

“九五”中国石油天然气集团公司级重点教材

CNPC

高等学校教学用书

# 天然气 处理与加工工艺

王遇冬 主编

TIANRANQI  
CHULI  
YU  
JIAGONG  
GONGYI

PETROLEUM INDUSTRY PRESS  
石油工业出版社

(北京)

64

25

“九五”中国石油天然气集团公司级重点教材

登录号	126107
分类号	TE 64
种次号	005

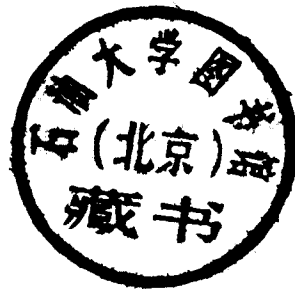
高等学校教学用书

# 天然气处理与加工工艺

王遇冬 主编



石油0122375



石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书是从我国石油天然气开采、加工生产的实际情况出发,结合国外天然气处理与加工工艺技术的发展,收集、参考了大量的技术资料编写而成的。本书着重讲述了天然气处理与加工工艺的基本原理、方法、工艺计算、新技术及其发展趋势。

本书可供石油高校化学工程与工艺专业学生使用,也可供从事天然气处理与加工生产、科研及设计工作的工程技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

天然气处理与加工工艺/王遇冬主编.  
北京:石油工业出版社,1999.4  
高等学校教学用书  
“九五”中国石油天然气集团公司级重点教材  
ISBN 7-5021-2525-6

I. 天…

II. 王…

III. ①天然气-处理-高等学校-教材

②天然气-生产工艺-高等学校-教材

IV. TE64

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 04373 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 15½ 印张 384 千字 印 1—2000

1999 年 4 月北京第 1 版 1999 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2525-6/TE·2063 (课)

定价: 21.00 元

# 前 言

自 70 年代末期以来,我国的天然气工业发展十分迅速。进入 90 年代后,随着我国陆上及海疆新发现的陕甘宁中部盆地、南海岸城 13-1 等大型气田及其它一批整装中型气田的陆续开发,我国的天然气工业又有了更大的发展。

天然气处理与加工是天然气工业中一个十分重要的环节,也是一门涉及化学工程、低温工程和石油工程等学科的综合性的工程技术。近 20 多年来,我国的天然气处理与加工能力和技术都有很大提高,呈现出一派大好形势。为适应我国天然气工业迅速发展的需要,国内一些石油高等学校的化学工程与工艺专业也陆续开设了《天然气处理与加工工艺》课程。

1992 年,我们曾根据教学要求编写了一本有关天然气处理与加工工艺的讲义在西安石油学院内部使用,经过多年教学实践并反复征求各方面意见,结合国内外天然气处理与加工工艺技术的最新发展,在原讲义的基础上我们编写了《天然气处理与加工工艺》一书,以供石油高等学校化学工程与工艺专业学生使用。根据教学计划,《天然气处理与加工工艺》是在三四年级开设的专业课程之一。因此,凡已在《化工原理》、《化工热力学》、《石油加工工程》等课程中介绍过的内容,或正在《化工分离工程》、《化工系统工程》等课程系统介绍的内容,本书都不再重复,而只重点介绍具有天然气处理与加工工艺特点的基本原理、技术、工艺计算及发展趋势。本书浓度的表示方法出现多种形式,考虑到实际使用上的方便而又符合有关计量要求的规定,本书以 % ( $\varphi$ ) 表示体积分数;% ( $\chi$ ) 表示摩尔分数;% ( $w$ ) 表示质量分数。

由于本书编者大多曾在石油系统科研、设计单位长期从事天然气处理与加工工艺方面的有关工作,所以在编写中还注意把基本原理、工艺技术及生产过程等结合起来,因此本书也可供从事天然气处理与加工生产、科研及设计等工作的工程技术人员参考。

本书共十章。其中,第二、三、九章由陈慧芳编写,第六、十章由张立希编写,其余各章由王遇冬编写。王遇冬任主编。徐文渊、王开岳任主审。其中,第一、四、五、六、十章由徐文渊审稿,第二、三、七、八、九章由王开岳审稿。本书确定为中国石油天然气集团公司级重点教材。

本书在编写过程中得到四川、华北、胜利等油气田有关工程技术人员的大力协助。

由于编者学识及水平有限,书中难免有不妥之处,敬请各位专家、同行及广大读者批评指正。

编 者

1998 年 6 月于西安

# 目 录

<b>第一章 概论</b> .....	( 1 )
第一节 天然气在国民经济中的重要性及其分类与组成.....	( 1 )
第二节 天然气及其加工产品的质量要求.....	( 4 )
<b>第二章 天然气的相特性</b> .....	( 13 )
第一节 烃类的相特性.....	( 13 )
第二节 烃—水体系相特性.....	( 18 )
第三节 烃—二氧化碳体系相特性.....	( 32 )
<b>第三章 防止天然气水合物形成的方法</b> .....	( 38 )
第一节 热力学抑制剂法.....	( 38 )
第二节 动力学抑制剂及防聚剂法.....	( 45 )
<b>第四章 吸收法脱水</b> .....	( 49 )
第一节 天然气脱水的方法.....	( 49 )
第二节 甘醇脱水工艺及设备.....	( 53 )
第三节 甘醇脱水工艺计算.....	( 60 )
第四节 甘醇质量在脱水装置操作中的重要性.....	( 69 )
<b>第五章 吸附法脱水</b> .....	( 72 )
第一节 脱水吸附剂的选择.....	( 72 )
第二节 固体吸附剂脱水工艺及设备.....	( 80 )
第三节 固定床吸附过程特性及计算.....	( 85 )
第四节 吸附法在酸性天然气脱水中的应用.....	( 100 )
<b>第六章 天然气凝液回收</b> .....	( 103 )
第一节 天然气凝液回收的目的和方法.....	( 103 )
第二节 制冷方法.....	( 109 )
第三节 天然气凝液回收工艺.....	( 132 )
<b>第七章 天然气脱硫</b> .....	( 152 )
第一节 脱硫方法的分类与选择.....	( 152 )
第二节 醇胺法.....	( 156 )
第三节 砒胺法及其它脱硫方法.....	( 168 )
<b>第八章 克劳斯法硫磺回收</b> .....	( 181 )
第一节 克劳斯法硫磺回收基本原理.....	( 181 )
第二节 工艺流程和主要设备.....	( 186 )
第三节 操作条件分析及影响硫回收率的因素.....	( 190 )
第四节 硫磺回收催化剂.....	( 197 )
第五节 克劳斯法工艺计算.....	( 202 )
第六节 克劳斯法发展动向.....	( 209 )

