

“八五”三次采油成果汇编

化学驱油论文集

上册

(1991 ~ 1995)

冈秦麟 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

该套成果汇编分上下两册，较全面系统地反映了我国“八五”期间三次采油科技攻关成果，论述了化学驱油机理、油藏地质、方案设计、数值模拟、注采工艺、地面集输与产出液的处理，并较系统地阐述和评价了油田矿场试验和取得大幅度提高采收率的好效果。

本套成果汇编可供从事油田开发各级领导、研究和设计人员，以及矿场技术人员的参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

化学驱油论文集 上册：1991～1995/ 冈秦麟主编 .
北京：石油工业出版社，1998.7
(“八五”三次采油成果汇编)
ISBN 7 - 5021 - 2290 - 7

. 化...

. 冈...

. 化学驱油 - 研究 - 中国 - 1991～1995 - 文集

. TE357.46 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 12291 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)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 30 印张 740 千字 印 1—1000

1998 年 7 月北京第 1 版 1998 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7 - 5021 - 2290 - 7 TE·1907

定价：50.00 元

《化学驱油论文集》

编 委 会

主 任：	冈秦麟					
委 员：	蒋其墁	沈平平	宋万超	赵立春	张振华	时庚戌
	程杰成	马世煜	宋振宇	俞稼镛	何勤功	黄荣华
	胡重浩	李春如	张卫国			

前 言

我国陆上老油田已进入高含水期采油，注水效率越来越低，产油量递减，但老油田还有近百亿吨石油地质储量剩留在地下。在当前新区勘探新增储量满足不了原油生产需要的情况下，挖掘老油田潜力，尽快增加可采储量，已成为我国石油工业发展的迫切需要。

“八五”期间，“三次采油新技术”做为国家重点科技攻关的项目，设立了九个课题 40 个专题 177 个子专题，在“七五”科技攻关基础上，主要开展了以下三个方面的科技攻关内容。

- 1) 完善配套聚合物驱油工艺技术；
- 2) 复合驱油技术攻关；
- 3) 国产驱油剂的研制。

项目攻关工作，由中国石油天然气总公司具体组织，全国有关科学院所、大学和油田等 34 个单位 1140 名技术人员和近 3000 人的油田现场试验队伍参加，形成了产、学、研大型科技联合攻关，系统全面地开展了大量科学实验研究和矿场试验工作，付出了很多的心血，取得了一大批很有成效的高水平的技术成果，不仅为我国老油田稳产提供了“九五”可工业化应用的三次采油新技术，而且使我国化学驱油技术在较短时间内走在了世界前列。为了今后更好地发展我国三次采油技术，现将“八五”期间三次采油科技攻关成果，以论文形式进行了汇编，分为上、下两册。上册论述了我国三次采油技术的现状及今后发展，并重点反映了聚合物驱油技术；下册为复合驱油技术和国产驱油剂的研制。整套书的内容，包括了三次采油的机理研究、油藏研究、方案设计、数值模拟、注采工艺、地面集输与处理技术，并较系统地阐述、分析、评价了油田试验区的试验和效果。是一套有理论、有技术、有实践经验的内容较全面系统丰富的三次采油技术书籍。可有助于油田开发各级领导和技术人员更系统了解我国三次采油技术的发展，今后将更好地推动并发展三次采油技术，为更大幅度提高我国油田采收率做出新贡献。

冈秦麟
一九九八年三月

我国三次采油技术现状与发展（代序言）

冈秦麟

中国石油天然气总公司科技局

摘 要

三次采油将把油田开发技术带入新阶段，我国具有很大的三次采油潜力。经过十年左右化学驱油科技攻关和工业应用，不论规模上、年增油量和技术配套上，均走在世界前列。当前聚合物驱已开始工业化推广应用，比水驱提高采收率 10% 左右；复合驱油取得技术突破，油田矿场先导试验比水驱提高采收率 15% ~ 20%；国产驱油剂已有很大发展，五种驱油剂已有中试产品，其中三种已开始用于矿场试验。我国当前三次采油面临进一步提高经济效益，加强油藏精细描述，因地制宜发展新技术和优化三次采油系统工程整体效益。

我国石油工业的大发展，始于新中国成立以后，本世纪 60、70 年代，我国石油工作者借鉴国外油田开发技术，开始三次采油技术研究和小型矿场试验，但受当时技术和试验条件的限制影响了系统的研究和矿场试验效果。我国三次采油的高速发展，是在本世纪 80 年代以后，由于国民经济高速发展需要大量能源，而老油田陆续进入二次采油中、后期，尤其是 90 年代以来，产量递减，产水量大幅度上升，注水效率降低，原油成本上升，而新增石油储量满足不了生产发展的需要，急需三次采油新技术接替。

一、三次采油将使我国油田开发进入新阶段

油田开发的历史，就是不断提高采收率的过程。随着对油田开发规律的不断深化认识和油田开发理论的发展，一、二、三次采油反映了油田开发技术的重大发展和不同的开发历史阶段，有力地体现了科学技术的发展推动了生产力的提高。

本世纪 40 年代以前，油田开发主要是依靠天然能量消耗开采，一般采收率仅 5% ~ 10%，我们称为一次采油。它反映了油田开发早期的较低技术水平，使 90% 左右探明石油储量留在地下被废弃。

随着渗流理论的发展，达西定律被用于流体在多孔介质渗流。反映出油井产量与压力梯度呈正比关系，人们认识了影响一次采油采收率低的主要因素是油层能量的衰竭。从而提出了人工注水（气），保持油层压力开发油田的二次采油方法。这是至今世界油田的主要开发方式，使油田采收率提高到 30% ~ 40%，是一次油田开发技术上的大飞跃。但二次采油仍有 60% ~ 70% 剩余油留地下采不出来。为此，多年来国内外石油工作者进行了大量研究工作，逐步意识到制约二次采油采收率提高的因素，从而提出了新的三次采油方法。

