



# 液化气船舶设备与 安全管理

李文华 主编

孙玉清 主审

YEHUAQI CHUANBO SHEBEI YU ANQUAN GUANLI

大连海事大学出版社

# 液化气船舶设备与 安全管理

李文华 主编

孙玉清 主审

大连海事大学出版社

## 内容提要

本书是为使航海类及相关专业毕业生能更好地适应液化气船运输管理的要求而编写的。本书对液化气船的基本概念、构造、关键设备和最新技术,以及管理要点作了系统全面的阐述。全书共计八章,内容涉及液化气船的规则、布置和构造原则,液化气船货物操作设备及附属系统,液化气再液化原理及装置,液化天然气船主推进装置,液化气船货物检测仪表及各种监控报警系统,液化气船液货装卸作业和液化气船“船岸安全检查表”。

本书可作为航海类及相关专业液化气船舶有关课程的教学用书,也可作为液化气船舶运输方面的工程技术人员和管理人员学习和工作的参考书。此外,本书也可用作液化气船船员特殊培训之参考资料。

© 李文华 2009

### 图书在版编目(CIP)数据

液化气船舶设备与安全管理 / 李文华主编. —大连: 大连海事大学出版社, 2009. 9

ISBN 978-7-5632-2346-6

I. 液… II. 李… III. 液化石油气—船舶—设备—安全管理—高等学校—教材 IV. U674.92

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第163049号

### 大连海事大学出版社出版

地址: 大连市凌海路1号 邮编: 116026 电话: 0411-84728394 传真: 0411-84727996

<http://www.dmupress.com>

E-mail: [cbs@dmupress.com](mailto:cbs@dmupress.com)

大连金华光彩色印刷有限公司印装

大连海事大学出版社发行

2009年9月第1版

2009年9月第1次印刷

幅面尺寸: 185 mm×260 mm

印张: 12.75

字数: 343千

印数: 1~1 000册

责任编辑: 沈荣欣

版式设计: 晓寒

封面设计: 王艳

责任校对: 杨子江

ISBN 978-7-5632-2346-6

定价: 22.00元

# 前 言

液化气船的发展与石化工业的发展紧密相联，随着石油工业的迅速发展，液化气在工业与民用领域的应用也日益广泛。由于运输成本的原因，气体需液化后在海上运输才经济可行。气体被液化后就称为液化气，如液化石油气（简称 LPG）和液化天然气（简称 LNG）等。液化气船就是一种将液化后的石油气、天然气及理化性质与它们相近的其他化学气体运输到气体消费地或中转站的海上运输专用工具。

根据我国的能源结构调整，液化天然气已经成为一种十分重要的清洁环保能源。为满足进口液化天然气的运输需求，我国航运公司正在逐步地建立和发展液化天然气国际运输船队。LNG 船即液化天然气船，是国际造船界公认的高技术、高可靠性、高附加值的特殊船舶，被誉为“船舶建造皇冠上的明珠”。由沪东中华造船厂承建广东 LNG 运输项目的中国第一条 LNG 船“大鹏昊”于 2008 年 4 月 3 日交付使用，这是中国自主建造的第一艘 LNG 船，填补了中国造船业的空白。可以预见，我国液化气船海上运输事业将呈现一派朝气蓬勃的景象，我国到 2010 年需要 38 艘 LNG，至 2015 年则需要 65 艘以上的 LNG 船。随着我国液化气船建造能力的突破和提高，将逐渐组建 LPG 船和 LNG 船船队，同时带动与液化气船相关的建造、运输、管理等行业的发展。

为了适应我国大规模发展液化气船舶运输的需要，使我校学生为将来从事液化气船相关工作奠定一定的基础，编者于 2006 年开设了全校性选修课程《液化气船舶设备与安全管理》，在一边授课的同时，一边收集、整理相关资料，经过近 2 年的时间，终于使本教材得以付梓出版。

全书共计八章。第一章概述；第二章介绍液化气船的规则、布置和构造原则；第三章介绍液化气船货物操作设备及附属系统；第四章介绍液化气再液化原理及装置；第五章介绍液化天然气船主推进装置；第六章介绍液化气船货物检测仪表及各种监控报警系统；第七章介绍液化气船液货装卸作业；第八章介绍了液化气船“船岸安全检查表”。

本书可作为航海类专业及相关专业液化气船舶有关课程的教学用书，也可作为液化气船舶运输方面的工程技术人员和管理人员学习和工作的参考书。此外，本书也可用作液化气船船员特殊培训之参考资料。

本书由李文华主编；孙玉清教授对全书的组织编写作了全方位的指导，并对全书进行审定；陈海泉教授参与了本书第二章和第三章的编写工作。

在本书的编写过程中，得到王在中、连俊鸿、蒲文广、成江滨、杨成坤、杨海军、侯育闯、王志军、王明涛、王振华、李振中、赵俊豪、洪汇勇、赵一楠、李晓涛等的大力支持与热情提供资料，李可顺为本书的编写做了大量前期工作。在此一并致以衷心感谢。

