

不同压力下正压漏孔漏率研究

张建军, 张涤新, 赵 澜, 冯 焱
(兰州物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 在不同出口和入口压力下校准了1只正压漏孔, 给出了校准结果并进行了讨论, 按照黏滞流-分子流理论拟合校准曲线, 给出了不同压力下计算漏率的公式。

关键词: 正压漏孔; 黏滞流-分子流; 漏孔校准

中图分类号: TB774; TN107

文献标识码: A

文章编号: 1006-7086(2003) 01-0039-04

STUDY ON LEAKAGE OF PRESSURE LEAK WITH DIFFERENT PRESSURES

ZHANG Jian-jun, ZHANG Di-xin, ZHAO Lan, FENG Yan
(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: A pressure leak was calibrated with different inlet pressures and outlet pressures. The results are given and discussed. The equations to calculate leakages of different pressures are presented in accordance with the theory of viscous-molecular flow.

Key words: pressure leak; viscous-molecular flow; leak calibration

1 引 言

近年来, 正压漏孔越来越多地应用在航天领域, 特别是在卫星, 运载火箭, 飞船等大型产品的整体检漏中。对正压漏孔特点和性能的研究, 对于提高检漏的准确性和保证航天产品的可靠性都有重要意义。

正压漏孔是在给定温度和入口压力的条件下, 向大气端提供已知漏率的装置。一般情况下, 在 23 °C 温度条件下, 入口为 2 个标准大气压, 出口为 1 个标准大气压, 以某种特定气体为示漏气体对正压漏孔进行校准, 给出其漏率值。但是, 在实际的检漏工作中, 正压漏孔的出口压力易于保证, 但入口压力往往会有较大的变化和差异。在不同的入口压力条件下, 标准漏孔的漏率值也不相同, 需要进行修正。因此, 必须研究在一定压力范围内入口压力变化或者出口压力变化与正压漏孔漏率的关系, 可在压力条件变化的情况下, 仍能得到较为可靠的检漏结果。

常用的正压漏孔有金属毛细管型和金属压扁型 2 种。对于金属毛细管型正压漏孔, 用自带气瓶来提供入口压力, 减小了压力变化可能带来的影响; 而对于金属压扁型, 每次接入的入口压力都可能不同, 因而, 选用这种正压漏孔作为研究对象。① 出口压力(100 kPa)不变的情况下, 入口压力从 150 kPa 上升到 1 000 kPa; ② 入口压力(100 kPa)不变的情况下, 出口压力从 100 kPa 下降到 1 kPa, 在这 2 种情况下, 用 N₂ 和 He 2 种示漏气体对同 1 只金属压扁型正压漏孔进行了校准。根据校准结果, 给出了不同压力条件下漏率的变化曲线, 运用黏滞流-分子流理论对校准结果进行了修正。

2 校准装置^[1]

采用国防科工委真空计量一级站建成的“正压漏孔标准装置”对正压漏孔进行了校准, 校准范围为

收稿日期: 2003-01-06.

作者简介: 张建军(1975-), 男, 甘肃省庆阳市人, 硕士研究生, 从事真空计量学的研究工作。

$1 \times 10^{-1} \sim 5 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 由定容法校准系统和定量气体动态比较法校准系统两部分组成, 定容法的校准范围为 $1 \times 10^{-1} \sim 5 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 测量不确定度为 $2.6\% \sim 9.1\%$; 定量气体动态比较法的校准范围为 $2 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 测量不确定度小于 14.2% 。图 1 为正压漏孔校准装置原理简图。

