

天然气工程丛书

气田与凝析 气田开发

李士伦 王鸣华 何江川 等编著

石油工业出版社

天然气工程丛书

气田与凝析气田开发

李士伦 王鸣华 何江川 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

《天然气工程丛书》共分8个分册,《气田与凝析气田开发》是其中的一个分册。

本书以我国主要类型的气田和凝析气田(气驱气田、水驱气田、异常高压气田、凝析气田和非常规煤层气田)为对象,在总结前人经验和大量吸收国内外先进技术的基础上,系统介绍了这类气田开发的基本理论、方法、经验和最新技术进展,并附有气田开发的实例。

本书可供从事天然气工程的技术人员、研究人员和管理人员参考,也可供相关、相近专业的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

气田与凝析气田开发/李士伦等编著.

北京:石油工业出版社,2004.12

(天然气工程丛书)

ISBN 7-5021-4829-9

I. 气…

II. 李…

III. ①气田开发②凝析气田-气田开发

IV. TE37

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第122037号

气田与凝析气田开发

李士伦 王鸣华 何江川等编著

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.cn

总 机:(010) 64262233 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印刷

2004年12月第1版 2004年12月第1次印刷

889×1194毫米 开本:1/16 印张:21.75

字数:649千字 印数:1—5000册

定价:88.00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

《天然气工程丛书》

编 委 会

主 任 黄 炎

副主任 王乃举 刘宝和 胡文瑞 夏鸿辉 魏宜清

茹 克 王志刚

成 员(以姓氏笔画为序)

马新华 王全生 王道富 冉新权 孙龙德 许可方

张卫国 李安琪 李海平 李鹭光 杜志敏 宋顺琼

沈 琛 孟慕尧 金忠臣 胡朝元 黄立功 阎存章

编辑组成员

组 长 孟慕尧

组 员 冉新权 张卫国 咸玥瑛

《天然气工程丛书·气田与凝析气田开发》

编 写 组

主 编 李士伦

副 主 编 王鸣华 何江川

成 员 郭 平 夏海容 钱治家 曲俊跃 孙 雷 杜建芬
孙龙德 宋文杰 江同文 黄全华 张茂林 刘建仪
孙良田 张健博 王红岩 杜志敏 黄天星 王 莉
王皆明 朱亚东 李振龙 魏国彪 赵平起 马小明
孙亚兰 李玉冠 王新裕 杜 春 张永高 马力宁
李江涛 宫 威 焦里力 卢 涛 张明录 赵晓峰
汤 勇 周守信 杨学峰 张 吉

序一

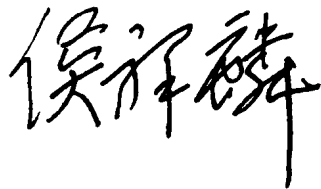
近年来，我国天然气工业取得了很大的发展，已逐步进入了工农业生产和日常生活的方方面面，成为国民经济生活中的重要内容。经过几代人的努力，我国目前已经初步形成了四川、塔里木、鄂尔多斯、柴达木和海洋在内的五大气区基本格局，建设了以“西气东输”为代表的一批陆地及海上输气干线。“西气东输”宏大建设工程的实施，不仅是落实“西部大开发”战略的重要举措，而且也是我国在天然气生产建设能力和技术等方面的综合体现，标志着我国天然气的发展进入了一个新的阶段。

经过几十年的生产实践，我国在天然气的勘探、开发、储运和综合利用等方面，已经积累了丰富的经验，技术达到了较高的水平。认真总结这方面的经验和技術，展示我国天然气工业的成就和进步，指导和促进技术水平的提高，是一件十分有意义的工作，本套丛书的编写实现了这一愿望。

《天然气工程丛书》是一套按系统工程要求编写的丛书，它全面系统地总结了我国历年来在天然气方面的实践经验和成果，借鉴了国外有关天然气方面的先进理论和技术。编著者大多来自多年从事现场和科学研究有经验的专家、学者，在编写方法上强调了科学、实用及可操作性的特点，并有相当部分实例可供借鉴，使丛书成为一部信息量大、内容充实、涉及面广、有一定理论深度的技术专著。

《天然气工程丛书》的出版，对我国天然气的勘探、开发和综合利用具有很大的技术指导 and 推动作用，在此我表示衷心地祝贺。藉该书出版之际，我祝愿广大的科技工作者不断创新，不断进步，为促进我国工业技术水平的提高和发展做出更大的贡献。

