

真空室压升法测量液态工质漏率可行性分析

孙伟, 闫荣鑫, 韩琰, 邵容平
(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 文章旨在探讨压升法测量液态工质漏率的可行性, 研究液体泄漏的试验方法。首先根据液体饱和蒸气压的理论分析, 得出液体挥发引起的定容压力增量; 之后通过微进样系统, 采用真空室静态升压方法, 分别以全氟三乙胺和乙二醇水溶液为研究对象进行试验分析, 研究得出漏入液体量 V 与压力变化 ΔP 成线性关系, 与理论分析计算结果相符合, 证明了压升法测液态工质漏率的可行性; 最后提出了微量采样系统进行比对测量液态工质漏率的压升试验方法及计算公式。研究结果表明, 压升法可有效地测量液态工质漏率, 为液体的流动试验研究提供参考依据。

关键词: 静态压升法; 液态工质; 漏率; 理论分析; 试验研究

中图分类号: TB774; TN107

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2011)05-0467-04

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2011.05.013

0 引言

通常情况下, 处理液态工质的流动均采用层流下Hagen-Poiseuille方程来描述其漏率^[1], 进行理论分析及研究。但在实际工程应用中, 常遇到微小尺度的流动或泄漏, 因漏量小以及液态工质的粘性及表面张力等作用, 难以有效地测量液态工质漏率。目前有研究采用显微镜观测毛细管内液柱端面位移的方法来定量分析液态工质漏率^[2], 但是液面的蒸发等因素影响其测量精度^[3], 而且无法测量很小的泄漏量; 同时, 该方法的出口压力为大气状态, 并不适用于在真空环境下工作的密封管路的实际工质漏率的测量。考虑液体在真空状态下因压力低于其饱和蒸气压而会发生气化, 成为气相态, 造成真空度变低, 压力升高, 根据这一原理测量其压力的变化量即可得到液体漏率。这种方法既可以避免显微镜观测法的不足, 也适用于真空环境下运行的产品的检漏。本文利用所研制的微量注射器和特殊工装将定量的液体直接注入真空室内, 观测真空室内的压力变化, 从而考察液体漏入真空室内迅速气化的程度, 分析其气化量, 并验证液体漏率采用压升法测量的合理性与准确性。

1 理论分析与计算

当液体在室温的压力低于其饱和蒸气压时, 就

将汽化或闪蒸^[4], 使密封容器内压力升高。假设液体的压力低于其饱和蒸气压, 且全部气化, 按照理想气体状态方程^[5]

$$PV = \frac{M}{u}RT, \quad (1)$$

可以计算定量液体注入到真空室内而产生的压力增量。式(1)中: P 为气体压力, Pa; V 为气体体积, m^3 ; R 为摩尔气体常数, $R=8.314 J/(mol \cdot K)$; T 为绝对温度, K; u 为该种气体相对分子质量, kg; M 为该种工质质量, kg。

从公式(1)可以得到压力增量(Pa)的计算公式为

$$\Delta P = \frac{\rho v}{uV}RT, \quad (2)$$

式中: ρ 为液体密度, kg/m^3 ; V 为真空室内体积, m^3 ; v 为注入液体体积, m^3 。

以全氟三乙胺和乙二醇水溶液为主要研究对象, 真空室容积为 5.36 L, 温度为 297 K。在此条件下对几种液态工质蒸发产生的压力进行分析计算。

1) 全氟三乙胺的相对分子质量为 371, 密度为 1.736 g/mL, 液体注入量为 1 μ L, 完全挥发状态下造成的真空容器压力升高值由公式(2)可计算得到:

收稿日期: 2011-01-25; 修回日期: 2011-09-23

作者简介: 孙伟(1984—), 男, 硕士学位, 研究方向为航天器总装检漏技术。E-mail: sunwei84@163.com。闫荣鑫(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 中国真空学会质谱与检漏委员会主任委员。

$$\Delta P = \frac{1.736 \times 0.001}{371 \times 5.36 \times 10^{-3}} \times 8.31 \times 297 = 2.15 \text{ Pa} \quad (3)$$

2) 乙二醇的相对分子质量为 62, 密度为 1.11336 g/mL, 液体注入量为 1 μL, 完全挥发状态下造成的真空容器压力升高值由公式(2)可以计算得到:

$$\Delta P = \frac{1.11336 \times 0.001}{62 \times 5.36 \times 10^{-3}} \times 8.31 \times 297 = 8.27 \text{ Pa} \quad (4)$$