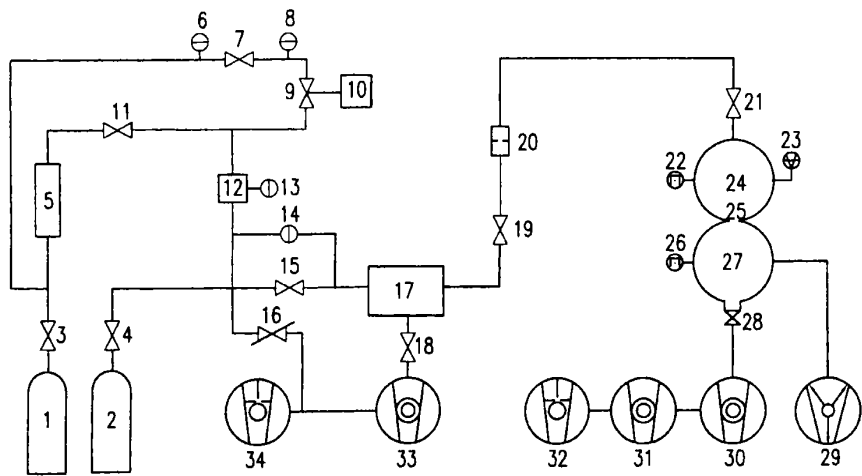


图 1 正压漏孔校准装置原理简图

1、2. 气瓶; 3、4、7、11、15、19、21. 截止阀; 5. 待校漏孔; 6、8、13. 绝对式电容规; 9. 三通阀; 10. 标准容积; 12. 定容室 I; 14. 差压式电容规; 16. 针阀; 17. 定容室 II; 18、28. 插板阀; 20. 小孔; 22、26. 冷阴极规; 23. 四级质谱计; 24. 质谱分析室; 25. 限流孔; 27. 抽气室; 29. 抽气室; 29. 溅射离子泵; 30、31、33. 分子泵; 32、34. 机械泵。

3 校准方法

选用的正压漏孔在 $1 \times 10^{-1} \sim 5 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 漏率范围内, 因而, 在正压漏孔校准装置中采用定容法进行校准。校准漏孔时, 把漏孔接入 5 位置, 由气瓶 1 提供入口压力, 在定容室 12 中充入出口压力, 开始校准, 气瓶 1 中的示漏气体通过正压漏孔被引入到定容室 12 中, 引起定容室压力变化, 在定容室容积不变的条件下, 通过测量定容室中的压力变化值和所用的时间, 可得到正压漏孔的漏率

$$Q = V \frac{\Delta p}{\Delta t} \tag{1}$$

式中 Q 为正压漏孔的漏率, $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$; V 为定容室的容积, m^3 ; Δp 为定容室中的压力变化值, Pa ; Δt 为定容室中的压力变化 Δp 所用的时间, s 。

调节气瓶 1 和定容室 12 中的气体压力, 改变入口压力和出口压力, 在不同条件下对正压漏孔进行校准, 可得到在不同压力条件下正压漏孔的漏率值。

4 实验结果与分析

4.1 对 N_2 的漏率

用 N_2 作为示漏气体, 在 2 种条件下进行了实验: ① 在出口压力为 100 kPa , 入口压力从 $1.05 \times 10^2 \text{ kPa}$ 上升到 $1.00 \times 10^3 \text{ kPa}$; ② 入口压力为 $1.00 \times 10^2 \text{ kPa}$, 出口压力从 $9.00 \times 10^1 \text{ kPa}$ 下降到 1.00 kPa 。表 1 为示漏气体为 N_2 时不同压力下的正压漏孔漏率值。

对于金属压扁型正压漏孔, 气体在漏孔中的流动状态非常复杂, 漏率也很难进行定量计算。实验结果表明, 随着正压漏孔出口压力和入口压力之间压力差的增大, 漏率值有明显变化, 但并不是简单的线性关系, 气体在通道中的流动状态是变化的, 这与黏滞流-分子流的有关理论相一致, 可以用此理论拟合校准曲线。

