

聚合物驱油 计算理论方法

肖 伟 石成方 王凤兰 计秉玉 编著

石油工业出版社

聚合物驱油计算理论方法

肖 伟 石成方 王凤兰 计秉玉 编著

石油工业出版社

内 容 简 介

本书要求读者具有一定的微积分、概率统计及现代应用数学方法基本知识,适合油田开发工程技术人员、油田科技管理人员、油田科研人员参考阅读。全书虽然应用了较多的数学方法原理,但主要还是从工程计算和计算机应用程序化出发编写的,因此对非数学工作者依然容易理解、阅读。本书共有八章,其中第一章和第四章主要从聚合物驱油机理出发讨论了聚合物驱原理及其指标计算,第二章、第三章、第五章主要从数学分析出发给出了建立解决现实世界问题的数学模型所涉及科技工作中的基本数学技术如数据处理、数据分析、数学建模、量纲分析、相似原理、常规预测、神经网络等,第六章、第七章、第八章则是从不同侧面讨论了聚合物驱指标综合预测模型,从数学上来讲,它们分别代表了确定性模型、随机性模型、功能性模型。

图书在版编目(CIP)数据

聚合物驱油计算理论方法/肖伟等编著.

北京:石油工业出版社,2004.6

ISBN 7-5021-4712-8

I. 聚…

II. 肖…

III. 高聚物-化学驱油-计算方法

IV. TE357.46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 059140 号

聚合物驱油计算理论方法

肖伟 石成方 王凤兰 计秉玉编著

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: www.petropub.cn

总 机: (010) 64262233 发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京华正印刷厂印刷

2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 15.5

字数: 400 千字 印数: 1-2000 册

定价: 40.00 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

随着三次采油技术的日益完善, 聚合物驱油技术也越来越广泛地应用于油田开发, 它已成为石油开发稳产的重要手段。因此, 聚合物驱油开发指标的计算及预测已经成为油田聚合物驱开发制定规划、实施最优控制开发的重要保证。本书虽然写的是聚合物驱油指标计算理论方法, 但实际上许多地方是介绍的一般数学方法及其数学处理技巧。全书共有八章。第一章介绍聚合物驱机理, 在其他聚合物驱油方面的书也有介绍, 这里为了保持系统性写了这一章, 但采用了不同的观点。第二章和第五章讲述了一般数学处理原理, 这对非数学专业工作者可能有些困难, 但作者尽力以工程计算的观点在写, 希望读者尽最大可能理解其一般性。第三章在介绍了一般数学建模、量纲分析建模、相似原理建模的基础上陈述了部分有代表性的聚合物驱油数学模型, 这些模型描述了聚合物驱油过程各指标综合变化及其相互影响的关系, 它们来自公开发表的文献。第四章从聚合物驱机理出发给出了相关指标的数学表达式或实验测定数学公式。第六章、第七章、第八章则是从三个不同侧面揭示了聚合物驱油开发指标预测模型。其中第六章应用时间序列分析法给出了开发指标随时间变化的动态数学预测模型(一元函数预测模型), 第七章给出了开发指标与聚合物驱动态指标及其油藏静态指标之间的综合数学预测模型(多元函数预测模型), 第八章应用神经网络原理给出了开发指标的功能模拟预测模型(向量值函数预测模型)。可以说, 本书不仅是写聚合物驱油指标计算, 而且试图写一些基本的定量分析、数学模型分析的一般原理。希望本书有助于工程技术人员研究聚合物驱油动态规律及其相关指标计算, 有助于读者理解建立研究对象数学模型的常规数学技术, 例如, 数据处理、数据分析、数学建模、量纲分析、相似原理、常规预测、神经网络等技术。

本书是为从事聚合物驱油研究的油田第一线工程技术人员写的, 也可以供从事聚合物驱油工程研究的科研人员及相关管理工作参考。

本书的主要成果是作者在大庆油田博士后工作站期间完成的。本书得到了大庆油田、大庆油田博士后工作站、大庆油田勘探开发研究院及其开发规划室、南京理工大学博士后流动站的大力支持与帮助。本书也部分地得到了南京理工大学科研启动基金的资助。

