

天然气 凝液回收技术

◎ 王智 著

天津出版传媒集团



天津科学技术出版社

天然气 凝液回收技术

◎ 王智 著

天津出版传媒集团



天津科学技术出版社

内容题要

天然气作为重要的化工原料和清洁能源,近年来日益受到各方的关注,从天然气中回收凝液,可以满足商品气的质量要求,生产合格的管输气,同时最大限度地回收天然气凝液。本书从我国的实际出发,结合国内外天然气凝液回收技术的现状,着重阐述了天然气凝液回收的工艺方法、基本原理、工艺计算和设备的最新进展和成就。

本书可以作为从事天然气凝液回收工艺设计、生产和科研等工程人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

天然气凝液回收技术 / 王智著, -- 天津: 天津科学技术出版社, 2014.2
ISBN 978-7-5308-8781-3

I. ①天… II. ①王… III. ①天然气液-回收技术
IV. ①TE64

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 041062 号

责任编辑: 王 彤
责任印制: 王 莹

天津出版传媒集团

 天津科学技术出版社出版
出版人: 蔡 颢
天津市西康路 35 号 邮编 300051
电话 (022) 23332674
网址: www.tjkjcb.com.cn
新华书店经销
山东金鼎彩印有限公司印刷

开本 787×1093 1/16 印张 10.75 字数 254 000
2014 年 3 月第 1 版第 1 次印刷
定价: 58.00 元

前 言

天然气以其高效、洁净、方便等优势在整个能源结构中逐步进入鼎盛时期，开发和利用天然气是当今世界能源发展的潮流。在世界能源结构中，天然气的贡献比例已从 1971 年的 16.1% 上升到 2012 年的 23.76%，并继续保持增长趋势。估计到 2020 年，可达 27%，从而超过煤炭成为继石油之后的第二大能源，到 2030 年，天然气在世界能源中的贡献比例可达到 29% 以上，预计在 2050 年前后天然气将会超过石油，成为世界一次能源结构中的第一能源。

我国天然气的开发、利用虽然起步很早，但由于受到各种因素的影响，长期以来一直未能形成完整、系统的工业体系。近几十年来，随着我国国民经济的迅速发展，在天然气资源的勘探与开发上取得了丰硕成果，先后在陆上的新疆、陕西、内蒙、川渝、青海等地区发现大型气田。到“十二五”末，我国将初步形成以西气东输、川气东送、陕京线和沿海主干道为大动脉的，连接四大进口战略通道、主要生产区、消费区和储气库的全国主干管网，形成多气源供应，多方式调峰，平稳安全的供气格局

我国的天然气产量在连续三年以 16% 的增幅猛增后，2009 年增幅放缓至 6%，产量达到 848.54 亿立方米，其中天然气产量在 2007 年世界排名第 9 位，2008 年排名第 8，2009 年排名第 6。2012 年的全年天然气产量为 1067 亿立方米，同比增长 6.71%，排名仍为第 6 位。

2012 年，我国一次能源消费总量已达到 36.2 亿吨标煤，石油和天然气分别占一次能源消费总量的 18.9% 和 5.5%，分别提高了 0.3% 和 0.5%，但天然气与国际平均水平（23.8%）差距较大。同时，随着我国城镇化深入发展，我国城镇化率将从目前的 52.57% 提高至 76% 以上。城镇化进程中无疑会要求提高城镇居民和商业所需的清洁能源比例。因此，调整能源结构尤其突出。此外，随着城镇生活水平改善和能源消费支付能力的提高，居民对能源数量和质量提出了更高的要求。因此，我们必须加快清洁能源的发展，这也是当今社会发展的重要因素，以及保持国民经济持续发展的重要动力。

另外，加快发展天然气，提高天然气在我国一次能源消费结构中的比重，可显著减少二氧化碳等温室气体和细颗粒物（PM_{2.5}）等污染物排放，实现节能减排、改善环境，这既是我国实现优化调整能源结构的现实选择，也是强化节能减排的迫切需要。