由于液化气体海上运输涉及的专业技术领域很广，限于编者的理论水平和实践经验，书

中难免有不足或疏漏之处，祈请读者不吝赐正。最后，向本书所参阅、引用有关资料的国内外作者，致以谢忱。

联系地址：辽宁省大连市大连海事大学轮机工程学院；

邮编：116026；

E-mail: liwenhua992@yahoo.com.cn

**编 者**

2009·8

# 目 录

第一章 概述.....	1
第一节 液化气船的发展概况.....	1
第二节 常见的液化气货品.....	3
第三节 气体货物运输的主要方法和液化气船的种类.....	6
第二章 液化气船的规则、布置和构造原则.....	11
第一节 液化气船的规则、指南和规定.....	11
第二节 液化气船的安全布置与要求.....	13
第三节 液化气船液货舱及货物围护系统.....	17
第四节 液化天然气船液货舱结构形式.....	27
第五节 液货舱的试验以及船舶检验和发证.....	37
第三章 液化气船货物操作设备及附属系统.....	41
第一节 货物管路、阀门和滤器.....	41
第二节 液货泵.....	46
第三节 货物压缩机.....	60
第四节 货物加热器和蒸发器.....	72
第五节 惰性气体系统和氮气系统.....	74
第六节 压力释放系统.....	81
第七节 应急切断系统.....	89
第四章 液化气体再液化原理及装置.....	92
第一节 液化气体再液化原理.....	92
第二节 再液化装置的功用与类型.....	96
第三节 再液化装置的应用实例及相关设备.....	101
第四节 再液化装置的各种作业和要求.....	103
第五节 LNG 再液化的原理和类型.....	106
第六节 再液化装置在 LNG 船上的应用.....	115
第五章 液化天然气船主推进装置.....	125
第一节 概述.....	125
第二节 蒸汽轮机推进装置.....	126
第三节 低速发动机推进装置.....	129
第四节 双燃料发动机推进装置.....	134
第五节 燃气轮机推进装置.....	138

第六节 气体燃烧装置.....	139
第六章 液化气船货物检测仪表及各种监控报警系统.....	145
第一节 液化气船的货物监控、测量项目.....	145
第二节 液位测量设备及监控报警装置.....	146
第三节 压力、温度检测设备和报警系统.....	154
第四节 固定式货物气体监测报警系统.....	155
第七章 液化气船液货装卸作业.....	158
第一节 液化气船营运流程.....	158
第二节 干燥与惰化.....	158
第三节 驱气.....	161
第四节 预冷.....	163
第五节 装货.....	165
第六节 载货航行.....	168
第七节 卸货.....	171
第八节 液货舱换装货品.....	178
第九节 液货舱检修前的准备工作.....	180
第十节 LNG 船液货装卸作业.....	182
第八章 液化气船“船岸安全检查表”.....	192
参考文献.....	197

# 第一章 概述

## 第一节 液化气船的发展概况

液化气船的发展与石化工业的发展密切相关。人们在开采、加工石油过程中发现了储量丰富的石油气和天然气，它们既是使用方便、热值高、污染小的燃料，也是重要的化工原料。然而，石油气和天然气在自然环境条件下呈气态，密度很低，只有将这些气态物质进行液化，才能使其便于储存和运输。许多化学气体，如无水氨、氯乙烯、乙烯、丁二烯、环氧乙烷等，它们的理化性质与石油气、天然气相近，存在相同的储运问题。因此，国际上许多机构被这种前景广阔的储运业所吸引，竞相投入大量的人力物力，用于研究和发展这些气态货物在海上的运输。气体被液化后就称为液化气，如液化石油气（Liquefied Petroleum Gas，简称 LPG）和液化天然气（Liquefied Natural Gas，简称 LNG）等。液化气船就是一种将液化后的石油气、天然气及理化性质与它们相近的其他化学气体，运输到气体消费地或中转站的海上专用运输工具。

由于 LNG 和 LPG 是最主要的海上运输液化气货品，其他许多液化气货品均可由这两种船兼运。

### 一、LPG 船

#### 1. LPG 的定义

LPG 是由碳氢化合物组成的混合物，主要含丙烷和丁烷两种可燃物质。这个命名也是为了区别两个不同成分物质的纯度或代表商品的等级。LPG 是很轻的碳氢化合物，无味、无毒，并相当容易从较轻或较重的碳氢化合物中净化析出。LPG 是最纯净的燃料之一，可用于民间、商业和工业市场（它的含硫量很低），因此能与石油、煤油甚至天然气在市场上相互竞争。LPG 蒸发成气体时，既易于管理，燃烧效果又非常好。LPG 能在公路、铁路、海上运输，也可以通过管道运输，以液体形式方便地储存在液化气的生产工厂或其附近的分配中心站以及销售地点的储气库内。

许多石油工业中提炼得到的气体或某些气体由于与 LPG 的物理特性很相近，因此都可以使用 LPG 船来装运。这些气体包括：丁二烯（ $C_4H_6$ ）、丙烯（ $C_3H_6$ ）、氯乙烯单体（VCM）等。

LPG 船的大小一般按液货舱容积划分以下三类：

- (1) 小型—— $8\ 000\ m^3$  以下；
- (2) 中型—— $8\ 000\sim 60\ 000\ m^3$ ；
- (3) 大型—— $60\ 000\ m^3$  以上。

