

真空模拟环境下液体推进剂 蒸发特性的试验研究

池保华, 洪流, 李龙飞, 杨伟东
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 为研究液体推进剂在真空环境下的蒸发特性, 建立了真空环境模拟试验系统。对水、饱和盐水、煤油、酒精和凝胶模拟液等工质进行了蒸发特性试验。通过控制系统实时采集了真空舱的真空度和工质温度。试验中观察到了明显的闪蒸现象。由于闪蒸的存在, 工质蒸发过程非常剧烈。最后分析了不同工质在真空环境下的蒸发特性, 给出了部分工质的闪蒸参数。

关键词: 真空环境; 闪蒸; 蒸发特性

中图分类号: V511

文献标识码: A

文章编号: (2010) 01-0071-04

Experimental study on evaporation characteristics of liquid propellants in vacuum environment

Chi Baohua, Hong Liu, Li Longfei, Yang Weidong
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: A simulant vacuum system was built to study evaporation characteristics of liquid propellants in vacuum. Water, saturated brine, kerosene, alcohol and simulant gelatin were studied in the experiments. The vacuum pressures and temperatures of propellants were recorded during the tests. The substance vaporized explosively due to flash evaporation, which could be observed evidently. The evaporation characteristics of different substances was analyzed and parameters of flash boiling was calculated.

Key words: vacuum environment; flash evaporation; evaporation characteristic

收稿日期: 2009-08-07; 修回日期: 2009-10-12。

作者简介: 池保华 (1982—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机喷雾燃烧。

0 引言

空间发动机工作在低温真空的太空环境，液体推进剂在此环境下常常表现出与地面环境不一样的特性，这些差异对工质的存储和使用会带来影响，甚至影响到发动机点火和冷却性能。闪蒸是真空环境下液体喷射区别于大气环境的最显著的一种现象。当环境压力突然降低到初始温度对应的饱和压力以下时，液体由最初的平衡状态变成过热状态，当压力下降过快时，液体不能全部以显热的方式来释放能量，而是通过快速蒸发以释放潜热，这一过程称为闪蒸。闪蒸通常伴随液体剧烈的相变现象，使蒸发过程存在一定的不确定性。空间发动机多次启动时，由于剧烈的相变改变推进剂的雾化、混合和燃烧特性，影响发动机的点火；对于载人飞船和空间站在太空飞行排放生活废水时，当闪蒸带走的热量过多时，会导致排放管出口结冰，恶化宇航员的生活质量。因此，研究液体工质在真空环境下的蒸发特性对于空间发动机和太空排放设计具有重要意义。

D Saury 等^[1]研究了降压速率对水闪蒸的影响，Rajshekhar D Oza 等^[2]提出了闪蒸中气泡的增长模型，JONG-IL KIM 等^[3]分析了低压闪蒸过程中的临界点，吴楚等^[4]研究了压力、温度对喷雾特性的影响。这些研究取得了可喜的成绩，但研究多以水为研究对象，对于液体火箭发动机真实推进剂研究较少。随着未来无毒无污染液体火箭发动机的发展，采用煤油、甲烷和酒精作为推进剂成为一种趋势。本文对水、饱和盐水、煤油、酒精和凝胶模拟液等工质在真空模拟试验环境下进行了蒸发特性试验研究。

1 试验系统介绍

1.1 试验系统

真空模拟试验系统如图 1，由真空舱、真空机组、真空计、温度传感器和数据采集系统等组成，基本技术参数如下：

(1) 真空舱有效使用容积为 3m³，极限真空度

- 0.1Pa；
- (2) 真空机组抽真空时间小于 30 分钟，机组满足在大水蒸汽（300ml）条件下真空舱内真空度不高于 500Pa 正常工作的能力；
- (3) 真空计可检测真空度范围为 0.1Pa 至 1×10⁵Pa，显示精度为 0.01Pa；
- (4) 温度传感器满足真空环境下的正常使用，量程为 223.15~373.15K。真空舱侧向设有观察窗，可定性观察工质在真空中的蒸发过程。数据采集系统对真空度、工质温度等进行实时记录和存取。

