

# 国内外液化天然气工厂及技术现状与进展

李 简 (国家管网集团工程技术创新有限公司, 天津 300450)

**摘要:** 天然气液化技术的应用, 实现了天然气向液态的转变, 为天然气资源的储存和运输提供便利, 也推进了液化工艺的发展。为降低天然气液化能耗、装置投资, 提高操作便捷性, 国内外技术人员研究出了适用于不同规模液厂的液化工艺。本文结合国内外建成的天然气液化装置, 对天然气液化工艺类型、特点、原理、适用范围等进行介绍与对比, 为选择适宜的液化工艺提供参考, 更好的保障天然气液化装置的运行, 推进液化技术发展。

**关键词:** LNG; 液化工厂; 液化技术; 进展

## 1 液化天然气工厂概述

LNG 工厂以天然气作为原料气, 经净化系统、液化系统生产出合格的 LNG 产品进入存储系统内, 经装车系统外输。LNG 工厂气源可分为常规气田气、非常规气田气 (如煤层气、页岩气、致密气)、煤制气、工业副产气、管道气等。根据地质形成条件的不同, 天然气的成分和组成亦有所不同。

LNG 工厂根据功能定位可分为基荷型、调峰型等。基荷型液化工厂多建在靠近气源的位置, 包括回收边远井口气的橇装型小型液化装置、气田附近的大中型液化工厂; 调峰型液化工厂多位于城市附近, 站内设置气化外输系统, 实现 LNG 气化后向管网的返输、调峰。

LNG 工厂根据产能的不同, 可分为小型 (< 10 万 t/a)、中型 (10~100 万 t/a)、大型 (100~500 万 t/a) 和超大型 (> 500 万 t/a)。考虑 LNG 工厂工程投资、液化能耗和运维难易等因素, 不同规模 LNG 工厂所选用的液化工艺不尽相同, 本文着重对不同规模 LNG 工厂所选用液化工艺进行介绍。

## 2 液化天然气工厂进展

19 世纪初, 迈克尔·法拉第在实验室首次制备 LNG; 1917 年, 在美国西弗吉尼亚建成第一座 LNG 实验工厂; 1941 年, 在美国俄亥俄克里夫兰建成第一座商业化工厂; 全球液化工艺于 2003~2011 年进入快速成长期, 得到大规模商业化使用, 陆续建成 SEGAS、Gorgon、亚马尔、Cove Point、卡塔尔等 500 万 t/a 产能的 LNG 液化装置。相比国际 LNG 行业进程, 国内 LNG 行业起步较晚, 但自 2010 年来, 中国 LNG 产能保持了高速增长, 主要集中在 2011~2015 年之间, 年均增速在 50% 以上。2001 年, 我国第一座 LNG 基本负荷型工厂河南中绿能源建成投产; 2014 年, 国内最

大 LNG 工厂——湖北黄冈 500 万方 / 天 LNG 工厂国产化示范工程建成投产。

国内 LNG 液化工厂特点表现为数量多, 但单个液化产能低; 2022 年底, 全国已建液化工厂约 300 座, 产能主要以 20 万 t/a 以下为主, 总产能超过 3500 万 t/a, 产能主要集中在中西部。中西部、西北、西南合计占总产能比例超过 80%, 其中以内蒙古是全国产能最大的省级行政区。长三角与东南沿海地区大型 LNG 接收站较多, 管网相对发达, 本地调峰需求偏弱, 液化工厂较少。国内 LNG 工厂产能分布如图 1 所示。