#### 2. LPG 的运输方式

上述提到的 LPG（除沸点为  $-104\ ^\circ C$  的乙烯外）可以用下列的任何一种方法进行运输：

- (1) 全压式，即在环境温度条件下高压液化运输，适用于小型液化石油气船；
- (2) 全冷式，即在大气压力下，充分制冷到  $-30\sim -48\ ^\circ C$ ，即液化石油气沸点的最低温度以下进行运输，适用于大型液化石油气船；
- (3) 半冷半压式，即通过制冷并在必要的压力下液化后进行运输，适用于中型液化石油气



船。

### 3. LPG 船发展概况

在 20 世纪 20 年代就出现了改装旧船，在甲板上安装压力容器来储运液化石油气。世界第一艘专用 LPG 船是“*Agnita*”号，它是由一艘油船改装而成的，由英国的 *Swan Hunter* 船厂负责改装，该船在货舱内垂直地安装着 12 个铆制的压力式液货容器，容器内装载的是常温加压液化的丁烷。在这以后相当长的一段时期里液化石油气船都是由旧船改装的。直到 20 世纪 40 年代末、50 年代初期，欧洲国家开始大量使用液化石油气作为工业生产和民用燃料，液化石油气的海上运输业务日益增多，一些国家才开始设计建造专用的小型全压式液化气船。在整个 20 世纪 50 年代期间，液化气的海上运输采用常温下加压液化方式运输，船舶载货容积小。为增大载货量，减轻造船和运输成本，船用制冷技术被引进液化气运输中来。1959 年英国的一家船厂成功地采用船舶制冷技术，建成了第一艘半冷半压式液化气船“*Descartes*”号，液货舱的压力能达到 0.9 MPa。从 20 世纪 60 年代初期开始，各国才开始建造半冷半压式液化气船。这些早期的半冷半压式液化气船的载货舱容都在 5 000 m<sup>3</sup> 以下。

船舶冷藏技术的应用导致液化气船从全压式发展到半冷半压式，液化气船从此进入一个新的阶段。炼钢技术的发展和耐低温材料技术的革新，又使得液化气船储运温度更低的液货成为可能，从而导致全冷式液化气船相继出现，不但使液化石油气运输得到更为令人满意的效果，而且开创了液化天然气海上运输的历史。

1962 年，日本三菱重工株式会社横滨船厂建成了世界上第一艘全冷式液化石油气船“*Bridgestone Maru*”，该船由纽约亨利公司设计，舱容为 2.8 万 m<sup>3</sup>，可装载 -45 ℃ 的低温液货。在整个 20 世纪 60 年代，液化气船的建造发展非常快。租船人要求船舶具有更大的机动性，新造船要求能够在海上或装货时对货物进行加热或冷却，并能在卸货时提升货物的温度，因此，在 1967 年由 *Chantiers Navaals la Ciotat* 建成第一艘既能装半冷货物又能装全冷货物的船舶——半压全冷式液化气船“*PSCAL*”号，该船还具有把常温的货物装船后再进行冷却的能力，总载货舱容 6 310 m<sup>3</sup>。第二年，该船厂又建成一艘比同类型稍为复杂的总载货舱容为 6 327 m<sup>3</sup> 的远洋运输液化气船“*HUMBOLDT*”号，该船的适装性很强，允许在同一时间向 6 个卧式液货舱装 6 种不同的货物。

近代的液化气船从安全性、经济性、防止海洋和大气污染以及自动化程度等方面都得到了很大提高和完善。另外就适装货品而言，LPG 船从过去只运输单一的 LPG 货物，发展到目前可兼运许多化学气体如氨、氯乙烯、丁二烯等，甚至可装载环氧乙烷、氯和二氧化硫等剧毒特危险货品。

目前世界上容量最大的 LPG 船由现代三湖重工首次建造。该船总长 225 m，型宽 36.6 m，型深 22 米，最大航速 22 kn，容量为 8.2 万 m<sup>3</sup> 级。

## 二、LNG 船

### 1. LNG 的定义

在天然气中，把那些有毒的不纯杂质如硫化氢 (H<sub>2</sub>S) 和一氧化碳 (CO) 除去以后，被制冷成液态，这种呈液体状态的纯净天然气就称为 LNG。

LNG 是由碳氢化合物构成的混合物，主要成分为甲烷，占总体积的 70%~95% (随产地而异)，其余为乙烷、丙烷、丁烷和少量的氮、二氧化碳、硫化氢等。在常温常压条件下，天然气呈气体状态。为了提高天然气的海上运输效率，将天然气在标准大气压下冷却到 -160.5 ℃ 成为液态，体积缩小到约 1/600。LNG 的重量仅为同体积水的 45% 左右，热值为 52 MMBtu/t (1 MMBtu

$=1 \times 10^6 \text{ Btu} = 1.054 \times 10^6 \text{ kJ}$  )。LNG 为无色透明、无味、无毒、不腐蚀的液体。

在液化过程中大部分较重的碳氢化合物 ( $C_4$ 、 $C_5$ 、 $C_6$ ) 得到清除。散装运输的 LNG, 主要是液化甲烷气——一般占容积的 80% 以上, 其余微量的是乙烷、丙烷和丁烷, 许多 LNG 含 1% 的氮 (N)。

LNG 是世界公认清洁能源, 其应用有利于生态环境保护, 尤其是在工业中心和人口稠密地区, 使用 LNG 更具优越性, 目前世界上环保先进的国家都在推广使用液化天然气。

