

工程热力学与传热学 实验指导

主 编 李杞超

主 审 刘建禹

东 北 农 业 大 学

前 言

热工学是研究能量转换规律、热能利用和热能传递的一门技术学科，能量转换和热能合理有效的利用是这门学科的主要课题。在生产领域和人类日常生活中，随时随地、直接或间接地都会遇到热能利用和传热问题。因此，各行各业的工程技术人员，要把热能按质按量利用得好，就应该掌握热工学的基本知识、基本理论和热工主要设备的工作原理。

本书可作为农业机械化及其自动化、能源工程、食品机械、机械设计制造及其自动化等专业实验指导用书，也可作为相关人员参考用书。本指导书主要介绍热力学和传热学实验研究问题，包括实验原理、方法和仪器装置的操作规程。学生可通过本课程的学习，具备能量转换和热能传递的基本知识、基本理论和相应的热工分析计算能力；热工主要设备的一般工作原理、构造特征和性能指标；合理而有效地利用热能和节能技术的知识。

由于编者水平有限，书中必定存在缺陷及欠妥之处，恳请读者批评指正。

目 录

前 言.....	II
实验一 气体定压比热测定.....	1
实验二 二氧化碳临界状态及 P—V—T 关系实验.....	4
实验三 非、准稳态法测非金属固体材料导热系数.....	11
实验项目 1 准稳态法测试部分.....	11
实验项目 2 常功率平面热源法测试部分.....	16
实验四 强迫流动单管管外放热系数测定实验.....	22

实验一 气体定压比热测定

1、实验特点

实验类型：验证

实验类别：专业基础

计划学时：4 学时

每组人数：6~8 人

2、实验目的

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）方面的基本知识。本实验的目的是 1) 增加热物性实验研究方面的感性认识，了解气体比热测定的基本原理；2) 熟悉本实验中测量温度、压力、热量、流量的方法；3) 掌握由基本数据计算比热的方法和比热公式。为此能够促进学生理论联系实际，以利于培养分析问题和解决问题的能力。

3、实验设备装置

主要由风机、流量计、比热仪本体、电功率调节及测量四部分组成（如图 1—1）。

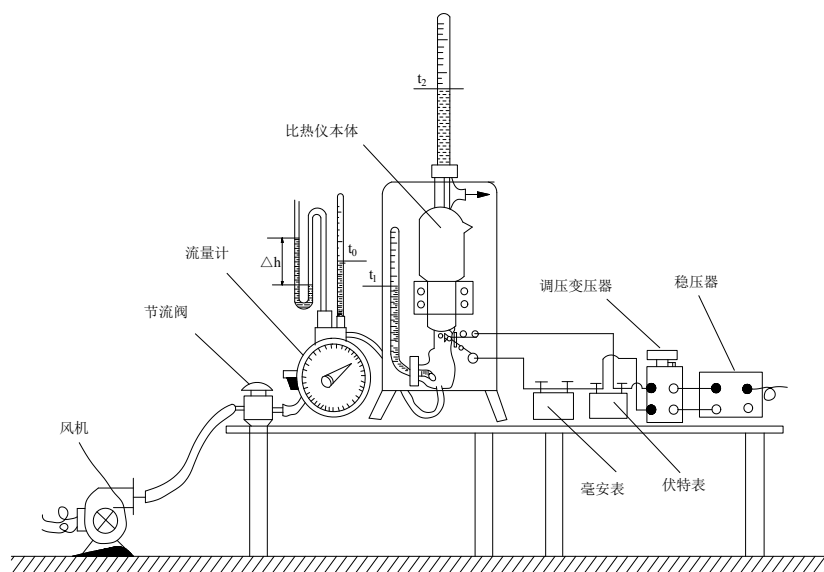


图1-1 气体定压比热整体图

4、实验原理

干空气的定压比热

$$c_{pm_{t_1}}^{t_2} = \frac{Q_g}{G_g(t_2 - t_1)} = \frac{Q - Q_w}{G_g(t_2 - t_1)} \text{ KJ} / (\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C})$$

