

石油高职教育“工学结合”规划教材

提高石油采收率技术

(第三版)

吕秀凤 崔凯华 主编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

内 容 提 要

本书是针对油气开采技术专业岗位群的典型工作任务,运用基于工作过程的课程开发理论进行开发编写的“工学结合”教材。本书设计了六个学习情境,分别为聚合物驱油技术、三元复合体系驱油技术、热力采油技术、气体混相驱油技术、微生物采油技术和物理采油技术。每个学习情境都包括这种提高石油采收率方法所涉及的工作过程知识和技能训练项目。

本书可作为高职高专院校油气开采专业及相关专业的教学用书,也可作为矿场技术人员及油田职工的培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

提高石油采收率技术/吕秀凤,崔凯华主编. —3 版
北京:石油工业出版社,2012.8

(石油高职教育“工学结合”规划教材)

ISBN 978-7-5021-9067-5

I. 提…

II. ①吕…②崔…

III. 石油开采-提高采收率-高等职业教育-教材

IV. TE357

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 094896 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: <http://pip.cnpc.com.cn>

编辑部:(010) 64523574 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012 年 8 月第 3 版 2012 年 8 月第 7 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:15.25

字数:389 千字

定价:27.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

第三版前言

本教材是根据 2009 年 10 月在大庆职业学院召开的石油高等职业教育油气开采技术专业课程改革与配套教材研讨会会议精神,按照与会的全国石油高职高专院校教师与企业专家共同审定的《提高石油采收率课程标准》编写的。

本教材在编写过程中,注重体现先进性、科学性和适用性的设计理念。

(1) 先进性。本教材是国内高职高专院校提高石油采收率工学结合教材,所选取的工作过程知识为最新的提高石油采收率技术,所选取的技能训练内容均来自于油田矿场一线的岗位实际操作项目。

(2) 科学性。全书编写规范,书中所涉及的各项参数均采用国际单位制,内容的选取是由校内教师和油田矿场专家共同合作完成,并按学生的认知规律,由简单到复杂进行各个学习情境的序化和编排。

(3) 适用性。以就业为导向,从工作岗位的职业能力培养出发,基于工作过程设计了 6 个学习情境,17 个学习项目。每个学习项目包括:知识目标、技能目标、工作过程知识、技能训练等内容,适于一体化教学的使用。

本教材由石油高职高专院校教师及油田企业专家联合编写,具体分工:绪论由天津工程职业技术学院熊海灵编写;学习情境一由大庆职业学院吕秀凤编写;学习情境二由大庆油田有限责任公司第三采油厂王荣久、张瞳阳,大庆油田有限责任公司第四采油厂曹卫平编写;学习情境三由辽河石油职业技术学院崔凯华、雷广发编写;学习情境四由大庆职业学院王晓丛、天津石油职业技术学院王立柱编写;学习情境五由松原职业技术学院王守峰编写;学习情境六由大庆职业学院陈淑华编写。本书由吕秀凤、崔凯华担任主编,熊海灵、王守峰担任副主编,大庆职业学院姜继水教授、大庆油田有限责任公司第三采油厂张佳民高级工程师担任主审。

本书在编写过程中,得到了姜继水教授、张佳民高级工程师的悉心指导和大力支持,同时也得到了大庆油田、辽河油田、吉林油田等生产一线专家的指导和大力支持,谨在此表示最诚挚的谢意!

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请使用本教材的师生和广大读者批评指正。

编 者

2012 年 2 月

第二版前言

本书是根据石油工业出版社于 2005 年 10 月在大庆职业学院主持召开的教材编审会精神,按照各石油高职高专院校与会的专业教师审定的《提高石油采收率技术》教学大纲,针对石油高职高专院校油气田开采专业学生而编写的教学用书。

随着国内外油田开采形势的不断发展,国内的大部分油田尤其是东部油田已经进入高含水或特高含水期。虽然油田注水驱油阶段接近于结束,但是靠水驱的油田最终采收率也仅仅达到 50% 左右。因此,各个油田所面临的亟待解决的问题是如何突破提高石油采收率这一“瓶颈”技术。为了提高石油采收率,世界各国的油藏工程师、采油工程师及油田化学专家针对各个油田的不同地质特点,一直在不断地努力尝试着各种技术措施。本书是根据各种提高石油采收率技术的最新研究成果及其在油田开发中的应用情况,并且结合各高职高专院校的宝贵反馈意见,在石油工业出版社 1999 年 8 月出版发行的《提高石油采收率技术》(姜继水、宋吉水主编)一书的基础之上修订完成的。

本书的内容包括油田注水及空气驱油技术、聚合物溶液驱油技术、表面活性剂溶液驱油技术、碱水驱油及复合体系驱油技术、气体混相驱油技术、热力采油技术、微生物采油技术及物理采油技术。在此值得一提的是,有的提高石油采收率技术措施尚处于室内评价阶段,有的处于油田现场先导性试验和扩大工业性试验阶段,有的则已经在油田上大面积推广使用。因此,该书内容的侧重点是在国内油田矿场上应用比较成熟的提高石油采收率技术措施;与此同时,对国外比较先进的、有良好发展前景的提高石油采收率技术给予了介绍。

