

文章编号:1006-2467(2019)08-1010-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.08.017

# 液化天然气饱和单液滴蒸发模型及其吹拂效应的影响

邓佳佳<sup>1</sup>, 许健<sup>1</sup>, 卢金树<sup>1</sup>, 石墩章<sup>2</sup>

(1. 浙江海洋大学 港航与交通运输工程学院, 浙江 舟山, 316022;

2. 舟山博睿船舶科技开发有限公司, 浙江 舟山, 316000)

**摘要:**采用计算流体力学方法,基于液滴界面能量守恒原理建立了液化天然气饱和单液滴蒸发模型,以对不同的温差、相对速度及液滴粒径的液滴在同种蒸气中的蒸发过程进行模拟,并分析了吹拂效应的影响.结果表明:增大温差、相对速度及液滴粒径,均会使得液滴界面换热量增大;随着温差增大,温度边界层厚度及其比值逐渐增加,但考虑与未考虑液滴蒸发时液滴界面换热量之比呈现出分段变化特征,液滴的运动使得其分段点提前,且吹拂效应的影响增大;随着相对速度增加,吹拂效应对液滴蒸发的影响减弱,当相对速度大于18 m/s时,吹拂效应的影响可以忽略;随着液滴粒径增加,吹拂效应的影响基本保持不变.

**关键词:**液化天然气;液舱预冷;液滴运动;单液滴蒸发模型;吹拂效应

**中图分类号:** TE 644

**文献标志码:** A

## Blowing Effect Analysis of Single Saturated Liquefied Natural Gas Droplet Evaporation in Its Vapor

DENG Jiajia<sup>1</sup>, XU Jian<sup>1</sup>, LU Jinshu<sup>1</sup>, SHI Dunzhang<sup>2</sup>

(1. School of Port and Transportation Engineering, Zhejiang Ocean University,

Zhoushan 316000, Zhejiang, China; 2. Zhoushan Borui Ship Technology

Development Co., Ltd., Zhoushan 316000, Zhejiang, China)

**Abstract:** A novel model was built based on the computational fluid dynamics method. By multiple temperature differences, the static and moving liquefied natural gas (LNG) droplets of multiple relative velocity differences and multiple droplet diameters evaporation were simulated. Their blowing effects were identified. It was found that the higher vapor temperature is, the bigger relative velocity and the bigger diameter are, and they could enhance the droplet interface heat transfer rate. As the increase of vapor temperature, the temperature boundary layer becomes thicker and the thickness ratio becomes larger, but the heat transfer ratio presents a piecewise linearity characteristic. The piecewise linearity critical point of moving droplet evaporation is lower than the static droplet evaporation, but the blowing effect is bigger. The blowing effect is enhanced because vapor temperature increases. The blowing effect becomes weaker as the relative velocity increases, the blowing effect could be omitted when the relative velocity is bigger than 18 m/s. The blowing effect almost keeps the same as the diameter increases.

**收稿日期:** 2017-08-07

**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, 湖北省洪湖市人, 副教授, 主要从事两相流动传热传质研究.

电话(Tel): 0580-8180981; E-mail: lu\_goldtree@163.com.

**Key words:** liquefied natural gas (LNG); tank cooling down; droplet movement; single droplet evaporation model; blowing effect

储运天然气最安全、经济的方式是将其转化为液化天然气(LNG). 在 LNG 液舱投产准备中,约有一半的事故发生在预冷过程<sup>[1-2]</sup>. 液舱预冷是将制冷剂雾化喷入、利用制冷剂液滴相变而实现的<sup>[3-4]</sup>. 为防止结冰堵塞,液舱预冷前需将舱内气体置换为液滴蒸气.

目前,因实验设备昂贵且理论研究难度较大,液舱预冷过程的实验和理论研究还少见报道,而且单液滴在其蒸气中的蒸发理论模型欠缺,又制约了其数值模拟的发展. 液体与其蒸气的传热传质过程模拟通常采用 Lee 模型<sup>[5-6]</sup>. Lee 模型适用于压力恒定且温度接近于饱和温度的传热过程模拟,如水沸腾<sup>[7-8]</sup>. LNG 液舱预冷的初始温度远高于其饱和温度,传质非常剧烈<sup>[9]</sup>,界面处蒸气喷出速度较大,对传热具有阻碍作用,即形成吹拂效应<sup>[10]</sup>;而且液舱预冷过程中的舱内温度变化较大,吹拂效应的影响也不断变化,但 Lee 模型未考虑吹拂效应及其变化的影响,因此,本文基于液滴界面能量守恒原理建立了 LNG 饱和单液滴在其蒸气中的蒸发模型,分析了吹拂效应对液滴蒸发的影响,以期完善 LNG 液滴蒸发模型及保障 LNG 液舱操作安全提供参考.

## 1 模型及验证

### 1.1 模型假设

在 LNG 液舱预冷过程中,喷淋的 LNG 液滴是饱和液滴,因而其吸收的热量完全用于液相蒸发. LNG 单液滴在其蒸气中的蒸发过程非常复杂,为了简化模型,本文进行如下假设:

- (1) 蒸发过程中的液滴呈球形,且气相流场结构为轴对称,采用二维轴对称坐标系;
- (2) 采用液态甲烷液滴和气相甲烷作为 LNG 模型工质;
- (3) 气-液界面及液滴内部的温度均为饱和温度,气-液界面的相变符合准稳态假设,且相变只发生在气-液界面;
- (4) 因为 LNG 液滴为饱和液滴且处于稳态蒸发阶段<sup>[11]</sup>,液滴内部的运动对液滴传热传质的影响很小,所以忽略液滴内部运动的影响;
- (5) 忽略辐射热的影响.

### 1.2 数学模型

基于以上假设和液滴界面能量守恒原理,采用

计算流体动力学方法建立单液滴的蒸发模型. 采用稳态二维轴对称坐标系,其模型方程包含连续性方程、动量方程、能量方程和湍流模型<sup>[12]</sup>.

连续性方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = 0 \quad (1)$$

式中:  $x$  为轴向坐标;  $r$  为径向坐标;  $v_x$  为轴向速度;  $v_r$  为径向速度;  $\rho$  为蒸气密度.

动量守恒方程为

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_x) = \\ - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r \mu \left( 2 \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{v}) \right) \right] + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) = \\ - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu \left( 2 \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{v}) \right) \right] + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] - \\ 2 \mu \frac{v_r}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot \mathbf{v}) \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $p$  为压力;  $\mu$  为黏度;  $\mathbf{v}$  为速度矢量.

能量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\mathbf{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) \quad (4)$$

式中:  $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$ ,  $h$  为显热;  $T$  为温度;  $k_{\text{eff}}$  为有效传热系数.

加入组分方程后,该模型可用于液滴在混合介质中的蒸发模拟. 组分扩散方程为

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} w_i) = - \nabla \cdot \mathbf{J}_i \quad (5)$$

式中:  $w_i$  为  $i$  相的质量分数;  $\mathbf{J}_i$  为  $i$  相的扩散通量.

由于液滴界面边界层对液滴蒸发的影响非常大,为准确模拟液滴界面边界层,本文采用 SST  $k-\omega$  湍流模型<sup>[13]</sup>. 其中,将近壁区间与远场区间分开处理,以准确模拟近壁区间层流边界层的流体流动,其方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k v_j)}{\partial x_j} = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\omega v_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial\omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega$$

(7)

式中： $k$  为湍动能； $\omega$  为比耗散率； $G_k$  为平均速度梯度湍动能生成项； $G_\omega$  为比耗散率的生成项； $\Gamma_k$ 、 $\Gamma_\omega$  分别为湍动能和比耗散率的有效扩散系数； $Y_k$ 、 $Y_\omega$  分别为湍动能和比耗散率的湍流耗散量； $S_k$ 、 $S_\omega$  分别为湍动能和比耗散率的源项； $D_\omega$  为正交发散项。

气-液界面处气相传递给液相的热量等于气-液界面处液体相变所需相变潜热，即气-液界面的边界条件为

$$v_2 = \frac{q}{Q\rho}$$

(8)

式中： $v_2$  为气-液界面处蒸发蒸气的速度； $q$  为气-液

界面处气相传递给液相的热流密度； $Q$  为液相的蒸发潜热。

选择理想气体模型来计算蒸气的密度，即

$$\rho = \frac{(p_{\text{op}} + p_1)M_w}{RT}$$

(9)

式中： $R$  为普适气体常数； $M_w$  为蒸气的相对分子质量； $p_{\text{op}}$  为操作压力； $p_1$  为相对压力。

1.3 模拟条件及网格

根据静止液滴与运动液滴蒸发的流场特性的不同，分别采用不同的网格。具体模型及网格如图 1 所示。其中：边界条件分别为进口温度  $T_{\text{r}}=110\text{ K}$ ，出口温度  $T_{\text{out}}=300\text{ K}$ 。表 1 列出了所用介质的热物理性能参数。其中： $c_p$  为定压比热容； $\lambda$  为导热系数；各参数的分段线性来源于软件数据库<sup>[14]</sup>。

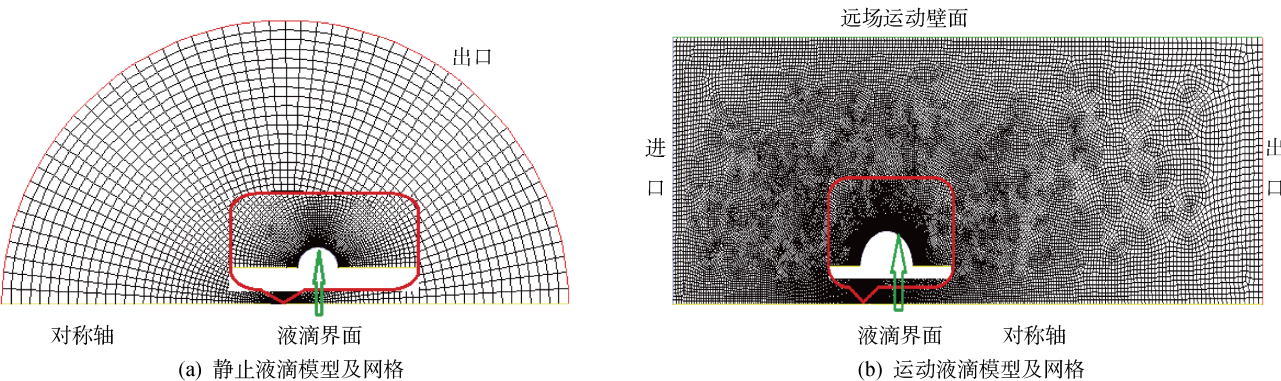


图 1 模型及网格划分  
Fig.1 Model and its meshing

表 1 所用介质的热物理性能参数  
Tab.1 Physical properties of the materials

介质	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$c_p/[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$	$\mu/[\text{g}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}]$	$\lambda/[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$	$Q/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$
饱和 LNG	—	—	—	—	511.15
天然气	理想气体	线性	分段线性	分段线性	—
萘烷液滴	0.603	—	—	—	293.31
萘烷蒸气	理想气体	线性	0.54	0.147	—

1.4 模型验证

本文利用上述模型对粒径  $d=2\text{ mm}$  的萘烷液滴在  $1\,000\text{ K}$  高温空气中的蒸发实验<sup>[15]</sup> 进行模拟。为了与实验数据进行对比，对计算结果进行后处理。以液滴粒径作为因变量，采用 2 次抛物线将计算结果拟合而得到质量蒸发速率的函数  $f(d)$ ，拟合结果如图 2(a) 所示。进一步采用下式对拟合函数进行转换：

$$\left. \begin{aligned} \frac{dm}{dt} &= f(d) = ad^2 + bd \\ \frac{dm}{dt} &= \frac{\pi\rho_d}{6} \frac{dd^3}{dt} = \frac{\pi\rho_d d^2}{2} \frac{dr}{dt} \end{aligned} \right\}$$

(10)

得到不同粒径的液滴完全蒸发所需时间为

$$t = \frac{4\pi\rho_d}{a^2} [aR - b\ln(aR + b) + b\ln b]$$

(11)

式中： $m$  为液滴质量； $\rho_d$  液滴密度； $a$ 、 $b$  均为拟合函数的系数。

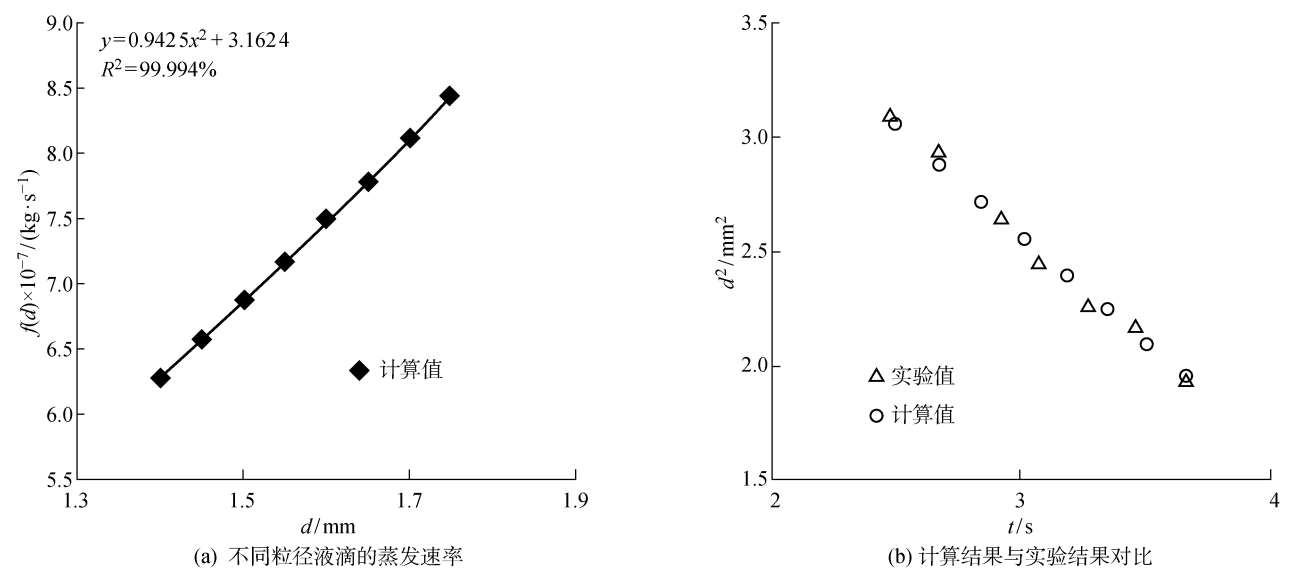


图 2 计算结果与实验结果的对比  
Fig. 2 Calculation results versus experimental results

计算所得液滴粒径的平方与液滴蒸发时间的关系,以及液滴温度达到饱和温度后的实验数据<sup>[14]</sup>如图 2(b)所示. 由图 2(b)可见,模型的计算值与实验数据吻合较好.

2 结果与分析

2.1 静止 LNG 液滴的蒸发特性

2.1.1 气-液相温差的影响 图 3 所示为不同的气-液相的温差  $\Delta T$  下  $d = 1\text{ mm}$  的静止 LNG 液滴在蒸发过程的温度边界层厚度  $\delta_T$  以及界面换热量对比. 由图 3 可知:在液滴粒径相同的情况下,随着

$\Delta T$  增加,蒸发产生的吹拂效应使得温度边界层变厚,有、无蒸发时温度边界层厚度之比  $\zeta$  呈线性增长,其变化曲线的斜率为  $5.16 \times 10^{-3}\text{ K}^{-1}$ ;当  $\Delta T < 165\text{ K}$  时,  $\zeta < 2.00$ ,两者的换热量非常接近,有、无蒸发时的液滴界面换热量之比  $\beta = 0.982$ ,表明吹拂效应  $(1 - \beta)$  仅为  $2.80\%$ ,即吹拂效应的影响较小;当  $\Delta T > 165\text{ K}$  时,随着  $\Delta T$  逐渐增大,两者的液滴界面换热量差距越来越大,其  $\beta$  值随着温差增加而呈现出线性降低,其变化曲线的斜率约  $-1.03 \times 10^{-3}\text{ K}^{-1}$ ,当  $\Delta T = 490\text{ K}$  时,吹拂效应达到  $35.20\%$ .

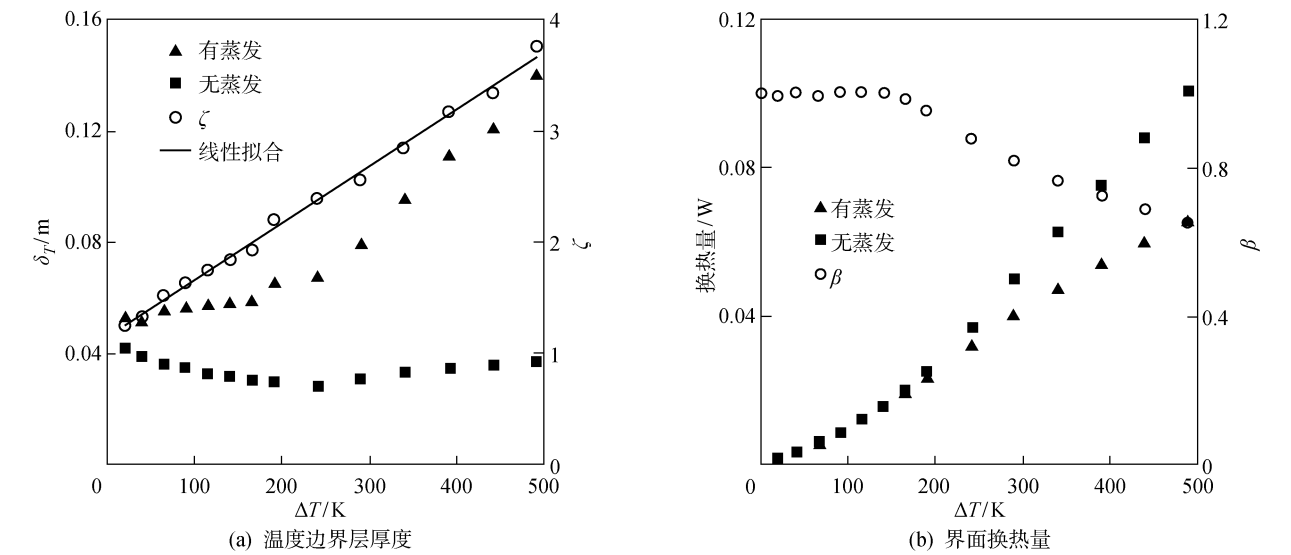


图 3 不同温差下静止液滴的蒸发特性对比  
Fig. 3 The evaporated characteristic comparison of static droplets versus temperature differences

**2.1.2 液滴粒径的影响** 图 4 所示为不同粒径的静止 LNG 液滴在 300 K 的蒸气中,当考虑、未考虑液滴蒸发时蒸发温度边界层厚度及液滴界面换热量的对比. 由图 4 可以看出:在温差保持不变、液滴粒径逐渐增大的情况下,考虑及未考虑液滴蒸发过程的液滴界面换热量及温度边界层厚度均呈线性增长;其  $\zeta$  基本保持不变,且  $\zeta=2.34$ ;另外,液滴界面换热量的差别并不大,其  $\beta$  值约为 0.955,吹拂效应仅为 4.50%.

综上所述,在考虑液滴蒸发的情况下,由于液滴

蒸发的蒸气运动方向与传热方向相反,所以阻碍了传热,且使得温度边界层变厚. 吹拂效应对温度边界层厚度的影响随着温差增大而呈线性增长,但随着液滴粒径的增加而几乎保持不变. 吹拂效应对液滴界面换热量的影响随着温差增大而呈现出分段变化特征,当  $\Delta T$  处于 0~165 K 时,吹拂效应对传热及传质的影响很小,仅为 2.76%;当  $\Delta T$  处于 165~490 K 时,吹拂效应的影响逐渐增大,吹拂效应最大可达 35.20%;随着液滴粒径增大,吹拂效应对液滴界面换热量的影响不大,仅为 4.50%.

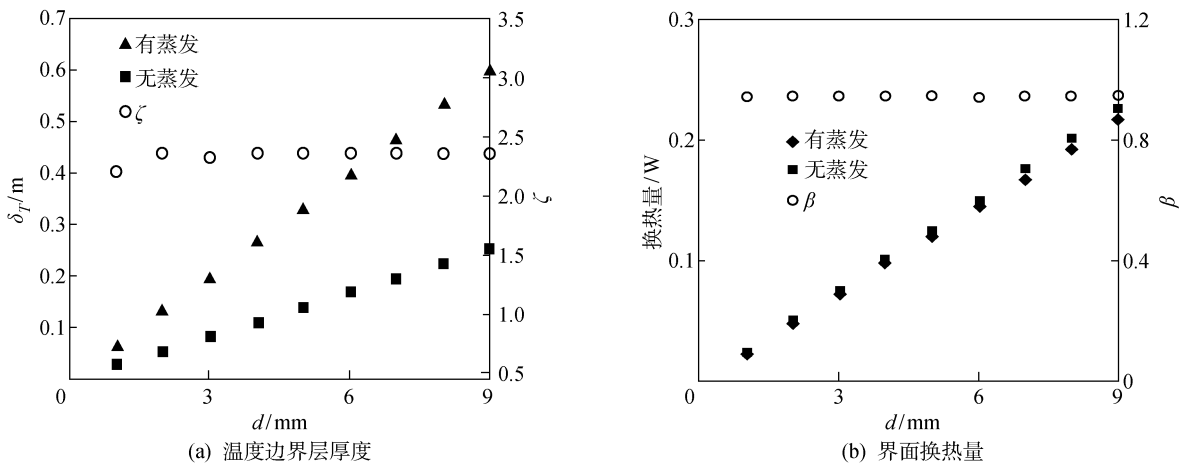


图 4 不同液滴粒径时的温度边界层厚度及界面换热量  
Fig. 4 Temperature boundary layer and blowing effect versus particle sizes

**2.2 运动 LNG 液滴的蒸发特性**

通过对静止 LNG 液滴的蒸发特性分析可知,气-液相温差的影响明显大于液滴粒径的影响,因此,本文在分析运动 LNG 液滴的蒸发特性时,重点考虑气-液相温差  $\Delta T$  及相对速度  $v$  的影响. 由于运

动液滴蒸发过程中,温度边界层沿液滴圆周方向的厚度分布不均匀,所以只采用最薄边界层厚度进行分析.

**2.2.1 气-液相温差的影响** 图 5 所示为不同的气-液相温差、 $v=10$  m/s 下,  $d=1$  mm 的液滴在考

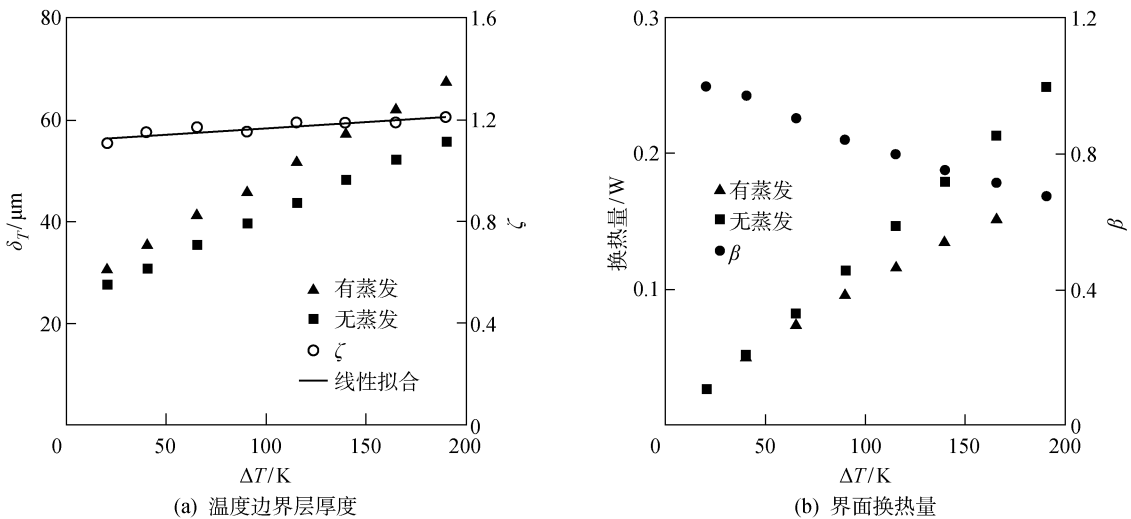
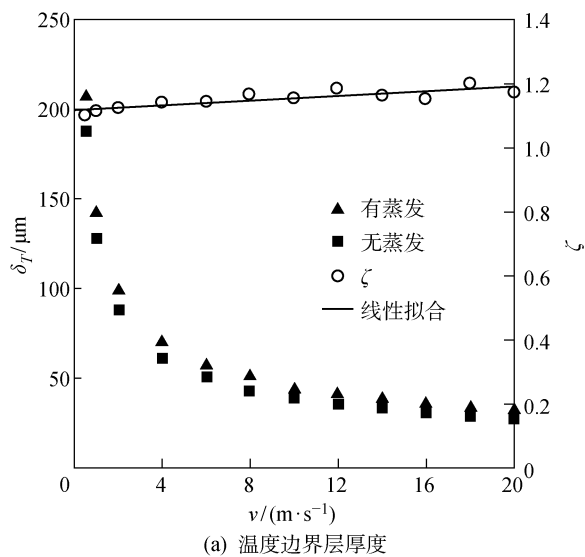


图 5 不同温差下运动液滴的温度边界层厚度及界面换热量

Fig. 5 Temperature boundary layer thickness and heat transfer rate versus temperature differences of moving droplets

虑和未考虑液滴蒸发时的温度边界层厚度和液滴界面换热量及其比值. 由图 5 可以看出:随着  $\Delta T$  增加,温度边界层厚度及液滴界面换热量均增大; $\zeta$  值呈线性增长,其变化曲线的斜率为  $4.72 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ;  $\beta$  值随着  $\Delta T$  增加也呈现出分段变化趋势,当  $\Delta T=40 \text{ K}$  时,  $\beta=0.974$ ,吹拂效应的影响非常小,仅为 2.60%;当  $\Delta T \geq 40 \text{ K}$  时,其  $\beta$  值呈现出线性减小的变化趋势,其变化曲线的斜率约为  $-1.99 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ,当  $\Delta T=190 \text{ K}$  时,吹拂效应使得液滴界面换热量降低了 32.7%.



2.2.2 相对速度的影响 图 6 所示为不同的相对速度  $v$  下,  $d=1 \text{ mm}$  的运动液滴在气相温度为  $200 \text{ K}$ 、考虑和不考虑蒸发时温度边界层厚度及界面换热量及其比值的对比. 由图 6 可以看出:随着  $v$  增加,温度边界厚度逐渐降低,液滴界面换热量逐渐增加,  $\zeta$  呈现出小幅增长的变化趋势,其变化曲线的斜率为  $3.50 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ;  $\beta$  值也随着  $v$  增加而呈现出线性增长,其变化曲线的斜率为  $8.46 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ;当  $v=18 \text{ m/s}$  时,  $\beta=0.949$ ,吹拂效应的影响可以忽略.

