



高等院校石油天然气类规划教材

生产测井原理与资料解释

郭海敏 戴家才 陈科贵 编著



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

高等院校石油天然气类规划教材

生产测井原理与资料解释

郭海敏 戴家才 陈科贵 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要介绍了生产测井方法原理、资料解释及其应用。全书分 12 章, 内容包括生产测井信息处理基础知识、注采剖面测井技术、套管井地层参数测井技术、套管工程检测技术、射孔工艺原理、生产测井资料解释与综合应用等。

本书为石油高校相关专业的教材, 也可作为油田相关工作者的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

生产测井原理与资料解释/郭海敏, 戴家才, 陈科贵编著.

北京: 石油工业出版社, 2007. 4

高等院校石油天然气类规划教材

ISBN 978-7-5021-5897-2

I. 生…

II. 郭…

III. 生产测井-高等学校-教材

IV. P631. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 159583 号

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

2007 年 4 月第 1 版 2007 年 4 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 22

字数: 558 千字 印数: 1—2000 册

定价: 30.00 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

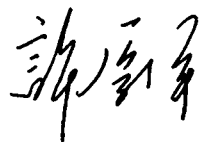
序

地球物理测井是石油工业发展中的重要学科之一，长期以来在石油勘探开发中发挥着重要作用，勘探测井被称为寻找油气田的“眼睛”；生产测井被油田工程师称为开发的“医生”。生产测井是测井技术中的两个重要分支之一，主要用于油田开发生产驱油效率的动态监测。监测方法是采集储层在二、三次采油过程中的动态变化信息并对所测得的信息进行综合分析，可以得到油气水的分布动态，由此了解整个油区的开发生态，从而为调整、优化开发方案及提高原油采收率提供科学依据。生产测井的内容主要包括工程测井、注采剖面测井、套管井地层评价三方面，利用这些结果可以直接观察到流体界面的动态位置，分析注入的水或聚合物前缘的变化，同时可以得到井眼及井周几何特性变化规律及现状信息。

本书论述了涉及生产测井过程的几个主要方面，从注采井网部署、流量、压力、含水、温度、密度测量应用到资料综合解释；从射孔产能预测、水平井测井、套管井地层评价测井、工程测井到综合应用，基本上涵盖了整个生产测井技术涉及的各个领域；内容范围从传统方法到新技术应用，均进行了深入浅出的论证，并把作者多年来的研究成果包含在整个著作体系中。通过本书的学习可以了解注采井网部署与注采剖面的关系、产能与射孔的关系、产能与剩余油的关系、传统生产测井工艺与现代生产测井技术的关系。整个内容把测井技术与油藏动态有机结合起来，使读者不但能清楚地了解相应的测井技术，也同时能清楚地知道如何利用处理结果去评价整个油田的生产动态，从而达到了拓宽生产测井工作者视野及知识面的目的。

国民经济的持续发展对石油资源的需求日益增长，除了寻找新的石油资源之外，更重要的是对老油区进行挖潜，提高相应储集层的油气采收率，因此生产测井技术无疑将会发挥越来越重要的作用。本书作者在有关章节中也加入了涉及生产测井发展的一些新技术，如持率成像测井、RST 持率测井、测井多相流动优化解释技术等。总之，希望本书的出版能为生产测井工作者提供分析问题的新方法，并开阔观察问题的视野，同时也希望本书的出版能为我国石油工业的发展作出更大贡献。

中国科学院院士



前 言

生产测井是指在套管井中完成的各类测井,包括注采剖面测井、工程测井及套管井地层评价测井,目的是监测井眼几何特性及注采动态。随着现代生产测井技术的发展,现在已经可以在套管井中确定动态地层参数;在油藏动态描述中,可以用注采剖面信息确定剩余油饱和度的分布及不同油层的油藏压力和渗透率。随着油田开发的不断深入和面临问题的日益复杂,生产测井技术将发挥越来越重要的作用。

生产测井技术的发展始于20世纪30年代,最初只研制了温度计;40年代又研制了压力计和流量计,当时这些仪器只能单参数测量;50年代开发了综合产出剖面测井仪器,一次下井可以同时采集流量、压力、温度、持水率、流体密度等多种信息。进入21世纪之后,流动成像测井、水平井生产测井及特殊生产测井技术日臻完善,相应处理方法也取得了长足的进步。

长期以来,我国生产测井工作者主要把研究注意力集中在单井数据采集和相应信息处理方面,对于处理结果的油藏应用了解较少,出现了一些“只见树木,不见森林”的现象。作者从拓宽生产测井工作者应用知识面的目的出发,在总结十余年来从事研究生、本科生及专科生教学经验的基础之上,结合与油田长期合作的研究结果,完成了本书的编写工作。本书的内容涉及油藏工程、流体力学、渗透力学、电子学、传感器原理等多门学科的知识,新增了水平井测井、MDT、射孔、三次采油及试井等方面的内容。通过学习,可以对生产测井的方法、原理、数据采集、信息处理及资料解释、油藏应用等知识有一个系统全面的了解。由于生产测井技术是一门不断发展和完善的应用学科,作者希望本书能为生产测井技术的发展尽一份薄力。

