



中国石油天然气总公司

---

---

院士文集

---

中国工程院院士

---

王德民 集

---

---

中国大百科全书出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

中国石油天然气总公司 院士文集:王德民集/王德民著.  
北京:中国大百科全书出版社,1997.9  
ISBN 7-5000-5866-7

I. 中… I. 王… III. 石油工程-文集 IV. TE-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 18194 号

中国大百科全书出版社出版发行

(北京阜成门北大街 17 号 邮编 100037)

北京图文印刷厂印刷 新华书店总店北京发行所经销

开本 787×1092 1/16 印张 8.625 字数 154 千字

1997 年 9 月第 1 版 1997 年 9 月第 1 次印刷

**定价:117.00 元**



**王德民** 1937年2月生，河北唐山，1960年北京石油学院毕业。1986～1991年任大庆石油管理局总工程师。现任大庆石油管理局副局长、教授级高级工程师、博士生导师、中国科协常委、中国石油学会常务理事。1994年当选为中国工程院院士。

长期从事油田开发科研实践和科技管理工作，主要研究的“多层非均质砂岩油藏采油工艺技术”已在油田广泛应用；“聚合物驱油技术”已成为油田稳产的重要措施。多项成果获科技奖，其中作为主要完成者的“大庆油田长期高产稳产的注水开发技术”获1985年国家科技进步奖特等奖。

# 中国石油天然气总公司 院士文集

## 编辑委员会

顾 问 王 涛

主 任 周永康

副主任 马富才 吴耀文 史训知 李天相  
金钟超

委 员 (按姓氏笔画为序)

丁贵明	王显聰	石宝珩	刘宝和
朱秉刚	牟书令	沈平平	贡华章
陆基孟	张一伟	张友韬	张嗣伟
胡见义	徐世仁	高瑞祺	

## 序

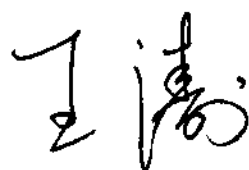
我衷心祝贺《中国石油天然气总公司院士文集》出版发行。这套由中国石油天然气总公司系统的中国科学院、中国工程院 13 位院士撰写的文集，集中了我国石油科技理论精华，是一部反映我国石油科学技术发展的代表作。它的编辑出版，是中国石油天然气总公司重视科学技术的一个重要举措，在我国石油科技史中占有重要的地位。

新中国石油工业的发展史，是一部“两论”起家，努力创建具有中国特色的石油勘探开发理论与实践的科技发展史。众所周知，旧中国的石油工业极其弱小，解放初期全国石油产量仅 12 万吨，不及现今全国 8 小时的产量。50 年代中期，我国发现了克拉玛依油田，推动石油产量超过百万吨。60 年代，我国以大庆油田的发现和开发为标志，实现了石油自给。70 年代，渤海湾地区胜利、大港、辽河、华北、中原等油田的相继开发，推动我国原油产量在 1978 年达到 1 亿吨，跨入了世界石油大国的行列。这些年来，我国石油工业贯彻实施党中央、国务院确定的稳定东部，发展西部，油气并举，发展海上等战略方针，保持了东部地区产量的基本稳定，大庆油田在年产 5000 万吨以上连续稳产了 21 年。西部地区在新疆塔里木、吐哈、准噶尔三大盆地取得了重大突破，开发建成了一批大型油田。在陕甘宁盆地、四川等地区新发现了一批大型气田。海洋石油形成了规模，继续保持了稳定发展。1996 年全国生产原油 1.57 亿吨，居世界第五位；生产天然气 201 亿立方米，居世界第 21 位。

