

'97

# 油田堵水技术论文集

刘翔鹄 主编



(北京)

7.6-53  
2

石油工业出版社

|     |            |
|-----|------------|
| 登录号 | 127313     |
| 分类号 | TE357.6-S3 |
| 种次号 | 002        |

# '97 油田堵水技术论文集

刘翔鸮 主编



石油0121108

石 油 工 业 出 版 社

## 内 容 提 要

本书精选 1997 年全国油田堵水工作会议论文 18 篇,内容涉及到全国各大油田各典型油藏的堵水技术及实际经验,反映了现阶段我国各类型油藏堵水的技术水平,同时也指出了今后的技术发展方向。

本书可供油田现场堵水工作技术人员与管理人员,及有关院校师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

'97 油田堵水技术论文集/刘翔翥主编.  
北京:石油工业出版社,1998.2  
ISBN 7-5021-2245-1

I. '9...

II. 刘...

III. 采油井-堵水-文集

IV. TE358-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 01792 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 13¼ 印张 327 千字 印 1—2000  
1998 年 2 月北京第 1 版 1998 年 2 月北京第 1 次印刷  
ISBN 7-5021-2245-1/TE·1874  
定价:25.00 元

# 《'97 油田堵水技术论文集》编委会

主 任:刘振武

副主任:曾宪义 刘万赋 刘翔鹑

委 员:胡博仲 吴 奇 罗治斌

李宇乡 戴瑞斌 张卫国

主 编:刘翔鹑

## 前 言

在第九次全国油田堵水技术工作会议上总公司科技局副局长刘振武和开发生产局总工程师刘万赋根据各油田代表的要求,确定出版论文集。经全国堵水技术协调组与各油田共同努力,将第八次全国堵水技术工作会议以来,在研究和实际生产中有新发展和新成果的18篇论文编辑出版,对进一步发展全国的堵水、调剖技术有现实的指导意义。

本书所选用的论文内容充实丰富,包括机理研究、筛选方法和决策技术、裂缝油藏堵水调剂、水平井堵水和选择性堵水等,做到了文章内容与油田开发实践紧密结合,采油工程与油藏工程紧密结合,突出了经济效益。本书还展望了“九五”期间堵水调剖技术的发展趋势和重点攻关方向。

论文集的出版是对全国近几年来堵水调剖技术工作的总结,将有助于相互交流,进一步推动堵水、调剖技术的发展,促进高含水油田的开发取得更好的效果。

本书对全国油田的采油工程、油藏工程技术干部和有关领导是一本很好的参考用书。

中国石油天然气总公司  
全国油田堵水技术协调组  
刘翔鹤  
1998.1

## 目 录

|                                                               |         |
|---------------------------------------------------------------|---------|
| 油田堵水、调剖技术的进展与展望 .....                                         | ( 1 )   |
| 大庆油田机械堵水技术的应用与发展 .....                                        | ( 25 )  |
| 胜坨油田特高含水期堵水调剖技术研究与应用 .....                                    | ( 33 )  |
| 龙 11 块以调剖为主的综合治理技术 .....                                      | ( 46 )  |
| PI 决策技术及其在区块整体调剖堵水中的应用 .....                                  | ( 57 )  |
| 区块整体调剖的 RE 决策技术 .....                                         | ( 68 )  |
| 吉林油田延迟交联深部调剖技术研究与应用 .....                                     | ( 78 )  |
| 中原油田砂岩油藏封堵大孔道技术 .....                                         | ( 86 )  |
| 裂缝性低渗透油藏提高波及效率研究与应用 .....                                     | ( 96 )  |
| 长庆低渗透油田堵水技术 .....                                             | ( 119 ) |
| 聚合物冻胶堵水调剖机理研究 .....                                           | ( 129 ) |
| 化学堵水调剖数值模拟研究及应用 .....                                         | ( 138 ) |
| 大港羊三木油田延缓交联深部调剖技术 .....                                       | ( 149 ) |
| 冀东油田复杂断块堵水新技术 .....                                           | ( 160 ) |
| 华北碳酸盐岩中小潜山油藏开发后期化学堵水挖潜技术研究 .....                              | ( 170 ) |
| 大庆油田化学堵水技术的研究与应用 .....                                        | ( 180 ) |
| 渤南油田五区沙三 <sub>9</sub> <sup>1-2</sup> 层高温低渗透砂岩油藏整体调剖技术研究 ..... | ( 186 ) |
| 活化稠油选择性堵水技术 .....                                             | ( 195 ) |

# 油田堵水、调剖技术的进展与展望

刘翔鹤 白宝君

中国石油天然气总公司勘探开发科学研究院

## 摘 要

本文论述了国内外油田堵水、调剖技术的新进展及其在油田应用的效果。结合我国油田特点展望了该项技术的应用和发展前景,并对今后发展提出了建议。

## 一、引 言

改善注水采收率技术是在老油田注水开发中后期的关键技术。国外在当前低油价的条件下,侧重发展了如下几项重点技术:包括改善注水技术,注水井调剖和油井堵水技术,水平井、多底井和侧钻井技术,老井重复压裂技术等。其中注水井调剖和油井堵水技术也得到了较快的发展。

我国“八五”末投入开发的 313 个油田,采出可采储量大于 60%,综合含水大于 80% 的油田有 118 个,动用地质储量占总开发地质储量的 74.9%,年产油量占陆上油田年总产油量的 73.0%。大部分老油田已进入高含水开发后期。

