

液化天然气技术

第2版

顾安忠 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



液化天然气技术

第2版

顾安忠 鲁雪生 石玉美 林文胜 高 婷 编著



机械工业出版社

本书是2003版国内第一本有关液化天然气专著《液化天然气技术》的修订版。经过十多年的行业使用反响很好,在新能源形势下,进行了重新整合修订。

本书共分11部分,包括绪论、第1章天然气热物理特性、第2章天然气的预处理、第3章液化天然气流程和装置、第4章液化天然气接收终端、第5章液化天然气装置的相关设备、第6章液化天然气的储运、第7章液化天然气的气化与利用、第8章液化天然气安全技术、第9章非常规天然气液化及附录等内容。

本书可作为能源领域、低温工程领域,尤其是天然气开发应用领域的大学专业教材,也可作为从事以上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/顾安忠等编著. —2版. —北京:机械工业出版社,2015.7
ISBN 978-7-111-50344-6

I. ①液… II. ①顾… III. ①液化天然气-技术-高等学校-教材
IV. ①TE64

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第112216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:沈红 责任编辑:沈红

版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔

封面设计:陈沛 责任印制:乔宇

唐山丰电印务有限公司印刷

2015年10月第2版第1次印刷

184mm×260mm·24.5印张·605千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-50344-6

定价:78.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

策划编辑:010-88379778

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

第2版前言

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应用前景。天然气的液化和存储是其开发利用的一项关键技术。液化天然气（简称LNG）技术是高科技的系统工程，已形成了一个产业链。半个世纪以来，LNG技术作为世界上一门新兴工业正在飞速发展，目前仍继续保持着强劲的发展势头。我国具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在我国是一个陌生的名词和概念，对LNG产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。为了适应我国已到来的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，急需相关著作对其进行全面系统的论述和介绍。

为了满足社会的需要，作者于2003年率先出版了《液化天然气技术》，该书是我国LNG领域的第一本专著。由于本书突出了理论和实践相结合，并具有全面系统和重点突出兼顾的特点，获得了世界读者的广泛好评。10年来，10次印刷，销量已达18000本以上仍有不断需求。为此，修订再版成为必要。第2版编写人员仍以上海交通大学的教授为主组成，顾安忠教授为主编。顾安忠教授承担绪论、第6章和第1章部分的撰写工作，石玉美教授承担第2章、第3章、第4章和第1章部分的撰写工作，鲁雪生研究员承担第5章和第8章的编写，林文胜博士承担第7章和6.5节的编写，高婷博士承担第9章的编写。

在编写过程中，得到了业界许多能源企业、设备制造商和工程设计院所的关心和支持，其中合肥通用机械研究院陈学东院长、约克公司蒋立新经理提供了特别的帮助，上海流体工程学会阀门专业委员会主任、上海纳福希阀门有限公司杨恒总经理参与了5.6节的编写，编写组致以诚挚的感谢。

上海交通大学顾安忠教授团队的研究生在LNG相关技术的研究中做出了重要的贡献。编写组感谢团队所有参与工作的研究生，尤其感谢张林、黄美斌、贺红明、席芳、覃朝晖、汪顺华等同学，他们的成果为本书提供了直接的素材。

本书不仅可作为能源领域、低温工程领域，尤其是天然气开发应用领域的大学专业教材，也可作为从事以上领域的科研人员和工程技术人员的参考书。

顾安忠

2015.8

香 港

科 大 出 版 社

第1版前言

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（简称 LNG）技术是高科技的系统工程，已形成了一个产业链。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 在我国是一个陌生的名词和概念，对 LNG 产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。急需要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，如东海天然气的事后调峰站工程研究，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、液化气的再气化和冷量回收，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、硕士生的研究成果。

