

液化天然气装备 设计技术

► 液化换热卷

张周卫 郭舜之 汪雅红 赵丽 著

YEHUA TIANRANQI ZHUANGBEI SHEJI JISHU
YEHUA HUANRE JUAN



化学工业出版社

液化天然气装备 设计技术

④ 液化换热卷

张周卫 郭舜之 汪雅红 赵丽 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要围绕液化天然气(LNG)混合制冷剂液化工艺及贮运工艺中所涉及的主要低温装备,研究开发LNG工艺流程中主要液化换热装备的设计计算技术,主要包括LNG低温液化混合制冷剂多股流缠绕管式主换热装备、LNG低温液化混合制冷剂多股流板翅式换热装备、表面蒸发空冷器、开架式气化器、低温液氮洗用多股流缠绕管式换热器等设计计算技术,为LNG液化、LNG换热等关键环节中所涉及的主要设备的设计计算提供可参考样例,并推进LNG系列液化装备及系统工艺技术的标准化及国产化进程。

本书不仅可供液化天然气(LNG)、化工机械、制冷及低温工程、石油化工、动力工程及工程热物理等领域的研究人员、设计人员和工程技术人员参考,还可供高等学校化工机械、能源化工、石油化工、低温与制冷工程、动力工程等专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

液化天然气装备设计技术:液化换热卷/张周卫等著.
北京:化学工业出版社,2018.3
ISBN 978-7-122-31065-1

I. ①液… II. ①张… III. ①液化天然气-换热器-设计 IV. ①TE8

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第289093号

责任编辑:卢萌萌 刘兴春

文字编辑:向东

责任校对:宋玮

装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:三河市航远印刷有限公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张21¼ 字数536千字 2018年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:138.00元

版权所有 违者必究

前言

FOREWORD

随着低温制冷技术的不断发展，低温工艺及装备设计制造技术日趋完善，在工业、农业、国防及科研等领域内的作用日益突显，尤其在石油化工、煤化工、天然气、空分等大型成套装备技术领域具有重要地位，已广泛应用于大型液化天然气（LNG）、百万吨化肥、百万吨甲醇、大型气体液化分离等重大系统装备技术工艺流程中。

在 LNG 工业领域，大力发展 LNG 产业，提高天然气能源在消费中的比例是调整我国能源结构的重要途径。LNG 既是天然气远洋运输的唯一方法，又是天然气调峰的重要手段。随着国内众多 LNG 工厂的相继投产及沿海 LNG 接收终端的建设，我国 LNG 工业进入了高速发展时期，与之相关联的 LNG 低温制冷装备技术也得到快速发展。LNG 液化工艺主要包括天然气预处理、液化、储存、运输、接收、再气化等工艺单元，其中，液化工艺为核心工艺流程，主要应用低温制冷工艺技术制取 -162°C 低温环境并将天然气液化。根据不同的 LNG 液化工艺，可设计并加工制造不同的制冷装备，主要包括天然气压缩机、制冷剂压缩机、天然气冷箱、BOG 压缩机、气液分离器、大型空冷器、LNG 膨胀机、四级节流阀及各种过程控制装备等。储运工艺技术中还包括大型 LNG 储罐、LNG 立式储罐、LNG 气化器、LNG 潜液泵等。近年来，30 万立方米以上 LNG 系统多采用混合制冷剂板翅式主换热装备及液化工艺技术，60 万立方米以上大型 LNG 系统多采用混合制冷剂缠绕管式主换热装备及液化工艺技术，这两种混合制冷剂 LNG 液化工艺技术具有集约化程度高、制冷效率高、占地面积小及非常便于自动化管理等优势，已成为大型 LNG 液化工艺装备领域内的标准性主流选择，在世界范围内已广泛应用。目前，国内的大型 LNG 装备一般随着成套工艺技术整体进口，包括工艺技术包及主设备专利技术使用费等，造价非常昂贵，后期维护及更换设备的费用同样巨大。由于大型 LNG 系统装备及主设备大多仍未国产化，即还没有成型的设计标准，因此给 LNG 制冷装备的设计计算带来了难题。

《液化天然气装备设计技术：液化换热卷》主要围绕 LNG 混合制冷剂液化工艺及换热工艺中所涉及的主要低温装备，研究开发 LNG 液化工艺流程中核心主液化装备的设计计算技术，主要包括 LNG 低温液化混合制冷剂多股流缠绕管式主换热装备、LNG 低温液化混合制冷剂多股流板翅式主换热装备、天然气进气压缩机及混合制冷剂压缩机用表面蒸发空冷器、LNG 开架式气化器等装备的设计计算技术，为 LNG 液化、LNG 储运、LNG 接收及 LNG 气化等关键环节中所涉及主要设备的设计计算提供可参考样例，并推进 LNG 系列装备及 LNG

系统工艺技术的标准化及国产化研究开发进程。此外，近年来由于低温液氮洗、低温甲醇洗等系统工艺技术在低温气体液化分离领域内占比越来越大，应用越来越广泛，而这两套工艺系统内最具特色的装备为大型多股流缠绕管式主换热装备，是目前世界上设计计算难度最大的系列主设备之一，尤其低温液氮用多股流缠绕管式换热器，内含扩散制冷工艺技术且有 10 股以上低温流体同时进行低温多股流、多相流换热过程，设计计算难度极大，在换热领域内，同 LNG 低温液化混合制冷剂多股流缠绕管式主换热装备并列为设计计算难度最大的换热装备，本书作者通过多年研究开发，已系统掌握这两种主换热装备的设计计算技术，并通过本书一并呈送相关领域同行借鉴参考。

