

高真空液态工质排放多变过程分析

徐侃¹, 赵建福², 宁献文¹, 郑红阳¹

(1. 中国空间技术研究院总体部, 北京 100094,
2. 中国科学院力学研究所微重力重点实验室, 北京 100190)

摘要:短周期任务的航天器,在任务结束后要放掉工质,以减轻重量,提高安全性和可靠性。基于两相混合流动及液体闪蒸、闪蒸波理论,结合压力突降过程液态全氟三乙胺闪蒸试验,对1/6 g重力、高真空环境排放流体回路管道内液态全氟三乙胺工质的过程进行分析。结果表明,全氟三乙胺工质向真空排放时会发生闪蒸,回路系统内液体工质的排放时间主要取决于压力排放段、重力辅助排放段和闪蒸波传播段;其中,仅重力辅助排放段依赖于重力,闪蒸波传播段时间最长;试验观测闪蒸波在内径9 mm塑料管内的传播速度为0.23 m/s,比Simões - Moreira & Shepherd简化模型预测结果偏大。

关键词:工质排放;闪蒸;真空

中图分类号: O521 + .23

文献标志码: A

文章编号: 1006 - 7086(2015)02 - 0139 - 07

DOI: 10.3969/j.issn.1006 - 7086.2015.03.003

COMPLEX PROCESS ANALYSIS OF THE WORKING FLUID EVACUATING IN HIGH VACUUM

XU Kan¹, ZHAO Jian-fu², NING Xian-wen¹, ZHENG Hong-yang¹

(1. The System Institute, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;
2. Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: For lightening or improving reliability and security, more and more space aircrafts with short periodic missions need to evacuate the working fluid after the mission ending. Based on the two phase flow and the liquid flashing vaporization theory, together with the $N(C_2F_5)_3$ flashing vaporization experiment carrying out in the pressure rapidly decreased surrounding, it was analyzed in the present study that the working fluid $N(C_2F_5)_3$ in the fluid loop evacuating in high vacuum under 1/6g gravity and condition. The results indicated that the $N(C_2F_5)_3$ evacuating in the high vacuum would tempestuously flash vaporization. The time of working fluid evacuating was decided by the Pressure Evacuating Stage, the Gravity Assisted Evacuating Stage and the Flashing Vaporization Wave Transmitting Stage, and only the second stage depended on the gravity, the last stage time is the longest. The velocity 0.23m/s of the flashing vaporization wave transmitting was experimentally measured in the plastic pipe with 9mm in diameter. It was faster than the prediction by Simões - Moreira & Shepherd simplified model.

Key words: working fluid evacuating; flashing vaporization; vacuum

0 引言

越来越多短任务周期的航天器,在任务结束后需要放掉不必要的工质,以减轻重量,提高安全性和可靠性。在轨工质排放属于典型的真空环境中的液

体排放问题,涉及液体闪蒸与气液两相临界流动等复杂过程。

多年来,气液两相临界流得到广泛地关注,并得出了许多预测气液两相临界流动的经验或分析模型。Elias 和 Lellouche^[1]对相关模型进行了系统评

收稿日期:2015-03-16

作者简介:徐侃(1983 -),男,湖南省人,工程师,从事空间飞行器热控的研究。E-mail:ridxk@163.com。

估,通过与大范围实验数据比较,对最常使用的一些预测模型进行检验,发现模型对不同条件的适用能力依赖于模型所采用的控制方程,及对相界面传递过程的经验关联。对于非等截面和非直管道,加速压降及弯头损失会加剧液体压力的下降,临界流动也有可能发生在出口之前。Celate^[2], Fraser 和 Abdelmessih^[3], 赵建福^[4], Du^[5] 等大量实验表明,对于过冷态的水流而言,闪蒸往往发生在靠近出口的地方,两相流动段非常小,可以忽略不计。另一方面,闪蒸点压力“过冲”与内部压力相比也可以忽略不计,因此,可将内部高过冷条件下流道内的实际流动简化为单相流动。对于复杂流道,目前尚无公认的预测模型,主要源于难以正确估计相间非平衡效应及流道内局部流动损失和摩擦损失等不确定因素,但可通过对结构和模型简化的方法进行计算和分

析。针对复杂结构的流体回路系统,开展模型简化后的工质排放过程数值计算和试验验证,分析全氟三乙胺($N(C_2F_5)_3$)工质完全排放所需时间,以及排放过程中闪蒸波传播等问题。

