

大庆油田

博士后优秀论文集

(三次采油 化工工程)



廖广志
张春雷
张文祥
著

石油工业出版社

大庆油田博士后优秀论文集

(三次采油 化工工程)

廖广志 张春雷 张文祥 著

石油工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大庆油田博士后优秀论文集(三次采油 化工工程)/廖广志等著.
北京:石油工业出版社,2001.6
ISBN 7-5021-3418-2

I. 大…

II. 廖…

III. ①石油工业-文集

②三次采油-文集

③石油化工-石油工程-文集

IV. TE-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 035512 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
河北省徐水印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 20.75 印张 531 千字 印 1—1000

2001 年 6 月北京第 1 版 2001 年 6 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3418-2/TE·2548

定价: 48.00 元

《大庆油田博士后优秀论文集》编委会

主 任：苏树林 曾玉康

副主任：徐绍铭 孙淑光

委 员：苏树林 曾玉康 徐绍铭 孙淑光 王玉普 王广昀
萧德铭 周抚生 苏玉添 巢华庆 王启民 隋 军
郭万奎

《大庆油田博士后优秀论文集》编辑组

组 长：孙 彦

副组长：王 英

组 员：孙 彦 王 英 万金荣

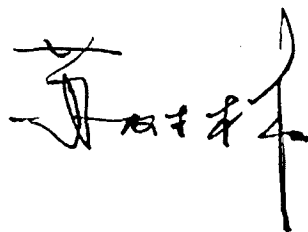
序

纵观大庆油田 40 年开发建设历程，人才起到了至关重要的作用。以铁人王进喜、新时期铁人王启民为代表的一大批优秀人才，怀着矢志不渝的爱国热情和献身石油的崇高理想，在极端困苦的条件下高速度、高水平地开发建设了大庆油田，实现了年产原油 5000 万 t 以上 25 年高产稳产，创造了世界同类油田开发的先进水平，取得了举世瞩目的巨大成就。实践证明，大庆油田 40 年的历史，就是一部各级各类人才依靠科技、艰苦创业、共同奋斗的历史。

在大庆油田进入二次创业的今天，站在事关企业可持续发展的高度，审视人类社会赖以生存的自然资源、资本资源、信息资源、技术资源、管理资源、人力资源六大资源，人才是推动企业发展的不竭资源。只有牢牢占领人才这一制高点，大庆油田公司才能在激烈的市场竞争中立于不败之地。结合油田二次创业和可持续发展的新形势、新任务，我们发展形成了“大庆油田有限责任公司人才观”，并制定出台了一系列人才激励配套政策，在油田公司形成了一个有利于人才脱颖而出的良好环境，为企业可持续发展提供了强有力的支持和保障。

正是顺应了油田二次创业伟大实践对人才，特别是高级人才的需求，大庆油田博士后科研工作站应运而生。博士后工作站成立 4 年多来，先后有 32 名博士后进站工作。在站工作期间，他们以强烈的责任感和事业心，大胆挑战极限，勇于突破禁区，在石油地质、油气勘探、油田开发、三次采油、采油工程、地面工程、石油化工和企业管理等诸多科研领域，取得了一大批有重大价值的科研成果。《大庆油田博士后优秀论文集》选编了工作站博士后们的部分优秀科研成果。它的出版发行，既是对他们辛勤劳动的一种回报，又是对油田科技工作者的一种鼓舞和鞭策。

借本书出版发行之际，我谨向大庆油田博士后工作站的博士后们表示衷心的感谢！并致以崇高的敬意！



2001 年 3 月

前 言

1996年7月24日,经国家人事部博士后管理委员会批准成立的大庆油田博士后科研工作站正式挂牌运作,这是继上海宝钢博士后科研工作站成立后的第二家企业博士后科研工作站。在大庆油田党政领导的支持下,四年来大庆油田博士后科研工作站共计进站四批32名博士后,其中已有3名博士后出站并留在了大庆油田工作。这些博士后们在管理局和油田公司以及各二级单位领导的亲切关怀下,在大庆油田所涉及各主要领域展开了全面的研究工作,在石油地质与勘探、油气田开发、三次采油、采油工程、地面工程、化工工程、企业管理及油田可持续发展等各专业方向勤勤恳恳、兢兢业业地工作,为大庆油田的可持续发展做出了较为突出的贡献。

