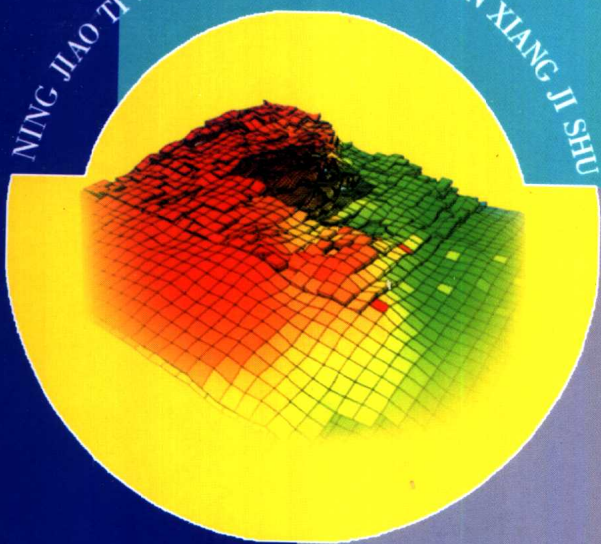


# 凝胶体系

## 地层流体转向技术

NING JIAO TI XI DI CENG LIU TI ZHUAN XIANG JI SHU



刘义坤 编著

石油工业出版社

# 凝胶体系地层流体转向技术

刘义坤 编著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书介绍了国内外凝胶体系地层流体转向技术的最新发展趋势；对凝胶体系成胶机理、流变和渗流特性、驱油效果，凝胶体系处理的渗流数学模型及凝胶反应动力学模型，以及凝胶体系处理数值模拟等方面进行系统的总结分析。

本书可供相关专业的科研人员、工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

凝胶体系地层流体转向技术/刘义坤编著.

北京:石油工业出版社,2000.7

ISBN 7-5021-3028-4

I.凝…

II.刘…

III.胶束溶液-化学驱油

IV.TE357.46

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 64169 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)

地矿部河北地勘局测绘院印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

\*

850×1168 毫米 32 开本 4.25 印张 116 千字 印 1—500

2000 年 7 月北京第 1 版 2000 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3028-4/TE·2335

定价: 15.00 元

# 前 言

对水驱开发的油田，由于油藏的非均质性以及油、水的粘度差异，会造成注入水沿着注入井和生产井之间的高渗透层、大孔道或裂缝单层突进或指进，导致生产井过早水淹，高渗透层水淹严重，中、低渗透层动用程度较低或未动用，从而降低了水的波及效率和水驱效果。聚合物驱作为一种提高原油采收率的方法，已经从矿场试验阶段进入了工业化应用阶段，目前技术上也相对比较成熟，其驱油机理主要靠增加注入水的粘度，改善不利的油水流动度比，提高驱替效果。但是在油藏中有特高渗透层、大孔道或裂缝存在时，也会出现单层突进或指进现象，生产井过早地采出聚合物，降低了聚合物驱的驱替效果。

近年来，凝胶体系地层流体转向技术得到很大发展，它已不是单纯的依靠调剖、堵水来降低含水的井底处理措施，而属于调节层间或层内矛盾，增加波及体积的一种提高石油采收率的方法。这种方法的基本原理是通过注入凝胶体系而堵住高渗带的水流通道，迫使水流改向到剩余油较多的部位或层位，以有效地扩大波及体积，提高原油采收率。

凝胶体系地层流体转向技术中化学剂与地层岩石、流体之间的相互作用对能否成功地使用该技术起着关键性作用。凝胶体系要在地层内流动，因此其吸附、滞留作用、聚合物在地层内的水解、聚合物与交联剂与地层流体的配伍性、离子交换作用以及各种化学剂和凝胶本身在地层中的热稳定性等都必须考虑。由于这项技术解决的是层内与层间的矛盾（主要是层内矛盾）势必涉及到地质、油藏工程诸多方面的问题，在方案设计中必须进行精细的油藏描述和数值模拟。因此除了高分子化学外，还需综合运用地质、油层物理、渗流力学、油藏工程等多学科的理论 and 知识，才能更好地应用此项技术，它已不是个单纯的工艺问题，而是一

