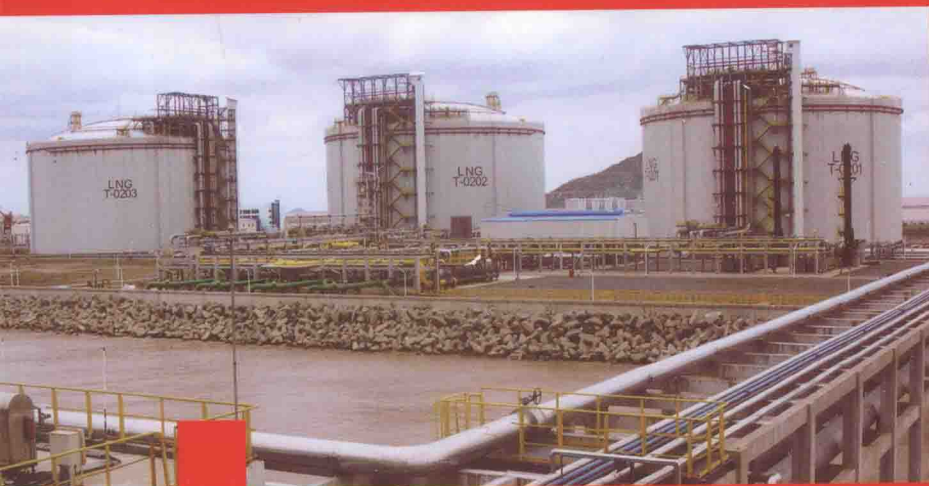


YEHUA TIANRANQI (LNG)  
GONGYI YU GONGCHENG



# 液化天然气 (LNG) 工艺与工程

郭揆常 编著

中國石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

# 液化天然气(LNG)工艺与工程

郭揆常 编著

中国石化出版社

## 内 容 提 要

本书是液化天然气领域的专业技术书籍,在介绍天然气和液化天然气基本性质的基础上,对天然气处理、天然气液化、液化天然气接收、天然气输配、液化天然气利用以及液化天然气安全技术进行了详细阐述。

本书专注于液化天然气工艺与工程技术,可以作为从事液化天然气产业、石油天然气工程、油气储运、城市燃气等专业的科研、设计、建设和生产运行人员阅读参考,也可作为石油院校相关专业的辅助教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

液化天然气(LNG)工艺与工程/郭揆常编著. —北京:  
中国石化出版社, 2014. 5  
ISBN 978-7-5114-2718-2

I. ①液… II. ①郭… III. ①液化天然气-生产工艺  
IV. ①TE646

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 055195 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

### 中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

\*

787×1092 毫米 16 开本 24 印张 602 千字

2014 年 5 月第 1 版 2014 年 5 月第 1 次印刷

定价:80.00 元

# 前 言

液化天然气(LNG)技术使天然气得以液态形式存在,不仅方便了天然气的运输和储存,而且有力地促进了天然气贸易,推动了天然气应用的发展。近几十年来,液化天然气工业已经成为一门新兴工业,得到了迅猛发展。LNG应用技术除了用来解决天然气储存运输问题外,还广泛应用于供气调峰、交通运输和冷能利用等方面。

随着我国经济的迅速发展,对清洁能源的需求日增,液化天然气的利用也提到日程。十多年来,我国液化天然气工业从起步到发展,在LNG产业链的液化、储存、运输等各个环节上都有了显著进步。自2000年上海LNG调峰站建成投产以来,已相继建设了数十座中小型天然气液化工厂。为了利用国外天然气资源,20世纪90年代,我国开始从海上引进LNG,广东大鹏LNG接收站于2006年6月率先投产,接着福建莆田、上海、江苏如东、辽宁大连的LNG接收站相继投产,其他接收终端正在建设和规划中。多艘大型LNG运输船已交付使用、多支LNG运输船队已服务于我国近海LNG运输。