“八五”期间,我国的堵水调剖技术获得更快的发展。在机理研究、化学堵剂研制和油田区块整体堵水调剖等多方面取得了新进展,在改善注水开发效果方面取得了显著的成效。

## 二、调剖、堵水机理研究的新进展

### 1. 英国帝国理工医学院矿源工程系 Richard A. Dawe 教授的微观模型试验

#### 1) 模型

微观玻璃刻蚀二维物理模型,尺寸为  $25\text{mm} \times 50\text{mm}$  和  $50\text{mm} \times 110\text{mm}$ ,孔隙尺寸宽  $60 \sim 500\mu\text{m}$ ,深  $10 \sim 15\mu\text{m}$ 。

共采用四种模型:

- (1) 强亲水模型仅饱和盐水;
- (2) 强亲水模型有残余油;
- (3) 强亲水裂缝模型有残余油;
- (4) 亲油模型有残余油。

#### 2) 实验用化学剂

- (1) 黄胞胶- $\text{Cr}^{3+}$  凝胶 Xanthan flocon-4800, X-Link1000;
- (2) 聚丙烯酰胺- $\text{Cr}^{3+}$  凝胶 PAM Alcoflood 2545。

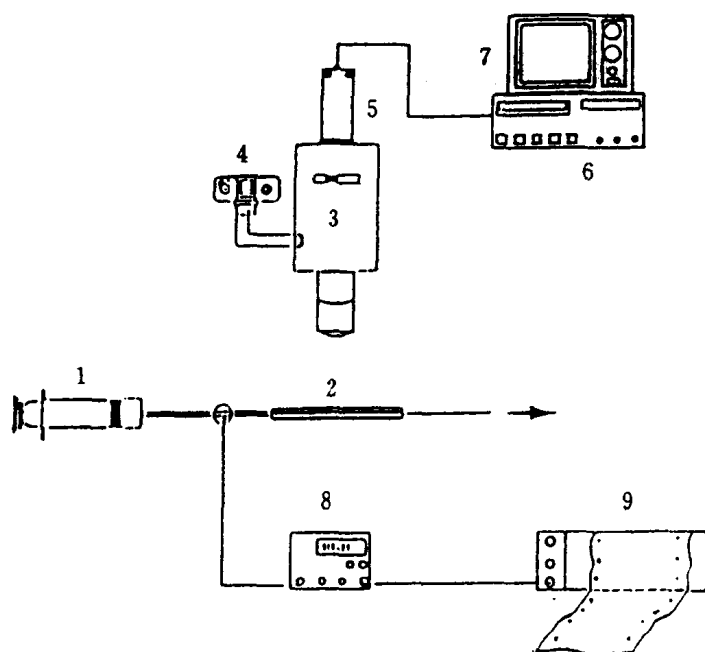


图1 微观模型实验流程图

1—注射器;2—微观模型;3—显微镜;4—照相机;5—可视孔;  
6—录相机;7—监视器;8—压力传感器;9—绘图仪

实验用油为精制油,其  $r = 0.796$ ,  $\mu = 2.0 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。微观模型试验流程见图1。

### 3) 实验结果讨论

(1)强亲水模型仅饱和盐水,凝胶处理后水驱凝胶的压力远远大于油驱凝胶的压力,判断为凝胶的堵水能力远远大于堵油能力(见表1及图2)。

(2)强亲水模型仅饱和盐水,岩心用凝胶处理后控制了水通过能力,而油流通道可逐步扩大。盐水只在孔隙中部穿过,而油流通过时沿途带走凝胶碎片并使凝胶收缩,逐步扩大油流通道。图3为油流通过被凝胶封堵的孔道。图4为水流通过被凝胶封堵的孔道图。

(3)强亲水模型有残余油实验结果表明,当岩心模型有裂缝时凝胶将裂缝堵住,大幅度地降低了水相的通过能力。

(4)亲油模型有残余油的实验结果表明,凝胶处于孔隙中部,油膜将凝胶孔隙壁隔开,封堵能力不大。

表1 油水驱替凝胶压力变化

| 岩 样 | 水驱凝胶压力, kPa | 油驱凝胶压力, kPa | 水驱凝胶压力, kPa |
|-----|-------------|-------------|-------------|
| 1   | 138         | 31          | 60          |
| 2   | 7900        | 102         | 7900        |

## 2. 美国新墨西哥石油研究中心物模研究

Jenn-Tai Liang, Haiwang Sun 和 R. S. Seright 对冻胶堵水能力大于堵油能力的原因进行了实验研究和分析。

### 1) 实验中使用的化学剂

- (1)间苯二酚—甲醛;
- (2)醋酸铬-HPAM;
- (3)乙二酚-CPAM;
- (4)12-羧基硬脂酸-Soltrol 130。

### 2) 实验用岩心

贝雷砂岩,其绝对水相渗透率  $800 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,长 14cm,直径 3.6cm。