种扩大波及体积的提高原油采收率的方法。

本书在大量国内外文献调研和近几年研究的基础上，对凝胶体系地层流体转向技术包括室内实验、渗流理论模型和现场试验3个方面的国内外最新研究成果进行了综述；对凝胶体系成胶机理、流变及渗流特性、室内驱油效果等进行了探讨和研究；建立了凝胶体系处理的渗流数学模型，给出了凝胶反应动力学模型，并利用有限差分方法给出了数值模型；进行了凝胶体系处理的数值模拟研究。相信本书的出版将对我国的凝胶体系地层流体转向技术的研究工作起到一定的推动作用。本书由吴文祥博士主审；同时，向在本书的出版过程中给予著者大力支持、关心和帮助的同事和朋友表示诚挚的谢意。

由于时间仓促，书中的缺点和不足之处在所难免，有许多工作还需进一步地研究，恳请专家、读者不吝赐教，以利今后不断改进、完善，著者在此表示衷心感谢。

著 者

2000年5月

责任编辑：高 迎  
责任校对：王 群  
封面设计：刘雪松

ISBN 7-5021-3028-4



9 787502 130282 >

ISBN 7-5021-3028-4/TE · 2335

定价：15.00 元

激  
脱  
体  
系  
地  
层  
流  
体  
转  
向  
技  
术

石  
油  
工  
业  
出  
版  
社

# 目 录

<b>第一章 概论</b> .....	( 1 )
第一节 凝胶体系地层流体转向技术基本原理.....	( 1 )
第二节 凝胶布置的基本概念.....	( 3 )
第三节 国内外发展概况.....	( 5 )
第四节 需要解决的问题.....	( 8 )
<b>第二章 凝胶体系机理研究</b> .....	( 11 )
第一节 三价铬的胶凝作用机理.....	( 12 )
第二节 聚丙烯酰胺/ $\text{Cr}^{3+}$ 凝胶体系成胶机理 .....	( 17 )
第三节 胶态分散凝胶体系研究 .....	( 27 )
第四节 胶态分散凝胶渗流特性研究.....	( 35 )
<b>第三章 凝胶体系地层流体转向技术数学模型的建立</b> .....	( 52 )
第一节 建立模型的基本假设.....	( 52 )
第二节 模型的建立.....	( 52 )
<b>第四章 凝胶模型</b> .....	( 62 )
第一节 凝胶反应动力学模型.....	( 62 )
第二节 凝胶性质描述.....	( 65 )
第三节 凝胶处理生产工艺模拟.....	( 67 )
<b>第五章 数值模型</b> .....	( 69 )
第一节 差分方法.....	( 69 )
第二节 质量守恒方程.....	( 79 )
第三节 运动方程.....	( 81 )
第四节 压力方程.....	( 81 )
第五节 初始条件和边界条件.....	( 84 )
第六节 约束方程.....	( 85 )
第七节 井 模 型.....	( 87 )
第八节 自动时间步长.....	( 90 )

第九节	高阶方法与解析解的比较·····	( 92 )
第六章	凝胶体系地层流体转向技术数值模拟研究·····	( 97 )
第一节	数值模拟软件·····	( 97 )
第二节	水驱过程中凝胶体系处理效果的影响因素研究 ·····	( 98 )
第三节	聚合物驱过程中凝胶体系处理效果的影响因素 研究·····	(108)
附录 A	物质平衡方程的导出·····	(118)
附录 B	软件流程图·····	(125)
参考文献	·····	(127)