中国科学院院士
中国工程院院士



序二

在我担任中油股份公司总裁期间，油气田开发方面的几位老同志，建议编写出版一套“天然气工程丛书”，以适应我国天然气迅猛发展的需要，我非常赞同和支持这件事。

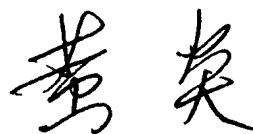
三年来，在中石油、中石化、中海油、石油院校等部门的数十名专家和上百名工程技术人员的辛勤努力下，克服了专业门类多、地域跨度大、编著人员不稳定等诸多困难，完成了丛书的编写出版任务。

本“丛书”的内容涵盖了全国各主要产气区，按照上下游一体化的总体思路，从资源勘探到综合利用，编辑为8个分册，约500万字。它凝结着我国从事天然气工作的几代人的辛劳和智慧，并把丰富的实践经验与近代科技进步相结合，是目前国内较为全面系统又有一定理论概括的系列丛书。

进入新世纪以来，我国天然气发展形势很好。预期在不久的将来，天然气在国民经济和社会生活中的地位和影响将越来越大，从事天然气工业的各个领域的工程和管理人员也将越来越多，他们迫切需要站在一个更高的起点上，了解和掌握比较系统的天然气技术；石油院校师生，也需要有更新的教材。我认为丛书的出版，一定能够给予他们以有力的帮助，并为促进天然气勘探、开发、采气工程、气田建设、管道输送、天然气综合利用等技术的发展与创新做出贡献。

在“丛书”出版的时候，特向参与编著和出版的各位专家、教授、工程师及全体工作人员致以衷心的感谢！

丛书编委会主任
中国石油学会理事长



编 著 说 明

我国是世界上发现和利用天然气历史最悠久的国家之一。新中国成立以来，经过半个多世纪的努力，在天然气的勘探、开发、储运和综合利用等方面，积累了丰富的实践经验，有了一套适合于我国天然气工业发展特点的技术和理论。特别是“九五”、“十五”期间，天然气得到了迅猛发展，目前已初步形成四川、塔里木、鄂尔多斯、柴达木和海洋五大气区格局的天然气现代工业体系，“西气东输”——国家西部大开发战略序幕性工程的实施，标志着我国天然气的发展进入了一个新的阶段。

我国天然气的勘探和开发，有其自身的特点。气田的地质条件复杂，开采的技术难度较大，绝大多数气田的储层为低渗透、低孔隙，具有边、底水，非均质性严重；气田规模多为中小型且地域分散；有些主力气田含硫，这就使气藏工程、采气工程、地面工程及综合加工利用等，面临一系列技术难题。正是在这种复杂和困难的条件下，我国的科技人员，经历了多年的探索和实践，研究和利用新技术、新方法和新装置，加深了对我国天然气工业勘探、开发和加工基本规律的认识，发展了天然气上、下游工程，使我国天然气工业得到了迅速的发展。这些成就饱含着从事天然气工作的广大工程技术人员、生产经营管理者的辛劳和智慧。

国民经济的快速增长和天然气工业的大发展，要求我们必须系统总结我国天然气工业丰富的实践经验，同时借鉴国外天然气工业先进的理念与技术，编辑出版一套既有理论指导又有现实可操作性的科技论著，给这一方兴未艾的大好形势以有力的技术指导。

1999年，经中国石油天然气集团公司原开发生产局局长王乃举、总工程师孟慕尧和石油工业出版社张卫国等同志提议，成立“天然气工程丛书”编写筹备组，同时将这一想法向当时担任中国石油天然气股份有限公司总裁的黄炎作了汇报，得到了黄炎同志的大力支持，组建了“丛书”编委会。经与多方协商，由黄炎担任编委会主任，王乃举、刘宝和、胡文瑞、夏鸿辉、魏宜清、茹克、王志刚任编委会副主任；编委有：马新华、王全生、王道富、冉新权、孙龙德、许可方、张卫国、李安琪、李海平、李鹭光、杜志敏、宋顺琼、沈琛、孟慕尧、金忠臣、胡朝元、黄立功、阎存章。

