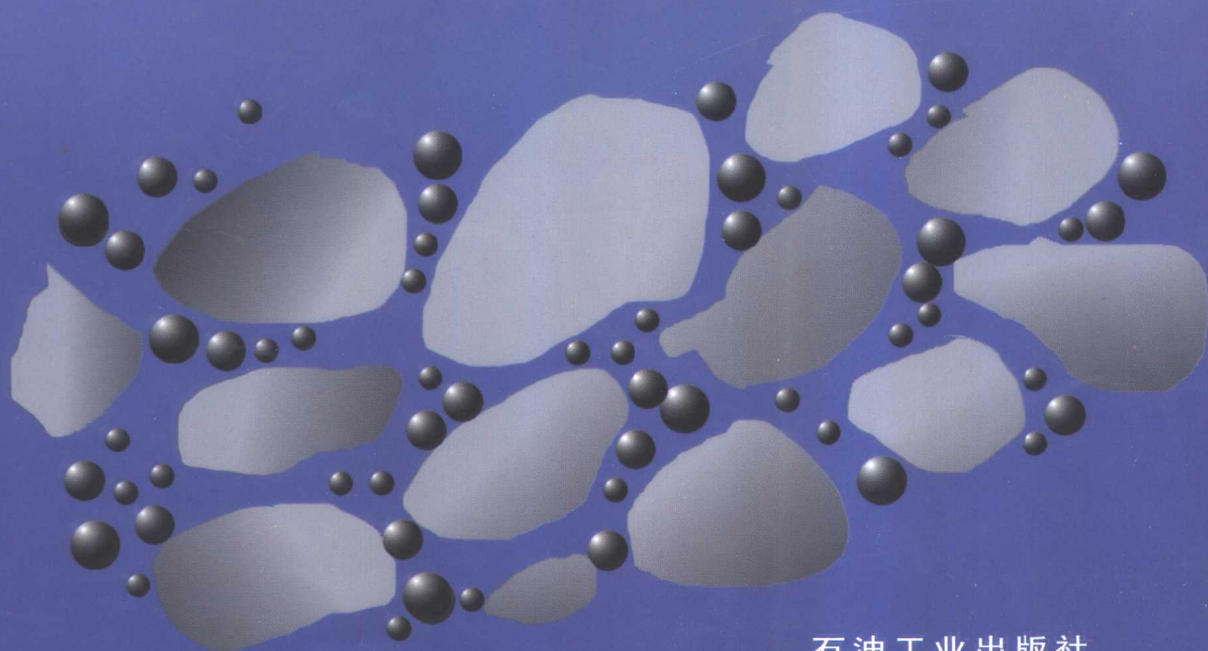


提高石油采收率技术

姜继水 宋吉水 主编



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

提高石油采收率技术

姜继水 宋吉水 主编

石油工业出版社

1999.8

内 容 提 要

本书系统地阐述了聚合物溶液驱油、表面活性剂溶液驱油、碱水驱油及复合体系驱油、气体混相驱油、热力采油、微生物采油及利用物理场等提高石油采收率的各项技术的驱油机理、驱油效果的影响因素、驱油工艺和各种提高采收率方法在国内外油田的开展状况和发展方向。

本书供中等专业学校石油开采、石油地质及油田化学专业教学使用，也可供矿场工程技术人员阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

提高石油采收率技术/姜继水, 宋吉水主编.

北京: 石油工业出版社, 1999.8

ISBN 7-5021-2742-9

I. 提…

II. ①姜…②宋…

III. 三次采油—新技术

IV. TE357

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 38289 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里一区一号楼)

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 6¼ 印张 160 千字 印 1—3000

1999 年 8 月北京第 1 版 1999 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2742-9/TE·2154 (课)