大量实践和理论研究证明，油层是十分复杂的，具有非均质性，油、水（气）两相流体在油层多孔介质中渗流过程，不仅注入水（气）不可能活塞式驱油，使注入水（气）波及不到全油层；而且油、水（气）两相渗流过程，受油水（气）粘度差、毛细管力、粘滞力影响，各相流量将随驱油过程各相饱和度变化而变化。只有进一步扩大注入水（气）波及体积和提高驱油效率，才能大幅度提高采收率。从而，在非均质性的油层提出了注入高分子量的聚合物，提高注入水粘度，降低油水粘度差，以提高注入水波及体积的聚合物驱油三次采油方法；采用注入表面活性剂、注碱或注气与原油混相等方法，降低界面张力，提高注入水驱

油效率的表面活性剂驱、碱驱、混相驱三次采油方法；以及 80 年代后期发展起来的既可扩大波及体积又可提高驱油效率的复合驱油三次采油方法。

三次采油技术远不同于二次采油。二次采油是依靠人工补充油层能量的物理作用提高采收率的，油水在油层中服从达西定律——建立在流体粘度、组分、相态不改变的条件下，而三次采油方法是建立在注水保持油层压力基础上，又依靠注入大量新的驱油剂，改变流体粘度、组分和相态的物理化学作用，不仅进一步扩大了注入水作用范围，而且使分散的束缚在毛细管中的残余油重新聚集而被采出。因此，三次采油要求更精细的掌握分散原油在地下油层中的分布；新的驱油剂与十分复杂的岩石矿物、流体的物理—化学作用；探索并掌握非牛顿流体多相渗流油田开发基本规律，从而做到正确合理地油田开发部署—井网、井距、层系划分、注采关系、注采工艺、动态监测方法，以及相应的地面集输系统和净化处理。总之，一整套技术都将随着三次采油技术的应用而发生变化，使油田开发建立在更广泛的多学科综合应用基础上，深化了对油田的认识，从宏观和微观上更强化了地下原油渗流能力，从而，进一步发展了油田开发理论和技术，将油田开发带入一个更高技术水平的新阶段，我国将为此个油田开发新时期的到来做出应有的贡献。

二、我国化学驱油走在世界前列

1979 年原石油工业部将三次采油列为我国油田开发十大科学技术之一，成立了专项领导小组，开始组织国内有关科研单位和油田，着手进行了国内外三次采油技术调研，并组织与国外技术合作，引进先进技术，揭开了我国三次采油高速发展的序幕。

1982 年在对国外五个主要石油生产国十余种三次采油方法筛选标准综合分析基础上，对我国 23 个主力油田进行了三次采油方法粗筛选；1984 年开始与日、美、英、法等国，在大港、大庆、玉门等油田进行聚合物驱油、表面活性剂驱油技术合作，为我国在较短时间吸收和掌握 80 年代国际三次采油先进技术创造了条件。“七五”（1986—1990）、“八五”（1991—1995）期间连续列为国家重点科技攻关项目，遵循“立足国情，着眼三次采油转化为生产力，加快实现工业化应用步伐”的指导思想，组织了国内中国科学院、大学、石油院校和油田有关科研单位，组成了“产、学、研”大型联合技术攻关。根据我国探明气源不足，油田混相压力较高，不具备广泛混相驱条件，确定了化学驱油作为我国三次采油主攻技术，依据我国经济和技术力量，以及油田地质条件，并需要尽快提供新技术形成生产能力，又确定了首先将机理清楚，技术较简单，成本较低的聚合物驱作为重点，按系统工程组成项目攻关内容，坚持室内实验、理论与研究与油田地质条件相结合；注采工艺、地面工程与油田开采条件相结合，坚持严格遵循科学试验程序不超越，实施步伐必须加快的原则，大大加快了三次采油攻关成果转化为生产力的速度，仅用了十年左右的时间，已基本掌握聚合物驱油技术，完善配套了十大技术，即注水后期油藏精细描述技术；聚合物筛选及评价技术；合理井网井距优化技术；数值模拟技术；注入井完井、分注和测试技术；聚合物驱防窜技术；聚合物配制、注入工艺和注入设备国产化；采出液处理及应用技术；高温聚合物驱油技术；聚合物驱方案设计和矿场实施应用技术。使聚合物驱先导性和工业性矿场试验，均取得比水驱提高采收率 10% 以上的好效果。

大港港西四区聚合物驱先导性井组试验，在“七五”期间最早取得明显增油降水效果，井组含水由 90.5% 下降到 67%，日产油由 48.6t 上升到 88.4t，采收率提高了 10.4%，注 1t 聚合物增产原油达 400t。注聚合物前后分别测试吸水剖面，使高渗透层吸水强度由 $15\text{m}^3/\text{m}$ 下降到 $10\text{m}^3/\text{m}$ ；低渗透层吸水强度由 $1\text{m}^3/\text{m}$ 上升到 $7\text{m}^3/\text{m}$ ，反映出有效地扩大了注入水

波及体积。

大庆是我国最大的油田，也是世界特大油田之一。油层大面积稳定分布，油层物性多为中高渗透层，油层温度较低，原油粘度 $9\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，地层水矿化度低，油水流体性质变化小，水驱原油成本低，是我国大面积化学驱油最有利油田。大庆在注水近 30 年的中区西部开展了聚合物驱油先导性井组试验，在葡₁₋₄单层试验井组，使全区综合含水由 95.2% 降到 79.4%，日产油由 37t 上升到 149t，平均注 1t 聚合物增油 241t，中心井比水驱提高采收率 14%，使采出程度达 52.2%；在葡₁₋₄和萨₁₋₃双层开采试验井组，全区综合含水由 94.7% 降到 84.4%，日产油由 86t 上升到 211t，平均每注 1t 聚合物增油 209t，中心井比水驱提高采收率 11.6%。在试验区钻密闭取心井证实，萨₁₋₃层水洗厚度增加了 50.1%；葡₁₋₄水洗厚度由 34.1% 增加到 82.1%，表明聚合物驱油有效地扩大了注入水波及体积。在此基础上，开展了工业性矿场试验，北一区断西葡₁₋₄层，试验区面积达 3.13km^2 ，地质储量 $632 \times 10^4\text{t}$ ，注采井数达 61 口。使全区含井由 90.7% 下降到 73.9%，日产油由 651t 上升到 1357t，现已提高采收率 13.62%，每吨聚合物增加原油 130t。试验仍在进行。