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_m	质量流量	kg/s
A	面积	m^2	q_v	体积流量	m^3/s
c	质量热容、比热容	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	Q	热量	J
c_p	质量定压热容、比定压热容	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	r	潜热	J/kg
$C_{p,m}^{\text{id}}$	理想气体的摩尔定压热容	$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$	R	摩尔气体常数	$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
$C_{v,m}$	混合物的摩尔定容热容	$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$	Ra	瑞利数	1
D, d	直径	m	S_m	摩尔熵	$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
E_x	焓	J	S_m^{id}	摩尔理想熵	$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
e_s	质量焓、比焓	J/kg	S_m^{res}	摩尔余熵	$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
g	重力加速度	m/s^2	$S_{m,0}$	基准点摩尔熵	$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
h	普朗克常数	1	S	熵	J/K
h	高度	m	t	时间	s
h	表面传热系数	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	T	温度	K
h	质量焓、比焓	J/kg	T_b	正常沸点温度	K
H	焓	J	T_B	泡点	K
H_m	摩尔焓	J/mol	T_c	临界温度	K
H_m^{id}	摩尔理想焓	J/mol	$T_{c,m}$	混合物的虚拟临界温度	K
H_m^{res}	摩尔余焓	J/mol	T_D	露点	K
$H_{m,0}$	基准点摩尔焓	J/mol	T_r	对比温度 ($T_r = T/T_c$)	1
k_{ij}	SPK 方程和 PR 方程中的二元交互作用系数	1	$T_{r,m}$	混合物的虚拟对比温度	1
K	传热系数	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	ΔT_m	对数平均温差	K
K_i	相平衡中平衡常数	1	u	质量热力学能, 比热力学能	J/kg
L	长度	m	v	速度	m/s
Le	刘易斯数	1	v	质量体积、比体积	m^3/kg
m	质量	kg	V	体积	m^3
M_r	相对分子质量	1	V_m	摩尔体积	m^3/mol
$M_{r,m}$	混合物相对分子质量	1	V_c	临界摩尔体积	m^3/mol
p	压力	Pa	$V_{c,m}$	混合物的虚拟临界摩尔体积	m^3/mol
p_c	纯物质的临界压力	Pa	V_r	对比摩尔体积	1
$p_{c,m}$	混合物的虚拟临界压力	Pa	x	液相摩尔分数	1
p_r	纯物质的对比压力 ($p_r = p/p_c$)	1	y	气相摩尔分数	1
$p_{r,m}$	混合物的虚拟对比压力	1	z	总流量中的摩尔分数	1
Pr	普朗特数	1	z_i	组分 i 的摩尔分数	1
q_n	总摩尔流量	mol/s	Z	压缩因子	1
$q_{n,v}$	气相摩尔流量	mol/s	Z_c	临界压缩因子	1
$q_{n,l}$	液相摩尔流量	mol/s	$Z_{c,i}$	组分 i 的临界压缩因子	1
			$Z_{c,m}$	混合物的虚拟临界压缩因子	1

