

复杂流道液体真空排放中的气液两相流态模拟实验

赵建福^{1,3}, 吴克^{1,3}, 徐侃², 宁献文², 郑红阳²

(1. 中国科学院力学研究所微重力重点实验室, 北京 100190; 2. 中国空间技术研究院北京空间飞行器总体设计部空间热控技术北京市重点实验室, 北京 100094; 3. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要: 针对月球表面部分重力、高真空环境液体排放需求, 按照 Bond 数相似准则, 采用内径 3.5 mm、长 350 mm 的透明有机玻璃管弯制成具有 3 个弯头(弯曲半径约 13.5 ~ 17.5 mm)、一端开口的复杂流道, 在地面环境模拟了月面环境复杂管路系统中液体排放过程特征。实验表明, 真空环境复杂管道内液体排放过程可以划分为初始状态段、快速减压段、液体排放段、残液排放段和闪蒸终止段 5 个阶段, 各阶段特征可用于更为精细的模型构建, 以及相关应用技术验证与性能预测。

关键词: 液体真空排放; 气液两相流; 月球重力; 复杂流道

中图分类号: TK124; O359 + .1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5825(2016)06-0727-05

DOI: 10.16329/j.cnki.zrht.2016.06.010

Simulation Experiment on Two-phase Gas-liquid Flow Pattern in Complex Pipeline during Liquid Discharge in Vacuum

ZHAO Jianfu^{1,3}, WU Ke^{1,3}, XU Kan², NING Xianwen², ZHENG Hongyang²

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

2. Beijing Key Laboratory of Space Thermal Control Technology, Institute of Spacecraft System Engineering,

China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China; 3. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to simulate the characteristics of the process of liquid discharge into high vacuum in the lunar gravity on the moon, a special complex pipeline made of a 350 mm-long transparent organic glass tube with 3 elbows was used in this study. In accordance with the similarity criterion of Bond number, the inner diameter of the pipeline was 3.5 mm in the ground simulation experiment, and thus the length-to-diameter ratio was 100. The bending radius of the 3 elbows was in the range of 13.5 mm to 17.5 mm. One end of the pipe was closed, while the other was open to vacuum. Experimental observations showed that the process of liquid discharge into vacuum could be categorized into the initial state, rapid decompression state, liquid discharge state, residual liquid discharging state, and flashing end state. The characteristics of the two-phase gas-liquid flow patterns observed inside the complex pipeline during each stage could be used for precise modeling of the actual process, as well as for the technology validation of the related applications and the performance prediction.

Key words: liquid drainage into vacuum; two-phase gas-liquid flow; lunar gravity; complex flow channel

1 引言

航天器在执行任务期间或任务结束返回之

前, 往往会向外部高真空环境排放液态物质。液体在排放管口压力及相应的饱和温度的急剧下降, 导致液体快速转变为高过热状态, 进而引发液

收稿日期: 2016-04-27; 修回日期: 2016-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(11472040)

作者简介: 赵建福(1967-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为微重力多相热流体动力学及其空间应用。E-mail: jfzhao@imech.ac.cn

体闪蒸,形成复杂的气液两相流动现象,并伴随有强烈的热质传递现象^[1-7]。然而,迄今公开文献中报道的结果往往关注于上游压力驱动下液体在排放关口至外的射流形态及其排放流量变化规律,对无压力驱动时系统依赖自重(尤其是在部分重力或微重力环境下自重影响被削弱后的)液体真空排放过程的研究尚未见报道。此外,实用管路系统因各种因素制约往往布局复杂,进一步增加了问题的复杂程度和系统设计与测算难度。

本文针对月球表面部分重力、高真空环境中的热控流体回路全氟三乙胺液体工质的真空排放过程,新设计了地面模拟观测实验,对复杂管路内的气液两相流现象开展了模拟实验观测和分析,以揭示其流动特征与控制机制,为构建和验证刻画该现象的精细模型提供实验依据,并服务于相关应用技术验证与性能预测。

2 实验装置与实验流程

针对月球表面环境液体排放需求,按照 Bond 数相似准则^[8-10],采用内径 3.5 mm(相应的 Bond 数约为 16)、长 350 mm 的透明有机玻璃管弯制成具有 3 个弯头(弯曲半径约 13.5 ~ 17.5 mm)、一端开口的复杂流道(图 1),用于在地面常重力环境模拟月球表面复杂管路系统中液体排放过程特征。流道敞开端口近似垂直向上,以避免实验开始之前液体的流失。



