

CONDITIONING AND PROCESSING OF NATURAL GAS

天然气处理与加工

朱利凯 主编

天然气开采工程丛书

(五)



登录号	100612
分类号	TE64
种次号	004

天然气开采工程丛书 (五)

天然气处理与加工

朱利凯 主编



石油工业出版社

内 容 提 要

《天然气开采工程丛书》共六个分册,即《气田开采地质》、《气藏工程》、《采气工程》、《天然气矿场集输》、《天然气处理与加工》和《输气管道工程》。本书是其中之一。

本书在总结我国 40 年天然气工业地面工程经验的基础上,系统介绍了对不同气质和含不同非烃类杂质的天然气进行处理与加工的方法、工艺和技术,以及国外在该领域中的最新进展。

本书可供从事天然气处理及加工的工程技术人员阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

天然气处理与加工/朱利凯主编.
北京:石油工业出版社,1997.5
(天然气开采工程丛书;5)
ISBN 7-5021-1866-7

I. 天…

II. 朱…

III. 天然气工业:加工工业

IV. TE64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 21557 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 27½ 印张 685 千字 印 1-1500

1997 年 5 月北京第 1 版 1997 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-1866-7/TE·1574

精装定价:60.00 元

平装定价:55.00 元

《天然气开采工程丛书》编辑委员会

中国石油天然气总公司编辑委员会

主 任 李虞庚

副主任 冈秦麟 王乃举 张家茂 滕耀坤

编 委 蒋其凯 曾宪义 罗英俊 孟慕尧 潘国潮 李海平
李希文 吕德本 叶敬东 张卫国 徐文渊 周学厚
王季明 王鸣华 文楚雄

四川石油管理局编辑委员会

主 任 滕耀坤

副主任 徐文渊 周学厚 王季明 冉隆辉 刘同斌

编 委 (以姓氏笔划为序)

王全生 王鸣华 许可方 陈中一 陈赓良 李联奎
杨光鲜 范恩泽 金裕方 张 化 侯德明 章申远
游开诚 舒世容

《天然气处理与加工》分册编写组

主 编 朱利凯

副 主 编 夏丽云

编写人员 朱利凯 夏丽云 陈赓良

统 审 徐文渊

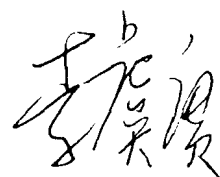
序

40年来,我国气田开发经验不断丰富,已逐步形成一套适合我国气田开发特点的技术。为了系统总结经验,提高气田开发技术水平,迎接我国天然气工业的大发展,中国石油天然气总公司科技发展局组织了长期从事气田开发、具有较高理论水平和丰富实践经验的技术人员,系统编写了这套丛书,即《气田开发地质》、《气藏工程》、《采气工程》、《天然气矿场集输》、《天然气处理与加工》和《输气管道工程》,共六个分册。

我国是世界上天然气开采和利用最早的国家,早在公元前301年汉末晋初时,就开始了采气熬盐,开创了世界最古老的“卓筒井”钻井、“簾盆”排水采气、“亮筒子”试气、“补腔”修井、“显号”识别裂缝以及“通腔”划分连通系统,这些都已成为世界石油史上光辉的一页,也是浅层低孔隙低渗透裂缝-孔隙型有水气田开采的宝贵经验。解放前,我国天然气开采技术停滞不前,处于十分落后的局面,直到新中国成立,才开始较大规模工业化的勘探与开发,气田由旧中国的两个增加到现在的116个,年产气大幅度增加,已成为我国国民经济发展不可缺少的能源。目前陆上天然气勘探有了新的发展,海上崖13—1大气田也已开始投入开发,这为我国“九五”期间天然气进一步加快发展创造了条件。

我国已开发气田的地质条件复杂,开采的技术难度较大,绝大多数气田储层为低孔隙低渗透,具有边、底水。以碳酸盐岩为主的中、小型气田,其微细裂缝为渗流通道,非均质性严重,主力气田多为含硫气田,使生产建设面临一系列技术难题。正是在这种复杂和困难的条件下,我国的技术人员经历了多年的探索,不断地实践—认识—再实践—再认识,引进和应用新技术、新方法和新装备,加深了对我国气田开发基本规律的认识,完善配套了天然气上、下游工程,使我国天然气工业得到了发展,气田开发水平步入现代技术水平。

