

增材制造紧凑型换热器的 LNG 再气化工艺设计

曹鹏伟*

(惠生海洋工程有限公司, 上海 201210)

摘要:提出了一种增材制造紧凑型换热器作为浮式储存及再气化装置(FSRU)上的核心装备 LNG 气化器来进行紧凑型 LNG 气化器样机设计,筛选出丙烷作为加热介质,对其进行工业化测试,以验证校核紧凑型 LNG 气化器的换热器性能,并完成在 FSRU 上的实际应用,其中 BOG 再冷凝器、LNG 气化器和 NG 天然气加热器均采用增材制造紧凑型换热器,有效降低了 LNG 再气化模块的重量和尺寸,为后续在实际 FSRU 项目上的推广应用奠定了坚实的技术基础。

关键词:紧凑型换热器;增材制造;FSRU;LNG 气化器;FSRU 再气化工艺

中图分类号:TE832

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)07-0202-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.07.043

Design of LNG regasification process based on compact heat exchanger made by additive manufacturing

CAO Peng-wei*

(Wison Offshore & Marine Limited, Shanghai 201210, China)

Abstract:A compact heat exchanger made by additive manufacturing is used as LNG vaporizer, which is a core equipment of a floating storage and regasification unit (FSRU), and the prototype compact LNG vaporizer is designed. Propane is selected as the heating medium, industrial tests are performed to verify the performance of heat exchanger in the compact LNG vaporizer. Actual application process are completed in a FSRU, in which BOG re-condenser, LNG vaporizer and NG heater all employ the compact heat exchanger made by additive manufacturing, which can effectively decrease the weight and size of LNG regasification module, laying a solid technical foundation for the subsequent application on the actual FSRU.

Key words:compact heat exchanger; additive manufacturing; FSRU; LNG vaporizer; FSRU regasification process

1 增材制造紧凑型换热器介绍

目前,国内并未完全掌握印刷电路板换热器化学蚀刻和扩散焊接加工技术,而增材制造紧凑型换热器可避免印刷电路板换热器制造技术不成熟的限制,完全能够进行自主设计、自主制造及产品推广应用。

增材制造紧凑型换热器没有焊缝和垫片,具有无泄漏的优势,作为 LNG 气化器使用时,可避免超低温 LNG 泄漏。相比传统的板翅式 LNG 换热器,紧凑型换热器的设计压力为 65 MPa,单位体积内换热面积为 $2\ 500\ \text{m}^2/\text{m}^3$,换热效率达 98% 以上,材料为不锈钢,如表 1 所示,以上特点使其具有体积小、耐高压、耐高温、抗腐蚀等优势,完全满足 FSRU 再气化工艺要求^[1-9]。

增材制造紧凑型换热器样机如图 1~图 3 所示,

表 1 紧凑型换热器与板翅式换热器特点比较

项目	紧凑型换热器	板翅式换热器
设计压力/MPa	65	16
设计温度/℃	-270~900	-270~65
面积、体积比/ $(\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3})$	≤ 2500	≤ 1600
通道截面积/ mm^2	0.88	6
最小温差/℃	1	1
换热效率/%	98~	~95
材料	不锈钢	铝
介质	非常清洁	清洁

作为 LNG 气化器进行工业化测试试验,设计压力 20 MPa,设计温度 $-196 \sim 70\text{℃}$,芯体为增材制造成型,材料为 306L,芯体内介质通道为半径 0.75 mm 的半圆形结构,通道中心间距 2 mm,每层通道间距 3.5 mm,冷热介质在每层通道交错流动换热,换热芯体尺寸为 $408\ \text{mm} \times 180.15\ \text{mm} \times 140\ \text{mm}$ 。

收稿日期:2019-09-18;修回日期:2020-04-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0310400)