电热器单位时间放出热量 Q 。通常要考虑电表内耗，要扣除内耗才是电热器单位时间放出的热量。由于本仪器表内阻较小，可忽略不计，所以电热量就是电压与电流乘积（ $Q=VI$ ）。

根据流量计出口空气的干湿球温度，从干湿图查出含湿量 d ，计算水蒸气的容积成分：

$$r_w = \frac{d/622}{1 + d/622}$$

干空气流量 G_g

$$\begin{aligned} G_g &= \frac{P_g V}{R_g T_0} = \frac{(1 - r_w)(B + \frac{\Delta h}{13.6}) \times \frac{10^4}{735.56} \times \frac{10}{1000 \tau}}{29.27(t_0 + 273.15)} \\ &= \frac{4.6447 \times 10^{-3} (1 - r_w)(B + \frac{\Delta h}{13.6})}{\tau(t_0 + 273.15)} \text{ Kg/S} \end{aligned}$$

水蒸气流量 G_w

$$\begin{aligned} G_w &= \frac{P_w V}{R_w T_0} = \frac{r_w (B + \frac{\Delta h}{13.6}) \times \frac{10^4}{735.56} \times \frac{10}{1000 \tau}}{47.06(t_0 + 273.15)} \\ &= \frac{2.8889 \times 10^{-3} r_w (B + \frac{\Delta h}{13.6})}{\tau(t_0 + 273.15)} \text{ Kg/S} \end{aligned}$$

水蒸气吸收的热量 Q_w

$$\begin{aligned} Q_w &= \frac{G_w}{4.1868} \int_{t_1}^{t_2} (0.4404 + 0.0001167 t) dt \\ &= G_w [0.1052 (t_2 - t_1) + 0.00001394 (t_2^2 - t_1^2)] \text{ KJ/S} \end{aligned}$$

5、实验步骤

1) 接通电源及测量仪表，调整流量计地角螺钉，使水准器水泡位于中心，并在使用中长期保持。

2) 摘下流量计上的温度计，开动风机，缓慢调节节流阀，使流量保持在额定值附近。测出流量计出口空气的干球温度(t_0)和湿球温度(t_w)。(流量计指针转动 1 圈所需时间为

36 秒，即额定流量值为 1 圈/36 秒，指针转动 1 圈气体的流量为 5 升)。

3) 将温度计插回流量计，缓慢调节流量，使它保持在额定值附近。

4) 逐渐提高电压，使出口温度升高至预计温度。(可以根据预计所需电功率： $W \approx 12 \frac{\Delta t}{\tau}$)。 W 为电功率； Δt 进出口温度差； τ 为每流过 10 升空气所需时间)。

5) 待出口温度稳定后(出口温度在 10 分钟内无变化或有微小起伏，即为稳定)，再进行记录数据。

6) 数据记录完后，要把调压器调到零电压，切断调压器与功率表电源，注意让风机继续运转，直到出口温度冷为室温，再切断电源。

6、数据记录和处理

流量计出口处干球温度 $t_0 =$

空气相对湿度 $\varphi =$

根据查表得出湿球温度 $t_w =$

流量计上 U 型管里水的高度差 $\Delta h =$

表 1-1

序号	设定 Δt	调整功率 W	实际电压	实际电流	实际进口温度 t_1	实际出口温度 t_2
1						
2						
3						

根据所测量的数据，计算气体的比热值，并写出计算过程，然后填写下表。

表 1-2

序号	单位时间放出热量 Q (KJ/S)	干空气流量 $G_g (kg/s)$	水蒸气流量 $G_w (kg/s)$	水蒸气吸收热量 $Q_w (KJ/s)$	干空气定压比热 KJ/Kg $^{\circ}C$
1					
2					
3					

