

# 快速减压条件下液滴热动力学行为的实验研究

杜王芳 赵建福 李凯

(中国科学院力学研究所微重力重点实验室, 北京 100190)

**摘要** 实验研究了快速降压过程中悬挂单水滴闪蒸/冻结过程, 得到了典型条件下液滴闪蒸/冻结过程的热动力学特征, 并基于实验观测结果, 探讨了不凝气体对液滴闪蒸/冻结热动力学过程的影响。实验发现, 起始冻结时的液滴过冷度近似为常数, 而再辉温度对应于终态蒸汽分压所确定的气-固相变平衡温度。这些结果有助于正确预言高真空环境中的液滴闪蒸/冻结特征。

**关键词** 液滴; 闪蒸; 冻结; 不凝气体

**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2012)08-1349-04

## Experimental Study on Thermal-Dynamical Behaviors of Liquid Droplets During Quick Depressurization

DU Wang-Fang ZHAO Jian-Fu LI Kai

(Key Laboratory of Microgravity/CAS; Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** The evaporating-freezing process of single pensile water droplet during quick depressurization is studied experimentally. The typical characteristics of the thermal-dynamical behaviors of this process are obtained. Based on the experimental observations, the influences of non-condensable gases on the process are analyzed and discussed in detail. It is pointed out that the subcooling corresponding to the onset of freezing of the droplet is nearly a constant, and the recalescence temperature is approximatively equal to the vapor-solid equilibrium temperature determined by the partial pressure of vapor at the terminal state. The present results are helpful for predicting correctly the evaporating-freezing processes of liquid droplets in high vacuum environment.

**Key words** liquid droplets; flashing; freezing; non-condensable gases

## 0 引言

载人飞船、液体火箭等空间飞行器在太空飞行过程中, 会向太空高真空环境排放生活废水、液态推进剂等。液体排放过程中压力的迅速下降, 导致液体饱和温度随之快速下降, 甚至远低于液体温度。处于过热状态的液体会快速而剧烈地蒸发即发生闪蒸。闪蒸过程中, 液体蒸发需要吸收大量的热, 但太空应用系统往往难以及时供给, 这部分热量只能从未蒸发的液相介质中获得, 导致液体温度急剧下降, 甚至远低于冻结温度而发生冻结现象<sup>[1]</sup>。闪蒸过程中, 大量蒸汽的快速生成, 往往会撕裂液相介质, 形成大量液滴。而排放到太空中的液滴, 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, 这些对飞行器安全及任务实施等有着致命的危害。因此, 高真空环境中的液滴闪蒸现象研究在航天技术应用中具

有重要意义。

文献中有许多工作研究了液滴在真空环境下闪蒸、冻结及破碎等。Shin 等<sup>[2]</sup>、Kim 等<sup>[3]</sup>认为液滴结冰需有三个条件: 足够小的尺寸, 足够长的真空停留时间, 远低于三相点压力的环境压力。张绍志等<sup>[4]</sup>认为减小水滴颗粒尺寸可以提高水滴的结冰率。Feuillebois 等<sup>[5]</sup>的研究将闪蒸分为两个阶段, 并将冻结方向分为三种情况: 液滴内冰晶均匀分布(均匀冻结)、中心冻结向外扩展、外壳冻结向内扩展。Hindmarsh 等<sup>[6]</sup>观测了液滴闪蒸过程中水滴冻结的四个阶段: 预冷阶段、温升阶段、冻结阶段、再冷阶段。刘伟民<sup>[7]</sup>、刘璐<sup>[8]</sup>观察了液滴冻结/破碎的几种形态, 分析了稳态闪蒸和稳态冻结过程中环境压力、初始温度、初始半径等对液滴冻结起始温度及其回升幅度、体系最低温度等的影响。

收稿日期: 2011-12-27; 修订日期: 2012-07-16

基金项目: 中国科学院“知识创新工程”资助项目

作者简介: 杜王芳 (1984-), 女, 博士研究生, 主要从事微重力多相热流体动力学研究。通信作者: 赵建福, 研究员, E-mail: jfzhao@imech.ac.cn.

需要说明的是,在地面常压环境中开展的单液滴闪蒸/冻结实验,往往采用快速减压的方式进行,初始环境中大量不凝气体(即空气)的存在对于液滴闪蒸/冻结的热动力学过程有着明显影响,需要考虑该影响,并予以正确表征。因此,本文对不凝气体对液滴闪蒸/冻结的热动力学过程的影响进行实验研究,以探讨了相关因素的作用机理,为正确预言高真空环境液滴闪蒸/冻结特征服务。