近几十年来，随着我国天然气工业的迅速发展，天然气凝液回收能力和工艺水平也有了很大提高。为了适应大好形势的到来，为我国的天然气工业尽绵薄之力，特编写此书，以供国内广大从事天然气凝液回收工程工艺设计、生产、科研和教学的工程技术人员和师生全面及系统了解天然气凝液回收过程的原理与工艺。

作者长期从事天然气处理及凝液回收工程设计和项目管理工作，在本书的编写过程中注重理论联系实际，并对天然气凝液回收装置设计基础进行了着重介绍。

本书共四章，包括概述、天然气处理的含义和产品质量要求、天然气凝液回收技术和工艺、天然气凝液回收装置设计基础。

本书在编写过程中得到了中石化石油工程设计有限公司孙晓春、陈景霞等的帮助，在此一并感谢！

由于作者水平有限，书中不妥之处难免，敬请各位专家、同行和广大读者批评指正。

目 录

第一章 概述	1
第一节 天然气的重要性和在我国的发展前景	2
一、天然气在能源结构中的重要性	2
二、我国天然气工业的发展前景	3
第二节 天然气的成因	4
一、生物成因气	4
二、油型气	5
三、煤型气	6
四、无机成因气	7
五、各种成因气识别标志	9
六、天然气的开采	9
七、天然气的分布	11
第三节 天然气的分类、组成和体积参比条件	13
一、天然气分类	13
二、天然气组成	15
三、天然气体积计量的参比条件	17
第四节 天然气的相特性	18
一、烃类相特性	19
二、烃-水体系相特性	23
三、烃-二氧化碳体系相特性	37
第二章 天然气处理的含义和产品质量要求	40
第一节 天然气处理的含义	40
第二节 商品天然气的质量要求	42
一、热值	42
二、烃露点	42

三、水露点·····	43
四、硫含量·····	43
五、二氧化碳含量·····	45
六、机械杂质（固体颗粒）·····	45
七、其他·····	45
第三节 天然气处理主要产品及其质量要求·····	47
一、液化天然气·····	48
二、天然气凝液·····	48
三、液化石油气·····	48
四、稳定轻烃·····	49
五、压缩天然气·····	49
第三章 天然气凝液回收技术和工艺·····	51
第一节 天然气凝液回收的目的及方法·····	51
一、天然气类型对天然气凝液回收的影响·····	51
二、天然气凝液回收的目的·····	52
三、天然气凝液回收方法·····	54
第二节 制冷剂制冷和膨胀制冷原理与技术·····	62
一、蒸汽压缩制冷·····	63
二、透平膨胀机制冷·····	79
三、节流阀膨胀制冷·····	86
四、节流阀及膨胀机联合制冷·····	91
第三节 天然气凝液回收工艺·····	92
一、工艺及设备·····	92
二、工艺方法选择·····	100
三、以回收 C_3^+ 烃类为目的的工艺流程·····	105
四、以回收 C_2^+ 烃类为目的的工艺流程·····	110
五、国内外天然气凝液回收工艺发展情况·····	114
第四章 天然气凝液回收装置设计基础·····	121
第一节 一般规定·····	121
一、装置的基础参数和资料·····	121

二、装置的投资回收年限·····	123
三、装置的综合能耗·····	124
四、产品指标·····	126
第二节 工艺方法·····	126
一、原料气压缩·····	126
二、原料气脱水·····	128
三、冷凝分离·····	128
四、凝液分馏·····	135
第三节 设备·····	139
一、设计压力和设计温度·····	139
二、原料气压缩机·····	139
三、膨胀机组·····	146
四、分馏塔·····	153
五、凝液泵·····	155
六、热交换器·····	155
第四节 设备及管线安装·····	156
一、设备平面布置·····	156
二、设备安装·····	156
三、阀门安装·····	159
四、管线安装及其他·····	160
五、模块设计·····	161
参考文献·····	162

