

高等学校教材

煤层气开发概论

张卫东 王瑞和 主编

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

高等学校教材

煤层气开发概论

张卫东 王瑞和 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统介绍了煤层气储层地质,煤层气开发原理与方法,煤层气钻井、固井与完井,煤层气测井与试井,煤层气储层压裂,煤层气开采等内容,并且站在世界煤层气产业科学发展的角度,回顾了世界煤层气开发的发展历程。

本书可作为从事煤层气工作的科技工作者、高校学生的参考书,也可作为社会各界了解煤层气的专业读物。

图书在版编目(CIP)数据

煤层气开发概论 / 张卫东, 王瑞和主编.

北京: 石油工业出版社, 2013.2

(高等学校教材)

ISBN 978-7-5021-9316-4

I. 煤…

II. ①张…②王…

III. 煤层-地下气化煤气-资源开发-高等学校-教材

IV. P618.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 246208 号

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: <http://pip.cnpc.com.cn>

编辑部: (010) 64255590 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2013 年 2 月第 1 版 2013 年 2 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 13.75

字数: 337 千字

定价: 30.00 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

前 言

赋存在煤岩中的煤层气(俗称瓦斯),因在煤炭开采中容易引起岩爆等灾难性事件的发生,长期被视为灾害之源,当从井下抽排上来以后又被视作废物排放到空气中,造成了大气污染。20世纪70年代的石油危机使美国认识到资源的宝贵,率先将煤层气纳入可利用的能源范畴,在政府的税收补贴等政策刺激下,发展起了煤层气产业,使煤层气成为了能源新宠。1980年,全美煤层气产量尚不足 $1 \times 10^8 \text{m}^3$,而到1993年,全美煤层气产量提高到 $212 \times 10^8 \text{m}^3$ 。进入新世纪的2006年,美国煤层气产量更高达 $540 \times 10^8 \text{m}^3$ 。加拿大、澳大利亚等国也紧跟其后,进入了煤层气商业开发阶段,煤层气工业的快速发展实现了经济效益和社会效益的双丰收。

从1993年开始,我国已成为油气纯进口国,进口的油气数量快速增长,油气对外依存度逐年增加。我国煤层气储量为 $36.81 \times 10^{12} \text{m}^3$,居全球第三位,几乎与我国常规天然气储量相当,是一笔宝贵的资源财富。为保障国民经济的快速发展和国家能源安全,煤层气作为我国重要的油气替代能源,已成为我国今后勘探开发的重点。1996年,国务院批准组建了全国唯一的煤层气开发企业——中联煤层气有限责任公司。当时的江泽民总书记、李鹏总理分别批示:“依靠科技进步,发展煤层气产业,造福人民”、“突破煤层气,开发新能源”。国家鼓励煤层气作为一个新能源产业进行发展,拉开了我国煤层气大规模勘探开发的序幕。到2010年12月,国家为进一步扩大煤层气开采对外合作,新增了中国石油天然气集团公司、中国石油化工集团公司以及河南省煤层气开发利用有限公司三家企业作为第一批试点单位,以期进一步加快我国煤层气勘探开发的步伐。在这种情况下,编写一部介绍煤层气开发的书,把世界上通用的煤层气开发技术呈现出来,供从事煤层气勘探开发的科技工作者、高校学生学习和参考,具有十分重要的现实意义。

本书从煤层气产业科技发展的角度,介绍了国内外煤层气开发的发展历程、煤层气储层地质、煤层气开发原理与方法以及煤层气钻完井、煤层气测井和试井、煤层气压裂、煤层气开采等工艺技术。

全书共分七章,绪论和第一章由张卫东编写;第二章由王瑞和编写;第三章由周卫东、左银卿编写;第四章由周卫东、王楚峰编写;第五章由郭炳政、白建梅编写;第六章由王杏尊编写;第七章由张卫东、郭敏编写。全书由张卫东、王瑞和统稿。

该书的编写得到了华北油田分公司从事煤层气开发诸多专家的鼎力支持和

帮助,得到了中国地质大学(北京)多位教授的细心指点,中国石油大学(华东)的研究生做了大量资料搜集工作,在此表示衷心的感谢。编写中参考并引用了国内外诸多的文献,对这些文献的作者一并表示感谢!

由于编者水平有限,疏漏、错误之处在所难免,恳请各位读者批评、指正。邮件联系方式:wdzhang@upc.edu.cn。

编者
2012.9

目 录

绪论	1
第一章 煤层气开发的发展历程	4
第一节 煤层气井下抽放技术的发展历程	4
第二节 煤层气地面开发技术的发展历程	5
第三节 我国煤层气开发的发展历程	9
第二章 煤层气储层地质	14
第一节 煤炭及煤层气的形成	14
第二节 煤化学与煤阶	18
第三节 煤层及煤层气储层特性	30
第四节 煤层气的赋存状态与富集条件	42
第五节 煤层气藏	48
第三章 煤层气开发原理与方法	60
第一节 煤层气的运移与产出机理	60
第二节 排水降压法开发煤层气	64
第三节 注热、注气法开发煤层气	78
第四节 煤层气开发方案编制	84
第四章 煤层气钻井	89
第一节 煤层气钻井	89
第二节 煤层气固井	102
第三节 煤层气完井	107
第五章 煤层气测井与试井	116
第一节 煤层气测井	116
第二节 煤层气试井	133
第六章 煤层气储层压裂	145
第一节 煤层气储层压裂产生的特殊问题	145
第二节 煤层气储层岩石力学特性及压裂裂缝类型	154
第三节 水力压裂工艺及影响	162
第四节 压裂液与支撑剂	165
第五节 煤层气储层压裂新方法	173
第七章 煤层气开采	181
第一节 煤层气排采设备	181
第二节 煤层气排采工艺	189