这些成绩的取得，是我国广大石油职工在党的路线、方针、政策指引下，艰苦创业的结果，也包含了数十万石油科技工作者的创造性劳动。在我国石油工业艰苦创业、石油科学技术不断发展过程中，也造就了一大批理论造诣深、实践经验丰富、科研成果丰硕的石油专家、学者，两院院士就是其中的杰出代表。他们身上所体现出的热爱祖国、献身石油、勇于探索、百折不挠的精神是我们石油工业的精神财富，他们的理论与实践凝聚着建国几十年来石油科技的精华，代表了石油科技的总体水平。把两院院士们的理论著作和研究成果精选汇集出版，既是对前一历程的总结展示，又有利于后来者继承和发展。现在，13 位院士中，翁文波、童宪章、朱亚杰三位老先生业已作古，文集的出版也是对他们深深的怀念。

目前，我国石油勘探与开发工作更趋复杂和艰辛，石油工业的发展已更加依赖于石油科技的进步。在世界石油供需矛盾日趋尖锐、石油市场竞争日益激烈的

形势下，科技就是实力，谁掌握先进的科学技术，谁就是强者，谁就会赢得市场。我国石油科技工作者的历史责任重大，希望从事石油科技工作的同志们，认真地向院士们学习，努力掌握先进的科学技术，解决生产中的难题，把科技成果转化为现实的生产力，不断攀登新的高峰。祝愿我们的院士们在石油的二次创业中不断作出更多的新成果，祝愿我们石油系统涌现出更多的院士，出版更多的院士文集。

A handwritten signature in black ink, consisting of two characters: '王' (Wang) and '强' (Qiang), written in a cursive style.

一九九七年五月十五日

## 本书主要编辑、出版人员

总编辑 徐惟诚  
社长 单基夫  
副总编辑 吴希曾  
主任编辑 程力华

编 审 张友韬  
策 划 张友韬 孟 军  
责任编辑 程力华  
封面设计 高原  
责任印制 徐崇星

# 目 录

序 .....	( 1 )
大庆油田分层注采工艺技术 (1982) .....	( 1 )
大庆油田北区小型胶束/聚合物驱油试验 (1992) .....	( 12 )
大庆油田中区西部聚合物驱油矿场试验效果 (1993) .....	( 23 )
大庆油田聚合物驱油工业性试验 (1995) .....	( 40 )
大庆油田碱/表面活性剂/聚合物驱先导性矿场试验 (1996) .....	( 51 )
大庆油田北部萨 <sub>I<sub>10-16</sub></sub> 层聚合物驱先导性矿场试验 (1996) ...	( 68 )
大庆油田高含水期采油工艺技术 (1986) .....	( 83 )
不稳定试井方法在我国某油田的应用 (1963) .....	( 96 )
对多油层压力的某些认识 (1963) .....	(120)
编后 .....	(127)



# Content

Preface .....	( 1 )
Separate Production Techniques for Multiple Zones in Daqing Oilfield (1982) .....	( 1 )
Pilot Test of Micellar-Polymer Flooding in the Northern Part of Daqing Oilfield (1992) .....	( 12 )
Results of Two Polymer Flooding Pilots in the Central Area of Daqing Oil Field (1993) .....	( 23 )
Commercial Test of Polymer Flooding in Daqing Oil Field (1995) .....	( 40 )
Pilot Test of Alkaline Surfactant Polymer Flooding in Daqing Oil Field (1996) .....	( 51 )
A Pilot for Polymer Flooding of Saertu Formation S <sub>10-16</sub> in The North of Daqing Oilfield (1996) .....	( 68 )
Production Technology of Daqing Oil Field During Its High Water Cut Stage (1986) .....	( 83 )
The Application of Instable Well Testing in an Oilfield in China (1963) .....	( 96 )
Some Knowledge about Multiple Zone Pressure (1963) .....	(120)
Editors' Words .....	(127)

# 大庆油田分层注采工艺技术

## Separate Production Techniques for Multiple Zones in Daqing Oilfield

**摘要** 大庆油田是一个多层砂岩油藏。油藏非均质性、水的单层突进和层间干扰严重，为此成功地研制并使用了一套单油管多油层分层开采工艺技术，获得了较好的开发效果。

**Abstract** Daqing oilfield is a heterogeneous multizone sandstone reservoir. It had serious water channeling and zonal interference troubles; therefore, a set of single-tubing separate zone production techniques including separate zone injection, separate zone production, separate zone stimulation, and production logging, were developed and used successfully in the oil field.