为全面系统地把博士后们的优秀科研成果反映出来,大庆油田拟陆续出版《大庆油田博士后优秀论文集》,共分六集,即:

第一集:三次采油与化工工程(包括炼油化工、精细化工、天然气利用工程等);

第二集:石油地质与勘探(包括地球物理测井、物探等);

第三集:油气田开发工程(包括生产测井、试井等);

第四集:钻采工程(包括采油工艺、钻井工艺、油层保护等);

第五集:油田工程(包括地面集输工程);

第六集:企业管理(包括可持续发展、工商、金融、政策法规等)。

本专集为《大庆油田博士后优秀论文集》之第一集,主要反映大庆油田第一批进站的廖广志博士后、第二批进站的张春雷博士后和第三批进站的张文祥博士后在三次采油、炼油化工、精细化工、天然气利用等方面的研究成果,这些论文中部分成果已在油田的科研生产中得到了应用,相信本专集的出版,对大庆油田今后的科研生产和可持续发展将起到积极作用。

本着“百花齐放、百家争鸣”的“双百”方针,欢迎各位专家学者对本专集中的观点看法进行商榷,斧正文中不足之处,以使大庆油田博士后科研工作站的工作向前更进一步,为大庆油田的发展做出更大的贡献!

《大庆油田博士后优秀论文集》编委会
2001年3月

目 录

第一部分 廖广志博士后论文..... (1)

一、聚合物驱油技术的实践与认识.....	(3)
二、大庆油田聚合物驱技术应用的做法与经验	(10)
三、大庆油田聚合物驱油动态特征及驱油效果影响因素分析	(16)
四、大庆油田条件下疏水缔合两性聚合物三元复合驱和聚合物驱体系的应用 性能	(21)
五、流度比对化学驱驱油效果影响实验研究	(28)
六、三元复合驱技术综合研究	(32)
七、大庆油田三元复合驱矿场试验效果评价方法分析	(42)
八、大庆非酸性石蜡基油田三元复合驱先导性试验	(46)
九、三元复合驱中超低界面张力影响因素研究	(55)
十、三元复合驱低浓度体系相行为及中间混合层结构分析	(61)
十一、三元复合驱数值模拟实验室参数的求解方法	(66)
十二、大庆油田三元复合驱油体系相行为研究	(71)
十三、ASP-FOAM 提高高含水期油藏原油采收率效果的数值模拟研究	(76)
十四、大庆油田复配碱化学驱配方研究	(82)
十五、复配碱化学驱数值模拟	(88)
十六、三次采油用烷基苯磺酸盐类表面活性剂的研究	(95)
十七、大庆油田三元复合驱矿场试验综述	(99)
十八、多孔介质中泡沫流动等效数值模拟模型.....	(105)
十九、泡沫驱研究新进展.....	(112)
二十、朝阳沟油田特低渗透、高粘度油层热采可行性研究.....	(117)
二十一、新表面活性剂配制的三元复合体系驱油效果实验研究.....	(130)
二十二、阴离子表面活性剂 AES 虫状胶束的形成	(131)
二十三、大庆油田泡沫复合驱油先导性矿场试验.....	(136)
二十四、What is After Water Flooding in Daqing Oilfield	(142)
二十五、Interactions Between Alkali/Surfactant/Polymer and Their Effects on Emulsion Stability	(149)

第二部分 张春雷博士后论文..... (155)

一、 $\text{MoO}_3/\text{H}-\beta$ 沸石催化剂上甲烷的无氧芳构化及分子筛合成方法对催化剂 性能的影响.....	(157)
二、沸石载体结构对甲烷无氧芳构化性能的影响.....	(159)
三、甲烷在过渡金属离子交换分子筛催化剂上的无氧芳构化.....	(163)
四、铜离子交换改性沸石催化剂上甲烷的非氧芳构化.....	(167)