(1) LNG 缠绕管式主换热装备

以目前最流行的 MCHE 型混合制冷剂 LNG 液化工艺为例，MCHE 主换热器为多股流缠绕管式换热器，主要用于 $100 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 以上大型 LNG 液化系统，是整个 LNG 液化工艺流程中的核心设备，可一次性将 36°C 天然气冷却至 -162°C ，并液化。由于 MCHE 主换热器为工艺型换热器，内含液化工艺，有 5 种以上混合制冷剂分凝预冷并同时制冷，是一种多股流回热型换热器，也是目前换热器中体积最大、缠绕过程最复杂、设计计算难度最大的换热器。MCHE 型缠绕管式换热器管内介质以螺旋方式流动，壳程介质逆流横向交叉通过绕管，换热器层与层之间换热管反向缠绕，管、壳程介质以纯逆流方式进行传热，即使在较低的雷诺数下其流动形态也为湍流，换热系数较高，其结构相对紧凑、耐高压且密封可靠、热膨胀可自行补偿，易实现大型 LNG 液化作业。美国 APCI 是 LNG 领域 MCHE 最大的供货商，在 1977~2013 年间，生产了 120 套 LNG 装置，其液化能力累计达到 $4.3 \times 10^8 \text{t/a}$ 。此外，德国 Linde 公司在近 5 年内一共生产了累计金属重量达到 3120t 的多股流缠绕管式换热器应用于 LNG 工厂。自 2010 年以来，由兰州交通大学张周卫等主持研究开发 LNG 缠绕管式换热器等项目，目前，已出版《缠绕管式换热器》专著一部，开发 MCHE 专用软件一套，申报发明专利 12 项，发表论文 14 篇，涉及 12 类不同温区的缠绕管式换热器，并系统开发了缠绕管式换热器设计计算方法，可用于设计计算 LNG 专用系统缠绕管式换热器、低温甲醇洗系列缠绕管式换热器、低温液氮洗系列缠绕管式换热器等各种类型缠绕管式换热器。本书给出了专用于计算 MCHE 型 LNG 混合制冷剂用缠绕管式换热器的一个计算事例，供相关行业的同行参考。

(2) LNG 板翅式换热器

LNG 板翅式换热器主要用于 $30 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 以上大型 LNG 液化系统，是该系统中的核心设备，一般达到 $60 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 以上时，采用并联两套的模块化办法，实现 LNG 系统的大型化。基于板翅式换热器的 LNG 液化工艺也是目前非常流行的中小型 LNG 液化系统的主液化工艺。从 2013 年开始，由兰州交通大学张周卫等开始研究开发大型 LNG 混合制冷剂用多股流板翅式换热器，并前后开发了 LNG 混合制冷剂板翅式换热器、LNG 一级三股流板翅式换热器、LNG 二级四股流板翅式换热器、LNG 三级五股流板翅式换热器等系列 LNG 板翅式换热器，申报发明专利 4 项。本文根据项目开发情况，给出了 LNG 混合制冷剂多股流板翅式换热器设计计算模型，供相关行业的同行参考。

(3) 表面蒸发空冷器

表面蒸发空冷器常用于天然气压缩机、混合制冷剂压缩机等出口高温气体的冷却过程，其利用管外水膜的蒸发过程进一步强化管外传热过程，从而达到空冷的效果。基本工作原理是用泵将设备下部水池中的循环冷却水输送到位于水平放置的光管管束上方的喷淋水分配器，由分配器将冷却水向下喷淋到传热管表面，使管外表面形成连续均匀的薄水膜；同时用

风机将空气从设备下部空气入口吸入，使空气自下而上流动，横掠水平放置的光管管束。此时传热管的管外换热除依靠水膜与空气流间的显热传递外，管外表面水膜的迅速蒸发吸收了大量的热量，强化了管外传热。由于水具有较高的汽化潜热（1atm 时为 2386kJ/kg），因此管外表面水膜的蒸发大大强化了管外传热，使设备总体传热效率明显提高。本书根据表面蒸发空冷器强化换热原理，给出了一种表面蒸发空冷器的设计计算方法，仅供参考。

(4) LNG 开架式气化器

LNG 开架式气化器是用海水作为热媒将液态 LNG 气化为气体。开架式气化器结构简单，外部接口有 LNG 入口、气化后的 LNG 出口以及海水进出口、换热管安装在框架结构内。气化器的基本单元是传热管，由若干传热管组成板状排列，两端与集气管或集液管焊接形成一个管束板，再由若干个管束板组成气化器。LNG 从下部总管进入，然后分配到每个小的换热管内，在换热管束内由下向上流动。气化器顶部装有海水分布装置，海水由顶部进入，经分布器分配成薄膜状均匀沿管束外壁下降，同时将热量传递给管内液化天然气，使其加热并气化。本书根据 LNG 开架式气化器工作原理，给出了一种 LNG 开架式气化器的设计计算方法，仅供参考。

