

基于 LNG 冷能的液固流化床海水制冰淡化

孙靖*, 韩克鑫, 谢春刚, 王鑫, 任建波, 张令品, 安子韩
(自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所, 天津 300192)

摘要:提出了一种利用 LNG 冷能进行流化床式海水冷冻淡化的具体方案,该方法中载冷剂冷量来自于 LNG 气化所释放的冷能,载冷剂进入流化床制冰器壳程与管程内海水换热制冰,流态化固体颗粒通过碰撞传热管壁去除冰晶形成冰浆,冰晶经分离洗涤融化后得到淡水。该方法通过合理控制颗粒粒径、床层孔隙率、传热温差等工艺参数,可实现连续稳定高效的制冰淡化。进行了载冷剂的分析选取,研究了流化床海水制冰淡化系统的流程、系统稳定运行条件及关键工艺参数的选取,并以产水量 100 L/h 为例进行了工艺设计。

关键词:LNG 冷能利用;海水淡化;流化床;制冰;颗粒

中图分类号:TB21

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)07-0197-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.07.042

Freezing desalination of seawater in liquid/solid fluidized bed by utilizing LNG cold energy

SUN Jing*, HAN Ke-xin, XIE Chun-gang, WANG Xin, REN Jian-bo, ZHANG Ling-pin, AN Zi-han
(The institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, MNR (Tianjin), Tianjin 300192, China)

Abstract:A scheme for freezing desalination of seawater in a liquid/solid fluidized bed by utilizing LNG cold energy is presented. Cold charge of the refrigerant comes from cold energy released during LNG vaporization. The refrigerant enters the shell side of the fluidized bed to exchange heat with seawater in pipe side where ice is made. The fluidized solid particles form into ice slurry by colliding the wall of the heat transfer pipe to remove ice crystals, and then the ice crystals are separated, washed and melted to get fresh water. This method can achieve continuous, stable and efficient freezing desalination by reasonably controlling the particle size, bed porosity, heat transfer temperature difference and other process parameters. The refrigerant is screened and selected, and the process flow of the fluidized bed freezing seawater system, the stable operating conditions of the system and the selection of key process parameters are studied. An example process design is carried out with a water production capacity of 100 liter per hour.

Key words:utilization of LNG cold energy; desalination of seawater; fluidized bed; ice making; particle

随着对 LNG 需求量的日益增长,我国沿海各大城市先后兴建了 10 余座 LNG 接收站,而 LNG 在气化过程中会释放大量的冷能(约 830 kJ/kg),这部分冷能通常会随着海水的排放而被直接舍弃掉,造成能源的巨大浪费。常用的 LNG 冷能利用方式主要有空分、低温粉碎、冰蓄冷、制液氮等^[1],但由于市场空间有限,LNG 冷能的利用率尚不足 20%,大量冷能仍处于无法被利用的状态。因此,LNG 冷能利用成为 LNG 企业亟需解决的问题。

海水冷冻淡化是海水在低温下冷却至结冰,冰晶经分离、洗涤、融化后得到淡水的技术。海水冷冻淡化可与 LNG 接收站实现共址建设,工艺耦合性强,可大量消化 LNG 冷能,是 LNG 冷能利用的一项重要技术途径。目前常用的冷冻制冰方法包括刮削

式、直接接触式、真空式、流化床式及过冷水制冰等^[2],其中流化床式制冰法是依靠在制冰器内处于流化状态的小颗粒对传热壁面的持续碰撞,去除壁面上生成的微小冰晶,形成流体冰浆的过程。该方法传热效率高,传热管内颗粒流动类似液体,可使大量热、质在不同传热管间传递^[3-4],易于规模扩展,能满足工业化大批量连续作业的需求。目前关于流化床制冰技术,国内外学者已经开展了一些研究。Pronk 等^[3]采用流化床技术对质量分数为 7.7% 的氯化钠溶液进行制冰性能的研究,测试了系统稳定运行的边界条件。Meewis 等^[4]开展了流化床制冰性能测试,并建立了传热系数计算模型。然而该技术用于海水制冰淡化尚未见报道。本文中提出利用流化床制冰方法实现 LNG 冷能海水淡化,载冷剂

收稿日期:2020-02-13;修回日期:2020-05-06

基金项目:2016 年中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(K-JBYWF-2016-T03);天津市科技计划科技支撑重点项目(18YFZCSF00320);中国博士后科学基金资助项目(2019M650999);十三五国家重点研发计划项目(2016YFB0301201);2016 年中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(K-JBYWF-2016-T01)