目 录

第2版前言

第1版前言

本书常用符号、名称及单位

绪论 1

0.1 向天然气转型是世界潮流 1

0.2 我国 LNG 产业构架 3

0.2.1 小型 LNG 工厂 3

0.2.2 LNG 进口接收站 6

0.2.3 LNG 物流模式 6

0.2.4 LNG 应用市场 8

第1章 天然气热物理特性 13

1.1 引言 13

1.1.1 天然气的热力学性质 13

1.1.2 天然气的迁移特性 14

1.2 天然气的气液相平衡 15

1.2.1 相平衡计算的难点 15

1.2.2 相平衡计算所用的状态方程和逸度方程 15

1.2.3 (p, T) 闪蒸计算 16

1.2.4 泡点和露点的计算 18

1.3 天然气的焓和熵 19

1.3.1 计算焓和熵的表达式 19

1.3.2 计算焓和熵的方法 21

1.3.3 计算结果与国外试验结果的比较 21

1.4 天然气的黏度 22

1.4.1 常用的黏度算法综述 22

1.4.2 不同压力范围及相应的天然气黏度计算模型 23

1.4.3 天然气的统一黏度计算模型 25

1.5 天然气的热导率 30

1.5.1 常用的热导率计算方法综述 30

1.5.2 不同压力范围及相态的天然气热

导率计算模型 31

1.5.3 天然气热导率对应态预测模型 33

1.5.4 计算结果与实验数据的对比分析 34

1.6 天然气的表面张力 35

参考文献 37

第2章 天然气的预处理 39

2.1 脱酸性气体 40

2.1.1 脱硫方法分类 40

2.1.2 常用的净化方法 45

2.1.3 脱硫方法选择原则 49

2.2 脱水 51

2.2.1 吸收法脱水 51

2.2.2 吸附法脱水 53

2.2.3 低温冷凝法脱水 56

2.2.4 膜分离法脱水 57

2.3 其他杂质的脱除 58

参考文献 59

第3章 液化天然气流程和装置 61

3.1 概述 61

3.2 中、大型 LNG 流程 62

3.2.1 C3MR 丙烷预冷混合制冷剂流程 62

3.2.2 DMR 双混合制冷剂流程 67

3.2.3 AP-X™ 混合制冷循环流程 72

3.2.4 MFC 混合制冷剂级联流程 73

3.2.5 PMR 并联混合制冷剂流程 75

3.2.6 经典级联流程 77

3.2.7 康菲优化级联流程 79

3.2.8 流程比较 82

3.2.9 中、大型 LNG 装置	85	应用	146
3.3 小型 LNG 流程	90	5.3.6 LNG 泵的运行	147
3.3.1 SMR 单混合制冷剂流程	90	5.4 LNG 输送管路	147
3.3.2 膨胀技术与流程	92	5.4.1 冷收缩问题	148
3.3.3 我国 LNG 装置	96	5.4.2 LNG 管路的隔热	148
3.4 浮式液化装置	101	5.4.3 管道的预冷和保冷	150
参考文献	102	5.4.4 LNG 管路的试验	152
第4章 液化天然气接收终端	104	5.4.5 管内流阻	154
4.1 LNG 接收终端工艺流程	104	5.5 膨胀机	154
4.1.1 LNG 卸船系统	104	5.5.1 透平膨胀机工作原理与结构	154
4.1.2 LNG 存储系统	105	5.5.2 透平膨胀机在天然气工业中的 应用	155
4.1.3 LNG 再气化	105	5.5.3 透平膨胀机的工作特点与类型	155
4.1.4 蒸发气处理系统	108	5.5.4 透平膨胀机的主要参数	156
4.1.5 储槽防真空补气系统	108	5.6 低温阀门	158
4.1.6 火炬/放空系统	109	5.6.1 低温阀门的类型	159
4.2 全球 LNG 接收终端	109	5.6.2 低温阀门的基本性能	164
4.2.1 概述	109	5.6.3 低温阀门的类型、标准规范、结构 特点	167
4.2.2 日本 LNG 接收终端	115	5.6.4 低温阀门产品主要性能参数及 国外生产厂家	168
4.2.3 韩国 LNG 接收终端	116	5.6.5 低温阀门的试验	170
4.2.4 美国 LNG 接收终端	117	参考文献	172
4.2.5 我国 LNG 接收终端	118	第6章 液化天然气的储运	173
参考文献	119	6.1 引言	173
第5章 液化天然气装置的相关 设备	120	6.2 LNG 储罐(槽)	173
5.1 压缩机	120	6.2.1 型式分类	173
5.1.1 往复压缩机	120	6.2.2 LNG 储罐(槽)结构	176
5.1.2 离心压缩机	121	6.2.3 LNG 储槽内部观察装置	183
5.1.3 螺杆压缩机	124	6.3 LNG 船	183
5.2 换热器	128	6.3.1 LNG 船运在 LNG 工业链中的 作用	183
5.2.1 绕管式换热器	128	6.3.2 LNG 货舱的围护系统	185
5.2.2 板翅式换热器	129	6.3.3 世界 LNG 船一览(1983— 2013)	192
5.2.3 LNG 气化器	130	6.3.4 现代 LNG 船的船型	199
5.2.4 换热器的换热能力	136	6.3.5 典型 LNG 船的货舱分布	199
5.2.5 传热过程中存在的问题	137	6.3.6 LNG 船的技术新构思	202
5.3 LNG 泵	138	6.3.7 我国 LNG 船制造业的发展	203
5.3.1 潜液式电动泵	139	6.4 LNG 槽车	204
5.3.2 潜液式电动泵的应用	141	6.4.1 LNG 槽车的隔热方式	204
5.3.3 LNG 泵的平衡要求	144		
5.3.4 LNG 泵的试验	145		
5.3.5 非潜液式低温泵在 LNG 系统中的			