全书由褚人杰、吴锡令两位教授审核,由郭海敏、戴家才负责编写第一至第十一章,陈科贵负责编写第十二章,张超谟、赵宏敏、章成广、宋红伟等同志参与了部分章节的编写工作。在完成本书的过程中,中国石油天然气集团公司科技发展部的领导给予了许多帮助,同时得到了中国石油天然气集团公司测井重点实验室陆大卫、李剑浩、李宁和汤天知等同志的支持;谢荣华、何亿成、王界益、田学信、吴世旗、范宜仁、王进旗等同志为本书的编写提供了许多现场素材并提出了诸多宝贵建议;全国测井界同行给予了关心与支持;长江大学测井专业研究生方伟、朱益华、张豆娟、侯月明、安小平、郑剑锋、邹存友、郭海峰、郭淑军等在书稿整理过程中做了大量工作,在此谨致以衷心的感谢!

由于知识面所限,书中不妥之处敬请读者不吝赐教和纠正。

编 者
2007年2月

目 录

第一章 生产测井及信息处理基础	(1)
第一节 油田开发基础	(1)
第二节 油藏流体向井流动	(10)
第三节 油、气、水在垂直管道中的流动	(21)
第四节 油、气、水物性参数	(50)
参考文献	(61)
第二章 井下流量测井	(62)
第一节 涡轮流量计	(62)
第二节 连续流量计	(69)
第三节 示踪流量计	(78)
第四节 层流中的放射性示踪测井	(89)
第五节 其他流量测量方法	(93)
参考文献	(96)
第三章 流体密度及持水率测量	(97)
第一节 放射性流体密度计	(97)
第二节 压差密度计	(98)
第三节 电容法持水率计	(100)
第四节 微波持水率计	(106)
第五节 低能源持水率计	(109)
第六节 电导法含水率计	(112)
第七节 流动成像仪	(112)
参考文献	(114)
第四章 温度测井	(115)
第一节 温度测井原理	(115)
第二节 温度测井定性解释	(122)
参考文献	(125)
第五章 压力测井及资料分析	(126)
第一节 压力成因	(126)
第二节 井下压力计与压力测量	(127)
第三节 试井与压力资料的应用	(136)
第四节 钻柱测试分析	(146)
第五节 电缆地层测试资料分析	(149)
第六节 组件式地层动态测试器	(164)
参考文献	(169)

第六章 产出剖面测井信息综合分析	(170)
第一节 产出剖面测井解释程序	(170)
第二节 DDL 型生产测井产出剖面解释	(184)
第三节 抽油机井油水两相流动	(192)
第四节 油水两相流动井下刻度解释方法	(196)
第五节 三相流动产出剖面测井资料解释	(198)
第六节 油气水三相流动最优化处理方法	(201)
参考文献	(206)
第七章 水平井生产测井技术	(207)
第一节 水平井完井技术	(207)
第二节 水平井中的流型	(209)
第三节 水平井产出剖面	(212)
第四节 水平井现场测井	(214)
参考文献	(218)
第八章 注入剖面测井	(219)
第一节 注水剖面测量原理	(219)
第二节 同位素示踪注水剖面测井信息处理	(226)
第三节 注蒸汽剖面测量	(233)
第四节 注聚合物剖面测量	(238)
参考文献	(242)
第九章 套管井地层参数测井	(243)
第一节 中子测井的核物理基础	(243)
第二节 中子寿命测井	(246)
第三节 碳氧比能谱测井	(253)
第四节 过油管储集层评价测井	(257)
参考文献	(265)
第十章 生产测井资料应用	(266)
第一节 注采系统调整实例	(266)
第二节 在区块开发调整中的应用	(268)
第三节 用注采剖面资料确定剩余油分布	(270)
第四节 注采剖面在油藏数值模拟中的应用	(275)
第五节 油藏数值模拟在油田开发调整中的应用	(281)
参考文献	(285)
第十一章 套管工程检测测井	(286)
第一节 油井的井身结构及井口装置	(286)
第二节 井径测井	(288)
第三节 磁测井仪器	(290)
第四节 噪声测井	(298)
第五节 井下超声电视测井	(303)
第六节 连续测斜仪	(303)

第七节	沉降监测测井	(309)
第八节	其他工程测井	(310)
参考文献		(315)
第十二章	射孔工艺原理	(316)
第一节	跟踪射孔原理	(316)
第二节	过油管射孔原理	(320)
第三节	油管输送射孔原理	(324)
第四节	聚能射孔弹原理和射孔枪	(325)
第五节	水平井射孔技术	(334)
第六节	其他射孔工艺	(339)
第七节	井壁取心	(341)
参考文献		(342)