### 2. LNG 的运输方式

在 45 个大气压下, 天然气的临界温度为  $-82 \text{ }^\circ\text{C}$ , 但是在通常的大气压下以散装形式运输 LNG 时, 须将其制冷到  $-163 \text{ }^\circ\text{C}$ 。液化气船与油船总体设计相似, 呈尾机型, 居住舱室都在船尾, 液货都储存在船中部的许多专用液货舱内, 占全船长度的  $2/3 \sim 3/4$ 。

由于装船的液货很轻 (LNG 的密度约为原油的一半), 液货舱不能用作压载舱, 液化气船干舷大都很高。

尽管液化气在非常低的温度下, 或者在高压下装运, 但液化气船通常被认为比油船运输安全, 其原因是: ①船体大多数设计成双层壳结构; ②夹层中间充填惰性气体; ③由于有连续的气体防爆监测装置和周密的装卸操作方法, 因此, 一般认为液化气若漏出舷外, 瞬即汽化, 不会污染海洋和岸边。

LNG 船的大小一般按液货舱容积划分以下五类:

- (1) Small—— $90\,000 \text{ m}^3$  以下;
- (2) Small Conventional—— $120\,000 \sim 149\,999 \text{ m}^3$ ;
- (3) Large Conventional—— $150\,000 \sim 180\,000 \text{ m}^3$ ;
- (4) Q-flex—— $200\,000 \sim 220\,000 \text{ m}^3$ ;
- (5) Q-max—— $260\,000 \text{ m}^3$  以上。

### 3. LNG 船发展概况

世界上 LNG 海上运输始于 1959 年, 当时用杂货船改装的“甲烷先锋号” (Methane Pioneer) 从美国路易斯安那州的查尔斯湖向英国肯威岛 (Canvey) 运送  $5\,000 \text{ m}^3$  LNG。20 世纪 60 年代初期, 英、法等国陆续建造了一些液化天然气船, 容量为  $25\,000 \sim 27\,000 \text{ m}^3$ 。经过试验运输后, 70 年代出现了大型液化天然气船。1978 年法国建成容量达  $130\,000 \text{ m}^3$  的巨型液化天然气船。为保证能源供应多元化和改善能源消费结构, 一些能源消费大国越来越重视 LNG 的引进, 促成了 LNG 船运的快速发展, 近年来国内外船队增长迅速。

今后 LNG 船的发展趋势如下:

- (1) LNG 船大型化: 大型 LNG 船能有效降低 LNG 运输费用。
- (2) 货物围护系统: 新建造的 LNG 船多采用薄膜型液货舱。
- (3) 推进系统: 由于操作维护简单、效率高等原因, 柴油机推进系统有取代蒸汽轮机推进系统的趋势。

## 第二节 常见的液化气货品

国际海事组织 (IMO) 制定的《国际散装运输液化气体船舶构造和设备规则》(IGC 规则) 中的液化气货品有 32 种, 但在液化气海上运输中, 最常见、运输量最大的是作为能源用的液化天然气 LNG 和液化石油气 LPG 两种。本节的内容将重点介绍这两种货品, 此外, 氨、乙烯、

氯乙烯、丙烯等作为化工用途的液化气货品也较为广泛地出现在海上运输中。

## 一、液化天然气 (LNG)

### 1. 液化天然气链

天然气从气田开采出来,要经过处理、液化、船运、接收和再汽化等几个环节,最终送至终端用户,这样便形成了所谓的“液化天然气链”,如图 1-1 所示。液化过程能净化天然气,除去其中的氧气、二氧化碳、硫化物和水。这个处理过程能够使天然气中甲烷的纯度接近 100%。

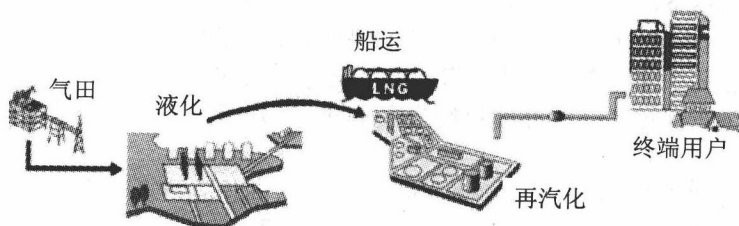
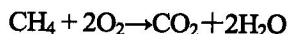


图 1-1 液化天然气链

### 2. 液化天然气的成分

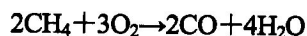
液化天然气主要成分为甲烷,也包括一定量的乙烷、丙烷和重质碳氢化合物,还有少量的氮气、氧气、二氧化碳和硫化物。此外,在天然气管线中还发现含有水分。

甲烷的分子结构是由 1 个碳原子和 4 个氢原子组成,燃烧产物主要是二氧化碳和水:



与其他化工燃料相比,天然气燃烧时仅排放少量的二氧化碳、粉尘和极微量的一氧化碳、碳氢化合物、氮氧化物,因此,天然气是一种清洁的能源。

天然气的主要成分是甲烷,它本身是一种无毒可燃的气体。同其他燃料一样,天然气的燃烧需要大量氧气 ( $\text{O}_2$ )。如果居民用户在使用灶具或热水器时不注意通风,室内的氧气会大量减少,造成天然气的不完全燃烧。不完全燃烧的后果就是产生有毒的一氧化碳 ( $\text{CO}$ ),最终可能导致使用者中毒,反应式如下:



天然气是从地底油田、气田中开采获得的碳氢化合物和非碳氢化合物的混合气体。其中从油田开采中获得的天然气叫伴生天然气,从单独气田开采中获得的叫非伴生天然气。非伴生天然气比较纯净,热值较高。从气田中开采是获得天然气的主要途径。

不同的油气田开采的天然气成分不同。一般而言,甲烷占主要成分,占体积的 70%~95% (有的甚至高达 99%,如阿拉斯加的天然气是一种优质天然气,含甲烷量达 99.5%之多),另含有少量的乙烷、丙烷、丁烷和统称为天然气液 (NGL) 的重质烃,以及少量非烃物 (如水、二氧化碳、氮、硫化氢以及其他非烃杂质)。

天然气液 (NGL) 是指天然气中沸点较高、分子量较大、常温常压下是液体的戊烷及  $\text{C}_5$  以上较重的碳氢化合物。

### 3. 液化天然气的性质和特点

(1) 纯净的 LNG 是无色、无味、无毒和透明的液体, LNG 比水轻,不溶于水。LNG 蒸气温度高于  $-110\text{ }^\circ\text{C}$  时,比空气轻,货物泄漏时蒸气往上升,易于扩散,因此发生爆炸的危险性相对 LPG 较轻。

(2) LNG 化学性质稳定, 与空气、水及其他液化气货品在化学上相容, 不会起危险反应(与氯可能有危险反应)。

(3) 结构材料方面, 由于 LNG 是非腐蚀性货品, 所以只要求能耐低温的金属材料, 如不锈钢、铝、铜、含 9%或 36%全镍的合金钢等。

(4) LNG 无毒, LNG 液体会使眼睛和皮肤严重冻伤, 高浓度的蒸气会使人晕眩困倦但没有持久的影响。另外高浓度的蒸气也可能会造成空间缺氧而使人窒息。

(5) 由于 LNG 的临界温度远低于环境温度, 所以只能采用全冷冻的条件运输与贮存, 即在常压沸点温度下运输, 使用的船型是 2G 型。

(6) 由于 LNG 属于混合物, 货品的成分不同会影响它的理化性质, 运输时须向货主索取有关数据和建议。

## 二、液化石油气 LPG

### 1. 液化石油气的成分

LPG 是液化石油气 (Liquefied Petroleum Gas) 的英文缩写。液化石油气即“被液化了的石油气”, 其本身在常温常压下是气体, 为了便于运输和贮存, 通常采取加压或制冷或两者兼施的方法将其液化。

液化石油气是碳氢化合物的混合物, 主要成分是丙烷和丁烷, 根据生产和净化程度的不同, LPG 主要是由俗称碳三 ( $C_3$ ) 和碳四 ( $C_4$ ) 的一种或多种烃类化合物组成, 括丙烷、正丁烷、异丁烷、丙烯、丁烯-1、顺丁烯-2、反丁烯-2 和异丁烯等 8 种成分; 以及少量俗称碳一 ( $C_1$ )、碳二 ( $C_2$ ) 和碳五 ( $C_5$ ) 的物质组成, 包括甲烷、乙烷、戊烷、乙烯和戊烯等成分。此外还有微量的硫化物、水蒸气/水和其他非烃类杂质。液化石油气的来源不同, 其各种成分和含量也不同。为了准确了解 LPG 的成分和含量, 通常使用气相色谱仪对 LPG 进行定性和定量的分析。

### 2. LPG 的性质和特点

LPG 是  $C_3$  和  $C_4$  的混合物, 货品的组成会影响其理化性质和有关数据。以下仅对 LPG 的一些物理化学性质以及这些性质在使用中的重要性作一些简单介绍。

(1) 气态时密度较空气大, 是空气密度的 1.5~2.1 倍。丙烷、丁烷在标准状态下的气态密度分别为  $2.01 \text{ kg/m}^3$  和  $2.7 \text{ kg/m}^3$ 。

(2) 液态时密度比水小, 约为水密度的 1/2。LPG 密度随温度变化差异很大, 在常温时为  $0.5\sim 0.58 \text{ g/cm}^3$ 。0 °C 时丙烷和丁烷的液体密度分别为  $0.528 \text{ g/cm}^3$  和  $0.601 \text{ g/cm}^3$ 。

(3) 石油气能在常温下加压液化和常压下降温液化, 又能在常温下汽化。从气态转变为液态时, 体积缩小为 1/250~1/300。丙烷和正丁烷在大气压下的沸点分别为  $-42.3 \text{ °C}$  和  $-0.5 \text{ °C}$ 。

(4) LPG 液体溶剂膨胀系数大, 是水的 16 倍。温度上升, 液相体积膨胀大。

(5) LPG 易燃易爆。它的爆炸极限范围较窄, 为 1.5%~9.5%, 而且爆炸下限比其他可燃气体低, 这意味着泄漏少量的 LPG 就可能与空气形成爆炸性混合气体而使环境处于危险中。

