

# 气体状态特性测量

## 实验指导书



机械与动力工程学院  
基础实验与创新实践教学中心

2025年

# 气体状态特性测量实验

研究热力过程和热力循环的能量关系时，必须确定工质各种热力参数的值。而研究实际气体的性质，寻求其各热力参数之间的关系，最重要的就是建立实际气体的状态方程。温度  $T$ 、压力  $p$ 、比体积  $v$  是工质最基本的热力参数，更是计算热力学能、焓、熵等其他无法直接测量的热力参数的基础。

## 一、实验目的

1. 理解理想气体状态方程的含义。
2. 通过实际气体压缩因子的计算，了解理想气体与实际气体的差别。
3. 掌握  $p$ 、 $V$ 、 $T$  等温膨胀法的基本原理和实验操作方法。
4. 测定氮气的  $p$ 、 $V$ 、 $T$  数据。

## 二、实验原理

理想气体的压力、体积和温度之间，是有一定的关联性的，即课程中学习的理想气体的状态方程。虽然实际气体课程中还没有学习，但是实际气体和理想气体具有相似的特征，即压力、温度、体积之间也具有一定的关联，与此同时，实际气体与理想气体间也会有一定的差异，反映在状态方程上，实际气体并不完全满足理想气体状态方程，实际气体与理想气体的偏离程度通常采用压缩因子来表示，即

$$Z = \frac{pV}{nRT} \quad (1)$$

式中： $p$  为气体压力， $T$  为气体温度， $n$  为气体的摩尔数， $R$  为摩尔气体常数。

理想气体的压缩因子恒等于 1，实际气体的压缩因子可以大于 1，也可以小于 1，其偏离理想气体的大小与气体种类、气体的温度和压力状态有关。所以，压缩因子也是一个状态参数。获得压缩因子后，可以通过压缩因子修正对应的理想气体状态方程获得实际气体状态方程。

本实验利用等温膨胀的方法，测量气体工质的压缩因子，然后利用气体压缩因子的定义计算得到气体密度，避免了测量容积的体积标定和气体质量的称量，实验的测量结果具有较高的精度。原理图如图 1 所示。

实验本体主要由 2 个容器构成，分别为主容器 A（容积为  $V_A$ ）和膨胀容器 B（容积为  $V_B$ ），容器间通过阀门连接，将整个装置置于恒温环境中以保证等温膨胀过程。

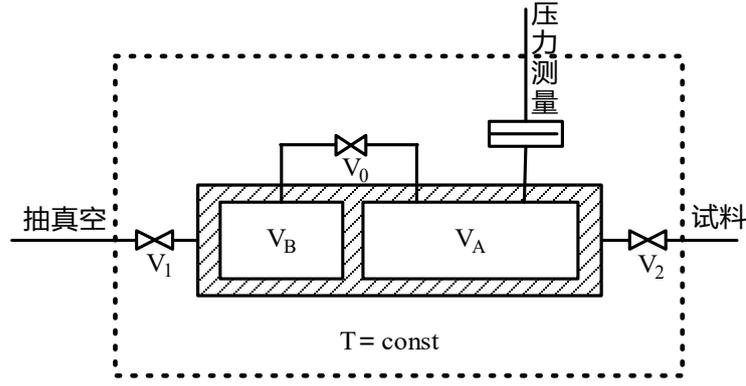


图 1 Burnett 法测量气相 PVT 性质原理图

首先向处于真空状态的主容器中充入一定量的待测气体工质。此时，膨胀容器处于真空状态。主容器内状态方程可以表示为：

$$p_0 V_A = n_0 Z_0 RT \quad (2)$$

打开膨胀阀，则气体将由主容器向膨胀容器流动，等到温度和压力再次平衡后，主容器中的气体压力记为  $p_1$ 。膨胀后主容器和膨胀容器内的压力相同，且两个容器内氮气的摩尔数与膨胀前主容器内的摩尔数相同。此时，两个容器内的状态方程可以表示为：