压扁型漏孔的通道形状很难确定, 可以按照圆截面长管来进行研究, 相关的流量理论^[2]计算如下。

在黏滞流状态下, 圆截面长管漏率公式为

表 1 不同压力下对 N₂ 的漏率值

入口压力/kPa	出口压力/kPa	漏率/Pa·m ³ ·s ⁻¹	入口压力/kPa	出口压力/kPa	漏率/Pa·m ³ ·s ⁻¹
1.00×10 ³	9.95×10 ¹	1.58×10 ⁻²	1.10×10 ²	1.00×10 ²	4.55×10 ⁻⁵
9.01×10 ²	9.92×10 ¹	1.16×10 ⁻²	1.05×10 ²	1.00×10 ²	2.00×10 ⁻⁵
8.01×10 ²	9.95×10 ¹	9.81×10 ⁻³	1.00×10 ²	9.00×10 ¹	4.17×10 ⁻⁵
7.03×10 ²	1.00×10 ²	7.86×10 ⁻³	1.00×10 ²	7.98×10 ¹	8.40×10 ⁻⁵
6.03×10 ²	1.01×10 ²	5.96×10 ⁻³	1.00×10 ²	6.97×10 ¹	1.22×10 ⁻⁴
5.01×10 ²	1.00×10 ²	4.29×10 ⁻³	1.00×10 ²	5.98×10 ¹	1.56×10 ⁻⁴
3.99×10 ²	1.00×10 ²	2.79×10 ⁻³	1.00×10 ²	5.00×10 ¹	1.84×10 ⁻⁴
3.03×10 ²	1.00×10 ²	1.59×10 ⁻³	1.00×10 ²	4.01×10 ¹	2.09×10 ⁻⁴
2.00×10 ²	1.00×10 ²	6.44×10 ⁻⁴	1.00×10 ²	2.99×10 ¹	2.35×10 ⁻⁴
1.51×10 ²	1.00×10 ²	2.72×10 ⁻⁴	1.00×10 ²	1.98×10 ¹	2.53×10 ⁻⁴
1.41×10 ²	1.00×10 ²	2.07×10 ⁻⁴	1.00×10 ²	9.91	2.64×10 ⁻⁴
1.31×10 ²	1.00×10 ²	1.50×10 ⁻⁴	1.00×10 ²	1.00	2.70×10 ⁻⁴
1.21×10 ²	1.00×10 ²	9.56×10 ⁻⁵			

$$Q_v = C_{vy} \cdot (p_1 - p_2) = \frac{\eta^4}{128 \eta} \cdot \frac{1}{2} (p_1 + p_2) (p_1 - p_2) = K_v \cdot \frac{1}{128 \eta} \cdot \frac{1}{2} (p_1 + p_2) (p_1 - p_2) \tag{2}$$

式中 η 为内摩擦系数, N·s/m²; K_v 为与漏孔有关的因子; p_1 为漏孔的入口压力, Pa; p_2 为漏孔的出口压力, Pa。 η 对于不同的气体和不同温度有不同的值, 在 23℃ 时, 对于 N₂ 计算可得为 1.77×10⁻⁴ N·s/m², 对于 He 为 8.98×10⁻⁵ N·s/m²。 K_v 是与漏孔有关的因子, 可以通过实验确定。

在分子流状态下, 圆截面长管漏率公式为

$$Q_m = C_{my} \cdot (p_1 - p_2) = 3.81 \frac{T}{\mu} \frac{D^3}{L} (p_1 - p_2) = K_m 3.81 \frac{T}{\mu} (p_1 - p_2) \tag{3}$$

式中 T 为气体的绝对温度, K; μ 为气体的分子量; K_m 为与漏孔有关的因子; p_1 为漏孔的入口压力, Pa; p_2 为漏孔的出口压力, Pa。同样, K_m 是与漏孔有关的因子, 可以通过实验求得。

