

LNG 工艺中压缩机的选型研究

李莹珂 蒲黎明 祁亚玲 王科 姜宁

中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司, 四川 成都 610041

摘要: 我国已经进入 LNG 行业快速发展的时期, 压缩机是 LNG 处理过程中最核心的转动设备。综述了 LNG 液化厂中原料气、分子筛脱水装置的再生气、天然气液化制冷剂 and BOG 增压过程中工艺的要求和介质的特点, 根据常用压缩机的特性和适用范围, 提出 LNG 工艺中压缩机选型原则与方法。同时提出了 LNG 处理过程中压缩机驱动方式的选择原则和冷却方式的选择方法, 为 LNG 工厂中压缩机及配套的驱动和冷却方式的合理选型提供了参考依据。

关键词: LNG; 离心式压缩机; 往复式压缩机; 螺杆式压缩机; 电动机; 燃气轮机; 蒸汽轮机
DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2014.05.007

0 前言

LNG 生产是天然气发展领域的一场革命, LNG 相对于成品油和 CNG, 具有更加安全清洁、便于运输使用等特点。通过 LNG 的开发及引进, 实施 LNG 替代石油, 既有利于缓解国内大中城市的空气污染, 又能够获得更好的经济回报, 有利于能源供应方式的多元化, 提高天然气的利用程度, 从更广的领域加快能源结构的优化和调整, 保障国家能源安全^[1-7]。我国已经进入 LNG 快速发展的时期, 截止 2013 年 12 月已经建成湖北 500×10⁴ m³/d (120×10⁴ t/a)、哈纳斯 300×10⁴ m³/d、泰安 260×10⁴ m³/d、延长 50×10⁴ m³/d、安塞 200×10⁴ m³/d、广安 100×10⁴ m³/d 等 80 多座 LNG 工厂。建成投产广东大鹏、福建莆田、上海海洋山港、江苏如东、大连新港、河北唐山、天津浮式等多个 LNG 接收站, 浙江宁波、山东青岛、广东珠海等 LNG 接收站正在建设中, 预计到 2015 年中国东南沿海将建成 LNG 接收站 10 多个, 总接收能力将超过 4 500×10⁴ t/a (约合 600×10⁸ m³/a)^[1-7]。压缩机是 LNG 液化厂和接收站工程的核心转动设备, 主要用于 LNG 液化厂中原料气、分子筛脱水装置的再生气、天然气液化制冷剂和闪蒸气(BOG), 以及接收站中 BOG 增压过程。因此, 在 LNG 工厂中选择合适的压缩机及压缩机的驱动方式、冷却方式非常重要。

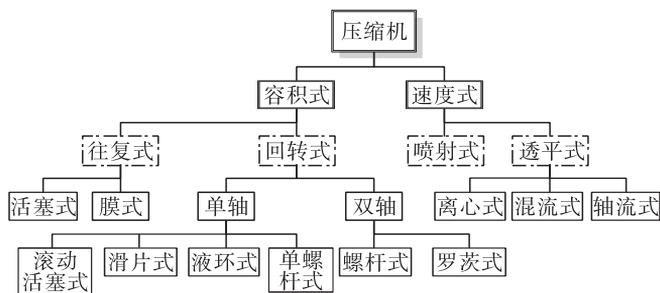


图 1 压缩机的基本型式

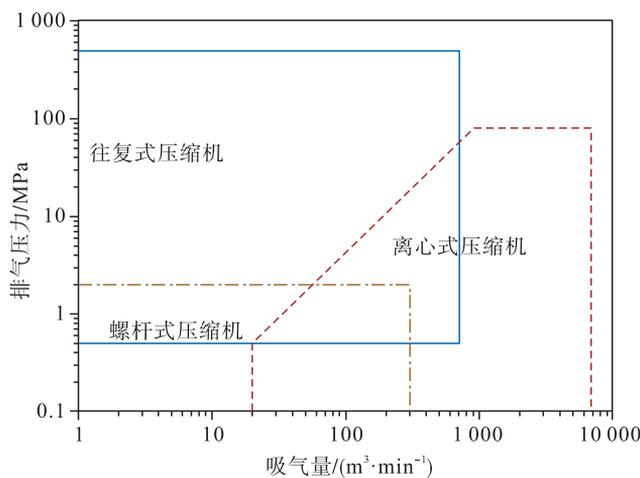


图 2 压缩机的适用范围

收稿日期:2014-04-31

基金项目:中国石油天然气股份公司重大科技专项“350万吨/年天然气液化关键技术与装备国产化研究”(2009-1805 E)

