



# 第四章 气体动理论基础

<https://shuailiu1990.github.io/>



# 第四章 气体动理论基础

117系

教学内  
容

4.1 平衡态 温度 理想气体状态方程

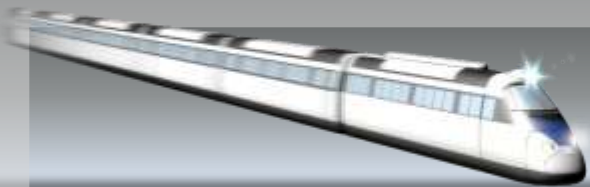
4.2 理想气体压强公式

4.3 温度的统计解释

4.4 能量均分定理 理想气体的内能

4.5 麦克斯韦速率分布律

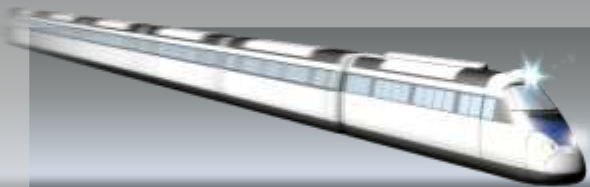
4.7 分子的平均碰撞频率和平均自由程



## 教学基本要求

一 了解气体分子热运动的图像。理解平衡态、平衡过程、理想气体等概念。

二 理解理想气体的压强公式和温度公式，能从宏观和微观两方面理解压强和温度的统计意义。



## 教学基本要求

三 了解自由度概念，理解能量均分定理，会计算理想气体的内能。

四 理解麦克斯韦速率分布律、速率分布函数和速率分布曲线的物理意义。会计算气体分子热运动的三种统计速度。

五 理解气体分子平均碰撞次数和平均自由程的概念和公式。



## 4.1 平衡态 温度 理想气体状态方程

### 4.1.1 平衡态

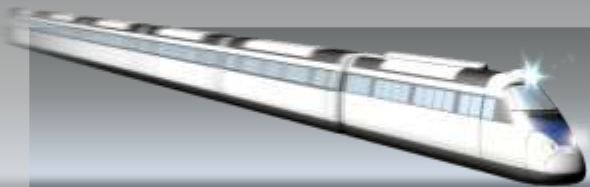
#### 1 热力学系统

由大量微观粒子（分子、原子等微观粒子）所组成的宏观物体或系统。

#### ★ 热力学系统分类

根据系统与外界交换能量或物质的特点，可以分为三种：

- (1) 孤立系统——与外界既无能量交换，又无物质交换的系统
- (2) 封闭系统——与外界只有能量交换，但无物质交换的系统
- (3) 开放系统——与外界既有能量交换，又有物质交换的系统



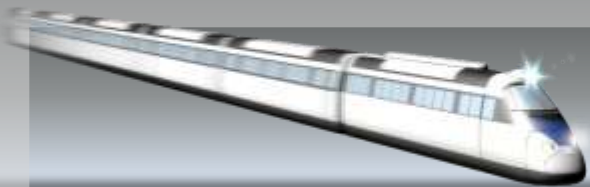
## 4.1.1 平衡态

### 2 平衡态

对于一个不受外界影响的系统，不论其初始状态如何，经过足够长的时间后，必将达到一个宏观性质不再随时间变化的稳定状态，这样的状态称为**热平衡态**，简称**平衡态**。

**系统处于平衡态，必须同时满足两个条件：**

- ✓ 系统与外界在宏观上无能量和物质的交换
- ✓ 系统的宏观性质不随时间变化



## 4.1.1 平衡态

### 3 气体的状态参量

1) 气体压强 $p$ : 作用于容器壁上单位面积的压力 (力学描述)

单位:  $1\text{Pa}=1\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$

标准大气压:  $45^\circ$ 纬度海平面,  $0^\circ\text{C}$ 时的大气压

$1\text{atm}=760\text{mmHg}=1.013 \times 10^5\text{Pa}$

2) 体积 $V$ : 气体所能达到的最大空间 (几何描述)