按照克努森理论, 在黏滞流-分子流状态下, 通过圆截面长管测得流量可以写成

$$Q = Q_v + bQ_m \tag{4}$$

式中 Q 为黏滞流-分子流下的流量, Pa·m³/s; Q_v 为黏滞流下的流量, Pa·m³/s; Q_m 则为分子流下的流量, Pa·m³/s; b 为与漏孔的几何形状和示漏气体有关的一个参数, 可以由实验确定。

对于 1 只正压漏孔来说, 假设在 1 000 kPa 往 900 kPa 流入时为黏滞流, 在 100 kPa 往小于 1 kPa 流入时为分子流, 再测量在其间的某一点, 由式 (2)、(3)、(4), 即可解得 K_v 、 K_m 和 b 的值。

对于这只正压漏孔, 按照以上理论求得 K_v 、 K_m 和 b 的值后, 再对于不同的出口压力、入口压力, 计算了漏孔的理论漏率。

图 2 是在出口压力一定的情况下, 不同入口压力时漏孔的实际漏率和通过以上方法计算的理论漏率的曲线。入口压力在 110~700 kPa 之间变动时, 实际漏率和理论漏率之间的偏差不大于 5%, 在入口压力很大和很小两种极限情况下, 理论漏率较实际漏率大, 其最大偏差达到 15%。

图 3 是入口压力一定时, 不同出口压力的理论漏率和实际漏率曲线。出口压力在 90 kPa~<1 kPa 之间变动时, 实际漏率和理论漏率的偏差不大于 5%。

4.2 对 He 的漏率

用 He 作为示漏气体, 在 2 种条件下进行了实验: ① 在出口压力为 100 kPa, 入口压力从 1.00×10³ kPa 下降到 1.06×10² kPa; ② 入口压力为 100 kPa, 出口压力从 9.020×10¹ kPa 下降到 0.316 kPa。表 2 为示漏气体为 He 时不同压力下的正压漏孔漏率值。

图 4 是出口压力一定时, 不同入口压力下的实际漏率和理论漏率的曲线。入口压力在 120~800 kPa 之间变动时, 实际漏率和理论漏率之间的偏差不大于 10%, 在入口压力很大和很小两种极限情况下, 理论漏率

较实际漏率大,其最大偏差达到 15%。

图 5 是入口压力一定的情况下,不同出口压力下时通过以上方法计算的理论漏率和实际漏率曲线。出口压力在 90 kPa~<1 kPa 之间变动时,实际漏率和理论漏率的偏差不大于 8%。