作者在完成本书的过程中, 得到了博士后合作研究导师南京理工大学博士生导师杨孝平博士的极大帮助和指导, 在此表示深切的谢意。同时也感谢大庆油田博士后工作站孙彦主任、王英科长、万金荣、邱海萍对作者在站工作期间提供的研究帮助和生活关照, 感谢大庆油田勘探开发研究院刘春林、王者琴、侠丽华、韩冰、姜祥成、乔书江、郭玮奇、刘端奇等

的关心与帮助，感谢大庆油田勘探开发研究院开发规划室全体人员给研究工作提供的各种数据资料、研究课题讨论以及生活上的关心。

感谢我妻子在我完成本书过程中的大力支持，她不辞辛劳地承担了全部家务。

肖 伟

南京月牙湖畔

2004 年春

目 录

第一章 聚合物驱油机理	1
§1.1 引 言	1
§1.2 聚合物的化学性质	2
§1.3 聚合物的物理性质	3
§1.3.1 聚合物的增粘性	3
§1.3.2 聚合物的流变特性	4
§1.3.3 聚合物的稳定性	6
§1.4 聚合物驱油原理	10
§1.4.1 聚合物驱流变性问题	10
§1.4.2 聚合物驱波及效率问题	13
§1.4.3 聚合物驱滞留性问题	14
§1.4.4 聚合物驱不可及孔隙体积效应问题	15
§1.4.5 聚合物驱调剖问题	16
§1.5 聚合物驱油工程设计	16
§1.5.1 油藏参数设计	16
§1.5.2 注入方案设计	17
§1.5.3 井网井距设计	19
§1.6 应 用	21
§1.6.1 地层温度低	21
§1.6.2 地层水和注入水矿化度低	22
§1.6.3 油层的非均质特性	22
§1.6.4 油层润湿性	22
§1.6.5 原油粘度	22
§1.7 结论及讨论	23
参考文献	23
第二章 聚合物驱油数据分析	25
§2.1 引 言	25
§2.2 数据录取	26
§2.2.1 聚合物取样	26

§2.2.2 聚合物录取要求	27
§2.3 数据处理	31
§2.3.1 数据整理	32
§2.3.2 数据数学变换	33
§2.3.3 数据无量纲化	35
§2.4 数据分析	37
§2.4.1 数据集中趋势的度量	37
§2.4.2 数据离散程度的度量	41
§2.4.3 方差分析	44
§2.4.4 相关分析	49
§2.5 聚合物驱数据统计	52
§2.5.1 基础数据统计	52
§2.5.2 注入数据统计	53
§2.5.3 采出数据统计	55
§2.5.4 聚合物驱效果评价指标计算	60
§2.6 聚合物驱动态分析	62
§2.6.1 注聚压力与注入聚合物量的关系	63
§2.6.2 单井含水率	63
§2.6.3 采液指数与采聚浓度的关系	64
§2.6.4 产量与注聚量的关系	64
§2.6.5 含水下降幅度与剩余油饱和度及地层系数的关系	65
§2.6.6 油层平面及纵向波及效果	65
§2.6.7 含水变化与油层条件及油井连通关系	65
§2.7 应 用	65
§2.7.1 含水率	66
§2.7.2 产液量	69
§2.7.3 产油量	70
§2.8 结论及讨论	72
参考文献	72
第三章 聚合物驱油数学模型	74
§3.1 引 言	74
§3.2 数学分析建模	75

