

气体定压比热测定 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

2023年2月

单位物量的物体温度每升高1度所需的热量称为比热容，简称比热。不同热力过程比热值是不同的。热动力装置中工质的吸热和放热过程都是可以简化成容积不变或压力不变的过程，因此定容比热 c_v 和定压比热 c_p 最具有现实意义。与此同时，测量比热可以很好地理解热力学第一定律，这也是选择比热测量作为实验的一个重要原因。

对同一种气体， c_p 与 c_v 的比值为一常数，故只需确定其中一个便可。气体定压比热的测定是工程热力学的基本实验之一。实验中涉及温度、压力、热量（电功）、流量等基本量的测量；计算中用到比热及混合气体（湿空气）方面的知识。

实际上，气体的比热是随温度的升高而增大的，需通过实验确定比热与温度的关系。

一、实验目的

1. 深度理解热力学第一定律，进而掌握气体定压比热测定装置及其基本原理。
2. 熟悉本实验中的测温、测压、测热、测流量的方法。
3. 掌握由基本数据计算出比热值和求得比热公式的方法。
4. 分析本实验产生误差的原因及减小误差的可能途径。
5. 增加对气体热物性方面的感性认识，理论联系实际，培养同学分析问题和解决问题的能力。

二、实验装置及测量系统

1. 本实验装置由风机、流量计、比热仪本体、电功率调节及测量系统等四部分组成。如图1所示。

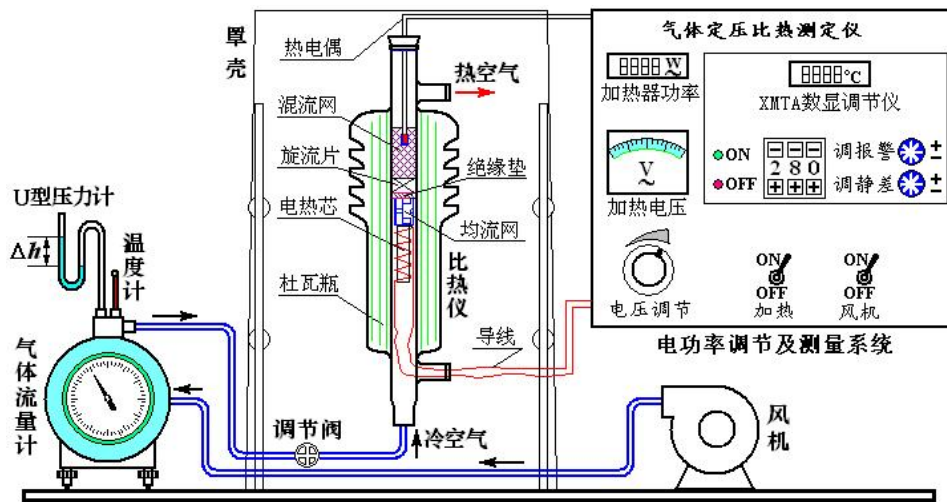


图1 气体定压比热测定实验装置示意图

2. 比热测定仪本体由内壁镀银的多层杜瓦瓶，空气进出、口，热空气出口测温热电偶，电加热器和均流网，绝缘垫，旋流片和混流网等组成。

3. 实验时，被测空气由风机经湿式气体流量计送入比热仪本体，经加热、均流、旋流、混流后流出。在此过程中，分别测定：气体经比热仪本体的进出口温度 (t_1, t_2)；气体的容积流量 (q_v)；电热器的输入功率 (P)；以及实验时相应的大气压 (p_b) 和流量计出口处的

表压 (Δh)。有了这些数据, 并查用相应的物性参数, 便可计算出被测气体的定压比热 (c_p)。

4. 气体的流量由调节阀控制, 气体出口温度由输入电热器的功率 (电压) 来调节。本比热仪可测240°C以下的定压比热。

三、实验原理

引用热力学第一定律第二解析式的微分形式:

$$dq = dh - vdp \quad (1)$$

定压时 $dp = 0$,

$$c_p = \left(\frac{dq}{dT} \right) = \left(\frac{dh - vdp}{dT} \right) = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (2)$$

式(2)直接由 c_p 的定义导出, 故适用于一切工质。

在没有对外界作功的气体的等压流动过程中:

$$dh = \frac{1}{q_m} dP \quad (3)$$

则气体的定压比热可以表示为:

$$c_p \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{P}{q_m (t_2 - t_1)} \quad [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (4)$$

式中, q_m ——气体的质量流量, kg/s;

P ——气体在等压流动过程中单位时间的吸热量, kW。

理想气体的比热是温度的单值函数, 该函数关系可表达为

$$c_p = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots$$

(5)

