

GAS PRODUCTION ENGINEERING

采气工程

杨川东 主编

天然气开采工程丛书
(三)



石油工业出版社

天然气开采工程丛书 (三)

采 气 工 程

杨川东 主编

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

《天然气开采工程丛书》共分六个分册：《气田开发地质》、《气藏工程》、《采气工程》、《天然气矿场集输》、《天然气处理与加工》和《输气管道工程》，本书是其中之一。

本书主要介绍气井的完井方法、完井测试工艺技术、气层保护及射孔工艺技术、气井生产系统与采气工艺方式选择、排水采气工艺技术、低渗改造增产工艺、修井工艺和采气工程方案设计等，以阐述排水采气工艺为重点，特别强调采气工程是一个系统工程，必须通过采气工程的整体方案来实现。

本书以四川气田采气工程的实践和技术发展为主，同时吸收了国内外采气工程的新理论、新方法和新技术。本书既从理论上阐明采气工程的基本原理，也介绍实用技术，以采气工程理论指导矿场实践。

本书可供从事气田开发、采气工程工作的研究人员、工程技术人员及石油院所师生参考。

DP17/16

图书在版编目 (CIP) 数据

采气工程/杨川东主编.

北京:石油工业出版社,1997.8

天然气开采工程丛书(三)

ISBN 7-5021-1944-2

I. 采…

II. 杨…

III. 天然气开采

IV. TE37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 02012 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里 2 区 1 号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 24 $\frac{1}{4}$ 印张 618 千字 印 1-1500

1997 年 8 月北京第 1 版 1997 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-1944-2/TE·1635

精装定价: 60.00 元

平装定价: 50.00 元

《天然气开采工程丛书》编辑委员会

中国石油天然气总公司编辑委员会

| | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| 主 任 | 李 虞 庚 | | | | | | |
| 副 主 任 | 冈 秦 麟 | 王 乃 举 | 张 家 茂 | 滕 耀 坤 | | | |
| 编 委 | 蒋 其 凯 | 曾 宪 义 | 罗 英 俊 | 孟 慕 尧 | 潘 国 潮 | 李 海 平 | |
| | 李 希 文 | 吕 德 本 | 叶 敬 东 | 张 卫 国 | 徐 文 渊 | 周 学 厚 | |
| | 王 季 明 | 王 鸣 华 | 文 楚 雄 | | | | |

四川石油管理局编辑委员会

| | | | | | | | |
|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| 主 任 | 滕 耀 坤 | | | | | | |
| 副 主 任 | 徐 文 渊 | 周 学 厚 | 王 季 明 | 冉 隆 辉 | 刘 同 斌 | | |
| 编 委 | (以姓氏笔划为序) | | | | | | |
| | 王 全 生 | 王 鸣 华 | 许 可 方 | 陈 中 一 | 陈 赓 良 | 李 联 奎 | |
| | 杨 光 鲜 | 范 恩 泽 | 金 裕 方 | 张 化 | 侯 德 明 | 章 申 远 | |
| | 游 开 诚 | 舒 世 容 | | | | | |

《采气工程》分册编写组

主 编 杨川东

副 主 编 李联奎

编写人员 杨川东 李联奎 王季明 刘同斌 陈中一

刘鸿文 喻平仁 郭元庆 沈祖荣 周 堤

刘德平 罗俊渊 于 蓉 谢忠齐 聂忠孝

统 审 王季明

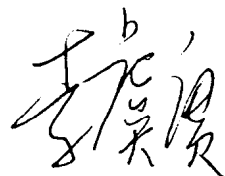
序

40年来，我国气田开发经验不断丰富，已逐步形成一套适合我国气田开发特点的技术。为了系统总结经验，提高气田开发技术水平，迎接我国天然气工业的大发展，中国石油天然气总公司科技发展局组织了长期从事气田开发、具有较高理论水平和丰富实践经验的技术人员，系统编写了这套丛书，即《气田开发地质》、《气藏工程》、《采气工程》、《天然气矿场集输》、《天然气处理与加工》和《输气管道工程》，共六个分册。

我国是世界上天然气开采和利用最早的国家，早在公元前301年汉末晋初时，就开始了采气熬盐，开创了世界最古老的“卓筒井”钻井、“窰盆”排水采气、“亮筒子”试气、“补腔”修井、“显号”识别裂缝以及“通腔”划分连通系统，这些都已成为世界石油史上光辉的一页，也是浅层低孔隙低渗透裂缝—孔隙型有水气田开采的宝贵经验。解放前，我国天然气开采技术停滞不前，处于十分落后的局面，直到新中国成立，才开始较大规模工业化的勘探与开发，气田由旧中国的两个增加到现在的116个，年产气大幅度增加，已成为我国国民经济发展不可缺少的能源。目前陆上天然勘探有了新的发展，海上崖13—1大气田也开始投入开发，这为我国“九五”期间天然气进一步加快发展创造了条件。