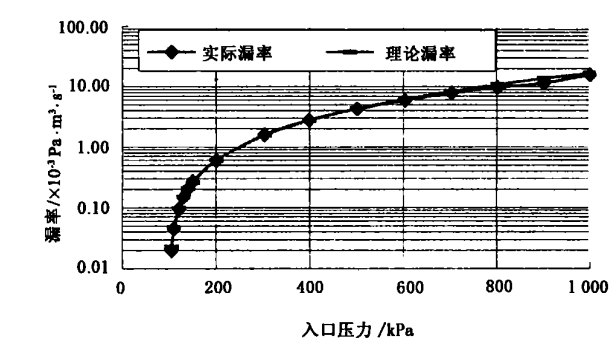


图 2 不同入口压力下漏孔对 N₂ 的实际漏率和理论漏率的曲线

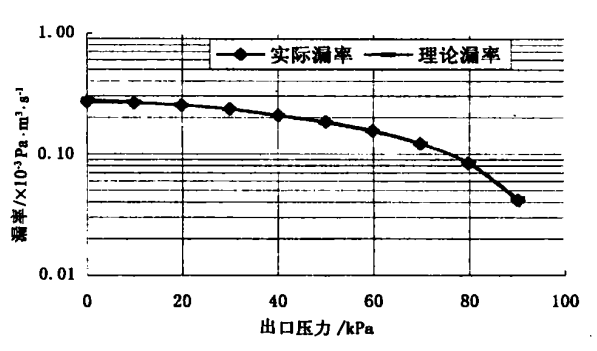


图 3 不同出口压力下漏孔对 N₂ 的实际漏率和理论漏率的曲线

表 2 不同压力下对 He 的漏率值

入口压力/kPa	出口压力/kPa	漏率/Pa·m ³ ·s ⁻¹	入口压力/kPa	出口压力/kPa	漏率/Pa·m ³ ·s ⁻¹
1.00×10 ³	1.00×10 ²	1.53×10 ⁻²	1.15×10 ²	1.00×10 ²	9.70×10 ⁻⁵
9.01×10 ²	1.00×10 ²	1.26×10 ⁻²	1.11×10 ²	1.00×10 ²	7.56×10 ⁻⁵
8.00×10 ²	1.00×10 ²	1.06×10 ⁻²	1.06×10 ²	1.00×10 ²	3.86×10 ⁻⁵
7.00×10 ²	1.00×10 ²	8.27×10 ⁻³	1.00×10 ²	9.02×10 ¹	5.62×10 ⁻⁵
6.01×10 ²	1.00×10 ²	6.33×10 ⁻³	1.00×10 ²	8.00×10 ¹	1.06×10 ⁻⁴
5.01×10 ²	1.00×10 ²	4.53×10 ⁻³	1.00×10 ²	7.00×10 ¹	1.65×10 ⁻⁴
4.01×10 ²	1.00×10 ²	3.03×10 ⁻³	1.00×10 ²	6.00×10 ¹	2.02×10 ⁻⁴
3.00×10 ²	1.00×10 ²	1.72×10 ⁻³	1.00×10 ²	5.00×10 ¹	2.42×10 ⁻⁴
2.01×10 ²	1.00×10 ²	7.32×10 ⁻⁴	1.00×10 ²	4.00×10 ¹	2.89×10 ⁻⁴
1.50×10 ²	1.00×10 ²	3.25×10 ⁻⁴	1.00×10 ²	3.00×10 ¹	3.14×10 ⁻⁴
1.40×10 ²	1.00×10 ²	2.53×10 ⁻⁴	1.00×10 ²	2.00×10 ¹	3.42×10 ⁻⁴
1.30×10 ²	1.00×10 ²	1.91×10 ⁻⁴	1.00×10 ²	9.690	3.69×10 ⁻⁴
1.20×10 ²	1.01×10 ²	1.34×10 ⁻⁴	1.00×10 ²	0.316	3.89×10 ⁻⁴

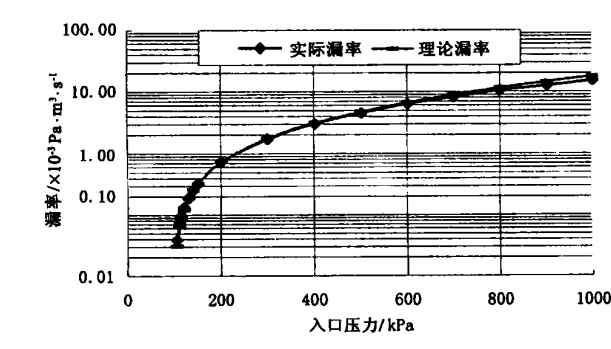


图 4 不同入口压力下漏孔对 He 的实际漏率和理论漏率的曲线

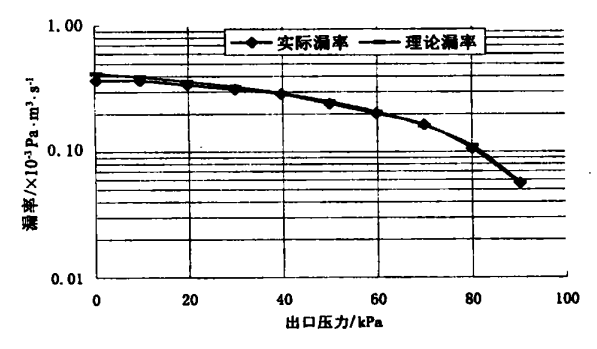


图 5 不同出口压力下漏孔对 He 的实际漏率和理论漏率的曲线

5 结 论

对于金属压扁型正压漏孔,出口压力和入口压力发生改变时,它的漏率会发生较大变化,在一定压力范
(下转第 49 页)