我国天然气开发具有40年的经验,这是十分宝贵的,认真系统地总结经验,必将对我国天然气工业的发展起到积极的推动和指导作用。随着我国新气田、大气田的不断发现,将有一大批技术人员加入气田开发队伍,这套丛书不仅是矿场技术人员很好的参考书,也是石油大专院校很好的教材。我相信,随着我国天然气工业的发展,今后我国气田开发的技术水平将会不断完善和提高。



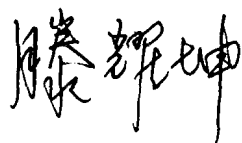
一九九六年七月二十一日

序

四川盆地是一个面积约 $18 \times 10^4 \text{km}^2$ 的大型含气盆地。在前震旦系变质岩和火成岩的基底上，沉积了厚达 6000~12000m 的海、陆相地层，为天然气的生成、运移、聚集和保存提供了有利条件。现已证实，震旦系、奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系均蕴藏着丰富的天然气。但盆地的地质情况极其复杂，储集层绝大多数为低孔、低渗的裂缝性碳酸盐岩，多数气田有边、底水，且具有井下温度高、地层压力高、天然气含硫化氢高等特点，这给勘探开发工作带来了诸多困难。

四川开采利用天然气的历史悠久，但大规模的勘探开发是在新中国成立以后。40 多年来，四川石油管理局的广大职工，以求实、创新、勇于实践的精神，攻克了天然气勘探、开发、钻井、采气、集输、处理、加工等领域一个个技术难关，创造了一套适应四川复杂地质条件的勘探开发技术，探明了占全国 40% 的天然气地质储量，使天然气产量占全国总产量的 41%，占纯气藏产气量的 80%，为我国西南地区工农业发展做出了重大贡献，使四川成为我国天然气工业的重要基地。

《天然气开采工程丛书》是根据中国石油天然气总公司的要求而编写的。为此，四川石油管理局成立了由长期从事天然气事业、理论造诣深、实际经验丰富的专家组成的编辑委员会和 30 余名高级工程师组成的六个编写组，对 40 多年来四川在天然气开发方面的实践经验，特别是近十多年来在技术攻关、科学研究以及引进、消化国外先进技术方面的成果进行全面、系统总结，因此，这套“丛书”不仅较全面地反映了四川天然气开发的科技进步，同时也从一个侧面反映了多年来我国在天然气开采诸方面所取得的巨大成就。40 年，在历史的长河中是很短暂的，但若能通过这 40 年的经验总结对今后全国天然气工业的发展有所启迪、有所促进，我们将感到十分欣慰，我想，这也是广大气田开发科技工程技术人员对这套“丛书”的期望。



一九九六年七月

前 言

天然气必须经历勘探、开发、处理加工乃至管输等之后方能予以综合利用，而天然气的处理加工则是其中承前启后的一个十分重要的环节。该专业工艺涉及化学工程、低温工程等，它不如地质勘探、开采、储运有鲜明的专业属性，而是一门综合性的学科。目前，我国的天然气工业发展很快，其天然气处理加工已形成完整的体系，在天然气净化、硫回收、天然气组分的分离等方面积累了丰富的生产经验，已成建制地形成教育、科研、设计、施工、生产等方面的技术队伍，但有关天然气处理加工工艺的专著则不多见，尤其是标志科技先进的专用软件的开发几近于空白。

目前可供参考的论著大抵有两类：或“学院”式地专注于胺法过程气液反应的研究；或侧重于分类介绍已经过工业实践的工艺方法及其发展。有的虽然注意到了在叙述工艺过程时结合一些专业的基本概念，但往往是以作短期培训的教材为目的而显得太简略。

有鉴于此，我们编纂本书希图系统地均衡介绍天然气处理工艺方面的发展趋势及与本专业相关的基本概念，也提供了一些有关的分析测试技术。奢望其能有益于这一专业工程技术人员参考。基于天然气加工问题国内已有专著，只从其他角度作些必要的论述，不作为本书的重点。

四川是我国天然气工业的重要基地之一，历史悠久。四川气田在天然气净化、硫回收等天然气处理方面尤具特色，且其系统完整，工艺也较先进，堪称我国天然气工业的典型，这一事实在本书中有较多的反映。

