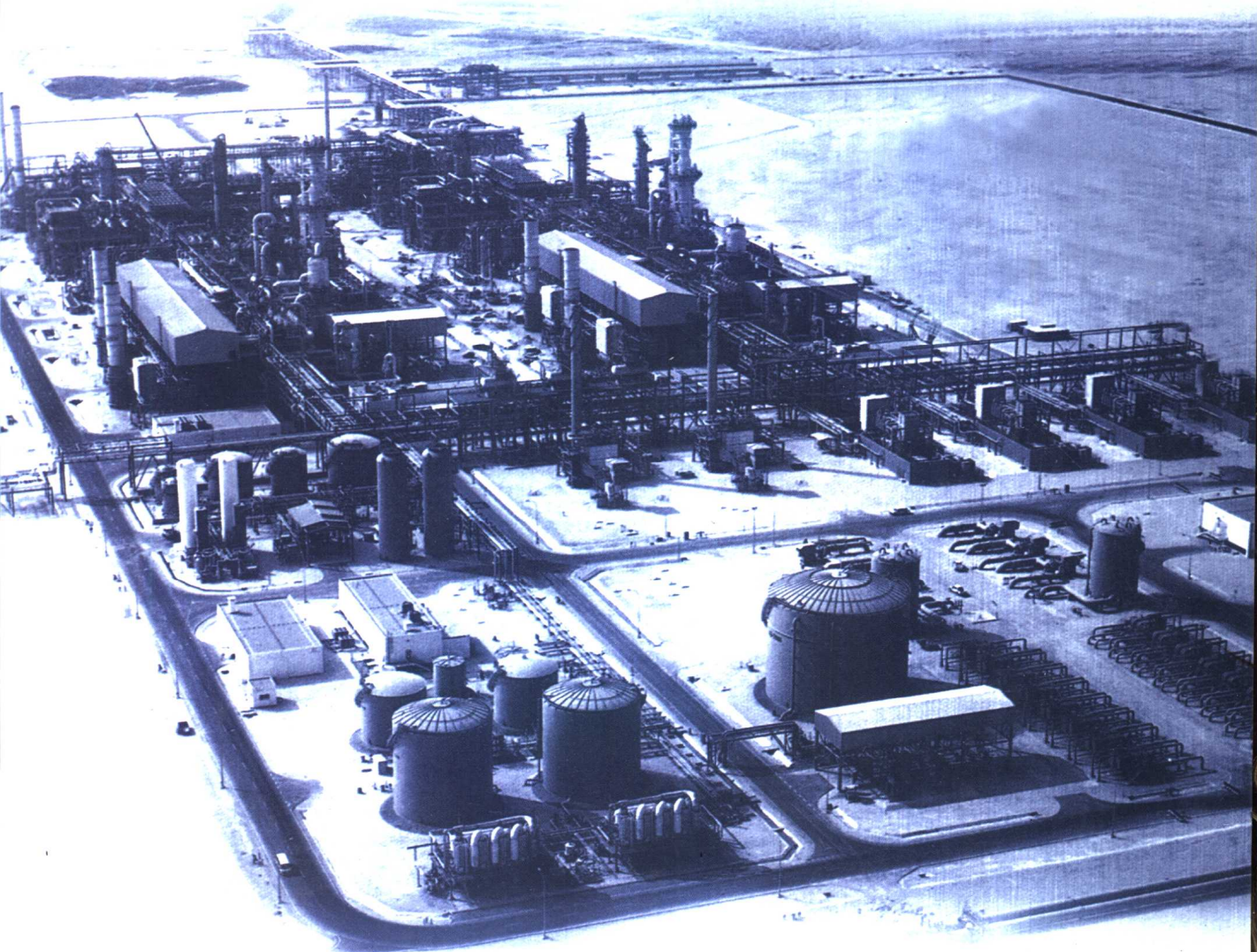


机械工业出版社出版基金资助项目

液化天然气技术

顾安忠 等著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



机械工业出版社出版基金资助项目

液化天然气技术

顾安忠 鲁雪生 汪荣顺 著
石玉美 林文胜



机械工业出版社

本书是为了适应我国大规模开发利用天然气的需要,针对天然气液化和储存的关键技术,全面系统地阐述液化天然气的基本理论、最新技术和工程应用。内容包括天然气的热物理特性,液化天然气工业链的各个环节,即天然气的预处理、天然气的低温液化流程和设备、液化天然气的储存和运输、液化天然气的再汽化、冷量回收,以及液化天然气的应用等。本书全面反映了国内外液化天然气技术的最新应用和技术发展,内容全面、丰富、新颖。

本书可作为能源领域,尤其是天然气应用领域的专业教材,也可作为从事这一领域的科研人员和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

液化天然气技术/顾安忠等著. -北京:机械工业出版社,2003.10
ISBN 7-111-13040-5

I.液… II.顾… III.液化天然气—技术 IV.TE64

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第081097号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:蒋有彩

责任编辑:蒋有彩 版式设计:张世琴 责任校对:申春香

封面设计:姚毅 责任印制:闫焱

北京瑞德印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004年1月第1版第1次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·21.75印张·540千字

0 001—4 000册

定价:36.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

序

中国天然气工业的发展曾受到丰富煤炭资源的压抑。但近年来在环境保护的巨大压力下，随着中国政府能源政策和能源结构的调整，以及大量气源的探明，天然气的开发和利用已成为不可逆转的大趋势。天然气的开发、储存和应用技术已成为专门技术领域，受到工程和学术界广泛关注。天然气的液化和储存技术又是开发利用天然气的关键技术之一。开展液化天然气技术研究、攻关、人才培养和技术传播，将对中国经济持续发展产生重要影响。中国目前在液化天然气的研究、开发、工程化等领域都还处于起步阶段，急需有关专著进行全面系统的介绍。因此，此书的出版正适应了中国大规模开发利用天然气形势的迫切要求。