作者简介:孙靖(1983-),女,硕士,工程师,研究方向为海水淡化技术,通讯联系人,164316294@qq.com。

吸收 LNG 冷能为流化床制冰器提供冷量,冰浆中冰晶经分离融化产出淡水。本文中进行了载冷剂的分析选取,研究了流化床式海水制冰淡化的工艺流程及关键工艺参数的选取原则,并开展工艺设计,为流化床制冰技术用于冷冻海水淡化领域提供技术参考。

1 流化床式冷冻淡化工艺流程

流化床式制冰淡化系统包括载冷剂循环系统、原料水系统、分离清洗系统及融冰系统,如图 1 所示。

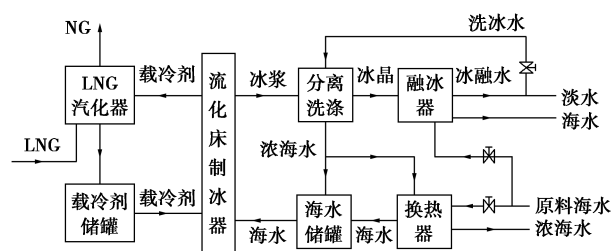


图 1 LNG 流化床海水制冰淡化工艺流程

如图 1 所示,LNG 与载冷剂换热后转化为 NG,载冷剂降温后进入流化床制冰器壳体内与预冷后的海水通过传热管间接换热,载冷剂升温后再次进入 LNG 汽化器循环利用。原料海水经换热器预冷并与分离洗涤器中分离出的浓海水混合后进入流化床制冰器,颗粒在海水的带动下实现流态化并具备一定的动能。当海水在流化床内过冷至冰点以下,会发生初始成核,随即冰晶开始生长,颗粒持续与壁面碰撞,去除黏附在传热壁面的冰晶形成冰浆,如图 2 所示,而冰晶的尺度则由颗粒与传热管壁面间的撞击作用决定,冰晶直径在 0.1~3.0 mm^[4]。冰浆排出制冰器后进入分离洗涤器中被分离为冰晶和浓海水,部分浓海水进入海水储罐,部分则进入换热器预冷海水后排出系统。分离洗涤器中排出的冰晶在融冰器内与海水换热融化成淡水,部分淡水作为洗涤水返回分离洗涤装置,该部分淡水水量为总淡水量的 5%~10%。

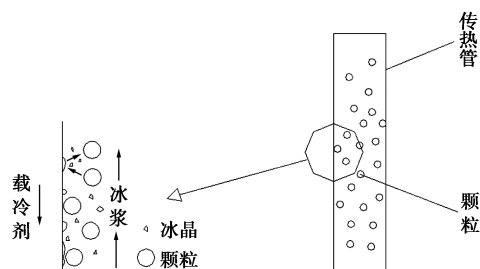


图 2 流化床制冰原理图

典型流化床换热器包括进口段、换热管束、出口

段 3 部分^[5],如图 3 所示。在进口段分别加入了流体分布器与颗粒分布器,分布器为多孔板,孔板开孔率数值由具体工艺确定,同时在换热管段入口端开孔,协助分布器使固体颗粒更好地均匀分布。流化床对壁面沉积物的去除能力避免了沉积物热阻导致的传热性能下降,同时流态化颗粒的运动打破了传热管内层流边界,降低了海水与传热壁面的热阻,而且颗粒与壁面的碰撞本身也能起到一定的导热作用,因此流化床制冰器具有很好的传热性能,传热系数可达 3 500~5 500 W/(m²·K)^[3]。流化床的除垢和强化传热性能在沸腾蒸发及高浓缩易结垢物料的处理中已经有较多应用^[6-7]。

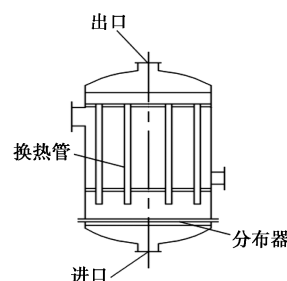


图 3 流化床制冰器结构示意图

2 载冷剂的选取

该方法中载冷剂作为中间介质,将 LNG 冷能传递给海水。载冷剂与 LNG 换热降温后进入流化床制冰器,载冷剂吸收海水热量后返回 LNG 汽化器重新冷却,如此不断循环,实现连续制冷。流化床制冰器载冷剂的选择应遵循以下原则。

