

LNG 成套装置换热器关键技术分析

陈永东 陈学东

1.合肥通用机械研究院 2.国家压力容器与管道安全工程技术研究中心

陈永东等.LNG 成套装置换热器关键技术分析.天然气工业,2010,30(1):96-100.

摘 要 换热器是 LNG 成套装置的关键部件,汽化器和主低温换热器在 LNG 接收站和液化装置中扮演了重要的角色。为此,从结构、材料、传热与流动 3 个方面分析了开架式汽化器、带有中间介质的汽化器以及缠绕管式换热器 3 种典型的汽化器的关键技术,并结合工艺流程分析了缠绕管式换热器、板翅式换热器作为 LNG 液化装置主低温换热器的特点,最后对大型 LNG 成套装置中汽化器和主低温换热器实现国产化提出了如下建议:①加强基础研究;②立足全国的技术能力,对汽化器和 MCHE 的材料进行拓展研究,对其承压特性、表面特性、加工特性进行深入研究;③全面提高汽化器和 MCHE 的制造工艺技术及大型化生产能力;公正、客观、科学地选择与接收站以及液化工厂相适应的换热器;④对进口换热器的实际运行进行全面跟踪,开展基于风险与寿命的 LNG 成套装置换热器设计与制造的研究工作。

关键词 LNG 接收站 LNG 液化工厂 汽化器 主低温换热器 结构 材料 传热与流动 技术

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2010.01.028

在 LNG 接收站和 LNG 液化工厂,汽化器和主低温换热器是关系到整个工艺流程实现的重要过程设备,同时也是影响整个装置能耗的关键设备。为此,将从结构、材料、传热与流动 3 个方面针对 LNG 接收站汽化器和天然气液化工厂的主低温换热器的关键技术进行分析。

1 LNG 接收站换热器

1.1 主要汽化器种类

LNG 接收站的汽化处理量很大,采用空温式汽化器和强制通风式汽化器^[1]都需要很多模块,占地面积大,效率低,因此目前主要选择液体加热型汽化器,而液体加热型汽化器的热源因地制宜地选择了海水。

液体加热型汽化器主要包括开架式汽化器(含 ORV 和超级 ORV)、浸没燃烧型汽化器(SCV)、带有中间传热介质的汽化器(IFV)和缠绕管式汽化器(SWV)^[2]。其中浸没燃烧型汽化器在其他国家主要

用于调峰,不作为基本负荷下的汽化器,而在美国,考虑到向海里排放冷水会影响海洋生命,因此美国主要采用浸没燃烧型汽化器作为基本负荷下的汽化器^[3]。浸没燃烧型汽化器的特点是反应迅速^[4-6],但因其直接消耗燃料,本文不将其列为讨论对象。

1.2 开架式汽化器

开架式汽化器是以海水为热源的汽化器,是用于基本负荷型的大型汽化装置,最大天然气流量为 180 t/h。汽化器可在 0~100% 的负荷范围内安全运行,可以根据需求的变化遥控调整汽化量。

整个汽化器用铝合金支架固定安装。汽化器的基本单元是传热管,由若干传热管组成板状排列,两端由集气管或集液管焊接形成一个板型管束,再由若干个板型管束组成汽化器。汽化器顶部有海水喷淋装置,海水喷淋在板型管束外表面上,依靠重力的作用自上而下流动。LNG 在管内向上流动,海水将热量传递给 LNG,使其加热并汽化。我国深圳大鹏 LNG 接收站

基金项目 国家科技支撑计划(编号:2008BAF34B14)。

作者简介 陈永东,1968 年生,教授级高级工程师,硕士;合肥通用机械研究院特种设备节能技术研究设计开发部部长,压力容器学会换热器委员会常务副主任委员,全国锅炉压力容器标准化技术委员会热交换器分会委员;长期从事石油、化工、天然气等领域换热设备的传热与结构研究工作。地址:(230088)安徽省合肥市高新区天湖路 29 号合肥通用机械研究院。电话:(0551) 5335412,13805692930。E-mail: cy_hf@ yahoo.cn