(5) 低温液氮洗用多股流缠绕管式换热器

与 LNG 缠绕管式换热器设计相关联的低温液氮洗用多股流缠绕管式换热器主要应用于液氮洗工艺，主换热工艺流程主要包括三个阶段，由三个不同换热温区的换热器组成，其中，第一个阶段是将压缩后的高压氮气进行预冷，将 42℃ 高压氮气预冷至 -63.6℃；第二个阶段是将高压氮气及低温甲醇工艺来的净化气从 -63.6℃ 冷却至 -127.2℃，为低温液化做准备；第三个阶段是将 -127.2℃ 高压氮气冷却至 -188℃ 并液化及将 -127.2℃ 净化气冷却至 -188.2℃，三个过程连续运行并连接成为一个整体式低温液氮回热换热装备。本书给出了低温液氮洗用多股流缠绕管式换热器设计计算模型，供相关行业的同行参考。

本书共分 6 章，第 1 章、第 2 章、第 3 章由张周卫、郭舜之负责撰写并编辑整理，第 4 章、第 5 章、第 6 章由汪雅红、赵丽负责撰写并编辑整理；全书最后由张周卫统稿。

本书受国家自然科学基金（编号：51666008）、甘肃省财政厅基本科研业务费（编号：214137）、甘肃省自然科学基金（编号：1208RJZA234）等支持，在此表示感谢！

本书按照目前所列装备设计计算开发进度，重点针对 5 项装备进行研究开发，总结设计计算方法，并与相关行业内的研究人员共同分享。由于水平有限、时间有限及其他原因，本书难免存在不足之处，希望同行及广大读者批评指正。

兰州交通大学

张周卫 郭舜之 汪雅红 赵丽

2017 年 12 月 1 日

目录

CONTENTS

第1章 绪论

- 1.1 LNG 应用领域 / 001
- 1.2 LNG 工厂国内外发展现状 / 002
 - 1.2.1 国外发展及现状 / 002
 - 1.2.2 国内发展及现状 / 003
- 1.3 LNG 产业链 / 003
- 1.4 LNG 产业链各环节主要工艺概述 / 004
 - 1.4.1 LNG 净化工艺 / 004
 - 1.4.2 LNG 液化工艺 / 006
 - 1.4.3 LNG 接收站工艺 / 009
 - 1.4.4 LNG 加气站工艺流程 / 010
- 1.5 LNG 主要装备技术 / 011
- 参考文献 / 011

第2章 LNG 缠绕管式换热器设计计算

- 2.1 LNG 多股流低温缠绕管式换热器 / 012
 - 2.1.1 缠绕管式换热器设计计算路线 / 012
 - 2.1.2 MCHE 型 LNG 液化工艺描述 / 013
 - 2.1.3 LNG 缠绕管式换热器设计原则 / 020
- 2.2 缠绕管式换热器换热工艺计算 / 021
 - 2.2.1 换热工艺计算主要内容 / 021
 - 2.2.2 缠绕管式换热器的制冷过程温熵图的绘制 / 030
 - 2.2.3 制冷装备通过真空层向外界辐射散热量的计算 / 035
 - 2.2.4 一级制冷装备传热及管束结构参数计算过程 / 036

- 2.2.5 二级制冷装备传热及管束结构参数计算过程 / 048
- 2.2.6 三级制冷装备传热及管束结构参数计算过程 / 051
- 2.3 缠绕管式换热器结构设计计算 / 054
 - 2.3.1 内筒的强度设计计算 / 054
 - 2.3.2 换热管规格及选型 / 058
 - 2.3.3 管板设计 / 059
 - 2.3.4 法兰与垫片 / 059
 - 2.3.5 保温层及保温材料选择 / 062
 - 2.3.6 开孔补强计算 / 062
 - 2.3.7 中心筒的强度校核 / 076
- 2.4 塔的强度设计 / 077
 - 2.4.1 塔壳(外筒)的强度计算 / 077
 - 2.4.2 塔的质量载荷计算 / 082
 - 2.4.3 塔的自振周期计算 / 084
 - 2.4.4 地震载荷和地震弯矩的计算 / 084
 - 2.4.5 风载荷和风弯矩计算 / 087
 - 2.4.6 计算各截面的最大弯矩 / 088
 - 2.4.7 塔壳稳定校核 / 090
 - 2.4.8 裙座稳定计算 / 091
 - 2.4.9 地脚螺栓座计算 / 093
 - 2.4.10 裙座与塔壳对接连接焊缝的验算 / 096
 - 2.4.11 设计总汇 / 097
 - 2.4.12 塔器设计主要符号说明 / 097
- 2.5 本章小结 / 098
- 参考文献 / 098

第3章 LNG板翅式换热器设计计算

- 3.1 板翅式换热器简介 / 101
 - 3.1.1 板翅式换热器国内外发展 / 101
 - 3.1.2 板翅式换热器的构造及工作原理 / 102
 - 3.1.3 基于PFHE的LNG液化系统 / 102
 - 3.1.4 基于板翅式换热器的混合制冷剂制冷系统 / 102
 - 3.1.5 液化天然气工艺流程操作及控制 / 103
- 3.2 板翅式换热器的工艺计算 / 103
 - 3.2.1 板翅式换热器的工艺设计过程 / 103
 - 3.2.2 混合制冷剂参数确定 / 103

