

深层致密砂岩气藏 勘探开发技术

李健 吴智勇 曾大乾 陈恭洋

石油工业出版社

前 言

世界天然气工业在近 10 年中发展迅速,天然气在世界一次能源构成中所占份额从 50 年代的 9.7% 已上升到了目前的 23.8%。^[1]同时,由于天然气的高效益和对环境的低污染、天然气工业内部结构的巨大发展和天然气工业管理结构的巨大变化,使得全球天然气的使用范围迅速扩展。对天然气需求的增长,本身综合体现了天然气在国家工业中能源工业的发现及天然气在能源工业中的诸多优越性,如天然气能以能源网的形式输送给用户、使用更加方便;天然气在燃烧过程中产生低的二氧化碳含量和对环境的低污染;天然发电技术的发展带来了更高效率、更低成本及更低幅射的能源应用过程。事实上,多样化的能源是多数国家的政治目标和经济发展的需要。同时,需求的增长影响着天然气的工业结构,其程度取决于生产、运输、销售这些新增天然气的总量以及使用这些新增天然气的消费类型。需求的增长、管理结构的变化以及勘探、开发、应用技术的进步,正全面支撑和刺激着天然气工业的发展。在一些发达国家,天然气工业正在成为面向市场、逐步走向成熟、高度集团化的工业,并且是高度发达的住宅、商业、工业、电力生产部门的重要能源。工业家和能源专家普遍认为,天然气将成为 21 世纪的全球能源。

在我国,天然气工业的起步较晚。新中国成立后,天然气勘探起步较早的是四川盆地,而全国范围的勘探则是近年的事。从 20 世纪 80 年代中期开始,随着勘探地区、领域的扩大和研究程度的深入,中国天然气储量迅速增长,1991~1995 年的 5 年中,探明储量翻了一番,达 $2.26 \times 10^8 \text{ m}^3$,相当于石油探明储量的 11.4%。1995 年全国天然气产量为 $174 \times 10^8 \text{ m}^3$,为同期石油产量当量的 11%。据近期的评估,中国天然气远景资源量约相当于石油资源量的一半,具有较大的发展潜力,未来 15~20 年将是中国天然气工业发展较快的时期。

然而,受地质发育历史和大地构造背景的控制,中国天然气资源主要分布在自然条件较差的地区,沙漠区、山区、黄土高原和海域占总资源量的 84%,而且埋藏深、储层物性普遍较差,中国陆上天然气资源中有 32.5% 分布在埋深 3 500~4 500 m 的地层中,有 24.8% 分布在埋深 4 500 m 以下的地层中。由于埋藏深,低渗透和超低渗透储层资源量占总资源量的 50%。

以上特点给中国天然气的勘探开发带来了极大的难度,是制约中国天然气工业快速发展的客观因素。

在我国,尽管天然气的资源形势仍较为严峻,但就天然气的资源类型而言,应当说不同成因特征天然气的类型较为丰富,尤其是在深层致密砂岩中赋存着巨量的天然气资源,且勘探程度较低,勘探潜力巨大,是我国今后一段时间天然气增产上储的重要领域。要推进我国天然气资源的有效开发利用和天然气工业的发展,跟上世界天然气发展的水平,就必须加强对占中国天然气资源量 50% 的深层致密砂岩天然气的勘探开发技术的研究。为此,开展对国外深层致密砂岩气藏勘探开发技术的调研,结合中国具体实际,总结一套适合我国地质特征的深层天然气勘探开发技术,在此基础上,充分发挥我国石油行业大规模集团化、高技术、强有力的人才、装备优势,提出一整套适应于我国天然气发展的有效战略和对策,也为油田的新一轮创业寻找新的机遇和途径,这是我们开展本研究的根本目的。

本书是在“东濮深层气勘探开发技术研究”科研项目的基础上总结、提炼而成的。通过对国外致密砂岩气藏的形成条件、地质特征、分布规律及其勘探发现现状的论述,可得出如下结论和认识:

1. 位于褶皱造山带和克拉通之间的前陆盆地深拗陷(深盆区)或盆地向斜轴部及其斜坡部位是致密砂岩气藏发育的最有利场所。长期稳定沉降的构造环境、巨厚碎屑沉积物的堆积(楔状体),海陆交互的多变沉积环境以及受构造—沉积作用控制的差异成岩作用等是形成致密砂岩气藏的重要因素。应当指出的是,除了前陆盆地外,在条件适宜的其他类型盆地中同样可以形成这类气藏。

2. 北美落基山地区含油气盆地中拥有丰富的油气资源,分别为美国和加拿大的重要油气产地。其

中致密砂岩含气领域(包括深盆气)是其一大特色。这类气藏以其产出地质背景特殊、储层致密、产量低、潜量可观、成藏和圈闭机理以及开采方法与常规气藏不同为特点。致密砂岩气已成为当今美国、加拿大天然气产量构成中相当重要而又不断增长的部分,同时也是其他国家的重要后备天然气资源。

3. 良好而丰富的气源岩是致密气藏形成的物质基础。海陆交互相的煤系地层是该类气藏的主要气源岩,煤层甲烷是其主要气源。气源岩与致密储层往往交互出现,所含有机质类型以Ⅲ型干酪根为主,有利于生气。

4. 储层致密、低孔渗和具有区域性平缓倾斜构造背景特点,是含气区呈大面积区域性分布主要原因,扩散作用是致密地层中天然气运移的主要方式。

5. 深盆区中的致密砂岩气藏(深盆气藏)既不是传统的水动力圈闭,也不是构造或其他常规类型的圈闭,属动态平衡圈闭,即天然气始终处于向上倾方向运移、散失,同时源岩又不断生成天然气给予补给的动态平衡状态之中。因此丰富的气源条件和活跃的生气作用是大型致密砂岩气藏得以形成和保持压力异常(高压)的基础条件。这类气藏往往与构造和地层圈闭无关。

6. 致密砂岩气藏具异常压力特征,即高于或低于区域静水压力,且两者具有共同的成因,都是由天然气热生成及其在致密储层中聚集所引起,而低压气藏是由高压气藏演变而来的。异常压力现象往往可作为判别致密砂岩气藏存在的一个重要标志。精确定异常压力边界位置及其形态可降低勘探风险,有利于异常压力天然气封隔体的发现。压力封隔体的意义在于每个封隔体都可能是一个潜在的含油气圈闭,可构成格架式或叠置式油气藏。

7. 致密砂岩气藏,虽然储量大、但产量低,一般需经过增产措施(水力压裂)才能获得工业性气流。因此,勘探中寻找孔渗性较好的有利储集相带和天然裂缝发育带即所谓的甜点,是提高这类气藏勘探成功率,降低成本的又一关键问题。

8. 开拓油气勘探思路,应针对不同盆地类型和盆地勘探的不同阶段采取相应的勘探策略。在具体实施中不应过于局限于某一圈闭,某一目的层,甚至某一地区,应特别关注那些认为无工业价值的低产层和低级别的含油气显示层。在钻井和完井过程中要特别注意保护致密储层。

9. 致密砂岩气藏虽然规模大、储量可观,但在目前经济技术条件下,其可采储量和生产能力都较低。因此采用和不断开发先进的勘探开发技术至关重要。广泛采用三维地震和 AVO 技术,提高和改进完井质量和水力压裂效果,适当采用水平钻井技术,运用先进测井方法,采用综合的检测天然裂缝方法和优化开发井网都有利于致密砂岩气藏的勘探与开发。

本书前言及第二、三、四章由吴智勇执笔,第六、八章由陈恭洋执笔,第一章由吴智勇、曾大乾执笔,第五章由陈恭洋、曾大乾执笔,第七章由曾大乾、史振勤执笔,全书统稿由李健完成。由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,望读者指正。