参加本书的编写人员及分工情况:第一章由天津石油职业技术学院刘红兵、纪素先编写;绪论、第二章及各章节的插图由大庆职业学院姜继水编写;第三章由承德石油高等专科学校高书香编写;第四章由大庆职业学院吕秀凤编写;第五章由渤海石油职业学院范昆仑编写;第六章由克拉玛依职业技术学院廖作才编写;第七章由松源职业学院王静梅编写;第八章由山东胜利职业学院张俨彬编写。本书主编为姜继水,副主编为刘红兵、高书香、王静梅,大庆石油学院刘振宇教授负责主审。

在本书的编写过程中,得到了大庆石油学院提高石油采收率所、大庆石油管理局勘探开发研究院三采室、大庆管理局采油工程研究院采油工艺室等有关领导及专家的精心指点与帮助,在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,其中难免有不当和错误之处,诚恳欢迎使用本教材的师生和广大读者批评指正。

编 者

2006 年 5 月

第一版前言

本书是根据原中国石油天然气总公司人事劳资部于1998年8月在河北省承德市召开的石油中专第八次教材编审会的决定，按照专业指导委员会审定的《提高石油采收率技术》教学大纲进行编写的。

参加本书编写的人员及分工：大庆石油学校姜继水和大庆石油管理局采油二厂宋吉水共同编写第一章和第三章；长庆石油学校张波编写第二章；胜利石油学校何燕萍编写第四章；新疆石油学校张磊编写第五章；吉林石油学校邹艳霞编写第六章；辽河石油学校吴尚斌编写第七章。全书由姜继水和宋吉水担任主编，由大庆石油学校高级讲师闫崇仁主审。

在本书的编写过程中，得到了大庆石油学院提高石油采收率所和大庆石油管理局勘探开发研究院提高石油采收率室的精心指点与帮助，在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限，难免有不当和疏漏之处，恳请读者批评指正。

编 者

1999年7月

目 录

绪论	(1)
学习情境一 聚合物驱油技术	(6)
项目一 聚合物溶液的配制	(6)
项目二 聚合物溶液的注入	(33)
项目三 聚合物驱油效果分析	(52)
学习情境二 三元复合体系驱油技术	(69)
项目一 三元复合体系的配注	(69)
项目二 三元复合体系驱油效果分析	(77)
学习情境三 热力采油技术	(93)
项目一 蒸汽注入站运行与管理	(93)
项目二 蒸汽注入井生产管理	(107)
项目三 注蒸汽采油井管理	(115)
项目四 注蒸汽效果分析	(140)
项目五 火烧油层技术	(157)
学习情境四 气体混相驱油技术	(164)
项目一 烃类气体混相驱油技术	(164)
项目二 二氧化碳混相驱油技术	(171)
学习情境五 微生物采油技术	(193)
项目一 微生物吞吐采油技术	(193)
项目二 微生物清蜡和防蜡技术	(201)
项目三 微生物驱油技术	(203)
学习情境六 物理采油技术	(222)
项目一 利用声波处理油层技术	(222)
项目二 利用热场处理油层技术	(230)
参考文献	(237)

绪 论

石油作为一种非再生的化石能源，其采收率不仅是石油工业界，而且是整个工业界最为关心的问题。由于石油是一种流体矿藏，具有独特的开采方式，所以在各种矿物中石油的采收率是比较低的。在世界范围内，石油的采收率约为 30% ~ 60%。因此，世界各国的油藏工程师们一直致力于最大限度地提高油藏采收率的研究。

一、石油采收率的概念

石油采收率可定义为油藏累计产油量与油藏原始地质储量比值的百分数，其定义式为：

$$E_R = \frac{N_{\text{累计采出}}}{N_{\text{原始}}} \times 100\%$$

该比值的大小取决于注入流体在油藏中的波及系数和驱油效率。一般使用的计算公式如下：

$$E_R = E_v \cdot E_D$$

式中 E_R ——石油采收率，%；

$N_{\text{累计采出}}$ ——累计产油量，t；

$N_{\text{原始}}$ ——原始地质储量，t；

E_v ——波及系数，又称扫油效率或宏观驱替效率，它是指注入流体波及区域内的体积与油藏总体积的比值。

E_D ——驱油效率，又称微观驱替效率，它是指注入流体波及区域内，采出的油量与波及区内石油储量的比值。

由上式可知，影响采收率大小的主要因素是波及系数和驱油效率。因此，所有提高采收率的方法都是致力于提高波及系数或（和）驱油效率。

影响驱油剂宏观波及系数的主要因素有油层渗透率的差异、油层内驱替流体与被驱替流体之间流度的差异，以及驱替剂的推进速度等。此外，油藏构造、裂缝和断层分布发育状况等油藏性质以及采取的油藏工程方法（井网、注采关系等）也都会影响波及系数。

影响驱油剂驱油效率的主要因素有原始含油分布状态、岩石孔隙结构、岩石表面性质、驱油剂性质等。驱油剂在波及储油孔隙之前，原油成单相流动。在驱油剂进入储油孔隙之后，随着含油饱和度的降低，驱替和被驱替流体呈两相流动，两相流状态除受到水动力学的力之外，在很大程度上受制于孔隙的大小和分布形态，以及毛管力和岩石表面的润湿性。因此，降低毛管力，使岩石表面由亲油转变为亲水是提高驱油效率最关键的措施之一。

