

天 然 气 工 程 丛 书

天然气 资源勘探

杜尚明 胡光灿 李景明 等编著

石油工业出版社

天然气工程丛书

天然气资源勘探

杜尚明 胡光灿 李景明 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,《天然气资源勘探》是其中之一。

本书内容包含天然气地质学和资源勘探工程学两部分。在天然气地质学部分,概括地阐明了天然气成因和天然气藏形成的地质条件与作用的基本理论;突出了天然气盖层、运移与聚集作用的动力学评价和成油气系统研究方法。天然气资源勘探工程学是本书的重点,这部分内容通过对中国天然气勘探典型实例的解析,总结了天然气的物理特点、成藏特点、勘探特点,并从这些特点出发,论述了天然气资源勘探工程所应采取的勘探程序与部署原则、勘探方法和勘探技术对策等。本书最后还梗概地介绍了中国现阶段天然气资源评价与储量计算,提出了关于储量计算与建立经济可采储量的思考,用以减少勘探风险。

本书可供从事天然气勘探、开发的技术人员和管理人员参考,也可供相关院校的师生及研究人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

天然气资源勘探/杜尚明,胡光灿,李景明等编著.
北京:石油工业出版社,2004.4

(天然气工程丛书)

ISBN 7-5021-4409-9

I. 天...

II. 杜...

III. 天然气-油气勘探

IV. P618.130.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第094601号

天然气资源勘探

杜尚明 胡光灿 李景明等编著

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4月第1版 2004年4月第1次印刷

889×1194毫米 开本:1/16 印张:20.25

字数:605千字 印数:1—3000册

定价:82.00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 咸玥璞

《天然气工程丛书·天然气资源勘探》

编 写 组

主 编 杜尚明

副 主 编 胡光灿 李景明

成 员 王世谦 戴鸿鸣 陈盛吉 谢继容 廖 曦 周建文

刘成林 李东旭 罗 霞 张树林 赵良孝 陈礼平

张伦友

序一

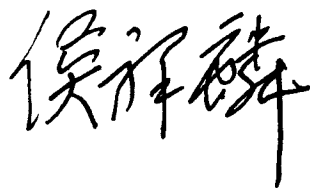
近年来，我国天然气工业取得了很大的发展，已逐步进入了工农业生产和日常生活的方方面面，成为国民经济生活中的重要内容。经过几代人的努力，我国目前已经初步形成了四川、塔里木、鄂尔多斯、柴达木和海洋在内的五大气区基本格局，建设了以“西气东输”为代表的一批陆地及海上输气干线。“西气东输”宏大建设工程的实施，不仅是落实“西部大开发”战略的重要举措，而且也是我国在天然气生产建设能力和技术等方面的综合体现，标志着我国天然气的发展进入了一个新的阶段。

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和推动作用，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。

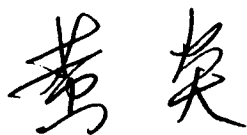
三年来，在中石油、中石化、中海油、石油院校等部门的数十名专家和上百名工程技术人员辛勤努力下，克服了专业门类多、地域跨度大、编著人员不稳定等诸多困难，完成了丛书的编写出版任务。

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、研究院所的领导、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

《天然气工程丛书》共分 8 个分册，本书是其中之一。从全书的系统性和完整性要求来看，需要阐明天然气资源的自然状态及其形成过程，以及在开发前所要做的勘探工作。因此，本书应包括天然气地质和资源勘探两个部分，前者是理论基础，后者则为应用工程。

天然气地质部分在国内已有几部专著，本书尽力减少相关内容的重复，力求反映新观点、新动向、新进展。在资源勘探方面，国内有关这方面著作很多，学术水平高，实践性强。但是，专限于天然气资源勘探的专著，国内外都没有。因此，在表述石油与天然气通行的勘探作法中，本书突出了天然气勘探的特点和特殊要求，并通过第五章集中表述，其后各章引向深入。

第一章绪论。以史为鉴，阐述了中国是世界上最早发现和利用天然气资源的国土，已有 2000 余年的悠悠历史。从 11 世纪中叶到 19 世纪中叶，最古老的四川自流井气田发明的卓筒井·窿盆·笕系列技术和古朴的矿场地质，在世界文明史上谱写了光彩夺目的篇章。在经历近代约 100 年衰退之后，新中国诞生，天然气工业又重新崛起。世界天然气发展趋势与特点，开启人们去追寻天然气世纪的未来。

