

LNG 空温式气化器传热问题的研究进展

徐少杰^{1,2} 高文学² 严荣松² 张欢¹ 王艳² 杨林²

1. 天津大学环境科学与工程学院 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司·城市燃气热力研究院

摘要:空温式气化器在运行过程中的传热恶化问题有可能会带来灾难性的后果,是液化天然气再气化过程中必须要重视和解决的难题。为此,在全面回顾和总结空温式气化器传热问题研究成果及现状的基础上,重点阐述了管内流动沸腾传热特点及其传热系数关联式的发展,分析了管外结霜过程及其对空温式气化器换热性能的影响,对当前气化器研究所面临的问题进行了梳理和总结,并对进一步解决传热恶化问题的研究方向进行了展望。研究结果表明:①以甲烷为主的多组分烷烃混合有机物的管内流动沸腾是未来的研究难点;②对于 LNG 竖管内的流动沸腾试验还需要开展更加深入的研究,除了热流密度、干度、质量流量以外,还应包括入口压力、管径、管长以及内壁面粗糙度的影响;③管外结霜是造成气化器传热恶化的主要原因;④完善低温表面抑霜技术是改善气化器传热恶化的重点,对于空温式气化器设计、制造以及运行均具有普遍的理论指导意义;⑤疏水材料的抑霜除霜剂比亲水材料的抑霜除霜剂更加适用于空温式气化器。结论认为,该研究成果有助于破解空温式气化器传热恶化难题。

关键词:液化天然气;空温式气化器;传热恶化;星形翅片管;流动沸腾传热;换热性能;结霜与抑霜;疏水材料

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.06.014

Research progress on the heat transfer of ambient air LNG vaporizers

XU Shaojie^{1,2}, GAO Wenxue², YAN Rongsong², ZHANG Huan¹, WANG Yan², YANG Lin²

(1. School of Environmental Science & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd./City Gas & Heating Technology Research Institute, Tianjin 300384, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 40, ISSUE 6, pp.130-140, 6/25/2020. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The heat transfer deterioration of an ambient air vaporizer in the process of its operation may bring about disastrous consequences, so this difficulty shall be concerned and solved in the process of LNG regasification. After reviewing and summarizing the research achievements and status of the heat transfer problems in ambient air vaporizers, this paper mainly illustrated the characteristics of the flow boiling heat transfer inside the tube and the development of its heat transfer coefficient relation. Then, the frosting process outside the tube and its effect on the heat exchange performance of an ambient air vaporizer were analyzed. Finally, the current problems in the research of vaporizers were analyzed and summarized, and the research direction for further solution of heat transfer deterioration was prospected. And the following research results are obtained. First, the flow boiling of the organic mixture of multi-component alkane dominated by methane inside the tube is the research difficulty in the future. Second, the experiments on the flow boiling inside the LNG vertical tube shall be researched further. And besides heat flow density, dryness fraction and mass flow rate, the effects of inlet pressure, tube diameter, tube length and inner wall roughness shall be investigated. Third, frosting outside the tube is the main reason for a vaporizer's heat transfer deterioration. Fourth, improving the low-temperature surface anti-frosting technology is the key point to solve heat transfer deterioration, and it is of universal significance in theoretically guiding the design, manufacturing and operation of ambient air vaporizers. Fifth, compared with the frost restraining and removing agent with hydrophilic material, the one with hydrophobic material is more suitable for an ambient air vaporizer. In conclusion, the research results are conducive to solving the heat transfer deterioration of ambient air vaporizers.

Keywords: LNG; Ambient air vaporizer; Heat transfer deterioration; Star-shaped fin tube; Flow boiling heat transfer; Heat exchange performance; Frosting and anti-Frosting; Hydrophobic material

基金项目:国家重点研发计划课题“城市燃气独立供应场站关键设施性能检测与评价技术研究”(编号:2018YFF0215004)。

作者简介:徐少杰,1989年生,博士;主要从事城镇燃气输配方面的研究工作。地址:(300384)天津市南开区华苑产业园区桂苑路16号。电话:(022)83711118 转 8316。ORCID:0000-0003-0291-0625。E-mail:xushaojie10@126.com

通信作者:高文学,1972年生,正高级工程师;主要从事燃气输配、燃气燃烧与应用技术的研究与开发工作。地址:(300384)天津市南开区华苑产业园区桂苑路。E-mail:wenzuegao@163.com

1 研究背景

2018 年我国进口 LNG $5\,300 \times 10^4 \text{ t}$, 是目前全球最为活跃的天然气和液化天然气市场之一。当前, 我国在运行的 LNG 大型接收站有 20 座, 在建的有 3 座, 另有 3 座已完成规划, 绝大多数都分布在东部沿海地区^[1]。除此以外, 已有不同规模的中小型城镇 LNG 气化站分布在全国各地, 以点供的形式为工业用户和居民用户提供燃气。无论是在大型的 LNG 接收站还是中小型的 LNG 卫星站, 气化器均是实现 LNG 升温、再气化所必需的主要核心设备。因热媒不同, 气化器通常分为多种形式, 包括开架式气化器、空温式气化器、浸没燃烧式气化器以及中间流体式气化器等。其中, 空温式气化器 (Ambient Air Vaporizer, AAV), 顾名思义是以空气作为热源加热 LNG, 其多用于中小型的 LNG 卫星接收站和气化站, 具有投资建设和维护成本低、能量消耗少、污染物排放少、适用区域广等特点。

尽管空温式气化器本质上属于间壁式换热器, 但是由于其在工况、工质和结构方面的特殊性, 使得传统的工程应用经验和理论分析并不能准确地对其运行特性进行描述。国内的气化器生产厂商多奉行拿来主义和经验主义, 在空温式气化器的设计和选型方面, 仅依据应用地区的全年最低温度和最大气化负荷, 采用简略的换热器计算公式和经验设计系数获得换热所需的总面积, 然后以并列垂直向上或并列蛇形来布置翅片管, 从而完成其设计和生产。事实上这种忽略气候条件、地理位置以及运行特征的做法, 往往会导致气化器无法完全满足用户的需求, 甚至出现结构性破坏引发天然气泄漏、爆炸事故。正是由于缺乏对气化器运行过程实质性的、全面的、深入的认识, 生产厂商无法结合具体情况对用户进行科学指导和培训, 更不会有效提高气化器的利用效率和使用寿命。

为了解决空温式气化器在运行过程中可能出现的各种问题, 研究者们对空温式气化器的传热过程展开了全面的探索研究, 其中不仅包括了星形翅片管 (图 1) 内部气液两相流动沸腾传热的机理分析、试验研究以及数值模拟计算, 也包含了对翅片管外霜层的出现及生长特性分析, 同时还有将空温式翅片管束作为统一整体进行传热研究。这些研究成果不仅有利于从更深层面揭示空温式气化器传热问题的本质, 也可进一步推动气化器技术的发展应用, 对于气化器的开发、设计、制造、运行和维护具有切实的借

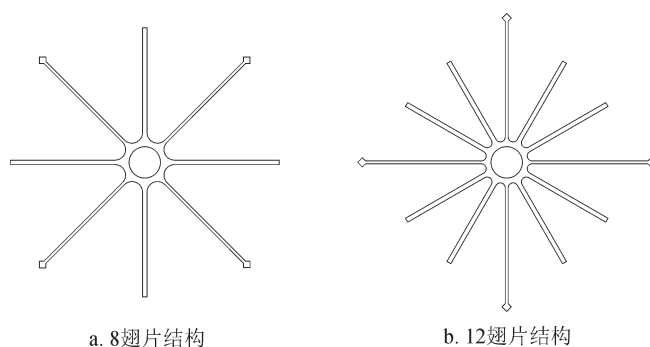


图 1 星形翅片管横截面图

鉴意义, 为未来无人化值守和智能化控制奠定基础。因此, 笔者从空温式气化器的传热问题切入, 通过对空温式气化器当前所面临的问题进行分析, 然后对上述的研究内容进行综述, 评述当前的研究成果以及不足之处, 最后对气化器的发展进行展望。

2 空温式气化器传热问题

空温式气化器的工作原理是利用环境空气与管内低温 LNG 工质之间的温度差进行热量交换, 进而使液态的天然气发生气化变为气态, 其中涉及 3 个基本传热形式, 即导热、对流和辐射。从管内到管外换热方式依次为: 管内流体沸腾对流换热、管壁内外表面 (包括翅片表面) 之间的导热、翅片管外表面和外界环境之间的自然对流换热以及辐射传热。空温式气化器的整体传热系数由上述 3 种传热过程串联组成。相较于管内沸腾对流换热与管外自然对流及辐射换热, 翅片管内外壁之间的导热过程较为简单。因此, 空温式气化器的传热问题主要集中在管内两相流的对流沸腾特性和传热系数经验关联式的发展以及管外深冷结霜机理的研究与热阻分析。由于这两项难点的存在, 对空温式气化器全面、深入、详细的探索一直是近年来研究的热点。管外的辐射传热系数尽管易于计算, 但常常被研究人员所忽略, 经过计算发现管外的辐射换热和对流换热处于相同的数量级。因此, 并不能将其忽略不计。

关于管内气液两相流动沸腾传热研究已经历了多年的发展, 最初管内的流动工质主要是水和空气等, 后来随着制冷行业的快速发展又有不同类型的烷烃类制冷剂受到研究人员的重视。但是到目前为止笔者发现关于 LNG 的低温多组分烷烃在管内流动沸腾传热的试验研究寥寥无几, 与之对应的传热系数经验关联式更是乏善可陈。由于管内工况的低温特性以及 LNG 工质特殊的热物性, 其他烷烃类制冷

剂的关联式并不能准确地预测 LNG 的两相流动沸腾传热。因此,研究设计人员只能以自身经验结合其他工质的传热系数经验公式对空温式气化器的换热面积进行粗略的计算,这也导致了气化器往往气化能力不足或者严重过剩的问题。

当前国内空温式气化器的设计过程中,虽然考虑了当地的最低气温,但是往往忽略了其他气候因素,特别是环境湿度、空气风速等至关重要的参数。而这些环境气候参数对于管外结霜问题有着不可忽视的影响。当翅片管外霜层从出现到不断发展时,翅片管与空气之间的传热便会因为霜层热阻的存在而受到削弱。当霜层在气化器表面达到一定的面积并生长到一定的厚度时,气化器出口天然气温度会小于最低要求温度,此时不得不停机并切换至备用设备。此外,由于翅片管外壁与周围环境存在较大的温差,且冰晶的表面发射率较高,导致周围环境的热辐射与对流换热处于相同的数量级,是必须考虑和计算的传热项。仅仅依靠经验系数放大空温式气化器的换热面积,以弥补环境因素带来的不良影响,造成的结果往往是气化器气化能力不足或气化器面积过大造成浪费,很难做到与实际需求相匹配。

对于空温式气化器传热问题研究的严重滞后,使得 LNG 产业的发展受到一定程度的制约,造成空温式气化器的设计和选型缺乏科学的指导和支持。因此,将对上述热点问题的研究概况和进展情况进行逐一介绍和评述。

3 空温式气化器管内流动沸腾传热

LNG 在翅片管内受热蒸发气化不可避免地会经历气液两相流动沸腾换热阶段,这是最常见、最复杂的流动形态。竖直上升翅片管中的流型会随着气液两相的相对含量、相对位置、相对温度的不同出现较大的差异,从下到上依次可能出现泡状流、弹状流、搅拌流、环状流、环形雾状流以及弥散流^[2],如图 2 所示。而常见的空温式气化器多为蛇形布置,除了

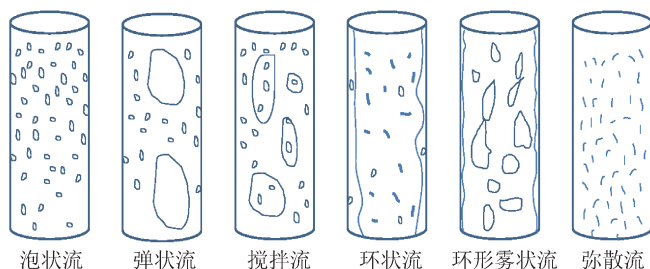


图 2 竖直上升管中的气液两相流型图

竖直上升翅片管,还包含有竖直下降翅片管。竖直下降翅片管仅含有竖直两相流中的 3 大流型,即泡状流、弹状流以及环状流,其传热性能相较于竖直上升翅片管有明显差距^[3]。

3.1 竖直管内流型特征

竖直管内的流型特征是气液两相流研究的重点。Mishima 等^[4]在传统的两相流准则之上,根据流型转换机理,开发出了新的气液两相流流型,提出了完整的理论模型,通过与已有的两相流流型和试验数据相对比,发现新模型既可以很好地符合常压下的水和空气两相流,又能够适用于水和水蒸气在竖直圆管内的两相流动,为管内沸腾两相流流型的研究奠定了基础。以上述常温、高温工质两相流流型为基础,Ozawa 等^[5]研究了低温液氮在竖直上升管内的两相流动沸腾流型,并将流型自下向上依次定义为泡状流、弹状流、环状流和反环状流,通过试验发现液氮在竖直管内的流型图与 Mishima 的研究结果基本相符,这表明在不同工况温度下竖直管内气液两相流的流型有着非常相似的特征。值得警惕的是,在竖直管内气泡不断地增加和聚合,形成弹状流型后可能会发生间歇性的喷发^[6],这种非稳定现象会导致管内压力的波动,对管路会造成结构性的破坏。为了对这种非稳定现象的形成和发展进行探索,Das 等^[7]使用电容测量方法分析管内流体的气相份额,通过分析脉动频谱测定流型变化,并针对试验数据提出了一种分析模型,尽管这在当时具有一定的先进性,但是并不能直观显示管内流型的分布。张华^[8]使用高速摄像机对不同倾斜角度管内液氮气泡的上升速率进行了可视化研究,通过与常温液体中气泡的上升速率相比较反映出低温液体的物理特性,并结合多尺寸组(Multiple Size Group, MUSIG)模型建立了描述管内低温液体气泡的碰撞、聚合过程的数学模型,可以较为准确地预测气泡的特征、尺寸以及分布等。刘亦鹏^[9]研究了低温管道内液氮中 Taylor 气泡的形成,使用粒子图像测速(Particle Image Velocimetry, PIV)测量法对气泡形成的位置、长度和速度进行了可视化研究,探究了流场湍流强度、热流密度、管道内径以及倾斜角度对气泡形成的影响。

低温工质竖直管内流型的分布特征与沸腾流动传热特性有着密切的关系,两者相互作用、相互影响,热壁面为气泡的生长和发展提供热动力,而气泡的脱离、碰撞挤压和融合又对热壁面形成强冷却。同时,管壁的热流密度和低温工质的流速对两相流中的气

泡份额有着直接的影响,使得气泡团的形成而引发流型的改变。对于空温式气化器,要警惕管内气液两相流由于压力波动所带来的不稳定性,这种不稳定性造成的管道振动可能引发设备的疲劳破坏。

3.2 低温工质管内流动沸腾传热

目前关于以 LNG 为主的低温工质在管内的流动沸腾换热研究极少。但是由于 LNG 的主要组分——甲烷在常压的沸点较低 ($-161.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) 与液氮等低温工质的沸点温度 ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) 较为接近,所以 LNG 与其他低温工质在管内的流动沸腾传热存在着相似特征。因此,笔者选择已获得较多研究成果的液氮、液氦作为类比工质,介绍关于低温工质在管内流动沸腾传热特性,主要聚焦于流动沸腾传热机理和传热系数关联式,这对于低温 LNG 管内流动沸腾传热研究具有指导意义。

目前为止,所发展的管内流动沸腾传热机理认为,传热是由两部分组成:一是在管壁表面的核态沸腾,其包含了气化核心的形成、气泡的生长、脱离壁面等过程,主要依赖于壁面上的气化核点,与壁面热流密度的关系密切;二是强制对流蒸发,主要是气液之间边界处的蒸发换热,主要依赖于管内工质的质量流量和含气量,这种传热方式在环状流阶段尤为明显。

经过多年的研究发展,陆续出现了多种不同形式的流动沸腾传热经验公式,因此 Webb 等^[10]对流动沸腾传热关联式进行了总结,将其分为 3 种类型:叠加模型、渐进模型和增强模型。

叠加模型是由核态沸腾和对流蒸发传热系数分别与抑制因子和增强因子相乘,然后进行简单的算数加和计算而得:

$$h = Sh_{nb} + Eh_{ce} \quad (1)$$

式中 h 表示传热系数; h_{nb} 表示核态沸腾传热系数; h_{ce} 表示对流蒸发传热系数; S 表示抑制因子; E 表示增强因子。

尽管不是叠加模型的提出者,但 Chen^[11]发展了两相流动沸腾方程,并对饱和和流动沸腾传热进行了详细的研究。其中,核态沸腾与固体表面的物理特征、表面的过热度以及热流密度相关,此时管内沸腾和池内沸腾并无区别,因此使用 Foster-Zuber 方程计算核态沸腾换热系数;对流蒸发则主要与气液两相的流速和体积分数相关,使用 Dittus-Boelter 方程计算。随着试验数据的不断丰富, Bennett 等^[12]对之前的传热系数关联式进行了修正,主要是增加了核态沸腾

抑制因子的关联式。Chen 提出的传热系数关联式经过了多种工质在竖直向上管内沸腾试验数据的验证,具有计算精度高,适用范围广等优点,理论上可适用于液相的过冷沸腾段到气相的强制对流段,但实际上在干度范围为 $0.7 \sim 1.0$ 时适用性相对较差。

渐进模型是两种传热模式系数指数形式加和计算,其中指数 n 因工质而异,目前还没有确切的理论意义,通常取值介于 $2 \sim 3$, 如下式:

$$h = [(Sh_{nb})^n + (Eh_{ce})^n]^{1/n} \quad (2)$$

Liu 等^[13]在算数叠加模型的基础之上开发出了新的关联式,即渐进模型。该模型对于管内的饱和和流动沸腾和过冷流动沸腾都有比较好的适用性。在核态沸腾换热占据主导地位的传热区域或者以强制对流换热为主的区域,叠加模型和渐进模型的计算结果都比较接近,而两者出现明显差异的地方是在核态沸腾与强制对流大小相当的区域。

增强模式则使用沸腾准则数来表征核态沸腾对综合换热系数的影响,并由其计算的修正因子与强制对流蒸发系数进行乘积,即

$$h = eh_{ce} \quad (3)$$

式中 e 表示修正因子。

Shah^[14]在 1982 年最先提出了这种增强模型。式 (3) 中的修正因子通常取增强因子和抑制因子两者的最大值。与叠加模型中的增强因子和抑制因子计算公式完全不同,增强模型中的计算公式引入了沸腾准则数和含气量等参数。

近年来的沸腾流动传热研究取得了长足的进步,但传热系数关联式基本还是以上述 3 种模型为蓝本,这些关联式对于水和常用的制冷剂有比较好的预测性,但是对于低温工质仍有较大的不确定度。未来在三者基础之上,若要开发研究出通用型传热系数关联式,则仍需要进一步地探究流动沸腾传热的微观机理。

目前对于低温工质在管内的流动沸腾传热研究,多是以单组分两相流为主,譬如液氮、液氧以及液氢等。Klimenko^[15]搜集了一系列液氮、液氢、液氦的管内流动沸腾传热数据,并首次尝试建立低温介质的沸腾对流传热关联式。尽管当时由于数据不充裕等原因,关联式的误差较大,但是为后续低温工质的研究奠定了基础。Deev 等^[16]对比了 Klimenko 的传热系数关联式与自己的试验数据和其他 6 组数据,发现误差在 20% 以内。随着时间的推移,低温介质在管内的沸腾对流传热数据越来越丰富, Shah^[17]将 11 组液氮、液氦、液氢以及液氩在竖直或者水平管内的沸腾数据与自己的经验关联式和 Klimenko 的

经验关联式分别进行了对比分析,结果发现自己提出的关联式能够与其中的 9 组数据进行很好的符合,但是与其他部分数据相比的平均误差过高,最高达到了 59%,而 Klimenko 的关联式与试验数据相差较远,甚至在高压力和高热流密度阶段对气相分数的预测趋势完全错误。Kandlikar^[18]研究了液氮、液氦等在竖直管内的流动传热特性,利用增强模型发展出了一种新的传热系数经验关联式。该经验关联式对于水和其他制冷剂工质有较好的符合特性,但是对于低温液氮和液氦有着不可接受的误差,可能是由于以当时低温条件下的试验测试精度较差。Steiner^[19]在 Kandlikar 的研究基础上对核态沸腾和对流传热分别进行详细研究,并将工质压力、热流密度、管壁粗糙度以及管径尺寸等参数整合进修正方程之中,而对流传热系数主要受气液两相流密度之比和干度的影响。于忠杰^[20]以液氮为工质,对竖直管路中液氮两相流动传热特性进行了系统的研究,通过试验数据对经典的传热系数经验公式进行了验证,发现 Klimenko 经验关系式和 Shan 经验关系式的预测效果相对较好,但仍有较大误差。

通过对比低温工质的试验数据和沸腾流动传热关联式,可以发现大部分关联式的计算值都大于试验值,这可能是由于对核态沸腾和对流蒸发的耦合作用缺乏深层次的研究。尽管核态沸腾在传热过程中占据着主导作用,但是核态沸腾和对流蒸发的相互作用并不像 3 种模型所描述的那么简单,这需要更多的试验数据支撑理论的进一步发展。然而,相较于非低温流体力工质,低温流体力工质的沸腾流动传热研究报道的试验数据依然比较欠缺,而且由于试验条件的差异性,从不同文献中收集的试验数据往往缺乏一定的连续性,这对低温沸腾传热关联式的研究造成了很大的困扰。

3.3 烷烃类工质沸腾传热

针对烷烃类工质的流动沸腾传热研究大多集中在低温制冷领域,且多是以丙烷、戊烷和辛烷等为主,涉及甲烷的研究极少。这些烷烃类工质与 LNG 相比,除了各组分所占比重有明显的差异外,两类液相之间的泡点温度也有较大的差别。因此,并不能将无甲烷的液相烷烃类混合物的流动沸腾传热理论直接应用于 LNG,同时相关的传热预估关联式也不可直接采用。然而,尽管乙烷、丙烷等烷烃在 LNG 中所占比重较小,但它们同样也是 LNG 中不容忽视的组成部分。因此,对乙烷和丙烷等烷烃类混合物流动

沸腾传热的探究,对深入了解 LNG 流动换热特性也有着积极意义。

乙烷是 LNG 中含量仅次于甲烷的轻烃组分,对于乙烷的研究主要是将其作为低温级制冷剂(R170)展开的。Zou^[21]针对水平管内的乙烷饱和流动沸腾传热展开了试验研究,并系统地分析了质量流量、热流密度、含气率对传热系数的影响,结果发现乙烷在水平管内的传热过程主要是以核态沸腾为主,通过将试验数据与 3 种关联模型中选取的 9 个常见关联式进行比较分析,得出渐进模型和增强模型的关联式与试验数据符合较好,而叠加模型预测效果较差。姚远等^[22]利用高速摄影机研究了乙烷的核态沸腾过程中气泡的生长、脱离和上升行为特征,通过试验绘制出单个气泡的生长直径与时间的变化关系,采用分段预测模型发现气泡脱离直径、频率与壁面热流密度之间呈现正相关。但是事实上除了以上的考察参数外,气泡行为还与管内压力、壁面粗糙度以及工质的物性参数有直接关系,这些也都是影响管内流动沸腾换热的影响因素,若能够在关联式中引入这些因素,即可进一步提高其预测的准确性。

丙烷可作为环保型的低温制冷剂用于代替 R22 和 R502。Shen 等^[23]针对丙烷的核态沸腾传热进行了研究,采用改变圆管壁面的热流密度使管内的丙烷经历了自然对流到核态沸腾的转变,并且与前人报道的试验值和计算值进行了比较,两者的误差在 20% 以内,较为接近。Choi 等^[24]探究了丙烷在水平光滑微通道内流动沸腾换热特性及压降特点,试验数据表明沸腾换热系数随着内管径的增加而减小,但是随着液体饱和温度的上升而增大。流动沸腾换热系数与 Shah^[14]发展的关联预测公式能较好地符合,并在叠加模型的基础上重新发展出了新的沸腾换热模型关联式,平均误差仅有一 2.42%。与此相对应,Wang 等^[25]将水平管的内径扩大至 6 mm,并对压降和传热系数进行了全面的研究,试验表明传热系数随着质量流量和热流密度的增加而增大,将试验数据与 5 个常用关联式对比后发现,Liu-Winterton 模型能够与试验数据较好地匹配,相对误差小于 10%。

除乙烷、丙烷等单质外,烷烃类混合工质的流动沸腾传热也获得了较多的研究。乙烷、丙烷混合工质在水平管内的饱和流动沸腾传热特性与单质的沸腾传热有着明显的区别,特别是对于此类非共沸混合物,陈高飞等^[26]的试验研究表明当混合物中乙烷的摩尔浓度比升高时,混合物的传热系数逐渐下降,在靠近泡点和露点温差最大的位置,传热系数

的下降幅度也最大。Wen^[27] 对水平管内的丙烷、丁烷以及两者混合物的流动沸腾传热展开了试验研究，探讨了质量流速和热流密度对于沸腾传热系数的影响，并以增强模型为基础开发出新的传热系数关联式。对于混合工质，由于热物性的差异，需要通过引入修正因子使得预测值与实验值之间的平均误差在 11.15%。除了丙烷与乙烷混合物、丙烷与丁烷混合物，丙烷与戊烷等混合工质也获得了一定的研究，Shin 等^[28] 针对包括丙烷和戊烷在内的多种单质及混合物的流动沸腾传热系数进行了相关试验，结果表明在低气相分数的区域，传热系数受到热流密度的影响较大，在高气相分数的区域，传热系数几乎不受其影响，从侧面印证了 Chen 发展的两相流沸腾模型的合理性。然而在与 Gungor 等^[29] 的传热系数关联式对比以后，发现实验值小于预测值，且平均误差较大，超过了 30%。

值得注意的是，近年来随着 LNG 工业的快速发展，涉及到甲烷的沸腾传热研究已经开始逐步显现。Gong 等^[30] 将甲烷以及甲烷与乙烷、丙烷、异丁烷等组成的二元或多元混合物作为研究工质，结果表明对于非共沸的多元混合物，随着泡点与露点之间的

温差变大，沸腾传热系数减小的幅度也变大，试验数据与半经验的关联式预测值相比，误差在 25% 左右。陈东升等^[31] 针对 LNG 在竖直上升管内和水平管内的流动沸腾传热和压降特性进行了实验和理论研究，并指出质量流量对 LNG 管内流动沸腾传热系数影响较大，特别是在较高的流量工况下，传热系数随干度的增加呈现先增大后减少的趋势。

针对 LNG 的低温特性和烷烃类的有机特点，到目前为止可适用于管内 LNG 流动沸腾传热的经验关系式主要有 4 种（表 1）。其中，Chen 关联式在管内干度大于 0.7 时，准确性大幅下降，在 LNG 的蒸发沸腾后期适用性变差；Gungor 关联式使用的工质多为常规制冷剂，其饱和温度相较于 LNG 的温度较高；Zou 关联式应用于空温式 LNG 传热系数研究的最大障碍在于其关联式对应的流型为水平管而非竖直管，所以其准确度仍需进一步验证。因此，到目前为止，Klimenko 关联式最适合应用于空温式 LNG 管内沸腾传热的研究。可以预见，随着 LNG 快速发展的迫切需求以及实验技术的不断提高，LNG 管内的流动沸腾传热机理会被不断揭示，与之相关的传热模型及关联式也会日趋丰富和完善。

表 1 4 种主要管内流动沸腾传热经验关系式表

经验关联式名称	传热机理	适用工质
Chen 关联式	核态沸腾与液膜对流蒸发传热叠加模型	水、制冷剂、有机物质
Klimenko 关联式	核态沸腾与液膜对流蒸发传热叠加模型	水、液氮、制冷剂
Gungor 关联式	池沸腾与液膜对流传热渐进模型	水、有机物质
Zou 关联式	池沸腾与液膜对流传热增强模型	乙烷或丙烷的烷烃有机物

4 空温式气化器管外结霜特性

空温式气化器在运行时，翅片管外表面的温度较低，有时甚至低至 -120 ℃，此时空气中的水蒸气会在翅片管的外表面快速凝固形成冰晶，随着时间的推移逐步生长、累积形成霜层（图 3）。如此，除辐射换热外，空温式气化器外表面的换热形式就从空气与翅片管间的自然对流换热转变为翅片管与霜层之间的导热以及霜层与空气之间的对流换热。显然霜层的存在既会导致翅片管与空气之间的换热热阻增加，又会使空气的流通截面变窄，增大空气流经气化器的阻力，这会造成空温式气化器的气化能力严重下降，有时不得不停机除霜。无论是从设计制造还是运行维护的角度来看，对于空温式气化器结霜问题的研究，



图 3 翅片管结霜图

均有利于实现节能降耗、节省制造材料、降低企业成本和提高经济效益。

4.1 结霜机理

结霜的本质是空气中水蒸气的相变,其受到多种因素的影响,包括冷面温度、环境空气湿度和温度以及空气的流速等。其过程通常分为结晶生长期、霜层生长期以及霜层老化期。当湿空气接触到冷壁面时,由于温度下降至露点,空气中的水蒸气会冷凝液化形成水层。若温度进一步下降并低于水的三相点,冷壁面会形成冰层。水蒸气继而会在冰层上发生凝华现象,

形成结晶胚胎。结晶胚胎在冰层上呈均匀点状分布,并沿着冷壁面的法线方向以柱状增长。柱状的霜晶体生长到一定高度以后,开始分叉形成枝状结晶。随着枝状结晶的发展,在其上部就会形成平坦的网状霜层。由于霜层热阻较大,其顶部温度会逐渐上升至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时霜层融化,生成的水进入霜层内部后形成冻冰,霜层的导热率因而增大,霜层表面继续受冷结霜,如此形成融化—结冰—融化的老化过程(图4)。

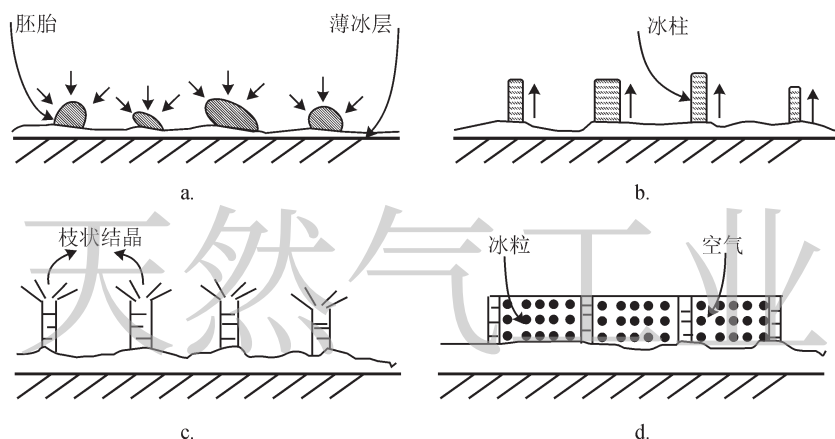


图4 霜层形成过程示意图^[32]

为了探究霜层的生长规律,国内外研究学者不断提出各种形式的霜层物理模型,包含有多孔模型、冰柱模型、多空—冰柱复合模型以及复杂的并串联上下两层模型。Jones等^[33]将霜层看作多孔的物质,基于水蒸气分子在霜层中的扩散理论,结合能量与质量平衡方程,开发出新的多孔理论模型。该模型可以适应环境参数的变化,能够很好地符合试验数据的变化趋势。Schneider^[34]使用冰柱模型研究了霜层在冷表面的增长速率,并指出霜层的厚度与雷诺数和蒸汽压无关,仅遵循冰晶的生长规律,其发展的模型方程能够与前人的试验数据很好地符合,误差在3.7%以内。孙玉清等^[35]针对上述几种霜层结构模型的优缺点,依据理论和试验研究,认为霜层的上部为冰层,下部为并列的冰柱与空气的混合,其建立的霜层导热系数模型更加接近于实际问题。

4.2 结霜对翅片管换热的影响

翅片管结霜的问题一直困扰着人类的生产与生活,从工业生产中的深冷换热器到家用空调的蒸发器,尤其在低温制冷领域,此类问题的研究极为丰富。Kondepudi等^[36]探究了霜层在翅片管换热器上生长的影响因素,基于对数平均焓差的方法,在结霜条件下,量化了传热系数与空气湿度、空气迎面流速以及翅片间距之间的关系,较高的空气湿度、空气迎

面流速,较大的翅片密度均会促使翅片管传热系数的增大。Gatchilov等^[37]研究了不同翅片间距的换热器结霜情况,发现换热器的换热系数随着空气湿度的增加呈现先上升后下降的趋势,这与后来多个研究人员成果相印证,原因是初始条件下,霜层的形成增大了翅片管的换热面积,强化了换热效果,但随着霜层的进一步生长,其热阻较大,并逐渐发展成主要影响因素,导致换热效果恶化。

空温式气化器常用的星形翅片管近年来也获得一定的研究。Jeong等^[38]对空温式气化器的翅片进行了数值模拟计算,将翅片角度和翅片厚度作为研究参数,分析了霜层厚度对传热系数的影响,计算结果能够很好地与试验数据相匹配。因此,可以用来对气化器进行优化设计。除了数值计算,Jeong等^[39]通过空调等设备设计不同季节的大气环境,研究不同时期空温式气化器的换热特性,试验结果表明气化器外表面结霜受到空气的湿度、迎面速度以及管内工质的流速和温度等因素的影响,这与Kondepudi研究结论保持了一致性。Lee等^[40]模拟和分析了中等规模的空温式气化器表面结霜特性,开发了一种动力学数值计算模型,并计算了霜层的厚度和LNG不同位置的温度随时间的变化,模拟结果与试验结果之间的平均误差在5.5%以内。

此外,国内的专家学者对空温式翅片管的结霜问题也做了部分研究。苏海林^[41]针对星形翅片管换热器的结霜过程做了详细的研究,试验表明结霜量随着时间呈现抛物线增长,霜层厚度在初期快速增长,而后霜层的生长逐渐平缓。尽管苏海林建立了翅片管结霜过程中的数学理论模型,并计算了霜层厚度、密度与导热率之间的关系,但是将霜层密度简化为与霜层表面温度有关的经验关系式的做法过于简略,因为随着霜层的生长与老化的交替进行,其密度必然发生明显改变。赵平^[42]设计并完成了星形翅片管结霜特性研究实验平台的建设,通过改变环境条件以及低温工质的流量和压力,研究翅片管表面霜层的生长规律及结霜对翅片管换热性能的影响,发现若管内低温工质流量保持稳定,表面霜层将不会融化结冰,而空气受冷后形成的下降气流会冲刷部分霜层使其脱落,且低温工质的流量越大,下降气流越明显,霜层的脱落区域就越大,这对气化器的除霜研究具有一定的借鉴意义。李澜^[43]在已有的霜晶生长和霜层结构模型之上,建立了霜层生长过程中的质量和能量守恒方程,并引入了霜层导热系数和霜层表面温度的经验关联式,使方程组得以封闭可解,得出霜层的物性参数随时间的变化规律,计算了各个因素对霜层热阻的影响。李澜发现霜层外表面与周围环境之间的辐射传热系数与外表面的自然对流换热系数有着相同的数量级,因此通常忽略辐射换热的做法并不可取。但是在计算辐射换热系数时,作者却使用的是翅片外壁面温度和冰表面发射率,这种计算方式值得商榷。王明秋^[44]进行了结霜工况下低温工质在空温式气化器内的气化试验,分析了管内工质的气化规律及其与翅片表面霜层生长的相互影响,试验结果表明在翅尖位置最先出现霜层,沿管径方向翅根位置最晚结霜,在结霜初期霜层厚度的平均增长率为0.16 mm/s,结霜中期其平均增长率为0.07 mm/s。相较于前人的气化器表面结霜测试平台,王明秋的试验数据更为丰富和全面,包含霜层的厚度、翅片表面整体的温度、翅端温度以及换热空气的温度和相对湿度,但是仍然缺乏霜层密度的测试数据。

对于空温式 LNG 气化器而言,根据湿空气在翅片管外传热与传质过程获得霜层的质量增长速率方程以及结霜过程中的能量守恒方程,但是仅靠这两类方程组无法获得相关的数值解,因此需要建立霜层导热系数和霜层密度之间的经验关联式,以使得方程组封闭。除了可以基于实验结果建立两者之间的经验关系式外,根据霜层的孔隙率这一关键参数,

也可以建立霜层导热系数与其密度之间的关系,这是比较常见的数值计算处理方法。

4.3 翅片管换热器的抑霜除霜

当霜层导致空温式气化器的换热效果恶化后,通常就需要启动备用设备,并对结霜气化器进行人工除霜。尤其在寒冷的冬天,除霜过程几乎是每台空温式气化器都需要经历的阶段。常规的换热器抑霜除霜方法有两种:一种是引入其他热源对换热器表面的霜层加热实施融霜;另外一种就是改善翅片管的物理结构和材质特性,减少霜层的累积或者使其阶段性脱落。当空温式气化器停止运行后,可借助于周围空气的热量进行融霜,但是这种融霜方式受季节和环境的影响较大,融霜时间难以控制,严重时可能需要增加备用设备的台数。而采用其他热源融霜,较为方便的是利用部分天然气燃烧释放的热量加热管内的 LNG,但是这种方式存在能耗高、设备复杂、有污染的弊端。由此可见,第二种除霜抑霜方法更具有吸引力。

基于 Barthlott 等^[45]提出的“莲花效应”,许多研究人员利用试验证实了疏水表面具有一定的抑霜研究特性。Wu 等^[46]通过试验探究了霜层在疏水表面的分布及生长,结果表明疏水部位霜晶出现较晚,结晶点较少。但是,疏水表面对于结霜的抑制作用仅在结霜初期有效,一旦疏水层被冰层覆盖,疏水表面即失去作用。但上述研究是基于水平表面,而对于空温式气化器竖直翅片表面而言,若被疏水涂层覆盖,其表面最初形成的冷凝液滴会发生凝并的现象,从而形成直径较大的液滴,在重力作用下大体积的液滴可沿表面快速滚落,这样即可抑制冰层的形成,从而抑制霜层的形成。随着纳米技术的快速发展,纳米结构超疏水材料同样被用于抑霜研究。丁云飞等^[47]研究了7种不同的纳米材料抑霜效果,结果表明全纳米结构表面的抑霜特性最好。纳米结构的疏水表面不但具备更强的耐蒸汽冷凝能力,还会使冷凝液滴发生自弹跳现象^[48-49]。一般的疏水涂层在结霜—融霜反复交替出现的条件下,由于受到低温—常温交变载荷的作用,可能会形成表面老化脱落现象,但是纳米结构疏水表面却具有相当好的耐久性^[50-51],具备在空温式气化器上应用的前景。

除了疏水表面,亲水表面也可以抑制霜层的形成。因为亲水涂层可以吸附大量的凝结水,并且还可以储存部分潜冷,使得吸附的水在-20℃时不发生结冰。Liu 等^[52-53]试验开发出一种强吸水抑霜涂料,

相较于之前的吸水涂层,抑霜效果和使用寿命有了显著提升,但是在低温设备上应用时由于吸水能力有限,导致抑霜能力不断退化。亲水表面涂层的抑霜效果与涂层的厚度有较大的关联,要达到较好的抑霜效果就需要一定的厚度。但是厚度较高的涂层表面相对比较柔软,抗冲击的性能较差。尽管已有许多研究通过改进涂层材料的生产工艺和组分比例,不断降低所需涂层的厚度,但是亲水涂层依然存在着先天性的不足。例如吸附大量水的涂层在短时间内无法完全干燥,当第二个工作循环开始时,亲水涂层的吸水能力就受到严重的削弱,如此往复其抑霜能力会逐渐消失。

无论是疏水涂层还是亲水涂层,其生产工艺要求均比较高,高昂的制作成本可能会阻碍在空温式气化器上的应用。不借助其他特殊材料,而直接对铝翅片表面进行改性,使其形成疏水表面将会更具有应用前景。汪峰等^[54]采用氢氧化钠溶液刻蚀法,制备了接触角的疏水性铝翅片,揭示接触角为 $90^{\circ} \sim 160^{\circ}$ 内的4组疏水性铝翅片表面对结霜的影响,结果表明翅片表面的接触角越大,凝结液滴形成的越晚,抑霜效果越好。这对于未来开发出具有抑霜作用的空温式气化器有一定的借鉴和指导意义。

5 结论

1) 国内外专家学者对低温工质的管内流动沸腾传热进行了大量的试验研究和理论分析,但是关于LNG的竖直接管内流动沸腾试验研究较少,更多的是采用流体计算软件进行的数值模拟计算,且计算过程中将LNG定义为单一组分虚拟物质,不求解组分输运方程。已经发展出的低温工质流动沸腾传热关联式,可以为LNG的流动沸腾研究提供一定的借鉴和参考意义,但由于工质的热物性彼此不同,并不能直接使用已有传热关联式。目前关于LNG的热物性试验数据还很欠缺,尽管已有较多采用不同混合规则的热物性计算关联式,但都因缺乏与试验数据的对比而无法保证准确性,这给LNG流动沸腾传热研究带来困难。对于LNG竖直接管内的流动沸腾试验还需要开展更加深入的研究,除了热流密度、干度、质量流量,还应包括入口压力、管径、管长以及内壁面粗糙度的影响。LNG作为非共沸混合物,在发生沸腾相变时,气相与液相之间的轻重组分浓度有着较大的不同,由此引起的传质扩散阻力会对核态沸腾和对流蒸发造成消极影响,因此LNG混合物中

的传质问题非常具有研究的必要。

2) 空温式气化器的管外结霜是一种非常复杂的物理现象,研究人员已经提出了多种结霜结构模型,从传热、传质的角度进一步揭示了冷壁面上的结霜过程和生长机理,这对于深入了解空温式气化器外翅片管的结霜过程有积极意义。但是,目前的结霜机理研究多是基于水平平板的结霜问题,而对于自然对流条件下的竖直表面结霜还需要进一步的探讨。特别是对于空温式气化器外表面形成下降冲刷气流时,翅片表面的结霜过程有很重要的研究意义。对于空温式气化器结霜试验的测量还需要尽可能地准确测试霜层的密度,特别是经历了老化阶段后的密度,这对于霜层的导热系数影响较大。

3) 相对于管内流体沸腾流动换热系数而言,管外的空气侧换热系数较低,若要强化空温式气化器的换热能力,可先重点提高空气侧换热系数,而最为直接和有效的方式就是降低翅片管外霜层热阻。目前的抑霜除霜方法多是以试验探索为主,疏水材料比亲水材料更加适合用于空温式气化器。这些新技术和新材料对于抑霜除霜有着良好的应用前景,但是仍然面临着寿命和稳定性的问题,距离实际的推广与应用仍有较长的路途。此外,抛弃涂层而直接通过蚀刻形成疏水表面,与涂层相比应该更具优势,既可以提高疏水表面的寿命,又可以减少额外的热阻。这可以作为未来气化器翅片表面疏水处理的优先发展方向,且需要通过试验进一步探索研究。

参 考 文 献

- [1] Petroleum-Economist, Freereport LNG. World LNG factbook 2019 edition[C]//19th International Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas, 1-5 April 2019, Shanghai, China.
- [2] 王经. 气液两相流动态特性的研究[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2012.
WANG Jing. Research on the dynamic behavior of gas-liquid two-phase flow[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2012.
- [3] KLIMENKO V V, SUDARCHIKOV A M. Investigation of forced flow boiling of nitrogen in a long vertical tube[J]. Cryogenics, 1983, 23(7): 379-385.
- [4] MISHIMA K, ISHII M. Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1984, 27(5): 723-737.
- [5] OZAWA M, ASAO Y, TAKENAKA N. Density wave oscillation in a natural circulation loop of liquid nitrogen[M]//Instabilities in multiphase flows, Gouesbet G, Berlemont A, eds., Boston: Springer, 1993: 113-124.

- [6] 张亮, 林文胜, 鲁雪生, 等. 低温液体输送系统间歇泉现象机理分析与消除措施[J]. 低温与超导, 2002, 30(2): 1-6.
ZHANG Liang, LIN Wensheng, LU Xuesheng, et al. Physical mechanism and elimination of the geysering effect in cryogenic liquid transfer system[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2002, 30(2): 1-6.
- [7] DAS R, PATTANAYAK S. Bubble to slug flow transition in vertical upward two-phase flow of cryogenic fluids[J]. Cryogenics, 1995, 35(7): 421-426.
- [8] 张华. 垂直管道低温汽-液两相流动弹状流型及动态特性的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
ZHANG Hua. Study on cryogenic slug flow and dynamic flow characteristics in vertical pipes[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [9] 刘亦鹏. 低温气液两相弹状流流动特性和流场结构的实验及数值研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
LIU Yipeng. Experimental and numerical study on the flow characteristics and flow structure of cryogenic gas-liquid slug flow [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [10] WEBB R L, GUPTA N S. A critical review of correlations for convective vaporization in tubes and tube banks[J]. Heat Transfer Engineering, 1992, 13(3): 58-81.
- [11] CHEN J C. Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow[J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 1966, 5(3): 322-329.
- [12] BENNETT D L, CHEN J C. Forced convective boiling in vertical tubes for saturated pure components and binary mixtures[J]. AIChE Journal, 1980, 26(3): 454-461.
- [13] LIU Z, WINTERTON R H S. A general correlation for saturated and subcooled flow boiling in tubes and annuli, based on a nucleate pool boiling equation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1991, 34(11): 2759-2766.
- [14] SHAH M M. Chart correlation for saturated boiling heat transfer: Equations and further study[J]. ASHRAE Transactions, 1982, 88(1): 185-196.
- [15] KLIMENKO V V. Heat transfer intensity at forced flow boiling of cryogenic liquids in tubes[J]. Cryogenics, 1982, 22(11): 569-576.
- [16] DEEV V I, ARCHIPOV V V, NOVIKOV V N. Heat transfer at nitrogen boiling in condition of forced flow[J]. Teploenergetika, 1984, 3: 26-29.
- [17] SHAH M M. Prediction of heat transfer during boiling of cryogenic fluids flowing in tubes[J]. Cryogenics, 1984, 24(5): 231-236.
- [18] KANDLIKAR S G. A general correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes[J]. Journal of Heat Transfer, 1990, 112(1): 219-228.
- [19] STEINER D. Heat transfer during flow boiling of cryogenic fluids in vertical and horizontal tubes[J]. Cryogenics, 1986, 26(5): 309-318.
- [20] 于忠杰. 竖直圆管内液氮两相流动沸腾摩擦阻力及传热特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
YU Zhongjie. Study on flow friction and characteristics of heat transfer of liquid nitrogen boiling two-phase in vertical circular tube [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [21] ZOU Xin, GONG Maoqiong, CHEN Gaofei, et al. Experimental study on saturated flow boiling heat transfer of R170/R290 mixtures in a horizontal tube[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(2): 371-380.
- [22] 姚远, 公茂琼, 陈汉魁, 等. 乙烷核态池沸腾中的气泡生长、脱离和上升[J]. 科学通报, 2018, 63(3): 356-364.
YAO Yuan, GONG Maoqiong, CHEN Hanzhi, et al. Bubble growth, departure and rising of ethane at nucleate pool boiling condition[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(3): 356-364.
- [23] SHEN J, SPINDLER K, HAHNE E. Pool boiling heat transfer of propane from a horizontal wire[J]. International Communications in Heat Mass Transfer, 1997, 24(5): 633-641.
- [24] CHOI K I, PAMITRAN A S, OH J T, et al. Pressure drop and heat transfer during two-phase flow vaporization of propane in horizontal smooth minichannels[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(5): 837-845.
- [25] WANG Sheng, GONG Maoqiong, CHEN Gaofei, et al. Two-phase heat transfer and pressure drop of propane during saturated flow boiling inside a horizontal tube[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 41: 200-209.
- [26] 陈高飞, 公茂琼, 邹鑫, 等. 乙烷/丙烷混合工质流动沸腾传热研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(9): 1454-1456.
CHEN Gaofei, GONG Maoqiong, ZOU Xin, et al. Study of flow boiling heat transfer of ethane/propane mixtures[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(9): 1454-1456.
- [27] WEN M, HO C Y, HSIEH J M. Condensation heat transfer and pressure drop characteristics of R-290(propane), R-600(butane), and a mixture of R-290/R-600 in the serpentine small-tube bank[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(16): 2045-2053.
- [28] SHIN J Y, Kim M S, RO S T. Experimental study on forced convective boiling heat transfer of pure refrigerants and refrigerant mixtures in a horizontal tube[J]. International Journal of Refrigeration, 1997, 20(4): 267-275.
- [29] GUNGOR K E, WINTERTON R H S. A general correlation for flow boiling in tubes and annuli[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1986, 29(3): 351-358.
- [30] GONG Maoqiong, MA Jia, WU Jianfeng, et al. Nucleate pool boiling of liquid methane and its natural gas mixtures[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(11/12): 2733-2739.
- [31] 陈东升, 石玉美. 0.5 MPa 下液化天然气在竖直圆管中饱和流动沸腾传热[J]. 化工学报, 2014, 65(4): 1199-1207.
CHEN Dongsheng, SHI Yumei. Flow boiling heat transfer of LNG in vertical smooth tube at 0.5 MPa[J]. CIESC Journal, 2014, 65(4): 1199-1207.
- [32] 赵鹏. 竖直星形翅片管霜层生长及传热性能的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
ZHAO Peng. Study of frosting process and heat transfer performance on a vertical star-shaped finned-tube[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [33] JONES B W, PARKER J D. Frost formation with varying environmental parameters[J]. Journal of Heat Transfer, 1975, 97(2):