第一章 概 述

天然气，英文名称为 Natural Gas，是一种多组分的混合气体，主要成分是烷烃，其中甲烷占绝大多数，另有少量的乙烷、丙烷和丁烷，此外一般还含有硫化氢、二氧化碳、氮和水气，以及微量的惰性气体，如氦和氩等。在标准状况下，甲烷至丁烷以气体状态存在，戊烷以上为液体。天然气在燃烧过程中产生的能影响人类呼吸系统健康的物质极少，产生的二氧化碳仅为煤的 40%左右，产生的二氧化硫也很少。天然气燃烧后无废渣、废水产生，相较于煤炭、石油等 00 能源具有使用安全、热值高、洁净等优势。主要存在于油田和天然气田，也有少量出于煤层。

从广义的定义来说，天然气是指自然界中天然存在的一切气体，包括大气圈、水圈、生物圈和岩石圈中各种自然过程形成的气体。而人们长期以来通用的“天然气”的定义，是从能量角度出发的狭义定义，是指天然蕴藏于地层中的烃类和非烃类气体的混合物，主要存在于油田气、气田气、煤层气、泥火山气和生物生成气中。天然气又可分为伴生气和非伴生气两种。伴随原油共生，与原油同时被采出的油田气叫伴生气；非伴生气包括纯气田天然气和凝析气田天然气两种，在地层中都以气态存在。凝析气田天然气从地层流出井口后，随着压力和温度的下降，分离为气液两相，气相是凝析气田天然气，液相是凝析液，叫凝析油。

天然气是一种多组分的混合气体，主要成分是烷烃，其中甲烷占绝大多数，另有少量的乙烷、丙烷和丁烷，此外一般还含有硫化氢、二氧化碳、氮和水气，以及微量的惰性气体，如氦和氩等。在标准状况下，甲烷至丁烷以气体状态存在，戊烷以下为液体。

天然气系古生物遗骸长期沉积地下，经慢慢转化及变质裂解而产生之气态碳氢化合物，具可燃性，多在油田开采原油时伴随而出或纯天然气气田。

天然气蕴藏在地下多孔隙岩层中，主要成分为甲烷，比重约 0.65，比空气轻，具有无色、无味、无毒之特性。天然气公司皆遵照政府规定添加臭剂（四氢噻吩），以资用户嗅辨。天然气在空气中含量达到一定程度后会使人窒息。

若天然气在空气中浓度为 5%~15% 的范围内, 遇明火即可发生爆炸, 这个浓度范围即为天然气的爆炸极限。爆炸在瞬间产生高压、高温, 其破坏力和危险性都是很大的。

依天然气蕴藏状态, 又分为构造性天然气、水溶性天然气、煤矿天然气等三种。而构造性天然气又可分为伴随原油出产的湿性天然气、不含液体成份的干性天然气。

第一节 天然气的重要性和在我国的发展前景

一、天然气在能源结构中的重要性

天然气以其高效、洁净、方便等优势在整个能源结构中逐步进入鼎盛时期, 开发和利用天然气是当今世界能源发展的潮流。在世界能源结构中, 天然气的贡献比例已从 1971 年的 16.1% 上升到 2002 年的 23.76%, 并继续保持增长趋势。估计到 2020 年, 可达 27%, 从而超过煤炭成为继石油之后的第二大能源, 到 2030 年, 天然气在世界能源中的贡献比例可达到 29% 以上^[1], 预计在 2050 年前后天然气将会超过石油, 成为世界一次能源结构中的“第一能源”, 从而进入一个全新的历史发展时期。