7、比热随温度的变化关系

假定在 $0 \sim 300^{\circ}C$ 之间，空气的真实定压比热与温度之间近似地有线性关系，则由 t_1 到 t_2 的平均比热为：

$$c_{pm} \frac{t_2}{t_1} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (a + bt) dt}{t_2 - t_1}$$

$$= a + b \frac{t_1 + t_2}{2}$$

因此，若以 $\frac{t_1 + t_2}{2}$ 为横坐标， $c_{pm} \frac{t_2}{t_1}$ 为纵坐标，则可根据不同温度范围内平均比热确定截距 a 和斜率 b，从而绘制出比热随温度变化的关系图，得出比热随温度变化的计算式。坐标图

计算式

8、注意事项

- 1 请勿在无气流过情况下使电热器投入工作，以免引起局部过热而损坏比热仪本体。
- 2 开启风机前，要关闭节流阀；开启风机后，要缓慢的打开节流阀，以免流量计上 U 型管中水被喷出。
- 3 输入电热器的电压不得超过 220V。气体出口最高温度不得超过 $300^{\circ}C$ 。
- 4 加热和冷却要缓慢进行，防止温度计和比热仪本体因温度骤升骤降而断裂。
- 5 停止实验时，应先切断电热器，让风机继续运行 20 分钟左右。

实验二 二氧化碳临界状态及 P—V—T 关系实验

1、实验特点

实验类型：验证

实验类别：专业基础

计划学时：2 学时

每组人数：6~8 人

2、实验目的和任务

目的：

- 1) 掌握工质热力学状态及气体状态变化规律的理论知识。
- 2) 用实验研究实际工质的方法和技巧。
- 3) 熟悉部分热工仪器正确使用方法，加深对饱和状态、临界状态等基本概念理解。

任务：

1) 测定 CO_2 的 P—V—T 关系，在 P—V 坐标中给出 t 为 $20^\circ C$ ， $27^\circ C$ ， $31.1^\circ C$ ， $35^\circ C$ ， $50^\circ C$ 五种等温曲线，与标准实验和范德瓦尔方程理论计算值相比较并分析差异原因。

2) 观察临界状态，将实验所得的 v_c 值与理想气体状态方程及范德瓦尔方程式的理论计算值作一比较，简述其差异原因。

3) 测定 CO_2 在不同压力下饱和蒸气和饱和液体的比容(或密度)及饱和温度和饱和压力的对应关系。

4) 观察凝结和汽化过程及临界状态附近气液两相模糊的现象。

3、实验原理

1) 实际气体在压力不太高，温度不太低时，可以近似地认为是理想气体，并遵循理想气体状态方程式：

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

式中：P——绝对压力 kg/cm^2

V——容积 m^3

T——绝对温度 K

m——气体质量 kg

R——气体常数

$$R_{CO_2} = 0.18892 \left[\frac{KJ}{(kg \cdot K)} \right]$$

实际气体中分子力和分子体积，在不同温度压力范围内，这两个因素所引起的相反作用综合按规定是不同的，因而，实际气体与不考虑分子力，分子体积的理想气体有一定偏差，1873 年范德瓦尔针对偏差原因提出了范德瓦尔方程式：

$$\left(P + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = RT \quad (2)$$

$$\text{或 } PV^3 - (bP + RT)V^2 + aV - ab = 0 \quad (3)$$

式中： V^2 ——是分子力的修正项

$$a\text{——比例常数 } a = \frac{27}{64} \cdot \frac{R^2 T_c^2}{P_c}$$

$$b\text{——是分子体积修正项 } b = \frac{RT_c}{8P_c}$$

临界压力 $P_c = 7.387 \text{ Mpa}$ ，临界温度 $T_c = 31.1^\circ\text{C}$

(3) 式随 PT 的不同， V 可有三种解：

①不相等的三个实根；②相等的三个实根；③一个实根二个虚根。

本实验论证以上三种解的形成和原因，同时论证范德瓦尔方程较理想气态方程更接近于实际气体的状态变化规律，但仍有一定差距。

2) 工质处于平衡状态时，其基本状态参数 P 、 V 、 T 之间是有一定关系的：
 $F(P, V, T) = 0$

三个基本状态参数中，只有两个是独立的，我们可以令一个参数如 T 不变，用实验方法找出其余两个参数 (P 、 V) 之间的变化关系，从而求得工质变化规律，完成实验任务。