本书的主编顾安忠是上海交通大学的资深教授、博士生导师、低温工程学科带头人。他从1982年在美国燃气工艺研究院及伊利诺斯州理工学院任访问学者起，就开始进行液化天然气方面的研究工作，是中国最早涉猎液化天然气领域的专家之一。二十余年辛勤耕耘，培养、带领出一支学术水平高、研究实力雄厚，且团结合作的液化天然气方面学术研究、技术开发队伍。顾安忠教授渊博的专业知识、踏实的工作作风和谦和坦诚的人品，更为上海交通大学师生和国内外制冷和低温界人士所敬重。

二十多年来，以顾安忠教授为首的液化天然气课题组进行了大量研究、开发工作，持续承担中国的天然气液化及相关项目，包括国家自然科学基金资助的“新型天然气液化流程的热力研究”等基础性研究项目，以及“八五”、“九五”国家攻关项目。他们还参与中国东海天然气调峰装置、陕北气田液化天然气和中原油田液化天然气等重要工程项目，发表天然气方面学术论文六十余篇，积累了丰硕的研究成果。在国内外工业、学术界均有较大影响。

这本《液化天然气技术》专著深入系统地介绍了液化天然气工业链上各环节的内容，包括天然气物性、原料天然气的预处理、天然气的低温液化、低温储存、液化气的再汽化、冷量回收，以及天然气的应用等诸多环节，集中了课题组二十多年来的研究成果。本书内容广泛、理论深度适中、系统性强，具有很好的学术和应用价值，是国内全面展现液化天然气技术的第一本专著。本书的出版必将为高等院校化工和能源的本科生和研究生提供一本内容翔实、理论与实践相结合的实用教材，并为上述领域的科技工作者提供了一本极有价值的参考书，将为该学科的技术进步、人才培养、天然气开发利用起到积极的推动作用。

李行恕博士 (Dr. Bernard S. Lee)

2003年5月

李行恕——原美国燃气工艺研究院 (IGT) 院长

前 言

天然气是一种优质洁净燃料，在能源、交通等领域具有十分诱人的前景。天然气的液化和储存是其开发利用的一项关键技术。液化天然气（LNG）技术是高科技的系统工程，已形成了一个工业链。三十年来，液化天然气技术作为世界上一门新兴工业正在飞速发展，目前仍然保持着强劲的势头。我国有丰富的天然气资源，但大规模开发利用天然气，尤其是开发和应用 LNG 技术起步很晚。长期以来，LNG 在中国是一个陌生的名词和概念，对 LNG 工业链既缺乏基础的定量研究，又很少对它的技术内涵有系统了解。为了适应我国已经面临大规模开发利用天然气的新形势，尽快改变国内在 LNG 产业上的薄弱状态。急需有相关著作对其进行全面系统的论述和介绍。

以顾安忠为首的研究小组，从 20 世纪 70 年代末就将 LNG 技术作为一个主要研究目标，持续不断地从基础研究到工程实践，从本科专业教学到高层次人才培养，做了大量的工作。特别是在 20 世纪 90 年代，先后三次获得国家自然科学基金的资助，一次高等院校博士点基金资助，大大促进了对 LNG 应用的基础理论进行深入的研究。与此同时，研究小组还不同程度地参加或参与了我国 LNG 领域的一些重要工程实践，如东海天然气事故调峰站工程研究，陕北气田 LNG 工程的前期论证，中原油田 LNG 工厂的评审、技术总结等，取得了一系列的成果。在国内外发表了近七十篇论文，其中四篇论文连续四次被世界上权威的 LNG 大会所录用并发表，在国内外同行中形成一定的影响。本书就是在此基础上撰写而成的国内第一本 LNG 技术的专著，突出了理论与实践相结合，全面系统和重点突出相结合的特点。参加编写的人员由研究小组中的教授和博士组成。顾安忠教授为主编，并承担绪论、第 1 章和第 6 章的撰写，鲁雪生研究员撰写第 5 章和第 8 章，汪荣顺教授撰写第 2 章，石玉美博士撰写第 3 章、第 4 章及附录，林文胜博士撰写第 7 章和第 6 章的 6.4 节。全书各章涵盖了天然气的物性、天然气的低温液化和储运、液化气的再汽化和冷量回收，以及液化天然气的应用等方面的内容。尤其在第 1 章、第 3 章、第 6 章和第 8 章中，收入了研究组和多位博士生、硕士生的研究结果。

在本书的编写中，得到国际知名能源专家，四次国际 LNG 大会主席，前美国燃气工艺研究院院长李行恕博士的关注，并专门为本书写了“序”，在此深表谢意。为本书的出版，中国科学院理化中心张亮研究员、上海海运学院卢士勋教授和上海交通大学王经教授作了有力的推荐。在本书的编写过程中，还得到了许多能源领域、深冷设备制造企业的专家和工程技术人员的关心、支持，并提供了部分很有价值的素材和信息，在此表示感谢。