编委会的具体组织领导工作由王乃举、孟慕尧同志负责。为了加强经常性的工作指导，还成立了编辑工作组，组长为孟慕尧，成员有冉新权、张卫国、咸玥瑛。

在“丛书”编写期间，编委会先后组织了多次研讨会，邀请各油气田、石油院校、科研院所的领导、专家、工程技术人员参加，确定了“丛书”的框架结构和编写提纲。每一分册都组建了各自的主编及编辑小组，聘请了一大批著名专家撰稿，他们都做了大量艰苦细致的文献查阅、专题研究及亲临现场调研工作。中国石油天然气集团公司、中

国石油化工集团公司、中国海洋石油总公司、西南石油学院、石油大学等单位，在编写资料、编写人员等方面积极给予协调帮助；中国石油天然气股份有限公司、西南油气田分公司、长庆油田分公司在经费上给予了支持，保证了“丛书”编写工作的正常运行。石油工业出版社在稿件审查、编辑加工和组织出版方面高度重视，将该套“丛书”列入了石油工业出版社“十五”重点丛书，并上报国家新闻出版总署，将此“丛书”作为精品图书出版。

本套“丛书”是系列性科技专著，共分8个分册，约500万字，分别为《天然气资源勘探》、《气藏地质》、《气田与凝析气田开发》、《气藏工程分析方法》、《采气工程》、《天然气矿场集输与处理》、《天然气输送与储存工程》、《天然气综合利用》。“丛书”既有理论概念，但更多地偏重于适用的工程技术方法的阐述。它是天然气勘探、开发、集输、储运、综合利用系统有代表性的专家和技术人员的集体创作，主要面对从事天然气工业的中高级科技人员和经营管理者，也可作为大专院校及企业在职教育培训的参考教材。

在本“丛书”出版的时候，编委会对所有参加本“丛书”的编写、研讨、出版和曾经给予大力支持的各界人士，谨致衷心的感谢！

前 言

进入 21 世纪以来,随着国家西气东输工程的实施,中国天然气工业进入了一个快速发展的新时期,天然气储量、产量、下游用量迅速增长,天然气为改善我国能源结构、减轻大气污染、促进国民经济增长正发挥着日益重要的作用。

气田、凝析气田开发是天然气上游生产的主要内容。气田、凝析气田开发的理论是在地质、应用地球物理、渗流力学、油气层物理、天然气钻采工程、油气集输工程和技术经济等多学科结合基础上逐渐积累和发展起来的。其核心内容就是在气藏描述基础上,认识流体在多孔介质中的渗流规律,并采取各种相应的工程措施,控制天然气和凝析油从气层中流向井底的渗流过程,以达到开采油气和其他宝贵组分的目的。按照全套丛书的安排,本书涉及的不是气田、凝析气田开发的全部内容,着重在气藏工程部分,且倾向于介绍主要类型气田的开发理论、方法、技术和经验。

全书李士伦为主编,王鸣华、何江川为副主编。全书共分九章,各章的编写人员如下:

第一章 李士伦 何江川

第二章 郭 平 夏海容 钱治家

第三章 王鸣华

第四章 曲俊跃 王鸣华 李士伦

第五章 李士伦 孙 雷 杜建芬 孙龙德 宋文杰 江同文 黄全华 何江川
张茂林 刘建仪

第六章 李士伦 孙良田 杜建芬

第七章 张健博 王红岩 李士伦

第八章 黄天星 王 莉 王皆明 朱亚东 李振龙 魏国彪 赵平起 马小明
孙亚兰 李玉冠 王新裕 杜 春 张永高 马力宁 李江涛 宫 威 焦里力 卢
涛 张明录 王鸣华 李士伦

赵晓锋、汤勇、周守信、杨学峰、张吉等同志也参加了本书编写中的部分工作。

在编写过程中,得到了中国石油天然气集团公司、中国石油化工集团公司、中国海洋石油总公司等相关单位、专家和技术人员的大力支持与帮助,王乃举、韩大匡、孟慕尧、冈秦麟、陈元千等同志对本书提出了许多宝贵意见和建议,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有缺点和不足之处,恳请读者批评指正。