我国已开发气田的地质条件复杂，开采的技术难度较大，绝大多数气田储层为低孔隙低渗透，具有边、底水。以碳酸盐岩为主的中、小型气田，其微细裂缝为渗流通道，非均质性严重，主力气田多为含硫气田，使生产建设面临一系列技术难题。正是在这种复杂和困难的条件下，我国的技术人员经历了多年的探索，不断地实践—认识—再实践—再认识，引进和应用新技术、新方法和新装备，加深了对我国气田开发基本规律的认识，完善配套了天然气上、下游工程，使我国天然气工业得到了发展，气田开发水平步入现代技术水平。

我国天然气开发具有40年的经验，这是十分宝贵的，认真系统地总结经验，必将对我国天然气工业的发展起到积极的推动和指导作用。随着我国新气田、大气田的不断发现，将有一大批技术人员加入气田开发队伍，这套丛书不仅是矿场技术人员很好的参考书，也是石油大专院校很好的教材。我相信，随着我国天然气工业的发展，今后我国气田开发技术水平将会不断完善和提高。



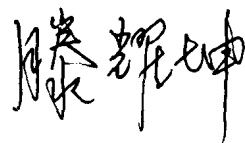
一九九六年七月二十一日

序

四川盆地是一个面积约 18 万 km^2 的大型含气盆地。在前震旦系变质岩和火成岩的基底上，沉积了厚达 6000~12000m 的海、陆相地层，为天然气的生成、运移、聚集和保存提供了有利条件。现已证实，震旦系、奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系均蕴藏着丰富的天然气，但盆地的地质情况极其复杂，储集层绝大多数为低孔、低渗的裂缝性碳酸盐岩，多数气田有边、底水，且具有井下温度高、地层压力高、天然气含硫化氢高等特点，这给勘探开发工作带来了诸多困难。

四川开采、利用天然气的历史悠久，但大规模的勘探开发是在新中国成立以后。40 多年来，四川石油管理局的广大职工，以求实、创新、勇于实践的精神，攻克了天然气勘探、开发、钻井、采气、集输、处理、加工等领域一个个技术难关，创造了一套适应四川复杂地质条件的勘探开发技术，探明了占全国 40% 的天然气地质储量，使天然气产量占全国总产量的 41%，占纯气藏产气量的 80%，为我国西南地区工农业发展做出了重大贡献，使四川成为我国天然气工业的重要基地。

《天然气开采工程丛书》是根据中国石油天然气总公司的要求而编写的。为此，四川石油管理局成立了由长期从事天然气事业、理论造诣深、实际经验丰富的专家组成的编辑委员会和 30 余名高级工程师组成的六个编写组，对 40 多年来四川在天然气开发方面的实践经验，特别是近十多年来在技术攻关、科学研究以及引进、消化国外先进技术方面的成果进行全面、系统总结，因此，这套丛书不仅较全面地反映了四川天然气开发的科技进步，同时也从一个侧面反映了 40 多年来我国在天然气开采诸方面所取得的巨大成就。40 年，在历史的长河中是很短暂的，但若能通过这 40 年的经验总结对今后全国天然气工业的发展有所启迪、有所促进，我们将感到十分欣慰，我想，这也是广大气田开发科技工程人员对这套丛书的期望。



一九九六年七月

前 言

本分册《采气工程》主要介绍了气井的完井方法、完井测试工艺技术，气层保护及射孔工艺技术，气井生产系统与采气工艺方式选择，产水气井的排水采气工艺技术，气井低渗改造增产工艺技术，试井及生产测井工艺技术，气井的修井工艺技术和采气工程方案设计等。特别强调采气工程是一个系统工程，是通过采气工程整体方案实现的。本书在编写内容上，以四川气田采气工程的实践和技术发展为主，同时也对其它气田的采气工程技术成果尽可能地加以阐述，并吸收了国内外采气工程的新理论、新技术。编写中力求理论与实际相结合。既从理论上阐明采气工程的基本原理，也介绍实际应用技术，以介绍理论的实际应用为主。在述及具体的采气工程技术时，尽量做到运用实际资料，论证采气工程理论的科学性及其对实践的指导作用。本书可供从事天然气开采工程工作的技术人员阅读以及科研、大专院校研究人员和师生参考。