采用的就是开架式汽化器。

开架式换热器的关键技术主要表现在：

1)结构和传热与流动工艺的结合：如何保证大流量的海水均匀地分配到每个板型管束的每根换热管上，因此巧妙的喷淋结构设计显得尤为重要。

2)尽量减少 ORV 运行时在板型管束的下部尤其是集液管外表面的结冰。水膜下降时具有较高的换热系数，但是由于冰层的导热系数大约是铝合金管材导热系数的 $1/40$ ，因此也会使汽化器的传热性能下降。Osaka Gas 和 Kobel Steel 联合研发采用了双层结构的传热管，有效地改善了结冰的状况（这种开架式汽化器被称作 SuperORV）。LNG 从底部的分配器先进入内管，然后进入内外管之间的环状间隙^[7]。间隙内的 LNG 直接被海水加热并立即汽化，内管内流动的 LNG 是通过间隙内已经汽化的天然气气体来加热，使汽化逐渐进行。间隙虽然不大，但能提高传热管的外表面温度，因而能抑制传热管的外表结冰，保持所有的传热面积都是有效的，因此提高了海水和 LNG 之间的传热效率。

3)材料和传热研究的结合：由于传热管内侧 LNG 蒸发时的换热系数相对较低，SuperORV 设计时采用了一些强化措施，传热管分为汽化区和加热区，采用管内肋片来增加换热面积和改变流道的形状，增加流体在流动过程的扰动。所有与天然气接触的组件都用铝合金制造，可承受很低的温度，所有与海水接触的平板表面镀以铝锌合金，防止锈蚀。

和传统的 ORV (Kobel Steel 制造)相比，SuperORV 单根换热管的蒸发能力提高 3 倍左右，海水量减少 15%，建造成本减少 10%，安装所需空间减少 40%。

1.3 带有中间传热介质的汽化器 (IFV)

采用中间传热流体的方法可以改善结冰带来的影响。通常采用丙烷、异丁烷、氟利昂、氨等介质作为中间传热流体介质。IFV 可分为 3 个部分：第 1 部分由海水（或其他热源流体）和中间传热流体进行换热；第 2 部分由中间传热流体和 LNG 进行换热；第 3 部分为天然气过热。这种汽化器远离了加热流体的冰点问题，适用于循环加热系统、海上浮动储存与汽化系统^[8]和冷能发电系统。

IFV 换热器的关键技术主要表现在：

1)结构：如何组合好中间流体和海水的换热部分以及与 LNG 的换热部分；中间流体与 LNG 的换热部

分是否设计成可抽拉换热结构；海水对天然气的过热部分是否设计成独立结构等。

2)材料：该换热器在选材上集中体现了安全性和经济型的和谐，要求既能承受海水腐蚀又能承受低温。与海水接触的换热管选择钛材；与 LNG 接触的换热管和管箱部分选择奥氏体不锈钢。管板可以选择复合钢板结构，与海水接触的管箱与变径筒体则既可以采用复合钢板结构，又可以采用衬里结构。

3)传热与流体流动工艺：首先是选择中间传热介质，确定好中间传热流体的相变压力及其对应的温度；IFV 对热源流体的适用温度范围较宽，因此可以最大限度地发挥潜热等热物理性质，选择匹配的中间传热介质；其次是选择并优化热源流体的串联流程；再次是改善 IFV 换热管的表面特性，实现强化传热。

1.4 缠绕管式汽化器

缠绕管式汽化器实际上就是管壳式换热器，由合肥通用机械研究院和镇海石化建安工程有限公司联合开发，在中小型 LNG 汽化装置上已成功应用，其主要技术参数如表 1 所示。一般情况下加热介质走壳程，LNG 走管程。汽化器的能力主要取决于壳程加热介质的温度和流量。新型缠绕管式汽化器的特点就是在相同的容积内拥有较大的传热面积，同时可以实现多股流体在同一设备内的换热，结构如图 1 所示。缠绕管式换热器壳程阻力较小，允许通过较大的流量，对壳程介质的温度要求并不苛刻，因此既可以使用循环加热介质作为热源，也可以使用大流量海水作为热源。

