

# 热机循环实验

(注：本次实验包括“热机循环”和“空气比热容比测量”两个实验内容)

## 一、实验目的：

1. 学习和掌握热机的工作原理及循环过程；
2. 研究热机的性质，学习热机效率的测量与计算方法；
3. 学习用振动法测量空气的比热容比。

## 二、实验仪器：

热机装置，计算机，Pasco Capstone 软件，850 通用接口，四通道温度传感器，双通道压力传感器，转动传感器，200g 砝码，3 个 10g 砝码与砝码挂钩。



图 1 热机实验装置

## 三、实验原理：

### 1. 热机循环实验

#### (1) 热力学基础

热力学理论是人们在研究和提高热机性能工作过程中发展起来的，**热机**是指各种利用工作物质（通常是一定量气体）吸热和放热来对外做功的机械装置，如蒸汽机、内燃机、汽轮机和喷气发动机等。一个热力学系统的状态在发生变化时，通常说这个系统在经历一个**过程**。在不受外界影响情况下，如果一个系统的宏观性质不随时间改变，称此系统处于**平衡态**。如果在过程中任意时刻，系统都无限的接近平衡态，因而任何时刻系统的状态都可以当作平衡态来处理，这样的过程被称为**准静态过程**。也可以说，准静态过程是由一系列依次衔接的平衡态所组成的过程。准静态过程可以用系统的**状态图**来表

示，如  $P$ - $V$  图、 $P$ - $T$  图或  $V$ - $T$  图中的某一条曲线。一个系统，如热机中的工作物质，在经历一系列变化后又回到初始状态的整个过程称为**循环过程**。如果在循环过程中，工作物质只和两个恒温热源交换热量，这种循环过程称为**卡诺循环**。

## (2) 理想气体状态方程：

$$PV = nRT \quad (1)$$

其中  $P$  为气体压强， $V$  为气体体积， $T$  为气体的热力学温度， $n$  为气体摩尔数， $R$  为普适气体常数。常温常压下空气可被视为理想气体。分别用下标  $i$  与  $f$  表示某热学过程的初态与末态，用  $\Delta V = V_f - V_i$  表示该过程中系统体积的增量，则由

$$\frac{P_i V_i}{T_i} = \frac{P_f V_f}{T_f} \quad (2)$$

可知，如果系统经历了等温过程，其初态体积可表示为

$$V_i = \frac{P_f}{P_i - P_f} \Delta V \quad (3)$$

同样，如果系统经历了等压过程，其末态体积可表示为

$$V_f = \frac{T_f}{T_f - T_i} \Delta V \quad (4)$$

可以用 (3) (4) 两式来计算循环过程中工作气体的体积。

## (3) 热力学第一定律：

改变一个热力学系统的状态可以通过做功或者传热。**热力学第一定律**指出，系统内能的增量等于系统从外界吸收的热量和系统对外做的功之差，即：

$$\Delta U = Q - W$$

其中  $Q$  为系统吸收的热量， $W$  为系统对外界做的功。通常规定： $Q > 0$  表示系统从外界吸热， $Q < 0$  表示系统向外界放热。 $W > 0$  表示系统对外做功， $W < 0$  表示外界对系统做功。内能  $U$  为系统的状态函数，理想气体的内能只与温度有关。系统经整数次工作循环后回到初始状态，则  $\Delta U = 0$ 。

系统吸收热量  $Q$  的数值与具体的热学过程有关：

**等温过程：**由于温度不变，则  $\Delta U = 0$ ，所以有  $Q = W$ 。

**等压过程：** $Q = nC_p \Delta T$ ，其中  $C_p$  为气体的定压摩尔热容。

空气主要由双原子分子组成，对于双原子分子  $C_p = \frac{7}{2}R$ 。若系统吸热， $Q$  为正值；若系统放热， $Q$  为负值。

系统对外界做的功  $W = \int_{V_i}^{V_f} P dV$ ，数值上等于系统  $P$ - $V$  图曲线下的面积。

$W$  的数值也与具体的热学过程有关：

对于等温过程： $W = \int_{V_i}^{V_f} P dV = \int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V} dV = nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$ 。

对于等压过程： $W = \int_{V_i}^{V_f} P dV = P(V_f - V_i)$ 。

若系统膨胀， $W$  为正值，若系统压缩， $W$  为负值。

## (4) 热力学第二定律：

**热力学第二定律**指出，热量不能自动地从低温物体传向高温物体，或者说，不能

从单一热源吸热，使之全部转化为功，而不引起其他变化。因此，未转化为功的热量需要向低温热源释放。

热机的效率可定义为：

$$e = \frac{W_{tot}}{Q_{in}}$$

其中 $W_{tot}$ 为一个工作循环中热机对外界所做的总功， $Q_{in}$ 为一个工作循环中热机吸收的总热量。理论上，工作在固定温度为 $T_H$ 的高温热源与固定温度为 $T_L$ 的低温热源之间的热机，其最大效率  $e_{max} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$ 。