二、提高石油采收率方法概述

通常把利用油藏天然能量开采石油称为一次采油，也称为能量衰竭法采油，一般来说，一次采油的采收率低于 15%。通过注水或非混相注气提高油层压力并驱替油层中的原油称为二次采油，二次采油时原油的物理、化学性质不发生变化，采收率通常为 30% ~ 40%，个别油田可达 80%。由于水的来源广，价格便宜，采收率又高，所以，美国自 20 世纪 40 年代初便发展了注水采油技术。50 年代至 60 年代，注水开发的工程项目数达到了顶峰。但到 60 年代后期，注水开发项目数一直在下降，其原因是一些注水油田已进入开发后期，这

时产水率持续上升，产油量却不断下降，当产水率增高到 95% ~ 98% 时，再继续注水是不经济的，这时被迫停止注水。人工注水虽然可以提高采收率，但水驱后尚有约一半以上的原油滞留在油层中，如何采出这些二次残余油（也称为水驱残余油）是油藏工程师们面临的问题。从 20 世纪 20 年代起，技术的发展使开采二次残余油成为可能。这一开采技术主要是通过向油层注入化学物质、注蒸汽、注气（混相）或微生物，从而改变油层中的原油性质并提高油层压力，这种驱油方式称为三次采油（Tertiary Oil Recovery）。

由于我国油田采用的开发技术除玉门油田外，均没有明确的一次采油和二次采油之分。例如，我国的大庆油田是油藏一开发就进行注水，以保持地层压力，提高水驱采收率；克拉玛依油田的稠油油藏是以蒸汽吞吐和蒸汽驱方法开始开采的。因此，对我国油田使用提高石油采收率或强化采油（Enhanced Oil Recovery, EOR）这一名词更为恰当。EOR 这一专有名词包括注水和其他提高采收率的方法。关于水驱，其他教材有较为详尽的介绍，本书只介绍水驱以外的其他提高石油采收率的方法。

目前世界上已形成的提高石油采收率方法，除水驱外，主要包括四大技术系列，即化学驱、热力法、气驱和微生物采油。

化学驱包括聚合物驱、表面活性剂驱、碱水驱及其复配的二元、三元复合驱、泡沫复合驱等。

热力法包括热水驱、蒸汽法、火烧油层、电加热等。其中蒸汽法又包括蒸汽吞吐、蒸汽驱、蒸汽辅助重力驱、蒸汽与天然气驱；火烧油层法又分为正向燃烧法、逆向燃烧法、湿式燃烧法等。

气驱包括混相、部分混相或非混相的富气驱、干气驱、CO₂ 驱、氮气驱和烟道气驱等，注入方式分为段塞注入、连续注入或水汽交替注入。

微生物采油是指利用微生物及其代谢产物来增加石油产量的方法（MEOR）。该技术是将经过选择的微生物注入油层，它们在油层内生长、繁殖、新陈代谢，微生物本身及其代谢产物的作用可以降低油—水—岩石体系的界面张力、改善油层流体的流度比或导致选择性封堵孔隙空间、提高流体驱替效率，有助于进一步增加二次采油后枯竭的油井的产油量。

上述的提高采收率技术，部分已进行工业化推广应用，部分开展了先导性矿场试验，部分尚处于理论研究之中。世界范围内已进行工业化推广或曾进行矿场试验的提高采收率技术包括蒸汽法、火烧油层法、CO₂ 驱、烃类气驱，以及聚合物或活性剂等化学驱。诸多 EOR 技术中，蒸汽法仍是最主要的方法，其次为 CO₂ 混相驱，烃类气体混相或非混相驱与氮气驱也起着相当重要的作用。

三、国内外提高采收率技术的应用状况

据 2010 年《世界油气杂志》统计，气驱提高采收率的项目（165 项）约占 52%；热采（139 项）约占 44%；化学驱（7 项）约占 2%。而 EOR 产量百分比分别为：热采占 45.5%，烃类混相驱占 40.5%，二氧化碳驱占 14.2%，化学驱占 2.2%。

（一）国外提高采收率技术的应用概况

1. 美国提高采收率研究与应用概况

2010 年，美国热采产油量占 EOR 产量的 44%，注气（轻烃、二氧化碳和氮气）约占 56%，化学驱项目数量已降至 0 项。近年来，由于美国发现了十分丰富的天然 CO₂ 气源，

带动了 CO₂ 混相驱项目的实施, 使此技术成本大幅度下降。同时在高油价下修好了三条输送 CO₂ 的管道, 可以把 CO₂ 从产地直接输送到使用地得克萨斯州, 使一些较小的项目也有利可图, 从而促进了 CO₂ 驱的快速发展。

在美国, 任何提高采收率技术的发展水平, 其方法能否使用, 或在什么时候推广使用是由油价、政治经济形势以及美国国家政策和税率决定的。提高采收率方法最早可以追溯到 20 世纪初期, 但发展并不快, 从研究到试验, 真正受到重视是从 1973 年阿拉伯石油禁运开始的, 把提高采收率作为美国能源政策的一部分, 并对提高采收率项目给予特殊的优惠政策, 使提高采收率的研究和应用得到迅速发展。

现在, 美国热采尽管实施的项目数有所减少, 但自 1986 年以来产量一直保持稳定, 在 EOR 产量中始终保持在 40% 以上。近年来, 各种提高采收率方法的实施项目都在减少, 只有二氧化碳混相驱项目一直在稳定增加。

