

大型砂岩油田高效开采技术

王玉普 著

DAXING SHAYAN YOUTIAN GAOXIAO KAICAI JISHU



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

大型砂岩油田高效开采技术

王玉普 著

石油工业出版社

内 容 提 要

非均质砂岩油田,其层间、平面和层内地质特性存在着明显差异,这些差异将直接影响油田最终采收率和经济效益。分层开采技术可以充分发挥各类油层的生产能力,提高各类油层动用程度,为油田持续发展提供技术保证。本书系统介绍了大庆油田在不同开发阶段采用的分层开采技术,尤其是近年来分层开采技术的新发展以及在油田现场的实际应用效果。书中分别阐述了分层注水、分层注聚、分层找堵水、分层压裂、储层酸化、厚油层层内挖潜等技术的发展和应用。

本书可供从事油田开发的技术人员、石油院校师生及研究人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

大型砂岩油田高效开采技术/王玉普著.

北京:石油工业出版社,2006.8

ISBN 7-5021-5602-X

I. 大…

II. 王…

III. 砂岩油气田-油田开发-大庆市

IV. TE343

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 073427 号

大型砂岩油田高效开采技术

王玉普著

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.com.cn

发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 15.25

字数: 386 千字 印数: 1—2000 册

定价: 60.00 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

前 言

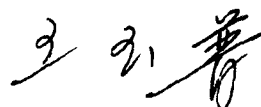
如何开发好大型砂岩油田，一直是世界上各国石油工作者在不断探索、研究和实践的问题。大型砂岩油田一般均具有多层、非均质的特点，其层间、平面和层内在地质和渗流特性等方面均存在明显差异，给油田开发带来很大困难。

大庆油田是一个具有 60~100 个小层，层间渗透率级差高达 60 以上的特大型多层砂岩油藏，非均质性十分严重。通过划分不同的开发层系，每口井仍有几个到十几个小层进行开采，各层之间以及单层在平面上的渗透率仍存在较大的差异，这些差异对油田注水开发效果影响很大。为了有效调整这些矛盾，大庆油田投入开发 40 多年来，针对油田开发不同阶段的需求，以高效开发为目标，自主研究和发了一整套分层采油工艺技术。40 多年的油田开发实践充分证明，这套以分层注水、分层找堵水、分层改造、分层测试等为主体的分层开采工艺技术的应用，在保持油层能量、提高可采储量动用程度、调整层间和平面差异、充分发挥各类油层生产能力以及认识和研究油层状况等方面发挥了重要作用，为实现油田长期高产稳产，为高效开发油田提供了重要技术保障。大庆油田的整体开发水平位于世界油田开发前列，一系列分层开采工艺技术达到世界先进水平。

大庆油田的分层开采技术是随着油田开发的深入不断创新、发展和完善的。譬如，在油田开发早期低含水阶段，研究应用了以水力压缩式封隔器相配套的分层注水工艺，在控制注入水沿高渗透层单层突进和平面上突进，造成油井过早见水和水淹等方面发挥了重要作用。在油田开发的中含水阶段，注水已全面见效，主力油层已多层多方向见水，油水层交错分布、层间和平面上矛盾加剧。在这个阶段，分层注水工艺得到很大发展，由固定式分层配水技术发展成偏心活动式配水配套技术，简化了施工工艺，满足了分层配注井大量增加的需要，提高了注水合格率。同时，分层找堵水技术、分层测试、分层压裂等技术也都取得很大发展，保证了油田有效开发的要求。油田开发进入高含水初、中期阶段后，主力油层已大面积水淹，油井已多层含水，产量递减加快。主要控潜对象已转向中、低渗透率的差油层，机械采油逐步成为主要采油方式。这时，分层开采工艺根据油田发展的需要，先后发展完善了机械分层堵水技术、化学堵水和调剖技术、投球法选压多裂缝技术和限流法完井压裂技术等，在调整开采层系、保持油田稳产方面发挥了重要作用。油田综合含水率在 80% 以上高含水后期开采阶段，油田的主要挖潜对象是剩余油分散的难采储层、具有薄隔层的低渗透薄差储层以及厚油层内水淹程度较低的部位。随着精细地质研究的不断深入，薄差油层逐步投入开发，对分层注水提出了细分的要求，为此创新了同心集成式细分注水技术、桥式偏心分层注水技术、偏心集成细分注水技术等，满足了细分注水要求，提高了测试效率和注水合格率。同时，机械和化学堵水技术、分层压裂技术、厚油层层内挖潜工艺、低渗透油田增产改造技术以及三次采油注聚合物驱工艺技术等都有了较大的发展。这些技术的应用，在注采系统调整、稳油控水、提高油田开发经济效益上，发挥了巨大作用。

本书粗浅总结了大庆油田在 40 多年开发实践中，采油工程技术人员研究和认识的部分成果，由于本书内容涉及面较广，作者水平有限，时间仓促，疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

本书在撰写过程中得到了大庆油田陈喜民、汪玉华、裴晓含、王研、王德喜、孙洪志、兰忠孝等同志的帮助，大庆油田几代采油工程技术人员更是为此做出了突出贡献，在此表示衷心的感谢！

A handwritten signature in black ink, appearing to read '王玉华' (Wang Yuhua), the author of the book.