据报道, 最近 10 年来世界天然气总产量增势良好, 虽然 2006 年产量增幅较 2005 年 (4.08%) 有所减缓, 但仍然保持近 2% 的增幅, 总量达到 $28343.04 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中, 欧佩克天然气产量近两年持续高速增长, 继 2005 年 10.43% 的增幅之后, 2006 年增幅达到 4.67%, 全年共生产天然气 $4615.70 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

我国的天然气产量在连续三年以 16% 的增幅猛增后, 2009 年增幅放缓至 6%, 产量达到 $848.54 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中天然气产量在 2007 年排名世界第 9 位, 2008 年排名第 8, 2009 年至今排名第 6。

近年来随着国民经济的迅速发展和人民生活水平的不断提高以及能源结构的调整, 未来对清洁能源天然气的需求将大幅度提高, 供需矛盾也将进一步加大。虽然我国的天然气产量逐年猛增, 仍不能满足国内需求, 还需大量进口天然气。其中, 一方面在我国沿海一带建设液化天然气 (LNG) 接收终端, 从东南亚、中东和澳大利亚等进口天然气; 另一方面从中亚土库曼斯坦等国通过管道将天然气输送至我国境内, 再由西气东输二线管道向沿线和珠江三角洲、长江三角洲供气。这种多元化的气源将大大提高我国的天然气供应安全系数, 而且

在数量上也有较好的保障，因而将会逐步改善国内的能源结构。

未来 50 年内，我国城镇化率将从目前的 52.57% 提高至 76% 以上。中国城镇化问题，是一个关系到中国经济持续快速发展以及国民经济可持续发展的重大战略问题。城镇化进程是一个综合的发展过程，它要求提高城镇居民和商业所需的清洁能源比例。因此，调整能源结构尤其突出。此外，随着城镇居民生活水平的提高，居民对能源支付的支付能力也在提高。这些，对能源数量和质量提出了更高的要求，也要求我们必须快速发展清洁能源，这也是当今社会发展的重要因素，也是保持国民经济持续发展的重要推动力。

二、我国天然气工业的发展前景

我国天然气的开发、利用虽然起步很早，但因受各种条件影响，长期以来一直未能形成完整、系统的工业体系。早期的天然气开发、利用主要在四川，近几十年来，随着我国国民经济的迅速发展，在天然气资源的勘探与开发上取得了丰硕成果，先后在陆上的新疆、陕西、内蒙、川渝、青海等地区发现大型气田。此外，海上天然气资源也十分丰富，南海、东海及渤海的崖 13-1、东方 1-1、平湖、春晓、锦州 20-2 等大型气田或凝析气田也已陆续开发建设，从而使我国天然气工业呈现出欣欣向荣的局面。西气东输工程的建成投产，更标志着我国天然气的开发、利用又迈上一个新的台阶。

根据全国第三次资源评价结果，我国天然气总资源量为 $53 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，预计天然气可采资源量为 $14 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。现已累计探明天然气可采储量 $2.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。目前剩余天然气可采储量 $2.214 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，天然气已探明的储量仅占总资源量的 6%。我国的天然气资源主要分布在中、西部地区 and 近海地区。其中，80% 以上的资源量集中分布在新疆、川渝、陕西、内蒙、青海及东南海域。

此外，我国的非常规天然气资源（如煤层气、天然气水合物等）也十分丰富。我国煤层埋深 2000 m 以浅的煤层气总资源量为 $36.81 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，其中可采资源量为 $10.87 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。虽然这类资源的勘探开发工作尚处在起步阶段，但却有着很好的开发、利用前景。截止到 2005 年底，全国共施工地面煤层气井 607 口，完成 7 个煤层气试验井组和一个示范工程项目，近年来对外合作也已取得可喜成绩。不仅如此，我国煤层气资源在区域分布、埋藏深度上也有利于规划开发。“西气东输”、陕京两条管道经过多个煤层气富集区，这就为煤层气的开发提供了输送条件。2009 年 9 月山西沁水盆地煤层气田樊庄区块产能建设（ $6 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ）和煤层气中央处理厂（总规模为 $30 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ，其中一期为 $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ）的投产，以及郑庄区块（ $9 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ）的相继建设，标志着我国煤层气的