河南双河油田，在油层温度 72℃ 条件下，发展了一套聚合物抗温技术，使矿场先导试验已取得提高采收率 8.6% 的好效果，预计试验完成后，可提高采收率 10.4%。

到“八五”末，全国已进行聚合物驱油矿场试验 19 个，均取得明显增油降水好效果。并在六个大油区 25 个油田、区块开始推广应用，建成 $168 \times 10^4\text{t}$ 原油生产能力。“九五”已将聚合物驱增产原油列入我国陆上原油生产计划，2000 年年增产原油将达 $(500 \sim 700) \times 10^4\text{t}$ ，“九五”期间五年将增产原油 $1500 \times 10^4\text{t}$ 。1997 年实际全国聚合物驱年增原油达 $303 \times 10^4\text{t}$ ，现已投入聚合物驱工业化应用的油田面积达 101.3km^2 ，动用地质储量 $2.21 \times 10^8\text{t}$ ，年注入聚合物干粉 $2.37 \times 10^4\text{t}$ 。使聚合物驱已成为我国陆上老油田稳产战略性重大技术，也是世界上规模最大，大面积增产效果最好的国家。

“八五”期间我国复合驱油技术有了重大突破。我国油田受地质条件制约，注水开发不论波及系数和驱油效率均较低，复合驱油主要是利用化学剂之间协同效应，既可提高波及系数又可提高驱油效率。不仅比聚合物驱可更大幅度提高采收率，而且比表面活性剂驱所用昂贵表活剂用量减少一个数量级，从而使复合驱油具有高效驱油并可工业化应用的前景。但是复合驱油技术远比聚合物驱油复杂的多，难度更大，风险更大。“八五”期间我国在“七五”攻关掌握表面活性剂驱油技术基础上，按系统工程组织了科技攻关，开展了复合驱油机理、多种化学剂间相容性和协同性、驱油剂和油田地质条件的适应性、复合驱数值模拟软件研制、合理注采关系和动态监测技术，注采工艺及采出液净化处理等技术的研究。自行设计了不同油区、不同类型的五个复合驱油先导性矿场试验方案和实施方案，并首次于 1993 年在胜利油区孤东油田小井距试验区试验成功，在已采出程度 54%（超出水驱预测最终采收率—属油田枯竭）条件下，又提高采收率 13.4%，使总采收率达到 67%；大庆油区原油基本无酸值情况下，中区西部先导试验区、杏五区先导试验区均取得比水驱最终采收率提高 20% 以上好效果，高出聚合物驱提高采收率一倍左右；新疆克拉玛依砾岩油田二中区小井距先导试验区，在已含水 99% 情况下，使中心井产量增长了 12 倍，含水已下降到 83%；辽河油区兴隆台油田兴 28 块具有气顶边水小断块油田已注水枯竭情况下，采用碱—聚合物二元复合驱先导试验，中心井日产油由 0.9t 上升到 9.7t。

1996 年 11 月在大庆油区杏二区正在进行的扩大试验，井距 200m 情况下，截至 1997 年 10 月，中心井日产油由 0t 上升到 30t，含水由 100% 下降到 50.1%，预计采收率可比水驱提

高 24.7%；1997 年 3 月在北一区断西正在进行的井距 250m 扩大试验区，截止到 1997 年 10 月全区日产油已由 99t 上升到 129t，预计也将比水驱提高采收率 25%。以上取得的成果，反映我国复合驱油技术不论是室内研究、方案设计、不同类型的油田试验技术的配套、现场试验的数量，以及油田试验已取得的效果均走在世界前列。复合驱油技术在“九五”期间将进一步扩大工业性矿场试验，进一步系统完善配套技术，将为 2000 年以后工业化应用提供更大提高采收率的技术。

“八五”期间国产驱油剂有了重大发展。化学驱油技术要工业化应用，不仅技术上要掌握，更重要的是经济上可行。化学驱油剂费用是影响化学驱油经济效益的关键，也是当今世界三次采油不能工业化推广的重要原因，它也将制约我国三次采油工业化的推广应用。为此，“八五”期间“三次采油新技术”国家重点科技攻关项目第三个重要内容，就是开展了国产驱油剂的研究，从立足国产、降低化学剂用量和采用廉价原料三个方面入手，努力实现驱油剂的“高效廉价”，开展了八种驱油剂的研制，其中除聚丙烯酰胺和石油磺酸盐主要是提高作为驱油剂国产产品性能质量外，其他六种均具有开创性的研制。