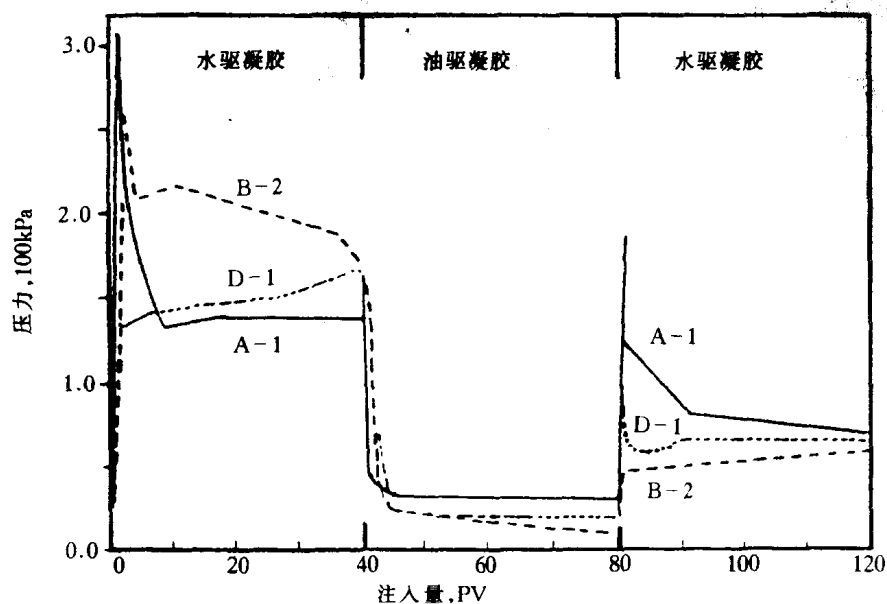


图2 油水驱替凝胶时压力的变化

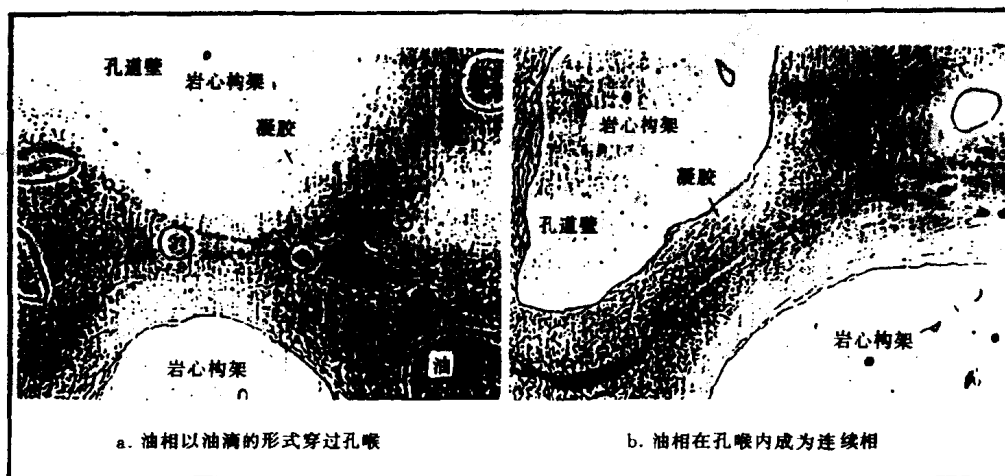


图3 油流通过被凝胶封堵的孔道

### 3) 实验用流体

#### (1) 油:

Soltrol-130 精制油,  $r=0.76$ ,  $\mu(41^{\circ}\text{C})=1.05\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

#### (2) 水:

盐水,  $\mu(41^{\circ}\text{C})=0.67\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

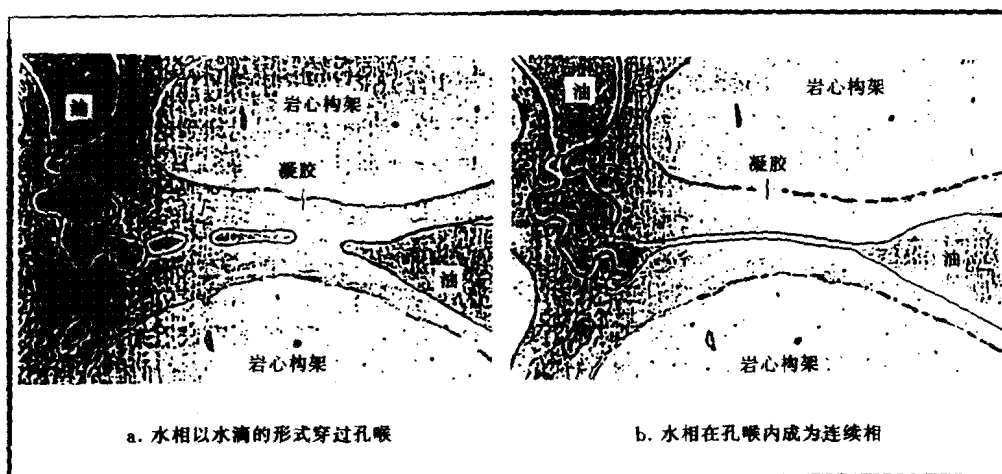


图4 水相通过被凝胶封堵的孔道

#### 4) 实验结果

在驱替过程中水和油的流动通道是各自分隔的,如图 5、6 所示分离的油水通道图,图 5 为水流通通道图,图 6 为油流通通道图。



图5 高含水通道图

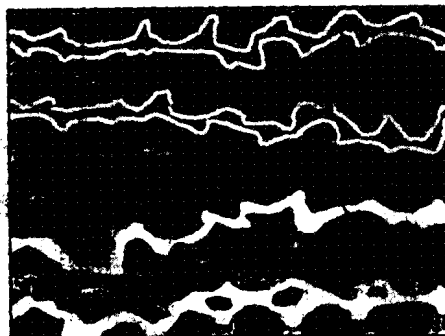


图6 高含油通道图

凝胶处理时,水基凝胶主要进入水流通道而封堵水流,对油流通通道影响不大。

#### 3. 调剖后注水速度与封堵效果的研究

根据美国新墨西哥石油研究中心 Seright 教授用黄孢胶和相同渗透率的贝雷砂岩岩心试验的结果,可以看出残余阻力系数随堵后注水速度的增加而减小,见图 7 注水速度对残余阻力系数的影响。