第七节 硫磺的储存与装运.....	(213)
<b>第九章 克劳斯法装置的尾气处理.....</b>	<b>(218)</b>
第一节 尾气处理方法的分类.....	(218)
第二节 几种尾气处理方法简述.....	(221)
第三节 尾气处理的发展动向.....	(224)
<b>第十章 液化天然气与压缩天然气.....</b>	<b>(227)</b>
第一节 天然气液化发展概述.....	(227)
第二节 天然气液化工艺.....	(229)
第三节 天然气提氮.....	(234)
第四节 压缩天然气.....	(236)
<b>参考文献.....</b>	<b>(239)</b>

# 第一章 概 论

## 第一节 天然气在国民经济中的重要性及其分类与组成

### 一、天然气在国民经济中的重要性

据第 14 届世界石油大会有关报告统计,天然气的最大用户是城镇居民、公共建筑和商业部门,约占总用量的 41.5%;其次是工业部门,约占 37%,主要用作生产化工产品和工业燃料的基本原料;再次是发电厂,约占 19% 以上;运输部门所占比例不足 1%。预计今后 50 年内,天然气的应用将会显著扩大,天然气转化生产合成氨、甲醇和烯烃、芳烃等技术将会取得新的进展,天然气用作汽车燃料也将使天然气汽车得到进一步的推广。

天然气与其它燃料相比,具有使用方便、经济、热值高、污染少等优点,是一种在技术上已经得到证实的优质清洁燃料。天然气代替其它燃料,可以减少一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)及烃类等的排放,有利于环境保护。因此,它不仅被广泛作为钢铁、非金属矿产、玻璃、食品、陶瓷、造纸等工业的能源,同时也是发电厂的主要燃料。特别是采用天然气联合循环发电技术后,投资费用仅为煤炭和核发电厂 2/3 左右,对空气和水的污染也少,因而使得以天然气为燃料的发电厂更加具有竞争力。

天然气的一些特性使它有可能成为一种很有吸引力的汽油替代燃料。它的价格和汽车废气排放指标都低于汽油。据统计,截至 1996 年,全世界投入运营的天然气汽车已达 100 多万辆。

天然气的主要组分是甲烷,此外还含有乙烷、丙烷、丁烷及戊烷以上烃类,是重要的基本有机化工原料。以天然气为原料,可以生产出合成氨、甲醇、低碳含氧化合物、合成液体燃料等种类繁多的化工产品。至今,全世界已有 10% 的天然气用于制取化工产品,年产量已达到 1.6 亿 t。据统计,1995 年全世界用天然气制取的合成氨和甲醇分别占两类产品总产量的 84% 和 90%。值得指出的是,由天然气经甲醇(GTM)生产低分子烯烃(MTO)的技术已在 90 年代初期完成中间实验,并正在加速工业化。由于它的投资回收率比石脑油裂解高很多,因此,对于天然气资源丰富、价格便宜的地区,这种生产烯烃的技术将具有很强的竞争力。

据预测,在今后几十年中天然气在发达国家能源需求中的重要作用还会有所增加。天然气作为一种优质清洁燃料,在许多领域将会代替日趋减少的石油。美国内政部的资料预测,进入 21 世纪后天然气将逐步取代石油,并在世界能源消费结构中占据主导地位,见图 1-1。

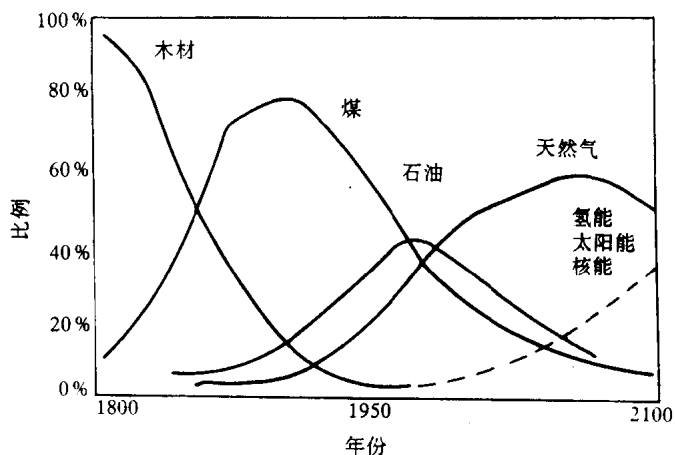


图 1-1 世界能源消费结构趋势

## 二、天然气的组成和分类

### 1. 天然气的组成

天然气是由烃类和非烃类组成的复杂混合物。大多数天然气的主要成分是气体烃类，此外还含有少量非烃类气体。天然气中的烃类基本上是烷烃，通常以甲烷为主，还有乙烷、丙烷、丁烷、戊烷以及少量的己烷以上烃类 ( $C_6^+$ )。在  $C_6^+$  中有时还含有极少量的环烷烃（如甲基环戊烷、环己烷）及芳香烃（如苯、甲苯）。天然气中的非烃类气体，一般为少量的氮气、氧气、氢气、二氧化碳、水蒸气、硫化氢，以及微量的惰性气体如氦、氩、氙等。天然气中的水蒸气一般呈饱和状态。

