

# 国外煤层气资源与开发概况

煤炭科学研究总院西安分院 沈襄鹏

煤层气主要是指煤层甲烷。过去普遍认为煤层甲烷是煤矿中一大灾害,近些年来,由于勘探开发技术的发展,人们已逐步认识到它是一种具有重大经济价值的天然气资源。由于煤层气储量大,勘查成本低,勘探风险小,现正得到国内外的广泛重视。目前,深入研究煤层气的生成,储集、产出能力,详细调查和估算资源量,不断改进和提高开发工艺,已成为各国能源机构共同关心的课题。

## 1 各国煤层气资源概况

目前世界探明煤地质储量为16~20万亿t,若以成煤作用中等的肥煤生气能力 $199\sim 230\text{ m}^3/\text{t}$ 计算,全世界可生成煤成气 $3\ 184\sim 4\ 600$ 万亿 $\text{m}^3$ 。若以煤远景储量计算,则全世界煤成气达 $9\ 950\sim 11\ 500$ 万亿 $\text{m}^3$ 。煤层气是煤成气的一部分,约占煤成气的3%~24%。

据《世界天然气报导》报道(1980),世界煤田中有利于开发的煤层气资源为:亚洲10.7万亿 $\text{m}^3$ ,欧洲0.9万亿 $\text{m}^3$ ,非洲0.3万亿 $\text{m}^3$ ,北美4.2万亿 $\text{m}^3$ 。此数据与后来各国估算的数据有些出入。

### 1.1 美国

美国大陆的煤层气是美国大陆上最大的天然气资源之一。美国(不包括阿拉斯加)煤炭资源总量为3.6万亿t,居世界第二。据美国能源部和天然气研究所最初估算,美国煤层气原始地层资源量为5.6~22.6万亿 $\text{m}^3$ ,其可采储量最高可达11.3万亿 $\text{m}^3$ 。按目前美国每年天然气消耗量5 604亿 $\text{m}^3$ 计算,可

满足全美20年的需求。

煤层气资源评价是建立在煤储量和甲烷含量基础上的,煤的甲烷含量不仅与煤化作用时甲烷生成条件有关,而且取决于煤层沉积后的地质史,包括煤级、温度、压力、热力场和大地构造条件等。全美脱气试验表明,煤的甲烷含量随煤级变化,一般低挥发分烟煤含量高,为 $13.43\text{ m}^3/\text{t}$ ,最高达 $28.32\text{ m}^3/\text{t}$ ;中挥发分烟煤为 $7.96\text{ m}^3/\text{t}$ ,高挥发分烟煤A、B、C含量低,分别为4.36、2.79和 $1.28\text{ m}^3/\text{t}$ 。在埋深914 m以上,煤层甲烷的平均含量为 $5.604\text{ m}^3/\text{t}$ ;在914~1 829 m为 $13.59\text{ m}^3/\text{t}$ 。

上述美国煤层气资源量初步估算是根据48个州粗略的煤炭资源量和更粗略的吨煤含甲烷量作出的,而且煤炭资源量主要以可采的或潜在可采的煤层为基础,没有注意收集埋深大于991 m的煤层或含煤地层的资料。

1979~1982年美国能源部开展了一项全国性调查计划——煤层甲烷回采计划(MRCP),对全美13个煤盆地61万 $\text{km}^2$ 的含煤地层,包括埋深超过1 829 m含煤地层的煤层气资源量进行了评价。这13个煤盆地的煤层气原始地层资源量为2.03~11.32万亿 $\text{m}^3$ 。后来,在天然气研究所资助下,GRVIC—列维因能源部通过某些盆地中经济上可回收煤层气的研究,对某些主要盆地的煤层气资源量作详细评价,将以前的估算值作了一些修正,但总资源量相差不大。