#### 4. 聚合物冻胶堵水、调剖机理的物理模拟和数值模拟研究

北京石油勘探开发科学研究院采油研究所与渗流力学研究所合作,用微观模拟技术和核磁共振成像技术研究了聚合物冻胶在多孔介质中的充填、运移和堵塞规律,初步从物理模

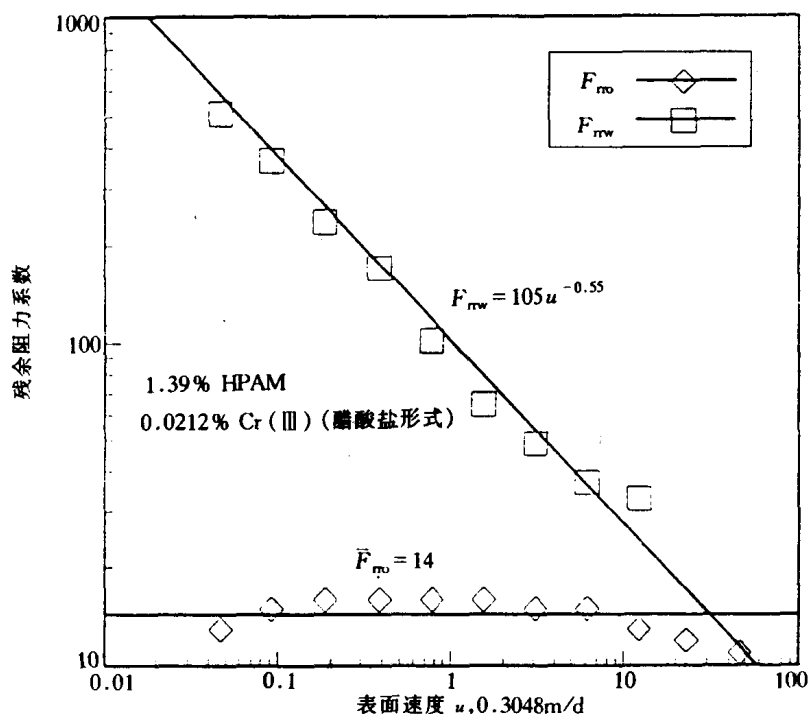


图 7 注水速度对残余阻力系数的影响

拟研究方面探索了聚合物凝胶提高注入水的波及体积、调整吸水剖面、改善水驱采收率的微观机理。研究结果指出聚合物冻胶首先堵塞原注水形成的水流大通道,迫使注入水重新形成新的旁通孔道,波及原未波及的区域,从而提高注水的波及系数,提高水驱采收率。

#### 1) 微观模型

参照河南双河油田检-2 井、检-210 井的岩心参数制成仿真模型。由 2mm 厚玻璃烧结,刻腐而成。模型规格为 6.5cm×6.5cm 和 14cm×14cm 两种外观尺寸,其图案尺寸为 4cm×4cm 和 12cm×12cm 两种,试验流程见图 8。

#### 2) 核磁共振成像技术(NMRI)及平面模拟研究

模拟试验在从瑞士 Spectrospin 公司引进的 47/40 超导核磁共振成像系统上进行。实验模型是两层非均质填砂模型。先将亲水模型饱和原油,进行水驱油至残余油后,用阴、阳离子聚合物堵水、调剖。流程见图 9、图 10。

注水井调剖模型尺寸:

长×宽(高渗宽+低渗宽)×厚=24cm×(7.5+7.5)cm×0.1cm,当水驱油含水率达 96% 左右时,进行注水井调剖,注入调剖剂,录相跟踪全实验过程。

实验及结果:

用 TP-910 调剖剂和阴、阳离子聚合物溶液作为化学堵剂。当模型中水驱油达到设计要求时注入 TP-910 调剖化学剂。TP-910 堵剂 80% 以上进入水流大孔道或称高渗透通道,