§3.3 量纲分析建模	78
§3.3.1 量纲分析原理	78
§3.3.2 量纲分析原理的应用	81
§3.4 相似原理建模	85
§3.4.1 相似原理	85
§3.4.2 流动相似的准则及其物理意义	87
§3.4.3 相似原理的应用	90
§3.5 相似原理应用于建立聚合物驱模拟模型	91
§3.5.1 符号说明	91
§3.5.2 确定聚合物驱模拟相似准则	92
§3.5.3 数值分析检验相似准则	95
§3.5.4 建立部分相似模拟方案	96
§3.6 一维聚合物驱模型	99
§3.6.1 假设条件	99
§3.6.2 符号说明	100
§3.6.3 数学模型	100
§3.6.4 模型的算法	100
§3.7 二维聚合物驱模型	101
§3.7.1 假设条件	101
§3.7.2 符号说明	102
§3.7.3 数学模型	102
§3.7.4 模型的算法	103
§3.8 聚合物驱一般数学模型	105
§3.9 结论及讨论	108
参考文献	109

第四章 聚合物驱指标解析计算 110

§4.1 引言	110
§4.2 聚合物的剪切流变性	110
§4.3 聚合物在多孔介质中的流变性	112
§4.3.1 聚合物在多孔介质中流动的剪切速率	112
§4.3.2 聚合物有效粘度	113
§4.4 聚合物驱渗透率	115

§4.4.1	相对渗透率	115
§4.4.2	渗透率下降系数	116
§4.5	聚合物驱阻力与残余阻力系数	117
§4.5.1	室内实验测定	118
§4.5.2	Hall 曲线法	118
§4.5.3	动态估计法	119
§4.6	聚合物驱注采速度	120
§4.6.1	注入速度与注入压力	121
§4.6.2	注入速度与渗透率	121
§4.6.3	采液速度与注采井距	121
§4.7	聚合物驱产量	122
§4.7.1	总体估算	122
§4.7.2	计算产液量	123
§4.7.3	计算含水率	123
§4.8	结论及讨论	124
	参考文献	126
第五章	聚合物驱指标常规预测模型	128
§5.1	引言	128
§5.1.1	预测定性分类	129
§5.1.2	预测一般描述	129
§5.1.3	预测模式	131
§5.1.4	预测步骤	133
§5.2	平均法	134
§5.2.1	简单平均法	134
§5.2.2	移动平均法	135
§5.2.3	指数平滑法	135
§5.2.4	温特线性与季节性指数平滑法	136
§5.3	滤波调整法	136
§5.4	趋势外推法	137
§5.4.1	作图法	138
§5.4.2	二次曲线外推法	138
§5.4.3	指数曲线外推法	139

§5.4.4 生长曲线外推法	140
§5.5 投入产出分析	141
§5.5.1 静态投入产出模型	142
§5.5.2 动态投入产出模型	144
§5.5.3 动态优化投入产出模型	146
§5.6 回归分析	148
§5.6.1 一元线性回归分析	148
§5.6.2 多元线性回归分析	151
§5.6.3 非线性回归分析	154
§5.7 时间序列分析	156
§5.7.1 一般性描述	157
§5.7.2 自相关与偏相关函数	158
§5.7.3 模式识别	160
§5.7.4 参数估计	163
§5.7.5 预 测	166
§5.7.6 进一步讨论	169
§5.8 灰色预测	170
§5.8.1 一般性描述	170
§5.8.2 一维灰色模型 $GM(1,1)$	172
§5.8.3 多维灰色模型 $GM(1,p+q)$	172
§5.9 结论及讨论	174
参考文献	175

第六章 聚合物驱指标动态分析预测

§6.1 建立模型的准备	177
§6.1.1 模型假设	177
§6.1.2 符号说明	178
§6.2 产液量数学模型	180
§6.2.1 综合推导模型	180
§6.2.2 阻力系数的计算	183
§6.2.3 最终模型	184
§6.3 产油量数学模型	186
§6.4 含水率数学模型	187