作者
2002 年 9 月

目 录

前 言	I
第一章 概 述	(1)
第二章 深层致密砂岩气藏的成藏机制	(12)
第一节 深层致密砂岩气藏的地质特征	(12)
第二节 深层致密砂岩气藏形成条件和圈闭机制	(17)
第三章 深盆地成藏机理	(38)
第一节 深盆地气藏的基本概念和主要特征	(38)
第二节 深盆地气藏形成机制	(42)
第四章 深层致密砂岩气藏的勘探技术	(51)
第一节 地震勘探新方法	(51)
第二节 综合岩石一测井标定技术	(61)
第三节 深盆地中的钻井工程	(81)
第四节 深盆地中的完井工艺	(87)
第五章 深层致密砂岩气藏描述	(90)
第一节 深层致密砂岩气田储层地质评价	(90)
第二节 致密砂岩气田储层评价新技术	(96)
第三节 致密砂岩储层地震横向预测与气藏识别	(110)
第六章 裂缝性储层描述与评价	(116)
第一节 概 述	(116)
第二节 裂缝探测方法	(118)
第三节 致密砂岩裂缝发育程度的综合评价	(126)
第四节 裂缝性储层的地震横向预测技术	(137)
第七章 深层气测井解释方法	(155)
第一节 气层测井识别方法	(155)
第二节 深层致密砂岩测井裂缝识别	(168)
第八章 主要含致密砂岩气盆地及其重要气藏	(180)
第一节 阿尔伯达盆地	(180)
第二节 美国落基山地区	(187)
第三节 鄂尔多斯盆地	(196)
主要参考文献	(204)

第一章 概述

一、二十一世纪世界能源将进入天然气时代

世界天然气工业在近 10 年中发展迅速,天然气在世界一次能源构成中所占份额从 20 世纪 50 年代的 9.7% 已上升到了目前的 23.8%。专家们普遍预测,21 世纪中叶将是以天然气为主的能源时代。

回顾和预测世界能源的发展可以发现,三种能源先后分别形成了三个高峰期:20 世纪 20 年代是煤炭的高峰期,其占能源百分比超过 70%;70 至 90 年代石油接替煤炭,石油占能源百分比为 30%~40%;到 21 世纪早期天然气将逐步替代石油,前者占能源百分比预测将超过 50%。Marchetti (1979) 编制了能源系统变迁和理论替代模式图,见图 1-1 所示。

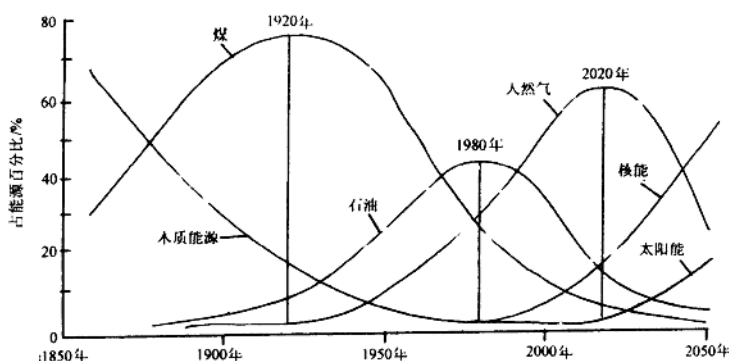


图 1-1 世界一次能源替代趋势图

20 世纪 70 年代后,世界石油产量上升缓慢,近 20 年来年产量一直在 30×10^{12} t 左右徘徊;而天然气产量却高速增长,1970~1996 年,从 1×10^{12} m³/a 上升到 2.34×10^{12} m³/a,年产量翻了一番还多,天然气剩余可采储量从 41.6×10^{12} m³ 上升到 150.24×10^{12} m³,增加了 3.6 倍。

按热值计算,天然气探明储量 1970 年和 1985 年分别相当于石油探明储量的 50% 和 80%,而到 1995 年则基本上与石油持平(见图 1-2)。

世界上丰富的天然气资源为天然气工业发展奠定了坚实的物质基础。据俄罗斯学者预测,世界常规天然气总资源量达 $400 \times 10^{12} \sim 600 \times 10^{12}$ m³,此外还有大量非常规天然气资源;目前天然气资源探明率还很低,天然气完全可以满足人类对能源的需求。

据美国《油气杂志》1997 年第 10 期报道:1996 年世界天然气总产量为 $23\,379 \times 10^8$ m³,其中居前 3 位的分别是原苏联($10\,118 \times 10^8$ m³)、美国($5\,664 \times 10^8$ m³)和加拿大($1\,836 \times 10^8$ m³)。我国当年产气量为 197×10^8 m³,列世界第 21 位。

由于天然气的高效益和对环境的低污染、天然气工业内部结构的巨大发展以及天然气工业管理结

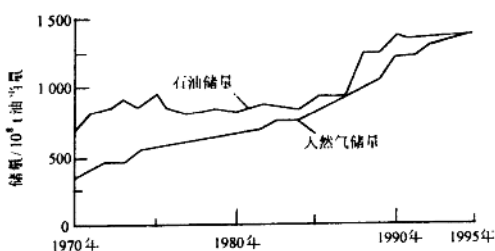


图 1-2 世界天然气和石油探明储量比较

构的巨大变化,使得全球天然气的使用范围迅速扩展。对天然气需求的增长,本身综合体现了天然气在国家工业中的地位及天然气在能源工业中的诸多优越性。如天然气基本能以能源网的形式输送给用户,使用更加方便;天然气在燃烧过程中产生低的二氧化碳含量(单位能量中天然气所产生的二氧化碳至少比煤少40%~50%)和对环境的低污染;天然气发电技术的发展带来了更高效率、更低成本及更低幅射的能源应用过程(循环气涡轮机和天然气的相合、供热和供电的相结合)。事实上,多样化的能源是多数国家的政治目标和经济发展的需要。同时,需求的增长影响着天然气的工业结构,影响程度的取决于生产、运输、销售这些新增天然气的总量以及使用这些新增天然气的消费类型。需求的增长、管理结构的变化以及勘探、开发、应用技术的进步,正全面支撑和刺激着天然气工业的发展。在一些发达国家,天然气工业正在成为面向市场、逐步走向成熟、高度集团化的工业,并且是高度发达的住宅、商业、工业、电力生产部门的重要能源。因此,工业家和能源专家普遍认为,天然气将成为21世纪的全球能源。

二、我国的天然气工业的现状

经过建国后50年的积累,尤其是近20年来的攻关研究和勘探开发实践,我国探明的天然气地质储量增长较快,而天然气开发利用和环境保护水平则仍处于发达国家的初期阶段。

1. 丰富的天然气资源基础

中国石油天然气集团公司(CNPC)和中国海洋石油总公司(CNOOC)曾两次进行了全国范围内的油气资源评价。第一轮(1990年)评价结果,天然气总资源量为 $33 \times 10^{12} \text{ m}^3$;第二轮(1995年)评价结果为 $38 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。两次相比,陆上天然气资源量变化不大,海域有较大幅度的增加。预计随着今后勘探和研究程度的加深,上述数字还会改写。

近年来的煤层气评价研究认为,我国各含煤盆地2000 m以浅含有 $25 \times 10^{12} \sim 30 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的煤层气资源量。建国50年来特别是最近4个“五年计划”的国家项目攻关、探索研究和实践,除形成了一整套包括地球构造动力系统与含油气盆地理论、天然气生成理论、现代地层学与天然气储盖层研究、天然气聚集理论和含油气系统与天然气分布规律及深盆气等在内的天然气地质理论、煤层气地质理论和相应的勘探开发工程技术外,还累计探明了 $2.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的天然气储量。近年来还控制了 $2000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的煤层气地质储量。“八五”以来的近10年间,我国探明天然气储量年均以 $1200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上的速度增长;年产量平均以10%以上的速度增长。目前,尚有剩余天然气可采储量1万多亿立方米未动用,为加快开发利用天然气资源奠定了资源基础。尽管如此,国内天然气可采资源量的探明率也只有13%左右,加上刚起步的煤层气资源。还有相当大的资源潜力可供开发,预计未来的10~20年间将是我国天然气储量快速增长的时期。