定价: 11.00 元

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)
第一章 聚合物溶液驱油	(4)
第一节 聚合物及其水溶液性质	(4)
一、聚合物	(4)
二、聚丙烯酰胺的溶解	(5)
三、聚合物溶液的粘度	(5)
四、聚合物溶液的流度性	(7)
第二节 聚合物溶液驱油基本原理	(8)
一、聚合物溶液驱油机理	(8)
二、聚合物在多孔介质中的滞留	(10)
第三节 聚合物溶液驱油的适用条件与注入方案	(11)
一、聚合物溶液驱油的适用条件	(11)
二、聚合物驱油注入方案设计	(12)
第四节 聚合物驱油地面工艺技术	(15)
一、聚合物驱油地面工程设计原则	(15)
二、聚合物驱油地面工艺流程	(15)
第五节 聚合物驱油注入和举升工艺	(16)
一、聚合物驱油注入井管柱	(17)
二、聚合物驱油举升工艺	(17)
第六节 聚合物驱油的动态分析	(18)
一、聚合物驱油阶段开采指标的统计方法	(18)
二、聚合物驱油最终开采指标的计算方法	(26)
第七节 聚合物驱油系统工程管理方法	(28)
第二章 表面活性剂溶液驱油	(32)
第一节 表面活性剂的类型及其溶液性质	(32)
一、表面活性剂的分类	(32)
二、表面活性剂溶液的基本性质	(33)
三、驱油用表面活性剂	(36)
第二节 活性剂水溶液驱油	(37)
一、活性水驱油	(38)
二、胶束溶液驱油	(39)
三、微乳液驱油	(40)
四、胶束—聚合物复合驱油法	(40)
五、表面活性剂溶液驱油的油层条件	(41)
第三节 泡沫驱油	(42)

一、泡沫的形成及其稳定因素	(42)
二、评价泡沫的重要指标	(43)
三、泡沫液的组成和配制	(44)
四、泡沫驱油机理	(44)
第三章 碱水驱油及复合体系驱油	(46)
第一节 碱水驱油机理	(46)
一、碱水驱油机理	(46)
二、影响碱水驱油的因素	(47)
三、碱水驱油的注入方式	(48)
四、碱—聚合物复合驱油法	(48)
第二节 三元复合体系驱油	(50)
一、ASP 三元复合驱油机理	(50)
二、ASP 三元复合驱油存在的主要问题及解决途径	(53)
第三节 泡沫复合驱油技术	(54)
一、泡沫性能的评价	(54)
二、起泡剂的综合发泡特性	(55)
三、影响泡沫复合驱油效果的因素	(55)
第四章 气体混相驱油	(57)
第一节 相图和混相原理	(57)
一、三组分相图	(57)
二、初接触混相	(59)
三、多级接触混相	(59)
第二节 烃类气体混相驱油	(60)
一、液化石油气驱油	(60)
二、富气混相驱油	(61)
三、高压干气混相驱油	(62)
第三节 非烃类气体混相驱油	(63)
一、CO ₂ 混相驱油	(63)
二、高压 N ₂ 驱油	(64)
第五章 热力采油	(66)
第一节 稠油特性及开采方法概述	(66)
一、稠油的特性及分类	(66)
二、提高稠油采收率方法	(67)
第二节 蒸汽驱油工艺	(69)
一、蒸汽驱油机理	(69)
二、蒸汽驱油的筛选标准	(70)
三、蒸汽驱油采收率计算	(71)
四、蒸汽驱油工艺设计问题	(71)
五、蒸汽驱油工艺经济可行性分析	(72)
第三节 蒸汽吞吐采油工艺	(73)

一、蒸汽吞吐方法	(73)
二、蒸汽吞吐采油机理	(73)
三、蒸汽吞吐采收率计算	(73)
四、蒸汽吞吐工艺设计问题	(74)
第四节 蒸汽驱过程中的热损失	(75)
一、地面热损失	(75)
二、井筒热损失	(77)
第五节 火烧油层	(78)
一、燃烧过程	(79)
二、燃烧方法	(79)
三、火烧油层对采收率的影响	(79)
四、火烧油层工艺适用的油藏条件	(80)
第六章 微生物采油技术	(81)
第一节 微生物基础知识	(81)
一、微生物	(81)
二、细胞的生长	(81)
三、油田中常用的微生物	(82)
第二节 微生物采油机理及工艺	(83)
一、微生物采油提高采收率的主要机理	(83)
二、影响微生物采油的因素	(83)
三、微生物采油工艺	(84)
第七章 物理采油在提高石油采收率中的应用前景	(86)
第一节 利用声场处理油层技术	(86)
一、水力振动采油技术	(86)
二、井下低频电脉冲采油技术	(86)
三、对声场处理油层增油机理的初步认识	(87)
第二节 利用电场采油技术	(87)
一、国外电场采油技术应用概况	(87)
二、电化学采油技术	(88)
参考文献	(90)

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的最终采收率的研究。

在油田开发史上，运用油藏天然能量开采石油叫一次采油。如依靠油中溶解的天然气膨胀而将油举升到地面，当溶解气耗尽时，油便失去流动能力。一次采油也被称为能量衰竭法采油，采收率一般只能达到 15% 左右。