LNG工业是一门新兴产业,不仅市场发展迅速,而且技术进步显著。为了适应LNG工业发展的形势,需要有更多熟悉了解液化天然气技术的工程技术和经营管理人员。本书编著的目的就是为广大LNG从业人员提供比较系统的液化天然气专业书籍。本书编写时注重理论与实践的结合,在吸收世界LNG工业前沿技术的同时,努力总结我国各地已经投产和正在建设的LNG工程提供的有用经验。本书除了重点阐述天然气预处理及液化工厂、天然气液化工厂和液化天然气接收站工程外,还介绍了天然气性质、LNG冷能利用及安全技术等方面的相关内容。鉴于LNG的利用最终还需经过再汽化后管输供给用户,为了完整叙述LNG产业链,本书在LNG接收站工程后,简要介绍了天然气管道输送的有关内容。

本书第三章由上海交通大学教授顾安忠审阅,第五章由中石化上海工程有限公司教授级高级工程师金国强审阅,第六章由上海液化天然气有限责任公司总工程师严艺敏审阅。编写过程中得到众多从事液化天然气工作的工程技术和

管理人员的关心和帮助，提供了包括研究、设计、工程建设和生产运行的经验和案例，充实了相关内容的叙述。本书作者郭揆常愿借本书出版的机会，表示衷心感谢；并向众多被本书参考与引用的文献和资料的原作者表示由衷的感谢。

随着天然气应用的拓展，液化天然气工艺与工程技术也在不断发展和进步，相信今后会有更多的新内容提高和丰富本书。对于本书中的不当之处，恳请各位读者指正。

# 目 录

第一章 天然气性质 .....	( 1 )
第一节 天然气分类 .....	( 1 )
一、按矿藏特点分类 .....	( 1 )
二、按相特性分类 .....	( 2 )
三、按酸气含量分类 .....	( 2 )
四、按液烃含量分类 .....	( 2 )
第二节 天然气组成 .....	( 2 )
一、组成 .....	( 2 )
二、商品天然气品质要求 .....	( 3 )
三、天然气生产的产品 .....	( 5 )
四、硫化氢 .....	( 6 )
第三节 天然气物性 .....	( 6 )
一、基本性质 .....	( 6 )
二、压缩因子 .....	( 8 )
三、黏度 .....	( 10 )
四、定压摩尔热容 .....	( 12 )
五、焦耳-汤姆逊(J-T)效应系数 .....	( 12 )
六、热值 .....	( 13 )
七、燃烧极限 .....	( 13 )
八、偏心因子 .....	( 14 )
第四节 LNG 的性质 .....	( 14 )
第五节 天然气的相特性 .....	( 16 )
一、一元物系的相特性 .....	( 16 )
二、二元及多元物系相特性 .....	( 17 )
三、天然气的相特性 .....	( 19 )
第六节 烃类物系的气液平衡 .....	( 19 )
一、气液平衡相组成 .....	( 19 )
二、烃系的气液平衡 .....	( 21 )
三、相平衡计算 .....	( 28 )

第二章 天然气预处理 .....	( 31 )
第一节 天然气脱硫脱碳 .....	( 31 )
一、脱硫脱碳工艺方法 .....	( 32 )
二、脱硫脱碳工艺选择 .....	( 33 )
三、醇胺法脱硫脱碳 .....	( 36 )
四、其他脱硫脱碳方法 .....	( 51 )
第二节 天然气脱水 .....	( 60 )
一、脱水工艺方法 .....	( 61 )
二、脱水方法选择 .....	( 62 )
三、甘醇脱水工艺 .....	( 63 )
四、吸附法脱水工艺 .....	( 70 )
第三节 天然气脱汞 .....	( 78 )
一、汞对铝的腐蚀机理 .....	( 78 )
二、脱汞工艺技术 .....	( 79 )
三、天然气脱汞的实际应用 .....	( 80 )
第四节 天然气脱氮 .....	( 81 )
一、吸附-液化脱氮 .....	( 81 )
二、液化-精馏脱氮 .....	( 82 )
第三章 天然气液化工艺 .....	( 83 )
第一节 阶式制冷液化工艺 .....	( 83 )
第二节 混合冷剂制冷液化工艺 .....	( 85 )
一、单循环混合冷剂液化工艺 .....	( 86 )
二、丙烷预冷混合冷剂液化工艺 .....	( 88 )
三、双循环混合冷剂液化工艺 .....	( 90 )
四、工艺参数分析 .....	( 91 )
第三节 膨胀制冷液化工艺 .....	( 95 )
一、氮气膨胀液化流程 .....	( 95 )
二、氮-甲烷膨胀液化流程 .....	( 96 )
三、天然气直接膨胀液化流程 .....	( 98 )
四、双膨胀机技术 .....	( 99 )
第四节 液化工艺比较 .....	( 100 )
一、液化工艺比较 .....	( 100 )
二、液化工艺的发展 .....	( 101 )
三、工艺模拟计算 .....	( 104 )