五、氧缺位铁酸盐 $\text{MFe}_2\text{O}_{4-\delta}$ 的性质研究	(171)
六、HZSM-5 结晶度和晶粒度对甲烷无氧芳构化催化剂性能的影响	(176)
七、第四周期过渡金属离子交换改性的 HZSM-5 沸石催化剂上甲烷的无氧芳构化	(180)
八、甲烷在含镓沸石 (MFI) 上无氧活化性能的研究	(183)
九、以 HZSM-8 为载体的催化剂上的甲烷无氧芳构化	(188)
十、杂原子 ZSM-48 分子筛的合成及催化性能	(190)
十一、分子筛催化剂上天然气无氧芳构化的研究	(193)
十二、甲烷无氧芳构化的沸石催化剂研究	(206)
十三、合成气制低碳混合醇催化剂研究进展	(209)
十四、国内外天然气化工及大庆油田天然气利用现状	(214)
十五、沸石催化剂上实际天然气的无氧芳构化研究	(218)
十六、天然气制合成气技术	(222)
十七、Aromatization of methane in the absence of oxygen over Mo-based catalysts supported on different types of zeolites	(231)
十八、The function of Cu (II) ions in the Mo/CuH-ZSM-5 Catalyst for methane conversion under non-oxidative condition	(241)
十九、Studies on the decomposition of carbon dioxide into carbon with oxygen-deficient magnetite I .Preparation, characterization of magnetite, and its activity of decomposing carbon dioxide	(250)
二十、Studies on the decomposing of carbon dioxide into carbon with oxygen-deficient magnetite II .The effects of properties of magnetite on activity of decomposition CO_2 and mechanism of the reaction	(261)

第三部分 张文祥博士后论文

一、分散法制备的 $\text{CuCl}/\text{ZSM}-5$ 分子筛催化剂上 C_3H_6 选择性催化还原 NO 反应的研究	(277)
二、银离子交换分子筛上一氧化氮的吸附性能	(280)
三、铜离子交换分子筛上 NO 吸附的 IR 光谱及 TPD 研究	(283)
四、 Au/ZnO 催化剂的制备及常温常湿条件下 CO 氧化催化性能	(288)
五、不同方法制备的纳米 Au/NiO 上 CO 常温常湿催化氧化性能的研究	(293)
六、常温常湿条件下 Au/MeO_x 催化剂上 CO 氧化的性能	(296)
七、纳米 CO_3O_4 的制备、表征及 CO 低温催化氧化	(303)
八、常温常湿 CO 氧化催化剂 $\text{Au}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的制备与稳定性研究	(306)
九、常温常湿条件下 $\text{Au}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 催化剂上 CO 氧化稳定性的影响因素	(310)
十、沉淀剂对 Au/ZnO 催化剂上 CO 氧化性能及催化剂结构的影响	(316)

第一部分 廖广志博士后论文

一、聚合物驱油技术的实践与认识

1 聚合物驱油技术已取得重大突破

中国油田自 20 世纪 60 年代以来,一直十分重视三次采油的试验和基础科学研究。大庆油田在会战初期就提出,如果采收率提高 1%,就相当于找到了 1 个玉门油田;如果提高 5%,就相当于找到了 1 个克拉玛依油田。为此,在 60 年代初期,大庆油田和克拉玛依油田分别在大庆萨北地区和克拉玛依黑油山开辟了三次采油提高采收率试验区。由于大庆和克拉玛依原油分别属低酸值的石蜡基原油和中酸值环烷基原油,开展表面活性剂驱难度很大。80 年代初,大庆油田开展了以聚合物驱为重点的三次采油科技攻关。通过“七五”、“八五”以来的国家重点科技攻关,使中国油田的聚合物驱油技术取得了突破性的进展。

1.1 完成了从把聚合物驱看作改性水驱到看作三次采油技术认识上的重大观念转变

广大科技工作者在实践和研究的基础上,实现了对聚合物驱油技术理论认识的重大突破,完成了从把聚合物驱看作改性水驱到看作三次采油技术认识上的重大观念转变。具体表现在以下六个方面:

(1) 我国油田大多是陆相沉积油田,和国外海相沉积油田的油藏条件不同,提出了聚合物驱有其自己适用的油藏条件,实现了理论上、认识上的飞跃;

(2) 打破了人们长期认为聚合物驱只能比水驱提高采收率 2%~5% 的传统说法,提出了我国陆相油田聚合物驱可比水驱提高采收率 10% 以上的新观点;

(3) 打破了高含水期不能注聚合物的说法,提出了在含水 98% 以前注聚合物仍可取得效果的新认识;