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叫二次采油。二次采油时原油的物理、化学性质不发生变化。有些油田没有明确的一次采油和二次采油之分，此时的二次采油叫维持压力采油。如我国的大庆油田和前苏联有相当一部分油田在投入开发的同时进行人工注水。人工注水采油法远比能量衰竭法的采收率高，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 40 年代初便迅速地在油田发展起了注水采油技术。自 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，注水开发项目一直下降。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。我国的大庆油田从 60 年代初期就采用人工注水采油方法，在进入高含水期后，坚持“稳油控水”这一基本开发方针，开拓了一条改善高含水期油田开发整体经济效益的新路子，为“八五”期间原中国石油天然气总公司确定实施“稳定东部，发展西部”的战略方针做出了重大贡献。进入“九五”期间，我国东部老油田 1998 年底综合含水率已达到 85.56%，部分地区高达 90% 左右，已进入特高含水后期开采阶段。为了搞清剩余油的分布，将在油藏精细地质描述、开发地震技术（包括三维地震和横向预测技术及四维地震技术）、水淹层测井监测技术（包括裸眼井测井技术和套管内水淹层测井技术）和精细油藏数值模拟技术及石油勘探开发综合软件集成平台技术等方面进行研究，逐步形成配套技术。在搞清剩余油分布状况基础上，可通过钻高效调整井〔如采用侧钻水平井、多底井、分支井等复合井（见图 1）和直井不均匀加密布井〕和利用地层深部流体转向技术（即向地层注入能大幅度提高油层残余阻力系数或在地层深部堵塞高渗透层的物质，使后继的注入水在地层深部转向）来达到提高水驱波及体积的目的。

人工注水虽然可以提高采收率，但注水后尚有约一半以上的油滞留在油层中，如何采出这些二次残余油（也称水驱残余油）是油藏工程师们面临的问题。技术的发展使从本世纪 20 年代起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，这种驱油方式叫三次采油（tertiary oil recovery）。由于我国采用的油田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，故对我国油田使用提高石油采收率或强化采油（EOR—enhanced oil recovery）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。本书主要涉及到的是除注水以外的提高石油采收率技术。

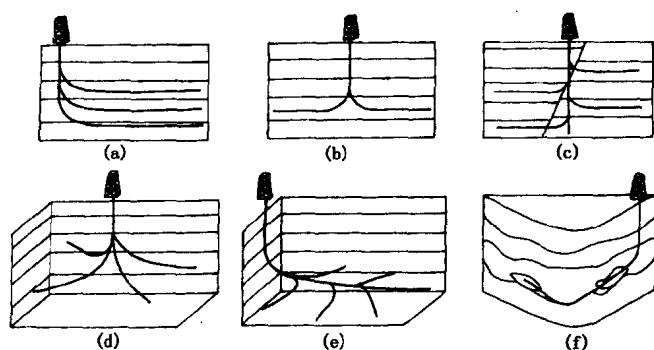


图1 不同类型的复合井

- (a) 叠式多分支井; (b) 双向侧井; (c) 由同一口垂直井再入侧井;
(d) 丛式多分支井; (e) 多泄油面或多侧井; (f) 三维井

EOR 技术以美国发展最快, 这与美国对石油的需求量大, 而近几十年新发现的油田越来越少是有关系的。为了鼓励发展 EOR 技术, 美国曾实施一些优惠政策。特别是油价暴涨的 70 年代, 美国能源部对国家研究机构和有关大学给予 EOR 研究的经济支持, 对石油公司则实行矿场 EOR 试验的成本分担。这些政策有力地促进了 EOR 技术的发展。从统计资料来看, 美国的 EOR (不含水驱) 采油量从 1980 年的 $1640 \times 10^4 \text{t}$ 到 1992 年最高峰

的 $3751 \times 10^4 \text{t}$, 增加了一倍多, 而实施的项目数几乎没有增加, 见表 1 和表 2。这与美国进

表 1 美国 EOR 采油量 (10^4t)

年 份	EOR			总 计
	热 法	注 气	注化学试剂	
1980	1260.0	368.9	11.8	1640.7
1982	1470.8	355.2	21.7	1847.7
1984	1797.7	409.3	66.0	2273.0
1986	2365.3	533.6	83.3	2982.2
1988	2292.7	646.0	110.9	3049.6
1990	2240.0	940.0	58.5	3238.5
1992	2270.0	1470.0	11.0	3751.0
1994	2064.0	1423.0	9.3	3496.3
1996	2091.0	1476.0	0.67	3567.7

