

综述与专论

小型可移动式天然气液化装置研究进展

公茂琼¹, 郭浩¹, 孙兆虎^{1,2}, 程逵炜¹, 陈高飞¹, 邹鑫¹, 吴剑峰¹

(¹ 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190;

² 中科睿凌(北京)低温设备有限公司, 北京 101408)

摘要: 小型可移动式天然气液化装置以其独特优势在零散天然气源的液化集输、管输天然气的再分配及分布式调峰和车用 LNG 燃料站等场合有非常广泛的应用前景。概括对比分析了现有的天然气液化技术, 指出占据国际 LNG 工业主流地位的混合制冷剂循环(MRC)液化流程也是适宜小型化的最佳技术之一。在简要介绍了小型天然气液化装置的近期进展后, 重点介绍了本团队基于近 20 年的混合工质节流制冷技术方面的研究经验, 研制成功系列规格小型混合工质撬装液化装置, 同时提出并创建了以此为基础的“煤层气柔性液化中心和虚拟管网”集输方案的概念。已研制出的全风冷、制冷油润滑螺杆压缩机驱动的 $10000 \sim 30000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ “可移动式液化装置”, 其中 $30000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 液化装置生产中实测液化比功耗已经与国内 $1000000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的集中液化工厂相当。目前在山西、内蒙古已有多套不同规模的装置运行, 初步形成一定规模。

关键词: 天然气; 液化; 混合物; 小型装置; 柔性液化中心

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20150699

中图分类号: TB 657.8

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2015) S2—0010—11

Advances in mobile natural gas mini-liquefiers

GONG Maoqiong¹, GUO Hao¹, SUN Zhaohu^{1,2}, CHENG Kuiwei¹,
CHEN Gaofei¹, ZOU Xin¹, WU Jianfeng¹

(¹ Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, Beijing 100190, China;

² Refrigeration and Liquefaction Equipment Co., Ltd., Beijing 101408, China)

Abstract: Mobile natural gas mini-liquefiers have great advantages in application prospects in dealing with scattered and isolated well natural gas resources, pipeline gas redistribution, distributed peak-shaving and vehicle LNG fuel station, etc. In this paper, the various natural gas liquefaction technologies were first analyzed. It is pointed out that the mixed refrigerant liquefaction cycle (MRC) which is the dominant technology in world-wide LNG industry is still the best choice for the miniature scale natural gas liquefiers. The current development of mobile natural gas mini-liquefier is also reviewed. Based on the researches on MRC for 20 years, our team has successfully developed various skid-mount natural gas liquefiers. The idea of flexible liquefaction center and virtual pipe line network is proposed. Series air-cooled skid-mount liquefiers with various capacities from 10000 to 30000 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ have been developed and commercialized which is driven by ordinary oil-lubricated screw compressors. The measured specific power consumption of the 30000 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ mini-liquefier is almost equal to that of the large-scale LNG plant with 1000000 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ in China. At present, several different capacities of liquefiers have been used in Shanxi and Inner Mongolia.

Key words: natural gas; liquefaction; mixture; mini-liquefiers; flexible liquefaction center

2015-05-25 收到初稿, 2015-06-02 收到修改稿。

联系人: 孙兆虎。第一作者: 公茂琼 (1971—), 男, 博士, 研究员。

基金项目: 国家重大科技专项 (2011ZX05039-01-004)。

Received date: 2015-05-25.

Corresponding author: SUN Zhaohu, zhsun@mail.ipc.ac.cn

Foundation item: supported by the State Key Science and Technology Program (2011ZX05039-01-004).

引言

天然气是一种具有使用方便、经济、热值高、燃烧产物对环境污染少等优点的优质清洁燃料。除了常规天然气外，还包括气田分散的单井气、油田伴生气、煤层气、页岩气，工艺放散气以及海上采油平台产出的无法利用的小股量天然气等非常规的零散天然气。在实际应用中一般会焚烧大量零散气和工艺放散气，这严重影响环境和浪费资源。例如中原油田有 100 多口零散井，单井，日产量大多在 10 t 以下，各井分布比较分散，生产不稳定。据不完全统计，仅部分因地域限制、分散的小油田每年焚烧的伴生气就高达 10 亿立方米左右。因此，液化采收零散气和放散气资源，变废为宝，对缓解能源供应紧张和改善地区环境有着十分重要的意义。另外，天然气管网集输能够实现大气量输运，但是难以兼顾周边小用户；采取小型液化技术模式，建立虚拟管网，有利于增大管网覆盖范围，提升管道运输的效能，并发挥调峰作用，意义重大。同时作为清洁能源，LNG 燃料的客车及重型卡车的发展越来越受到重视。小型 LNG 液化装置在实现城市调峰

作用的同时，还可以作为车用 LNG 燃料的加注站。因此，小型可移动式天然气液化装置的研究对于我国天然气的开发利用和 LNG 市场越来越重要。

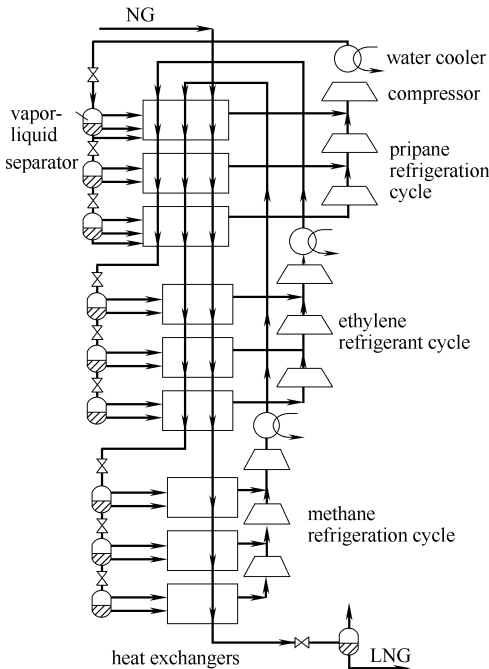
小型可移动式天然气液化装置一般规模约在 5~70 t·d⁻¹。其基本特征为运输方便、尺寸紧凑、维护简单，并且具有较高的运行效率，以及较低的初投资成本。