表 1 典型缠绕管式汽化器主要技术参数表

技术参数	壳程	管程 1	管程 2
最高工作压力 /MPa	0.2	5.0	0.9
工作温度 /℃	20	-162/7	250
设计压力 /MPa	1.0	6.0	1.0
设计温度 /℃	80	-196/50	280
介质	水	LNG/天然气	水蒸气

注：主体材质为 0Cr18Ni9；处理量为 $25\ 000 \times 2\ \text{m}^3/\text{h}$ 。

缠绕管式汽化器的关键技术主要表现在以下几个方面：

1)结构：该汽化器的结构、工艺条件、材料选择密不可分。如果采用海水作为热源，则采用单股流缠绕管式汽化器；如果有可选择的辅助热源，如热机循环水等，可采用多股流缠绕管式汽化器。为了防止结冰，该汽化器内可以设置一些管系，增加气体或蒸汽扰动。

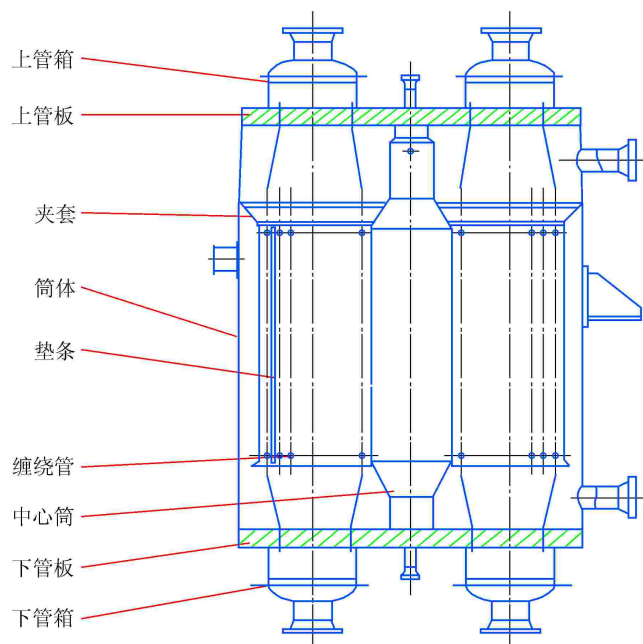


图1 多股流缠绕管式汽化器结构示意图

2)材料:使用海水作为热源的汽化器选材的一大特点就是不管 LNG 走管程还是壳程,换热管和管板材料的选择既需要考虑低温,又需要考虑海水腐蚀。如果海水走壳程、LNG 走管程,壳程不用考虑低温,只需要考虑耐海水的腐蚀。如果 LNG 走壳程,海水走管程,选材的困难情况并不能得到缓解。同时由于 LNG 走壳程,壳体压力较高,又承受低温,只能选用较厚的奥氏体不锈钢材料。另外,缠绕管式汽化器的换热管比传统换热器长得多,从材料的适应性看,可以采用 TA2、AL-6XN、B30、HA177-2、HSn70-1A (推荐程度由高到低)^[9]。这些材料的超长换热管目前主要依赖进口。经比较,汽化器的管板和壳体采用 AL-6XN 超级奥氏体不锈钢制造比较合适,管箱材料可以采用普通奥氏体不锈钢制造。换热管和管板采用强度焊接加贴胀。管板靠近管箱侧布管区表面复合一层换热管的同质金属(AL-6XN 除外)。

3)传热与流体流动技术:海水走壳程是为了充分发挥海水大流量对传热的强化作用,提高壳程的雷诺数,另外一个原因是 LNG 在管程的汽化传热流动机理与应用研究已臻成熟。而如果海水走管程,大流量海水在管内流动,加大了管程阻力;由于换热管较长,只能通过增加换热管根数、减小流速来调整,这样势必影响管内的传热,同时 LNG 壳程的换热系数较低,使得整个热力技术不够优化,造成换热面积增大,因此从整体的经济性来讲不如 LNG 走管程、海水走壳程的设计方案。

2 LNG 液化工厂的主低温换热器(MCHE)

2.1 概述

在天然气工厂中,制冷工段是能量消耗最集中的地方。制冷工段操作的灵活性和有效性直接影响到整个液化工厂的效率。主低温换热器(简称 MCHE)是制冷工段的核心,也是整个 LNG 液化工厂最重要的换热设备。MCHE 的作用是将天然气冷却液化到 -162°C ,它的技术进步将对整个 LNG 液化工艺过程和装置的操作成本产生极大的影响。