(4) 首先提出了聚合物驱可大大节省注水量、提高注水利用率的新概念;

(5) 打破了国外聚合物驱采用小段塞低用量的做法,率先提出了聚合物驱可采用大段塞高用量的新做法;

(6) 研究了聚合物分子量和油层渗透率的匹配关系,使得工艺上不用担心出现聚合物堵塞油层问题,提出了油田可采用高分子量聚合物驱的新思路。

1.2 加强新方法、新技术研究,为大规模工业化应用提供了技术保障

随着实验室的理论研究不断深入,进行了小规模的现场试验并取得明显的效果。同时,为适应聚合物驱油大规模工业化应用,科技人员加强了相应配套的实施方法和实施技术的攻关研究,为大规模工业化应用提供了重要技术保障。目前,已经研究制定并相应完善配套了四种方法和六项技术。

四种方法是:(1) 聚合物驱油油藏工程开采指标计算方法;(2) 聚合物驱合理井网井距计算方法;(3) 聚合物驱采出液的利用方法;(4) 聚合物驱的经济评价方法。

六项技术是:(1) 研究了高密度、大孔径、深穿透射孔新技术(由此可减少孔径处的剪切,尽可能高地保持聚合物粘度);(2) 形成了以保持聚合物注入粘度为核心的地层配、注工艺技术;(3) 初步形成了适应聚合物采出液的处理技术(包括游离水脱除、电脱水和含油污水处理等);(4) 研究和开发了适合聚合物驱的分层注入、分层测试技术;(5) 建立了一

套动态监测技术（如聚合物注入和采出的浓度、粘度和分子量测试技术）；（6）研究和开发了聚合物驱数值模拟技术。

1.3 聚合物驱油技术步入工业化生产，开创三次采油新局面

从1996年起，聚合物驱油技术陆续步入工业化生产，到1998年年底大庆油田已投入聚合物驱区块共10个，动用面积104.01km²，地质储量19847.7×10⁴t，总井数1753口，其中注入井808口，生产井945口。1998年聚合物驱注入干粉总量达46782t，产油量已达816×10⁴t，占大庆油田当年产油量的15%，开创了中国聚合物驱三次采油的崭新局面，成为21世纪大庆油田乃至中国石油天然气集团公司可持续发展的重要技术支柱。

2 聚合物驱驱油机理研究有了重要进展

早期的聚合物驱油理论认为，聚合物驱只是通过增加注入水的粘度、改善油水流动度比，扩大注入水在油层中的波及体积，从而提高原油采收率。基于毛管数与驱油效率的关系，认为聚合物驱并不能提高驱油效率，降低残余油饱和度。因此，有人把聚合物驱称为改性的水驱，即二次采油。其理论是：（1）聚合物驱与水驱驱替速度一般相同；（2）聚合物溶液的粘度一般为水粘度的30倍左右；（3）聚合物不能降低油水之间的界面张力，所以，聚合物驱时的毛管数不能提高到10⁻³以上，即不能明显提高驱油效率。

我们知道，在注入水波及到的油层，由于岩石表面润湿性和毛细管液阻效应的存在，水驱后还存在着大量的残余油。这些残余油以簇状、柱状、孤岛状、膜（环）状、盲状等形态滞留在孔隙介质中。那么，聚合物驱能否把这些残余油驱出呢？“八五”及“九五”前三年的攻关研究表明，聚合物驱不仅可以提高波及系数，而且还可以提高水波及域内的驱油效率。其提高驱油效率的机理表现在以下几个方面。

2.1 本体粘度使聚合物在油层中存在阻力系数和残余阻力系数，是驱替水驱未波及残余油和簇状残余油的主要原因

对于渗透率相近的人造岩样，分别用水驱至残余油状态（含水98%），用相同粘度的甘油、聚合物溶液分别驱替0.6PV后，继续用水驱至残余油状态，驱替过程中测量岩样两端的压差，测定结果表明，聚合物驱时岩样两端的压差远高于甘油驱时岩样两端的压差。这是由于聚合物溶液是粘弹性流体，不仅增加了驱替相的粘度，降低油水粘度比，而且由于聚合物在岩石中的滞留，引起了水相渗透率的下降，因而残余阻力系数大于1，使油水流动度比进一步降低；而甘油（丙三醇C₃H₈O₃，分子量92.09）是粘性流体，只能通过增加水相粘度，使油水流动度比下降。所以，尽管两者的粘度相同，但驱油效率却不同；而且聚合物驱对甘油