<b>第四章 液化天然气工厂</b>	(109)
<b>第一节 工厂建设条件</b>	(111)
一、气源和市场	(111)
二、厂址	(111)
<b>第二节 基本负荷型天然气液化工厂</b>	(113)
一、预处理装置	(113)
二、液化装置	(127)
三、储运系统	(133)
四、辅助生产系统	(148)
五、工厂总平面布置	(154)
六、公用系统	(155)
<b>第三节 调峰型液化工厂</b>	(165)
一、天然气直接膨胀调峰型液化装置	(165)
二、氮膨胀液化调峰型液化装置	(166)
三、混合冷剂制冷调峰型液化装置	(167)
<b>第四节 浮式天然气液化装置</b>	(167)
一、预处理装置	(168)
二、液化装置	(169)
三、LNG 储存	(170)
四、LNG 卸载输送	(172)
五、装卸臂	(173)
六、低温软管	(174)
七、FPSO 动力	(174)
八、安全与平面布置	(175)
<b>第五节 主要工艺设备</b>	(176)
一、压缩机	(176)
二、透平膨胀机	(181)
三、换热器	(186)
<b>第五章 液化天然气接收站</b>	(191)
<b>第一节 接收站功能</b>	(191)
<b>第二节 接收站工艺系统</b>	(194)
一、卸料系统	(194)
二、储存系统	(195)



三、蒸发气处理系统 .....	(198)
四、汽化系统 .....	(201)
五、外输及计量系统 .....	(202)
六、火炬系统 .....	(202)
七、自动控制系统 .....	(202)
八、接收站的操作 .....	(210)
第三节 主要设备 .....	(210)
一、储罐 .....	(210)
二、卸料设施 .....	(225)
三、LNG 输送泵 .....	(226)
四、汽化器 .....	(232)
五、再冷凝器 .....	(238)
六、BOG 压缩机 .....	(240)
第四节 液化天然气的船运 .....	(241)
一、液化天然气海上运输的特点 .....	(241)
二、LNG 运输船结构特点 .....	(242)
三、液化天然气运输船船型 .....	(243)
第五节 陆岸液化天然气接收站 .....	(246)
一、气源与市场 .....	(246)
二、站址 .....	(248)
三、码头 .....	(249)
四、总平面布置 .....	(254)
五、公用系统 .....	(256)
第六节 浮式液化天然气接收终端 .....	(264)
一、浮式 LNG 接收终端的发展 .....	(265)
二、浮式 LNG 接收终端的特点 .....	(268)
三、LNG - FSRU 的系统配置 .....	(268)
第六章 天然气管道输配 .....	(270)
第一节 天然气管道输送系统 .....	(270)
第二节 天然气管道输送技术 .....	(271)
一、输气工艺 .....	(271)
二、管材 .....	(277)
三、输气管道的腐蚀与防护 .....	(281)
四、管道运行与监控 .....	(289)