第一章 生产测井及信息处理基础

本章主要论述与生产测井相关的油气田开发基础，包括油田开发方案设计、渗流、多相管流、提高采收率及油气水物性计算等内容。

第一节 油田开发基础

一个含油气构造经过地质、地震、钻井、测井等一系列勘探发现工业油流后，接着就要进行详探并逐步投入开发。油田开发，是指依据详探成果和必要的生产性开发试验，在综合研究的基础上，对具有工业价值的油田，从实际和生产规律出发，制订出合理的开发方案，对油田进行建设和投产，使油田按预定的生产能力和经济效益长期生产，直至开发结束。油田的正规开发主要包括三个阶段：

(1) 开发前的准备，包括详探、开发试验等；

(2) 开发设计和投产，包括油层研究和评价、开发井部署、射孔方案制订、注采方案制订和实施；

(3) 方案调整和完善。

在油田实际开发前，不可能把油田地质情况认识得很清楚，这就不可避免地在油田投产后，会在某些问题上出现一些原来估计不足之处，致使生产动态与方案设计不符合，因而在油田开发过程中必须不断地进行调整。所以整个油田开发的过程也就是一个不断重新认识和不断调整的过程。

一、油田开发前的准备阶段

1. 详探阶段的主要任务

(1) 以含油层系为基础的地质研究：要求弄清全部含油地层的地层层序和接触关系，各含油层系中油、气、水层的分布及其性质，尤其是含油层段中的隔层和盖层的性质必须搞清，同时还应注意出现的特殊地层，如气夹层、水夹层、高压层、底水等。

(2) 储油层的构造特征研究：要求弄清油层构造形态、储油层的构造圈闭条件、含油面积及与外界连通情况（包括油、气、水分布关系），同时还要研究岩石物性、流体性质以及油层的断裂情况、断层密封情况等。

(3) 分区分层组储量及可采储量计算。

(4) 油层边界的性质研究以及油层天然能量、驱动类型和压力系统的确定。

(5) 油井生产能力和动态研究：了解油井生产能力、出油剖面、递减情况、层间及井间干扰情况。对于注水井，必须了解吸水能力和吸水剖面。

(6) 探明各含油层系中油气水层的分布关系，研究含油地层的岩石物性及所含流体的性质。

完成上述任务要进行的主要工作有地震细测、详探资料井和取心资料井、测井、试油试采分析化验研究等。

2. 油田开发生产试验区和开发试验

经过试采了解到较详细的地质情况和基本的生产动态后,为了能够认识油田在正式投入开发以后的生产规律,对于准备开发的大油田,在详探程度较高和地面建设条件比较有利的地区,首先划出一块区域,用正规井网正式开发作为生产试验区,是开发新油田必不可少的工作。生产试验区也是油田上第一个投入生产的开发区,除了担负试验任务之外,还有一定的生产任务。

1) 生产试验区的主要任务

(1) 研究主要地层:主要研究油层小层数目;研究各小层面积及分布形态、厚度、储量及渗透率大小和非均质情况,认识地层的变化规律;研究隔层性质及分布规律;进行小层对比,研究其连通情况。

(2) 研究井网:研究布井方式,包括合理的切割距大小、井距和排距大小以及井网密度;研究开发层系划分的标准以及合理的注采层段划分方法;研究不同井网和井网密度对各类油砂体储量的控制程度;研究不同井网的产量和采油速度以及地面建设、采油工艺方法;研究不同井网的经济技术指标及评价方法。

(3) 研究生产动态规律:研究合理的采油速度及最大有效产量、油层压力变化规律和天然能量大小、合理的地层压力下降界限、驱动方式及保持地层能量的方法;研究注水后油水井层间干扰及井间干扰,观察单层突进、平面水窜及油气界面与油水界面的运动情况,掌握水线形成及移动规律、各类油层的见水规律。

(4) 研究合理的采油工艺技术及增产和增注措施(压裂、酸化、防砂、降粘)的效果。

2) 开发试验应包括的主要内容

(1) 油田各种天然能量试验;

(2) 井网试验;

(3) 采收率研究试验和提高采收率的方法试验;

(4) 影响油层生产能力的各种因素和提高油层生产能力的各种增产措施及方法试验;

(5) 与油田人工注水有关的各种试验;

(6) 稠油热采、注蒸汽及混相驱替试验。

在试验过程中,生产测井的主要目的是在生产井中确定分层产液量及性质,在注入井中确定吸水层位及吸水剖面、吸汽剖面,检查射孔效果等。

总之,各种开发试验应针对油田实际情况提出,而在油田的开发过程中必须始终坚持试验,因为油田开发过程本身就是一个不断深入地进行各种试验的过程。

在油气勘探开发的过程中,详探及油田开发的准备阶段的各项工作构成一个独立的不能忽视的阶段,是保证油田能科学合理开发所必须经过的阶段。两者可能相互交替进行,如井的布置要穿插进行,注采工程要穿插进行等。