2006 年 6 月

目 录

第一章 国外大型砂岩油田开采技术综述·····	(1)
第一节 国外多层砂岩油田的分布及开采状况·····	(1)
第二节 国外砂岩油田主要采油工艺技术·····	(5)
第二章 分层注水配套技术·····	(20)
第一节 注水系统优化设计·····	(20)
第二节 试注试配技术·····	(23)
第三节 分层配水工艺·····	(28)
第四节 测试工艺及配套仪器·····	(43)
第三章 聚合物分层注入配套技术·····	(61)
第一节 聚合物驱开发过程中的层间矛盾·····	(61)
第二节 聚合物分层注入技术·····	(62)
第三节 聚合物分层注入参数的选择·····	(68)
第四节 测试原理及配套仪器综述·····	(69)
第五节 聚合物驱分层注入效果分析·····	(72)
第四章 分层找水与堵水技术·····	(76)
第一节 油井找水技术·····	(76)
第二节 油井机械堵水技术·····	(81)
第三节 化学堵水技术·····	(89)
第五章 注水井化学调剖技术·····	(105)
第一节 化学调剖机理·····	(105)
第二节 体膨型聚合物颗粒调剖技术·····	(106)
第三节 注水井层间长效调剖技术·····	(110)
第四节 凝胶深度调剖技术·····	(112)
第五节 注泡沫调剖技术·····	(125)
第六节 化学调剖工艺及参数设计·····	(131)
第六章 分层压裂技术·····	(137)
第一节 分层压裂工艺·····	(137)
第二节 压裂液·····	(156)
第三节 支撑剂评价及选择·····	(172)
第四节 压裂施工设计·····	(176)
第七章 砂岩储层酸化技术·····	(195)
第一节 酸岩反应机理·····	(195)
第二节 注水井酸化技术·····	(201)
第三节 油井酸化增产技术·····	(209)
第四节 注水井酸化优化设计·····	(216)

第八章 特高含水期厚油层精细挖潜技术..... (221)

 第一节 厚油层开发现状..... (221)

 第二节 油藏精细描述..... (222)

 第三节 精细挖潜工艺..... (226)

参考文献..... (234)

第一章 国外大型砂岩油田开采技术综述

第一节 国外多层砂岩油田的分布及开采状况

一、国外多层砂岩油田的分布状况

目前,世界上大型非均质多油层砂岩油田主要分布在俄罗斯、美国、中国、中亚等国家和地区。

俄罗斯绝大多数油田属于非均质多油层砂岩油田。属大型油田的有萨莫特洛尔油田、罗马什金油田、阿尔兰油田、阿甘油田等。

美国的大型砂岩油田有普鲁德霍湾油田、钟溪油田、威明顿油田、东得克萨斯油田、托奇莱特油田、福多契油气田、克恩河油田、格兰普油田。

中亚地区哈萨克斯坦的乌津油田是一个多油层油气田,多层性和非均质性十分严重,从上而下可划分为 28 个层。储集层为砂岩和粉砂岩,属泥质胶结和泥质—碳酸盐胶结。

在其他地区主要有加拿大的帕宾那油田、乌克兰的多林纳油田等。

中国主要有大庆油田,吉林油区,胜利油区的胜坨、孤东、孤岛和埕东油田,辽河油区的兴隆台油田,江汉油区的王场油田,河南油区的双河油田等。

在上述油田中,较为典型的、与大庆油田较为相似的油田有萨莫特洛尔、罗马什金、阿尔兰、乌津油田、普鲁德霍湾、胜利、吉林等油田。

1. 萨莫特洛尔油田

萨莫特洛尔油田是西西伯利亚、也是俄罗斯的特大型油田,位于二级构造的下瓦尔托夫斯克穹隆的中部,自大塔尔霍夫穹状隆起范围内,连接萨莫特洛尔构造、马尔托夫构造、北萨莫特洛尔构造、别洛焦尔内构造和切尔尼果夫构造等几个三级构造。总的特点是构造复杂、油层多、岩性变化大,是一个由不同类型油气藏组合成的巨大油气田。储集层 AB 和 BB 层共可分为 50 多个小层,每个小层的平均厚度为 0.9~2.8m,总厚度 103m,渗透率变化范围为 $(300\sim 1100) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。地下原油粘度 0.895~2.4mPa·s,原油相对密度为 0.733~0.793,含硫量 1%,含蜡量 2%~3%。随着油层厚度增加,原油性质变好,饱和压力为 9.7~13.7MPa,井深 2000~2200m。

主要产层是下白垩纪的阿雷姆组 AB₁ 层,瓦尔托夫组的 AB₂₋₃、AB₄₋₅ 和 AB₆₋₇ 层,麦吉昂组的 BB₈⁰、BB₈、BB₁₀、BB₁₁ 和 BB₁₂ 层。

主要产层组总的特点是:AB 层占全油田可采储量为 50%,它的特点是厚度大、分层性强、非均质严重,常常是由薄砂层和透镜状的砂岩、粉砂岩和泥岩互层组成,AB₄₋₅ 和 BB₈ 层由细粒和中粒砂岩组成,其特点是岩性成分和厚度稳定,含泥量不超过 10%。