# 第一章 概 论

## 第一节 凝胶体系地层流体 转向技术基本原理

众所周知，对水驱开发的油田，由于油藏的非均质性以及油、水的粘度差异，会造成注入水沿着注入井和生产井之间的高渗透层、大孔道或裂缝单层突进或指进，导致生产井过早水淹，高渗透层水淹严重，中、低渗透层动用程度较低或未动用，从而降低了水的波及效率和水驱效果。

聚合物驱作为一种提高原油采收率的方法，已经从矿场试验阶段进入了工业化应用阶段，尤其是在我国的大庆油田已大面积推广使用，目前技术上也相对比较成熟，其驱油机理主要靠增加注入水的粘度，改善不利的油水流动度比，提高波及体积和驱替效果，大体提高采收率 10% 左右。但是在油藏中有特高渗透层、大孔道或裂缝存在时，也会出现单层突进或指进现象，生产井过早地采出聚合物，降低了聚合物驱的驱替效率和驱替效果。

近年来，凝胶体系地层流体转向技术得到很大发展，它已不是单纯地依靠调剖、堵水来降低含水的井底处理措施，而属于调节层间或层内矛盾，增加波及体积的一种提高石油采收率的方法。

这种方法的基本原理是将聚合物溶液与交联剂在地面或在地下进行交联，形成凝胶体系或胶态分散凝胶体系而堵住高渗带的水流通道，迫使水流改向到剩余油较多的部位或层位，以有效地扩大波及体积，提高原油采收率。

根据油层特征不同，地层流体转向技术所用的凝胶体系也不同。从流动特性上看，该体系主要有两种类型：

1) 不流动性凝胶体系。该体系强度大, 粘度高, 成胶后不易流动。主要用于对付裂缝和大孔隙, 级差较大的厚油层和非均质严重的多层油藏。对于这种体系, 其“放置”技术是目前研究的重点。这种技术的特点是根据其交联时间, 通过数值模拟, 精心设计段塞置入的尺寸, 并使凝胶进入合适的部位, 最大限度地使流体转向和绕流, 扩大波及体积。

2) 流动性凝胶体系。该体系所用的聚合物浓度一般较低, 粘度不大, 胶凝过程很缓慢。注入地层后逐渐交联成很小粒径的胶粒, 并吸附/滞留在多孔介质中, 形成胶态分散凝胶, 在高渗透层中造成很大的渗流阻力, 其量值可以比聚合物高出数十倍, 迫使流体转向到低渗透层, 起到调节油层内油水流动度的作用。它适用于有相当渗透率级差的厚层、或虽有夹层但有一定连通性的油藏。这种方法其关键技术是要控制聚合物分子交联的程度, 使聚合物在交联剂作用下不形成三维网络结构, 而仅仅是分子内部交联或几个分子间的交联。形成的凝胶是胶体分散体, 在地层内可以缓慢流动。为使其不形成三维网络, 其聚合物浓度比较低(一般小于 500mg/L), 因此其注入的粘度很小, 注入过程中不会因使用而导致注入压力明显升高, 因而进入低渗透层的量相对较少, 并且是缓慢交联, 因而可以深入地层内部。

凝胶体系地层流体转向技术可视为聚合物驱油技术的互补和延伸, 它和聚合物驱相比具有所用化学剂量少、成本较低、投资回收快等特点。因此在某种条件下可以代替聚合物驱。该技术与常规聚合物凝胶调剖堵水也有差别, 由于它不仅包括对井底附近地层的凝胶体系处理, 而且凝胶体系可深入地层内部来调整渗透率剖面, 使地层流体转向进入到低渗透层中, 扩大波及体积来提高原油采收率。

凝胶体系地层流体转向技术中其化学剂与地层岩石、流体之间的相互作用对能否成功地使用该技术起着关键性作用。凝胶体系要在地层内流动, 因此其吸附、滞留作用、聚合物在地层内的水解、聚合物与交联剂与地层流体的配伍性、离子交换作用以及