(6) LPG 液体汽化潜热大, 液态 LPG 喷出接触人体皮肤时, 会迅速汽化而吸收人体皮肤表面的热量, 造成皮肤冻伤。

(7) LPG 热值高, 为  $22\ 000\sim 29\ 000 \text{ MJ/m}^3$ , 是城市优质燃气, 但燃烧需要的空气量很大, 完全燃烧需 20~30 倍的空气量, 使用场所必须通风良好, 否则易发生使人中毒或窒息事故。

(8) LPG 是石油产品, 与同簇溶解性好, 在酒精、乙醚和高于乙醇的高醇中能完全溶解, 在油脂 (除蓖麻油外) 中能完全溶解。对橡胶软化性强, 在 LPG 货物系统中必须使用耐油和耐酸碱材料 (如合成橡胶、聚四氟乙烯、丁腈制品等)。LPG 基本不溶于水。

(9) LPG 饱和蒸气压力较大, 随温度升高而加大。

(10) 当温度低于露点温度或压力大于饱和蒸气压力时, LPG 气体容易产生凝液, 管道管网输送 LPG 气体时, 应防止 LPG 气体液化。

(11) 自燃温度为 400~500 °C, 燃烧速度为 0.38~0.5 m/s, 爆炸速度为 2 000~3 000 m/s, 火焰温度约为 2 000 °C, 闪点在-104~-80 °C 之间。

(12) 纯净的 LPG 无色、无味、无毒。但如货品不纯, 含有较多硫化氢等硫化物时, 可能会有微毒性, 对人体中枢神经有麻醉作用。当空气中含有 10% (体积) 的 LPG 时, 只要呼吸 2 min 就会引起头昏。LPG 残液中的 C<sub>5</sub> 也能麻醉神经, 使人恶心、呕吐、晕倒甚至休克等。

(13) LPG 化学性质稳定, 与空气、水和其他液化气货品无危险反应 (但与氯可能有危险反应)。由于 LPG 是非腐蚀性物质, 与常用的金属无反应, 如低碳钢 (0 °C 以下不适合)、不锈钢、铝等。

(14) LPG 通常可通过加压、全/半冷冻等方式运输, 使用的船型为 2G/2PG。

### 第三节 气体货物运输的主要方法和液化气船的种类

#### 一、气体货物运输的主要方法

一般来说, 气体液化的目的, 主要在于压缩体积, 加大密度, 增大装载量。因为在常温、常压下的气体状态运输需要庞大的运输设备, 这既不方便又不经济。因此, 为了能装载并运输更多的气体货物, 常采用如下 4 种方法处理: ①使之溶解于液体 (如水等) 中; ②使之变成压缩气体; ③使之变成液化气; ④使之变成冷却固体。经上述①处理后, 实际上为液体货物, 即是化学品运输船的对象; 而用方法②、④, 很不经济。因此, 只有采用方法③, 即设法将气体物质液化, 使之缩小体积, 增大密度并贮藏运输。甲烷液化后的体积仅为气态时的 1/615, 乙烷为 1/406, 丙烷为 1/260, 而丁烷则为 1/230。实践证明, 将气体液化后进行运输既经济又安全, 同时该方法在技术上也已十分成熟。

#### 二、天然气的运输方法

天然气的主要成分是甲烷, 在常压下沸点为-160 °C, 空气中可燃极限为 5%~15%, 是一种低温、可压缩、易燃的气体, 具有密度轻、无毒、不腐蚀等特性。天然气从气田开采出来, 到最终被终端用户使用, 需要一个运输过程, 采用经济、合理和适宜的输送方式就成为天然气能够被广泛利用的前提。

天然气的运输方式有管道运输、压缩天然气 (CNG) 船运输和液化天然气 (LNG) 船运输三种方法。目前主要是采用管道运输 (占 75%) 和液化天然气船运输。

##### 1. 管道运输

应用高压压缩技术将天然气通过长距离、大口径输气管线送往终端用户。管道运输适用于陆地上输送天然气。

优点是: 适于短距离 (小于 3 000 km), 运输气体的数量越大, 相对运输成本越低。

缺点是: 投资成本取决于管道的距离, 不适于隔海运输和远距离传输。

##### 2. 液化运输 (LNG 船)

将天然气冷却液化后, 通过专门的 LNG 船运送至液化天然气的接收终端, 在终端将 LNG

重新汽化输送给最终的使用者。

优点是：适于长距离（超过 3 000 km）；运输成本比较固定，供应比较灵活。

缺点是：液化装置成本高；前期投资成本高。

### 3. 压缩运输（CNG 船）

压缩天然气（Compressed Natural Gas, CNG 或 Pressurized Natural Gas, PNG）作为天然气的一种运输模式正在被人们所关注。压缩天然气可以直接从管道中经清洁后获得或从高压下 LNG 蒸发后获得。压缩天然气是气态而不是液态，压缩后的体积比为（200~300）：1（LNG 大约为 615：1），温度在环境温度至-40℃之间，压力在 10~25 MPa 之间。

