

LNG 装置冷箱中混合冷剂偏流处理方案探讨

孙 博¹ 宋俊平² 刘振华¹ 任 伟³

1. 昆仑能源有限公司生产运行部, 北京 100028;

2. 华油天然气广元有限公司 LNG 工厂, 四川 广元 628002;

3. 辽河油田能源管理公司, 辽宁 盘锦 124010

摘 要:冷箱作为 LNG 工厂液化工序中的核心设备,其运行状态直接关系到整个液化装置的安全平稳运转。介绍了采用混合冷剂制冷工艺的天然氣液化装置在开车过程中发生的冷箱冷剂偏流问题,对冷箱在低生产负荷下发生冷剂偏流的原因进行了系统分析,提出了在保持生产基本平稳的情况下迅速有效处理冷箱冷剂偏流、保障设备健康运行的措施和建议,并在实际生产过程中得到了有效验证,对类似采用混合冷剂制冷工艺的 LNG 工厂液化装置的开车和运行具有指导意义。

关键词:LNG;冷箱;混合冷剂制冷工艺;冷剂偏流

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2015.06.007

0 前言

液化天然气(简称 LNG)作为一种优质、清洁能源,对于改善城市空气质量、节能减排具有重要意义^[1-3]。近年来,随着我国清洁能源需求的增加以及环保要求的日益严格,LNG 行业得到了迅速发展^[4-5],目前 LNG 已广泛应用于重型卡车和城市公交。据昆仑能源公司统计,截至 2014 年 10 月,我国投产 LNG 工厂数量为 111 座,产能达到 $5\,982 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ($1\,560 \times 10^4 \text{ t/a}$),较 2013 年增长 $2\,164 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,同比增长速度为 57%。

我国 LNG 工厂呈现出分布广、规模小的特点,近年来新投产工厂有向大型化发展的趋势^[5]。国内的 LNG 液化装置普遍采用混合冷剂制冷工艺,天然氣液化用的主低温换热器多采用内置铝扳翅式换热器的冷箱。由于受真空钎焊炉的限制,单个铝扳翅式换热器尺寸和处理量较小,在 LNG 工厂规模增大后需在冷箱中采用多个铝扳翅式换热器并联。由于工程实践中难以做到并联的铝扳翅式换热器及附属管路设施的阻力降相同,由此引发偏流问题,轻者导致工厂停产,重者出现安全事故^[6]。本文通过某 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ LNG 工厂开车过程中冷箱混合冷剂偏流的实际案例,提出了 LNG 液化装置

防止冷箱混合冷剂偏流的操作调整方案,对类似采用混合冷剂制冷工艺的 LNG 工厂开车和运行具有重要参考意义。

1 工艺简介

某 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ LNG 工厂的液化装置采用 PRICO®混合冷剂制冷工艺技术,由美国 B&V 公司提供专利授权^[7]。工厂液化单元的主低温换热器采用冷箱,内装有两个并联的铝扳翅式换热器,由日本神户制钢公司供货。冷箱的天然氣处理量为 $4.17 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$,最大冷剂流量为 $154\,104 \text{ kg/h}$ 。冷箱由 A、B 两个扳翅式换热器并联组成,天然氣分两路分别进入 A、B 两个扳翅式换热器。在扳翅式换热器的上部对原料天然氣进行预冷,预冷温度为 $-63\text{ }^\circ\text{C}$,预冷后经过分离重烃的天然氣进入扳翅式换热器的下部,被冷凝和过冷至 $-156\text{ }^\circ\text{C}$ 后经 J-T 阀节流送至 LNG 储罐。

该装置制冷系统的制冷剂组成为 N_2 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_3H_8 、 C_5H_{12} ,制冷剂经压缩机增压并冷却后呈气液两相,由分离罐分离后分别送至冷箱顶部,由冷箱内汇管混合并分配后分别送至 A、B 两个扳翅式换热器,在扳翅式

换热器中被冷却至 $-156\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后经过 J-T 阀节流,为自身及天然气的冷却提供冷量^[8-11],冷箱流程示意图见图 1。

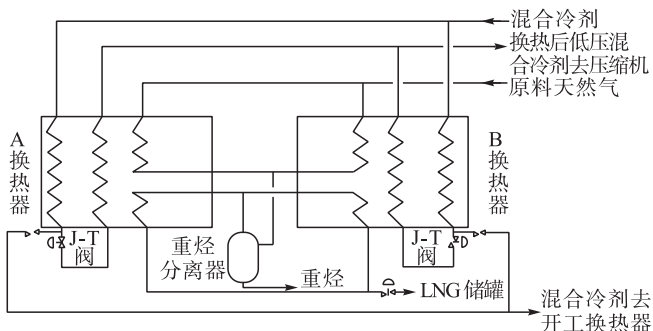


图 1 冷箱流程示意图

2 混合冷剂偏流情况

该 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ LNG 工厂的液化装置于 2014 年 6 月 14 日投产开车,原料气进气量 $1.25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$,初始生产负荷 30 %。天然气净化处理合格,混合制冷剂系统建立正常循环后,冷箱进行降温。按照相关操作规程,冷箱由 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降温至 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 过程中,只进气相冷剂,J-T 阀开度约为 30 %,降温速率为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。当冷箱内温度达到 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$,并观察不再下降时,引液相冷剂进入冷箱。为了保护装置,应保证冷箱降温速率低于 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。投料试车阶段的气相冷剂流量为 $15\,000\text{ kg}/\text{h}$,为正常设计值的 10 %;液相冷剂流量为 $10\,000\text{ kg}/\text{h}$,为正常设计值的 14 %。