各种化学剂和凝胶本身在地层中的热稳定性等都必须考虑。由于这项技术解决的是层内与层间的矛盾（主要是层内矛盾）势必涉及到地质、油藏工程诸多方面的问题，在方案设计中必须进行精细的油藏描述和数值模拟。因此除了高分子化学外，还需综合运用地质、油层物理、渗流力学、油藏工程等多学科的理论 and 知识，才能更好地应用此项技术，它已不是个单纯的工艺问题，而是一种扩大波及体积的提高原油采收率的方法。

在水驱过程中可以使用凝胶体系地层流体转向技术，聚合物驱过程中也可以使用。

## 第二节 凝胶布置的基本概念

本节主要给出了凝胶布置的一些基本概念，在这里所说的凝胶实际上是一种强胶，对深部凝胶处理未必适合，但所提及的概念对深部凝胶处理有重要的参考价值。

### 1. 基本概念

如图 1-1 所示，在水驱过程中，假设注入水沿高渗透层已达到生产井。凝胶体系处理由下列几步构成：

第一步，注入凝胶体系（图 1-1a）。

先注入与水的粘度基本相同的凝胶体系。由于凝胶体系粘度较低，使得窜流到低渗透层中的凝胶最少。

第二步，后冲洗（图 1-1b）。

注水将凝胶体系驱替远离井筒。必需注入足够的水，使高渗透层中的凝胶体系的后缘超过邻近低渗透层中的前缘。

第三步，关井产生凝胶（图 1-1c）。

第四步，恢复注水（图 1-1d）。

如果是注水井进行凝胶体系处理，则应恢复注水（如果是生产井进行凝胶体系处理，则应恢复生产）。

我们希望获得水从高渗透层改向到低渗透层的流动通道，这样可以提高波及系数。上述方案是可行的，它可以提供有力的注

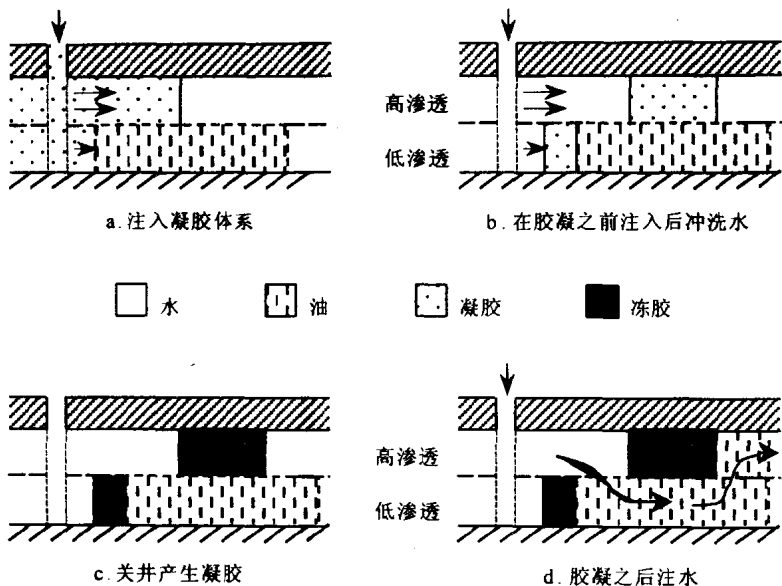


图 1-1 凝胶布置、后冲洗、胶凝过程和后续注水示意图

入特性。

## 2. 限制条件

必须认识到上述凝胶布置方案有几个限制条件。

第一，超过凝胶穿透油藏最大深度以外的区域，由于流体从低渗透层又重新返回到高渗透层，凝胶处理不再提高波及系数。

第二，胶凝时间是限制凝胶在油藏中穿透深度的一个重要因素。可以通过改变许多变量（例如：温度、pH 值、矿化度、凝胶成分）来获得所需的胶凝时间。如果凝胶处理仅局限在井筒附近的区域，那么这些变量对控制胶凝是有用的。然而，如果凝胶布置在距井筒较远的地层深部区域，那么胶凝时间的控制通常是有限的。如果油藏的流动通道是大孔道或裂缝，凝胶在交联之前就已穿透油藏很深的距离。因此，如果油藏的流动通道是由可渗

