

【实验目的】

- ① 掌握低真空的获得和检测方法
- ② 掌握分析天平、福廷式气压计的正确使用方法。
- ③ 学会测量空气的密度。

【实验原理】（电学、光学画出原理图）

对于理想气体，其气体物态方程可表示为： $pV = \frac{m}{M}RT$

其中 p 是压强， V 是体积， T 是温度， R 为普适气体常量， M 为气体的摩尔质量。一般来说，空气在通常情况下（压强不太大、温度不太低）也基本满足上述物态方程。

实验中以空气作为实验气体，因为空气主要是氧气与氮气的混合物，氧约占 $\frac{1}{5}$ ，氮约占 $\frac{4}{5}$ ，氧的摩尔质量是 $32 \times 10^{-3} \text{ kg}$ ，氮的摩尔质量是 $28 \times 10^{-3} \text{ kg}$ ，由此可求出空气的摩尔质量 M_A 为 $28.98 \times 10^{-3} \text{ kg}$ 。当空气充满某一容器（被称气泡）时，则 p 和 T 可以认为就是当时的大气压强及室温，在实验中可从福廷式气压计及温度计上分别读出 p 和 T 。本实验的主要内容就是利用精密天平（电光分析天平）分别称出充满空气的玻璃泡的质量 m_1 ，及抽真空后玻璃泡的质量 m_0 。容器的容积（即空气的体积） V 由实验室给出，于是就知道在压强为 p 、温度为 T 时的空气密度：

$$\rho = \frac{m_1 - m_0}{V} = \frac{m}{V}$$

由于空气的密度与大气压强、温度和绝对湿度等因素有关，故因此而测得的是在当时实验条件下的空气密度值。如要把所测得的空气密度换算为干燥空气在标准状态下（压强 $p_0 = 1$ 大气压，温度 $T_0 = 273.15 \text{ K}$ ）的数值，则可采用下式算出：

$$\rho_{0F} = \rho \frac{p_0}{p} (1 + \alpha t) \left(1 + \frac{p_w}{p} \right)$$

式中 ρ_{0F} 为干燥空气在标准状态下的密度， ρ 为在当时实验条件下测得的空气密度； p_0 为标准大气压； p 为实验条件下的大气压强； α 为空气的压强系数（ $\frac{1}{273.15} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ）； t 为空气的温度（ $^\circ\text{C}$ ）； p_w 为空气中所含水蒸气的分压强（即绝对湿度值）， $p_w = \text{相对湿度} \times p_{w0}$ ， p_{w0} 为该温度下饱和水汽压强。

代入求普适气体常量为 $R = \frac{p_0 M_A}{T_0 \rho_{0F}}$ 。



【实验内容】（重点说明）

① 玻璃泡抽气

将待抽玻璃泡装在 $k_1 \sim k_3$ 的任意一个口上，并打开活塞，其他活塞全部关闭。启动机械泵对系统进行抽气，观察真空表示值，当指针稳定，系统已达到一定的真空度时，立即关闭玻璃泡活塞（同时抽多个玻璃泡时，待抽玻璃泡活塞要全部关闭），在切断机械泵电源前，为防止泵油倒灌需缓慢打开放气阀 k_4 ，慢慢地放气，使抽气管系统与大气相通，然后立即关闭机械真空泵，最后拔出玻璃泡。

② 计算普适气体常量

利用复称法在电子天平和光电分析天平上分别称出抽真空后的玻璃泡质量 m_0 ，然后玻璃泡上的活塞打开，让空气进入瓶内，静置数分钟，待泡内外空气状态相同后再分别称出装有空气的玻璃泡的质量 m_1 ，利用[实验原理]公式计算 R 值， P_0 值，求出相对误差。

【实验器材及注意事项】

① 实验器材：

- (1) 实验用玻璃泡
- (2) 做真空系统
- (3) 光电分析天平
- (4) 补偿式水银气压计
- (5) 干湿温度计

② 注意事项

- (1) 水银管内水银下降凸面不明显，可用手指在保护管上靠近水银面轻轻碰一下，使凸面有正常的形状。
- (2) 温度与重力加速度需要进行修正。



【数据处理与结果】

玻璃泡容积	室温	相对湿度	福廷式气压计气压值
$V=162.166\text{cm}^3$	$t=19.8^\circ\text{C}$	65%	$p'=1025.8\text{hPa}$

由上面数据对气压进行温度修正设测量时温度为 t , 气压计读数为 p' , 气压正确值为 p , 则温度变化时所引起的气压改变量为 $\Delta p = p' - p = p(\gamma - \beta)t$, 其中 γ, β 分别为水银和铜的膨胀系数, $\gamma = 1.82 \times 10^{-5}^\circ\text{C}^{-1}$, $\beta = 1.9 \times 10^{-5}^\circ\text{C}^{-1}$, 代入得 $p = \frac{p'}{1 + (\gamma - \beta)t} = p'(1 - 0.000163t/^\circ\text{C})$, 再加上重力加速度修正, 有 $p = p_g'(1 - 0.000163t/^\circ\text{C})$, 其中 $g_0 = 980.665\text{cm/s}^2$, $g = 9.793\text{m/s}^2$, 代入得 $p = 1021.1\text{hPa}$
查表得 $p_w = 65\% \times 2309.00 = 1500.85\text{Pa}$.