图 1 地面模拟实验中使用的复杂管路照片
Fig. 1 Photo of the complex pipeline used in the ground simulation experiment

实验在真空闪蒸实验台(图 2,包括真空维持系统及过程控制与数据采集系统等)上进行。真空闪蒸实验台包括真空维持系统、测试罐及过程控制与数据采集系统^[4-7, 11]。

真空维持系统由真空泵、真空罐、真空球阀、电磁阀以及连接管段等组成,其中真空罐用来模拟空间高真空环境,容积约 1 m³,内部压力采用

高精度真空规管进行监测。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 6×10^{-2} Pa,抽气速率 8 L/s。实验开始前,先启动真空泵将真空罐内压力降到适当数值备用。实验中真空泵将持续工作以维持良好真空环境。

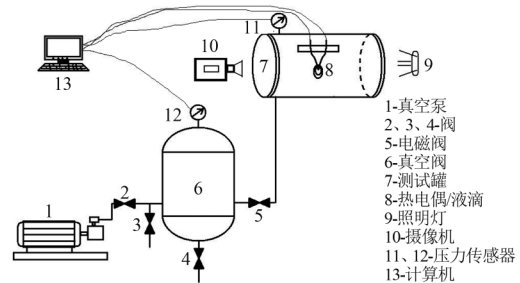


图 2 真空闪蒸实验台示意图
Fig. 2 Schematic diagram of experimental facility for liquid flashing in vacuum environment

实验管道完全置于测试罐内。测试罐内压力的变化采用德国 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。测试罐内的介质温度则选用 K 型热电偶进行测量,并预先进行了标定,其不确定度为 1.0 °C。

过程控制与数据采集系统包括 DATAQ/DI710 数据记录仪、电磁阀驱动回路、温度变送器、压力变送器、真空规管、AOS/Vitcam CTC 高速摄像机及相应的照明设备等。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 AOS/Vitcam CTC 高速摄像机,拍摄和记录管道内气液两相流形态,从而保证了实测数据与高速摄像机记录图像的时序同步。实验中高速摄像机图像采集帧率设为 500 fps。实验盒内压力、管道敞开端附近温度及电磁阀启动信号等数据采用 DATAQ/DI710 数据记录仪进行自动采集和存储,采集频率为 100 Hz,每路数据的时间分辨率均为 0.03 s。

实验开始前,首先小心向流道内注满全氟三乙胺液体工质,并尽力消除明显可见的初始气泡。其次,将复杂流道连同内部液体工质一并放入测试罐内,封闭测试罐,打开真空罐和实验盒间的连接管路上的球阀,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,流道内的全氟三乙胺液体发生闪蒸相变,形

成气液两相流,并由敞开端流出。

3 复杂流道液体真空排放中的气液两相流态

图3显示了2次实验中记录下来的测试罐内部压力与温度的典型变化,其中,实线和虚线分别对应1#和2#实验,箭头指向相应物理量曲线的纵轴坐标。温度测点在流道出口外且靠下约2 cm的位置,实验中也观察到有液体工质喷洒出去后沿热电偶引线流到热电偶测点处。这样,热电偶测出的温度更多地反映了测试罐内环境气体或液体喷出后形成的气液混合物的温度。

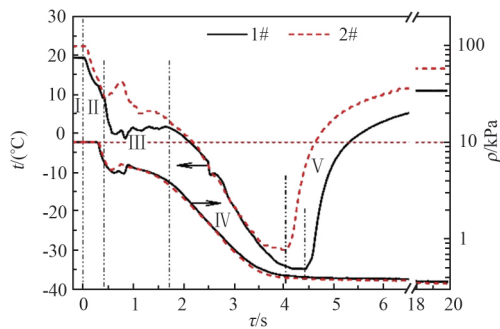


图3 复杂管道内液体工质排放过程中测试罐内压力、温度变化曲线

Fig. 3 Changes of pressure and temperature inside the vacuum test box during the discharge of liquid from the complex pipeline into vacuum

根据图3显示的压力、温度变化曲线和视频慢速回放所展示的实验现象,真空环境复杂管道内液体排放的过程可以划分为以下5个阶段:

1) 初始状态段(常压、常温):对应于电磁阀开启前的静止阶段。受压力传感器量程所限,初始压力(约100 kPa)在图3中未显示出。

2) 快速减压段:压力快速下降至初始温度对应饱和压力附近,液体过热,内部(尤其密封端口)缺陷处吸附气体析出、膨胀,辅以过热液体汽化,气泡合并、长大,挤压开口端液面向外移动,但液面尚能保持光滑状态。悬于实验盒内的热电偶测量的盒内气体温度因气体膨胀减压而快速下降。

3) 液体排放段:管道开口端附近液面上发生闪蒸,闪蒸波界面后形成的气液混合物喷出管口,导致测试罐内光线变暗。伴随着液体破碎与闪蒸,测试罐内压力下降趋势减缓,甚至略有回升;而沿热电偶引线下流的残余液体使得测点温度基

本不变,甚至也略有回升。液体闪蒸主要发生在开口附近,管路内部呈现为环状流型。根据管内气核/团与外界环境的连通与否,该阶段又可分作如下两个子阶段:(1)气核与外界环境气氛不连通的“气团伸张”子阶段;(2)气核与外界环境气氛连通的“气核拖曳”子阶段。在前一子阶段中,受封闭端限制,管路内的气团在内部液体持续蒸发和压力下降的共同作用下,不断向开口端伸张,形成具有光滑液气界面的长气团,并推动液体排出管道;而在后一子阶段中,气核在开口端与外界环境气氛相连通,直接形成气相逸出通道,在饱和压力与外界真空环境压力之差的驱动下,低密度的气相介质流速遽增,进而强烈剪切、拖曳着管道壁面附近的环状液膜,形成界面剧烈波动的环状流型。气流的剪切与界面的波动也会进一步促进液气相变,加快工质的排放。

4) 残液排放段:主体液量已基本排出管道,闪蒸成为气体,并被真空罐抽吸出实验盒,实验盒内部压力与温度再次持续稳定下降。此时管道内残存液体(一般出现在较低部位且倾斜向上段,相对于弯管居于外侧壁面)继续蒸发,并被上游蒸发产生的气流吹掠形成明显波状分层流型。

5) 闪蒸终止段:实验盒内压力与真空罐达到平衡,压力基本不变,闪蒸停止,盒内混合气体温度因设备初始热容量的影响而迅速回升,最终达到某个略低于初始温度的数值(该数值取决于闪蒸吸热量与实验盒总热容的某种平衡)。

图3中两次实验充液量近似一致(即开口端液面近似相同),压力变化曲线符合很好,但温度在以下3处存在明显不同:(1)第二次实验初始液体温度22.4℃,略高于第一次的19.5℃;而闪蒸终止后平衡温度第二次为16.7℃,也高于第一次的11.0℃;第一、二次实验前后温差分别为8.5℃和5.7℃,也略有差异。(2)第二次实验在排放开始时温度反向升高,而第一次没有。根据图像回放可以看到,该反向升温是由敞开口端喷出的过热液体接触热电偶测点引起的。第二次实验中,封闭管段残留气泡较大,快速减压过程中该气泡迅速膨胀,将尚未达到闪蒸状态的液体挤出管道开口端,并沿热电偶的引线向下流过温度测点,引起测量温度回升。(3)第二次实验最后阶段开始升温较第一次早,同样源于早期被挤出的

液体,较早喷洒散开,强化了闪蒸过程,并使闪蒸完成时间因此提前。审视压力曲线,第二次实验的残液排放段中的压力曲线稍稍低于第一次的压力曲线,其含义与温度变化曲线一致。

图4显示了第一次实验中快速减压开始及液体排放过程中管内流态特征。需要说明的是,本实验系统中 Bond 数约为 16,低速条件下的气液两相流显然会处于重力依赖区^[8-10]。实验中确实观察到气液两相流型存在明显的重力分层及弯管离心分层现象。具体排放过程特征详述如下:

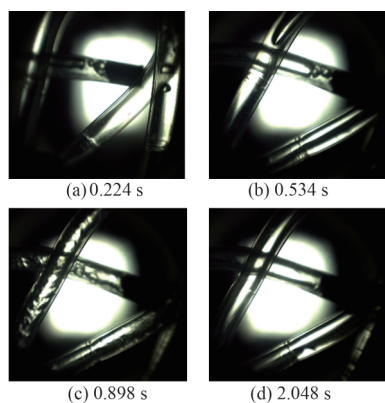


图4 排放过程中管内气液两相流典型流态
Fig.4 Typical flow patterns of gas-liquid two-phase flow in the complex pipeline during the discharge process