2. 罗马什金油田

罗马什金油田是伏尔加—乌拉尔地区最大的地台型多层油田,地理上位于鞑靼斯坦的东

南部。1943 年发现, 1952 年在完成大规模地质勘探工作以后主要开发层系投入开发。在泥盆系和石炭系共证实有 22 个层位, 其中 18 个层位是工业性油层。主要含油层为泥盆系的 Π_3 、 Π_2 、 Π_1 和 Π_0 油层。 Π_1 和 Π_0 层的沉积中含有这个油田最大的油藏, 是穹隆式层状油藏, 含油面积很大, 为 4255km^2 , 厚度在 50m 以上。油水过渡带占有相当大的含油面积。 Π_1 为陆源岩石的砂岩、粉砂岩和泥岩互层, Π_0 为砂岩和粉砂岩。

Π_1 层在剖面和在平面上都存在相当大的地质非均质性。平均总厚度为 28.2~46.3m, 平均含油厚度为 3.7~16.6m, 孔隙度为 18.2%, 渗透率为 $(339\sim666) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 含油饱和度为 0.691~0.834, 含砂率 0.259~0.520, 分层系数 5.3~1.2。

3. 普鲁德霍湾油田构造

该构造是一东南向倾伏的鼻状构造, 北面为一断层遮挡。在构造的北边和南边都有翼部下降的正断层。北边断层很多, 而且断距都很大; 南翼平缓, 倾角不到 2° , 是一个带气顶的油藏, 气顶高度超过 122m。

油田东西长 51km, 南北宽 19km, 构造面积约为 696km^2 , 含油面积约为 516km^2 。油田的产层有 3 个: 下白垩系的库帕鲁克河 (K 层)、二叠—三叠系的赛德勒罗茨特层 (S 层)、石炭系的利斯布尔尼层 (L 层), 其中赛德勒罗茨特层为主要生产层, 属二叠系—三叠系的河流—三角洲相沉积, 由砂岩、砾岩和泥岩组成, 平均地层厚度为 168m, 孔隙度为 16%~25%, 渗透率为 $(102\sim1020) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

二、国外大型砂岩油田开采状况

虽然国外大型砂岩油田开采阶段各不相同, 但也有其共同的特点, 大致可分为低含水采油阶段、中含水采油阶段、高含水采油阶段和特高含水采油阶段。在不同的阶段和时期, 世界各国的油田发展了各自不同的采油工艺技术。

威明顿油田东区开发一开始, 吸取了西区多层分采不成功的经验, 使用膨胀式套管外封堵器——标准封隔器 (外径大于套管直径 2in, 安装在套管上) 和特种间隙封隔器 (大于套管直径 1in, 在衬管上使用), 从 1965 年 9 月到 1971 年下半年已在 579 口注采井中下了 2220 个封隔器, 成功率达 92.6%。以后随着技术的改进, 封隔器安装成功率又有提高。

由于在向市场经济过渡中, 采油工艺所需设备的成本不断提高, 因此, 必须重新研究利用一口井同时分层开采几个油层的技术方法问题。1968—1972 年间, 前苏联曾对此种方法做过较多的探讨, 设计出 120 多种有关设备。1973 年在巴什基尔、鞑靼、阿塞拜疆、秋明、古比雪夫及彼尔姆油气区的 2500 余口注水井进行了同时分层注水工作。1975 年, 认为此项技术存在较多的缺点, 从而停止了实验研究工作。其实, 这一技术可以使钻探费用降低一半, 特别在钻井困难的永冻岩带经济效益更高, 减少采油设备, 降低油田建设费用, 提高开发速度, 改善低产油层的开采条件。据秋明油区估计, 使用此项技术每年可减少 $480 \times 10^4 \text{m}$ 钻探进尺, 自同时开采油层中获得 $2500 \times 10^4 \text{t}$ 油。在萨马特洛尔油田的两口井进行了试验, 获得成功, 1991—1995 年, 秋明油区计划 15000 口注水井中有 25% 使用此项技术即可获得可观的经济效益。

1. 普鲁德霍湾油田

普鲁德霍湾油田是世界上有名的高速开发的大油田之一, 也是美国产油最多的油田。该

油田自 1977 年正式投入开发以来, 经历过两个大的开发阶段, 即 1984 年 6 月以前, 主要以消耗地层能量方式开发, 以重力驱为主, 并结合气顶和边水驱; 第二开发阶段自 1984 年 6 月—1993 年为大规模实施注水保持地层压力和提高采收率方案阶段。为确保油田日产油量保持在 $21.4 \times 10^4 \text{t}$ 的水平上, 使最终采收率计划达到地质储量的 40% 左右, 制定了耗资 105×10^8 美元的 5 年计划, 该计划主要采取的措施有以下几点:

(1) 加密井网。从 1979 年已经开始, 使单井控制面积缩小到 $32 \times 10^4 \text{m}^2$ /井, 井网加密后, 主要产层井数达到 500 口, 可使采收率提高 4 倍, 耗资达 $(20 \sim 30) \times 10^8$ 美元。

(2) 注水。为保持油田稳产, 向油层注采出水和海水。分两期工程, 一期工程 1984 年投产每天 $15.9 \times 10^4 \text{m}^3$, 耗资 10×10^8 美元, 采收率提高 2%; 二期工程 1985 年投产, 每天注 $36 \times 10^4 \text{t}$ 经处理的海水, 耗资 $(15 \sim 20) \times 10^8$ 美元, 使采收率提高 4%~7%。

(3) 分期安装气举采油系统, 该系统耗资 $(15 \sim 20) \times 10^8$ 美元, 使采收率提高 5%。

(4) 安装低压分离器, 减小油层回压, 可增加采收率 5%。

(5) 在油田开展大规模混相驱方案。油藏研究表明, 混相驱开发增加的原油采收率将为原始地质储量 5.2% 左右。20 年混相驱开发方案采出原油 $2700 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