第二、三章是天然气地质学部分。相对气藏地质而言，资源勘探更注重宏观特征的展示。

第二章突出了国际流行的 3 种生气模型与多源、多阶成因气的特征。

第三章强调了烃源层、储集层、盖层、运移与聚集、圈闭等基本概念与特征，简化了一般地质原理的描述，以较浓厚的墨触介绍了成藏动力学评价与 20 世纪 90 年代风靡世界的成油气系统。跟踪这些理论的发展，以推动中国天然气勘探与研究进程。

第四章至第九章是资源勘探部分，也是本书重点所在。

第四章从中国天然气勘探成果与资源评价的结果出发，阐明中国天然气资源现状、分布特征、控制因素及其一般富集规律，具有承前启后的作用。

第五章是透过中国天然气勘探典型实例的实践活动解析，阐明地层条件下天然气的特点、成藏特点、勘探特点，为以后的勘探程序、方法、技术等章铺垫伏笔。

第六章从勘探实际出发，在石油行业的油气勘探“三段式”程序基础上，推荐增加“区带评价勘探阶段”；针对各阶段勘探的地质任务、勘探程度等，提出了各阶段的部署原则，有利于认识勘探对象的特点和减少勘探风险。

第七章与其他油气勘探著作相比较，将勘探方法独立成章，是本书的独到之处。广

义地定义了勘探方法：是与勘探技术相关的勘探方法和与人的勘探思想相关联的勘探方略；强调了勘探思想在油气勘探中的地位与作用；阐述了三大勘探评价，整体勘探与立体勘探，关于井网方式与井距的讨论，勘探风险与科学决策方法等诸方面，是方法论与认识论在油气勘探中的辩证统一。

第八章从油气勘探的通用技术出发，跟踪世界技术发展的前沿，紧紧扣住天然气这一主题，阐述了非地震物化探、地震勘探对天然气的识别与预测方法；井筒系列技术、测井技术在识别、发现、保护、获得天然气层（藏）中的工艺、技术方法。从技术的广度与深度，综合了中国天然气资源勘探的技术科学。

第九章梗概地介绍了中国现阶段的天然气资源储量分级，资源评价方法与储量计算的方法及可采储量的计算与评价。从国际流行的储量定义与储量观念形态的差别，提出了“关于储量计算与建立经济可采储量的思考”，旨在降低勘探风险。

参加本书编写的有：

前言 胡光灿、杜尚明；

第一章第一节 杜尚明，第二节 李景明；

第二章第一节 王世谦，第二节 戴鸿鸣；

第三章第一节 陈盛吉，第二节 谢继容、廖曦，第三、四节 周建文，第五节 廖曦、杜尚明，第六节 李景明、廖曦；

第四章第一节 刘成林、李剑、刘人和，第二节 李东旭、马硕鹏、张福东、吕庆章，第三节 罗霞、谢增业、胡国艺、李剑、杜尚明，第四节 李东旭、张粉锦、李本亮、王明明、杜尚明；

第五章至第八章 杜尚明，其中第五章第一节 李大鹏，第八章第二节 张树林，欧阳永林参与部分工作，第四节 赵良孝、周肖；

第九章第一、二节 陈礼平，第三、四节 张伦友，第五节 杜尚明。

全书编写思路、结构、内容，由胡光灿、杜尚明策划、审定；全书文字编写由杜尚明执笔；全书文图由杨波、王坛编辑；参加本书工作的还有陈礼平、林琳、陈莎等。

在成书的过程中，王乃举、孟慕尧对提纲、初稿组织了认真的审查；胡朝元、梁狄刚、杨俊杰、张厚福、宋顺琼对全书进行审查并提出了详尽的修改意见；西南油气田分公司冉隆辉、陈更生及西南油气田分公司勘探开发研究院、中国石油勘探开发研究院廊坊分院给予了大力的支持和帮助，在此一并致谢。

