

# 真空环境液体排放过程的热动力学研究

赵建福<sup>1</sup> 杜王芳<sup>2</sup> 李凯<sup>1</sup>

(1. 中国科学院力学研究所微重力重点实验室, 北京 100190;

2. 国家核电技术有限公司北京研发中心, 北京 102209)

**摘要** 实验研究了真空环境液体排放过程 (特别是出口射流) 的热动力学特征, 分析了 3 种不同射流形态 (连续液体射流、部分闪蒸射流和完全闪蒸射流) 间的转换条件, 发现基于气泡生长机制的 Cleary 模型低估了闪蒸所需过热度, 较早预测了闪蒸射流的发生; 而基于核化机制的 Lamanna 模型会高估闪蒸所需化学势差, 预测的闪蒸发生晚于实验观测结果。闪蒸引起的流量壅塞效应对真空液体排放流量的影响依赖于初始过冷比  $R_{P,0} = P_0/P_{\text{sat}}(T_0)$ , 除非初始过冷比远大于 1, 一般需要考虑闪蒸引起的实际排放流量变化, 即明显低于不可压理论的估算结果。

**关键词** 液体闪蒸射流; 壅塞; 真空液体排放

**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2015)03-0564-04

## Thermal Dynamics on Liquid Discharge into Vacuum Environment

ZHAO Jian-Fu<sup>1</sup> DU Wang-Fang<sup>2</sup> LI Kai<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. State Nuclear Power Technology Corporation Research & Development Center, Beijing 102209, China)

**Abstract** Thermal dynamics of liquid discharge into a vacuum environment are studied experimentally, particularly focusing upon the phenomenon of liquid flashing jet near the exit of the discharge pipe. Transition conditions among three different kinds of jet patterns, namely continuous liquid jet, partially flashing liquid jet, and completely flashing liquid jet, are analyzed and discussed in detail. The present experimental data are compared with common-used mechanistic models. It's found that the Cleary model, based on the mechanism of bubble growth, will underestimate the required superheat and then make an earlier forecast of the occurrence of liquid flashing jet. On the other hand, the Lamanna model, based on the mechanism of nucleation, will overestimate the required chemical potential difference and then predict a later occurrence of liquid flashing jet comparing with the experimental observation. The influence of the flow choking behavior caused by liquid flashing on the discharge flow rate depends on the initial undercooling  $R_{P,0} = P_0/P_{\text{sat}}(T_0)$ . Unless  $R_{P,0}$  is far greater than 1, the influence of flashing must be considered. Comparing with the prediction of the incompressible model, the actual discharge flow rate will decrease.

**Key words** flashing liquid jet; flow choking behavior; liquid discharge into vacuum

## 0 前言

卫星、液体火箭、载人飞船与空间站等空间飞行器在太空任务执行过程中, 会向太空高真空环境排放生活废水、推进剂等液态物质。真空环境的液体排放过程中, 沿程压力迅速下降导致液体饱和温度随之下降, 甚至远低于液体实际温度, 从而使液体处于过热状态, 引发快速、剧烈的蒸发即闪蒸现象。闪蒸需要吸收大量的热, 导致液体温度急剧下降, 甚至远低于冻结温度而发生液体冻结, 堵塞排放通道。而闪蒸生成的大量蒸汽也会撕裂液相介质,

形成大量液滴, 影响排放特性。此外, 排放管外高真空环境中的射流形态直接与射流推力相关, 而分散的液体一旦接触飞行器固体表面会即刻冻结, 或在太空高真空环境中的继续闪蒸过程中冻结甚至爆裂破碎, 对飞行器安全及任务实施等有着严重影响。因此, 高真空环境中的液体闪蒸射流现象研究对其在航天技术应用中具有重要意义。

与常规的不可压液体射流相比, 真空环境中的液体闪蒸射流往往具有明显不同的特征<sup>[1-8]</sup>。现有

收稿日期: 2014-12-23; 修订日期: 2015-02-15

基金项目: 中国科学院“知识创新工程”资助项目

作者简介: 赵建福 (1967-), 男, 研究员, 博士, 主要从事微重力多相热流体动力学研究。E-mail: jfzhao@imech.ac.cn

研究依据液体初始温度或背压对其观测到的射流形态进行了分类,但由于观测方法与具体参数定义等的不同,具体的分类不可避免地存在着一定的差异,甚至类别定义不尽相同,迄今尚没有公认且明确的分类判据。此外,真空环境中的液体闪蒸射流流量特性也与常规的不可压液体射流有着极大差异,甚至会发生如可压缩气体喷管流那样的壅塞现象。