### 1.2 苏联

初步估计全苏煤成气资源为1000~5000万亿 $\text{m}^3$ ,其中煤层气为150~160万亿 $\text{m}^3$ 。

这是以深度浅于1800m、煤储量约10万亿t(其中可采煤层储量为8.6万亿t)计算的。还有人估计苏联煤田煤层气总量约1000~1500到2400~2500亿 $m^3$ ,这种评价是以煤变质作用中甲烷的形成量与排放到大气中的甲烷量的假定性概念为依据的。更精确地推算苏联主要烟煤与无烟煤煤田煤层中甲烷的容量,是根据煤田中按煤牌号计算的煤炭储量的分布,及含气性与煤变质程度、赋存深度间的定量关系。

根据单位煤中含有的甲烷量,将苏联主要煤田的煤分为三大类:低变质的(长焰煤、气煤)、中变质的(气肥煤到瘦煤)和高变质煤。各煤田各类煤层甲烷含量见表1。

表1 苏联各煤田各类煤中煤层甲烷含量( $m^3/t$ )

煤田	煤类		
	低变质	中变质	高变质
库兹涅茨	8~12	16~21	20~30
伯绍拉	10~15	23~28	20~30
顿涅茨	8~12	14~18	20~30
卡拉干达		18~23	

各种牌号煤的含甲烷量,在深度和水平上都有变化。煤田上部风化带中,长焰煤和气煤中甲烷含量小于 $1\sim 2 m^3/t$ ;肥煤和焦煤中小于 $3\sim 4 m^3/t$ ;贫煤和无烟煤中小于 $4\sim 6 m^3/t$ 。在甲烷带中,含气量随深度增加,800~1000m范围内含气量缓慢增加,1000~1500m深处含气量变化极小。在甲烷带中,煤层气含量随变质程度增高而迅速增加,从长焰煤的 $8\sim 10 m^3/t$ 以下,到高变质烟煤(贫煤)约 $30\sim 35 m^3/t$ 。直到低变质无烟煤达最大值,约 $40\sim 45 m^3/t$ 。高变质无烟煤(超无烟煤)则完全不同,含气量很低,为 $2\sim 5 m^3/t$ 。

根据这些变化规律,苏联库兹涅茨、卡

拉干达、伯绍拉、顿涅茨4个煤田,1800m深度以上煤层厚度超过0.5m的煤层中,按煤炭地质储量和标准储量两种方案完成的计算表明,共含有约15万亿 $m^3$ 的煤层气。

煤和相邻储集岩中甲烷的分布如下:在可采煤层中,集中与分散吸附的甲烷容量大约占30~50%;薄煤层(厚度小于0.5m)中约占20~30%;分散含碳物质中约占30~45%。据此可概略推算出苏联这4个主要煤田的全部含碳物质中蕴藏的甲烷总容量是:库兹涅茨约20~25万亿 $m^3$ ,伯绍拉约5~7万亿 $m^3$ ,顿涅茨与卡拉干达各约2~2.5万亿 $m^3$ 。

### 1.3 澳大利亚

由于煤层气资源的价值正在日益得到承认,澳大利亚也正在大量研究。以鲍恩盆地为例,几年前就在中、南部进行甲烷排放,估计某些地区每平方公里面积内藏有8500 $m^3$ 以上的可采气。北鲍恩盆地煤的储量巨大,很可能超过1000亿t,350m以上煤的推算储量在100亿t以上。根据埋深较浅的岩芯切块脱气求得煤的甲烷含量高达 $18 m^3/t$ ,估算北鲍恩盆地的总可采储量很可能超过2800亿 $m^3$ ,而且许多地区煤层厚、横向连续,煤级为中到低挥发分烟煤,镜质组反射率在1.2%以上,这些地区处在适于捕集大量煤层甲烷的深度范围内。