2. 天然气开发利用处于初级阶段

无论是开发还是利用天然气的环境和政策,尤其是应用市场机制配置资源方面,与发达国家比较,我国仍处于初级阶段。

我国人均拥有天然气产量不足 20 m^3 ,相对发达国家(如英国人均达 1300 m^3 以上)落后太多。这主要与资源开发程度、天然气储运等基础设施滞后和天然气消费构成不合理等因素有着直接的关系。以致于到目前为止,我国天然气消费量在一次能源消费结构中仅占2%左右。如除了化肥、化工用气外,作为能源消费的天然气只占2.1%(陈永武,2000)。

表1-1是目前我国与世界各地区及日本的天然气消费构成情况,表1-2是我国与世界主要国家和地区一次性能源消费构成情况。从表中数据可以看出,我国目前仍以煤炭作为主要能源,而天然气这种相对洁净的资源大多用在化工原料上,致使我国许多大中城市大气污染严重。

社会的发展和生产、生活文明程度的提高,要求天然气工业有较快的发展,以改善能源结构,保护大气环境。近年来,我国已逐渐认识到我国在天然气消费构成以及一次能源消费比例上失衡的现象,逐步加大了在天然气勘探、开发及利用等方面的研究,并已见到成效,我们完全可以预期,在未来的10~20年间我国的天然气工业会有一个跨跃式的发展,与世界发达国家天然气利用水平上的差距会明显缩小。

表 1-1 我国与世界各地及日本的天然气消费构成情况表

国家与地区	发电 /%	工业 /%	化工原料 /%	城市与商用 /%	占能源消费比例 /%
世界平均	26	43	5	26	23.2
北美	13	34	4	39	27.2
西欧	17	24	4	45	19.4
东欧	16	45	13	26	—
前苏联	36	44	4	16	50.9
中东	32	54	9	5	37.7
非洲	42	45	4	9	16.8
日本	70	29	1	—	11.2
东南亚	38	44	10	8	—
中国	15	16.8	50.8	17.4	2.1

表 1-2 1998 年有关国家和地区一次能源消费情况表

国家与地区	煤炭	石油	天然气	水电	核能
世界平均	26.2	40.0	23.8	2.7	7.4
美国	24.9	39.7	25.7	12.4	8.5
英国	17.9	35.4	35.1	0.3	11.3
前苏联	18.6	20.6	53.1	2.2	5.6
澳大利亚	44.5	36.3	17.8	1.4	—
印度	56.8	31.8	7.7	2.7	1.0
日本	17.7	51.1	12.5	1.9	16.8
亚太地区	43.9	38.9	10.1	2.0	5.3
中国	71.6	19.8	2.1	6.5	—

3. 我国天然气资源的分布与结构

受地质发育历史和大地构造背景的控制,中国的天然气资源基本上赋存于下述三大领域:①中上元古界和古生界以海相碳酸盐岩为主体的地层分布区,如四川盆地、鄂尔多斯盆地和中国南方碳酸盐岩分布区,还可能包括塔里木盆地的一部分,该领域内共拥有约占我国总量 35% 的天然气资源量;②各时代煤系地层分布区,如鄂尔多斯盆地(C—P)、华北盆地(C—P)、四川盆地川西南坳陷区(T₃)、楚雄盆地(T₃)、塔里木盆地库车坳陷区(J₁₊₂)、准噶尔盆地昌吉坳陷(J₁₊₂)、吐哈盆地台北坳陷(J₁₊₂)、东海盆地(E₂)、莺—琼盆地(E₃)等,该领域共拥有约占全国总量的 35% 的天然气资源量;③中生代陆相盆地,如松辽盆地、渤海湾盆地、南襄盆地、江汉盆地、珠江口盆地、北部湾盆地等,这些盆地以产油为主,所产天然气主要为石油伴生气,约占中国天然气总资源量的 20%。此外,中国的第四系尚有一定数量的生物气资源,主要分布在西部柴达木盆地及东部沿海地区。

中国约 90% 的天然气资源量集中分布于塔里木、四川、莺—琼、渤海湾、松辽、吐哈等盆地及南方碳酸盐岩区。专家们按照地区将其划分为四大含气区,即:中西部含气区、西北含气区、近海大陆架含气区和东部含气区。

综上所述,中国天然气资源具有如下特征:①资源分布和经济区不相协调,人口稠密、经济发达的东部地区拥有的天然气资源量不到 20%,而 69% 以上的资源量则分布在中、西部地区;②大部分资源量分布在自然条件较差的地区,沙漠区、山区、黄土高原和海域分别占总资源量的 26%、25%、12% 和 21%,共计 84%;③埋藏深、储层物性普遍较差,中国陆上天然气资源中有 32.5% 分布在埋深 3 500~4 500 m 的地层中,有 24.8% 分布在埋深 4 500 m 以下的地层中。深部天然气资源主要分布在塔里木、准噶尔、四川和鄂尔多斯等主要产气盆地。由于埋藏深,低渗透和超低渗透储层资源量占总资源量的 50%。

以上特点给中国天然气的勘探开发带来了极大的困难,是制约中国天然气工业快速发展的客观因素。

随着油气勘探领域的扩展和天然气成因理论研究,在相关研究方面取得了一些重要进展,也使得天

然气的成因和资源结构多样化。对生物成因气、生物-热催化过渡带气的成功勘探实践和对煤层气的成功勘探开发经验,使得各国在天然气资源的结构和资源量储备上多样化。

在我国,尽管天然气的资源形势仍较为严峻,但就天然气的资源类型而言,应当说不同成因特征天然气的类型较为丰富。然而,从天然气资源的结构来看,仍存在较明显的不均衡性。这种不均衡性主要体现在原油和油型气的相对比例、煤和煤型气的相对比例上。在大中型气田的资源类型中,除四川盆地的部分天然气可属油型气(以 I、II 型有机质的生气作用为主)外,其它气田的天然气主要与 III 型有机质(或煤系地层)的成气作用有关,如琼东南盆地 13-1 构造天然气、塔里木盆地库车凹陷依南 2 构造天然气、鄂尔多斯盆地天然气等。此外,在煤和煤层气(Coalbed Methane)资源的相对关系上,我国还处于起步阶段,这与我国具煤首富的称呼是极不相称的。

因此,对世界范围内天然气合理资源结构的充分认识可以使我国比较明确地规划我国天然气资源的勘探方向,将主要的精力投入在有效的天然气研究与生产中去。

4. 我国天然气勘探开发的技术现状

我国天然气资源的分布和天然气的成藏类型多且复杂,资源埋藏时代老、深度大、储层物性差、变化大。因此,根据我国的特殊情况,借鉴国外模式,建立针对不同天然气成藏领域的地质理论,提高勘探开发效益,就需要有与之相配套的技术体系,以适应复杂多变的地质和地面条件。

近年来,地震勘探在山地地震、黄土塬地震技术攻关,以及提高分辨率、多波勘探、AVO 技术、地震反演、模式识别直接找气等方面都取得了一定的成效,但还应该针对各地区的不同地质特点,进一步加以配套完善。现代钻井技术、水平井钻探和开采、凝析气田回注采气、储层改造,以及储气库和输气管网的合理配套等技术,有的已比较成熟,但相当部分仍处于起步阶段,尤其是气藏模拟技术和提高采收率等,还需要完善和综合配套。