天然气的组成并非固定不变，不仅不同地区油、气藏中采出的天然气组成差别很大，甚至同一油、气藏的不同生产井采出的天然气组成也会有区别。我国一些油、气田的天然气组成见表 1-1。

表 1-1 我国一些油、气田天然气组成 (干基)

组分	四川	四川	大庆	华北	新疆	华北	大庆	陕西
	威远气藏气	卧龙河气藏气	杏南伴生气	任北伴生气	柯克亚凝析气	苏桥凝析气	阿拉辛气藏气	靖边气藏气
	$\varphi_B^{\oplus}, \%$							
$C_1^{\text{②}}$	86.36	97.14	68.26	59.37	74.68	78.58	91.35	93.95
$C_2$	0.11	0.43	10.58	6.48	8.38	8.26	0.31	0.77
$C_3$	—	0.03	11.20	12.02	4.00	3.13	0.12	0.50
$C_4$	—	0.01	5.96	9.21	3.31	1.43	—	—
$C_5$	—	—	1.91	3.81	2.69	0.55	—	—
$C_6$	—	—	0.66	1.34	2.68	0.39	—	—
$C_7^+$	—	—	0.36	1.40	—	5.45	—	—
$CO_2$	5.01	1.46	0.20	4.58	0.26	1.41	0.22	4.70
$N_2$	7.20	0.73	0.55	1.79	3.99	0.80	8.00	—
He	0.30	—	—	—	—	—	—	—
Ar	0.03	—	—	—	—	—	—	—
$H_2S$	0.99	0.20	—	—	—	—	—	0.08
合计	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

①本书中以  $\varphi_B$  或  $\varphi$  表示各组分的体积分数。

② $C_1$  表示  $CH_4$ ， $C_2$  表示  $C_2H_6$ ，依次类推。

世界上也有少数的天然气中含有大量的非烃类气体，甚至其主要成分是非烃类气体。例如，我国河北省赵兰庄、加拿大艾伯塔省 Bearberry 及美国南得克萨斯气田的天然气中，硫化氢含量均高达 90% 以上。我国广东省沙头圩气田天然气中二氧化碳含量高达 99.6%。美国北达科他州内松气田天然气中氮含量高达 97.4%，亚利桑那州平塔丘气田天然气中氦含量高达 9.8%。

### 2. 天然气的分类

天然气的分类方法目前尚不统一，各国都有自己的习惯分法。常见的分法如下所述。

(1) 按产状分类 可分为游离气和溶解气。游离气即气藏气，溶解气即油溶气和水溶



气、固态水合物气以及致密岩石中的气等。

(2) 按经济价值分类 可分为常规天然气和非常规天然气。常规天然气是指在目前技术经济条件下可以进行工业开采的天然气，主要是伴生气（也称油田气、油藏气）和气藏气（也称气田气、气层气）。非常规天然气主要是指煤层甲烷气、水溶气、致密岩石中的气及固态水合物气等。其中，除煤层甲烷气外，其它非常规天然气由于目前技术经济条件的限制尚未投入工业开采。

(3) 按来源分类 可分为与油有关的气（包括伴生气、气顶气等）和与煤有关的气；天然沼气，即由微生物作用产生的气；深源气，即来自地幔挥发性物质的气；化合物气，即指地球形成时残留地壳中的气，如深海海底的固态水合物气等。

(4) 按组成分类 分类方法大致为：

1) 以天然气中烃类组成分类可分为干气和湿气、贫气和富气。对于从气井井口采出的，或由油、气田矿场分离器分出的天然气而言，其划分方法如下：

①干气：每  $\text{m}^3$ <sup>①</sup> 气中，戊烷以上烃类 ( $\text{C}_5^+$ ) 按液态计小于 10mL 的天然气。

②湿气：每  $\text{m}^3$  气中，戊烷以上烃类 ( $\text{C}_5^+$ ) 按液态计大于 10mL 的天然气。

③贫气：每  $\text{m}^3$  气中，丙烷以上烃类 ( $\text{C}_3^+$ ) 按液态计小于 100mL 的天然气。

④富气：每  $\text{m}^3$  气中，丙烷以上烃类 ( $\text{C}_3^+$ ) 按液态计大于 100mL 的天然气。

通常，人们还习惯将脱水（脱除水蒸气）前的天然气称为湿气，脱水后露点降低的天然气称为干气；将回收天然气凝液前的天然气称为富气，回收天然气凝液后的天然气称为贫气。此外，也有人将干气与贫气、湿气与富气相提并论。由此可见，它们之间的划分并不是十分严格的。因此，本书以下述及的富气与湿气、贫气与干气也是没有严格的区别。

2) 以天然气中硫化氢、二氧化碳含量分类可分为净气（甜气、非酸性天然气）和酸气（酸性天然气、含硫气）。

①净气：指硫化氢和二氧化碳等含量甚微或不含有，不需脱除即可管输或达到商品气质量要求的天然气。

②酸气：指硫化氢和二氧化碳等含量超过有关质量要求，需经脱除才能管输或成为商品气的天然气。

(5) 我国习惯分法 我国习惯上把天然气分为伴生气、气藏气和凝析气。

1) 伴生气，系产自油藏（含油储集层）的气，故也称为油田气。伴生气指在地下储集层中伴随原油共生，或呈溶解气形式溶解在原油中，或呈自由气形式在含油储集层上部游离存在（即气顶气）的天然气。当伴生气随原油一起从地下储集层采出到地面后，通常先在矿场分离器中与原油进行初步分离。分离出的原油往往蒸汽压较高，为防止其在储运中产生蒸发损耗，又常经过原油稳定过程将原油中的甲烷、乙烷、丙烷、丁烷及戊烷等组分脱除掉。脱出的这些气体烃类称为原油稳定气。无论是从矿场分离器分出的气体，还是经原油稳定过程回收的稳定气，都属于伴生气范畴。

