

流气式气体探测器气密性的测量

朱永生

(中国科学院高能物理研究所,北京)

摘 要

流气式气体探测器的气密性常用U形管压力计测量。本文给出了该方法测量探测器气体泄漏率的计算公式,讨论了气压、温度测量精度对泄漏率误差的影响。

一、原理和公式

粒子物理、核物理中常用的气体探测器一般采用流气方式工作。好的气密性是流气式探测器的基本要求之一,原因在于

- a) 探测器气密性差,空气渗漏导致工作气体成分变化,使探测器性能变坏、寿命缩短。
- b) 为保证长期工作中探测器性能基本不变,供气流量应取合理大的值,一般地流量正比于泄漏率。提高气密性可成倍节省气体用量,这对工作气体昂贵或大体积的探测器尤其重要。

气体探测器工作气体压力一般高出环境压力不多,其密封性能常用U形管压力计测量,如图1所示,U形管内灌注不易蒸发的液体如硅油。将探测器内气体压力升高到工作气压并将阀门关死,该时刻(t_0)探测器内气压为 $p_0 = p_s + h_0\rho$,其中 p_s 是环境压力, h_0 是U形管两边液柱高度差, ρ 为硅油密度。在 $t_1 \approx t_0$ 时测得探测器内气压 $p_1 = p_s + h_1\rho$,于是泄漏率可表示为

$$L = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{p_0 - p_1}{t_1 - t_0} = \frac{h_0 - h_1}{t_1 - t_0} \rho. \quad (1)$$

实际上(1)式只能用于 t_0 到 t_1 之间 p_s 和探测器内气体温度 T 可视为不变的情形。若要求探测器有较好的气密性,如每天 cm 水柱量级的泄漏率,测量时间需一天以上。这样 p_s 和 T 都有明显变化,(1)式不适用。

下面讨论适用的公式。设从阀门到U形管B端为止气体体积为 V ,气体的摩尔数为 n ,据实际气体方程有

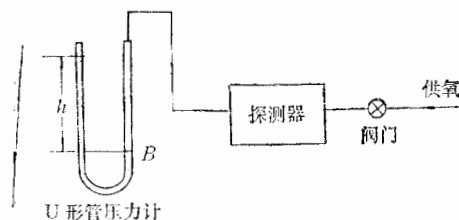


图1 流气式探测器气密性测量

$$\frac{pV}{zT} = nR, \quad (2)$$

R 为理想气体常数, z 为探测器内气体的压缩系数. 首先假定从阀门到U形管B端是无泄漏的密闭系统, 令 t_0 和 t_1 时刻的环境压力, 探测器内气体温度, U形管液柱差分别是 $(p_{s0}, p_{s1}), (T_0, T_1)$ 和 (h_0, h_1) , 由于(2)式右边是常数, 故

$$\frac{(p_{s1} + h_1\rho)V_1}{z_1T_1} = \frac{(p_{s0} + h_0\rho)V_0}{z_0T_0},$$

一般探测器容积比 $(h_1 - h_0)S$ 大得多 (S 是U形管内截面积), 故 $V_1 \cong V_0$, 即得

$$h_1 = \frac{z_1T_1}{z_0T_0} \left(\frac{p_{s0} + h_0\rho}{\rho} \right) - \frac{p_{s1}}{\rho}.$$

实际上探测器有泄漏, t_1 时刻测到的U形管液柱差 $h'_1 < h_1$, 泄漏导致的压力降 Δp 为

$$\Delta p = \rho(h_1 - h'_1) = \frac{z_1T_1}{z_0T_0} (p_{s0} + \rho h_0) - p_{s1} - \rho h'_1. \quad (3)$$

在常温常压且温度压力变化不大的情形下, 对绝大多数气体, $z_0 \cong z_1^{[1]}$, 上式可简化为

$$\Delta p = \frac{T_1}{T_0} (p_{s0} + \rho h_0) - p_{s1} - \rho h'_1. \quad (4)$$

利用 $L = \Delta p / \Delta t$ 立即算得平均泄漏率.

二、误差分析

T, p_s, h 的测量误差会对 Δp 产生影响. 若使用 DYM2 立槽水银压力计, 分度值为 $0.1\text{mbar} \cong 1\text{mm}$ 水柱, h 的读数误差 $\leq 1\text{mm}$. 由(4)式可知, p_{s0}, p_{s1} 两次测量读数误差导致 Δp 误差 $\leq 2\text{mm}$ 水柱, h_0, h_1 两次测量导致的误差 $\leq 2h\rho \cong 2.2\text{mm}$ 水柱 ($\rho = 1.10$). 至于温度 T 的影响, 假定 T_0, T_1 两次独立测量的误差同为 σ_T , 由(4)式可知

$$\sigma(\Delta p)_T = (p_{s0} + \rho h_0)\sigma(T_1/T_0) = (p_{s0} + \rho h_0) \frac{(T_1^2 + T_0^2)^{1/2}}{T_0^2} \sigma_T,$$

