

真空环境液体闪蒸射流实验研究

杜王芳^{1,2} 赵建福¹ 李凯¹

(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 100084)

摘要 本文实验研究了蒸馏水经内径 0.226 mm、长度 16.5 mm 薄壁不锈钢直管向真空环境排放时形成的液体闪蒸射流现象。实验观察到 3 种射流形态。在液体初始温度低于背压所对应的饱和温度时, 液体不会发生闪蒸, 液体射流喷出后保持完整; 反之, 液体表面蒸发会导致液体射流核周围出现不规则蒸发波, 射流破碎散落; 进一步降低背压, 会使得射流一出喷口即快速破碎形成扩张角大于 90° 的雾状射流。射流流量在背压低于某个临界数值时出现壅塞现象, 即流量不再随背压降低而增加, 表现出强烈的可压缩流动特征。

关键词 液体闪蒸射流, 壅塞, 真空

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2014)05-0910-04

Experimental Study on Flashing Liquid Jets in Vacuum Environment

DU Wang-Fang^{1,2} ZHAO Jian-Fu¹ LI Kai¹

(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 100084, China)

Abstract Flashing liquid jets of distilled water through a long, straight stainless steel capillary with an inner diameter of 0.226 mm and a length of 16.5 mm into a vacuum environment are studied experimentally. Three kinds of jet patterns are observed. For the case of low initial temperature which is lower than the saturated temperature corresponding with the backpressure inside the vacuum chamber, no evaporation occurs, and then the flow of the liquid jet from the nozzle exit remains intact and follows a straight path. On the other hand, if the initial temperature is higher than the saturated temperature corresponding with the backpressure, evaporation will take place, which results in a visible irregular evaporation waves around the liquid core and then a shattering jet. On further decreasing the backpressure, the liquid jet shatters giving rise to a cloud of droplets with a spray angle usually bigger than 90 degree, indicating a large number of nucleation sites and rapid bubble growth. It is also shown that there is flow choking behavior as the flow rate becomes constant and insensitive to pressure reduction below some backpressure threshold, and thus, the flow exhibits a strong compressible characteristic.

Key words flashing liquid jet; flow choking; vacuum

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。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, 影响射流特性。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射流现象研究对在航天技术应用中具有重要意义。

真空环境中的液体射流由于闪蒸的发生, 与常规的不可压液体射流相比往往具有明显不同的特征, 呈现出十分复杂的特征。文献 [1]~[5] 真空液体射流

收稿日期: 2014-01-05; 修订日期: 2014-04-22

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, 主要从事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

现象进行了研究, 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。不过, 尽管分类依据本质上是一致的, 但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, 如激波的存在有赖于纹影图像分析^[3,4], 而超音速的单相气体膨胀射流的出现要求喷嘴前管道足够长以便能够将液体完全汽化^[5]。而且, 现有研究并没有给出明确的分类判据, 甚至类别定义不尽相同。

此外, 闪蒸现象的发生会导致两相临界流, 出现射流流量的壅塞现象^[3,4], 即背压低于某个临界数值后射流流量不再随背压降低而变化; 液体初始温度越高, 壅塞现象对应的临界流量越小, 且出现壅塞现象的临界背压也越高。壅塞现象反映了流动的强可压缩特性, 并且对空间流体排放具有至关重要的影响。

本实验采用大气压力与真空室压力之差驱动液体射流, 研究不同的压差以及液体初始温度对真空液体射流 (特别是液体闪蒸射流) 特性的影响, 以揭示其传热传质机理。

1 实验装置与流程

实验采用了真空闪蒸装置^[6], 包括真空维持系统、真空实验盒及过程控制与数据采集系统。与液滴闪蒸实验不同的地方, 这里用射流喷管代替了悬挂

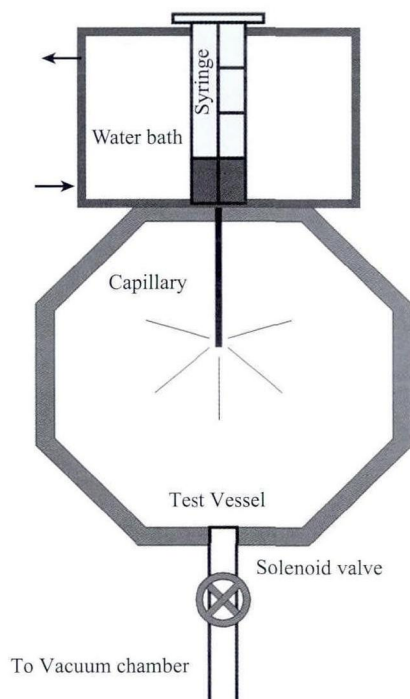


图 1 真空射流实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental facility for liquid jets in vacuum environment