### 引言

大庆油田投入开发 21 年了。针对油田面积大，边水不活跃，弹性能量低的特点，实行了早期内部注水，保持压力采油。但由于具有 40 多个小层，地下原油粘度 5~10 厘泊，油层渗透性差异大，当开采一口井时层段分的越少，其层段内差异系数（即各层段的渗透率均方根差异的厚度加权平均值）越大（图 1）。所以，注水后水沿高渗透层单层突进快，这就要求必须进行分层注采。

21 年来，大庆油田使用了一整套适用于中深井多层砂岩油藏的分层注水、分层采油、分层改造和分层测试等分层注采工艺技术。

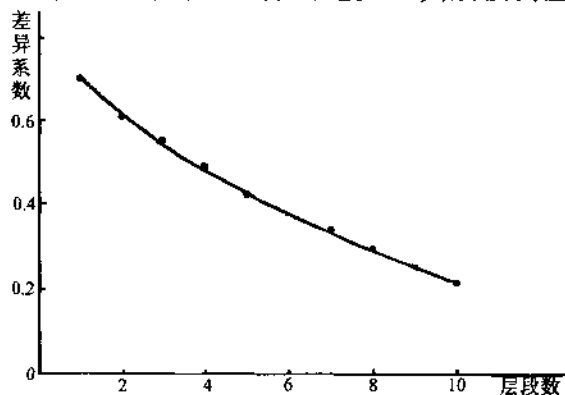


图 1 分层层段数和层段内差异系数关系曲线

## 一、分层注水工艺

油田实现早期注水后，油层压力得到保持，油井自喷能力旺盛。但笼统注水使注入水在地下产生单层突进，在生产试验区只几个月一口距注水井 250 米的排液生产井就见水了。萨尔图油田中部地区笼统注水 3 年，采出程度 5%，而第一排生产井有 60% 的油井见水，含水上升率高达 6~7%。为了扭转这种含水上升快的情况，使吸水剖面较均匀，油田使用了几套分层注水工艺。这些工艺主要由水井使用的封隔器和配水器组成。

首先研制了水力压差式封隔器，这种封隔器密封可靠，适应性强，封隔器外径 110 毫米，可在内径为 118~132 毫米的套管中使用；任何时候停注后，即可进行洗井；构造简单，操作起下方便。从 1963 年底开始至今，已大面积投入使用。其缺点是为膨胀封隔器要损失压力 6~8 个大气压。为了减小压力损失，节约能源，提高中低渗透层的注入量，研制了水力压缩式封隔器。此封隔器坐封后不需压力可保持密封，减小了压力损失。1980 年在喇嘛甸油田 290 多口水井上使用，使差油层和好油层变差部位实际增加的水量占总增加水量的 95.1%。在堵水井减少的情况下，1980 年底油田含水上升率比 1979 年底下降 1.44%。针对这种封隔器不能洗井的问题，研制了既保持原有优点，又可洗井的新型水力压缩式封隔器，最大洗井排量可达 32.6 米<sup>3</sup>/小时。

为了控制注水量，先后使用了固定式、空心式和偏心式配水器。

固定式配水器的水嘴用丝扣固定在配水器上，其优点是简单可靠，不需要附带的投捞机构，使用方便，曾在油田大面积使用。其缺点是调整水嘴必须起下油管。

由于大庆油田含水率逐渐上升和采油速度不断提高，采液量逐渐增加。为保持注采平衡，需不断调整注水量，这样每年起下油管的次数较多，所以使用了空心配水器。其优点是结构简单，用钢丝投捞水嘴，减少了起下油管的作业井次，其缺点是在 5 英寸套管中使用 2  $\frac{1}{2}$  英寸油管，这种配水器最多用 4 级，要调整最下一级的水嘴时，必须把上面各级捞出，所以投捞次数多。