§6.5 模型的应用	187
§6.5.1 规模控制	187
§6.5.2 预测准备	188
§6.5.3 预测步骤	192
§6.6 范 例	194
§6.7 结论及讨论	197
参考文献	201
第七章 聚合物驱指标远期趋势预测模型	202
§7.1 引 言	202
§7.2 模型的建立步骤	203
§7.3 确定性趋势模型	206
§7.3.1 数学模型	206
§7.3.2 参数识别	209
§7.4 残差的随机性模型	211
§7.4.1 残差序列的统计检验	211
§7.4.2 计算自回归模型 $AR(p)$ 阶数 p	212
§7.4.3 计算纯自回归模型 $AR(p)$ 系数	213
§7.5 综合预测模型	213
§7.6 结论及讨论	215
参考文献	216
第八章 聚合物驱神经网络预测模型	218
§8.1 问题的提出	218
§8.2 问题的数学描述	220
§8.3 前馈 BP 神经网络	223
§8.3.1 网络结构	223
§8.3.2 网络学习算法	225
§8.3.3 算法的讨论	228
§8.4 应 用	230
§8.5 结论及讨论	232
参考文献	234
第九章 符号索引	235

第一章 聚合物驱油机理

在注水开采后,油藏中仍然存在大量的原油。这些油或者被毛管压力束缚住不能流动,或者由于驱替相和被驱替相间的不利流度比使得注入溶液波及体积小而无法驱动原油。在注入溶液中加入某些化学添加剂则可极大地改善注入液的驱洗油能力。聚合物驱油就是将高分子聚丙烯酰胺添加到注入水中以提高注入水的粘度,降低驱替介质流度的一种改善水驱方法。在美国聚合物驱开始于 20 世纪 50 年代末,矿藏试验开始于 60 年代中期。进入 70 年代,前苏联、加拿大、英国、法国、罗马尼亚以及德国等相继进行了聚合物驱矿藏试验。1972 年,我国大庆油田进行了聚合物驱矿藏试验。现在聚合物驱油已成为大庆油田高产稳产的重要手段。本章简单地介绍聚合物驱油的基本机理,大庆油田实施聚合物驱油的条件以及从大庆油田聚合物驱实践所得出的一些认识。

§1.1 引言

石油开发在经历了依靠天然能量消耗开采的一次采油(一般采收率仅为 5%~10%),通过人工注水保持油层压力的二次采油(采收率提高到 30%~40%)后,又提出了三次采油。通过理论研究以及实际开发实践,人们认识到油层的复杂性及其非均质性。由于油水两相流体在油层多孔介质中渗流时,不仅注入水不可能活塞式驱油,使注入水波及不到全油层,而且油水两相渗流过程中受油水粘度差、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。因此,只有进一步扩大注入水波及体积和提高驱油效率,才能大幅度提高采收率。于是,三次采油应运而生,它包括:(1)注入高分子量的聚合物以提高注入水粘度,降低油水粘度差,从而达到提高波及体积的注聚三次采油技术;(2)注入表面活性剂、碱、气与原油混相等,降低界面张力,提高注入水驱油效率的表面活性剂驱、碱驱、混相驱的三次采油技术;(3)20 世纪 80 年代后期提出的既可扩大波及体积又可提高驱油效率的复合驱三次采油技术。我们将要讨论的就是注聚三次采油技术。

聚合物驱油就是在注入水中加入高分子聚合物达到增加水的粘度、改善水油流度比、提高波及效率及微观驱油效率,从而提高采收率。通常使用两种类型的聚合物:一种是合成聚合物如部分水解聚丙烯酰胺,另一种是生物作用生产的聚合物如黄胞胶。但对聚合物驱油效果解释存在着两种明显的观点:一种观点认为聚合物驱油主要作用在于改变油水流度比,扩大波及体积,聚合物驱是一种改善的水驱,并不能提高驱油效率,如赵永胜等^[1]就认为聚合物驱可以提高波及效率,但不能提高驱油效率;郭尚平等^[4]利用微观渗流模型,认为聚合物提高驱油效率的机理是由于聚合物溶液与油的剪切应力大于水与油的剪切应力。另一种观点认为聚合物驱可以提高驱油效率,依据是对聚合物驱与水驱后检查井岩心分析