本分册由杨川东担任主编，李联奎担任副主编，王季明担任统审。全书结构由序言，前言和可相对独立的九章组成。前言、第一章、第二章第一节、第四章第二节和第九章由杨川东编写；第二章第二节由王季明编写，第三节由刘同斌编写，第四、五、六节由陈中一编写；第三章第一、二、四、五、六、七节由喻平仁，第三节由刘德平编写；第四章第一节由刘鸿文编写，第三节由谢忠齐编写，第四节由刘鸿文、于蓉、杨川东编写，第五节由聂忠孝编写，第六节由罗俊渊编写，第七节由刘德平编写；第五章由李联奎编写；第六章由郭元庆编写；第七章由沈祖荣编写；第八章由周堤编写。

本分册的编写工作，得到了中国石油天然气总公司、科技发展局和开发生产局，石油工业出版社，四川石油管理局及局属科技处、开发处、钻井处、钻采工艺技术研究院、井下作业处、地质勘探开发科学研究院、川南矿区、测井公司等单位大力指导、支持与帮助，这是本书编写能够顺利进行的有力保证。在此谨向所有提供指导、支持与帮助的单位、有关同志致以衷心的感谢。

我国采气工程使用的是SI国际单位制，鉴于本分册在编写中介绍了必要的国外采气工程的新技术，对引用的相应资料的少数图表，保留了原采用的英制单位，在分册的最后附有单位换算表，以方便读者查证。

本分册主要是为研究和应用采气工程学的工程师编写的，编者恳切希望本分册能为采气工程师提供一些使气田具有高效益、高采收率开发水平的采气工程学基本原理和现场实用工程技术。

编 者

1995.12

目 录

| | |
|----------------------------------|-------|
| 第一章 绪论 | (1) |
| 第一节 采气工程的主要任务及其技术发展..... | (1) |
| 第二节 采气工程的主要特点..... | (2) |
| 第三节 采气工程方案和采气工程师的职责..... | (3) |
| 第二章 气井完井 | (5) |
| 第一节 概述..... | (5) |
| 第二节 气井完井方法..... | (5) |
| 第三节 气层保护 | (13) |
| 第四节 油管柱与井下工具 | (28) |
| 第五节 射孔 | (34) |
| 第六节 气井完井测试 | (39) |
| 参考文献 | (43) |
| 第三章 气井生产系统与采气工艺方式选择 | (44) |
| 第一节 概述 | (44) |
| 第二节 气井(气藏)评价 | (44) |
| 第三节 多相垂管流 | (48) |
| 第四节 气井节点分析 | (71) |
| 第五节 气井合理产量的确定 | (88) |
| 第六节 气井工作制度的选择 | (91) |
| 第七节 气井分类开采 | (95) |
| 参考文献..... | (118) |
| 第四章 产水气井的排水采气工艺 | (119) |
| 第一节 排水采气工艺的机理和基本评价..... | (119) |
| 第二节 优选管柱排水采气..... | (123) |
| 第三节 泡沫排水采气..... | (142) |
| 第四节 气举排水采气..... | (153) |
| 第五节 游梁抽油机排水采气..... | (177) |
| 第六节 电潜泵排水采气..... | (193) |
| 第七节 射流泵排水采气..... | (219) |
| 参考文献..... | (232) |
| 第五章 气井增产措施 | (234) |
| 第一节 概述..... | (234) |
| 第二节 增产原理..... | (234) |
| 第三节 主要增产方法..... | (240) |
| 第四节 评层选井——储层评价及施工合理性研究评价..... | (244) |

| | |
|----------------------------------|--------------|
| 第五节 增产措施设计技术····· | (249) |
| 第六节 工作液及添加剂····· | (267) |
| 第七节 现场质量控制····· | (275) |
| 第八节 裂缝诊断与监测····· | (278) |
| 参考文献····· | (281) |
| 第六章 气井修井····· | (282) |
| 第一节 概述····· | (282) |
| 第二节 气井常规修井····· | (284) |
| 第三节 气井大修····· | (292) |
| 参考文献····· | (303) |
| 第七章 气井试井工艺····· | (304) |
| 第一节 概述····· | (304) |
| 第二节 气井试井仪表和设备选择····· | (304) |
| 第三节 试井作业····· | (326) |
| 第四节 试井作业的安全技术····· | (331) |
| 参考文献····· | (334) |
| 第八章 生产测井工艺技术····· | (335) |
| 第一节 概述····· | (335) |
| 第二节 生产测井装置····· | (335) |
| 第三节 单相流动生产测井资料解释····· | (338) |
| 第四节 气—水两相流动生产测井资料解释····· | (342) |
| 第五节 生产测井在气田开采中的应用····· | (343) |
| 参考文献····· | (356) |
| 第九章 采气工程方案设计····· | (357) |
| 第一节 概述····· | (357) |
| 第二节 采气工程方案设计的特点····· | (357) |
| 第三节 采气工程方案设计的前期工作····· | (358) |
| 第四节 采气工程方案设计的基本任务及主体工艺的分析论证····· | (361) |
| 第五节 采气工程方案设计程序····· | (363) |
| 第六节 采气工程方案设计应用气藏实例····· | (375) |
| 参考文献····· | (385) |
| 附录 单位换算表····· | (386) |

