形结构破乳剂 ZD01(见图 1)与现场破乳剂相比,脱水率提高了 10%。

2) 污水处理技术。a. 聚合物降解剂。聚合物的存在增加了污水处理的难度,通过用聚合物降解剂先对聚合物进行降解,以降低聚合物对污水处理

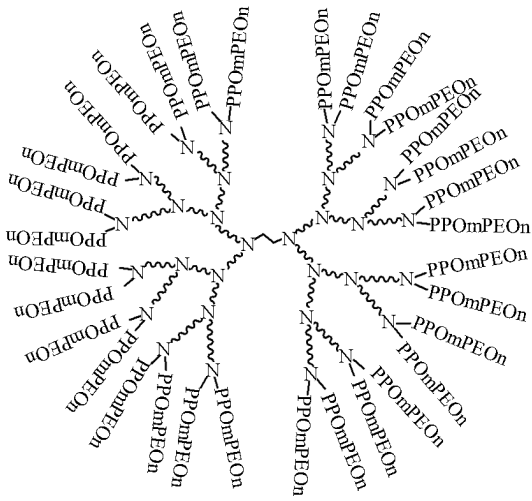


图1 星形破乳剂 ZD01 分子结构示意图

Fig. 1 The schematic of molecular structure of starburst demulsifier ZD01

的影响,研制出了一种聚合物降解剂。在常温下,1 000 mg/L 聚合物溶液中加入 100 mg/L 降解剂,聚合物溶液粘度从41 mPa·s 降到 4 mPa·s,降粘率为 90.2%。在处理含聚污水时,加入清水剂前,先加入降解剂能提高处理效果。该领域研究起步较晚,难度大,有待进一步深入研究。b. 清水剂。设计合

成出乳液型清水剂 FC-203,并完成了从 50 kg 到 1 000 kg 的逐级放大生产试验。在 LD10-1 油田开展了矿场试验,清水效果明显,处理后污水含油率 < 30 mg/L。c. 电化学处理技术。研发了电化学污水处理技术,电解处理含聚量为 200 ~ 300 mg/L 的含聚污水后,其降粘率达到 86% 以上,除油率达到 93% 以上,处于平台中试阶段。原理是将电解氧化还原、电解凝聚以及电解气浮三方面作用相结合的一种污水处理技术,无需添加化学药剂,因而不会产生絮凝剂形成的大量聚集体,且处理时间短,平均为 20 min。d. 核桃壳过滤器改造。针对目前核桃壳过滤器易被含聚污水堵塞,提出将过滤器由体内撮洗改造为体外撮洗。改造后过滤器将滤料泵入罐外撮洗管内进行撮洗,然后再返回罐内继续过滤,以充分清洗被污染的滤料,避免堵塞,提高过滤效果。

3.4 海上油田早期注聚效果评价方法

陆地油田在含水 80% 以上或特高含水期注聚,其效果评价方法已成熟,海上油田早期注聚在含水率低于 20% 时(见图 2),由于水驱时间短或无水驱阶段,使得传统的聚驱效果评价方法在海上早期注聚情况下不适用,注入有效性、增油量计算方法等都不适用。

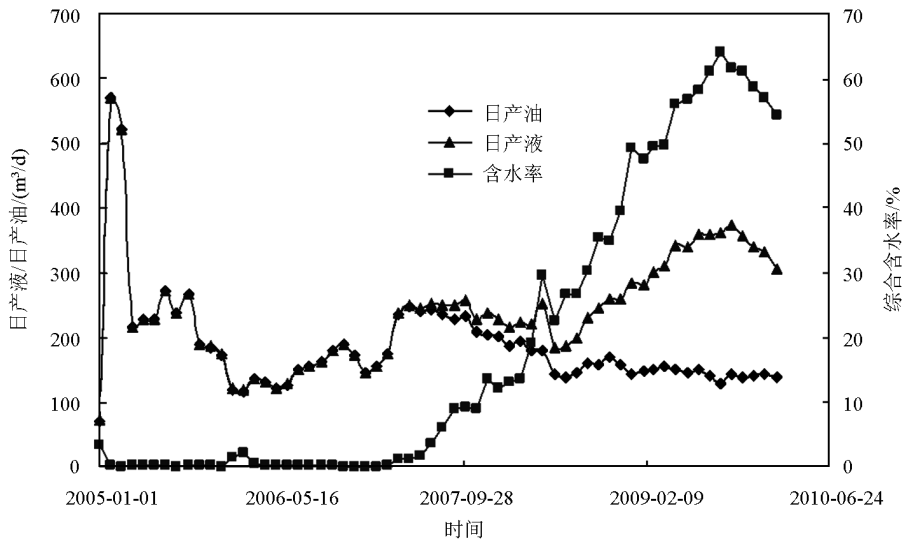


图2 渤海油田早期注聚井组典型生产井开采曲线

Fig. 2 Production plots of typical well for early polymer flooding in Bohai offshore oilfield