本书编写组

2004 年 5 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 中国古代天然气开采简史	(1)
第二节 天然气是 21 世纪的主要能源之一	(3)
第三节 中国天然气工程技术发展现状和世界发展趋势	(4)
第四节 气田、凝析气田开发特点和一些规律性认识	(7)
第五节 气田、凝析气田开发方案编制中的一些重要问题	(13)
参考文献	(32)
第二章 天然气性质	(33)
第一节 基本概念	(33)
第二节 天然气相对密度和视摩尔质量	(35)
第三节 拟临界气体性质的计算	(36)
第四节 天然气偏差系数 (Z 因子) 的确定	(46)
第五节 气体的地层体积系数	(49)
第六节 气体密度	(50)
第七节 气体压缩系数	(50)
第八节 气体粘度	(53)
第九节 地层水的性质	(53)
第十节 气体中的水蒸气含量	(59)
第十一节 气体水合物	(62)
第十二节 气体紊流因子和非达西流系数	(63)
参考文献	(65)
第三章 气驱气藏开发	(68)
第一节 天然气井产量	(68)
第二节 压降法计算气藏储量	(80)
第三节 气藏动态分析	(85)
第四节 气藏采气速度	(95)
第五节 气藏开发井网	(97)
第六节 气藏开发指标概算	(100)
参考文献	(102)
第四章 水驱气藏开发	(104)
第一节 水驱气藏类型和开发特征	(104)
第二节 水驱气藏水侵特征	(109)
第三节 应用矿场资料分析气藏水侵强度	(114)
第四节 出水气井类型及特征	(119)
第五节 水驱气藏气井合理产量	(121)
第六节 水驱气藏采收率的影响机理	(124)
第七节 提高水驱气藏采收率的途径	(129)
参考文献	(136)

第五章 凝析气藏开发	(138)
第一节 凝析气藏的主要地质特征、开发特征及开发方式	(139)
第二节 凝析油体系相态特性实验测试与模拟研究	(145)
第三节 凝析气藏的天然气、凝析油的储量计算	(164)
第四节 衰竭式开发凝析气藏	(167)
第五节 回注干气开发凝析气藏	(190)
第六节 注水开发凝析气藏的探讨	(204)
参考文献	(207)
第六章 异常高压气藏开发	(210)
第一节 异常高压的起因	(210)
第二节 物质平衡法在异常高压气藏储量计算和动态分析中的应用	(216)
第三节 异常高压对岩石性质(压缩系数、孔隙度和渗透率等)的影响	(223)
第四节 异常高压气藏开发特征	(227)
第五节 异常高压气藏开发实例	(230)
参考文献	(234)
第七章 煤层气藏开发	(236)
第一节 煤层气藏地质特征与资源分布	(236)
第二节 煤层气储层评价参数	(239)
第三节 煤层气吸附脱附规律、渗流规律及开采机理	(244)
第四节 煤层气储量计算	(257)
第五节 煤层气富集特点及选区原则	(260)
第六节 煤层气开采技术和开发井网	(264)
参考文献	(281)
第八章 国内气田、凝析气田开发实例	(284)
第一节 崖城 13-1 海上高产气田开发技术和经验	(284)
第二节 新疆柯克亚凝析气田西五一(3)循环注气先导试验	(289)
第三节 大张坨凝析气田循环注气开发技术和经验	(295)
第四节 青海第四系长井段多层疏松砂岩气田开发技术和经验	(309)
第五节 锦州 20-2 底油底水凝析气田开发技术与经验	(315)
第六节 中坝气田须二气藏开发技术和经验	(325)
第七节 长庆靖边气田开发技术和经验	(328)
参考文献	(332)

第一章 绪 论

第一节 中国古代天然气开采简史

中国是世界上开凿天然气井和利用天然气最早的国家之一。公元前1世纪出现的陕西鸿门火井和四川临邛火井，是人类开采利用天然气的证明。这不仅为中国大量史籍如《蜀王本记》、《汉书·地理志》、《水经注》、《华阳国志》、《博物志》等著作所记载，也为外国学者所公认。据《新国际百科全书》第八卷“瓦斯条”记载，西方学术界承认天然气的利用，以中国和波斯最早，中国还在波斯之前。英国著名科学家李约瑟博士所著的《中国科学技术史》第一卷第七章写到：“中国汉代时，四川已经利用从钻孔冒出来的天然气来蒸发抽出来的或从别处流来的咸水”，并认为这是最早的天然气井。马可波罗在《中国游记》中，写到早在汉朝，有的庙宇用天然气点灯的情景。这些都无可置疑地说明了中国是世界上最早开发和利用天然气的国家。