国产聚丙烯酰胺的研制，是从剖析单体杂质对产品质量影响，优化引进体系，改进合成工艺，直到正式生产，使国产聚丙烯酰胺分子量提高到 1000 万以上，多项质量性能指标满足了驱油剂要求；国产生物聚合物不仅可耐温 85℃，而且创新性的试验用黄胞胶发酵液做驱油剂，减少加工工艺，或采用无须乙醇处理新工艺的干粉生物聚合物；充分利用新疆克拉玛依高芳烃含量原油，研制作作为化学驱油剂的石油磺酸盐，不仅建设了生产车间，并已用于克拉玛依复合驱油先导性矿场试验；新开发并具有开创性的生物表面活性剂发酵液新型驱油剂，不仅每吨价格只是表面活性剂的 20%~25%，而且与大庆复合驱油体系所用表面活性剂复配后，具有更大超低界面张力，还可替代体系中表面活性剂 50% 用量，现正用于矿场先导试验区；利用大庆石蜡基原油，成功地将气相氧化改进为可工业化生产的液相氧化流程，开发出羧酸盐中试产品，与大庆复合驱油体系中表面活性剂复配，具有超低界面张力，而且由于廉价还可替代表面活性剂 30% 的用量；另外对原料便宜、来源广的本质素磺酸盐，室内试验可作为驱油体系的牺牲剂，减少表面活性剂被油层吸附损失；利用纸浆废液的室内研究，可替代大量碱用于复合驱油体系中，还可改善纸浆废液对环境的污染；另外开展了高分子表面活性剂作为新型驱油剂探索性研究，设想使提高驱油效率和扩大波及体积作用集中于一种驱油剂，从而改善驱油体系在油层中的色谱效应。“九五”将使以上中试产品逐步进入矿场试验，并进一步开发超高分子量聚丙烯酰胺、烷基苯磺酸盐和环烷酸磺酸盐作为驱油剂的研制。这样将使驱油剂产品立足国产，做到高效廉价，为我国三次采油大规模工业化应用创造条件。

我国化学驱油技术的高速发展，已成为我国陆上老油田继续稳产的重大战略接替技术。当前不论从规模上，年增产原油量和技术的系统完善配套上，均已走在世界前列。预计化学驱油技术的推广应用，将使年产 5000×10^4 t 已稳产 20a 的大庆油田，再延长稳产期 10~15a，将成为世界石油史上稳产年限最长的大油田，这将对我国石油工业的发展产生重大影响。预计到 2010 年我国化学驱油年总增油量将占全国陆上年产油量 15% 左右，成为世界上三次采油工业化程度最高的国家，将为世界油田开发理论和技术发展做出重大贡献。

三、中国三次采油具有很大潜力

我国油田主要分布在陆相沉积盆地，以河流—三角洲沉积体系为主，受气候和河流频繁的摆动，储油层砂体纵横向分布和物性变化均比海相沉积复杂，泥质含量高，泥砂交错分

布，油藏非均质性远高于主要为海相沉积的国外油田；加上陆相盆地生油母质为陆生生物，原油多高含蜡和粘度高。这种陆相沉积环境和生油条件，加大了我国油田开发难度。我国油田基本上均采用早期注水保持压力的开发方式，30多年来，根据油田特点，着眼油田非均质性，发展了一整套细分沉积相、细分开发层系、分层注水、分层测试、加密井网、提高排量以及注、压、抽等综合配套技术，使注入水不断扩大波及体积，延长了油田稳产期，提高了水驱采收率。如大庆油田在综合含水60%以后的高含水期，继续年产 $5000 \times 10^4 \text{ t}$ 已稳产18a；胜利主力油田孤岛、埕东，在综合含水90%以上特高含水期又稳产3a。应该说，我国注水开发技术和稳产指标，已达到或超过国外同类开发方式油田的先进水平。尽管如此，经多种方法预测，我国油田平均采收率仅34.2%，一些油田只有20%~25%。原苏联注水开发的杜玛兹油田，主要产层为海相泥盆系砂岩，原油地下粘度为 $2.5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ，含水82.9%时，已采出地质储量49.3%，方案设计采收率为59%；美国水驱的东得克萨斯油田，产层为上白垩系乌德拜海相砂岩，原油地下粘度为 $0.93 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ，含水80%时，已采出地质储量50%，方案设计采收率可达80%。而我国陆相沉积的大庆油田，主要生产层为葡萄花和萨尔图砂岩，原油地下粘度为 $9 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ，现含水82%，仅采出地质储量30.1%。1963年编制萨尔图中部 146 km^2 地区开发方案时，根据岩心水驱油实验、经验公式、与国外油田开发资料对比等三种方法综合分析，确定萨、葡油层水驱采收率仅为34.8%；大庆还开展了75m小井距水驱全过程矿场试验，注水1.85~2倍情况下，含水已达96.8%，此时葡₁₋₄水驱采收率为39%，葡₄₋₇为43.8%，萨₇₊₈仅为32.7%。经过这些年工作不断改善水驱开发效果，使大庆油田预测水驱采收率也仅可提高到40%左右，但仍然远远低于国外海相沉积水驱大油田采收率。陆相沉积的胜利油田，上第三系馆陶组油层，原油地下粘度高达60~90 $\text{ mPa} \cdot \text{s}$ ，下第三系沙河街组油层，原油地下粘度为10~20 $\text{ mPa} \cdot \text{s}$ ，现含水已达89.8%，仅采出地质储量21.1%，预测水驱采收率仅27.7%。我国油田采收率低，主要是陆相沉积储层水驱波及系数和驱油效率较低。大庆13口井水淹层密闭取心资料，反映了以正韵律厚层砂岩为主的喇嘛甸、萨北、萨中地区，注入水平面上沿条带状突进，垂向上厚油层底部水淹严重，在注水倍数为1时，水洗厚度仅69%，其中强水洗厚度也仅26.5%，水洗段平均驱油效率47%；在中区西部已注水开发近30年，注聚合物驱油前，在试验区新钻密闭取心井，水淹层测井解释和岩心资料说明，萨₁₋₃层水淹层厚度仅33.7%，葡₁₋₄层水淹厚度也仅28.4%，采出程度仅20%。胜利最大的胜坨油田，是一套河流—三角洲沉积体系，为高渗高粘度油田，1994年所钻检查井资料表明，在已注水也将近30年，注水倍数已达1.1~1.44，综合含水率已高达92%~95%情况下，水洗和强水洗厚度仅为油层厚度54.6%，平均驱油效率也仅41.6%~47.1%。

