

# 快速减压过程中液滴闪蒸/冻结现象实验研究

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:** 采用快速减压方式实验研究了蒸馏水单液滴闪蒸/冻结现象。实验观察到的液滴闪蒸/冻结形态可以划分为稳定冻结、冰粒破裂、冰里进碎和冰粒爆裂等4类, 液滴状态演化过程包括蒸发降温、核化、再辉升温、恒温冻结和升华降温等阶段。实验结果表明: 核化时间一般随系统终态压力降低而减小, 但显示出明显的随机性; 核化温度与过冷度受核化时间直接影响, 核化时间越短, 核化温度越高, 液滴过冷度越小; 冻结温度和过冷度的平均值分别约为 $-1^{\circ}\text{C}$ 和 $10^{\circ}\text{C}$ , 与系统终态压力、液滴初始尺寸和核化时间等无关; 冻结时间由系统终态压力和液滴初始尺寸所决定。

**关键词:** 闪蒸/冻结过程, 核化, 随机性, 快速减压

## 0 引言

载人飞船、液体火箭、卫星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、推进剂等液态物质。排放过程中, 液体压力迅速下降, 导致液体饱和温度随之下降, 甚至远低于液体温度从而使得液体处于过热状态, 引发快速、剧烈的蒸发即闪蒸现象。闪蒸过程中, 液体快速、剧烈的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, 而只能从未蒸发的液相介质中获得这部分热量, 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对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、冻结及破碎等过程及其机理。Shin等<sup>[2]</sup>、Kim等<sup>[3]</sup>用扩散蒸发控制模型分析了液滴闪蒸过程中的热、质交换, 并通过实验进行了检验, 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。不过, 扩散蒸发控制模型无法刻画液滴闪蒸过程中液-固相变引起的尺寸和温度变化等过程。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。这

基金项目: 中国科学院国防科技创新基金项目

作者简介: 杜王芳(1984-), 女, 山西人, 博士研究生, 研究方向: 微重力多相热流体动力学。E-mail: duwangfang@imech.ac.cn

些研究考虑了液滴结冰过程中液滴和外界的整体换热，仅从能量平衡的角度计算初始与最终换热量，而未考虑液滴过冷凝和冻结过程中温度的回升及内部温度分布的不均匀性等。

Hindmarsh 等<sup>[6]</sup>实验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，并对水滴的冻结过程进行了数值分析。不过，Hindmarsh 模型针对的是冷气流中液滴的冷却过程，与真空闪蒸过程不尽相同。Strub 等<sup>[7]</sup>采用蒸汽扩散方法计算水滴质量减少率，进而确定液滴尺寸变化，但计算步骤较多，过程复杂。刘伟民<sup>[8]</sup>采用热电偶悬挂法对液滴闪蒸过程进行了实验研究，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。在其构建的数值模型中，需要实验观察到的液滴半径随时间变化曲线，增加了模型使用难度，同时精确性也将强烈受制于实验观察精度。刘璐<sup>[9]</sup>进一步研究了降压过程对液滴冻结的影响，发现在压力-温度图上，实验过程往往穿越的是固液线而不是汽液线，因此认为并未发生非平衡闪蒸。

本文采用快速减压的方式对单液滴闪蒸/冻结现象进行实验研究，重点观测核化时间、冻结温度、过冷度与冻结时间等参数变化特征，探讨液滴闪蒸/冻结的热动力学过程特征及其机制。

## 1 实验装置与实验流程

液滴真空闪蒸实验台<sup>[10]</sup>（图 1）分为真空维持系统、液滴闪蒸实验单元及过程控制与数据采集系统。真空维持系统由真空泵、真空罐以及连接管段

和真空球阀等组成；液体闪蒸实验单元由测试罐及附属电磁阀、热电偶（用于悬挂液滴并测量液滴内部温度）和压力传感器等组成；过程控制与数据采集系统包括电磁阀驱动回路、温度变送器、压力变送器、真空规管、数据采集仪、高速摄像机及相应的照明设备等。

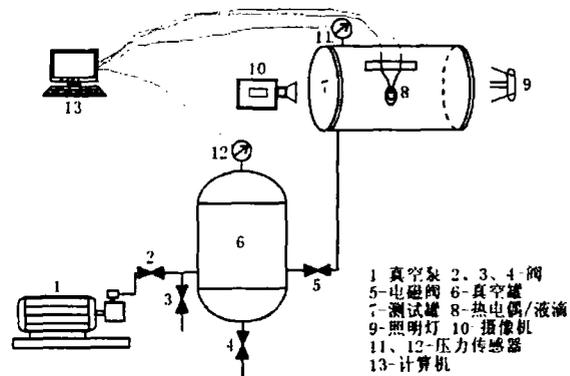


图 1 真空闪蒸实验台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vacuum flashing experimental facility.