石油的最早记载是东汉历史学家班固（公元32—92年）所著的《汉书》，在该书“地理志”中写道：“高奴有洧水可燃”，高奴今陕西延长一带；洧水是延河的一条支流。中国历史石油名称的演变见表1-1。

表1-1 中国历史石油名称的演变

历史朝代	当时石油的主要名称	所载文献
秦、汉	可燃水	《汉书》
三国、晋	石漆	《博物志》
南北朝	水肥	《水经注》
隋、唐	树脂水 黑香油	《元和郡县图志》 《大唐西域记》
宋	石油 火油 石脑油	《梦溪笔谈》 《武经总要》 《本草衍义》
明	石油 雄黄油 硫磺油 泥油 石脑油	《大明一统志》 《蜀中广记》 《蜀中广记》 《物理小识》 《本草纲目》
清	石油	

有关天然气记载的情况:

(1) 公元前 11—8 世纪, 西周初年成书《易经》中有“泽中有火”的记载, 反映了气苗燃烧的现象。

(2) 公元前 1—3 世纪, 战国时期, 李冰在四川兴修水利, 钻凿盐井, 而后在临邛(今邛崃)的盐井中发现了天然气, 当时称“火井”(《华阳国志》)。

(3) 公元前 61 年, 在陕西鸿门(今神木县一带)发现天然气井, 并立“火井祠”(《汉书》)。

(4) 公元前 53—18 年, 西汉文人杨雄著《蜀都赋》, 把火井列为蜀都一大名胜。

(5) 1950 年在成都出土的东汉画像砖中, 有一幅“煮盐像”, 生动地描绘了公元 1—2 世纪天然气熬盐的情景。

(6) 公元 3 世纪, 三国时期, 诸葛亮曾亲自去临邛看过天然气井, 据《异苑》记载, 这口井燃烧时间长达 300~400 年。

(7) 公元 3—4 世纪, 西晋左思著《蜀都赋》曾有这样的诗句:“火井沉荧于幽泉, 高焰飞煽于天垂”。

(8) 东晋常璩著《华阳国志》详细记载了自秦、汉以来四川天然气熬盐情景:“临邛县, ……有火井, 夜时光映上昭。民欲其火, 先以家火投之, 顷许如雷声, 火焰出, 通耀数十里。以竹筒盛其光藏之, 可拽行终日不灭也。井有二水, 取井火煮之, 一斛(注:容量十斗)水得五斗盐。”

(9) 公元 1041—1053 年, 北宋仁宗庆历—皇佑年间, 中国钻井工艺技术有一次大革新, 出现了“卓筒井”, 这是从大口井浅井向小口井深井发展的标志。当时这个技术传到了欧洲(英国李约瑟博士著《中国科学技术史》)。

(10) 公元 1673 年, 明崇祯十年, 宋应星写成《天工开物》一书, 对我国古代钻井、天然气熬盐等技术都做了详细记载。

(11) 公元 1765 年, 清乾隆三十年, 在四川自流井构造老双盛井, 井深 530m, 遇天然气, 日产约 160m³。

(12) 公元 1835 年, 我国钻井深度已超过 1000m, 自流井构造兴海井井深 1001.4m。

(13) 公元 1840 年前后, 自流井构造磨子井深达 1200m, 钻穿了嘉陵江石灰岩(T³c)主力气层, 由于气势凶猛, 发生了大火, 从井口喷出了几十丈高的火舌, 像一座火山。据估计, 当时日产 1×10⁴m³以上气井约 10 余口, 大部分位于构造顶部。据不完全统计, 从 1853—1983 年, 在自流井构造 74km²的采区内, 共先后开凿盐井 13000 口, 天然气井已数以千计, 粗略估计累计采气 334×10⁸m³。

我国古代钻井技术起源于人们寻找水源的手工挖掘劳动中。自北宋中期有了新发展, 成功地开凿小口井, 称“卓筒井”, 苏轼在《东坡志林》中记载“自庆历(公元 1041—1048 年)、皇佑(1049—1054 年)以来, 蜀始创用“筒井”, 用圆刃凿如碗大, 深者数十丈。以巨竹去节, 牝(音 pìn, 雌性鸟兽, 跟牡相对)牡相衔为井, 以隔横入淡水, 则卤咸泉自上。”古代钻井也是走在当时世界前列的, 大体上分 7 个步骤: 开井口, 下石圈, 锉大口, 下木竹, 扇泥, 锉小口和见功。古代称钻头为“锉”, 大体有 4 种: 鱼尾锉、银锭锉、财神锉、马蹄锉(单、双两种)。有起加重杆和钻铤作用的梃子; 有灵巧的打捞工具, 包括打捞绳矛的和锉或其他落井铁器两类; 还有修补井壁坍塌部分的“补腔”和找漏堵漏的工具, 等等。