我国曾对25个主力油田资料的研究表明，平均水驱波及系统最终可达0.693，驱油效率0.531，预测全国油田采收率仅34.2%，这就将使我国近百亿吨探明石油地质储量采不出来。这些室内研究和油田实际生产，说明了我国油田地质情况为三次采油提供了巨大资源条件。1988年应用美国能源部提高采收率潜力模型，对我国13个油区174个油田近千个区块，总计 $74 \times 10^8 \text{ t}$ 地质储量进行了三次采油潜力分析，其结果表明：适合聚合物驱 $59.7 \times 10^8 \text{ t}$ 地质储量；平均提高采收率8.7%，可增加可采储量 $5.19 \times 10^8 \text{ t}$ ；适合表面活性剂和二元复合驱（均可视为复合驱）地质储量 $60 \times 10^8 \text{ t}$ ，平均提高采收率18.8%，可增加可采储量 $11.3 \times 10^8 \text{ t}$ 。这些数字显示出我国三次采油具有很大的潜力。实际上，经过这些年近30个矿场试验和推广应用，聚合物驱可提高采收率10%；复合驱先导试验可提高15%~20%。

显示出我国三次采油可大幅度增加可采储量，这将为我国老油田稳产创造了条件。

四、围绕提高经济效益，发展我国三次采油技术

理论上和油田现场试验，均说明三次采油可以大幅度提高采收率，但世界三次采油总体上仍是处于试验研究阶段，至今未进入大规模工业化应用。主要原因，一方面是三次采油机理复杂，涉及多学科、多专业的高新技术；另一方面很重要的是其高投入和高风险性。

我国今天重视并发展三次采油技术，是对比了多种可大幅度增加可采储量的方法基础上确定的。

我国原油年产量已高达 1.4×10^8 t，全国陆上油田综合含水已达 82%，进入了高含水采油阶段，每年年产量综合递减 800 多万吨，仅做到稳产，每年就需增加近 8×10^8 t 地质储量。目前，我国新区勘探难度越来越大，单纯靠新区增加可采储量已满足不了生产需要，而老油田剩余近百亿吨储量二次采油采不出来。大庆油田曾对其外围新区未动用低渗透新油田和老油田每采 100×10^4 t 原油所需总费用进行了对比：老区继续水驱加密井网总费用 4.22 亿元；老区聚合物驱 3.93 亿元；外围新区 8.3 亿元。反映了大庆老区挖掘投入经费是较低的。在老区挖掘方法上，进一步以北一区中块为例，进行了开发指标的经济评估（按三次采油八年有效期）对比（表 1）。

表 1

开发指标 方 法	平均单井日产 t	提高采收率 %	采 1t 油需注水量 m ³	采 1t 油需产出液量 t
继续水驱加密井网	4.1	3	16.5	9.2
聚合物驱	20.7	12	5.8	6.6
复合驱	34.5	20	2.8	2.7

表 1 反映了大庆老油田采用三次采油是经济有效的，不仅可大幅度增加可采储量，还可大幅度减少注水量和产出液量。

尽管大庆采用三次采油提高采收率是有利的，但三次采油具有的高投入和高风险性，将会影响工业化的推广应用。目前我国三次采油已步入工业化应用阶段，面对的是更为复杂多种类型的油田地质条件和各企业不同的经济条件，这些年主要是在较好油层进行了一定规模的现场试验，工业化推广仍存在风险性。三次采油具有很强的针对性和高的风险性，应用失败将会造成很大的经济损失，另一方面即便矿场应用可增加原油产量和增加可采储量，但也要受到企业经济条件的制约。根据我国三次采油矿场试验粗略的经济评估，一般聚合物驱原油成本比水驱增加 200 ~ 300 元；复合物驱将增加 300 ~ 500 元左右，每个企业受经济效益制约，都有一个可承受的原油成本极限。因此，以提高三次采油经济效益为中心，进一步发展三次采油技术，才能更好地推动我国三次采油工业化的应用。

1. 深化油藏研究，最大限度地降低三次采油的风险性

我国这些年所实施的每个三次采油矿场试验，尽管小到不足 0.5km²，大到 1 ~ 3km²，都要投入上千万到几千万元资金，应用的失败，不仅使企业受巨大经济损失，而且将使油田丧失对三次采油技术的信心，直接关系老油田稳产和国家石油资源的损失。美国一些油田开发专家认为，这些年美国一批三次采油矿场试验的失败，主要是对油藏认识不足。反映出三

次采油对油藏条件很强的针对性和小型矿场试验代表的局限性。因此，三次采油油藏描述的要求远比二次采油深入，这是因为三次采油所采用的驱油剂比二次采油所用的水昂贵的多，需要更加有效的发挥新驱油剂的作用；另一方面新的驱油剂的驱油作用，已不单是二次采油物理作用，而是要在油层中发挥有利驱油的物理化学作用再加上二次采油长期注水开发，油层中剩余油分布已很分散，油水犬牙交错十分复杂了。为此，三次采油要在一般对油层宏观参数掌握的基础上，进一步需掌握长期注水后油层物性、孔隙结构的改变，矿物的组成，粘土的分布形态，水窜通道的分布及其对开采影响程度；对流体性质一般宏观参数表征外，还应掌握流体的组分、离子含量，以及对已复杂分散化的剩余油的分布和控制剩余油的主要因素等。每个油田都具有不同的地质条件，使三次采油技术的推广应用必须十分谨慎，对每一个油田、区块、层系都要做具体的充分的油藏精细描述，采取有效的减少风险的技术措施，才有可能取得成功的希望。大庆油田在油藏条件基本相同的情况下，萨尔图中区西部三元复合驱配方就不能用于南部杏树岗五区，配方中所用表面活性剂与杏五区原油形不成超低界面张力。为此，大庆在推广应用聚合物驱前，在萨尔图地区就开展了不同区、层 9 个矿场先导性和工业性试验，并在都取得成功后，“九五”期间还要对每个区块地质条件认真研究的基礎上，进行逐步扩大推广应用。从而取得了大面积工业化应用成功。我国这些年矿场试验表明，深化油藏地质条件研究，直接关系三次采油的成败。深化油藏的认识应发展水淹层密闭取心技术、水淹层内及薄层精细测井系列与解释技术、井间岩性和物性变化预测技术、示踪剂测试技术以及室内微观物理模拟技术等。