目前全世界能够完成大型 LNG 装置(一般指 LNG 液化能力在 $300 \times 10^4 \text{ t/a}$ 以上)工程设计的商家主要有 APCI、Shell、ConocoPhillips、Statoil、Linde 和 Axens。其中 APCI 是最具实力的 LNG 液化工艺商,其主打工艺是丙烷预冷、混合制冷剂液化和氮气膨胀过冷的 LNG 液化工艺流程,在主低温换热器的选择上,均采用了多股流缠绕管式换热器。而 Statoil and Linde 根据液化能力和液化工艺流程的不同,在小型 LNG 装置中采用基本单一混合制冷剂流程,选择了铝制钎焊板翅式换热器;在中型 LNG 装置采用改进型混合制冷剂流程,天然气在同一多股流缠绕管式换热器内完成预冷、液化和过冷,不同压力、温度的制冷剂分离器为各段天然气的降温提供冷媒(典型装置为中国新疆广汇公司的 LNG 工厂, $43 \times 10^4 \text{ t/a}$, 2004 年投产);在大型 LNG 装置中采用了混合制冷剂梯级循环流程,采用了 3 种不同混合制冷剂的循环压缩机,每一个循环对应天然气降温过程的不同温度阶段,选择了铝制钎焊板翅式换热器作为预冷段换热器,选择多股流缠绕管式换热器作为液化段和过冷段的主低温换热器。

2.2 板翅式换热器

板翅式换热器是一种紧凑式换热器,空分和 LNG 液化领域使用的都是铝制板翅式换热器,其特点是可以实现多股流换热,且对冷热物流的股数并不需要严格限制。德国林德公司在其基本单一 LNG 流程(天然气液化能力小于 $20 \times 10^4 \text{ t/a}$)中采用了板翅式换热器,流程示意图见图 2,安装在冷箱内的板翅式换热器通过两级单一混合制冷剂循环将天然气直接冷却到 LNG 温度(典型装置为挪威 Kollsnes LNG 工厂, $4 \times 10^4 \text{ t/a}$, 2003 年投产)。其中分离器顶部的气相混合制冷剂冷却后节流进入换热器提供过冷温度,分离器

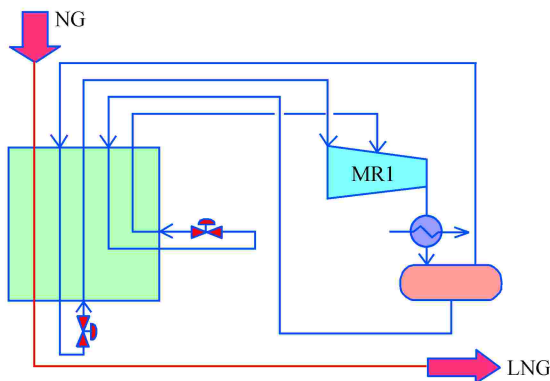


图 2 林德公司基本单一 LNG 流程示意图

底部的液相混合制冷剂冷却后节流进入换热器提供预冷和液化温度。美国燃气工艺研究院在其小型 LNG 液化单元中也采用了铝制板翅式换热器作为低温换热器^[9]。全世界采用铝制板翅换热器作为大型 LNG 液化工厂主低温换热器的较少,美国康菲石油公司(澳大利亚 Darwin LNG 工厂,液化能力为 324×10^4 t/a)采用 3 种冷剂的梯级循环,干燥的天然气通过和不同循环温度级对应的板翅式换热器最终得到液化。

铝制板翅式换热器的缺点也很突出:钎焊炉的容积限制了大型液化作业、两相流动分配技术造成流体分布不均匀、连接管道多造成应力复杂、泄漏点多。这也是目前全世界的大型 LNG 工厂很少采用其作为 MCHE 的主要原因。

板翅式换热器的关键技术表现在以下几个方面:

1) 结构:研究高承压能力翅片,可以提高整个铝制板翅式换热器的结构承载能力。提高翅片密度,既加大了承压能力,又增大了单位体积的换热面积;对气液两相分配结构的优化技术,可实现大流量下流体的均匀分布;由于多个板翅式换热器组合在冷箱内,因此多单元并联的配管优化、整体冷箱结构的配置、冷箱结构的安全性分析等都是设计的重点环节。

2) 材料:压力容器用薄铝板材和管材相对于钢材的质量不够稳定,因此一定要控制好铝制板翅式换热器的原材料质量。针对不同的合金铝材选择钎焊材料,优化钎焊工艺是整个结构安全性的首要保证。

3) 传热与流体流动:改善板翅式换热器表面的几何形状,强化翅片传热能力,降低翅片流动阻力是各个领域板翅式换热器的研究课题^[10-11],在 LNG 领域也不例外;更令人关注的是如何实现大流量下、尤其是两相流动状态下流体的均匀分布。因此流道布置与流体分布的均匀性措施研究十分重要;板翅式换热器加工精度对传热性能影响较大;由于板翅式换热器的流道

长度受限制,冷热端存在较大的温度梯度,轴向导热增加了不可逆损失,降低了换热器的热效率,在传热设计中应予考虑;此外还应关注板翅式换热器的安装位置对传热与流动的影响。

2.3 缠绕管式换热器(SWHE)

缠绕管式换热器用作 LNG 液化主低温换热器(MCHE)是其自身的特点决定的:①管内介质以螺旋方式流动,壳程介质逆流横向交叉通过绕管,换热器层与层之间换热管反向缠绕,管、壳程介质以纯逆流方式进行传热,即使在较低的雷诺数下其流动形态也为湍流,换热系数较高;②多种介质共存于一台缠绕管式换热器进行传热时,由于其传热元件为圆管,缠绕管式换热器对不同介质之间的压差和温差限制要求较小,降低了生产装置的操作难度,提高了设备的安全性;③结构相对紧凑、耐高压且密封可靠、热膨胀可自行补偿;④易实现大型 LNG 液化作业。

美国空气产品化学工程公司(air products)是 LNG 领域 SWHE 最大的供货商,在 1977~2008 年间,为 79 套 LNG 装置(其液化能力累计达到 2.3×10^8 t/a)生产了缠绕管式换热器。德国林德(Linde)公司在近 5 a 内一共生产了累计金属重量达到 3 120 t 的多股流缠绕管式换热器应用于 LNG 工厂。

缠绕管式换热器的关键技术主要有:

1) 结构:缠绕管式换热器的结构和工艺条件紧密联系在一起,合理分配液化段和过冷段的热负荷,使液化段和过冷段相对协调;结合特大型换热器的载荷分配以及换热管相对较软的特性,采用足够刚度的中心筒,从设计上保证缠绕的均匀性。组合设计技术的充分应用使“冷塔”结构合理;管壳程及物料进出口位置的合理选择,使流体的分布更均匀;多管板结构的应用使结构进一步优化。

2) 材料:由于大型 LNG 液化工厂的热负荷都是数十乃至数百兆瓦级的,再加上低温要求,目前适用的材料只有两种:奥氏体不锈钢和铝合金。换热面积 2×10^4 m² 以下的缠绕管式换热器换热管还可以考虑采用薄壁奥氏体不锈钢材料, 2×10^4 m² 以上的缠绕管式换热器换热管基本采用铝合金材料。全奥氏体不锈钢材料的缠绕管式换热器制造起来相对简单,若换热管采用铝镁合金管则面临着几个问题:①超大型铝镁合金换热管的国产化;②换热器其他受压元件的选材及其与换热管的适应性;③管板的复合技术研究,在常温下成形后复合管板的低温机械性能研究以及管板过渡层材料厚度的研究;④精密冲压内件的成型技术研究,保证对换热管的零损伤。

3) 传热与流体流动: ①提高物性计算的精确度。在低温和高压下, 尤其是超临界条件下混合组分烃介质热物性的研究; ②流程设计优化: 利用已有的国外烃加工软件, 对天然气预冷、液化、过冷等过程热负荷与温度关系进行模拟, 主要分析其热负荷的区间及温差动力的幅度以及相互之间的对应关系; ③流体的分布与模拟; ④对主低温换热器中的管程天然气、管壳程混合组分介质进行液相、气相、两相及超临界压力等不同工况下的传热与流动的研究, 包括低雷诺数下传热的研究^[12], 给出对于不同负荷区间的传热因子与摩擦阻力因子, 从而计算不同管程、不同区间的换热面积; ⑤结合特大型负荷下换热研究的经济性, 对天然气及混合制冷剂介质的污垢特性^[13]进行深入的研究。