6.4.2	LNG 槽车的安全设计	205	7.5.4	利用 LNG 的燃气-蒸汽联合 循环	273
6.4.3	LNG 槽车的输液方式	206	7.5.5	日本利用 LNG 冷量发电概况	276
6.4.4	LNG 槽车容量的大型化、列车化 和轻量化	206	7.6 LNG 冷量用于空气分离	278	
6.4.5	LNG 槽车运行高速化	207	7.6.1	概述	278
6.4.6	LNG 槽车实例	207	7.6.2	利用 LNG 冷量提高空分装置 液化率	280
6.5 LNG 存储中的分层和涡旋	212		7.6.3	利用 LNG 冷量降低空分装置 压力	281
6.5.1	涡旋现象	212	7.6.4	利用 LNG 冷量空分装置案例	282
6.5.2	分层与涡旋现象的机理	212	7.7 LNG 冷量的其他利用途径	285	
6.5.3	分层与涡旋的理论模型	214	7.7.1	轻烃分离	285
6.5.4	涡旋预防的技术措施	221	7.7.2	制取液化二氧化碳和干冰	287
参考文献	223		7.7.3	冷库	288
第 7 章 液化天然气的气化与 利用	225		7.7.4	低温破碎和粉碎	289
7.1 LNG 的气化	225		7.7.5	海水淡化	290
7.1.1	LNG 气化站的总体考虑	225	7.7.6	蓄冷装置	292
7.1.2	LNG 气化工艺	229	参考文献	293	
7.1.3	LNG 气化工艺设备	230	第 8 章 液化天然气安全技术	297	
7.1.4	测量仪表	233	8.1 引言	297	
7.1.5	气化站的消防与安全	234	8.2 LNG 的有关安全特性	297	
7.1.6	气化站建设实例	235	8.2.1	燃烧范围	298
7.1.7	气化站 BOG 回收案例	237	8.2.2	着火温度与燃烧速度	299
7.2 LNG 储罐的自增压供气系统	238		8.2.3	LNG 的低温特性	300
7.2.1	增压供气系统概述	238	8.2.4	对生理上的影响	300
7.2.2	自增压系统稳压供气原理	240	8.3 有关安全检测设备	301	
7.2.3	增压管路传热及流动计算	242	8.3.1	可燃气体检测器 (CGD)	301
7.3 LNG 为燃料的运输工具	244		8.3.2	火焰检测器	302
7.3.1	LNG 作为运输工具燃料的优势	244	8.3.3	高温检测器	302
7.3.2	LNG 汽车燃料系统	246	8.3.4	低温检测器	302
7.3.3	LNG 加气站	252	8.3.5	烟火检测器	302
7.3.4	LNG 燃料动力船舶	255	8.3.6	缺氧检测设备	303
7.3.5	以 LNG 为燃料的其他运输 工具	262	8.4 LNG 溢出或泄漏	303	
7.4 LNG 及其冷量利用的焓分析	264		8.4.1	LNG 储罐处于火灾情况下的 传热计算	304
7.4.1	LNG 冷量焓分析数学模 型	264	8.4.2	LNG 泄漏或溢出后的蒸气 扩散	305
7.4.2	LNG 冷量焓特性分析	266	8.4.3	LNG 泄漏或溢出的预防	306
7.5 LNG 冷量发电	267		8.5 LNG 溢出与防火技术	306	
7.5.1	天然气直接膨胀发电	267	8.5.1	概述	306
7.5.2	利用 LNG 的蒸汽动力循环	268	8.5.2	紧急状态的应对措施	307
7.5.3	利用 LNG 的气体动力循环	270			

8.5.3	LNG 溢出的控制方法	307
8.5.4	有关消防保护	308
8.5.5	灭火剂	309
8.6	基础设施的安全要求	310
8.6.1	LNG 储罐的距离	311
8.6.2	气化器等工艺设备的安装距离	311
8.6.3	LNG 储罐的防震	311
8.7	LNG 存储中的安全问题	311
8.7.1	LNG 储罐的充注条件	312
8.7.2	LNG 储罐的最大充装容量	313
8.7.3	LNG 储罐的压力控制	314
8.7.4	间歇泉和水锤现象	314
8.8	管路和阀件的安全要求	315
8.9	装卸作业	315
8.10	消防和防护	316
8.11	紧急泄放和关闭	317
8.12	人员安全与救护	317
	参考文献	318

第9章 非常规天然气液化 319

9.1	非常规天然气概述	319
9.2	煤层气液化	320
9.2.1	氧的脱除	322
9.2.2	氮/甲烷的吸附分离	330
9.2.3	吸附-液化流程	332
9.2.4	液化-精馏流程	334
9.3	合成天然气液化	336
9.3.1	含氢甲烷的物性与相平衡特性	337
9.3.2	采用常规流程的合成天然气液化方案	340
9.3.3	氢气的分离	342

9.3.4	液化与氢气分离整合流程	347
	参考文献	349

附录 354

附录 A 附表 354

表 A-1	R50 (甲烷) 饱和液体、蒸气热物性数据之一	354
表 A-2	R50 (甲烷) 饱和液体、蒸气热物性数据之二	356
表 A-3	R170 (乙烷) 饱和液体、蒸气热物性数据	358
表 A-4	R290 (丙烷) 饱和液体、蒸气热物性数据之一	360
表 A-5	R290 (丙烷) 饱和液体、蒸气热物性数据之二	362
表 A-6	R600 (正丁烷) 饱和液体、蒸气热物性数据	364
表 A-7	R600a (异丁烷) 饱和液体、蒸气热物性数据	366
表 A-8	R1150 (乙烯) 饱和液体、蒸气热物性数据	368
表 A-9	R728 (氮气) 饱和液体、蒸气热物性数据之一	370
表 A-10	R728 (氮气) 饱和液体、蒸气热物性数据之二	372