1 工质排放分析模型

1.1 几何模型

对于在月球表面 $1/6 g$ 重力的流体回路系统,分析工质排放时,流体回路结构可以依据功能简化为图 1 所示,系统高 2.7 m,顶部管长 12.5 m,底部管道布置一个补偿器,工质排放阀布置在距底部 0.5 m 高处。管路系统及补偿器内充满液体,工质最初将处于高过冷状态。流体回路系统参数见表 1 所示。

表 1 流体回路各参数

项目	值
管内径	8 mm
总管长	60 m
工质体积	3.9 L
补偿器液侧体积	0.9 L
补偿器气侧体积	0.4 L
补偿器初始压力	0.25 MPa
工质温度	40 °C
回路总高度	2.7 m
工质排放口高度	0.5 m
顶部管长	12.5 m

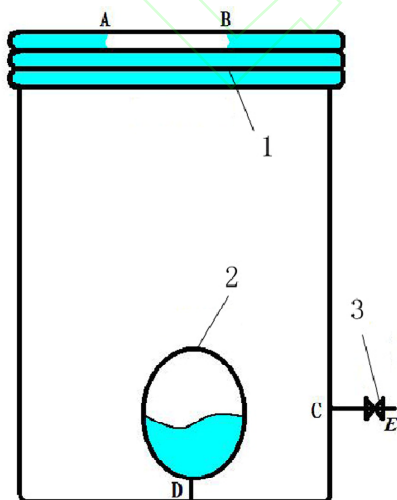


图 1 流体回路工质排放分析模型简化示意图

1. 顶部管路; 2. 补偿器; 3. 排放阀

1.2 数理模型分析

图 2 给出了流体回路排放过程中流量变化示意图。阶段 I、II 对应于补偿器内工质排放,阶段 I 为启动阶段,即排放阀开启后形成的管路系统内部液体工质的瞬态启动过程。排放阀开启后, E 点将处于闪蒸状态,也即 E 点的压力接近于工质饱和蒸汽压。阶段 III 为过渡阶段,此时补偿器内部液体工质几乎完全排出,但管路系统内压力与点 E 处压力相比仍远大于系统重位压降,使得排液速率急剧下降,直到顶部管路中的液体工质压力低于饱和值并发生闪蒸。阶段 IV 为重位压降驱动的管路排放过程,此时,顶部管路中的液体工质压力因重力的影响最低,因此最先达到过热并且在整个管路系统中过热度最高而首先发生闪蒸。鉴于管路系统热容很大,全氟三乙胺汽化潜热仅为水汽化潜热 2257 kJ/kg 的 4%^[6],忽略蒸发过程中的潜热影响,工质温度维持

不变。阶段 IV,驱动管路系统中的液体工质向外排放的动力只有顶部管路与排放口高度差引起的重位压降,排放速度近似恒定。当顶部管路中的液体排放完,液气界面下移,重位压降减小,液体工质的排放速度将不断降低,排放也将随之进入阶段 V。此时,重位压降可能不足以驱动液体工质自流,工质的排放依赖于从排放管口逆上传的闪蒸波的传播。因此,以下将重点对阶段 II、IV 和 V 进行详细分析。

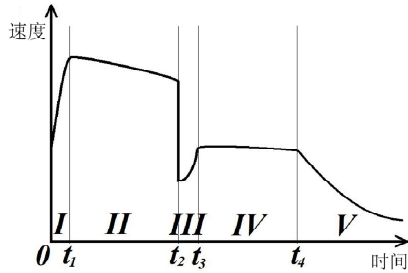


图2 流体回路排放过程示意图

1.2.1 阶段 II:补偿器工质排放段

补偿器内有一定的初始压力,该阶段又可称为压力排放段。在 $1/6g$ 重力条件下,高度差引起的重位压降远小于补偿器内部压力所产生的压差,故重力影响可以忽略不计。忽略有较大流阻的长支路内的流动,按单通路 DCE 段管道计算。初始的驱动压差为补偿器初始压力与排放口 E 处的饱和蒸汽压之差,将补偿器内液体的排放过程视为准静态过程,则排放所需的驱动压差与沿程阻力相等,即^[7]:

$$\Delta P_{dr} = P - P_{sat}(t_0) = \Delta P_f \quad (1)$$

$$\Delta P_f = \frac{\rho u^2}{2} \left(1 + K_L + f \cdot \frac{K_{eff} L}{d} \right) \quad (2)$$

$$f = \begin{cases} 64/Re & Re \leq 2100 \\ 0.3164/Re^{1/4} & Re > 2100 \end{cases}, Re = \rho u_{\tau_i} d / \mu \quad (3)$$

