

中国现代科学全书

石油与天然气工程学

油气田开发工程

罗平亚 杜志敏 编著



中国石化出版社

中国现代科学全书·石油与天然气工程学

油气田开发工程

罗平亚 杜志敏 编著

中国石化出版社

图书在版编目(CIP)数据

油气田开发工程/罗平亚,杜志敏编著
—北京:中国石化出版社,2003
(中国现代科学全书·石油与天然气工程学)
ISBN 7-80164-314-3

I. 油… II. ①罗…②杜… III. ①油气开发
②气田开发 IV. TE3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 098326 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com.cn

北京精美实华图文制作中心排版

三河市三佳印刷装订有限公司印刷

新华书店北京发行所经销

*

850×1168 毫米 32 开本 9.5 印张 246 千字 印 1—2000

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月第 1 次印刷

定价: 27.00 元

石油与天然气工程学序

《中国现代科学全书》是一套规模宏大的学术专著丛书，它的任务是系统、全面地概述我国现代自然科学和社会科学各学科的建设与发展及其学术研究的主要成果，为繁荣和发展我国与世界各国之间的科学文化交流服务。它是一项迎接 21 世纪的科学文化建设工程。

石油与天然气工程学科是工业分卷中的一部分，其内容又按四个分支学科分为五卷，即《油气勘探工程》、《油气井工程》、《油气田开发工程》、《油气开采工程》、《油气储运工程》。

近代石油工业的发展约有 150 年的历史。石油在 20 世纪世界工业化进程中起了极其重要的作用，它不仅在能源、交通方面支撑着工业化的进行，在化工等各个方面也起着举足轻重的作用，因此被称为“工业的血液”。我国是世界上最早发现、开采和利用石油的文明古国。两千年前，我们的祖先就开始描述和利用石油了。公元前 221~210 年，四川出现了用顿钻钻凿的天然气井；13 世纪，四川的先民已大规模开采气田煮盐。公元 1878~1949 年的旧中国勘探、开发了一批油气田，如玉门的老君庙、新疆的独山子、台湾苗栗的出磺坑、陕北的延长等油田、四川的圣灯山等气田；但自 1904 年至 1949 年累积产量仅 210 万吨。因此，中国现代石油工业的建设是在 1949 年全国解放以后开始的；经过半个世纪的奋斗，已发现了大庆、胜利、克拉玛依、辽河、任丘、渤海蓬莱 19-3 等一批油田和四川、陕甘宁、南海、柴达木、塔里木等一批气区；2000 年我国的原油产量达到了 1.6 亿吨，天然气产量 262 亿立方米。

我国石油工业极其艰难地走过了半个世纪。由于中国地质构造和陆相沉积的复杂性使石油勘探开发工作也极具特色，这也决定了石油学科的科学技术发展方面的特殊性，它丰富了世界油气勘探开发理论和技术的宝库，应予以很好总结。

虽然中国的石油工业进入了大发展的阶段，但是国民经济的快速发展对石油工业提出了更高的要求。1993年，我国又开始进口原油了，而且今后石油缺口还会不断扩大。在这样矛盾的情况下，对中国石油工业应有一个正确的认识，它到底是一个发展中的产业或高峰期的产业还是一个夕阳产业？目前的几个事实应该能清楚地说明上述问题。一是我国油气产量还在逐年稳步上升，保持在世界前十位这样一个较高的产量水平上，二是后备储量也在不断增长，能支持产量维持在这一较高水平上，能确保“西气东输”的资源基础。三是大型油气田还在不断发现，如近几年发现的内蒙古苏里格大气田(5千亿立方米以上)、塔里木盆地的克拉2号大气田(2.5千亿立方米)是目前我国最大的整装气田，渤海湾的蓬莱19-3油田，为位列大庆油田之后的第二大油田，说明我国东、西部地区都有着巨大的潜力，说明我国石油工业仍处在向上发展阶段；特别值得一提的是蓬莱19-3油田，它是在我国东部老区上第三系新领域发现的大油田。根据对我国资源量的估算，石油高峰年产量预计将达到2.5亿吨左右。