4、实验设备

实验设备主要由压力台、恒温器、试验台本体及防护罩三大部分组成（如图 2—1）。

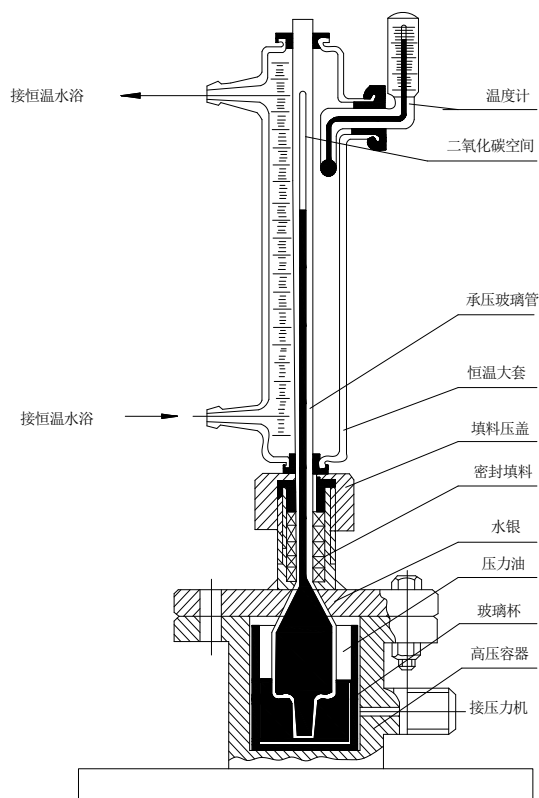


图2-1 二氧化碳设备简图

恒温器是提供室温到 60℃ 范围内恒温水的设备，我们借助提供的恒温水来间接恒定 CO_2 的温度，同时也起改变 CO_2 环境温度的作用。

压力台是借助其活塞杆的进退，使低粘度油传递压力来提供实验所需要的压力。

由恒温器提供的恒温水，从试验台本体玻璃水套下端进口流入，上端出口流出，反复循环，其温度数值由水套上的温度计读出，当水套上的温度计读数基本稳定，且与恒温器上温度计相差不太大时，我们可以近似认为承压玻璃管中所存的 CO_2 温度与此温度相同。

由压力台出来的压力油，进入高压容器后，从高压容器与玻璃杯间隙处溢向水银表面，迫使水银进入预先装了 CO_2 气体的承压玻璃管中，压缩 CO_2 ，其压力和容积通过压力台上活塞杆的前进和后退调节， CO_2 压缩时所受压力，由压力台上的压力表读出，其容积变化则由玻璃管内 CO_2 柱的高度来衡量。

5、实验步骤

1) 使用恒温器调定温度

①做好恒温器使用前的准备工作：加蒸馏水，检查并按通电路，开动水泵，使水循环对流。

②设定温度：一种方式是旋转电接点温度计顶端幅形磁铁，调至所规定的恒温温度；另一种方式是打开恒温器，把设定与测量开关打在设定档位上，用小螺丝刀来调节温度螺丝，调到所需的温度后，再把开关打到测量档位上，来读取温度。

