

文章编号:1673-5005(2019)06-0138-06

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2019.06.016

静止液态甲烷饱和单液滴蒸发模拟

邓佳佳¹, 许 健², 卢金树¹

(1. 浙江海洋大学港航与交通运输工程学院, 浙江舟山 316022; 2. 浙江海洋大学船舶与机电工程学院, 浙江舟山 316022)

摘要:经典液滴蒸发模型无法适用于 LNG 制冷剂在其蒸气中的蒸发过程模拟。采用数值模拟方法,建立静止饱和甲烷液滴在其蒸气中蒸发的新模型。利用该模型对液滴蒸发过程进行计算。结果表明:模型计算结果准确可靠;气液界面蒸气喷出速度与液滴半径成反比,与温差成正比;“吹拂效应”使温度边界层变厚,热流密度减少;温差为 190 K、半径为 0.5 mm 工况下,“吹拂效应”影响最剧烈,使温度边界层增厚 28.8%,热流密度减小 27.7%;质量蒸发率随温差以及半径增大而增大且与半径、温差之间具有一定的数学关系。

关键词:液化天然气; 传热传质; 液滴蒸发; 温度边界层; 数学模拟

中图分类号:TK 124; TE 88 **文献标志码:**A

引用格式:邓佳佳,许健,卢金树. 静止液态甲烷饱和单液滴蒸发模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019,43(6):138-143.

DENG Jiajia, XU Jian, LU Jinshu. Simulation and analysis of evaporation of stationary saturation liquid methane droplet in its vapor [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019,43(6):138-143.

Simulation and analysis of evaporation of stationary saturation liquid methane droplet in its vapor

DENG Jiajia¹, XU Jian², LU Jinshu¹

(1. School of Port and Transportation Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

2. School of Naval Architecture and Mechanical-electrical Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: The classic models for the droplet evaporation are often difficult to predict the evaporation of a liquid methane droplet during the cooling down of a cargo tank. A novel evaporation model to overcome the difficulties was presented. With different temperatures, the evaporation processes of droplets with different sizes were systematically investigated. The results show that the calculation results of the current model are accurate and reliable. The velocity of the vapor at the gas-liquid interface is inversely proportional to the droplet radius and proportional to the temperature difference. The "blowing effect" makes the temperature boundary layer thicker and the heat flux decreased. Under the temperature difference of 190 K and the radius of 0.5 mm, the "blowing effect" has the most severe influence, i. e. the temperature boundary layer is thickened by 28.8%, and the heat flux is reduced by 27.7%. The mass evaporation rate increases with the increase of the temperature difference and the radius, which is correlated with the radius and temperature difference with a certain mathematical relationship.

Keywords: liquefied natural gas; heat and mass transfer; droplet evaporation; temperature boundary layer; mathematical simulation

天然气作为清洁能源受各界学者关注和研究^[1-2],由于其产地与需求地不匹配,需长距离运输,

长距离运输天然气最为经济的方法是采用 LNG 运输船运输^[3]。为保证安全,LNG 液舱投产前需预冷作

收稿日期:2019-09-08

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(11602222);浙江省基础公益研究计划项目(LY18E090009);浙江省舟山市科技局项目(2016C41021,2016C12010);浙江海洋大学科研启动基金项目(Q1612)

作者简介:邓佳佳(1982-),男,副教授,博士,研究方向为两相流动传热传质。E-mail:dengjiajia@zjou.edu.cn。

业,使用制冷剂蒸气置换舱内气体,然后喷入雾化后的制冷剂液滴,通过相变吸热制冷^[4],大型液舱一般采用LNG预冷^[5-6]。Abramzon等^[7]考虑多物性参数、Stenfan流及“吹拂效应”的影响,建立适用于喷雾燃料燃烧的近似蒸发模型。Haywood等^[8]研究运动液滴在气流中蒸发,发现“吹拂效应”严重影响传质过程。Zhou等^[9]考虑蒸发速率的影响,发现“吹拂效应”扰乱液滴蒸发过程中温度边界层的形成。前人研究主要基于组分梯度与扩散系数,而液舱预冷过程中制冷剂液滴在其蒸气中蒸发,无法描述组分梯度及扩散系数。目前,液体与其蒸气间的传热传质,通常采用Lee模型^[10],Lee模型形式简单,适用于压力恒定且温度接近饱和温度、传热占据主导地位的过程,如管内水沸腾^[11]和相变^[12-13]。而LNG液舱预冷过程,初始环境温度远高于饱和温度,传质非常剧烈,高速蒸气喷出使边界层加厚,阻碍了传热过程^[14],存在“吹拂效应”^[9]。且液舱预冷过程中舱内温度变化大,“吹拂效应”的影响非恒定。这些因素Lee模型中均未考虑,因此不适用于LNG液舱预冷操作。故有必要建立适合液态甲烷液滴在其蒸气中蒸发的模型。笔者通过分析液滴蒸发过程,确立分步的研究思路,现阶段通过建立静止饱和单液滴在其蒸气中蒸发的模拟模型研究液态甲烷饱和单液滴在甲烷蒸气中的蒸发特性及“吹拂效应”的影响。

1 模型设计

基于能量守恒方程及质量守恒方程,建立静止饱和单液滴在其蒸气中蒸发模型。利用该模型对液态甲烷单液滴在甲烷蒸气中蒸发过程进行模拟。

1.1 假设

静止液态甲烷饱和单液滴在其蒸气中蒸发过程非常复杂,为了简化模型,假设:①由于喷雾液滴粒径较小(最大为2.5 mm),可假设液滴保持球形,暂时忽略质量力对气相场的影响,可以将模型简化为球坐标系一维模型;②气液界面相变符合准稳态假设^[7]且相变只发生在气液界面处;③液态甲烷液滴为饱和液滴且处于稳态蒸发阶段^[15],液滴内部运动对传热传质的影响很小,暂时忽略液滴内部的运动带来的影响;④忽略热辐射带来的影响,只需计算液滴表面处的气相场区域。

1.2 物理模型

建立以静止液滴中心为球心,计算区域为液滴表面至距离球心0.5 m的球形物理模型,如图1所示。

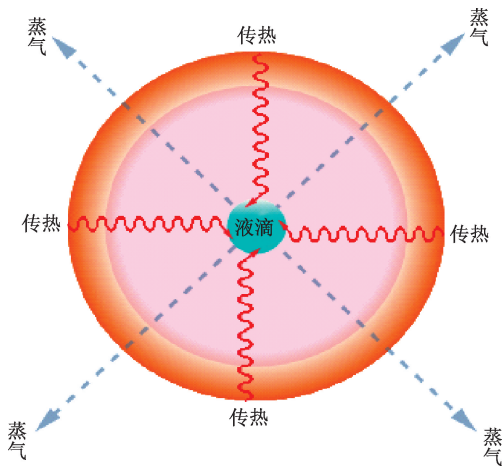


图1 液滴蒸发物理模型

Fig. 1 Physical model of droplet evaporation

1.3 数学模型

一维球坐标系下气相区域的能量方程^[16]为

$$\frac{d}{dr}(\rho u_r r^2 T) = \frac{d}{dr} \left(\frac{\Gamma r^2}{c_p} \frac{dT}{dr} \right). \quad (1)$$

式中, u_r 为轴向蒸气速度,m/s; r 为轴向位置坐标,m; c_p 为比定压热容,J/(kg·K); Γ 为导热系数,W/(m·K); ρ 为密度,kg/m³;T为温度,K。

根据界面处能量守恒(吸收的热量完全用于蒸发相变)以及质量守恒定律,得到液滴表面及其他区域的气相速度计算公式^[17]为

$$\begin{cases} u_r = \frac{\nabla T \cdot \Gamma}{h_q \rho}, \\ u_r = u_R (R/r)^2 \rho_s / \rho. \end{cases} \quad (2)$$

式中, ∇T 为界面处温度梯度,K/m; h_q 为相变潜热,kJ/kg; u_R 为液滴表面蒸气喷出速度,m/s; R 为液滴半径,m;下标s表示饱和状态下物性参数。

基于以上数学模型,对计算区域使用结构化网格进行划分,并对临近液滴附近网格进行加密处理。利用控制容积法对能量方程进行离散化处理,对流项采用二阶精度的中心差分格式。设置计算绝对残差收敛标准为 10^{-10} K,松弛因子为0.3,运用C语言编程,进行迭代计算求解,其中甲烷的导热系数通过状态方程^[18]得到,计算程序流程见图2。

1.4 模型验证

由于液滴在同种蒸气中蒸发的相关研究国内外未见报道,因此对比模型计算和理论分析所得低温球(无蒸发)传热过程中温度边界层厚度(δ_T)并分析网格敏感度,以验证模型准确性。

低温球的传热公式^[16]为

$$\frac{d}{dr} \left(\Gamma r^2 \frac{dT}{dr} \right) = 0. \quad (3)$$

给定边界条件为

$$\begin{cases} T_R = 110K, \\ T_\delta = T_R + 0.99(T_\infty - T_R), \\ T_\infty = 120 \sim 300K. \end{cases} \quad (4)$$

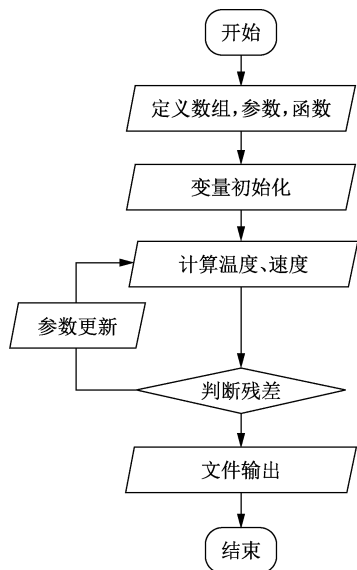


图2 程序流程

Fig.2 Program flow

低温球 δ_T 表达式为

$$\delta_T = \frac{X-Y}{Y} R = JR. \quad (5)$$

其中

$$X = \int_{T_R}^{T_\infty} \Gamma(T) dT, \quad Y = \int_{T_\delta}^{T_\infty} \Gamma(T) dT.$$

式中, δ_T 为温度边界层厚度, m; 下标 R, δ 和 ∞ 分别为液滴表面、温度边界层处和无穷远处。

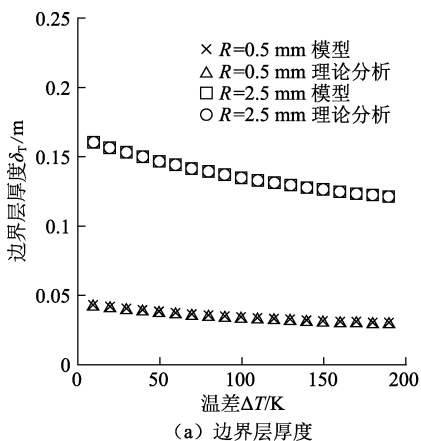
在温差为 10 ~ 190 K 工况下, 对比模型计算与和理论分析所得半径为 0.5 和 2.5 mm 的液态甲烷低温球 δ_T [17], 对比结果如图 3(a) 所示, 吻合较好。

对数量分别为 100、1 000、2 000 的粗、中、细网格进行液滴蒸发过程计算, 采用累积均方根 (RMS) [19] 对比其差异, RMS 的计算公式为

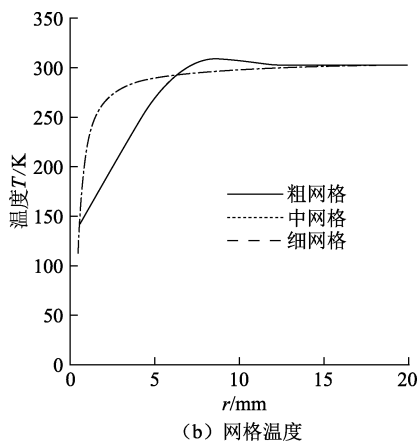
$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\sqrt{\left| \frac{T_1 - T_2}{T_2} \right|^2} \right). \quad (6)$$

式中, $\varepsilon_{1,2}$ 为累积均方根; N 为样本数量; T_1 和 T_2 分别为网格 1 和网格 2 计算温度, K。

不同网格温度对比见图 3(b) 所示, 粗—中和中—细网格的 RMS 分别为 1.48×10^{-2} 和 5.44×10^{-6} 。可知, 中等网格计算结果与细网格结果基本一致, 但与粗网格结果差距较大, 因此采用中等网格进行后续计算。



(a) 边界层厚度



(b) 网格温度

图3 模型验证

Fig.3 Model validation

2 模拟结果与分析

采用所建模型, 在半径 R 为 0.5 ~ 2.5 mm, 温差 ΔT 为 10 ~ 190 K 工况下, 对静止液态甲烷饱和单液滴和低温球 (无蒸发) 在甲烷蒸气中的蒸发过程进行模拟, 分析液滴蒸发特性以及“吹拂效应”的影响。

2.1 气液界面蒸气喷出速度

液滴为饱和单液滴, 处于稳态蒸发阶段, 吸收热

量完全用于相变, 并以蒸气的形式喷出。 R 及 ΔT 是气液界面蒸气喷出速度 (u_R) 的重要影响因素。图 4 为气液界面蒸气喷出速度变化趋势。由图 4 可知, u_R 随 R 减小而增大, 随 ΔT 增大而增大。进一步对 u_R 、 R 以及 ΔT 之间的关系进行分析, 发现 u_R 与 R 乘积随 ΔT 呈现相同的变化规律, 如图 5 所示。

牛顿冷却公式和 u_R 表达式分别为

$$\begin{cases} h\Delta T A = h_q u_R \rho A, \\ Nu = hd/\Gamma. \end{cases} \quad (7)$$

式中, A 为液滴表面积, m^2 。

$$u_R = \frac{Nu \Gamma \Delta T}{h_q \rho d} \quad (8)$$

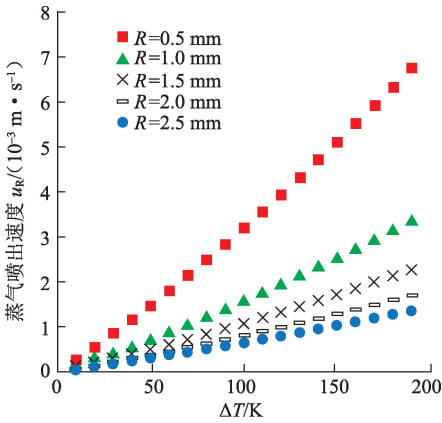


图 4 气液界面蒸气喷出速度变化趋势
Fig. 4 Trend of u_R

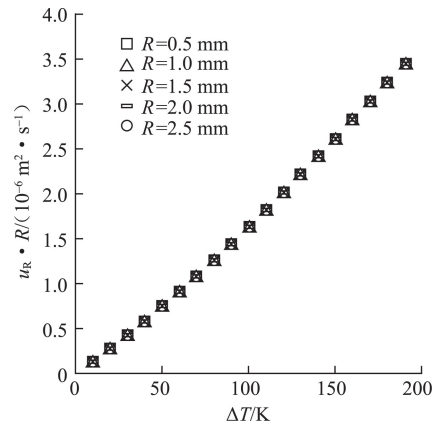


图 5 气液界面蒸气喷出速度与温差、半径关系
Fig. 5 Relationship of $R, \Delta T$ and u_R

由于静止液滴蒸发过程中 Nu 数一直以来被认为等于常数^[9], u_R 又表示为

$$u_R = K \Delta T / R. \quad (9)$$

式中, K 为常数。

由公式(9)可以看出 u_R 与 R 成反比, 与 ΔT 成正比。

根据图 5, 对系数 K 进行计算, 得出 u_R 的计算式为

$$u_R = 1.69 \times 10^{-8} \Delta T / R. \quad (10)$$

2.2 温度边界层厚度

液舱预冷过程中其初始环境温度远高于饱和温度, 传质非常剧烈, 高速蒸发蒸气喷出使 δ_T 加厚, 阻碍了传热过程, 这种现象称为“吹拂效应”。液态甲烷饱和单液滴在甲烷蒸气中蒸发, 温度边界层厚度 δ_T 主要考虑 R 和 ΔT 及“吹拂效应”的影响。由于“吹拂效应”的影响暂无计算公式, 将 δ_T 增厚率(α)

定义为“吹拂效应”对 δ_T 的影响, 计算式为

$$\alpha = (\delta_{T_d} - \delta_{T_c}) / \delta_{T_c}. \quad (11)$$

式中, α 为“吹拂效应”对 δ_T 的影响率; 下标 c 和 d 分别表示低温球和液滴。

图 6 为温度边界层厚度变化趋势。由图 6 可知:

(1) 低温球 δ_T 随 R 增加而变厚, 随 ΔT 增加而变薄。根据式(5)可知, 低温球 δ_T 为 R 和 J 的乘积, J 是仅与 ΔT 有关的无量纲系数。图 7 为系数 J 随 ΔT 变化趋势, 随着 ΔT 加剧, J 呈减小趋势。因此低温球 δ_T 随 ΔT 增大而变薄, 随 R 增大而变厚。由于 u_R 与传热方向相反, 产生“吹拂效应”, 造成相同工况下液滴 δ_T 比低温球厚。

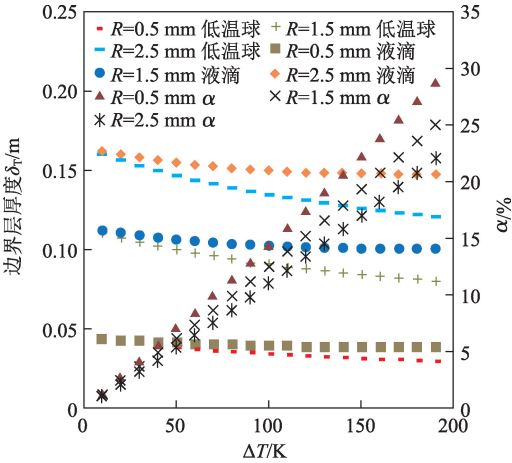


图 6 温度边界层厚度变化趋势
Fig. 6 Trend of δ_T

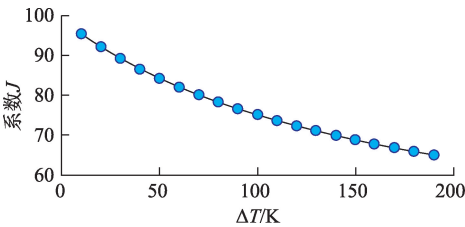


图 7 系数 J 变化趋势
Fig. 7 Trend of coefficient J

(2) ΔT 不变情况下, R 越小, “吹拂效应”越明显。在 $\Delta T = 190 \text{ K}$ 工况下, “吹拂效应”使 $R = 0.5 \text{ mm}$ 液滴 δ_T 增长 28.8%, 使 $R = 2.5 \text{ mm}$ 液滴 δ_T 增长 22.03%。 R 不变情况下, ΔT 越大, “吹拂效应”对 δ_T 影响越剧烈。 $R = 2.5 \text{ mm}$ 工况下, $\Delta T = 10 \text{ K}$ 时, “吹拂效应”使 δ_T 增加 1.06%; $\Delta T = 190 \text{ K}$ 时, “吹拂效应”使 δ_T 增加 22.03%。

2.3 热流密度

δ_T 变厚, 将导致传热受阻, 造成热流密度(q)减少。热流密度计算式为

$$q=h_q\rho_s u_R. \quad (12)$$

将 q 减少率(β)定义为“吹拂效应”对 q 影响, 计算式为

$$\beta=(q_c-q_d)/q_c. \quad (13)$$

式中, β 为“吹拂效应”对 q 的影响率; q 为热流密度, W/m^2 。

图 8 为热流密度变化趋势。由图 8 可知,液滴 q 随 ΔT 增大而增大,随 R 增大而减小,这与 u_R 的变化特性一致。由于“吹拂效应”影响,传热受阻,相同工况下,液滴 q 相对于低温球较小。“吹拂效应”对 q 影响仅与 ΔT 有关,温差由 0 提高到 190 K,“吹拂效应”的影响由 0 线性增加至 27.7%。

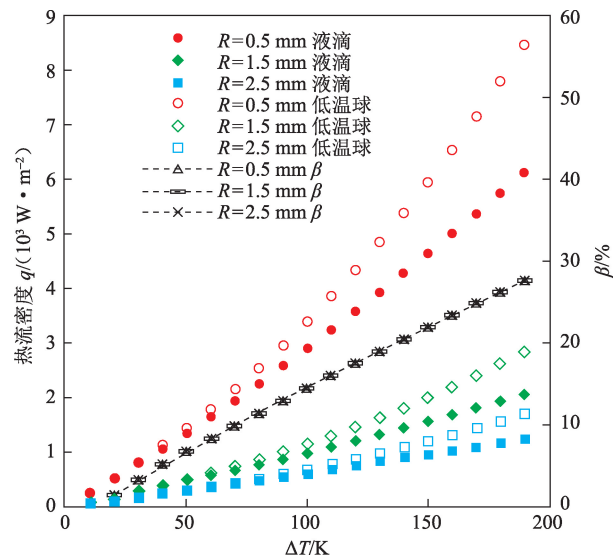


图 8 热流密度变化趋势
Fig. 8 Trend of heat flux

2.4 质量蒸发率

利用 u_R 对液滴质量蒸发率($\dot{m}$)进行计算。图 9 为蒸发速率对比。由图 9 可知,随着 ΔT 增加, $\dot{m}$ 呈现线性增长。这是由于 ΔT 越大,传热越剧烈,因此 $\dot{m}$ 也越大。在 ΔT 不变情况下, $\dot{m}$ 随 R 增大,这是因为 u_R 与 R 成反比,而 $\dot{m}$ 与 u_R 及液滴外表面积有关,外表面积是 R 的平方关系,因此 R 越大, $\dot{m}$ 越大。

根据 $\dot{m}$ 计算公式,进一步对 $\dot{m}$ 与 ΔT 和 R 的关系研究,发现 $\dot{m}$ 与 R 的乘积随 ΔT 呈现相似的变化趋势,如图 10 所示。静止液态甲烷饱和单液滴质量蒸发率为

$$\dot{m}=Apu_R, \quad (14)$$

$$\frac{\dot{m}}{R}=\frac{2\pi Nu\Gamma}{h_q}\Delta T. \quad (15)$$

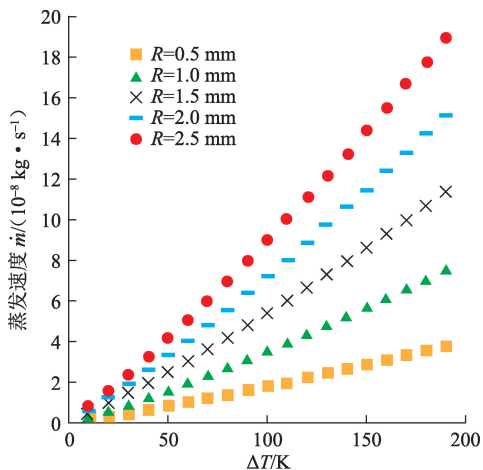


图 9 蒸发速率对比

Fig. 9 Trend of evaporation rate

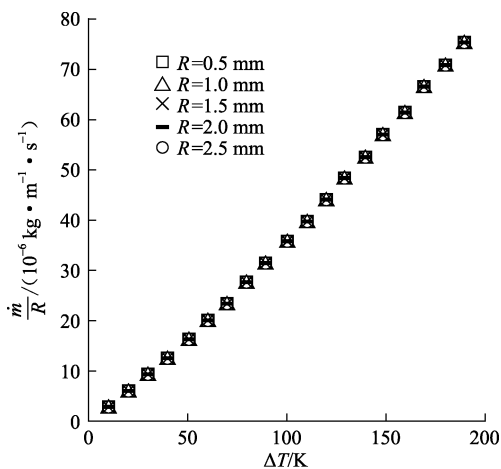


图 10 温差、半径、蒸发速度关系

Fig. 10 Relationship between $\Delta T, R$ and $\dot{m}$

3 结 论

(1)液滴蒸发过程中气液界面蒸气喷出速度与半径成反比,与温差成正比。

(2)低温球温度边界层厚度随着半径增加而变厚,随温差增加而变薄;在“吹拂效应”影响下,液滴温度边界层比相同工况下要厚,半径越小温差越大,“吹拂效应”影响越剧烈。温差为 190 K、半径为 0.5 mm 工况下,“吹拂效应”对温度边界层厚度影响最剧烈,使温度边界层厚度增加 28.8%。

(3)“吹拂效应”阻碍传热过程,使热流密度减少;“吹拂效应”对热流密度的影响仅与温差有关,温差由 0 增大至 190 K,热流密度减小率线性增加至 27.7%。

参考文献:

[1] 杨帆,刘畅,姜文全,等. 超临界压力下低温甲烷传热特性数值研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),