(1)载冷剂在工作温度下应处于液体状态,冰点应低于工作温度,沸点应高于工作温度。

(2)载冷剂应具备较高的热容,以降低载冷剂循环量,提高循环经济性。

(3)载冷剂应具备黏度小、相对密度小的特点,使其具有良好的低温流动性及较低的输送功率,同时具备良好的传热性能,降低设备传热材料成本。

(4)载冷剂应在工作温度下具备良好化学稳定性,不发生物理化学反应。

(5)无腐蚀性,安全无毒,经济廉价。

海水凝固点大约为-2℃,适用的载冷剂主要有盐水、乙二醇或丙二醇溶液、二氯甲烷和三氯乙烯。二氯甲烷和三氯乙烯传热系数低,稳定性差,且溶解性低,易造成管道及设备冰堵。因此本研究中载冷剂重点考虑盐水及乙二醇或丙二醇溶液,表 1 列出了这几种载冷剂主要物理参数。

表1 常用载冷剂物性参数

载冷剂	常压下 冰点/°C	常压下 沸点/°C	比热容/ (kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	黏度/ (kPa·s)
氯化钙 (9.4%~29.9%)	-5.2~ -55	100~ 110	3.601~ 2.638	2.55~ 64.72
乙二醇 (10%~60%)	-3.2~ -48.3	101~ 109.4	3.937~ 2.844	2.08~ 93.44
丙二醇 (10%~59%)	-3.3~ -59	100~ 106.7	4.042~ 3.096	2.68~ 524.01

氯化钙水溶液凝固温度随浓度而变,当溶液质量分数为9.4%时,氯化钙盐水的最低凝固温度为-5.2℃;当溶液质量分数为29.9%时,氯化钙盐水的最低凝固温度为-55℃;氯化钙价格较低,但对设备腐蚀性很大。

乙二醇和丙二醇性质稳定,水溶液的凝固温度随浓度而变,凝固点分别可达-48.3、-59℃,但由于低温下溶液的黏度上升非常迅速,因此一般在0~-20℃工况下应用。在相同温度下,丙二醇水溶液是相同质量浓度乙二醇水溶液黏度的3倍左右,因此本研究采用乙二醇水溶液作为载冷剂。乙二醇水溶液略有腐蚀性,使用时应添加适量缓蚀剂。

3 关键工艺参数的确定

流化床制冰器只有在特定的工艺条件下才能保证稳定运行。因为流化床制冰器的制冰过程是一个传热壁面冰晶生长与去除的动态平衡,只有当冰晶的去除速率大约等于冰晶的生长速率时才能保证冰浆的连续产出,如果冰晶生长过快,超过颗粒对冰晶的去除速率,传热壁面将形成冰层,由于冰层的热阻,传热系数将随之降低,同时随着冰层厚度的增加,传热管内流化床直径减小,将导致床层向上方膨胀,颗粒溢出传热管。此时,流化床失稳,传热管会被不断生长的冰层阻塞。因此流化床制冰器的设计要同时兼顾传质传热性能和颗粒的除冰性能。颗粒非循环流化床具有结构简单、投资成本及运行能耗低的特点,因此本文中将从颗粒非循环式流化床出发探讨流化床式海水制冰淡化的设计方法。

在流化床制冰方法的研究中发现,无论在何种工况下,系统运行总存在一个传热温差的极限值^[4,7],该传热温差为传热管壁面温度与管内料液温度之差,温差超过该极限值,冰晶的去除速率将不及冰晶的生长速率,导致系统失稳。因此,该传热温差可用于表征颗粒对传热壁面冰晶的去除能力。该温差越大,代表冰晶的去除速率越高,系统可稳定运

行的工况范围越大,系统有更好的适应性和稳定性。因此流化床式海水制冰淡化系统的设计首先要明确床层内颗粒的物性及流化性质与除冰能力间的关系。

张少峰^[8]研究发现,三相流动沸腾流化床颗粒体积分率较大时,系统具备更好的除垢能力和传热性能。姜峰^[9]研究得出,在蒸发浓缩循环流化床中随着颗粒浓度的增加,颗粒在防除垢性能、提高浓缩倍率及强化传热方面的性能均有所增加。因此流化床内颗粒孔隙率对床层除垢及传热性能有重要影响。