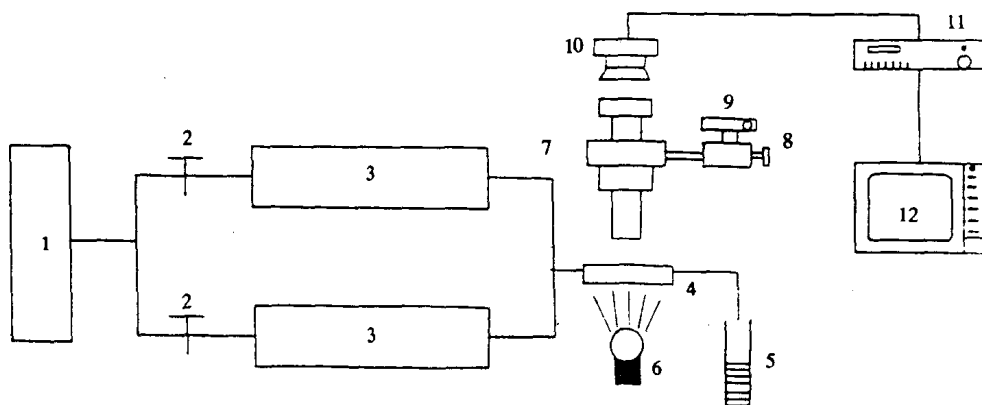


图8 微观模型试验流程图

1—微量泵;2—阀门;3—中间容器;4—微观模型;5—接样器;6—光源;  
7—显微镜;8—观察口;9—照像机;10—摄像机;11—录相机;12—电视机

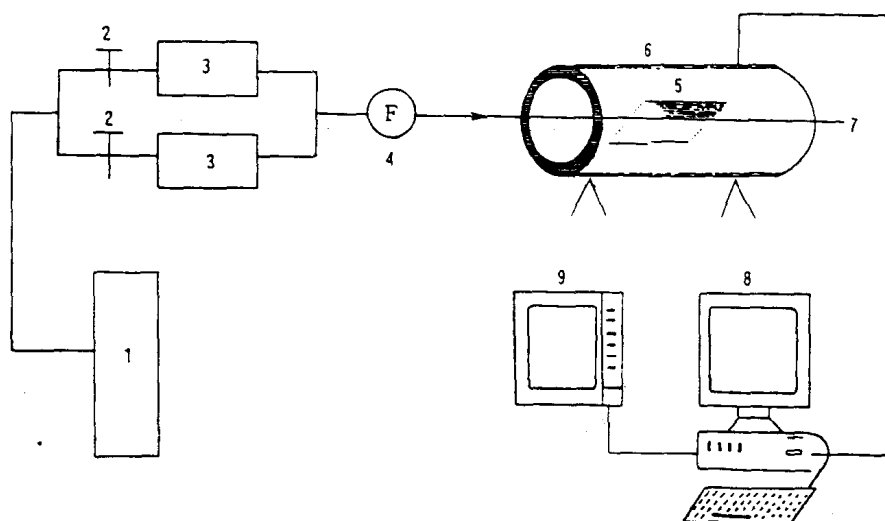


图9 核磁共振成像系统堵水调剖实验流程图

1—微量泵;2—阀门;3—中间容器;4—压力表;5—模型;6—核磁共振仪;7—接样器;8—计算机;9—彩色监视器

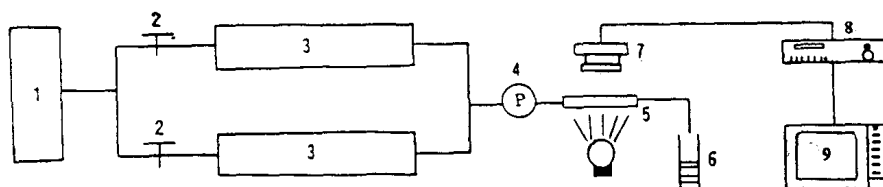


图10 核磁共振成像实验录像系统流程图

1—微量泵;2—阀门;3—中间容器;4—压力表;5—模型;6—接样器;7—摄像机;8—录相机;9—彩色监视器

地下交联后形成凝胶,堵塞原有大孔道。迫使后面的注入水绕过堵塞区,而形成新的旁通通道,波及原低渗透地区,提高波及效率。显微镜下摄像,图像如图 11~13。图 11 所示为注水形成的水流大通道,注入化学剂前,注入水主要沿此通道通过,而其它区域则未受到注入水的波及。图 12 所示为注入的化学堵剂进入原水流通通道,形成对原通道的堵塞。图 13 所示为原水流通通道堵塞后,注入水又形成的通道,从而波及到原未被水驱动用的储量。

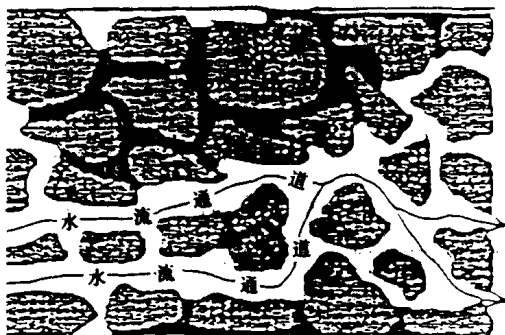


图 11 注入化学堵剂前的注水通道



图 12 化学堵剂进入水流大通道

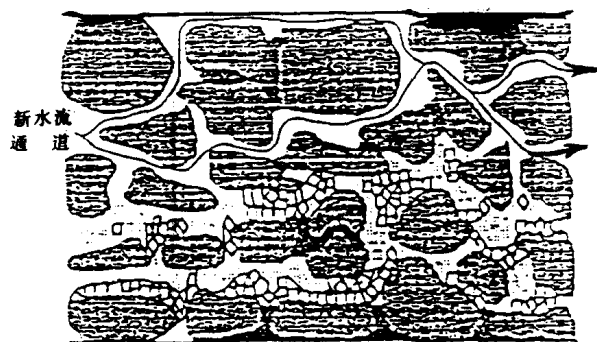


图 13 化学堵剂堵塞原水流通通道后形成新水流通道

以上微观物理模拟和核磁成像平面夹砂模型试验得出的结论是一致的,即聚合物调剖剂对高渗透大通道形成凝胶堵塞,从而迫使注入水选择新的通道,向原低渗透层突破,从而扩大了注入水的波及体积,提高了波及效率,提高了注入水的利用率。注入水进入低渗透层后使原来未被驱动原油驱替出来,从而提高了产油量和阶段采出程度。