5. 我国天然气的综合利用和工业化的发展

天然气的综合利用始终是我国天然气工业的一个薄弱环节,其发展与我国整个国民经济的发展状况有关,这里涉及到我国整个民族工业的发展水平问题。在进入新世纪和面临全球经济一体化发展趋势的今天,科学技术和经济市场也在逐渐趋于全球一体化,过去很多限制我们发展的经济和技术瓶颈在不断被突破,我国天然气工业大发展的机遇正在来临。

国外有大量成功的天然气综合利用的先例,有大量成功的综合技术。如 1997 年 6 月,智利首都圣地亚哥市利用新建成的“安第斯输气管道”,通过阿根廷的国家天然气输气系统的有关管线,开始接受来自 500km 以外,远在安第斯山脉南端的阿根廷内乌肯盆地的天然气,从而使智利跨入了全球 20 个近期决定将城市中心和工业基础“甲烷化”的国家之列。

近年来在天然气使用方面最显著的变化出现在亚太地区 and 南美洲地区,但天然气使用范围的扩展却是全球性的。更高效的燃气发电厂在这种扩展中发挥着主要作用。但是,需求、管理政策、内部发展和技术方面的变化趋势均对天然气工业的结构变化有贡献。从最广泛的意义上讲,这些都是全球性问题,跨越了国界甚至区域界限。当我们更仔细地观察需求增长或管理的变化是如何作为天然气工业重组的一种催化剂的时候,我们仍然可以发现区域和国家间的明显差别。

综上所述,作为准备投身于天然气工业的大型油田企业集团,在考虑其持续发展战略时,应站在世界范围内、区域范围内来考虑问题。对我国天然气工业的水平有一个明确的认识。在此基础上,充分发挥我国石油行业大规模集团化、高技术、强有力的人才、装备优势,提出一整套适应于我国天然气发展的有效战略和对策,同时也为油田的新一轮创业寻找新的机遇和途径。

三、我国天然气资源的巨大潜力

目前,我国天然气勘探和研究程度还不高,但是从地质条件分析,我国拥有巨大的天然气资源潜力(张文昭,1998)。

1. 存在众多的大型陆相盆地

巨厚的陆相沉积是“气源之本”,世界上的大气田都源于陆相沉积之中(如西西伯利亚特大含气区,

北海含气区等)。据原苏联维舍米尔斯基统计,世界气田储量陆相占 41%,海相占 16%。我国陆相大型盆地(面积逾 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$)有 10 个,面积累计达 $230 \times 10^4 \text{ km}^2$,是世界上拥有陆相大型盆地最多的国家之一。

从地质条件来类比,我国天然气的成藏条件仅次于原苏联和中东,超过美国,天然气勘探前景是十分乐观的(张文昭,1998)。

2. 我国煤系地层十分发育,煤炭资源丰富,煤成气、煤层气(煤层甲烷)形成的物质基础十分雄厚

据世界范围内初步统计,煤成气(含煤层气)储量占天然气储量的 50%~70%。世界上很多大气田都与煤系、煤层生气有关,如西西伯利亚气区、北海格罗宁根大气田等。据不完全统计,我国煤成气资源量为 $20 \times 10^{12} \sim 30 \times 10^{12} \text{ m}^3$,煤层气资源量达 $30 \times 10^{12} \sim 35 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

3. 我国断陷、拗陷盆地沉陷深、幅度大,有利于深层裂解气的形成

我国东部裂谷型盆地的基岩埋深为 8 000~10 000 m。中西部一些大型盆地如四川、陕甘宁、塔里木、准噶尔等盆地地质历史时期多次沉降、回返,湖盆深度都超过 10 000 m。从有机质热演化的阶段性和分带性观点来分析,盆地内至少一半生油一半生气,深层裂解气的广阔领域还未揭开,我国过成熟区沉积岩面积为 $163 \times 10^4 \text{ km}^2$,但勘探程度很低,因而深层天然气还有很大潜力。

4. 我国第四系湖相沉积、海相沉积分布广泛,有利于生物气的形成

柴达木盆地东部面积为 $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,第四系沉积厚度达 3 000 m,其中有近 1 600 m 良好的生气层段,已发现众多气田。南海西部(莺歌海)裂谷盆地第四系、第三系沉陷达万余米,其中第四系海相沉积厚度达 1 300 m,发育众多“泥底辟构造”,具有丰富的第四系天然气资源,已发现一批天然气田。这些地区勘探前景十分乐观。

此外,我国也具有形成大气田有利的地质条件。世界上大气田的形成主要具备了 4 大地质条件:一是盆地大,气源足;二是有巨厚稳定的盖层和保存条件;三是有大型的背斜圈闭,世界上背斜气田储量占总储量的 92%;四是有较稳定的储集层(但要求孔渗条件较低)。以上这些条件在我国广大领域中都是具备的。

另外,戴金星(1999)认为,我国目前资源评价获得天然气资源量 $38 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 或可采资源量 $10.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 是偏小的数据。理由是至少还有 1/3 沉积岩面积未进行资源评估;而且仅测算了常规天然气资源量(最后两次较权威性评价),而对煤层甲烷、深盆气、水溶气、气水合物、泥页岩气以及致密砂岩气等非常规天然气基本未进行系统评价。

在对众多资源评价结果进行综合分析的基础上,戴金星(1999)认为,我国常规天然气可采资源量为 $16.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$,非常规天然气资源量据不完全测算为 $(27 \sim 115) \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

由此可见,我国天然气勘探前景十分乐观,尤其是非常规天然气资源,仍有相当大的潜力。关德师等(1995)认为,我国致密砂岩气资源量约为 $12 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

四、深层致密砂岩气资源

在美国和加拿大等西方国家,通常把天然气藏划分为常规天然气藏和非常规天然气藏两大类,所谓非常规天然气藏是指其储集层和流体特性与一般气藏不同,用一般勘探与开采常规天然气藏的方法很难发现或有效地加以开发的一类气藏。这类气藏目前大概包括 8 种,即致密砂岩气、页岩气、煤成气、地压(超压)甲烷气、深源气、深盆气、水合气和二氧化碳气。

致密气砂层,是指地下含有天然气的、具较低孔隙度(一般小于 10%),高含水饱和度(大于 40%),而渗透率(小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)勉强能使天然气渗流的砂岩层。由于这类砂岩层往往处于深处或盆地的深部,所以习惯地在其前面冠以“深层”二字,称之为“深层致密砂岩气藏”。这是目前国外大力勘探及开采的一种非常规气资源,世界石油工业界从事这种致密砂岩气藏的勘探和生产已有 30 年以上,并发表了大量的文献资料,也发展了寻找和开采这种天然气的一系列技术,而处于领先地位的是美国和加拿大。

20 世纪 60 年代末、70 年代初,美国天然气工业储采比例失调。为了刺激研究单位和工业财团勘探

开发致密气的积极性,美国政府先后颁布了一系列的优惠经济政策。此外,政府还拨款资助致密含气盆地的勘探、研究和开发工作。为了加强对致密气勘探开发的指导和协调,于1976年成立了半官方的“天然气研究所”(GRI)和“燃料气工艺研究院”(IGT),分别统一筹划全国致密天然气的勘探、研究和开采项目。

经过20余年的努力,致密砂岩气已成为美国天然气资源中一种日趋重要的组成部分。美国国家石油委员会(NPC)在1978~1980年进行全国致密气普查后所做的报告中提到,在美国本土48个州识别出了113个天然气盆地,到1982年,发现有致密气藏的盆地有23个。