实际操作中发现,初始阶段只通入气相冷剂时,冷箱内 A 换热器温度由 25 ℃ 逐渐降至 -40 ℃,B 换热器温度由 27 ℃ 逐渐降至 -39.5 ℃,两换热器降温速率均小于 0.5 ℃ /min,且两换热器最终温度相差不大。当引入液相冷剂后,冷箱 A 换热器降温较快,降温速率约为 0.5 ℃ /min,而 B 换热器降温较慢,降温速率约为 0.25 ℃ /min。开车 6 h 后,A 换热器底部温度已降至 -147.7 ℃,此时 J-T 阀开度为 57 %;B 换热器底部温度为 -77.5 ℃,J-T 阀开度为 62 %,冷箱两换热器温差达到 70 ℃。当发现 A、B 换热器温差较大时,操作人员尝试增加 B 换热器 J-T 阀开度和液相冷剂调节阀开度,当 B 换热器 J-T 阀开度开至大于 A 换热器 J-T 开度的 5 % 时,液相冷剂调节阀的开度相同,但两者流量相差 2 000 kg /h,B 换热器温度仍未下降。此时判断为液相冷剂在冷箱 A、B 换热器之间分配不均,出现偏流现象。

3 混合冷剂偏流原因分析

冷箱混合冷剂偏流发生在 LNG 装置投料试车初期, 工厂运行负荷较低, 仅为正常设计工况负荷的 30 %, 冷箱中液相冷剂流量为设计值的 14 %。由于此时液相冷

剂流量较小,液相制冷剂流体很容易受到冷箱内流道阻力降的影响,进而在不同换热器之间发生偏流^[8],造成冷箱两换热器之间液相制冷剂的分配偏离设计值,液相制冷剂进入量较高的换热器得到更多冷量,降温速率较大,而液相制冷剂进入量较小的换热器获得冷量较少,降温速率较小。如果没能及时发现两换热器温度变化的异常,换热器之间的温差会迅速增大,出现预冷段换热器温度过低而深冷段换热器温度无法降低至设定值的情况,危害设备安全和装置的平稳运行^[12-16]。

4 混合冷剂偏流处理措施

针对冷箱混合冷剂偏流的实际情况,提出了如下处理措施:

1) 根据冷箱 A、B 两换热器温度, 逐渐减小冷箱 A 换热器 J-T 阀和液相冷剂调节阀开度, 维持 A 换热器温度稳定, 增加 B 换热器 J-T 阀和液相冷剂调节阀开度, 使 B 换热器逐渐降温。

2) 如果冷箱 B 换热器降温很快,应及时减小 B 换热器 J-T 阀和液相冷剂调节阀开度,否则会出现冷箱 B 换热器温度降低,A 换热器温度升高,两换热器温差为 B 换热器低于 A 换热器的偏流。

3) 增大开工换热器的冷剂量, 从而提高混合冷剂总循环量, 但要注意密切监视冷箱温度变化。

4)在工艺和设备条件允许的情况下,尽可能缩短冷箱低负荷停留时间,使冷剂循环量迅速提高。

5 结论

近年我国 LNG 工业发展迅速, LNG 工厂生产中暴露的问题也日益凸显, 开工工况下冷箱混合冷剂偏流是其中一个突出问题。建议主要应对措施如下:

1)在冷箱的制造、安装过程中,两路液相流体管线应尽量对称布置。

2) 日常运行操作中应加强监测和调节,保持两路流量一致,在观察到冷箱两换热器温差增大时,及早调节冷剂管路 J-T 阀开度,遏制偏流趋势发展。

3) 由于混合冷剂偏流一般发生在装置运行负荷较低或者运行负荷波动比较剧烈的情况下,此时冷箱内流道阻力降对于混合冷剂流体的运动影响较大,混合冷剂容易在两换热器之间分配不均。因此,在工厂日常运行管理中要注意保持装置运行的稳定性和连续性,避免生产负荷剧烈波动,维持设备平稳运转。

参考文献:

[1] 钱伯章,朱建芳.世界液化天然气的现状及展望[J].天然

- 气与石油, 2008, 26(4): 34-38.
- Qian Bozhang, Zhu Jianfang. Present Situation of LNG in the World and Its Prospect[J]. Natural Gas and Oil, 2008, 26(4): 34-38.
- [2] 石玉美, 顾安忠, 汪荣顺, 等. 无回热混合制冷剂循环(MRC)液化天然气流程的系统模拟[J]. 低温与超导, 2000, 28(1): 45-50.
- Shi Yumei, Gu Anzhong, Wang Rongshun, et al. The Simulation of No Turn Round Heat Exchange Mixed Refrigerant Cycle to Liquefy the Natural Gas[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2000, 28(1): 45-50.
- [3] 石玉美, 顾安忠, 汪荣顺, 等. 混合制冷剂循环(MRC)液化天然气流程的设备模拟[J]. 低温与超导, 2000, 28(2): 41-46.
- Shi Yumei, Gu Anzhong, Wang Rongshun, et al. The Simulation of Equipment Module in the Mixed Refrigerant Cycle to Liquefy the Natural Gas[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2000, 28(2): 41-46.
- [4] 邢云. 中海油LNG产业链的形成及发展[J]. 天然气工业, 2010, 30(7): 103-106.
- Xing Yun. Shaping and Development of an LNG Industry Chain in CNOOC[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(7): 103-106.
- [5] 郭海燕, 张炜森. 珠海LNG装置技术分析与运行情况[J]. 石油与天然气化工, 2012, 41(1): 43-47.
- Guo Haiyan, Zhang Weisen. Technical Analysis and Operation Situation of Zhuhai LNG Plant[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2012, 41(1): 43-47.
- [6] 顾安忠. 液化天然气技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- Gu Anzhong. LNG Technical Manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [7] 张炜森. PRICO液化工艺在珠海LNG装置中的应用[J]. 上海煤气, 2011, (3): 5-6.
- Zhang Weisen. Application of the PRICO Liquefaction Technology in the LNG Equipment in Zhuhai[J]. Shanghai Gas, 2011, (3): 5-6.
- [8] 谭建宇, 李红艳, 王莉, 等. 小型天然气液化装置工艺流程数值模拟和优化[J]. 天然气工业, 2005, 25(5): 112-114.
- Tan Jianyu, Li Hongyan, Wang Li, et al. Numerical Simulation and Optimization of Process Flows for Small Gas Liquefaction Plants[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(5): 112-114.
- [9] 王坤, 徐风雨, 李红艳, 等. 小型MRC天然气液化装置中板翅式换热器动态特性仿真研究[J]. 低温工程, 2007, (3): 44-49.
- Wang Kun, Xu Fengyu, Li Hongyan, et al. Dynamic Performance Simulation of Plate-fin Heat Exchangers in Small Scale MRC-LNG Plant[J]. Cryogenics, 2007, (3): 44-49.
- [10] 徐正斌, 王世清, 乔志刚. LNG凝液回收技术经济浅析[J]. 天然气工业, 2005, 25(10): 133-135.
- Xu Zhengbin, Wang Shiqing, Qiao Zhigang. Economic Analysis of LNG Condensate Recovery Techniques[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(10): 133-135.
- [11] 王遇冬. 天然气处理原理及工艺[M]. 2版. 北京: 中国石油出版社, 2011: 223-224.
- Wang Yudong. Natural Gas Processing Theory and Technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Petroleum Press, 2011: 223-224.
- [12] 高芳, 陈阳, 张振鹏. 低温液体推进剂充填管路的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2007, 22(1): 108-113.
- Gao Fang, Chen Yang, Zhang Zhenpeng. Numerical Simulation of Filling Pipe of Cryogenic Liquid Propellant[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(1): 108-113.
- [13] 徐益峰, 蔡祖恢. 平行流多流体板翅式换热器的动态数学模型[J]. 化工学报, 1998, 49(6): 721-727.
- Xu Yifeng, Cai Zuhui. Dynamic Mathematical Model of Multi-fluid Plate-fin Heat Exchangers[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 1998, 49(6): 721-727.
- [14] 刘盛鹏. 广安LNG装置冷箱积液处理[J]. 石油与天然气化工, 2013, 42(2): 154-155.
- Liu Shengpeng. Treatment of Cold-box Abnormal Liquid-flooding Phenomenon in Guang'an LNG Plant[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2013, 42(2): 154-155.
- [15] 王世杰, 薛维海, 孙开友, 等. 天然气深冷冷箱存在问题分析[J]. 油田节能, 2003, 14(2): 33-35.
- Wang Shijie, Xue Weihai, Sun Kaiyou, et al. Analysis of Problems Existed in Natural Gas Cryogenic Box[J]. Energy Conservation of Oil Fields, 2003, 14(2): 33-35.
- [16] 王治红, 吴明鸥, 王小强, 等. 富含CO₂天然气低温分离防冻堵工艺研究[J]. 天然气与石油, 2012, 30(4): 26-29.
- Wang Zhihong, Wu Ming'ou, Wang Xiaoqiang, et al. Study on Technology for Preventing Ice Plug in Low Temperature Separation of Natural Gas Containing Rich CO₂[J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(4): 26-29.