(6) 非常规井在油田的应用。非常规井是普鲁德霍湾油田开发方案中的重要组成部分, 它包括 4 种类型:

- ①高角度井;
- ②水平井;
- ③反向高角度井;
- ④排液井。

每种类型的非常规井在该油田都得以具体的应用, 每种类型的非常规井的选择取决于它的垂向渗透率的非均质性、断层及构造的倾斜程度和油藏的几何形状。这些井的产量较高, 注入能力很强, 该项措施是减缓水、气锥进以及开发边缘油气藏的一种有效方法。

该油田自 1977 年正式投入开发以来, 产量迅速上升, 1978 年产油量达到 $5362 \times 10^4 \text{t}$, 1980 年达到 $7503 \times 10^4 \text{t}$, 稳产 9 年一直到 1988 年产量在 $7000 \times 10^4 \text{t}$ 以上。从 1889 年开始产量下降到 $6806 \times 10^4 \text{t}$, 到 1980 年底, 累计采油量为 $9.6127 \times 10^8 \text{t}$, 地质储量采出程度为 27.86%, 可采储量采出程度为 61.89%, 到 1991 年底累计采油量超过 $10 \times 10^8 \text{t}$ 。

2. 萨莫特洛尔油田

在高含水期(油井采出液含水率为 91.3%)为了解决油田进一步开发和提高最终采收率等问题, 油田应用了系统分析方法, 对非均质严重的 AB_2+3 层开发后期进行强化排液及注水, 并利用数值模拟找出死油区及泄油弱的地区, 优化油井数量及其分布。研制成功并顺利推广了以下项目:

(1) 控制油井外来水窜的封隔板的安装工艺。

(2) 提高油层原油采收率和防止水窜的工艺。

(3) 采用油层深部正负交错反复降压和小规模水力压裂的方法净化油层附近地带的工艺。

(4) 进行了一系列工艺技术的研究和试验: 油井深穿透射孔工艺试验、水力冲击处理法试验、选择性控制油井水窜工艺试验, 在装备方面采用新结构的封隔装置和油层断流器。

(5) 多次地层水力压裂作业(同时隔离高含水段), 这类作业在 300 多口井上进行过,

多采出原油 $223.33 \times 10^4 \text{t}$ 。

(6) 选择性堵水。

(7) 钻水平井。

综合运用封堵与强化油流可以提高堵水效果和大修井成功率。1998—1999 年将两者综合应用后累计增油 $33.29 \times 10^4 \text{t}$ ，每口措施井平均增油 7.2t/d ，平均含水率下降 10.9% 。

目前在萨莫特洛尔油田推行的还有其他一些提高原油剩余储量开采效率的方法，包括在高含水油井选择性地隔离水淹段，在高含水带相位界面安装低渗透隔屏，成功率达到 84% ，含水率降低了 25% ，单井产量增长到 18.6t/d ，每口井多采原油 $0.41 \times 10^4 \text{t}$ 。

在今后的开采中，准备进行下列一些措施：

(1) 有效地开发 AB 层，包括专门为此而打的约 1000 口井；

(2) 大规模地采用石油开采方面的先进工艺，其中包括：

① 注入工艺；

② 粘弹性系统和沉积隔水系统；

③ 强化流动法，包括地层水力压裂；

④ 降低相位界面表面张力、促成油井采出液含水量降低和提高油层采收率的各种注水法。

3. 罗马什金油田

已进入开发晚期，其特点是采油速度低，油井含水高，难采石油储量所占比例由 27% 增至 85% ，油藏的平均含水率为 85.8% 。

1996 年在该油区 90 个地区进行了 38 种新的开发技术试验，已选择出 22 种，应用这些技术可使开发速度平均提高 $2 \sim 3$ 倍，采收率由 $10\% \sim 20\%$ 提高到 $25\% \sim 45\%$ 。新的开发系统不仅考虑油田的地质特点，还应考虑这种技术的经济条件。在市场经济条件下具有很大意义的技术如下：

(1) 在划分产层的科学依据时考虑储层特征及地层流体性质；

(2) 油田钻探顺序应按从已知到未知的原则加以确定，优化井口及井底的丛式布井，对于多油层的不同层采用不同的井网密度；

(3) 应用现代三维详查地震技术优化布井系统，以提高生产钻井的效果；

(4) 根据各种井网密度所钻产层开发指标的统计处理结果，优化井网密度及布井系统；

(5) 考虑油田不同开发阶段的压力保持系统；

(6) 对于油水过渡带及低渗和含泥质储层依靠独立系统开发；

(7) 利用本产层污水及地层水作为驱油介质。

罗马什金油田的阿尔梅奇耶夫区块自 1986 年起进行循环注水及改变渗流方向（水动力驱动）处理方法，以增加产量。至 1993 年，注淡水及回注采出水的数量降低近一倍，不但改变了生态环境，而且原油增产效果超过了计划指标。对罗马什金油田的别列佐夫、巴甫洛夫、米尼巴耶夫等 6 个地质条件近似区块的试验结果表明，利用水力驱动处理方法对提高原油采收率的效果比注聚合物或粘弹性处理剂的效果高得多。