开发利用进入了大发展时期^[3,4]。除煤层气外，页岩气、南海等海域的天然气水合物等都可能成为天然气的接替资源。

2012 年，我国一次能源消费总量已达到 36.2 亿吨标煤，比 2011 年增长 4%。煤炭占一次能源消费总量的比重大约为 66.4%，比 2011 年下降了 2%；石油和天然气分别占一次能源消费总量的 18.9%和 5.5%，分别提高了 0.3%和 0.5%；非化石能源消费量占一次能源消费总量的比重为 9.1%，提高了 1.1%。

第二节 天然气的成因

天然气与石油生成过程既有联系又有区别：石油主要形成于深成作用阶段，由催化裂解作用引起，而天然气的形成则贯穿于成岩、深成、后成直至变质作用的始终；与石油的生成相比，无论是原始物质还是生成环境，天然气的生成都更广泛、更迅速、更容易，各种类型的有机质都可形成天然气——腐泥型有机质则既生油又生气，腐植型有机质主要生成气态烃。因此天然气的成因是多种多样的。归纳起来，天然气的成因可分为生物成因气、油型气和煤型气。近年来无机成因气尤其是非烃气受到高度重视，这里一并简要介绍，最后还了解各种成因气的判别方法。

一、生物成因气

1. 概念

生物成因气是指成岩作用（阶段）早期，在浅层生物化学作用带内，沉积有机质经微生物的群体发酵和合成作用形成的天然气。其中有时混有早期低温降解形成的气体。生物成因气出现在埋藏浅、时代新和演化程度低的岩层中，以含甲烷气为主。

2. 形成条件

生物成因气形成的前提条件是更加丰富的有机质和强还原环境。

最有利于生气的有机母质是草本腐植型-腐泥腐植型，这些有机质多分布于陆源物质供应丰富的三角洲和沼泽湖滨带，通常含陆源有机质的砂泥岩系列最有利。硫酸岩层中难以形成大量生物成因气的原因，是因为硫酸对产甲烷菌有明显的抵制作用， H_2 优先还原 $SO_4^{2-} \rightarrow S^{2-}$ 形成金属硫化物或 H_2S 等，因此 CO_2 不能被 H_2 还原为 CH_4 。

甲烷菌的生长需要合适的地化环境,首先是足够强的还原条件,一般 $Eh < -300\text{mV}$ 为宜(即地层水中的氧和 SO_4^{2-} 依次全部被还原以后,才会大量繁殖);其次对 pH 值要求以靠近中性为宜,一般 $6.0 \sim 8.0$,最佳值 $7.2 \sim 7.6$;再者,甲烷菌生长温度 $0 \sim 75^\circ\text{C}$,最佳值 $37 \sim 42^\circ\text{C}$ 。没有这些外部条件,甲烷菌就不能大量繁殖,也就不能形成大量甲烷气。

3.化学组成

生物成因气的化学组成几乎全是甲烷,其含量一般超过 98%,高的可达 99% 以上,重烃含量很少,一般低于 1%,其余是少量的 N_2 和 CO_2 。因此生物成因气的干燥系数($C_1/\sum C_{2+}$)一般在数百~数千以上,为典型的干气,甲烷的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值一般 $-85 \sim -55\text{‰}$,最低可达 -100‰ 。世界上许多国家与地区都发现了生物成因气藏,如在西西伯利亚 683~1300 m 白垩系地层中,发现了可采储量达 10.5 万亿 m^3 的气藏。我国柴达木盆地(有些单井日产达 1 百多万立方米)和上海地区(长江三角洲)也发现了这类气藏。