为了克服上述配水器的缺点，进一步发展了偏心配水器，其优点是结构紧凑，长度为 99.4 厘米，调整水嘴方便，钢丝投捞，可以投捞其中的任意一级；可以多级使用，现场使用最多达到 14 级，油田已用它代替空心配水器，投入全面推广使用（图 2）。

大庆油田凡是油层需要、井况允许的水井都实现了分层注水。全油田从 1965 年以后，分层注水井占水井总数的 90~95%，注水井层间吸水剖面得到改善。从

1977 年以来,注水合格率一直保持在 70~79%。

由于油田渗透性差异大,在井口注水压力 100~150 大气压(井底压力接近或稍超过破裂压力)的条件下,高渗透层能达到配注要求,但有许多低渗透层的注入量达不到要求。由于注入量低,这些层的地层压力就低,在油井这些层就不能动用或动用程度差。为提高低渗透层的动用程度,使用了一套增注技术,包括洗井、土酸酸化、二氧化碳酸化、溶剂前置液酸化、注表面活性剂、胶束溶液增注、用暂堵剂选择性增注、压裂酸化、水井压裂和高压注水。

大庆油田中低渗透层存在多种堵塞,如铁锈堵塞,泥浆堵塞。因大庆原油凝固点为 25~30℃,注普通水时井筒附近油层温度为 15℃左右,低于原油凝固点,所以也存在原油堵塞。对于低渗透层,除上述原因造成堵塞外,还有本身渗透率太低,注入强度达不到要求的问题。根据油层的不同堵塞情况,采取不同的解堵措施。

(1) 洗井。原来达到注入量要求的井,发现注入量下降,首先根据注水指示曲线分析,确定油层是否堵塞。如果由于注入水带进了颗粒较大的铁锈等杂质,堵塞炮眼和井筒附近油层时,用洗井方法可解除堵塞(图 2)。在洗井过程中,只需油层吐少量的水,对大部分井都能恢复到原来的注入量,对仍然不能恢复注入量的井,一般由于堵塞物进入地层较深,应采用别的解堵方法。