二、开发方案设计的方针和原则

油田开发方案是在详探和生产试验的基础上,经过充分研究后,使油田投入长期和正式生产的一个总体部署和设计。开发方案的优劣决定着油田今后生产的好坏,制订开发方案涉及国家资金、人力的投入及经济效益等。

油田开发方案应包括的内容有油田地质情况、储量计算、开发原则、开发程序、开发层系、井网、开采方式、注采系统、钻井工程和完井方法、采油工艺技术、开采指标、经

经济效益、实施要求。测井和生产测井技术始终贯穿在各个环节中。

油田开发必须依据一定的方针进行，其正确与否直接关系到油田今后生产的经济效益。正确的油田开发方针应根据油田具体情况和长期经验及国民经济发展的要求制订，开发方案编制不能违背这些方针。开发方针的制订应考虑如下几方面的关系：采油速度、油田地下能量的利用和补充、采收率大小、稳产年限、经济效益、工艺技术。

在编制开发方案时，必须制订与之相适应的开发原则，这些原则应对以下几方面的问题作出具体规定：

(1) 规定采油速度和稳产期限。

(2) 规定开采方式和注水或强采方式。规定利用什么驱动方式采油，开发方式如何转化（如弹性驱转溶解气驱再转注水、注气或注蒸汽、聚合物等）。如果决定注水，应确定是早期注水还是后期注水。

(3) 确定开发层系。一个开发层系，是由一些独立的、上下有良好隔层、油层性质相近、驱动方式相近、具备一定储量和生产能力的油层组合而成。它用一套独立的井网开发，是一个最基本的开发单元。当我们开发一个多层油田时，必须正确地划分和组合开发层系。一个油田要用哪几套层系开发，是开发方案中的一个重大决策，是涉及油田基本建设的重大技术性问题，也是决定油田开发效果的很重要的因素。

(4) 确定开发步骤。开发步骤是指从布置基础井网开始，一直到完成注采系统、全面注水和采油的整个过程中所必经阶段和每一步的具体作法。①基础井网布置：基础井网是以某一主要含油层为目标而首先设计的基本生产井和注水（或汽、气等）井。它是进行开发方案设计时，作为开发区油田地质研究的井网。研究时，工作人员要进行准确的小层对比工作，作出油砂体的详细评价，为层系划分和井网布置提供依据。②确定生产井网和射孔方案：根据基础井网，待油层对比工作做完以后，全面部署各层系的生产井网，依据层系和井网确定注采井别，进行射孔投产。③编制注采方案：全面打完开发井网后，落实注采井别，确定注采井段，编制注采方案。

(5) 确定合理的布井原则。合理布井要求在保证采油速度的条件下，采用井数最少的井网，最大限度地控制地下储量，以减少损失，并使绝大部分储量处于水驱（或气、汽驱）范围内。

(6) 确定合理的采油工艺。

三、开发层系划分的原则

国内外已开发的油田，大多数是非均质多层油田。由于储油层在纵向上的沉积环境不可能完全一致，因而油层特性自然会有所差异，所以开发过程中层间矛盾的出现也不可避免。若高渗透层和低渗透层合采，则由于低渗透层的流动阻力大，生产能力往往受到限制；若低压层和高压层合采，低压层往往不出油，甚至高压层的油有可能窜入低压层。在水驱油田，高渗透层往往会很快水淹，合采时会使层间矛盾加剧，出现油水层相互干扰造成开发被动，严重影响采收率。

在注水油田中，主要油层出水后，流动压力不断上升，全井的生产压差越来越小。这样注水不好的差油层的压力可能与全井的流压相近，因而出油不多甚至无油产出，在逆压差较大时，还会出现高压含水层的油和水往低压油层倒灌的现象。这就是见水层与含油层之间的倒灌现象，如图 1-1-1 所示。这一现象利用流量计测量结果可以识别。因此只有

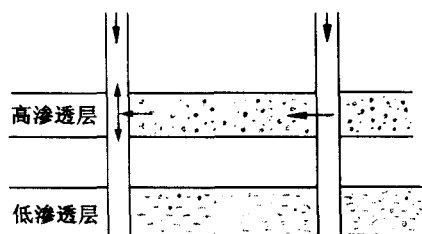


图 1-1-1 倒灌现象示意图

合理划分开发层系才能充分发挥各主要出油层的作用、提高采油速度、缩短开发时间并提高基本投资的周转率。确定了开发层系，一般就确定了井网的套数。多层油田的油层参数往往高达几十个，开采井段有时可达数百米。采油工艺的任务在于充分发挥各油层的作用，使它们吸水均匀和出油均匀，所以往往必须采取分层注水、分层采油和分层控制的措施。目前的分层技术还不可能达到很高的水平，因此就必须划分开发层系，使一个生产层内部的油层不致过多、井段不致