第三节 煤层气的矿场集输工艺·····	196
第四节 煤层气的采出水处理·····	198
参考文献·····	208

绪 论

煤层气俗称“瓦斯”，是赋存于煤层及其围岩中、与煤炭共伴生的一种天然气体，国际上习惯称其为煤层甲烷(Coal bed Methane, 简称CBM)，其成分以甲烷为主，其次为二氧化碳、氮气等。煤层气工业是一个介于煤炭工业与石油天然气工业之间的新兴能源产业。美国、加拿大、澳大利亚等国的煤层气工业已进入了规模性商业开发时期，我国的煤层气工业正得到飞速发展。

煤层气工业以开发利用煤层气资源为目标，是一个技术密集型的庞大工业系统。从产业层面看，煤层气工业包括上游、中游、下游三个领域。煤层气工业上游以勘探开发为主要任务。煤层气工业中游主要进行煤层气的管道输送和销售，是煤层气开发和利用的桥梁。煤层气工业下游主要从事煤层气加工和利用，包括居民生活用气、发电、作化工原料、作工业用优质燃料等。

根据资源状态、开发条件和开发产品的不同，煤层气开发可分为两大类，即煤矿区煤层气资源的抽排和原始储层煤层气资源的地面开采。

煤矿区煤层气资源的抽排是借助煤炭开采工作面和巷道，通过煤矿井下抽放、煤矿采动区抽放、废弃矿井抽放等方法开采煤层气资源的开发方式。煤矿井下煤层气抽放是最成熟的煤矿区煤层气开发方式；煤矿采动区抽放是充分利用煤炭开采过程形成的采动影响带开采煤层气；废弃矿井抽放则是利用已报废的煤矿采空区进行负压抽放煤层气。

原始储层煤层气资源的地面开采是指利用垂直井或定向井技术、储层改造技术(如压裂、洞穴完井等)、排水降压采气技术来开采原始储层条件下的煤层气资源的开发方式。煤层气地面垂直井或定向井开采，易于形成相当规模的商业开发，是目前煤层气工业大力发展的开发方式。

煤层气自生自储、以吸附态为主要赋存状态、需要排水降压才能采气的独特资源属性决定了煤层气开发具有以下显著特点：

(1)煤层气是一种典型的自生自储式非常规天然气资源。

煤本身是一种有机碳含量极为丰富的有机源岩，在其成岩、煤化过程中生成大量的烃类物质，其中以甲烷为主。由于煤本身具有极强的吸附性能，加之甲烷与煤的有机质又具有较强的亲和力，因此在煤演化过程中生成的甲烷气体被吸附在煤不同级别孔隙的内表面，以吸附态赋存于煤层之中。这一演化、生气、吸附过程使得煤层气在一定的温度和压力条件下得以富集，从而使煤层具有较高的含气量。

(2)煤层气是以吸附态为主要赋存状态。

天然气资源的赋存状态取决于储层特性和赋存条件。对常规天然气来讲，其储层以砂岩、灰岩为主，赋存于孔隙之中，在常规的压力和温度条件下主要呈游离态；而煤层气则是赋存于煤层之中，煤层是一种特殊的储层，对甲烷具有极强的吸附能力，故以吸附态为主。煤对

甲烷的最大吸附容量约在 $10\sim 50\text{m}^3/\text{t}$ 之间。

(3)煤层气具有独特的产出机理。

由于煤层气产出必须是先解吸,再通过扩散和渗流到达井筒而产出。因此,煤层气的产出机理可描述为以下三个过程:

①解吸过程。通过排水降压,在井筒附近形成一定的压降漏斗。在地层压力低于临界解吸压力的区域,被吸附的甲烷分子开始从煤的基质孔隙内表面解吸,由吸附态变为游离态。甲烷在煤层中的解吸是吸附的逆过程,当煤储层中压力降低时,被吸附的甲烷分子与煤的内表面脱离,解吸出来,进入游离相。

②扩散过程。煤层甲烷的扩散是煤基质孔隙内的甲烷分子在浓度差作用下,从高浓度区向低浓度区的运动过程。排采作用导致裂隙内煤层气浓度低于基质,此过程是甲烷分子由基质向割理扩散。