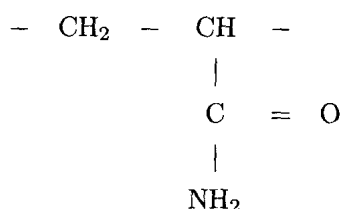
的驱油效率所进行的直接对比,并力图通过粘弹性、流变学室内实验研究证明聚合物水溶液提高驱油效率的具体数据。如王德民等^[5]根据微观渗流实验结果,分析了聚合物溶液提高微观驱油效率的机理是聚合物溶液的粘弹性效应。王德民等^[2]通过实验室岩心驱油实验,对水驱后的不同残余油类型进行了研究,并认为如果选择聚合物溶液性能合理,即可提高微观驱油效率;夏惠芬等^[3]通过理论分析和微观渗流模型实验分析,认为粘弹性的聚合物溶液均会不同程度地降低各类残余油量,从而提高微观驱油效率。但第二种观点现在已普遍认可。

总的来说,聚合物驱油提高石油采收率的基本原理可概括为两点:(1)在水溶剂中加入聚合物可增加驱替水的粘度,降低水的流度,由此极大地降低油水流动度比,以减缓水驱指进现象,改善油层横向及微观孔隙结构的非均质状况,缓解窜流、绕流等现象,增加驱替水的波及体积。(2)改善驱替水在垂向油层间的分配比,调整吸水剖面,增强低渗透率层和正韵律沉积层内上层部位吸水能力,从而减缓水沿高渗透率层窜进的现象,改善驱替水的波及体积。

由于生物聚合物如黄胞胶成本高并容易造成井底附近堵塞,因此在石油开采生产中广泛应用合成聚丙烯酰胺。在生产中大规模使用黄胞胶的未见报道。在以后的内容中所讲的聚合物就指聚丙烯酰胺。

§1.2 聚合物的化学性质

由于注聚三次采油中几乎都是应用的聚丙烯酰胺,这里的聚合物化学性质实质上指聚丙烯酰胺的化学性质。聚丙烯酰胺有非离子型、阴离子型、阳离子型三种产品,其中工业用于驱油的是阴离子型聚丙烯酰胺,也称为部分水解聚丙烯酰胺,其基本分子结构如下:



当聚丙烯酰胺作为添加剂加入水中形成聚合物水溶液驱油时,它会与溶液中的离子发生强烈反应形成部分水解聚丙烯酰胺。水解聚丙烯酰胺分子是柔性链结构,在分子化学中有的称为无规线圈。与黄原胶相比,聚丙烯酰胺不象黄原胶的螺旋结构那样具有固定的次级结构,能提供刚度。另外由于聚丙烯酰胺链是柔性的,它更容易受到水溶剂中的离子强度影响,而且其溶液性质对盐度比黄原胶更加敏感。

现在由于生产技术的提高,可以生产分子量非常高的合成聚丙烯酰胺产品。在聚合物驱油生产中所用聚丙烯酰胺分子量一般在 $2 \times 10^6 \sim 2 \times 10^7$, 也有报道为提高聚合物驱采

收率所生产的部分水解聚丙烯酰胺分子量范围在 $2 \times 10^6 \sim 2 \times 10^7$ 。

§1.3 聚合物的物理性质

聚合物驱油主要是利用了把聚丙烯酰胺加入注入水中使聚合物水溶液的粘度增加，从而改善油水流动比以波及体积增加，提高驱油效率。这里从聚合物驱油的目的出发，介绍聚合物的流变形、增粘性、稳定性三方面的物理性质。