五、天然气管道输送技术的发展 .....	(293)
第三节 城镇燃气输配系统 .....	(297)
一、城镇燃气站场 .....	(298)
二、城镇燃气管网 .....	(300)
<b>第七章 液化天然气利用 .....</b>	<b>(310)</b>
第一节 LNG 冷量分析 .....	(311)
第二节 LNG 发电 .....	(312)
一、直接膨胀发电 .....	(313)
二、二次媒体法 .....	(314)
三、联合循环法 .....	(315)
第三节 空气分离 .....	(315)
一、空气分离装置利用 LNG 冷能的特点 .....	(316)
二、利用 LNG 冷能的空气分离技术 .....	(317)
三、应用现状 .....	(319)
第四节 其他利用 .....	(322)
一、LNG 汽车 .....	(322)
二、生产液态二氧化碳 .....	(324)
三、冷冻仓库 .....	(324)
四、间接利用 .....	(326)
<b>第八章 液化天然气安全技术 .....</b>	<b>(333)</b>
第一节 安全特性 .....	(333)
一、燃烧特性 .....	(333)
二、低温特性 .....	(335)
三、生理影响 .....	(336)
第二节 安全分析 .....	(337)
一、安全标准 .....	(337)
二、储存安全 .....	(338)
三、运输安全 .....	(346)
四、泄漏及防止 .....	(348)
五、火灾爆炸危险性 .....	(351)
六、低温及其他危害 .....	(354)
七、事故后果模拟分析 .....	(355)
第三节 安全检测 .....	(356)

一、可燃气体检测器 .....	(357)
二、火焰检测器 .....	(358)
三、低温检测器 .....	(358)
四、烟火检测器 .....	(358)
五、缺氧检测设备 .....	(358)
第四节 安全防火 .....	(359)
一、总图布置 .....	(359)
二、加强危险物料的安全控制 .....	(361)
三、电气防爆 .....	(362)
四、供电安全 .....	(363)
五、防雷、防静电 .....	(363)
六、建、构筑物防火 .....	(365)
七、消防设施 .....	(365)
参考文献 .....	(374)

# 第一章 天然气性质

天然气是指在地层中自然存在的烃类和非烃类气体混合物。自然界中气体的形成成因十分广泛，可以是有机质的降解和裂解，也可能是由于岩石变质、岩浆作用、放射性作用以及热核反应等产生的。在自然界里，很少有成因单一的气体单独聚集，而往往是不同成因的气体的混合。作为资源的天然气是指以烃类为主的可燃气体。当前已大规模开发并为人们广泛利用的天然气是与原油成因相同、与原油共生或单独存在的可燃气体，这部分常划分为常规天然气。随着科学技术的发展和经济条件的变化，原先受技术经济条件的限制尚未投入开采的煤层气、页岩气、致密性气藏气等都已开始投入工业开采，这部分天然气也常称为非常规天然气。

天然气性质的显著特点是：

(1) 密度低。相对密度一般为 0.6 ~ 0.7，比空气轻。与其他气体一样，天然气具有可压缩性。天然气的体积随温度、压力而变化。

(2) 热值高。能源物质的热值是各元素燃烧热之和，天然生物和化石燃料中的主要元素是氢和碳。氢总热值为 34000kcal/kg (1cal = 4.18J)，碳为 7800kcal/kg，因此燃料化学结构中，氢含量越高，热值也越高。甲烷是烃类中 H/C 比最高的，而天然气是以甲烷为主的气体燃料，因而天然气的热值是化石燃料中最高的，大约是煤的 1.5 ~ 2 倍。

(3) 效率高。采用天然气使能源利用效率提高近一倍，如燃煤锅炉效率为 50% ~ 60%，而燃气锅炉效率可达 80% ~ 90%。家用燃煤炉灶效率仅 20% ~ 25%，而燃气炉灶效率为 55% ~ 65%。燃煤蒸汽发电效率一般为 33% ~ 42%，燃气联合循环发电效率可达 50% ~ 58%。

(4) 污染小。天然气的主要成分是甲烷，而甲烷是烃类中 C/H 比最小的，其燃烧产物中碳排放量最少。而且按照商品天然气的质量标准，由管道输送到用户的天然气中硫和氮的含量都很少，通过改进燃烧技术和尾气处理可进一步减少 NO<sub>2</sub> 的排放。天然气燃烧不会产生烟尘，燃烧产物中没有固体排放物。相同的燃烧效率(70%)时，生产每千瓦时有用能源：用天然气作燃料时排放的氮氧化物为 0.1g，排放的 CO<sub>2</sub> 是 50g；用煤作燃料时排放的氮氧化物是 1.1g，排放的 CO<sub>2</sub> 是 475g。可见天然气对环境的影响比其他化石能源要小得多，确实是一种清洁能源。

