

液化天然气接收站气化器自主研制与工业化研究

黄宇*, 陈海平, 宋坤

(中海石油气电集团有限责任公司, 北京 100028)

摘要: LNG 气化器是 LNG 接收站中除 LNG 储罐外单体投资最大、最重要的设备, 对项目的安全生产起到关键作用, 长期受制于国外公司, 开展国内自主化成为当务之急。以大型 LNG 气化器为例, 总结 LNG 装备自主化的技术路线与研究经验, 为后续 LNG 设备或其他行业设备自主化项目提供参考。

关键词: 开架式气化器; 中间介质气化器; 自主研制; 工业应用

中图分类号: TE978; TQ053.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2018)02-0173-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.02.041

China's independent development and industrialization of vaporizer in LNG terminal

HUANG Yu*, CHEN Hai-ping, SONG Kun

(CNOOC Gas & Power Group, Beijing 100028, China)

Abstract: LNG vaporizer is the second most important equipment with the second largest investment in LNG terminal, only next to LNG storage tank. It plays a key role in the safety production. The manufacture technology for LNG vaporizer has been subjected to foreign companies for a long time and it is necessary to develop China's independent technology. Taking large LNG vaporizer as example, this paper summarizes China's technical routines and research experiences for independent development of LNG equipment, and also provides references for China's independent development projects of subsequent LNG equipment or other industrial equipment.

Key words: open rack vaporizer (ORV); intermediate fluid vaporizer (IFV); independent development; industrial application

随着国内液化天然气 (liquefied natural gas, LNG) 产业链日趋完整, 超低温技术领域逐步成熟。因 LNG 领域的局限性, 国内引入 LNG 接收站之初, 大型装备与技术均由国外公司垄断, 采购谈判地位被动, 项目投资控制难度大。面对“天价”进口设备, 国内 LNG 相关投资企业、制造企业陆续开始通过技术改造、产学研合作等方式, 开展 LNG 装备自主化, 攻坚克难, 打破国外技术垄断。

中海石油气电集团有限责任公司 (以下简称“气电集团”) 作为国内主要的 LNG 项目投资单位, 率先在国内开展 LNG 装备自主化研制工作, 先后在 LNG 全容储罐、开架式气化器 (ORV)、中间介质气化器 (IFV)、LNG 潜液泵、槽车装车橇、防爆旋臂起重机等重大关键设备取得自主化技术突破, 实现市场应用推广。开架式气化器和中间介质气化器是 LNG 关键设备自主化项目的重中之重, 作为 LNG 接收站中的基本负荷型气化器, 国际上被日本企业垄断 (神户制钢 KOBELCO 和住友 SUMITOMO), 设备贸易易受国际局势变化的影响, 存在设备报价不合理、价格波动大和供货周期无法保证等情况。随着

自主化 LNG 气化器的成功推广, 由过去完全依赖日本供应商转变为拥有自主核心成套技术, 从设计到制造、从中试到工业化、从成果鉴定到成功推广, 探索出 LNG 产业关键自主化的实现路径, 为今后的 LNG 设备自主化项目提供有效指导。

1 LNG 气化器

LNG 气化器是 LNG 接收站的核心设备之一, 是 LNG 接收站除大型储罐外单体投资最大、最重要的设备, 其中 ORV、IFV 是目前国际上应用最普遍的 LNG 气化器。ORV 具有经济性好、运行成本低等优点, IFV 具有换热效率高、设备紧凑占地面积小、海水水质适应能力强等优点, 在中国、日本、韩国和欧洲被广泛使用。我国已建成的大鹏 LNG、莆田 LNG、上海 LNG、如东 LNG 等 10 余座接收站均选用上述 2 种气化器之一作为基本负荷型气化器使用。

开架式气化器 (open rack vaporizer, ORV) 利用海水作为热源, 通过覆盖在开放的薄层管束上的海水液膜降落来气化管束里的 LNG, 管束两端由集箱管连接, 具有经济性好、运行成本低等优点^[1]。