3 结论与建议

LNG 成套装置的换热器集中反映了机械和能源两个领域许多学科的技术集成:

1) 汽化器和主低温换热器的结构和工艺紧密联系, 这些换热器的结构中涉及一些专利技术, 应予以规避。

2) 汽化器和主低温换热器的材料是低温高合金钢或有色金属, 不同于我国目前能够供应的承压元件材料, 尤其是超长型有色金属换热管和异型铝合金强化管等在我国都是空白。

3) 我国在低温、高压、复杂相变状态下的传热与流体流动研究还需进一步加强。

随着我国天然气的应用需求日益增长, 大型 LNG 成套装置的相关技术应取得突破。为了实现大型 LNG 成套装置换热器的国产化, 建议如下:

1) 加大基础研究, 筛选某些烃类分析软件进行二次开发, 模拟和优化工艺流程; 加大低温高压及超临界状态下的热物性研究, 提高换热器设计输入条件的精确性; 利用 CFD 技术对强化传热的方式及流体分配的均匀性进行数值模拟, 有条件地进行传热与流体流动的试验研究, 分析各种工况下多股流介质之间的换热特性及流体阻力特性, 并对二者的符合性进行分析。

2) 立足全国的技术能力, 对汽化器和 MCHE 的材料进行拓展研究, 尤其是有色金属材料。对其承压特性、表面特性、加工特性进行深入研究。

3) 全面提高汽化器和 MCHE 的制造工艺技术及

大型化生产能力。

4) LNG 成套装置体现了安全与节能并重的要求, 一定要公正、客观、科学地选择和接收站及液化工厂相适应的换热器。

5) 对进口换热器的实际运行进行全面跟踪, 开展基于风险与寿命的 LNG 成套装置换热器设计与制造的研究工作^[14]。

参考文献

- [1] 王明富. 强制通风液化天然气汽化器的研制[J]. 深冷技术, 2008(6): 23-26.
- [2] 陈永东. 大型 LNG 汽化器的选材与结构研究[J]. 压力容器, 2007, 24(11): 40-47.
- [3] ZEUS DEVELOPMENT CORPORATION. Vendors analysis of regasification vaporizers [R]. [S.l.]: LNG Express, 2004(9): 25-26.
- [4] 顾安忠. 液化天然气技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 166-167.
- [5] 毕明树, 窦兴华. LNG 沉浸式气化器的数值模拟[J]. 天然气工业, 2009, 29(1): 109-110.
- [6] 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.
- [7] NAOYA MORIMOTO. Development and practical application of a high performance open-rack LNG vaporizer [R]. [S.l.]: Osaka Gas, 2003.
- [8] 张超, 黄群, 侯建国, 等. 海上 LNG 接收终端技术方案研究[J]. 海洋技术, 2009, 28(2): 101-104.
- [9] 张维江, 石玉美, 汪荣顺. 小型天然气液化装置研究进展和关键问题[J]. 低温与超导, 2007, 35(5): 428-432.
- [10] 陈树军, 汪荣顺. 紧凑式低温换热器的发展概况[J]. 低温与超导, 2006, 34(5): 328-331.
- [11] 焦安军, 厉彦忠. 新型紧凑式低温换热器的研究与进展[J]. 低温与超导, 2001, 29(1): 8-13.
- [12] 陈长青. 低温换热器的特点及研究方向[J]. 深冷技术, 1991(4): 15-18.
- [13] 杨庆峰, 顾安忠. 低温液体换热中的污垢问题[J]. 低温工程, 2000(3): 37-40.
- [14] 陈学东, 王冰, 艾志斌, 等. 以风险与寿命为基准的承压设备设计与制造[J]. 压力容器, 2007, 24(10): 1-5.

(收稿日期 2009-09-23 编辑 何明)