(5) 为优质原料。天然气可以通过直接转化或间接转化生产高附加值化工产品。由于天然气是以甲烷为主的混合物，它是生产碳一化工产品的重要原料。生产甲醇、合成氨等产品时比用石油或煤炭作原料加工工艺简单，操作方便，产品质量高。

## 第一节 天然气分类

天然气可按矿藏特点、相特性、酸气含量及可回收液烃含量等进行分类。

### 一、按矿藏特点分类

#### (一) 气藏气

储集层流体在开采的任何阶段均呈气态，但是随组成不同，在地面压力温度条件下有可

能出现少量液体。

## (二) 凝析气

储集层流体在原始状态下呈气态，但在开采到一定阶段，随着储集层压力下降，流体进入反凝析区，气藏内出现液态烃。

## (三) 伴生气

伴生气来自油藏的气顶气和溶解气，在储集层中与原油共存，开采过程中随原油采出。

## 二、按相特性分类

按压力 - 温度相特性，天然气可分为：

### (一) 干气

在气藏和地面压力温度条件下不产生液烃的天然气。按  $C_5$  界定法是指  $1\text{m}^3$  ( $20^\circ\text{C}$ ,  $101.325\text{kPa}$ ) 气中液烃含量 ( $C_5^+$ ) 按液态计小于  $13.5\text{cm}^3$  的天然气。

### (二) 湿气

在气藏条件下没有液相，但采出后在地面条件下气体内出现液烃。按  $C_5$  界定法是指  $1\text{m}^3$  ( $20^\circ\text{C}$ ,  $101.325\text{kPa}$ ) 气中液烃含量 ( $C_5^+$ ) 按液态计大于  $13.5\text{cm}^3$  的天然气。

## 三、按酸气含量分类

世界上开采的天然气中约有 30% 含有  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{CO}_2$ ，它们溶于水中成为酸性溶液，故称  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{CO}_2$  为酸气。

### (一) 酸气

$\text{H}_2\text{S} > 1\%$  和/或  $\text{CO}_2 > 2\%$  的天然气称为酸性天然气。

### (二) 甜气

$\text{H}_2\text{S} < 1\%$  和/或  $\text{CO}_2 < 2\%$  的天然气称为“甜”性天然气。工业上对  $\text{H}_2\text{S}$  给予更多的重视，常把含  $\text{H}_2\text{S}$  的天然气称酸性天然气。

## 四、按液烃含量分类

把天然气内除  $C_1$  或  $C_1 + C_2$  外的其他较重组分看做潜在可回收的液体。按  $1\text{atm}$ 、 $15^\circ\text{C}$  状态下  $1\text{m}^3$  天然气内可回收液体体积多少，把天然气分为贫气、富气和极富气三种。若将乙烷及重于乙烷的组分 ( $C_2^+$ ) 看做可回收液体 [西方用 GPM 表示，表示每  $1000\text{ft}^3$  ( $1\text{ft} = 0.3048\text{m}$ ) 气体含  $C_2^+$  或  $C_3^+$  的 gal 数 ( $1\text{gal} = 4.546\text{dm}^3$ ) ]，则：贫气  $< 0.3344\text{L}/\text{m}^3$ ；富气为  $0.3344 \sim 0.6688\text{L}/\text{m}^3$ ；极富气  $> 0.6688\text{L}/\text{m}^3$ 。也可将  $C_3^+$  作为潜在可回收液体。

## 第二节 天然气组成

### 一、组成

天然气是以烃类为主的可燃气体，其中的烃类基本上是烷烃。表 1-1 列出了几种天然气的典型组成。由表看出，天然气的主要成分为较轻的烷烃， $C_6$  和  $C_6^+$  的组分极少。天然气

中常含有饱和量的水蒸气，可能含有一些其他气体如  $N_2$ 、He、 $H_2$ 、 $O_2$ 、A(氩)和酸性气体  $H_2S$ 、 $CO_2$  等，还可能含有硫醇等硫化物。此外，在开采过程中还可能夹带氧化皮、硫化铁、游离水、添加的化学剂和固体尘粒等。天然气的组成不仅随油气藏的地区、层位不同而不同，而且对于同一油气藏在不同的生产阶段其组成也有所变化。