罗马什金油田的微生物采油取得了良好的效果，利用的是地层中本源微生物，通过向注水井注入微生物和微生物营养物质，同时利用残余油活化微生物，以活化注水井地层中的本源微生物而获得驱油的物质。

第二节 国外砂岩油田主要采油工艺技术

一、分注、分采工艺技术

为了调整多油层油田的层间矛盾，提高驱油效率，降低成本，一些产油国家不同程度地应用了水井分注和油井分采工艺技术。但是，由于认识上的分歧和地质与工艺上的原因，这一技术在美国和原苏联两国只是在部分地区有条件地获得采用。例如，鞅鞅油区开采泥盆纪油层的一些油田，由于地质和工艺上的原因，实际上已不采用分注分采技术，他们认为在多油层油田上，开采层系细分，用单独井网开采，采用点状—选择性注水系统，更便于在油层开采过程中进行调节和控制。美国得克萨斯州的矿业保护法则明确规定，1口井只开采一个层，这样当然也就无需采用分采技术了。尽管如此，分注分采技术作为一项主要的采油工艺措施，从20世纪40年代开始在一些产油国家的部分地区获得了推广和应用。

1. 分层注水工艺技术

美国除用同心管、平行管分注以外，进一步发展了单管分注技术。单管分层注水技术主要有4种：偏心固定式配水技术、偏心活动式配水技术、同心固定式配水技术、同心活动式配水技术。在分层注水方面，美国的地面自调式配水器和井下自调式配水器在材质和使用寿命方面都达到了一定水平，大多数水井分注2~3层，个别情况下可分注7~8层。

当时前苏联除了油套分注、双管分注技术以外，1974年前后还推广了一种类似于水力压差式封隔器加固式配水器的分层注水管柱，此外还有一种偏心配水管柱。1口注水井一般分注2~3层。

2. 分层采油工艺技术

美国从20世纪40年代开始推广分采技术，前苏联从20世纪60年代开始采用分采技术。下面从3个方面概述一下美国和前苏联分层采油情况（主要是同井分采）。

1) 分采规模 and 水平

在20世纪60年代，美国每年投产的分采分注井约2000口左右，占每年完钻新井总数的5%，在这些分采油井中，分采两层的占85%，分采3层的占14%，分采4层以上的占1%。分采最深的井为6300m。

前苏联1965年全国的同井分采井数仅82口，到1974年初，已有各种分采方法共25种，分采工具达247种，分采的油井数为1500口，20世纪70年代后期，已有4500多口转为分采分注，绝大部分是同井分采两层的油井，很少同井分采3层或4层。

2) 分采方式

(1) 美国多层油田采用的主要分采方式如下：

①双油管单封隔器分采两层（上层抽油，下层自喷）。

②单油管单封隔器分采两层（油、套管分采，油管外侧装有压力计，可测分层应力，起油管后下层可以自动关闭）。

③单油管双封隔器分采两层（下层油走油管与套管环形空间，上层油走油管，上封隔器取出后，层与层之间仍不串通）。

④单油管三封隔器分采两层（利用上层的天然气举升两个层的油）。

⑤双油管双封隔器分采两层，双油管三封隔器分采3层（长管柱上带两级封隔器），双油管四封隔器分采4层（长管柱上带三级封隔器）。

⑥单管多级封隔器分采多层。

⑦双管三级封隔器分采4层。

⑧多管多级封隔器分采多层。

（2）前苏联使用的分采主要方式。

在自喷井中，主要有：

①同心管双封隔器分采两层。分采是靠两个封隔器来实现的，一个安装在套管和外管之间，一个安装在内外管之间，上层油走内外环形空间，下层油走油管。

②双管双封隔器或者三管三级封隔器分采3层的装置。

③单封隔器分采两层的装置。

在抽油井中，主要有：

①抽油井上层自喷下层抽油的分采装置，特点是允许对每层的产量分别进行调整，并可用现有的方法进行清蜡。

②水力活塞与自喷结合的分采装置，特点是水力活塞泵的工作液由油管注入，下层的采出液与用过的工作液混合再从环形空间采出，上层自喷产量也从环形空间采出，水力活塞泵停泵时，其产量为自喷产量，总产量减去自喷产量即为水力活塞泵产量。

③用潜油电泵分采两层的装置。

（3）同井单管分采和多管分采的比较。

多管分采就是在井内下入多根管柱，用封隔器将各个油层分隔开来，通过每一根管柱和井口油嘴单独实现一个油层（或一个层段）的控制采油。也就是说不仅能对每层的注采加以控制，而且也能分别集输。单管分采则是在井内只下一根管柱，用单管多级封隔器将各个油层分隔开采，在油管上与各油层对应的部位装一个配产器，并在配产器内装一个油嘴对各层进行控制采油。就是说对3层以上的井来说，只能做到在井下控制每层的注采，无法分别集输，也难以准确地计量。单管分采和多管分采的共同点是在按分层储量控制压差的条件下可提高原油产量和最终采收率，还可以大幅度提高开发工作的技术经济指标。所以说单管和多管分采都有它们的独到之处。

二、控制含水上升工艺技术

1. 控制注水工艺技术

1) 应用聚合物分散体系调剖

前苏联石油工业化学生产联合公司用由局部水解聚丙烯酰胺和粘土悬浮物组成的聚合物分散体系来提高注水波及系数。这种体系的作用机理是利用聚丙烯酰胺的絮凝作用，使粘土颗粒沉积在孔隙壁上，从而降低水淹层段的渗透率。该方法在罗马什金和乌尔也夫等油田试验区试验，工艺效果很好。