化学驱一直呈下降趋势, 特别是表面活性剂驱几乎停止, 但应用聚合物调剖仍有很大的发展。美国已把调剖和聚合物驱、钻加密井、水平井等列为改进的二次采油, 也属于提高采收率的范围。特别是深度调剖, 它已不再是单纯的增产措施, 在一定条件下它可以代替聚合物驱, 或与聚合物驱结合, 使聚合物驱获得更大的成效。它与聚合物驱相比, 具有所用化学剂量较少、投资回收快等特点。其中新的深度调剖体系 (胶体分散凝胶 CDG) 近几年受到普遍重视。这种凝胶是一种半流体状态, 在地层中可以缓慢流动, 由于聚合物浓度很低, 不仅使成本大大降低, 同时由于其粘度很小, 不会使注入压力明显提高, 因而进入低渗透层的量相对减少, 并且由于是缓慢交联, 可以更深入地层内部, 大大提高了调剖效果。美国已进行 29 个矿场试验, 其中 19 个获得成功。怀俄明州的北 Rainbow Ranch 开发单元进行了一个成功的胶体分散凝胶注入项目, 总共注入 0.12% PV, 提高采收率至少为 8%, 其增油费用为 2 美元/bbl。

尽管三次采油在美国发展比较缓慢, 但美国能源部对提高采收率的基础研究仍十分重视, 研究项目的 80% 资金由能源部提供。

2. 加拿大提高采收率研究与应用概况

加拿大以重油开采为主, 主要是热采和露天开采沥青砂。对于轻油主要采用注烃混相驱或非混相驱。化学驱主要进行室内研究, 几乎没有什么矿场试验。这主要是因为加拿大有丰富的天然气资源, 其原油性质又适合混相驱之故。仅阿尔伯达省就拥有 1750 亿 bbl (1bbl = 0.159m³) 的沥青储量, 这也促进了加拿大热采技术的高速发展, 使其拥有国际一流的稠油开采技术, 如蒸汽辅助重力泄油 (SAGD)、溶剂泄油 (VAPEX)、火烧油层 (In-situ Combustion) 等。应用数量最多的是蒸汽辅助重力泄油 (SAGD) 项目, 大都应用于油砂开采中。此外 Encana 公司的 Weyburn CO₂ 混相驱是加拿大主要的 CO₂ 驱项目, 该项目被认为是世界上最大的减少二氧化碳排放的联合实施项目。Talisman 能源公司拥有在 Turner Valley 油田的氮气 EOR 项目, 计划投资 1.5 亿美元进行 3 年的先导性试验, 以证明用注氮气开采 15% 地质储量的可能性。

(二) 我国提高采收率技术的应用情况

在我国, 目前常规稀油的平均采收率约为 33.6%, 即约有 66.4% 的储量 (77.3×10^8 t) 靠注水方法采不出来, 只能靠其他新技术开采。我国开展 EOR 研究最早的是克拉玛依油田, 1958 年开始研究火烧油层。20 世纪 60 年代初, 大庆油田一开始投入开发, 就开始了 EOR 研究工作, 先后研究过水驱、聚合物驱、CO₂ 混相驱、注胶束溶液驱和微生物驱。70 年代

后期,我国对 EOR 的研究逐渐重视起来,玉门油田开展了活性水驱油和泡沫驱油。80 年代,大港油田开展了碱水驱油研究工作。从“七五”到“十一五”,国家已连续把提高采收率技术列为国家重点科技攻关项目,先后开展了热采、聚合物驱、微乳液—聚合物驱、碱—聚合物驱以及碱—表面活性剂—聚合物驱等技术研究,使我国化学驱提高采收率技术进入了世界领先水平。大庆、胜利、大港等油田对 EOR 技术开展了大量的研究,相继研究出了三元复合驱及泡沫复合驱提高石油采收率等新技术。

其中,聚合物驱技术是目前三次采油技术中最成熟的。自 1996 年工业化推广以来,对聚合物驱过程的认识不断加深,聚合物驱技术得到不断完善和改进。大庆油田在实践中形成了进一步改善聚合物驱效果的三项技术和一个做法,即高分子前置段塞技术、综合调整技术、分层注聚合物技术和加大聚合物用量做法。聚合物驱物料供给充足,产品质量和性能不断提高,特别是近年新型抗盐聚合物的研制成功和污水配制聚合物溶液技术的进步,进一步降低了聚合物驱成本,扩大了聚合物驱的应用范围。聚合物驱注入设备已实现国产化,采出液处理基本得到了解决,具备了进一步扩大应用规模的潜力,并成为中国石油天然气集团公司东部老油田稳产和可持续发展的重要接替技术。

三元复合驱技术,已经经历了从机理研究—表面活性剂主剂国产化—先导性试验—扩大先导性试验—工业性试验五个关键步骤的全过程研究,初步具备了工业化应用的条件。

在稠油热采提高采收率技术方面,先后开展了中深层稠油蒸汽驱工业性试验、超稠油蒸汽辅助重力泄油试验、改善浅层蒸汽驱开发效果研究和水驱普通稠油油藏转注蒸汽开发试验等研究和现场试验,目前已经形成了蒸汽吞吐、浅层蒸汽驱和超稠油蒸汽吞吐开采三项配套技术。