本书可作为能源领域、低温工程领域，尤其是天然气应用领域的大学专业教材，也可作为从事这一领域的科研人员和工程技术人员的参考书。

作 者
2003 年 5 月

本书常用符号、名称及单位

a	热扩散率	m^2/s	$q_{n,l}$	液相摩尔流量	mol/s
A	面积	m^2	q_m	质量流量	kg/s
c	质量热容、比热容	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	q_v	体积流量	m^3/s
c_p	质量定压热容、比定压热容	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	Q	热量	J
$C_{p,m}^{\text{id}}$	理想气体的摩尔定压热容	$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$	r	潜热	J/kg
$C_{v,m}$	混合物的摩尔定容热容	$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$	R	摩尔气体常数	$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
D, d	直径	m	Ra	瑞利数	1
E_x	焓	J	S_m	摩尔熵	$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
e_x	质量焓、比焓	J/kg	S_m^{id}	摩尔理想熵	$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
g	重力加速度	m/s^2	S_m^{res}	摩尔余熵	$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
h	普朗克常量	1	$S_{m,o}$	基准点摩尔熵	$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
h	高度	m	S	熵	J/K
h	表面传热系数	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	t	时间	s
h	质量焓、比焓	J/kg	T	温度	K
H	焓	J	T_b	正常沸点温度	K
H_m	摩尔焓	J/mol	T_B	泡点	K
H_m^{id}	摩尔理想焓	J/mol	T_c	临界温度	K
H_m^{res}	摩尔余焓	J/mol	$T_{c,m}$	混合物的虚拟临界温度	K
$H_{m,o}$	基准点摩尔焓	J/mol	T_D	露点	K
k_{ij}	SPK 方程和 PR 方程中的二元交互作用系数	1	T_r	对比温度 ($T_r = T/T_c$)	1
K	传热系数	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	$T_{r,m}$	混合物的虚拟对比温度	1
K_i	相平衡中平衡常数	1	ΔT_m	对数平均温差	K
L	长度	m	u	质量热力学能, 比热力学能	J/kg
Le	刘易斯数	1	v	速度	m/s
m	质量	kg	v	质量体积、比体积	m^3/kg
M_r	相对分子质量	1	V	体积	m^3
$M_{r,m}$	混合物相对分子质量	1	V_m	摩尔体积	m^3/mol
p	压力	Pa	V_c	临界摩尔体积	m^3/mol
p_c	纯物质的临界压力	Pa	$V_{c,m}$	混合物的虚拟临界摩尔体积	m^3/mol
$p_{c,m}$	混合物的虚拟临界压力	Pa	V_r	对比摩尔体积	1
p_r	纯物质的对比压力 ($p_r = p/p_c$)	1	x	液相摩尔分数	1
$p_{r,m}$	混合物的虚拟对比压力	1	y	气相摩尔分数	1
P_r	普朗特数	1	z	总流量中的摩尔分数	1
q_n	总摩尔流量	mol/s	z_i	组分 i 的摩尔分数	1
$q_{n,v}$	气相摩尔流量	mol/s	Z	压缩因子	1
			Z_c	临界压缩因子	1

$Z_{c,i}$	组分 i 的临界压缩因子	1	ρ_L	液相密度	kg/m^3
$Z_{c,m}$	混合物的虚拟临界压缩因子	1	ρ_v	气相密度	kg/m^3
γ	比热 [容] 比	1	ρ_r	对比密度	1
δ	厚度	m	$\rho_{r,m}$	混合物虚拟对比密度	1
η	粘度	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	σ	表面张力	J/m^2
λ	热导率	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	ϕ_i	组分 i 的逸度系数	1
λ_m	混合物热导率	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	Φ	热流量	W
ν	运动粘度	m^2/s	ω	偏心因子	1
ρ	密度	kg/m^3	ω_m	混合物的偏心因子	1
ρ_c	临界密度	kg/m^3			

目 录

序	
前言	
本书常用符号、名称及单位	
绪论	1
0.1 天然气	1
0.2 中国的天然气	1
0.2.1 天然气的勘探	1
0.2.2 天然气的开发	2
0.2.3 天然气管道建设	2
0.3 液化天然气	2
0.3.1 LNG 工业链	3
0.3.2 市场预测	5
0.4 中国的液化天然气工业	6
参考文献	7
第 1 章 天然气热物理特性	8
1.1 引言	8
1.1.1 天然气的热力学性质	8
1.1.2 天然气的迁移特性	9
1.2 天然气的气液相平衡	10
1.2.1 相平衡计算的难点	10
1.2.2 相平衡计算所用的状态方程和逸度方程	10
1.2.3 (p, T) 闪蒸计算	12
1.2.4 (p, H) 闪蒸和 (p, S) 闪蒸计算	13
1.2.5 泡点和露点的计算	14
1.2.6 低温气液相平衡试验	15
1.3 天然气的焓和熵	18
1.3.1 计算焓和熵的表达式	18
1.3.2 计算焓和熵的方法	19
1.3.3 计算结果与国外试验结果的比较	20
1.4 天然气的粘度	21
1.4.1 常用的粘度算法综述	21
1.4.2 不同压力范围相应的天然气粘度计算模型	21
1.4.3 天然气的统一粘度计算模型	24
1.5 天然气的热导率	29
1.5.1 常用的热导率计算方法综述	29
1.5.2 不同压力范围及相态的天然气热导率计算模型	30
1.5.3 天然气热导率对应态预测模型	32
1.5.4 计算结果与实验数据的对比分析	33
1.6 天然气的表面张力	34
参考文献	36
第 2 章 天然气的预处理	38
2.1 脱水	39
2.1.1 冷却脱水	39
2.1.2 吸收脱水	39
2.1.3 吸附脱水	41
2.2 脱酸性气体	45
2.2.1 脱硫方法分类和选择	45
2.2.2 常用的净化方法	49
2.3 其它杂质的脱除	52
参考文献	53
第 3 章 天然气液化流程	54
3.1 级联式液化流程	54
3.2 混合制冷剂液化流程	56
3.2.1 闭式混合制冷剂液化流程	56
3.2.2 开式混合制冷剂液化流程	57
3.2.3 丙烷预冷混合制冷剂液化流程	57
3.2.4 CII 液化流程	59
3.3 带膨胀机的液化流程	60
3.3.1 天然气膨胀液化流程	60
3.3.2 氮气膨胀液化流程	61