§1.3.1 聚合物的增粘性

注水驱油效果较差，原油采收率低，就是因为油井见水早，油层严重非均质性导致指进现象严重，人们认为聚合物驱油会弥补注水驱油的这一缺陷。事实上通过在水中添加高分子聚合物可以增加水的粘度以及降低侵入区油层的渗透率，使驱替稳定，降低指进，增加波及体积。由于聚合物是高分子化合物，而作为驱油应用的溶剂是水，高分子的聚丙烯酰胺与低分子的水溶剂的分子尺寸相差太大，导致分子运动速度的巨大差别，因此，水溶剂能比较快地渗入到聚丙烯酰胺内部，使聚合物体积膨胀，然后聚合物才均匀地分散在溶剂中，形成完全溶解的分子分散体系。在聚合物溶液中，偶极水分子通过吸附或氢键在高分子周围形成溶剂化层或成为束缚水，同时因带电基团间的静电斥力而使聚合物分子更加舒展，无规线团体积增大，所有这些都使分子运动的摩擦增大，流动阻力增大，由此增加注入聚合物水溶液的粘度。但文献^[7]确认为聚合物溶液如何增粘还不很清楚，只能做出这样的物理解释：聚合物链和水溶剂分子间的相互作用，沉降、扩散、碰撞、摩擦等导致能量分散而增粘。这就说明聚合物增粘性的物理化学机理有待深入分析研究。

聚合物溶液的粘度与聚丙烯酰胺的分子量、溶液浓度、水解度、温度、水的矿化度有关，具体来讲：(1) 粘度与分子量成正比：分子量越高，聚合物溶液的粘度越大；(2) 粘度与浓度成正比：聚合物溶液的粘度随着其浓度的增加而增大，并且增加的幅度随着浓度的增加而增加；(3) 粘度与水解度成正比：聚丙烯酰胺的水解度越高，聚合物溶液的粘度越大。当水解度达到一定程度后，粘度的增加趋缓；(4) 粘度与温度成反比：聚合物溶液的温度越高，其粘度越低，但在温度降解之前聚合物的粘度是可以恢复的；(5) 粘度与矿化度成反比：水溶剂中的矿化度越高，聚合物溶液的粘度越低。尤其需要注意的是高价阳离子不但能够严重地降低聚合物溶液的粘度，而且它还会引起聚合物的交联，从而使聚合物从水溶液中沉淀出来。因此，在聚合物溶液的配制时需考虑三方面因素：油田水要满足配制要求，高价阳离子含量不能过高；另一方面，在用聚合物溶液驱油时，要考虑地下油藏高价阳离子的含量即地下水的矿化度、温度对聚合物水溶液粘度的影响；最后就是要注意配制的聚合物溶液的分子量、浓度必须与聚合物驱油目的相一致。

为了估计聚合物溶液的增粘效果，必须估计聚合物溶液的粘度。一方面，可以直接应

用粘度计测量配制的聚合物溶液的粘度；另一方面，可以从其物理属性考虑。因为在一定的剪切速率下，聚合物溶液的粘度是其浓度和含盐量的函数

$$\mu_p = \mu_w [1 + (A_1 C_p + A_2 C_p^2 + A_3 C_p^3) (C_{sep})^{A_4}] \quad (1.1)$$

其中 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 为待定常数。但聚合物溶液驱油时其粘度与流动中受到的剪切应力有关，即要考虑流动中的剪切速率。当聚合物溶液的粘度足够高时，聚合物溶液表现为非牛顿特性。用密特 (Meter) 方程可表达在一定含盐量 C_{sep} 、一定浓度 C_p 下粘度 μ_p 与剪切速率 γ 的关系