③渗流过程。煤层割理中的甲烷气体在流体势(压力差)的作用下,通过裂隙系统流向压裂裂缝并向生产井筒渗流。煤层甲烷在裂隙系统中的流动符合达西定律。在裂隙系统中,甲烷和水以各自独立的相态混相流动。达西定律的使用需考虑每种流体的相对渗透率和有效渗透率。在实际研究过程中通常采用相对渗透率,通常认为它是饱和度的函数。

(4)煤层气具有独特的开采生产技术。

针对煤层气独特的产出机理,形成了独特的煤层气开采生产工艺技术:

一是煤层气储层改造技术,如压裂洞穴完井等,使人工裂缝尽可能地连通煤层中的天然裂隙,加速煤层裂隙内水和气的渗流速度,以加快排水—降压过程,从而提高煤层气产量。

二是排水采气技术。煤层气生产前,先进行排水,降低煤层的压力到达煤层气临界解吸压力后再进行采气。

井间干扰对煤层气生产是一项最有效的实现稳定高产的技术措施,而对常规天然气生产却恰恰相反,井间干扰会导致常规天然气产量大幅度锐减。井间干扰促进煤层气井稳定高产的原理在于:在储层条件下,煤层气是呈吸附态存在的,煤层气产出需要通过排水—降压,从而使煤层气从煤的基质孔隙内表面解吸下来,因此井间干扰是造成有效降压的技术手段。

(5)煤层气井具有独特的产气规律。

正是复杂的产出机理和独特的生产工艺技术决定了煤层气井生产期长、单井日产量低

的特点。根据美国多年的生产经验,通常是通过一段时间的排采,煤层气井的气产量才开始逐步进入一个稳定的高峰产量阶段,这一高峰产量一般可维持 $3\sim 5$ 年,之后产量缓慢降低,如图0-1所示。因此,煤层气开发具有投资大、投资回收期长、综合效益显著等特点。

(6)有利于煤矿安全和能源安全。

无论是地面开采原始储层的煤层气资源,还是煤矿井下瓦斯抽放,其实质都

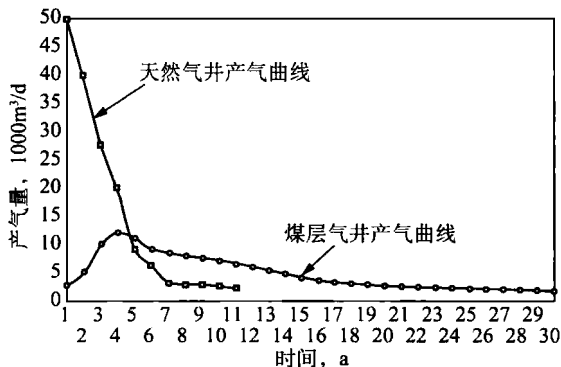


图0-1 煤层气井产气曲线与天然气井产气曲线对比

是采用切实有效的方法,在采煤之前先将煤层气开采出来,以减少煤层中的甲烷气体含量,降低煤矿井下的瓦斯涌出量,防止瓦斯灾害,提高煤炭生产效率。这一观念早已被政府和煤炭企业认同,并积极开展各种方式的采煤前采气工作。从煤层气工业的角度来考虑,利用地面井开采原始储层的煤层气资源是大规模商业性开发的最佳方式。美国煤层气工业的绝大多数煤层气开发项目都属于此类开采方式。

若不能很好地将煤层气资源及时有效地开发,它将随着煤炭资源的开采而被白白地排放掉。据粗略估计,世界上的煤矿每年向大气中排放约 $140 \times 10^8 \text{m}^3$ 煤层气,严重浪费了宝贵的煤层气资源。

第一章 煤层气开发的发展历程

煤层气是一种非常规天然气资源,也是一种战略性的后备资源,由于能源危机和环保问题日益受到世界各国的重视,开发煤层气也逐渐被提到议事日程上来。通过政策扶持和科研投入,成功地实现了从“瓦斯灾害”到“优质能源”的认识转变以及从“井下抽放”到“地面开发”的技术革新,特别是美国多年来在煤层气勘探开发中所积累的技术和经验以及所取得的显著效益,更促使了煤层气工业在世界范围内的蓬勃发展。

第一节 煤层气井下抽放技术的发展历程

瓦斯气体是煤矿安全生产中的最大威胁之一,有“煤矿第一杀手”之称。人类最早开采煤层气是出于采煤过程中安全的需要,采抽出的煤层气被排放到空气中或直接燃烧掉,并没有加以利用。最早有历史记载的瓦斯抽放可追溯到1637年以前,我国著名科学家宋应星在《天工开物》一书中记载了利用竹管引排煤中瓦斯的方法。