收稿日期: 2017-07-27

作者简介: 黄宇 (1989-), 男, 硕士, 工程师, 从事液化天然气接收站项目设计和设备设施的技术研究工作, 通讯联系人, 010-84524194,

huangyu10@cnooc.com.cn。

中间介质气化器 (intermediate fluid vaporizer, IFV) 将 3 个管壳式热交换器组合, 利用沸点很低的丙烷作为中间介质来气化 LNG, 避免海水直接气化 LNG 时出现结冰的情况, 适用于海水条件较差的工况。具有海水适应性强、操作方便等优点^[2]。

2 种气化器的原理如图 1、图 2 所示^[3]。

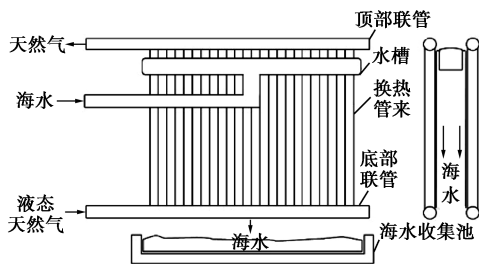


图 1 ORV 原理图

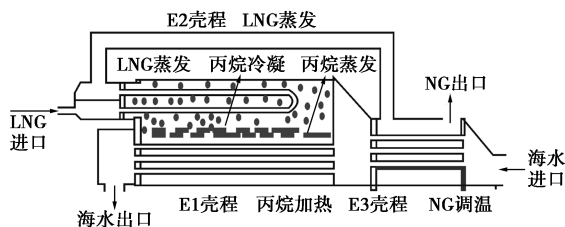


图 2 IFV 原理图

2 技术难点与攻关

国内 LNG 接收站项目的 ORV、IFV 设备主要依赖进口, 设计制造技术长期被日本企业垄断, 存在供货渠道单一、供货期长、采购受限等问题。2010 年

起, 气电集团与航天科工哈尔滨风华有限公司 (以下简称“航天科工”)、江苏中圣高科技产业有限公司 (以下简称“中圣集团”) 启动 LNG 气化器自主化联合攻关, 完成气化器传热模型设计和结构开发, 在高效换热管、介质分布系统、换热管焊接技术、海水防腐涂层技术取得重大突破, 成功研制 LNG 气化器, 彻底摆脱依赖进口的局面, 降低国内项目采购和维护成本。

2.1 开架式气化器核心技术开发

(1) 异型换热管结构设计

换热管是整个 LNG 气化器最主要的传热元件, 也是 LNG 气化器中的核心部分^[4]。对于开架式气化器而言, 换热管结构形式与常规换热管不同, 设计上需要综合考虑传热效率、承压能力、强度、换热面积、防结冰、翅片结构、水膜均匀分布、管内流体流动等因素。因此, 换热管内部结构设计分为气化段和加热段 2 个阶段。在气化段内, 换热管内部设置有内插件和扰流子。在加热段内, 换热管内部设有扰流子, 作用是强化管内流体的湍流程度, 提高传热系数。换热管外表面采用星型分布结构, 有效增大换热面积, 使海水水膜均匀流动, 保证换热性能。

经过反复建模与模拟计算, 成功开发性能优于常规进口 ORV 设备的高效异型换热管, 换热管的外周设有多个直翅片, 呈中心对称的波纹状凸起, 换热管同一截面上的翅片高度不相同, 外翅片不仅增大了换热面积并且有利于海水的分布, 强化了海水侧

(上接第 172 页)

验关联式对流化床中硫酸铵结晶工艺放大设计具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 刘宝树, 种悦晖, 孙华, 等. 均一化大颗粒硫酸铵结晶高效制备工艺研究[J]. 无机盐工业, 2017, 49(6): 77-80.

[2] 王荣荣. 硫酸铵间歇冷却结晶过程研究及晶体粒度与形态调控[D]. 上海: 华东理工大学, 2016.