$$\mu_p = \frac{\mu_p^{\lim} - \mu_w}{1 + \gamma/\gamma_{1/2}} \quad (1.2)$$

式中 μ_p ——聚合物溶液粘度，mPa·s；

μ_w ——水的粘度，mPa·s；

$\mu_p^{\lim}$ ——流变曲线外推至剪切速度为零时对应粘度 μ_p 极限值；

$\gamma_{1/2}$ —— μ_p 降至 $(\mu_w + \mu_o)/2$ 时的剪切速率，m/s。

§1.3.2 聚合物的流变特性

三次采油驱替剂水中由于加入了高分子聚丙烯酰胺后，水溶液的粘度增加，其流动性发生变化。这里的聚合物流变性指在外力作用下，流动过程发生形变的一种特性。这种流变特性的研究已非常清楚，通常都是做出不同聚合物分子量的流变曲线进行对比分析。这种流变曲线在许多参考书上都可以查到，此处不再画出不同分子量流变曲线对比分析图。通过对高分子聚合物溶液流变曲线的实验测定并结合理论分析，聚合物溶液属于非牛顿流体，其剪切应力与剪切速率之间的关系，一般而言与时间无关或基本无关。它由第一牛顿段、假塑段、极限牛顿段、粘弹段、降解段组成。具体说明如下。

在很小的剪切速率下，大分子构象不改变，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，这就是第一牛顿段。

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化，长链高分子偏离平衡态构象，聚合物解缠以及分子链彼此分离，降低相互运动阻力，因此聚合物溶液粘度随剪切速率的增大而下降，这就是假塑段。

当剪切速率增加到一定程度后，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，聚合物溶液的流动遵守牛顿流动定律，这就是极限牛顿段。

当剪切速率继续增加时，聚丙烯酰胺主链的相邻键偏离了正常的键角，由此产生了弹性恢复力，聚合物溶液粘度随剪切速率的增大而升高，此乃粘弹段。

当剪切速率增加到足以使高分子链断裂时，聚合物发生降解，其粘度下降，此乃降解段。

由此表明, 聚合物溶液的流变性特征主要由它的粘度决定, 这在后面将单独谈到。

现在讨论衡量聚合物溶液在多孔介质中流动时的固有属性。这种固有属性可以通过实验测定, 从而估计聚合物驱油的效率。这就是聚合物的粘弹性问题及其流动阻力系数的测定问题, 后者包含阻力系数 f_r 和残余阻力系数 f_{rr} 。

(1) 粘弹性问题。为了方便地检测聚合物分子的粘弹性, Jennings 等研制了一种筛网粘度计, 模拟聚合物溶液在变径处的流动, 用筛网系数

$$f_s = \frac{t_p}{t_w} \quad (1.3)$$

来表征, 其中 t_p 代表固定体积的聚合物溶液通过筛网所需时间, t_w 代表等体积的溶剂 (通常用水) 通过筛网所需的时间。筛网系数与聚合物粘弹性之间有很好的对应关系。在研究聚合物驱提高石油采收率时, 通常将筛网系数作为控制聚合物质量的一个重要参数, 低的筛网系数通常表现为聚合物溶液具有高的注入性。因此, 常常要求聚合物具有高的增粘能力和低的筛网系数。筛网系数实际上是聚合物分子在拉伸应力下所表现的应变, 表征了由拉伸引起的粘度变化。

(2) 阻力系数 f_r 问题。聚合物溶液在多孔介质中流动时, 流体速度与压力梯度的关系要比达西定律复杂得多, 需要同时使用多孔介质模型和聚合物溶液的流变模型 (包括剪切稀释和在高流速下的剪切增稠) 进行描述。Pye 最早提出了聚合物溶液在多孔介质中流动的描述参数——阻力系数 f_r , 它被定义为注入水 (盐水) 的单相流动能力与聚合物溶液单相流动能力之比

$$f_r = \frac{\lambda_w}{\lambda_p} = \frac{K_w \mu_p}{K_p \mu_w} \quad (1.4)$$

或者

$$f_r = \frac{\Delta P_p}{\Delta P_w} \cdot \frac{u_w}{u_p}$$

式中 ΔP_p ——注入聚合物溶液的注入压力降;