本书回顾和总结了前五十年石油工业理论和技术发展概况和发展水平，对未来的发展趋势和可能前景作了预测，相信会对今后石油学科的发展和有关政策的制定起到应有的作用。

《石油与天然气工程学》主编 张一伟

2002年6月

前 言

本书为《中国现代科学全书》中的《石油与天然气工程学》之《油气田开发工程》分卷，系统全面地概述了油气田开发工程学科特点、基本研究方法和技术手段，总结了 20 世纪油气田开发工程学科的发展及其学术研究成果，并对该学科 21 世纪的发展趋势进行了展望。

石油与天然气作为一种矿产资源，有其独特的存在形态，它深埋地下且处于高温、高压的隐蔽状态，较之其他矿藏的勘探与开发有更大的难度。石油作为一种重要的战略资源，对国民经济的发展具有特殊的意义。油气田开发是石油工业中的重要环节，它在石油工业中起着举足轻重的作用。能否合理地开发油气田，最大限度地提高油气田开发采收率，这不仅与科学技术水平有关，还与油气田的开发方针和主要技术政策有关。石油、天然气的开发，是指在基本探明油、气田储量和掌握了油气藏地质特征以后，着手制订合理的开发方案，采用科学的开采技术和方法，经济、合理地把地下油气资源最大限度地开采出来的全部工作。石油工业是知识密集、技术密集、资金密集的工业，油气田开发工程是综合应用多学科的巨大工程。

自从近代美国于 1859 年开始采油以来，油田开发事业已经经历了 140 多年的发展过程，油气田开发工程随着油田的开发和开采而逐步发展和成熟起来。我国的油田开发工程是与新中国一起成长发展起来的，经历了学习探索，初步掌握油田开发方法和技术；自主创新，建立以大庆油田开发为例的陆相沉积油藏开发方法和技术；开拓发展，形成多种类型油藏开发模式和配套工艺技

术；调整提高，发展和应用提高采收率技术；科技进步，形成复杂油气田、边际油气田开发配套技术；学科交叉，建立认识油气藏、开发油气藏、改造油气藏的油气田开发系统工程；团队协作，形成油气田开发多学科协作的油藏经营管理模式等油气田开发技术发展历程。今天，我国的油气田开发工程，经过广大油气田开发工作者卓有成效的努力，已跨入世界的先进行列。

本书由中国工程院院士、西南石油学院院长罗平亚教授主编。全书共分七章，其中第一章，第二章的第一、二、六节，第三章，第四章的第四和五节由刘蜀知编写；第二章的第三、四节，第四章的第一节和第五章由叶仲斌编写；第二章第五节，第四章第二、三和六节由张茂林编写；第六章由杜志敏编写；第七章由杜志敏、李传亮编写。全书由罗平亚院士统稿，西南石油学院李士伦教授和李允教授审定。

在本书的编写过程中，得到了西南石油学院“油气藏地质和开发工程”国家重点实验室和石油大学校长张一伟教授及校办王志欣老师的大力支持和热情帮助，我们深表感谢！

由于编写人员水平有限，不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者



罗平亚 中共党员，生于1940年6月，四川隆昌人。中国工程院院士、教授、博士生导师、西南石油学院院长，“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室主任，中国石油天然气集团公司油井完井技术中心主任，享受政府特殊津贴。40年来一直从事石油天然气勘探开发方面的教学与研究，在油层保护、油田化学理论和应用技术等方面取得了一批重要成果。

先后主持和完成了40余项省部级以上科研项目，获省部级以上研究成果奖30余项（次），其中国家级奖6项，省部级一等奖11项，中国石油天然气集团公司十大优秀应用成果奖3项，出版专著6部，论文70余篇，培养硕士、博士60多人。

获省部级以上表彰6次，先后被评为“国家级有突出贡献的中青年专家”和国家及省部级劳动模范、先进教师，1993年获孙越崎能源大奖。是国务院学位委员会第三、四届学科评议组成员，四川省学位委员会委员，第六、七届全国人大代表，第六届四川省党代会代表，2000年全国先进工作者。