据美国国家石油委员会1980年估计,美国致密气可采储量为 $190 \times 10^{12} \sim 570 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ 。1978年10月列文联合公司给能源部的一份报告中,估计整个西部致密含气盆地含气面积为 $37\,351 \text{ mi}^2$,天然气总储量为 $423 \times 10^{12} \text{ ft}^3$,工艺可采储量为 $211.4 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ 。1980年美国能源部的估计稍有不同,它估计美国致密砂层中的天然气储量为 $400 \times 10^{12} \sim 1\,000 \times 10^{12} \text{ ft}^3$,另外,在低渗透的页岩和煤层中,还有 $300 \times 10^{12} \sim 2\,700 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ 天然气储量。

最近,美国地质调查所和能源部莫干唐能源技术中心,根据最新研究成果和多井试验工程(MWX)的资料,分别对大绿河盆地和皮申斯盆地天然气资源重新做了估计。调查表明,仅在科罗拉多州西部的皮申斯盆地,致密砂岩气的地质储量达 $420 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ 。而据1988年报道,在怀俄明州的大绿河盆地(面积为 $51\,000 \text{ km}^2$,沉积岩厚度为 $3\,048 \text{ m}$),致密气储量可能达到 $4\,970 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ 。这不但大大高于1978年和1980年所做的估计值,而且还说明,仅在一个盆地内致密砂岩气的储量有时也是极其巨大的。

1984年8月,美国联邦能源管理委员会(FERC)确定了全国171个致密气区,除阿拉斯加州外,其余142个(主要为气砂层)位于科罗拉多、怀俄明、犹他、新墨西哥、得克萨斯和路易斯安那6个州。

加拿大的致密天然气主要储集在西加拿大盆地的深盆部分,又称深盆气。这是位于克拉通边缘向斜盆地轴部或弧状凸起的倾没端底部发现的天然气资源。1980年有人估算在西加拿大盆地的深盆部分,就可能找到 $500 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ 的致密气地质储量;1984年则估计为 $1\,500 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ 。

世界范围内致密气层的天然气储量有多少?关于这一点报道的不多。1985年有学者估计全世界致密气砂层因天然气可采储量(按孔隙度小于10%,渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 计算)约为 $3\,500 \times 10^{12} \text{ ft}^3$,仅为地质储量的一小部分。

致密气田发现率很高。在1975年,美国有175个致密砂岩气藏,到1982年,增加到665个,7年增加了2.75倍。已探明的致密砂岩气可采储量为 $29 \times 10^{12} \text{ ft}^3$,至1986年已采出可采储量一半以上,多余可采储量为 $13.7 \times 10^{12} \text{ ft}^3$,占全美非伴生气可采储量的9.3%,占美国天然气总可采储量的6.8%。致密砂岩气的最终采收率一般为50%,致密透镜体为47.2%,致密层状气藏为71.3%。

据统计,1970年美国开采致密砂岩气的总产气量为 $0.8 \times 10^{12} \text{ ft}^3$,1981年增加为 $15 \times 10^{12} \text{ ft}^3$,使致密气产量占非伴生气产量的比重由4.6%上升到94%。据估计,到2000年其产量为 $8.3 \times 10^{12} \text{ ft}^3$,占美国国内天然气供给量的三分之一,到2020年,产量将增至 $14 \times 10^{12} \text{ ft}^3$,即占当时国内天然气供给量的二分之一。

至于勘探和开发致密层天然气的经济效益,就美国而言,可能不比常规天然气藏的勘探与开发的经济效益差。这是因为:

(1)近年来致密层天然气的勘探(由于仍处于早期阶段)成功率很高,平均达到43%,有的达50%、60%或更高,而常规天然气的勘探成功率一般还不到20%。深层天然气勘探成功率更高,平均在50%以上。

(2)大气田的发现率,致密气田高于常规气田1.5倍;

(3)随着勘探与开发技术的突破,致密气藏的勘探与开发风险程度会大大降低,加之实行价格刺激政策,致密气藏的净现值也会大大提高并接近常规气藏的净现值。

中国大陆在印支运动基本拼合后,陆内构造相当活跃,许多盆地在早、中期生烃建造后,往往持续或急剧下沉,深部砂岩普遍致密化且程度很高。这种复杂的大地构造背景,使中国的天然气勘探和开发的对象更多地是深层致密砂岩气藏。

据 1994 年完成的中国油气资源第二轮评价结果,预测我国常规天然气资源量为 $38 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中埋深小于 3 500 m 的天然气资源量占 43% ($16.34 \times 10^{12} \text{ m}^3$),埋深大于 3 500 m 的天然气资源量占 57% ($21.66 \times 10^{12} \text{ m}^3$)。后者中陆上占 $17.11 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (见表 1-3),海域占 $4.55 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。在陆上深层赋存的 $17.11 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 天然气资源量中,主要集中在我国中、西部地区,其中中部地区为 $631 \times 10^{12} \text{ m}^3$,西部地区为 $8.14 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (塔里木盆地、准噶尔盆地、柴达木盆地、吐哈盆地)。除上述地区外,松辽盆地、渤海湾盆地、南海莺琼盆地地下第三系、东海盆地的下第三系都有深层天然气资源分布。

表 1-3 中国陆上天然气资源量与埋深的关系(据康竹林,2000)

地区	埋 深							
	小于 2 000 m		2 000~3 500 m		3 500~4 500 m		大于 4 500 m	
	资源量 / 10^{12} m^3	所占百分比 /%	资源量 / 10^{12} m^3	所占百分比 /%	资源量 / 10^{12} m^3	所占百分比 /%	资源量 / 10^{12} m^3	所占百分比 /%
东部区	1.12	26.1	2.36	55.0	0.74	17.3	0.07	1.6
中部区			5.23	45.3	5.03	43.6	1.28	11.1
西部区	0.6	5.6	2.03	18.8	3.03	28.2	5.11	47.4
南方区	0.89	27.1	0.55	16.7	0.9	27.3	0.95	28.9
合计	2.61	8.7	10.17	34.0	9.7	32.5	7.41	24.8

结合中国的石油地质特点分析,致密砂岩天然气在中国有以下两种赋存形式。

1) 一般的致密砂岩天然气藏

这种气藏的形成机理与常规天然气藏基本一样,只是其储层低孔低渗难以开采。对这类气藏关键在于提高勘探技术方法,尽早达到经济开采的技术标准,才能大规模地动用这部分资源。

2) 特殊的致密砂岩天然气藏——深盆气藏

深盆气藏是 70 年代在北美建立起来的一种新概念,与一般的气藏相比,深盆气藏有几个独特之处:

- (1) 这种气藏常位于前陆盆地地陷深部;
- (2) 深盆气藏上倾方向气水关系倒置,下倾方向无底水;
- (3) 深盆气藏的气源往往与煤系地层有关,而且气源补给十分充足;
- (4) 深盆气藏虽然是一种致密砂岩气藏,但在其范围内局部发育有常规孔渗发育带,通过寻找这一常规孔渗发育带,使其在目前技术水平条件下具有工业开采价值;
- (5) 深盆气藏多发育在前陆盆地巨厚的碎屑岩系中,因此其规模和储量均较巨大。

中国许多盆地如陕甘宁盆地上古生界致密砂岩深盆气藏,近年来不断有重大发现,其远景储量可达 $(0.5 \times 10^{12} \sim 1 \times 10^{12} \text{ m}^3)$ 。四川、准噶尔、塔里木、南华北等盆地,从盆地构造特征分析,均可能具备深盆气藏的形成条件。因此,中国深盆气资源是值得认真研究和勘探的一种后备资源。