《天工开物》中记载:“凡煤炭普天皆生,以供锻炼金石之用。南方秃山无草木者,下即有煤,北方勿论。煤有三种,有明煤、碎煤、末煤。明煤大块如斗许,燕、齐、秦、晋生之。不用风箱鼓扇,以木炭少许引燃,炽达昼夜。其傍夹带碎屑,则用洁净黄土调水作饼而烧之。碎煤有两种,多生吴、楚。炎高者曰饭炭,用以炊烹;炎平者曰铁炭,用以冶锻。入炉先用沃水沃湿,必用鼓鞴后红,以次增添而用。末煤如面者,名曰自来风。泥水调成饼,入于炉内,既灼之后,与明煤相同,经昼夜不灭,半供炊爨,半供熔铜、化石、升朱。至于燔石为灰与矾、硫,则三煤皆可用也。”这一段介绍了煤的用途、储存地方以及分类,并介绍了明煤(相当于无烟煤)、碎煤(相当于烟煤)、末煤(相当于褐煤和泥煤)三种不同煤的性质、产地以及用途。

《天工开物》记载:“凡取煤经历久者,从土面能辨有无之色,然后掘挖,深至五丈许方始得煤。初见煤端时,毒气灼人。有将巨竹凿去中节,尖锐其末,插入炭中,其毒烟从竹中透上,人从其下拾取者。或一井而下,炭纵横广有,则随其左右阔取。其上枝板,以防压崩耳。”这一段介绍了开采煤的过程中会伴随有煤层气的逸出,即“初见煤端时,毒气灼人”,并介绍了引排煤中瓦斯的方法(图1-1),即用中间挖空的巨竹管插入井底,把瓦斯排出地面。用竹筒把瓦斯排空后,再进行巷道支护才能安全开采煤矿。此记载表明早在明代,我国采煤技术已在世界处于领先地位。

1733年,英国一家煤矿首次进行了煤矿瓦斯抽放和管道输送的尝试。1844年,又有一个发生过瓦斯爆炸事故的矿井将采空区的瓦斯抽放至地面。19世纪的欧洲曾尝试钻入煤层抽出煤层气,以减少采矿危险。19世纪后期,英国威尔士开始进行从煤层中抽排瓦斯的试验。

随着世界经济的发展,煤炭资源被大规模开发和利用,煤矿瓦斯爆炸事故也频频发生。1907年,美国发生了其历史上最致命的一次矿难,西弗吉尼亚的一次爆炸夺走了362个人的生

命,该年美国矿难死亡人数达3200余人。据专家统计,到20世纪初期,美国的矿难每年有近6%的矿工葬身井下,近6%的落下终身残疾,6%的受到不同程度的暂时性损害。

英国煤矿历史上约有15000人死于瓦斯爆炸事故,最严重的一次是1913年10月14日发生在圣海德煤矿的瓦斯爆炸事故,死亡439人。但自从1979年以来,就再也没有发生过瓦斯爆炸死人事故,这与瓦斯抽放及管理的严格执行密切相关。要求煤矿必须建立明确的瓦斯抽放管理系统,包括瓦斯抽放的政策、组织管理机构、抽放工程和抽放量的严格计划、抽放技术管理规定、抽放结果监测并公示、抽放后的系统安全评估等。各环节职责和目标都要明确,每年由管理系统以外的内

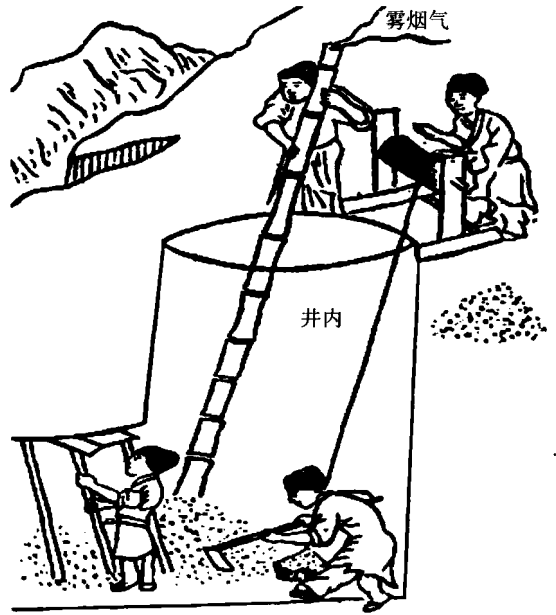


图1-1 我国明代引排煤中瓦斯的方法

行专家进行一次瓦斯抽放管理系统审查,如果煤矿不能有效控制瓦斯灾害,必须及时调整瓦斯抽放管理系统的相关内容。英国生产矿井的瓦斯抽放率达到45%以上,抽出的瓦斯全部被利用。其在废弃矿井瓦斯抽放方面也取得成功,抽放废弃矿井的瓦斯用于发电,既获取了新的洁净能源,又减少了废弃矿井瓦斯向大气的泄漏,减少了对环境的污染。

前苏联是世界上煤层气资源量最丰富的国家,由于经济等方面的原因,至今仍仅限于为解决煤矿安全问题而进行井下抽放。1985年,其瓦斯抽放量超过了 $21 \times 10^8 \text{m}^3$,这对有效控制瓦斯事故起到了重要作用。

第二节 煤层气地面开发技术的发展历程

一、美国煤层气地面开发技术的发展历程

美国在不断探索中逐渐将常规油气钻井技术引入到煤层气的开发中来。1920年和1931年,美国在粉河盆地中部的怀俄德克煤层和阿巴拉契亚北部比格郎气田的匹兹堡煤层先后打出了三口煤层气自流井。1953年,美国在圣胡安煤田钻了第一口地面煤层气井,产气量达 $1.2 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 。