ΔP_w ——注入水的注入压力降;

u_w ——注入水的流速, m/s;

u_p ——注入聚合物溶液的流速, m/s。

公式 (1.4) 也可以用下式表示

$$R_k = \frac{K_w}{K_p} = \frac{\mu_w}{\mu_p} \cdot f_r \quad (1.5)$$

式中 R_k 为渗透率降低系数。因为通常由粘度计得到的粘度 μ 与剪切速度的关系与在多孔介质中测量得到的视粘度 μ_p 与等效剪切速度 γ_{eg} 的关系不一致, 后者往往要高出一个恒定值。这就表明聚合物在流动过程中不仅能增加粘度, 而且降低了渗透率。 f_r 与 R_k 的不同

之处在于前者是描述聚合物流动时总流度降低的参数，而后者只是多孔介质渗透率降低的参数。

(3) 残余阻力系数 f_{rr} 问题。聚合物溶液在多孔介质中渗流时的压力降不仅仅是聚合物溶液的粘滞效应、粘弹性效应以及渗透率降低引起的，还应当考虑聚合物的吸附和滞留效应。由于聚合物在岩石上的吸附以及在小孔隙中的圈捕，减少了孔隙的水动力学半径流动通道，造成了多孔介质渗透能力的永久降低。为了单独考虑渗透率永久性的降低，可引进残余阻力系数 f_{rr} ，它是聚合物溶液渗流前后盐水渗流速度之比

$$f_{rr} = \frac{\lambda_{wb}}{\lambda_{wa}} = \frac{\Delta P_{wa}}{\Delta P_{wb}} \cdot \frac{u_{wb}}{u_{wa}} \quad (1.6)$$

式中 λ_{wb} ——聚合物溶液渗流前盐水渗流流度，m/s；

λ_{wa} ——聚合物溶液渗流后盐水渗流流度，m/s；

ΔP_{wb} ——聚合物溶液渗流前盐水渗流时的压力降；

ΔP_{wa} ——聚合物溶液渗流后盐水渗流时的压力降；

u_{wb} ——聚合物溶液渗流前盐水渗流速度，m/s；

u_{wa} ——聚合物溶液渗流后盐水渗流速度，m/s。

显然， f_{rr} 系数表征了聚合物溶液造成的多孔介质渗透率的永久损失，它是聚合物溶液封堵孔隙通道能力的度量，衡量聚合物驱时油层吸水剖面改善（高渗透率层渗透率的降低）的一个标准。同样， f_r 系数则是衡量聚合物驱时流度比改善的一个标准，其值的明显增加表明聚合物溶液改善油水流动比的能力增强。

总而言之，聚合物的流变性从三方面刻画：(1) 高分子聚合物溶液在拉伸力作用下所表现的应变性，即筛网系数 f_s 。筛网系数越小，聚合物溶液注入性越好。(2) 阻力系数 f_r 用于刻画聚合物溶液在油藏多孔介质中流动时总流度降低状况。要注意区别它与渗透率下降系数 R_k 的不同， R_k 是聚合物在多孔介质中降低渗透率的能力刻画。(3) 残余阻力系数 f_{rr} 刻画了聚合物溶液在多孔介质中流动因吸附和滞留效应所引起的多孔介质渗透率永久损失。而前面两方面确是聚合物在多孔介质中的粘弹性、粘滞性导致粘度的变化。

§1.3.3 聚合物的稳定性

聚合物溶液驱油的目的就是保持其适当的粘度，但在注入聚合物溶液时，由于各种原因聚合物高分子链会提前出现断裂，破坏了大分子结构，达不到聚合物驱要求，这就是所谓的聚合物降解。因此，为了保持聚合物溶液的稳定性以达到理想的驱油效果，我们必须研究聚合物的稳定性。在聚合物驱采油中通常有以下三种降解：(1) 化学降解，由于氧化作用所引起的迅速化学反应或水解作用对分子骨架长期化学作用造成聚合物分子链断裂所构成的聚合物降解；(2) 机械降解，由于聚合物高分子受到较大剪切应力引起聚合物分子链断裂所造成的聚合物降解，如在井筒附近的高流速区域，或在聚合物注入设备的某些地方如油