五、国内外致密砂岩气藏勘探开发概况

通常人们习惯上把天然气藏区分为常规天然气藏和非常规天然气藏两大类。所谓非常规气藏是指其储层和流体特征与一般常规气藏不同,并且采用勘探和开发常规气藏的方法很难予以发现或有效地加以开采的一类气藏。这类气藏大致有:致密砂岩气(包括深盆地)、页岩气、煤层气、水溶气、深源气、天然气水合物和二氧化碳气等。有人则把地压(高压)甲烷气、深盆气单独列为非常规气藏的一种。

随着世界对天然气资源量需求的不断增加和常规天然气储量的日益减少,很多国家都把非常规天然气作为重要的后备资源而倍加关注。由于经济技术条件的日臻成熟,有的非常规天然气(如致密砂岩气、页岩气、煤层气等)在一些国家(如美国、加拿大)已进行了大规模的开发,并获得了可观的经济和社会效益。

研究表明,近年来,美国和加拿大增长最快的供气源是非常规天然气,并且主要是由于致密砂岩气、煤层气和页岩气的开发。其中致密砂岩气又是非常规天然气资源中勘探开发最为成熟的气源。如美国非常规气产量 1970 年为 $1 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ ($283 \times 10^8 \text{ m}^3$),至 1997 年增加到 $4 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ ($1.132 \times 10^9 \text{ m}^3$),这种

适度的增长主要是扩大了致密砂岩气和煤层甲烷的开发。

据估算,目前世界上非常规天然气资源量尚有 $800 \times 10^{12} \sim 1000 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 处于尚未全面开发阶段,其中致密砂岩气的资源量为 $75 \times 10^{12} \sim 100 \times 10^{12} \text{ m}^3$,在非常规天然气中位居第二(第一位是天然气水合物)。而现今技术上可开采的致密砂岩气储量为 $10.5 \times 10^{12} \sim 24.0 \times 10^{12} \text{ m}^3$,则居非常规天然气之冠,因此这类气藏是 21 世纪最有希望而又最现实的重要能源。

低渗透(致密)气层通常是指地层原始渗透率(不包括裂缝渗透率)低于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的含气岩层,这种含气层几乎可存在于所有的含油气区。其岩石类型包括砂岩、粉砂岩、页岩、碳酸盐岩、白云岩和白垩。致密含气层的厚度和分布范围变化很大,并且与聚集在构造或地层圈闭中的常规气藏不同,致密储层中的天然气往往呈区域性广泛聚集。这类气藏通常具异常压力,且与构造和地层圈闭关系不大。开采致密储层中的天然气一般都需要采取诸如水力压裂之类的增产措施,除非产层中发育有大量的天然裂缝。

虽然致密含气砂岩层在世界上很多含油气盆地都有分布,但目前对这种资源进行卓有成效地加以开发利用的,主要局限在美国、加拿大等为数不多的几个国家,因此本书的资料主要来自北美。

1. 美国致密砂岩气藏勘探与开发

在 20 世纪 60~70 年代,美国的天然气工业储采比严重失调,产气量的增长速度高于储量的增长速度。另外,其时全球又处于能源危机,油气价格急剧上升,美国政府基于政治、经济和战略上的需要,开始重视勘探和开发致密砂岩天然气藏,并且相应地采取了一系列经济技术上的优惠和扶植政策。特别是 1973 年石油禁运以后,美国为储备能源和寻求新的能源,由能源部发起了一项针对美国致密气藏的综合研究工作。在能源部的支持下,美国地调局先后在落基山地区和得克萨斯州墨西哥湾沿岸开展了地质研究工作。此外,加拿大的 Hunter 公司和地调局对加拿大和美国的致密含气储层也进行了广泛的调查工作,并且在工艺技术上进行了新技术、新方法的多种试验,正是通过这些研究和试验,一方面加深了人们对致密储层中气藏的认识,同时也促进了对这类天然气资源的勘探开发工作。

20 多年前,大规模的水力压裂增产措施在致密砂岩气藏中获得成功,进一步开创了美国致密砂岩这一含气领域的新局面。该项工作,在美国最早始于阿巴拉契亚盆地和圣胡安盆地,随后扩展到落基山地区的主要含油气盆地,90 年代中期又扩大到得克萨斯州和中陆区。经过 30 多年的努力,致密砂岩气已是美国目前天然气产量构成中相当重要而又不断增长的部分。

在美国的实际生产中,将孔隙度低(一般小于 10%),含水饱和度高(大于 40%),渗透率小于 $0.1 \times 10^{-4} \mu\text{m}^2$ 的含气砂岩作为致密含气砂岩储层。这个限量标准目前在美国已得到广泛的认同。

美国本土现有含气盆地 113 个,其中发现具有致密砂岩气藏的盆地 23 个(图 1-3),主要分布在西部,特别是落基山地区。在 20 世纪 70 年代中期到 80 年代初,致密砂岩气藏的勘探成功率较高,平均达到 43%,有的高达 60%以上(表 1-4),而常规天然气藏勘探成功率一般不到 20%。据有的学者估算,致密气藏的最终采收率一般可达到 50%,透镜状砂岩气藏采收率为 47.2%,比常规气藏的采收率(一般为 60%~80%)低,但目前远未达到这个比率。

表 1-4 美国一些致密砂岩含气盆地的勘探成功率(探井成功率)

年份	盆 地				
	大绿河盆地/%	北部大平原/%	皮申斯盆地/%	犹因塔盆地/%	加权平均值/%
1977	39	28	23	30	33
1978	46	18	36	67	32
1979	38	29	63	17	34
1980	44	29	67	83	42
1981	38	36	75	100	43

从 70 年代到 80 年代末,美国不少能源机构、地质部门和学者对美国致密储层中的天然气地质资源量进行了测算(表 1-5)。从表中可见,尽管人们对这类天然气资源量的估算值各不相同,但他们的计

算结果都一致表明,其潜在的资源量是巨大的。估算出现较大的差异,主要是由于各部门对该类气藏的研究程度不同,估算方法和所采用的参数不同以及参与评价的盆地数、产层数和气井数的差异。各家的计算表明,美国致密储层中的天然气资源量至少有 $420 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ ($11.9 \times 10^{12} \text{ m}^3$),并可能超过 $5\,000 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ ($141 \times 10^{12} \text{ m}^3$),其中可采资源量从 $200 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ ($5.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$)到超过 $550 \times 10^{12} \text{ ft}^3$ ($15.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$)。

表 1-5 美国致密储层中天然气地质储量估算值对比表

盆地	联邦动力委员会 (1973)	联邦能源管理 委员会(1978)	Kuuskraa 等 (1978)	全国石油委员 会(1980)	美国地质调查 局(1987,1989)	列文合作公司 (1990)
北部大平原/威利斯顿	~	130(3.6)	74(2.0)	148(4.0)		
大绿河	240(7.0)	240(7.0)	91(2.6)	136(3.8)	5063(143.3)	
犹因塔	207(6.0)	210(6.0)	50(1.4)	20(0.6)		
皮申斯	149(4.0)	150(4.0)	36(1.0)	49(1.4)	423(11.9)	287(8.0)
温德河			3(0.08)	34(1.0)		
大角			24(0.7)			
道格拉斯河		3(0.08)				
丹佛		19(0.5)	13(0.4)			
圣胡安		63(1.8)	15(0.4)	3(0.1)		17(0.5)
奥左纳				1(0.03)		
索诺位			24(0.7)	4(0.1)		
爱德华莱姆				14(0.4)		
甜棉谷			53(1.5)	22(0.6)		31(0.87)
酸棉谷			14(0.4)			
沃希托			5(0.15)			
其它				481(13.6)		
总计	569(16.8)	793(22.4)	411(11.6)	925(26.2)	5486(155.3)	335(9.5)