③视水温情况开关加热器，当恒温器指示灯达到时亮时灭时，说明温度已达到所需的恒温。

④观察玻璃水套上的温度计，其读数与恒温器上电接点温度计标定的温度一致时，则可近似认为 CO_2 的温度已处于标定的温度。

⑤当需要改变温度时，同上步骤进行。

2) 加压前的准备

因为压力台的油缸容量比实验台本体的油压室容量小得多，需要多次从油杯里抽油，再向主容器充油，才能在压力表上显示压力读数。压力台抽油、充油的操作过程非常重要，若操作失误，不但不能加上压力而且还会损坏实验设备，所以务必认真掌握。

其步骤如下：

①关闭压力表及进入本体油路的两阀门，开启压力台上油杯的进油阀。

②倒退压力台上活塞螺杆，至螺杆全部退出，抽油。

③先关闭油杯阀门，然后开启压力表和油路两阀门。

④推进活塞螺杆，向本体内注油，如此反复，至压力表上有读数为止。

⑤最后检查油杯阀门是否关好，压力表和油路阀门是否开启准备妥后即可进行试验。

3) 进行实验

当准备工作做好，实验环境条件满足时，开始抽油进行加压，加压时，应足够缓慢的推进活塞螺旋杆进行加压，注意观察 CO_2 受压力后的各种现象，并将所测得的数据和实验现象记录下来，填写入表 2—1。

(1) 测定低于临界温度 ($t < t_c$) 的恒温线。

①使用恒温器调定 $t = 20^\circ C$ ，并要维持恒温。

②压力记录从承压玻璃可读取到数值开始。当玻璃管内水银计升起来后，应足够缓慢

地摇进活塞杆，以保证恒温条件，否则来不及平衡，读数不准。

③按照适当的压力间隔读取 h 值至压力 $P=7.6\text{Mpa}$ 。

④注意加压后， CO_2 的变化，特别是注意饱和压力和饱和温度的对应关系，液化、汽化等现象，将测得的实验数据及观察到的现象一并填入表 2—1。

⑤测定 $t=27^\circ\text{C}$ 下饱和温度和饱和压力的对应关系。

表 2—1

温度 压力	T=20℃			T=27℃			T=31.1℃			T=35℃			T=50℃		
表压 Mpa	CO ₂ 柱 高度 h	水 银 柱 高 h'	现象	CO ₂ 柱 高度 h	水 银 柱 高 h'	现象	CO ₂ 柱 高度 h	水 银 柱 高 h'	现象	CO ₂ 柱 高度 h	水 银 柱 高 h'	现象	CO ₂ 柱 高度 h	水 银 柱 高 h'	现象
4.5															
5.0															
5.5															

(2) 观察临界现象，确定临界等温线，($t_c=31.1^\circ\text{C}$) 需要从高于及低于临界温度两方面向临界等温线逼近，观察临界点附近的现象，以便判断是高于还是低于临界温度，并做出完整的等温线。

在靠近临界点时，略低于临界温度，可以看到稳定汽液两相分化，但两相界面的观察困难（两相折光性质差异近于消失）。汽、液两相的沉降分离、液滴合并（或气泡合并）困难，需要缓慢的操作与仔细观察才能看到这种汽液两相分辨困难的现象。即所谓的“汽液模糊现象”。

同样，在略低于临界温度并靠近临界点附近。当确实观察到有少量液相并看清相界面之后，摇进油压机手柄，动作幅度要小，细微的改变 CO_2 的总体积，即完成了由汽相到全部为液相的转变过程。在这个过程中，我们看不到相界面的移动，只能按过程发生后相界面的消失断定已成为单相，与前面相类似，也可由少量液相迅速地全部转变为汽相，这种由于相变热近于零及两相摩尔体积差近于零，而只需细微改变 CO_2 总体积，由一相到另一相的全部转化，称“整体现象”。

在等于或略高于临界温度的临界点附近，看不到稳定的汽、液两相的分化，但这时如果从比临界压力高一些的条件开始，迅速而小幅度地摇出油压手柄，压力降至临界压力或临界压力的某一范围内， CO_2 在一极短的绝热膨胀过程中会因温度暂时降低到临界温度以下出现“起雾”现象；由于热交换“雾”立即消失，这种“瞬间倒退液化现象是与混合现象”本质上不同的。