中国劳动人民对找寻天然气也有着丰富的经验, 他们对四川三叠系嘉陵江石灰岩地层缝口、洞口早有了很好的认识, 他们说:“水和火都是从缝里出来的, 要找水和火就要找缝”。我们的祖先还发展了一套井下工具, 如: 有了解井下情况的打印工具——泥娃娃; 有作为井口测试或放空的“瓶塞子”, “通天视”; 有能做到边钻边采、边捞水边采气的井口装置——“康盆”; 有高达百米的木制井架……, 这些都是中国劳动人民智慧的结晶。但是, 由于封建统治者的长期残酷剥削和近百年来各国列强的沉重压迫, 使中国石油和天然气工业长期处于落后状态。国民党统治时期, 在四川一共只钻了 5 口半井, 还报废了 3 口, 钻井深度仅 1402m, 只在 2 口井中获得了少量的天然气。这就是旧中国所谓“资源开

发”的缩影。

第二节 天然气是 21 世纪的主要能源之一

一、能源发展简述

19 世纪燃煤蒸汽机的发明带动了世界范围的工业革命，由此煤炭成为主要能源，并发展壮大资本主义经济。

20 世纪石油的开采和发展及内燃机迅速广泛的应用大大地促进了世界经济的快速发展。石油在世界经济发展和现代化进程中做出了巨大的贡献，并在能源结构中替代了煤炭成为世界第一能源。根据已探明和待发现的石油资源量来看，其优势和重要地位，可从 20 世纪中叶起持续 100a 左右。

在勘探开发石油过程中，同时增加了对天然气的认识并发现了大量天然气，使天然气探明的储量迅速增加。特别是经济快速发展和人口急剧增加，能源消费不断增长，温室气体及各种有害物质排放，对人类生存环境造成了极大的挑战。在这一背景下，清洁的、热值高的天然气能源正在日益被受重视，利用天然气几乎已成为世界各国改善环境和维持经济可持续发展的必不可少的最佳选择。对当今世界天然气工业发展的特点大致可以概括成以下三句话：

- (1) 从环保和优质能源出发，21 世纪将是天然气世纪。
- (2) 天然气将成为能源市场上首先选择的燃料。
- (3) 世界能源发展的总趋势是向低碳化方向发展，最终向无碳化发展。

由于天然气利用的热效率高，环境效益好，发展利用天然气成为当今世界能源发展的潮流。2010 年前后，天然气在能源结构中可能达到占一次能源消费结构的 24%；可能在 2050 年前后，将超过石油，预计可保持一个相当长的时期。最终将进一步降低能源含碳量，即可再生的太阳能、氢能源将取代现有大部分矿物能源，而成为最主要的能源^[1,2]。

二、世界天然气开发概况

1. 世界天然气资源量

(1) 世界天然气剩余可采资源量 $1120 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，其中，常规天然气 $280 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，占 25%；非常规天然气 $840 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，占 75%。国际天然气联合会 (IGU) 估计世界探明和非探明常规天然气资源量约 $400 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

(2) 探明可采储量的增长和分布。1950 年探明剩余可采储量 $8.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，而 2001 年为 $155.08 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，增长了 18 倍，年平均增长 33.8%。东欧 + 独联体 39% (其中俄罗斯 $48.14 \times 10^{12} \text{ m}^3$)；中东 34% (伊朗 $9.88 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，占 15.8%)；西半球 10%；西欧 3%；非洲、亚太各占 7% 左右。

2. 气田分布特点

20 世纪 90 年代气田分布有如下特点：

- (1) 世界共有油气田 40000 多个，其中，气田 17000 个。
- (2) 按储层分，砂岩气藏占 76.5%，碳酸盐岩气藏占 23.5%；按圈闭分，构造圈闭占 92.9%，岩性、地层圈闭占 7.1%；按深度分，小于 1500m 占 38.8%，1500~3000m 占 49.9%，3000~5000m 占 10.5%，大于 5000m 占 0.8%。