伴生气一般多为富气，主要成分是甲烷、乙烷，其次是一定数量的丙烷、丁烷和戊烷以上的烃类，有时还有少量的非烃类气体。

2) 气藏气，系产自气藏（含气储集层）的气，也称为气田气、气层气。气藏气指在地下储集层中呈均一气相存在，采出地面仍为气相的天然气。这类气通常都是贫气，主要成分

① 此处均指 20℃ 及 101.325kPa 状态下的体积。

是甲烷，其次是少量乙烷、丙烷、丁烷和非烃类气体。

3) 凝析气，系产自具有反凝析特征气藏的气。凝析气指在地下储集层中呈均一气相存在，在开采过程中当气体温度、压力降至露点状态以下时会发生反凝析现象而析出凝析油的天然气。凝析气除含甲烷、乙烷外，还含一定数量的丙烷、丁烷及戊烷以上烃类，直至天然汽油和柴油馏分等。

## 第二节 天然气及其加工产品的质量要求

### 一、商品天然气的质量要求

表 1-1 列举的是从气井井口采出或从矿场分离器分出的天然气组成。通常，这些天然气中含有不同数量的、在大气条件下处于液相的较重烃类，以及水蒸气、硫化物（如硫化氢）、二氧化碳、氮和氦等非烃类气体，一般不适宜大多数用户直接使用，故有时也称为粗天然气。它们大多需要经处理以脱除不希望有的组分（如硫化氢、水蒸气）后方可作为商品天然气。此外，为了回收与利用天然气中的乙烷及更重烃类以及氮、氦等非烃类气体，则需对天然气进行加工，将这些组分从天然气中分离出来。然后，再将残余气（主要是甲烷）作为商品天然气外输，或送回油、气田内部回注，也可将其液化后（液化天然气）外运。

商品天然气的质量要求不是按其组成，而是根据经济效益、安全卫生 and 环境保护等三方面的因素综合考虑制订的。不同国家，甚至同一国家不同地区、不同用途的商品天然气质量要求均不相同，因此，不可能以一个国际标准来统一。此外，由于商品天然气多通过管道输往用户，又因用户不同，对气体质量要求也不同。通常，商品天然气的质量指标主要有下述几项。

#### 1. 热值（发热量）

热值是表示燃气（即气体燃料）质量的重要指标之一，可分为高热值（高位发热量）与低热值（低位发热量），单位为  $\text{kJ}/\text{m}^3$  或  $\text{kJ}/\text{kg}$ ，亦可为  $\text{MJ}/\text{m}^3$  或  $\text{MJ}/\text{kg}$ 。不同种类的燃气，其热值差别很大。天然气的热值大约是人工燃气的 2 倍，见表 1-2 所示。

表 1-2 各种燃气低热值（概略值）

燃 气	天然气 <sup>②</sup>		人 工 燃 气		
	气藏气	伴生气	焦炉煤气	直立炭化炉煤气	压力气化煤气
热值, $\text{MJ}/\text{m}^3$ <sup>①</sup>	31.4~36.0	41.5~43.9	14.7~18.3	16.2~16.4	15.3~15.5

①此处  $\text{m}^3$  指 101.325kPa、0℃ 状态下的体积。

②未经加工或处理。

燃气热值也是用户正确选用燃烧设备或燃具时所必须考虑的一项质量指标。

华白（Wobb）指数是代表燃气特性的一个参数。它的定义式为

$$W = \frac{H}{\sqrt{d}}$$

式中  $W$ ——华白指数，或称热负荷指数；

$H$ ——燃气热值， $\text{kJ}/\text{m}^3$ ，各国习惯不同，有的取高热值，有的取低热值，我国取高

热值；

$d$ ——燃气相对密度（设空气的  $d=1$ ）。

假设两种燃气的热值和相对密度均不相同，但只要它们的华白指数相等，就能在同一燃气压力下和在同一燃具或燃烧设备上获得同一热负荷。换句话说，华白指数是燃气互换性的一个判定指数。只要一种燃气与燃具所使用的另一种燃气的华白指数相同，则此燃气对另一种燃气具有互换性。各国一般规定，在两种燃气互换时华白指数的允许变化不大于  $\pm 5\% \sim \pm 10\%$ 。在两种燃气互换时，热负荷除与华白指数有关，还与燃气粘度等性质有关，但在工程上这种影响往往可忽略不计。

由此可见，在具有多种气源的城镇中，由燃气热值和相对密度所确定的华白指数，对于燃气经营管理部门及用户都有十分重要的意义。

在一些国家的商品天然气质量要求中，都对其热值有一定要求。例如在北美各国，一般要求商品天然气的热值不低于  $34.5 \sim 37.3 \text{ MJ/m}^3$ 。

## 2. 烃露点

此项要求是用来防止在输气或配气管道中有液烃析出。析出的液烃聚集在管道低洼处，会减少管道流通截面。只要管道中不析出游离液烃，或游离液烃不滞留在管道中，烃露点要求就不十分重要。烃露点一般根据各国具体情况而定，有些国家规定了在一定压力下允许的天然气最高烃露点。例如，加拿大艾伯塔省规定在  $5.5 \text{ MPa}$  下的最高烃露点为  $-10^\circ\text{C}$ 。