[3] 张建华, 叶世超, 曾贯虹, 等. 氨法脱硫中硫酸铵结晶过程影响因素的研究[J]. 广东化工, 2016, 43(11): 3-5.

[4] 殷萍. 硫酸铵蒸发结晶过程研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.

[5] 徐欢欢, 刘宝树, 孙华, 等. 硫酸铵蒸发-冷却结晶工艺研究[J]. 无机盐工业, 2012, 44(6): 14-16.

[6] 王忠良, 万雅曼, 齐鸣斋. 硫酸铵结晶热力学与动力学的实验研究[J]. 石油化工技术与经济, 2014, 30(3): 11-14.

[7] Chianese A, Diberardino F, Jones A G. On the effect of secondary

nucleation on the crystal size distribution from a seeded batch crystallizer[J]. Chemical Engineering Science, 1993, 48(3): 551-560.

[8] 章怡, 李军, 王盼. 流化床中磷酸二氢钾结晶成核动力学研究[J]. 无机盐工业, 2010, 42(5): 29-31.

[9] 李俊宏, 叶世超, 程郡. 等. 旋流流化床结晶特性实验研究[J]. 现代化工, 2015, 35(3): 139-142.

[10] 王平, 彭芹, 叶世超, 等. 旋流流化床中氯化钠蒸发结晶特性研究[J]. 现代化工, 2016, 36(5): 151-155.

[11] Sattar Al-Jibbouri, Joachim Ulrich. The growth and dissolution of sodium chloride in a fluidized bed crystallizer[J]. Journal of Crystal Growth, 2002, 234(1): 237-246.

[12] Binev D, Seidel-Morgenstern A, Lorenz H. Study of crystal size distributions in a fluidized bed crystallizer[J]. Chemical Engineering Science, 2014, 133: 116-124.

[13] 丁绪淮, 谈遵. 工业结晶[M]. 北京: 化学工业出版社, 1985.

[14] 陈涛, 张国亮. 化工传递过程基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009. ■

换热。换热管的内壁在圆周方向设有多个内翅片,合理的内翅片结构参数可有效减小传热管外部结冰层的厚度。

(2) 铝合金焊接工艺

ORV 属于超高压压力容器,设计压力在 10 MPa 以上,焊接工艺要求极高,包括换热管分布密集、作业空间狭小、焊接位置不规则、不锈钢与铝合金的过滤焊接等设备制造的攻关难点。铝合金换热管经挤压工艺完成制造后,需要与 LNG/NG 集合管进行铝合金焊接,ORV 的进出口需要与工艺区不锈钢管线链接,需要考虑不同材质的过渡焊接。

通过不断研究、试验和评定,最终彻底掌握铝合金管之间的焊接工艺、铝/不锈钢过渡接头爆炸焊接工艺,攻克开架式气化器的核心焊接工艺。

(3) 海水防腐涂层技术

ORV 运行在海洋环境中,铝合金换热管长期经受海水冲刷,如换热管表面防腐涂层设计不合理,会出现点腐蚀、换热管厚度不均、泄露等情况^[5]。换热管喷涂的厚度过薄,涂层寿命达不到设计要求;涂层厚度过厚,不仅减弱涂层附着力,也影响换热性能^[6]。通过开发的适用于开架式气化器的热喷涂技术,涂装耐海水腐蚀的 Al-Zn 合金涂层,耐冲刷、耐腐蚀性能好,提高涂层使用寿命。同时,通过研究涂层腐蚀原理,根据不同区域海水水质条件,实现防腐涂层的适应性配置。

2.2 中间介质气化器核心技术开发

(1) 传热结构设计

根据 IFV 原理可知,海水在水平管内强制对流换热,水平管束外丙烷池沸腾换热;超临界 LNG 在水平管内强制对流换热,水平管束外丙烷膜状凝结换热,NG 气体横掠管束强制对流换热^[7]。IFV 的设计难点在于如何合理地布置 3 个管壳式换热器,一方面要满足 LNG 气化能力和出口温度的设计要求,另一方面要考虑 LNG 超临界状态下的压力和温度变化。通过数次计算选择最终合适的关联式,确定最优气化性能的结构设计^[8]。