二、油型气

1.概念

油型气包括湿气(石油伴生气)、凝析气和裂解气。它们是沉积有机质特别是腐泥型有机质在热降解成油过程中,与石油一起形成的,或者是在后成作用阶段由有机质和早期形成的液态石油热裂解形成的。

2.形成与分布

与石油经有机质热解逐步形成一样,天然气的形成也具明显的垂直分带性。

在剖面最上部(成岩阶段)是生物成因气,在深成阶段后期是低分子量气态烃($\text{C}_2 \sim \text{C}_4$)即湿气,以及由于高温高压使轻质液态烃逆蒸发形成的凝析气。在剖面下部,由于温度上升,生成的石油裂解为小分子的轻烃直至甲烷,有机质亦进一步生成气体,以甲烷为主石油裂解气是生气序列的最后产物,通常将这一阶段称为干气带。

由石油伴生气→凝析气→干气,甲烷含量逐渐增多,故干燥系数升高,甲烷 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值随有机质演化程度增大而增大。

对我国四川盆地气田的研究(包茨, 1988)认为,该盆地的古生代气田是高温甲烷生气期形成的,从三叠系→震旦系,干燥系数由小到大($T: 35.5 \rightarrow P: 73.1 \rightarrow Z: 387.1$),重烃由多到少。川南气田中,天然气与热变沥青共生,说明天然气是由石油热变质而成的。

三、煤型气

1.概述

煤型气是指煤系有机质（包括煤层和煤系地层中的分散有机质）热演化生成的天然气。

煤田开采中，经常出现大量瓦斯涌出现象，如四川合川县一口井的瓦斯突出，排出瓦斯量竟高达 140 万立方米，这说明，煤系地层确实能生成天然气。

煤型气是一种多成分的混合气体，其中烃类气体以甲烷为主，重烃气含量少，一般为干气，但也可能有湿气，甚至凝析气。有时可含较多 Hg 蒸气和 N₂ 等。

煤型气也可形成特大气田，20 世纪 60 年代以来在西西伯利亚北部 K2、荷兰东部盆地和北海盆地南部 P 等地层发现了特大的煤型气田，这三个气区探明储量 22 万亿立方米，占世界探明天然气总储量的 1/3 弱。据统计（M.T 哈尔布蒂，1970），在世界已发现的 26 个大气田中，有 16 个属煤型气田，数量占 60%，储量占 72.2%，由此可见，煤型气在世界可燃天然气资源构成中占有重要地位。我国煤炭资源丰富，据统计有 6 千亿吨，居世界第三位，聚煤盆地发育，现已发现有煤型气聚集的有华北、鄂尔多斯、四川、台湾—东海、莺歌海—琼东南、以及吐哈等盆地。经研究，鄂尔多斯盆地中部大气区的气多半来自上古生界 C-P 煤系地层（上古：下古气源=7：3 或 6：4），可见煤系地层生成天然气的潜力很大。

2.成煤作用与煤型气的形成

成煤作用可分为泥炭化和煤化作用两个阶段。前一阶段，堆积在沼泽、湖泊或浅海环境下的植物遗体和碎片，经生化作用形成煤的前身——泥炭；随着盆地沉降，埋藏加深和温度压力增高，由泥炭化阶段进入煤化作用阶段，在煤化作用中泥炭经过微生物酶解、压实、脱水等作用变为褐煤；当埋藏逐步加深，已形成的褐煤在温度、压力和时间等因素作用下，按长焰煤→气煤→肥煤→焦煤→瘦煤→贫煤→无烟煤的序列转化。

实测表明，煤的挥发分随煤化作用增强明显降低，由褐煤→烟煤→无烟煤，挥发分大约由 50%降到 5%。这些挥发分主要以 CH₄、CO₂、H₂O、N₂、NH₃ 等气态产物的形式逸出，是形成煤型气的基础，煤化作用中析出的主要挥发性产物见图 5-9。