## 3. 水露点（也称露点）

此项要求是用来防止在输气或配气管道中有液态水（游离水）析出。液态水的存在会加速天然气中酸性组分（ $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CO}_2$ ）对钢材的腐蚀，还会形成固态天然气水合物，堵塞管道和设备。此外，液态水聚集在管道低洼处，也会减少管道的流通截面。冬季水会结冰，也会堵塞管道和设备。

水露点一般也是根据各国具体情况而定。在我国，对管输天然气要求其水露点应比输气管道中气体可能达到的最低温度低  $5^\circ\text{C}$ 。也有一些国家是规定天然气中的水蒸气含量（也称水含量），例如，加拿大艾伯塔省规定水蒸气含量不高于  $65 \text{ mg/m}^3$ 。

## 4. 硫含量

此项要求主要是用来控制天然气中硫化物的腐蚀性和对大气的污染，常用  $\text{H}_2\text{S}$  含量和总硫含量表示。

天然气中硫化物分为无机硫和有机硫。无机硫指硫化氢（ $\text{H}_2\text{S}$ ），有机硫指二硫化碳（ $\text{CS}_2$ ）、硫化羰（ $\text{COS}$ ）、硫醇（ $\text{CH}_3\text{SH}$ 、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{SH}$ ）、噻吩（ $\text{C}_4\text{H}_4\text{S}$ ）、硫醚（ $\text{CH}_3\text{SCH}_3$ ）等。天然气中的大部分硫化物为无机硫。

硫化氢及其燃烧产物二氧化硫，都具有强烈的刺鼻气味，对眼粘膜和呼吸道有损坏作用。空气中硫化氢浓度（ $\varphi$ ）大于  $0.06\%$ （约  $910 \text{ mg/m}^3$ ）时，人呼吸半小时就会致命。当空气中含有  $0.05\%$ （ $\varphi$ ） $\text{SO}_2$  时，人呼吸短时间生命就有危险。

硫化氢又是一种活性腐蚀剂。在高压、高温以及有液态水存在时，腐蚀作用会更加剧烈。硫化氢燃烧后生成的二氧化硫和三氧化硫，也会造成对燃具或燃烧设备的腐蚀。因此，一般要求天然气中的硫化氢含量不高于  $6 \sim 20 \text{ mg/m}^3$ 。除此以外，对天然气中的总硫含量也有一定要求，一般要求小于  $480 \text{ mg/m}^3$ 。

## 5. 二氧化碳含量

二氧化碳也是天然气中的酸性组分，在有液态水存在时，对管道和设备也有腐蚀性。尤

其当硫化氢、二氧化碳与水同时存在时，对钢材的腐蚀更加严重。此外，二氧化碳还是天然气中的不可燃组分。因此，一些国家规定天然气中二氧化碳的含量（ $\varphi$ ）不高于2%~3%。

此外，北美国家的商品天然气质量要求中还规定了最高输气温度和最高输气压力等指标。

原中国石油天然气总公司发布的行业标准《天然气》（SY 7514—88）已从1989年开始实施。此标准适用从油、气田采出，经矿场分离和处理后用管道输送至用户，并按产品类别分别作为民用燃料、工业原料和工业燃料的天然气。标准中对商品天然气的质量要求见表1-3。

表1-3 我国天然气质量要求

项 目		质 量 指 标			
		I	II	III	IV <sup>②</sup>
高位发热量 MJ/m <sup>3</sup> <sup>①</sup>	A组	>31.4 (>7500 kcal/m <sup>3</sup> )			
	B组	14.65~31.4 (3500~7500kcal/m <sup>3</sup> )			
总硫（以硫计）含量，mg/m <sup>3</sup>		≤150	≤270	≤480	>480
硫化氢含量，mg/m <sup>3</sup>		≤6	≤20	实测	实测
二氧化碳含量，%（体）		≤3		—	
水分		无游离水			

①本标准中的 m<sup>3</sup> 为在 101.325kPa、20℃ 状态下的体积。

②IV类气为总硫含量大于 480mg/m<sup>3</sup> 的井口气，该气体只能供给有处理手段的用户。

表1-3中所列的I、II类气体主要用作民用燃料，III、IV类气体主要用作工业原料与燃料。与国外相比，我国的《天然气》标准虽基本上反映了商品天然气的质量要求，但也有商榷之处。例如，指标中仅规定了无游离水，而对天然气的水露点并未明确规定，这显然是不能满足管输气对水含量的要求。又如，IV类气体指标中未对总硫含量规定上限，加之国内这类商品气数量很少，故建议予以取消。

在国外，随着天然气在能源结构中的比重上升、输气压力增加和输送距离增加，对天然气的质量要求也更加严格。

实际上，商品天然气的质量要求应从提高经济效益出发，在满足国家关于安全卫生和环境保护等标准的前提下，由供需双方按照需要和可能，在签订供气合同或协议时具体协商确定。

如果只是为了符合管道输送的要求，则经过处理后的天然气称之为管输天然气，简称管输气。我国对管输天然气的质量要求是：

①进入输气管道的气体必须清除其中的机械杂质。

②水露点应比输气管道中气体可能达到的最低环境温度（即最低管输气体温度）低5℃。

③烃露点应低于或等于输气管道中气体可能达到的最低环境温度。

④气体中硫化氢含量不大于 20 mg/m<sup>3</sup>。

⑤如输送不符合上述质量要求的气体，必须采取相应的保护措施。

国外对管输天然气也都有相应的质量要求，此处就不再一一介绍。

## 二、天然气处理与加工的涵义

天然气处理与加工是天然气工业中一个十分重要的组成部分，是从油、气井中采出或从矿场分离器分出的天然气在进入输、配管道或送往用户之前必不可少的生产环节。但是，由于天然气处理与加工的目的不同，其涵义也有所不同。