### 3) 填砂长管模型实验

模型长 30.0cm, 直径为 2.368cm,

填入 50~80 目, 100~140 目两种亲水石英砂。

#### 实验和结果:

注入调剖化学剂 0.15, 0.20, 0.25, 0.30PV 四个实验。结果一致指出调剖后采出曲线斜率变缓, 含水明显下降, 提高了阶段的采出程度。实验曲线见图 14。该实验结果说明, 注入化学剂的段塞越大则可相对地提高调剖的效果, 如图 15, 说明当含水不同时, 进行调整吸水剖面的不同效果。

#### 4) 数值模拟研究

采油所时富庚博士研制了三维两相(油、水)六组分(油、淡水、聚合物、交联剂、凝胶、有效盐离子)数学模型。本模型考虑 13 个因素(重力、毛管力、流体和岩石的压缩性、可及孔隙体积、吸附、滞留、扩散、阻力系数、残余阻力系数、交联反应、剪切、降解、聚合物对水相粘度的影响等)。各参数遵循质量守恒方程, 假定流体流动遵循达西定律, 流体扩散遵循 Fick 定律, 软件模型的定解条件的内边界为线源(注水井)线汇(生产井)、外边界为封闭边界。模型

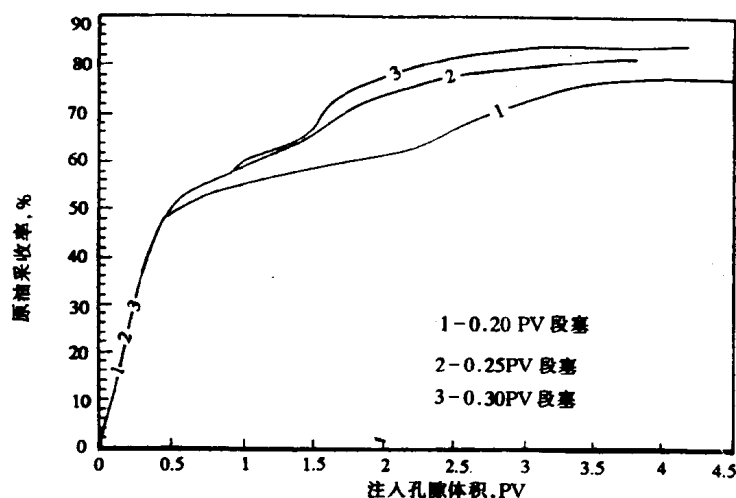


图 14 不同调剖时机实验的采出程度对比曲线图

求解采用有限差分法求其数值解。用 IMPECES (隐式压力, 显式饱和度显式浓度) 建立差分方程。

应用该软件对油藏进行堵水调剖的有关参数进行了初步研究。

(1) 调剖时机对调剖效果的影响, 见图 14。

水驱一年后含水 60% 时调剖较水驱三年后含水 85% 或水驱五年后含水 90% 时调剖可取得更好的效果。

(2) 调剖剂用量对调剖

效果的影响, 见图 15。

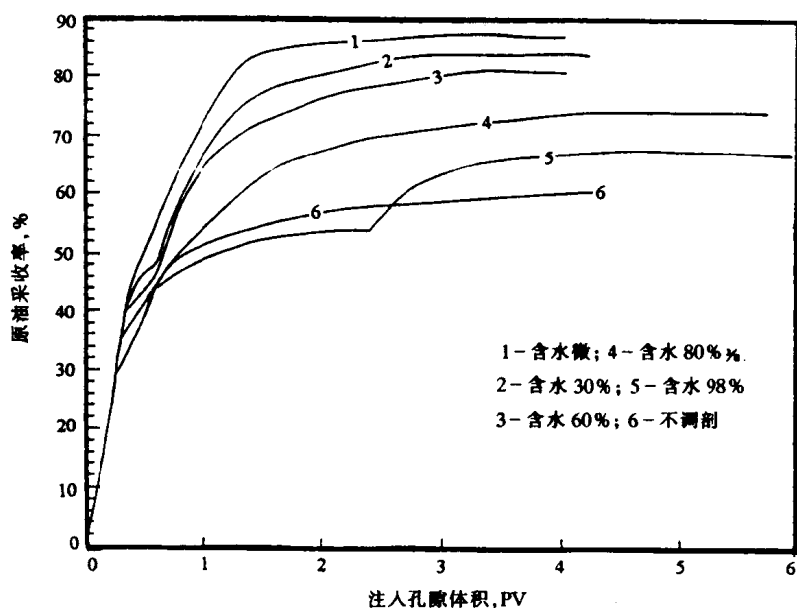


图 15 单段塞三种剂量调剖时注入孔隙体积与采出程度的关系曲线

大剂量较小剂量效果好。但当剂量达到一定限度后, 增加剂量对效果的提高不大。

(3)  $K_h/K_v$  值对调剖效果的影响, 计算结果如图 16 所示。

$K_h/K_v$  值越大, 调剖效果越好。当油藏含水 90% 时,  $K_h/K_v = 1000$  较  $K_h/K_v = 100$  或  $K_h/K_v = 10$  时取得的调剖提高采收率的效果更为明显。