作者简介:李莹珂(1982-),女,河南洛阳人,工程师,硕士,主要从事天然气净化、LNG工厂工艺设计工作。

1 压缩机类型及适用范围

压缩机种类繁多,按作用原理可分为容积式和速度式两大类,具体分类见图1。由于不同类型的压缩机特点不同,适用于不同的生产条件。在LNG液化工厂和接收站中主要采用往复式压缩机、离心式压缩机和螺杆式压缩机。这三种压缩机在石油、天然气加工、制冷等领域中占非常重要的地位,其适用范围见图2^[8]。

2 LNG处理过程中常用压缩机选型原则

LNG处理过程中常用的三种压缩机优缺点见表1,LNG处理常见工艺中压缩机的选型原则如下:

a) 判断气体的组成与洁净度。在气体中硫含量和水

表1 LNG处理过程中常用的三种压缩机特点

型式	优点	缺点
离心式压缩机	单机处理量大;结构简单,制造方便,尺寸小,重量轻;运行可靠性高,维修工作量小;气体不与润滑油接触,可适应任何气体;转速高,可直接用于工业汽轮机或燃气、烟气轮机驱动;噪音较小。	流量小时制造有困难;排气压力大于20 MPa时制造有困难;排气压力会随流量改变而改变;价格高;不耐杂质与液滴;低流量有喘振问题,多台并机操作困难,对变工况适应能力较差。
往复式压缩机	排气压力高,目前工业可达320 MPa;排气压力稳定,不受气量调节的影响;可实现小气量、高压;价格较低较能忍受一定的杂质与液滴,操作简易,可多台并机运行,对变工况适应能力较强。	单机能处理的气量较小,目前可达800 m ³ /min;结构复杂制造麻烦,转速低,体积庞大,重量大;噪音大,可靠性低,维修工作量大;转速低,大型机仅300~500 r/min,一般用低速电机直接驱动,若用工业涡轮机驱动时需要通过复杂减速机构。
螺杆式压缩机	结构简单,制造方便、可靠性高、尺寸较小、重量较轻;比较能耐气体中的杂质、油、水等;单机排量可达800 m ³ /min;对气体适应性强;噪音小。	能达到的压力低,一般小于2.5 MPa;国外神户制钢、曼透平可达10 MPa,但制造困难,价格相当昂贵。

3 LNG处理过程中压缩机选型

基于上述选型原则,LNG处理常见工艺中压缩机的选型结果如下。

3.1 原料气增压和输送

LNG工厂的原料气来源有管输气,也有气田气、煤制气、煤层气等。当原料气需要增压后输送或者由于原料气压力较低,需要增压至适宜液化的压力时,则需设置原料气增压压缩机。原料气压缩机选择需考虑的主要因素是原料气介质情况。若原料气为管道气或煤制气,介质洁净度较高,输气量大且稳定,一般选择离心式压缩机。若原料气为气田气、煤层气,介质较脏需要输送至预处理系进行净化,且气田气的处理气量变化较大,离心机的适应能力差则需要选择往复式压缩机^[9]。

3.2 分子筛再生气增压

LNG工厂的原料气预处理部分中,分子筛脱水装置的再生气压缩机由于再生气量一般较小,气压比较小,在常用的两塔脱水工艺中,再生气量不连续,且需要再生气量回流来保证压缩机的连续运转,因此再生气压缩机一般选择往复式压缩机。目前,国内天然气轻烃回收