1.煤化作用中挥发性产物总量 2.CO₂ 3.H₂O 4.CH₄ 5.NH₃ 6.H₂S

从形成煤型气的角度出发，应该注意在煤化作用过程中成煤物质的四次较

为明显变化（煤岩学上称之为煤化跃变）：

第一次跃变发生于长焰煤开始阶段，碳含量 $Cr=75\%\sim 80\%$ ，挥发分 $Vr=43\%$ ， $Ro=0.6\%$ ；

第二次跃变发生于肥煤阶段， $Cr=87\%$ ， $Vr=29\%$ ， $Ro=1.3\%$ ；

第三次跃变发生烟煤→无烟煤阶段， $Cr=91\%$ ， $Vr=8\%$ ， $Ro=2.5\%$ ；

第四次跃变发生于无烟煤→变质无烟煤阶段， $Cr=93.5\%$ ， $Vr=4\%$ ， $Ro=3.7\%$ ，芳香族稠环缩合程度大大提高。

在这四次跃变中，导致煤质变化最为明显的是第一、二次跃变。煤化跃变不仅表现为煤的质变，而且每次跃变都相应地为一次成气（甲烷）高峰。

煤型气的形成及产率不仅与煤阶有关，而且还与煤的煤岩组成有关，腐殖煤在显微镜下可分为镜质组、类脂组和惰性组三种显微组分，我国大多数煤田的腐殖煤中，各组分的含量以镜质组最高，约占 $50\%\sim 80\%$ ，惰性组占 $10\%\sim 20\%$ （高者达 $30\%\sim 50\%$ ），类脂组含量最低，一般不超过 5% 。

在成煤作用中，各显微组分对成气的贡献是不同的。长庆油田与中国科学院地化所（1984）在成功地分离提纯煤的有机显微组分基础上，开展了低阶煤有机显微组分热演化模拟实验，并探讨了不同显微组分的成烃贡和成烃机理。发现三种显微组分的最终成烃效率比约为类脂组:镜质组:惰性组=3:1:0.71，产气能力比约为 3.3:1:0.8，说明惰性组也具一定生气能力。

四、无机成因气

地球深部岩浆活动、变质岩和宇宙空间分布的可燃气体，以及岩石无机盐类分解产生的气体，都属于无机成因气或非生物成因气。它属于干气，以甲烷为主，有时含 CO_2 、 N_2 、 He 及 H_2S 、 Hg 蒸气等，甚至以它们的某一种为主，形成具有工业意义的非烃气藏。

1. 甲烷

无机合成： $CO_2 + H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$ 。条件：高温（ $250^\circ C$ ）、铁族元素。
地球原始大气中甲烷：吸收于地幔，沿深断裂、火山活动等排出。

板块俯冲带甲烷：大洋板块俯冲高温高压下脱水，分解产生的 H 、 C 、 $CO/CO_2 \rightarrow CH_4$

2. CO_2

天然气中高含 CO_2 与高含烃类气一样，同样具有重要的经济意义，对于 CO_2 气藏来说，有经济价值者是 CO_2 含量 $>80\%$ （体积浓度）的天然气，可广泛用于工业、农业、气象、医疗、饮食业和环保等领域。我国广东省三水盆地沙头

圩水深 9 井天然气中 CO_2 含量高达 99.55%，日产气量 500 万方，成为有很高经济价值的气藏。

目前世界上已发现的 CO_2 气田藏主要分布在中—新生代火山区、断裂活动区、油气富集区和煤田区。从成因上看，共有以下几种：

无机成因：

① 上地幔岩浆中富含 CO_2 气体当岩浆沿地壳薄弱带上升、压力减小，其中 CO_2 逸出。

② 碳酸盐岩受高温烘烤或深成变质可成大量 CO_2 ，当有地下水参与或含有 Al、Mg、Fe 杂质，98~200℃ 也能生成相当量 CO_2 ，这种成因 CO_2 特征： CO_2 含量 > 35%， $\delta^{13}\text{CCO}_2 > -8\text{‰}$ 。