(2) 铁锈、水垢、泥浆等杂质堵塞,采用土酸酸化。油田每年酸化 300 口井左右,平均单井日增注 40~45 米<sup>3</sup>。

(3) 原油堵塞,采用注表面活性剂、胶束溶液增注,平均单井日增注 20~30 米<sup>3</sup>。

(4) 原油、铁锈、水垢堵塞,采用溶剂前置液酸化,平均单井日增注 40~45 米<sup>3</sup>。

(5) 低渗透层,采用水井加砂压裂,平均单层增加水量 20 多立方米。

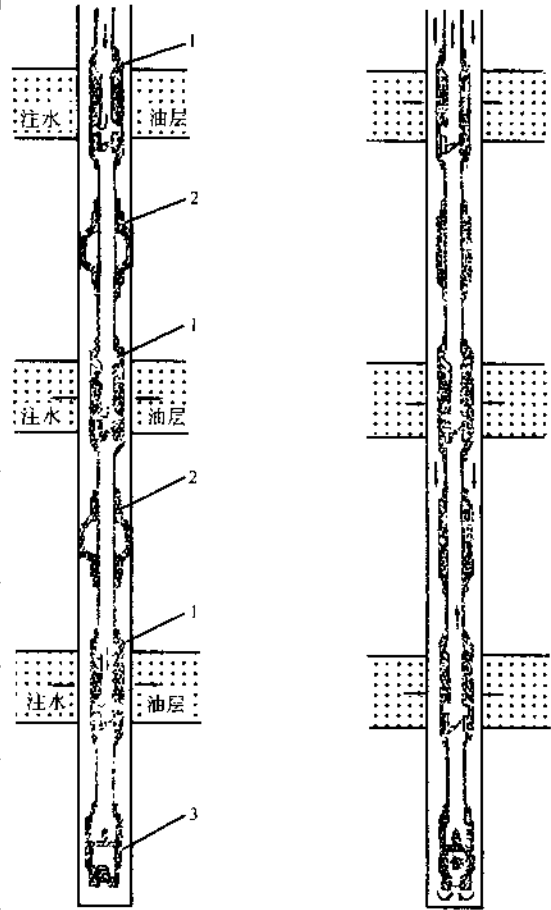


图 2 偏心配水及循环洗井示意图

1. 配水器; 2. 分离器; 3. 球座

(6) 需要增注的低渗透层和不需增注的高渗透层由于夹层过小，不能用封隔器隔开时，采用暂堵剂选择性增注，平均单井日增注 40 多立方米。

(7) 上述措施井的有效期为 0.5~1 年以上，所以水井改造工作量很大。为了减小工作量，全面提高中低渗透层的注入量，采用提高注水压力的增注措施。大庆油田形成的裂缝一般为水平裂缝，不会穿透夹层，所以允许在稍高于油层破裂压力的条件下注水，这时裂缝范围较小，不影响水驱扫油面积。1980 年底有 97.2% 的水井实现了井口注入压力  $\geq 130$  大气压注水。从实测资料看，一般注入量提高一倍，中低渗透层注入量提高更多（图 3）。

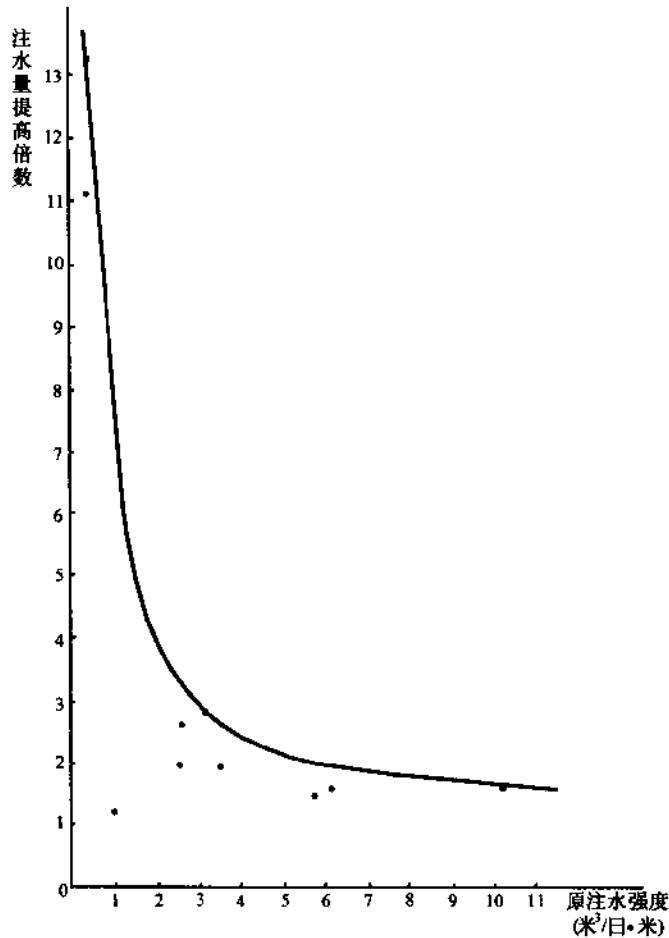


图 3 高压注水后注水量提高倍数与原注水强度关系曲线

由于采油速度开发初期不到 1%，到 1980 年提高到 2% 左右，加上油田含水上升，所以大庆油田注水量每年增加 8% 以上，在单层注水量不断增加的条件下，欠注层的百分比仍从 25% 降到 1980 年底的 15% 左右，使注水剖面更加合理。

## 二、分层采油工艺

分层注水虽然控制了注水量，但不能控制采液量，也不能控制注入水的流动方向，造成高渗透层采液量大，压力下降。因油田原油粘度高，饱和压力高，析蜡点高，如果压力下降过多，原油粘度会增大，这就必然影响开发效果。同时，注入水单层突进严重，对同一个层的注水井周围的不同采油井而言，在这口井注水量需减小，而在那口井注水量需增大。为调节高渗透层的地层压力和采液量，必须使用分层采油工艺，以调节平面差异和层间差异，限制高含水层的采液量，控制油井和油田的产水量，减少对低渗透层的干扰，提高低渗透层的产油能力。