假设补偿器内部气体侧的变化为绝热过程,随着液体工质的排放,补偿器内压力满足如下关系:

$$P = P_0 \left(\frac{V_0}{V_0 + \Delta V} \right)^\gamma \quad (4)$$

其中,气体绝热指数 $\gamma = 1.4$,体积变化可表示为:

$$\Delta V = \int_0^t \frac{\pi}{4} d^2 u(\tau) d\tau \quad (5)$$

1.2.2 阶段 IV:重力辅助排放段

顶部管路工质的排放依赖于重力辅助,该部分工质占总管路内液体工质的 21%,顶部管路中的全氟三乙胺液体属于重位压降驱动的阶段。考虑到重力所产生的静压梯度效应,与其他部分管路内的液

体工质相比,顶部管路中的液体将距饱和状态最近。因此,除了排放口附近的工质外,顶部管路中的液体工质也将最先进入过热状态并发生闪蒸。可以假设顶部管路因液体工质排放引起的系统压降而率先过热并引起闪蒸,闪蒸产生的大量蒸汽又使得其压力上升,维持了液汽两相间的状态平衡,使顶部管路内闪蒸形成的气团压力等于系统温度所对应的饱和压力。处于顶部管路内的气团与排放管口之间的液体流动可以近似视为由月球重力产生的重位压降驱动的单相不可压流动,流动阻力来自于管路系统沿程阻力以及局部阻力。阶段 III 中,假设排放的液体全部来自顶部管道而不考虑闪蒸起始点的偏置状况,则驱动压差即重位压降保持不变。另一方面,液体工质的排放路径为先 ADC 和 BC 两段并联后再串联 CE 段,即 ADCE 和 BCE,流动产生的摩擦压降可以按如下方式计算^[9]:

$$\Delta P_g = \rho_0 g \Delta h / 6 \quad (6)$$

$$\Delta P_{f1} = f_{11} \cdot \frac{L_{11}}{d} \cdot \frac{\rho_0}{2} \cdot u_{11}^2 = f_{12} \cdot \frac{L_{12}}{d} \cdot u_{12}^2 \quad (7)$$

$$\Delta P_{f2} = f_2 \cdot \frac{K_{eff} L_2}{d} \cdot \frac{\rho_0}{2} \cdot (u_{11} + u_{12})^2 \quad (8)$$

$$L_0 = \int_0^t (u_{11} + u_{12}) d\tau \leq L_d \quad (9)$$

$$L_{1i} = k_i \cdot K_{eff} \cdot (L_i - L_0), (i = 1, 2) \quad (10)$$

其中,式(7)表示并联管段摩擦压降,式(8)为排放管段压降,二者之和等于排放驱动压差,即式(6)所表示的重位压差。式(9)表示顶部管段因闪蒸产生的空泡管段长度,此处忽略了闪蒸液量。

1.2.3 阶段 V:闪蒸波传播段

由于流体回路管道构型较为复杂,会导致闪蒸气团边界到达局部最低点后,与排放管口失去高度差,并因此失去驱动力,无法维持单相流动状态,只能依靠环境压力通过诱导逆向蒸发波向上游推进,管内液体通过气液界面上的闪蒸波转化为气相并由下游管道排出。

图3显示了蒸发波界面特征,左侧为过热液体,右侧为闪蒸后形成的气液混合物。取包含蒸发波界

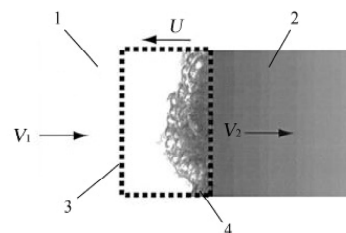


图3 蒸发波结构特征及控制体示意图

1. 液态工质; 2. 气液混合物; 3. 控制体; 4. 闪蒸波

面的控制体如图中虚线所示,假设蒸发波向上游液相传播的速度为 U ,过热液体具有向下游运动的速度 V_1 ,而气液混合体向下游运动的速度为 V_2 。将坐标系固结在蒸发波界面上,则过热液体来流相对速度 $W_1 = U + V_1$,气液混合体出流相对速度 $W_2 = U + V_2$ 。