气体混相驱研究相对较晚,与国外相比还有很大差距。尽管在 20 世纪 80 年代开展了 CO_2 和天然气驱矿场试验,取得了一定效果,但因气源问题,一直未得到发展。随着西部油田的开发,安塞世界级气田的发现,长庆注气混相驱和非混相驱被列入国家重点攻关项目,吐哈油区的葡北油田注烃混相驱矿场试验得以启动,大大推动了我国混相驱提高采收率技术的快速发展。同时,吉林的扶余油田、苏北黄桥气田、江苏秦潼凹陷,以及广东三水盆地等一批 CO_2 气藏的发现,推动了 CO_2 混相或非混相驱先导试验研究,同时“温室气体的地下埋存及在提高油气采收率中的资源化利用”已被列为国家重点攻关课题。

在微生物采油技术方面,早在 1966 年新疆石油管理局就开始利用微生物进行原油脱蜡技术的研究,被认为是微生物技术研究的开端。这项技术曾被列为国家科技攻关项目,主要开展了以下工作:微生物地下发酵提高采收率研究,生物表面活性剂的研究,生物聚合物提高采收率的研究;注水油层微生物活动规律及其控制的研究。20 世纪 80 年代,大庆油田率先进行了两口单井微生物吞吐矿场实验,结果含水量下降,原油产量增加。“九五”期间,大港油田率先进行了微生物菌液驱矿场先导试验。辽河油田、胜利油田、新疆油田等也在开展室内研究与应用。

应当指出的是,EOR 技术中,除注水外,其他技术都存在投资大、风险大的特点。因此,应严格按照“实验和机理研究→先导性试验→扩大化工业性试验→工业化推广”的程序进行实施,每一阶段都应该严格地按照技术要求进行施工,而且为下一阶段做好准备。

EOR 技术是一门多学科的综合性强应用的技术,它涉及的学科或知识面很广,根据不同的排驱类型,要求不同学科之间的合作,但无论哪一种排驱类型,都涉及油藏描述、油层物理、渗流力学、数值模拟等学科知识。对于化学驱,则还需要有高分子化学、高分子物

理、表面化学等知识；对于气体混相驱则需要物理化学、有机化学等知识；对于热驱则需要传热学、工程热力学等知识。因此，应该按照系统工程的原理组织化学、开发地质、油藏工程、采油工程、地面集输工程等各方面的专家联合攻关。

总之，通过技术进步来提高油田开发水平、降低成本、提高经济效益，已成为 21 世纪初石油工业发展的重大任务。我们相信，EOR 技术的发展，定会为我国石油工业实现中国石油天然气集团公司的“东部硬稳定，西部快发展”的战略部署提供可靠的技术保障。

学习情境一 聚合物驱油技术

聚合物驱油就是把聚合物添加到注入水中，提高注入水的粘度，降低驱替介质流度的一种改善水驱方法。其中，粘度是流体分子间摩擦力的量度，摩擦力越大，粘度越大，流动性越差；驱替介质，这里是指用于驱油的流体；流度，是指流体的流动能力。流度与粘度成反比，与岩石的渗透率成正比，计算公式如下：

$$\lambda = \frac{K}{\mu} \quad (1-1)$$

式中 λ ——流度， $\mu\text{m}^2/\text{mPa} \cdot \text{s}$ ；

μ ——粘度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ；

K ——渗透率， μm^2 。

应用普通水进行驱油时，由于水的流度比油大很多，所以波及系数不是很高，而把少量聚合物加入到水中就可以使水的粘度大幅度提高，从而提高波及系数。

由于聚合物是一种高分子物质，在水中的溶解速度很慢，所以油田矿场上在应用聚合物驱油技术时，是在聚合物配制站将聚合物粉末配制成聚合物母液，再输送到聚合物注入站同高压清水混合成目的液，最后经聚合物注入井注入到油层中的。

本学习情境是根据聚合物驱油技术的现场实施过程进行设计的，并按这一过程设计了三个学习项目。

项目一 聚合物溶液的配制

聚合物属高分子物质，它在水中的溶解同低分子物质比较起来，有着明显的不同，完全溶解大约需要 2h 左右的时间，为了能够达到注入的要求，聚合物驱油技术的工业化应用要求有聚合物配制站，负责按要求配制合格的聚合物母液并按需要输送到注入站。

任务一 聚合物性能指标的测定



知识目标

- (1) 掌握聚丙烯酰胺的性能指标。
- (2) 掌握影响聚丙烯酰胺溶液粘度的因素。
- (3) 掌握聚合物提高采收率的机理。



技能目标

会测定聚丙烯酰胺溶液的粘度和浓度。

工作过程知识

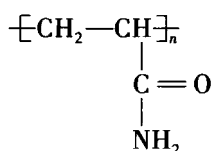
聚合物性能的好坏，直接影响到聚合物驱项目的成败，因此聚合物配制站对聚合物干粉的性能指标有明确的管理规定。如干粉送到后，由配制站一名队干部和资料员共同对干粉的规格、包装、铅封、生产批号、产品化验单进行检查，全部合格后，方可接收。各聚合物配制站对当日送达的每车干粉至少抽查一个样品现场化验粘度，与标准相差较大时，要查找原因，并增加取样个数，如果仍低于降级指标的，应及时向主管部门汇报，并填写“聚合物干粉取样化验记录”。各厂中心化验室要坚持干粉每 50t 抽查一个样品进行详细的质量检验，并填写“聚合物检测原始记录”。