20世纪70年代以前,美国煤矿抽放煤层气主要是为了煤矿井下安全。进入20世纪70年代,在全球能源危机的影响下,石油价格一度高涨,美国首先意识到煤层气可以作为一种能源,能够有效缓解石油供需矛盾。美国能源部做出了开展包括煤层气在内的非常规天然气勘探开发研究的决定,从1978年开始对全美16个含煤盆地进行了长达8年的煤层气研究,对煤层气的储集、运移机理、生产方式和开采工艺有了进一步的认识,并先后对14个盆地做出了资源量评价。

1980年,美国政府出台了《能源意外获利法》,鼓励非常规气体能源和低渗透气藏的开发,其中可适用于煤层气的鼓励政策是第29条的税收优惠政策,该税收优惠政策的出台在煤层气开发的初期起到了巨大的推动作用。1980年12月,全世界第一个商业煤层气田——黑勇士盆地橡树林煤层气开发区建成投产,标志着美国煤层气工业进入起步阶段。美国天然气研究所和许多天然气公司开始了大规模煤层气商业性开发,不久又在圣胡安盆地取得重大突破,至此黑勇士盆地和圣胡安盆地成为美国煤层气生产的主要基地,其产量占全美煤层气产量的80%以上。两大盆地煤层气产量的主要增长期开始于1986年,这归结于煤层气勘探、生产技术的重大进步以及联邦减税政策的实施。该法出台后的10年间,美国黑勇士盆地煤层气开得到的税收优惠约为2.7亿美元,圣胡安盆地的税收优惠约为8.6亿美元。

1983年,阿拉巴马州颁布了煤层气产业法规,它是最早颁布煤层气产业法规的美国州政府,弗吉尼亚州和西弗吉尼亚州也相继颁布了煤层气法规。之后,这两州煤层气产量大幅度上升,由此产生的经济效益和社会效益非常明显。

1986年以后,美国在取得东部浅层含煤盆地煤层气开发经验的基础上,又对西部深层含煤盆地展开了研究,并取得了显著的开发效果。90年代晚期,怀俄明州和蒙大拿州粉河盆地的煤层气产量迅速增长,随后一度成为美国煤层气开采最活跃的地区之一。煤层气产地也从当初的圣胡安、黑勇士盆地拓展到粉河、拉顿、尤因塔和大绿河等含煤盆地。

最初《能源意外获利法》中第29条税收优惠政策的适用期为10年,即到1989年底。而1988年美国又把该项优惠政策延迟到1990年底,后来政府又第二次把截止期推迟到1992年底。在1979年12月31日至1993年1月1日之间钻探的井中生产出的煤层气产量,在2003年1月1日以前都可以享受到第29条税收政策规定的优惠。美国第29条税收优惠政策的截止日期的两次推迟,极大地促进了煤层气开发者在3个截止日期之前,以最大的努力钻探最多的井,以期获得最大限度的税收优惠。到1994年底,全美已有6000多口煤层气井,正在生产的井超过5500口,年产量逾 $210 \times 10^8 \text{m}^3$,占美国天然气总产量的4.2%。美国第29条税收优惠政策有效推动了美国煤层气井数和产量的增加,使美国煤层气年产量从1983年到1995年的12年间,从 $1.7 \times 10^8 \text{m}^3$ 猛增到 $250 \times 10^8 \text{m}^3$,基本形成产业规模。

有人曾预言在1993年初停止减税政策之后,煤层气的产量将会减少甚至停止,然而这种情况并没有发生,可能是因为天然气被认为是一种理想的清洁能源,或者是因为现在新的生产技术的发展已经不需要减税刺激政策就可以实现煤层气的盈利性生产。1998年全美煤层气产量已达 $324 \times 10^8 \text{m}^3$,约占当年天然气总产量的7%。纵观美国煤层气工业的发展历程,可将其发展史分为以下三个阶段:

第一阶段:基础研究阶段。

20世纪70年代末期,美国采矿局和美国钢铁公司在黑勇士盆地开始了具有里程碑意义的煤层气研究和开发试验项目。后来能源部又加入此项目,并将此研究扩大为橡树林煤矿区的一个23口井的煤层甲烷气开发试验区。通过这项系统研究,发现煤在形成过程中形成的大量甲烷气,仍有相当部分保存在煤中。煤具有很高的含气能力,美国的优质煤一般可达到 $14 \sim 17 \text{m}^3/\text{t}$ 的含气量。研究还发现,钻直井可有效开采煤层中的甲烷资源。原来认为向煤层钻直井只能获得较小的泄气区,但实际表明,由于煤中发育了大量节理和天然裂缝系统,直井

可获得相当大的泄气区。煤层中73%的原始甲烷资源是可通过钻直井开发的,与此同时,其他机构和石油公司也对煤层气藏形成机制和资源研究做了大量工作,对煤层气形成机理、储集方式、解吸过程和开发可行性有了更深入的认识。