- 2018,42(6):139-144.
- YANG Fan, LIU Chang, JIANG Wenquan, et al. Numerical study of cryogenic methane heat transfer characteristics under supercritical pressure[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018,42(6):139-144.
- [2] 胡广杰. 加注天然气稠油高温高压条件下井筒流动特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(4):91-97.
- HU Guangjie. Wellbore flow characteristics of heavy oil injected with natural gas at high temperature and high pressure [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(4):91-97.
- [3] KOHOUT A, JAIN P, DICK W. Review, identification and analysis of local impact of projectile hazard in the LNG industry: a LNG storage tanks case study [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019, 57, 304-319.
- [4] 王良军, 刘杨, 罗仔源, 等. 大型 LNG 地上全容储罐的冷却技术研究[J]. 天然气工业, 2010, 30(1):93-95, 147.
- WANG Liangjun, LIU Yang, LUO Zaiyuan, et al. Cooling techniques for ground large-scale full-capacity LNG storage tanks[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(1):93-95, 147.
- [5] 贾士栋, 吕俊, 邓青. 浙江 LNG 接收站卸料管线 BOG 预冷模拟研究[J]. 天然气工业, 2013, 33(3):84-88.
- JIA Shidong, LÜ Jun, DENG Qing. A simulation study of boil-off gas (BOG) pre-cooling process in unloading pipelines in an LNG terminal in Zhejiang[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(3):84-88.
- [6] 陈帅, 田士章, 魏念鹰. 地上全容式混凝土顶 LNG 储罐的冷却动态模拟[J]. 天然气工业, 2013, 33(6):91-96.
- CHEN Shuai, TIAN Shizhang, WEI Nianying. A dynamic simulation study of the cooling of a ground LNG storage tank with a full containment concrete roof (FCCR) [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(6):91-96.
- [7] ABRAMZON B, SIRIGNANO W A. Droplet vaporization model for spray combustion calculations [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1989, 32(9):1605-1618.
- [8] HAYWOOD R J, NAFZIGER R, RENKSIZBULUT M. A detailed examination of gas and liquid phase transient processes in convective droplet evaporation. [J]. Journal of Heat Transfer, 1989, 111(2):495-502.
- [9] ZHOU Z, WANG G, CHEN B, et al. Evaluation of evaporation models for single moving droplet with a high evaporation rate [J]. Powder Technology, 2013, 240:95-102.
- [10] LU J, XU S, DENG J, et al. Numerical prediction of temperature field for cargo containment system (CCS) of LNG carriers during pre-cooling operations [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 29:382-391.
- [11] 魏敬华, 潘良明, 袁德文, 等. 过冷流动沸腾相变过程汽泡特性的 VOF 方法模拟[J]. 核动力工程, 2012, 33(6):65-71.
- WEI Jinghua, PAN Liangming, YUAN Dewen, et al. VOF simulation of bubble characteristics of subcooled flow boiling[J]. Nuclear Power Engineering, 2012, 33(6):65-71.
- [12] LIU S, JIAO W, WANG H. Three-dimensional numerical analysis of the coupled heat transfer performance of LNG ambient air vaporizer [J]. Renewable Energy, 2016, 87:1105-1112.
- [13] HATANIM A, FARHADZADEH M, RAHIMIAN M H. Investigation of vapor condensation on a flat plate and horizontal cryogenic tube using lattice Boltzmann method [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2015, 66:218-225.
- [14] 李科, 赵钰祥, 武文斐. 单液滴蒸发燃烧周围流场及火焰结构的数值模拟研究[J]. 热科学与技术, 2015, 14(3):178-183.
- LI Ke, ZHAO Yuxiang, WU Wenpei. Numerical study on surrounding gas flow and flame structures of single combustng droplet [J]. Thermal Science and Technology, 2015, 14(3):178-183.
- [15] 阮一道, 薛绒, 赖欢, 等. 单液氮液滴在气流中的蒸发运动特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(6):147-152.
- RUAN Yixiao, XUE Rong, LAI Huan, et al. Evaporation and movement characteristics of single liquid nitrogen droplet in high-speed gas flow [J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2017, 51(6):147-152.
- [16] PATANKAR S V. Numerical heat transfer and fluid flow [M]. New York: Hemisphere Pub Corp, 1980:31, 80.
- [17] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006:165, 209.
- [18] KUNZ O, WAGNER W. The GERG-2008 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures: an expansion of GERG-2004 [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2012, 57(11):3032-3091.
- [19] LEE H B, PARK B J, RHEES H, et al. Liquefied natural gas flow in the insulation wall of a cargo containment system and its evaporation [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(14):2605-2615.