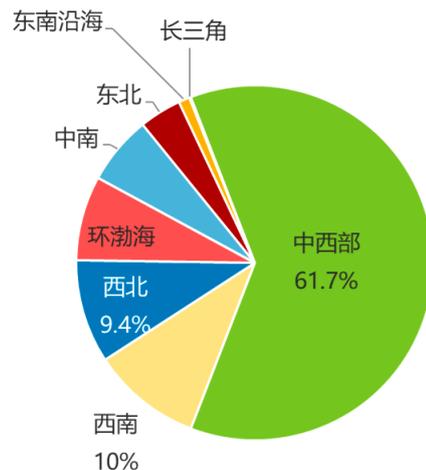


图 1 国内 LNG 工厂产能分布图

## 3 液化工艺现状与进展

天然气液化装置的能耗约占液化工厂总能耗的 90%、LNG 供应链总能耗的 42%，天然气液化是低温天然气工业中最重要热力学过程之一，因此应用适宜的液化工艺以实现节能降耗，保障工厂的经济效益的目的至关重要。目前世界上常用液化工艺包括：级联式（阶式）式、混合制冷剂式和膨胀制冷式液化工艺。

### 3.1 级联式液化工艺

级联液化工艺是天然气液化工艺中较早的一种，早在 20 世纪 60 年代就已在天然气液化领域得到广泛应用。该工艺的基本原理是将低温度级的循环冷量转给相邻高温度的循环。通常由 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>（或 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>）和 CH<sub>4</sub> 三个独立制冷循环复迭而成，提供液化所需的冷量。

丙烷制冷循环为天然气、乙烯（或乙烷）和甲烷提供冷量；乙烯（或乙烷）制冷循环为天然气和甲烷提供冷量；甲烷制冷循环为天然气提供冷量。通过换热器的逐级冷却实现天然气的液化。典型的级联式液化工艺包括康菲 cascade 工艺、林德的 MFC 工艺、改进的 C3-MFC 工艺，以及 CPECC 西南研发应用于黄冈液厂的 MSC 工艺等。该工艺具有能耗低、操作稳定的优点，主要应用于产能 > 100 万 t/a 的液化装置。但该液化工艺的突出缺点是流程复杂、设备多、投资高、运维难度大。典型的级联式液化工艺流程如图 2 所示。

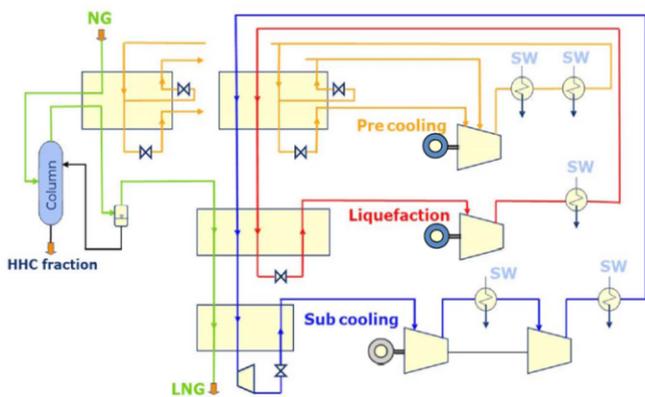


图 2 典型级联式液化工艺流程图

### 3.2 混合制冷液化工艺

20 世纪 70 年代后，混合制冷液化工艺逐渐成为应用最广泛的液化工艺。混合制冷剂制冷循环是利用多组分混合制冷剂代替多种纯组分制冷剂，进行逐级冷凝、蒸发、节流膨胀得到不同温度水平的制冷量，以达到逐步冷却和液化天然气的目的。混合制冷剂根据要液化的天然气组分进行配制设计，通常由 N<sub>2</sub>、C<sub>1</sub>~C<sub>5</sub> 碳氢化合物组成。根据其流程特点主要分为单循环混合制冷工艺（SMR）、双循环混合制冷工艺（DMR）、带丙烷预冷的混合制冷工艺（C3MR）等。

#### 3.2.1 SMR 液化工艺

单循环混合制冷工艺（SMR）相比阶式制冷循环流程简单，投资低，在制冷循环中由一台制冷剂压缩机

压缩节流提供冷源，适用于中小型 LNG 工厂。混合制冷剂的组成比例需根据原料气的组成、压力进行设计和运行匹配，已实现节能运行。实际运行过程中，受原料气组分变化及压力波动，频繁调整制冷剂组分不具备可行性，因此运行中难以始终保持最优制冷剂的配比。针对该问题，混合制冷工艺通常采用分段液化，以使液化过程的熵增降至最小。典型 SMR 工艺流程如图 3 所示。