附录 B 附图 374

图 B-1	R50 (甲烷) p - h 图	374
图 B-2	R170 (乙烷) p - h 图	375
图 B-3	R290 (丙烷) p - h 图	376
图 B-4	R600 (正丁烷) p - h 图	377
图 B-5	R600a (异丁烷) p - h 图	378
图 B-6	R1150 (乙烯) p - h 图	379
图 B-7	R728 (氮气) p - h 图	380

绪 论

液化天然气（简称 LNG）是一种清洁、高效的能源。由于进口 LNG 有助于能源消费国实现能源供应的多元化，保障能源安全；而出口 LNG 有助于天然气资源国有效开发生产天然气，且增加收入，以及促进国民经济的发展。因此 LNG 的国际贸易成为全球能源市场的一个热点，连年高速增长，成为全球增长最迅猛的能源行业之一。

我国能源中长期规划明确指出，“十二五”期间，大力发展天然气，预计到 2030 年天然气将占到一次能源的 10%，成为我国能源发展战略中的一个亮点和绿色能源支柱之一。在我国，作为对管道天然气的有益补充，LNG 产业的发展，在优化国家能源结构、促进经济持续健康发展、实现节能减排和保护环境方面发挥着重要作用。

经过近 20 年的发展，我国小型 LNG 产业链不断完善，商业运营模式日趋成熟，应用领域不断扩大，市场需求快速增长，商业投资和商业推广应用活动日趋活跃，为此在改善偏远地区居民生活燃料结构，提高居民生活质量、降低车辆燃料成本，缓解城市空气污染、保障城市能源安全稳定供应方面取得了立竿见影的效果。小型 LNG 在我国天然气供应和使用中的作用尤为突出，其地位日益提升。

0.1 向天然气转型是世界潮流

全球 LNG 工业发展始于 20 世纪 70 年代，在当时的能源危机由日本驱动，年增长率相对平稳，以 2.5% 增长。到 21 世纪初由于环保原因年增长 4%~5%，在美国，特别是推进发展联合循环发电，天然气的需求大大增加。

表 0-1 为世界 LNG 进出口国 2012 年的进出口量。

表 0-1 世界 LNG 进出口国 2012 年的进出口量

序 号	出 口	容量/ 10^{10}m^3	序 号	出 口	容量/ 10^{10}m^3
1	卡塔尔	105.4	10	文莱	9.1
2	马来西亚	31.8	11	阿联酋	7.6
3	澳大利亚	28.1	12	也门	7.1
4	尼日利亚	27.2	13	埃及	6.7
5	印度尼西亚	25.0	14	秘鲁	5.4
6	特立尼达和多巴哥	19.1	15	赤道几内亚	4.9
7	阿尔及利亚	15.3	16	挪威	4.7
8	俄罗斯联邦	14.8	17	其他	4.4
9	阿曼	11.2		总 计	327.9

(续)

序 号	进 口	容量/ 10^{10}m^3	序 号	进 口	容量/ 10^{10}m^3
1	日本	118.8	11	阿根廷	5.2
2	韩国	49.7	12	美国	4.9
3	西班牙	21.4	13	墨西哥	4.8
4	印度	20.5	14	比利时	4.5
5	中国	20.0	15	智利	4.1
6	台湾	16.9	16	巴西	3.2
7	英国	13.7	17	加拿大	1.8
8	法国	10.3	18	泰国	1.4
9	土耳其	7.7	19	其他	7.3
10	意大利	7.1	总 计		327.9

2010年以来,西太平洋地区以日本为首的多国都提出“向天然气转型”的能源目标。日本是世界最大天然气进口国,在2010年6月份,日本首次更新能源战略计划,重新定义了国家能源政策核心目标,其中包括减少温室效应气体排放的目标。新修订计划着重提到天然气的优点,天然气被确定为快速建设低碳社会的重要能源构成,强调加快向天然气的转型。具体表现为对城市燃气产业提出了五个关键措施:①以燃气作为能源的燃料电池系统的推广应用,对民用住宅同时供电和供热;②在商业设施中燃气空调系统的推广应用;③在工业生产中天然气作为替代燃料的推广应用;④大力推广热电联产系统;⑤实现IT集中能源管理系统。