3.3.3 氮-甲烷膨胀液化流程	62	4.2 调峰型天然气液化装置	133
3.3.4 其它膨胀液化流程	63	4.2.1 采用天然气直接膨胀液化流程的 调峰型液化装置	133
3.4 天然气液化流程中的设备		4.2.2 采用氮膨胀液化流程的调峰 型液化装置	134
模拟	63	4.2.3 我国第一座调峰型天然气 液化装置	134
3.4.1 压缩机模块	65	4.2.4 调峰型天然气液化装置及其 运行情况	138
3.4.2 膨胀机和节流阀模块	65	4.2.5 调峰型天然气液化装置的经济性 评价原则	140
3.4.3 气液分离器模块	66	4.3 浮式液化天然气生产储卸 装置	142
3.4.4 物流混合器模块	66	4.3.1 液化流程	143
3.4.5 多股流换热器模块	67	4.3.2 储存系统	143
3.4.6 设备模块计算的验证	68	4.3.3 卸货操作	144
3.5 基本负荷型天然气液化装置中 液化流程的热力学分析	70	4.3.4 总体布局	144
3.5.1 流程	70	4.4 液化天然气接收终端	145
3.5.2 流程模拟	71	4.4.1 LNG 接收终端工艺流程	145
3.5.3 流程参数分析	72	4.4.2 国外 LNG 接收终端	147
3.5.4 流程优化分析	83	参考文献	155
3.5.5 流程焓分析	87	第 5 章 液化天然气装置的 相关设备	157
3.6 调峰型天然气液化装置中液化 流程的热力学分析	90	5.1 压缩机	157
3.6.1 流程	90	5.1.1 往复压缩机	157
3.6.2 流程模拟	92	5.1.2 离心压缩机	158
3.6.3 流程参数分析	93	5.2 换热器	160
3.6.4 流程优化分析	105	5.2.1 绕管式换热器	161
3.6.5 调峰型天然气液化流程的比较	112	5.2.2 板翅式换热器	162
3.6.6 调峰型天然气液化流程的焓 分析	112	5.2.3 LNG 汽化器	163
参考文献	114	5.2.4 换热器的换热能力	167
第 4 章 天然气液化装置	116	5.2.5 传热过程中存在的问题	169
4.1 基本负荷型天然气液化装置	116	5.3 LNG 泵	170
4.1.1 采用级联式液化流程的基本 负荷型液化装置	116	5.3.1 潜液式电动泵	171
4.1.2 采用闭式混合制冷剂液化流程的基 本负荷型液化装置	118	5.3.2 潜液式电动泵的应用	173
4.1.3 采用丙烷预冷混合制冷剂液化流程 的基本负荷型液化装置	119	5.3.3 LNG 泵的平衡要求	175
4.1.4 基本负荷型液化装置中液 化流程的比较	120	5.3.4 LNG 泵的试验	176
4.1.5 我国的基本负荷型天然气 液化装置	121	5.3.5 非潜液式低温泵在 LNG 系统中的 应用	177
4.1.6 国外基本负荷型液化装置概况	123	5.3.6 LNG 泵的运行	178
4.1.7 投资分析	129	5.4 LNG 输送管路	179

5.4.1 冷收缩问题	179	第 7 章 液化天然气的汽化与 利用	237
5.4.2 LNG 管路的隔热	180		
5.4.3 管道的预冷和保冷	182		
5.4.4 LNG 管路的试验	183		
5.4.5 管内流阻	185		
5.5 膨胀机	185		
5.5.1 透平膨胀机工作原理与结构	186		
5.5.2 透平膨胀机在天然气工业 中的应用	186		
5.5.3 透平膨胀机的工作特点与类型	187		
5.5.4 透平膨胀机的主要参数	188		
参考文献	190		
第 6 章 液化天然气的储运	191		
6.1 液化天然气储罐 (槽)	191		
6.1.1 型式分类	191		
6.1.2 LNG 储罐 (槽) 结构	194		
6.1.3 LNG 储槽内部观察装置	201		
6.2 液化天然气船	202		
6.2.1 LNG 船运在 LNG 工业链中的 作用	202		
6.2.2 LNG 货舱的围护系统	203		
6.2.3 各种 LNG 船的建造量	209		
6.2.4 典型 LNG 船的货舱分布	213		
6.2.5 LNG 船的技术新构思	216		
6.2.6 推进中国 LNG 船制造业	216		
6.3 液化天然气槽车	217		
6.3.1 LNG 槽车的隔热方式	218		
6.3.2 LNG 槽车的安全设计	218		
6.3.3 LNG 槽车的输液方式	219		
6.3.4 LNG 槽车容量的大型化和 列车化	219		
6.3.5 LNG 槽车运行高速化	220		
6.3.6 LNG 槽车实例	220		
6.4 液化天然气储存中的 分层和涡旋	225		
6.4.1 涡旋现象	225		
6.4.2 分层与涡旋现象的机理	225		
6.4.3 分层与涡旋的理论模型	227		
6.4.4 涡旋预防的技术措施	234		
参考文献	235		
7.1 液化天然气的汽化	237		
7.1.1 液化天然气汽化站的总体考虑	237		
7.1.2 液化天然气汽化工艺	240		
7.1.3 液化天然气汽化工艺设备	241		
7.1.4 测量仪表	244		
7.1.5 汽化站的消防与安全	245		
7.1.6 汽化站建设实例	246		
7.2 液化天然气储罐的自增压供气 系统	248		
7.2.1 增压供气系统概述	248		
7.2.2 自增压系统稳压供气原理	249		
7.2.3 增压管路传热及流动计算	252		
7.3 液化天然气及其冷量利用的 焓分析	254		
7.3.1 LNG 冷量焓分析数学模型	254		
7.3.2 LNG 冷量焓特性分析	256		
7.4 液化天然气发电	257		
7.4.1 天然气发电概况	257		
7.4.2 天然气直接膨胀发电	261		
7.4.3 利用 LNG 的蒸气动力循环	262		
7.4.4 利用 LNG 的气体动力循环	263		
7.4.5 利用 LNG 的燃气-蒸气 联合循环	267		
7.5 液化天然气为燃料的 运输工具	269		
7.5.1 液化天然气作为运输工具 燃料的优势	269		
7.5.2 液化天然气汽车燃料系统	271		
7.5.3 液化天然气加注站	275		
7.5.4 以液化天然气为燃料的其它 运输工具	277		
7.6 液化天然气冷量用于 空气分离	280		
7.6.1 概述	280		
7.6.2 利用 LNG 冷量提高空分装置 液化率	282		
7.6.3 利用 LNG 冷量降低空分 装置压力	284		