与现有的 LNG 船不同，CNG 船是运输在常温下压缩的天然气，即天然气是在气体压缩状态下进行运输，一般是将天然气压缩至原来体积的 1/290，比 LNG 船运输在极低温下液化的天然气更加经济。LNG 船要将天然气在-163℃左右的极低温条件下进行液化后运输，因此，运输液化天然气需要先建设将天然气液化和汽化的工厂，为此需要投资数亿美元。运输压缩天然气则无须建设那种将天然气从气态变成液态，再从液态变成气态的转换工厂，这可节省相当大的一笔资金。当然，一艘 CNG 运输船所能承运的天然气数量仅相当于一艘 LNG 船的 1/4（目前所建造的 LNG 船，每艘船容量一般为 13.8 万~14.5 万 m<sup>3</sup>）。

目前有六家公司提出了各种不同的压缩天然气船的设计方案，各种方案的具体内容见表 1-1。ABS（American Bureau of Shipping）、DNV 和 BV 等船级社针对散装压缩天然气船颁布了指导意见和规范要求。

表 1-1 各种 CNG 船的设计方案

CNG 系统	Coselle (Sea NG) (加拿大)	Enersea (美国)	TransCanada (加拿大)	Trans Ocean Gas (加拿大)	Knutsen (挪威)	CETech (挪威)
CNG 货舱 类型	盘管	圆筒形 压力容器	圆筒形 压力容器	圆筒形 压力容器	圆筒形 压力容器	圆筒形 压力容器
压力容器的 布放	水平盘管	立式	水平	立式	立式	水平
压力容器 材料	钢管	钢管	复合加强的 钢管	复合玻璃或 碳纤维	钢管	钢管
压力容器 直径	150 mm	1 040 mm	1 040 mm	1 040 mm	1040 mm	1 040 mm 或 1 220 mm
压力容器 长度	18 km	24~36 m	24 m	12 m	18~36 m	220 m
压力容器 压力	20 MPa	9~13 MPa	20 MPa	24 MPa	25 MPa	20~25 MPa
压力容器 温度	10℃	-20~-40℃	环境温度	-40℃	环境温度	环境温度

压缩天然气技术为短、中距离运送小、中容量天然气提供了有效的方法。天然气被压缩装在船上的管组内，通过专用的压缩天然气船来运输。

优点是：CNG 船不需要装货码头的液化装置和卸货码头的再汽化装置，这样将节省大量的

成本。

缺点是：CNG 船的装载量要小于 LNG 船；CNG 船不适合长距离运输，一般运输距离在 1 500 km 以内。

### 三、液化气船的种类

液化气船是指将一些气态碳氢化合物（通常是从原油精炼过程中或石脑油等分解过程中制取，同时也可通过从油井和气井中提取的天然气中分离而取得），以及其他一些特殊气体（如氨、氙、氧、氩、氮等）经液化后在一定温度和压力下进行运输的船舶，它是一种半个多世纪以来出现的全新船种。

按照载运的货物以及装载条件的不同，液化气船可分成 6 种不同类型，即全压式运输船、半冷半压式运输船、半压全冷式运输船、全冷式液化石油气运输船、乙烯运输船、液化天然气运输船。

#### 1. 全压式运输船

这类船就货物围护系统和装卸货设备而言是所有气体运输船中最简单的，它们在环境温度下运载货物相应于 45 °C 时丙烷的蒸气饱和压力，碳钢结构的 C 型液货舱压力容器必须采用标准的设计压力 1.75 MPa（表压）。实际使用中还有采用较高设计压力的，1.8 MPa（表压）是很普遍的，少数船也有高达 2 MPa（表压）的。这类船无需绝热层或再液化装置，货物可用液货泵或压缩机进行卸货。

由于设计压力的缘故，液货舱极其笨重。这就决定了全压式运输船趋向小型化，其最大的货舱容积为 4 000 m<sup>3</sup>，主要用来运载液化石油气和氨。在双层底舱和顶边水舱装载压载水。因为这类船采用 C 型货物围护系统，不需要次屏壁，货舱处所可用空气通风。

#### 2. 半冷半压式运输船

这类船因为具有 C 型液货舱——标准设计的压力容器最大工作压力为 0.5~0.7 MPa（表压），所以类似于全压式运输船。该类船的载货容量可高达 7 500 m<sup>3</sup>，主要运载液化石油气。与全压式运输船相比，由于压力的降低，液货舱的壁厚可以减薄，但须配有制冷装置和敷设绝热材料。这类船的液货舱是用能够承受低至 -10 °C 温度的钢材建造的。它们的形状可以是圆柱形、圆锥形、球形或双叶形。

#### 3. 半压全冷式运输船

这类液化气船的运载容量从 1 500 至 30 000 m<sup>3</sup>。它已成为各种气体（从液化石油气、氯乙烯单体至丙烯和丁二烯）最佳的运输工具。目前，该类型的船在“较小型”液化气船经营者间是最受欢迎的。和前述两种类型的液化气船一样，半压全冷式运输船采用 C 型液货舱压力容器，因此不需要次屏壁。液货舱既可由耐低温钢制成能承受 -48 °C 的低温，以适载大多数液化石油气和化学品气体，也可由特殊的合金钢或铝制成，以便能运载 -104 °C 的乙烯。该类型船设计成具有灵活的装卸系统，能够对有压力且制冷的贮罐进行装货或卸货。