天然气加工是指从天然气中分离、回收某些组分，使之成为产品的那些工艺过程。诸如天然气凝液回收、天然气凝液化以及从天然气中提取氦等稀有气体的过程等均属于天然气加工的范畴。

天然气处理则是指为使天然气符合商品质量或管道输送要求而采取的那些工艺过程，诸如脱除酸性气体（即脱除酸性组分如  $H_2S$ 、 $CO_2$ 、有机硫化物如 RSH 等）和其它杂质（水、烃类、固体颗粒等）以及热值调整、硫磺回收和尾气处理（环保要求）等过程。

虽然，天然气处理和加工所用的工艺方法可能相同，但两者的区别在于其目的不同。在我国，还习惯把天然气的脱水、脱酸性气体（或脱硫）、硫磺回收和尾气处理（环保要求）等称之为净化。

图 1-2 为天然气在油、气田上进行处理与加工的示意框图。由图 1-2 可知，从油、气井来的天然气经过一系列加工与处理过程后，或经输配管道送往城镇用户，或去油、气田内部回注等。图中的相分离、脱酸性气体及硫磺回收等过程均属于天然气处理范畴。至于图中的脱水与天然气凝液回收过程，如其目的是为了控制天然气的水露点和烃露点（露点控制），使其满足管道输送或商品天然气的要求，也应属于天然气处理范畴；如其目的是为了回收乙烷及更重烃类作为产品，则应属于天然气加工范畴。应该说明的是，并非所有油、气井来的天然气都经过图 1-2 中的各个加工与处理过程。例如，如果天然气中含酸性组分很少，则可不脱酸性气体而直接脱水；如果天然气中含乙烷及更重烃类很少，则可不必经天然气凝液回收而直接液化生产液化天然气等等。

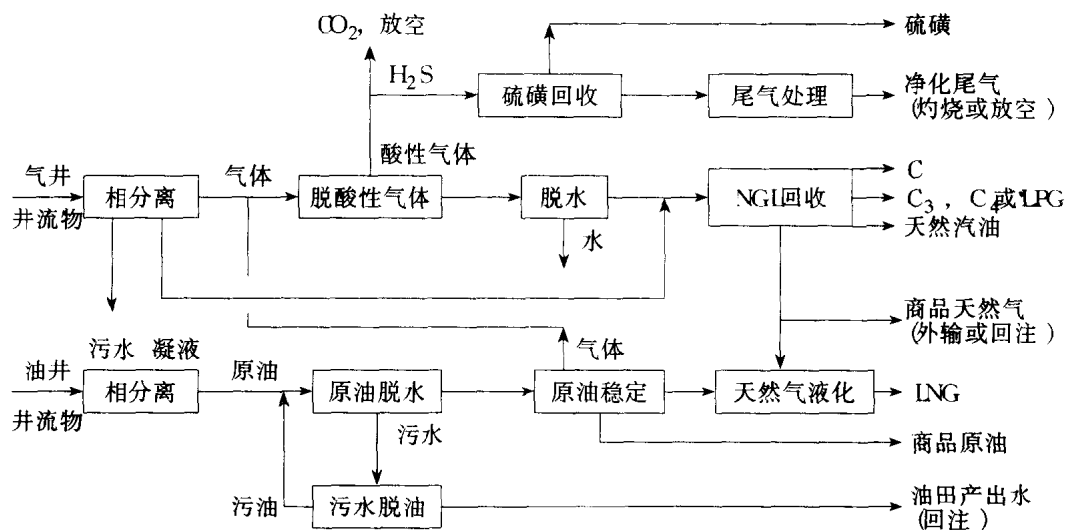


图 1-2 天然气处理与加工示意图

此外，天然气加工与原油加工的涵义也是有区别的。原油加工是采用物理的或化学的方法由原油获得一系列产品的过程，而天然气加工只是采用物理的方法从天然气中获得产品的过程。对于那些采用化学方法从天然气中获得产品的过程，则属于天然气化工的范畴。

当前，天然气的加工深度（通常以天然气凝液的回收率来表示）和天然气凝液的生产能力是衡量一个国家天然气工业发展水平的重要标志之一。回顾一些发达国家天然气凝液回收的发展过程，大致可分为以下四个阶段：

①井口汽油时代（1910~1920年）：由油井井口分离器分离出的伴生气经压缩、冷凝和分离后即可得到井口汽油（也称套管头汽油）。井口汽油组成不定，也不稳定。这一阶段只是对伴生气进行简单处理，以防止在输气管道中析出液烃。

②天然汽油时代（1920~1940年）：这一阶段天然气凝液回收方法有了很大发展，常温油吸收法逐步取代了初期的压缩法，主要产品是经过稳定的天然汽油，同时已开始生产液化石油气。

③液化石油气（或丙烷，丁烷）时代（1940~1960年）：液化石油气的生产始于30年代，到40年代以后其产量迅速增加，不仅促进了天然气化工的发展，也给城市提供了清洁方便的燃料。这一阶段天然气凝液回收方法已从常温油吸收法逐渐转为低温油吸收法（冷冻油吸收法），丙烷、丁烷的回收率有了显著提高。

④乙烷时代（1960~1980年）：自50年代后期至60年代，由于对乙烯的需求剧增，从天然气中回收的乙烷、丙烷、丁烷已成为裂解制取乙烯的主要原料，因而对乙烷的需求也日益增加。60年代中期出现的透平膨胀机制冷方法，由于具有很多优点而被广泛采用。与此同时，为了扩大乙烷来源，对组成较贫的天然气也进行了加工。

我国天然气处理与加工工业是在60年代以后才发展起来的，而大规模的建设是在70年代后期至80年代。其中，大庆、辽河、中原等油田的伴生气主要是经过加工生产天然气凝液，或再进一步分离为乙烷、丙烷、丁烷（或液化石油气）和天然汽油；四川及正在开采的陕北气藏气，主要是经过处理生产商品天然气，也有一小部分用来回收天然气凝液。