囿于作者的学识，书中谬误不当之处尚祈专家们指正，作者由衷希望有更好的专著出版，为天然气处理与加工专业工程技术人员提供更多更实用的参考书。

本书由朱利凯编著第一章、第五章的第十节、第七章、第八章，陈赓良编著第三、四、五、六章，夏丽云编著第二、九章。

编委会指定本书由徐文渊统审。周学厚、范恩泽、张化审阅了部分有关章节。

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 国外发展及现状.....	(4)
第二节 国内发展概况.....	(14)
第二章 天然气的物理化学性质	(19)
第一节 概述.....	(19)
第二节 天然气的质量要求.....	(20)
第三节 天然气组分的一般性质.....	(23)
第四节 天然气的物理性质.....	(29)
参考文献.....	(44)
第三章 天然气脱硫	(45)
第一节 常用脱硫方法.....	(45)
第二节 醇胺与 H_2S , CO_2 的化学反应和溶剂.....	(50)
第三节 醇胺法的工艺流程与设备.....	(52)
第四节 醇胺法装置的操作要点.....	(55)
第五节 选择性吸收脱硫工艺.....	(59)
第六节 氧化还原法脱硫.....	(71)
第七节 其它脱硫方法.....	(81)
参考文献.....	(86)
第四章 天然气脱水	(88)
第一节 水—烃体系.....	(88)
第二节 溶剂吸收法脱水.....	(102)
第三节 固体吸附法脱水.....	(119)
参考文献.....	(129)
第五章 克劳斯法硫磺回收工艺	(131)
第一节 克劳斯法制硫基本原理.....	(131)
第二节 工艺方法和流程.....	(135)
第三节 主要设备.....	(139)
第四节 影响操作的因素.....	(142)
第五节 液硫的加工与成型.....	(145)
第六节 从贫酸气中回收硫.....	(149)
第七节 氧基硫磺回收工艺.....	(152)
第八节 从硫化氢中回收硫和氢.....	(154)
第九节 硫磺回收催化剂及其工业应用.....	(159)
第十节 克劳斯法燃烧炉内化学反应及过程气的平衡组成.....	(170)
参考文献.....	(209)

第六章 尾气处理	(212)
第一节 发展概况.....	(212)
第二节 直接灼烧.....	(214)
第三节 在液相中进行的低温克劳斯反应.....	(216)
第四节 在固体催化剂上进行的低温克劳斯反应.....	(218)
第五节 还原—吸收.....	(220)
第六节 氧化—吸收.....	(223)
第七节 发展动向.....	(225)
参考文献.....	(236)
第七章 胺法脱硫工艺原理	(237)
第一节 H_2S 、 CO_2 在醇胺水溶液中的溶解度	(237)
第二节 板式塔或填料塔中醇胺水溶液吸收 H_2S 、 CO_2 的机理和动力学上 选择性吸收 H_2S 问题	(267)
第三节 胺法再生塔工艺参数的选择.....	(290)
第四节 天然气净化厂的能量平衡.....	(309)
参考文献.....	(327)
第八章 天然气加工及低温分离工艺技术	(331)
第一节 低温分离工艺及 $\text{CH}_4 - \text{CO}_2$ 体系相平衡.....	(331)
第二节 天然气凝液回收.....	(349)
第三节 天然气液化和提氮.....	(370)
第四节 压缩天然气 (CNG) 作车用燃料	(383)
参考文献.....	(385)
第九章 天然气的分析测试技术	(388)
第一节 气体定律.....	(388)
第二节 天然气分析测试技术.....	(394)
第三节 天然气脱硫的分析技术.....	(414)
第四节 硫磺回收的分析技术.....	(415)
第五节 有关天然气凝液 (NGL) 回收、天然气提氮的分析测试技术	(419)
附表	(426)
附表 1 国内外天然气试验方法标准汇览	(426)
附表 2 我国已出版天然气试验方法行标和企标一览表	(428)

第一章 绪 论

天然气是一种洁净、方便、高效的优质燃料，也是重要的化工原料。具有明显的社会效益，环境效益和经济效益。1993 年统计全世界天然气总产量为 $26633.8 \times 10^8 \text{m}^3$ ，销售量为 $21582.7 \times 10^8 \text{m}^3$ 。主要产气国家的产气量及销售情况如表 1—1 所示。

表 1—1 1993 年世界天然气生产情况

国 家	产气量, 10^8m^3	销售量, 10^8m^3
前苏联	7781.4	7577.4
美国	6488.0	5225.0
加拿大	1707.1	1387.5
荷兰	840.1	810.1
阿尔及利亚	1307.0	570.0
英国	736.2	654.9
印度尼西亚	742.0	558.0
墨西哥	371.4	262.6
罗马尼亚	214.9	211.9
沙特阿拉伯	673.0	359.0
挪威	415.8	273.8
阿根廷	202.5	153.5
阿联酋 (U.A.E)	264.7	241.4
委内瑞拉	424.8	216.0
意大利	194.0	194.0
澳大利亚	236.7	222.3
德国	193.8	186.8
马来西亚	253.2	249.2
中国	158.1	158.1
总 计	23204.7	19511.5