第一章 绪 论

第一节 采气工程的主要任务及其技术发展

一、采气工程的主要任务

采气工程是指在天然气开采工程中有关气田开发的完井投产作业、井下作业工艺技术、试井及生产测井工艺技术、增产挖潜措施、天然气生产、井下作业与修井、地面集输与处理等工艺技术和采气工程方案设计的总称，是天然气开采工程中一个占有主导地位的系统工程，对天然气气田的高效益、高采收率开发具有举足轻重的作用。

采气工程的任务主要是：

- (1) 针对气藏的地质特征和储层特点，编制气田开发的采气工程方案，对气藏实施高效、高采收率的开发；
- (2) 研究、发展适合气藏特点的采气工程工艺技术，并配套形成生产能力；
- (3) 对气井进行生产系统节点分析，优化采气工艺方式，提高气井的采气速度；
- (4) 推广、应用各种新技术、新装备，解决气田开发的工程技术问题；
- (5) 研究、制定、完善采气工程方面的有关标准、规程、规范、使采气工程技术、施工操作有章可循，实现标准化、规范化作业，确保安全生产。

二、采气工程的技术发展

新中国成立以来，我国的采气工程技术取得了举世瞩目的迅速发展。60年代前，我国最大的天然气生产基地四川气田，还处于气井压力相对较高的开采初期和无水采气阶段，采气工程的主要内容是相对较为简单的气井试井、地面集输，气井管理和酸化原理、酸液配方、现场施工技术探索等工艺技术；60~70年代，我国采气工程有了新的进步，它已经包含了气体稳定流动能量方程在气井生产系统分析中的应用和天然气脱硫、脱水等工艺技术基本解决了“常规解堵酸化”的装备和工艺技术问题，但研究的对象气井生产大系统，仍然主要是一次开采的自喷采气、较为简单的单相流动规律和产层增产改造的常规工艺技术；70年代后期，特别是80年代以来，针对天然气生产规模扩大、产水气田和产水气井与进入低压开采阶段的气藏和低压开采气井以及年久待修的老井逐年增多、二次勘探井和开发补充井中遇到的低渗透层和区块也越来越多的新情况，为了实现老气田稳产，依靠科学技术进步，加快了采气工程配套工艺技术系列的研究，促进了采气工程系统的建立和采气工程工艺技术水平的长足进步。在气井的完井保护气层方面，从储层评价方法、完井液研究、完井方式研究、固井及水泥添加剂研究、高效射孔到投产措施等方面的技术，都获得了重要成果；在采气增产工艺技术方面，针对低渗透储层改造，在“常规的解堵酸化”基础上发展了“前置液压裂酸化”、“胶凝酸压裂酸化”、“降阻酸压裂酸化”、“泡沫酸压裂酸化”、“堵塞球压裂酸化”、“封隔器分层压裂酸化”等六项压裂酸化工艺技术。针对产水气藏，发展了二次开采的排水采气工艺技术。针对低压气开采，发展了以高低压分输、天然气喷射器和压缩机增压输

送的采、集、输配套工艺技术。从而形成了采气工艺增产的三大技术系列，在气田开发中发挥了重要的作用；在气井的生产方式方面，推广、应用了生产系统节点分析技术，摸索和总结了不同类型气藏的开采工艺模式；在气井维修和井下作业方面，上试补孔应用了过油管传输为主的深穿透负压射孔技术，一井两层分采使用了以插管封隔器为主的完井井下工具，清砂应用了新冲砂工艺，排液应用了连续油管 and 液氮排液技术，提高了井下作业和修井的效率；在防腐蚀方面，逐步发展了含硫气田的一次性完井管柱和开采、防腐新技术，历史进入 20 世纪的 90 年代，我国的天然气年产量，已突破了 150 亿 m^3 。不仅在四川发现了一批新的气田，而且在陕甘宁盆地、南海北部大陆架都发现了新的大中型气田，在新疆的塔里木、准噶尔、吐哈三大盆地和青海，不断发现和钻获了高压气井，在我国的东部地区，天然气勘探也有了新的发现。在采气工程重点发展并形成生产能力的 10 项工艺配套技术的基础上，开展了采气工程方案设计程序和设计方法的研究。一些新气田的开发建设认真进行了采气工程方案设计的编制，使采气工程方案设计逐步成为了气田开发总体建设方案设计的重要组成部分和核心。所有这些，都展示出我国的天然气工业和采气工程技术，进入了一个更大发展的新时期。