本次热机循环实验利用热机实验装置构造了两个等温过程和两个等压过程，实现了如图 2 所示类似卡诺循环的工作循环过程。

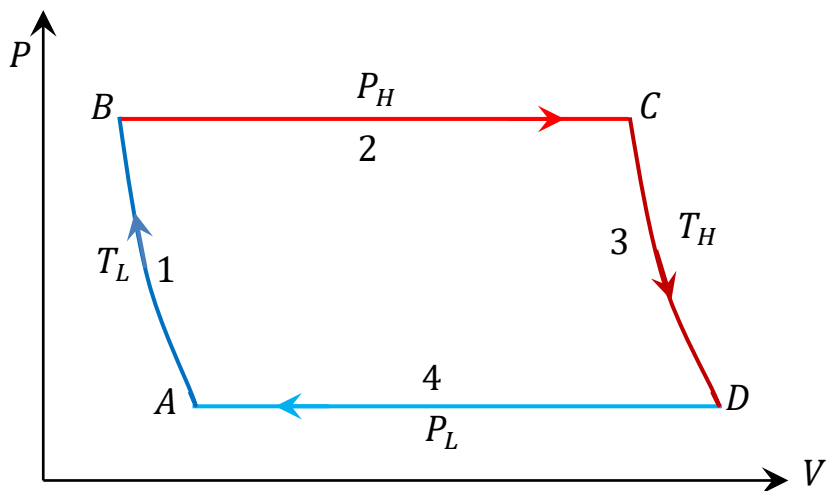


图 2 热机循环过程

实验中热机循环过程包括：

- 1) A→B，等温压缩：在固定温度  $T_L$  下，压强由 $P_L$ 增加到 $P_H$ ，在这个过程中系统做功及与外界交换的热量分别为：

$$W_1 = nRT_L \ln \frac{V_B}{V_A} = -P_L V_A \ln \frac{P_H}{P_L}$$

$$Q_1 = W_1 = -P_L V_A \ln \frac{P_H}{P_L}$$

$W_1$ 为负，表示外界对系统做功。 $Q_1$ 为负，表示系统放热。

- 2) B→C，等压膨胀：在固定压强 $P_H$ 下，温度由 $T_L$ 增加到 $T_H$ ，

$$W_2 = P_H(V_C - V_B)$$

$$Q_2 = nC_P(T_H - T_L) = \frac{7}{2}nR(T_H - T_L) = \frac{7}{2} \frac{P_L V_A}{T_L} (T_H - T_L)$$

$W_2$ 为正，表示系统对外界做功。 $Q_2$ 为正，表示系统吸热。

- 3) C→D，等温膨胀：在固定温度  $T_H$  下，压强由 $P_H$ 减少到 $P_L$ ，

$$W_3 = nRT_H \ln \frac{V_D}{V_C} = \frac{P_L V_A}{T_L} T_H \ln \frac{P_H}{P_L}$$

$$Q_3 = W_3 = \frac{P_L V_A}{T_L} T_H \ln \frac{P_H}{P_L}$$

$W_3$ 为正，表示系统对外界做功。 $Q_3$ 为正，表示系统吸热。

4) D→A, 等压压缩: 在固定压强 $P_L$ 下, 温度由 $T_H$ 减少到 $T_L$ 。

$$W_4 = P_L(V_A - V_D)$$

$$Q_4 = nC_P(T_L - T_H) = -\frac{7}{2} \frac{P_L V_A}{T_L} (T_H - T_L)$$

$W_4$ 为负, 表示外界对系统做功。 $Q_4$ 为负, 表示系统放热。

循环过程总做功:  $W_{tot} = W_1 + W_2 + W_3 + W_4$  = 循环在  $P$ - $V$  图中所围成的面积,

循环过程总吸热:  $Q_{in} = Q_2 + Q_3$ ,

热机效率:  $e = \frac{W_{tot}}{Q_{in}}$ 。

## 2. 测量空气的比热容比

摩尔热容:  $C = dQ/dt$ , (1 摩尔物质)

比热容:  $c = dQ/dt$ , (1kg 物质)

定压摩尔热容:  $C_P = \frac{7}{2}R$ , (空气, 双原子分子)