(世界天然气 1994 年度报告书, 国际天然气和含烃气体信息中心)

天然气在一次能源消耗构成中历年占的比例示于表 1—2。

表 1—2 天然气在一次能源消耗构成中占的比例, %

年	1920	1940	1950	1960	1970	1980	1989	1990	1993
占的比例, %	1.5	1.9	4.6	10.0	14.6	19.9	21.3	21.3	26.5

1990 年世界天然气总产量已达 $21397 \times 10^8 \text{m}^3$ ，为世界能源总量的 30%，预计到 2000 年将增至 40% 以上。AGA 统计 1993 年天然气销售量相当于油气产量的 58%（按 1000m^3 气 / 0.85t 油当量计）。马凯帝（Marchetti）预测继煤、石油之后，天然气将在一次能源中占主要地位（图 1—1）。

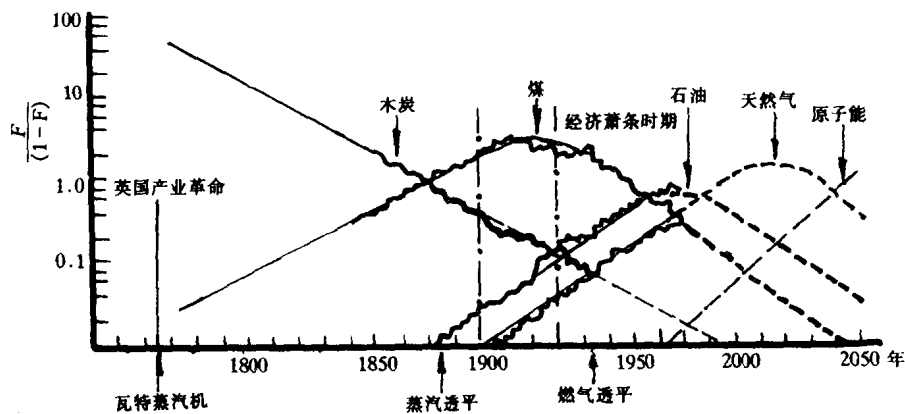


图 1—1 各种能源市场占有率 (F) 的历年变化预测

这就注定天然气工业必将有巨大的发展。犹如石油工业一样，天然气工业也由地下、地面两部分工程构成，涉及勘探、开发、采气、加工处理，管输等环节，而天然气的加工和处理是开采出的天然气变成商品气过程中的一个重要的组成部分，是安全平稳而经济地进入输气管线或用户之前的一个必要的中间环节。

石油一词广义有三个含义：①气态的石油，即通常习称的天然气；②原油；③固态的石油——沥青。在大多数情况下，天然气是一多组分的以烷烃（更普遍的是甲烷）为主的混合物，出于历史上的原因，开采出的天然气大多数都是可燃的，因而指天然气为气态的石油显然是恰当的。但应指出，随着生产的发展，也有相当一些的含 N_2 或 CO_2 甚高而甲烷含量很低的非燃料型天然气发现，它若经过加工、处理是不能作商品燃料气的，从而也更突出了天然气加工处理的必要性和重要性。

天然气的组成因油、气田层系不同而异，油田气（包括凝析油气田气）、气田的气井气，均属天然气范畴。工业上习称的“酸性天然气”即指含 CO_2 、 H_2S 、有机硫（为 RSH ）等的天然气，它需处理达到一定的气质标准后才能作商品气管输。有些天然气中尚有氩（ Ar ）、氦（ Ne ）、氦（ He ）等稀有气体存在，迄今含 He 天然气几乎是工业用 He 的唯一经济来源。

按 GPA 分类天然气及有关产物的组分如表 1—3 所示。

表 1—3 天然气及其有关产物的组分

产物名称	He	N ₂	CO ₂	H ₂ S	RSH ^①	C ₁	C ₂	C ₃	iC ₄	nC ₄	iC ₅	nC ₅	C ₆₊
1. 惰性气体	●	●	●										
2. 天然气	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
3. 酸气			●	●	●								
4. 液化天然气 (LNG)		●				●	●	●	●	●			