1 适宜小型化的天然气液化技术

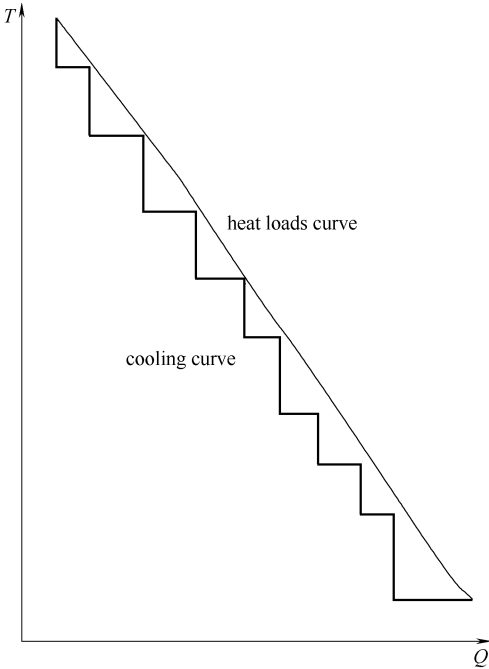
天然气主要的成分为甲烷，为一种低温气体，其常压沸点在 111.6 K。因此，天然气液化是一种典型的分布温度热负荷的冷却，实现冷却介质与热负荷曲线的完善匹配是高效液化的关键。下面对适宜小型化的几种天然气液化技术进行介绍^[1-4]。

1.1 级联式液化流程

级联式液化流程又称为复叠或阶式液化流程。经典级联式液化流程由分别以丙烷、乙烯和甲烷为工质的 3 个独立的制冷循环串联构成，同时为了尽可能实现冷却介质与热负荷曲线的完善匹配，将丙烷段、乙烯段、甲烷段各分为 3 个段，形成一个 9 阶式液化流程。图 1 (a) 和 (b) 分别给出了传统



(a) pure fluid cascade cycle



(b) heat loads curve

图 1 纯工质级联式液化流程和热负荷曲线

Fig. 1 Pure fluid cascade cycle and heat loads curve

级联式天然气液化流程和热负荷曲线。另外还出现了采用混合工质的新型级联式液化流程,如图 2 所示。级联式液化流程能耗低,技术成熟,但是在其应用过程中也存在很多缺点:机组多、投资费用高、流程十分复杂等。现今 LNG 生产厂少见采用这种工艺。

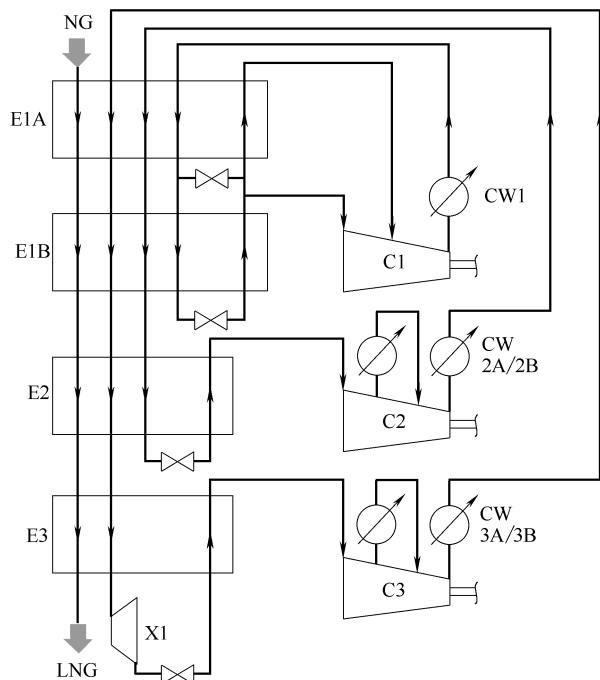


图 2 混合工质级联式液化流程

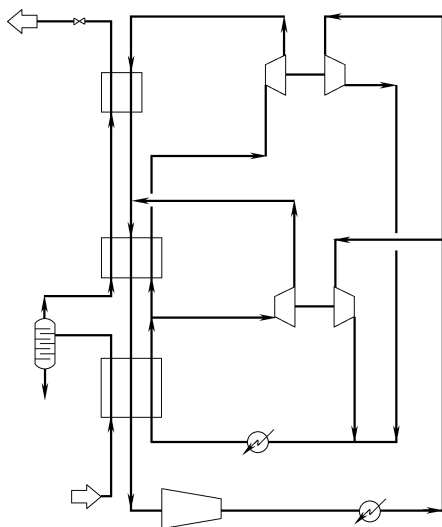
Fig. 2 Mixed fluids cascade cycle

1.2 带膨胀机液化流程

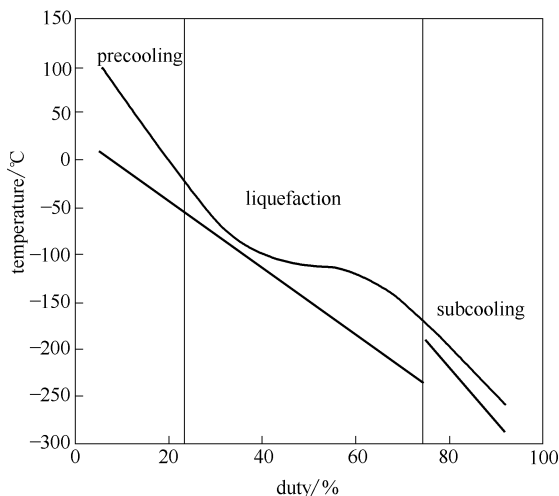
带膨胀机的液化流程 (expander cycle) 通过利用高压制冷剂在透平膨胀机绝热膨胀制冷实现天然气液化。expander cycle 最大的特点在于膨胀机输出冷量的同时可以输出功,用于驱动流程中的压缩机,提升膨胀流体的压力等级。根据制冷剂的不同,可以分为氮气膨胀液化流程和天然气膨胀液化流程。