3) 水的相对分子质量为 18, 密度为 1 g/mL, 液体注入量为 1 μL, 完全挥发状态下造成的真空容器压力升高值由公式(2)可以计算得到:

$$\Delta P = \frac{1 \times 0.001}{18 \times 5.36 \times 10^{-3}} \times 8.31 \times 297 = 25.6 \text{ Pa} \quad (5)$$

4) 实际使用的乙二醇水溶液为 35% 的水和 65% 的乙二醇, 根据上述纯乙二醇和水的计算结果, 可以得到注入 1 μL 的乙二醇水溶液, 将造成真空容器的压力升高 14.3 Pa。

上述计算得到的压力增量结果和查询出的液态工质的饱和蒸气压如表 1 所示。

表 1 液体全挥发压力增量 (注入量 1 μL)

Table 1 The pressure rise under full vaporization condition

液体种类	饱和蒸气压/kPa	压力增量/Pa
全氟三乙胺	14.82 ^[6]	2.15
纯乙二醇	10.67 × 10 ⁻³ ^[6]	8.27
水	2.34 ^[7]	25.6
乙二醇水溶液	1.41 ^[6]	14.3

2 试验原理及分析结果

2.1 试验原理

真空法测液态工质漏率可行性试验基本原理是根据液体在真空或低于其饱和蒸气压的环境下会迅速蒸发为气相状态, 通过静态压升法测量一定时间内真空容器内的压力变化即可得到相应工质的漏率值。该方法的可行性主要取决于液态工质的蒸发程度和压力变化量与泄漏量的关系。建立了微进样试验及液体漏率测量试验平台 (如图 1 所示), 根据静态压升法测量原理, 利用微进样器向真空室内注入一定体积的液态工质, 测量其压力变化量, 与理论分析结果相比较, 确定其蒸发程度, 分析压力变化量与泄漏量是否满足线性关系 (公式(2)), 从而验证真空法测液态工质漏率的可行性。

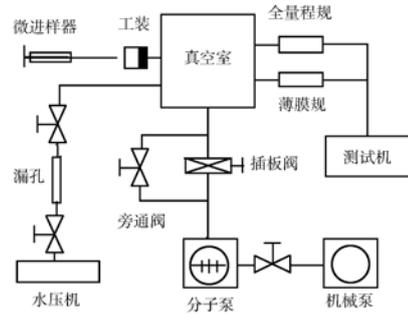


图 1 静态压升法测量漏孔液态工质漏率的原理

Fig. 1 Schematic diagram of leakage detection for standard leaks by static pressure rise method

2.2 试验过程及结果

试验以全氟三乙胺和乙二醇水溶液为研究对象, 将压升法试验装置的真空室抽至 4.0 × 10⁻⁵ Pa 以下, 使用量程为 1 μL 的微量进样器分别吸取 0.1 μL、0.2 μL、0.3 μL、0.4 μL、0.5 μL、0.7 μL、1.0 μL 的液体, 关闭插板阀, 将真空室与泵隔离开, 并通过微量进样转接口将试验液体注入到真空室内, 真空室内压力产生突变, 待压力趋于稳定后记录压力增量, 然后减去本底的压力增量, 即可得到该定量试验液体所引起真空室的压力增量。

试验分为 3 个阶段: 首先测量系统的本底压升速率, 测 3~5 次取平均值; 然后进行定量液体注入试验, 分别测试两种液体在不同微量注入情况下的压力变化。表 2 为测量本底压升试验结果。表 3 为分别注入 0.5 μL 和 1 μL 时两种液体的压力变化值。

表 2 压升法试验装置本底压升速率

Table 2 Background pressure rising rate of the pressure rise testing system 单位: Pa/s

试验测试次数			均值
第一次	第二次	第三次	
2.05 × 10 ⁻⁵	2.52 × 10 ⁻⁵	1.68 × 10 ⁻⁵	2.08 × 10 ⁻⁵

表 3 注入 0.5 μL、1 μL 两种液体的压升值

Table 3 The pressure rise data for two liquids by infusing volumes of 0.5 μL and 1 μL

工质	压升/Pa					扣除本底值 (t=120s) 后
	微进样量/μL	测试次数			均值	
		第一次	第二次	第三次		
全氟三乙胺	0.5	1.10	—	—	1.10	1.09
	1.0	2.29	2.12	2.17	2.19	2.18
乙二醇水溶液	0.5	8.90	9.50	—	9.20	9.19
	1.0	18.35	18.91	15.85	17.70	17.69