续表

产 物 名 称	He	N ₂	CO ₂	H ₂ S	RSH ^①	C ₁	C ₂	C ₃	iC ₄	nC ₄	iC ₅	nC ₅	C ₆ +
5. 液化石油气 (LPG)							●	●	●	●			
6. 天然汽油								●	●	●	●	●	●
7. 天然气凝液 (NGL)							●	●	●	●	●	●	●
8. 稳定后凝析油									●	●	●	●	●

①包括硫醚等有机硫。

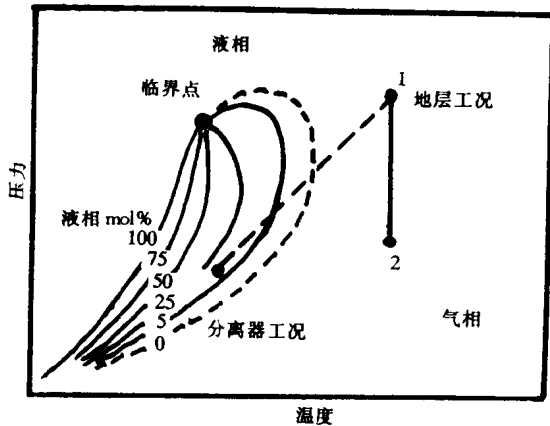


图 1—2 湿气的相图

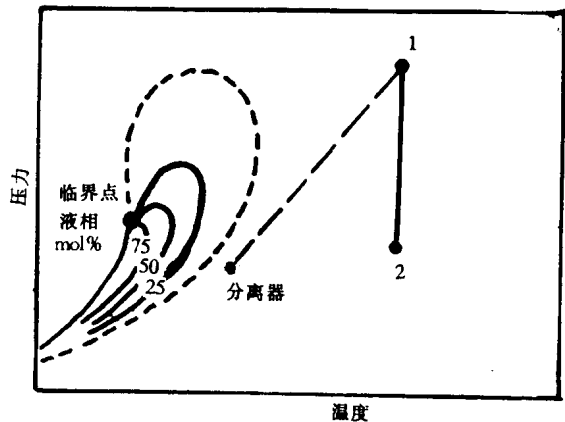


图 1—3 干气的相图

美国历来都是按乙烷、丙烷、丁烷、异丁烷、丙—丁烷混合物、未加工的天然气凝液 NGL 以及脱丁烷的天然汽油等部分来统计 NGL 产量。实际上意味着上述产品都是天然气加工的目的产物——天然气液体或凝液 (NGL)。

气井气大多数都是“干气”——气中含少量或几乎没有工业回收价值的液体产物，伴生气和凝析气大多数都是可供加工回收液体产物的“湿气”（或“富气”）。这些气体的相态特性如图 1—2~1—4 所示。凝析气田在开采过程中会出现如图 1—4 的“反凝析现象”，与常例相反，在采气过程中因压力降低或温度升高而析出液体。这样，天然气工业地面工程部分的主要任务是对不同气质或含不同非烃类的杂质的天然气作必要的加工、处理，以回收有用的组分如 NGL，He 等，或脱除去有害的杂质（如酸性气体或水）以作为符合管输标准的商品气售出。