- 3.2.3 基于板翅式换热器的 LNG 液化流程 / 104
- 3.2.4 LNG 工艺计算过程 / 105
- 3.2.5 板翅式换热器传热系数、传热面积计算及板束排列及压力降计算 / 113
- 3.3 板翅式换热器结构设计 / 139
 - 3.3.1 封头设计 / 139
 - 3.3.2 液压试验 / 144
 - 3.3.3 接管确定 / 146
 - 3.3.4 接管补强 / 149
 - 3.3.5 法兰与垫片选择 / 158
 - 3.3.6 隔板导流片封条的选择 / 161
 - 3.3.7 换热器的成型安装 / 163
- 参考文献 / 164

第 4 章 表面蒸发空冷器设计计算

- 4.1 空冷技术概述 / 166
 - 4.1.1 国外空冷技术发展概况 / 167
 - 4.1.2 我国空冷技术发展概况 / 167
 - 4.1.3 工作原理 / 169
 - 4.1.4 蒸发空冷器的特点 / 169
 - 4.1.5 亲水膜 / 170
- 4.2 空冷器的设计计算 / 170
 - 4.2.1 空冷器的设计计算方法和步骤 / 170
 - 4.2.2 详细计算 / 175
- 4.3 喷淋系统的设计 / 198
 - 4.3.1 喷头的选用 / 198
 - 4.3.2 喷淋水质的要求 / 198
 - 4.3.3 喷淋系统 / 198
- 4.4 管束结构与计算 / 201
 - 4.4.1 管束的布管设计 / 201
 - 4.4.2 管箱结构形式 / 201
 - 4.4.3 管束材料 / 202
 - 4.4.4 管束支撑梁的计算 / 202
 - 4.4.5 管束定距结构 / 208
 - 4.4.6 丝堵式焊接矩形管箱的设计计算 / 209
- 4.5 构架 / 215
 - 4.5.1 构架的型式与参数 / 215

- 4.5.2 构架载荷的计算 / 217
- 4.5.3 构架材料选用的一般原则 / 219
- 4.6 百叶窗 / 219
 - 4.6.1 叶窗的用途 / 219
 - 4.6.2 百叶窗的安装方式 / 220
 - 4.6.3 一般要求 / 220
 - 4.6.4 百叶窗的结构 / 220
- 4.7 风机的选用 / 220
 - 4.7.1 风机的选型方法 / 220
 - 4.7.2 通风机选型的一般步骤 / 221
 - 4.7.3 轴流式通风机 / 222
 - 4.7.4 性能参数表 / 222
 - 4.7.5 离心式通风机 / 223
 - 4.7.6 风机型式及传动方式 / 224
 - 4.7.7 离心通风机的安装与使用 / 225
 - 4.7.8 通风机噪声 / 226
- 4.8 空冷器的防冻设计 / 227
 - 4.8.1 确定防冻设计依据 / 227
 - 4.8.2 热损失和防冻要求 / 227
 - 4.8.3 计算最低的管壁温度 / 227
- 参考文献 / 228

第5章 开架式气化器设计计算

- 5.1 概述 / 230
 - 5.1.1 背景及意义 / 230
 - 5.1.2 开架式气化器结构和工作原理 / 230
 - 5.1.3 LNG 组分及物性 / 231
 - 5.1.4 设计基本参数 / 231
- 5.2 气化器换热计算 / 232
 - 5.2.1 气化器传热面积的确定 / 232
 - 5.2.2 气化器的气化能力的确定 / 232
 - 5.2.3 气化单位质量液化天然气所需的热量 / 232
 - 5.2.4 气化器的传热系数的确定 / 233
 - 5.2.5 开架式气化器结构尺寸的确定 / 247
- 5.3 LNG 开架式海水气化器设计选材 / 248
 - 5.3.1 气化器概述 / 248

- 5.3.2 影响气化器选材的因素 / 249
- 5.3.3 材料传热性能 / 249
- 5.3.4 材料低温性能 / 249
- 5.3.5 材料耐腐蚀性能 / 249
- 5.3.6 常用材料性能比较 / 250
- 5.3.7 气化器材料选择 / 250
- 5.4 开架式气化器的海水分布装置 / 251
 - 5.4.1 海水水质的基本要求 / 251
 - 5.4.2 海水分布装置结构 / 251
- 5.5 LNG 换热管道裂纹及腐蚀 / 252
 - 5.5.1 工作环境及工况说明 / 252
 - 5.5.2 开架式气化器基本结构 / 253
 - 5.5.3 LNG 换热管道裂纹分析 / 253
 - 5.5.4 传热管开裂成因及解决方案 / 254
- 5.6 LNG 管道腐蚀及应力计算 / 254
 - 5.6.1 铝合金应力腐蚀性能 / 254
 - 5.6.2 铝合金点蚀对应力集中系数影响 / 255
 - 5.6.3 点蚀数目和最深点蚀位置的影响 / 256
 - 5.6.4 点蚀系数对应力集中系数的影响 / 256
- 5.7 法兰设计 / 257
 - 5.7.1 螺栓法兰连接设计内容 / 257
 - 5.7.2 本设计采用窄面整体法兰 / 257
 - 5.7.3 整体法兰计算 / 258
- 参考文献 / 260