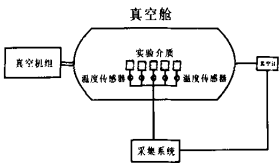


图 1 真空蒸发试验系统示意图
Fig.1 Sketch of the vacuum experiment system

1.2 试验工质

试验工质包括水、饱和盐水、酒精、航空煤油和凝胶模拟液。由于舱体容积较大、真空程度较高，认为工质间相互不干扰。各工质基本参数如表 1。

表 1 工质基本参数
Tab.1 Basic parameters of the test substances

	水	饱和 盐水	酒精	煤油	凝胶模 拟液
初始温 度/K	291.45	291.45	291.45	291.45	291.45
重量/g	192.8	215.7	137.4	144.7	172.1
冰点/K	273.16	251.95	159.15	<213.15 ~223.15	-

1.3 数据采集和操作

工质温度通过 PT-300 温度传感器测量，真空舱的真空度通过压力传感器和真空计测量。温度压力均接入数据采集系统，并实时显示和采集。试验时，先开启旋片泵对真空舱抽取真空，待真空度达到一定程度（约 1000Pa 左右）后，旋片泵停止工作，开启罗茨泵。真空度约为

1000Pa 时开始采集数据, 采集时间为 1500s, 采集频率为 10 点/s。数据采集末段 (约 1450s), 关闭阀门和罗茨泵, 对真空舱进行保压。

2 结果和分析

2.1 试验结果

试验中观察到了所有液体工质的快速蒸发过程, 伴随大量气泡和液体沸腾; 水、饱和盐水和凝胶模拟液出现了块状结冰, 酒精和煤油没有出现结冰, 只是煤油中出现少量丝状物。试验结束后各工质的最终温度和蒸发比如表 2。

表 2 工质蒸发参数

Tab.2 Evaporation parameter of the substances

	水	饱和 盐水	酒精	煤油	凝胶模 拟液
最终温 度/K	237.71	249.71	234.86	259.58	235.55
重量/g	192.8	215.7	137.4	144.7	172.1
蒸发 量/g	109.9	118.7	65.3	72.8	100.2
蒸发比	0.570	0.550	0.475	0.503	0.582

试验过程中真空度随时间的变化如图 2, 工质温度随时间变化如图 3。真空舱压力除了在末段保压时出现阶段回升外, 在 420s 和 1232s 处也出现回升, 原因是保压时真空机组无抽取, 工质蒸发增加了真空舱压强。从图 3 可看出, 在 $t=0$ s 时刻, 闪蒸开始, 随环境压力的快速降低, 工质迅速变得整体过热, 工质的潜热通过工质表面释放。闪蒸使得液体汽化带走大量热量, 导致温度快速降低; 在 $t=400$ s, 水和凝胶模拟液表面已经结冰, 工质由液态转变为固态会释放出凝固热, 工质得到加热, 温度略有上升, 在 $t=400$ s~ 420 s, 固体表面升华导致真空舱压力上升, $t=420$ s 后, 水和凝胶模拟液完全变成固相, 固相在真空环境下升华带走的热量使得温度继续下降; 而煤油、酒精冰点低, 闪蒸时吸收的热量不足以使自身发生相变, 温度一直下降, 由于温度的降低使过热度过度降低, 闪蒸过程会逐渐趋于平缓。

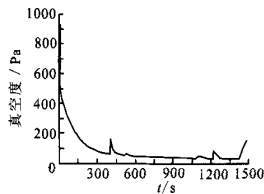


图 2 真空度随时间的变化曲线

Fig.2 Vacuum pressure versus time

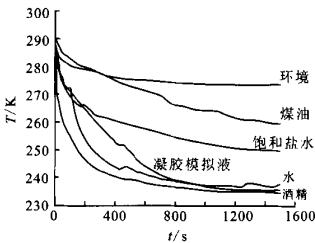


图 3 工质温度随时间的变化曲线

Fig.3 Temperature of substance versus time

2.2 质量蒸发量

忽略工质的自然挥发和环境的换热, 以质量平衡为基础, 假设间隔时间内工质相间处于相对平衡, 蒸发量吸收的气化潜热来自液相, 则有:

$$mc_v dt - h_{fg} dm = 0 \tag{1}$$

对上式在间隔时间内积分, 假设工质的密度 ρ_l 、气化潜热 h_{fg} 和比热容 c_v 不变, 可得到闪蒸的质量蒸发量:

$$m_{ev}(t) = \rho_l A H \left(1 - e^{-\frac{c_v}{h_{fg}}(T_0 - T)} \right) \tag{2}$$

式中, A 为液体横截面积; H 为液位高度。

变换形式后可得到相对质量蒸发量:

$$\alpha = \frac{m_{ev}(t)}{\rho_l A H} = 1 - e^{-\frac{c_v}{h_{fg}}(T_0 - T)} \tag{3}$$