第二节 采气工程的主要特点

充分认识我国采气工程的特点，是发展采气工程技术的前题和依据。我国的采气工程技术主要有下述几个基本特点。

一、地质和储层特性的特殊性

我国已发现的天然气气藏的地质特点和储层特性的特殊性，给采气工程技术带来了很大的困难。从勘探部门提供的资源评价结果看，古生界预测的天然气资源量约占 62%，而世界天然气资源量中，古生界不到 30%。地层越偏老，埋藏越深。我国已探明的气田其埋藏深度大多在 3000~6000m 之间，而美国有近 70% 的天然气资源埋藏在 3000m 以内，前苏联有 60% 的天然气储量埋藏在 2000m 以内。开发埋藏较深的气田必须要有水平较高的采气工程技术，我国的天然气储层大多属于中低渗透储层，而且低和特低渗透储层占有相当的比例，而美国、前苏联等国的气田一般都具有高孔、高渗的特点。低渗气藏的气层增产的改造难度大，我国已投入开发的气田中，产水气田和低压气田占有相当的比例。截止 1994 年，四川钻获的 82 个已投入开发的气田中，就有 69 个产水，占气田总数的 85% 以上。有效开发产水气田，国外资料较少，如人工举升等常见工艺技术的国外资料大都针对油田，不能生搬硬套、简单借用，需要通过实践，发展一套有中国特点的采气工程技术。在全国目前已探明的 100 多个气田中，地质储量大于 300 亿 m^3 的只有为数几个，而美国、前苏联等主要天然气生产国都拥有储量上万亿 m^3 的大气田作为天然气开采的支柱。中小气田为主这一特点，决定了我国天然气开发的分散性和复杂性，致使气田产出气的利用其同步配套关系较之油田更为严格，它不仅涉及气田内部的生产集输配套，也涉及到气田外部用户的一系列配套，并从生产、输送到外销，都受到时间、季节因素及用户生产检修的直接影响，给管理工作带来了很大难度。

二、气藏产水危害的严重性

采气工程与采油工程在开采的方式上有较大的差异，油藏多以人工保持能量方式开采，

开采速度和最终采收率相对较低。天然气多以消耗能量的衰竭方式开采，开采速度和最终采收率比油藏相对要高得多，一般纯气驱气藏的最终采收率可高达90%以上。但是，对产水气藏而言，则较之气驱气藏或油藏的开采工程技术的难度都要大得多。气藏产水后，水气在渗流通道和自喷管柱内形成两相流动，增大了气藏和气井的能量损失，降低了气的相渗透率，并分割气藏形成了死气区，从而使采气速度和一次开采的采收率大大降低，平均采收率仅为40%~60%。也就是说，有30%~50%的储量，需要依靠二次开采的排水采气工艺技术，并投入较大的工作量才能开采出来。有的水淹气井，虽经多种工艺措施排出大量地层水，只要未能复产，就存在着无效投入的可能性。因此，采气工艺技术比采油工艺技术具有更大的风险性、艰巨性。

三、流体性质的高腐蚀性

气藏中，不仅地层水的氯离子含量可高达40000~50000mg/L，而且相当一部分气井所产的天然气中还含有高腐蚀性的硫化氢、二氧化碳等酸性气体。据统计，仅四川气田的硫化氢含量大于200mg/m³（标）的天然气储量就占探明储量的30%~80%，需脱硫处理后才能外输的气量占总产气量的64%左右。四川卧龙河气田硫化氢含量体积比为5.0%~7.28%，中坝气田为6.75%~13.3%，都属于硫化氢含量在5%以上的高含硫气田。华北油田赵兰庄特高含硫气藏，含硫高达92%。吉林油田万金塔气藏的万2—2井，二氧化碳和硫化氢合计含量高达99.77%。天然气藏中含有的硫化氢、二氧化碳酸性气体不仅可能严重危及人、畜，而且严重腐蚀气井的设备和管线，随时威胁气井的生产。四川威远气田几乎两至三年必须更换一次井下油管，川中磨溪气田雷¹气藏及川东地区部分石炭系气藏也连续发现井下管串严重腐蚀的情况，从而给采气工程作业及配套装备提出了比采油工程更为苛刻的要求。