适的范围内,以减小高频下黏性损失。

参考文献:

- [1] LYN BOWNAN, JARIATH MCENTEE. Microminature stirling cycle cryocoolers and engines[P]. U.S. Patent 5 749 226, 1998-05-12.
- [2] CHIALUN TSAI, CEHN REH-LIN, CHEN CHUNG-LUNG, *et al.* Micromachined stack component for miniature thermoacoustic refrigerator[C]. IEEE2002(Hongkong). 149~151.
- [3] JAY A, ADEFF, THOMAS J, *et al.* Measurements with reticulated vitreous carbon stacks in thermoacoustic prime movers and refrigerators[J]. J Acoust Soc Am, 1998, 104(1): 32~38.
- [4] KEOLIAN, ROBERT M, SWIFT, G W. Pin stack array for thermoacoustic energy conversion[P]. U.S. Patent 5 456 082, 1995-10-10.

(上接第 42 页)

围内,可以通过黏滞流-分子流理论进行理论计算求得漏率值。对于不同漏孔和不同示漏气体, K_v 、 K_m 和 b 的值不同,但可以通过实验方法确定特定漏孔对特定气体的 K_v 、 K_m 和 b 的值,再用公式(4)计算不同压力下的漏率值。

参考文献:

- [1] 张涤新,李得天,张建军,等.正压漏孔校准装置[J].真空科学与技术, 2001, 21(1): 55~59.
- [2] 郭鸿震.真空系统设计与计算[M].北京:冶金工业出版社, 1986. 19~48.

(上接第 24 页)

一种可行的办法,由图 2 可以看出,提高储罐外壁的热交换,储罐内的温度可以整体得到提高。不论是采取在储罐中心增加换热管还是加强储罐外壁的热交换,提高吸附剂的导热系数是必要的,高的吸附剂导热系数可以使储罐内的各点更好地受益于来自换热管或储罐外壁的热交换。增大储罐内的初始压力虽然能减缓储罐内温度下降的速度,但是否合理,还需要进一步的论证。

参考文献:

- [1] MacDonald, J A F, QUINN D F. Carbon adsorbents for natural gas storage[J]. Fuel, 1998, 77(1-2): 61~64.
- [2] BARBOSA MOTA J P, RODRIGUES A E. Dynamics of natural gas adsorption storage systems employing activated carbon[J]. Carbon, 1997, 35(9): 1 259~1 270.
- [3] CHANG K J. Orhan Talu Behavior and performance of adsorptive natural gas storage cylinders during discharge[J]. Applied Thermal Engineering, 1996, 16(5): 359~374.
- [4] MOTA J P B, RODRIGUES A E, TONDEUR D. A simulation model of a high-capacity methane adsorptive storage system[J]. Adsorption, 1995, 1(1): 17~27.
- [5] MOTA J P B, RODRIGUES A E, SAATDJIAN E, *et al.* Charge dynamics of a methane adsorption storage system: intraparticle diffusion effects. Adsorption[J]. 1997, 3(3): 117~125.
- [6] Malek LAMARI, ASDIN AOUI, PIERRE MALBRUNOT. Thermal effects in dynamic storage of hydrogen by adsorption[J]. AIChE Journal, 2000, 46(3).
- [7] 陈进富,陆绍信.吸附法储存天然气汽车燃料技术研究[J].天然气工业, 1999, 19(4): 81~84.
- [8] 傅国旗,周理.吸附天然气储罐放气过程的数学模拟[J].计算机与应用化学, 2001, 18(1).
- [9] 杨晓东.超临界温度甲烷吸附储存研究[D].上海:上海交通大学, 2001.