(2) 核心焊接工艺与换热管材料开发

IFV 也属于超高压压力容器,设计压力根据下游管网压力情况,一般为 12 MPa 以上,根据换热器内介质的不同合理选材,采用可靠的焊接工艺十分关键。IFV 设备的使用工况是在海水条件较差的沿海地区,换热管选材上需要充分考虑含有重金属离子、高泥沙的海水。因此,IFV 的选材采用大部分碳钢、部分不锈钢、换热管钛合金的组合,保证设备整

体的设计合理性和经济性。3 个换热器的换热管与管板连接上采用特殊的焊接工艺方法,既保证管板与换热管连接的密封性能又可以确保抗拉拖的强度,大大加强了连接的可靠性。

(3) 设备监控技术优化

丙烷是 IFV 的中间介质,起着能量转换的作用,充装量的控制至关重要。在丙烷的液位控制上,为了准确地对丙烷的充装量进行控制,控制方式设计上采用了远程控制和就地显示相结合的监控方式,使得液位控制更加准确。

2.3 自主化 LNG 气化器参数

自主化 ORV 产品参数:采用模块化设计,单台最大 LNG 气化量可达 260 t/h;单台最高设计压力 16 MPa;单台设计温度 $-170\sim+65^{\circ}\text{C}$;设备使用寿命满足 30 年要求;具备使用 ORV 海水条件的国内外区域。

自主化 IFV 产品参数:因运输条件限制,单台最大 LNG 气化量可达 250 t/h;单台最高设计压力 25 MPa;单台设计温度 $-170\sim+65^{\circ}\text{C}$;设备使用寿命满足 30 年要求;具备使用 IFV 海水条件的国内外区域。

3 自主化实施路径

根据 LNG 气化器的案例,总结装备自主化技术路线如图 3 所示。

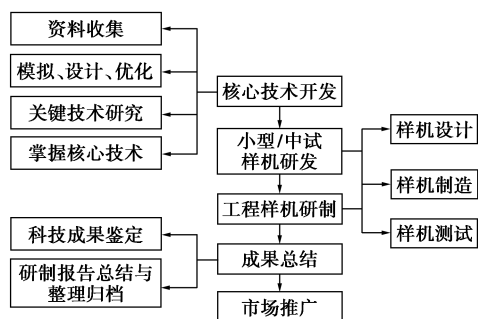


图 3 自主化研制技术路线图

4 自主化成果介绍

气电集团分别与航天科工、中圣集团开展 IFV、ORV 联合研制工作,先后完成 5 t/h ORV 中试样机、157.5 t/h ORV 工程样机、175 t/h IFV 工程样机,在福建 LNG、海南 LNG、浙江 LNG 完成产品中试和工业化测试,成果成功推广至北海 LNG。ORV 工程样机在海南 LNG 作为主气化器使用超过 1 200 h;IFV 工程样机在浙江 LNG 作为主气化器使用超过 2 400 h。

设备测试期间,自主化产品与进口产品均进行性能对比测试,换热效果达到国际同类产品水平。自主化 IFV、ORV 通过中国石油和化学工业联合会组织的科技成果鉴定,成果达到国际先进水平^[9]。

历经数年的科研攻关,LNG 气化器技术从调研前期到项目落地,真正迎来科研“开花结果”、产业“乘风起航”。

5 关键节点与注意事项

5.1 设备制造要求

国内制造企业的选择应满足以下基本要求:相关产品制造许可、制造资质,符合 ASME、API、GB 等国际标准和国内强制规范要求,拥有产品设计、制造能力和工厂试验条件,具备相关产品的制造业绩。产品中试样机、工程样机的制造应配套完整的质量把控体系,全程控制设备质量,并由制造企业提供出厂合格证及相关测试证书。压力容器设备应该具有当地锅检所出具的《性能监督检验证书》,随设备文件资料符合样机使用所在地办理压力容器使用登记的要求。