快速减压开始,首先观察到管道封闭端胶泥上气泡析出和生长,这可能源于充液排气时插入胶泥中的注射针头遗留空穴引起的残留气体膨胀。在随后的视频中可看到该部位上气泡连续出现与合并、长大并向下游延伸生长。同时,在敞开端口附近也能看到气泡析出。通过连续视频慢速回放可判断这些气泡均产生于管道内壁面,与常规的非均质沸腾现象中相应气泡生长过程类似。气泡长大、脱落并随液体向下游运动,在原来位置有新气泡生成。邻近液气界面的气泡与界面合并引起液面破碎和闪蒸的发生。显然,管道敞开端口附近的液体闪蒸最初往往源自邻近液气界面的气泡与界面合导致的液面破碎,后续气泡的到来则加剧了闪蒸强度。闪蒸一般持续发生在近似相同的部位,即闪蒸波界面近似稳定不动。

封闭端气团的扩张形成了尺度远大于管径的偏心气核,其延伸过程排开管内液体,将其从敞开端口挤出、闪蒸形成的雾状气液混合体,使得图像变暗、变模糊,并且出口射流的反作用力会导致底

部未固定牢固的整个管道略微向右倾倒。流道内延伸生长着的气核使绝大部分管道内流态近似为环状流,但与常规重力环境和常规尺寸管路中的气液两相环状流不同的是,气团扩张阶段的环状液气界面非常光滑、平稳,且存在明显偏心现象,在紧邻弯管部分尤为明显。气核特征还与流动方向有关,在水平或倾斜上升段,气核直径明显小于管径,且偏心现象明显;而在下降段,气核尺寸接近管径,并近似对称分布。总之,重力效应主要存在于气团伸张子阶段,此时,哪怕中间出现间断或短气团(后者在运动过程中会与前后气核连通、融合),液气界面形态总是光滑的,且形成的气核在重力和弯道离心力作用下明显呈现出偏心状。

而在气核拖曳子阶段,气核直接与环境气氛相连,不再受管口液体的封堵,环境真空对其的剧烈抽吸作用造成气相流速的急剧增加,进而对环状液膜产生强烈的剪切作用,形成液气界面的剧烈波动。气核与外部气氛的连通后形成的液气界面剧烈波动的环状流型呈现为对称状,即表现出明显的重力无关性。这里,起作用的是气核流动速度。赵建福^[8-9]曾提出在 Bond 数准则外,还存在另一个如式(1)所示的修正 Froude 数准则,来表示气相惯性力超越重力作用的重力无关区:

$$Fr_* \equiv U_{sc} / \sqrt{(\rho_L - \rho_G)gd/\rho_G} \geq Fr_{*,cr} \approx 0.54 \sim 2.2 \quad (1)$$

由此可以计算出在本文实验条件下气液两相流重力无关的最小气流表观速度约为 3 m/s。这与下文观测数据是一致的。

气核与外部气氛连通后,从开口端逆向传播的液气界面剧烈波动现象在约 0.1 s 时间内即到达管道封闭端,其传播速度约为 3.5 m/s。赵建福^[12]研究了气液两相流动中声波传播速度的变化规律,指出在气、液两相相互作用剧烈但无相变的情形,两相声速可降低到 $a_m = (4p/\rho_L)^{1/2}$ 。在本文实验条件下全氟三乙胺气液两相声速约 6.3 m/s。此外,相变会进一步强化相间耦合作用,会导致气液两相声速的进一步下降^[13]。考虑到液气界面剧烈波动向上游的传播相对与混合流动为逆向传播,基于上述数据确定出的混合流动速度不小于 3 m/s,满足式(1)确定的重力无关条件,从而使气核与外部气氛的连通后形成的环状

流型表现出明显的重力无关性。

最后,在残液排放段,前期喷散出管道中的液体在实验盒内闪蒸引起温度持续下降,管内残余液体(一般呈附壁液团状出现在较低部位)闪蒸被抑制,在缓慢蒸发出的少量气体驱动下缓慢波状前移。此时,测试罐内压力近似恒定,处于闪蒸产生的气体速率与真空罐抽吸能力准平衡的状态;而其温度的上升则源自测试罐体热容的影响。

4 结论

本文在地面常重力环境实验模拟了月球表面复杂管路系统中液体排放过程特征。实验发现在所模拟研究情形中,Bond 数约为 16,重力效应在低速流动时依然存在,而在高速环状流或低速下降流动中则弱不可测。

实验观测表明,真空环境复杂管道内液体排放的过程可以划分为初始状态段、快速减压段、液体排放段、残液排放段和闪蒸终止段等 5 个阶段,工程上最为关注的实际上是第 2、3 阶段,决定着排放过程的主要技术指标。本文观测结果可以直接用于相关设计验证及构建更为精细的流动模型,服务于相关应用技术研发与运控管理。

参考文献(References)

[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] 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.