本书编写组

2003年8月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 中国天然气勘探开发简史与发展展望	(1)
第二节 世界天然气工业的发展趋势及其特点	(10)
第二章 天然气成因	(16)
第一节 天然气成因分类及其特征	(16)
第二节 天然气成因类型的特征	(21)
第三章 天然气藏形成的地质条件与作用	(33)
第一节 气源岩	(33)
第二节 储集岩	(49)
第三节 盖层	(68)
第四节 天然气运移与聚集	(84)
第五节 天然气圈闭	(95)
第六节 成油气系统	(98)
第四章 中国天然气资源与分布规律	(111)
第一节 天然气资源状况	(111)
第二节 天然气资源的分布	(120)
第三节 天然气分布的主要控制因素	(124)
第四节 不同类型天然气藏富集的一般规律	(154)
第五章 天然气勘探特点	(175)
第一节 中国天然气勘探实践	(175)
第二节 天然气勘探特点和应采取的对策	(198)
第六章 天然气勘探程序与部署原则	(208)
第一节 盆地区域勘探阶段	(208)
第二节 区带评价勘探阶段	(211)
第三节 圈闭预探阶段	(213)
第四节 气藏评价勘探阶段	(217)
第七章 勘探方法	(222)
第一节 勘探方法的基本概念及其重要意义	(222)
第二节 勘探思想在油气勘探中的地位与作用	(224)
第三节 三大勘探评价方法	(227)
第四节 整体勘探与立体勘探	(234)
第五节 关于井网方式与井距的讨论	(238)
第六节 勘探风险与科学决策	(240)
第八章 天然气勘探技术	(245)
第一节 非地震物、化探	(245)
第二节 地震勘探	(249)
第三节 井筒系列技术	(269)
第四节 测井	(276)

第九章 天然气资源评价与储量计算	(286)
第一节 中国天然气资源和储量分级	(286)
第二节 天然气资源评价	(287)
第三节 天然气储量计算方法	(294)
第四节 储量评价方法	(303)
第五节 关于储量计算与建立经济可采储量的思考	(306)

第一章 绪 论

在人类的生产活动中，人们通常从广义的和狭义的两个角度去定义天然气。

广义的天然气泛指自然界存在的一切气体，它包括大气圈、水圈、生物圈、岩石圈以及地幔和地核中所有自然过程形成的气体。按其存在的环境，分为大气、地表气、海洋气、沉积岩气体、地幔—地核气体，还有宇宙气。它们的化学组成^[1]，与其生成和存在环境的生物、化学、放射性元素蜕变等作用息息相关。

狭义的天然气是从资源利用的角度出发，专指岩石圈、特定的水圈中蕴藏的，以气态烃为主的可燃气体及对人类生产、生活有重要经济价值的非烃气体，如具有较高商业品位的 CO_2 ， H_2S ， He 等气体。本书是论述烃类可燃气体资源勘探的著作。

第一节 中国天然气勘探开发简史与发展展望

中国天然气勘探开发史，是一部辉煌而悲壮的历史。从古代文明的开创，到近代被欺凌的衰落，直到 20 世纪中叶，古老的中国重新崛起，伴随工业化进程，在振兴中以扶摇发展之势迎接新世纪的曙光。

一、古代天然气勘探开采与利用

中国利用石油、天然气的历史源远流长，有关石油、天然气地象与自然景观的记载，或见之于“史”、“志”，或见之于“书”、“赋”，络绎不绝，世代相传。四川邛崃花牌坊和成都西门外出土的汉代“火井”画像砖^[2]（图 1-1）便是生动的写照。

1. 天然气的发祥地——四川火井县

“火井”，是中国古代先民给天然气井的形象命名。关于“火井”的记载始于《汉书·郊祀志》，即西汉宣帝神爵元年（公元前 61 年），“祠天封苑火井于鸿门”，即今陕西省神木县和榆林县之间。由于这口井天然气燃烧，故立祠虔敬。

西汉著名文学家杨雄（公元前 53—公元 18 年）与西晋著名文学家郭璞（公元 276—324 年），分别在《蜀都赋》

与《盐池赋》中对四川奇特的“火井”（图 1-2），进行过赞美^[3]。临邛（今四川邛崃市）一带，在西晋《博物志》中就有“临邛火井一所，从（纵）广五尺，深二三丈。井在县南百里，昔时人以竹木投以取火”的记载。常璩著《华阳国志》中，不仅记载了利用天然气煎盐的史实：“井有二水，取井火煮