一、驱油用聚合物的分类

聚合物是由被称为单体的低分子物质聚合而成的高分子化合物。人们通常把相对分子质量大于 1000 的物质称为高分子化合物，而矿场上驱油用聚合物的相对分子质量都在数百万，甚至数千万以上，属于超高分子化合物。

驱油用聚合物大致可分为两大类，即天然聚合物和人工合成聚合物。天然聚合物从自然界（植物及其种子）中得到，如改进的纤维素类，有时也从细菌发酵中得到，如生物聚合物黄胞胶（xanthangum）。人工合成聚合物是在化工厂生产出来的，如目前大量使用的聚丙烯酰胺（PAM）和部分水解聚丙烯酰胺（HPAM）等。虽然黄胞胶具有较好的抗剪切和耐盐性能，但由于其价格要比聚丙烯酰胺高出数倍，故现场驱油一般用的都是聚丙烯酰胺。

聚丙烯酰胺分子是由很长的丙烯酰胺单体分子链组成，其基本结构单元（又称链节）为：



其中， n 为聚合度（重复链节数）。

二、聚合物的性能指标

聚丙烯酰胺在造纸、水处理、选矿、采油等许多工业领域有着广泛的应用。根据其应用性质的不同，对产品的性能要求也不完全一样。在采油应用方面，主要要求聚合物具有较好的增粘性和较大的相对分子质量，从而达到控制流度、增大波及体积和提高采收率的目的。为了达到这一目的，将根据不同的油层条件来选择相应的聚合物。目前，大庆油田对聚合物性能的要求有 11 项，见表 1-1。

表 1-1 大庆油田聚合物产品指标汇总表

性 能	指 标		
相对分子质量， 10^6	9.5 ~ 11	11 ~ 14	17 ~ 20.5
粘度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$	31 ~ 38	≥ 40	≥ 50
特性粘数	15 ~ 16.5	16.5 ~ 19.5	22.5 ~ 25.5
固相含量， $\text{g}/100\text{g}$	$\geq 88\%$	$\geq 88\%$	$\geq 88\%$
水解度，%	23 ~ 27	23 ~ 27	23 ~ 27
过滤性能	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.5

续表

性 能		指 标		
筛网系数		15 ~ 20	≥ 16	≥ 28
水不溶物, g/100g		≤ 0. 2%	≤ 0. 2%	≤ 0. 2%
溶解时间, h		≤ 2	≤ 2	≤ 2
残余单体		≤ 0. 05%	≤ 0. 05%	≤ 0. 1%
粒度, g/100g	≥ 1mm	≤ 3%	—	≤ 3%
	≤ 0. 2mm	≤ 3%	—	≤ 3%

（一）对聚合物相对分子质量的要求

聚合物的相对分子质量越大，增粘效果越好。与此同时，其分子的回旋半径也会越大，通过油层孔隙的难度也会增加。所以针对不同渗透率的油层，会选择不同相对分子质量的聚合物。

（二）对聚合物粘度的要求

粘度是控制流度的关键参数，因此对聚合物粘度的要求较高。表 1 - 1 中所列的粘度指标是指温度在 45℃、大庆水质条件下，0. 1% 浓度的聚合物溶液，用布氏粘度计在 6r/min 条件下测定的。

（三）对聚合物特性粘数的要求

惯用粘度法测定驱油用聚合物的相对分子质量，称为粘均相对分子质量。首先测定某种聚合物不同浓度下的粘度（增比粘度）求出特性粘数，再算出其相对分子质量。

（四）对固相含量的要求

聚合物都含有一定量的水分，即表面吸附水和内部水，产品固相含量的准确测量既关系到商业利润，又关系到使用量的准确。对驱油用聚合物的固相含量要求大于 88%。

（五）对聚合物的过滤因子及水不溶物的要求

制定过滤因子、水不溶物两项指标的目的是防止聚合物堵塞油层。过滤因子用过滤速度的比值表示，即聚合物溶液经 3. 0μm 微孔滤膜过滤，初期的过滤速度与后期过滤速度的比值。

（六）对残余单体的要求

由于聚合物产品在合成过程中还残存一定量的未反应单体，这些单体是有毒物质，将造成环境污染，影响人的身体健康，因此出于环保原因，提出了这项要求。

（七）对聚合物粒度大小的要求

聚合物粒度大小与溶解速度密切相关，粒度过大将增加溶解时间。粒度过细，由于比表面积增大，将给分散带来不利影响，在溶解时，小的颗粒容易粘结在一起形成“鱼眼”，增加溶解时间。同时，粒度过细，储存时容易结块。因此，对驱油用聚合物的粒度提出了要求，粒度大于 1mm 部分和小于 0. 2mm 部分均不能超过 3%。