第二阶段:开发可行性研究与试验阶段。

20世纪80年代初期,美国天然气研究所加入了煤层甲烷气开发研究的行列,开始了大规模的煤层气开发研究和试验。除继续研究控制煤层甲烷储集、释放和有效开发的机理外,重点研究开发的可行性和适合于煤层气勘探开发的成套技术。为此专门在离原来橡树林试验区仅数英里的Rock Creek,又建立了一个大型试验区。通过在该试验区的研究,取得了若干令人瞩目的成果,包括:发展了在一口井中对多个煤层进行完井的技术;探索和开发了适合于煤层气藏的试井和诊断技术,研制出了压力传递“间歇”试井方法及所需设备和解释软件,引入了一个煤层气藏模拟模型;通过水力压裂前和压裂后的分析,借助开矿观察,加深了对煤层水力压裂的理解,研究出了一种一次处理一系列薄煤层的多层压裂技术和程序;进行了煤层气开发试验的经济分析,论证了在优惠的税收政策和其他鼓励政策下,从美国许多地区进行煤层气开发是经济可行的。同时,还对美国的煤层甲烷气资源进行了一次综合性评价,于1984年发布的评价结果显示:在圣胡安、黑勇士等13个含煤盆地中,拥有煤层气总资源量达 $11 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。这一雄厚的资源基础,极大地鼓舞了美国政府和天然气工业界。

第三阶段:工业性开发的起步和发展。

美国的煤层气工业开发活动是从20世纪80年代初开始活跃的,但钻井活动起初主要集中在地质情况较简单、条件较好的圣胡安盆地和黑勇士盆地,后来又在全美十多个盆地大面积推广,迅速成为新的钻井热点。

圣胡安盆地位于美国西南部,是一个著名的含气盆地,油气开发史相当漫长,煤炭工业也很发达。该盆地的煤层气主要产自白垩系的Fruitland煤层和Mellefee煤层,总资源量约 $2.5 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。该盆地的煤层虽然埋深较大,但煤层厚、气体含量高(每吨煤含气量达 14m^3),煤层分布稳定、地质情况简单,是煤层气开发的合适地区,所以成为最先被开发的煤层。1985年煤层气井不足100口,但到1990年初煤层气井已超过1500口。该盆地钻了许多高产煤层气井,单井日产量高达 $(7 \sim 30) \times 10^4 \text{m}^3$ 。

黑勇士盆地位于美国东部,煤层气主要分布在宾夕法尼亚系的Pottsvill煤层,煤层气资源量达 $5660 \times 10^8 \text{m}^3$ 。该盆地煤层埋深较浅、煤质较好、气体含量较高,每吨煤含气量高达 17m^3 ,是煤层气开发的理想场所。该盆地的煤层气生产开始于20世纪70年代末期,到1988年12月,已钻开发井1000多口,到1990年初约有煤层气井2750口,累计采气 $5.66 \times 10^8 \text{m}^3$ 。该盆地煤层气井的单井产量不如圣胡安,一般只有数千立方米。但由于钻井成本低、市场条件好、租地方便,所以开发活动胜于圣胡安盆地。

美国煤层气总资源量为 $21 \times 10^{12} \text{m}^3$,是世界上煤层气商业化开发最成功的国家,也是煤层气产量最高的国家。美国煤层气主要赋存在1500m以内的浅煤层,近85%分布在西部落基山脉中生代和新生代含煤盆地,其余15%分布在东部阿巴拉契亚含煤盆地和中部石炭纪含煤盆地。美国煤层气工业起步于20世纪70年代,大规模开发始于20世纪80年代,1990年有煤层气井7000口,2000年有13986口,2006年则达到30000口。煤层气探明剩余可采储量,1989年仅有

1041 × 10⁸m³, 1991年达到2312 × 10⁸m³, 1999年突破4000 × 10⁸m³, 2005年为5633 × 10⁸m³。如图1-2所示,煤层气产量也直线上升,1989年为26 × 10⁸m³, 2005年为491 × 10⁸m³, 2006年达到540 × 10⁸m³(占美国天然气年总产量的10%)。美国有完善的天然气管道系统,所生产的煤层气大部分进入天然气管网销售给燃气公司,矿井抽放煤层气有的直接供给坑口发电厂,有的则与煤混合燃烧作为锅炉燃料。