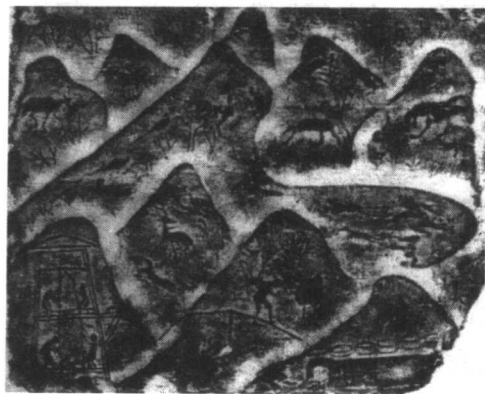


图 1-1 汉代“火井”画像砖



图 1-2 世界第一井——临邛火井遗址

之，一斛水得五斛盐”。而且记载了广都（今成都至双流一带）盐井发展的历史背景：“周灭后，秦孝文王以李冰为蜀守（公元前 250 年左右），冰能知天文地理，……又识齐水脉，穿广都盐井诸陂池，蜀于是盛有养生饶焉。”李冰不只为都江堰水利工程创立了千秋伟业，而且对凿井求盐与天然气利用也是功不可没的。

从西晋“火井沉荧于幽泉，高焰飞煽于天垂”，到北周（公元 557—581 年），将临邛县命名为“火井镇”，再延续至隋大业十二年（公元 616 年）设“火井县”（见《旧唐书·志》二十一）这一历史的演迁的事实，都充分证明四川火井县是天然气的发祥地。

2. 古老的自流井气田

自流井气田位于四川省自贡市、富顺县、荣县境内，历史上曾称贡井（西）场和自流井（东）场^①自流井天然气最早的开采利用，是从凿井求盐开始的。据《川盐纪要》记载：“西蜀去海远，而凿井求盐，人无淡食之忧”。在这一历史背景下，四川井盐的兴歇变幻中，又以自流井久负盛名。据《华阳国志》记载：“江阳县有富义盐井”。经历史多次变革，时下的富义盐井称为富顺盐井。自流井因其火井沱河岸自流盐水^②而得名。井盐生产自汉晋时期则有之，到唐代已具规模（见《唐书·地理志》），至北宋时期（见《太平寰宇记》）已成为四川有名产地。伴随井盐开凿，在唐高宗显庆年（公元 656 年），自流井侏罗系浅层天然气已有发现，到宋代用“草皮火”（浅层气古称）煎盐日甚。明崇祯十年（公元 1637 年），宋应星在《天工开物》中的“井火煮盐图”就是有力的证据。清康熙年间（公元 1667—1671 年），时任富顺县知县的金肖孙对“火井”兴叹，有诗云：“九渊一炬起，高岭列灶烘，能省樵夫力，兼成煮海功。”李榕（公元 1860 年）在《自流井记》中也有“蜀中数邑产盐，惟火井烧盐之法最精”的记载，说明天然气的利用已在井盐的发展中起着举足轻重的作用。

自流井无论是盐卤，还是天然气的开采都是独特的。凿井“见功”（水、火、油得其一者，谓之见功），即行开采，直到枯竭再“锉下脉”（加深凿井）。如此，逐层打开，逐层开采。于是，众多小而分散的侏罗系浅层气，主要经历了从 13 世纪到 19 世纪中叶“加深添火”开采时期。到清嘉庆二十年（公元 1815 年），桂咸井井深 797.8m 才钻穿侏罗纪地层。1835 年，荣（shēn）海井钻达井深 1001.42m，首次揭开了下三叠统嘉陵江组，发现嘉五段气层（图 1-3）。据《四川盐政史》等记载，1850 年磨子井钻达 945~980m，发现了嘉三段主力气层（古称“大火”），史称“自贡古今第一大火井——火王井”，相传 30 里外可见火光。