综上所述可以看出，聚合物的很多性能指标都需将其制备成溶液之后测定，用它进行驱油时也是将聚合物溶液注入油层。因此，必须掌握聚合物溶液的特性。

三、聚丙烯酰胺的溶解性

观察聚丙烯酰胺在水和煤油中的溶解性（技能训练一），发现聚丙烯酰胺在水溶液中的溶解性较好，会使水的粘度增加，只是溶解速度很慢；在煤油中是不溶的，因此煤油的粘度没什么变化。这是由于高分子的聚丙烯酰胺的溶解也遵守“极性相近相溶”原则，带有强极性基团（ $-\text{CONH}_2$ ）的聚丙烯酰胺能很好地溶于水和盐水溶液，而不能溶于有机溶剂。因此，水或盐水对于含强极性基团的聚合物为良溶剂，而有机溶剂则为不良溶剂。在良溶剂内，聚合物分子呈松散状，得到了最大限度的伸展，聚合物分子之间以及聚合物与溶剂分子之间内摩擦力增大，溶液粘度增大。在不良溶剂内，聚合物分子呈卷曲状，聚合物分子之间，以及聚合物与溶剂分子之间的接触面小，溶液的粘度也基本没有变化。聚丙烯酰胺在水溶液中的溶解速度慢是因为聚丙烯酰胺高分子与溶剂（水）分子的尺寸相差悬殊，二者的分子运动速度差别也很大，溶剂分子能比较快地渗入聚合物内，而高分子向溶剂中的扩散却非常慢。因此，聚合物的溶解要经过两个阶段，即先是溶剂分子渗入聚合物内部，使聚合物体积膨胀，称为溶胀，然后才是高分子均匀地分散在溶剂中，形成完全溶解的分子分散体系。一般情况下，聚丙烯酰胺的完全溶解需要 2h 左右的时间。所以，油田矿场应用时要采用专门的聚合物配制设备。

四、影响聚合物水溶液粘度的因素

因为流体的粘度是流体分子间摩擦力的量度，所以凡是影响聚合物溶液分子间摩擦力的因素都影响其粘度。而聚合物溶液的粘度是改善流度比的关键因素。

在其他条件相同的情况下，聚合物的相对分子质量、浓度、水解度、水的矿化度及溶液温度对溶液的粘度都有影响。具体分析如下所述。

（一）聚合物溶液的浓度、相对分子质量对粘度的影响

表 1-2 是几种不同相对分子质量聚合物溶液的浓度与粘度的对应关系。

表 1-2 几种不同相对分子质量聚合物溶液的浓度和粘度的对应关系

种类	浓度, mg/L				
	250	500	1000	1500	2000
	粘度, mPa·s				
广州产 (500 万)	1.4	2.5	6.2	11.6	19.2
美国产 (1000 万)	3.2	8.8	29.8	64.2	119.0
法国产 SNF (1200 万)	3.7	9.8	33.7	68.3	129.0
英国产 1275A (1800 万)	4.7	13.0	41.7	91.4	151.0

注：1. 括号中的数字是聚合物的相对分子质量。

2. 配制水的矿化度为 1320mg/L。

图 1-1 是利用这种关系所绘制的曲线。从图中可以看出，在其他条件相同的情况下，聚合物溶液的粘度随浓度的增加而增加，随相对分子质量的增加而增加。

所以，在油田矿场上，常通过加大聚合物的相对分子质量或注入浓度的方法，来改善聚合物驱油的效果。

（二）矿化度对粘度的影响

表 1-3 是几种不同相对分子质量聚合物溶液的粘度与矿化度的对应关系。

表 1-3 不同相对分子质量聚合物溶液的粘度与矿化度对应关系

种 类	矿化度, mg/L								
	7000	6000	5000	4000	3000	2000	1500	1000	500
	粘度, mPa·s								
广州产 (500 万)	3.2	3.4	3.7	4.1	4.5	6.6	8.3	9.7	13.2
美国产 (1000 万)	10.3	11.2	13.1	15.2	18.3	25.6	32.1	42.5	50.7
法国产 SNF (1200 万)	13.9	15.6	17.2	19.8	24.6	32.6	39.7	51.7	78.8
英国产 1275A (1800 万)	19.6	21.3	24.3	28.1	30.6	42.1	44.1	63.3	176.0

注：聚合物浓度为 1000mg/L，温度为 45℃。

图 1-2 是利用这种关系所绘制的曲线。从图中可以看出，聚合物溶液矿化度或含盐量对溶液粘度存在着较大的影响。一般情况下，矿化度越高，溶液粘度越低，并且在同一矿化度变化条件下，较低相对分子质量聚合物的溶液粘度损失小于较高相对分子质量的溶液粘度损失，这说明较低相对分子质量的聚合物具有较为优良的耐盐性。

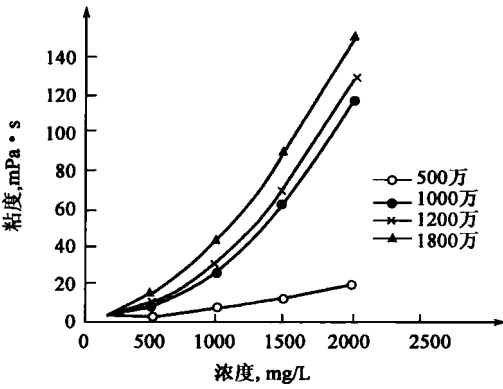


图 1-1 不同相对分子质量聚合物溶液粘度—浓度关系曲线

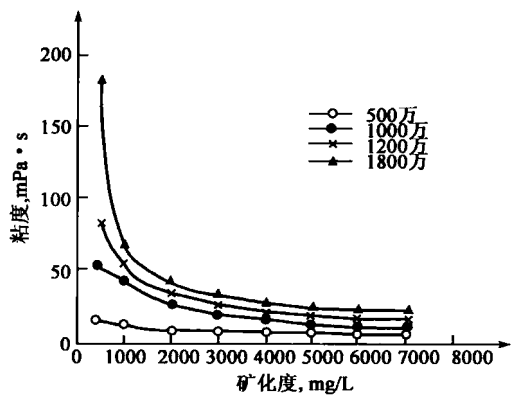
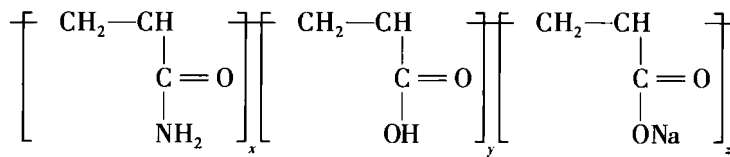