工质发生相变过程中, 虽然闪蒸没有停止, 但是仅发生在部分液面和容积, 质量蒸发量计算较复杂, 关键参数在本试验条件下难以获得, 故仅分析水、饱和盐水和凝胶模拟液在液态时的闪蒸参数, 三种工质在 273.15K 以上状态的闪蒸参数见图 4。酒精和煤油在闪蒸过程中没有发生相变, 整个过程中的闪蒸参数如图 5。

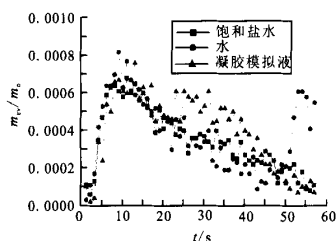


图4 结冰工质相对质量蒸发率曲线

Fig.4 Relative mass evaporation of frozen substance

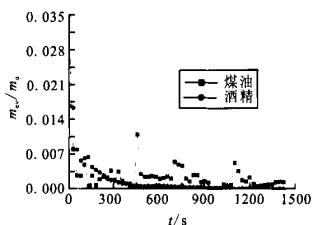


图5 未结冰工质相对蒸发率曲线

Fig.5 Relative mass evaporation of liquid substance

液体火箭发动机常规推进剂, 如 N_2O_4 和 UDMH, 常压下自然挥发的相对质量蒸发量仅为 10^{-4} 量级^[9], 推进剂在真空环境下的相对质量蒸发量普遍要高 1~2 个量级。水、饱和盐水和凝胶模拟液的相对质量蒸发量随时间总的变化趋势是先增加后减小, 水和凝胶模拟液后续有两个明显的波峰, 分析认为是工质达到了该温度下的临界压力。酒精和煤油的相对质量蒸发量迅速减小后趋于平缓, 在 252s (此时真空度为 104Pa) 前, 酒精相对质量蒸发量比煤油大, 之后煤油相对质量蒸发量比酒精大。

2.3 真空度对温度的影响

真空度对不同工质由于蒸发引起的温度变化各不相同, 温度下降的快慢主要是由闪蒸的强烈程度决定。从图 6 可以看出, 真空度越小, 工质温度降低速度越快, 即闪蒸越来越强烈。在相同降压条件下, 压强大于 267Pa 前, 煤油温度降低速度最慢, 水、饱和盐水和凝胶模拟液大体相当, 酒精温度降低最快; 压强小于 267Pa 后, 煤油温度降低速度最慢, 其余依次是饱和盐水、凝胶模拟液、水和酒精。

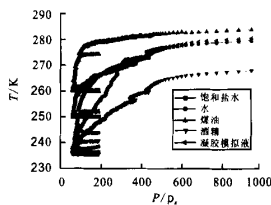


图6 真空度对工质温度的影响

Fig.6 Influence of vacuum pressure on temperature

3 结论

(1) 真空条件下液体工质发生了显著的闪蒸, 导致蒸发比常压下强烈得多, 冰点较高的工质达到固相后温度会继续下降。

(2) 低压蒸发过程中, 工质温度的降低先迅速后缓慢。水和凝胶模拟液最终变成固态, 在真空度低于 100Pa 时, 水和凝胶模拟液的最低温度为 237.75K 和 235.55K。煤油和酒精没有明显的液相转变为固相的过程, 但煤油出现了丝状物。

(3) 真空度越小, 闪蒸越强烈, 工质温度降低速度越快。

参考文献:

- [1] Saury D, armand S, Siroux M. Flash evaporation from a water pool: Influence of the liquid height and of the depressurization rate [J]. International Journal of Thermal Sciences 44(2005): 953-965.
- [2] Rajshekhar D Oza, James F Sinnamon. An Experimental and Analytical Study of Flash-Boiling Fuel Injection[J]. Society of Automotive Engineers, 1983.
- [3] JONG-IL KIM. Some critical transitions in pool flash evaporation[J]. Int.J.Heat Mass Transfer, 40(1997):2363-2372.
- [4] 吴楚, 魏建勤, 许沧粟, 等. 闪蒸喷雾的试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(5): 516-520.
- [5] 金仁喜, 刘登瀛, 华顺芳, 等. 爆炸沸腾研究进展[J]. 海军工程大学学报, 2001, 13(6): 8-13.
- [6] 陈新华, 吴冲华, 佟连捷. 可贮存有毒推进剂在大气中蒸发特性的研究[J]. 指挥技术学院学报, 1999, 10(2): 11-15.

(编辑: 王建喜)