2. 因地制宜、经济有效地发展三次采油技术

美国马拉松公司 70 年代就已取得表面活性剂驱油矿场试验成功，但由于需注入大量昂贵的表面活性剂，经济上无法承受工业化应用而停止。一些专家预言，只有当国际油价 30 美元/桶时，才能考虑表面活性剂驱。在当前油价情况下，世界三次采油均处于停滞状态，室内研究已转向高效率、低成本方向发展。

美国国内油田已采出可采储量 86% 以上，老油田大量产水，一大批油田接近枯竭，甚至废弃。但经三次采油信息系统模拟潜力分析，地下还有大约 $450 \times 10^8 \text{ t}$ 剩余油无法采出。因此，它们在当前油价低的情况下，根据美国资源情况，在深化油藏描述研究基础上，转向深度调剖和 CO_2 混相驱。

美国现将成本高的化学驱油转向开发深度调剖技术，已在高含水老油田上较广泛的应用，目前美国深度调剖剂的研究十分活跃。特奥柯公司对 31 个使用凝胶调剖技术区和 24 个水驱开发区对比，相同采收率下，凝胶调剖区可少注水 28%，每增加 1 桶原油成本仅增加 1~3 美元；怀俄明州波特布夫克油田，每增加 1 桶原油仅增加 0.57 美元；菲利普公司在堪萨斯西部老油田上应用，取得注 1t 调剖剂增油 760t 原油的好效果。

美国发展 CO_2 混相驱，主要是美国中南部有多个巨型—大型 CO_2 气田，而且已建成三条 CO_2 输气管线。在具有便宜、充足供应 CO_2 及油田具备较低混相压力条件下，近年来 CO_2 混相驱油技术得到了很大的发展。如美国中南部 Wasson San Anros 油田的 Willard 区 CO_2 混相驱，使采收率比水驱提高了 12.2%，总采收率达 53.1%。目前 CO_2 混相驱已成为美国三次采油最主要的方法，1996 年有 60 个矿场进行 CO_2 混相驱油，年总产油达 $855 \times 10^4 \text{ t}$ 。

我国 CO_2 、天然气探明资源不足，大多数油藏混相压力高，不具备混相驱条件。因此，我国三次采油主要发展化学驱油方法。这些年矿场试验结果，聚合物驱可提高采收率 10%

左右，复合驱提高 20% 左右，效果是明显的。但我国油田类型多，各油田地质条件更是千差万别，加上各企业经济和地处环境不同，三次采油必须因地制宜地优选方法和开发新技术，只有使其具有企业可承受的经济条件，才能有工业化应用前景。大庆在好油层化学驱油（尤其是聚合物驱油）已取得大幅度增加可采储量的好效果，聚合物驱原油成本远低于经济评估经济极限值，但随着大规模的推广，陆续差油层投入化学驱油，技术和经济效果都将发生变化，进一步开发新技术，降低成本提高经济效益仍将是三次采油工业化推广应用的重大课题。1996 年大庆开始在萨北、喇南，在注聚合物前进行了深度调剖井组试验，经后来聚合物驱增产原油高于其他井组，聚合物产出浓度大幅度降低。这项新技术的应用，将会使大庆化学驱油经济效益进一步提高，推动更大范围可进行化学驱油。另外，在复合驱油体系的深化研究上，发展新技术解决好碱对聚合物的降解作用，从而减少化学剂用量，降低复合驱油成本，这将使复合驱油的工业应用出现更广阔的前景。胜利油田化学驱油地质条件远比大庆复杂，目前主要开展化学驱油的孤岛、孤东油田，地下原油粘度高达 60mPa·s 以上，油层温度 65~80℃，长期注水开发，使特高渗透疏松砂岩已形成错综复杂的大孔道，再加上地处淡水缺乏地区，这些不利化学驱油因素，直接影响三次采油开发效果和经济效益，为此给三次采油的应用提出了一批需要攻克的新技术，如以搞清水窜大孔道分布为中心的油藏精细描述新方法；针对特大孔道的封堵和深度调剖新技术；油田污水配制聚合物溶液提高粘度新技术；以及抗温抗盐廉价的聚合物研制等。这些技术的突破，将会大大降低化学剂用量和提高驱油效率，从而为三次采油应用创造更广阔的工业化应用条件。我国还有些更为复杂的油田，以及经济条件更为困难的老油田，应根据企业的条件，地处的环境，可发展如区块整体深度调剖技术，有气源地区注气技术以及其他新技术。

3. 进一步提高三次采油整体工程的经济效益

三次采油是系统工程，某一个环节增加投资可能会使其他环节更少投入和更多产油。因此，要从三次采油整体工程经济效益出发，进一步优化、完善和发展新技术。

我国陆相沉积储油层非均质性严重，根据不同注水阶段检查井取心资料表明，长期注水后，油层的渗透率、孔隙度增大，泥质含量降低，其中尤以渗透率增大最为突出，而高渗透层被注水冲刷强度远大于低渗透层，这就更加剧了层间矛盾，使油层平面和纵向上非均质性更加严重。因此，注水后期进行三次采油注化学段塞前，需要根据油层情况进行深度调剖，甚至是封堵大孔道，以降低化学剂无效的窜流浪费，同时也减少了因采出液中聚合物浓度高而增加地面净化处理工程投入。美国虽然是海相沉积砂岩油田，他们仍然十分重视三次采油前进行调剖作业。我国河南双河砂砾岩油田，在进行聚合物驱前和聚合物驱过程，根据动态反映的情况，多次进行部分井调剖，从而控制了聚合物的早窜和产出高浓度聚合物。这样尽管增加了因调剖作业而增加了费用，但可有效地提高化学剂利用率和驱油效率，从总体上降低了经济损失。另外从三次采油的高投入来分析，三次采油在水驱基础上，增加了新钻井费用、购买化学剂费用和地面工程费用三部分，根据我国近年来三次采油各矿场试验发生费用情况，购买化学剂费用占总费用约 30%~50%；地面工程费用占 30%~40%。这两部分成为我国目前化学驱油增加投入的主要部分，直接关系到企业的经济承受能力，影响着三次采油技术的推广应用。因此，降低三次采油高投入，也应主要从这两部分进一步改进技术，发展新技术和优化技术。