1850 年太平天国革命爆发，1853 年攻克南京，长江运道梗阻，富荣盐^③济销湘楚，刺激了“锉下脉”或开凿深井的发展，促进了雷口坡组“黑卤”和嘉三气藏



图 1-3 世界第一口千米深井

① 1938 年自贡未设市之前，分属荣县、富顺县。——编者注

② 盐泉。——编者注

③ 指自流井、贡井盐。——编者注

的开发,也导致了1894年“发源井”对岩盐层的发现与开采。此间,“富甲郡邑”的王畏三堂家族达到极盛时期(1850—1884年)足以佐证。但是,本来就有“东场火盛,西场水旺”的态势,由于主力气藏的开采,更加剧了“火贱水贵”的局面(迫于过剩与无奈,大量的天然气只好引“笕”^①对空燃烧)。据《自流井记》记载:“火之极旺者,曰海顺井,可烧锅七百余口;水、火、油三者并出,曰磨子井,水、油二种经二三年而涸,火可烧锅四百余口,经二十余年犹旺也……。”“火以锅口计”,“视所煮盐之多寡以为兴衰。”据《四川盐政史》记载:“民国三年(公元1914年)两场^②分家,调查水、火两井共900眼,火灶4584口,……而废井则有11800余眼”;又记“1929年,东场火井470眼,火灶4645口……;西场火井163眼,火灶3134口……。”1953—1956年自流井专题调查队胡励善等人,根据当时的179口气井以及历史上的火井、火灶、产盐量变化情况计算,自流井气田的采出气量达 $305.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ (1986年达 $336.8 \times 10^8 \text{ m}^3$)^[4]。1960年4月18日,在该气田上,又在自2井发现了阳新统大型裂缝—溶洞型气藏,1990年被中国石油天然气总公司命名为“功勋气井”,至2000年底,已累计采气 $46.833 \times 10^8 \text{ m}^3$,为该气田增添了新的光辉。

自流井天然气的开发利用,以无可争辩的史实,谱写了世界上最古老气田的灿烂一页。

3. 古老天然气勘探开采技术

自流井不仅以它的悠久的开采历史而闻名,而且更以它的古典的勘探开采工艺技术而著称。据《自流井记》记载:“盐厂之管事有四:规画形势,督工匠以凿井者,为井之管事;综核水、火,计成数以烧盐者,为灶之管事;安置竹笕,由近及远以达咸水者,为笕之管事;储盐运盐,行水陆以权交易者,为号之管事。井、灶、笕、号四管事,盐之重任也。”通过这些生产组织可以窥见,从地质钻井、采卤采气,到卤气集输、盐务运销,已形成上、中、下游一体化的手工作业工程。

1) “识齐脉”定井

凿井求盐,如何布井,是从“识齐脉”开始的。据1610年《蜀中广记》记载,“凡匠氏相井,多于两河夹岸,山形险急得沙势处,鸠工立石圈……,而凿大小窍焉……。”古时定井,都要请高明的“山匠”看“龙脉”。他们从“水旺”或“火盛”井的分布,特别是“黑卤”与嘉三主力气藏发现后,逐渐窥测出碳酸盐岩裂缝发育的规律。根据自流井专题调查队编制的雷口坡组绿豆岩标准层构造图检验,凡有历史记载的绝大多数井位都沿构造长轴分布。足见,“识齐脉”已有萌芽的构造地质知识。

2) “扇泥筒”录井,“黄姜、绿豆岩”作标准层

据《四川盐法志》卷二“盐井图记”篇记载,“铍井初,则灌水凿之,及二三丈许,泉四出,不用灌水,无论大小钎触处俱为泥水。每凿一二尺,起钎,用筒竹一,约丈余,通节,以绳系其梢,筒下为皮钱掩其底,操绳以缩皮,泥水翕入,邑满提出,渐尽,复下钎凿焉。”用竹筒扇泥的作用,首先在于清除井底岩屑;其二是录井。据《自流井记》记载:“凡凿井须审地中之岩,井铍初下为红岩,次为灰岩,次黄姜岩,见油。次草白岩,次黄砂岩,见草皮火。次青砂岩,次白砂岩,见黄水。次煤炭岩,次麻箍岩,次黑烟岩,次绿豆岩,见黑水。……凡井,诸岩不备见,唯黄姜、绿豆岩必有之……”。如此生动形象的记叙,一是指出“诸岩不备见”,反映了陆相地层横向变化大的特征;二是指出“唯黄姜、绿豆(岩)必有之”,即下侏罗统东岳庙灰岩与中三叠统雷口坡组底绿豆岩,沿用至今,作为区域标准层。

3) “立缝见火”、“横缝见水”

用于凿井的原始地质记录——“岩口薄”,大量记载了钻遇“横缝”、“立缝”的现象,据《四川盐法志》记载:“泥孩儿专为试走岩^③其名盖承木孩儿云,其形制则殊。铍井最忌走岩,漏白水。然少能

① 竹管。——编者注

② 即东、西场。——编者注

③ 地层垮塌。——编者注

免此者，其要在能补^①……然走岩何方，以及白水之多寡不知也，于是以此试之（曰试腔）。百年前相传用木孩儿，今改用泥孩儿（曰泥娃娃），削木为杵，长可三、四尺，半缚泥，外束以麻，大与井眼相若而稍缩。度纆悬而下，至走岩处顿许时取出，视其湿印知其方，湿宽者即知其腔口大，湿深者即知其水力劲，然后据以补之。”通过大量的“试腔”实践，发现和认识了井下地层中的“横缝”和“立缝”，且进而掌握了“立缝见火”，“横缝见水”的规律性。