对注聚合物分散体系处理后流量计测井表明，吸水剖面有以下不同变化：

（1）原来不吸水的小层吸水，吸水厚度增加。

（2）在油层工作厚度不变的情况下，高渗透层吸水量下降，低渗透层吸水量增加。

(3) 在新油层投产时, 新的小层吸水, 高渗透水淹层停止吸水 (如罗马什金油田的 15752 号、14850 号等井)。

2) 生物调剖技术

利用生物细菌能够在非均质地层中堵塞高渗透层这一特性, 前苏联研究了向注水井注入有生命的细菌来提高注水波及范围, 并于 1966 年首先在阿尔兰油田的阿列克产层的 C₂ 层 (1455 号井区) 进行了采用和保持稳定存活状态的生物群试验。试验中使用了淡水淤泥和泥炭层含有的各种群类的天然微生物群。在注入前, 把微生物在地层液体 (原油和稀释的阿尔兰油田地层水) 环境中培养一段时间, 使细菌适应地层生活条件。通过 1455 号注水井将生物注入 C₂ 层。试验结果, 1455 号注水井吸水剖面得到调整, 油层射开厚度的注水波及程度从 66% 增至 100%。

3) 聚合物地层深部调剖技术

延缓交联聚合物地层深部调剖技术是改善非均质油藏水驱或聚合物驱的一套最具前景的配套工程。该技术是将聚合物溶液与交联剂在地面混合, 用单液法配制成调剖剂工作液, 并以大剂量注入地层深部, 在地层条件下缓慢交联, 形成具有网状结构、粘度可控的聚合物凝胶体, 借以封堵高渗透注水大孔道。交联反应时间可根据设计要求控制在 7d 或更长。当调剖剂中交联剂用量少到仅能在部分聚合物大分子内或分子间生成分子团悬浮体, 而整个体系并不形成连续网状结构的凝胶体时, 就称为聚合物微凝胶或胶态分散凝胶。用聚合物微凝胶代替传统的线型聚合物驱油, 可以减少聚合物的用量, 大幅度降低聚合物驱油成本; 用聚合物微凝胶进行注水井深部调剖, 可以达到选择性封堵注水大孔道目的。

20 世纪 80 年代美国 Tiorco 公司首先提出的胶态分散凝胶由 100~1200mg/L 高相对分子质量部分水解聚丙烯酰胺和阳离子聚丙烯酰胺与柠檬酸铝交联剂组成, 聚合物与交联剂之比为 20:1, 1985 年进入现场试验, 所进行的 29 次深部调剖作业有 22 次获得了经济效益, 提高采收率 1.3%~18.2%; Phillip 石油公司采用 1000~1500mg/L 阴离子或阳离子聚丙烯酰胺氧化—还原反应生成三价铬的延缓交联体系进行深部调剖, 平均每注入 1kg 聚合物可增产原油 1108L, 有效期超过一年。

2. 堵水工艺技术

注水开发油田高含水采油阶段, 封堵高渗透水淹层是改善和提高低渗透油层开发效果的重要措施之一, 特别是在储油物性差、吸水弱的区块, 应该封堵主力水淹层。

就堵水的时机来讲, 一般认为在含水为 70%~80% 时堵水为好, 但实际情况是油田含水即使达到 90% 以上, 仍可以有效地进行堵水。堵水工艺基本上可分为两种: 机械堵水和化学堵水; 各种堵剂达到上百种。下面简单介绍几种堵水工艺技术。

1) 水泥堵水工艺技术

国外应用各种水泥进行堵水的时间长、应用广泛。水泥堵水剂种类很多, 有水基水泥、油基水泥、改性的“索拉”水泥、泡沫水泥和水泥聚合物等。水泥堵水适用于下列含水井: 下部高渗透层夹层水、高渗透层底层水、油层和水层串通的含水井, 各分层压力相似的油层水淹层和吸收能力高的水淹层。国外应用的水泥堵水的工艺技术有以下几种:

(1) 用人工隔层封隔底水技术。当油井过早水淹适当的堵水工作是必须进行的。其必要性和适宜性已为杜玛兹油田的实践所证实。在该油田, 首先提出了保持地层压力情况下封堵底水的问题。

如果在油层中的油水界面高度或更高的地方存在厚度大于 0.5~1m 的粘土隔层,应当利用这些隔层作为隔断含水部分的基础,把堵水物质注到含水部分。在无隔层地层中则必须建立人工遮挡(或叫人工隔层)。遮挡半径应大于地层含水部分的厚度。根据 Дюлюи 公式求得流量变化与处理深度和地层中压降分布的关系,分析对比确定地层含水部分的最优处理半径为 5~10m。在处理半径为 5~10m 范围内,所建立的遮挡(人工隔层)应承受 0.5~1 MPa/m 的压力梯度。

在处理工艺中,使用粘度和密度均较地层水和堵水剂小的顶替液,把堵水物质挤到地层深处,提高处理效果。还要求顶替液与原油接触时具有较低的表面张力,并具有溶解沥青—胶质和石蜡沉积的能力。