### 三、天然气加工主要产品及其质量要求

天然气加工产品主要有液化天然气、天然气凝液、液化石油气、天然汽油等。典型的天然气及其加工产品的组分见表1-4。

表 1-4 典型的天然气及其产品组成

组 成 名 称	组 成													
	He 等	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	iC <sub>4</sub>	nC <sub>4</sub>	iC <sub>5</sub>	nC <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub> <sup>+</sup>	
天然气	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	
惰性气体	▲	▲	▲											
酸性气体 <sup>①</sup>			▲	▲										
液化天然气		▲			▲	▲	▲	▲	▲					
天然气凝液						▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	
液化石油气						▲	▲	▲	▲					
天然汽油							▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	
稳定凝析油								▲	▲	▲	▲	▲	▲	

① 即酸气 (acid gas)。

#### 1. 液化天然气

液化天然气 (Liquefied natural gas, LNG) 是由天然气液化制取的，以甲烷为主的液烃

混合物，其组成 ( $\chi$ ) 约为： $C_1$  80%~95%， $C_2$  3%~10%， $C_3$  0~5%， $C_4$  0~3%， $C_5$  微量。一般是在常压下将天然气冷冻到约  $-162^\circ\text{C}$  使其变为液体。由于液化天然气的体积为其气体 ( $20^\circ\text{C}$ ,  $101.325\text{kPa}$ ) 体积的  $1/625$ ，故有利于输送和储存。随着液化天然气运输船及储罐制造技术的进步，将天然气液化几乎是目前跨越海洋运输天然气的主要方法。LNG 不仅可作为石油产品的清洁替代燃料，也可用来生产甲醇、氨及其它化工产品。此外，在一些国家和地区 LNG 还用于民用燃气的调峰。LNG 再气化时的蒸发潜热 ( $-161.5^\circ\text{C}$  时约为  $511\text{kJ/kg}$ ) 还可供制冷、冷藏等行业用。表 1-5 为 LNG 的主要物理性质。

表 1-5 LNG 的主要物理性质

气体相对密度 (空气=1)	沸点, $^\circ\text{C}$ (常压下)	液体密度, g/L (沸点下)	高热值, $\text{MJ/m}^3$ <sup>①</sup>	颜色
0.60~0.70	约 $-162$	430~460	41.5~45.3	无色透明

①指  $101.325\text{kPa}$ 、 $15.6^\circ\text{C}$  状态下的气体体积。

## 2. 天然气凝液

天然气凝液 (Natural gas liquids, NGL) 也称为天然气液或天然气液体，我国习惯称为轻烃，是指从天然气中回收到的液烃混合物，包括乙烷、丙烷、丁烷及戊烷以上烃类等，有时广义地说，从气井井场及天然气加工厂得到的凝析油均属于天然气液。天然气液可直接作为产品，也可进一步分离出乙烷，丙烷，丁烷或丙、丁烷混合物 (LPG) 和天然汽油等。天然气液及其得到的乙烷、丙烷、丁烷等烃类是制取乙烯的主要原料。此外，丙烷，丁烷或丙、丁烷混合物不仅是热值很高 (约  $83.7\sim 125.6\text{MJ/m}^3$ )、输送及存储方便、硫含量低的民用燃料，还是汽车的清洁替代燃料 (其标准见 SY 7548—1998)。

## 3. 液化石油气

液化石油气 (Liquefied petroleum gas, LPG) 也称为液化气，是指主要由碳三和碳四烃类组成并在常温和压力下处于液态的石油产品。按其来源分为炼厂液化石油气和油气田液化石油气两种。炼厂液化石油气是由炼油厂的二次加工过程所得，主要由丙烷、丙烯、丁烷和丁烯等组成。油气田液化石油气则是由天然气加工过程所得到的，通常又可分为商品丙烷、商品丁烷和商品丙、丁烷混合物等。商品丙烷主要由丙烷和少量丁烷及微量乙烷组成，适用于要求高挥发性产品的场合。商品丁烷主要由丁烷和少量丙烷及微量戊烷组成，适用于要求低挥发性产品的场合。商品丙、丁烷主要由丙烷、丁烷和少量乙烷、戊烷组成，适用于要求中挥发性产品的场合。油气田液化石油气不含烯烃。我国油气田液化石油气质量要求见表 1-6。

表 1-6 我国油气田液化石油气质量要求 (GB 9052.1—1998)

项 目	质量指标			试验方法
	商品丙烷	商品丁烷	商品丙、丁烷混合物	
37.8 $^\circ\text{C}$ 时的蒸气压 (表压), kPa, 不大于	1430	485	1430	GB/T 6602 <sup>①</sup>
组分, $\varphi$ , %				
丁烷及以上组分, 不大于	2.5	—	—	SH/T 0230
戊烷及以上组分, 不大于	—	2.0	3.0	

续表

项 目	质量指标			试验方法
	商品丙烷	商品丁烷	商品丙、丁烷混合物	
残留物 100mL 蒸发残留物, mL, 不大于 油渍观察	0.05 通过	0.05 通过	0.05 通过	SY/T 7509
密度 (20℃ 或 15℃), kg/m <sup>3</sup>	实测	实测	实测	SH/T 0221 <sup>②</sup>
铜片腐蚀, 级, 不大于	1	1	1	SH/T 0232
总硫含量, w, 10 <sup>-6</sup> , 不大于	185	140	140	SY/T 7508
游离水	—	无	无	目测