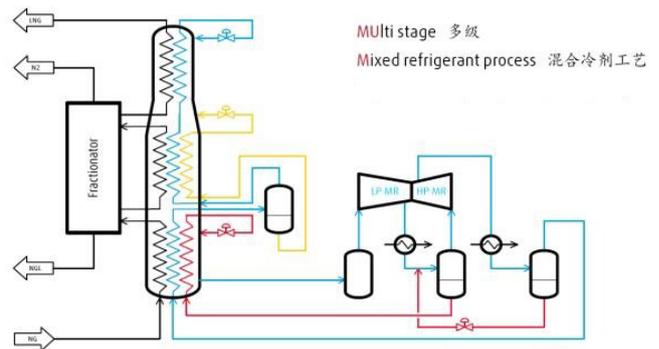


图 3 典型 SMR 工艺流程图

#### 3.2.2 C3MR 液化工艺

在 SMR 工艺的基础上，结合了级联式工艺的优点，研究了有丙烷预冷的 C3MR 工艺。该工艺分两段供给天然气冷量：高温段用丙烷压缩制冷，按 3~4 个温度水平预冷原料天然气到 ~-35℃；低温段采用混合制冷剂与原料气换热。由于丙烷预冷与原料气的冷凝曲线相匹配，充分体现了热力学上的特性，因此该工艺拥有更高的制冷效率。该工艺适应性强，但工艺流程复杂，设备多，操作和控制较为困难。典型的 C3-MR 工艺流程如图 4 所示。

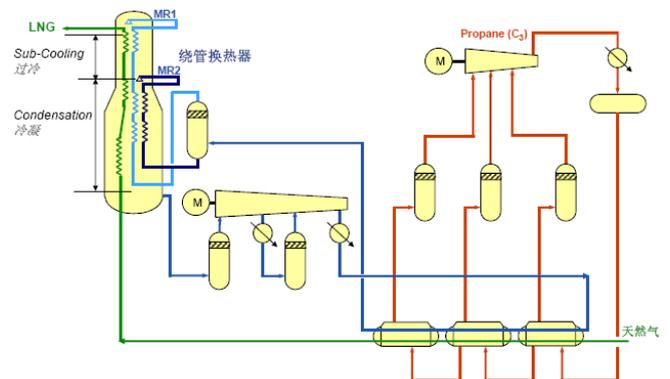


图 4 典型 C3MR 工艺流程图

#### 3.2.3 DMR 液化工艺

由于 C3MR 预冷段丙烷物理特性的限制，只能冷

却至  $-35^{\circ}\text{C}$  左右, 为克服该缺点, DMR 工艺采用混合制冷剂代替传统的丙烷, 利用两个独立的混合制冷剂循环进行天然气的液化。DMR 工艺比 SMR 工艺具有更高的热效率, 同时可以为天然气液化提供更加合理的冷量, 两个循环之间动力平衡更易控制, 更易平衡两混合制冷剂提供的冷量。流程对不同组成原料气具有更强的适应性、可靠性。DMR 工艺具有工艺简单、能耗低、产能大、液化效率高等优点, 主要用于大、中型 LNG 液化装置。典型 DMR 工艺如图 5 所示。