以 N_2 膨胀机制冷循环为基础的液化方式发展比较早,但是由于其膨胀机、(无油) 气体压缩机可靠性较差、采用气体制冷使其冷箱和外围设备均较为庞大,和单级 N_2 膨胀循环同单级纯工质节流循环一样不适合分布温度热负荷的冷却造成效率低下。若采用多级膨胀方式 [图 3 (a)],虽然具有较好的负荷匹配 [图 3 (b)],但这又如同多级复叠节流循环一样复杂。

现 N_2 膨胀方式多应用大型或者超大型液化装置的低温级,这有助于解决低温级换热器内多元两相混合物均匀性分配这一个重要难题。APCI 提出 AP-X 流程是以丙烷制冷循环预冷天然气、MRC 液化天然气和 N_2 膨胀过冷天然气组成一个天然液化流程^[3] (图 4),该流程适合天然气液化构成的分布温度热负荷,同时避免了多元两相混合物的不均匀性分配。



(a) N_2 expansion cycle



(b) heat loads curve

图 3 N_2 膨胀液化流程和热负荷曲线

Fig. 3 N_2 expansion cycle and heat loads curve

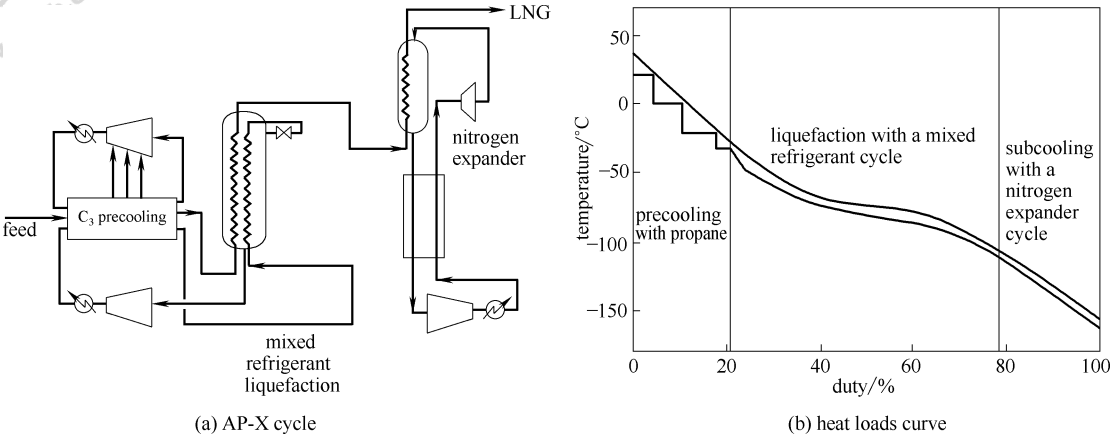


图 4 AP-X 液化流程和热负荷曲线
Fig. 4 AP-X cycle and heat loads curve

1.3 混合工质液化流程

混合制冷剂液化流程（mixed refrigerant cycle, MRC）一般是以 $C_1 \sim C_5$ 的碳氢化合物以及 N_2 等组成的多组分混合制冷剂为工质，逐级冷凝、蒸发、节流膨胀以得到不同温度水平的制冷量，达到逐步冷却和液化天然气的目的。与纯组分制冷剂不同的是，混合制冷剂定压蒸发温度是变化的，能够实现与天然气介质良好的变温匹配。MRC 可以达到类似级联式液化流程的目的，同时系统设备较少、投资费用较低，管理方便。其缺点在于，能耗较级联式流程略高、混合制冷剂合理配比和物性计算较困难等。典型的混合制冷剂液化流程包括常规单级混合工质液化流程、丙烷预冷的混合工质液化流程及双级混合工质液化流程等。

单级 MRC 流程由混合工质制冷循环回路和天

然气液化回路组成。如图 5（a）所示，单级 MRC 流程的混合工质制冷循环回路：混合工质经压缩机压缩至高压，经风冷或水冷后由汽液分离器分离出液相和气相，液相经过换热器 1 过冷，节流降温后与返流气混合为换热器 1 提供冷却天然气、气相制冷剂和液相制冷剂的冷量。汽相制冷剂经换热器 1 冷却后，由汽液分离器分离成气相和液相，液相经换热器 2 冷却后，节流降温后与返流气混合为换热器 2 提供冷却天然气、气相制冷剂和液相制冷剂的冷量。汽相制冷剂经换热器 2 冷却后，由汽液分离器分离成气相和液相，液相经换热器 3 冷却后，节流降温后与返流气混合为换热器 3 提供冷量却天然气、气相制冷剂和液相制冷剂的冷量。汽相制冷剂经换热器 4 冷却，再节流降低降压后为换热器 4 提供冷却天然气和气相制冷剂的冷量。天然液化回