定义界面间断量 $[f] = f_2 - f_1$,则质量、动量和能量守恒定律可分别表示为:

$$\begin{cases} [J] = 0 \\ [P + JW] = 0 \\ [h + 0.5W^2] = 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中, h 为比焓,而 J 为表观质量流率。

$$J = \frac{W_1}{v_1} = \frac{W_2}{v_2} \quad (12)$$

上式中, v 代表比容。由式(11)-(12)可得瑞利方程:

$$J^2 = -\frac{[P]}{[v]} \quad (13)$$

和兰金-雨贡纽方程

$$[h] = \frac{v_1 + v_2}{2} [P] \quad (14)$$

为求解该问题,还需增加一个状态方程以确定下游热力学特性参数。对单相理想气体而言,理想气体状态方程及比热容即可。而对两相介质一般假设两相之间存在力、热平衡,即两相间不存在速度与温度差,混合热力学参数可以采用单相参数的质量加权方法计算出来;此外,还需引入气相干度和饱和态限制。

为使方程组封闭,还需补充熵增约束条件。*Simões - Moreira & Shepherd*[9]给出了一个简化的解决方法,其中,利用 $v_2 \approx v_c \gg v_L$ 将瑞利方程简化为:

$$J^2 = \left(\frac{U}{v_L}\right)^2 = \left(\frac{W_2}{v_2}\right)^2 \approx -\frac{[P]}{v_c} \quad (15)$$

该处假设上游液体来流速度 $V_1 = 0$,下游处于局部声速状态,即

$$W_2 = C_2 = \sqrt{\gamma RT_2} \quad (16)$$

事实上,式(16)还忽略了下游混合物中少量液滴对声速的影响,可以得到上下游压力之间存在如下关系:

$$P_2 \approx \frac{P_1}{1 + \gamma} \quad (17)$$

将上述公式联合求解,可得

$$J^2 = \left(\frac{U}{v_L}\right)^2 = \left(\frac{W_2}{v_c}\right)^2 \approx \frac{\gamma}{1 + \gamma} \frac{P_1}{v_c} \quad (18)$$

1.3 闪蒸试验

真空闪蒸实验台如图4所示,包括真空维持模块、实验模块及数据测量与采集模块等。真空维持模块由真空泵、真空罐以及连接管段和真空球阀等组成;实验模块由实验盒、电磁阀等组成;数据测量与采集模块则由温度变送器、压力变送器、真空规管、数据采集仪以及高速摄像机和照明灯等组成。

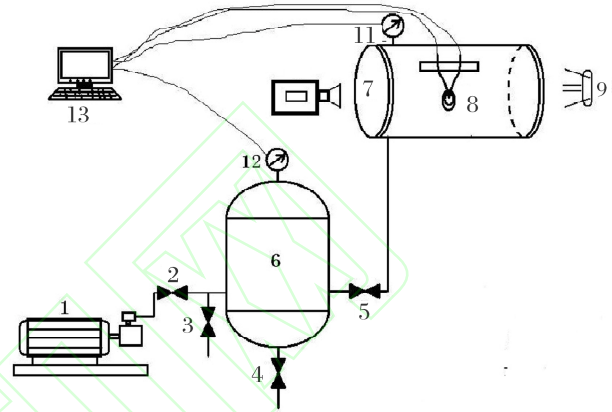


图4 真空闪蒸实验台结构示意图

1. 真空泵;2,3,4. 阀;5. 电磁阀;6. 真空罐;7. 测试罐;
8. 热电偶/液滴;9. 照明灯;10. 摄像机;11,12. 压力传感器;13. 计算机