7.7 液化天然气冷量的其它	
利用途径	284
7.7.1 制取液化二氧化碳和干冰	284
7.7.2 冷库	285
7.7.3 低温破碎和粉碎	285
7.7.4 蓄冷装置	286
参考文献	286
第 8 章 液化天然气安全技术	290
8.1 引言	290
8.2 液化天然气的有关安全特性	290
8.2.1 燃烧范围	291
8.2.2 着火温度与燃烧速度	292
8.2.3 LNG 的低温特性	293
8.2.4 对生理上的影响	293
8.3 有关安全检测设备	294
8.3.1 可燃气体检测器 (CGD)	294
8.3.2 火焰检测器	295
8.3.3 高温检测器	295
8.3.4 低温检测器	295
8.3.5 烟火检测器	295
8.3.6 缺氧检测设备	296
8.4 LNG 溢出或泄漏	296
8.4.1 LNG 储罐处于火灾情况下的 传热计算	297
8.4.2 LNG 泄漏或溢出后的蒸气扩散	298
8.4.3 LNG 泄漏或溢出的预防	299
8.5 LNG 溢出与防火技术	300
8.5.1 概述	300
8.5.2 紧急状态的应对措施	300
8.5.3 LNG 溢出的控制方法	301
8.5.4 有关消防保护	301
8.5.5 灭火剂	302
8.6 基础设施的安全要求	304
8.6.1 LNG 储罐的最小距离	304
8.6.2 汽化器等工艺设备的安装距离	304
8.6.3 LNG 储罐的防震	304
8.7 LNG 储存中的安全问题	305
8.7.1 LNG 储罐的充注条件	305
8.7.2 LNG 储罐的最大充装容量	306
8.7.3 LNG 储罐的压力控制	307
8.7.4 间歇泉和水锤现象	307
8.8 管路和阀件的安全要求	308
8.9 装卸作业	308
8.10 消防和防护	309
8.11 紧急关闭系统	310
8.12 人员安全与救护	310
参考文献	311
附录	312
附录 A 附表	312
表 A-1 R50 (甲烷) 饱和液体、蒸气 热物性数据之一	312
表 A-2 R50 (甲烷) 饱和液体、蒸气 热物性数据之二	314
表 A-3 R170 (乙烷) 饱和液体、蒸气 热物性数据	316
表 A-4 R290 (丙烷) 饱和液体、蒸气 热物性数据之一	318
表 A-5 R290 (丙烷) 饱和液体、蒸气 热物性数据之二	320
表 A-6 R600 (正丁烷) 饱和液体、蒸气 热物性数据	322
表 A-7 R600a (异丁烷) 饱和液体、蒸气 热物性数据	324
表 A-8 R1150 (乙烯) 饱和液体、蒸气 热物性数据	326
表 A-9 R728 (氮气) 饱和液体、蒸气 热物性数据之一	328
表 A-10 R728 (氮气) 饱和液体、蒸气 热物性数据之二	330
附录 B 附图	332
图 B-1 R50 (甲烷) $p-h$ 图	332
图 B-2 R170 (乙烷) $p-h$ 图	333
图 B-3 R290 (丙烷) $p-h$ 图	334
图 B-4 R600 (正丁烷) $p-h$ 图	335
图 B-5 R600a (异丁烷) $p-h$ 图	336
图 B-6 R1150 (乙烯) $p-h$ 图	337
图 B-7 R728 (氮气) $p-h$ 图	338

绪 论

0.1 天然气

天然气与煤炭、石油并称目前世界一次能源的三大支柱。天然气的蕴藏量和开采量都很大，其基本成分是甲烷。它除了是廉价的化工原料外，主要作为燃料使用。由于天然气热值高，燃烧产物对环境污染少，被认为是优质洁净燃料。

随着世界经济的发展，石油危机的冲击和煤、石油所带来的环境污染问题日益严重，使能源结构逐步发生变化，天然气的消费量急剧增长。最近二十年，天然气工业发展较快，在一次能源结构中已占约 24%。它不仅作为居民的生活燃料，而且还被用作汽车燃料，如出租车（日本），公共汽车（美国、意大利、加拿大）和大货车。作为美国三大汽车制造商的通用汽车公司、福特汽车公司和克莱斯勒公司，于 1994 年在华盛顿宣布联合研制以天然气为动力燃料的新型汽车计划，一旦用天然气作为燃料驱动的汽车全面走向市场，其前景是光明的。天然气用于联合发电系统、热泵（供冷和供热）、燃料电池等方面都具有十分诱人的前途，发达国家都在竞相进行应用开发。

0.2 中国的天然气^[1]

中国天然气资源比较丰富，根据第二轮全国油气资源评价结果，中国天然气资源量约为 $3.8 \times 10^{13} \text{ m}^3$ 。近些年来，中国在天然气的地质综合研究、勘探、开发和合理利用方面均有进展。

0.2.1 天然气的勘探

经过近五十年的勘探，在中国的四川、鄂尔多斯、塔里木、琼东南、莺歌海，以及东海盆地的勘探，取得重大发现，基本形成六大天然气主要探区。截止 2001 年底，中国（未含台湾省）探明天然气地质储量为 $3.01 \times 10^{13} \text{ m}^3$ 。目前已探明的天然气储量分布在 21 个盆地之中，主要集中在四川、鄂尔多斯、塔里木、柴达木、琼东南、莺歌海、东海、渤海湾、松辽、准噶尔、吐哈盆地等 11 个盆地之中。上述 11 个盆地探明天然气地质储量 $2.98 \times 10^{13} \text{ m}^3$ ，占中国天然气储量的 99.29%^[1]。