表 2 美国三次采油试验项目数

年 份	热采方法	注 气	注化学试剂	总 计
1971	91	22	19	132
1974	83	18	18	119
1976	106	24	28	158
1978	115	29	46	190
1980	150	34	42	226
1982	139	50	85	274
1984	151	84	138	373
1986	201	104	206	511
1988	152	90	124	366
1990	154	91	50	295
1992	133	89	26	248
1994	116	30	79	225
1996	115	12	84	211

入 80 年代的政策有关。其中注气，包括注天然气、 CO_2 （混相和非混相）、注其他气体等，采油量增加最多，1980 年注气采油量为 $369 \times 10^4 \text{t}$ ，1996 年达到 $1476 \times 10^4 \text{t}$ 。热法采油量，包括注蒸汽和层内燃烧，1980 年为 $1260 \times 10^4 \text{t}$ ，1996 年为 $2091 \times 10^4 \text{t}$ ，仅增加不到 $1000 \times 10^4 \text{t}$ 。注化学试剂方法，从 1988 年到 1996 年采油量没有增加，反而有所下降。可以看出，从 1986 年后 EOR 项目总数持续下降，而 EOR 产量在 1992 年达到高峰。

前苏联的多数油田在 50 年代至 60 年代期间仍处于注水有效期，因此在 80 年代以前，其三次采油的方法研究进展较慢。60 年代，EOR 的试验工作才开始开展，70 年代有了较大发展。进入 80 年代，前苏联对 EOR 的研究工作极为重视。进入 90 年代的 1991 年，前苏联地区应用各种 EOR 方法提高石油采油率，原油产量为 $1.75 \times 10^4 \text{bbl/d}$ ，其中，注化学试剂法占总产量的 55%，热采方法占总产量的 37%，其余为注气方法开采。另外，还应用了聚合物、复合驱油技术，微生物和物理方法采油，如地震振荡技术、微核技术、不同物理场方法等。

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。60 年代初，大庆油田一投入开发，就开始了 EOR 研究工作，先后研究过 CO_2 水驱、聚合物溶液驱、 CO_2 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。90 年代，大庆、胜利、大港等油田对聚合物驱油都开展了研究，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。其中聚合物驱已走向工业化推广阶段，三元复合驱也走向扩大化工业试验阶段，泡沫复合驱尚处于室内实验研究阶段。

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—扩大工业性试验—工业推广”的程序进行实施，每一阶段严格按技术要求进行施工，而且为下阶段做好准备。

EOR 技术是一门多学科的综合性很强的应用技术，它涉及的学科多，知识面广，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。

本教材的目的在于给予石油开采、石油地质及油田化学等专业的学生以基本的 EOR 概念，为今后从事 EOR 矿场应用或研究打下基础。

总之，在世纪之交面临国际油价低迷的严峻形势，通过技术进步以提高油田开发水平、降低成本、提高经济效益将是 21 世纪初叶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走向辉煌提供可靠的技术保障。

第一章 聚合物溶液驱油

聚合物溶液驱油是把聚合物添加到注入水中，提高注入水的粘度，降低驱替介质的流量的一种改善水驱方法。

聚合物溶液驱油最早在美国开始于 50 年代末、60 年代初期，1964 年进行了矿场试验。1970 年以后，前苏联、加拿大、英国、法国、罗马尼亚和德国等国家都迅速开展了聚合物驱矿场试验。从 60 年代至今，全世界有 200 多个油田或区块在进行聚合物驱油试验。

国内自 1972 年在大庆油田开展小井距驱油矿场试验以来，先后在大庆、大港、胜利、吉林、辽河和新疆等油田开展了矿场试验及扩大化工业试验，并取得了较好的效果。特别是通过国家“七五”、“八五”重点科技攻关，已形成聚合物驱油的配套研究能力和矿场驱油的配套技术，取得了聚合物驱比水驱提高采收率 12%，每吨聚合物增油 120t 的显著效果。

大庆油田在“九五”期间将逐步形成年注聚合物干粉 5×10^4 t 的规模。1998 年注入聚合物干粉量达到 4.68×10^4 t，采油量达到 800×10^4 t 的生产能力，成为大庆油田持续高产稳产的重要技术措施。