真空罐的体积为 0.8 m^3 ,用来模拟空间高真空环境,采用 ZJ-52T 型电阻真空计测量真空度,泵的极限真空度可达 $6 \times 10^{-2} \text{ Pa}$,抽气速率 8 L/s ,实测表明,在约 1.5 h 内将真空罐内压力降低到 1 Pa (绝对压力)。用半导体加热和致冷器对真空罐内的实验盒进行控温,实验盒上安装 ZJ-52T 型电阻真空计以监测压力的大小,为便于高速采集实验盒减压过程中的压力变化过程,还安装 DMP331 型压阻式不锈钢压力传感器,量程为 $0 \sim 10 \text{ kPa}$,响应时间小于 5 ms ,精度为 $0.25\% \text{ FS}$ 。用 T 型热电偶置于管道开口端,以测量闪蒸后的气液混合体温度。为了保证实测数据与高速摄像机记录图像的时序同步,利用电磁阀启动信号触发高速摄像机开始记录。数据采集采用 DI710 独立数据记录仪进行自动采集和存储,精度为 $\pm 0.05\% \text{ FS}$ 。

2 结果和讨论

2.1 模型分析结果

基于上述数学模型编制计算程序,对液体排放过程进行了仿真模拟。数值计算中对收敛性进行了验证,当时间间隔取 10^{-6} s 和 10^{-4} s 时,总的排放时间相差不超过 $3 \times 10^{-6} \text{ s}$,满足收敛性要求。

对于阶段 II,图5显示了补偿器内液体排放过

程中主要参数:排放速度 u 、补偿器内部压力 P 及气相测体积 V 的变化趋势。图中清楚显示了补偿器内 0.5 L 的液体工质在 3.62 s 内即可排空,平均排放流量为 500 L/h 。补偿器内部液体排放结束时,气相侧压力约 88 kPa ,依然远大于系统整体 6 kPa 的重位压降,因此,该阶段重力对工质排放的影响可以忽略。

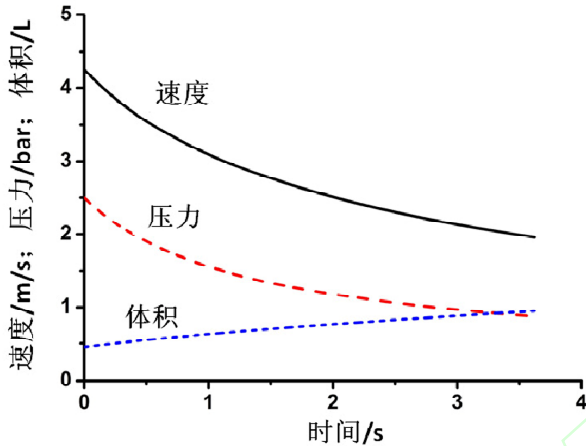


图5 补偿器内液体排放过程中流速和压力变化

对于阶段 IV,考虑到流道布局的非对称性以及闪蒸发生部位的随机性,引入偏置因子 k_i , $k_i \in (0.25, 0.75)$ 且 $k_1 + k_2 = 1$ 来表示并联管道 ADC 和 BC 长度的差异,具体设置由公式(10)确定;同时,公式(10)出现的等效长度系数 K_{eff} 原因及取值同前。系统管路总长度 $L_t = 60\text{ m}$,顶部管路长度 $L_d = 12.5\text{ m}$,排放管段长度 $L_2 = 0.5\text{ m}$ 。该阶段排放的驱动力是 $1/6\text{ g}$ 重力,也是整个排放过程中唯一依赖于重力的阶段。

图6显示了不同偏置系数下的顶部管道排放过程特征参数变化情况。在偏置系数取值 $0.25 \sim 0.75$ 范围内,顶部管道内液体的排放速度几乎不变,在约 50 s 内顶部管道中的液体工质均能够排空。两条支路排放流速差别最大可达到 60% ,且偏置程度越大,排放速度越快。

对于阶段 V,剩余的全氟三乙胺工质均通过闪蒸的方式排放出去,表现为闪蒸波在管内的传播,重力影响可以忽略。闪蒸模型计算中,可作如下进一步的假设:

(1) 由于全氟三乙胺属于多原子分子,其蒸气绝热指数 $\gamma = 1.29$;