四、天然气的可爆性和高压的危险性

天然气气藏一般具有较高的压力。特别是一些深层天然气气藏，常常形成某些高压和超高压层段。四川气田的川西北和川东南存在着两个高压异常区，压力系数高达2.2以上，中原油田文东沙三中气藏压力系数在1.6以上。天然气又是一种易燃、易爆性气体，其单位体积重量不到水的1‰，密度小，具有很大的可压缩性和膨胀性，使气井井口压力不仅远远高于具有相同井深和井底压力的油井井口压力，而且对气井的井下工艺作业的防火、防爆措施要求更为严格。井下修井作业也要求采用不压井修井工艺技术或采用吊灌的安全作业措施。由于气藏的压力系数很高，液柱压力一旦与之失去平衡，则其释放速度非常迅猛，将会造成强烈井喷，其喷势远比油井激烈，有些强烈井喷，倾刻即可将井架喷倒，引起熊熊大火，从而增加了采气工程作业的难度和危险性。

针对这些基本特点，我国的广大采气工程工作者不仅发展了，而且还将进一步发展具有我国天然气开采显著特色的采气工程技术。

第三节 采气工程方案和采气工程师的职责

一、采气工程方案

采气工程是一个以油藏工程研究成果为基础复杂的整体工程。每个气田的开发和开

采，都离不开气藏内部的多孔、多相渗流大系统和气井井筒举升与地面集输、分离的气井生产大系统。这两个大系统把产层—气井—地面建设工程结合成为一个有机的统一整体。两个大系统相互联系、相互作用的过程，就是气田开发和气藏开采的过程。对气藏大系统的研究，是气藏工程的任务，主要着重于产层，解决合理开发好气藏的问题。对于气井生产大系统的研究，是采气工程的重要任务之一，主要着重于气井，解决合理开采好气井的问题。两个大系统虽然着重点不同，却又紧密联系、紧密相关。气井是产层的出口，是采气工作者用以控制气藏生产的手段。气井开采不好，必然影响整个气藏的开发；反之，如果气藏气水关系恶化，则气井也很难实现稳定、正常生产。因此，要合理开发好一个气藏，必须建立在依靠采气工程技术去科学开采好每一口气井的基础上；要合理开采好气井，也必须以气藏工程为基础，从整个气藏的地质特点和储层特性等地质情况着眼去指导采气工程整体方案的制定和实施。因而，采气工程方案已成为指导气田科学开发重要原则之一。一方面，由于每一个气田和气藏都有它的特殊性，这就不但决定了整个气藏开发上所采取的采气工程方案措施的特点，而且也决定了气井开采工艺技术措施的特点；另一方面，一个气藏在气藏工程研究的基础上，能否投入高效、高采收率的开发，也需要采气工程通过所编制的方案设计为气藏开发的全过程提供成熟可靠、能有效应用于气藏的整体配套工艺技术，气井能否正常生产，需要采气工程方案提供优化的气井保护技术和开采工艺方式，有效的动态监测技术、强有力的气井作业手段以及增产措施；天然气能否合理处理与输送，需要采气工程方案提供有效的分离、计量输送技术和除去有害物质的有关技术；气田的开采能否降低生产成本，提高综合经济效益，需要采气工程方案解决好投入与产出的技术关键。

二、采气工程师的主要职责

采气工程师是采气工程方案设计的决策人和实施人。因此，采气工程师必须至少具有两个方面的知识。一是具备油藏工程的基本知识；二是必须全面具备采气工程的技术知识。采气工程师只有以适应气藏地质特点和储层特性要求的气藏工程研究成果为基础，才能指导解决气田开发、开采中出现的各种新问题；也只有针对气藏的地质特点和储层特性，并以气藏工程研究成果为指导，才能充分了解气井生产系统现状，较好地预测气井生产系统的未来的动态，编制好气田开发的采气工程方案，研究、发展适合于中国气藏特点的采气工程技术体系，并配套形成生产能力。

从我国开发气藏的总体地质特点和储层特性出发，采气工程师主要肩负着三项重要任务：一是在具体气藏条件下，根据气藏工程总体部署方案的要求，解决好钻什么样的井、采取什么样最有效的气层保护方法、完井方法、套管程序和开采的方式，以确保把气藏的储量最大限度的控制和动用起来；二是从气井投入开采到枯竭的整个阶段，要以最经济、最有效的方式，在井筒建立合理的采气生产压差，以获得较长的无水采气期和带水生产自喷期、较高的采气速度和气田开采的最高采收率，这是采气工程技术的核心；三是要以最低的消耗完成产出天然气的采集输和气水分离、净化回收，为用户提供气质合格的商品天然气。