### 5. 注水井井口压降曲线决策技术 [石油大学 (华东) 赵福麟教授]

原理: 利用注水井关井后井口压力随时间的变化曲线算出其压力指数:

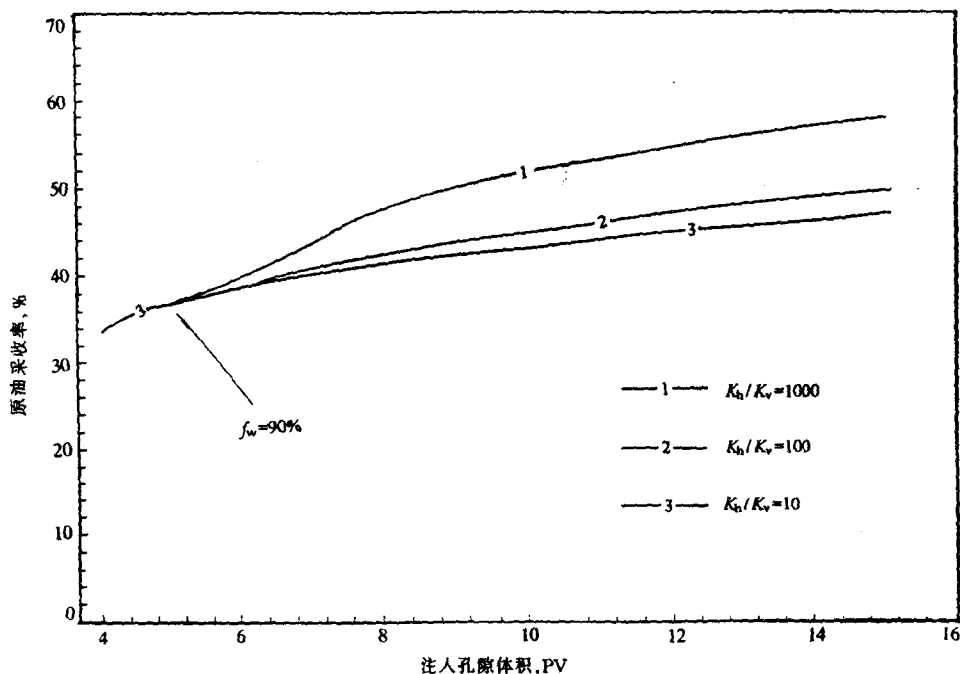


图 16  $K_h/K_v$  对调剖效果的影响

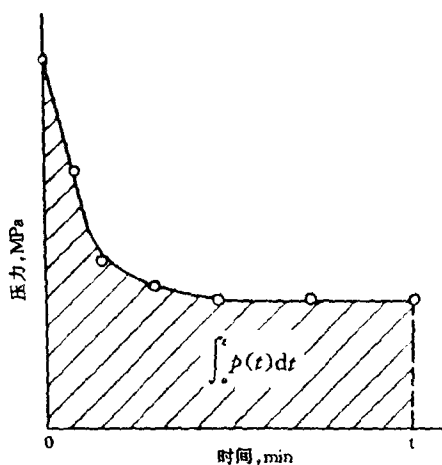


图 17 由压降曲线计算  $\int_0^t p(t) dt$  值

$$PI = \frac{\int_0^t p(t) dt}{t} \quad (1)$$

式中  $PI$ ——压力指数, MPa;  
 $p(t)$ ——注水井井口压力随关井时间变化的函数, MPa;  
 $t$ ——关井时间, min。

用油田区块中注水井的  $PI$  值的极差 (最大值 - 最小值) 来进行判别:

- (1) 区块调剖的必要性;
- (2) 注水井调剖的选定。

压降曲线见示意图 17。

6. RE 决策技术 [石油大学 (华东) 陈月明教授]

利用油藏参数和数值计算方法进行如下几方面的优选和决策。

- (1) 选井决策。
- (2) 单因素决策: 渗透率、吸水剖面、注入动态等。
- (3) 多因素综合决策: 选井, 多因素模糊决策。

- (4) 堵剂选择。
- (5) 注入压力确定。

### 三、深部调剖技术

#### 1. 美国 TIORCO 公司现场实验应用简况

1994 年前九年期间该公司在落矶山地区进行的 29 个油田深部调剖的项目中 22 个项目获得成功,19 个项目获经济上成功,取得了下列经验和认识。

- (1)处理层特点:高度非均质储层 Dykstra-Parsons 渗透率变异系数 0.80(0.5~0.9)。
- (2)处理层流体特性:地下原油粘度较高,地层温度条件下为10~20mPa·s。
- (3)处理层井底温度:50.55~96.67℃。
- (4)每个处理单元的原始地质储量:  $(18.59 \sim 206.8) \times 10^4 \text{m}^3$ 。
- (5)深部调剖的作用:处理油藏内部的不均质性,增加高渗透率出水层深部的流动阻力,使水流转向进入低渗透层。
- (6)处理用化学剂:先注入的胶态分散凝胶 CDG 为高分子量(1000 万以上)聚合物,低浓度 100~1200mg/L 后,注入 BG 冻胶,其注入次序为:

- ①阳离子聚丙烯酰胺,浓度 775mg/L;  
阴离子聚丙烯酰胺,浓度 1400mg/L;  
柠檬酸盐,浓度 1000mg/L;  
阴离子聚丙烯酰胺,浓度 300mg/L;  
柠檬酸铝浓度,300mg/L;
- ②本体凝胶 BG;  
阴离子聚丙烯酰胺,浓度 1500mg/L;  
醋酸铬,浓度 130mg/L。