$$p_1 (V_A + V_B) = n_0 Z_1 RT \quad (3)$$

第二次膨胀前，主容器内充满气体工质，膨胀容器处于真空状态。主容器内状态方程可以表示为：

$$p_1 V_A = n_1 Z_1 RT \quad (4)$$

第二次膨胀后，两个容器内的状态方程可以表示为：

$$p_2 (V_A + V_B) = n_1 Z_2 RT \quad (5)$$

同理，第  $r$  次膨胀前，主容器内的状态方程为：

$$p_{r-1} V_A = n_{r-1} Z_{r-1} RT \quad (6)$$

第  $r$  次膨胀后，两容器内的状态方程为：

$$p_r (V_A + V_B) = n_{r-1} Z_r RT \quad (7)$$

由式 (6) 和式 (7) 可得：

$$\frac{p_{r-1}}{p_r} = \frac{V_A + V_B}{V_A} \frac{Z_{r-1}}{Z_r} \quad (8)$$

将两容器体积之和与主容器体积之比记为容积常数  $N$ ，即：

$$N = \frac{V_A + V_B}{V_A} \quad (9)$$

每次膨胀过程可以简化为：

$$\frac{p_{r-1}}{p_r} = N \frac{Z_{r-1}}{Z_r} \quad (10)$$

由式（10）易得：

$$\frac{p_0}{p_r} = N^r \frac{Z_0}{Z_r} \quad (11)$$

则第  $r$  次时的压缩因子可表示为：

$$Z_r = N^r \frac{Z_0}{p_0} p_r \quad (12)$$

记  $A = \frac{Z_0}{p_0}$  为充气常数。

因此，只要知道容积常数  $N$  和充气常数  $A$  就可以求得压缩因子  $Z_r$ 。再由式（1）即可得到气体比容和密度。

### 三、实验装置及测量系统

本实验装置主要由 PVT 测量装置本体、恒温槽 C、真空系统 E、待测样品 D 和计算机 F 等组成。如图 2 所示。PVT 测量装置本体由主容器 A、膨胀容器 B、铂电阻温度计 G、压力传感器及连接管线和阀门组成。在测试过程中，主容器 A 和膨胀容器 B 浸没在水浴中。测量装置本体外壳填充保温材料，前后装有视窗方便观察。实验中的温度由恒温槽提供水浴进行控制。

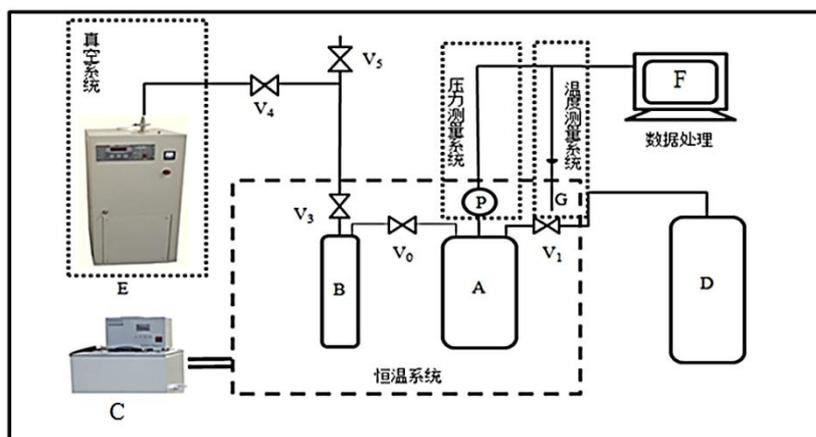


图 2 PVT 测量实验装置示意图

### 四、实验步骤

1. 连接实验设备，接通循环水浴，调节实验温度。
2. 关闭进样阀和排样阀 2，打开其余阀门，给整个装置（主容器  $V_A$ 、膨胀容器  $V_B$  以及管路）抽真空，使真空度达 10Pa 以下，保持至少 1min。关闭真空阀，打开进样阀，加入少量氮气对整个装置进行清洗，而后关闭进样阀，打开排样阀 2 将气体排入大气，然后关闭排样阀 2 再次给整个装置抽真空到 10Pa 以下，保持至少 1min，以上清洗过程可重复两到三次，随后关闭所有阀门。
3. 打开进样阀，建议氮气进样压力约 4MPa，随后关闭进样阀。

4. 打开 PVT Measurement 软件, 等到温度压力稳定后, 记录此时的温度  $T_0$  和压力值  $p_0$ 。

5. 打开膨胀阀进行膨胀, 等温度压力稳定之后, 膨胀过程结束, 记录此时的温度  $T_1$  和压力值  $p_1$ 。关闭膨胀阀, 打开排样阀 1、排样阀 2 将膨胀容器  $V_B$  中气体放出, 随后关闭排样阀 2, 打开真空阀对膨胀容器  $V_B$  抽真空, 使真空度达 10Pa 以下, 保持 1min, 随后关闭所有阀门。重复以上步骤, 依次测量  $p_2$ 、 $p_3$ ... $p_r$ , 一般重复 6 次或主容器内压力低于 300kPa 后, 结束本实验。