关于降低化学驱油剂费用，一方面要使驱油剂立足国产，开发高效廉价的系列驱油剂，另一方面要优化驱油体系段塞尺寸，使驱油剂的用量减少，最有效的发挥驱油剂的作用。

降低地面工程费用，需要尽可能地简化流程，一方面是对目前工艺流程进一步发展新技术简化流程，如大庆将聚合物分散配制分散注入的地面流程改进为集中配注分散注入，大大降低了地面建设投资；在产出液处理上，开发了高效破乳剂等；另一方面也可从总体效益优化优选技术，如聚合物选用粉剂还是乳剂？固体的粉剂聚合物，不但生产过程中要增加技术难度大的干燥和造粒工序，而且在油田注入时，又需将固体粉剂聚合物再进行分散、溶解和熟化过程，使其成为溶液，使生产和使用都增加很多装置和流程，增加了投入。因此，很需要从三次采油系统工程总体经济效益出发，结合油田实际，具体分析做出各项技术选用的优化决策。

我国三次采油技术，经过十年左右国家重点科技攻关取得了很大发展，目前聚合物驱油刚开始走向工业化应用，但三次采油技术是复杂的，目前仍是世界性高新技术，驱油机理有待认识，适应不同类型油藏地质条件的新方法有待开发，围绕降低成本的新技术有待发展，任重而道远，减少石油储量损失，最大限度地提高采收率，将是油田开发工作者终身职责。让我们为我国石油工业的发展，为世界油田开发做出更大贡献。

目 录

第一篇 油田矿场试验、机理及数值模拟

1 大庆油田中区西部单层区聚合物驱油矿场试验	(1)
2 大庆油田中区西部双层区聚合物驱油矿场试验研究	(15)
3 大庆萨北厚层试验区萨 ₁₀₋₁₆ 聚合物驱油矿场试验	(28)
4 双河油田 ₅ 层高温聚合物驱试验	(34)
5 大庆北一区断西聚合物驱工业性矿场试验	(45)
6 港西四区聚合物驱工业性试验区效果评价	(52)
7 对大庆油田聚合物驱若干问题的认识	(60)
8 大庆油田萨中以北地区聚合物驱油潜力分布特征	(71)
9 大庆油田聚合物驱合理井网井距研究	(81)
10 大庆油田聚合物驱开采指标测算方法	(89)
11 聚合物在油层中的特性研究	(99)
12 油藏条件下聚丙烯酰胺溶液高温老化稳定性研究	(107)
13 聚丙烯酰胺溶液的地下流变特性研究	(112)
14 聚合物驱相对渗透率曲线特征研究	(120)
15 聚合物驱最佳聚合物分子量优选技术	(125)
16 聚合物分子量及分子量分布对残余阻力系数影响的研究	(138)
17 HPAM 的分子量对岩心渗透率适应性研究	(150)
18 聚合物分子量与岩心非均质系数匹配关系的实验研究	(155)
19 不同分子量及分子量分布的聚合物样品的制备及测定方法研究	(163)
20 聚合物调剖及驱油物理模拟研究	(181)
21 试井技术在 ₅ 层聚合物先导试验区的应用	(188)
22 聚合物驱后进一步提高采收率的试验研究	(202)
23 井间砂体预测方法研究	(208)
24 河流相储层精细地质作图计算机辅助系统	(219)
25 聚合物驱 BLACKPM 新模型的研制	(227)
26 聚合物滞留及剩余油分布的数值模拟研究	(236)
27 聚合物驱渗透率下降系数 R_k 预测模型研究	(240)
28 聚合物驱应用软件算法研究	(246)
29 聚合物驱数值模拟前处理和后处理软件研制	(254)
30 对脉冲试井压力反应进行数值模拟的油藏描述方法	(258)
31 大庆油田中区西部单、双层聚合物试验区动态拟合和效果评价数值模拟研究	(264)
32 北一区断西聚合物驱工业性试验方案设计数值模拟研究	(271)
33 聚合物驱油的聚合物用量合理选择研究	(277)

34 聚合物驱油段塞保护数值模拟研究 (280)

35 聚合物防窜—聚合物驱油组分模型模拟器 (283)

36 水解聚丙烯酰胺盐水溶液表观粘度的数学模拟 () 通用
Mark - Houwink - Sakurada 方程式 (295)

37 水解聚丙烯酰胺盐水溶液表观粘度的数学模拟 () 零剪切粘度与
特性粘数的关系 (302)

38 水解聚丙烯酰胺盐水溶液表观粘度的数学模拟 () 表观粘度与剪切
速率的通用关系式 (306)

39 北一区断西聚合物驱工业性试验跟踪拟合和效果预测研究 (311)

40 聚合物防窜数值模拟技术在港西四区的应用 (319)

第二篇 聚合物驱的注采工艺及地面处理工艺

41 聚合物驱系统工程评价技术研究 (325)

42 聚合物驱防窜机理实验研究 (331)

43 聚合物驱防窜室内物理模拟试验 (336)

44 港西四区聚合物驱防窜井组先导试验 (344)

45 套管井测井监测聚合物驱油效果 (351)

46 非均质厚油层测井及剩余油精细解释技术 (357)

47 聚合物驱双层分注工艺技术 (370)

48 聚合物驱分层测试技术 (376)