透基质岩石构成，为了达到深的凝胶穿透深度，需要一种具有很长的胶凝时间（至少几个月以上）的低粘度凝胶体系。

第三，凝胶体系的粘度和阻力系数不能太大是一个非常重要的限制条件。如果凝胶体系的粘度和阻力系数太大，凝胶体系可渗入低渗透层更大的深度。此外，凝胶在交联之前，凝胶将从高渗透层连续窜入低渗透层，这样会在高渗透层与低渗透层界面上形成凝胶堵塞。如果注入后冲洗水，这种堵塞将影响水从高渗透层流入低渗透层。

### 第三节 国内外发展概况

关于凝胶体系地层流体转向技术在室内渗流理论研究及矿场试验等方面，国内外学者先后发表了一些文献，其主要有：

#### 一、在室内实验研究方面

1988年 C.S. McCool 等对聚丙烯酰胺/ $\text{Cr}^{3+}$  凝胶体系引起渗透率下降机理进行了室内实验研究。实验是在柱状未胶结的填充砂模型中进行的，实验结果表明：凝胶聚集体的尺寸大小随时间不断增加，即表观粘度随时间不断增大。1987年 N.A. Mumallah 给出了一种评价弱凝胶的实用方法。该方法使用的装置为改进的筛网粘度计，在稳定流的条件下，可以测量弱凝胶的表观拉伸粘度，表观拉伸粘度随聚合物和交联剂的浓度及类型变化而变化。吴凤芝等对 PI-8203 的调剖效果进行了室内岩心评价。通过岩心实验结果表明：此调剖剂封堵强度高，堵水效率（堵水效率为调剖前后岩心渗透率的比值）可达 99% 以上，调剖前后中、低渗透率的岩心吸水量明显增大，高渗透岩心水相渗透率下降 26 倍，变得低于中、低渗透率岩心的水相渗透率。张祥云等研究了矿化度对交联聚合物成胶的影响，实验中采用聚合物为 HPAM，交联剂为柠檬酸铝，人工盐水，随矿化度的增高成胶时间缩短，粘度降低。Deborah 等对温度对聚丙烯酰胺/ $\text{Cr}^{3+}$  体系成胶时间的影响进行了研究；该凝胶体系随温度增加成胶时间缩短，成胶

时间是 NaCl 浓度的函数，随含盐浓度的增大，成胶时间缩短。在胶态分散凝胶体系室内研究方面国内外学者做了一些工作，Smith 等在 80 年代中期对部分水解聚丙烯酰胺和柠檬酸铝的交联体系进行了室内配方研究，于 90 年代中期提出了胶态分散凝胶（CDG）的概念。近几年，国内一些学者也对胶态分散凝胶体系进行了研究。

## 二、在渗流理论模型研究方面

1990 年 Todd 等给出了由氧化还原法就地生成聚丙烯酰胺凝胶的数学模型，该数学模型建立了考虑凝胶影响孔隙度变化的一维对流—扩散方程；1991 年袁士义给出了二维两相多组分地下交联调剖数学模型；1995 年时富庚给出了三维两项六组分油田化学堵水调剖数学模型。1996 年朱维耀对化学剂堵水调剖渗流理论进行了研究，建立了聚合物交联防窜驱油组分模型；田根林等对交联聚合物剪切特性及渗流规律进行了研究。