### 1.4 英国

英国国家煤炭局对英国煤层气含量进行了详细调查,并研究了控制煤层气形成和分布的地质因素。结果表明,煤层气含量随垂深增加,每百米的变化梯度为 $0.2\sim 1.4 m^3/t$ ,而且含量变化范围较大。在斯特福德郡南区和英格兰中部南区,煤层可能含气量为 $3 m^3/t$ 或更少;在英格兰中部东区已测得煤层气含量为 $9 m^3/t$ ;在兰卡郡南部和斯特福德郡北部,煤层气含量分别达 $11 m^3/t$ 和 $15 m^3/t$ ;西威尔士煤田透气性好的无烟煤

含气 $20\text{ m}^3/\text{t}$ 。为了研究方便还建立了煤层气含量数据库,库中贮存了从地表勘探孔煤芯样测定的4 000多个煤层气含量数据。

## 2 国外煤层气资源的开发

许多国家从矿井安全角度对可采煤层的瓦斯进行过研究,并抽放过矿井瓦斯。1987年,苏、英、中、法、捷、日、西德等国瓦斯抽放总量为52.57亿 $\text{m}^3$ 。把煤层气视为一种巨大资源并有计划地勘探、开发和利用是近几年才开始的,美国在这方面作了很多研究工作,并取得了很大成就。

### 2.1 美国煤层气资源勘查,开发状况

本世纪70年代初,美国矿业局开始研究美国东北部一些煤层甲烷的形成、贮存和泄出机理,但那时的目的侧重于甲烷对生产矿井通风的影响,试图减少煤矿的灾害。1973年随着“能源危机”的出现,美国能源部(以后又有能源研究开发署)发起了“非常规天然气开采”计划,1978年开始研究煤层甲烷的资源潜力,制订了从煤层中回收甲烷的项目(MRCP)。对13个煤盆地作了详细勘查,把高远景区的面积减少为104 674.5 $\text{km}^2$ 。目前已建立的全美最活跃的两个煤层气开发区是沃里尔和圣胡安盆地,还有5个正在开发的地区是:皮森斯、雷顿、中阿帕拉契亚、北阿帕拉契亚、西华盛顿盆地。

圣胡安盆地位于新墨西哥州西北部,科罗拉多州西南部,是一个椭圆形盆地,面积7 500 $\text{km}^2$ ,是美国第二大天然气盆地。在盆地已有的钻孔中,有14 000个钻孔进行了测井,研究程度很高。该盆地煤层埋深不大,约610~1 220 m,煤级从盆地边缘的次烟煤

A和高挥发分烟煤变化到盆地北部的低挥发分烟煤。煤层气产自上白垩统含煤的弗鲁特兰组和下面的皮克彻特克里夫斯砂岩。圣胡安盆地产煤层气历史悠久,有一口井在过去30年中生产了约2 832万 $\text{m}^3$ 天然气,现在每天仍能生产4 247 $\text{m}^3$ 的气。从弗鲁特兰组945 m深处,单井产量最高可达20万 $\text{m}^3/\text{d}$ 。弗鲁特兰组已开采煤层气1 050百万 $\text{m}^3$ ,下面皮克彻特克里夫斯砂岩已产气62 300百万 $\text{m}^3$ 。

圣胡安盆地1980~1988年开采煤层气的钻井数和年产量(近似值)见表2。煤层气主要产在盆地西北部,全部位于新墨西哥州境内,约占整个盆地面积20%~25%。

亚拉巴马州的沃里尔煤田,面积为90650 $\text{km}^2$ ,煤系为石炭纪宾夕法尼亚系,有近20层可采煤层。煤层气主要产自中石炭世波茨维尔组,煤级为中~低挥发分烟煤。甲烷含量超过14 $\text{m}^3/\text{t}$ 的煤有好几层,盆地深部贮有2 800亿 $\text{m}^3$ 甲烷,浅部代表性的钻孔产量为5 000~6 000 $\text{m}^3/\text{d}$ 。1980~1988年间沃里尔煤田生产井和产气量(近似值)见表3。美国天然气研究所在沃里尔煤田得到了从多煤层煤田中抽放煤层气的技术经验。