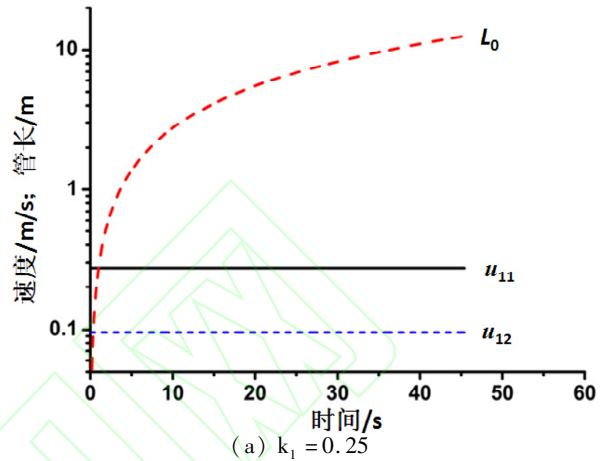
(2) 鉴于全氟三乙胺蒸发潜热较小,蒸发波前后温差可以忽略,即 $T_1 = T_2 = 40\text{ }^\circ\text{C}$;

(3) 闪蒸波的发生和持续需要一定的过热度,

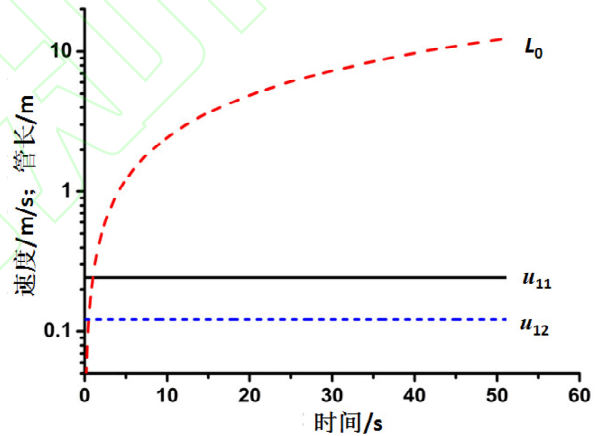
假设上游过热比 $R_p = P_{sat}(T_1)/P_1$ 恒定,取值为 1.5 ;

(4) 全氟三乙胺蒸气状态变化可以用理想气体状态方程近似描述。

综合上述假设及全氟三乙胺工质的物性可知 [9]:



(a) $k_1 = 0.25$



(b) $k_1 = 0.50$

图6 偏置系数不同时顶部管道液体排放参数的变化

$$\begin{cases} P_1 = P_{sat}(T_1)/1.5 = 23\text{ kPa} \\ v_L = 1/\rho_L = 5.917 \times 10^{-4}\text{ m}^3/\text{kg} \\ P_2 = 10.5\text{ kPa} \\ v_C = RT/P_2 = 0.31\text{ m}^3/\text{kg} \end{cases} \quad (19)$$

利用式(18)可以计算出闪蒸波的运动速度 $U = 0.12\text{ m/s}$, $W_2 = 95\text{ m/s}$,即相应温度和绝热指数条件下的声速, $V_2 \approx W_2$ 。显然,若蒸发波传遍整个管路系统,则相应的液体工质也就可以认为全部排出。在不考虑管路构型或阻力的情况下,按最长 60 m 计算,蒸发波传遍整个管路系统需要约 500 s 。Simões-Moreira & Shepherd曾实测了十二烷液体中闪蒸波的传播速度^[8],其数值约在 $0.3 \sim 1.5\text{ m/s}$ 间,其数量级与本计算结果接近。

2.2 试验结果分析

为了解全氟三乙胺液体工质在压力遽降条件下是否会发生闪蒸以及发生闪蒸时闪蒸波界面特征及其传播特性,试验采用体积 2.5 mL , 针管内径约为 9.14 mm 的塑料注射器, 摘除了针头并将出口完全封堵, 然后预装 1.15 mL 全氟三乙胺液体工质。注射器和其中的全氟三乙胺液体工质全部置于闪蒸实验盒内。

实验中, 真空罐初始绝对压力置于 15 Pa , 环境温度 $12 \text{ }^\circ\text{C}$, 未启动实验盒温控系统, 液体的初始温度与环境温度相近。开启电磁阀后压力变化过程如图 6 所示, 图中同样还给出了电磁阀启动开关信号以标示时间同步起点。