式中 a_0 、 a_1 、 a_2 等是与气体性质有关的常数。

实验表明, 在离开室温不很远的温度范围内, 空气的定压比热与温度的关系可近似认为是线性的, 即可近似表示为

$$c_p = a + bt \quad (6)$$

则温度由 t_1 升至 t_2 的过程中所需要的热量可表示为:

$$q = \int_{t_1}^{t_2} (a + bt) dt \quad (7)$$

由 t_1 加热到 t_2 的平均定压比热则可表示为:

$$c_p \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (a + bt) dt}{t_2 - t_1} = a + b \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (8)$$

四、实验步骤

1. 测量气体每流过6升, 即流量计指针转3圈所需的时间 τ_0 。

本实验建议分别设定4个加热电功率工况: 8W、20W、35 W、50 W。

2. 接通电源，确认电压调节旋钮在最小位置。

3. 将定压比热测试仪面板上的风机开关向上推（打开风机），调节节流阀，使气流量保持在预选值附近（流量计指针约11秒左右转一圈）。将加热开关拨向“ON”。

4. 顺时针转动电压调节旋钮，设定电加热功率初始值。比热仪出口温度便开始上升。在温升过程中，加热功率会有所变化（常是缓慢渐增），这并非异常。

5. 待出口温度稳定后（出口温度约在湿式流量计指针转3圈以后（40秒左右时间）无变化或有微小起伏即可视为稳定，若要精确测量稳定时间应更长些）。测量6升气体通过流量计（流量计指针转3圈）所需时间 τ ，比热仪进口温度 t_1 ，出口温度 t_2 ，流量计中气体表压（U型管压力表读数） Δh ，电热器的功率 P 。并将数据填入实验报告气体定压比热测定实验数据记录表中。

6. 依次测定其余各工况的相关数值并填入本实验报告中的实验数据记录表。实验中需要测定和计算气流温度、水蒸汽的质量流量 q_{mv} 、干空气的质量流量 q_{ma} 、干空气的吸热量 P_a 等数据。

7. 测试结束后，将电压调节旋钮调至最小位置，加热开关拨向“OFF”，勿关闭风机开关，保持对杜瓦瓶内部进行通风冷却。待比热仪出口温度与环境温度的差值小于 10°C 时可以关闭风机，结束实验。

8. 利用升温间隙记录以下数据：

实验日期：_____； 天气：_____； 室温 $t_b =$ _____ $^\circ\text{C}$ ；

当地大气压 $p_b =$ _____ Pa。

五、计算方法

1. 气流温度

气流在加热前的温度 t_1 由流量计出口处的温度计测取，加热后的温度 t_2 由比热仪出口处的测温热电偶测量，从数显温度计上读取。

2. 水蒸汽和干空气的质量流量

(1) 水蒸汽的质量流量 q_{mv}

本实验系统中，气流是穿过湿式流量计水箱后供入比热仪的。实验证明，进入比热仪的空气接近饱和空气。因此可以用比热仪进口温度 t_1 作为湿球温度 t_w 在饱和蒸汽表上查得气流中水蒸汽的分压力 p_v ，或用下式计算 p_v （ T_w 为湿球绝对温度， $T_w = t_w + 273.15$ ）：

$$p_v = 10^x \text{ (Pa)} \quad (9)$$

$$x = 12.501305 + 0.0024804T_w - 3142.305/T_w + 8.2 \times \lg(373.145/T_w)$$

设某实验工况测得流量计每通过 V (m^3) 气体（可以取6升，即流量计指针转3圈）所花的时间为 τ (s)，则水蒸汽的质量流量为：

$$q_{mv} = \frac{p_v(V/\tau)}{R_v T_1} \text{ (kg/s)} \quad (10)$$

式中, R_v ——水蒸汽的气体常数: $R_v=461.5[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$

T_1 ——流量计中湿空气的绝对温度(本实验装置中即为比热仪的进口温度), K。

(2) 干空气的质量流量 q_{ma}

气流中湿空气的绝对压力

$$p = 100p_b + 9.80665\Delta h \text{ (Pa)} \quad (11)$$

式中, p_b ——当地大气压, hPa;

Δh ——流量计上U型管压力表读数, mmH₂O柱。

气流中干空气的分压力

$$p_a = p - p_v \text{ (Pa)} \quad (12)$$

于是, 干空气的质量流量为

$$q_{ma} = \frac{p_a(V/\tau)}{R_a T_1} \text{ (kg/s)} \quad (13)$$

式中, R_a ——干空气的气体常数: $R_a=287.05[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$

T_1 ——流量计中湿空气的绝对温度, K。

3. 加热量的测定

电加热器单位时间的加热量(功率) P 可直接由瓦特表读出。

当湿空气气流由温度 t_1 加热到 t_2 时, 其中单位质量水蒸汽的吸热量可用式(7)计算, 对水蒸汽 $a = 1.833$, $b = 0.0003111$ 。故气流中水蒸汽的单位时间的吸热量(吸热功率)

$$\begin{aligned} P_v &= 1000q_{mv} \int_{t_1}^{t_2} (1.833 + 0.0003111t) dt \\ &= 1000q_{mv} \left[1.833(t_2 - t_1) + 0.0001556(t_2^2 - t_1^2) \right] \text{ (W)} \end{aligned} \quad (14)$$