Pronk 等^[3]在内径为42.7 mm的传热管内实验测得了质量分数为7.7%氯化钠溶液在流化床制冰器稳定运行下溶液平均温度与传热管壁面间最大传热温差及总传热系数与颗粒直径及床层孔隙率间的对应关系,颗粒采用不锈钢直径等高小圆柱,直径分别为2、3、4 mm,实验结果如图4、图5所示。可见最大传热温差和总传热系数均随着颗粒直径的增加及床层孔隙率的降低而升高。在非循环床内,颗粒浓度的增加虽然会降低床层表观流速,但会提高颗粒与壁面的撞击频率,使得床层除冰能力变强。然而颗粒浓度过高会导致床内颗粒群因不能充分流化而造成颗粒分布不均,从而减弱床层的除冰能力,例如如图4所示2 mm颗粒在较低孔隙率下除冰能力有所下降。此外,相同孔隙率下较大颗粒的床层因具备更高的表观流速和更大的撞击动量而拥有更强的

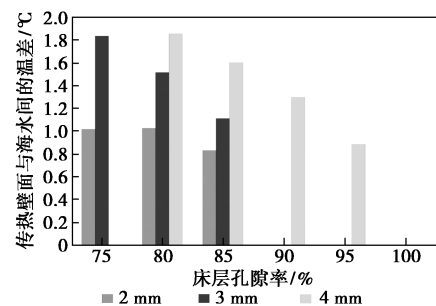


图4 颗粒直径和床层孔隙率对运行性能的影响

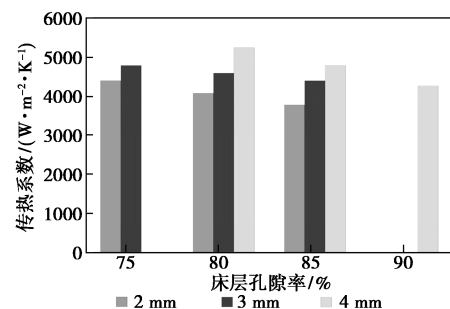


图5 传热系数随颗粒直径及床层孔隙率的变化

除冰能力。同时,较高的表观流速更有利于传热,而且颗粒与溶液间的传热系数也随颗粒直径的增加而增大^[10],因此较大颗粒流化床具备更好的传热性能。

综上所述,综合考虑传质传热和颗粒除冰性能,非循环流化床制冰器应选择较大直径的颗粒和较低的床层孔隙率。本文中在流化床式海水冷冻制冰淡化的设计中选择 4 mm 不锈钢直径等高小圆柱作为流态化颗粒,床层孔隙率定为 80%。

海水的结晶速率既与海水的盐度相关,也与海水中溶解的盐分种类相关。海水中盐分主要为氯化钠和硫酸镁,其中 NaCl 约占总含盐量的 80%,其次为 MgSO₄ 约 10%,其余成分含量很小可忽略其扩散性能对海水制冰的影响。Pronk 等^[11]对多种溶剂在不同浓度溶液下的流化床稳定制冰最大传热温差进行了测定,其中 NaCl 和 MgSO₄ 的测试结果如图 6 所示,相同浓度下 MgSO₄ 溶液的结冰速度低于 NaCl 溶液,且海水中主要成分为 NaCl,因此在设定流化床海水制冰器传热温差时可参考相应浓度 NaCl 溶液的实测结果。

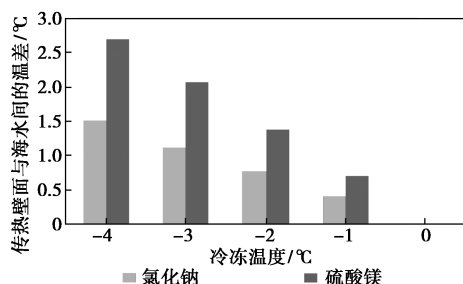


图 6 传热温差与溶质种类及浓度的关系

根据参考文献[12],对于流化床内海水的操作温度,因海水的冰点随浓度的增加而降低,为了避免 Na₂SO₄·10H₂O 析出,同时能生成易于分离的冰晶,

应控制冰点在-1.95~-4.2℃。图 7^[12]为海水平衡冷冻曲线,冰点为-4.2℃时海水的含盐量为 6.49%,由图 7 可知,海水含盐量越大,稳定运行时允许传热温差越大,因此流化床制冰淡化的海水浓缩倍率应在不超过 1.85 范围内越大越好;再根据本文第 2 部分载冷剂的选取分析,考虑到一定的设计余量,本研究选择质量分数为 20%的乙二醇水溶液作为载冷剂,其常压下冰点为-7.8℃,沸点为 102.2℃,动力黏度约为 3.50 kPa·s。

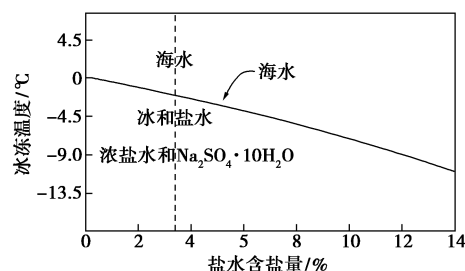


图 7 海水平衡冷冻曲线

4 工艺计算

流化床海水制冰淡化后的冰融水还需要进一步脱盐才能满足饮用水标准,本文中暂不考虑冰融水后处理,以 100 L/h 冰融水产量为例进行工艺设计,工艺流程如图 8 所示。设定冰融水量的 10%用于洗冰,返回离心分离器,洗冰过程中冰晶损失率为 5%,则流化床制冰器的实际冰晶产量应为 100 L/h/(90%×95%) = 117 L/h。选取流化床制冰温度为-4℃,此时制冰器内循环海水的盐度为 6.186%。设定冰融水的脱盐率为 90%。传热管内径定位 43 mm,颗粒为 4 mm 直径等高不锈钢圆柱,流化床孔隙率 80%,则海水表观流速 u 可通过如下方法计算。

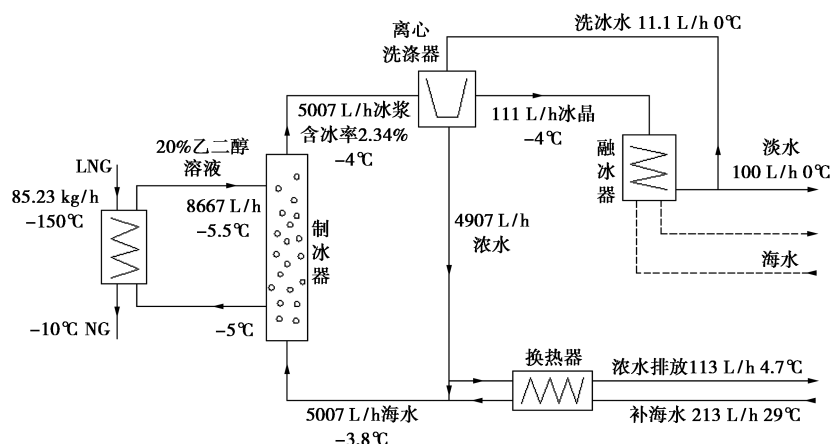


图 8 流化床海水制冰淡化工艺流程

颗粒密度为 $7\ 900\ \text{kg}/\text{m}^3$, 颗粒为非球形, 采用如下方法^[13] 计算颗粒终端速度 v_t , 该方法相比工程常用方法具有更高的精确度, 在阿基米德数 $Ar = 20 \sim 1.0 \times 10^7$, 相应雷诺数 $Re = 1 \sim 5.6 \times 10^3$ 范围内适用。

与终端速度相对应的终端雷诺数 Re_t 计算式为:

$$Re_t = dv_t \rho_f / \mu_f \quad (1)$$

阿基米德数计算式为:

$$Ar = d^3 V \rho \rho_f g / \mu_f^2 \quad (2)$$

其中 d 为颗粒直径, 对于非球形颗粒, $d = d_v$, d_v 为颗粒等体积当量直径; ρ_f 为海水的密度; $V \rho = \rho_s - \rho_f$, ρ_s 为颗粒密度; μ_f 为海水动力黏度; g 为重力加速度。

Ar 与 Re_t 之间满足关系式^[14]:

$$Re_t = C [(4/3)(Ar/C_D)]^{1/2} \quad (3)$$

其中, C_D 为颗粒在流体中的曳力系数, 计算式如下^[15]:

$$C_D = 0.28 + 6/Re_t^{0.5} + 21/Re_t \quad (4)$$

C 为 $v_t(\phi)/v_t(\phi=1)$ 的比值, 即非球形颗粒与球形颗粒终端速度的比值, ϕ 为颗粒形状系数, 其值为直径为 d_v 的球体表面积与颗粒表面之比, $4\ \text{mm}$ 圆柱颗粒形状系数经计算为 0.8 。 C 可由下式计算:

$$C = 1.1 [C_2 + (4 - \log^{Re_t})(C_1 - C_2)/6] \quad (5)$$

其中 C_1 和 C_2 为形状系数影响中间变量, 由下式计算^[16]:

$$C_1 = 5\phi + 0.5 \quad (6)$$

$$C_2 = -2.41 + 12.66\phi - 20.0\phi^2 + 10.75\phi^3 \quad (7)$$

上述各式联立并迭代即可求出颗粒终端速度, 经计算 $v_t = 1.21\ \text{m}/\text{s}$ 。本文中研究的流化床属于散式流态化, 根据选定的孔隙率 $\varepsilon = 0.8$, 可计算出流化床表观流速 $u = \varepsilon \cdot v_t = 0.97\ \text{m}/\text{s}$ 。