#### 4. 全冷式液化石油气运输船

全冷式运输船在接近大气压下运载货物，一般设计用来运输大宗的液化石油气和氨。该类船采用 4 种不同的货物围护系统：带有双层壳的独立型液货舱；带有舷侧单层的独立型液货舱但具有双层底和斗舱；整体液货舱；半薄膜液货舱。后两者均有双层壳。应用得最广泛的是带有舷侧单层壳的独立液货舱，该液货舱为 A 型棱柱形自持式，最大工作压力为 0.07 MPa（表压）。液货舱用耐低温钢建造，能够运载温度低至 -48 °C 的货物。全冷运输式船的载货容积从 10 000 至 100 000 m<sup>3</sup>。

一艘典型的全冷式液化石油气运输船可多达 6 个液货舱，每个液货舱设有横向防荡舱壁及纵向舱壁以改善船舶稳性。液货舱通常以木垫块支撑并与船体滑动连接，能允许膨胀和收缩，同时防止在静载荷和动载荷下产生移动。液货舱还设置了防浮垫块，由于是在低温条件下载货，必须配置绝热材料和再液化装置。

全冷式运输船在操作灵活性方面受到一些限制。但是，常常采用货物加热器和增压泵以便卸货至压力式贮罐。

若为 A 型液货舱，则需要一个完整的次屏壁。当运载易燃货物时，货舱处所必须惰化。压载水装载在双层底舱、顶边水舱或者压载边舱中。

### 5. 乙烯运输船

乙烯运输船是为特定运输而建造的，它的载货容积从 1 000 至 130 000m<sup>3</sup>。1966 年建造第一艘半压全冷式乙烯船“Teviot”号。乙烯气体在大气压下沸点为-104℃，通常以全冷式运载。若采用 C 型压力式液货舱，则不需要次屏壁；若采用 B 型液货舱，则需要部分次屏壁；若采用 A 型液货舱，则需要完整的次屏壁。由于运载-104℃的货物，船体不能作为次屏壁，所以在这种情况下必须设置一个独立的次屏壁。在这种类型的运输船上须配置绝热材料以及大容量的再液化装置。

如上所述，许多乙烯运输船也可以运载液化石油气，以增加其多用性。压载水装载在双层底舱和边压舱中。对于运载低于-55℃的各种货物，不论是 A 型液货舱、B 型液货舱，还是 C 型液货舱，均需设置一个完整的双层壳。

### 6. 液化天然气运输船

LNG 船都是以常压全冷方式运输的，即在大气压下以-163℃左右低温贮存运输。其液货舱材料必须耐-163℃以下的低温。一般液货舱材料是铝合金、铝、不锈钢、镍合金钢等。液货舱设有绝热层。由于 LNG 比 LPG 的贮运温度低得多，所需的再液化设备技术和成本要大得多，因而目前现有的 LNG 专用船一般不设货物蒸气的再液化设备。但为了控制液货舱内的货物温度和压力在允许范围内，其方法是将超压的货物蒸气作为燃料通到机舱内，供船上推进系统或废热系统使用，也可通过蒸气排放系统排至大气。但是将 LNG 排入大气既不经济也不利于环境保护，所以一般只作为应急用。早期大多数 LNG 船都选用蒸汽轮机作推进机械，因为蒸汽轮机容易使用 LNG 蒸气作为锅炉燃料；同时也有用双燃料发动机的，该类发动机能烧重油、货物蒸气和两者混合气；还有燃气轮机，能燃烧处理渣油和渣油、货物混合蒸气的混合气。

为了适装乙烯或 LPG 等其他货品，多用途的 LNG 船则需要装设再液化装置。但运输 LNG 时是采用双燃料发动机而不用再液化装置设备，只有在运输乙烯和 LPG 等货品时才使用再液化装置并停用双燃料系统。

所有的液化天然气运输船沿液货舱长度都设有双层壳，这样为压载提供了足够的容积。

液货舱周围的货舱处所应该始终保持惰化，但对球形的 B 型液货舱围护系统可以例外，该型的货舱处所可以充注干燥的空气，不过在一旦检测到有液货漏泄时应有合适的方法对货舱处所进行惰化。所有的货舱处所需要连续的气体泄漏监测。

由于受到日益增强的环保意识的影响，小型液化天然气分销已经出现。小型液化天然气船正在开发之中，以满足本地配送液化天然气的需要。小型液化天然气船也可以为其他船只提供燃料。各种不同类型的船只使用液化天然气作为燃料可能将成为更为普遍的现象。

由 Nakilat 独立或合资签订合同建造的第一艘 Q-max LNG 船“Mozah”号装载量为 266 000 m<sup>3</sup>，于 2008 年 9 月 29 日在 Samsung Heavy Industries Shipyard on Geoje Island 交付给 Qatargas Operating Company Limited and Qatar Gaz Transport Company (Nakilat)。Q-max 船长



345 m, 船宽 55 m, 吃水 12 m, 装载量 263 000 至 266 000 m<sup>3</sup>。由于船上装有再液化装置, 采用智能柴油机推进, 燃烧更少的燃料, Q-max 和 Q-Flex LNG 船分别比传统 LNG 船多出 80%和 50%的货物装载量, 但是所需能量降低了 40%, 并降低了二氧化碳的排放。常规 LNG 船只能运输 95%的货物到达卸货港, 每天需要燃烧 0.14%的货物燃料, 而 Q-max 和 Q-Flex LNG 船能运输 100%货物达到卸货港。