①蒸气压也允许用 GB/T 12576 方法计算, 但在仲裁时必须用 GB/T 6602 测定。

②密度也允许用 GB/T 12576 方法计算, 但在仲裁时必须用 SH/T 0221 测定。

#### 4. 天然汽油

天然汽油也称为气体汽油或凝析汽油, 是指天然气液经过稳定后得到的, 以戊烷及更重烃类为主的液态石油产品。我国习惯上称为稳定轻烃, 国外也将其称为稳定凝析油。我国将天然汽油按其蒸汽压分为两种牌号, 其代号为 1 号和 2 号。1 号产品可作为石油化工原料; 2 号产品除作为石油化工原料外, 也可用作车用汽油调和原料。它们的质量要求见表 1-7。

表 1-7 我国稳定轻烃质量要求 (GB 9053—1998)

项 目	质量指标		实验方法
	1 号	2 号	
饱和蒸气压, kPa	74~200	夏 < 74, 冬 <sup>①</sup> < 88	GB/T 8017—87
馏程			
10% 蒸发温度, ℃, 不低于	—	35	GB/T 6536—1997
90% 蒸发温度, ℃, 不高于	135	150	
终馏点, ℃, 不高于	190	190	
60℃ 蒸发率, %	实测	—	
硫含量, %, 不大于	0.05	0.10	SH/T 0253—92
机械杂质及水分	无	无	目测 <sup>②</sup>
铜片腐蚀, 级, 不大于	1	1	GB/T 5096—85 (91)
颜色, 赛波特色号, 不小于	+ 25	—	GB/T 3555—92

①冬季指在 9 月 1 日至第二年 2 月 29 日间。

②将油样注入 100mL 的玻璃量筒中观察, 应当透明, 没有悬浮与沉淀的机械杂质和游离水。

至于其它如商品乙烷等, 我国目前尚无上述那样由国家或行业在相应标准中提出的质量要求。

#### 5. 压缩天然气

压缩天然气 (compressed natural gas, CNG) 是经过压缩的高压商品天然气, 其主要成分是甲烷。由于它不仅抗爆性能 (甲烷的研究法辛烷值约为 108) 和燃烧性能好, 燃烧产物



中的温室气体及其它有害物质含量很少，而且生产成本较低，因而是一种很有发展前途的汽车优质替代燃料。目前，大多灌装在 20~30MPa 的气瓶中供汽车使用，称为汽车用压缩天然气 (compressed natural gas for vehicle)。

我国发布的行业标准《汽车用压缩天然气》(SY/T 7546—1996) 已从 1997 年开始实施，标准中对汽车用压缩天然气的质量要求见表 1-8。

表 1-8 我国汽车用压缩天然气质量要求 (SY/T 7546—1996)

项 目	质 量 指 标	试 验 方 法
高位发热量, MJ/m <sup>3</sup>	≥31.4	GB/T 11062
硫化氢含量, mg/m <sup>3</sup>	≤20	GB/T 11060.1 或 GB/T 11060.2
总硫 (以硫计) 含量, mg/m <sup>3</sup>	≤270	GB/T 11061
二氧化碳含量, %	≤3.0	SY/T 7506
水露点	低于最高操作压力下最低环境温度 5℃	SY/T 7507 (计算确定)

① 为确保压缩天然气的使用安全，压缩天然气应有特殊气味，必要时加入适量加臭剂，保证天然气的浓度在空气中达到爆炸下限的 20% 前能被察觉。

② 气体体积为在 101.325kPa、20℃ 状态下的体积。

#### 四、天然气体积的计量条件

天然气作为商品交接时必须进行计量。天然气流量计量的结果值可以是体积流量、质量流量和能量 (热值) 流量。其中，体积计量是天然气各种流量计量的基础。

天然气的体积具有压缩性，随温度、压力条件而变。为了便于比较与计算，需把不同压力、温度下的天然气体积折算成相同压力、温度下的体积。或者说，均以此相同压力、温度下的体积单位 (工程上通常是 1m<sup>3</sup>) 作为天然气体积的计量单位，此压力、温度条件称为标准状态。

##### 1. 标准状态的压力、温度条件

目前，国内外采用的标准状态的压力和温度条件并不统一。一种是采用 0℃ 和 101.325kPa 作为天然气体积计量的标准状态，在此状态下计量的 1m<sup>3</sup> 天然气体积称为 1 标准立方米，简称 1 标方。我国以往写成 1Nm<sup>3</sup>，目前已改写成 1m<sup>3</sup>。另一种是采用 20℃ 或 15.6℃ (60°F) 及 101.325kPa 作为天然气体积计量的标准状态。其中，我国石油天然气行业气体体积计量的标准状态采用 20℃，英、美等国则多采用 15.6℃。为与前一种标准状态区别，我国以往称其为基准状态，而将此状态下计量的 1m<sup>3</sup> 称为 1 基准立方米，简称 1 基方或 1 方，写成 1m<sup>3</sup>。英、美等国通常写成 1Std m<sup>3</sup> 或 1m<sup>3</sup>。

由于这两种标准状态条件下天然气的计量单位我国目前均写为 1m<sup>3</sup>，为便于区别，故本书将前者写成 1m<sup>3</sup> (N)，后者写成 1m<sup>3</sup>，而对采用 15.6℃ 及 101.325kPa 计量的 1m<sup>3</sup> 写成 1m<sup>3</sup> (GPA)。当气体质量相同时，它们的关系是：1m<sup>3</sup> = 0.985m<sup>3</sup> (GPA) = 0.932m<sup>3</sup> (N)

##### 2. 国内采用的天然气体积计量条件

目前，国内天然气生产、经营管理及使用部门采用的天然气体积计量条件也不统一，因此，在计量商品天然气体积时要特别注意所采用的体积计量条件。

中国石油天然气总公司采用的标准状态为 20℃、101.325kPa。例如，在《天然气》(SY 7514—88) 及《天然气流量的标准孔板计量方法》(SY/T 6143—1996) 等行业标准中，