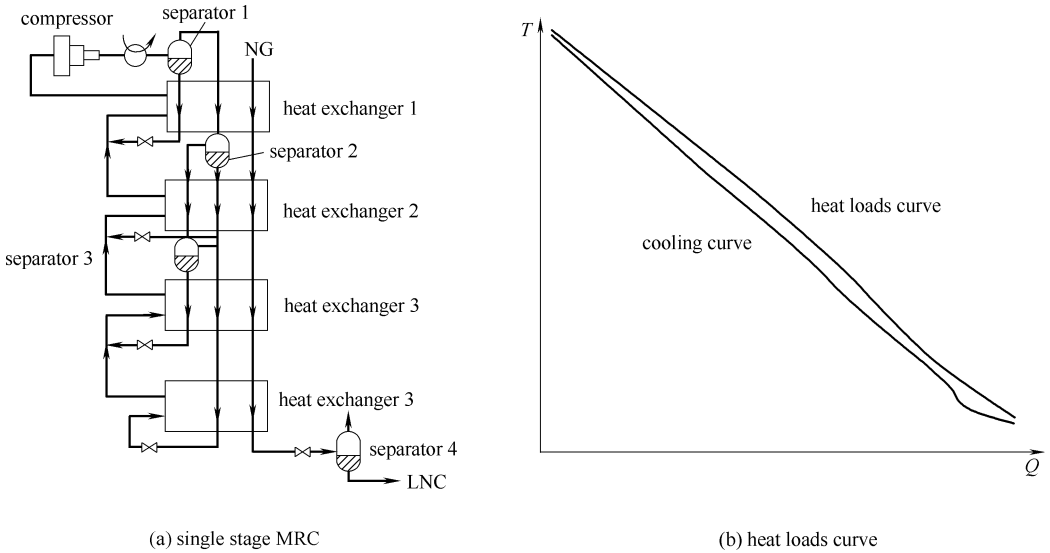


图 5 单级混合工质液化流程和热负荷曲线
Fig. 5 Single stage MRC and heat loads curve

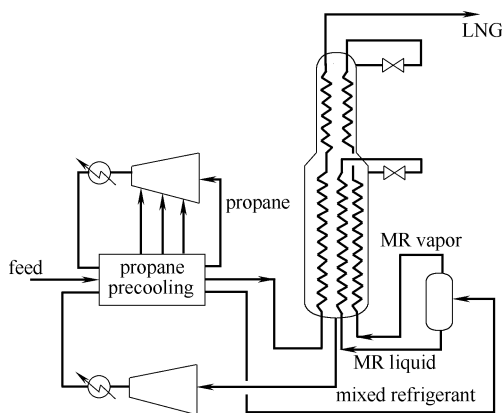
路：天然气被换热器 1、换热器 2、换热器 3 和换热器 4 逐级冷却后经节流后由闪蒸罐储存。图 5 (b) 给出了单级 MRC 液化流程的热负荷曲线，可以看出制冷剂 and 天然气之间具有非常好的温度匹配。

丙烷预冷混合制冷剂循环 (C_3 MR) 是 APCI 首先发展起来的技术。图 6 (a) 和 (b) 是 APCI 丙烷预冷混合制冷剂循环液化天然气流程及热负荷曲线。流程由 3 部分组成：① 混合制冷剂循环；② 丙烷预冷循环；③ 天然气液化回路。丙烷预冷循环用于预冷混合制冷剂和天然气，而混合制冷剂循环用于深冷和液化天然气。 C_3 MR 液化流程操作弹性比较大，具有较好的适应性和良好的用户接受

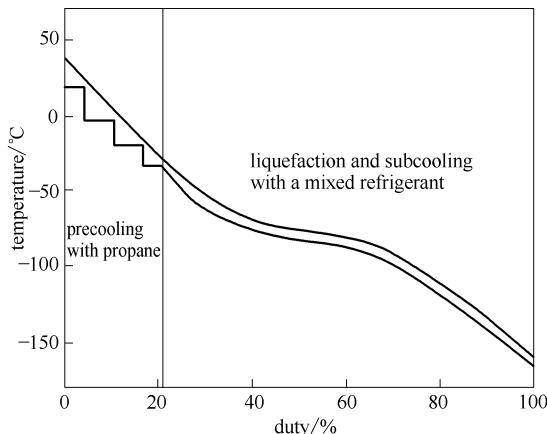
度，同时具有较高的效率。

在丙烷预冷混合制冷剂液化流程的基础上，双混合工质液化流程 (dual MRC) 被提出。dual MRC 采用高沸点混合物循环实现预冷，低沸点混合物实现液化和过冷。其基本流程图和热负荷曲线见图 7 (a) 和 (b)。由于预热段采用混合工质，dual MRC 预冷段的换热匹配较 C_3 MR 液化流程要好。

表 1 给出了现有液化循环的技术经济特征比较。可以看出，混合制冷剂循环 (MRC) 液化流程具有独特的优势，并已经成为国际 LNG 工业主流技术之一，同时也是适宜小型化液化装置的最佳技术之一。



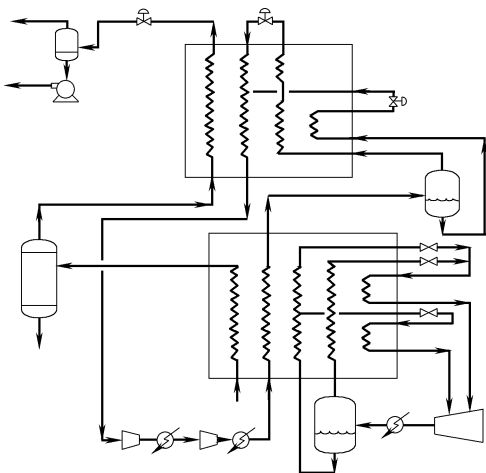
(a) dual MRC



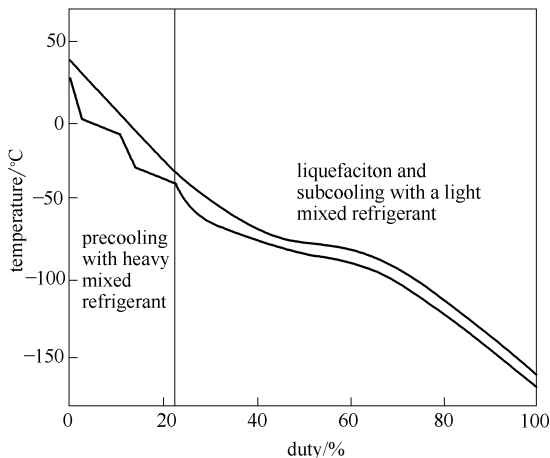
(b) heat loads curve

图 6 APCI 丙烷预冷混合制冷剂液化流程和热负荷曲线

Fig. 6 C_3 /MR cycle-AP and heat loads curve



(a) dual MRC



(b) heat loads curve

图 7 双混合工质液化流程和热负荷曲线

Fig. 7 Dual MRC and heat loads curve

表 1 现有液化循环的技术经济特征比较

Table 1 Comparison of existing cycles

Cycle	Efficiency	Complexity	Reliability	Possibility for miniaturization
cascade	high with 9 stages	high	low	too many facilities, low reliability
MRC with precooling	high	middle	high	good, with off-the-shelf facilities, easy assembly
nitrogen brayton cycle	low, improved by precooling	low, simple system configuration	high	difficult in miniature turbine and compressor

2 本课题组在深冷混合工质节流制冷技术的研究概况

中国科学院理化技术研究所低温与制冷工程研究中心从 20 世纪 90 年代开始，开展了新型深冷混合工质节流制冷技术的研究工作，在其工作机理、热力学分析、优化混合工质浓度和应用技术研发方面取得了重大进展^[5]。