发现储量大于 $3 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 的大型气田 22 个，探明天然气地质储量 $1.83 \times 10^{13} \text{ m}^3$ 。另外，发现储量大于 $5 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 而小于 $3 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 的中型气田 67 个。上述 89 个大中型气田探明储量占全国累计探明储量的 88%，是开发的主体。

近期天然气勘探不断取得新突破，具体表现在鄂尔多斯盆地苏里格气田含气面积进一步扩大；四川盆地罗家寨、铁山坡气田储量规模基本明朗；塔里木盆地库车坳陷发现迪那、库车塔吾气田基本明朗。

1993 年中国剩余天然气可采储量位居世界第 22 位。2000 年剩余天然气可采储量位居世界第 19 位。

0.2.2 天然气的开发

随着 20 世纪 50 年代末期在四川盆地川东南地区发现一批中小型气田，天然气开发已基本形成规模，到 1960 年，中国天然气年产量达到 $1 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，随着松辽、渤海湾盆地大批油气田的发现，油田伴生气产量大幅提高，到 1976 年，中国天然气年产量突破 $1 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 大关；随着南海琼东南盆地崖 13-1 气田的开发，到 1996 年，中国天然气年产量超过 $2 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ；近年随着鄂尔多斯盆地等天然气的大规模开发，2001 年天然气产量接近 $3 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。

目前，中国已建成四川盆地（2001 年年产天然气 $9.8 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ）、鄂尔多斯（2001 年年产天然气 $3.4 \times 10^9 \text{ m}^3$ ）、琼东南（2001 年年产天然气 $3.4 \times 10^9 \text{ m}^3$ ）、渤海湾（2001 年年产天然气 $4.8 \times 10^9 \text{ m}^3$ ）、松辽（2001 年年产天然气 $2.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ ）等 5 个年产天然气超过 $2 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 的生产基地。

塔里木、柴达木、莺歌海、东海建成 $2 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 以上规模指日可待。塔里木盆地随西气东输管道的建成，年产量将达到 $1.2 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 以上；柴达木盆地随着涩-宁-兰管道的全线贯通，市场将不断扩展，年产量可达 $3.0 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ；莺歌海气田的开发工作已进入前期设计，用气项目已基本落实（海南天然气化工基地），年产量可达 $2.0 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 以上；东海盆地春晓、天外天气田开发已进入前期设计，可新增生产能力 $(1.5 \sim 2.0) \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，年产量可达到 $(2.0 \sim 2.5) \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。

0.2.3 天然气管道建设

经过多年管道建设，形成了连接四川盆地已开发气田和主要消费区的环形输气管网；已形成以鄂尔多斯盆地靖边为中心的辐射形管网，将天然气输往京津地区、关中平原、银川平原。已形成以柴达木盆地东部涩北地区为中心，连接敦煌、格尔木、西宁-兰州的天然气管道。另外建成南海崖 13-1 气田到香港的海底输气管道，建成东海平湖到上海的海底输气管道。

目前已开工建设或即将开工建设的西气东输管道、忠县-武汉-长沙的输气管道和已建成的管道，将主要天然气产地和主要消费市场连接起来，国内骨干管道初步形成。

0.3 液化天然气

由于天然气的产地往往不在工业或人口集中地区，特别是海上天然气的开发，必须解决运输和储存问题。天然气的主要组分是甲烷，其临界温度为 190.58K，故在常温下，无法仅靠加压将其液化。通常的液化天然气（LNG）多存储在温度为 112K、压力为 0.1MPa 左右的低温储罐内，其密度为标准状态下甲烷的 600 多倍，体积能量密度为汽油的 72%，十分有利于输送和储存。天然气的液化、储存技术已逐步成为一项重大的先进技术。

目前，世界上液化天然气（LNG）技术已经成为一门新兴工业正在迅猛发展。LNG 技术除了用来解决天然气储存、运输问题外，还广泛地用于天然气使用时的调峰装置上。天然气作为城市民用燃气或发电厂的燃料，不可避免会有需要量的波动，这就要求供应上具有调峰作用。液化天然气最有利于调峰储存。目前，世界上共有 100 多座调峰型液化天然气装置。液化天然气还可用于汽车、船舶、以及飞机等交通运输工具。

天然气液化工作始于 20 世纪初，但直到 20 世纪 40 年代才建成世界上第一座工业规模

的天然气液化装置。1964年，世界上第一座LNG工厂在阿尔及利亚建成投产。同年，第一艘载着1.2万t LNG的船驶向英国，标志着世界LNG贸易的开始。

LNG是当今世界增长最快的一种燃料。自从1980年以来，LNG出口量几乎以每年8%的速度增长。2000年，全球LNG贸易量为105.5Mt，比上一年增长11.2%。目前，LNG占全球天然气市场的5.6%及天然气出口总量的25.7%。各国均将LNG作为一种低排放的清洁燃料加以推广。亚洲LNG进口量已占全球进口总量的70%以上，亚洲的能源市场，特别是中国和印度，已成为各国竞争的焦点。

全球LNG贸易主要集中在亚太地区、大西洋-地中海盆地。亚太地区的日、韩是两大进口国，印尼、马来西亚是两大出口国。在大西洋-地中海盆地，法国、美国是主要进口国，尼日利亚、阿尔及利亚、特立尼达和多巴哥是主要的出口国。