真空罐用来模拟空间高真空环境，所选用的真空泵极限真空度可达到  $6 \times 10^{-2}$  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 Vitcam CTC，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/冻结过程中数据与图像。

本文选取了标称的系统终态压力分别为 450 Pa、600 Pa、1000 Pa 三种实验工况，相应的终态压力范围分别为 405~478 Pa、574~641 Pa、979~1032 Pa，液滴初始尺寸为 1.4~2.1 mm。

## 2 实验结果与讨论

图 2 显示了实验观测到的 4 类不同的液滴闪蒸/冻结形态：稳定冻结、冰粒破裂、冰里进碎和冰粒爆裂。除了最后一类只在终态压力 450Pa 时观测到，其他 3 类在 3 种不同的终态压力下均观测到，说明终态压力并不是决定液滴闪蒸/冻结形态的唯一因素，其它如溶气含量、热电偶表面核化状态等也会影响到液滴闪蒸/冻结形态，使得问题的量化分析极为困难。

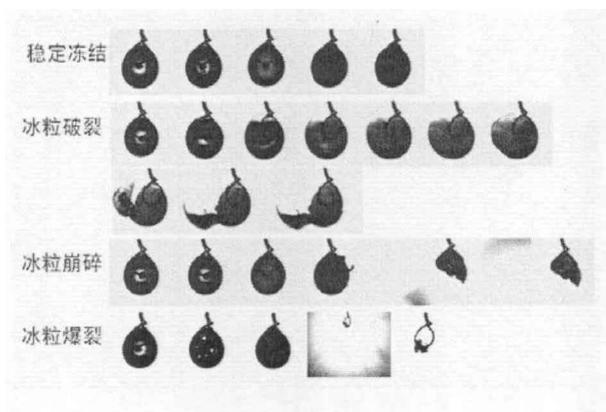


图 2 液滴闪蒸/冻结形态

Fig. 2 Classification of the flashing-freezing behavior of water droplet.

图 3 所示为液滴闪蒸/冻结过程中的典型温度变化，液滴状态演化过程包括蒸发降温、核化、再

辉升温、恒温冻结和升华降温等阶段。A 点所示时刻  $\tau_r$  为核化时间，所示温度  $t_r$  为核化温度；B 点所示温度  $t_f$  为冻结温度；C 点所示时刻为冻结结束时刻  $\tau_s$ ，那么，定义  $\Delta T_{\text{sub}}$  即冻结温度  $t_f$  与核化温度  $t_r$  之差为过冷度； $\Delta \tau$  即冻结结束时间  $\tau_s$  与核化时间  $\tau_r$  之差为冻结时间。

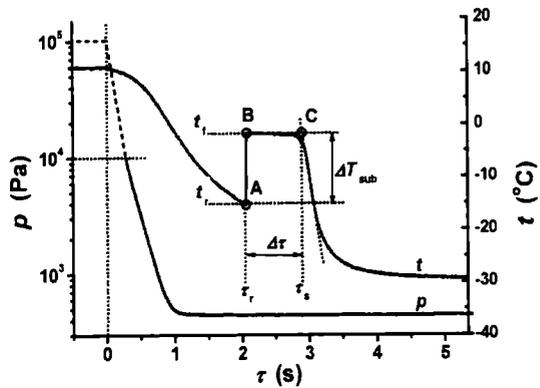


图 3 液滴闪蒸/冻结过程中的典型温度变化

Fig. 3 Typical history of the measured temperature inside the droplet during the flashing/freezing process.

实验中发现，在相同终态压力条件下，液滴核化时间有着明显差异。图 4 显示了不同压力条件下核化时间的概率分布，可以看出核化时间总体上随系统终态压力降低而缩短；终态压力相同时核化时间呈现出明显的随机性。这种随机性源于液固相变现象中核化过程的随机性，以及过冷降温过程中客观存在的外部随机扰动（如排气抽吸振动等）。

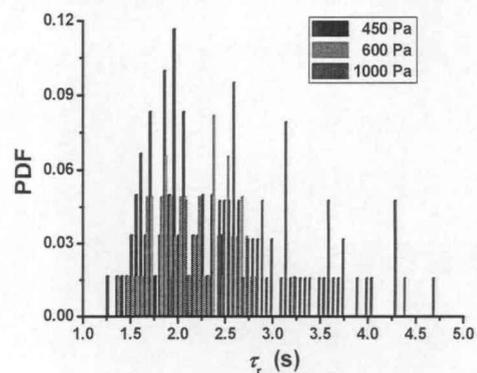


图 4 核化时间的概率分布

Fig. 4 Probability distribution function of nucleation time.