## 三、在现场试验及应用方面

目前，在国外聚合物驱试验项目较少，但凝胶地层流体转向技术受到广泛重视。该技术从 1985 年应用以来，国外已实施了近百次现场试验，Marathon 公司针对 Wyoming 北部油田有中等发育裂缝，注水开发中有早窜现象等问题实施了两次流体转向技术的矿场试验，第一次处理了 17 口水井、12 口油井，每口油井平均增产油  $848\text{m}^3$ ，每吨聚合物增油  $1300\text{m}^3$ ，处理每口水井增加可采储量  $34400\text{m}^3$  取得了明显的效果。第二次为扩大试验，处理了 26 口水井，8 口油井及 45 口水平井，共增加可采储量约  $20 \times 10^4\text{m}^3$ 。美国 TIORCO 公司 1985~1995 年总共实施了 37 个凝胶体系地层流体转向技术矿场试验，其中 31 个在经济上赢利，6 个试验失败，失败的主要原因是项目开始太晚，注水已到达后期，改善油藏的波及体积和克服油藏内水的循环和流型的余地不大，对油藏认识不够和完井不良导致窜流。从 31 个获得成功的项目中可以看出：适合注入凝胶体系进行深部流体转向的地层条件是：温度  $32 \sim 94^\circ\text{C}$ ，渗透率变异系数为  $0.5 \sim 0.9$ （油藏非均

质严重), 渗透率  $1 \sim 8500 \text{mD}^{\text{①}}$ , 含水饱和度  $65.6\% \sim 80\%$ , 孔隙度  $13\% \sim 22.4\%$ , 原油粘度  $1.1 \sim 40 \text{mPa}\cdot\text{s}$ , 水油比为  $0 \sim 59$ , 完井层段  $3 \sim 15.6 \text{m}$ 。累积注入凝胶体系量  $0.1\% \sim 15.8\% \text{PV}$ , 累计注水量  $18.1\% \sim 125.3\% \text{PV}$ , 提高采收率幅度  $0.3\% \sim 26.2\% \text{OOIP}$  (原油原始地质储量), 化学剂费用  $0.47 \sim 4.08$  美元/桶。如果油藏水油比大于 14, 提高采收率的幅度一般小于  $5.2\% \text{OOIP}$ , 因此, 凝胶体系注入时机越早越好, 越早越有利于大幅度提高采收率, 降低采油成本。凝胶体系注入量应较大, 至少要达到  $1\% \text{PV}$  才能有效地提高采收率, 而注入  $0.1\% \text{PV}$  仅能提高采收率  $0.3\% \text{OOIP}$ 。从经济上获得成功的实例来看, 1985~1987 年共实施 11 个项目, 化学剂费用统计平均为 1.71 美元/桶; 1988~1990 年共实施 9 个项目, 化学剂费用统计平均为 1.35 美元/桶; 1991~1994 年共实施 8 个项目, 化学剂费用统计平均为 0.97 美元/桶。化学剂费用逐渐降低, 从另一个侧面反映美国 TIORCO 公司注入的凝胶体系中聚合物的浓度趋于降低。

国内对这种技术也开始了试验, 胜利油田在实验室研究的基础上, 自 1992 年 8 月起, 采用聚合物与交联剂比为  $50 \sim 68$  的聚合物 HPAM 与 XL 系列交联剂驱油配方体系, 分别在孤东和孤岛油田 3 个区块或井区开展了交联聚合物驱油矿场先导试验, 取得了明显的增油降水效果。在孤东七区西注入交联聚合物  $0.12 \text{PV}$ , 累积增油  $3.54 \times 10^4 \text{t}$ ; 孤东三区注入交联聚合物  $0.04 \text{PV}$ , 累积增油  $0.95 \times 10^4 \text{t}$ ; 孤岛西区西 4-127 井组注入交联聚合物  $0.06 \text{PV}$ , 累积增油  $0.98 \times 10^4 \text{t}$ 。根据矿场先导试验中取得的经验, 在实施注聚合物的单元, 对低注入压力井, 在注聚合物初期采取了在注入的聚合物溶液中加交联剂的工艺, 增加注入液的粘度, 提高注入压力, 减缓注入的聚合物溶液过早窜流, 改善了聚合物驱油效果。这种交联聚合物驱实际上就是凝胶体系地层流体转向技术的一种。