作者简介:曹鹏伟(1983-),男,硕士,工程师,研究方向为浮式 LNG 装备的工程设计,通讯联系人,caopengwei@wison.com。

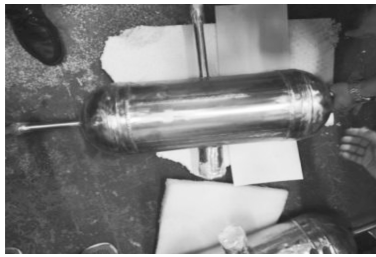


图1 紧凑式换热器样机



图2 紧凑式换热器样机芯体

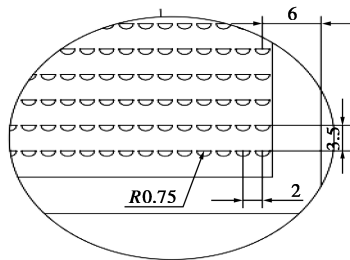


图3 紧凑式换热器芯体介质通道

2 工业化测试工艺设计

2.1 加热介质筛选研究

LNG 气化器加热介质主要有蒸汽、海水、乙二醇水溶液和丙烷,对 LNG 和 4 种加热介质关键物性进行对比研究,见表 2。对于紧凑式 LNG 气化器,结合其微小换热介质通道的特点,应选用不易堵塞流体通道的加热介质。蒸汽作为加热介质,由于凝点较高,易在换热器介质通道内结冰,显著降低换热效率,不适合作为紧凑式 LNG 气化器的加热介质。海水作为加热介质,由于海水含有氯离子,对 LNG 气化器材质不锈钢 306L 造成腐蚀,同时凝点也较高,不适合作为紧凑式 LNG 气化器的加热介质。乙二醇水溶液作为加热介质,凝点较低 -37°C ,导热性好,与 LNG 换热过程不产生相变,只能利用乙二醇水溶液的显热来换热,缺点是增加了换热系统中乙二醇水溶液的流量和储量。丙烷作为加热介质,凝点为 -187.6°C ,与 LNG 换热,不会造成结冰堵塞介质通道,同时,可利用丙烷的潜热来换热,显著降低了丙烷介质的流量及储存量。综合考虑,紧凑式

LNG 气化器的加热介质采用丙烷。

表 2 LNG 和加热介质物性对比表

项目	LNG	蒸汽	海水	乙二醇水溶液	丙烷
操作温度/ $^{\circ}\text{C}$	-153	175.5	32	15	0
操作压力/ MPa	13	0.8	0.3	0.5	0.35
体积分数/%	—	—	—	50	—
常压沸点/ $^{\circ}\text{C}$	-162	100	100.16	-107	-42
常压凝点/ $^{\circ}\text{C}$	—	0	-1.33	-37	-187.6
密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	431	4.573	1025	1080	9.584
比热容/ $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	3.279	2.029	3.89	3.31	1.674
黏度/ cP	0.1043	0.0148	0.861	3.591	0.0076
导热系数/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1})$	0.1839	0.0309	0.0308	0.3862	0.0157
气化潜热/ $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	-1992	2054	2054	1510	380
腐蚀性	无	无	强腐蚀	微腐蚀	无
可燃性	气相 可燃	不可燃	不可燃	不可燃	易燃 易爆

2.2 工业化测试工艺设计

为验证校核增材制造紧凑式换热器作为 LNG 气化器的换热性能,对紧凑式 LNG 气化器样机进行工业化测试工艺设计,加热介质采用丙烷,工业化测试工艺装置主要的设备包含 LNG 闪蒸罐、LNG 增压泵、LNG 气化器、丙烷缓冲罐、丙烷泵、丙烷水浴式气化器。主要检测数据为 LNG 气化器冷侧介质 LNG 的进出口流量、温度和压力,热侧介质丙烷的进出口流量、温度和压力。为满足紧凑式换热器作为 LNG 气化器应用到 FSRU 上,验证晃动情况下换热器的性能,应设计出实船模拟摇摆装置。

方案一,将 LNG 气化器安装在摇摆台上,进出口采用软管连接,因 LNG 气化器运行压力为 13 MPa,因此需要采用高压软管,而市场上 LNG 软管的设计压力为 1.05 MPa,无法满足设计要求。

方案二,将 LNG 气化器、LNG 闪蒸罐和 LNG 增压泵撬装安装在摇摆台上,见三维图 4 所示,摇摆台晃动角度 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$,晃动周期 $5\sim 20\text{ s}$,撬装设备进出口压力低于 1.05 MPa,低压软管可满足实船使用工