图 5、6 分别给出了不同条件压力下，核化时间与核化温度、过冷度之间的关系。从图中可以看出随着液滴核化温度总体上随核化时间增大而减小，而过冷度则相反。这是因为随着压力的急剧下降，液滴表面蒸发导致降温，达到一定过冷度并遇到扰动后，核化现象发生，部分液体快速冻结释放热量使整体温度升高（即再辉）。因此，核化时间越长，温度下降越低，核化温度也就越低；另一方面，液滴冻结温度变化极小，平均值约为 $-1^{\circ}\text{C}$ ，与系统终态压力、液滴初始尺寸和核化时间等参数无关，因此，过冷度会随核化时间增长而变大。

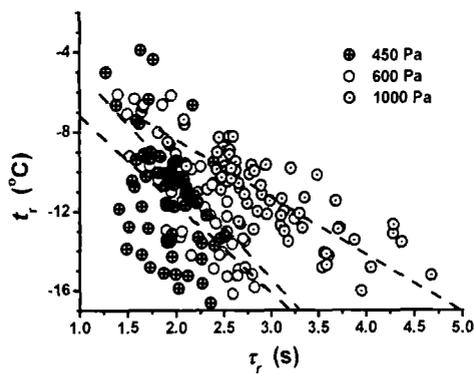


图 5 核化时间与核化温度关系

Fig. 5 Relationship between nucleation time and nucleation temperature.

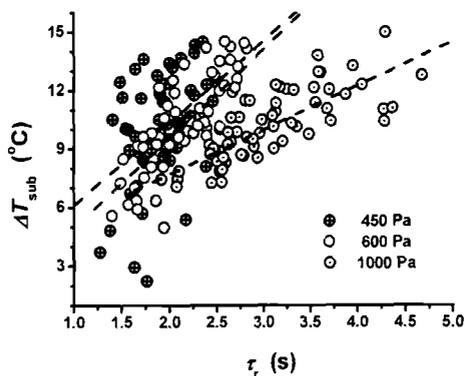


图 6 核化时间与过冷度关系

Fig. 6 Relationship between nucleation time and supercooling

不过，核化温度和过冷度并不受终态压力和液滴尺寸等参数的影响，甚至核化时间的随机性尽管导致了核化温度和过冷度的随机性，但其概率分布

函数间并不存在明显关联。由于冻结温度变化极小，这里只显示在 3 个不同终态压力下过冷度的概率分布函数（图 7），三者近似一致。过冷度的平均值约为 $10^{\circ}\text{C}$ ，最大过冷度约为 $16^{\circ}\text{C}$ ，这些均与文献中关于水冻结实验研究的结果相近。

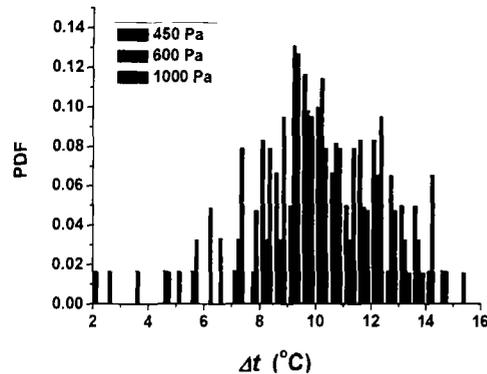


图 7 过冷度的概率分布

Fig. 7 Probability distribution function of supercooling.

图 8 是不同压力条件下，冻结时间的概率分布直方图，图 9 则给出了液滴初始尺寸和冻结时间的关系。从图可以看出系统终态压力、液滴尺寸决定着液滴冻结时间：系统终态压力越低，液滴完全冻结所需时间越短；液滴直径越小，液滴完全冻结所需时间同样越短。

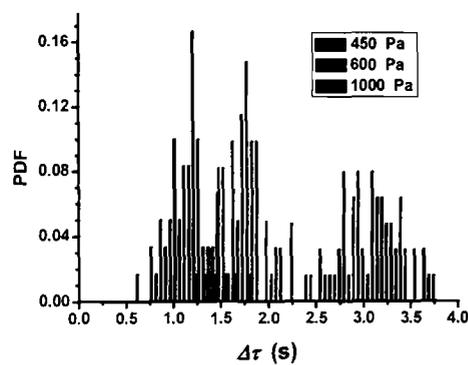


图 8 冻结时间的概率分布

Fig. 8 Probability distribution function of freezing time.