与真空环境液体闪蒸射流相似,常压环境中高温高压液体(如液化石油气等)的泄漏过程中也存在强烈的闪蒸现象<sup>[9-13]</sup>。射流形态的划分尽管有相似之处,但环境气体的影响也不可忽视,例如,在过冷或低过热情形中,机械破碎机制同样会导致液体射流的破碎与雾化;而高过热情形中液体闪蒸也免不了环境气氛的影响甚至制约。

本文采用热动力学方法分析了真空环境中的液体排放过程,并结合实验观测结果对排放管道出口附近的射流形态与流量特性进行研究,以便指导相关工程实践。

## 1 实验装置与流程

实验采用了真空闪蒸装置<sup>[14]</sup>,包括真空维持系统、实验盒及过程控制与数据采集系统。实验盒压力变化采用德国 BD 公司压阻式不锈钢压力传感器(DMP331)测量,量程为 0~0.01 MPa(绝对压力),响应时间小于 5 ms,不确定度为 0.25% FS。

液体真空排放实验采用连接在一只 1 mL 透明塑料注射针筒上的薄壁不锈钢直管作为射流喷管,喷管内径 0.226 mm,长度 16.5 mm。实验工质为蒸馏水,其初始温度采用水浴调节<sup>[6-8]</sup>。射流的驱动压力则来自实验盒内外压力之差。

实验开始前先启动真空泵,将容积约 1 m<sup>3</sup> 的真空罐内压力降到适当数值,并将 1 mL 左右的蒸馏水注入注射针筒内,调整水浴温度并维持 30 min 甚至更长时间,使得工质初始温度均匀、稳定。其次,打开真空罐和实验盒之间连接管路上的球阀,启动数据记录仪和高速摄像机。最后,按下电磁阀启动开关,使实验盒内压力快速降低,在外部大气压力驱动下,针筒内的蒸馏水经毛细管喷出形成射流。射流形态由瑞士 AOS 公司 Vitcam CTC 高速摄像机记录,图像采集频率设为 400 帧/s;而射流流量则通过针筒内液面位置变化测出。

## 2 液体闪蒸射流的热动力学分析

图 1 给出了实验观测到的 3 种典型射流形态:连续液体射流、部分闪蒸射流和完全闪蒸射流<sup>[6-8]</sup>。

假设液体在喷管上游处于过冷液体区域,初始压力与温度分别为  $P_0$  和  $T_0$ 。若喷管出口环境压力  $P_\infty$  低于初始温度所对应的液体饱和压力  $P_{\text{sat}}(T_0)$ ,则液体在排放口处呈过热状态,流出时会发生快速蒸发即闪蒸;否则,热效应对射流形态的影响可以忽略,射流破碎一般源于射流表面剪切作用,因此又称为机械破碎。机械破碎时稳定液滴的最大尺寸对应于临界 Weber 数  $We_d = \rho_a u^2 d_p / \sigma = 10 \sim 20$  (其中,下标 a 和 p 分别代表环境空气和液滴)。

过热液体对平衡状态的偏离程度往往采用过热度  $\Delta T = T - T_{\text{sat}}(P)$  来表征<sup>[10-12]</sup>,其中  $T_{\text{sat}}(P)$  代表当地压力  $P$  所对应的液体饱和温度。Muralidhar 等<sup>[11]</sup> 直接以临界过热度来描述射流的机械破碎与闪蒸雾化转换条件,而 Kitamura 等<sup>[10]</sup> 基于过热液体中气泡生长速度的分析提出了一个修正的 Jacob 数准则来确定机械破碎与闪蒸雾化间的转换边界,随后 Cleary 等<sup>[12]</sup> 扩展为如下方程:

$$\Phi \cdot Ja = k \cdot We_v^{-1/7} \quad (1)$$

其中, Jacob 数  $Ja = \rho_l c_{pl} \Delta T / (\rho_v h_{lv})$ , 气相 Weber 数  $We_v = \rho_v u^2 d_t / \sigma$ , 修正因子  $\Phi = 1 - \exp(-2300 \rho_v / \rho_l)$ ,  $\rho$ 、 $c_p$ 、 $h$ 、 $u$ 、 $d$  和  $\sigma$  分别代表密度、比热容、焓、速度、直径和表面张力,下标 l、v 和 t 则对应液相、气相和喷管。Cleary 等<sup>[12]</sup> 将机械破碎与闪蒸机制共同作用的过渡区边界定义为常数  $k=55$  (机械破碎机制的上限) 和 150 (完全闪蒸雾化的开始) 时式 (1) 确定的曲线。该模型基于过热液体中的气泡生长机制,将修正的 Jacob 数与 Weber 数联系在一起,反映了闪蒸和机械破碎机制间的竞争。

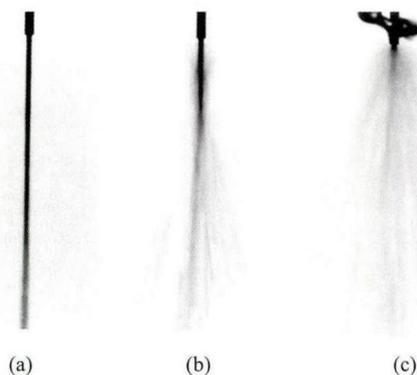


图 1 真空液体射流的典型形态:(a) 连续液体射流,(b) 部分闪蒸射流,(c) 完全闪蒸射流

Fig. 1 Typical patterns of liquid jet into vacuum near the exit of the discharge pipe. (a) continuous liquid jet, (b) partially flashing liquid jet, and (c) completely flashing liquid jet

不过,液、气相变的驱动力来自两相间的化学

势差  $\Delta\mu$

$$\Delta\mu = k_B T_0 \ln \left[ \frac{P_{\text{sat}}(T_0)}{P_\infty} \right] \quad (2)$$

其中,  $k_B$  为玻尔兹曼常数。这样, 用压力定义的出口过热比  $R_{P,\infty} = P_{\text{sat}}(T_0)/P_\infty$  因直接与化学势差相关联, 可能更适于表征液体闪蒸特征。Lamanna 等 [13] 基于经典核化理论, 引入无量纲参数  $\chi$ , 即临界团簇的形成能  $\Delta G$  的无量纲形式

$$\chi \equiv \Delta G/k_B T_0 = \Theta^3/\Psi^2 \quad (3)$$

来表征单位体积的过热液体在单位时间内产生的稳定气核数, 并结合实验数据, 以此作为完全闪蒸射流发生的判据, 即液体射流由机械破碎向完全闪蒸雾化的转换对应于  $\chi=1\sim 4$ 。在此模型中, 用到了无量纲的表面张力  $\Theta$  [15] 和化学势差  $\Psi$

$$\Theta = \frac{a_0 \sigma}{k_B T_0} \quad (4)$$

$$\Psi \equiv \frac{\Delta\mu}{k_B T_0} = \ln R_{P,\infty} \quad (5)$$

其中,  $m$  为单个分子的质量,  $a_0$  为液体分子表面积

$$a_0 = \sqrt[3]{36\pi v_m^2} = \sqrt[3]{36\pi (m/\rho_l)^2} \quad (6)$$

图 2 和图 3 分别将本文实验结果与 Cleary 模型和 Lamanna 模型给出的转换边界进行了比较, 符合程度均不能令人满意。Cleary 模型预测结果 (虚线) 在高温 ( $T_0=333\text{ K}$ ) 时与实验比较一致, 但在低温 ( $T_0=298\text{ K}$ ) 时明显低估了闪蒸发生所需的过热度, 较早预测了闪蒸的发生。基于实验数据, 可将 Cleary 模型修正为 (在图 2 中用实线表示):

$$\Phi \cdot Ja = k_s \cdot We_v^{-1} \quad (7)$$

其中, 常数  $k_s=0.75$ (机械破碎边界) 或  $5.75$ (完全闪蒸雾化边界)。该变化的原因来自本文实验中 Weber 数非常小, 射流表面剪切作用微弱, 在较低过热情形中射流几乎没有任何破碎, 而是呈现为连续的液体射流。这样, 在本文研究的参数范围内, 液体射流的破碎只能依赖闪蒸作用, 破碎的程度或射流形态也就更大程度地取决于射流出口处的液体过热程度。