杜志敏 西南石油学院副院长、教授、博士生导师，河南宝丰人，1953年生。享受国务院政府特殊津贴。主要从事油气田开发、油藏数值模拟技术及现代油藏经营管理方面的教学和科研工作，曾获中国石油天然气总公司科技进步一等奖、二等奖各1项，获四川省科技进步一等奖1项，获国家教学成果一等奖。2000年获国家科技进步二等奖1项，完成和承担科研项目多项，在国内外发表科技论文30余篇，译著2部，指导博士生14名，指导硕士生15名。

中国现代科学全书总编辑委员会

名誉主编 胡 绳 钱伟长 吴阶平 周光召
许嘉璐 罗豪才 季羨林 王大珩
郑必坚

主 编 姜士林 郭德宏 刘 政 程湘清
卞晋平 王洛林 许智宏 白春礼
卢良恕 徐 诚 王洪峻 明立志

石油与天然气工程学编辑委员会

主 编 张一伟

编辑委员 (以姓氏笔画为序)

张一伟 严大凡 何生厚 张劲军
杜志敏 张 琪 金之钧 罗平亚
胡湘炯 高德利

张一伟

目 录

第一章 序言	(1)
第一节 油气田开发工程的创立及其发展.....	(1)
第二节 油气田开发工程的研究意义.....	(9)
第二章 油气田开发工程的研究对象与范围	(14)
第一节 油气田的地下构造.....	(14)
第二节 储集层的性质和分布状况.....	(20)
第三节 油气藏流体分布.....	(32)
第四节 油气藏流体性质.....	(37)
第五节 流体在储层中的流动.....	(42)
第六节 油气藏储量.....	(58)
第三章 油气田开发设计	(67)
第一节 油田开发前的准备阶段.....	(67)
第二节 油田开发的基本原则与开发方案编制内容.....	(70)
第三节 油气藏类型及开发措施.....	(76)
第四节 油田开发方式的选择.....	(79)
第五节 开发层系的划分与组合.....	(89)
第六节 油田开发井网部署.....	(91)
第七节 油田开发调整.....	(96)
第四章 油气田开发研究方法	(101)
第一节 岩心分析技术.....	(101)

第二节	地层油气流体高压物性测试和相态模拟方法	(118)
第三节	试井分析方法	(137)
第四节	物质平衡方法	(158)
第五节	矿场经验方法	(165)
第六节	油藏数值模拟方法	(177)
第五章	提高采收率技术	(198)
第一节	影响采收率的主要因素	(200)
第二节	提高采收率的主要途径	(204)
第三节	提高采收率的主要方法	(207)
第六章	现代油藏经营管理	(244)
第一节	油藏经营管理的概念	(244)
第二节	油藏经营管理模式	(248)
第三节	油藏经营管理运作方式	(254)
第四节	油藏经营数据管理	(258)
第五节	地质、工程、经济协同化	(266)
第六节	油藏经营优化决策模式	(273)
第七章	21世纪油气田开发工程展望	(280)
第一节	我国油气田开发面临的挑战	(280)
第二节	我国油气田开发发展战略	(282)
第三节	技术更新和管理体制改革	(286)
参考文献		(291)

第一章 序 言

石油是一种重要的战略资源，对国民经济的发展具有特殊的意义。石油的开发，是指在基本探明油、气田储量和掌握了油气藏地质特征以后，着手制订合理的开发方案，采用科学的开采技术和方法，经济、合理地把地下油气资源最大限度地开采出来的全部工作。

第一节 油气田开发工程的创立及其发展

在 20 世纪初，油气田开发工程所能依据的理论、方法和采用的手段还十分有限，油气田基本上是依靠天然能量开采，对油气层及其中能量的研究和认识还停留在一个初级水平上。20 世纪 40 年代以来到现在的半个多世纪，油气田开发工程这门学科有了根本性的改变。一方面是由于对油气藏进行研究的手段和方法有了根本性的改变，另一方面也由于开采和测试手段有了彻底的更新。因此，对油气藏进行总体解剖和研究成为可能，进而又可从整体上进行规划、部署和开发。目前，油气田开发事业已发展成为应用现代先进的科学技术和装备建设起来的综合工业部门，成为整个石油工业中极为重要的环节。