- 255-259.
- [34] SCHNEIDER H W. Equation of the growth rate of frost forming on cooled surfaces[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1978, 21(8): 1019-1024.
- [35] 孙玉清. 结霜的理论控制及应用[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1997.
- SUN Yuqing. Theoretical control and application of frosting[M]. Dalian: Dalian Maritime Press, 1997.
- [36] KONDEPUDI S N, O'NEAL D L. Effect of frost growth on the performance of louvered finned tube heat exchangers[J]. *International Journal of Refrigeration*, 1989, 12(3): 151-158.
- [37] GATCHILOV T S, IVANOVA V S. Characteristics of the frost formed on the surface of finned air coolers[C]//*Proceedings of the XVth International Congress of Refrigeration*. 1979, Venice, Italy.
- [38] JEONG H M, CHUNG H S, LEE S C, et al. Optimum design of vaporizer fin with liquefied natural gas by numerical analysis[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2006, 20(4): 545-553.
- [39] JEONG H M, CHUNG H S, DJAJADIWINATA E, et al. Experimental study on the characteristics of longitudinal fin air-heating vaporizers in different seasons[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2008, 22(5): 981-990.
- [40] LEE Y, PARK J, HAN C. Modeling and analysis of frost growth in pilot-scale ambient air vaporizer[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, 57(17): 5933-5943.
- [41] 苏海林. 低温翅片管换热器表面结霜机理研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008.
- SU Hailin. The surface frosting mechanism research of fin-tube heat exchanger under low-temperature[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2008.
- [42] 赵平. 竖直星型翅片管结霜性能的实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- ZHAO Ping. Experimental study of frosting process on a vertical star-shaped finned-tube[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [43] 李澜. 结霜工况下 LNG 空温式气化器换热研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- LI Lan. Research on the heat transfer of LNG AAVs under frost conditions[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [44] 王明秋. 深冷翅片管气化器表面流场数值模拟与结霜实验研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- WANG Mingqiu. Numerical simulation of flow field and experimental study on frosting on the surface of cryogenic finned-tube vaporizer[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
- [45] BARTHLOTT W, NEINHUIS C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces[J]. *Planta*, 1997, 202(1): 1-8.
- [46] WU Xiaomin, WEBB R L. Investigation of the possibility of frost release from a cold surface[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2001, 24(3): 151-156.
- [47] 丁云飞, 殷帅, 廖云丹. 等. 纳微结构疏水表面结霜过程及抑霜特性[J]. *化工学报*, 2012, 63(10): 3213-3219.
- DING Yunfei, YIN Shuai, LIAO Yundan, et al. Frosting mechanism and suppression on nano/micro-structured hydrophobic surfaces[J]. *CIESC Journal*, 2012, 63(10): 3213-3219.
- [48] WISDOM K M, WATSON J A, QU X, et al. Self-cleaning of superhydrophobic surfaces by self-propelled jumping condensate[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2013, 110(20): 7992-7997.
- [49] 刘天庆, 孙玮, 孙相戡, 等. 超疏水表面上冷凝液滴发生弹跳的机制与条件分析[J]. *物理化学学报*, 2012, 28(5): 1206-1212.
- LIU Tianqing, SUN Wei, SUN Xiangyu, et al. Mechanism and condition analysis of condensed drop jumping on super-hydrophobic surfaces[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2012, 28(5): 1206-1212.
- [50] 李颖, 杨喜存, 单军勇. 低温环境试验条件恢复的防凝露问题[J]. *装备环境工程*, 2013, 10(5): 112-115.
- LI Ying, YANG Xicun, SHAN Junyong. Prevention of water condensation during condition restoration phase of low-temperature environmental test[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2013, 10(5): 112-115.
- [51] 刘先兰, 邵锦钟, 金潇明. 仿生非光滑表面耐磨性的影响因素[J]. *表面技术*, 2012, 41(1): 92-94.
- LIU Xianlan, SHAO Jinzhong, JIN Xiaoming. Influence factors of wear resistance with bionic non-smooth surfaces[J]. *Surface Technology*, 2012, 41(1): 92-94.
- [52] LIU Zhongliang, WANG Hongyan, ZHANG Xinhua, et al. An experimental study on minimizing frost deposition on a cold surface under natural convection conditions by use of a novel anti-frosting paint. Part I. Anti-frosting performance and comparison with the uncoated metallic surface[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2006, 29(2): 229-236.
- [53] LIU Zhongliang, WANG Hongyan, ZHANG Xinhua, et al. An experimental study on minimizing frost deposition on a cold surface under natural convection conditions by use of a novel anti-frosting paint. Part II. Long-term performance, frost layer observation and mechanism analysis[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2006, 29(2): 237-242.
- [54] 汪峰, 梁彩华, 吴春晓, 等. 疏水性铝翅片表面的结霜/融霜特性[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(4): 1368-1373.
- WANG Feng, LIANG Caihua, WU Chunxiao, et al. Frosting and defrosting characteristics of hydrophobic fin surfaces[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(4): 1368-1373.

(修改回稿日期 2020-04-05 编辑 何明)