图 1-2 不同相对分子质量聚合物溶液的粘度—矿化度关系曲线

(三) 水解度对粘度的影响

聚丙烯酰胺在酸或碱的作用下，发生水解反应，水解成为部分水解聚丙烯酰胺。部分水解聚丙烯酰胺的结构为：



—

CH₂—CH

—

C=O

NH₂

—

CH₂—CH

—

C=O

OH

—

CH₂—CH

—

C=O

ONa

—

CH₂—CH

—

C=O

NH₂

—

CH₂—CH

—

C=O

OH

—

CH₂—CH

—

C=O

ONa

水解度的计算公式为：

$$\text{水解度} = \frac{71}{40} \times \frac{\text{加入碱重量}}{\text{纯聚合物重量}} \times 100\%$$

(1-2)

式中，71 和 40 分别为聚丙烯酰胺基本链节和 NaOH 的相对分子质量。

用蒸馏水配制而成的聚丙烯酰胺溶液的粘度与水解度关系如图 1-3 所示。

从图 1-3 中可以看出，随着水解度的增加，聚合物溶液粘度增大。这是因为—COO⁻基团随着水解度的增加而增加，负电基团间的斥力促使分子更伸展，致使粘度增大。驱油中用 HPAM 的水解度应为 0.1% ~ 70%，最好在 5% ~ 30% 之间。因为水解度越大，聚合物溶液

中的 COONa^- 越多, 虽然有利于增大粘度和减少吸附, 但不利于聚合物的化学稳定性。相反, 水解度越小, 虽有利于聚合物的化学稳定性, 但 CONH_2 易吸附在岩石表面, 会增加 HPAM 的吸附量。

(四) 温度对粘度的影响

聚合物溶液的粘度随着温度的升高而降低, 当温度高于 70°C 时, 聚合物会发生热氧降解, 导致聚合物溶液的粘度大幅度下降, 有时甚至完全失去其效能。因此, 必须严格控制配制聚合物溶液的水温, 并避免在高温油藏应用聚合物驱油技术。

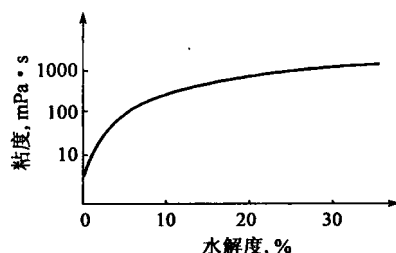


图 1-3 粘度与水解度的关系

技能训练

一、聚丙烯酰胺溶解性的认识

用品: 聚丙烯酰胺粉末 (相对分子质量为 500 万), 250mL 烧杯 2 只, 玻璃棒 2 根, 100mL 清水, 100mL 煤油。

目的: 观察聚丙烯酰胺在水及油中的溶解性。

操作步骤:

(1) 将 100mg 的聚丙烯酰胺粉末放入盛有 100mL 清水的烧杯 1 中, 并用玻璃棒搅拌, 观察其溶解情况。

(2) 将 100mg 的聚丙烯酰胺粉末放入盛有 100mL 煤油的烧杯 2 中, 并用玻璃棒搅拌, 观察其溶解情况。

二、聚丙烯酰胺溶液粘度的测定

仪器用品: 布氏粘度计 DV-II+ (或 DV-II 系列) 1 支, UL 转子、LV1 号转子 1 套, 恒温水浴 (控温精度 0.1°C) 1 个, 20mL、50mL 量筒若干, 烧杯、吸液器若干, 电子天平 (感量分别为 0.01g、0.0001g), 电动叶片搅拌器及磁力搅拌器等。

目的: 测定聚丙烯酰胺溶液的粘度。

操作步骤:

(1) 试样溶液制备: 称取 20~30g 聚合物溶液, 加入 4 倍清水, 放在磁力搅拌器上搅拌 15~20min, 搅拌均匀。

(2) 对布氏粘度计进行调平, 接好仪器电源。

(3) 打开恒温水浴开关, 设置温度为 45°C 。

(4) 将 UL 转子挂在布氏粘度计上。

(5) 打开布氏粘度计, 屏幕显示 “BROOKFIELD DVII + LV VISCOMETER”, 不需要按任何键。

(6) 当仪器显示 “REMOVE SPINDLE PRESS ANY KEY” 时, 取下转子, 按任意键, 仪器开始闪烁, 进行自动调零, 大约 10s 后, 仪器显示 “REPLACE SPINDLE PRESS ANY KEY” 时按任意键。

(7) 按 “SELECT SPINDLE” 键, 并按箭头选择转子代码 “00”, 再按 “SELECT SPINDLE” 键, 代码输入完毕 (若下次测定不更换转子, 此步骤可省略)。

(8) 挂上转子, 按箭头键和调转速键 (SET SPEED), 设置转速 6r/min, 按 “SELECT