液滴的热电偶。一根内径 0.226 mm、长度 16.5 mm 薄壁不锈钢直管作为射流喷管, 置于实验盒内; 实验工质蒸馏水则置于 1 mL 透明的塑料注射针筒内, 针筒处于恒温水浴内, 以便维持和调节液体初始温度状态 (图 1)。

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。射流形态利用瑞士 AOS 公司 Vitcam CTC 高速摄像机记录, 它可在保证像素是 1280×1024 的前提下, 图像采集频率达到 500 fps (本文实验中一般采用 400 fps)。实验中采用预触发工作模式, 在接到触发信号 (即启动电磁阀指令) 时, 开始记录对应图像。触发信号和实验盒压力一起由美国 DATAQ 设备有限公司的 DI710 独立数据记录仪进行自动采集和存储, 这样也就能够满足科学数据与图像间的同步要求。射流流量则是通过日本 SONY 公司 DCR-TRV900E 数码摄像机记录的透明的塑料注射针筒内液面位置变化来测量。

实验开始前, 首先启动真空泵将真空罐内压力调整到设定数值; 同时, 将蒸馏水注入注射针筒内, 调整恒温水浴温度并维持足够时间 (一般不小于 30 min)。其次, 打开连接管路上的球阀, 启动摄像机和数据记录仪。最后, 按下电磁阀启动开关, 开始液体射流实验。此时, 实验盒内部气体被快速抽吸出去, 导致内部压力急剧减小, 注射器针筒内的水在外部大气压力和实验盒内部压力之差的驱动下经毛细管喷出, 形成所要观测的液体射流。

2 实验结果与分析

为分析和比较真空液体闪蒸射流特征, 首先在常压环境测量了该毛细管阻力特性。结果表明, 毛细管摩擦阻力特性符合常规管道内不可压层流摩擦阻力的 Poiseuille 规律, 实测 Poiseuille 数 $Po=64.55$, 与理论值 64 的相对误差仅 0.8%, 并不表现出明显的微尺度效应。不过, 由于毛细管与注射针筒间接口形状的复杂性导致进口局部阻力显著增大。

但是, 真空液体射流流量并不完全满足标定的阻力特性下的预测趋势 (图 2)。图 2 中可以清晰看到: 在背压较高 (接近或高于液体初始温度所对应的饱和压力) 时, 标定阻力关系能够较好地预测真空液体射流流量的变化; 当背压进一步减小, 射流流量偏离预测结果, 即实际流量要低于预测流量; 而当背压低于某个临界压力时, 射流流量不再随背压减小而增大, 近似为一常数, 呈现出明显的壅塞现象。

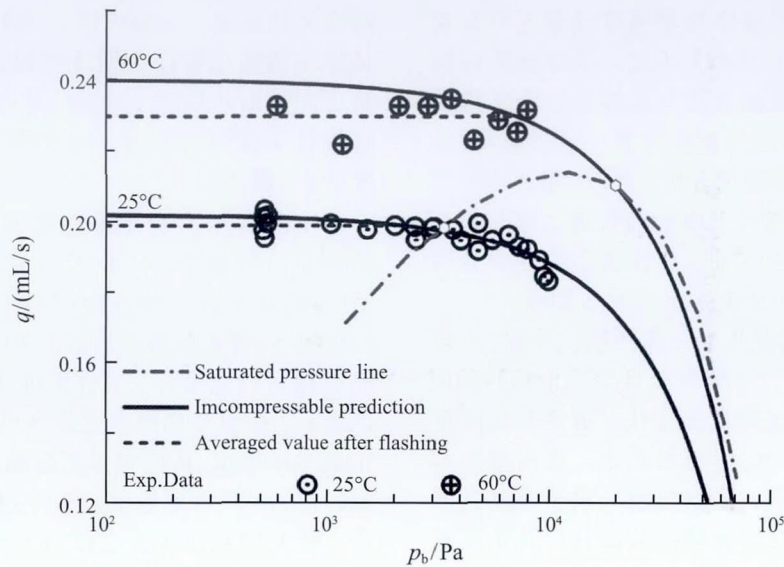


图 2 真空液体射流流量特性

Fig. 2 Flow rate of the liquid jets through the capillary nozzle into vacuum environment