近十多年来LNG价格变化如图0-1所示。目前LNG价格呈上扬趋势。

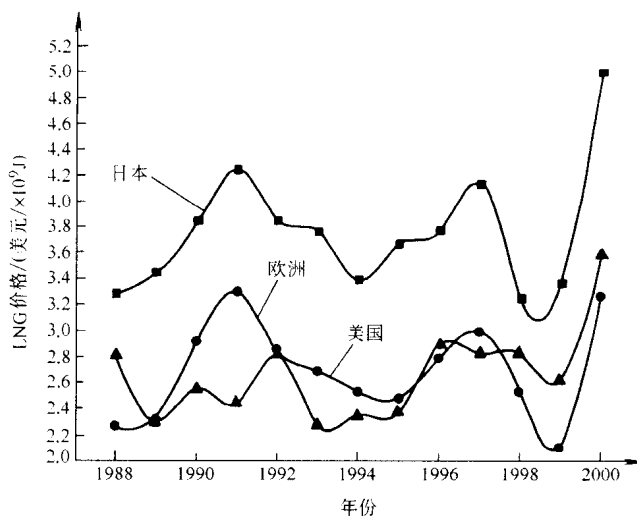


图 0-1 历年 LNG 到岸价格

0.3.1 LNG 工业链

LNG 工业链如图 0-2 所示，包括天然气预处理、液化、储存、运输、接收站、再汽化装置等。下面分别介绍 LNG 工厂、液化流程、运输和接收站。

1. 液化装置与流程

LNG 工厂主要可分为基本负荷型、调峰型两类。基本负荷型 LNG 工厂一直在扩大规模。20 世纪 60 年代单线液化能力为 0.5~1.1Mt/a，70 年代为 1.2~1.6Mt/a，80 年代为 2.0~2.6Mt/a，90 年代为 2.6~3.4Mt/a。目前，全球基本负荷型工厂有 19 座，以 APCI 流程为主，共有 67 条生产线。

调峰型 LNG 工厂液化能力约为 0.1Mt/a。这类工厂多建于 20 世纪 70~80 年代，主要位于欧洲、北美。美国有 62 座，英国 5 座，加拿大 3 座，德国 2 座，澳大利亚、阿尔及利亚、中国、比利时、荷兰各 1 座，二级门站多达 175 座分布在 11 个国家，其中西班牙 68 座，美国 45 座，日本 39 座。

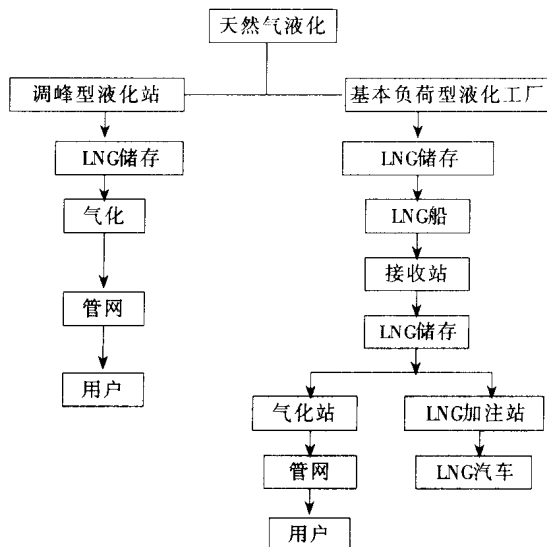


图 0-2 LNG 工业链

2. LNG 运输船

到 2001 年底, 共有 128 艘 LNG 船在运营中, 总运输能力约为 14Mm^3 。日本、美国等七国拥有全球 LNG 船运能力的 70% 以上。目前世界 LNG 船东共有 31 家, 其中的 12 家掌握着世界 LNG 运输能力的 70% 以上, 详见下表 0-1。历年 LNG 运输船数量见图 0-3。LNG 船运输能力见图 0-4。

表 0-1 全球主要船东拥有 LNG 船情况

船东	LNG 船数量/艘 (运输能力 12.5万 m^3 以上)	运输能力/ Mm^3
日本 NYK、NOL、KL、HNO、IGTC 等	21	2.725
巴拿马	15	2.030
美国 Patriot Shipping、Wilmington Trust 等	13	1.625
马来西亚 MISC、Petronas 等	10	1.300
阿布扎比 ADNOC	8	1.008
利比亚 Gotaas-Larsen	6	0.766
阿尔及利亚 SNTM-HYPROC	5	0.636
合计	78	10.162

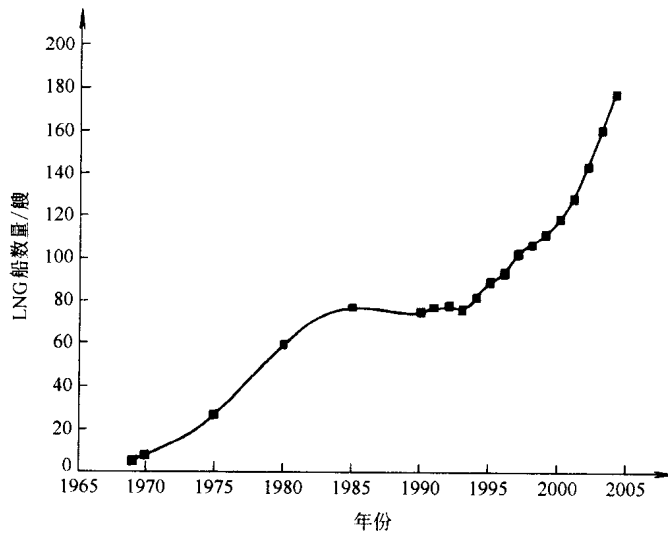


图 0-3 LNG 运输船数量

注: 2001 年后为预测值

目前运输能力超过 3Mt/a 的主要航线有: 印尼—日本、马来西亚—日本、澳大利亚—日本、文莱—日本、阿布扎比—日本、印尼—韩国、马来西亚—韩国、阿尔及利亚—法国、阿尔及利亚—比利时及阿尔及利亚—西班牙等, 总运输量占全球的 80% 以上。