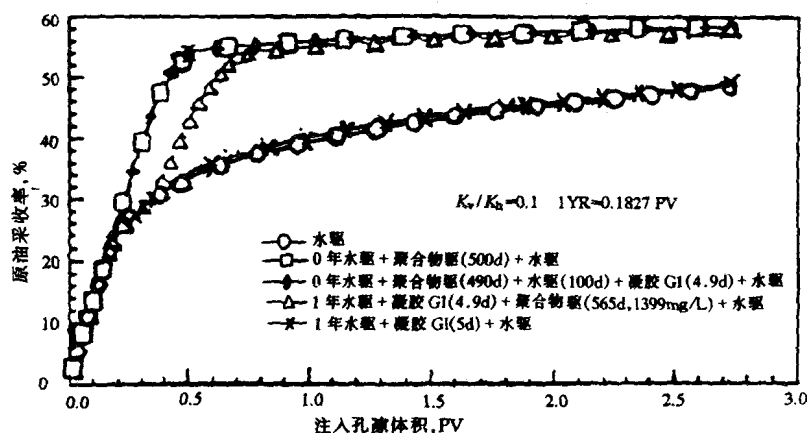
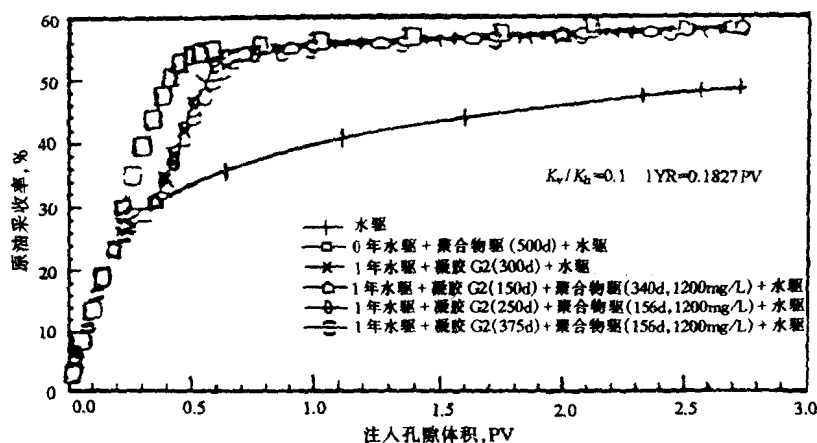
(7)作用原理:CDG 为水溶性、低浓度、高分子量聚合物冻胶,由阳离子聚丙烯酰胺和阴离子聚丙烯酰胺与柠檬酸铝交联而成。先注入阳离子聚丙烯酰胺吸附在岩石表面,再注入阴离子聚丙烯酰胺和柠檬酸铝,其中部分被阴离子聚丙烯酰胺吸附形成 CDG 冻胶,在一定压差下,可以流动进入油层深部。BG 体系是由高分子聚合物和醋酸铬交联而成,用段塞注入油层深部。

(8)数值模拟研究采用英国 BOAST 软件,在  $K_v/K_h=0.1$  时的处理结果为:

①单纯水驱与水驱并进行短期凝胶处理的效果相差不大,凝胶处理稍优;水驱后先进行凝胶短期处理,再进行聚合物驱,与聚合物驱后水驱和聚合物驱后水驱再进行凝胶短期处理相对比,初期效果有所差别,而最终趋于一致。凝胶处理对原油采收率的影响见图 18。

②长期凝胶处理效果较好,见图 19 深部凝胶处理对原油采收率的影响。除单纯水驱效果差外,其余三种方式,即直接聚合物驱后水驱、水驱后进行深部凝胶处理再水驱和水驱后先进行深部凝胶处理后再进行聚合物驱达到最终一致的效果。说明注水水驱后采用深部凝胶处理可以达聚合物驱相同的开发效果。

(9)应用实例:美国怀俄明州 Compbell North Rainbow Ranch 开发单元(NRRU),产层 Minnelnin,层深 2896m,为白云岩分隔的砂岩层。孔隙度为 19.7%,不均质系数为 0.74,原

图 18 凝胶处理对原油采收率的影响( $K_v/K_h=0.1$ )图 19 深部凝胶处理对原油采收率的影响( $K_v/K_h=0.1$ )

始地质储量为  $91.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 原油粘度为  $3.94 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  ( $94.4^\circ \text{C}$ ), 投产时间是 1973 年, 注水时间是 1984 年 7 月。总井数 14 口, 其中注水井 3 口。

CDG 处理时间为 1987~1990 年, 注入总体积  $15.56 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 相当于 10% PV。BG 处理在 1993 年注入总体积  $0.95 \times 10^4 \text{ m}^3$ , CDG 与 BG 总注入量  $16.51 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 相当于 11.7% PV, 总增油量  $7.23 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 相当于原始石油地质储量的 8%, 化学剂成本小于  $12.58 \text{ \$} / \text{m}^3$  油。见图 20、图 21、图 22。

## 2. “八五”期间国内深部调剖技术的新进展

目前主要有两种工艺技术, 即大剂量深部调剖技术和延迟交联聚合物深部调剖技术。下面结合油田情况做一简述。

### 1) 区块整体大剂量深部调剖技术