图 10 显示了核化时间与冻结结束时间之间的线性依赖关系，且比例系数近似为 1，因此，冻结时间与核化时间几乎没有关系。这显然与冻结过程

中的能量平衡相关。终态压力决定着液滴表面闪蒸与冰壳表面升华的强度，终态压力越低，闪蒸/升华越强烈，带走的热量就越多，冻结时间就越短；而液滴尺寸则决定着完全冻结所需要释放的总热量，液滴越小，冻结持续时间也就越短。

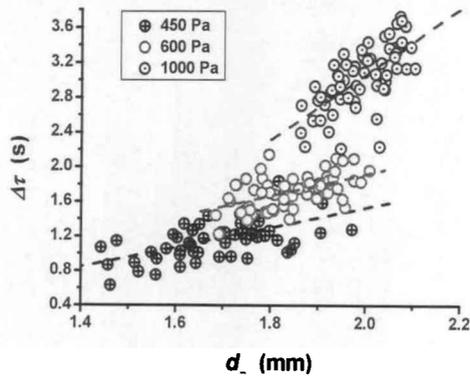


图9 液滴初始尺寸与冻结时间的关系

Fig. 9 Relationship between initial droplet size and freezing time.

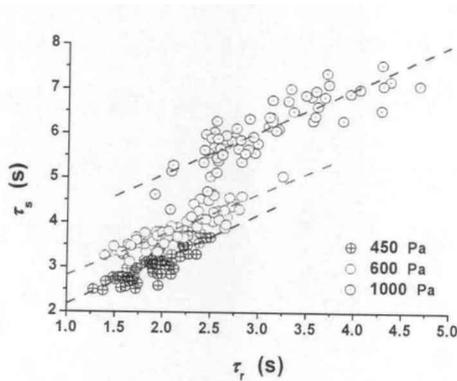


图10 核化时间与冻结结束时间关系

Fig. 10 relationship between nucleation time and freezing ending time.

### 3 结论

本文利用快速减压法对蒸馏水单液滴闪蒸/冻结过程进行了实验研究，并对实验数据进行了统计分析，研究了终态压力、液滴初始尺寸、核化时间、冻结时间、过冷度等参数对液滴闪蒸/冻结的热动力学过程的影响，得到如下结论：

(1) 液滴闪蒸/冻结形态可以划分为稳定冻结、冰粒破裂、冰里迸碎和冰粒爆裂等4类；液滴状态

演化过程包括蒸发降温、核化、再辉升温、恒温冻结和升华降温等阶段。

(2) 核化时间总体上随系统终态压力降低而缩短，但呈现出明显的随机性。

(3) 核化时间直接影响着核化温度和过冷度，并使其同样呈现出明显的随机性，但其概率分布函数间并不存在明显关联。

(4) 核化温度和过冷度与终态压力和液滴尺寸无关。

(5) 冻结时间由终态压力和液滴尺寸所决定，与核化时间无关。

### 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, Jung 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, Jung J. 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.
- [5] Feuillebois F, Lasek A, Creismas P, Pigeonneau F, Szaniawski A. 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] Strub M, Jabbour O, Strub F, Be'de'carrats J P. Experimental study and modelling of the crystallization of a water droplet [J]. *Int. J. Refrigeration*, 2003, 26: 59-68.
- [8] 刘伟民. 真空闪蒸过程中换热与流动机理的研究[D]. 西安交通大学博士学位论文, 2006年7月.
- [9] 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]. 西安交通大学博士学位论文, 2010年6月.
- [10] 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.

# Experimental study on flashing-freezing phenomena of liquid droplet during quick depressurization

Du Wang-Fang, Zhao Jian-Fu, Li Kai

*(Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China )*

**Abstract:** The flashing-freezing process of distilled water droplet during quick depressurization is studied experimentally. The observed flashing-freezing behavior of water droplet can be Classified into 4 Classifications, namely stably freezing, particle rupture, particle breakup, flashing burst. Liquid droplet experiences successively the following five distinct stages, i.e. evaporation cooling, nucleation, recalescence, freezing, and sublimation cooling. The nucleation time decreases with the system terminal pressure in general, while it exhibits strong randomness. The nucleation temperature and the supercooling are affected directly by the nucleation time in the following manner, i.e. the nucleation temperature increases but the supercooling increases with the decrease of the nucleation time. The freezing temperature and the supercooling, with averaged values of about  $-1^{\circ}\text{C}$  and  $10^{\circ}\text{C}$  respectively, are independent of the system terminal pressure, the initial size of droplet, and the nucleation time. The freezing time is determined by the system terminal pressure and the initial size of droplet.

**Key words:** flashing-freezing process, nucleation, randomness, quick depressurization