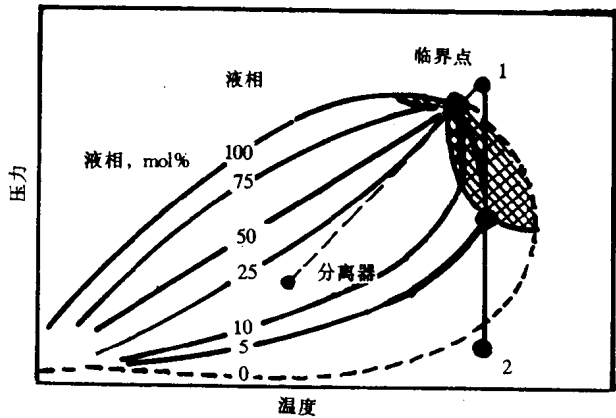


图 1—4 反凝析区相图

天然气的加工和处理两者都是一种行为。事实上如 NGL 回收，He 的提取等产品（甚至

NGL) 的获得都属加工范畴, 而天然气的处理则大多数都指酸性天然气的脱硫、脱碳的净化, 以获得符合管输标准的商品气。

天然气工业地面工程部分的加工、处理的构成如图 1—5 所示。

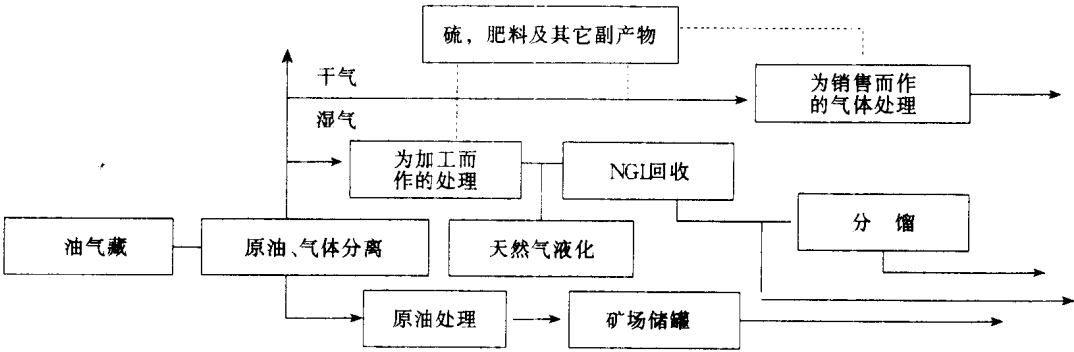


图 1—5 天然气的加工、处理的构成情况

因此出于特定的目的, 为利用组分复杂的天然气必然涉及如 NGL 回收、脱硫净化、脱水, 乃至硫回收、尾气处理等诸多的工业过程。

第一节 国外发展及现状

一、天然气加工

三类有代表性天然气加工过程是 NGL 回收、提氮、天然气液化。

1. 天然气凝液 (NGL) 的回收

凡自天然气中回收得到的 C₂⁺ 皆称为 NGL。

1988 年世界上现有天然气加工回收 NGL 装置 1424 套, 比以往略有增加 (1985 年 1439 套, 1986 年 1407 套, 1987 年 1406 套)。主要集中在北美, 1990 年美国有近 760 套, 加拿大为 525 套, 两者即占世界上总套数的 90%。1989 年美、加两国装置的处理能力、实际处理量和 NGL 产量分别为世界上总量的 62%, 63% 和 60%。

1989 年一些国家天然气加工量及 NGL 产量见表 1—4。

表 1—4 世界各国的 NGL 回收情况

国 家	装置或工厂数	加工能力 10 ⁸ m ³ /d	实际加工量 10 ⁸ m ³ /d	NGL 产量, 10 ⁴ m ³ /d	
				NGL	乙 烷
美国	761	18.99	12.1	24.43	2.40
加拿大	512	7.05	4.28	8.34	2.44
意大利	17	2.15	0.45	0.01	
阿根廷	14	0.42	0.42	0.70	0.26
巴西	11	0.13	0.12	0.33	
匈牙利	12	0.31	0.13	0.54	

续表

国 家	装置或工厂数	加工能力 $10^8\text{m}^3/\text{d}$	实际加工量 $10^8\text{m}^3/\text{d}$	NGL 产量, $10^4\text{m}^3/\text{d}$	
				NGL	乙 烷
墨西哥	11	1.32	0.95	4.83	4.83
委内瑞拉	14	0.82	0.72	1.60	0.08
英国	9	1.06	0.43	0.98	
印度尼西亚	10	1.10	0.99	0.77	0.01
利比亚	7	0.52	0.35	2.34	
巴基斯坦	7	0.12	0.05	0.02	
澳大利亚	5	0.73	0.39		
阿布扎比	5	0.45	0.36	0.21	
埃及	8	0.37	0.34	0.71	

天然气的加工利用率指经加工的天然气量与生产的天然气总量之比。美国一般为 80% 以上, 需指出的是天然气加工利用率和生产的天然气气质有关, 若生产总量中气井干气占的份额高则相对天然气的加工利用率就低, 美国的天然气加工利用率高说明它生产的天然气大都是“湿气”。对气井干气产量占甚大比例的总天然气产量, 其天然气加工利用率应以总天然气生产量中的伴生气和凝析气田气的产量作衡量天然气加工利用率的基准才比较客观。

大致可以以“井口汽油时期”(1900~1920 年), “天然汽油时期”(1920~1940 年), “液化石油气时期”(1940~1960 年), “乙烷时期”(1960 年~), 四个时期来概括以美国为代表的天然气加工的发展过程。

井口汽油时期。通过简单的压缩、冷却, 甚至仅以井口三相分离器从井口气流中分离出较重的组分, 回收液体。所得液体产物是不稳定的多组分混合物, 待其中轻组分(如 C_3)挥发完后得到的液体产物概称为凝析油。