3. LNG 接收站

接收海运 LNG 的终端设施称为 LNG 接收终端。它接收用船从基本负荷型天然气液化工厂运来的液化天然气, 将其储存和再汽化后分配给用户。

目前共有 38 个 LNG 接收站分布在日、韩等 11 个国家。2000 年新增 LNG 接收站 7 个。

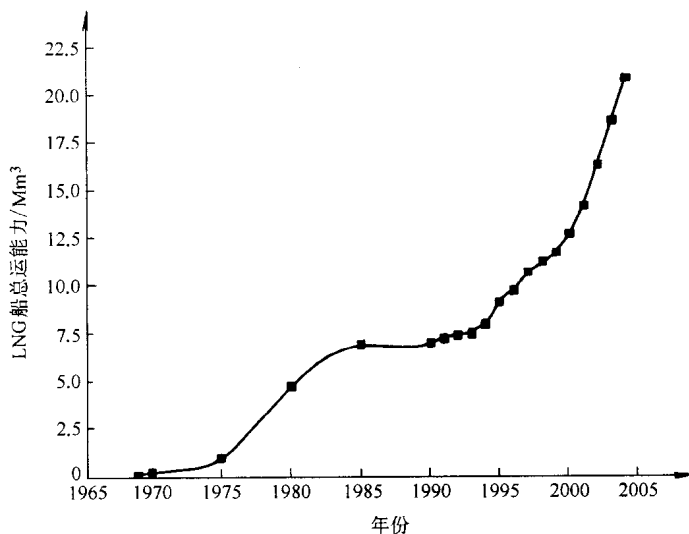


图 0-4 LNG 船运输能力

注：2001 年后为预测值

0.3.2 市场预测

LNG 贸易历年变化情况如图 0-5 所示。过去 10 年内，LNG 贸易量上升了近一倍。

2010 年，大西洋盆地的 LNG 需求约为 49~68Mt/a，供应能力约为 90Mt/a。亚太地区 LNG 需求约为 97.2~133.4Mt/a，供应能力约为 170Mt/a。LNG 供求预测见表 0-2。

目前，我国天然气仅占能源总耗的 2.6%，到 2010 年，这一比值预期达到 7%~8%。我国已探明可采储量仅占世界的 1.2%，目前年产量约为 25Gm³，到 2010 年将达 100Gm³，缺口严重，急需进口天然气（NG）或液化天然气（LNG）。

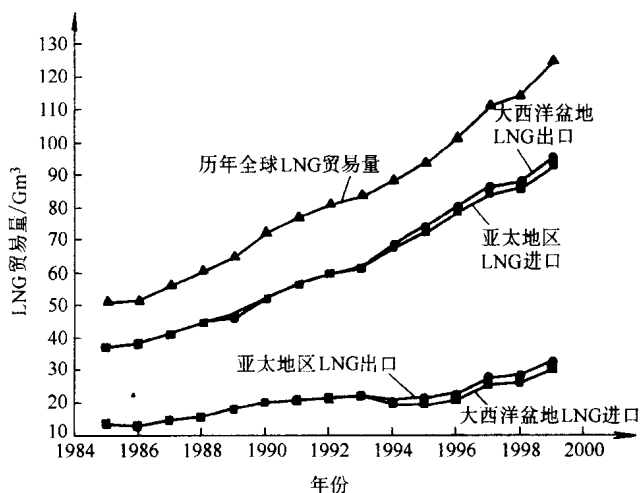


图 0-5 历年 LNG 进出口额变化曲线

表 0-2 2010 年 LNG 供应预测

(单位: Mt/a)

供应地	已有生产能力	新增生产能力	合计生产能力
大西洋盆地			
阿根廷	24		
利比亚	1.8		
特立尼达	14.2		

(续)

供应地	已有生产能力	新增生产能力	合计生产能力
大西洋盆地			
尼尔利亚	17.2		
埃及		9	
安哥拉		8	
挪威		8	
委内瑞拉		8	
小计	57.2	33	90
亚太地区			
印尼	30	6	
马来西亚	28		
文莱	11		
澳大利亚	16	8	
美国	10		
卡塔尔	27		
阿曼	11		
也门		6	
俄罗斯		9	
阿拉斯加		8	
小计	133	37	170

0.4 中国的液化天然气工业

为了改变能源结构、改善环境状态、发展西部经济，中国政府十分重视天然气的开发和利用。近十年来，中国的液化天然气已起步，在液化天然气工业链的每一环节上都有所发展；尤其是近几年内，在某些环节有了较大的进展。

1. 液化天然气工厂

在 20 世纪 90 年代初，中国科学院等单位先后为四川和吉林石化企业建成了二座液化天然气装置，生产 LNG 能力分别为 $0.3\text{m}^3/\text{h}$ 和 $0.5\text{m}^3/\text{h}$ 。

到 20 世纪 90 年代中期，长庆石油勘探局建立一座示范性液化天然气工厂，目的是开发利用陕北气田的边远单井，日处理量为 3万 m^3 。

20 世纪 90 年代末，东海天然气早期开发利用，在上海建了一座日处理为 10万 m^3 的液化天然气事故调峰站。以确保下游天然气输配系统能安全可靠地供气。该装置由法国燃气公司提供工艺设计、设备供应和技术服务。装置容量是为满足上游最大停产期十天的下游供气量，每天为 120万 m^3 的天然气。该站设有 2万 m^3 LNG 储存能力的储槽。液化工艺采用混合制冷剂液化流程 (CII)。工厂已于 2000 年 2 月投产，2001 年达到设计供气量。

2001 年，中原石油勘探局为了将天然气资源用于城市燃气和汽车代用燃料，建造了国内第一座生产型的液化天然气装置。日处理量为 15万 m^3 天然气。液化装置采用丙烷和乙烯为制冷剂的复叠式制冷循环。有二座 600m^3 的液化天然气储槽。用液化天然气槽车向山东、河南、江苏等地供气，满足城市燃气和工业用燃气的需要。

2002 年新疆广汇集团开始建设一座日处理量天然气量为 150万 m^3 的液化天然气工厂，