分层采油工艺主要由油井封隔器和配产器组成。

首先使用了自封式封隔器。这种封隔器密封可靠，寿命长，但单向承压，必须成对使用。管柱复杂，起管柱不能解封，在高压条件下起管柱困难。接着又使用了结构简单的密闭式封隔器，这种封隔器寿命较短，不能解封时起出困难。

针对上述存在问题，研制并使用了水力挤压式封隔器。此封隔器结构简单，起出容易，但适应性差，只能适应套管内径 3 毫米的变化，所以现场一次成功率较低，只达 70%，同时寿命较短。

后来研制了水力压缩式封隔器。这种封隔器水力坐封，水力解封，适应性强，外径为 114 毫米的封隔器可适应套管内径 118~132 毫米，一次成功率 95% 以上，预计寿命 5 年以上，目前已大量使用。针对这种水力压缩式封隔器水力解封有时不易解封的问题，研制了保留上述封隔器优点，采用上提解封的新型水力压缩式封隔器，已在油田推广应用。

油田先后使用了桥式配产器和偏心配产器。桥式配产器结构简单，油嘴用钢丝投捞，现场使用可靠。其缺点是在 5 英寸套管井中，使用  $2\frac{1}{2}$  英寸油管，配产器级数受到限制，同时投捞次数多。

偏心配产器可不压井下入井中，释放封隔器的同时，可以打开出液通道，不需进行其他作业，开井后各层即可投入生产，可以多级，在萨 27 井达到 14 级。偏心配产器与桥式配产器相比，如分 4 层生产，都投捞测试一遍，工作量可减少 80%。偏心配产器已在油田推广使用。

上述两种配产器可以测分层压力、分层产液量、分层含水和分层原油物性，并可随时验证各级封隔器的密封性。

各种不同油层的采液量和注入量根据需要经常调整，每季度进行一次测试。为方便起见，偏心配产器和偏心配水器采用了一种新型的结构，在正常情况下，不用振荡器即可进行顺利操作，简化了工序，提高了时效。

偏心配产器在油井多层见水情况下，可多级使用，但超过 6~8 级时现场操作较困难。所以在多层见水的高含水井，采用非选择性化学堵水。

在低产能井和需提高采油速度的自喷井上安装了机械采油设备。为了控制含水，在一些机械采油井进行了分层配产，使用了由防顶卡瓦、活门、水力压缩式封隔器、偏心配产器和支撑卡瓦等组成的机械采油堵水管柱（图 4）。

对于油层压力差别大，高低含水层交错分布，层间干扰大，而且产能较大的油井，如果控制某层，虽然发挥了另外层的作用，但总的产能会下降，这样就只有下双管进行分采。油田使用了分采 3~4 层的双管分采管柱（图 5）。