对油层产油部分水泥环不严重的井封堵底水和下部水,可进行二次注水泥,也可以先压裂,后向压出的裂缝中挤入少量(1m³以下)水泥。

在水泥环严密无损的井中封堵底水:在产油层的油水接触面以上有粘土夹层或粉砂岩夹层的油井中,封堵底水时,可在粘土夹层或粉砂岩夹层以上 0.5~1m 处注水泥造成人工井底,或先在夹层与砂层的接触面上压裂,然后往裂缝挤入少量(1m³以下)水泥,以造成良好的水泥接触面。

在岩性单纯的油层中封堵底水:应在油水接触面上进行压裂。在预定井段所形成的裂缝中,挤入隔绝剂(100m³以下的粘原油和 2~3m³以下的水基或烃基水泥浆),使其成为一个人为的不透水层,长期保护油井不受水淹。

用以上方法封堵水层后,使油井人工井底平均提高 5m 多,最底排孔眼提高 0.5~12m。油层打开部分厚度缩小了 10%~74%。尽管如此,但产油量却增加了 50%。

堵水不应在所有油井上进行,应分析油井水淹原因分别对待。杜玛兹油田对投产后即迅速水淹的井、在生产过程中含水量突然增加的井等,采用人工隔层的堵水方法均获得了良好效果。

(2) 使用封隔器的水泥封堵方法。首先在原射孔井段以下 3~5m,但高于含水层的地方,对着粘土夹层或低渗透性的粉砂岩层射孔,然后在新孔眼和老孔眼之间坐上封隔器,用油管在高压下挤水泥。新射的孔眼在注水泥以后,被水泥塞封堵住。这种堵水方法具有下列优点:

① 由于补孔和坐封隔器,可以利用洗井,清除油管外的钻井液和水泥碎屑;

② 可以在上、下孔眼之间的管外空间填满水泥;

③ 可以防止水泥浆堵塞油层孔眼;

④ 由于水泥浆不是通过油层部分的炮眼挤出,不会和油混合,因而可以保证水泥凝固良好。堵水所用的封隔器如图 1—1 所示。

这种封隔器在循环冲洗时,位置不会发生错动。如需要留水泥塞时,不需要更动它的位置,从井内起出时,不发生抽空作用。罗马什金油田有 5 口井曾使用这种封堵技术,效果良好,如表 1—1 所示,这种方法对于固井质量不高引起油井出水的井都获得了良好的效果。

(3) 泡沫水泥浆堵水工艺。泡沫水泥浆是用水泥原浆(事先加入

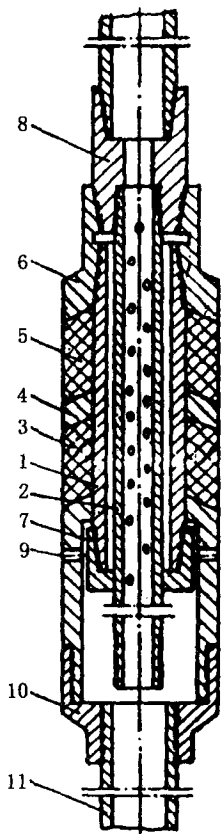


图 1—1 封隔器

1—外壳; 2—下支撑圆筒; 3、5—橡皮圈; 4—金属衬垫; 6—上部接头; 7—下挡圈; 8—锥接头; 9—两个孔眼; 10—大小头; 11—直径为 76~102mm 尾管

起泡剂，如烷基苯磺酸钠、溶解烷、ДС—РАС、ОП—10) 和由压缩机注入混合器—气化器内的空气混合而成。

表 1—1 罗马什金油田使用封隔器的水泥封堵效果

井号	油层射孔井段 (m)	新射孔井段 (m)	封隔器 坐封深度 (m)	挤入地层的 水泥浆量 (m ³)	修井前 产量 (t/d)	修井后 产量 (t/d)	修井前 出水量 (%)	修井后 出水量 (%)
1735	1633.4~1635.6	1662.6~1665.6	1661.8	1.3	0	175	100	0.4
	1636.6~1644							
	1650~1661.1							
1944	1632.4~1638	1640~1643.2	1639	1.1	0	9	100	3
713	1670.7~1692	1700~1701	1696	1.4	32	82	70	0.5
1904	1758.4~1762	利用下部孔眼	1772	0.85	7	45	7	0.6
	1781.6~1785.4							
1680	1779.8~1782	利用下部孔眼	1799.5	1.2	0	50	100	0
	1788.6~1797.2							
	1802.2~1803.6							

泡沫水泥浆是粘塑弹性系统，所以注入地层后，气泡粘附在水流通道的表面上，从而堵塞高渗透夹层。泡沫系统的相对密度低，有弹性，有利于泡沫水泥浆充分地波及它能够到达的地带。此外，表面活性剂中的气泡也加强了泡沫水泥浆的流动性和侵入性能。因此，在一定条件下采用泡沫水泥浆就可以解决一口井的若干问题，如：限制出水量、恢复管外水泥环密封性、封堵产层上下的外来水、封堵属于产层的地层水和注入水等。

泡沫水泥浆堵水，可以用以下两种工艺方法中的一种进行：

①高压挤水泥浆，然后从衬管井段冲洗出多余的泡沫水泥浆的注入工艺。

②挤注泡沫水泥浆，随后钻水泥塞。当地层吸收能力低，注入压力迅速上升，以及地层返出液体时，可采用挤注泡沫水泥浆，随后钻掉水泥塞的方法。

前苏联列宁油气开采管理局采用泡沫水泥浆堵水，原油产量增加 1 倍多，延长有效时间 42%。

(4) 水泥聚合物堵水。前苏联罗马什金油田研制了水泥聚合物堵水剂。水泥聚合物堵剂和水泥的区别在于配制水泥浆时，往水中调配一定百分比的环氧树脂—沥青质胶和适量的硬化剂聚乙烯聚酰胺环氧树脂在水泥浆中能保持水泥的高稳定性（静止 1h 沉淀不到 1%）不会影响钻井液的粘度及失水量。

