

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

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 在我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

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	9.3.4 液化与氢气分离整合流程	347
8.5.4 有关消防保护	308	参考文献	349
8.5.5 灭火剂	309	附录	354
8.6 基础设施的安全要求	310	附录 A 附表	354
8.6.1 LNG 储罐的距离	311	表 A-1 R50 (甲烷) 饱和液体、蒸气 热物性数据之一	354
8.6.2 气化器等工艺设备的安装距离	311	表 A-2 R50 (甲烷) 饱和液体、蒸气 热物性数据之二	356
8.6.3 LNG 储罐的防震	311	表 A-3 R170 (乙烷) 饱和液体、蒸气 热物性数据	358
8.7 LNG 存储中的安全问题	311	表 A-4 R290 (丙烷) 饱和液体、蒸气 热物性数据之一	360
8.7.1 LNG 储罐的充注条件	312	表 A-5 R290 (丙烷) 饱和液体、蒸气 热物性数据之二	362
8.7.2 LNG 储罐的最大充装容量	313	表 A-6 R600 (正丁烷) 饱和液体、蒸气 热物性数据	364
8.7.3 LNG 储罐的压力控制	314	表 A-7 R600a (异丁烷) 饱和液体、蒸气 热物性数据	366
8.7.4 间歇泉和水锤现象	314	表 A-8 R1150 (乙烯) 饱和液体、蒸气 热物性数据	368
8.8 管路和阀件的安全要求	315	表 A-9 R728 (氮气) 饱和液体、蒸气 热物性数据之一	370
8.9 装卸作业	315	表 A-10 R728 (氮气) 饱和液体、蒸气 热物性数据之二	372
8.10 消防和防护	316	附录 B 附图	374
8.11 紧急泄放和关闭	317	图 B-1 R50 (甲烷) p - h 图	374
8.12 人员安全与救护	317	图 B-2 R170 (乙烷) p - h 图	375
参考文献	318	图 B-3 R290 (丙烷) p - h 图	376
第9章 非常规天然气液化	319	图 B-4 R600 (正丁烷) p - h 图	377
9.1 非常规天然气概述	319	图 B-5 R600a (异丁烷) p - h 图	378
9.2 煤层气液化	320	图 B-6 R1150 (乙烯) p - h 图	379
9.2.1 氧的脱除	322	图 B-7 R728 (氮气) p - h 图	380
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		

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	焔	J	S_m^{id}	摩尔理想熵	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
e_x	质量焔、比焔	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	$S_{m,o}$	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
$H_{m,o}$	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

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