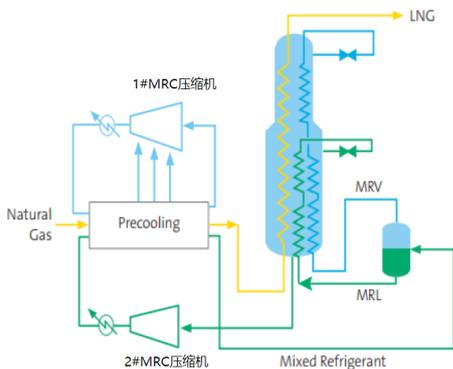


图 5 典型 DMR 工艺流程图

### 3.3 膨胀制冷液化工艺

20 世纪 80 年代, 基于膨胀机的天然气液化技术逐级走进大众视野, 该技术借助高压制冷剂利用透平膨胀机进行逆布雷顿循环制冷, 从而达到给天然气降温的目的。根据制冷剂的不同, 膨胀机制冷循环可分为: 氮膨胀机制冷循环、带预冷的氮膨胀机制冷循环、氮-甲烷膨胀机制冷循环。氮膨胀机制冷循环工艺具有流程非常简单、装置紧凑、造价略低、运行灵活、适应性强、易于操作和控制、安全性好等优点, 但能耗相比 MRC 工艺高出 40% 左右。为了降低膨胀机制冷循环的功耗, 发展了带  $\text{CO}_2$  预冷的氮膨胀制冷循环和  $\text{N}_2\text{-CH}_4$  膨胀机制冷循环等, 相比纯氮膨胀机制冷

循环节省 10~20% 的动力消耗。典型氮膨胀制冷工艺流程如图 6 所示。

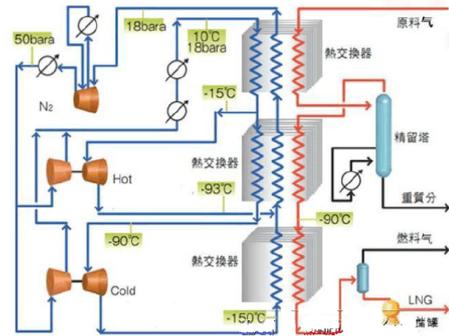


图 6 膨胀制冷液化工艺流程图

### 3.4 液化工艺比较

对常见的天然气液化工艺进行归纳总结和比较, 如表 1 所示。

### 4 结论

液化天然气对于保障国家能源安全、促进能源转型和助力实现“双碳”目标具有重要意义。天然气液化技术作为 LNG 产业链中关键的一环, 对其充分的理解更有利于选择适宜的液化工艺, 保障液厂的安全稳定高效运行。本文从天然气液化工厂工艺现状与进展等方面进行研究, 介绍了国内外常见的液化工艺, 为技术人员更好的选择适宜的天然气液化技术提供参考。

### 参考文献:

- [1] 顾安忠, 鲁雪生, 王荣顺, 等. 液化天然气技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [2] 白江涛. 浅析液化天然气工厂的生产装置及工艺技术 [J]. 化工管理, 2018(31).
- [3] 黄俊之. 试析天然气液化工艺的对比及应用 [J]. 企业技术开发, 2017(12).

表 1 天然气液化工艺比较

序号	液化流程	能耗比较	液化工艺 @ 国际专利商	适用范围	特点
1	级联式液化流程	1	cascade@ConocoPhillips; MFC@Linde	> 100 万 t/a	① 流程复杂, 设备多; ② 各制冷剂系统控制及管理维护复杂; ③ 操作稳定, 适应性强
2	混合 制冷 液化 工艺	两级混合制冷剂液化流程 (DMR)	DMR@APCI; DMR@Shell	100-500 万 t/a	① 流程简单, 机组设备少; ② 混合制冷剂的合理配比难确定; ③ 制冷剂压缩机维护技术要求高
3		丙烷预冷单级混合制冷剂液化流程 (C3MR/APX)	C3MR、APX、C3MR/ Split MR@APCI	100-500 万 t/a	
4		单级混合制冷剂液化流程 (SMR)	PRICO@BV; Limum@Linde	< 100 万 t/a	
5	膨胀制冷液化工艺	1.5~1.80	--	< 10 万 t/a	① 流程紧凑, 管理方便; ② 能耗高; ③ 产能受限于经济性