3. 非常规天然气

非常规天然气指致密砂岩气、深盆气、煤层气、浅层生物气、水溶性天然气、水合物和深源气等,资源非常丰富(浅层生物气和致密砂岩气现也常列在常规天然气中),远超过常规天然气,粗估为 $849 \times 10^{12} \text{m}^3$,可能远超过这个数字。

水合物是一种由烃类气体(主要是 C_1)和水组成的冰状物质,主要在深海海域和常年冻土带中,对此资源的估计大多出于猜测,差别很大,最近公布的数字幅度缩小,在 $(3000 \sim 30000) \times 10^{12} \text{m}^3$ 。水溶性天然气分布广,埋藏浅,储量大,估计世界地下水圈沉积盖层下水溶性气总资源量达 $33697 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。生物成因的甲烷气世界已探明储量为 $15.5 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。在产气层内,平均渗透率等于或低于 0.1mD ($1 \text{mD} = 10^{-3} \mu\text{m}^2$)的储层产气为致密砂岩气,估计资源很大,达 $3000 \times 10^8 \sim 600 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。天然气聚集盆地中央和凹陷较深部位,储层致密,气水关系倒置,含气层压力异常,人称深盆气,中国陕甘宁盆地资源量就达 $8 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。深源气是来自地壳深部的无机成因气,资源量也很大。

第三节 中国天然气工程技术发展现状和世界发展趋势

一、中国气田、凝析气田开发的简况

根据第二次全国油气资源评价结果,中国天然气总资源量为 $38 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。气层气主要分布在陆上中、西部地区以及近海海域的南海和东海,其中中部气区,包括四川、鄂尔多斯,资源量为 $12.1 \times 10^{12} \text{m}^3$,占陆上资源总量的 40.6% ;西部含气区,包括准噶尔、柴达木、塔里木、吐哈、河西走廊等区域,气层气资源量为 $10.77 \times 10^{12} \text{m}^3$,占陆上资源总量的 36.5% 。近海地区气层气总资源量为 $8.2 \times 10^{12} \text{m}^3$,占全国总资源量的 21.5% [3]。

四川盆地碳酸盐岩气田存在层系多、断裂复杂、非均质性严重和气水关系复杂等特点,盆地中约 70% 气井的天然气中含有 H_2S 和 CO_2 ,如渡口河气田探明储量为 $200 \times 10^8 \text{m}^3$, H_2S 含量高达 $232 \sim 244 \text{g}/\text{m}^3$, CO_2 含量高达 $126 \sim 162 \text{g}/\text{m}^3$,属中型储量、特高含硫气田,这类气田开发难度大,具有强腐蚀性和剧毒污染,还可能产生单体硫固相沉积,堵塞井筒,因此给采气设施和气体加工处理提出了一系列特殊要求。

陕甘宁盆地长庆下古生界为低渗碳酸盐岩气藏,上古生界为低渗砂岩气藏。下古生界气田气层分布面积大,但储层薄、丰度低,且由于存在侵蚀沟槽以及平面非均质强烈,给开发布井带来很大难度。上古生界气藏气井产能较低,其主要特征是低渗透、低丰度、低单井产能,孔隙度为 $4\% \sim 10\%$,渗透率为 $(0.1 \sim 2.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储层物性平面变化大,非均质性强,高产富集区难认识。

塔里木天然气资源丰富,气田规模大,储量丰度高,但气藏类型较特殊,如克拉 2 气藏,属于异常高压巨厚砂岩气藏,埋深 $3500 \sim 4000 \text{m}$,压力系数高达 2.02 ,储层厚度 $200 \sim 300 \text{m}$,这给气田开发提出了新的课题。

青海气区涩北—台南气田气层埋藏浅,约为 $500 \sim 1800 \text{m}$,储层疏松,易于出砂,纵向上含气层多达 $50 \sim 70$ 小层,气水关系复杂,具有边、底水,或呈气水层交互产状,层间及层内非均质严重,物性受泥质含量影响较大,致使含气饱和度、渗透率差异大,不同井(层)产量差异也大,这给气藏开发布署、调整和控制都带来很大困难。