天然汽油时期。主要采用常温下油吸收工艺。回收液体产物生产稳定后的轻油 C_5^+ ——天然汽油 [有一定的蒸气压要求, 雷氏 (Reid) 蒸气压 (RVP)], 以及脱出丙、丁烷。视采用吸收油的相对分子质量不同而解吸塔的设计也不同: ①若用的是低相对分子质量的吸收油, 甚至是装置本身的液体产物, 则解吸塔设计成分馏塔, 塔底产物分成二股, 一股去吸收, 一股作产品输出; ②若用的是高相对分子质量的吸收油(如轻柴油)则解吸塔设计成汽提塔的形式, 以蒸气或其它流体从富液中汽提出被回收的组分, 塔底贫液回到前端回收部分。

与“井口汽油时期”相比, 油吸收法提高了 NGL 的收率也回收了少部分的丙丁烷。所得的天然汽油或直接兑入汽油作车用汽油, 或通过裂解技术并采用抗爆添加剂后, 提高车用汽油的辛烷值。

液化石油气时期。主要采用了低温吸收工艺, 以提高丙丁烷的收率。主要是二次世界大战期间及战后石化工业日益对 LPG 的增长需要, 从而促进了低温油吸收法的发展, 其改革只是在贫液入吸收塔前先经冷却到 -30°C 左右, 冷源主要靠丙烷的压缩致冷, 这采用了低温技术的改进工艺大大提高了丙、丁烷的收率。

乙烷时期。50 年代后期乙烯工业崛起, 为此大量建立低温膨胀机装置, 提取深度增加, 乙烷回收率达 70% 以上, 90% 以上的乙烷用为制乙烯原料, 自此乙烷产量急剧上升。

一些常用的 NGL 方法的回收率如表 1—5 所示。美国工艺方法构成历年的变化见图 1—6。

表 1—5 各种 NGL 回收方法的收率 %

方 法 名 称	乙 烷	丙 烷	丁 烷	天然汽油 (C ₅ +))
常温油吸收	5	40	75	87
低温油吸收	15	75	90	95
简单冷冻	25	55	93	97
阶式冷冻	70	85	95	100
焦耳—汤姆逊节流	70	90	97	100
透平膨胀	85	97	100	100
马拉法 (Mehra Process)	2~90	2~100	100	100

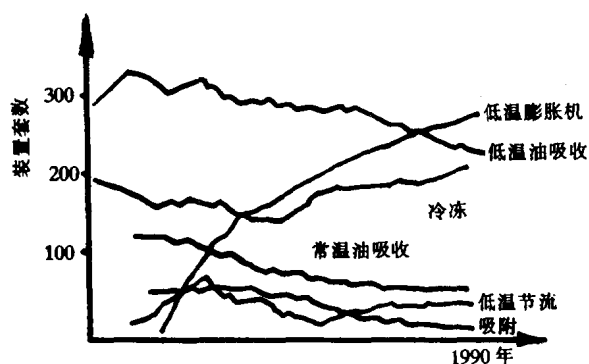


图 1—6 美国 NGL 回收工艺方法的发展趋势

2. 天然气提氦

氦 (He) 气是重要的战略物质, 在不同历史时期 He 的用途分配不一, 但有一点是相同的, 即几乎绝大部分用于军事或尖端科技领域 (表 1—6)。1990 年美国约产精氦 ($> 99.99\text{mol}\%$) $8000 \times 10^8 \text{m}^3$, 输出约 25%。

我国预期计划氦将用于合成呼吸气、配气、火箭及航卫发射、石英玻璃保护用气、光纤通讯、分析色谱、飞艇提升、低温超导、检漏

及其它等, 要着重指出的是近期 He 的需耗约增长 2.5 倍左右。

表 1—6 1985 年美国氦消费结构

用 途	分配比例, %	备 注
焊接	25	
低温工程	24.5	低温超导研究及核反应堆冷却
加压及吹扫	22.8	航天飞机的吹扫、冲洗、加压
控制环境	11.9	钛、锆生产
呼吸混合气	10.8	深潜人口呼吸气
检漏	2.4	
其它	2.2	

世界上消耗的 He 气主要来自含 He 天然气, 因地区不同天然气中含 He 量也有相当大的变化, 大致可分为: 富 He 的天然气, 含 He $> 0.1\text{mol}\%$; 贫 He 的天然气, He $> 0.01\text{mol}\%$ 。与之相比, 大气中 He 含量约为 $5.4 \times 10^{-4}\text{mol}\%$, 即使目前认为无经济价值的贫 He 天然气, 其 He 含量也要比大气中的 He 高出两个数量级, 故迄今含 He 天然气几乎是唯一经济的提 He 来源。

