

中国现代科学全书

石油与天然气工程学

油气井工程

胡湘炯 高德利 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

油气井工程

胡湘炯 高德利 编著

图书在版编目(CIP)数据

油气井工程/胡湘炯,高德利编著

—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 7-80164-318-6

I. 油… II. ①胡…②高… III. 油气钻井
IV. TE2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 101863 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 11.875 印张 306 千字 印 1—2000

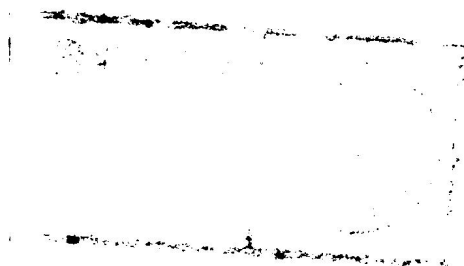
2003 年 2 月第 1 版 2003 年 2 月第 1 次印刷

定价:34.00 元



胡湘炯 教授，1931年12月生，中共党员。

1953年毕业于清华大学石油系，1957年于北京石油学院研究生毕业，长期从事教学和科研工作。曾任华东石油学院副院长，中国石油学会理事，山东石油学会副理事长。1992年被授予有特殊贡献的高等教育专家，享受国务院颁发的政府特殊津贴。





高德利 博士，1958 年生于山东省禹城市。现任石油大学(北京)教授、博士生导师，油气井工程学科负责人，中国科协委员等。长期从事石油与天然气工程领域的教学和科研工作，以“岩石力学、信息与控制工程”为主攻方向，已完成省部级以上重点课题 20 余项，其中获省部级以上科技奖励 6 项，同时发表学术论文 120 多篇，出版《井眼轨迹控制》等专著 2 本，主编《面向 21 世纪能源科技》、《地下钻掘采工程不稳定理论与控制技术》等论文集 5 部。是首届“孙越崎科技教育基金”能源大奖、第四届中国青年科技奖、首届“清华大学优秀博士后”奖及“国家杰出青年科学基金”的获得者。1996 年首批入选国家“百千万人才工程”(第一、二层次)，2001 年被评选为“长江学者奖励计划”特聘教授。1993 年开始享受国务院颁发的政府特殊津贴。

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		

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 1904~1949 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

序

全国人大常委会研究室，全国政协研究室，中央党史研究室和中国现代文化研究中心，共同组织编撰的《中国现代科学全书》，是一套规模宏大的学术专著丛书。该丛书对于探索世纪之交的科学发展规律，研究掌握现代科学跨世纪发展的特点和趋势，推动我国科技文化事业在 21 世纪的进一步繁荣发展，具有十分重要的现实意义和深远的历史意义。

油气井工程是勘探开发地下油气资源的重要基本环节。我国的油气井工程学科是于 1952 年建国初期，在北京清华大学首次创建的新兴学科。近半个世纪来，培养了大量的学士、硕士、博士和博士后高级科技人才，很好地满足了我国油气井工程建设不同阶段与不同层次的迫切需要。

随着我国政府不断加强对发展石油工业的投入力度，近 50 年来我国的油气井工程学科和工程建设，都取得了飞跃的发展，显著缩短了建国以前与世界上发达国家的巨大差距。目前我们已能在地下三维空间内，自行建立各种不同形态的定向拐弯井、丛式井、水平井，以及 6000 米以上的高难度超深井。1997 年还在我国南海东部海域，建成了一口水平位移创当时世界记录（完井深度 9238 米，水平位移 8062 米）的高难度大位移井。此外，由我国独创的保护油层屏蔽暂堵新技术，在不少油田已取得重大经济效益，有效解决了国内外长期以来未能彻底解决的油气层损害问题，对提高油气井产量和油田采收率具有重大的实用价值。

参与本书编撰的各位作者，都是各相关领域内颇有造诣的专家教授。由他们编撰的《油气井工程》，内容深入浅出，通俗易懂

懂，着重阐述了影响油气井工程发展的关键技术和相应的工艺措施。理论严谨，观点明确，具有较高的学术水平，是我国第一本能反映油气井工程科技发展的学术专著。本书的一个重要特点是，在阐述了国内外已成熟的基本工艺技术的基础上，广泛结合近十多年在全国科技攻关中取得的新观点，新成果，以及在生产上已有显著成效的新技术。如对地层特性评估、油气井优化设计、井眼轨迹控制和保护油气层屏蔽暂堵技术等，都作了比较详尽的论述。因此它不同于其它已出版的有关专业书籍，具有较高的学术水平和学术价值，无疑对油气井工程学科今后的发展和科技水平的提高，有重要的指导意义。

刘希圣

2002年6月于北京

前 言

根据《中国现代科学全书》编辑工作委员会制定的编撰条例和有关要求,通过在相关领域内颇有学术造诣的有关专家的共同努力,终于完成了《中国现代科学全书》工学分卷内石油与天然气工程中《油气井工程》的编撰工作。