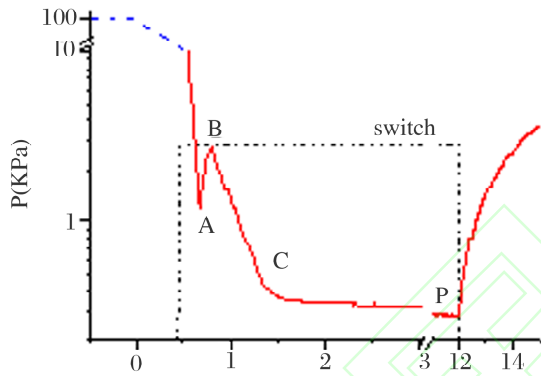


图7 实验盒压力遽降引起液体闪蒸盒内压力变化曲线

图 7 可以看出, 实验盒内压力在电磁阀开启后迅速降低, 0.68 s 后下降为 A 点处 1.239 kPa ; 随后, 压力出现陡升, 在 0.79 s 压力升至点 B 处 2.77 kPa ; 此后, 压力再次快速下降, 直到 1.5 s 左右下降趋势开始变缓, 在后续 10 s 时间内压力下降幅度约 70 Pa 。当电磁阀关闭后, 实验盒内残存的液体工质持续闪蒸, 使得实验盒内压力迅速升高。

图 8 显示了高速摄像机记录的闪蒸起始时, 液面形态与附近流动现象。在 0.674 s 时液面仍然维持静态平面, 而在 0.676 s 时, 观察到起自壁面附近的剧烈相变和向上喷涌流动, 其中夹带有大量细小液滴, 以至于在 0.680 s 时液面上方透光性极低, 背部照明用的透射光线几乎无法透过所形成的气液混合物, 图像呈黑色不透明状。与实测压力变化曲线向比较, 闪蒸的起始要略早于点 A 处实测压力的陡升, 这既与压力测孔位于注射器针管之外的实验盒壁面有关, 同时也是因为数据的采样间隔略大, 不足以捕捉更细微时间内的压差。总体而言, 实验数据

与图像具有一致性, 捕捉到了闪蒸起始时刻。图 8 (d) 给出了高速摄像机记录的闪蒸波界面向液相侧的传播。在 0.02 s 内闪蒸波界面向液相侧传播了 4.6 mm , 其平均速度为 0.23 m/s 。此外, 高速摄像机记录图像回放表明, 约在 1.03 s 时针管内就不再出现明显的气液混合物流动的迹象。

试验工况中, 温度 $T_1 = T_2 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, 根据全氟三乙胺的物性可知:

$$\begin{cases} P_1 = P_{sat}(T_1)/1.5 = 6.8 \text{ kPa} \\ v_L = 1/\rho_L = 5.63 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg} \\ P_2 = 2.97 \text{ kPa} \\ v_G = RT/P_2 = 2.15 \text{ m}^3/\text{kg} \end{cases} \quad (20)$$

利用式 (18) 可以计算出蒸发波界面运动速度 $U = 0.024 \text{ m/s}$, 气液混合物运动速度 $V_2 = 91 \text{ m/s}$ 。和实测出来的闪蒸开始阶段闪蒸波界面传播速度 0.23 m/s 相比, 预测结果小 1 个量级。造成上述差异的可能原因, 主要在于上述模型近似中存在与实际情形的较大偏离, 如气液混合物中液滴数量较多, 对闪蒸波界面下游状态影响较大; 闪蒸波上游过热度取值不符合实际情况; 另一方面, 考虑到实际管路系统的复杂性, 闪蒸波界面在其中的传播会受到很复杂的干扰和阻碍。