深冷混合工质节流循环主要分为两类：一是以混合工质自身回热过程（recuperative process）为主要制冷机理；另一种是基于复叠制冷循环形式，尤其是针对存在汽液分离器的制冷循环，称之为内复叠或者自动复叠循环（auto-cascade cycle）。Gong 等^[6-8]采用焓分析的方法对不同结构的混合工质制冷循环开展了相应的热力学分析，提出的具有分凝分离的回热式制冷流程结构可兼顾高效性和可靠性。

对于深冷混合工质节流循环技术而言，高效混合工质筛选优化是非常关键的因素之一。本团队对关键深冷组元 iC_5H_{12} 到 Ne 的节流制冷效应进行了

系统分析，发现每种纯质组元存在一个有效节流制冷温区，对应其高低压相变温度区间，而在此温区之外，其节流效应锐减（图 8）。基于有效节流效应温区接力匹配提出了组元筛选原则：从环境温度至目标制冷温度，优选高中低沸点纯质组元，使其有效制冷温区相互有部分重叠覆盖，以此完善制冷温区分布匹配，实现各沸点组元有效制冷温区的接力匹配，由此实现大温跨的高效制冷（图 8）。根据对混合工质等温节流效应的研究，指出整个温区的最小等温节流效应即制冷机的最大理论制冷量，由此提出以其为目标的混合工质浓度优化方法，具有明确的物理意义。

3 小型可移动式天然气液化装置研究进展

目前有很多关于天然气液化流程理论分析的报道^[9-11]，而小型可移动式装置的研制和实践应用的报道较少。

美国爱达荷州国家实验室^[12]研发出一种利用

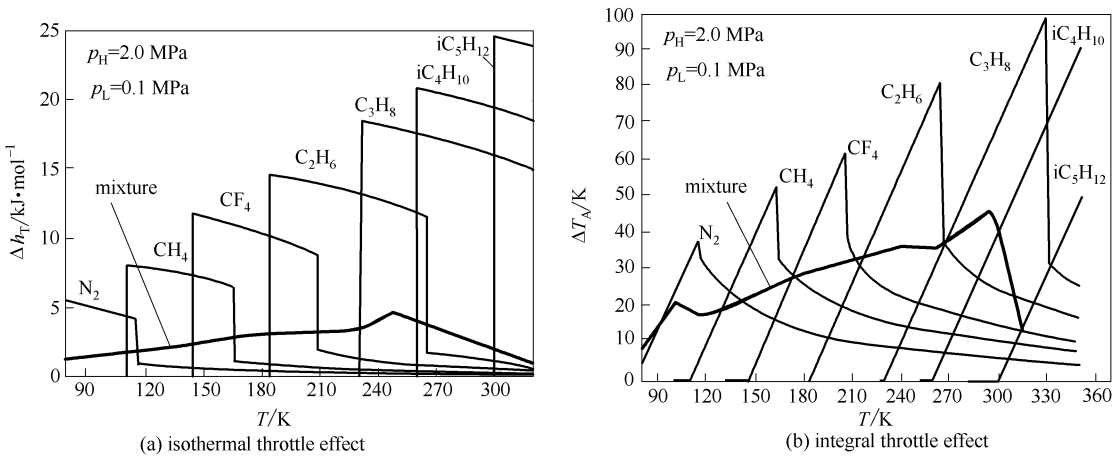


图 8 纯质与其混合物等温及积分效应

Fig. 8 Isothermal and integral throttle effect of pure fluids and mixture

天然气压差能膨胀液化天然气的小型天然气液化流程, 并已申请专利。该流程的优势在于能够在液化过程进行的同时, 将 CO_2 和水脱除, 该流程从管网引出天然气分两部分, 一部分进入透平膨胀机膨胀获得冷量, 用于冷却天然气; 另一部分膨胀用于冷却压缩机出来的流股。美国博莱克威奇 (BLACH&VEATH) 公司设计了一种采用混合制冷剂制冷循环的小型 LNG 液化装置, 该混合制冷剂采用 $\text{C}_1 \sim \text{C}_5$ 和 N_2 的混合物。该装置 LNG 产量为 $10 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ [13]。ABB 鲁玛斯全球 (LUMMUS GLOBAL) 公司的设计了两类小型天然气液化流程 [14-15], 其中一种流程采用丙烷制冷系统与膨胀机膨胀制冷结合, 即丙烷预冷天然气, 预冷后进入膨胀机进一步降温。较之其他一烃类作为制冷剂的 LNG 流程具有较高的经济性。另一种液化流程为双膨胀制冷循环液化流程, 两个独立的膨胀系统制冷。其中一个系统是以氮气为制冷剂, 另一系统以甲烷、乙烷等烃类化合物作为冷剂。该流程的特点主要是, 两个制冷循环系统可根据原料气气质的波动来选择合适的制冷方式, 即选择单独制冷或共同制冷; 另外, 由于制冷剂在工况下一直以气态进行工作, 不存在两相区, 因而无须汽液分离器, 使流程换热器的设计大为简化。Kryopak 公司研发了三类小型天然气液化装置, 即 KryopakEXP 流程、KryopakPCMR 流程和 KryopakSCMR 流程 [16]。KryopakEXP 流程是以自蒸发 BOG 气体作为制冷剂的单级透平膨胀机膨胀制冷液化流程。其特点是: 制冷剂来自过程气体, 不是混合制冷剂, 流程更简化, 但其效率低于混合制冷剂液化流程约 15%~20%。KryopakPCMR 流程是有预冷的 MRC 液化流程。其中预冷部分采用氨或丙烷为制冷剂, 主制冷剂采用 $\text{C}_1 \sim \text{C}_2$ 和 N_2 组成的混合制冷剂。与美国气体化工产品公司 (APCI) 的 MCRTM、康菲石油 (Conoco Phillips) 公司的 OCR、博莱克威奇 (Black & Veath) 的 Prico 以及挪威国家石油 (Statoil) 公司和林德 (Linde) 公司共同开发的混合液级联制冷液化工艺 (MFCP) 相比, 具有更高的制冷效率。KryopakSCMR 流程采用没有预冷的混合制冷剂制冷循环。其中制冷剂采用 $\text{C}_1 \sim \text{C}_2$ 和 N_2 混合成的混合制冷剂。较之 Kryopak PCMR 流程, 制冷效率要高出 2%~5%。KryopakSCMR 流程和 Kryopak PCMR 流程适用于处理量在 $3 \times 10^4 \sim 13 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的中小型基本负荷型和