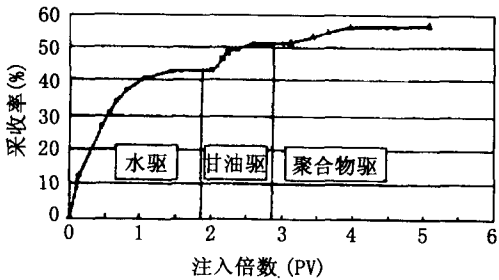


图1 水驱—甘油驱—聚合物驱
（微观模型）采收率曲线

驱替不出来的细喉道中的残余油，也有一定的驱替效果。图1是水驱、甘油驱后再聚合物驱（甘油与聚合物溶液粘度相同）的一个实验结果。结果表明，甘油水溶液可以驱出水驱后的部分残余油，聚合物溶液可以驱出甘油水溶液驱后的部分残余油，驱油效率可提高3%以上；而甘油水溶液不能驱出聚合物驱后的残余油。由此可见，聚合物溶液不仅有粘性作用，而且还有部分弹性作用。

2.2 界面粘度使聚合物溶液在多孔介质中的粘滞力增加，是驱替膜状、孤岛状残余油的主要机理

2.2.1 聚合物溶液与残余油之间的界面粘度远远高于注入水与残余油间的界面粘度值

聚合物溶液粘度的增加，是由于聚合物分子中含有许多亲水基团，这些亲水基团在聚合物分子外形成的“水鞘”，增加了相对移动的内摩擦力。同时，上述基团的水中解离，产生许多带电极性相同的链节，这些链节互相排斥，使聚合物分子线团在水中更加伸展，因而有更好的增粘能力。因此，聚合物溶液在多孔介质内的渗流过程中，其粘度值要比用粘度计测量的视粘度高许多倍。

2.2.2 聚合物溶液在毛细管管壁附近的速度梯度远远大于水在其上的速度梯度

由于聚合物溶液是非牛顿粘弹性流体，在岩石孔道中的流场分布与水截然不同。在相同平均流速下，聚合物溶液与油的界面速度远远大于水与油的界面速度。我们用带盲端的单管微观模型进行了聚合物溶液和盐水在毛细管中的速度分布实验。实验用浓度为 1500mg/L 的聚合物溶液和浓度 1000mg/L 的盐水，里面加入相对密度接近于 1、直径为 $2\mu\text{m}$ 的标准微粒，在同一模型上进行的；毛细管半径为 $90\mu\text{m}$ 。从实验观察到，聚合物溶液中管壁附近的微粒都能够运动，而水中运动的微粒只能到达距管壁 $10\mu\text{m}$ 处。表明水在毛细管中存在的不动水膜比聚合物溶液厚得多；而且在相同的平均流速下，管壁附近同样距离处，聚合物溶液的速度远远高于水。图 2 是实验测得的聚合物溶液和盐水在毛细管中的速度分布图。从图中可以看出，聚合物溶液在管壁附近的速度梯度大，水的速度梯度小。

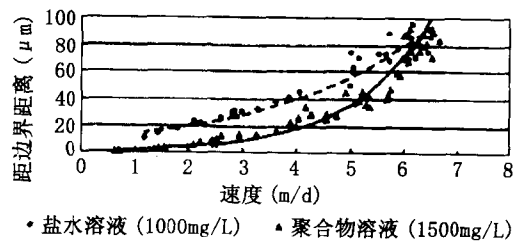


图 2 毛细管中聚合物溶液与盐水的速度分布

如果将残余油表面假想为管壁，那么，当聚合物溶液和注入水分别流过孤岛状、膜状残余油表面时，聚合物溶液与残余油之间的速度梯度会远远大于水的速度梯度。

综上所述，聚合物溶液作用在残余油表现的粘滞力远远大于水在其上的粘滞力，因此，聚合物能够将部分孤岛状残余油和膜状残余油驱走。

2.3 拉伸粘度使聚合物溶液存在粘弹性，是驱替盲状残余油的主要原因

柔性聚合物分子在应力作用下将产生形变，其弹性又会使其恢复、收缩。因此，当具有粘弹性的柔性聚合物溶液通过多孔介质时，既存在着剪切流动，也存在着拉伸流动。特别是聚合物分子流经孔道尺寸变化处时，聚合物分子就受到拉伸而表现出弹性。这种特性使进入盲端孔隙的聚合物溶液，具有与流动方向垂直、指向连通孔道的法向力。正是在上述聚合物溶液粘弹性的作用下，才使得聚合物溶液能够进入盲端中驱油。