在幂律流体稳定渗流基础上,考虑聚合物溶液的非牛顿性和多层非均质性,建立了早期聚合物驱霍尔曲线评价方法,其原理是利用压力和注入量数据,绘制出的聚合物驱改进霍尔曲线为线性形式。从图3可看出,与传统聚合物驱霍尔曲线采用斜率比求阻力系数不同的是,根据改进霍尔曲线的斜率和截距,可以直接求出聚合物驱阶段的流度和阻力系数等评价指标,解决了早期注聚注入有效性评价问题。

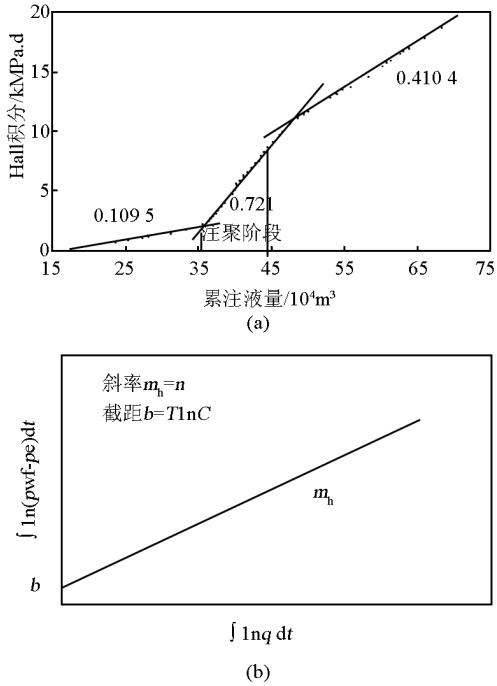


图3 传统聚合物驱与早期注聚霍尔曲线对比示意图

Fig.3 Comparison schematic diagram of traditional Hall curve and early polymer flooding hall curve

针对早期注聚水驱产量无法准确预测情况,根据海上油田不同注聚时机聚合物驱开发特点和含水规律,提出不同聚驱时机的水驱预测方法,对于早期注聚,当含水曲线没有出现漏斗,或含水率低于20%时,采用BP神经网络方法进行预测;当含水率为20%~60%时,可以用水驱或校正水驱曲线方法进行预测;对于中后期注聚则采用常规的及经筛选的增油量计算方法。结合海上油田早期聚合物驱开发特征及其评价指标研究成果,建立了海上油田早期聚合物驱效果评价体系,包括注入系统评价方法体系、生产系统评价方法体系和早期聚驱开发效果评价体系等18项指标体系。为建立海上油

田早期聚合物驱效果评价规范提供了基础。

4 海上稠油聚合物驱技术现场试验

自2003年在绥中36-1油田进行J3单井注聚现场试验以来,2005年10月于绥中36-1油田开展以A7井为中心井的4口注聚井构成的五点法井组试验,于2008年10月实施了A7扩大井组与B7井组矿场注聚试验,形成两个井组11注46采的规模;2007年4月开始在旅大10-1油田主体区6口井全面实施早期注聚;锦州9-3油田于2007年10月至2008年8月,实施了8口注水井转注聚,实现西平台整体注聚。

截至2010年8月,在渤海绥中36-1油田、旅大10-1油田及锦州9-3油田等油田,合计25口注入井实施聚合物驱,累积注入聚合物溶液1170.21万 m^3 ,聚合物干粉用量12981t交联剂用量739t,累积增油达到85.5万 m^3 ,已经实现投入产出比1:1.85~1:2.78。