定容摩尔热容:  $C_V = \frac{5}{2}R$ , (空气, 双原子分子)

比热容比:  $\gamma = C_P/C_V = 1.4$ , (空气)

如图 3 所示, 玻璃气缸内用一个活塞封闭有一定量的空气, 按压活塞, 然后释放, 封闭气体将会像弹簧一样使得活塞上下往复振动。按照拉其哈德法, 在绝热的情况下, 活塞运动使得圆桶内的气体被压缩和膨胀, 活塞会振荡着回到平衡位置, 内部封闭气体的比热容比 $\gamma$ 可以通过活塞振荡的周期来间接测量。



图 3 比热容比测量装置

如果质量为 $m$ , 面积为 $A$ 的活塞在平衡位置以下 $x$ 处, 那么活塞会受到一回弹力

$$F = -kx$$

使活塞回到平衡位置, 其中 $k$ 为空气弹性系数。在回到平衡位置后, 活塞会在平衡位置附近振动一小段时间, 其振动周期为

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

假设活塞的振动时间很短, 则振动过程可认为是绝热的。因此, 系统中空气的压强 $P$ 与体积 $V$ 满足  $PV^\gamma = \text{常数}$ , 其中 $\gamma$ 为空气的比热容比。空气主要由双原子分子构成, 故

$$\gamma = \frac{7}{5} = 1.4$$

两边微分  $PV^\gamma = \text{常数}$ , 并由  $dV = xA$ , 可得

$$dP = -\frac{\gamma P x A}{V}$$

再结合  $F = -kx = AdP$ , 可得

$$k = \frac{\gamma A^2 P}{V}$$

最后再结合  $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ , 可得

$$V = \frac{\gamma A^2 P T^2}{4\pi^2 m}$$

从玻璃气缸的几何结构上看, 圆筒气缸中封闭空气的体积  $V = A(h + h_0)$ , 其中  $h$  代表从气缸下方零刻线到活塞底部的气缸高度,  $h_0$  代表气缸零刻线以下的未知等效高度。结合以上两个体积  $V$  的公式可得

$$h = \left( \frac{\gamma A P}{4\pi^2 m} \right) T^2 - h_0$$

可见  $h$  与  $T^2$  是线性关系。因此, 如果测得了  $h - T^2$  直线的斜率  $K$ , 则空气的比热容比

$$\gamma = \frac{4\pi^2 m}{A P} K$$

## 四、实验步骤:

### 1. 热机循环实验

- 1) 运行计算机桌面上 Pasco Capstone 软件, 打开传感器接口盒电源。
- 2) 建立  $P$ - $x$  坐标图, 纵轴设为压强  $P$  (单位: kPa), 横轴设为位置  $x$  (单位: cm)。
- 3) 建立冷水与热水两个温度标签 (单位: K)。
- 4) 开放连接管道, 将活塞提升至 2 至 3cm, 关闭连接管道。
- 5) 先将铝筒气缸浸入冷水中半分钟, 然后点击记录按钮, 快速连续地完成下列步骤:

A→B: 将 200 克砝码放在与活塞相连的平台上;

B→C: 将铝筒气缸由冷水移到热水中;

C→D: 将 200 克砝码移开;

D→A: 将气罐由热水移到冷水中。

在  $P$ - $x$  坐标图上的平行四边形封闭之后, 点击停止按钮。

将以上步骤多练习几次, 直到在  $P$ - $x$  坐标图上画出比较完美的平行四边形。

注意每次开始前删除上一次的数据。

- 6) 保存最后一次比较完美的实验结果。该结果中应包含低温  $T_L$ , 高温  $T_H$ , 低压  $P_L$ , 高压  $P_H$ , 活塞的四个相对位置  $x_A \equiv 0, x_B, x_C, x_D$ 。  
记录活塞半径  $r$ 。

### 2. 测量空气的比热容比

- 1) 按实验仪器图将所用仪器安装好;
- 2) 运行计算机桌面上 Pasco Capstone 软件, 打开传感器接口盒电源;
- 3) 建立  $P$ - $t$  坐标图, 纵轴设为压强  $P$  (单位: kPa), 横轴设为时间  $t$  (单位: ms), 设置压强采样率为 1kHz;
- 4) 将铝筒气缸从橡胶塞上取下, 转动三通让玻璃气缸连接大气, 将活塞底部提升至刻线 1.0cm 处, 最后转动三通将玻璃气缸与大气隔绝;