## 1 实验装置与流程

液滴真空闪蒸实验系统如图 1 所示,包括真空维持系统、液滴闪蒸实验单元及过程控制与数据采集系统。

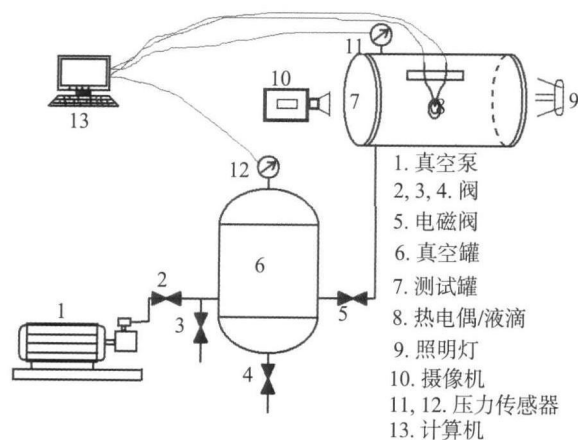


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

真空罐用来模拟空间高真空环境,采用高精度真空规管监测内部真空度数值。真空罐通过有内支撑软管连接到真空泵上。真空泵的极限真空度可达到  $6 \times 10^{-2}$  Pa,抽气速率为 8 L/s。测试罐安装有高精度压力传感器 DMP331(量程 0~0.01 MPa(绝压),响应时间  $< 5$  ms,精度 0.175% FS) 及 T 型热电偶(直径 0.1 mm,末端打结以利于液滴悬挂)。实验中需测量的压力、温度等参数均由 DI-710 数据记录仪进行采集和存储。为保证实验中降压过程的一致,采用交流电驱动的大功率电磁阀实现测试罐与真空罐之间的导通。电磁阀启动信号输入数据记录仪的同时,也被用来触发高速摄像机拍摄和记录液滴闪蒸/冻结过程,从而保证了实测数据与高速摄像机记录图像的时序同步。实验中高速摄像机记录速度为 250 帧/s,相应的记录时间为 8 s。

实验开始前,首先启动真空泵将真空罐内压力

抽到设定水平,同时打开测试罐,将一定大小的蒸馏水滴小心悬挂在热电偶上,并尽可能使热电偶测点位于液滴中心。然后,关闭测试罐,调整照明光源与高速摄像机位置等。实验准备就绪后,首先启动数据采集仪,再按下电磁阀启动开关,启动高速摄像机并快速打开电磁阀,将测试罐内气体排放至真空罐并使测试罐内压力急剧下降,观测并记录液滴闪蒸/冻结过程中的相关数据与图像。

显然,测试罐内原本气氛为非饱和湿空气(北京地区空气湿度较低,实验中室内相对湿度一般在 40%左右)。这样,液滴降压过程中所处气氛必然与残余空气份额有很大联系,局部环境中的蒸气分压可能偏离测试罐内实测压力,引起过程特征的变化。

## 2 实验结果与分析

图 2 显示了有无悬挂液滴时的降压过程及相应的实测温度变化情况。

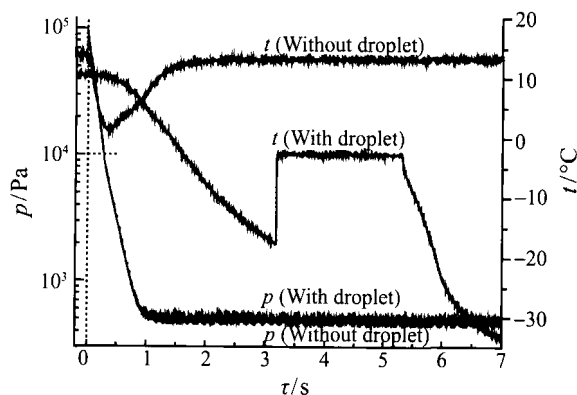


图 2 快速降压过程中测量的压力和温度的变化

Fig. 2 Variations of the measured pressure and temperature during quick depressurization

从图 2 可以看出,有无悬挂液滴对快速降压过程没有明显影响,只是终态压力数值略有不同——悬挂液滴表面的蒸发或升华提供了补充气源,因此终态压力略高于没有悬挂液滴的情形。然而,温度曲线则有着显著差异——没有悬挂液滴时,温度随压力的遽降而迅速下降,这对应于周围空气的绝热膨胀过程;随后,在压力低于约  $10^4$  Pa 时,实测温度不再下降,反而逐渐升高,最终恢复到接近初始温度状态,这主要源于热电偶丝的导热。悬挂液滴时,空气的绝热膨胀导致的环境温度的下降并不能即时传递到热电偶结点,实测温度因此存在显著滞后;温度的明显下降始于压力大到终态之后,表明液滴温度的下降主要源于液滴表面蒸发所散逸的热量;液



境气氛应该是测试罐内大气, 真实的液滴演化过程应该采用环境气氛中的蒸气分压来描述。遗憾的是, 目前尚无法快速测量测试罐内的大气分压, 只能从实验过程的具体情况对此进行一些探讨 (图 4 中用虚线示意了可能的变化过程)。