③ 碳酸盐矿物与其他矿物相互作用也可生成 CO_2 ，如白云石与高岭石作用即可。

另外，有机成因有：

生化作用；

热化学作用；

油田遭氧化；

煤氧化作用；

3. N_2

N_2 是大气中的主要成分，据研究，分子氮的最大浓度和逸度出现在古地台边缘的含氮地层中，特别是蒸发盐岩层分布区的边界内。氮是由水层迁移到气藏中的，由硝酸盐还原而来，其先体是 NH_4^+ 。

N_2 含量大于 15% 者为富氮气藏，天然气中 N_2 的成因类型主要有：

① 有机质分解产生的 N_2 ：100~130℃ 达高峰，生成的 N_2 量占总生气量的 2.0%，含量较低；（有机）

② 地壳岩石热解脱气：如辉绿岩热解析出气量， N_2 可高达 52%，此类 N_2 可富集；

③ 地下卤水（硝酸盐）脱氮作用：硝酸盐经生化作用生成 $\text{N}_2\text{O} + \text{N}_2$ ；

④ 地幔源的 N_2 ：如铁陨石氮的质量分数为十~数百 $\times 10^{-6}$ ；

⑤ 大气源的 N_2 ：大气中 N_2 随地下水循环向深处运移，混入最多的主要是温泉气。

从同位素特征看，一般来说最重的氮集中在硝酸盐岩中，较重的氮集中在芳香烃化合物中，而较轻的氮则集中在铵盐和氨基酸中。

4、H₂S

全球已发现气藏中，几乎都存在有 H₂S 气体，H₂S 含量>1%的气藏为富 H₂S 的气藏，具有商业意义者须大于 5%。

据研究（Zhabrew 等，1988），具有商业意义的 H₂S 富集区主要是大型的含油气沉积盆地，在这些盆地的沉积剖面中均含有厚的碳酸盐—蒸发盐岩系。

自然界中的 H₂S 生成主要有以下两类：

① 生物成因（有机）：包括生物降解和生物化学作用；

② 热化学成因（无机）：有热降解、热化学还原、高温合成等。根据热力学计算，自然环境中石膏（CaSO₄）被烃类还原成 H₂S 的需求温度高达 150℃，因此自然界发现的高含 H₂S 气藏均产于深部的碳酸盐—蒸发盐层系中，并且碳酸盐岩储集性好。

5、稀有气体（He、Ar、…）

这些气体尽管在地下含量稀少，但由于其特殊的地球化学行为，科学家们常把它们作为地球化学过程的示踪剂。

He、Ar 的同位素比值 3He/4He、40Ar/36Ar 是查明天然气成因的极重要手段，因沿大气→壳源→壳、幔源混合→幔源，二者不断增大，前者由 1.39×10^{-6} 至大于 10^{-5} ，后者则由 295.6 至大于 2000。

此外，根据围岩与气藏中 Ar 同位素放射性成因，还可计算出气体的形成年龄。

五、各种成因气识别标志

自然界中天然气分布很广，成因类型繁多且热演化程度不同，其地化特征亦多种多样，因此很难用统一的指标加以识别。实践表明，用多项指标综合判别比用单一的指标更为可靠（戴金星，1993）。天然气成因判别所涉及的项目主要有同位素、气组分、轻烃以及生物标志化合物等四项，其中有些内容判别标准截然，具有绝对意义，有些内容则在三种成因气上有些重叠，只具有一定的相对意义。

六、天然气的开采

天然气也同原油一样埋藏在地下封闭的地质构造之中，有些和原油储藏在同一层位，有些单独存在。对于和原油储藏在同一层位的天然气，会伴随原油一起开采出来。对于只有单相气存在的，我们称之为气藏，其开采方法既与原油的开采方法十分相似，又有其特殊的地方。