过长，以更好地发挥工艺手段的作用。

划分开发层系，就是把特征相近的油层合在一起，用一套井网单独开采。划分开发层系应考虑的原则是：

(1) 把特性相近的油层组合在同一开发层系内，以保证各油层对注水方式和井网具有共同的适应性。油层相近主要体现在沉积条件相近、渗透率相近、组合层系的基本单元内油层的分布面积接近、层内非均质程度相近。通常人们以油层组作为组合开发层系的基本单元，有的也以砂岩组划分和组合开发层系。因为砂岩组是一个独立的沉积单元，油层性质相似。

(2) 各开发层系间必须有良好的隔层，以确保注水条件下，层系间能严格分开，不发生层间干扰。

(3) 同一开发层系内油层的构造形态、油水边界、压力系统和原油物性应比较接近。

(4) 一个独立的开发层系应具有一定的储量，以保证油田满足一定的采油速度、具有较长的稳产时间。

(5) 在分层开采工艺所能解决的范围内，开发层系划分不宜过细。

综上所述，开发层系的合理划分是油田开发的一个关键部署。若划分不合理或出现差错，将会使油田开发很被动，以至于不得不进行油田建设的重新设计和部署，造成很大浪费。这样的教训无论在国外还是在国内都不鲜见。例如有的油田在划分开发层系时，未发现隔层尖灭和油层重叠现象，投产后两层系之间油水互窜；有的油田上下油层驱动方式不同，上部是封闭弹性驱，下部是活跃水驱，合采时相互干扰严重。

四、砂岩油田的注水开发

原油在地层中从远离井筒的地方流向井筒，需要一定的动力。一个油藏的天然能量，包括边水和底水水压、原生气顶和次生气顶的膨胀、原油中溶解气的释放和膨胀、油层和其中原油的弹性能量等。不同油藏天然能量的类型和大小各不相同，即驱动方式不同。利用天然能量可以采出一部分原油，但一般情况下只能在一段时间内起作用，且发挥不均衡，难于调整和控制。

利用人工注水保持油藏压力，是采油历史上一个重大转折。从 20 世纪 20 年代末开始，到现在已有 70 多年的注水历史。人工注水开发油田的优点是能持续高产、驱油效率高、采收率高、经济效益高、易于控制等。

用人工注水开发油田时，油井与油井之间、注水井和注水井之间存在强烈的相互影响，因此在注水开发的油田上不能只研究单井，必须把油田作为一个整体看待，把油田上相互

连通的全部油水井作为一个相互联系、相互制约的开采系统考虑，对整个开发区进行综合研究、设计和调整。因此，注采井网的确定是油田开发设计中的关键问题。

1. 注水方式

注水方式就是注水井在油藏中所处的部位和生产井及注水井间的排列关系。注水方式也称注采系统，归结起来主要有边缘注水、边内切割注水、面积注水和点状注水四种。

1) 边缘注水

采用边缘注水方式的条件为：油田面积不大；构造比较完整；油层稳定；边部和内部连通性好；油层的流动系数（有效渗透率×有效厚度/原油粘度）较高；特别是钻注水井的边缘地区要有较好的吸水能力，能保证压力有效传播。边缘注水根据油水过渡带的油层情况又分为以下三种。

(1) 缘外注水。注水井按一定方式分布在外油水边界处，向边水中注水。如图 1-1-2 所示为某油田注水方式示意图。把外油水边界以外的 6, 26, 15, 17, 4, 16, 18, 19, 25 等井转为注水井，就构成了缘外注水方式。

(2) 缘上注水。一些油田在含水边缘以外的地层渗透率显著变差，为了保证提高注水井的吸水能力和注入水的驱油作用，将注水井布在含油层外缘上，或在油藏以内距含油外缘不远的地方。图 1-1-2 中，假如外油水边界以外岩性变差，则可以让 25, 19, 24, 21, 5, 22 井转注即构成缘上注水。