第一节 聚合物及其水溶液性质

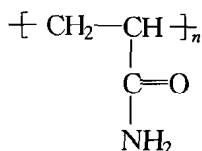
聚合物是高分子化合物，其水溶液是一种非牛顿流体。由于它的分子链很长，在流动过程中受到外力的作用或其他因素的影响，容易使聚合物的分子结构发生变化，从而使聚合物溶液的特性发生改变，因此，必须掌握聚合物及其水溶液的特性。

一、聚合物

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 的物质叫做高分子化合物，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（xanthan gum）。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）。

如聚丙烯酰胺的聚合度为 20 万时，则其相对分子质量为 $(12 \times 3 + 1 \times 5 + 16 \times 1 + 14 \times$

1) $\times 20 = 1420$ 万。根据聚丙烯酰胺单个分子内原子或原子团的种类, 以及它们的结合方式, 它可有不同的结构形式, 如图 1-1 所示。

在不同的生产工艺条件下, 聚合物可被制成三种物理形态, 即固体、水溶液(或半固体)和乳液。在聚合物驱油中, 这三种产品均有应用, 表 1-1 是这三种产品适用性能比较, 供选择产品时参考。

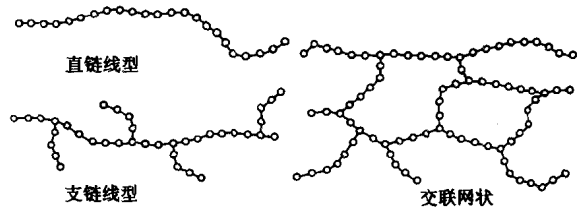


图 1-1 高分子聚合物的结构

表 1-1 不同形式的聚丙烯酰胺产品性能比较

产品形式	优点	缺点	一般应用场合
水溶液聚丙烯酰胺 (含 10% 聚合物)	产品支化及交联产物少, 注入性能好, 不需溶解, 可直接应用, 减少了地面溶解设备的投资, 价格低	运输困难, 费用高, 不易长期储存, 大气环境下保质期短, 相对分子质量低, 有效物含量低	原地或就近马上应用
固体聚丙烯酰胺 (含聚合物 90% 以上)	相对分子质量高, 有效物含量高, 运输、储存容易, 保质期长	溶解困难, 地面溶解设备投资较大, 价格较高	应用广泛
乳液聚丙烯酰胺 (含 35% 聚合物)	相对分子质量高, 易溶解, 不需溶解设备, 保质期较长 (6~9 个月)	运输较困难, 费用高, 价格高	应用广泛

二、聚丙烯酰胺的溶解

高分子物质的溶解与低分子物质的溶解不同。这是因为高分子与溶剂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。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 and 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则为良溶剂, 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, 溶液的粘度也因此降低。

三、聚合物溶液的粘度

聚合物溶液的粘度是改善流度比和调整吸水剖面的关键因素。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。

1. 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。图 1-2 为部分水解聚丙烯酰胺的结构。

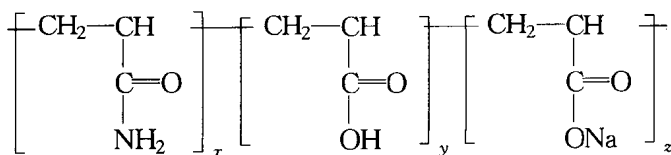


图 1-2 部分水解聚丙烯酰胺的结构

x, y, z —聚合度

$$\text{水解度} = \frac{71}{40} \times \frac{\text{加入碱质量}}{\text{纯聚合物质量}} \times 100\% \quad (1-1)$$

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和水解度关系见图 1-3。

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 $-\text{COONa}$ 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 HPAM 的水解度应为 0.1%~70%，最好在 5%~30% 之间。因

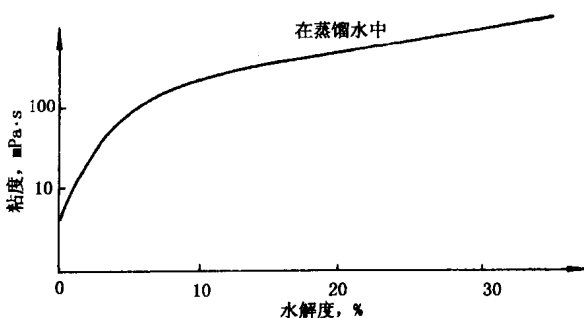


图 1-3 粘度与水解度关系

为水解度越大，聚合物溶液中的 $-\text{COO}^-$ 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 $-\text{CONH}_2$ 易吸附在岩石表面，会增加 HPAM 的吸附量。