临界压力和堵塞流量与液体初始温度有关。同样的现象文献 [3, 4] 中也报导过。

真空液体射流流量变化的奇异特性表明其流动结构与常规液体射流必然存在差异。图 3 显示了不同背压和温度条件下观察到的三类典型射流形态。

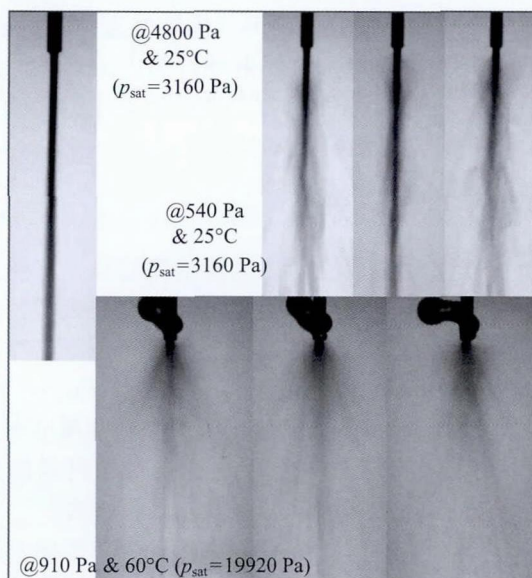


图 3 真空液体射流形态

Fig. 3 Liquid jet patterns into vacuum environment

1) 连续液体射流

在距喷嘴出口相当长距离内一直保持柱状结构而不会发生明显的扩散，一般发生在喷嘴出口条件是过冷和过热度较低时。此类射流类似于文献 [2] 非

破碎液体射流、文献 [3, 4] 无闪蒸射流及文献 [5] 常规射流。不过，本论文实验中并没有观察到文献 [2] 描述的那些零星喷出、平行于主液柱下落的非扩散液丝。

2) 部分闪蒸液体射流

在距喷嘴出口一定距离内能够保持一个内部液核的存在，液体柱破碎只发生在外层，并且伴随有不规则的蒸发波。此类射流形态极不稳定，不仅内部非破碎的液核长度有着显著的波动，而且外部蒸发波的形状与位置也存在有剧烈的变动。偶尔会观察到沿着与射流主呈钝角方向飞溅而出的液滴，近似于反向的溅射。此类射流形态一般发生在喷嘴出口液体处于中等过热度时，尤其是较低的液体初始温度情形中最为常见。部分闪蒸液体射流与文献 [2] 部分破碎液体射流和阶梯性破碎液体射流有着相近的特征，也与文献 [3, 4] 无激波闪蒸射流和文献 [5] 锥形闪蒸射流有一些相似之处。不过，部分闪蒸液体射流的不规则特性在以往文献中尚未见报道。

3) 完全闪蒸液体射流

在喷嘴出口即发生不规则的破碎，射流扩张角很大，并且存在有反向作用。后者可以从如下现象中得到明确的验证：实验中总能观察到喷嘴出口附近有液体沿着喷管外壁向上爬升，逐渐形成一个不停振荡并横向扩展着的大液团。大液团逆重力的“漂浮”显然来自下方射流的托举作用，该作用方向与射流主流方向截然相反。大液团尺寸不断增大，最后会从中断裂形成几乎相等的两部分，一部分仍黏附在喷管外壁上并继续生长，而另一部分先是水平

飞出——同样表明了反向作用的存在,随后在重力作用下向侧下方掉落。此类射流发生在喷嘴出口液体过热度很高的情形中,尤其是当液体初始温度较高且实验盒内终态压力很低时,更易于发生。文献中,有关真空液体射流的反向喷射现象鲜有报道,文献[7, 8]报道的反向喷射,是发生在贴壁环状液膜在中心气核带动下向真空环境喷射时,更多的是中心气核超音速出流结构与液膜间的相互作用结果。