4) “卓筒井”，伟大的古代的发明

“大口井”始于战国，汉获发展，唐臻于鼎盛时期。据临邛火井（见西晋《博物志》）和陵井（见后汉《陵州图经》）考证，前者“从（纵）广五尺，深二三丈”；后者“周回四丈，深五百四十尺”。由此可见，“大口井”是因地制宜、耗工巨大且随浅卤的枯竭而无法适从。北宋初，圜（圆）刃锉的发明，冲击式顿钻技术的发展，推动了凿井生产力的伟大变革。据苏轼《东坡志林》记载：“自庆历（公元1041—1048年）、皇佑（公元1049—1053年）以来，蜀始创用‘筒井’，用圆刃锉如盥大，深者数十丈。以巨竹去节，牝牡^②相衔为井，以隔横入淡水，则鹹泉自上……”。它充分说明，卓筒井开创了“小口井”深井掘进的新纪元。卓筒井发明在宋，发展在明，完善在清。据宋李心《建炎以来系年要录》史料记载，到公元1129年前后，四川地区有凿井的30个州县中，就有17个推广了卓筒井。它发祥于四川井研，发展完善于自流井，卓筒井的伟大实践，极大地推动了古代深井钻井系列技术的发展。据《中国古代井监工具研究》（1990年），从多种功能、不同类型的钻头发明与演进，到适应井下复杂性的钻具组合，从凿井到修井、补井与探测工具看，有9类70余种。其中，（1）钻井工具4种；（2）打捞工具14种；（3）辅助打捞工具15种；（4）固井工具9种；（5）测补工具4种；（6）连接工具7种；（7）撇汲工具4种；（8）扶正工具两种^④。其规格齐全，设计科学，制作精巧，巧夺天工令中外专家学者叹为观止。

卓筒井的井身结构由石圈—竹筒套管—裸眼组成。它的工序由选井签井—开井口—下石圈—锉大口—下竹木—锉小口—见功—腾位置^③。明朝末年（约公元1610年），曹学桢在《蜀都广记》卷六十六中，有“井法”一章，记载了自宋代以来，卓筒井的工作流程，堪称人类最早深井钻井的经典总结。

5) 窰盆·笕，巧夺天工的创举

1850年间，磨子井钻达嘉三高压主力气藏，引起强烈井喷失火，殃及鱼池。如何对付高压天然气，开采主力气层，已成为当务之急。以“窰盆”的发明和长距离输送“笕”（又称视管）为代表的采输系统工艺技术，成为凝聚了先民智慧的又一结晶。据《四川盐法志》记载：“凡火井成，井口尚陷地丈许，上用虚底木桶罩之，曰炕（窰）盆，桶式下阔而上狭。……桶上复以木板，中留小窍，上复片席，席上置木箱，亦下阔上狭……。气由席上达箱，曰冷箱，又曰冲天笕。……其桶旁凿窍，以笕端接地中，将至灶……。”显而易见，“窰盆”的结构设计科学，不仅具有降压、配风、气水分离等独特的优点，而且还可以边钻边喷或边修井作业、边采气的功能。

“笕”。中国古代人民把竹子或木料制成的管线，称之为“笕”或“视”。笕是天然气和卤水集输系统的动脉，于是有水、火笕之分。据《自流井记》记载：“水、火之笕皆以竹，火笕有用木者，笕外缠竹篾……油灰渗之，外不浸雨水，内不遗涓滴。高者登山，低者入地，……虽长虹饮涧，秋蛇之赴壑不能状也。小溪之井无火，置笕通咸水，复以石槽，伏引溪水中，达东岸，两岸各高二十余丈，绵亘冲射，是为奇观。”这里，既反映了笕的抗压、防腐的制造工艺，又表达了笕管沿途逾山越水，设“马车”数座^①，埋“渡水之笕，绵亘交错”，甚为壮观的情景。据《川盐记要》记载，当时的自流井“水、火笕有十二条，总长达二三百里。”昔日“东场火盛，西场水旺”之苦，今日凭“笕”变通途

① 补腔。——编者注

② 公母卓。——编者注

③ 钻口袋。——编者注

④ 驱马转轮，举水助笕。——编者注