参加本书编撰的有:长期从事优化钻井技术教学科研工作,曾获“优选钻井参数、平衡压力钻井和井控技术”成果奖胡湘炯教授,负责编撰第一、二、三章;高德利教授与邓金根教授共同编撰“实钻地层特性评估方法”(第四章);黄荣樽教授负责编撰“井眼稳定技术”(第五章);高德利教授负责编撰“井眼轨迹控制技术”(第六章);中国工程院院士罗平亚教授,负责编撰“保护油气层技术”(第七章);邓建民教授负责编撰“油气井固井技术”(第八章);万仁传教授级高级工程师负责编撰“完井工程”(第九章);陶果教授负责编撰“油气井测井技术”(第十章)。最后由胡湘炯和高德利教授根据专家评审意见,对全书作了适当的润饰处理和审定。

本书稿经我国油气井工程学科的创建者之一,石油大学刘希圣教授认真评审,提出了不少很好的建议和中肯的评审意见。我国油气井工程技术的最早开拓者史久光老先生,也对本书稿进行了认真审阅,提出了很多非常宝贵的意见。对于史老先生和刘希圣教授的认真负责精神,以及对本书的具体指导,在此谨表诚挚深切的感谢。

由于受我们的科学水平和资料所限,书中难免存在不妥之处,恳切希望广大读者指正。

胡湘炯

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 油气井工程发展概况	(1)
第二节 油气井工程的关键技术	(5)
第三节 油气井工程的发展方向	(8)
第二章 钻井工具设备	(15)
第一节 钻井地面设备	(15)
第二节 海洋钻井装置	(22)
第三节 井下钻井工具	(33)
第四节 钻井装备发展趋势	(43)
第三章 油气井优化设计	(46)
第一节 钻井系统分析	(46)
第二节 总体优化设计	(49)
第三节 井眼轨迹设计	(50)
第四节 优选钻井液性能	(60)
第五节 钻井优化设计	(65)
第四章 实钻地层特性评估方法	(84)
第一节 地应力的概念及测量方法	(84)
第二节 地层孔隙压力评估方法	(93)
第三节 地层破裂压力及其评估方法	(106)
第四节 岩石可钻性及其评估方法	(112)

第五节 典型地层的各向异性及其反演方法	(118)
第五章 井眼稳定技术	(124)
第一节 井壁的力学稳定技术	(124)
第二节 井壁的化学稳定技术	(141)
第三节 泥页岩井壁稳定的力学与化学的耦合分析	(151)
第四节 井眼系统流体压力平衡与井控技术	(160)
第六章 井眼轨迹控制技术	(174)
第一节 基本概念	(174)
第二节 井眼轨迹的测量与计算	(182)
第三节 直井防斜打直理论和技术	(187)
第四节 定向控制技术	(192)
第五节 井眼轨迹控制力学模型	(205)
第七章 保护油气层技术	(212)
第一节 油气层损害机理	(213)
第二节 油气层损害的评价技术	(223)
第三节 保护油气层技术	(227)
第八章 油气井固井技术	(257)
第一节 井身结构设计	(257)
第二节 套管柱强度设计	(264)
第三节 油井水泥	(273)
第四节 注水泥	(280)
第五节 固井质量检测 and 评价	(287)
第九章 完井工程	(291)

第一节	完井工程新概念·····	(291)
第二节	完井方式选择·····	(296)
第三节	完井工程对生产套管及注水泥的技术要求·····	(311)
第四节	射孔技术·····	(322)
第五节	完井生产管柱·····	(328)
第十章	油气井测井·····	(334)
第一节	电磁测井·····	(335)
第二节	声波测井·····	(344)
第三节	核测井·····	(351)
第四节	成像测井·····	(357)
第五节	随钻测井·····	(359)
第六节	生产测井·····	(361)
第七节	核磁共振测井·····	(362)

第一章 绪 论

地下油气资源通常都埋藏在地表以下几百、几千，甚至近万米深的各种岩层内。为了勘探开发这些油气资源，人们必须从地面或海底建立一条条直达地下油气藏的密闭通道。这种细长的密闭通道，有的与地面垂直，有的要定向弯曲伸向不能垂直钻达的油气藏，有的还要在油气藏内沿一定方向水平或弯曲延伸。这就在地下的三维空间内，构成了直井、定向斜井、水平井和多分支井等多种形态的油气井。因此，油气井工程是勘探开发地下油气资源的基本手段，是扩大油气储量和提高油气田产量的重要环节。它主要包括钻井、固井、完井和测井等多种工程技术，涉及地质学、岩石矿物学、物理学、化学、数学、力学、机械工程、系统工程和遥测遥控等各种学科，是一项多学科、多工种、技术复杂、造价昂贵的地下建设工程。