中国从 20 世纪 70 年代以来相继在陆上和海域发现了一批凝析气田,特别是 90 年代在西部塔里木盆地发现了牙哈等深层、高压、高含凝析油的凝析气田。经过近 20 多年的生产实践和“八五”、“九五”、“十五”攻关研究,特别是塔里木柯克亚凝析气田和大港大张坨凝析气田注气开发试验的成功,为中国凝析气藏的开发积累了宝贵的经验,初步形成了凝析气田循环注气开发配套技术。

中国已发现的天然气藏的地质特点和储层特性给天然气开发、开采带来很大困难。目前已探明的以中、小型气田居多(南海西部、塔里木、陕甘宁的一些大气田的发现使这一情况正在改变),这一特点决定了中国天然气开发的分散性和复杂性。中国已探明气田的埋藏深度大多在3000~6000m之间,气层偏老,埋藏又深,四川二叠系以下地层天然气探明储量占总储量的70.04%,深层气藏开发占主导地位,其开发、开采的难度必然增大。中国天然气储层大多属于中、低渗透储层,而且低渗、特低渗储层占相当大的比例,这些储层非均质明显,孔隙度低,连通性差,水敏和酸敏性突出,水锁贾敏效应严重,自然产能低,要达到经济而有效的开发,必须进行气层改造。水驱气田在已投入开发的气田中占相当大的比例,四川气田尤为突出,据已投入的73个气田的不完全统计,水驱气田占总数的85%,出水井数在44%以上。中国的凝析气田又具有一些特点,主要是:凝析油含量多为中偏低,回注干气都处于经济极限边缘;地露压差小,多为饱和凝析气藏;最大反凝析液量大大小于临界流动饱和度,一旦析出于地层中就很难流动;反凝析液损失率一般都超过50%;同一油区内,凝析气藏常带油环或为凝析气顶油藏,这更增加了开发的难度和复杂性。

二、天然气开发技术发展简述

国内外天然气开发近中期主要集中在水驱气藏、凝析气藏和低渗透及裂缝性碳酸盐岩气藏等特殊气藏的开发研究上,对于非常规天然气,包括煤层气、致密气层气、水溶气、深层气、浅层气和水合物固态气等也做了超前研究,主要发展的技术如下。

1. 提高天然气和凝析油采收率技术

1) 水驱气藏

(1) 国外从20世纪70年代后期开始了强排水采气的措施,对释放封闭气起到了积极的作用,可使采收率提高10%~20%左右。20世纪80年代又发展了气藏整体治水技术,具体方法是:

①单井排水采气。目的是调整气水边界推进速度,降低水侵区压力,使封闭气膨胀而产生,避免气藏水侵恶化,防止生产气井过早水淹。

②气水联合开采。该开采方式是气藏整体治水的一种工艺,不同于单井排水采气,它适用于尚未完全水淹或已完全水淹而“报废”了的气藏。先通过气藏描述和气藏数值模拟,确定最佳排水井位、排水量和采气速度,后再排水,实践证明,它是提高采收率的有效方法。

③阻水开采工艺。该工艺立足于气藏早期整体治水,在边水驱气藏气水界面的含水一侧或底水驱气藏的含水层布置排水井;对于局部水驱气藏,在水沿高渗透带或裂缝发育带进入气藏的通道上建立高分子聚合物粘稠液(如聚丙烯酰胺)阻水屏障,也有注氮气的,其目的在于减小边水推进、底水上升的速度,变水驱为“弹性气驱”。

(2) 水驱气藏采气工艺技术的选择与储层性质、水侵入气藏的机理和气井生产特征有密切关系,随着水驱机理的实验和研究,促进了采气工艺技术的不断更新,单一的气井排水或堵水不能从根本上解决水驱气藏水淹问题,近十几年来,将数值模拟技术用于气藏二次采气方案,发展了气藏整体治水的开发方式。

①排水采气工艺。发展了小油管、泡沫、气举、机械抽油、电动潜油离心泵、柱塞气举、射流泵和螺杆泵等多种排水工艺。

人工助排时间的选择非常关键,过早不经济,过晚待气井水淹严重时,气相渗透率急剧下降而影响采气效果,所以选择在气井出现“脉冲”或“自身压井”之前开始人工助排较为合适,它是延长出水气井开采期的最佳时机。气井排水工艺优化设计,美国布朗等人研究的气液流入井的动态关系与油管多相流及地面管流特性相协调的单井系统节点分析法在国外应用广泛。

气田水处理是个大问题,一般采用选择封闭性佳、渗透性好、储集空间大、采出程度高的废气层