表 1-1 天然气组成 % (mol)

组 成	天 然 气 1	天 然 气 2	凝 析 气	伴 生 气
$N_2$	0.51	4.85	—	—
$CO_2$	0.67	0.24	0.47	—
$C_1$	91.94	83.74	82.13	59.04
$C_2$	3.11	5.68	6.37	10.42
$C_3$	1.26	3.47	4.09	15.12
$iC_4$	0.37	0.30	0.50	2.39
$nC_4$	0.34	1.01	1.85	7.33
$iC_5$	0.18	0.18	0.55	2.00
$nC_5$	0.11	0.19	0.67	1.72
$C_6$	0.16	0.09	1.03	1.18
$C_7^+$	1.35	0.25	2.34	0.80
合计	100.00	100.00	100.00	100.00
$C_7^+$ 相对分子质量	172	115	114	—
$C_7^+$ 相对密度	0.803	0.744	0.765	—
$C_2^+$ GPM/(L/m <sup>3</sup> )	0.3344	0.4278	0.7354	1.6445*

\* 由  $C_8$  性质计算的  $C_2^+$  GPM。GPM 表示每 1000ft<sup>3</sup> 气体含  $C_2^+$  或  $C_3^+$  的 gal 数。

由表 1-1 可见，这几种天然气组成上的差异：

(一) 天然气中含有的  $C_2^+$  比较少，一般不超过 5%。

(二) 凝析气中  $C_2^+$  的含量一般为 5% ~ 10%。

(三) 伴生气中  $C_2^+$  的含量比较高，一般在 10% 以上。我国的油田伴生气  $C_2^+$  含量大多超过 20%。

(四) 天然气中常有  $N_2$  和  $CO_2$ ， $N_2$  的平均含量范围约为 0.5% ~ 5%，最高可达 25%。 $CO_2$  平均含量范围 0.5% ~ 10%，最高达 70%。

## 二、商品天然气品质要求

商品天然气的质量指标主要包括热值、 $H_2S$  含量、总硫含量、水露点和  $CO_2$  含量等五项指标。我国商品天然气质量指标(GB 17820—2011)是按三类划分的(表 1-2)。各级别天然气的质量要求不同，可适应天然气的不同用途(如用作民用燃料或化工厂原料)，对热值、 $H_2S$ 、总硫含量、水和  $CO_2$  含量有不同的要求，其中，一类商品天然气的质量指标大体与国外标准相近。

表 1-2 我国商品天然气质量指标 (GB 17820—2011)

项 目	一 类	二 类	三 类
高热值/(MJ/m <sup>3</sup> )	≥36.0	≥31.4	≥31.4
总硫(以硫计)/(mg/m <sup>3</sup> )	≤60	≤200	≤350
水露点/℃	交接点压力、温度下,比最低环境温度低 5℃		
硫化氢/(mg/m <sup>3</sup> )	≤6	≤20	≤350
二氧化碳/%	≤2.0	≤3.0	—

国外对商品天然气的品质由买卖双方根据气体买方要求和用途协商确定,要求的项目和指标会有出入。美国较典型的要求项目和指标见表 1-3。

表 1-3 美国商品天然气品质要求 (1atm、15℃)

项 目	标 准
水含量	64 ~ 112mg/m <sup>3</sup>
H <sub>2</sub> S 含量	<5.72mg/m <sup>3</sup>
总热值	>35.4MJ/m <sup>3</sup>
烃露点	<9.4℃ (压力 5.5MPa)
硫醇含量	4.58mg/m <sup>3</sup>
总硫含量	22.9 ~ 114.5mg/m <sup>3</sup>
CO <sub>2</sub> 含量	1% ~ 3% (mol)
O <sub>2</sub> 含量	0 ~ 0.4% (mol)
砂、尘粒、液体	无
干管输送温度	<50℃
干管输送压力	>4.8MPa(a)