- 5) 点击记录按钮,用手指轻轻下压与活塞相连的平台后放手,得到  $P-t$  坐标图上的振荡曲线,点击停止按钮。利用  $P-t$  坐标图上的振荡曲线求出活塞振动的周期  $T$ ;
- 6) 将活塞底部分别提升至 1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0cm 处时,重复步骤 5,得到这些高度处活塞振动的周期  $T$ ;
- 7) 记录活塞质量  $m$  与半径  $r$ 。

## 五、数据处理:

### 1. 热机循环实验

- 1) 对于等温过程  $A \rightarrow B$ , 初态体积  $V_{A1} = \frac{P_H}{P_L - P_H} \Delta V$ ,

对于等压过程  $D \rightarrow A$ , 末态体积  $V_{A2} = \frac{T_L}{T_L - T_H} \Delta V$ 。

其中,  $\Delta V = A \cdot \Delta x = \pi r^2 \cdot \Delta x$ ,  $\Delta x$  分别等于  $x_B - x_A$  和  $x_A - x_D$ 。

分别用以上两式计算气缸内初始体积  $V_A$ , 比较两个  $V_A$  值是否近似相等。

- 2) 计算  $W_{tot} =$  循环在  $P-V$  图中所围面积  $= \pi r^2 \times$  循环在  $P-x$  图中所围面积。
- 3) 计算  $Q_{in} = Q_2 + Q_3 = \frac{7}{2} \frac{P_L V_A}{T_L} (T_H - T_L) + \frac{P_L V_A}{T_L} T_H \ln \frac{P_H}{P_L}$ 。
- 4) 计算热机效率  $e = \frac{W_{tot}}{Q_{in}}$ , 将计算所得值与最大效率  $e_{max} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$  作比较。

### 2. 测量空气的比热容比

- 1) 计算  $h = 1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0\text{cm}$  高度时振动周期的平均值, 以及周期的平方  $\overline{T^2}$ 。
- 2) 以  $h$  为纵轴,  $T^2$  为横轴作图, 并将数据进行线性拟合, 计算拟合直线的斜率  $K$ 。
- 3) 计算  $\gamma = \frac{4\pi^2 m}{AP} K$ , 其中  $P$  近似为大气压强。

## 六、思考题:

1. 分析热循环四个过程, 说明为什么循环过程  $P-V$  图所围面积等于系统对外所做功?
2. 分析影响热机循环实验结果的可能误差因素?
3. 若用本实验的方法测量氦气的比热容比, 所得的  $h - T^2$  图斜率会比本实验中的  $h - T^2$  图斜率变大还是变小, 为什么?
4. 经过一次循环之后, 系统不能回到 A 点, 试分析其原因并提出改善方法。
5. 若冷水与热水的温差变小, 将对实验结果有何影响?

## 热机循环与空气比热容比的测量

热机循环

活塞半径  $r =$  \_\_\_\_\_ cm;

	第 1 次				第 2 次			
	$x_A(\text{cm})$	$x_B(\text{cm})$	$x_C(\text{cm})$	$x_D(\text{cm})$	$x_A(\text{cm})$	$x_B(\text{cm})$	$x_C(\text{cm})$	$x_D(\text{cm})$
	$P_H(\text{kPa})$	$P_L(\text{kPa})$	$T_H(\text{K})$	$T_L(\text{K})$	$P_H(\text{kPa})$	$P_L(\text{kPa})$	$T_H(\text{K})$	$T_L(\text{K})$
循环面积	(kPa.cm)(软件)				(kPa.cm)(软件)			
	(kPa.cm)(手算)				(kPa.cm)(手算)			
气体体积	$V_{A1}:$	(cm <sup>3</sup> )	$V_{A1}:$	(cm <sup>3</sup> )	$V_{A1}:$	(cm <sup>3</sup> )	$V_{A1}:$	(cm <sup>3</sup> )
	$\overline{V}_A:$	(cm <sup>3</sup> )			$\overline{V}_A:$	(cm <sup>3</sup> )		
$w_{tot}$	(J)				(J)			
$Q_{in}$	(J)				(J)			
$e$								
$e_{\max}$								

### 空气比热容比的测量

活塞半径  $r =$  \_\_\_\_\_ cm; 活塞质量  $m =$  \_\_\_\_\_ cm; 大气压强  $P = 101.3 \text{ kPa}$ ;

$h(\text{cm})$	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
$T(\text{ms})$						
$\bar{T}(\text{ms})$						
$\bar{T}^2(\text{ms}^2)$						
斜率 $K$						
$\gamma$						

直线拟合方程: \_\_\_\_\_

相关系数  $r =$  \_\_\_\_\_