调峰型 LNG 液化装置。美国 Gas Technology Institute (GTI) 报道了一台试商用的液化量为 $1000 \text{ GAL} \cdot \text{d}^{-1}$ ($2000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$) 的天然气液化装置 [17]。该装置采用单级混合工质液化流程, 通过燃气内燃机驱动商用制冷螺杆式压缩机, 冷箱采用铝制板翅式换热器。所有的部件均在一个撬体上。该装置最佳能耗为消耗 25% 的原料气液化剩余 75% 的天然气。挪威 SINTE 实验室的 Neksa 等 [18-19] 建立一个针对 LNG 运输船的天然气再液化站。该系统采用带气液分离器的混合工质制冷方式, 冷箱采用逆流式铜焊板式换热器。该系统采用常规两级复叠式制冷机预冷系统到 -35°C 。液化站利用油润滑螺杆式压缩机驱动, 当采用乙烯作为 BOG 时, 实际液化量达到 $14.4 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 。但是没有相关的能量效率被报道。此外, 美国气体研美国低温燃料技术公司 (CRYOFUEL)、INEEL、PG&E 和 SOCAL GAS 等均在小型 LNG 液化装置方面进行研发 [20-21]。

国内的撬装液化装置起步相对较晚, 浙江大学在实验室内设计制造了一小型天然气液化装置, 采用带精馏的混合制冷剂液化流程, 在原料气 0.14 MPa 的情况下, 达到 $0.69 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的能耗水平 [22]。中国科学院与中国石油天然气总公司勘探局和四川省绵阳燃气集团总公司等单位合作, 于 1992 年和 1996 年研发了两套小型 LNG 液化装置, 其产量分别为 300 、 $500 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$, 前者采用天然气自身压力膨胀制冷, 后者采用氮气膨胀闭式循环制冷。中原油田液化装置采用丙烷预冷与乙烯制冷结合, 充分利用天然气自身压力, 通过膨胀机膨胀制冷后, 节流降压至 LNG 储罐。该装置处理量为 $30 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 液化率为 50% [23]。昆仑能源公司 [24] 采用美国 Salof 公司的工艺投资建设了一套 $100000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的 LNG 装置, 该装置采用氨预冷制冷-混合制冷剂制冷循环。在两级制冷循环中分别使用了一台螺杆压缩机组, 并且由充满氨液的换热器预冷混合冷剂和进入冷箱中多股流换热器前的天然气。山东科瑞石油装备有限公司 [25] 研发了一套 $50000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的撬装式液化天然气装置, 同样采用混合工质制冷循环, 其综合耗能折合 $1.87 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ 。烟台杰瑞生产的 $300000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的液化设备 [26], 达到 $0.32 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ 的能耗水平, 折合消耗 10.1%, 液化 89.9% 的比例。中科院理化所低温系统关键技术课题组也对 $10000 \sim 50000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$

的 LNG 设备进行了研发制造,其采用混合制冷剂流程,比氮气膨胀制冷流程能耗低 30%^[27]。

3.1 理化所低温与制冷工程研究中心小型混合工质撬装液化装置的研究历程

本团队从 2005 年开始低压混合工质液化制冷系统、流程系统研究。2007 年研制成功第 1 套 2000 m³·d⁻¹ 的煤层气液化装置,并于 2008 年在淮南试车成功。

2009 年本团队成功研制一套风冷可移动式 10000 m³·d⁻¹ 撬装天然气液化装置^[28]。该系统预冷和主冷均采用开启式螺杆压缩机,工质分别采用 R22 和多元混合工质。压缩机单元、预冷换热器、空冷器等均组装在一个撬体上。图 9 给出了该装置的降温曲线。从环境温度 32℃ 经 40 min 降至 -148.9℃,即可正常生产 LNG,其对应天然气的饱和压力为 0.26 MPa。

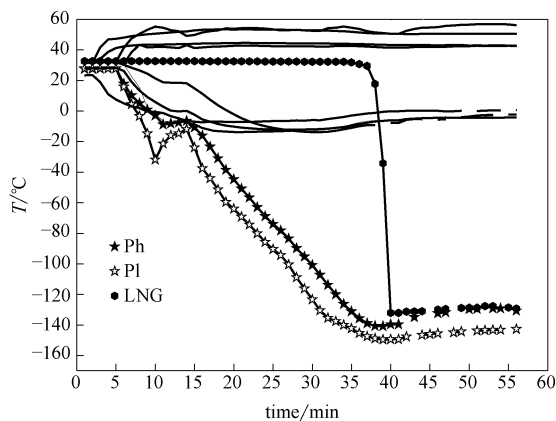


图 9 10000 m³·d⁻¹撬装液化装置降温曲线

Fig. 9 Cooling-down curve of 10000 m³·d⁻¹

2011 年 15000 m³·d⁻¹ 全风冷螺杆式煤层气液化装置成功。该装置采用核心技术与 10000 m³·d⁻¹ 液化装置相同,其中冷箱高度降低至 4.5 m,节省了很大空间。该装置从环境温度 25℃ 经 35 min 降至 -136.9℃,即可正常生产 LNG,其对应天然气的饱和压力为 0.53 MPa。当原料气压力为 1.3 MPa,该装置的液化量达到 18240 m³·d⁻¹。

2013 年 30000 m³·d⁻¹ LNG 撬装液化装置研制成功并在内蒙古杭锦旗投产(图 10),已经稳定运行 10 个月。该装置中压缩机及冷箱集成在一个撬块,撬块高度在 3.0 m 以下,满足一般公路运输条件,其优点在于:液化装置为单独撬块,制冷系统无须现场接管,接电即可开机。但是该装置的前处理模块仍然超高,需要单独运输。2014 年 3