2. 聚合物溶液的浓度对粘度的影响

表 1-2 是几种不同相对质量聚合物溶液的浓度和粘度的对应关系。图 1-4 是利用这种关系所绘制的曲线。从中看出，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。

3. 矿化度对粘度的影响

表 1-3 是几种不同相对质量聚合物的溶液粘度与矿化度的对应关系。图

1-5 是利用这种关系所绘制的曲线。从中可以看出，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，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。

4. 其他因素对粘度的影响

热、氧和细菌等因素对聚合物溶液的粘度都有影响。聚合物粘度随着温度的升高而降

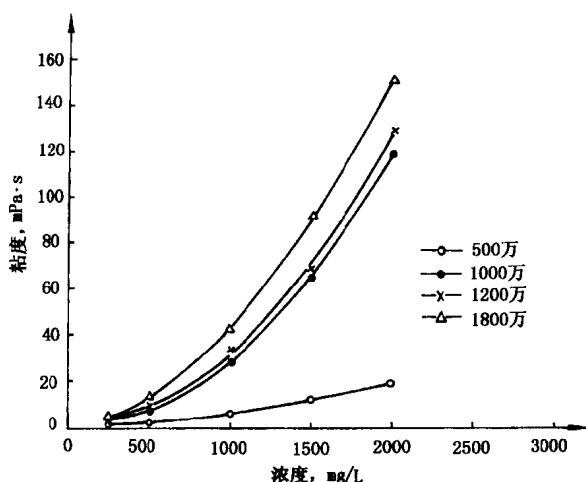


图 1-4 不同相对分子质量聚合物粘度—浓度关系曲线

表 1-2 不同相对分子质量聚合物溶液的浓度和粘度关系

浓度 mg/L 粘度 mPa·s 种类	250	500	1000	1500	2000
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：水的矿化度为 1320 mg/L。

表 1-3 不同相对分子质量聚合物的溶液粘度与矿化度关系

矿化度 mg/L 粘度 mPa·s 种类	7000	6000	5000	4000	3000	2000	1500	1000	500
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℃。