当 T_1, T_0 相差不大, 则有

$$\sigma(\Delta p)_T \cong (p_{s0} + \rho h_0) \frac{\sqrt{2}}{T_0} \sigma_T. \quad (5)$$

若温度计分度为 0.1°C , 在常温常压条件下, $T_0 \cong 293^\circ\text{K}$, $p_{s0} + \rho h_0 \cong 1\text{bar}$, $\sigma(\Delta p)_T \cong 5\text{mm}$ 水柱. 与 p_s, h 测量导致的误差相比, T 的测量误差是导致 Δp 误差的主要因素.

关于(3)式简化为(4)式导致的误差, 可作如下估计. 一般作气密试验时探测器内

表1 1bar 气压下空气的压缩系数 z

$T(^{\circ}\text{K})$	100	200	300	400	500
z	0.98090	0.99767	0.99970	1.00019	1.00034

充以空气, 压力 1 bar 时空气的压缩系数 κ 与温度 T 的关系数据列于表 1^[1]. 当 $p_{s0} + \rho h_0 \cong 1\text{bar}$, $T_0 = 7^\circ\text{C}$, $T_1 = 27^\circ\text{C}$ (差 20°C) 的条件下, (3) 式与 (4) 式算出的值差 2.2 mm 水柱, 与温度测量导致的 Δp 误差相比可以忽略.

三、测量数据和讨论

以北京谱仪 μ 计数器组件 1:1 模型的气密性测量为例, 讨论上述计算方法的应用. 测量数据列于表 2, 其中 Δp 用 (4) 式计算, Δp 随时间 t 的变化绘于图 2. 由图可见, 当以 $t = 0$ 时刻的环境压力 p_{s0} 作为零点, 探测器内气体的过压随着时间的增长呈缓慢下降趋势, 但是有上下的涨落. 其原因一是由于 h 、 p_s 、 T 的测量读数误差导致 Δp 有 ≤ 1

表 2 北京谱仪 μ 计数器组件 1:1 模型的气密性

t (h)	h (cm)	p_s (bar)	T ($^\circ\text{C}$)	T ($^\circ\text{K}$)	Δp (cm 水柱)
0	34.25	1.0226	15.55	288.71	0.00
16	21.00	1.0230	12.50	285.66	2.75
21	30.10	1.0194	14.40	287.56	3.52
27.5	31.90	1.0183	14.45	287.61	2.85
39.25	26.00	1.0173	12.55	285.71	3.25
42.75	32.80	1.0169	14.35	287.51	2.92
47	38.95	1.0131	15.15	288.31	3.02
52.75	36.25	1.0134	14.45	287.61	3.06
63.08	29.05	1.0144	12.70	285.86	3.42

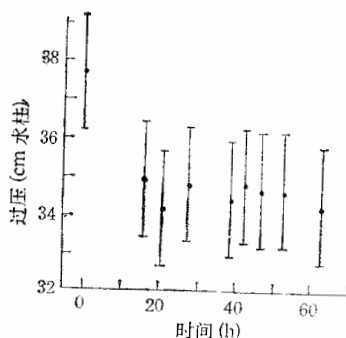


图 2 北京谱仪 μ 计数器组件 1:1 模型气密性测量数据

cm 水柱的误差(见第二节的讨论);其次 T_0 、 T_1 应是探测器内气体的温度, 实际只能测量探测器铝管壁的温度, 测量时避开阳光照射和热源, 环境温度变化很小且是慢变化, 铝又是热的良导体, 管壁与管内气体温度是平衡的. 环境温度微小的慢变化导致的 Δp 误差估计 $\sim 0.5\text{cm}$ 水柱. 这样每个测量点的总误差约 1.5cm 水柱.

由测量数据可知, 该探测器两天的泄漏导致压力下降仅为 $\leq 3\text{cm}$ 水柱. 非常保守地

说, 流气式探测器的供气流量大于泄漏率的一百倍肯定大大高于探测器能可靠正常工作的流量, 即使如此, 该探测器的用气量每星期亦只需更换一个探测器体积。

参 考 文 献

[1] American Institute of Physics Handbook, 3rd edition, Part 4, McGraw-Hill Book Company, New York, 1972.

THE MEASUREMENT OF GAS TIGHTNESS OF GAS DETECTOR WITH FLOW MODE

ZHU YONGSHENG

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing)

ABSTRACT

U-tube pressure gauge is often used to measure the gas tightness of gas detector with flow mode. The formula to calculate the gas leakage rate of detector by this method is given, the effects of measuring accuracies of pressure and temperature to leakage rate are discussed as well.