套 100000 m³·d⁻¹ LNG 撬装液化装置研制成功并在山西省五寨县投产,运行稳定,产量达标。表 2 给出了理化技术研究所全风冷撬装天然气液化装置测试液化性能与国内外液化装置的比较。从表中可以看出,理化所研制的 10000 m³·d⁻¹ 的效率与英国 Hamworthy 100000 m³·d⁻¹ 规模的固定式液化装置相当;理化所研制的 30000 m³·d⁻¹ 的效率与四川空分和四川川空的 1000000 m³·d⁻¹ 的液化装置相当。



图 10 内蒙古杭锦旗撬装液化装置

Fig. 10 Liquefier of 30000 m³·d⁻¹ in Inner Mongolia

3.2 基于多套撬装液化装置的柔性液化集输中心

利用可移动式天然气液化装置可形成一种高效的储运方案,大幅度提高其综合利用率。本团队提出根据气源规模和气井的分散程度在一定区域内以多套撬装液化装置集群应用(图 11),这一方案可以形成一定液化处理规模的分布式柔性液化中心,实现天然气的撬装液化集输方式,并且可以将液体天然气输至较远的用户区,提高和拓展天然气资源的利用效能。这种液化装置集群规模可以灵活变动,从每天液化万方到几十万方。



图 11 基于多套撬装液化装置的柔性液化集输中心

Fig. 11 Flexible liquefaction center based on mobile mini-liquefiers

与目前集中式固定液化工厂相比,以多套撬装液化装置形成的柔性液化中心具有选址灵活、基础建设投资小、装置工厂生产调试完成降低现场准备

表 2 理化技术研究所低温与制冷工程研究中心全风冷撬装天然气液化装置测试液化性能与国内外比较

Table 2 Comparisons of liquefaction performance of air-cooled skid-mount package LNG devices between this work and published data

No.	Organization	Cycle/hot sink	Capacity/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	Efficiency	Reference
1	GTI US	MRC/water	2000	$0.947 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ —burning 25%, liquefier only 75% (measured data)	[17]
2	SINTEF Norway	MRC/water	1400	$0.9 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ —burning 24%, liquefier only 76% (experimental measurements)	[18]
3	SINTEF Norway	MRC/water	2	$0.6 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ —burning 16.7%, liquefier only 83.3% (shaft powers of all devices)	[19]
4	Zhejiang University	MRC/—	25	$0.5 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ —burning 14.8%, liquefier only 85.2% (experimental measurements)	[22]
5	Shandong Kerui China	N/A	50000	$1.87 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ —burning 39%, liquefier only 61% (all plant)	[25]
6	Jereh China	MRC/—	5000—300000	$<0.32 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$, burning 10.1%, liquefier only 89.9% (liquefaction power consumption)	[26]
7	TIPC	MRC/—	10000—50000	30% lower than N_2 expander cycle	[27]
8	TIPC	MRC/air	10000	burning 15.3%, liquefier only 84.7% (all plant)	[28]
			30000	burning 11.5%, liquefier only 88.5% (all plant)	—
9	Hashenleng, China	MRC/water	70000	$0.47 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$, burning 14.3%, liquefier only 85.7% (shaft powers of all devices)	[29]
10	Hamworthy UK	N_2 expander/water	100000	$0.57 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$, burning 16%, liquefier only 84%	[30-31]
11	Sichuan air separation, China	MRC/—	100000	$0.39 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$, burning 11.5%, liquefier only 88.5% (all plant)	[32]
12	Huanqiu, China	dual MRC/—	2500000	$0.9 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$, burning 24%, liquefier only 76% (all plant)	[33]

周期、简化现场服务等特点，尤其是对于作者团队研制的低压混合制冷剂液化技术，由于可采用普冷油润滑螺杆制冷压缩机，具有显著的成本优势，还可以实现滚动发展，进一步减少初期投资的规模，减少初期建设的投资压力，特别有利于煤层气、偏散天然气、油田伴生气源、生物质气源等的开发，也可以用于集中管道输运的在分配和分布调峰等方面。

目前在山西晋城已建立一个 $45000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 煤层气柔性液化中心（图 12），该中心共包含 3 套液化装置，液化规模分别为 10000、15000 和 $20000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ，其中前两套液化装置已经投产。

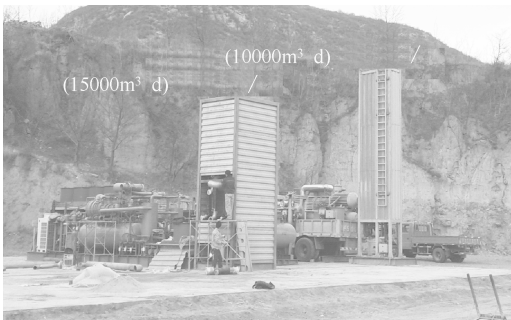


图 12 山西晋城煤层气柔性液化中心
Fig. 12 Flexible liquefaction center in Jincheng, Shanxi province

4 结 论

小型可移动式天然气液化装置在煤层气、偏散天然气、油田伴生气源、生物质气源等的有效开发利用、集中管道输运的在分配和分布调峰等方面具有非常巨大的应用价值和广阔的推广前景, 对于改善我国能源结构具有非常重要的意义。文中简要介绍了小型天然气液化装置的特征及近期进展, 概括总结了适宜小型化的天然气液化技术, 指出混合制冷剂循环 (MRC) 液化流程也是小型化天然气液化装置的最佳选择之一, 其最大特点是尤其可以采取制冷空调领域成熟的设备, 大大降低成本, 并保持了较高的可靠性。本团队基于近 20 年的混合工质节流制冷技术方面的研究经验, 研制成功多套小型混合工质撬装液化装置, 并与国内外部分液化装置进行了比较, 同时提出并创建了以多套撬装液化装置为基础的“煤层气柔性液化中心和虚拟管网集输”方案。目前在山西、内蒙古有多套不同规模的装置投产, 已逐步形成一定的商业化规模。