低，当温度高于 70℃时，聚合物会出现降解现象，即高分子断链成为较小的分子。

在氧化环境中或空气中，聚合物溶液会发生化学降解，粘度下降，严重时甚至会完全失去其增粘性。

细菌或酶是聚合物溶液发生生物降解而粘度下降的另一个因素。

四、聚合物溶液的流变性

聚合物的流变性是指在外力作用下，流动过程中发生形变的一种特性，其流变曲线如图 1-6 所示。

聚合物溶液的流变曲线由第一牛顿段、假塑段、极限牛顿段、粘弹段和降解段组成。粘度随剪切速率的变化与高分子在溶液中的形态结构有关。在很小的剪切

速率下，大分子构象分布不改变，流动对结构没有影响，聚合物溶液的粘度不因剪切速率的变化而变化，此即第一牛顿段；当剪切速率较大时，在切应力的作用下高分子构象发生了变

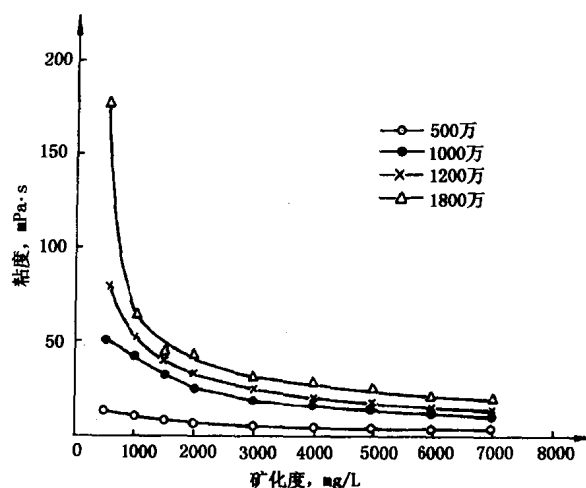


图 1-5 不同相对分子质量聚合物的溶液粘度—矿化度关系曲线

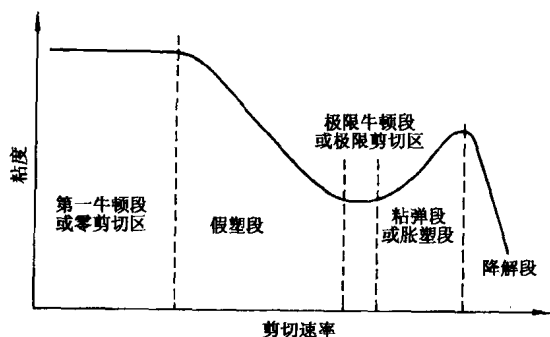


图 1-6 流变曲线示意图

化，长链高分子偏离平衡态构象，而沿流动方向取向，使得聚合物解缠和分子链彼此分离，从而降低了相互运动阻力，这时聚合物溶液粘度随剪切速率的增大而下降，此即假塑段；当剪切速率增加到一定程度以后，大分子取向达到极限状态，取向程度不再随剪切速率的变化而变化，聚合物溶液遵守牛顿流动定律，此即极限牛顿段；当剪切速率再增加时，主链的相邻键偏离了正常的键角，从而产生了弹性恢复力，聚合物溶液粘度随剪切速率的增大而升高，此即粘弹段；当剪切速率增加到

足以使高分子链断裂时，发生了聚合物降解，聚合物溶液粘度下降，此即降解段。

第二节 聚合物溶液驱油基本原理

注入工作剂驱油时，油藏内原油采收率是宏观波及效率、微观驱油效率以及井网效率的函数。

$$E = E_V \cdot E_D \cdot E_P \quad (1-2)$$

式中 E ——油藏注入工作剂的原油采收率，%；

E_V ——宏观波及效率，%；

E_D ——微观驱油效率，%；

E_P ——井网效率，%。

也有人将上式写成 $E = E_V \cdot E_D$ ，即将注采井网的影响归结到宏观波及效率 E_V 之中。下面结合影响 (1-2) 式的 E_V, E_D, E_P 诸因素，来探讨聚合物溶液驱油提高油藏原油采收率的各种途径。

一、聚合物溶液驱油机理

1. 提高宏观波及效率

聚合物溶液驱油就是利用聚合物增加注入水的粘度，聚合物吸附或滞留在油层孔隙中，降低了水相渗透率，从而降低了油水流量比，提高了宏观波及效率。用下式计算聚合物溶液驱油过程中的流量比。

$$M_{po} = \frac{\lambda_p}{\lambda_t} = \frac{\frac{K_{rp}}{\mu_p}}{\frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_{rw}}{\mu_w}} \quad (1-3)$$

式中 M_{po} ——聚合物溶液驱油时的总流量比；

λ_p ——聚合物溶液的流量；

λ_t ——油水混合带总流量比；

K_{ro} ——油的相对渗透率；
 K_{rw} ——水的相对渗透率；
 K_p ——聚合物溶液的相对渗透率；
 μ_p ——聚合物溶液的粘度；
 μ_o ——油的粘度；
 μ_w ——水的的粘度。

水油流度比降低后，既提高了平面波及效率，克服了注入水的“指进”，又提高了垂向波及效率，增加了吸水厚度。这就是聚合物驱油的最重要机理。

2. 提高微观驱油效率

传统的观点认为，聚合物溶液驱油只提高了宏观波及效率 E_v ，并不提高微观驱油效率 E_D 。近几年来，国内外有些专家指出，由于聚合物溶液的粘弹效应，也可提高微观驱油效率。图 1-7 是大庆油田矿场试验中所观察到的聚合物驱提高驱油效率的情况。

3. 提高井网效率

井网效率 E_p 可按下式计算。

$$E_p = \frac{A_w}{A} \quad (1-4)$$

式中 A ——油层面积， km^2 ；

A_w ——井网控制面积， km^2 。

计算结果表明（见表 1-4），在油层条件和注采速度相同的前提下，水驱开发效果较好的井网，其聚合物驱效果也好。聚合物驱效果由好到差的顺序为：斜对行列、五点法、正对行列、四点法、九点法和反九点法。另外，斜对行列和五点法井网的注采井数比为 1:1，四点法为 1:2，反九点法为 1:3。由于聚合物溶液的粘度高，在注入过程中，注入压力将逐步升高，为保证聚合物溶液的顺利注入，不会出现高于油层破裂压力的情况，从单井承受的能力角度看，采用斜对行列和五点法井网，是最为有利的。