第二章 气井完井

第一节 概 述

气井完井工程系指钻开生产层和探井目的层开始，直到气井投入生产为止的全过程，它既是钻井工程的最终一道工序，又是采气工程的开始，对钻井工程和采气工程起着承前启后的重要作用。

气井完井工程是采气工程非常重要的一个环节。气井完井工程之所以重要，因为它直接关系到气井的质量，是气井生产的基础。不仅完井工程很重要的一部分内容要由采气工程提出，靠钻井部门去完成，而且气井是气层流体流向地面的人工通道，在采气工程中起着输送天然气和控制地层的重要作用，对地层进行各种研究以及进行压井、人工举升、增产改造、生产测试等许多井下作业都将通过气井，气井完井质量不好或不相适应，天然气的生产将无从谈起。因此，气井完井方法的选择，完井质量的好坏，直接关系到探井能否反映井下情况、气井能否长期稳定的生产，并直接关系到气田开发方案的正确执行和气田或气井的最终经济效益。

以提高和确保气井完井质量为重点，本章主要介绍了气井完井方法、气层保护、油管柱与井下工具、射孔和气井的完井测试。

第二节 气井完井方法

一、引言

气井的完井方法是指钻开地层或探井目的层部位的工艺方法及该部位的井身结构。为了满足有效地开发各种不同性质油气层的需要，目前已有各种类型的不同气井完井方法。气井完井方法的选择取决于气层的地质情况、钻井技术水平和采气工艺技术的需要。气井完井方法选择是否得当，完井质量是否良好，都制约、影响着气井的整个生产过程，甚至气井的寿命。

气田的气井井数对相似规模的油田的油井井数而言，要少得多。气井完井的成败对气田开发的影响比油井对油田的影响大得多。气田的探井，一旦获得工业气流，将转为生产井。因此对气田的探井或气井都必须认真按天然气生产的特点选择正确的完井方法。

气井与油井相比较，由于天然气的密度比原油的密度低得多，随着勘探工作的深入发展，气井深度越来越深，因此，一般而言，气井的井底压力与井口压力比油井高得多。天然气中常常含有硫化氢、二氧化碳等酸性气体，对井下管柱与井口装置有严重的腐蚀，尤其是硫化氢对管材造成的氢脆，会造成井内油管的断裂、落井，对套管头和井口装置的破坏，有时会酿成严重事故，故气井完井技术要求高、难度也大。

二、选择气井完井方法应考虑的因素

从采气的角度出发，一口井最理想的完井方法应该满足气层和井底之间应具有最大的渗流面积，使气流的渗流阻力和气层所受的损害最小；能有效地分隔油、气、水层，防止气井出水和各产层间的相互干扰；能有效地控制气层出砂，防止井壁坍塌，确保气井修井成本低、能长期稳定生产；能具备有进行人工举升、压裂酸化等增产措施以及便于修井的条件。一口井的完井方法要同时全部满足以上条件是十分困难的。因此，应根据气层的地质特点，并参照本地区的实际经验，慎重地选择最适宜的完井方法，具体说来，选择气井完井方法时应主要考虑以下因素。

(1) 应考虑产层的结构，对碳酸盐地层来讲应注意产层的坚韧程度、产层倾角、夹层中泥土或页岩的情况、产层的裂缝、节理的发育情况，判断气井在生产过程中是否会发生坍塌、掉块、页岩或粘土膨胀等问题。如产层为松软砂层，该考虑气井在生产过程中是否会严重出砂。还要了解气井生产中后期出水的可能性，粘土或页岩容易因水的浸泡发生膨胀形成产层坍塌。

(2) 应观察地区气井或邻井的产层压力、井口压力、天然气中硫化氢和二氧化碳的含量是否对气井井下套管和油管柱有氢脆和严重电化学腐蚀的可能性。对于酸性气体，应采用带封隔器的一次性管柱，以保证油套管环形空间能充填防腐液。

(3) 邻井或气田上的气井中后期产水的可能性，气井生产后期进行排水产气和修井的可能性。

(4) 气田的生产井或邻井气井完成后，投产和增产措施的施工压力，与生产套管允许应力的关系。

(5) 气田上已有气井的产气量水平，用以确定气井完成时的油套管尺寸。由于气井经生产一段时期后，修井之前的压井工作极易发生井漏，伤害产层，气井井下作业时易于发生井喷，因而气井完成一般是一次管柱，并采用节点分析方法，优选油管直径。油管直径确定后，再根据采气工艺的特点选定套管直径。