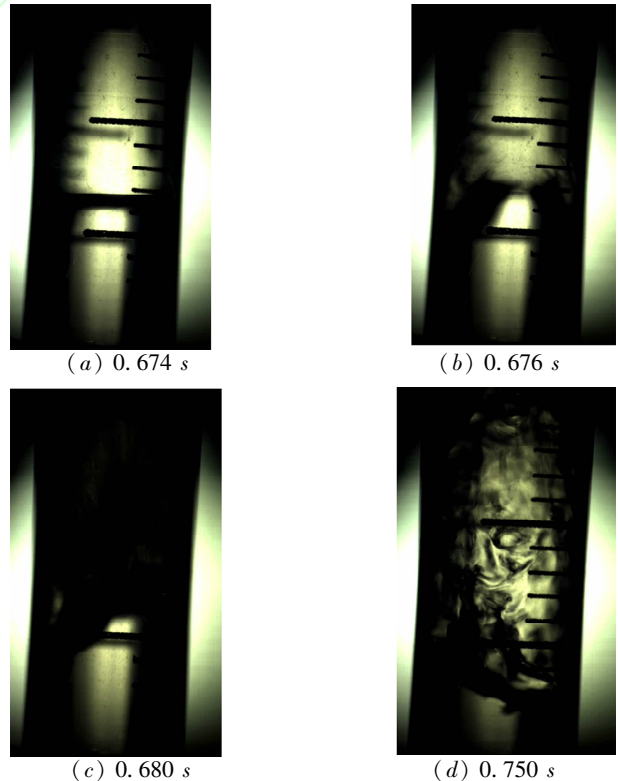


图8 闪蒸起始时液面形态和闪蒸波传播

3 结论

通过对流体回路在真空 $1/6 g$ 重力环境中的液体工质排放过程进行初步分析,结合液体闪蒸及闪蒸波理论,分析液体排放过程特征,试验观测并测量全氟三乙胺闪蒸特性,计算了排放过程各主要阶段需要的时间,可以得到如下结果:

a) 流体回路液体工质排放时间长短主要取决于压力排放段、重力辅助驱动排放段及闪蒸波传播段三个阶段所需的排放时间;b) 复杂构型的流体回路管路中,压力排放段排放时间短且可忽略重力影响,重力辅助驱动排放段依赖于重力加速度大小、构型、姿态等,闪蒸波传播段所需时间最长,闪蒸波在回路系统中的传播速度主要取决于工质的当地饱和蒸汽压;c) 试验观测了全氟三乙胺闪蒸波传播速度约 $0.23 m/s$,比用简化模型计算值偏大。

参考文献:

[1]Ellias E, Lellouche GS. Two - phase critical flow[J]. Int. J. multiphase Flow, 1994, 20 (suppl. issue): 91 - 186.
 [2]Celata G P, Cumo M, D'AnnibaleF, et al. The influence of non - condensible gas on two - phase critical flow[J]. In-

(上接第 164 页)

[5] Pirich R, Weir J, Leyble D, et al. Effect of radiation on the molecular and contamination properties of silicone - based coatings [C]. Applications and Technology Conference (LISAT), IEEE, 2011: 215 - 219.
 [6]焦子龙,杨东升. GEO 卫星整星分子污染初步预估[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(6): 526 - 532.
 [7]田海,冯展祖,杨生胜. 星用镀膜光学透镜空间带电粒子辐射效应评价[J]. 西北师范大学学报, 2014, 50(5): 33 - 36.
 [8]赵印中,李林,许旻,等. 玻璃型镀铝二次表面镜的模拟空间环境辐照试验研究[J]. 真空与低温, 2011, 17(4):

International Journal of Multiphase Flow, 1988, 14(2): 175 - 187.

[3]Fraser D W H, Abdelmessih A H. A study of the effects of the location of flashing inception on the maximum and minimum critical two - phase flow rates: Part I [J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 211(1): 1 - 11.
 [4]Fraser D W H, Abdelmessih A H. A study of the effects of the location of flashing inception on the maximum and minimum critical two - phase flow rates: Part II [J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 213(1): 11 - 30.
 [5]赵建福,张征明,张忠海. 窄缝内汽液两相临界流实验研究[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(z1): 173 - 176.
 [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]张建可. 全氟三乙胺的低温性能测试方法研究[J]. 低温与特气, 1996, (2): 63 - 65, 69.
 [8]郑丹星. 流体与过程热力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
 [9]Simões - Moreira J R, Shepherd, J E. Evaporation waves in superheated dodecane [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1999, 382: 63 - 86.
 [10]王娟,张建可,冀勇夫,等. 低温下液体饱和蒸汽压的测试[J]. 真空与低温, 1995, (3): 149 - 152.
 [9]黄小琦,王立,刘宇飞,等. 太阳帆表面薄膜空间电子辐照性能研究[J]. 真空与低温, 2014, 20(3): 154 - 157.
 [10]杜继实,张涛,赵丽丽,等. 玻璃空间电离辐照着色损伤动力学研究[J]. 无机材料学报, 2012, 27(11): 1197 - 1204.
 [11]王先荣,马文杰. 污染低温凝结效应设备的研制[J]. 宇航学报, 2002, 23(3): 68 - 71.
 [12]李瑞琦,李春东,何世禹,等. keV 质子辐照 Kapton/Al 的能量传输过程[J]. 高能物理与核物理, 2007, 31(1): 114 - 118.