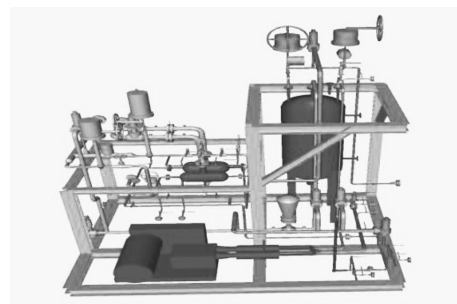


图4 LNG 气化撬块三维图

况要求。

图 5 为 LNG 气化器工业化测试工艺流程示意图, LNG 槽车运输到测试基地, 低温软管连接槽车和 LNG 闪蒸罐, 通过槽车自增压卸载到 LNG 闪蒸罐, 闪蒸气集中加热后安全排放到大气环境, 避免气相进入 LNG 增压泵造成气蚀损坏泵体, LNG 闪蒸罐液位通过进口控制阀门来调节, 避免将 LNG 全部卸载到闪蒸罐, 可有效降低闪蒸罐的尺寸, 同时, 也显著降低了摇摆台的负荷。

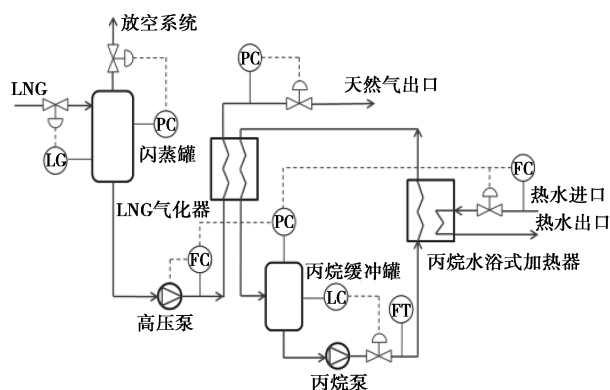


图 5 LNG 气化器工业化测试工艺流程示意图

LNG 经过增压泵加压到 13 MPa, 流量 $3 \text{ m}^3/\text{h}$, 通过变频调节 LNG 流量, 进入 LNG 气化器与气态丙烷介质换热, LNG 气化后温度约 -10°C 。LNG 气化器出口设置压力控制阀, 以提供负载来满足系统正常运行压力 13 MPa 的要求。气化的 LNG 经压力控制阀后进入站内回收储罐, 避免燃气排放。

从 LNG 气化器出来的液态丙烷约 -5°C , 进入丙烷缓冲罐, 经丙烷增压泵加压到 0.5 MPa, 流量 $4 \text{ m}^3/\text{h}$, 进入丙烷水浴式气化器气化到 0°C , 又重新返回到 LNG 气化器, 形成一个闭式循环, 其中丙烷水浴式气化器热源为站内热水, 以气化液态丙烷。丙烷缓冲罐的压力由 LNG 的流量和进入水浴式丙烷气化器的热量来控制, 维持丙烷缓冲罐的压力, 当丙烷缓冲罐压力升高时, 首先通过减小热水流量来控制, 如压力继续升高, 可通过增大 LNG 流量来共同调节, 可有效避免丙烷缓冲罐压力过高引起丙烷的排放。

3 增材制造紧凑型换热器的 FSRU 再气化工艺设计

完成紧凑型换热器的工业化测试, 进一步开发设计其在 FSRU 再气化模块中的应用。

方案一, 可沿用紧凑型 LNG 气化器的工业化测

试工艺流程, 如图 6 所示, 结合实际情况, 由于 FSRU 热水有限, 不能满足丙烷水浴式气化器的热量要求, 可采用海水对丙烷进行气化加热, 换热器为可拆式板式换热器, 材质为钛材, 可抗海水腐蚀, 但价格昂贵。