(6) 有多个产气层的气井在生产时是否要求分层开采。

(7) 钻井工程在本井是否采用了如大斜度井、水平井等新工艺。

根据以上因素确定完井方法，如果确实为较为单一的产层，产层井深也仅为中深井或浅井，采用较为简单的裸眼完井或衬管完井是可以的。从地区经验已证实其复杂性，就应选择更为合适的完井方法。单纯从节约资金出发，选择较单一或适应性较差的完井方法的作法，是不可取的。适应性强的完井方法，一次性投入高一些，却可以延长免修期。完井方法一定要着眼于气井的寿命和长期稳采，一口日产 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的天然气井，稳产 5 年，产值即可达到人民币 1000×10^4 元以上，与建井成本相比，气井的寿命对经济效益而言是更为重要的因素。

三、完井方法的主要分类

目前国内外采用的完井方法很多，从我国、特别是四川气田的地质和采气工艺的特点出发，最常采用的气井完井方法有裸眼完井、衬管完井、套管射孔完井和尾管射孔完井等 4 种方法。本书将主要介绍这 4 种完井方法，而对其它一些方法如砾石填充完井方法、一井两层分层开采完井方法、大斜度井的完井方法，将在完井方法的探索中，简明介绍其特点和用途。

1. 裸眼完井

裸眼完井是指气井产层井段不下任何管柱，使产层出于充分裸露的完井方法。这种完井方法的优点是完井投产后，不易漏掉产层，气井完善系数高，完井周期短，费用少，但是这种完井方法适应程度极低，易于产生井下坍塌、堵塞，甚至埋掉和部分埋掉产层，增产措施效率低，大段酸化，该吸酸的未吸到酸，不该吸酸的把酸吸进去了效果差。气井中后期的排水采气由于修井工作的困难而难于进行。甚至在气井生产过程中会导致井下出砂等许多困扰，使气井早期衰亡。

裸眼完井可分为先期裸眼完井（图 2-1）和后期裸眼完井（图 2-2）。

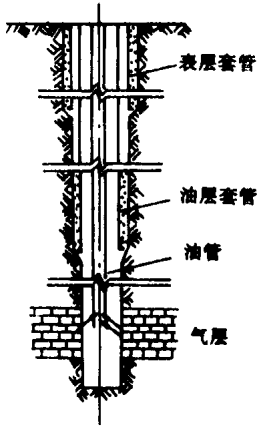


图 2-1 先期裸眼完井示意图

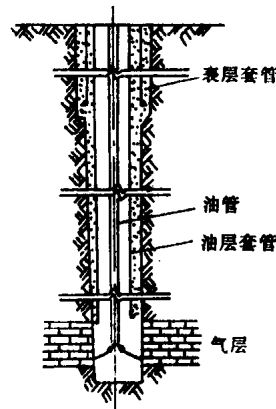


图 2-2 后期裸眼完井示意图

2. 衬管完井

衬管完井（图 2-3）与裸眼完井所不同的是在裸眼井段下入了一段衬管。衬管下过产层，并在生产套管中超覆一部分长度。针对各产层井段，在衬管相应部位采用长割缝或钻孔，使气层的气体从孔眼或缝中流入井底。这种完井方法较裸眼完井进了一步，它具有裸眼完井的优点，还能防止在生产过程中井下出砂的困扰，但裸眼完井的其它局限性依然存在。

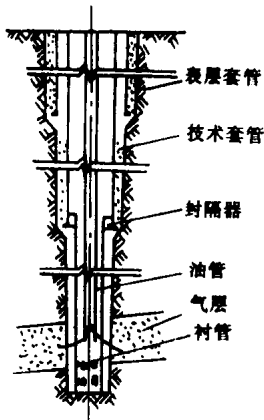


图 2-3 衬管完井示意图

衬管完井时，衬管在井内应用衬管悬挂器把衬管悬挂在生产套管内壁，使衬管在井内成吊伸状态，避免衬管受到曲挠。衬管是从地面用钻具送到井底的，脱手装置应灵活好用，脱手时应有明确征象，以免返工。

采用衬管完井的气井，生产初期应采用较低的稳定生产的产量，使管外砂粒在环空构成良好的、具有渗滤性的砂桥。对于过于疏松的砂层，或疏松砂层而且产层倾角较大的产层，禁忌采用衬管完井方法。

随着钻采工程技术的发展、超高压气井的出现和增多，采用裸眼或衬管完井的气井已越来越少，甚至趋于淘汰。但是对于产层情况较为单一，产层岩性较为坚韧的中等深度的气井，这两种完井方法仍有其一定生命力。

3. 套管射孔完井

套管射孔完井（图 2-4）是目前国内外最为广泛采用的一种完井方法。其特点是在钻达预计产层深度之后，下入生产套管，注水泥固井，然后再下入射孔枪对准产层射穿套管、