(3) 边内注水。如果地层渗透率在油水过渡带很差或过渡带注水不适宜，可将注水井布置在内含油边界内，以保证注水见效。

边缘注水方式适用于边水较活跃的中小油田，其优点是油水边界较完整、容易控制、无水采收率较高，若辅以内部点状注水则可取得很好的开发效果；缺点是不适用于面积大的油田。

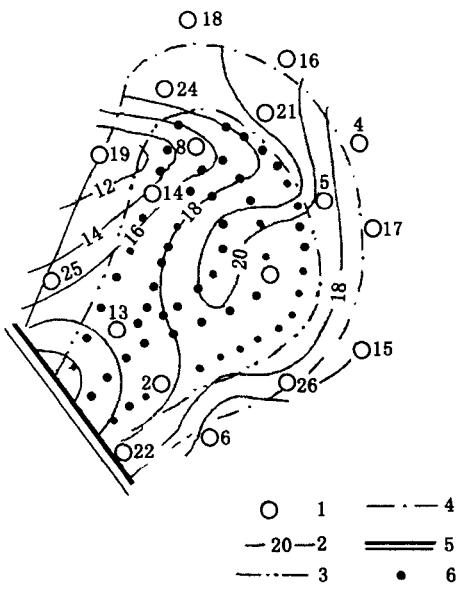


图 1-1-2 某油田注水方式示意图
1—详探井；2—砂岩等厚线；3—内油水边界；
4—外油水边界；5—断线条；6—生产井

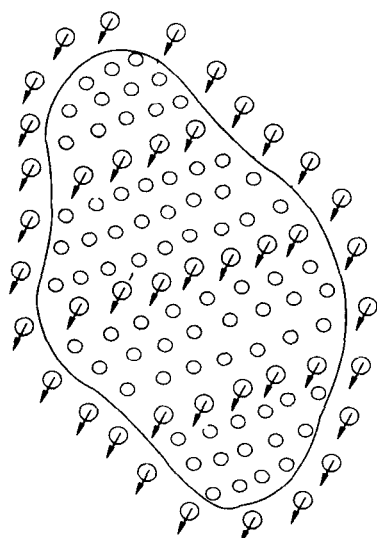
2) 边内切割注水方式

对于大面积、储量丰富、油层性质稳定的油田，一般采用边内切割注水方式。在这种方式下，利用注水井排将油藏切割成为较小单元，每一块面积（切割区）可以看成是一个独立的开发单元，分区块进行开发调整，见图 1-1-3。

边内切割注水方式的应用条件是：油层大面积分布，注水井排上可以形成比较完整的切割水线；保证一个切割区内布置的生产井与注水井有较好的连通性；油层有一定的流动系数，保证生产井与注入井间压力传递正常。

采用边内切割注水的优点是：可以根据油田的地质特征选择切割井排的最佳方向及切割区的宽度；可以根据开发期间认识到的油田详细地质构造资料修改已采用的注水方式；在油层渗透率具有方向性的条件下采用行列井网时，只要弄清油层渗透率变化的主要方向，适当控制注入水的流动方向，就可取得较好的开发效果。

这种方式的不足之处是对油层的非均质性适应性较差。对于在平面上油层性质变化较



⊙—注水井；○—生产井

图 1-1-3 边内切割注水方式示意图

大的油田，往往使相当部分的注水井处于低产地带，注水效率不高，注水井间干扰大。注水井成行排列，在注水井排两边的开发区内，压力不需要总是一致，地质条件也不相同，因此会出现区间不平衡。另外，由于生产井的外排与内排受注水影响不同，因而开采不均衡，内排生产能力不易发挥；外排生产能力大，见水快。

在计划采用或现已采用的行列注水油田，为了发挥其特长，主要采用以下措施：选择合理的切割宽度；确定最佳的切割井排位置；辅以点状注水，强化行列注水系统；提高注水线同生产井井底之间的压差等方式提高切割注水效果。

3) 面积注水方式

面积注水方式是将注水井按一定几何形状和密度均匀地布置在整个开发区上。根据油井和注水井的相互位置及构成井网的形状。面积注水可分为四点法、五点法、七点法、九点法、歪七点和正对或交错式排状注水。

面积注水方式采用的条件如下：

(1) 油层分布不规则，延伸性差，多呈透镜状分布。

用切割式注水不能控制多数油层，注入水不能逐排影响生产井。

(2) 油层的渗透性差，流动系数低。用切割式注水由于注水推进阻力大，有效影响面积小，采油速度低。

(3) 油田面积大，构造不够完整，断层分布复杂。

(4) 适应于油田后期的强化开采，以提高采收率。

(5) 油层具备切割注水或其他注水方式，但要求达到更高的采油速度时，也可考虑采用。

2. 注采井网

从平面上看，注水和采油均在井点进行。在注水井和生产井之间存在着压力差，并且被流线所连接。在均匀井网内连接注水井和生产井的是一条直线，它是这两井间的最短流线，沿这条线的压力梯度最大。于是注入水在平面上将沿着这条最短流线推进到生产井，以后才沿其他流线突入，这就是注入水的舌进现象。水波及区在井网面积中所占的比值就是均匀井网见水时的面积波及效率 η_1 ，表示为

$$\eta_1 = \frac{A_s}{A}$$

式中 A 、 A_s ——油藏面积和波及面积。

体积波及效率 η 和油藏的采收率 η_o 分别表示为

$$\eta = \frac{A_s h_s}{A h} = \eta_1 \eta_2$$

$$\eta_o = \eta \frac{S_o - S_{or}}{S_o}$$

式中 η_2 ——垂直波及效率；
 h 、 h_s ——油藏平均厚度和波及厚度；
 S_o 、 S_{or} ——原始含油饱和度和残余油饱和度。
 波及效率与油水的流度比相关，油水的流度比为

$$M = \frac{K_w / \mu_w}{K_o / \mu_o}$$

式中 K_w ——水的有效渗透率， μm^2 ；
 K_o ——油的有效渗透率， μm^2 ；
 μ_w ——水的粘度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ；
 μ_o ——油的粘度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