而 Lamanna 模型则明显高估了闪蒸射流发生所需的化学势差 (图 3), 预报的闪蒸射流远晚于实验观测。实验观测到的过渡区位置由 Lamanna 模型预测的  $\chi=1\sim 4$  上移至  $\chi=23\sim 1000$ (图 3 中用实线表示)。需要指出的是, Lamanna 模型是针对短喷管情形提出的, 本文所使用的喷管长径比高达 73, 且入

口局部阻力作用显著 [6~8], 单纯基于均相核化理论的 Lamanna 模型必然需要进行修正, 以便考虑管内流动状态的影响。

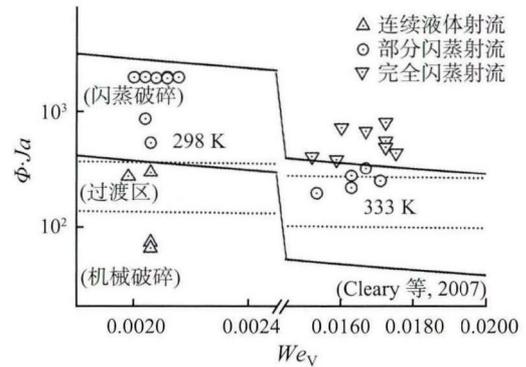


图 2 基于 Cleary 模型的射流形态图  
Fig. 2 Jet pattern map based on the Cleary model

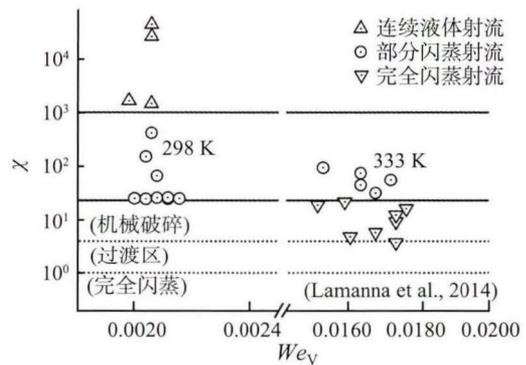


图 3 基于 Lamanna 模型的射流形态图  
Fig. 3 Jet pattern map based on the Lamanna model

此外, 杜王芳等 [6~8] 报道了真空环境闪蒸射流流量会表现出壅塞效应, 即背压低于某个临界值后, 液体闪蒸射流流量不再随背压下降而增大。这在高温时尤为明显。不过, 即使发生了闪蒸, 低温时不可压射流理论预测的流量与实测结果差异也很小, 可以忽略不计。这主要源于低温时饱和压力远小于驱动压力。类似于出口过热比  $R_{P,\infty}$ , 定义初始过冷比  $R_{P,0} = P_0/P_{\text{sat}}(T_0)$ , 则实验盒内、外压力差  $\Delta P = P_0 - P_\infty$  可表示为

$$\Delta P = P_{\text{sat}}(T_0) (R_{P,0} - 1) \left[ 1 + \frac{1}{R_{P,0} - 1} \left( 1 - \frac{1}{R_{P,\infty}} \right) \right] \quad (8)$$

显然, 若初始过冷比  $R_{P,0}$  远大于 1, 式 (8) 右端括号内第二项将远小于 1, 出口过热比  $R_{P,\infty}$  对闪蒸射流驱动力及流量的影响即可忽略不计。在本文研究的 2 种情形中, 低温时  $R_{P,0}=32$ , 而高温时  $R_{P,0}=5$ , 因而在高、低温时射流流量变化呈现出了

明显不同的表现。这样, 初始过冷比可以用来确定不可压射流理论的适用范围: 若  $R_{P,0} \gg 1$ , 无论闪蒸是否发生, 不可压射流理论均可以给出令人满意的流量预测; 否则, 必须考虑闪蒸引起的流量壅塞效应对射流流量的影响。