含量较高、含有固体颗粒时采用往复式压缩机或螺杆式压缩机,因为离心式压缩机对介质洁净度要求较高;

b) 考虑气体流量的变化。若气量稳定,则可以考虑离心机,若气量变化较大,考虑选择往复式压缩机或螺杆式压缩机。

c) 考虑压缩比。出口压力高于2.5 MPa,采用往复式压缩机或离心式压缩机。

d) 考虑投资成本。压缩机型式选定以后,需要结合整体工艺流程来确定压缩机数量。离心式压缩机由于可靠性与稳定性较高,一般不需要考虑备机。螺杆式压缩机机稳定性也较好,应用于制冷系统时一般不考虑备机。往复式压缩机可靠性低,维修量大,必须考虑备机。

工厂的再生气压缩机已有采用高速旋转离心式压缩机先例,但该类压缩机为进口产品,可供选择厂家少、应用业绩少。

3.3 制冷剂压缩机

液化装置是LNG工厂的核心,制冷剂压缩机是液化装置的关键设备。同时制冷剂一般由一种或几种组分构成,组成相对简单,洁净度高且流量稳定,因此制冷剂压缩机可按照压缩机功率划分来选型。大型液化装置制冷剂压缩机功率较大($N > 5\,000$ kW),选择离心式压缩机。中型液化装置的制冷剂压缩机($1\,500$ kW $< N < 5\,000$ kW)可以选择低温往复式压缩机(卧式或者立式迷宫型压缩机)。小型的制冷系统($N < 1\,500$ kW)可选择螺杆式低温压缩机。

3.4 闪蒸气(BOG)压缩机

在天然气液化节流、LNG储存以及装卸等过程中均会产生BOG,BOG具有低压、低温以及气量波动大的特点。在BOG压缩机的设计选型中需要充分考虑其特点,进行多方案对比^[10]。

LNG工厂BOG压缩机的选型需结合工厂规模和建设水平进行,根据BOG是否加热以及加热的程度可分

为超低温(如 $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$)、低温(如 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$)以及常温(如 $0\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)运行方案。BOG 温度越高,能耗越高,相应的压缩机投资越低。由于我国超低温闪蒸汽压缩机技术尚处于开发阶段,仅个别厂家有少量业绩,而进口超低温卧式往复压缩机和立式迷宫式压缩机价格高、生产工期长,国内大量 LNG 工厂采用低温以及常温运行方案。采用低温和常温方案,排气压力较低时适宜选择螺杆式压缩机,通过滑阀实现压缩机 $10\%\sim 100\%$ 的负荷调节,适应 BOG 气量波动大的特点,且无需设置备机;排气压力较高时受到螺杆压缩机排气压力的限制,多采用往复式压缩机。

LNG 接收站一般需设置 2 台及以上压缩机,便于 LNG 卸船时多机运行,非卸船工况时单机运行,通常不对 BOG 进行加热,有超低温(如 $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$)卧式往复压缩机以及立式迷宫式压缩机供选择,两种机型均有成熟业绩。

4 驱动机的选择

LNG 工艺中再生气压缩机、BOG 压缩机及小型的制冷剂压缩机功率较小,可选择使用电动机或者燃气发动机驱动,且以电动机居多。在大型 LNG 工厂中,原料气压缩机与制冷剂压缩机往往功率较大,其压缩机的驱动方式有燃气轮机、蒸汽轮机、电动机三种可供选择^[11-13]。

燃气轮机是采用天然气为燃料的驱动机,其燃料来源较为便利。自 20 世纪 70 年代以来,燃气轮机广泛用作基地型 LNG 工厂的驱动机,国内鄯善、广汇以及海南 LNG 工厂均有采用。燃气轮机排气温度很高,热能损失很大,存在着能源整体效率较低、运行可靠性差的不足。同时燃气轮机的效率对负荷的变化非常敏感,当负荷低于额定负荷的 70% 时,燃气轮机的效率显著降低。另外燃气轮机的检修周期间隔较短,检修费用高。相对于其他驱动方式,燃气轮机的设计制造技术复杂,定型和完善的周期长,目前各主要燃气轮机制造厂商的产品均是按标准开发的,不能提供与压缩机轴功率紧密配合的非标燃气轮机,因此在选择燃气轮机做驱动设备时需要进行压缩机匹配性研究。

工业汽轮机利用蒸汽作为驱动来源,汽轮机具有转速高、功率大、经济性好、性能优良的优点,20 世纪 60~80 年代时已在基本负荷型 LNG 工程中普遍用于制冷剂压缩机的驱动机。相对于燃气轮机制造技术复杂,产品系列标准化的特点,蒸汽轮机的部件通用化和标准化程度高,设计和制造成本低,生产周期短,且汽轮机型号多样化,可以根据压缩机轴功率的需求进行设计,使压缩机与汽轮机的配合达到最优化。由于汽轮机效率较低,且 LNG 工厂中一般缺乏蒸汽来源,限制了汽轮机在缺乏淡

水的 LNG 工厂中的应用。

采用电动机驱动的特点是设备简单、可靠、易于维修;无固定大修期,可频繁启动、噪音低、无灰尘、无粉尘污染;在轻载状态下消耗很低;一次投资较低,使用寿命长,安装维修费用低。但在 LNG 工厂中,大型电动机的启动往往需要增加变频器(或液力耦合),大型变频器+电动机需要大容量电厂的配合,还需要较多的大功率输电线路、输配电等设备,系统复杂。

因此,LNG 工厂中大功率的制冷剂压缩机驱动方式的选择需要对外界条件、经济投资等因素进行综合考虑后才能确定。

5 压缩机冷却方式的选择

压缩机冷却方式主要有风冷、水冷、风冷+水冷、水冷+水冷四种方式。风冷主要是空气通过空气冷却器带走热量,主要用于年平均气温低于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的地区以及无水或缺水地区,冷却后的气体温度高于环境温度 $10\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$,但是不适用于温度较高的湿热地区,同时空冷装置占地较大。水冷主要采用循环水经水冷却器换热带走热量,冷却后的介质温度一般高于循环水进水温度 $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷却效果好,但用水量较大,需要设置循环水冷却塔设备且定期清理。风冷+水冷也称混冷方式,即水冷却器系统中的水封闭循环,冷却后的热水再由空气通过空气冷却器带走热量。LNG 工厂中,分子筛再生气压缩机、BOG 压缩机、原料气压缩机等对冷却后的温度要求不高,一般优先考虑风冷(湿热地区除外),达到节能目的。

制冷剂压缩机冷却方式的选择需要根据制冷剂的凝点来确定。制冷剂循环是压缩、冷凝、节流、蒸发、压缩的循环过程。制冷剂气体经压缩后需在出口压力下冷却冷凝,对于采用空冷方式的环境温度较高地区,在相同条件下与水冷方式相比,制冷剂只有在更高的压缩机出口压力下才会冷凝,导致制冷剂压缩机功率增大。因此有混合制冷剂压缩机采用先空冷,后水冷方式将制冷剂气体冷凝,其目的是为更好地节约循环用水量。

6 结论

LNG 处理过程中需要综合考虑工艺、介质、环境与投资等因素来确定压缩机的型式、驱动方式与冷却方式等。选型往往抓住主要矛盾,根据技术、成本、可靠性、能耗等方面选择一个较优、更适合工艺流程的压缩机。本文基于往复式压缩机、离心式压缩机和螺杆式压缩机的特性和适用范围,通过分析 LNG 液化工厂中的原料气、分子筛脱水装置的再生气、天然气液化制冷剂 and BOG 的增压过程中工艺要求和介质特点,提出 LNG 工艺中压缩机选型原则与方法。基于以上压缩机选型结果,结合燃

气轮机、蒸汽轮机和电动机三种压缩机驱动方式的特点,以及地理环境对压缩机冷却方式的影响,提出了LNG处理过程中压缩机驱动方式的选择原则和冷却方式的选择方法,为LNG工厂中压缩机及其驱动方式和冷却方式的合理选型提供了原则和方法。

参考文献:

- [1] 顾安忠. 液化天然气技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004. 437-465.
Gu Anzhong. Liquefied Natural Gas (LNG) Technology[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2004. 437-465.
- [2] 王海博, 孙文字, 单卫国. 2013年中国天然气市场年中回顾与展望[J]. 国际石油经济, 2013, 21(10): 92-95.
Wang Haibo, Sun Wenyu, Shan Weiguo. Retrospect and Prospect of China's Natural Gas Market in 2013 [J]. International Petroleum Economics, 2013, 21(10): 92-95.
- [3] 贺静, 钱伯章. 石油消费持续低迷 能源市场变化加剧—BP公司2013年世界能源统计综述[J]. 中国石油和化工经济分析, 2013, (8): 27-34.
He Jing, Qian Bozhang. BP Statistical Review of World Energy Company 2013—Oil Consumption Downturn Exacerbated by Changes in the Energy Market [J]. China Petroleum and Chemical Industry Economic Analysis, 2013, (8): 27-34.
- [4] 李兵, 程香军, 陈功剑. LNG接收站BOG处理技术优化[J]. 天然气与石油, 2012, 30(5): 27-30.
Li Bing, Cheng Xiangjun, Chen Gongjian. Optimization of BOG Treatment Process in LNG Terminal [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(5): 27-30.
- [5] 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 and Prospect of LNG in the World [J]. Natural Gas and Oil, 2008, 26(4): 34-38.
- [6] 陈贻良. 天然气液化流程的发展及其有效能分析 [J]. 天然气与石油, 2013, 31(1): 27-32.
Chen Gengliang. Development and Available Energy Analysis of Natural Gas Liquefaction Process [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31(1): 27-32.
- [7] 夏丹, 郑云萍, 李剑峰, 等. 浮式液化天然气技术综述[J]. 天然气与石油, 2013, 31(3): 9-13.
Xia Dan, Zheng Yunping, Li Jianfeng. et al. Review on floating LNG Production Facility Technology [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31(3): 9-32.
- [8] 郁永章. 压缩机工程手册[M]. 北京: 中国石化出版社, 2012. 34-45.
Yu Yongzhang. Compressor Engineering Handbook [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2012. 34-45.
- [9] 宣建寅, 王银亮, 祖丙河, 等. 天然气增压压缩机组的选择[J]. 油气田地面工程, 2004, 23(10): 34-35.
Xuan Jianyin, Wang Yinliang, Zu Bingke. Selection of Natural Gas Booster Compressors [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2004, 23(10): 34-35.
- [10] 叶忠志, 张园星. 液化天然气BOG压缩机选型分析[J]. 石油和化工设备, 2013, 16(3): 61-63.
Ye Zhongzhi, Zhang Yuanxing. Selection of LNG BOG compressor [J]. Petroleum and Chemical Equipment, 2013, 16(3): 61-63.
- [11] 宋昕海. 工业汽轮机作为天然气液化工厂制冷压缩机驱动设备的评述[J]. 化学工程与装备, 2011, (12): 166-167.
Song Xinhai. Review of Steam Turbine as a Driven Equipment of Refrigeration Compressor in LNG Plant [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2011, (12): 166-167.
- [12] 宋昕海, 蔡宪和. 燃气轮机作为天然气液化工厂制冷压缩机驱动设备的评述[J]. 化学工程与装备, 2012, (1): 122-123.
Song Xinhai, Cai Xianhe. Review of Gas turbine as a Driven Equipment of Refrigeration Compressor in LNG Plant [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2012, (1): 122-123.
- [13] 宋昕海, 蔡宪和. 变频电动机作为天然气液化工厂制冷压缩机驱动设备的评述[J]. 化学工程与装备, 2012, (2): 123-124.
Song Xinhai, Cai Xianhe. Review of Frequency Motor as a Driven Equipment of Refrigeration Compressor in LNG Plant [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2012, (2): 123-124.