科罗拉多州的皮森斯盆地蕴藏着约占美国总蕴藏量四分之一的煤层气量,该煤田在研究深部煤层气的勘探和开采方法方面领先。最深的见气井深2 423 m,原始日产量11 328 $\text{m}^3$ ,但由于深度大,成本较高。

### 2.2 勘探、开采方法和增产措施

美国勘探煤层气的方法主要有两种:一是不断完善与采煤结合的用水平钻和垂直钻排放煤矿甲烷的方法。二是广泛应用常规气

表2 圣胡安盆地历年开采煤层气的钻井数和年产量

年 份	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
生产井数	4	6	30	65	95	124	164	200	360
年产气量(万 $\text{m}^3$ )	283	849	1 133	3 398	7 928	6 796	11 327	18 689	52 386

表3 沃里尔煤田历年开采煤层气钻井数和年产量

年份	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
生产井数	很少	30	80	110	200	270	315	420	470
年产气量(万m <sup>3</sup> )	0	566	5 663	11 327	19 822	25 485	36 812	48 139	55 634

田通用的垂直钻孔法。后者多用于勘探煤矿开采深度以下(主要是700~1 000m)的煤层气。此方法又包括裸眼和常规两种完井方法。裸眼完井,即钻进到煤层顶部时,便下生产套管并固井,然后用空气或者气雾钻进,打开煤层或煤与砂页岩互层,再视煤层节理发育情况,决定是否采用增产措施。常规完井,即钻进穿过含煤地层,再下生产套管,然后根据地球物理测井解释(密度、中子,伽马,声波、井径)对最有希望的地层射孔,并进行增产处理。

由于煤层甲烷中90%左右是以吸附状态赋存在煤层中的,除了裂隙发育且透气性强的煤层会自然地产出大量煤层气外,大多数煤层透气性差,渗透率低,必需采取人工措施。因此,抽放技术一直是煤层气工业发展的关键因素。美国经过长期摸索,到80年代初才在这方面有了重大进展。他们采用液压激发增产技术,在煤层中加砂压裂,用液体或氮泡沫作运载和支撑剂,具体有砂一水压裂,酸化砂水压裂、氮气泡沫压裂和凝胶液压裂等方法。

液压激发法能扩大煤中裂隙度,增加透气性,提高产气率。在圣胡安盆地,经人为激发的煤层得到了日产14 000~150 000m<sup>3</sup>的煤层气;沃里尔煤田在埋深不到600m,煤厚小于2m的煤层中,获得日产几十万立方英尺的煤层气。压裂改造后的煤层,既不破坏煤层顶底板的稳定性,对以后的采煤作业也没有影响。相反,通过抽放,降低了煤层中的甲烷量,保证了采煤的安全。如美国阿拉巴马州奥克格罗夫矿,1977年煤层含气量为14.2m<sup>3</sup>/t,抽放4年后到1981年降为

6.7m<sup>3</sup>/t,排放率为53%。到1988年,含气量降至3.8m<sup>3</sup>/t,排放率达73%。1988年全美煤层气产量为16亿m<sup>3</sup>,计划到1990年产气达100亿m<sup>3</sup>,1995年将达到400亿m<sup>3</sup>。

### 2.3 影响煤层气生产能力的地质因素

煤层既是煤层气的生成源,又是煤层气的储集层,所以,煤层的特征对煤层气生产能力的影响至关重要。影响煤层气产量的煤层特征参数是:煤级、煤厚、不均匀性、储气部位、含气量、压力、温度、气的比重、节理间距、孔隙率、扩散系数、压缩率、渗透性、水饱和度、可迁移的水量、透气性、吸附等温线、解吸压力等。这些数据可以从煤芯样、密封罐煤层气样及测井,井水测试等工作中获得。其中透气性、水饱和度、储集层压力和储气部位是煤层气生产的4个重要参数,它们还与埋藏深度及构造有关,也受沉积作用和成岩作用等许多地质因素影响。

理想的煤层储集层应具有以下条件:

- 煤层分布稳定,煤厚以中厚,即1.5m或更厚为好,单层厚度不小于0.6m。
- 生气潜力较好的煤级是部分高挥发分烟煤,全部中等和低挥发分烟煤,及部分半无烟煤,含气量大于8.51m<sup>3</sup>/t。
- 煤层埋深300~900m,上覆盖层厚度应超过300m,位于构造变动区。
- 煤层具有较发育的天然裂隙系统,裂隙密度大于1条/1.5m。

美国对煤层裂隙的研究十分重视,除露头 and 矿井下观察外,还应用定向岩芯,钻孔三维地震法(测定裂隙的方位角),水声阻抗测井法(测定裂隙的高度与宽度)、温度

测定法(测定裂隙高度)、伽马测井法(研究有效裂隙高度)、井底电视法(测定裂隙方位与宽度)进行深入研究。

#### 2.4 美国煤层气开发成本与投资

与常规的天然气相比,煤层气的储集层是板状的煤层,所以勘探的成功率高,达95%。美国天然气研究所对美国煤层气的前景持非常乐观的态度,1986年在煤层气研究上投资540万美元,1987年投资640万美元。

煤层气的效益。沃里尔煤田总投资215 000美元,10年累计产气量600万 $m^3$ ,产气成本为0.04美元/ $m^3$ 。圣胡安盆地总投资为158.1万美元,30年累计产气量218百万 $m^3$ ,成本为0.01美元/ $m^3$ 。

#### 2.5 美国煤层气研究机构和会议

目前,美国在煤层气地质资源勘查、基础理论研究、模拟开发生产、钻井设计施工等方面都在进行广泛深入地研究,也正在将已收集到的煤层气资源数据初步转化为可以进行鉴别与模拟开发的资料,以提高煤层气储量计算中的预测能力。能源部(DOE)和天然气研究所(GRI)继续合作进行一项煤层气研究项目,前者致力于资源储量与储气层可预测性和动态性能方面的研究;后者则着重于目前和今后需要的煤层气开采工艺的生产试验与生产潜力方面的研究,并编辑出版《煤层甲烷技术》季刊,交流开发技术。美国还有许多石油公司、钢铁公司也在从事煤层气的勘查开发工作。

美国有不少煤层气方面的专业会议,报道煤层气的开发状况,交流技术信息。如1985年美国“非常规天然气开采承包人”会议,介绍了美国东部地区煤层气开发情况。1986年美国石油工程师协会召开的“非常规天然气开发工艺”会议,有不少重要文章探讨煤层甲烷储集层特征及抽放技术。美国两年召开一次煤层气专题会。1987年专题会上介绍了美国东部石炭纪和东部白垩纪煤层气

地质情况、煤层气开发、利用及其经济评价。这次会议既探讨了煤层气的地质理论,又介绍了煤层气开发实用技术,较全面地反映了美国当前煤层气方面的科技状况。1989年专题会讨论了美国煤层气开发的战略部署,加速煤层气开发的经济因素,也探讨了储集层特征及影响煤层气生产率和赋存的地质因素;并建立了与煤层气生产和储集层储量计算有关的数学模型;介绍了各种煤层气井的水力激发、完井技术及煤层裂隙处理,提高煤层甲烷产量的技术;总结了美国和澳大利亚煤层气开发利用的经验。这次会议反映了美国煤层气开发利用的最新动态。

#### 2.6 其它国家煤层气研究开发状况

美国以外的其它国家也正在进行煤层气的抽放和开发工作。苏联通过煤层气资源的预测评价,已肯定它是重要的第二动力资源。但目前主要还是通过矿井抽放,以保证矿工劳动安全。在第十一个五年计划(1981~1985)期间,每年从井工开采煤层中释放出的瓦斯:顿涅茨煤田20~25亿 $m^3$ ,库兹涅茨煤田8~10亿 $m^3$ ,伯绍拉煤田5~6亿 $m^3$ (不包括从伴生煤层和岩石中释放出的瓦斯)。预计第十二个五年计划期间,井工开采高瓦斯含量煤层时,将释放出100亿 $m^3$ 的甲烷,再加上从伴生煤层和围岩中释放出的甲烷,预计每年释放的甲烷总量大约为200~250亿 $m^3$ 。如果矿井通过钻孔预先排放瓦斯,利用率为三分之一,即70~80亿 $m^3$ ,约相当于1 000万t标准燃料。