从表3中的数据可以看出, 微进样量为 $1\ \mu\text{L}$ 时的压升值与表1中的理论数值相近, 略大于其理论值。由于液态工质与大气相接触后其内部溶解了一些不可凝性气体, 在真空状态下, 液态工质蒸发的两种形式同时存在: 一种形式就是液体本身蒸发为气态, 称为蒸发空化; 另一种形式就是溶解在液体中的不可凝气体析出, 称为气化空化^[8-9]。其中不可凝性气体如空气等的析出会产生附加的压力升高量, 同时也由于试验测量时温度高于理论计算采用的 $297\ \text{K}$ 以及测量误差的存在,

所以产生的试验压升值略大于理论计算值, 两值相差较小, 可认为试验与理论相符合。在压升值低于液态工质饱和蒸气压时, 微量液体注入到真空室内会迅速且全部蒸发成为气态。并且 $0.5\ \mu\text{L}$ 所造成的压升值约为 $1.0\ \mu\text{L}$ 所造成的压升值的一半, 二者近似为线性关系, 与公式(2)相符合, 因此可通过注入不同液体量进行试验验证其注入量与压升值的线性关系。

表4为分别注入不同微量体积的乙二醇水溶液和全氟三乙胺造成的真空室压力变化的试验结果。

表4 不同注入量下两种液体造成的压升值

Table 4 Pressure rise data for different infusing volumes of two kinds of liquid

体积/ μL	注入液体压升反映值/Pa		扣除本底值 ($t=120\ \text{s}$) 后/Pa	
	全氟三乙胺	乙二醇水溶液	全氟三乙胺	乙二醇水溶液
0.1	0.27	—	0.268	—
0.2	0.45	3.97	0.448	3.96
0.3	0.68	—	0.678	—
0.4	0.86	—	0.857	—
0.5	1.10	8.50	1.097	8.49
0.7	1.40	—	1.397	—
1.0	2.16	16.20	2.157	16.19

根据表4中的测量值, 可以绘制出压升值随注入量的变化曲线, 如图2所示。从中可以清晰地看出, 液体注入量与定容的真空室内压升值成线性关系, 但其适用范围是真空室内压力要低于液态工质的饱和蒸气压。这就要求真空室必须有足够的体积

为注入液体全部闪蒸创造真空环境, 防止因真空室体积过小而导致其压力升高值超过液态工质的饱和蒸气压, 使液体只有部分蒸发造成测试不准确; 故此法不能用于测量经公式(2)算得压升值超过其饱和蒸气压的液体漏率值。

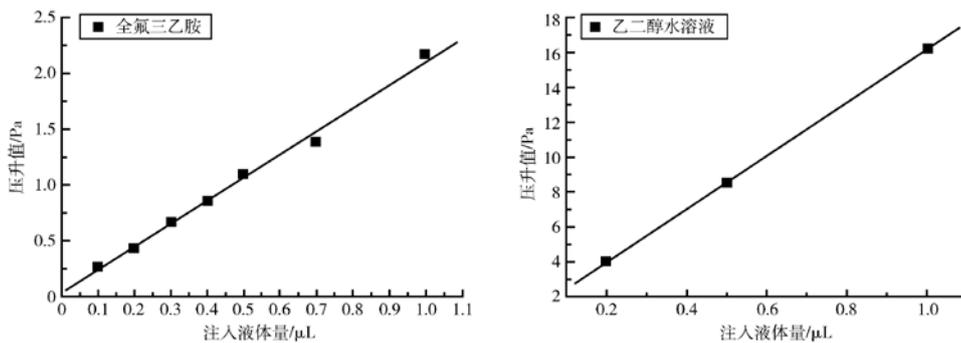


图2 压升值与液体注入量的关系曲线

Fig. 2 Increased pressure vs. infused liquid volume

2.3 分析与小结

根据上述分析, 得知微量液体注入引起的定容真空室压升的理论计算结果与试验结果符合较好, 存在的偏差主要是由于真空室本底压力变化, 溶液中的不可凝气体析出、微量液体的吸附、试验系统误差以及试验的实时温度与理论计算所取

温度间的差异等因素造成的。其中, 由于本底压力的变化与液体蒸发引起的压力变化相比小得多, 所引入的系统误差很小, 对试验结果影响不大, 可忽略不计; 而当微量液体注入到真空室时会存在吸附现象, 但因为其吸附量很微小, 可忽略不计。