一、油气田开发的概念、任务与特点

一个含油气构造经过初探发现其具有工业油气流以后，紧接着就要进行详探并逐步投入开发。所谓油气田开发，就是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

业价值的油气田，从油气田的实际情况和生产规律出发，制订出合理的开发方案并对油气田进行建设和投产，使油气田按预定的生产能力和经济效益长期生产，直至开发结束。

一切工程实施之前，都有前期工程，要求有周密的设计。有些工程在正式设计前还应有可行性研究。对于油气田开发工程来说，也不例外，但又有其不同的特点。

油气藏的认识不是短时间一次完成的，需经历长期的由粗到细、由浅入深、由表及里的认识过程。油气藏埋藏在地下，浅可近地表，深可达五、六千米，面积大者甚至可达几十、几百平方千米，看不见，摸不着。而且油气属于流体矿藏，又不可能掘之出来加以观察和描述，只有用地球物理等间接方法加以探测，或在其上钻若干口井(可视为油气藏的窗口)设法窥视其内部状况。显然，若井钻得越多，直接获得的信息就越多，所描述的油气藏就越接近实际。这就是说，初期对于油气藏的认识比较粗糙，而随着开发的进行将不断深化。

油气田是流体矿藏，凡是有联系的油气藏矿体，必须视作统一的整体来开发，不能像固体矿藏那样，可以简单地分隔，独立地开发，而不会影响相邻固体矿藏的蕴藏条件及邻井地段的含矿比。在与油气藏有联系的任何一个区段进行采出或注入水(或气)，都会导致整个矿藏原始状态、压力发生变化，相邻矿区含量发生变化，甚至远离开区很远仅有含水域相连通的另一油气田，也可使其聚集状态发生变化，例如产生气顶或气顶消失。

因此，勘探与开发油气田时，不能只局限于较详细地研究任何矿藏的局部地段，而必须对有可能成为统一流体水动力系统的整个矿藏有足够的全面的认识。这些应包括对位于含气、含油边缘以外区域的认识。同时，对于那些可以形成分隔流体作为屏障的断层、隔层、盖底层和夹层也应进行专门研究。因此，油气藏

开发除了要与其他矿藏开发一样研究矿体的几何性、油藏条件、含矿比和储量外，还要特别注意研究流体的渗滤性质，并注意这些性质随时间、空间及其他因素影响的变化。也就是说，我们不仅要研究油气田的静止(或原始)状态，而且要时刻注意其动态包括不同时间剩余油气的分布状况，以使自己的认识及设计立足于最新的基础之上。

必须充分重视和发挥每口井的双重作用——生产与信息的功能，这是开发工作者时刻应该研究及考虑的。世界上除了个别油藏采用矿山坑道开采外，绝大多数的油气田都是从地面钻取井孔来开采的。井具有双重作用，它既是采集油气的窗口和影响地层的场所，又是窥视油气藏内部取得各种信息的窗口。如何使用最少的井数既能把油气田地下情况搞清楚，又能将油气经济地从井中采出来，这是衡量油田生产技术水平高低的一个重要标志。

油田开发工程是知识密集、技术密集、资金密集的工业。油气田地域辽阔，地面地下条件复杂、多样；各种井网、管网和集输系统星罗棋布；加之存在着多种因素的影响和干扰，使得油田开发工程必然是个知识密集、技术密集和资金密集的工业，是个综合应用多学科的巨大工程。它主要涉及地质、物探、钻井、采油、油藏、储运、经济、管理、水电和土建部门。

在这些部门及相互之间有数以亿计的信息要进行存储、处理、反馈、控制、衔接和协调等。因而，在油田开发中如何充分应用现代电子技术、现代系统论、信息论、控制论和优化理论于油田开发设计、生产、组织和经营中，是一个重大的课题。