但是天然气消耗是如此的巨大，以致于 He 回收不可能与之同步（受市场及其储藏的限制），因此必然会出现两种情况：随着天然气烧掉而损耗的 He 远大于回收的 He；因天然气耗竭而不得不转向花费更大的贫 He 天然气乃至从非燃料型的天然气中提取 He。一旦因天然气 He 资源耗竭而被迫转向空气中回收 He，则将花费巨大的能量代价。基于这一事实，美国政府居安思危预计到以后科技发展的需要，早在 1961 年就提出了著名的：“…面向 21 世纪而储存 1.8Gm^3 （1961 ~ 1983 年）He…” 氦保护规划。美国花费了 4 亿多美元储存了 $1.05\text{Gm}^3\text{He}$ 。

天然气提 He 工艺方法的发展与生产的需要有密切的联系。深冷法（Cryogenic process）一直是天然气提 He 的基本工艺方法，近年来因膜分离法成熟且应用日广，也多有介入，与深冷法组合成不同的流程，以提高经济效益。

此外，例如美国随着燃料型含 He 天然气资源的枯竭，在 1985 年不得不转向开发早在 1960 年发现的因无法利用而封存的高酸气非燃料型含 He 天然气藏（ CO_2 67mol%， H_2S 4mol%， N_2 8mol%， $\text{He} > 0.5\text{mol}\%$ ，甲烷余量），生产 60mol% 的粗 He，纯 N_2 ，纯甲烷（ $\text{CO}_2 \leq 2\text{mol}\%$ ）三种产品，为此专门开发了与历史上原有的提 He 方法迥异的深冷工艺技术以适应这种高酸性气体的加工，以提高技术经济效益。

3. 天然气液化

天然气中主要是甲烷（临界温度 190.72K，临界压力 4.639MPa），在常压下深冷到 111K 即被液化，液化后的天然气（LNG）体积缩小到气态时的 1/600 左右。迄今 LNG 是跨地区远洋储运的唯一有效手段。尤其重要的是 2000 年后天然气产量的增长部分几乎将全部来自发展中的国家，这就意味着经济发达的国家能以“买”的方式从发展中国家获得必需的能源——天然气。从能源地缘角度来讲，天然气液化后运输为此提供了一种方便的手段。对日本这样的一个国家来说，几乎是唯一可供选择的方式。

1959 年“甲烷先锋”（Methane Pioneer）号液化天然气油轮，首先从美国路易斯安娜州查理斯湖运 $5000\text{m}^3\text{LNG}$ ，横渡大西洋成功地航抵英国凯凡（Canvey）岛。1961 年建造各为 27400m^3 的“甲烷进步”号和“甲烷公主号”。1964 年法国 Technip 公司和美国的 Prichard 公司合作，利用成熟的阶式循环率先在阿尔及利亚亚泽（Arzew）建成第一个大型的 LNG 工厂，因技术问题投产 5 年后才达到设计标准 $1500 \times 10^4\text{m}^3/\text{d}$ 的液化能力，1965 年法国的“儒勒·凡尔纳（Jules Verne）”号首运 $25000\text{m}^3\text{LNG}$ 自亚泽安全抵达里哈佛尔港。自此，经近 20 多年的发展，LNG 在世界天然气贸易中独树一帜，形成生产、储存、海运、接受及再气化、LNG 冷量利用、调峰等一系列完整的 LNG 工业。自此，LNG 在天然气国际商贸中日益坚挺。

LNG 工厂有三种类型：主要供出口的基地型 LNG 工厂，其特点是 LNG 生产能力很巨大；平时液化长输管线中相对富余的天然气，储存起来供冬令高峰负荷期间汽化后作补充用的调峰型 LNG 工厂，特点是液化能力不大但是储存容量和再气化能力都较大；卫星型 LNG 装置是调峰型的一种，本身无液化能力，靠用船或车从附近的中心运来 LNG，存储起来到高峰时汽化补充使用。调峰型 LNG 工厂一年开工 200 ~ 250d 以充满 LNG 储罐，待冬令高峰期气化后供 7 ~ 10d 的用气。

随着 LNG 生产的发展，天然气液化工艺经历了繁—简—繁的变化，其中心是节能，提高技术经济效益。阿尔及利亚亚泽工厂起始阶段首先移植应用由丙烷—乙烯—甲烷三段各有三个温度水平的阶式循环（Cascade Cycle）。虽然热效率很高，但是三台压缩机组，冷换设