表 1-4 列出了一些国家管输天然气的主要质量指标。气体用作燃料时,热值是燃料的重要质量指标之一。单位体积天然气完全燃烧时所放出的热量称为天然气的热值,也称之为发热量(单位 MJ/m<sup>3</sup> 或 MJ/kg)。热值有高热值与低热值之分。由于高热值可直接反映天然气的使用价值,因而目前国内外天然气质量标准多采用高热值。

表 1-4 国外部分国家管输天然气主要质量指标

国 家	H <sub>2</sub> S/(mg/m <sup>3</sup> )	总硫/(mg/m <sup>3</sup> )	CO <sub>2</sub> /%	水露点/(℃/MPa)	高热值/(MJ/m <sup>3</sup> )
英国	5	50	2.0	夏 4.4/6.9 冬 -9.4/6.9	38.84 ~ 42.85
俄罗斯	7	16		夏 -3(-10) 冬 -5(-20) <sup>①</sup>	32.5 ~ 36.1
法国	7	150		-5/操作压力	37.67 ~ 46.04
加拿大	23	115	2.0	-10/操作压力	36
德国	5	120		地温/操作压力	30.2 ~ 47.2
荷兰	5	120	1.5 ~ 2.0	-8/7.0	35.17
意大利	2	100	1.5	-10/6.0	
比利时	5	150	2.0	-8/6.9	40.19 ~ 44.38
奥地利	6	100	1.5	-7/4.0	
波兰	20	40		夏 5/3.37 冬 -10/3.37	19.7 ~ 35.2

① 括弧外为温带地区,括弧内为寒冷地区。

对水含量和烃露点的要求,是为了避免在管输过程中出现液体,形成气液两相流动。液态水的存在会加速天然气中酸性组分对钢材的腐蚀,还会形成固态天然气水合物,堵塞管道和设备。水露点一般根据各国具体情况而定,有的国家规定商品天然气中的水含量,我国要求商品天然气在交接点的压力和温度条件下水露点低于最低环境温度 $5^{\circ}\text{C}$ 。

对总硫含量要求是控制气体燃烧时产生 $\text{SO}_2$ 的数量,减少对环境与人体的危害,我国要求小于 $350\text{mg}/\text{m}^3$ 或更低。若用作化工原料对总硫含量无严格要求。

对 $\text{H}_2\text{S}$ 含量的要求,是为了控制气体输配系统的腐蚀以及对人体危害。湿天然气中,硫化氢含量小于 $5.7\text{mg}/\text{m}^3$ 时,对金属材料无腐蚀作用;硫化氢含量小于 $20\text{mg}/\text{m}^3$ 时,对钢材无明显腐蚀。

气体内有游离水存在时, $\text{CO}_2$ 可产生酸性溶液,加速金属腐蚀。当硫化氢、二氧化碳和水同时存在时,对钢材的腐蚀更加严重。不少国家规定天然气中 $\text{CO}_2$ 含量不高于 $2\% \sim 3\%$ 。此外因为二氧化碳是不可燃组分,其含量高低会影响天然气热值。

### 三、天然气生产的产品

已如前述,天然气是以饱和烃组成的气体燃料。天然气的产品按烃类组成可以分为:

#### (一) 甲烷产品

天然气的主要成分是甲烷,用作气体燃料或化工原料。按产品形态又可分为气态的管输天然气和液态的液化天然气。

##### 1. 管输天然气

管道输送的天然气主要成分是甲烷(见表1-4)。这是天然气产品中产量最大的一种产品,无论是用作燃料还是用作原料,用户常以管道气接收。

##### 2. 液化天然气

液化天然气(LNG)是在常压下将天然气冷却到 $-162^{\circ}\text{C}$ 使其液化制取。液化天然气是以甲烷为主的液烃混合物,其组成一般为:甲烷 $80\% \sim 90\%$ ,乙烷 $3\% \sim 10\%$ ,丙烷 $0 \sim 5\%$ ,丁烷 $0 \sim 3\%$ 。