式中, q_{mv} ——气流中水蒸汽质量流量, kg/s。

若忽略比热仪及导线的散热损失、不计加热器的热效率等, 干空气的吸热功率:

$$P_a = P - P_v \text{ (W)} \quad (15)$$

4. 空气的定压比热 c_p

根据比热的定义, 可直接导出干空气由 t_1 定压加热到 t_2 时的平均定压比热

$$c_p \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{P_a}{q_{ma}(t_2 - t_1)} = \frac{P - P_v}{q_{ma}(t_2 - t_1)} \text{ [J}/(\text{kg}\cdot\text{K})] \quad (16)$$

式中, P_a ——干空气单位时间的吸热量, W;

P_v ——水蒸汽单位时间的吸热量, W;

P ——湿空气单位时间的吸热量, W;

q_{ma} ——干空气的质量流量, kg/s。

实际上，输入比热仪中的热量不可避免地有一部分会散失于环境，散热量的大小主要决定于比热仪的温度状况。因此，精确测定比热值时应计及散热损失。若保持比热仪的进口温度 t_1 和出口温度 t_2 不变，当采用不同的质量流量和加热量进行重复测定时，其散热量变化是不大的。于是，可在测定结果中消除这项散热量的影响。设两次测定时干空气的质量流量分别为 q_{ma1} 和 q_{ma2} ，加热器的加热量分别为 P_1 和 P_2 ，散热量为 ΔP ，则达到稳定状况后可以得到如下的热平衡关系

$$P_1 = P_{a1} + P_{v1} + \Delta P = c_p Q_{ma1} (t_2 - t_1) + P_{v1} + \Delta P$$

$$P_2 = P_{a2} + P_{v2} + \Delta P = c_p Q_{ma2} (t_2 - t_1) + P_{v2} + \Delta P$$

两式相减消去 ΔP 项，得到

$$c_p \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{(P_1 - P_2) - (P_{v1} - P_{v2})}{(q_{ma1} - q_{ma2})(t_2 - t_1)} \text{ [J/(kg}\cdot\text{K)]} \quad (17)$$

六、实验注意事项

1. 实验前应进行预习，并估算各工况所需设定的加热电功率，并将估算值填入气体定压比热测定实验数据记录表中。
2. 切勿在无气流通情况下使电热器投入工作，以免引起局部过热而损害比热仪本体。
3. 输入电热器电压不得超过220V，气体出口温度最高不得超过240℃。
4. 加热和冷却要缓慢进行，防止比热仪本体及温度计因温度骤然变化和受热不均匀而破裂。
5. 停止实验时，应先将电压开关逆时针调到最小，切断加热电源，勿关闭风机开关，保持对杜瓦瓶内部进行通风冷却。待比热仪出口温度与环境温度的差值小于10℃时，再关闭风机。

附录1

气体定压比热测定实验报告



姓名 _____

学号 _____

班级 _____

任课教师 _____

实验指导教师 _____

实验日期 _____

一、 简述实验目的及原理

二、 实验数据记录及计算

天气情况：_____； 室温 $t_b =$ _____ $^{\circ}\text{C}$ ； 当地大气压 $p_b =$ _____ Pa。

气体定压比热测定实验数据记录表

工况	1	2	3	备用	备注
加热功率工况值 (W)	8	20	35	50	目标值
湿空气加热前温度 t_1 ($^{\circ}\text{C}$)					实测
气体表压 Δh (mmH ₂ O)					实测
6 升气体通过时间 τ (s)					实测
比热仪出口温度 t_2 ($^{\circ}\text{C}$)					实测
电加热器的功率 P (W)					实测
水蒸汽分压力 p_v (Pa)					查表或式(9)
水蒸汽质量流量 q_{mv} (kg/s)					式(10)
湿空气绝对压力 p (Pa)					式(11)
干空气质量流量 q_{ma} (kg/s)					式(13)
水蒸汽吸热功率 P_v (W)					式(14)
空气的定压比热 $c_p \Big _{t_1}^{t_2}$ [J/(kg·K)]					式(16)
$(t_1 + t_2)/2$ ($^{\circ}\text{C}$)					