第一节 油气井工程发展概况

20世纪初，人们用特制工具(钻头)加压旋转，以机械破岩方式为主的旋转钻井问世以来，近百年内它始终作为一种最主要的钻井方式，在全世界被广泛采用。其间虽曾探索了多种非机械破岩的钻井方式，如高压水力冲蚀，等离子切割、电弧高温熔蚀和连续定向爆破等，但因地下环境复杂，这些钻井方式都未取得富有成效的突破性进展和商业性应用。

由于长期的地壳运动和自然环境变迁，地下情况非常复杂，其中存在着许多难以预测的不确定因素。因此在 50 年代以前的

近半个世纪内，油气井工程基本上处在全凭经验钻井的初级发展阶段。50年代以来，由于各大石油公司逐步认识到不断探索钻井规律，深入开展科学研究，对于减少钻井风险和提高经济效益具有重要作用。因此积极组织力量，广泛开展了优选钻进参数、改进钻头结构、调节钻井液性能等多方面的室内研究和现场试验。先后研制成功了镶齿密封滑动轴承三牙轮钻头和金刚石复合片钻头，从而显著提高了破岩效率和钻头寿命。随着对新型钻井液及其性能处理的深入研究，又显著提高了预防和控制井壁垮塌、钻井液漏失和油气上喷等各种井下复杂故障的能力。尤其是70年代以来，随着计算机技术的高速发展，不断研制改进成的随钻测量仪器和遥控导向装置，更为油气井工程提供了遥测遥控的有效手段。目前，欧美等发达国家已钻成逾万米的超深井（前苏联已钻达的最大井深为12200m），以及高难度的大位移定向井（阿根廷海上一口大位移井的水平位移达11000多米）。此外，在高温高压钻井技术、三维多分支和多目标井的钻井技术，以及油气层保护技术等方面都取得了富有成效的突破性进展。但因地下岩层复杂多变，地区差别极大，目前还不能在钻井以前确切了解井下的地质环境，加上各种井下装置都要受细长井眼（井径和井深比最小达 10^{-5} ）的约束和高温高压等恶劣工况的影响，其技术性能尚难适应各种钻井和完井工程的要求。因此在油气井工程中还有不少技术难题，尚需在21世纪内进一步研究解决。

我国的油气井工程是在建国以前极其薄弱的基础上发展起来的。1907年清朝政府在陕西延长七里村用冲击顿钻方式，钻成了大陆上第一口井深81m的油井，日产原油1.0吨左右。此后在满清政府，军阀混战和国民党统治的40年间，全国仅钻油气井169口，钻井总进尺6.7万多米。1948年全国只有8台中小型旋转钻机，钻井14口，年总进尺仅0.5万米。建国以后由于不断加大对石油工业的投入力度，我国的油气井工程建设便高速发展

壮大，为发展我国的石油工业作出了巨大贡献。到 1998 年底，全国共有在用的大中型旋转钻机 988 台，当年钻井 10948 口，年总进尺 1662 万米，分别为 1948 年的 123 倍、781 倍和 3324 倍。建国五十年来共钻井 19.74 万口（其中探井 3.54 万口，生产井 16.20 万口），钻井总进尺 3.05 亿米，分别为建国以前 40 年的 1170 倍和 4552 倍。目前我国油气井工程建设的工作量已位居世界第三，仅次于美俄两国。正由于油气井工程建设的飞速发展，使我国的石油产量从 1949 年的年产 12 万吨，发展到 1998 年生产原油 1.4 亿多吨，增长 1166 倍，跨入了世界先进石油生产国的行列。

根据科教兴国的战略方针，党中央于 1952 年建国初期，就在北京清华大学首次创建了油气井工程学科。此后又先后在北京、西南、大庆、西安、新疆等石油院校内都设置了油气井工程专业。近五十年来培养了大量学士、硕士、博士和博士后高级科技人才，很好满足了油气井工程建设不同阶段和不同层次的迫切需要，促进了油气井工程建设的高速发展，显著缩短了建国以前与世界上发达国家的巨大差距。目前我国已能在地下三维空间内，自行建立各种不同形态的定向拐弯井、丛式井、水平井，以及 6000m 以上的高难度超深井。

我国第一口定向斜井始建于 1955 年。当时在甘肃玉门老君庙构造北翼，用涡轮钻具、弯接头和氟氢酸测斜仪钻定向斜井，历时 360 天，井深 2104m，最大井斜角 29.3° ，井底水平位移 489m。此后长期停滞不前，直到改革开放以后的 80 年代中期，为了解决在海滩、沼泽地带和建筑物稠密地区难于开辟井场和少占农田等问题，在全国开展了钻定向井、丛式井的技术攻关。通过引进国外先进的定向钻井技术和随钻测量仪器，使我国的定向钻井技术得到了很快发展。目前各油气田在合适地区都已采用定向井和丛式井开发油气藏。胜利油田于 1989 年钻成的河 50 丛式