由此可见，聚合物驱油技术，既能扩大波及系数，也能提高驱油效率，在开采特高含水油层时能很好地形成油墙，大幅度增加产油量，提高原油采收率。

3 聚合物驱油技术中亟待进一步攻关的三方面内容及其涉及基础学科研究的问题

3.1 聚合物驱效果有待通过调剖等方法得到进一步改善

目前，大庆油田聚合物驱油技术尽管已取得了突破性进展，但由于聚合物驱油技术的复

杂性使我们对其驱油机理尚未真正搞清。具体表现在现场聚合物驱油过程中提前见效的问题、产出液中聚合物浓度逐渐升高直至突破的问题等等。通常情况下，聚合物驱油有如下几种见效方式：

- (1) 注入井注聚合物一段时间后，生产井先见到产油量上升，后见到聚合物；
- (2) 注入井注聚合物一段时间后，生产井先见到聚合物，后见到产油量上升；
- (3) 注入井注聚合物一段时间后，生产井不见效但见到聚合物；
- (4) 注入井一开始注聚合物，生产井就见到聚合物。

上述四种见效见聚方式中，后三种都对聚合物驱油技术经济效果极为不利，因此需要利用各种方式改善聚合物驱油地层的注采剖面。

目前，聚合物驱油中的注采剖面调整方法主要是凝胶调剖方式，通常凝胶分为如下三种类型：

(1) 本体凝胶：该类凝胶所用聚合物浓度达 3000mg/L 以上，最高可达 7000mg/L，交联剂的浓度亦在 100mg/L 以上，形成的凝胶粘度大于 10000mPa·s，基本不能流动，因此称为本体凝胶；

(2) 弱凝胶：该类凝胶聚合物浓度在 800mg/L 左右，交联剂浓度为 50~100mg/L，是一种弱交联的本体凝胶。该类凝胶为一种连续可流动冻体，主要适用于长期冲刷形成水驱孔道的油田和裂缝油田；

(3) 胶态分散凝胶 (CDG)：该类凝胶聚合物浓度在 300mg/L 左右，交联剂浓度为 50~100mg/L，基本为胶体形态的不连续分散体，其粘度一般不是太高，但具有较高的残余阻力系数。

聚合物驱油中一般采用 CDG 进行调剖（实际上由于地下存聚的影响，地面 CDG 在地下已转变为弱凝胶），但关于凝胶的有关基础研究则远远不能达到目前聚合物驱的理论和工艺技术要求，需要在交联剂、凝胶形态、多孔介质中凝胶渗流体力学及数学物理描述以及评价标准和物理模拟驱油等方面做深入研究。

另外，关于聚合物驱过程中调剖时机选择问题。例如是在聚合物驱前调，还是在聚合物驱中后期调，或是聚合物驱完后甚至后续水驱完后调剖等时机问题，同样需要做更加深入细致的工作。

3.2 聚合物综合性能需进一步改进

驱油用聚丙烯酰胺主要是部分水解聚丙烯酰胺 (HPAM)，它是一种带有极性基团的水溶性高分子，是由丙烯酰胺单体合成的直链型聚合物，其中的部分丙烯酰胺单体已经水解。

为了能在差的油层条件下应用聚合物驱技术，必须对聚合物进行改性。寻求改性的聚合物性质包括聚合物的热稳定性、剪切稳定性、对盐类及不同矿化度的适应性。

目前的改性聚合物以“共混聚合物”为主，共混聚合物主要包括：二种聚合物的混合物；嵌段聚合物；接枝聚合物以及交叉渗透交联体系。共混聚合物的特点是改进了某一方面的性能而不显著降低其他性能。