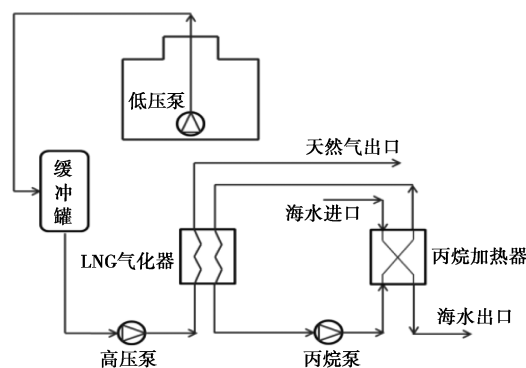


图 6 FSRU 简易式再气工艺流程示意图

方案二, 设计新的适用于紧凑型 LNG 气化器工艺流程, 如图 7 所示, 实际运行中 FSRU 液货舱会有大量的闪蒸气 BOG 气体产生, 经过 BOG 压缩机加压后与高压 LNG 换热, 可利用高压 LNG 的冷能来冷凝 BOG 气体, 返回到 LNG 缓冲罐, 有效减小 BOG 再冷凝器的尺寸, 换热器可采用紧凑换热器。另外, 在 LNG 气化器后串联 NG 加热器, 可有效控制天然气的出口温度, 保障天然气外输要求。

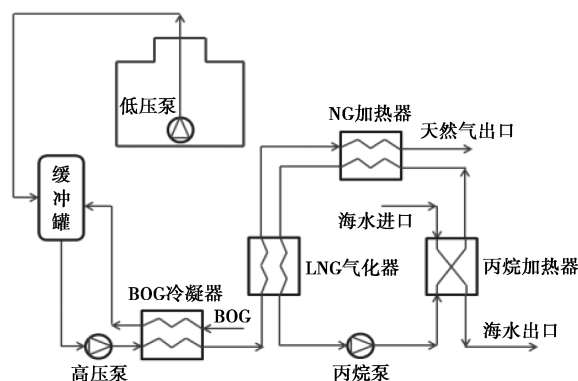


图 7 FSRU 复杂式再气工艺流程示意图

综合考虑, 并结合实际工程案例, 采用方案二紧凑型换热器的 FSRU 再气工艺流程进行设计, FSRU 再气化系统配置为 $3 \times 50\%$ 气化线, 每条线的气化能力为 $250 \text{ mm}^3/\text{scfd}$, LNG 经过舱内低压 LNG 泵输送至 FSRU 再气化模块内的缓冲罐, 从缓冲罐出来的 LNG 经 LNG 高压泵增压到 10.5 MPa, 首先进入 BOG 冷凝器液化 BOG 闪蒸气, BOG 冷凝液返回缓冲罐内。在一级紧凑型换热器内加热到 -10°C , 加热介质为丙烷, 加热后的天然气经二级高效紧凑

换热器加热到5℃。一级紧凑型换热器作为LNG气化器,二级紧凑型换热器为NG加热器,丙烷气体进入紧凑型换热器温度为0℃,出口冷凝为液相,温度为-20℃。丙烷加热采用海水加热,丙烷加热器采用可拆板式换热器,板材为钛材,抗海水腐蚀。

FSRU气化工工艺设计方案中,BOG冷凝器、LNG气化器和NG加热器都采用紧凑型换热器,具体规格数据见表3。因采用紧凑型换热器,可减小甲板和模块安装面积,减少了结构支撑材料,易于安装和维护,有效降低了模块整体重量,节约了初始资本投入。FSRU再气化模块3条气化线和缓冲罐设计在一个模块上,可有效减少与船舶和码头之间的界面,重量约为750 t,模块尺寸为25 m×18 m×12.5 m(长×宽×高)。

表3 紧凑型换热器芯体规格数据

设备名称	冷侧和热侧设计压力/MPa	冷侧和热侧设计温度/℃	尺寸(长×宽×高)/mm	数量
BOG 冷凝器	LNG 11.8, BOG 1.0	-165~70	960×496×196	3
LNG 气化器	LNG 11.8, 丙烷 2.5	-165~70	3406×596×371	3
NG 加热器	LNG 11.8, 丙烷 2.5	-165~70	896×830×596	3