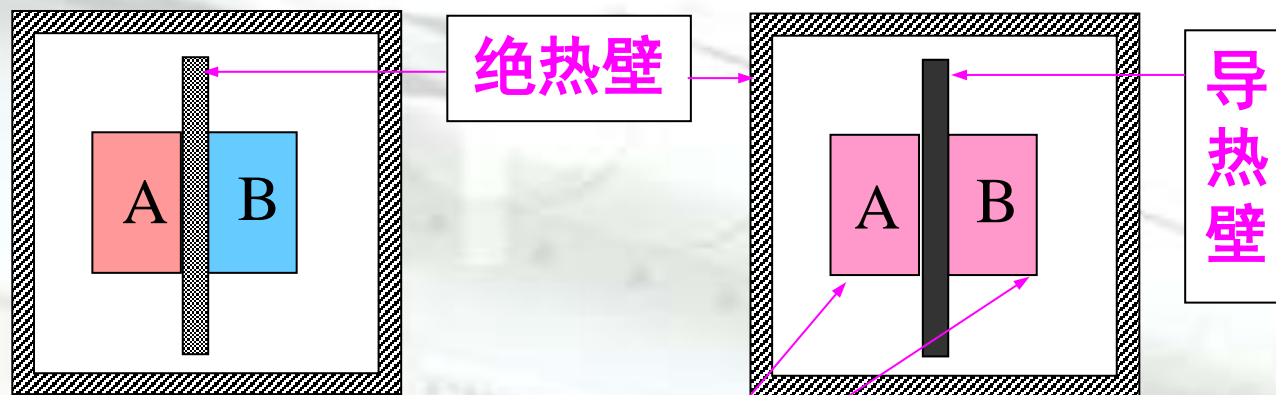
单位:  $1\text{m}^3=10^3\text{L}$

## 4.1.2 热力学第零定律 温度

### 1 温度概念

**温度 $T$** 是表征物体冷热程度的宏观状态参量。温度概念的建立以热力学第零定律为基础。

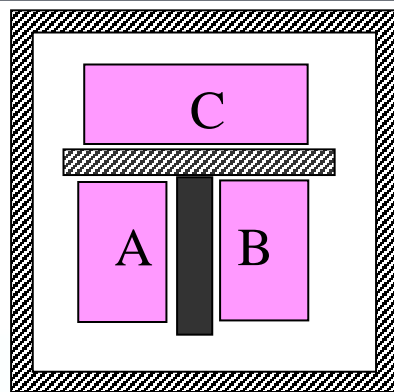
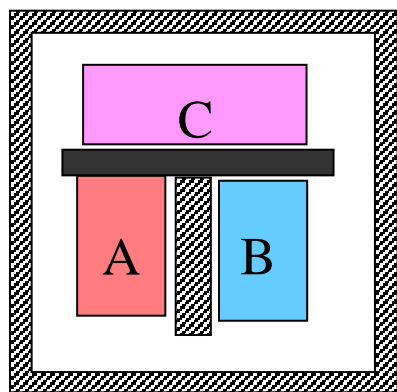
### 2 热力学第零定律



两系统彼此处于热平衡



## 4.1.2 热力学第零定律 温度



如果两个系统分别与第三个系统的同一平衡态达到热平衡，那么，这两个系统彼此也处于热平衡。这个结论称为**热力学第零定律**。

热力学第零定律说明，处于**相互热平衡状态**的系统必定拥有某一个**共同的宏观物理性质**。若两个系统的这一共同性质相同，当两个系统热接触时，系统之间不会有热传递，彼此处于热平衡状态；若两个系统的这一共同性质不相同，两个系统热接触时就会有热传递，彼此的热平衡状态会发生变化。决定系统热平衡的这一共同的宏观性质称为系统的**温度**。



## 4.1.2 热力学第零定律 温度

### 3 温度计 温标

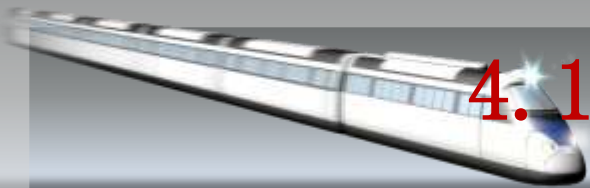
**温度计**：即测温的工具。温度计要能定量表示和测量温度，还需要建立**温标**，即温度的数值表示法。