综上所述,当真空室内压力远小于液体的饱和蒸气压时,注入的试验液体都能够全部挥发,不会有吸附或者未挥发的情况,并且液态工质体积泄漏量和压力升高值成线性关系,从而验证了压升法测量液体通过漏孔漏率的可行性及正确性。因此,可以利用如图1所示的试验平台,通过往真空室内注入定量的液体进行标样,对比得到测试时间内不同液体通过漏孔的泄漏量,通过公式(6)计算出测试液体通过漏孔泄漏入真空室的体积流量。

$$V_{\text{液}} = \frac{V_{\text{采液}}}{\Delta P_{\text{采}}} \times \frac{(\Delta P - \Delta P_0)}{t} \quad (6)$$

其中: $V_{\text{液}}$ 为测试液体体积漏率, $\mu\text{L/s}$; $V_{\text{采}}$ 为采样液体微量进样体积, μL ; $\Delta P_{\text{采}}$ 为采样液体进样引起的压力升高值, Pa ; $\Delta P_{\text{液}}$ 为测试液体引起的压力升高值, Pa ; ΔP_0 为测试系统的本底压力升高值, Pa ; t 为测试时间, s 。

3 结论

本文通过理论分析及试验研究验证了微量液体注入真空室内会迅速全部气化以及采用压升法测液体漏率的可行性及合理性,并且提出了利用微量采样系统进行比对测量的压升试验方法。通过定量微进样标定的方式,可以确认试验系统状态,提高测量准确度,方便工程应用,为后续开展的液态工质泄漏的相关研究提供有效的测量方法和依据。

参考文献 (References)

- [1] 陈卓如, 金朝铭, 王洪杰, 等. 工程流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 237-241
- [2] 孙尚武, 凌智勇, 杨继昌, 等. 两种液体在微圆管道内流动特性的试验研究[J]. 机械设计与制造, 2005, 7(7): 112-113
Sun Shangwu, Ling Zhiyong, Yang Jichang, et al. Experimental research on two kinds of liquid flow in microchannels[J]. Machinery Design & Manufacture, 2005, 7(7): 112-113
- [3] 李战华, 崔海航, 徐征, 等. 微米管道液体流量测量的几个问题[C]//第六届全国实验流体力学学术会议, 2004: 161-166
Li Zhanhua, Cui Haihang, Xu Zheng, et al. Some matters about testing liquid flow rate in the micro tube[C]//Proceedings of the 6th China National Conference on Experimental Fluid Mechanics, 2004: 161-166
- [4] 段欣悦, 厉彦忠. 低温流体节流过程空化现象的形成与发展规律[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(6): 554-555
Duan Xinyue, Li Yanzhong. Inception and growth of cavity in throttling flow for cryogenic fluid[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(6): 554-555
- [5] 达道安. 真空设计手册[M]. 3版. 北京: 国防工业出版社, 2004: 49-54
- [6] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册(有机卷)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 374-377; 595-600
- [7] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册(无机卷)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 17-18
- [8] Wylie E B. Simulation of vaporous and gaseous cavitation[J]. Journal of Fluids Engineering, 1984, 106(3): 307-311
- [9] Brian E, Paterson E. A scaling law for cavitation inception in circular jet flows[C]//Proceedings of the 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Summer Conference. San Diego, CA, United States, 2007: 347-357

Feasibility analysis of liquid leak rate testing with static pressure rise vacuum method

Sun Wei, Yan Rongxin, Han Yan, Shao Rongping

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: This paper studies the feasibility of testing liquid leak rate with the vacuum method. Based on the theoretical analysis of the saturated vaporization pressure, the constant-volume pressure increment is obtained. Then by using a micro infusing system and a vacuum method, i.e. the static pressure rise method, the liquid leak testing is carried out for $\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$ and $(\text{C}_2\text{F}_5)_3\text{N}$. The results show that there is a linear relationship between the leaking liquid volume V and the pressure increment ΔP , as in agreement with the theoretical calculation, which shows the feasibility of the vacuum method for testing liquid leak rate. The static pressure rise method with a micro infusing system for calibration is proposed and the calculation formula is obtained. It is shown that this method is effective for testing liquid leak rate, as a tool in the liquid flowing test study.

Key words: static pressure rise method; liquid medium; leak rate; theoretical analysis; experimental study