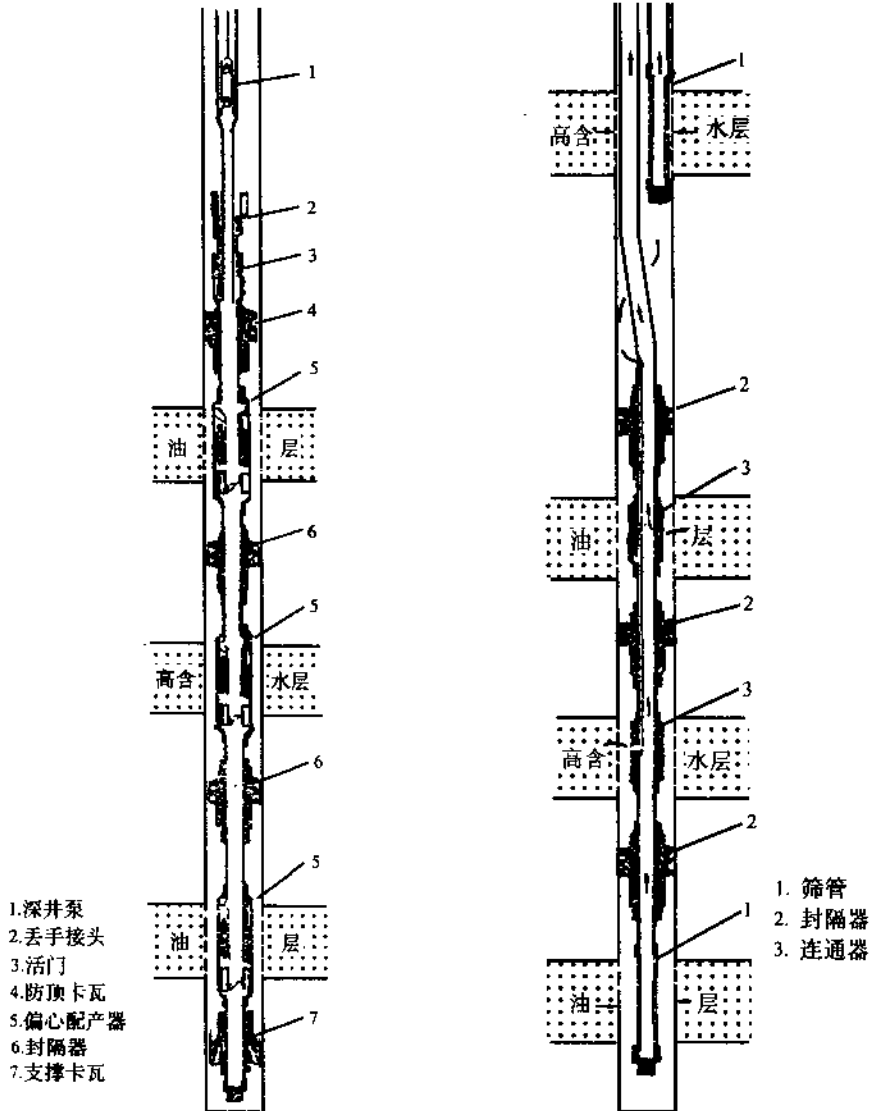


图 4 机械采油井堵水管柱示意图

图 5 双管采油示意图

分层采油，根据地下形势和油层产能进行配产，并堵掉高含水层，这样含水下降，井筒内液柱压力降低，井底流压下降，生产压差增加，使其他油层的出油能力增大。据此原理，推导出大庆油田自喷井、机械采油井和双管井配产堵水后产油量和产水量变化的公式。

### 1. 自喷井

在配产前后自喷井油压不变的条件下，产油量和产水量变化公式为：

$$\Delta Q_o = \frac{m(1-A_2)(A-A_2)Q_2}{\Delta P} - (1-A_1)Q_1 \quad (1)$$

$$\Delta Q_w = \frac{mA_2(A-A_2)Q_2}{\Delta P} - A_1Q_1 \quad (2)$$

### 2. 抽油井

在沉没度有余地，配产堵水前后抽油泵排量、泵效不变的条件下，产油量和产水量变化公式为：

$$\Delta Q_o = Q_1 \frac{(1.31-0.31A_1)(1-A_2) - (1.31-0.31A_2)(1-A_1)}{1.31-0.31A_2} \quad (3)$$

$$\Delta Q_w = Q_1 \frac{A_2(1.31-0.31A_1) - A_1(1.31-0.31A_2)}{1.31-0.31A_2} \quad (4)$$

### 3. 双管井

在下双管前后油压不变的条件下，产油量和产水量变化公式为：

$$\Delta Q_o = \frac{m [(1-A_2)(A-A_2)Q_2 + (1-A_1)(A-A_1)Q_1]}{\Delta P} \quad (5)$$