对于驱油用聚丙烯酰胺的改性工作主要集中在以下几个方面。

3.2.1 由低分子量到高分子量的改进

众所周知，在保证溶解性能和注入能力的前提下，高分子量聚合物比低分子量聚合物有较高的粘度和残余阻力系数，驱油效果较好。可以通过以下途径提高分子量：

- (1) 采用高效低温引发体系，控制聚合物反应升温速率；

- (2) 减少杂质的引入, 控制链转移反应;
- (3) 把聚合物反应和水解反应分离开, 提高各自的反应效率。

3.2.2 从普通聚合物到耐高温、抗高盐聚合物的改进

HPAM 是一种聚电解质, 因此它在溶液中的形态和性质与溶液条件密切相关。研究表明, 在高温、高盐、尤其是在 Ca^{2+} 等二价离子的存在, 聚合物溶液将会产生沉淀, 粘度降低。目前, 抗高温高盐聚合物主要有两种:

- (1) 丙烯酰胺共聚物。由于主链上引入的新结构单元控制了聚丙烯酰胺的水解度或改变了链的柔顺性, 因此提高了聚合物溶液的稳定性;
- (2) 部分交叉连接型聚合物。机理有待进一步研究。

3.2.3 接枝聚合物

主要在聚合物链的两侧引入表面活性剂支链, 使改性后的聚合物在保持一定粘弹性的同时降低了油水界面张力, 从而改善了驱油效果。

目前, 关于聚丙烯酰胺改性的报道比较少, 主要是丙烯酰胺共聚物。其有关机理是通过改性剂的引入, 改变聚丙烯酰胺的链结构或聚集态结构, 从而得到一些所期望的性能。有关该领域的基础和工艺研究尚需进一步深入。

3.3 聚合物驱油技术数值模拟需要深化研究

聚合物驱油数值模拟技术是一门综合技术, 它涉及到数学、物理、化学、油藏工程和计算机等多个学科。与其他数值模拟技术一样, 聚合物驱数值模拟技术也具有自己的基本数学模型。在考虑粘性力、重力、毛管力和物理弥散的条件下, 其物质守恒方程为