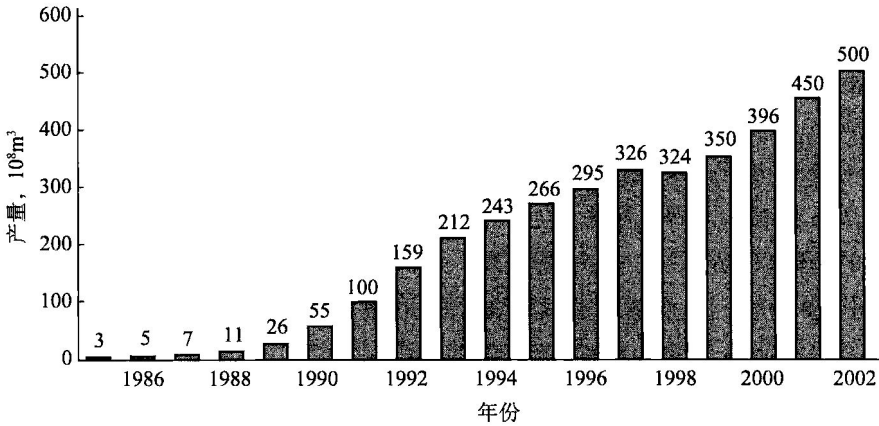


图1-2 美国历年煤层气产量

二、澳大利亚煤层气地面开发技术的发展历程

澳大利亚的煤炭资源量为1.7 × 10¹²t,煤层平均含气量为0.8~16.8m³/t,煤层埋深普遍小于1000m,渗透率多为(1~10) × 10⁻³μm²,煤层气资源量为(8~14) × 10¹²m³,主要分布在东部悉尼、鲍恩和苏拉特3个含煤盆地。澳大利亚煤层气勘探始于1976年,开始进展缓慢,后来充分吸收美国煤层气资源评价和勘探、测试方面的成功经验,针对本国煤层含气量高、含水饱和度变化大、原地应力高等地质特点,进行了特色技术的发展,将煤矿井下抽放技术应用到地面开发中,形成独特的U形井技术。1996年以来,煤层气产量连年增长:1998年煤层气产量为0.56 × 10⁸m³, 2004年产量达到13 × 10⁸m³, 2006年钻井1100口,产量达18 × 10⁸m³(图1-3), 2007年达到29 × 10⁸m³。

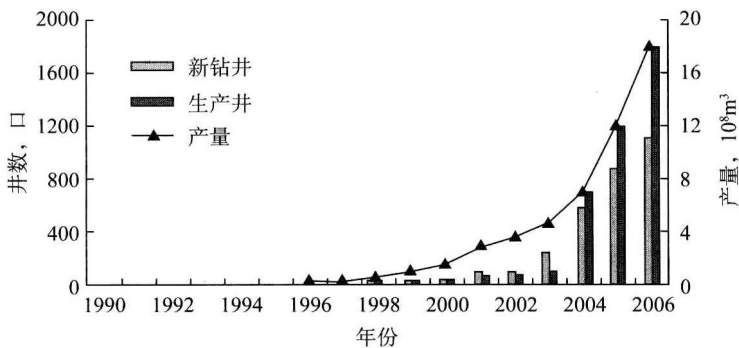


图1-3 澳大利亚煤层气产量及钻井情况

澳大利亚的煤层气勘探主要集中在东部的几个二叠纪—三叠纪的含煤盆地,包括悉尼

(Sydney)、冈尼达(Gunnedah)、博恩(Bowen)等盆地,其中博恩盆地的一些井经过测试已经转化为生产井。2000年到2001年度,仅博恩盆地用于煤层气勘探的费用就达4440万美元,占该盆地全部1.2亿美元勘探费的37%。昆士兰天然气公司已经在靠近Chianchill的Argyle-1井成功进行煤层气生产,日产量超过28230m³。目前,煤层气的勘探开发已经成为昆士兰石油和天然气工业的基本组成部分。澳大利亚的煤层气勘探开发以井下定向井开发为主,借助比较发达的天然气管网系统,产量增长较快,煤层气产量已成为天然气产量的重要组成部分。

三、加拿大煤层气地面开发技术的发展历程

据估计,加拿大17个盆地和含煤区煤层气资源量为 $(17.9 \sim 76) \times 10^{12} \text{m}^3$,其中阿尔伯达省是加拿大最主要的煤层气资源区。加拿大煤层气开发起步较晚,2000年以前由于市场价格、生产技术等原因,煤层气被列为无经济开采价值的资源。1987—2001年,加拿大仅有250口煤层生产井,其中4口单井日产气量达到2000~3000m³。加拿大在煤层气开发初期,简单套用美国开发技术,历时23年(1978—2001年)未能形成突破。21世纪初以来,根据煤层气地质条件(多煤层、含水少),注重发展连续油管压裂、二氧化碳注入、水平羽状井等增产技术。2003年,EnCana和MGV公司合作,钻井1015口,试采气 $5.1 \times 10^8 \text{m}^3$,2006年钻井超过3000口,煤层气井累计超过6500口,产量达 $55 \times 10^8 \text{m}^3$ (图1-4),2007年产量达到 $86 \times 10^8 \text{m}^3$ 。加拿大规划到2020年,煤层气产量达到 $(280 \sim 390) \times 10^8 \text{m}^3$,煤层气产量将占其天然气总产量的15%左右,形成与美国规模相近的煤层气产业。