①  $1 \text{D} = 0.987 \mu\text{m}^2$

大庆油田在南二区东部和北二区东部等区块进行了凝胶体系地层流体转向技术矿场试验，北二区东部试验区注入压力从 5.90MPa 上升到 8.93MPa，注入压力上升幅度达到 3.03MPa。两口中心井含水已由凝胶体系处理前的 90.0% 下降到 86.5%，含水下降了 3.5%，日产油由 7t 上升到 14t。

应用凝胶体系地层流体转向技术效果的好坏与油藏的地质条件、选取凝胶体系配方、凝胶体系的用量、凝胶体系的注入速度等因素有直接关系。

从总体上讲，在这个领域，国内目前无论在研究的深度和广度上都同国外存在着一定的差距。

通过上面几个方面的国内外文献资料调研，结果表明，利用凝胶体系进行地层流体转向技术已成为一种提高原油采收率的方法。

#### 第四节 需要解决的问题

尽管国内外学者已进行了许多室内研究和现场试验，但仍有许多基础理论和应用中的技术问题需要解决。

##### 1) 聚合物交联结构表征和凝胶体系评价。

聚合物交联结构表征和凝胶体系评价一直是高分子领域研究中的难点。由于聚合物凝胶体系或形成整体网络结构，或多个分子之间交联，它已没有单一分子的属性，不能用高分子溶液领域的经典理论和方法来准确表征；而对胶态分散凝胶体系在高分子溶液领域中，无论在基础研究还是在应用方面都是一种新的现象，目前还没有准确的表征方法。因此，很难对其机理、结构、流动特性和控制方法有充分的认识。胶态分散凝胶体系的评价方法和物理模拟技术也是尚未解决的问题。

##### 2) 延迟交联和成胶体系的选择。

##### 3) 凝胶体系的临界浓度及胶凝反应动力学和成胶机理。

##### 4) 油藏物性对凝胶体系成胶的影响。



5) 凝胶体系流变特性及渗流特性。

6) 凝胶体系对低渗透油层的伤害问题。

无论是聚合物凝胶调剖堵水还是交联聚合物驱油，对油藏低渗透油层的伤害和引起生产井产液量下降，一直是研究这种技术的人们最关心的问题。产生伤害的原因是地质条件不清或注入工艺技术不当，使凝胶体系进入低渗透层。

7) 凝胶体系的合理注入工艺技术。

进行施工设计和注入工艺的优化，并保证施工质量才能真正发挥地层流体转向技术提高采收率的作用。

8) 何时实施凝胶体系项目。

是在水驱前，还是水驱后或聚合物驱前，还是聚合物驱后进行凝胶体系深部流体改向？这些有待进一步深入研究。

9) 建立描述交联过程和凝胶体系流动特性的数学模型和相应软件的研制。

在深刻认识凝胶体系渗流机理的基础上，建立能够充分反映交联过程和凝胶体系流动特性的数学模型和相应软件的研制，这是成功应用此项技术的关键。

从目前国内外已有的文献资料看，利用数学、渗流理论方法来认识该技术的机理以及指导现场应用方面所作的努力很少，且模型过分简化。因此，有必要在充分认识凝胶体系渗流机理的基础上对凝胶体系地层流体转向技术渗流理论模型方面做些工作，研究其渗流机理，完善该渗流理论，进而进一步完善凝胶体系地层流体转向提高采收率技术，这无论从理论上还是实际应用上均具有十分重要的指导意义。

针对上述问题本书在下列几方面的工作进行了分析和探讨。

- 1) 凝胶机理、凝胶体系流变及渗流规律进行了探讨和研究；
- 2) 给出了三维两相九组分对流—扩散渗流数学模型；
- 3) 给出了凝胶反应及动力学模型；
- 4) 采用有限差分方法，给出了数值模型；
- 5) 数值模拟研究。