过去在澳大利亚鲍恩盆地中央施行的煤层气抽集计划并不十分成功,但证实了煤层中的确存在大量的气体。在毛拉附近的井中,经短期采集得到了高达2 300 $m^3/d$ 的流量;在黑水地区,经几个月的测试,从井中获得了日产570~1 400 $m^3$ 的气流。北鲍恩盆地二叠系的煤极其适于煤层气的抽集,煤层厚且横向分布连续,受构造活动的充分影响,有

# 显微组分的DTA及其与 油气生成的关系

中国科学院地球化学研究所 肖贤明

中国矿业大学北京研究生部 金奎勋

有机差热分析技术,到本世纪60年代开始用于干酪根的系统研究,为干酪根降解成油理论提供了许多有价值的依据。从实验方法上看,差热分析结果在很大程度上取决于实验条件〔1〕,尤其是介质环境。目前绝大多数研究都是在惰性气体条件下对煤或干酪根进行热重分析,在氧化条件下的差热分析目前主要应用于粘土或其它无机矿物的鉴定,对有机组分工作不多。为此,笔者选择在氧化条件下进行显微组分差热分析,试图探讨所获结构信息与油气生成间的关系。

## 1 实验方法

发育良好的裂缝及割理系统,且沿煤层倾向向下,煤层内含有大量甲烷。预计在600~1000m深度布井,开发井的钻进、完井和激发耗资不超过15万美元,8口井总投资约120万美元,每日可采气28000m<sup>3</sup>,每口井大约有2800万m<sup>3</sup>的可采气储量,井的生产寿命大致是20年,同一些常规天然气勘探项目相比,成本低的多。

### 煤层甲烷的利用

煤层甲烷有很大的潜在用途,一般天然气的发热量为1068BTU(英热量单位)/ft<sup>3</sup>,煤层甲烷的发热量为973~1059BTU/ft<sup>3</sup>。美国对有开发前景的地区,用地面打钻抽放或与井下抽放相结合的方式开采,有的立即与煤气公司的管道相接,直接供电厂发

物质在加热或冷却过程中发生化合、分解、脱水、升华、挥发和固体相转变,都会引起热焓的变化,差热分析正是以此为基础测定物质在加热过程中所体现的热效应,记录下的曲线即差热曲线(简称DTA)。本实验采用日本真空理公司制造的TGD-3000RH差热热重分析仪,仪器精度高,性能稳定,可同时获得在加热过程中的DTA曲线及其对应的热失重曲线。本次研究选择的实验条件如下:

样品:破碎到80目以下,称取5mg,进样前在80°C烘箱内恒温4h

介质:空气介质

电、联合企业中水的加热和建筑物中取暖、居民取暖和炊事。煤层甲烷是很好的化工原料,可用来制氨、尿素、肥料、炸药、甲醇等。30多年来,欧洲一些国家把煤层抽放的瓦斯广泛地用于煤矿的锅炉房、冶金、炼焦制造玻璃和制砖等,也用于选煤的烘干和生产合成材料等。将甲烷转变成压缩天然气、液化天然气、内燃机/甲烷混合气也可大大增加交通运输液体燃料储备。

总之,在世界天然油气资源日趋枯竭的今天,认识到煤层甲烷是未来的潜在能源,是有重大的现实意义和战略意义的。开发煤层气既能缓解能源紧缺,又能解除矿井危害,也有综合经济效益,所以是一个亟待深入研究和开发利用的新领域。