根据物料衡算得出补海水量为 $213\ \text{L}/\text{h}$, 盐度 3.5% , 温度定为夏季海水最高温度 $29\ ^\circ\text{C}$, 浓水排放量为 $113\ \text{L}/\text{h}$, 盐度 6.29% , 温度为 $4.7\ ^\circ\text{C}$ 。参考图 6 中 $-4\ ^\circ\text{C}$ 冰点时传热温差为 $1.5\ ^\circ\text{C}$, 取载冷剂入口温度为 $-5.5\ ^\circ\text{C}$, 可保证传热温差不超过 $1.5\ ^\circ\text{C}$, 传热系数参考图 4 中 $4\ \text{mm}$ 颗粒孔隙率 80% 时的传热系数 k , 由插值法计算为 $5\ 245\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 假设制冰器冷能损失率为 10% , 由式 (8) 计算传热面积 A 为 $1.53\ \text{m}^2$, 传热管内径为 $42.7\ \text{mm}$, 则传热管高度为 $11.4\ \text{m}$ 。

$$Q \cdot (1 - 10\%) = k \cdot A \cdot \Delta T \quad (8)$$

式中, Q 为换热量, kW ; ΔT 为对数传热温差, $^\circ\text{C}$ 。系统工艺参数如表 2。

表 2 系统工艺参数

参数	数值
冰融水产量/ $(\text{L} \cdot \text{h}^{-1})$	100
海水一次循环产冰率/%	2.34
冰融水脱盐率/%	90
海水浓缩倍率	1.77
海水进料量/ $(\text{L} \cdot \text{h}^{-1})$	213
浓水排放量/ $(\text{L} \cdot \text{h}^{-1})$	113
载冷剂循环量/ $(\text{L} \cdot \text{h}^{-1})$	8667
制冰器传热面积/ m^2	1.53
传热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	5245
冷量载荷/ kW	11.2

5 结论

(1) 提出一种基于 LNG 冷能利用的海水冷冻淡化方法, 将流化床制冰技术用于海水制冰淡化, 该方法传热效率高, 传热系数可达 $5\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 以上, 流化床内部固体颗粒流动类似液体, 可使大量热、质在不同传热管间传递, 易于连续化作业和规模扩展。

(2) 流化床制冰淡化稳定运行需满足颗粒对传热管壁面冰晶的去除速率大于壁面冰晶的生长速率, 基于这一原则, 分析了系统关键工艺参数如颗粒粒径、床层孔隙率、传热温差、制冰温度等的选取原则, 并在此基础上对产水量 $100\ \text{L}/\text{h}$ 的 LNG 冷能制冰淡化系统进行了工艺设计。

(3) 流化床制冰器的产冰效率受限于颗粒对冰晶的去除能力, 然而颗粒对冰晶的去除机理尚不完全清楚, 且颗粒性质 (外形、材质、密度等) 及颗粒粒径与传热管内径比值等参数对流化床的强化传热及除冰性能的影响也尚待进一步研究。因此, 流化床制冰淡化技术尚存在较大的优化空间。

参考文献

- [1] 袁丹, 丁际昭, 丁力. LNG 冷能高效利用发展策略研究 [J]. 广东化工, 2017, 44(357): 110-118.
- [2] 何国庚, 吴锐, 柳飞. 冰浆生成技术研究进展及实验初探 [J]. 建筑热能通风空调, 2006, 25(4): 22-27.
- [3] Pronk P, Infante Ferreira C A, Witkamp G J. Mitigation of ice crystallization fouling in stationary and circulating liquid-solid fluidized bed heat exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53: 403-411.
- [4] Meewis J W, Infante Ferreira C A. Validation of the use of heat transfer models in liquid/solid fluidized beds for ice slurry generation [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46: 3683-3695.

(下转第 205 页)

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. ■