49 油田注采过程中聚合物降解的研究 (385)

50 聚合物注入系统粘损初步分析 (395)

51 高温聚合物驱地面注入系统剪切规律研究 (398)

52 地面注入流程控制系统溶解氧含量 (404)

53 溶解熟化装置对聚合物溶解性能的影响与改进 (409)

54 高浓度聚合物水溶液输送浅论 (414)

55 应用超滤技术测定产出液中聚合物水解度的研究 (420)

56 浊度法检测聚丙烯酰胺浓度的研究 (424)

57 聚合物驱采出液游离水沉降脱除的试验研究 (429)

58 聚合物驱采出液油、水分离特性 (436)

59 含聚合物采出液原油破乳剂研究 (445)

60 聚合物驱采出液电脱水技术研究 (450)

61 聚合物驱产出水的利用方法 (457)

第一篇 油田矿场试验、机理及数值模拟

大庆油田中区西部单层区聚合物 驱油矿场试验

郝悦兴 叶中桂 姜祥成 赵 兵 唐莉华

摘 要

本项研究介绍了试验区的基本情况 & 聚合物驱油试验实施结果，对聚合物驱油效果作出了较全面深入评价。不仅总结出了聚合物驱油的动态反映特点，深化了对聚合物驱油机理的认识，而且建立了一套聚合物驱油动态分析方法和效果评价技术，为油田大规模应用聚合物驱油技术提供了依据。

一、试验区概况

大庆油田中区西部单层聚合物驱油矿场试验区位于中 5—9 井区（见图 1），由 4 个反五点井网组成。试验井 15 口，其中注入井 4 口，为 PO1，PO2，PO3 和 PO4；采油井 9 口，为 PO5，PO6，PO7，PO8，PO9，PO10，PO11，PO12 和 PO13；PO 观 1 和 PO 观 2 分别为射孔和未射孔观测井。注采井距 106m，采油井之间为 150m。试验目的层葡₁₋₄，埋藏深度 910~930m，试验区面积 90000m²，油层有效厚度 11.6m，孔隙度 30.0%，原始油饱和度 78.8%，原始地质储量 188398t，中心井区的地质储量为 34853t。

1. 油层特征

葡₁₋₄层是泛滥平原—分流平原环境下沉积的河道砂岩，是多期河道充填、下切、叠加而成的复合体。自上而下可分成 5 个不同时间沉积的砂体。油层多呈正韵律或多韵律类型。物性好，渗透率高，非均质严重，纵向上渗透率最低不足 0.1μm²，最高达 6.0μm²，渗透率变异系数在 0.7 至 0.8 之间。平面上砂体连通关系复杂，非均质性也较严重。脉冲试井结果表明，注采井间的压力传导快慢相比为 17 倍。水驱空白试验期间，示踪剂动

图 1 中区西部单层注聚合物
矿场试验区井位图

态资料证实，PO5 中心井 4 个来水方向上的推进速度最慢为 1.2m/ d，最快为 6.6m/ d。

葡₁₋₄层油层温度 42℃ 左右，有利用聚合物在油层中保持稳定。地层原油粘度 9.3mPa·s。注入水矿化度 800mg/ L 左右，产出水矿化度约 3000mg/ L（见表 1）。Ca²⁺，Mg²⁺ 含量不高，有利于聚合物的增粘。

表 1 水质分析数据

项 目	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻¹	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ K ⁺	总矿化度 mg/ L
注入水	0	537.0	24.1	33.6	12.0	6.1	208.3	821.6
产出水	219.1	1172.5	555.7	40.5	9.0	7.7	864.9	2969.4

2. 试验区开采简况

中区西部单层聚合物驱油试验区，处在原中区西部注水开发试验区之内。自 1960 年 6 月投入注水开采，到 1990 年 8 月 5 日注聚合物前，经历了四个大的开采阶段。

(1) 笼统开采阶段（1960.6 ~ 1964.12）

此阶段笼统注水，笼统采油。由于注入水沿油层高渗透带突进，造成油井见水早，含水上升快，影响了开采效果。

(2) 分层开采阶段（1965 ~ 1980）

此阶段注水井分层注水，采油井分层采油，以解决不同类型油层之间的矛盾。通过分层调整、改造，控制了含水上升速度，提高了采油速度，大大改善了试验区的水驱开发效果，为油田高产稳产提供了实践依据。

(3) 机械抽油降压强采阶段（1981 ~ 1989）

为了弥补产量递减，降低井底流压，放大生产压差，加大排液量的机械采油方式开采。根据试验区新钻井水淹层测井解释结果统计，此时，葡₁₋₄层水淹厚度占 51.6%，而高水淹厚度占 40.8%，多以底部水淹为主。全区含水饱和度达 43.5%，采出程度为 28.4%。中心井区含水饱和度 45.7%，采出程度达 31.1%。

(4) 注聚合物前的水驱空白试验阶段

为了研究密井网下的水淹特点，搞清试验区油层剩余油分布，为聚合物驱油效果评价奠定对比基础，于 1989 年 12 月 5 日到 1990 年 8 月 4 日进行了水驱空白试验。此阶段累积注水量占 28.5% 孔隙体积，累积采油 16124t，全区综合含水达 95 % 左右，中心井阶段采出程度 3.7%。

产液剖面测试结果证实，动用好的油层厚度（产厚比大于 1）约占 50%，主要集中在油层下部或韵律段底部，有 20% 的油层厚度没有动用，主要集中在油层上部。

单层区葡₁₋₄层的非均质性、流体性质及水淹特点都有利于聚合物驱油，剩余油较多，水驱空白试验结束时，中心井区采出程度为 34.8%。

二、聚合物驱油试验方案的实施

1. 聚合物性能指标

矿场试验所用的聚合物是引进美国的 3330S 产品，其各项性能指标都达到了设计要求。矿场试验证明，聚合物注入性及增粘性都很好。设计及实测指标对比见表 2。