6. 记录实验数据。

**表 1 PVT 实验数据记录表**

膨胀次数 $r$	$T/K$	$p/kPa$
0		
1		
2		
3		
4		
5		
6		

## 五、实验注意事项

1. 实验前应进行预习, 在充分理解 PVT 测量原理后进行操作;
2. 操作阀门时应当用力平稳, 避免用力过猛损害阀门密封面或阀门手轮;
3. 工质排气应通过排气阀排出, 勿将工质直接排入真空机组;
4. 实验结束后, 将 PVT 装置内的水排空以避免生锈。

## 六、数据处理方法

在求解容积常数  $N$  时, 多采用文献中的经典表达式:

$$\frac{p_{r-1}}{p_r} = N + K(N-1)p_{r-1} \quad (13)$$

利用最小二乘法对实验测得的一系列压力值进行处理就可以得到  $N$  值。

对于充气常数  $A$ , 采用前面提到的压缩因子公式, 也就是公式 (1), 可以得到:

$$Z_r = \frac{p_r v}{R_g T} = 1 + Bp_r + Cp_r^2 + Dp_r^3 + \dots \quad (14)$$

将式 (14) 代入式 (12) 可得:

$$N^r \frac{Z_0}{p_0} p_r = 1 + Bp_r + Cp_r^2 + Dp_r^3 + \dots \quad (15)$$

式 (15) 可写为:

$$N^r p_r = \frac{1}{A} + B'p_r + C'p_r^2 + D'p_r^3 + \dots \quad (16)$$

利用最小二乘法对实验测得的一系列压力值进行处理就可以得到  $A$  值。再结合式 (12) 和式 (1) 就可以得到不同压力下的气体比容和密度。

## 七、数据处理与实验报告

1. 完成表 1, 并计算容积常数  $N$ 、充气常数  $A$ 、不同状态下的气体压缩因子  $Z$  和对应状态下的气体密度。

2. 完成思考题及实验小结。

- (1) 分析实验中有哪些因素会带来误差?
- (2) 压缩因子受什么参数的影响?

## 附、计算实例

1. 利用氮气进行实验获得容积常数  $N$ :

膨胀次数 $r$	$T/K$	$p/kPa$	$p_{r-1}/p_r$	$p_{r-1}$
0	313.131	3485.572		
1	313.131	2320.383	1.502	3485.572
2	313.130	1545.143	1.502	2320.383
3	313.132	1029.934	1.500	1545.143
4	313.136	687.103	1.499	1029.934
5	313.133	458.639	1.498	687.103
6	313.133	306.319	1.497	458.639

通过式 (13), 由  $p_{r-1}/p_r \sim p_{r-1}$  关系采用最小二乘法进行拟合得到纵坐标的截距即为  $N$  值, 计算得到为  $N=1.4970$ 。

2. 计算充气常数  $A$ :

膨胀次数 $r$	$T/K$	$p/kPa$	$p_r N^r$
0	313.131	3485.572	3485.572
1	313.131	2320.383	3473.613
2	313.130	1545.143	3462.679
3	313.132	1029.934	3455.213
4	313.136	687.103	3450.715
5	313.133	458.639	3448.101
6	313.133	306.319	3447.504

通过式 (16), 由  $p_r N^r \sim p_r$  关系采用最小二乘法进行拟合得到纵坐标的截距即为  $1/A$ , 计算得到  $A=0.000290$ 。

3. 根据式 (12) 和式 (1) 可计算得气体压缩因子和气体密度:

$T/K$	$p/kPa$	$Z$	$\rho/\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
313.131	3485.572	1.011757	1.323948	37.07055
313.131	2320.383	1.008285	0.884401	24.76322
313.130	1545.143	1.005111	0.590782	16.54190
313.132	1029.934	1.002944	0.394644	11.05003
313.136	687.103	1.001638	0.263623	7.381452
313.133	458.639	1.000880	0.176101	4.930830
313.133	306.319	1.000706	0.117636	3.293807