如前所述, 在较低的终态压力情形中, 系统密封良好, 电磁阀开启后, 测试罐内大气被急剧抽吸排出, 从而使得测试罐内压力迅速达到终态数值; 该数值的维持源于真空维持系统的抽吸与液滴表面蒸发或升华所产生的蒸气量, 这样, 测试罐内气氛将迅速由初始的非饱和湿空气转化为纯粹的水蒸气, 系统终态压力即液滴表面蒸气分压。因此, 再辉发生后液滴表面冻结, 其温度将趋近该压力所对应的气-固相变平衡温度 (即该压力下的凝华/升华温度), 而不是赵凯璇等<sup>[9]</sup>初步模型中假设的三相点温度。

而在较高的终态压力情形实验中, 由于外界空气泄漏进入系统之中, 一方面使得降压速度降低, 液滴表面蒸发速度变小 (设定的较高的终态压力也使液滴表面蒸发速度变小), 正其产量下降; 另一方面也使测试罐内大气成分中空气含量下降缓慢。这样, 实测的系统终态压力将远大于蒸气分压。因此, 再辉发生后液滴表面冻结所对应的实际热力学过程需要采用实际的蒸气分压来表征, 而不是总的压力。基于较低终态压力情形分析, 假设再辉温度由蒸汽分压对应的气-固相变平衡温度所确定, 则可以推断此时蒸气分压将位于图 4 中虚线标示的位置, 极限过冷温度与相应气-固相变平衡温度之差和常规条件下的过冷度定义相一致 (这也是本文以极限过冷温度与再辉温度之差定义极限过冷度的原因), 其数值近似为一常数。不过, 终态蒸气分压不仅取决于系统密封性能, 也与液滴表面蒸发速度又极大关系, 后者同样依赖于系统降压过程的具体特征。

### 3 结 论

本文实验研究了快速降压过程中悬挂单液滴闪蒸/冻结过程, 得到了典型条件下液滴闪蒸/冻结过程特征, 并基于实验观测结果, 探讨了不凝气体对

液滴闪蒸/冻结热动力学过程的影响机制, 提出实验过程中的再辉温度由终态蒸汽分压对应的气-固相变平衡温度所确定, 再辉发生时的极限过冷度近似为常数。这些结果为正确预言空间高真空环境中的液滴闪蒸/冻结特征及其他场合相关应用提供理论指导。

### 参 考 文 献

- [1] Satoh I, Fushinobu K, Hashimoto Y. Freezing of a Water Droplet Due to Evaporation-Heat Transfer Dominating the Evaporation-Freezing Phenomena and the Effect of Boiling on Freezing Characteristics [J]. *Int J Refrigeration*, 2002, 25: 226-234
- [2] Shin H T, Lee Y P, Jurng J. Spherical-Shaped Ice Particle Production by Spraying Water in Vacuum Chamber [J]. *Appl Therm Eng*, 2000, 20: 439-454
- [3] Kim B S, Shin H T, Lee Y P, et al. Study on Ice Slurry Production by Water Spray [J]. *Int J Refrigeration*, 2001, 24: 176-184
- [4] 张绍志, 王 剑, 陈光明. 水制冷系统闪蒸器特性的理论分析 [J]. *低温工程*, 2000, (3): 12-15  
Zhang S, Wang J, Chen G. Theoretical Analysis of the Flash Vaporizer in a Refrigeration System Using Water as Refrigerant [J]. *Cryogenics*, 2000, (3): 12-15
- [5] Feuillebois F, Lasek A, Creismas P, et al. Freezing of a Subcooled Liquid Droplet [J]. *J Colloid Interface Sci*, 1995, 169: 90-102
- [6] Hindmarsh J P, Russell A B, Chen X D. Experimental and Numerical Analysis of the Temperature Transition of a Suspended Freezing Water Droplet [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 2003, 46: 1199-1213
- [7] 刘伟民. 真空闪蒸过程中换热与流动机理的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2006  
Liu W M. Study on Mechanism of Heat Transfer and Flow in the Flash Process With Liquid Discharged Into Vacuum [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2006
- [8] 刘璐. 降压过程中及低压环境下液滴相变传热传质的机理研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2010  
Liu L. Study on Mechanism of Phase Change Heat and Mass Transfer of a Droplet During Reduced Pressure Process and in Low Pressure Environment [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2006
- [9] 赵凯璇, 赵建福, 陈淑玲, 等. 液滴真空闪蒸/冻结过程的热动力学研究 [J]. *空间科学学报*, 2011, 31(1): 57-62  
Zhao K X, Zhao J F, Chen S L, et al. Thermodynamics of Flashing/Freezing Process of a Droplet in Vacuum [J]. *Chin J Space Sci*, 2011, 31(1): 57-62