天然气液化使天然气以液态形式存在,其体积缩小为约气态时的 $1/600$ ,适合用车船运输,由此出现了除管道输送外的另一种运输方式,以致天然气的远洋运输和贸易成为可能。液化天然气不仅为天然气输送提供了另一种运输方式,而且也可解决天然气的储存问题。液化天然气广泛应用于天然气输配的调峰储存,提高了城市燃气和电厂供气的稳定性,大大促进了天然气市场的发展。

#### (二) 乙烷产品

采用冷凝法从天然气内得到的液态烃称为天然气凝析油(NGL),用分馏法可由天然气凝析油得到乙烷、丙烷、丁烷和天然汽油等。

乙烷单体烃可作为石油化工厂乙烯原料。

#### (三) 丙烷产品

丙烷除用作工业、民用燃料外,也可用作石油化工厂原料。

#### (四) 丁烷产品

$n\text{C}_4$ 曾用作控制汽油蒸汽压的添加剂,或用作工厂原料; $i\text{C}_4$ 可作为炼厂烷基化工艺原料。



C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>的液态混合物称作液化石油气(LPG)，其发热量高(约 83.7 ~ 125.6MJ/m<sup>3</sup>)，运输和存储方便是优质的民用燃料，也可作为汽车的清洁替代燃料。

### (五) C<sub>5</sub><sup>+</sup> 产品

C<sub>5</sub><sup>+</sup> 称为天然汽油或稳定轻烃，可用做炼厂重整工艺原料。

## 四、硫化氢

有些天然气的硫化氢 H<sub>2</sub>S 含量高达 10% 以上。H<sub>2</sub>S 是透明、剧毒气体。各种不同浓度下，H<sub>2</sub>S 对人类的危害情况见表 1-5。

表 1-5 H<sub>2</sub>S 浓度与人的反应

空气中 H <sub>2</sub> S 浓度/(mg/m <sup>3</sup> )	生物影响及危害	空气中 H <sub>2</sub> S 浓度/(mg/m <sup>3</sup> )	生物影响及危害
0.04	感到臭味	300	暴露时间长则有中毒症状
0.5	感到明显臭味	300 ~ 450	暴露 1h 引起亚急性中毒
5.0	有强烈臭味	375 ~ 525	4 ~ 8h 内有生命危险
7.5	有不快感	525 ~ 600	1 ~ 4h 内有生命危险
15	刺激眼睛	900	暴露 30min 会引起致命性中毒
35 ~ 45	强烈刺激黏膜	1500	引起呼吸道麻痹，有生命危险
75 ~ 150	刺激呼吸道		
150 ~ 300	嗅觉 15min 内麻痹	1500 ~ 2250	在数分钟内死亡

在较低浓度下，H<sub>2</sub>S 会刺激眼睛。反复短时间与 H<sub>2</sub>S 接触，可导致眼睛、鼻子、喉咙的慢性疼痛，但只要在新鲜空气下，这种疼痛很快消失。H<sub>2</sub>S 也是一种可燃气体，能在空气中燃烧，其可燃体积浓度范围为 4.3% ~ 46%。由于 H<sub>2</sub>S 具有剧毒，在油气田进行的气体加工中必须将其控制在 5.72mg/m<sup>3</sup> 以下。

## 第三节 天然气物性

### 一、基本性质

天然气中烃和常见非烃气体的基本性质见表 1-6。

表 1-6 烃和常见非烃气体性质

组分	相对分子质量	沸点/℃ 1atm <sup>d</sup> (绝)	临界性质			液体密度(1atm <sup>d</sup> , 15℃)		
			压力/ MPa(绝)	温度/ K	比体积/ (m <sup>3</sup> /kg)	相对密度 (15℃/15℃)	kg/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /kmol
CH <sub>4</sub>	16.042	-161.5	4.599	190.56	0.00615	(0.3) <sup>a</sup>	(300) <sup>a</sup>	(0.05) <sup>a</sup>
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.069	-88.6	4.872	305.33	0.00484	0.3583 <sup>b</sup>	358.00 <sup>b</sup>	0.08405 <sup>b</sup>
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.096	-42.07	4.244	368.77	0.00455	0.5081 <sup>b</sup>	507.67 <sup>b</sup>	0.08686 <sup>b</sup>