[4] 杜王芳, 赵建福, 李凯. 快速减压条件下液滴热力学行为

为的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2012, 33(8): 1349-1352.

Du W F, Zhao J F, Li K. Experimental study on thermal-dynamical behaviors of liquid droplets during quick depressurization [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(8): 1349-1352. (in Chinese)

[5] Du W F, Li K, Wang S F, et al. Flashing liquid jets in low-pressure environment [J]. Interfacial Phenomena & Heat Transfer, 2013, 1(2): 173-180.

[6] 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 W F, Zhao J F, Li K. Experimental study on flashing liquid jets in vacuum environment [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(5): 910-913. (in Chinese)

[7] 杜王芳, 赵建福, 李凯. 真空环境液体排放过程的热动力学研究 [J]. 工程热物理学报, 2015, 36(3): 564-567.

Du W F, Zhao J F, Li K. Thermal dynamics on liquid discharge into vacuum environment [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(3): 564-567. (in Chinese)

[8] Zhao J. Two-phase flow and pool boiling heat transfer in microgravity [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2010, 36(2): 135-143.

[9] 赵建福. 气-液两相流动与相变传热 [M]//微重力科学概论, 北京: 科学出版社, 2010: 127-164.

Zhao J F. Two-phase Gas-liquid Flow and Heat transfer with Phase Change [M]//Introduction of Microgravity Sciences, Beijing: Science Press, 2010: 127-164. (in Chinese)

[10] 赵建福, 彭浩. 不同重力条件下管内冷凝现象研究进展 [J]. 力学进展, 2011, 41(6): 480-488.

Zhao J F, Peng H. Review on in-tube condensation in different gravity conditions [J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(6): 480-488. (in Chinese)

[11] 徐侃, 赵建福, 宁献文, 等. 高真空液态工质排放多变过程分析 [J]. 真空与低温, 2015, 21(3): 139-145.

Xu K, Zhao J F, Ning X W, et al. Complex process analysis of the working fluid evacuating in high vacuum [J]. Vacuum and Cryogenics, 2015, 21(3): 139-145. (in Chinese)

[12] 赵建福. 掺气水流可压缩特性的研究 [D]. 武汉: 武汉水利电力大学, 1998.

Zhao J F. Study on the Compressibility of Aerated Water Flow [D]. Wuhan: Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1998. (in Chinese)

[13] Henry R E, Grolmes M A, Fauske H K. Pressure pulse propagation in two-phase one-and two-component mixture [R]. ANL-7792, 1971.

+++++ (上接第 719 页)

[24] Du J F, Wu Y J, Zhang Y X, et al. Large-scale information entropy analysis of important sites in mature and precursor miRNA sequences [J]. Science in China Series C-Life Sciences, 2009, 52(8): 771-779.

[25] Quantification of Circulating miRNAs in Plasma Effect of Pre-analytical and Analytical Parameters on Their Isolation and Stability [J]. Journal of Molecular Diagnostics, 2013, 15(6): 827-834.

[26] Selcuklu S D, Donoghue M T A and Spillane C. miR-21 as a key regulator of oncogenic processes [J]. Biochemical Society Transactions, 2009, 37: 918-925.

[27] Chao T F, Xiong H H, Liu W, et al. MiR-21 Mediates the

Radiation Resistance of Glioblastoma Cells by Regulating PD-CD4 and hMSH2 [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology-Medical Sciences, 2013, 33(4): 525-529.

[28] Gwak H S, Kim T H, Jo G H, et al. Silencing of MicroRNA-21 Confers Radio-Sensitivity through Inhibition of the PI3K/AKT Pathway and Enhancing Autophagy in Malignant Glioma Cell Lines [J]. Plos One, 2012, 7(10).

[29] Xu S, Ding N, Pei H L, et al. MiR-21 is involved in radiation-induced bystander effects [J]. Rna Biology, 2014, 11(9): 1161-1170.