压裂是最有效的增产增注手段之一。实践证明，人工压裂造成的地层裂缝绝大部分是垂直于层面的。对于天然裂缝，驱动方向与裂缝方向成 45° 角时，见水时的波及系数高于各向同性层；驱动方向与裂缝方向一致时，见水时的波及系数降低。裂缝越长，对见水时的波及系数影响越大。天然裂缝和人工裂缝的方位取决于地质条件。在有天然裂缝的油藏和进行过大量压裂改造的油藏中进行注水时，要考虑裂缝方向。水平裂缝对波及系数的影响相当于井径扩大，随裂缝半径的增大，对低渗透油层波及系数会有所增加。

五、开发井网部署

油田开发的中心就是合理划分层系，部署生产井网。井网研究中通常涉及的有三个问题：井网密度、一次井网与多次井网、布井方式。在井网密度方面，通常是先期采用稀井网，后期加密；布井次数方面常采用多次布井方式。

1. 油层砂体研究及基础井网布置

油层砂体研究是布置井网的基本工作，研究的问题之一是各油层组的油砂体延伸长度。

图 1-1-4 表示的是三个油层组不同井距可控储量的百分数。由图可知，最上面一组油层（ $P_{\perp}$ 组）延伸长度大于 5km 时，其控制储量占总储量的 90% 以上，所以是大片连通的； $S_{\text{中}}$ 组油层大于 5km 以上的油砂体的储量为 75% 左右，3km 以上的为 80%，也是一组比较好的油层； $S_{\perp}$ 油层延伸长度大于 5km 的只占 30% 储量，3km 以上的只有 50% 的储量，1km 以上的也只占 80%。因此，对于这三组油层不能盲目部署开发方案，应依据基础井网取得的补充资料最终落实油层分布并布置开发井。

油层砂体研究的第二个问题是不同类型油砂体的渗透率、压力等参数的变化情况。图 1-1-5 是根据不同渗透率的油砂体所统计而得到的储量分布曲线。由图可知，三个油层组的油砂体的渗透率高低及分布特征不同。

$P_{\perp}$ 组油层渗透率高而且较均匀，其渗透率大于 $400 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油砂体的储量占全油层组总储量的 80% 以上，说明这一油层物性好，分布面积广，具备高产条

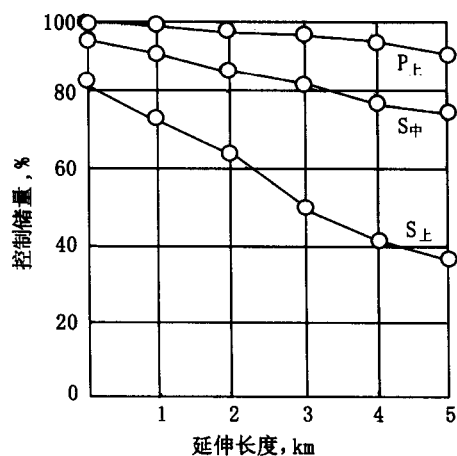


图 1-1-4 油砂体延伸长度与控制储量的统计关系曲线

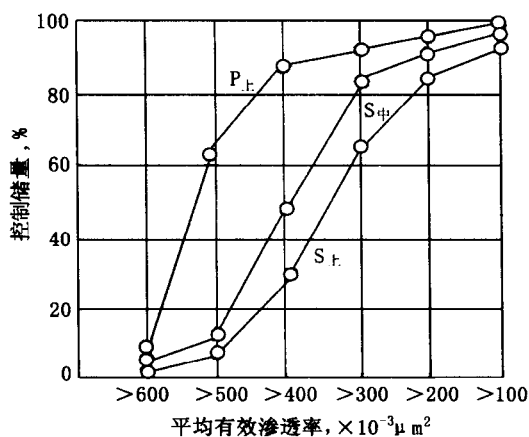


图 1-1-5 油砂体平均有效渗率与控制储量关系曲线

件。选定该层作为主要目的层布置基础井网是完全可行的。

油层砂体研究之后, 选定一个分布稳定、产能高、有一定储量、已由详探井基本控制并具有开发条件(隔层性能好)的油层作为开发对象布置井网。这套井网叫基础井网, 主要油层可以按此基础井网进行开发, 其他井网可以按此基础井网所取得的地质资料进行开发设计。

基础井网是开发区的第一套正规生产井网。它的开发对象必须符合如下要求:

- (1) 油层分布均匀稳定, 形态比较易于掌握。
- (2) 控制该层系的储量达 80% 以上。
- (3) 隔层良好, 确保各开发层系能独立开

采, 不发生窜流。

(4) 油层渗透性好, 有一定的生产能力。

(5) 具有足够的储量, 具备单独布井和开发条件。

基础井网布置后, 依据所取得的详细资料对本地区的地质情况全面研究, 然后部署全开发区各层系的开发井网。

2. 布井方案

在详细研究及基础井网布置的基础之上, 确定出适合本油田开发方式、层系划分、注水方式和井网布置方案。布井方案主要分四个步骤。

第一步: 划分开发层系, 确定本油田用几套井网开发并对每一层系分别布井。

第二步: 确定油水井数目。若已给定本开发区的采油速度为 v , 地质储量为 N , 平均单井日产量为 q , 则可算得本开发区的生产井数为

$$n = Nv/300q$$

由此可得井网密度 D

$$D = A/n$$

第三步: 布置开发井网。

第四步: 开发指标计算和经济核算。

六、油田开发调整

为了延长稳产期、提高采收率, 油田无论采用何种开采方式、井网系统、层系划分和驱动类型投入开发, 都要选择适当时机进行必要的开发调整。开发调整主要包括层系调整、井网调整、驱动方式调整和开采工艺调整。生产测井技术在开发调整中主要用于提供注采储集层及井身结构动态信息。

1. 层系调整

在多层油藏中, 往往包含了众多在水动力学上相互连通的含油砂体或单层, 有时在注

水条件下用一套井网开发是不可能的,需要分成若干个开发层系用不同的井网开发。由于层间渗透率不同,注水开采时将发生井间干扰现象。油层压力小于流动压力时,会发生倒灌现象。

油田开发过程中,一个层系中的单层之间由于注采的不均衡产生了新的不平衡,需要进行更进一步的划分。这时可能出现两种情况:一是在一个开发层系的内部更进一步划出若干个开发层系;二是在相邻的开发层系中将开发得较差的单层组合在一起,形成一个独立的开发层系。

2. 井网调整

通常认为密井网能比稀井网得到高的采收率,认为在同样的开采制度下,密井网区压降大,有更多的石油向这里流动,但把这一原理推广到不同的油藏就不恰当。实际情况是应从地质和经济两方面考虑井网密度问题。现将油藏简化为一个均质各向同性储集层,随井网密度增加,井间干扰加剧,从而降低了增加井数的增产效果。图 1-1-6 表示了经济效益与井数的示意关系。由图可知,开发初期,随井数增加经济效益增加快,当达到合理井数 n_{REA} 之后,经济效益随井数的增加不明显,若继续增加达到经济极限井数 n_{CRI} 之后,经济效益要明显下降。在油田投产初期,应钻生产井的合理井数 n_{REA} 不应超过油田最终开采井数的 80%,余留的 20% 的井数应考虑在油田开发的中后期调整使用。

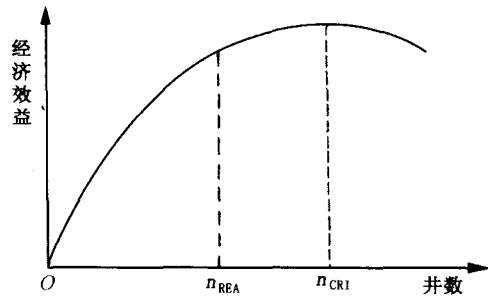


图 1-1-6 经济效益与开发井数关系的示意图

加密钻井进行井网调整,可以使开发较差的油砂体的效果得到改善;对于已处于直接水驱下的油砂体加密后有利于提高全油藏的产量,但不会有效降低油水比。

还有一种调整是水流方向调整和注水方式调整,如间歇注水等。调整水驱油的流动方向,对有裂缝的油田特别重要,水驱方向与裂缝延伸方向相同时,水驱效果最好。

3. 开采工艺调整

溶解气驱开发的油田,随着压力的下降,油藏的能量不能把油举至井口,需要人工举升;注水油田中,随开发的进行,含水率不断上升,流动压力不断升高,井底生产压差降低,井的产油量不断下降,也需要人工举升。前者用于补充压力不足;后者着眼于提高排量,我国大部分油田属后一种情况。针对这一情况,油田普遍采用电潜泵和水力活塞泵满足提高排液量的需要,常规有杆泵已不能有效维持正常生产。油田从自喷进入人工举升是一个很大的调整,要经历一个较长的时间,同时应根据注采平衡的要求进行注水调整,包括增加注水井点和提高注入压力等。一般认为注水井的井底压力应低于油藏的破裂压力,当注水井的井底压力高于地层破裂压力时,会出现水窜和油井暴性水淹的情况,此时必须严格控制注水压力,不使油层中的裂缝张开。在某些情况下,允许注水压力高于破裂压力。

矿场实验证明,油井见水并生产到含水率极高(98%)时,水驱油的面积波及系数接近 80%,垂向波及系数在 40%~80%之间。此时,在高含水情况下通过加密井提高体积波及系数不会有太大效果,着眼点应放在改善垂直波及系数上,如采用调剖技术调整吸水剖面并与聚合物改善驱油效率相结合,可以取得较好的效果。