抽气时间/s	5	10	20	30	40	50
抽气后质量/g	86.5814	86.5785	86.5783	86.5781	86.5781	86.5781

经过多次测量, 以及画图可得, $t=50\text{s}$ 示数已稳定, 可认定已抽真空.
(见右图)

根据抽气时间 $t=50\text{s}$ 反复测量抽气前质量如下:

实验次数	1	2	3	4	5
m_0/g	86.7762	86.7760	86.7764	86.7760	86.7758
m_1/g	86.5784	86.5786	86.5786	86.5785	86.5782
$\Delta m = m_0 - m_1/\text{g}$	0.1978	0.1974	0.1978	0.1975	0.1976

$$\bar{\Delta m} = 0.1976\text{g}, \rho = \frac{\bar{\Delta m}}{V} = 1.219\text{kg/m}^3$$

$$u_{\Delta m A} = \sqrt{\frac{1}{5 \times 4} \sum_{i=1}^5 (\Delta m_i - \bar{\Delta m})^2} = 8.0523 \times 10^{-5}\text{g}$$

$$u_{\Delta m B} = \frac{0.0001\text{g}}{\sqrt{3}}$$

$$u_{\Delta m} = \sqrt{u_{\Delta m A}^2 + u_{\Delta m B}^2} = 9.9164 \times 10^{-5}\text{g}$$

$$\therefore u_\rho = \frac{u_{\Delta m}}{V} = 6.115 \times 10^{-4}\text{kg/m}^3$$

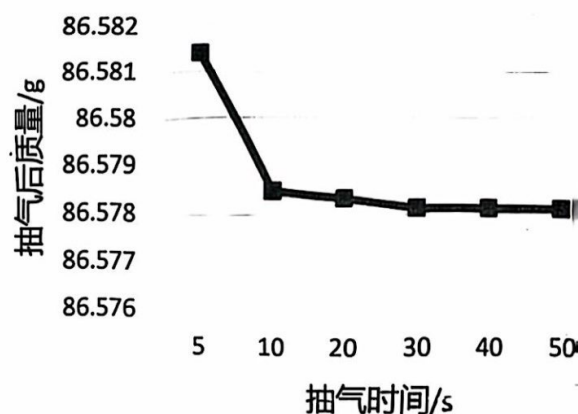
$$\therefore \rho = (1.219 \pm 6.115 \times 10^{-4})\text{kg/m}^3$$

$$\therefore \rho_{0T} = \rho \frac{p_0}{p} (1 + \alpha t) \left(1 + \frac{3}{8} \cdot \frac{p_w}{p}\right) = 1.304\text{kg/m}^3$$

$$R = \frac{p_0 M A}{T_0 \rho_{0T}} = 8.244\text{J/(mol}\cdot\text{K)}$$

$$\text{相对误差 } e = \frac{|8.244 - 8.314|}{8.314} \times 100\% = 0.84\%$$

抽气时间和抽气后质量函数



抽气时间/s

5

10

20

30

40

50



【误差分析】

本次实验的相对误差为0.84%，其主要来源如下：

- ①我们通过观察抽气时间与抽气后称量关系图认为 $t=50s$ 已为真空，但实际可能并非真空，且抽气泵也并非能将其抽至绝对真空，这为实验带来一定误差。
- ②分析天平、气压计、温度计读数均有可能带来误差。
- ③我们通过直接读取玻璃瓶标签测其容积，但实际可能因长期使用/保养不当而有所误差。
- ④在转移玻璃瓶时未完全将瓶内空气排净，手的温度对其实际温度有一定误差。

【实验心得及思考题】

①实验心得

本次实验我掌握了低真空的获得和控制方法，掌握了分析天平、福廷式气压计的正确使用方法，学会测量空气的密度，本次实验还是较为顺利的，实验误差也相对较小。

②思考题

(1) Q: 在测量已抽真空的玻璃泡称量的过程中若发现 m_0 的质量逐渐变大，这说明了什么问题？是否还需要继续测下去？为什么？

A: m_0 的质量逐渐变大说明瓶子漏气，有气体不断进入其中，此时不应继续测量，应更换瓶子重新进行实验。

(2) Q: 如何测量玻璃泡的容积？

A: 在已知某液体密度 ρ 的情况下，将液体灌满瓶子，测量前后质量差 Δm ，则有 $V = \frac{\Delta m}{\rho}$

(3) Q: 在称量玻璃泡的质量时，是否要考虑空气的浮力作用？

A: 不需要，因为我们需要的是抽气前后的质量差，而在玻璃泡容积不变的情况下，浮力前后被抵消。

(4) Q: 若抽真空后还剩130Pa压强的残留空气，将给空气密度的测量带来多大的误差？

A: $m_{\text{空气}}' = \frac{101325-130}{101325} m_{\text{空气}}$

$$\rho' = \frac{m_{\text{空气}}'}{V} = \frac{101195}{101325} \rho \Rightarrow e = \frac{\rho - \rho'}{\rho} = \frac{130}{101325} = 0.128\%$$

(5) Q: 有哪些因素会影响实验结果的准确性？

A: 1) 玻璃泡容积是否准确

2) 抽气是否完全

3) 分析天平、气压计、温度计等仪器灵敏度

4) 实验环境稳定性。



【数据记录及草表】

玻璃泡容积	室温	湿泡温度	相对湿度	福廷式气压计读出气压值
$V=162.166\text{cm}^3$	$t=19.8^\circ\text{C}$	$t' =$	65%	$p'=1025.8\text{hPa}$

$\mu=29\text{g/mol}$

实验次数	1	2	3	4	5
m_0	86.7762	86.7760	86.7764	86.7760	86.7758
m_1	86.5784	86.5786	86.5786	86.5785	86.5782

	10s	20s	30s	40s	50s
t					
m_0	86.7791	86.77902	86.7792	86.7794	86.7793
m_1	86.57845	86.5783	86.5784	86.5781	86.5781

教师签字:



