

单液氮液滴在气流中的蒸发运动特性研究

阮一逍¹, 薛绒¹, 赖欢^{1,2}, 刘秀芳¹, 侯予¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 中国空气动力研究与发展中心设备设计及测试技术研究所, 621000, 四川绵阳)

摘要: 为了研究低温风洞中液氮喷雾降温蒸发特性,从而从微观上把握整个喷雾过程,以经典蒸发模型为基础,建立了适用于高速气流下的单液滴蒸发模型,计算了高速气流下单个液氮液滴的蒸发过程,得到其蒸发过程中液滴直径、速度、蒸发速率等参数的变化规律,并比较了环境温度、环境压力、气流速度等不同因素对各参数的影响。结果表明:环境温度对液滴蒸发速率影响较大,在100~300 K环境温度下,每升高100 K,2 m的距离内液滴相对蒸发量大约增加18%,而对液滴运动速度则基本没有影响;气流速度越大,对流换热越强,液滴等时间蒸发速率越大,但由于蒸发距离一定,高速气流情况下的实际蒸发量减少,在上述条件下,10~30 m/s的速度范围内,相对蒸发量在5%~6%;大粒径液滴具有大的绝对蒸发量,而小粒径液滴的相对蒸发量则较大;随着环境压力的增大,蒸发速率会随之增加。

关键词: 喷雾冷却;液滴蒸发;液氮;运动特性

中图分类号: TK121 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)06-0147-06

Evaporation and Movement Characteristics of Single Liquid Nitrogen Droplet in High-Speed Gas Flow

RUAN Yixiao¹, XUE Rong¹, LAI Huan^{1,2}, LIU Xiufang¹, HOU Yu¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Facility Design and Instrumentation Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, Sichuan 621000, China)

Abstract: An evaporation model of single moving liquid nitrogen droplet in high-speed gas flow is developed based on the classical evaporation model to reveal the evaporation of whole liquid nitrogen spray. The droplet evaporation rate, diameter and velocity are obtained in the evaporation process by adjusting ambient temperature, ambient pressure and gas flow velocity. The results show that for those parameters, the ambient temperature has greater influence on the droplet evaporation rate, which grows with temperature. Within the falling distance of two meters, with the ambient temperature rising by every 100 K in the range from 100 to 300 K, the relative evaporation increases about 18%. The higher the gas flow speed reaches, the higher the droplet evaporation rate gets at equal time due to the stronger convection heat transfer, but the evaporation capacity decreases because of limited evaporation distance. Under above conditions, the relative evaporation is 5%~6% within the flow speed range of 10~30 m/s. Bigger droplet has bigger absolute evaporation capacity but smaller relative evaporation capacity, and the droplet evaporation rate rises with the ambient pressure.

收稿日期: 2017-01-10。 作者简介: 阮一逍(1991—),男,博士生;侯予(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51406160);中国博士后科学基金资助项目(2014M560773)。

网络出版时间: 2017-03-04

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170304.1704.002.html>

Keywords: spray cooling; droplet evaporation; liquid nitrogen; movement characteristics

随着航空技术的不断发展,飞行器的尺寸越来越大,飞行高度和速度也不断提高,结构愈加复杂,对于试飞之前的气动性能验证要求愈来愈高。气动性能验证的方法主要分为数值模拟和风洞试验,但在较大雷诺数下,数值模拟的模型和方法还不够成熟;另一方面,由于尺寸与飞行速度的提升,飞行器的雷诺数效应愈发明显,目前国外主要依靠建立低温风洞以达到目标雷诺数。与其他方法相比较,降低气流温度实现方便,需要的驱动功率小,且便于调节气流速度、总温和总压,因此得到了广泛使用^[1]。目前,我国对于跨声速风洞的建设与高雷诺数的模拟能力与国外仍有较大差距,这无形中增加了我国飞行器的研发难度。因此,建设自己的高雷诺数低温风洞并开展气动试验迫在眉睫。

低温风洞的降温涉及了液氮喷射、掺混、蒸发、换热等一系列的过程。对风洞中液氮喷雾的特性进行模拟可以为低温风洞的设计提供依据,而单液滴蒸发过程的研究可以从微观上把握整个喷雾过程。液滴的蒸发包括了与周围气相的传热传质,是模拟研究中的核心要素。

国内外学者对于液滴蒸发进行了大量的模拟和实验研究。文献[2]最早研究了燃料液滴的蒸发过程,在静止条件下,假设液相热导率无限大,且蒸发过程中气液两相物性均为常数。文献[3]在10~100的雷诺数范围内,分析了蒸发过程中液滴所受阻力的变化。文献[4]考虑有限热导率,假设液滴内部温度按抛物线形式分布,提出了适用于液滴对流加热的蒸发模型。文献[5]在上述模型的基础上,进一步加入了对液相辐射吸热的考虑。文献[6]对比了3种典型的蒸发模型,即经典模型、质量类比模型和漂移流动模型。文献[7]初步建立了单个制冷剂液滴的平衡蒸发阶段的蒸发冷却理论模型,并且预测了制冷剂液滴温度随飞行距离的变化。文献[8]以正庚烷燃料液滴在氮气中的蒸发为例,模拟在不同环境压力下的液滴蒸发,结果表明,液滴寿命随着环境压力的增大而减少。文献[9]使用了零维传热模型,研究了燃料液滴的蒸发破碎,发现考虑液滴内部的温度梯度会明显减少蒸发时间。文献[10]采用高速摄像机拍摄并分析了悬挂液滴的蒸发过程。

低温风洞的冷却主要使用低温工质液氮,而国内外的相关工作主要集中在水滴和燃料的蒸发模拟与实验,但对于液氮液滴的模拟及低温实验相

对较少。鉴于以上原因,本文以经典蒸发模型为基础,建立了适用于高速气流下的单个液滴蒸发模型,通过对液氮喷雾中单个液滴的蒸发运动特性的研究,为整个喷雾场的分析提供了一定的参考和指导作用。

1 数值理论与方法

1.1 液滴传热传质计算

液滴蒸发是一个耦合了流动、传热和传质的复杂物理过程。本文主要考虑稳态蒸发的过程和沸腾过程。在稳态蒸发阶段,气相传递给液滴的热量全部用来气化液滴。在此阶段,液滴的表面温度保持恒定。稳定蒸发阶段的蒸发率表达式为

$$\dot{m}_v = 2\pi D \left(\frac{k_g}{c_{p_g}} \right) \ln(1 + B_T) \quad (1)$$

式中: $\dot{m}_v$ 为液滴蒸发率; D 为液滴直径; k_g 为气体导热率; c_{p_g} 为气体比定压热容; B_T 为质量传递数。

蒸发率等于液滴质量损失率

$$\dot{m}_v = 2\pi D \left(\frac{k_g}{c_{p_g}} \right) \ln(1 + B_T) = - \frac{d}{dt} \left(\frac{\pi}{6} \rho_l D^3 \right) \quad (2)$$

整理得

$$\frac{dD}{dt} = - \frac{4k_g \ln(1 + B_T)}{\rho_l c_{p_g} D} \quad (3)$$

在稳态阶段, $B_T = B_M$, B_M 为质量传递数,式(3)可以改写为

$$2D \frac{dD}{dt} = - \frac{8k_g \ln(1 + B_M)}{\rho_l c_{p_g}} \quad (4)$$

$$\frac{d(D^2)}{dt} = - \lambda_e \quad (5)$$

式中: λ_e 为稳态液滴蒸发常数,表达式如下

$$\lambda_e = \frac{8k_g \ln(1 + B_M)}{\rho_l c_{p_g}} \quad (6)$$

即为稳态液滴蒸发的 D^2 定律。

1.2 液滴速度轨迹计算

当液滴在气流中运动时,液滴的速度 u_p 可以通过求解液滴动量方程得出。根据气粒两相流理论,当粒子与气体存在相对运动时,作用在粒子上的力有阻力、重力、虚拟质量力、热泳力、布朗力以及萨夫曼升力等。对于微小液滴,除阻力和重力外,其他附加作用力都可忽略。根据牛顿第二定律,得到液滴的动量方程如下

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l} \quad (7)$$

式中: u 为气流速度; ρ_l 为液滴密度; ρ_g 为气体密度。
式(7)等号右边第 1 项为阻力项,第 2 项为重力项,
阻力 F_D 按下式计算

$$F_D = \frac{18\mu_l}{\rho_l D^2} \frac{C_D Re_d}{24}$$

(8)

式中: μ_l 为液滴动力黏度; C_D 为阻力系数; Re_d 为液滴雷诺数。

对式(7)进行积分,得到液滴运动轨迹上每一位置的液滴速度,从而求出液滴轨迹。

2 数值模拟

基于上述换热和运动控制方程,针对液氮液滴蒸发,建立零维非稳态模型,考虑液滴与气体的沸腾换热以及气体对于液滴的作用力,不考虑液滴的形变和内部传热,并忽略与环境的辐射换热。

2.1 物理模型

由于原模型尺寸较大,且液滴运动的区域有限,为节约计算时间,认为液滴在一个 2 m 长的区域内飞行,气流速度方向沿着区域长度方向,重力方向垂直于气流的方向。

2.2 模型验证

根据文献[11]关于液氮液滴在空气中自由下落蒸发的实验,对液滴直径随时间的变化过程进行了模拟,并与实验数据进行了对比。计算参数如表 1 所示,数值模拟与实验结果的对照如图 1 所示,可以看出两者符合情况较好。

表 1 验证工况输入参数

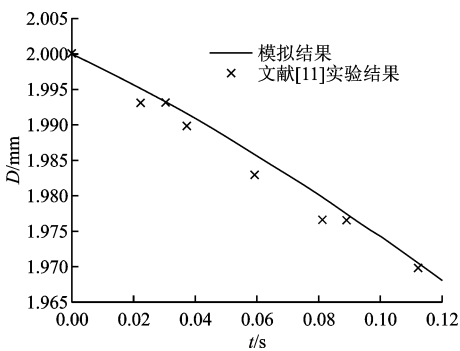
p_∞/Pa	$T_\infty/^\circ\text{C}$	D_0/mm
1.0×10^5	30	2.00
	-50	1.22
	-100	1.11

注: p_∞ 为环境压力; T_∞ 为环境温度; D_0 为液滴初始直径。

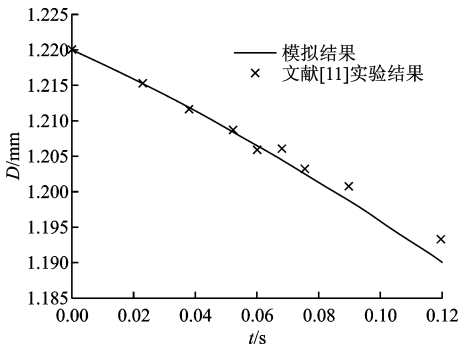
2.3 计算结果与分析

对于在高速气流下蒸发的液滴,其蒸发过程受到多个不同因素的影响,包括环境温度、气流速度、环境压力等。本文通过改变这些因素,对液氮液滴在氮气环境中的蒸发过程进行了模拟计算,得到了蒸发过程中液滴直径、速度等参数的变化情况,并对不同因素对蒸发过程的影响进行了系统分析。

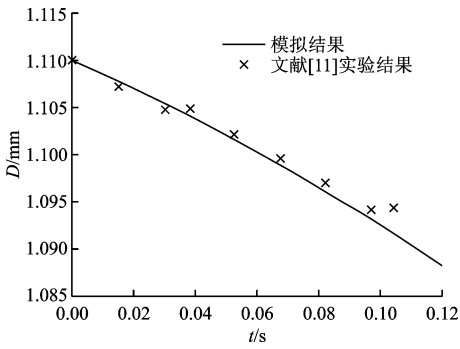
2.3.1 环境温度对液滴蒸发的影响 图 2 为不同环境温度下液滴直径、位置及蒸发速率在蒸发过程中的变化情况。其中,环境压力 $p_\infty=0.1\text{ MPa}$,气流速度 $u=10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,液滴初始速度 $u_{p_0}=7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,液滴初始直径 $D_0=0.8\text{ mm}$,液滴温度 $T_{p_0}=$



(a) $T_\infty=30\text{ }^\circ\text{C}$, $D_0=2\text{ mm}$



(b) $T_\infty=-50\text{ }^\circ\text{C}$, $D_0=1.22\text{ mm}$



(c) $T_\infty=-100\text{ }^\circ\text{C}$, $D_0=1.11\text{ mm}$

图 1 本文模拟结果与文献[11]实验结果的比较

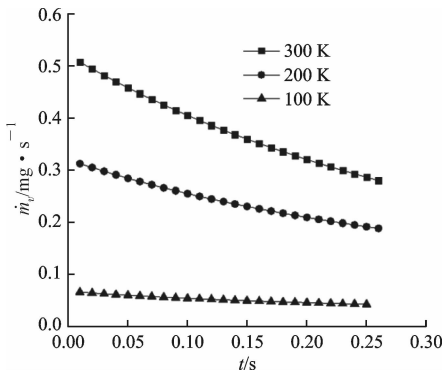
77.4 K。由图 2a 与图 2b 可以看出,环境温度对液滴的蒸发速率和蒸发量有很大影响,根据液滴蒸发时的传热、传质方程式,液滴与环境的温差与液滴的传热传质速率成正比,从而影响液滴的蒸发速率。表 2 统计了不同环境温度下液滴在 2 m 区域内的相对蒸发量的变化情况,其大致规律为,从 100 K 到 300 K,环境温度每升高 100 K,蒸发量大约增加 18%。环境温度对于液滴运动速度的影响不大,距离曲线基本重合,环境温度仅仅通过影响液滴蒸发量从而影响液滴直径,进一步影响液滴所受阻力情况,温度升高会使顺气流方向速度增大而重力方向速度减小,最终反映在总运动距离上,速度正负相抵。

表 2 不同环境温度下液滴蒸发情况对比

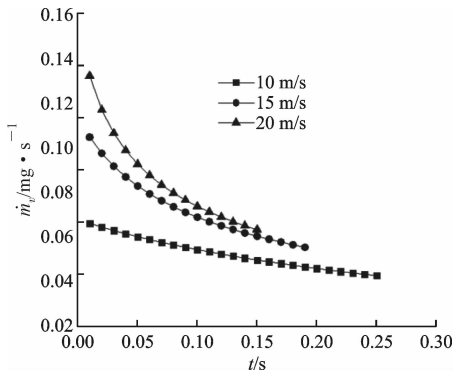
T_{∞}/K	残余直径/mm	相对蒸发量/%
100	0.783 6	6.02
200	0.716 3	28.22
300	0.657 3	44.53

表 3 不同气流速度下液滴蒸发情况对比

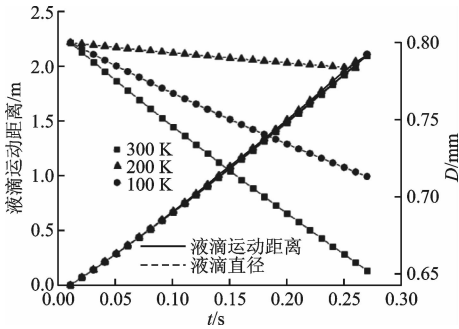
气流速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	残余直径/mm	相对蒸发量/%
10	0.783 6	6.02
20	0.784 4	5.74
30	0.786 6	4.94



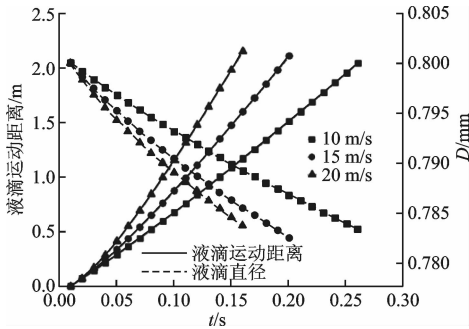
(a)环境温度对蒸发速率的影响



(a)气流速度对蒸发速率的影响



(b)环境温度对液滴直径与运动距离的影响



(b)气流速度对液滴直径与运动距离的影响

图 2 不同环境温度下液滴直径、位置及蒸发速率在蒸发过程中的变化情况

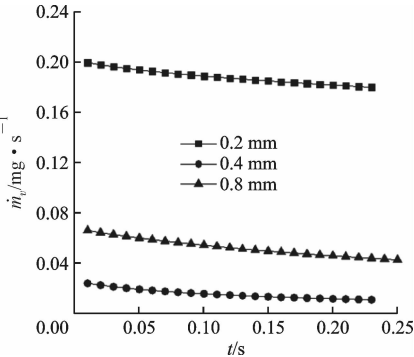
图 3 不同气流速度下液滴直径、位置及蒸发速率在蒸发过程中的变化情况

2.3.2 气流速度对液滴蒸发的影响 图 3 为不同气流速度下液滴直径、位置及蒸发速率在蒸发过程中的变化情况。其中,环境温度 $T_{\infty}=100\text{ K}$,环境压力 $p_{\infty}=0.1\text{ MPa}$,液滴初始速度 $u_{p_0}=7\text{ ms}^{-1}$,液滴初始直径 $D_0=0.8\text{ mm}$,液滴温度 $T_{p_0}=77.4\text{ K}$ 。图 3a 显示,气流速度越大,液滴蒸发速率越快,但根据表 3,3 种速度下的液滴蒸发量似乎相差不大,这种情形需要分为两个方面讨论。一方面,气流和液滴间的相对速度越大,液滴雷诺数越大,努塞尔数也越大,强化了液滴的换热情况,从而加速了其蒸发速率;另一方面,由于计算区域长度一定,随着相对速度增大,液滴在计算区域的停留时间有所减少,缩短了与环境进行传热传质的时间。由于两方面因素的综合影响,尽管高速气流使得蒸发速率增加,但是较少的停留时间导致从结果中看液滴的蒸发量与气流速度关系不大。

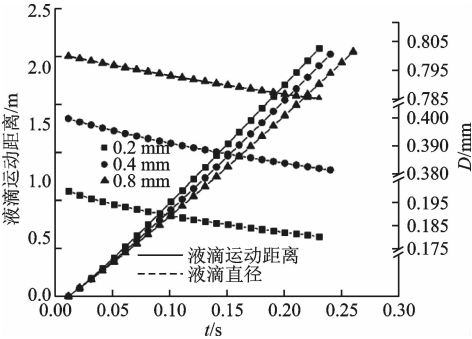
2.3.3 液滴直径对液滴蒸发的影响 图 4 显示了不同液滴初始直径下液滴直径、位置及蒸发速率在蒸发过程中的变化情况。其中,环境温度 $T_{\infty}=100\text{ K}$,环境压力 $p_{\infty}=0.1\text{ MPa}$,气流速度 $u=10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,液滴初始速度 $u_{p_0}=7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,液滴温度 $T_{p_0}=77.4\text{ K}$ 。图 4a 为液滴蒸发速率随时间的变化趋势,可以看出,较大的液滴具有较大的蒸发速率。这是由于此时液滴的表面积处于最大值,与环境的换热量最大,之后随着蒸发过程中直径的减小而换热量逐渐减小。图 4b 为不同大小液滴的直径随蒸发过程的变化情况,可以看出,大小不同的液滴其直径的变化趋势一致,但从表 4 看出蒸发量有所差异。从液滴蒸发的趋势可以看出:液滴在蒸发的初始时刻有最大的蒸发速率,因此 0.8 mm 液滴的绝对蒸发量最大; 0.2 mm 液滴具有最大的比表面积,因此其相对蒸发量最大,如表 4 所示。

表 4 不同直径液滴蒸发情况对比

$D_0 /$ mm	残余直 径/mm	相对蒸 发量/%	绝对蒸 发量/mg
0.2	0.180 2	26.85	0.000 9
0.4	0.381 5	13.24	0.003 6
0.8	0.783 6	6.02	0.013 1



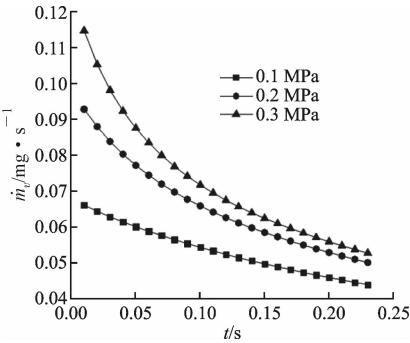
(a)液滴初始直径对蒸发速率的影响



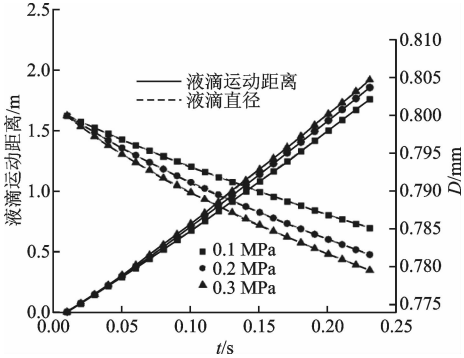
(b)液滴初始直径对液滴直径与运动距离的影响

图 4 不同液滴初始直径下液滴直径、位置及蒸发速率在蒸发过程中的变化情况

2.3.4 环境压力对液滴蒸发的影响 图 5 为不同环境压力下液滴直径、位置及蒸发速率在蒸发过程中的变化情况。其中,环境温度 $T_{\infty}=100\text{ K}$,气流速度 $u=10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,液滴初始速度 $u_{p_0}=7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,液滴初始直径 $D_0=0.8\text{ mm}$,液滴温度 $T_{p_0}=77.4\text{ K}$ 。观察图 5 可以看出,在蒸发的开始时刻,高压下蒸发速率明显高于低环境压力下的,但随着蒸发过程的进行,高压下的蒸发速率减小得更快,最终依旧呈现出环境压力越高,蒸发速率越大的趋势。其主要原因从式(4)可以看出,环境压力升高,改变了物性,使得质量传递数增加,增大了蒸发速率。图 5b 反映了环境压力对液滴运行距离和直径的影响,同样是由于环境气体的密度随压力升高而增大,从而使得液滴受到气体的作用力增大,因此从运行距离中体现液滴速度随着压力升高而增加。



(a)环境压力对蒸发速率的影响



(b)环境压力对液滴直径与运动距离的影响

图 5 不同环境压力下液滴直径、位置及蒸发速率在蒸发过程中的变化情况

3 结 论

本文在液滴蒸发模型的基础上,根据低温跨声速风洞中的实际工况加以修正,对高速气流下液滴的蒸发过程进行了模拟计算,通过改变计算参数,研究了环境温度、来流速度等因素对液滴蒸发过程的影响,结果如下。

- (1)环境温度对液滴蒸发速率影响较大,温度越高,蒸发速率越大,大致规律为,从 100 K 到 300 K,环境温度每升高 100 K,2 m 的距离内液滴相对蒸发量大约增加 18%,但对液滴运动速度则基本没有影响。
- (2)环境压力对蒸发速率影响有限,总体趋势为环境压力越高,蒸发速率越大,对液滴速度的影响主要是由气体密度的变化所导致的。
- (3)气流速度越高,对流换热越强,液滴蒸发速率也就越大,在 10~30 m/s 的速度范围内,相对蒸发量在 5%~6%。
- (4)大粒径液滴具有大的绝对蒸发量,而小粒径液滴的相对蒸发量则较大。
- (5)液滴运动距离受来流速度影响较大,在改变其他条件的情况下,对于液氮液滴的距离影响很小。

参考文献:

- [1] KILGORE R. Evolution and development of cryogenic wind tunnels [C] // 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. New York, USA: AIAA, 2005: 457.
- [2] SPALDING D B. The combustion of liquid fuels [C] // Fourth Symposium (International) on Combustions. Baltimore, Maryland, USA: Williams and Wilkins, 1953: 847-864.
- [3] YUEN M. Numerical study of droplet evaporation in a high-temperature stream [J]. Journal of Heat Transfer, 1983, 105(2): 389-397.
- [4] DOMBROVSKY, LSZHIN S. A parabolic temperature profile model for heating of droplets [J]. Journal of Heat Transfer, 2003, 125(3): 535-537.
- [5] ABRAMZON B, SAZHIN S. Convective vaporization of a fuel droplet with thermal radiation absorption [J]. Fuel, 2006, 85(1): 32-46.
- [6] 辛娟娟, 周致富, 辛慧, 等. 单个液滴蒸发模型中不同质量传递公式的有效性分析 [J]. 化工学报, 2012, 63(6): 1704-1708.
XIN Juanjuan, ZHOU Zhifu, XIN Hui, et al. Validation analysis of different mass transfer formula in single droplet evaporation model [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2012, 63(6): 1704-1708.
- [7] 周致富, 辛慧, 陈斌, 等. 激光手术喷雾冷却中单个液滴蒸发特性 [J]. 中国激光, 2008, 35(6): 952-956.
ZHOU Zhifu, XIN Hui, CHEN Bin, et al. Evaporation characteristics of a single droplet in laser treatment of port wine stain in conjunction with cryogen spray cooling [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(6): 952-956.
- [8] 丁继贤, 孙凤贤, 姜任秋. 对流条件下环境压力对液滴蒸发的影响研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(10): 1104-1108.
DING Jixian, SUN Fengxian, JIANG Renqiu. Effects of ambient pressure on fuel droplet evaporation in a convective environments [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(10): 1104-1108.
- [9] SAZHIN S S, ABDELGHAFAR W A, SAZHINA E M, et al. Models for droplet transient heating: effects on droplet evaporation, ignition, and break-up [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2005, 44(7): 610-622.
- [10] 马力, 仇性启, 王健, 等. 单液滴蒸发影响因素实验研究 [J]. 现代化工, 2013, 33(1): 103-106.
MA Li, QIU Xingqi, WANG Jian, et al. Experimental research on single droplet evaporation factors [J]. Modern Chemical Industry, 2013, 33(1): 103-106.
- [11] AWONORIN S. Evaporation rates of freely falling liquid nitrogen droplets in air [J]. Heat Transfer Engineering, 1989, 10(1): 26-36.

(编辑 杜秀杰)

(上接第128页)

- [12] WU H, FENG Z, GUO C, et al. ICTCP: incast congestion control for TCP in data center networks [C] // ACM Conference on Emerging Networking Experiment and Technology. New York, USA: ACM, 2010: 13-13.
- [13] JIANG C, LI D, XU M, et al. A coding-based approach to mitigate TCP incast in data center networks [C] // International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 29-34.
- [14] GHOBADI M, YEGANEH S H, GANJALI Y. Re-thinking end-to-end congestion control in software-defined networks [C] // ACM Hotnets 2012. New York, USA: ACM, 2012: 1-6.
- [15] JOUET S, PEZAROS D P. Measurement-based TCP parameter tuning in cloud data centers [C] // 21st IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP). New York, USA: ACM, 2013: 1-3.
- [16] JOUET S, PERKINS C, PEZAROS D. OTCP: SDN-managed congestion control for data center networks [C] // Network Operations and Management Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 1-9.
- [17] CURTIS A R, KIM W, YALAGANDULA P. Mahout: low-overhead datacenter traffic management using end-host-based elephant detection [C] // IEEE INFOCOM 2011. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1629-1637.
- [18] AL-FARES M, RADHAKRISHNAN S, RAGHAVAN B, et al. Hedera: dynamic flow scheduling for data center networks [C] // USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation. Berkeley, CA, USA: USENIX Association, 2010: 281-296.
- [19] WU H, JU J, LU G, et al. Tuning ECN for data center networks [C] // 8th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies Archive. New York, USA: ACM, 2012: 25-36.

(编辑 杜秀杰)