罗马什金油田利用水泥聚合物封堵了 6 口油、水层窜通的出水油井，都获得成功。罗马什金油田还曾用水泥—聚丙烯腈堵水剂施工 84 口井，成功率达 78.5%。

2) 控制产出水的封隔器与喷射泵总成

美国雪佛龙采油公司及 Tam 公司开发出一套将可多次坐封的可膨胀跨式双封隔器和液压喷射泵结合起来的新型工具串总成，可有效地控制垂直井和水平井中的产出水。可重复坐封的膨胀式双封隔器同水力喷射泵相配合，能对短层段进行充分的压降测试。这种新方法供

测试多层使用,在波斯湾盆地的 McElroy 油田直井和水平井做试验取得成功,产出水由 $223\text{m}^3/\text{d}$ 下降为 $32\text{m}^3/\text{d}$,产出油则由 $0.95\text{m}^3/\text{d}$ 增加到 $7.8\text{m}^3/\text{d}$ 。

3) 控制油井外来水窜的封隔板的安装工艺

(1) 向生产井段注堵剂。如果射孔钻开的是一个或几个油水互层,或钻开了一个水层;如果在含油层和含水层间没有泥质夹层,可以采取选择性封堵措施。当地层的一个致密段被打开时向生产层段注堵剂(见图 1—2)。其特点是向井内注堵剂前后进行井温测量。

向地层注入经过计算的一定量的堵水剂(凝胶硅酸盐或粘弹凝胶),据注入前后井温测量对比结果确定注入剂实际吸收段,这可以正确确定实际封堵的水淹段,并且合理选择含油层作为工艺射孔段。在用水泥加固被注入的堵剂后,在堵剂未吸收段重新射孔。在选择封堵过程中,必须加固射孔段下部注堵剂段,而射孔段上部用于试油和生产,不用水泥覆盖,借助于捞砂筒在准确位置打水泥塞。

(2) 注堵剂选择性封堵下部水淹段。当地层几个层段被射孔打开和通过测井确定地层下段水流后,预先用水泥保护射孔上段,向地层底部注堵剂(见图 1—3)。

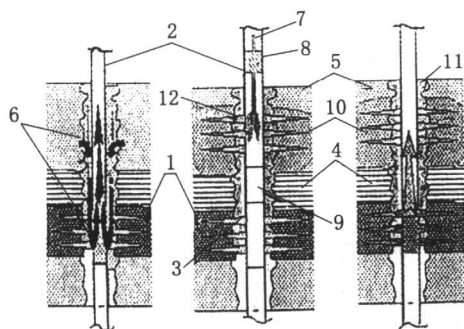


图 1—2 向生产层段注堵剂

1—含油层; 2—生产管柱; 3—工艺孔; 4—非储油层; 5—含水层; 6—水流; 7—油管; 8—封隔器; 9—水泥塞; 10—封隔屏障; 11—用堵剂封堵管外漏失; 12—专用孔

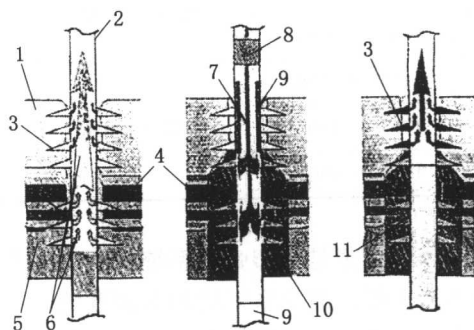


图 1—3 向地层底部注堵剂

1—含油层; 2—生产管柱; 3—工艺孔; 4—非储油层; 5—含水层; 6—水流; 7—油管; 8—封隔器; 9—水泥塞; 10—封隔屏障; 11—专用孔

通过填充与前述方法不同的砂石封堵上覆盖水流,可以降低重射孔费用,保护好用于注专用堵剂的射孔。用水泥塞加固已装好的屏障后对生产层重新射孔。

4) 用聚丙烯腈堵水

1969—1974 年苏联使用聚丙烯腈堵水最多,在鞅鞅地区封堵了 500 口井。与水泥相比,聚丙烯腈的优点是能够较容易地进入多孔介质和对矿化水有选择性,而对油则呈惰性,另外施工工艺简单。在原油中,聚丙烯腈仍为液态并可从地层中返排出来,这种性质对堵水是非常有利的。

5) 用部分水解聚甲基丙烯酸(絮凝物)堵水

室内实验证明絮凝物的水溶液对改变孔隙介质水油饱和度具有选择性作用。如在鞅鞅地区用絮凝物进行了现场堵水试验,效果很好。在罗马什金油田捷林诺高尔区的 8452 井,1973 年 11 月堵水前产量 $15\text{t}/\text{d}$,含水 82%。1973 年 12 月用水解甲基丙烯酸堵水后,油井产量为 $20\text{t}/\text{d}$,含水降至 50%。处理后产水降低的有效期保持 24 个月以上。工业试验证明,只要选井和工艺得当,絮凝物溶液限制水流是有效的。