References

- [1] Gu Anzhong (顾安忠), Lu Xuesheng (鲁雪生), *et al.* Handbook of Liquefied Natural Gas Technology (液化天然气技术手册) [M]. Beijing: China Machine Press, 2010: 76-82.
- [2] Gu Anzhong (顾安忠), Shi Yumei (石玉美), Wang Rongshun (汪荣顺), Zhu Gang (朱刚). Natural gas liquefaction processes and systems [J]. *Cryogenic Technology* (深冷技术), 2003, **1**: 1-6.
- [3] Liu Yuna (刘育南). Air Products and Liquefied natural gas//The 2nd China LNG Forum [C]. 2009.
- [4] Lin Chang (林畅), Bai Gailing (白改玲), Wang Hong (王红), Li Yulong (李玉龙). Development and trend of liquefaction technology and construction of large-scale natural gas liquefaction plant [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress* (化工进展), 2014, **33** (11): 2916-2922.
- [5] Gong Maoqiong (公茂琼), Wu Jianfeng (吴剑峰). Advances in mixed-gases Joule-Thomson refrigerators operating at low-temperature ranges [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2014, **65** (S2): 9-18.
- [6] Gong Maoqiong (公茂琼). Thermodynamic analysis and experimental study of the regenerative throttling refrigeration machine for the multi-component mixed refrigerant [D]. Beijing: Technical Institute of Physics and Chemistry of the Chinese Academy of Science, 2002.
- [7] Gong M Q, Luo E C, Zhou Y, Liang J T, Zhang L. Optimum composition calculation for multicomponent cryogenic mixture used in Joule-Thomson refrigerators [J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 2000, **45**: 283-290.
- [8] Gong M Q, Wu J F, Luo E C. Performance of the mixed gases Joule-Thomson refrigeration cycles for cooling fixed temperature heat loads [J]. *Cryogenics*, 2004, **44**: 847-857.
- [9] Remelje C W, Hoadley A F A. An exergy analysis of small-scale liquefied natural gas (LNG) liquefaction processes [J]. *Energy*, 2006, **31**: 2005-2019.
- [10] Arkharov A M, Arkharov I A. Analysis of existing small-capacity plants for natural-gas liquefaction [J]. *Chem. Petro. En.*, 2010, **46** (7/8): 397-416.
- [11] Cao W S, Lu X S, Lin W S, Gu A Z. Parameter comparison of two small-scale natural gas liquefaction processes in skid-mounted packages [J]. *App. Therm. En.*, 2006, **26**: 898-904.
- [12] Wilding B M, Bingham D N, McKellar M G, *et al.* Apparatus for the liquefaction of natural gas and methods relating to same [P]: US, 7219512. 2007-5-22.
- [13] Xu Wenyuan (徐文渊). Small scale liquefied natural gas production plant [J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas* (石油与天然气化工), 2005, **34** (3): 161-164.
- [14] Foglietta J H. New LNG process scheme//Proceedings of the Annual Convention-gas Processors Association [C]. Gas Processors Association, 1999: 281-286.
- [15] Foglietta J. Production of LNG using dual independent expander refrigeration cycles//AIChE Spring Meeting 2002 [C]. New Orleans, March 2002, 2002.
- [16] Kryopak Inc. LNG Process [EB/OL]. [2013.07.28] <http://www.kryopak.com>
- [17] Kountz K, Kriha K, Liss W, *et al.* Development of a Small-Scale Natural Gas Liquefier. Final report GTI project 65943 [R]. Gas Technology Institute, 2003.
- [18] Neksa P, Brendeng E. Small scale natural gas liquefaction plants//Proceedings of international congress of refrigeration [C]. Beijing China, paper ID ICR07-A2-1248, 2007.
- [19] Neksa P, Brendeng E, Drescher M, Norberg B. Development and analysis of a natural gas reliquefaction plant for small gas carriers [J]. *J. Nat. Gas Sc. En.*, 2010, **2**: 143-149.
- [20] Huang Zhiguang (黄志光), Wang Rongshun (汪荣顺), Shi Yumei (石玉美), Gu Anzhong (顾安忠). Review of mini-natural gas liquefier [J]. *Cryogenics* (低温工程), 2002, **6**: 59-62.
- [21] Zhao Zhejun (赵哲军), Yang Yi (杨逸), Zhao Shouming (赵守明). Feasibility study on small LNG skid-mounted technology in China [J]. *Natural Gas Technology and Economy* (天然气技术与经济), 2012, (3): 62-63.
- [22] Zhang Aimin (张爱民), Chen Guangming (陈光明), Wang Qin (王勤). Experimental study on a small-scale liquefied natural gas apparatus [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science* (浙江大学学报: 工学版), 2008, **42** (11): 1973-1976.
- [23] Wang Xiangzeng (王香增). Natural gas liquefaction technology and its applications [J]. *Chemical Engineering Oil & Gas* (石油与天然气化工), 2004, **33** (2): 91-92.
- [24] Li Kanglin (李康林). Researches and practices of a small-scale liquefied natural gas apparatus [J]. *China Petroleum*

- and Chemical Standard and Quality (中国石油和化工标准与质量), 2012, (9): 100-101.
- [25] http://www.gashome.cn/news/member_news/2015-04-01/22125.html.
- [26] <http://www.jereh.com/>.
- [27] TIPC. The 1st China LNG Expo [R]. 2015.
- [28] Gong M Q, Wu J F, Sun Z H, *et al.* Development and performance test of a small trailer-mounted moveable natural gas liquefier [J]. *Energy Conversation and Management*, 2012, **57**: 148-153.
- [29] <http://www.hrbhc.com> [OL].
- [30] Hamworthy Gas Systems, 2006, Small Scale & Mini LNG Liquefaction System [OL]. <http://www.hamworthy.com/products/products.asp?strareano=27>.
- [31] Begazo C, *et al.* Hydrocarbon World [R]. 2007: 28-33.
- [32] Sichuan Air Separation Group Co. Ltd. Sichuan Air Separation Natural Gas Engineering Co. Ltd. Zhangjiakou 1M Nm³/d natural gas liquefaction device construction and operation summarize//2014 Middle & Small Scale LNG Conference [C]. 2014.
- [33] China Huanqiu Contracting & Engineering Corp. The 1st China LNG Expo [R]. 2015.