4 总结

(1)采用增材制造紧凑型换热器代替传统的印刷电路板换热器作为LNG气化器的方案,建造了紧凑型LNG气化器测试样机,打破了国外对此类换热器的垄断。

(2)筛选出丙烷作为加热介质,设计出紧凑型LNG气化器的工业化测试工艺流程,并考虑了气化器实船摇摆要求,以验证校核紧凑型LNG气化器的换热性能。

(3)设计出紧凑型LNG气化器的FSRU再气化工工艺方案,其中BOG冷凝器、LNG气化器和NG加热器均采用紧凑型换热器,可有效减小FSRU再气化模块重量和尺寸,为实际项目的应用提供了可靠方案。

参考文献

(上接第201页)

- [5] Klaren D G. Fluidized bed heat transfer exchanger; A major improvement in severe fouling heat transfer [A]. In: Taborek J Heat Exchanger; Theory and Practice [C]. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1981: 885-896.
- [6] Klaren D G. Self cleaning heat exchangers, in: H. Müller-Steinhagen (Ed.), Handbook heat exchanger fouling [M]. Mitigation and Cleaning Technologies, Rugby Institution of Chemical Engineers, 2000: 186-199.
- [7] Aghajani M, Müller-Steinhagen H, Jamialahmadi M. New design equations for liquid/solid fluidized bed heat exchangers [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2005, 48: 317-329.
- [8] 张少峰. 三循环流化床蒸发器防除垢和强化沸腾传热的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2000.
- [9] 姜峰. 循环流化床换热器中的流动、传热和防、除垢研究 [D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [10] Mehran Ehsani, Salman Movahedirad, Shahrokh Shahhosseini. The

- [1] Brian Songhurst. The outlook for floating storage and regasification units (FSRUs) [M]. Oxford Institute for Energy Studies, 2017: 1-54.
- [2] 季鹏, 陈振中, 李婵, 等. 浮式接收再气化装置关键系统比选及发展趋势 [J]. 油气储运, 2017, 36(11): 1320-1325.
- [3] 吴维武, 王东宝, 赵黎明, 等. 印刷电路板式LNG气化器换热试验研究 [J]. 海洋工程装备与技术, 2016, 1(3): 20-24.
- [4] 陈永东, 于改革, 吴晓红. 新型扩散焊紧凑型换热器 [J]. 压力容器, 2014, 33(5): 46-55.
- [5] 李玮哲, 林文胜. 超临界甲烷在印刷电路板换热器中加热过程模拟 [J]. 低温工程, 2017, (5): 60-64.
- [6] Sang-Moon L. Optimization of zigzag flow channels of a printed circuit heat exchanger for nuclear power plant application [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2017, 49(3): 343-351.
- [7] Tony B. LNG applications of diffusion bonded heat exchangers [C]. AIChE Spring Meeting, 2016.
- [8] Seok Ho Yoon. Design of printed circuit heat exchanger for LNG regasification system [R]. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2018.
- [9] 王康硕, 任滔, 丁国良, 等. 浮式液化天然气用印刷电路板式换热器研究和应用进展 [J]. 制冷学报, 2016, 37(2): 70-77. ■

- effect of particle properties on the heat transfer characteristics of a liquid-solid fluidized bed heat exchanger [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 102: 111-121.
- [11] Pronk P, Infante Ferreira C A, Witkamp G J. Ice scaling prevention with a fluidized bed heat exchanger [J]. https://www.researchgate.net/publication/267833783_ICE_scaling_prevention_with_a_fluidized_bed_heat_exchanger.
- [12] 高从堦, 阮国岭. 海水淡化技术与工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- [13] 张卫义, 方陈靖, 陈罕. 液-固流态化固体颗粒终端速度 V_t 研究 [J]. 石油化工设备, 2011, 40(2): 10-13.
- [14] Clift R, Grace J R, Weber M E. Bubbles, drops and particles [M]. New York: Academic Press, 1978.
- [15] 王尊孝. 化学工程手册(第二十篇 流化床) [M]. 北京: 化学工业出版社, 1989.
- [16] 上海化工学院, 成都科技大学, 大连理工学院. 化学工程(上册) [M]. 北京: 化学工业出版社, 1980. ■