事实上,文献[2]闪蒸射流、文献[3, 4]有激波闪蒸射流和文献[5]半平面闪蒸射流与这里的完全闪蒸液体射流比较接近,但细节上的差异仍然存在,例如,文献[2]闪蒸射流示意图中完全看不到反向作用的任何迹象,在其表述中也从未提及。文献[3, 4]和文献[5]同样没有任何与反向作用相关的描述。不过,在文献[3, 4]有激波闪蒸射流和文献[5]半平面闪蒸射流图像中,可以明显看到在射流喷嘴出口截面上有着相对于喷嘴直径要大得多的固壁存在,限制了相应射流反向扩展的可能。倘如去除相应的固壁(如本论文喷嘴出口直径 0.226 mm,壁厚则只有不足 0.1 mm),至少在文献[3, 4]有激波闪蒸射流情形中,激波的形态尤其是近壁分支的形态表明射流的反向扩展是可观存在的。

需要注意的是,文献[3, 4]基于喷嘴出口附近锥形中心液核均匀扩展的简化假设,建立了一维可压缩流动分析方法,来预测真空液体闪蒸射流性能。但反向扩展现象的存在表明该模型严重偏离实际的流动情形。文献[9]基于喷嘴出口附近锥形中心液核均匀扩展的二维数值模拟同样无法与实验观测结果相符,同样源于其物理模型没能考虑射流的反向扩展影响。显然,基于新的物理观测结果构建更为符合实际现象的射流结构演化模型将是今后研究工作的重点方向之一。

3 结 论

本文实验研究了真空环境中液体射流的基本特征及其规律,得到如下结论:

1) 不同的真空背压条件下,液体射流具有明显不同的结构形态,可分为连续液体射流、部分闪蒸射流以及完全闪蒸射流。液体射流表面闪蒸现象的发生引起蒸发波和射流破碎,射流扩展程度非常显著,并可以观察到反向喷射的颗粒以及明显的反向

作用。

2) 背压不同导致喷管前后压差不同,射流流量也会不同。但射流流量与压差的关系并不总是能按不可压理论进行预测。当背压低于液体初始温度所对应的饱和蒸气压较多时,射流表面闪蒸的发生会使得射流流量明显偏离不可压理论的预测结果;而进一步减小背压,会出现流量壅塞现象,即射流流量不再与背压相关,而是保持恒定不变。这对应着两相临界流动的发生,流场中可能出现激波。但没有喷嘴出口截面固壁制约射流的反向扩展现象,会使得流场特性更为复杂,基于喷嘴出口附近锥形中心液核均匀扩展的简化的一维可压缩流动模型^[3,4]将难以正确预测液体闪蒸射流特征,需要发展新的更为符合实际现象的物理模型。

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 EM, Takimoto A, Hayashi Y. Flashing and Shattering Phenomena of Superheated Liquid Jets [J]. *JSME Int J*, 1994, 37B(2): 313-321
- [3] Simões-Moreira JR, Vieira MM, Angelo E. Highly Expanded Flashing Liquid Jets [J]. *J Thermophy Heat Transfer*, 2002, 16(3): 415-424
- [4] Vieira MM, Simões-Moreira JR. Low-Pressure Flashing Mechanisms in iso-Octane Liquid Jets [J]. *J Fluid Mech*, 2007, 572: 121-144
- [5] Pavlenko AN, Koverda VP, Reshetnikov AV, et al. Peculiarities of Superheated Liquid Discharging Under Strong and Weak Nonequilibrium Conditions [J]. *J Eng Thermophy*, 2010, 19(4): 289-305
- [6] 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
- [7] Du WF, Zhao JF, Li K. Experimental Study on Thermal-Dynamical Behaviors of Liquid Droplets During Quick Depressurization [J]. *J Eng Thermophy*, 2012, 33(8): 1349-1352
- [8] Yarygin VN, Prikhodko VG, Yargin IV. Jet Expansion of Gas With Near-Wall Liquid Film From Nozzle into Vacuum [J]. *Microgravity Sci Tech*, 2009, 21(S1): s271-s275
- [9] Yarygin V, Gerasimov Y, Krylov A, et al. Experimental Study of the International Space Station contamination by its Orientation Thrusters Jets [J]. *Microgravity Sci Tech*, 2011, 22(S1): s15-s23
- [10] Avila JAJ, Pimenta MM, Simões-Moreira JR. Numerical Solution of the Two-Phase Expansion of a Metastable Flashing Liquid Jet Using the Dispersion-Controlled Dissipative Scheme [J]. *Int J Numer Meth Fluids*, 2010, 63: 622-637