美国是世界上最大的天然气消费国,2013年占世界消费量的22%。

美国的小型LNG装置多用于为高峰时期供气,液化装置生产出的LNG被存储在大的LNG储罐中。当供气不足时(如在冬天),就将储罐中的LNG气化并供给用户。这些装置的液化能力约为 $15 \sim 60 \times 10^4 \text{m}^3$ (标)/天。

美国近些年在非常规天然气(页岩气、煤层气和致密岩气)的开发利用上显示出突飞的气势,据报道2010年已占全国燃气消耗的20%,2011年达到40%。要从进口国变为出口国。

这些年来,我国将天然气发展视为一项能源结构调整和大气环境改善的重要举措。我国城市燃气已进入了天然气阶段,20世纪90年代末到21世纪初,建设了一批天然气输送工程,推动了城市燃气发展。城市燃气普及率提高,燃气结构发生很大变化见表0-2。

在未来一段时间里,我国城市燃气产业

表0-2 中国燃气结构

年 份	人工煤气/亿 m^3	LPG/万 t	天然气/亿 m^3
1988	66.79	173.03	57.4
2000	152.36	1057.71	82.15
2005	255.83	1222.01	210.50
2009	382.40	1208.71	405.90

将会有更大的发展阶段，并逐渐从大城市往小型城镇转移，同时特别关注燃气的供应保障和安全供应。

现在我国为保障天然气的供应，已逐渐形成了多个来源的态势：即中亚管道天然气、中缅管道天然气、中俄管道天然气及东部海上 LNG 等，以保障能源安全。

0.2 我国 LNG 产业构架

0.2.1 小型 LNG 工厂

1. LNG 工厂的气源概况

我国已建的 LNG 液化厂气源开始主要来自于国内零散的小气田和油田的伴生气；以后更多取自于管道末端气、煤层气及新兴的煤制天然气。以小型气田为气源的有新疆广汇 LNG、中原油田 LNG、新奥涠洲岛 LNG 等；以海洋天然气为气源的有福山 LNG 和珠海海油 LNG 等；以煤层气为气源的有山西晋城港华 LNG、阳城煤层气 LNG 等；其他都是以管道末端气的气源。LNG 工厂的产品，作为管道输送的补充。

我国煤炭资源丰富，随着煤制气工艺技术的逐步提高，“十二五”期间在新疆、内蒙古、山西、陕西、辽宁、山东煤炭资源丰富地区将陆续上马多个煤制气项目。2015 年煤制气液化能力将达到 140 ~ 280 万 t/年，到 2020 年有可能达到 220 ~ 700 万 t/年。与此同步，我国的煤层气也将得到进一步开发和利用，页岩气将被重视，会有开发和利用的前景。这些非常规天然气将为小型 LNG 工厂提供更为丰富的气源。

2. LNG 工厂建设概况

我国 LNG 工厂，从上世纪末经过了一个从无到有，从小到大，艰难曲折的发展。首先由上海引进了法国索菲公司 CII 液化工艺技术，建成了一座 10 万 m³ 的 LNG 工厂，它以海上气田为气源，只作为城市调峰。2001 年 9 月，国内首座商业化运行的 LNG 工厂河南中原液化天然气工厂试投产运行，生产规模 15 万 m³/天，年产 LNG 4 万 t。2004 年 9 月，新疆广汇 LNG 工厂投产，年产 LNG 40 万 t。2012 年 7 月，宁夏哈纳斯 LNG 工厂投产，年产 LNG 80 万 t，是 2013 年前国内投产的最大的 LNG 工厂。

近年来我国小型 LNG 工厂发展迅速，其中国产液化工艺的工厂越来越多。截止到 2010 年 1 月，我国已经运营小型 LNG 装置有近 60 多座，另有 40 多座在建造之中，近一二年都会陆续投入运行。这些小型 LNG 工厂遍布新疆、四川、江苏、山东、山西、广东、内蒙古等省（区、市），总规模超过 2000 万 m³/天，年产量约 500 万 t。

国内 LNG 工厂一览表见表 0-3。

表 0-3 国内已投产的部分小型天然气液化装置

序 号	名 称	规模/ (10 ⁴ m ³ /天)	地 点	投 产 时 间	年产量/ 万 t
1	上海浦东五号沟	10	上海浦东	2000.02	2.67
2	中原绿能	15	河南濮阳	2001.11	4
3	新疆广汇	150	新疆鄯善	2005.08	40

(续)