三、主要计算公式

四、绘图

在图2上绘出平均比热与温度之间的关系曲线，并根据式(8)拟合出关系式 $c_p = a + bt$ 。

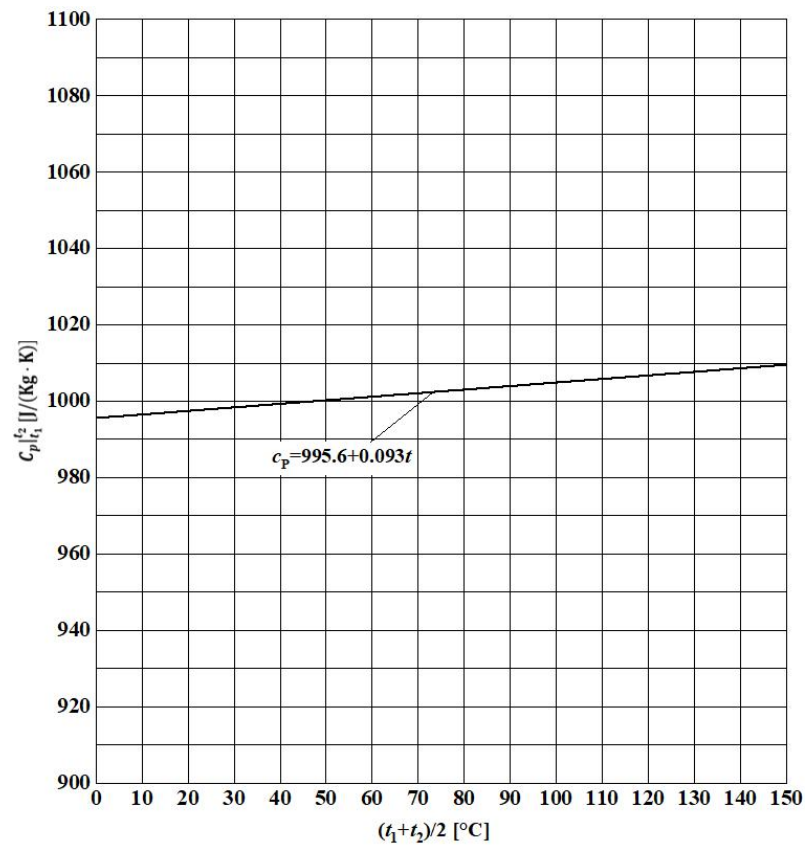


图2 空气平均比热与温度之间的关系曲线

五、思考题

1、从热力学第一定律角度，分析实验中漏热对测量数据的影响，比热是增大还是减小？

2、本实验中改善绝热性能的措施有哪些？

3、气体被加热后，要经过均流、旋流后才测量气体的出口温度，为什么？

4、进行实验误差分析，说明可能造成实验误差的原因，提出某种适用的减少计算误差的方法。

5、实验讨论及心得

附录2 计算实例

某一稳定工况实测参数如下：

$$p_b = 1020.8 \text{ hPa}, \quad \tau = 52.9 \text{ s}/10 \text{ L}, \quad t_1 = 18.5^\circ \text{C}, \quad t_2 = 217^\circ \text{C}, \quad \Delta h = 3 \text{ mmH}_2\text{O}, \quad P = 47.3 \text{ W}.$$

计算：

1. 将 $T_w = t_1 + 273.15$ 代入式(9)求得 $p_v = 2128.2 \text{ (Pa)}$

2. 将 p_v 代入式(10)计算水蒸汽的质量流量

$$q_{mv} = \frac{p_v(V/\tau)}{R_v T_1} = \frac{2128.2 \times (0.01/52.9)}{461.5 \times (18.5 + 273.15)} = 2.9890 \times 10^{-6} \text{ (kg/s)}$$

3. 据式(2-11)求气流中湿空气的绝对压力

$$p = 100p_b + 9.80665\Delta h = 100 \times 1020.8 + 9.80665 \times 3 = 102109 \text{ (Pa)}$$

4. 据式(2-13)求干空气的质量流量

$$q_{ma} = \frac{p_a(V/\tau)}{R_a T_1} = \frac{(102109 - 2128.2) \times (0.01/52.9)}{287.05 \times (18.5 + 273.15)} = 2.2576 \times 10^{-4} \text{ (kg/s)}$$

5. 据式(2-14)计算水蒸汽的吸热量（功率）

$$\begin{aligned} P_v &= 1000q_{mv} \left[1.833(t_2 - t_1) + 0.0001556(t_2^2 - t_1^2) \right] \\ &= 2.9890 \times 10^{-3} \left[1.833(217 - 18.5) + 0.0001556(217^2 - 18.5^2) \right] \\ &= 1.10928 \text{ (W)} \end{aligned}$$

6. 据式(2-16)计算干空气由 18.5°C 定压加热到 217°C 时的平均定压比热

$$c_p \Big|_{18.5}^{217} = \frac{P - P_v}{q_{ma}(t_2 - t_1)} = \frac{47.3 - 1.10928}{2.062 \times 10^{-4} \times (217 - 18.5)} = 1030.7 \text{ [J/(kg}\cdot\text{K)]}$$