#### 1) 摄氏温标

通常用酒精或水银作为测温物质，用液柱高度随温度的变化作为测温特性：纯水的冰点为0摄氏度，沸点为100℃，液柱高度随温度线性变化，0-100℃之间等分，每等分为1℃

#### 2) 热力学温标

一种与测温质和测温特性无关的温标。开尔文（lord Kelvin）在热力学第二定律的基础上建立了这种温标，称**热力学温标**。规定水的三相点（水，冰和水蒸汽平衡共存的状态）为**273.16K**。热力学温标可导出摄氏温标 $T = t + 273.15$



## 4.1.3 理想气体状态方程

### 1 理想气体

理想气体宏观**定义**：遵守三个实验定律的气体。由实验确定。在压强不太大（与大气压比较）和温度不太低（与室温比较）

### 2 理想气体的状态方程

**状态方程**：理想气体平衡态下各个状态参量之间的关系式

$$pV = \frac{M}{M_{mol}} RT$$

$M_{mol}$ ：气体的摩尔质量

$M$ ：气体的质量

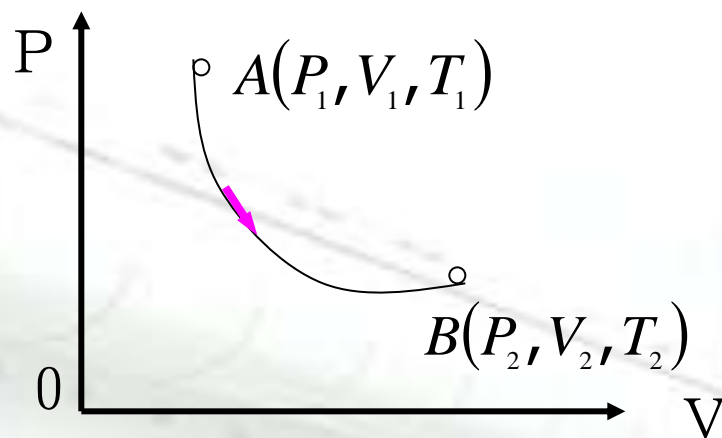
$R=8.31J/(mol \cdot K)$ ：普适气体常量

## 4.1.3 理想气体状态方程

### 3 状态图（ $P-V$ 图、 $P-T$ 图、 $V-T$ 图）

气体的平衡态除了可用一组状态参量来描述，还可利用状态图来表示，而一组状态参量在状态图中对应的是一个点。不同的状态在状态图中对应点不同。

在状态图中，一条光滑的曲线代表一个由无穷多个平衡态所组成的变化过程，如右图所示。曲线上的箭头表示过程进行的方向。



由于非平衡态不能用一组确切的状态参量来描述，因此在状态图中，非平衡态过程也就无法找到相应的过程曲线与之对应。



### 4.1.3 理想气体状态方程

**例4.1** 容器内装有质量为0.01kg的氧气，压强为 $10^6\text{Pa}$ ，温度为 $47^\circ\text{C}$ 。因为容器漏气，经过若干时间后，压强降到原来的 $5/8$ ，温度降到 $27^\circ\text{C}$ 。问（1）容器的容积有多大？（2）漏去了多少氧气？（假设氧气为理想气体）

解：（1）根据理想气体状态方程 $pV = \frac{M}{M_{\text{mol}}}RT$ ，求得容器的容积为

$$V = \frac{MRT}{M_{\text{mol}}p} = \frac{0.1 \times 8.31 \times (273 + 47)}{0.032 \times 10^6} = 8.31 \times 10^{-3} \text{m}^3$$





### 4.1.3 理想气体状态方程

(2) 设漏气若干时间后，压强减小到 $p'$ ，温度降到 $T'$ 。如果用 $M'$ 表示容器中剩余的氧气质量，从状态方程求得

$$M' = \frac{M_{mol} p' V}{RT'} = \frac{0.032 \times \frac{5}{8} \times 10^6 \times 8.31 \times 10^{-3}}{8.31 \times (273 + 27)} = 6.67 \times 10^{-2} kg$$

所以漏去的氧气质量为

$$\Delta M = M - M' = 3.33 \times 10^{-2} kg$$