第 6 章 低温液氮洗用多股流缠绕管式换热器

- 6.1 设计方案及流程 / 262
 - 6.1.1 液氮洗工序生产流程图 / 262
 - 6.1.2 设计工艺参数 / 264
 - 6.1.3 缠绕管换热器设计计算过程 / 264
- 6.2 氮气及制冷剂的状态计算 / 265
 - 6.2.1 高压氮气冷却器的设计 / 265
 - 6.2.2 缠绕管换热器壳程有效面积的计算 / 266
 - 6.2.3 壳侧界膜换热系数的计算 / 270
 - 6.2.4 管侧界膜换热系数的计算 / 272
 - 6.2.5 传热温差计算（利用对数平均温差法计算） / 276

- 6.2.6 管侧压力损失 / 278
- 6.2.7 壳侧压力损失 / 279
- 6.3 一号原料气体冷却器的设计计算过程 / 280
 - 6.3.1 一号原料气体冷却器螺旋管的确定 / 280
 - 6.3.2 缠绕管换热器壳程有效面积的计算 / 282
 - 6.3.3 壳侧界膜热导率的计算 / 286
 - 6.3.4 管侧界膜热导率的计算 / 286
 - 6.3.5 传热温差计算 / 291
 - 6.3.6 管内侧压力损失 / 293
 - 6.3.7 壳侧压力损失 / 295
- 6.4 二号原料气体冷却器的设计计算过程 / 296
 - 6.4.1 二号原料气体螺旋管的确定 / 296
 - 6.4.2 缠绕管换热器壳程有效面积的计算 / 297
 - 6.4.3 壳侧界膜热导率的计算 / 300
 - 6.4.4 管侧界膜热导率的计算 / 302
 - 6.4.5 传热温差计算 / 306
 - 6.4.6 管内侧压力损失 / 308
 - 6.4.7 壳侧压力损失 / 310
- 6.5 换热器机构设计与强度计算 / 311
 - 6.5.1 内筒的强度计算 / 311
 - 6.5.2 外筒（塔壳）的强度计算 / 316
 - 6.5.3 中心筒的强度校核 / 320
 - 6.5.4 管板设计 / 322
 - 6.5.5 法兰与垫片 / 322
- 参考文献 / 326

致谢

附录 混合制冷剂物性参数表

第1章

绪论

液化天然气(LNG)是将天然气冷却至 -162°C 并液化后得到的液态天然气,常压下储存,经远洋运输至LNG接收站,再气化打入天然气管网,或在LNG陆基工厂将陆地开采的天然气直接液化,经LNG槽车运输至接收站,再气化后打入天然气管网,供城镇居民或工业燃气使用。LNG作为继石油、煤炭、天然气之后的第四类新能源,来源于天然气并成为当今世界能源消耗中的重要部分,是天然气经脱水、脱硫、脱 CO_2 之后的无色透明低温液体,其体积约为气态天然气体积的 $1/630$,重量仅为同体积水的45%左右,通常储存在 -162°C 、 0.1MPa 左右的低温储存罐内。天然气由甲烷、乙烷、丙烷及其他杂质气体等主要成分构成,不同产地的天然气所含气体成分不同,所用的LNG液化工艺及装备依据产量及成分不同而有较大差别。

1.1 LNG应用领域

LNG是天然气脱除杂质并液化后的产物,作为燃料主要应用于城镇燃气、工业燃料、燃气发电及LNG汽车等领域。由于LNG为低温液体,具有自增压功效,在常温常压下直接将LNG打入自增压容器,并将自增压容器连入管网后,在天然气应用高峰期起到管网增压调峰的作用。

(1) 城镇燃气

LNG是一种非常理想的清洁燃料,燃烧后的产物几乎没有环境污染。近年来,随着国家能源结构的不断调整,LNG作为替代煤炭、石油等的主要能源,已广泛应用于城镇燃气等领域。LNG燃烧后产生的二氧化碳和氮氧化物仅为煤的50%和20%,污染为液化石油气的 $1/4$,煤的 $1/800$ 。LNG作为管道天然气的调峰气源,可对城市燃气系统进行调峰,保证城市天然气管网安全平稳供气。LNG自增压调峰装置已广泛用于天然气输配系统中,并对民用和工业用气的波动性进行调峰,尤其针对冬季采暖用气调峰具有非常重要的作用。

(2) LNG发电

LNG具有燃烧清洁的特性,已经成为全球新建电厂的主要能源。与煤电相比,LNG发电具有污染少、运行灵活、占地小、消耗低、投资省等优势。日本一直是世界上LNG进口最多的国家,其LNG进口量的75%以上用于发电,用作城市燃气的占20%~23%。韩国也是LNG进口大国,其电力工业是韩国天然气公司的最大客户,所消费的LNG占该国LNG进口总量的50%以上。

(3) 工业燃料

应用以 LNG 作为工业燃料燃气系统，可有效替代燃煤、燃油锅炉等供热设备，节约除尘、脱硫、脱氮等工艺成本，有利于环境保护，提高产品质量、减轻劳动强度，为企业带来良好的经济、社会和环境效益。LNG 可应用于造纸、冶金、陶瓷、玻璃等能源消耗较大的行业，上述行业企业往往距离城市或天然气管线较远，或者根本无法连接管道天然气时，使用 LNG 的优势更加明显。

(4) 化工原料

LNG 也是一种优质的化工原料。以 LNG 为原料的一次加工产品主要有合成氨、甲醇、炭黑等近 20 种，经二次或三次加工后的重要化工产品则包括甲醛、乙酸、碳酸二甲酯等 50 种以上。与用其他原料相比，以 LNG 为原料的化工产品装置投资省、能耗低、占地少、人员少、环保性好、运营成本低。

(5) LNG 汽车

LNG 汽车燃烧排出的一氧化碳、氮氧化物与烃类化合物水平都大大低于汽油、柴油发动机汽车，排放过程不积炭、不磨损，而且具有续驶里程长、燃烧效率高等特点，运营费用很低，是一种环保型汽车，目前国内外都在大力发展 LNG 汽车。

(6) LNG 冷能利用

-162℃低温 LNG 在 1atm (1atm=101325Pa) 时转变为常温气态的过程中可提供大量的冷能。LNG 在常温下约有 836J/kg 的冷能，将这些冷能回收，还可以用于多种低温用途上，如使空气分离而制造液态氧、液态氮；液化二氧化碳并制取干冰；制造冷冻食品或为冷冻仓库提供冷量等。

1.2 LNG 工厂国内外发展现状

LNG 液化装置具有投资费用大、配套要求严格、操作条件特殊（如操作压力从高压到低压，操作温度由环境温度到-162℃等）的特点。LNG 液化装置按其生产性质一般分为基本负荷型、调峰型、终站型和卫星站型四种。基本负荷型是指所生产的 LNG 主要供远离气源的用户使用或出口外运的大型液化装置；调峰型主要建在远离天然气气源的地区，用于液化管输来的天然气；终站型接收站用于接收油轮从基地型 LNG 生产厂运来的 LNG，在站内加以储存和气化后分配给用户；LNG 卫星站是一种小型的 LNG 接收和气化站，用于接收从 LNG 终端接收站或液化装置用专用汽车槽车来的 LNG。

1.2.1 国外发展及现状

世界上第一个基本负荷型 LNG 生产厂于 1964 年建于阿尔及利亚，之后一批新的基本负荷型 LNG 生产厂在亚洲、非洲、大洋洲、北美洲等地相继建成。世界上 LNG 调峰型生产装置约有 70 多个，美国和加拿大有 50 多个，欧洲和澳大利亚 10 多个，这些调峰型装置可储存 1.7×10^6 t 的 LNG，能液化 $13.2 \times 10^6 \text{m}^3/\text{d}$ 的天然气，能气化 $13.2 \times 10^6 \text{m}^3/\text{d}$ 的天然气。经过 40 多年的发展，LNG 接收站已遍及日本各地和英国、法国、意大利、西班牙、韩国等国家，世界现有 40 多个 LNG 接收站，日本拥有最多，多达 30 个，美国包括在建的终端站有 17 个。欧美各国和俄罗斯是通过建全国天然气管网而实现全国城镇燃气化的，而日本基本上是用 LNG 接收站加 LNG 卫星站实现全国城镇燃气天然气的。采用 LNG 卫星站供应天然气的城镇比例在日本已达 20%左右，美国在 20 世纪 80 年代初约有 22 个卫星调峰装置。

1.2.2 国内发展及现状

为了推动能源结构变革,改善生态环境、发展经济,近十年来,中国 LNG 产业开始迅速发展。目前中国已建成运营的 LNG 工厂有 50 多座,总液化能力 $2300 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,正在建设或调试的有 60 多座,全部建成后年产能可达 $208 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$ 。2001 年,我国第一座 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 小型天然气液化装置——中原 LNG 工厂在中原油田试运行成功,虽然规模不大,但标志着我国在生产 LNG 方面迈开了关键的一步。之后,2004 年新疆广汇 $50 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ LNG 工厂建成投产,以及 2008 年宁夏哈纳斯 $200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ LNG 工厂的建设等项目,标志着我国大规模工业生产 LNG 的开始,并对国家“西气东输”主干管网以外的广阔市场进行供气。国内 LNG 工厂大多建在西北及华北地区,其中,西北地区目前已建成 LNG 工厂 13 座,产能 $1110 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;华北地区目前已建成 LNG 工厂 22 座,产能 $745 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;华东地区目前已建成 LNG 工厂 3 座,产能 $29 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;西南地区目前已建成 LNG 工厂 8 座,产能 $272 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;华南地区目前已建成 LNG 工厂 3 座,产能 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;东北地区目前已建成 LNG 工厂 3 座,产能 $52 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

2000 年始建于上海的 LNG 事故调峰站是我国第一座调峰型天然气液化装置,生产能力为 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,储存能力为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,再气化能力为 $120 \text{ m}^3/\text{d}$,主要用于东海天然气中上游工程因不可抗拒的因素造成停产、冬季调峰时向管网提供可靠的天然气供应等。上海调峰站的建成,开启了我国 LNG 城镇燃气调峰之路。近些年来,国内陆续建成 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ LNG 调峰站 30 多座。我国西北部天然气储量丰富,人口稀少;东南沿海天然气储量较少,人口密集,经济发达,因而较西部有更大的 LNG 需求,仅依靠“西气东输”显然不能满足东南部发展的需要,还需要大量进口海洋 LNG。目前,国内沿东南沿海各个省份已建成投运大型 LNG 接收站 6 座,总接收能力 $2.42 \times 10^7 \text{ t/a}$,其中深圳大鹏 600 万吨/a LNG 站是中国第一座投入商业运行的 LNG 接收站。地处福建、上海、江苏、大连、浙江的 5 座 LNG 接收站也相继投产。此外,我国已在青岛等地建有 LNG 卫星站,我国 LNG 卫星站设计、建造及陆上运输技术已基本成熟,相关装备可国产化,且价格便宜,具有一定的竞争力。

1.3 LNG 产业链

LNG 产业链是一条贯穿天然气产业全过程的投资巨大且技术密集完整产业链条,主要由天然气勘探开采、天然气预处理、LNG 液化、LNG 储运、LNG 接收、LNG 再气化等工艺流程链条组成。除了 LNG 生产链条外,还包括 LNG 装备制造业产业链,主要包括 LNG 系列换热器、天然气压缩机、混合制冷剂压缩机、LNG 系列储罐、LNG 系列低温阀门等。由陆地或海洋开采的天然气在 LNG 工厂经过预处理后再进行液化,生产的 LNG 按照国际贸易流程,通过船运或槽车运输到 LNG 接收站储存,再气化后经天然气管网送至不同用户。从 LNG 生产流程来讲,整个 LNG 产业链主要包括上、中、下游三个环节(图 1-1)。

(1) LNG 上游产业链

上游产业链主要包括天然气勘探、开发、净化、分离、液化等几个环节。其中,天然气液化是 LNG 产业链上游中的关键环节。液化的主要作用是持续不断地把原料气液化成为 LNG,其主要步骤包括:①预处理工艺,即从天然气原料气中脱水、脱碳、脱硫、脱杂质等;②脱重烃工艺,即脱除天然气中的冷凝温度较高的重烃馏分;③LNG 液化工艺,即用深冷剂

将原料气冷却并冷凝到 -162°C ，使其成为液态 LNG 产品。

(2) LNG 中游产业链

中游主要包括 LNG 储存、装卸、运输、接收等环节，包括 LNG 储罐和再气化设施及供气主干管网的建设等环节。LNG 储存是指 LNG 被储存在接近 1atm 的 LNG 储罐中，最常见的大型 LNG 储罐有单包容储罐、双包容储罐、全包容储罐等，LNG 储罐是 LNG 液化末端或接收终端的关键设备；LNG 运输是指通过 LNG 槽车或 LNG 运输船将 LNG 运送到终端站；LNG 接收站是连接终端市场及用户的关键环节。在 LNG 接收站，LNG 通过码头从运输船卸载、储存 LNG，然后再气化后变成普通管道气输送至 LNG 发电厂或通过当地分销网络作为燃料气输送至 LNG 终端用户。

(3) LNG 下游产业链

LNG 下游产业链即 LNG 终端市场用户，主要包括 LNG 联合循环电站、城市燃气公司、工业锅炉用户、分布式能源站、天然气加气站，以及其他工业燃料或化工原料用户等。另外，可向下延伸至 LNG 卫星站、LNG 加注站及冷能利用等与 LNG 相关的所有产业。

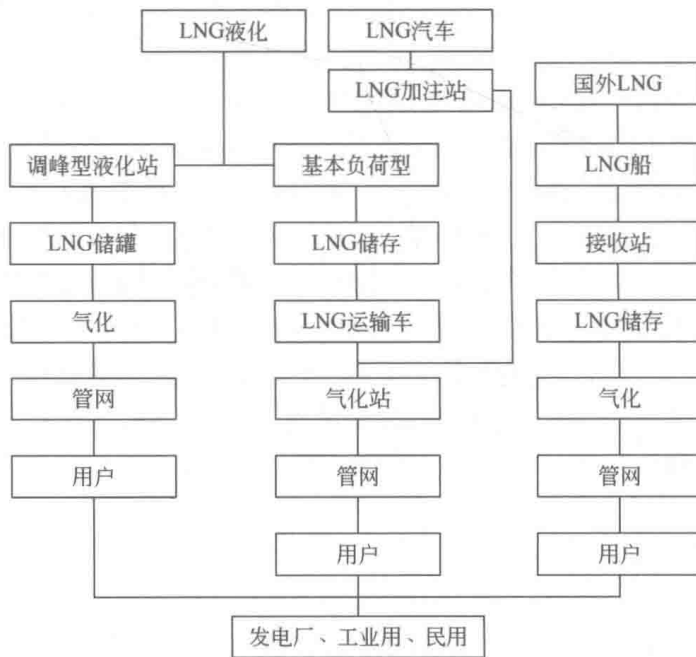


图 1-1 LNG 产业链示意

1.4 LNG 产业链各环节主要工艺概述

1.4.1 LNG 净化工艺

预处理前的天然气在进入长输管线时，其中含有有害杂质及深冷过程中可能凝固的物质，如 CO_2 、 H_2S 、 H_2O 、重烃、汞等，这些杂质气体应在天然气液化之前进行工艺分离，以免在冷却过程中冷凝并堵塞管道及产生严重管路腐蚀。一般工艺流程中，首先，应脱除重烃，