一个油气田开发常常要钻大量的油气井，铺设大量的集输、注入管路。仅一口三千米深的油井钻井费用就为几百万元甚至上千万元，而海上一座平台则要上亿元的投资。因此，开发上的任何轻率决定，都可能造成巨大的经济损失。

二、油气田开发的发展简史

自从近代美国于 1859 年开始采油以来，油田开发事业已经历了 140 多年的发展过程，油气田开发工程随着油田的开发和开采而逐步发展和成熟起来。分析 100 多年油田开采和开发的历史，大体上可以划分为如下几个阶段。

(一) 第一阶段

这一阶段是从开始采油到 1930 年前后。这一阶段大约经历了 70 来年的发展过程。其主要特点是没有也不可能把油田看成一个整体，而是一块一块地进行开采。在这个阶段里，石油工业处于开始的阶段，油田数目少，油层浅，面积小，在当时的科学技术和工业装备的条件下，加上油田的不同区域是归不同的资本家所有，所以不可能把油田当成一个统一的整体来考虑。在这一期间，钻井生产几乎是惟一的开发手段。因此，当时的石油科技工作者所研究的主要问题是关于井网密度的问题。20 世纪的 20 年代前后，美苏等国的石油科技工作者，曾发表了大量的关于井网密度对油层和油井产率等影响方面的文献和著作。在美国具有代表性的理论是 B·柯脱列尔等人提出的。他们主张用密井网来进行油田的开发，认为井网越密，也就是整个油田上的井数越多，虽然平均每口井的总产油量下降了，但单位面积上的产油量增加了，因而整个油田的产量将会增加。这种理论在美国油田开发中一个相当长的时间里，一直是占上风的。1925 年 11 月在莫斯科召开了“保护和合理使用油藏”的讨论会，前苏联的一些学者提出了与前述观点不同的论点。M.B. 阿勃拉莫维奇在他的“合理开发油田原则”的报告中，主张建立一种有根据的合理开发油藏的理论，并确定油田上合理的井数。

应当指出，在井网密度的研究方面，虽然有错误意见，但

也创立了一些研究方法，如根据油井平均产油率、当前产油率、油井初产量和开发速度等实际生产数据，来研究它们与井网密度之间的关系等。

这一阶段除了研究井网密度方面的问题外，对于计算原油储量和油井初产量方面的问题也进行了一定的研究。

(二) 第二阶段

这一阶段是从 1930 年至 1940 年前后。这个阶段的特点是有有的国家开始把油田看着一个整体来进行开发。1933 年，前苏联举行了全苏第一届石油工作会议，会上著名学者古勃金等指出有许多油田开发工作者“好象不是在开采整个油层和整个油田，而是像管理机器设备那样，像对待孤立的对象那样开采油井。”在这一时期，美国著名学者 M. 马斯凯特在其 1937 年所出版的一本著作中也指出，要提高油田的开采效率，必须研究影响开采过程的因素。

随着所开发油田数目的增多，人们发现了油藏中存在着各种各样的能量，从而创立了油藏驱动能量的学说。一些学者开始把地下流体力学的理论应用到油田开发中来。例如 A.C. 列宾荪研究了依靠气体的膨胀压力或边水压力，将流体从孔隙介质中驱出的情况，并导出许多有关排油和布井等方面的计算公式。M. 马斯凯特也提出应根据油层压力、岩心渗透率和油层之间的相互关系等因素，来预算油井的产量等。B.M. 巴磊歌夫等从 1938 年至 1942 年进行了一系列的试验研究，他们的试验证明：第一、如果以环形井排沿圆形油田任一等高线钻了足够数量的井，那么这些井会截住所有从含油边缘地区流来的液流；第二、在水压驱动油藏上，当井网密度达到一定程度后，再增加井数，如果回压不变，油藏的累积产油量也不会提高。

在这一期间，作为油田开发基础理论之一的油层物理学的研究也取得重要进展。美国人 G.H. 法奇等首先于 1933 年进行了油