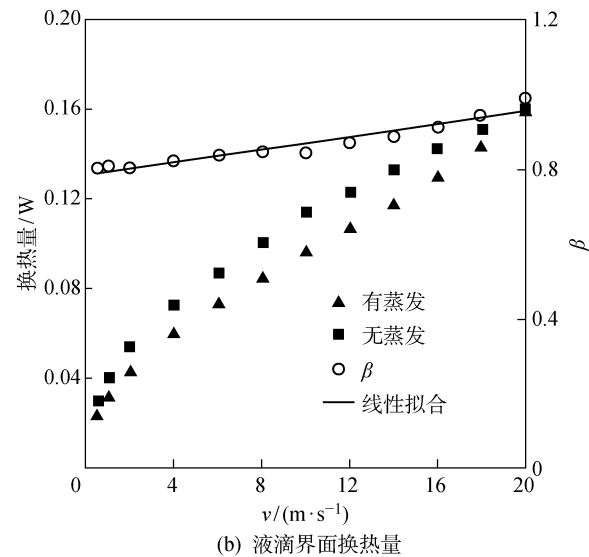


图 6 运动液滴在不同相对速度下的温度边界层厚度及界面换热量

Fig. 6 Temperature boundary thickness and heat transfer rate versus relative speeds of moving droplets

3 结论

(1) 基于液滴界面能量守恒原理所建适用于 LNG 单液滴在其蒸气中的蒸发模型的计算结果与实验结果较吻合.

(2) 在静止 LNG 液滴蒸发过程中,由于蒸发产生的吹拂效应而使得温度边界层变厚;随着温差增大,吹拂效应对温度边界层厚度的影响呈线性增长,而液滴粒径对其影响不大. 随着温差增加,吹拂效应对液滴界面换热量的影响呈现出分段变化特征,且分段点为 165 K;随着液滴粒径增大,吹拂效应对液滴界面换热量的影响保持恒定且很小.

(3) 在运动 LNG 液滴蒸发过程中,随着温差及运动速度增加,考虑、未考虑液滴蒸发时温度边界层厚度之比呈现出微弱的线性增长趋势;随着温差增加,吹拂效应对液滴界面换热量的影响呈现出分段变化特征,且分段点为 40 K;随着相对速度增加,液滴界面换热量增大,吹拂效应对液滴蒸发的影响逐

渐减小,当相对速度大于 18 m/s 时其影响可以忽略.

(4) 运动使得吹拂效应对液滴界面传热量的影响的分段点提前,从 165 K 提前至 40 K,并且使其线性减小段的斜率增加.

参考文献:

[1] 罗天龙. 大型储罐预冷过程非稳态传热分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.  
LUO Tianlong. Study on unsteady heat transfer of pre-cooling process of large-scale LNG storage tank [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.

[2] 孙晓平, 朱渊, 陈国明, 等. 国内外 LNG 罐区燃爆事故分析及防控措施建议[J]. 天然气工业, 2013, 33(5): 126-131.  
SUN Xiaoping, ZHU Yuan, CHEN Guoming, et al. An analysis of foreign and domestic explosion accidents in LNG tank fields and proposals for preventing

- measures[J]. **Natural Gas Industry**, 2013, 33 (5): 126-131.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] LU J, XU S, DENG J 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.
- [6] 李红艳. LNG 接收站投产预冷技术研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2014.
- LI Hongyan. Pre-cooling technology research in the commissioning of LNG terminal [D]. Dongying: China University of Petroleum, 2014.
- [7] 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.
- [8] HATANI M 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.
- [9] 李科, 赵钰祥, 武文斐. 单油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 Wenfei. Numerical study on surrounding gas flow and flame structures of single combusting droplet [J]. **Thermal Science and Technology**, 2015, 14(3): 178-183.
- [10] ZHOU Z F, WANG G X, CHEN B, *et al.* Evaluation of evaporation models for single moving droplet with a high evaporation rate [J]. **Powder Technology**, 2013, 240(5): 95-102.
- [11] 阮一逍, 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): 1-6.
- 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 Jiaotong University**, 2017, 51(6): 1-6.
- [12] 吴望一. 流体力学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2004: 145-156.
- WU Wangyi. Fluid mechanics [M]. Beijing: Peking University Press, 2004: 145-156.
- [13] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. **Aiaa Journal**, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [14] ANSYS Inc. Fluent 15.0 documentation [M]. New York: ANSYS Inc, 2014.
- [15] WONG S C, LIN A C. Internal temperature distributions of droplets vaporizing in high-temperature convective flows [J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 1992, 237(1): 671-687.

(本文编辑:何雪)