序号	名称	规模/ ($10^4\text{m}^3/\text{天}$)	地点	投产时间	年产量/ 万 t
4	四川犍为	4	四川犍为	2005.11	1.07
5	新奥涠洲岛	15	广西北海	2006.03	4
6	海南海燃	25	海南福山	2006.03	6.67
7	江阴天力	5	江苏江阴	2006.10	1.33
8	四川泸州	5	四川泸州	2007.03	1.33
9	辽宁沈阳	2	辽宁沈阳	2007.09	0.53
10	苏州华锋	7	江苏苏州	2007.11	1.87
11	大庆 LNG 实验装置	2	黑龙江大庆	2007.12	0.53
12	西宁(一期)	6	青海西宁	2008.01	1.6
13	山东泰安	15	山东泰安	2008.03	4
14	四川龙泉驿	10	四川成都	2008.08	2.67
15	西宁(二期)	20	青海西宁	2008.08	5.33
16	中海油珠海	60	广东珠海	2008.10	16
17	山西晋城	25	山西晋城	2008.10	6.67
18	山西顺泰	50	山西晋城	2008.11	13.33
19	鄂尔多斯	100	鄂尔多斯	2008.12	26.67
20	重庆民生黄水	12	重庆黄水	2008.12	3.2
21	四川星星能源	100	四川达州	2009	26.67
22	重庆民生璧山	5	重庆璧山	2009	1.33
23	河南安阳	10	河南安阳	2009.02	2.67
24	内蒙古时泰	60	鄂托克前旗	2009.04	16
25	新奥山西沁水	15	山西沁水	2009.04	4
26	安徽合肥	8	安徽合肥	2009.05	2.13
27	鄂尔多斯	15	鄂尔多斯	2009.06	4
28	西宁(三期)	20	青海西宁	2009.06	5.33
29	晋城(二期)	60	山西晋城	2009.09	16
30	宁夏 LNG	30	宁夏银川	2009.10	8
31	山西 SK	50	山西沁水	2010	13.33
32	西安西蓝天然气	50	山西靖边	2010	13.33
33	甘肃兰州燃气集团	30	甘肃兰州	2010.05	8
	总计	991			264.26

另外,在建和拟建设的 LNG 液化项目单座容量都有增大的趋势,达 200 万~300 万 $\text{m}^3/\text{天}$ 以上,目前最大的是昆仑能源湖北黄冈 LNG,达 500 万 $\text{m}^3/\text{天}$ 的规模。

3. LNG 工厂工艺技术和装备现状

我国的 LNG 产业，经过了从无到有的迅速发展过程，在液化工艺技术、相关装置和设备方面取得了长足进步，我国参照国外的专利技术也开发了自己的液化流程。但相比国外技术在流程优化方面还有所欠缺，尤其是效率相对较低，设备的可靠性也不高。此外，利用管道天然气自身膨胀液化生产 LNG 适合于压差较大的调压站，我国也已经有了多个应用实践，工艺成熟。

(1) LNG 工厂的工艺 我国已建成投产的 LNG 工厂中，一部分是采用国外流程工艺技术，如美国的 B&V 公司、Salof 公司，法国的 Sofe 公司，德国的 Linde 公司及美国的 ACPI 公司等。另一部分则是采用国内自行开发技术，如中原绿能、成都深冷和中科院理化所等的流程工艺。目前，国产液化工艺包日渐成熟，单条生产线的规模可达 200 万 m³/天，即年产 LNG50 万 t。近年来，以中石油寰球工程公司和中石油工程公司西南分公司为代表，实现了较大容量国产流程的华气安塞、泰安和湖北黄冈等工程，开发自主知识产权的液化气流程、液化工厂。这为我国走出国门，自主建设大型液化工厂打下了坚实的基础。表 0-4 为国内已投产的部分小型天然气液化装置的工艺流程技术。

表 0-4 国内已投产的部分小型天然气液化装置的工艺流程技术

序号	名 称	规模/ (10 ⁴ m ³ /天)	工艺流程技术	序号	名 称	规模/ (10 ⁴ m ³ /天)	工艺流程技术
1	上海浦东五号沟	10	法国索非 CII	16	山西顺泰	50	国产氮甲烷膨胀
2	中原绿城	15	国产级联式	17	鄂尔多斯	100	美国 BV 混冷
3	新疆广汇	150	德国林德混冷	18	重庆民生黄水	12	俄罗斯高压射流
4	四川犍为	4	国产直接膨胀	19	四川星星能源	100	美国 BV 混冷
5	新奥涠洲岛	15	美国 Salof 氮-甲烷膨胀	20	重庆民生壁山	5	俄罗斯高压射流
6	海南海燃	25	加拿大 Propak 氮膨胀	21	河南安阳	10	国产直接膨胀
7	江阴天力	5	国产直接膨胀	22	内蒙古时泰	60	国产氮甲烷膨胀
8	四川泸州	5	国产直接膨胀	23	新奥山西沁水	15	国产氮膨胀
9	苏州华锋	7	国产直接膨胀	24	合肥 LNG 工厂	8	国产氮甲烷膨胀
10	西宁（一期）	6	国产直接膨胀	25	晋城（二期）	60	国产混冷
11	山东泰安	15	国产氮膨胀	26	宁夏 LNG 工厂	30	国产氮甲烷膨胀
12	四川龙泉驿	10	国产氮膨胀	27	西安西蓝天燃气	50	美国 BV 混冷
13	西宁（二期）	20	国产氮膨胀	28	甘肃兰州燃气集团	30	美国 BV 混冷
14	中海油珠海	60	美国 BV 混冷		总计	902	
15	山西晋城	25	国产混冷				