$$\Delta Q_w = \frac{m [A_1(A-A_1)Q_1 + A_2(A-A_2)Q_2]}{\Delta P} \quad (6)$$

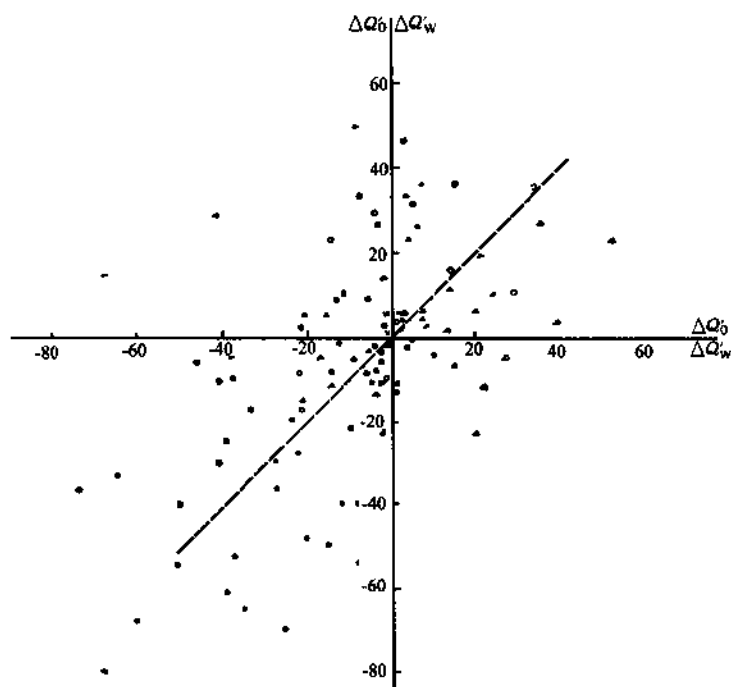
根据油井类型，分别按上述公式计算的预测油井产油量和产水量变化值与实际值 ( $\Delta Q'_o$ 、 $\Delta Q'_w$ ) 基本吻合 (图 6)。进一步提高吻合程度的关键是提高测试精度。

大庆油田进行配产堵水、化学堵水、双管采油，每年共达 300~600 多口井。1980 年，这三种类型油井日降水 12000 多立方米，日增油 1300 多吨，平均单井日增油 4 吨多，日降水 40 多立方米，相当于降低当年油田含水 1% 以上。

## 三、分层改造工艺

大庆油田油层多，渗透性差异大，过渡带等某些地方原油粘度更大，随着含水上升，采液强度越来越高，要保持油田 2% 的采油速度，就需要对中低渗透层进行改造。为适应大庆油田自喷为主，高低渗透层交错分布的特点，使用了分层改造工艺技术，包括不动管柱一次压多层的滑套式压裂管柱、水基凝胶高粘度压裂液、选择性压裂技术以及配套的井口装置和地面设备。





变化值	类型		
	自喷井	双管井	抽油井
$\Delta Q_o$ 与 $\Delta Q'_o$	○	△	×
$\Delta Q_w$ 与 $\Delta Q'_w$	·	▲	■

图6 自喷井、双管井、抽油井产油量和产水量变化值

(1) 针对油田高低渗透层、油水层交错分布，一口井一般需要压裂多层，井口压力又较高的特点，为了简化施工工艺，提高施工时效，研制了一套不压井起下、不动管柱一次压多层的滑套式压裂管柱（图7），从油田压裂的初期就推广使用。

(2) 为了提高压裂效果，油田采用了我国大量生产的田菁胶和海藻胶作为原料的水基凝胶压裂液。

(3) 许多厚层（>4米）有一些有平面延续性的不渗透夹层，在高含水后，还有很大部分未见水或低含水。这些厚层的出油剖面很不均匀。同时，这些高低含水层（或部位）不能用封隔器隔开。为了挖掘低含水层和厚层低含水部位的潜力，研制了采用暂堵剂的选择性压裂。这种工艺从1978年在油田推广使用以来，每年施工200多口井，单井日增油比普通压裂高。

从油田大量实践看来，压裂对于不同渗透率的油层增产幅度不同。一般面言，单层采油强度增加一倍左右，对于渗透率小于50毫达西的油层，可能由于堵塞比较严重，压后增产幅度很大（图8）。从1973年起，每年压裂350~470多口井，平