然后用醇胺法除去 CO_2 和 H_2S ；其次，用分子筛吸附天然气中的 H_2O ；接着，用脱氧工艺脱除天然气中的 O_2 ；最后，在需要的情况下脱汞。

天然气脱水工艺方法主要有变压吸附法，一般采用两个分子筛干燥塔切换吸附与再生流程，交替吸附及脱吸过程，从而达到连续脱除的目的。固体干燥剂种类很多，还可采用氯化钙、硅胶、活性炭、分子筛等。吸附法脱水工艺流程如图 1-2 所示。

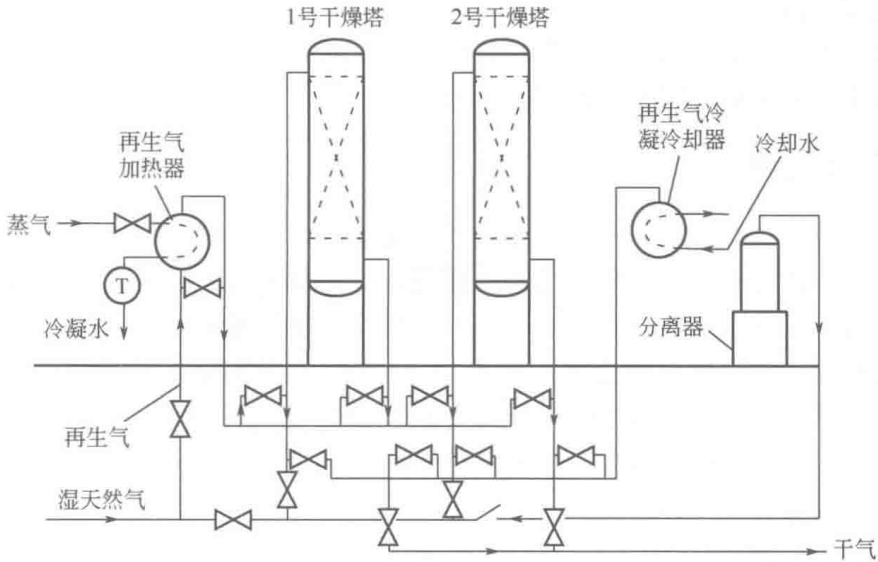


图 1-2 吸附法天然气脱水典型工艺流程示意

在天然气预处理过程中，脱除酸性气体 CO_2 、 H_2S 、 COS 等过程常称为脱硫脱碳过程。常用的脱硫方法有醇胺法、热钾碱法、砵胺法等，其中，醇胺法是利用以胺为溶剂的水溶液，以乙醇胺、二乙醇胺为溶剂，与原料天然气中的酸性气体发生化学反应来脱除酸性气体，其工艺流程见图 1-3。

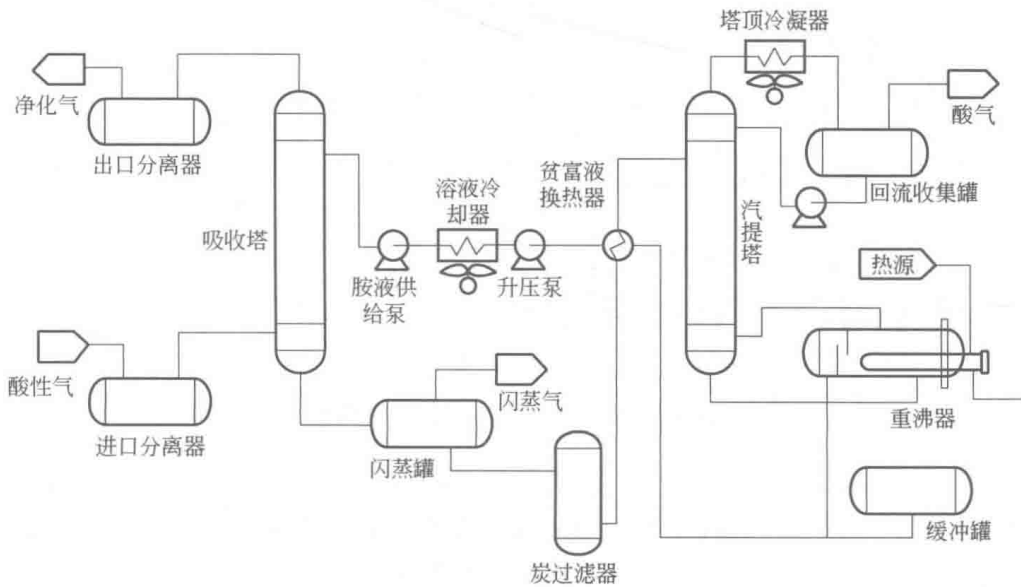


图 1-3 醇胺法脱硫装置的典型工艺流程