(2) LNG 工厂的设备 国内已建和拟建的小型 LNG 液化工厂，有些工厂的配套设备国产化已达到 80%。处理规模为 500 万 m³/天及以下生产线的液化厂，从工艺包到有关设备

选择的集成技术可以基本实现国产化。有些液化厂根据具体情况采用国产设备和进口设备相结合的方式。

目前,在液化厂主要设备中,离心压缩机大部分还是靠进口;活塞压缩机一般采用国产;冷箱国产化的程度已不断提高;膨胀机部分采用国产,部分进口;低温泵尤其是大型潜液泵,主要依靠进口;30000m³以下的储罐以国产为主,而30000m³以上的大型储罐国内尚未突破关键技术,基本上仍采用国外技术。

另外,国内企业和研究机构在设计 and 建设符合国情的、效率更高的小型 LNG 站方面取得了新的理论和实践成果,且已有多家设计院承担小型 LNG 项目工程设计,上海交大、中科院等研究机构已取得能应用于工程的研究成果,在液化流程工艺优化方面有独到的优势和积累,为多个工程项目提供帮助。在国家能源局和中国机械工业联合会的大力推动下,这些年在设备国产化方面有了长足的进步。

0.2.2 LNG 进口接收站

我国天然气的生产量从 20 世纪 90 年代初开始列入国家计划,自那时起生产量逐年增加。进入 21 世纪,生产量随着国民经济的发展和人民生活水平提高所需,提高更快。从 2005~2012 年平均增长 15%,2012 年已达 1027 亿 m³/年。但天然气的消费量也相应增加到 1471 亿 m³/年,供需明显不平衡,约有 400 亿 m³/年的差额。为此,政府以进口天然气作为填补供需缺口的重要政策。2013 年我国天然气的对外依赖度为 27.5%。天然气进口除了部分是通过管道从中亚、东南亚进口之外,其他是以 LNG 方式从澳大利亚、中东和东南亚等生产国海运进口。从 20 世纪 90 年代中期开始,国家就计划逐步建设 LNG 进口接收站。

我国第一个 LNG 进口接收站是在广东深圳大鹏,2006 年建成投产。该接收站以站线建设为工程主要内容,接收站第一期容量为 3000 万 t/年,管线分别将气化后的天然气送往周边的天然气发电厂,以及进入城市管网供居民用。该接收站的液化天然气资源来自澳大利亚,中海油与澳方签了 25 年长期供货合同。

根据国家计划,主要由中国海洋石油总公司(以下简称中海油)、中国石油天然气集团公司(以下简称中石油)和中国石油化工集团公司(以下简称中石化)三大国企为主,以独资或跟地方合资建设 LNG 进口接收站,在东部沿海由南往北要建 20 座以上接收站。已经建成投产的有广东深圳大鹏、福建莆田、浙江宁波、上海洋山、江苏如东、山东青岛、河北曹妃甸、天津浮式接收站,辽宁大连等,进口容量将近 3000 万 t/年。

目前,我国的 LNG 进口量已是全球第三位,按计划建成全部 LNG 接收站,将跃升至第二位,跟第一位的日本相差不多了。

0.2.3 LNG 物流模式

LNG 的运营模式是把液化厂生产的 LNG 由接收站进口的 LNG 通过专用汽车、火车或内河沿海的小型船舶运输到使用天然气的末端用户。

1. 公路运输

我国小型 LNG 工厂大都建于内陆地区,LNG 主要靠陆路运输,运输设备为 LNG 罐式集装箱和运输槽车。随着小型 LNG 行业的不断发展,LNG 运输需求也在不断增加。目前我国正在运行的 LNG 运输车约 1300 辆,其中以新疆广汇、新奥燃气、内蒙古鄂尔多斯的运输车