5.2 测试平台建造要求

测试平台建造要求严格按照工程项目建设标准进行建设,保证测试平台质量与测试运行期间安全。测试平台施工、设计、监理 3 方单位应当具备项目承揽资质。根据 LNG 气化器自主化过程经验,测试平台施工提前考虑拟建场地项目的一期扩建或二期预留的设计统一性,避免出现误操作^[10]。

5.3 产品试验要求

研制产品的试车、运行测试应提前编制《试车(测试)大纲》、《试验应急预案》、《中试/终试测试方案》、《设备操作与维护手册》,做好材料宣传与操作培训,保证项目生产安全,专业准确地进行产品工业化应用测试。

5.4 产品成型与鉴定要求

科研产品核心技术完成设计后,立即启动核心技术的专利申请,以保护自主核心知识产权,构建 LNG 装备技术专利池。科研产品通过工业化应用后,按照国家科技部关于《科学技术成果鉴定办法》的要求,立即向有权组织鉴定的机关或组织提出科研成果鉴定申请,确定产品结构、范围及创新性,形成整套科研成果的产权保护。

目前,本行业内的主要鉴定单位:国家工业和信息化部、中国石油和化学工业联合会、中国机械工业

联合会、省科学技术厅。

6 总结

自主化 LNG 气化器的成功研制打破国外垄断,实现大幅度降低采购成本和维护成本。据初步测算,产品实现国内配套制造后,采购价格将比进口降低 30% 以上,涂层维护价格降低 60% 以上,供货周期可控制在 12 个月内。同时,售后维护成本可降低 50% 左右,并且设备故障响应周期与设备维修消耗时间也将大幅度缩短。提高在 LNG 产业链上的核心设备自主化,增强国内企业在 LNG 气化器设备采购的主动性,彻底摆脱依赖进口的局面同时,还将带动内需,提高国内装备制造技术水平。

随着国内液化天然气业务的发展,LNG 气化器自主化成果可直接用于各个 LNG 接收站,根据目前国内主要石油企业的 LNG 项目“十三五”规划及远期规划,需要配套相当数量的 LNG 气化器,考虑在设备价格、采购周期、故障维修、响应时间等方面显著的优势,自主化 LNG 气化器应用于 LNG 产业中具有进口设备无法比拟的优势,有望全面替代进口产品,市场前景十分广阔。

参考文献

- [1] 王彦,冷绪林,简朝明,等.LNG 接收站气化器的选择[J].油气储运,2008,27(3):47-49.
- [2] 吕俊,王蕾.浙江 LNG 接收站项目气化器选型及系统优化[J].天然气工业,2008,28(2):132-135.
- [3] 马文婷,陈彦泽,刘梦溪,等.国内液化天然气接收站海水气化器的比较与选择[J].石油化工设备,2014,43(4):93-97.
- [4] 谢波,曹峻.开架式海水气化器的国产化研制[J].低温与特气,2016,34(4):5-7.
- [5] 张成伟,马铁轮,盖晓峰,等.LNG 接收站开架式气化器在高含沙海水工况下使用的探讨[J].石油工程建设,2007,33(6):8-10,83.
- [6] 刘宪军.电弧喷涂 Al、Zn 涂层和 Al-Zn 伪合金涂层的磨损性能[J].材料保护,2001,34(3):10-11.
- [7] 蔡宪和,秦锋.中间介质气化器国产化关键技术研究[J].中国海上油气,2013,25(4):59-62,66.
- [8] 王博杰,匡以武,齐超,等.中间介质气化器中超临界 LNG 换热过程分析[J].化工学报,2015,66(S2):220-225.
- [9] 国家石油和化工网.国内自主化 LNG 开架式气化器(ORV)实现工业化应用[J].现代化工,2016,36(12):161.
- [10] 王莉,李伟,郑大明.唐山 LNG 接收站关键装备国产化成果与经验[J].国际石油经济,2015,23(4):89-92,112. ■