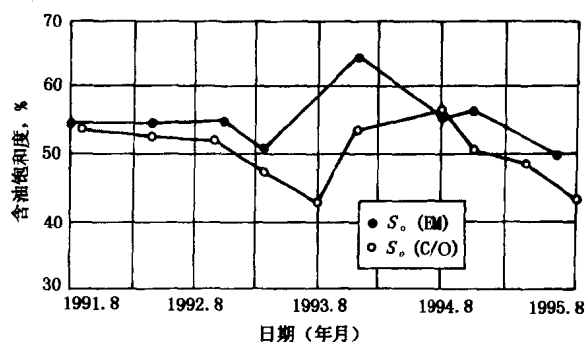


图 1-7 萨北 1-6 检 27 井含油饱和度 S_o 随时间变化曲线

EM—介电测井；C/O—碳氧比测井

表 1-4 不同井网水驱和聚合物驱效果对比

井网类型	水驱采收率, %	聚合物驱采收率, %	采收率提高值, %
正对行列	39.6	50.2	10.6
斜对行列	40.6	51.5	10.9
五点法	40.3	50.6	10.3
四点法	39.7	49.8	10.1
九点法	39.2	49.2	10.0
反九点法	38.4	49.0	10.6

二、聚合物在多孔介质中的滞留

聚合物驱油时会使岩石的渗透率下降，其主要原因是聚合物在岩石中的滞留造成的。滞留不仅引起溶液中聚合物的损失，同时也使得流度控制效率下降。除此之外，滞留会使聚合物溶液的原始性能（如浓度、粘度、阻力系数等）发生变化，也会使岩石的物性（如渗透率、孔隙度、界面性质）发生变化。聚合物在多孔介质中的滞留包括吸附、捕集和物理堵塞。

1. 聚合物的吸附

吸附是聚合物分子滞留于孔隙介质中的重要机理之一。吸附是聚合物在岩石表面的浓集现象。实验证明，聚合物在岩石表面上的吸附为单分子层吸附，聚合物主要通过重氢键、范德华力、化学键（配伍键）和静电力吸附。大量的研究表明，岩石对聚合物吸附按吸附量的影响从大到小的排序为

粘土矿物 > 碳酸岩 > 砂岩 > 蒙脱石 > 伊利石 > 高岭石 > 长石 > 石英

2. 机械捕集和物理堵塞

机械捕集是指比岩石孔隙大的分子进入并保留在岩石中。这些孔隙一般是一端小，另一端大，而不是根本不让聚合物进入小孔隙孔道。只要大口面向着多孔介质的上端，那么聚合物就可进入孔隙，但在小口端却流不出来，于是聚合物就被捕集起来。

物理堵塞主要是由于沉淀物而引起的。这些沉淀物包括聚合物溶液中的各种不溶物，聚合物与地层以及其中流体发生化学反应而生成的沉淀物，如地层中的二价阳离子，使部分水解聚丙烯酰胺絮凝或沉淀等。

机械捕集和物理堵塞的区别是，机械捕集有可能让油或其他不含水的流体通过，只是限制水溶液的流动，并且机械捕集是可逆的；物理堵塞不允许流体通过，并且一般是不可逆的。

在真实的油层岩石中，几乎不可能将吸附和捕集及物理堵塞定量地分开。聚合物在油层岩石中的滞留量是上述三个因素的综合作用。聚合物溶液通过多孔介质时，聚合物的滞留量导致孔隙结构变形，孔隙直径变小，从而使多孔介质的渗透率下降。聚合物降低渗透率的特性可用阻力系数、残余阻力系数和筛网系数等来表示。

3. 多孔介质中聚合物溶液流动综合系数

1) 阻力系数 R_F

阻力系数是指在相同条件下，盐水和聚合物溶液的流度之比。即

$$R_F = \frac{\lambda_w}{\lambda_p} = \frac{K_w}{K_p} \cdot \frac{\mu_p}{\mu_w} \quad (1-5)$$

式中 K_w —— 水的有效渗透率；

K_p —— 聚合物的有效渗透率。

为了单独描述渗透率的下降，最常用的度量值是渗透率下降系数 R_k 。

$$R_k = \frac{K_w}{K_p} = R_F \cdot \frac{\mu_w}{\mu_p} \quad (1-6)$$

R_F 一般比 R_k 大得多，因为前者包括粘度增大和渗透率下降两种效应。