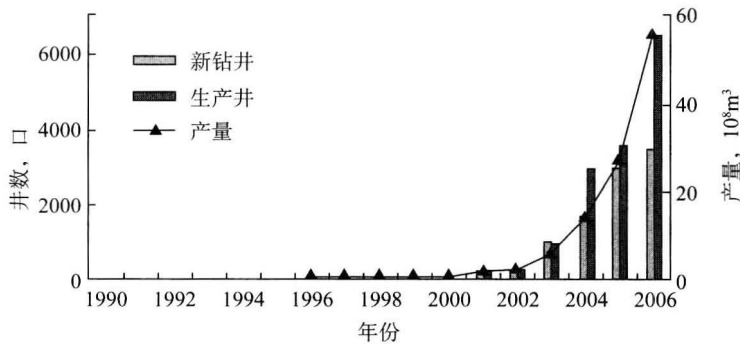


图1-4 加拿大煤层气产量及钻井情况

第三节 我国煤层气开发的发展历程

一、我国煤层气开发技术发展概况

我国是世界上第一产煤大国,煤炭资源量巨大,煤层气资源十分丰富,由于经济迅速发展,对能源的需求也越来越大,有必要开发新的能源。煤层气是煤矿事故的罪魁祸首,国内煤矿矿难70%~80%都是由瓦斯爆炸引起的,开发煤层气可以有效预防事故的发生,改善矿山生产工作条件,保护环境,因此开发煤层气对中国来说十分必要。

我国的煤矿井下瓦斯抽放始于20世纪50年代,1952年,煤炭工业部率先在辽宁抚顺矿务局龙凤煤矿进行了井下瓦斯抽放试验,并获得成功。1957年,阳泉矿务局四矿试验成功了邻近层抽放煤层气的方法。20世纪70年代末至80年代初我国煤层气进入地面开发阶段,原煤炭科学研究总院抚顺分院曾在抚顺、阳泉、焦作、白沙、包头等高瓦斯矿区施工了20余口地面瓦斯抽排试验井,用于解决煤矿瓦斯的突出问题。这批地面瓦斯抽排钻孔可谓是我国采用地面垂直井进行煤层气开采的最先尝试,然而由于当时井位选择和技术、设备等条件的限制,试验未达到预期效果。1985年国家经济贸易委员会修订《资源综合利用目录》,把瓦斯列入废弃能源。

90年代初,我国开始研究煤层气地面开发技术,当时已有近70口煤层气试验井,尤其是辽宁铁法、山西晋城以及安徽淮北等矿区的煤层气开发试验已显示出良好的前景,有的单井日产气量达7000m³。我国煤层气资源的大规模开发计划引起了世界的关注,联合国1992年首先通过全球环境基金会(GEF)向我国提供了1170万美元,用于资助“中国煤层气资源开发”项目。

1992年煤炭部门与联合国开发计划署(UNDP)签订协议,投资1000万美元进行试验,该项目包括松藻矿务局、开滦矿务局、铁法矿务局和煤炭科学研究总院西安分院的4个子项目,主要目的是为我国发展煤层气工业引进技术和设备。这一时期主要借用美国的技术和经验,但对于地质条件复杂的中国含煤区不太适用,因此未获得突破性进展。但是通过试验,对我国煤层气勘探开发取得了一定的认识,为后来的煤层气勘探开发奠定了基础。

1993年联合国又通过开发计划署向我国提供了130万美元,资助华北石油地质局的“中国深层煤层气勘探”项目。1996年亚太经合组织(APEC)向我国提供了1500万美元,主要是资助建立“煤层气利用示范工程”,其中包括民用和发电项目。

与此同时,国外许多专业公司也闻风而动,几十家国外石油或天然气公司及联合国机构来寻求合作,已在多个区块与外国公司建立了煤层气合资或合作项目。尤其是在1998年6月29日美国总统克林顿访问我国时,中美两国共签订了总金额近20亿美元的7个重要经贸合作协议。其中中联煤层气有限责任公司与美国阿莫科公司、菲利普公司分别签订的煤层气勘探开发合作,勘探投资3500万美元,完全用于山西的河东煤川煤层气开发,这标志着我国煤层气的开发利用由小规模试验性勘探开发向大规模勘探开发转变。与美方签订的4个合同区,总面积约8700km²,预测资源量超过4400×10⁸m³。如果4个合同区都进入商业性生产阶段,按单井日产5000m³计算,年产煤层气可达30×10⁸m³,除供当地和太原外,还可以用管道输送到周边省市。

我国石油、煤炭、地矿系统和部分地方政府积极参与这项工作,许多国外公司也积极投资,在中国进行煤层气勘探试验。1990年以来,全国已有30多个含煤盆地进行煤层气勘探钻井,取得了一批储层测试参数和生产参数,在一些地区甚至获得工业气流。1996年国家经济贸易委员会修订《资源综合利用目录》,把煤层气开发和煤层气发电列入该目录。为了加快我国煤层气开发,国务院于1996年初批准成立了中联煤层气有限责任公司(简称中联公司)。“九五”和“十五”国家科技攻关都设立了煤层气研究和试验项目,同期国家发展计划委员会设立了“中国煤层气资源评价”国家一类地勘项目。为了推进煤层气的产业化进程,2002年国家973计划设立了“中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究”项目,从基础及应用基础理论的