$$\frac{\partial W_k}{\partial t} + \Delta F_k = R_k$$

式中 W_k ——质量浓度;
 t ——时间;
 F_k ——达西速度和物理弥散;
 R_k ——源汇项。

聚合物驱油模型描述了众多的聚合物驱油机理, 主要有以下几个方面。

3.3.1 聚合物的吸附

在该项特性的描述上, 采用 Langmuir 等温吸附公式进行描述

$$\bar{C}_p = \frac{aC_p}{1 + bC_p}$$

式中 $\bar{C}_p$ ——聚合物吸附浓度;
 C_p ——聚合物浓度;
 a 、 b ——线性回归系数。

3.3.2 渗透率下降系数

由于聚合物溶液中的聚合物在油层中存在吸附和滞留, 因此将导致水相渗透率的下降, 因此用渗透率下降系数来描述这一机理

$$R_k = 1 + \frac{(R_{k\max} - 1) b_{rk} C_p}{1 + b_{rk} C_p}$$

式中 R_k ——渗透率下降系数;
 R_{kmax} ——渗透率最大下降系数;
 b_{rk} ——常数。

3.3.3 不可及孔隙体积

不可及孔隙体积表示为

$$XIPV = \frac{\varphi - \varphi_p}{\varphi}$$

式中 $XIPV$ ——不可及孔隙体积;
 φ ——孔隙体积;
 φ_p ——聚合物占孔隙体积。

由于聚合物本身的特性，在多孔介质渗流过程中，将有一部分孔隙体积聚合物分子无法进入，称为不可及孔隙体积。

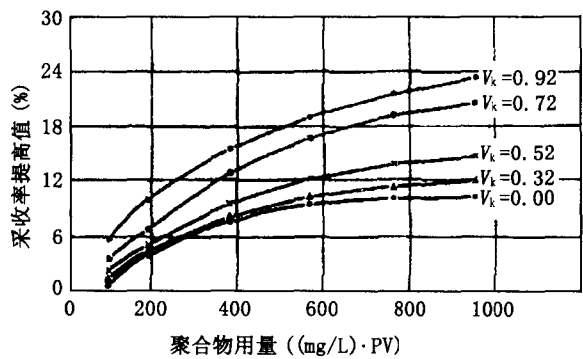


图3 不同非均质变异系数油层聚合物驱采收率提高值与聚合物用量的关系

聚合物驱油数值模拟技术无论是在聚合物驱油效果影响因素研究方面，还是在矿场试验方案设计方面，都得到了广泛的应用。在影响因素研究方面，利用该技术进行了聚合物注入时机、聚合物注入浓度、聚合物段塞设计、聚合物驱井网距的优选、不同非均质油层的聚合物驱效果和聚合物用量选择等方面研究。图3和图4是不同非均质油层条件下，不同聚合物用量的聚合物驱油效果变化情况。从图中可以看到，聚合物用量大小和油层的非均质情况将直接影响聚合物的驱油效果。

现场试验方案设计的合理与否，将直接关系到试验的效果，为此必须慎重考虑。图5是在大量研究工作的基础上确定的矿场试验方案，在现场实施的效果与预测效果的对比情况。

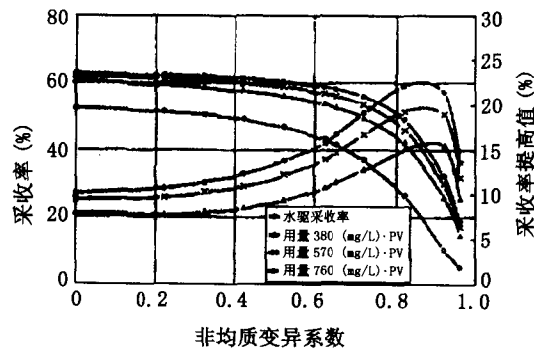


图4 不同用量条件下聚合物驱采收率、采收率提高值与油层非均质的关系

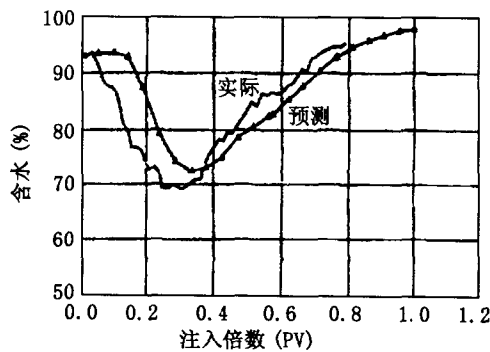


图5 大庆油田喇南一区中心井预测含水与实际含水变化对比曲线

从图中可以看到，预测的精度是较高的，为生产安排提供了依据。

根据上述聚合物驱油微观机理的认识以及现场应用分析，目前的聚合物驱数学物理方程尚需在如下三方面进行改进、完善：

(1) 在聚合物驱机理描述方面尚需考虑聚合物三个粘度，即本体粘度、拉伸粘度和界面粘度对聚合物驱油效果的影响，尤其是聚合物溶液的粘弹效应；聚合物溶液在多孔介质中的盲端效应以及聚合物通过多孔介质的蠕变效应等则更需从机理分析、数学物理描述及软件研制等方面花大力气深入研究；

(2) 目前的聚合物驱软件尚需要在可压缩性方面做进一步改进，以使考虑聚合物驱油过程中的压力变化问题，将刚性模型变成弹性可压缩模型；

(3) 在描述油藏非均质方面目前的聚合物驱软件也需要做更深入的工作，尤其是考虑地层尖灭、开天窗问题，在数值计算迭代收敛等解法方面需进一步改进，以真正描述油藏实际的地质问题。

聚合物驱油技术除上述三个方面基础科学直接影响该技术在油田实际应用中的效果外，还有油藏地质条件对聚合物驱油效果影响及油墙形成机理（如大庆油田南北聚合物驱差别）、高分子聚合物亚浓溶液的物理学和化学问题（高分子物理和高分子化学）、高分子流变学以及在多孔介质中的渗流流体力学等基础科学方面尚需做深入（有的甚至是开创性）工作，只有将这些基础科学基本研究清楚，聚合物驱油技术才能真正成为 21 世纪石油工业的主体技术。

本文引自《大庆石油地质与开发》1999 年 8 月第 18 卷第 4 期

本文作者为：王启民、廖广志、牛金刚