### 3 结 论

本文实验研究了真空环境液体射流的热动力学特征, 随着液体初始温度和环境压力的变化, 观察到了连续液体射流、部分闪蒸射流和完全闪蒸射流 3 种不同的射流形态, 与文献报道的真空液体射流形态转换模型比较发现, 基于过热液体中气泡生长机制的 Cleary 模型在高温 ( $T_0=333$  K) 时与实验结果比较一致, 但在低温 ( $T_0=298$  K) 情形中明显低估了闪蒸射流发生所需的过热度, 较早预测了闪蒸射流的发生; 而基于过热液体核化机制的 Lamanna 模型明显高估了闪蒸射流发生所需的化学势差, 预测出的闪蒸射流远晚于实验观测。基于观测数据, 对上述 2 类模型进行了修正, 以便用于相近情形中液体射流的分类预测。

此外, 本文还对液体闪蒸射流流量特性进行了分析, 引入用压力定义的初始过冷比  $R_{P,0}$  以确定不可压射流理论的适用范围: 若  $R_{P,0} \gg 1$ , 无论闪蒸是否发生, 不可压射流理论均可以给出令人满意的流量预测; 否则, 必须考虑闪蒸引起的流量壅塞效应对射流流量的影响。

### 参 考 文 献

- [1] Fuchs H, Legge H. Flow of a Water Jet Into Vacuum [J]. *Acta Astronautica*, 1979, 6: 1213-1226
- [2] Peter E M, Takimoto A, Hayashi Y. Flashing and Shattering Phenomena of Superheated Liquid Jets [J]. *JSME International Journal*, 1994, 37B(2): 313-321
- [3] Simões-Moreira J R, Vieira M M, Angelo E. Highly Expanded Flashing Liquid Jets [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2002, 16(3): 415-424
- [4] Vieiro M M, Simões-Moreira J R. Low-Pressure Flashing Mechanisms in Iso-Octane Liquid Jets [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, 572: 121-144
- [5] Pavlenko A N, Koverda V P, Reshetnikov A V, et al. Peculiarities of Superheated Liquid Discharging Under Strong and Weak Nonequilibrium Conditions [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 19(4): 289-305
- [6] Du W F, Li K, Wang S F, et al. Flashing Liquid Jets in Low-Pressure Environment [J]. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 2013, 1(2): 173-180
- [7] 杜王芳, 赵建福, 李凯. 真空环境液体闪蒸射流实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2014, 35(5): 910-913  
DU Wangfang, ZHAO Jianfu, LI Kai. Experimental Study on Flashing Liquid Jets in Vacuum Environment [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 35(5): 910-913
- [8] 杜王芳. 高真空环境液体射流与液滴闪蒸的热动力学研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013  
DU Wangfang. Study on Thermal Dynamical Behaviors of Liquid Jets and Flashing of Single Droplets in High Vacuum Environment [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013
- [9] Oza R. On the Mechanism of Flashing Injection of Initially Subcooled Fuels [J]. *Journal of Fluid Engineering*, 1984, 106: 105-109
- [10] Kitamura Y, Morimitsu H, Takahashi T. Critical Superheat for Flashing of Superheated Liquid Jets [J]. *Indust. Eng. Chem. Fundam.*, 1986, 25: 206-211
- [11] Muralidhar R, Jersey G R, Krambeck F J. A Two-Phase Model for Subcooled and Superheated Liquid Jets [C]// in: *Proceeding of International Conference on Modelling & Mitigating Accidental Releases of Hazardous Materials* AIChE, New Orleans: LA, USA, 1995: 189-224
- [12] Cleary V, Bowen P, Witlox H. Flashing Liquid Jets and Two-Phase Droplet Dispersion. I. Experiments for Derivation of Droplet Atomisation Correlations [J]. *Journal of Hazard Materials*, 2007, 142: 786-796
- [13] Lamanna G, Kamoun H, Weigand B, et al. Towards a Unified Treatment of Fully Flashing Sprays [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2014, 58: 168-184
- [14] 杜王芳, 赵建福, 李凯. 快速减压条件下液滴热动力学行为的实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2012, 33(8): 1349-1352  
DU Wangfang, ZHAO Jianfu, LI Kai. Experimental Study on Thermal-Dynamical Behaviors of Liquid Droplets During Quick Depressurization [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2012, 33(8): 1349-1352
- [15] Girshick S, Chiu C. Time-Dependent Aerosol Models and Homogeneous Nucleation Rates [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1990, 93: 1273-1277