5 海上稠油聚合物驱技术的应用前景展望

目前已经实施注聚的3个油田方案预计累积增油量823.1万 m^3 ,采用增量法计算,预计总体经济效益93亿元,投入产出比1:3.7。此外,渤海稠油油田适宜聚合物驱油藏19个,覆盖地质储量为14.2亿 m^3 ,提高采收率按5.72%计算,聚合物驱增加可采储量3000万 m^3 ,聚合物驱技术在海上油田具有广泛的应用前景。同时,由于中海油成功的开展了海上油田聚合物驱现场试验,引领了国内外海上注聚提高采收率技术方向,国外石油公司借鉴中海油在海上油田成功实施聚合物驱的经验,目前已准备在其油田开展聚合物驱油先导试验研究,如美国的康菲公司在蓬莱19-3油田、美国的雪佛龙公司在秦皇岛32-6油田和印尼SES石油公司等,为我国获得更多的海外石油资源提供技术支持。

6 结语

1)在我国海上油田实施聚合物驱提高采收率是一项具有战略意义的举措,对于海洋石油的发展具有重要意义。

2)针对制约海上油田聚合物驱的难点,通过近10年的攻关和矿场试验,攻克了适合海上稠油油藏条件的驱替液技术、平台聚合物配注技术、海上稠油含聚采出液处理技术及早期注聚效果评价等一系列

技术难题,初步形成了海上油田聚合物驱油技术体系。

3)在渤海绥中36-1油田、旅大10-1油田及锦州9-3油田等油田进行了不同规模的现场试验,并取得了明显的增油降水效果。截至2010年12月,三个油田已累积增油达到107万 m^3 ,已经实现投入产出比1:1.85~2.78以上。证明了聚合物驱提高采收率技术在海上稠油油田应用的技术可行性和经济有效性,为海上油田高效开发探索出了一条崭新的道路,具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 周守为. 海上油田高效开发技术探索与实践[J]. 中国工程科学, 2009, 11(10): 55-59.
- [2] 牛金刚. 大庆油田聚合物驱提高采收率技术的实践与认识[J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(5): 91-93.
- [3] 王德民, 程杰成, 吴军政, 等. 聚合物驱油技术在大庆油田的应用[J]. 石油学报, 2005, 26(1): 74-78.

- [4] 姜之福, 张贤松, 姜颜波, 等. 孤岛油田聚合物驱工业性试验研究[J]. 油气采收率技术, 1998, 5(4): 20-24.
- [5] 姚光庆, 陶光辉, 邱坤态. 河南油田聚合物驱增油效果评价方法探讨[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2003, 18(3): 28-31.
- [6] 高树棠. 美国化学采油综述[J]. 大庆石油地质与开发, 1989, 8(1): 45-52.
- [7] Morel D, Vert M, Jouenne S, et al. Polymer injection in deep offshore field: The Dalia Angola case [J]. SPE116672, 2008: 1-12.
- [8] Candau F, Braun O, Essler F, et al. Polymerization in nanostructured media: applications to the synthesis of associative polymers [J]. Macromolecular Symposia, 2002, 179(1): 13-26.
- [9] Ait-Kadi A, Carreau P J, Chauveteau G. Rheological properties of partially hydrolyzed polyacrylamide solutions [J]. Journal of Rheology, 1987, 31(7): 537-561.
- [10] Pabon M, Corpart J M, Selb J, et al. Synthesis in inverse emulsion and properties of water-soluble associating polymers [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2002, 84(7): 1418-1430.

Key technology research and field test of offshore viscous polymer flooding

Zhang Fengjiu¹, Jiang Wei¹, Sun Fujie^{1,2}, Zhou Shouwei¹

(1. State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, Beijing 100027, China;

2. China National Offshore Oil Corporation, Research Institute, Beijing 100027, China)

[Abstract] Although there is a high development potential, the EOR (enhanced oil recovery) techniques of onshore oilfield are not suitable for offshore. Based on the 10 years research and analysis of EOR techniques of offshore thickened oil, a series of resolutions and techniques on driving fluid technology, platform polymer injection distribution technology, production containing polymer treatment technology and effectiveness evaluation of early polymer injection for offshore heavy oil were developed, the system of offshore polymer flooding were established. These techniques had been carried out in Suizhong36-1, Lvda10-1 and Jinzhou9-3 with large scale field experiments. The water was controlled at a low level and the oil extraction was enhanced. These works proved the feasibility of the techniques and the value of economy.

[Key words] offshore; heavy oil; polymer flooding; displacing fluid; polymer solution preparation; produced fluid; oil displacement efficiency