注:表中数字单位为 Tcf,括号内的为($\times 10^{12} \text{ m}^3$)。~表示未估算,据国家石油委员会(1992)修改



图 1-3 美国含致密砂岩气盆地分布示意图

1. 北部大平原 2. 蛇河地陷 3. 大角盆地 4. 风河盆地 5. 瓦萨奇高原 6. 道格拉斯溪隆起 7. 丹佛盆地 8. 圣胡安盆地
9. 拉通盆地 10. 阿纳达科盆地 11. 阿科马盆地 12. 奥契塔山区 13. 瓦尔维德盆地 14. 福特沃德盆地 15. 西部海湾盆地
16. 棉花谷盆地 17. 大绿河盆地 18. 犹因塔盆地 19. 皮申斯盆地 20. 密执安盆地 21. 阿巴拉契亚盆地 22. 伊利诺斯盆地
23. 黑勇士盆地

据美国地调所和全国石油委员会 1995 年的统计和研究,1994 年美国致密砂岩天然气产量达到 2.5

$\times 10^{12} \text{ ft}^3 (707.5 \times 10^8 \text{ m}^3)$ (表 1-6) 占当年总产气量的 14% (1975 年为 $283 \times 10^8 \text{ m}^3$), 有 120 000 口井从致密砂岩中生产天然气 (表 1-7), 占美国天然气生产井的三分之一以上。致密砂岩气的证实储量也从 1992 年的 $31 \times 10^{12} \text{ ft}^3 (8\,773 \times 10^8 \text{ m}^3)$ 增加到 1994 年的 $33 \times 10^{12} \text{ ft}^3 (9\,339 \times 10^8 \text{ m}^3)$ (表 1-8), 有效地弥补了美国常规天然气储量的递减。

表 1-6 美国致密砂岩气产量 ($\times 10^8 \text{ ft}^3/\text{a}$)

盆 地	1992 年	1993 年	1994 年
阿巴拉契亚	4 190	3 960	3 960
圣胡安*	3 210	3 500	3 420
落基山地区	4 340	5 390	6 270
其它	11 770	11 950	11 270
累计	23 510	2 480	24 920

* 很多文献将圣胡安盆地列入落基山地区。本文也遵循这一惯例, 但表 1-6, 7, 8 仍按原文单独列出, 未加变动—编者注。

表 1-7 致密砂岩气生产井 (口)

盆 地	1992 年	1993 年	1994 年
阿巴拉契亚	91 040	85 790	86 080
圣胡安*	8 270	8 330	8 310
落基山地区	8 950	9 660	10 650
其它	15 590	16 120	17 140
累计	123 850	119 900	122 240

表 1-8 美国致密砂岩气证实储量 ($\times 10^{12} \text{ ft}^3$)

盆 地	1992 年	1993 年	1994 年
阿巴拉契亚	4.440	4.580	5.040
圣胡安*	7.840	7.660	7.640
落基山地区	8.570	9.890	11.240
其它	10.200	9.740	9.360
累计	31.050	31.870	33.100

目前美国开发致密砂岩气的主要盆地是落基山地区的大绿河盆地、丹佛盆地、圣胡安盆地、皮申斯盆地、粉河盆地、犹因他盆地, 另外还有阿巴拉契亚盆地、阿纳达科盆地等。许多大的勘探开发公司如 Amoco、Chevron 和 Texaco 公司以及一些独立经营者都参与了致密砂岩气藏的勘探和开发工作。

2. 加拿大致密砂岩气藏的勘探与开发

加拿大的致密砂岩天然气主要储集在阿尔伯达盆地的深盆部分, 故又称为深盆气, 这是发现于克拉通盆地边缘向斜轴部的天然气资源。将深盆气作为一种特殊的天然气藏类型进行勘探和开发始于 20 世纪 70 年代埃尔姆沃斯气田的发现。在此之前, 曾有近百口井在目前气田的范围内穿过了白垩系的含气层, 由于当时主要勘探目的层是密西西比系, 加之气层压力较低, 岩性致密以及钻井过程中对储层造成的伤害, 所以较长一个时期以来深盆气没有得以发现。

加拿大石油公司总裁 J. A. Masters 经过对阿尔伯达盆地有关资料的分析研究并与美国落基山地区圣胡安等盆地进行类比, 认为阿尔伯达盆地深部 (深盆区) 可能是一个巨大的天然气聚集区。按 Masters 的理论, 根据对测井资料的重新标定和解释以及地球化学等成果的应用, 于 1976 年在阿尔伯达盆地西部的埃尔姆沃斯成功地获得了第一口工业气井, 从而揭开了深盆气研究的新局面, 同时也开辟了一个新的含油气领域。随后霍德利气田、牛奶河气田的发现进一步肯定了该盆地深盆区的含油气远景, 最终导致了特大深盆气田的发现。Masters 通过对埃尔姆沃斯、圣胡安、牛奶河等气田的对比研究和分析, 提出了深盆气藏的基本理论。

1980 年, 有人估算阿尔伯达盆地深盆部分可找到 $500 \times 10^{12} \text{ ft}^3 (14.16 \times 10^{12} \text{ m}^3)$ 致密天然气地质储量。1984 年据 Masters 重新计算的深盆地区原始地质储量为 $1500 \times 10^{12} \text{ ft}^3 (42.48 \times 10^{12} \text{ m}^3)$, 即每平

方公里天然气储量达到 $7.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中北部埃尔姆沃斯地区的天然气资源量为 $22.64 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。1983 年根据近 2000 口新井资料，重新确定的深盆区面积为 64 000 km^2 (见图 1-4)。深盆区不但拥有加拿大第一大气田埃尔姆沃斯气田 (该气田面积 12 950 km^2)，而且目前加拿大的前三大气田 (埃尔姆沃斯、牛奶河、霍得利) 都位于该盆地的向斜部位并且都为深盆气藏类型，各自都拥有丰富的天然气储量 (表 1-9)。

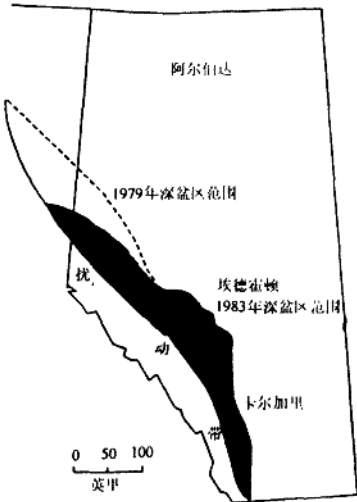


图 1-4 阿尔伯达盆地深盆区含气范围

表 1-9 阿尔伯达盆地三大气田的天然气储量

气田	埃尔姆沃斯	牛奶河	霍得利
储量	可采储量： $4\,800 \times 10^8 \text{ m}^3$	地质储量： $2\,584 \times 10^8 \text{ m}^3$	可采储量： 气 $1\,690 \sim 1\,980 \times 10^8 \text{ m}^3$ 凝析油 0.48~0.55 亿吨

第二章 深层致密砂岩气藏的成藏机制

第一节 深层致密砂岩气藏的地质特征

一、深层致密砂岩气藏的界定

美国能源部“1973年天然气技术工作要点”规定,被确定为致密气层且又可作为资源而进行开采的标准是:

- (1)为低渗透含气储集层,用现有技术无法进行工业性开采,无法获得具工业规模可采储量;
- (2)含气砂层有效厚度至少有 100 ft,含水饱和度必须低于 65%,孔隙度为 5%~15%;
- (3)目的层埋深为 5 000~15 000 ft(1 500~4 500 m±);
- (4)产层总厚度中至少有 15%为有效厚度;
- (5)供勘探的储集层面积至少有 12 km²(12 平方英里);
- (6)储集层在边远地区(当时考虑到要使用核爆炸压裂法,因此要远离居民稠密区);
- (7)产气砂层不与高渗透含水层交互。

为了便于经济分析和制定研究、勘探和开发计划,美国能源部又作了如下规定:

(1)主要储层的原始平均地层气渗透率大于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的为一般性气藏, $1.0 \times 10^{-3} \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的为近于致密气藏; $0.1 \times 10^{-3} \sim 0.005 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为标准致密气藏; $0.005 \times 10^{-3} \sim 0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的为甚致密气藏; $0.001 \times 10^{-3} \sim 0.0001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的为超致密气藏。

(2)气藏的埋藏深度在 4 000 ft 以上的为浅层, 4 000~10 000 ft 的为中深层, 10 000 ft 以下的为深层。

(3)由于储层的不连续性,按照几何形态则分为层状(席状)和透镜状储层两类。

(4)有的学者又根据地质和工程参数进一步细分为滨海层状储层、深层透镜状储层和浅层层状储层。

根据以上规定,美国将其致密天然气盆地分成 5 类:

- (1)西部致密天然气盆地:包括大绿河盆地、皮申斯盆地、尤因塔盆地等;
- (2)浅层气藏:威利斯顿盆地、北部大平原地区;
- (3)其它致密透镜体砂岩储气层:索诺拉、道格拉斯小溪隆起、大角盆地;
- (4)致密层状砂岩储气层:如丹佛、圣胡安、风河、棉花谷等盆地和奥契塔山区;
- (5)其它低渗透储气层:如棉花谷构造带的布鲁克内一斯马克欧沃层。

二、致密砂岩气藏的地质特征

1. 一般的致密砂岩油气层的地质特点

为了更准确地掌握深层致密砂岩气藏的特殊地质特征,有必要先了解一般致密砂岩油气藏的特点。用渗透率作为表达致密油气层的属性是简明而必要的。然而,从地质成因和渗流观点上揭示低渗透油气层的特征则更加重要。一般认为,低渗透油气层的地质特征有 5 方面(杨俊杰,1993)。

(1)成岩后生作用强烈,次生孔隙占重要地位

低渗透砂岩油气层具有沉积成熟度低、成岩成熟度高的特点。由于其沉积成熟度低,往往是颗粒混杂、极不均质;由于其成岩成熟度高,往往是压实强烈、后生作用明显,原始粒间孔急剧降低。

砂岩的次生孔隙发生于成岩后期,它们与造岩矿物及地层水化学成分有直接果关系。大量的研究

工作表明,低渗透碎屑岩的次生孔隙约占 $1/3 \sim 1/2$ 。其中以浊沸石、长石和碳酸盐矿物的次生溶孔最为常见,特别是浊沸石次生孔隙引起了越来越多的石油地质学家的注意。

沸石相的经典论著见于库姆斯(Coombs, 1954)对新西兰埋藏蚀变序列的研究,他认为浊沸石相既可以是成岩作用与变质作用的桥梁,也可以是海水与沉积物界面处的产物。并且明确指出:致密层使片沸石在浊沸石带中得以保存,而高渗透层中的片沸石则随其埋藏变浅而消失。这就为沸石的次生溶蚀提供了依据。

R. C. 苏达姆和 J. R. 博尔斯对岩浆岩屑砂岩的成岩作用作过广泛的研究,在分析了全世界范围内的片沸石、浊沸石、葡萄石后认为,从长石到浊沸石无需大量物质迁移,因为二者的元素组成十分近似。

E. D. 皮特曼认为:由长石或交代长石的碳酸盐溶解而成的孔隙,普遍存在于全世界各时代的砂岩中,怀俄明州溪壁次生砂岩(Second Wall Creek Sandstone)的孔隙度为 $15.4\% \sim 23.3\%$,渗透率为 $3.98 \times 10^{-3} \sim 115 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其中的溶蚀孔是钾长石、斜长石或交代长石的碳酸盐经淋滤而成的。

邻近生油层或生油区的砂岩,由于生烃过程中排出 CO_2 和有机酸,其次生孔隙往往格外发育。朱国华教授曾对陕甘宁盆地延长组砂岩的浊沸石次生溶孔作过开创性的研究。

陕甘宁盆地三叠纪延长组经历了巨型内陆湖泊从产生、发展以至消亡的完整过程,湖区位于盆地南部 10万 km^2 范围内,安塞三角洲油田位于湖泊的东北部。延长组有 10 个储、盖组合,自上而下编号为长₁~长₁₀,安塞油田的主力层为长₆,辅助产层为长₄₊₅,长₃和长₂。

长₆油层埋深 $1000 \sim 1200 \text{ m}$,砂岩呈厚层状或块状,属灰绿色硬砂质长石细砂岩,石英含量 20.1% ,长石含量 49.8% ,岩屑含量 8.6% ,胶结物为次生绿泥石、方解石和浊沸石,总量为 $11\% \sim 14\%$ 。砂岩粒度均一、分选中等。

油田东北部安定堡一带为三角洲平原分流河道沉积,砂岩厚度大,呈块状,由 5 个正粒序韵律层组成;油田西南为三角洲前缘沉积,席状砂体由 4~5 个砂层叠置而成,其底部为炭屑砂岩和薄层砂岩间互,形成水平层理;中部为细砂岩与含炭屑砂岩,形成交错层理;上部为中细粒砂岩,形成低角度板状斜层理。

根据 66 口井 5170 块样品分析,长₆砂层最大渗透率为 $45 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最小为 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $3.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。一般情况下,粒度粗、砂层厚,其孔隙增大,渗透率相应变好;而粒度细、砂层薄,渗透率急剧变差。美国 Niper 研究所对塞 302 井长₆岩心分析的结果是:孔隙喉道由大、中、小三类构成,大于 $0.81 \mu\text{m}$ 喉道连通的孔隙占 22% ; $0.1 \sim 0.81 \mu\text{m}$ 喉道连通的孔隙占 38% ;小于 $0.1 \mu\text{m}$ 喉道连通的孔隙占 40% 。这些微孔隙为束缚水占据,这也是造成该层含油饱和度不高的内在原因。

储层孔隙类型复杂且主要为次生孔隙。根据 18 口井 124 块铸体薄片资料统计。面孔率平均 6.46% ,其中粒间孔 3.47% ,占总面孔率的 53.7% ,浊沸石溶孔 2.79% ,占总面孔率的 32.3% ,长石溶孔 0.74% ,占总面孔率的 11.4% ;其他粒内孔 0.17% ,占总孔隙率的 2.6% 。对安塞油田延长组砂岩孔隙成因的分析表明。长₆的次生孔隙占 75.0% ,长₆₂的次生孔隙占 84% ,长₆₃的次生孔隙占 92% 。由此可见,安塞油田的次生孔隙占有举足轻重的地位,它们发育的程度直接控制着油层物性的好坏(杨俊杰, 1993)。

(2) 伴有裂缝(特别是微裂缝),层控作用明显

碎屑岩随其埋藏压力、温度的升高,压实、胶结、颗粒次生加大等成岩作用相应加强,而渗透率则急剧降低,脆性增大。因此,低渗透储层往往伴有裂缝(特别是微裂缝),且层控作用明显。

美国著名的斯普拉柏雷-特伦德油田(Sprabery-Trend)就是这方面的例子。该油田位于得克萨斯州,含油面积 440 km^2 ,产油层为斯普拉柏雷层,含油厚度为 1765 m ,孔隙度 12% ,渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。储层虽然致密,但裂缝发育,属双重孔隙介质出油,即孔隙储油,裂缝排油,有两组裂缝,主裂缝为北东-南西向,辅裂缝与主裂缝垂直相交。

近几年来,人们特别注意低渗透层中收缩裂缝的研究,认为其中的鸡笼裂缝对油气的现实意义更大。这种由内力作用生成的裂缝具有全方位性,在层内分布均匀,系因成岩脱水收缩、地温梯度、矿物相