临界性质测定及临界点附近现象的观察至少要测定两根等温线。从经验临界温度等温线作起。如果看到的是高于临界温度以下的临界点附近特有现象，则下一根等温线作降低 $0.2^\circ C$ 的等温线，如果观察到的是低于临界温度的临界点附近特有现象，则提高 $0.2^\circ C$ 后作下一根等温线。

找到临界温度后，在该温度下仿照第 3 步测出数据并将数据填入表 2—1，并在该曲线的拐点处找出临界压力 P_c 和临界比容。

(3) 测定高于临界温度 ($t=35^\circ C > t_c$) 时的等温线。

(4) 在温度 $t=48.1^\circ C$ 时，是 $P-V$ 恒温线成为均匀曲线的临界。测定 ($t=50^\circ C > 48.1^\circ C$) 时的等温线。

6、数据计算整理

1) 压力 P CO_2 的压力由活塞式压力计测量或由标准压力表读出，考虑装置中水银柱和油柱高度的影响，二氧化碳的绝对压力为

$$p_{co_2} = P + H_2 \rho_y g \times 10^{-6} - H_1 \rho_{Hg} g \times 10^{-6}$$

P ——活塞式压力计的测量值或标准压力表读数 MP

H_1 ——水银室内水银面至毛细管内水银面高度 m

H_2 ——水银室内水银面至压力计柱塞面（压力表中心）高度 m

ρ_{Hg} ——压力计内水银的密度 kg/m^3

ρ_y ——压力计内机油的密度 kg/m^3

实际上由于油液柱与水银产生的压力较小可忽略，所以二氧化碳的压力可近视等于标准压力表压力，即 $p_{co_2} \approx P$

2) 比容 V 实验中测得只是 CO_2 柱的高度 h 值，而我们需要的是 CO_2 的比容 V 值，设备中 CO_2 重量 (G) 不便测量，而承压玻璃管的内径或截面积 (A) 又不易测准，因而只能用间接方法确定 V 值。已知 CO_2 液体在 $20^\circ C$ 、 $6MPa$ 时，比容 V 为 $0.001276 m^3/kg$ 。实测出 CO_2 在 $20^\circ C$ 、 $6MPa$ 时、 CO_2 柱的高度 h ，则可得：

$$V_{co_2}(20^\circ C, 6MPa) = \frac{h \cdot A}{G} = 0.001276 m^3/kg$$

$$\frac{G}{A} = \frac{h}{0.001276} = K = \text{常数}$$

则在任意温度和压力下， CO_2 的比容为：

$$V = \frac{h}{G/A} = \frac{h}{K}$$

只要我们在实验中测得 $t=20^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{绝}} = 6\text{MPa}$ 时的 h 值, 计算出 K 值后, 其他一切 V 值均可求得。

原始数据记录经计算整理后, 根据实验任务要求, 将结果填入表 2—2。

说明: 临界状态的压力 P_c 和体积 V_c 是在临界温度 31.1°C 下测量压力 P 和体积 V 的数据得出来的, 计算式表 2—2 中已列出。再根据计算整理的数据表做出 $P-V$ 图; 计算临界状态误差; 并分析实验值及图与理论计算值及标准曲线之间差异所在原因。

表 2—2

温度 $^{\circ}\text{C}$ 压力 MP	$t=20$	$t=27$	$t=31.1$	$t=35$	$t=50$		
P	比容 V	比容 V	比容 V	比容 V	比容 V	$P = \frac{RT}{V}$	$P = \frac{R_o T}{(V-b)} - \frac{a}{V^2}$
临界状态	$P_c = \frac{RT_c}{V_c}$				$V_c = \frac{3}{8} \frac{RT_c}{P_c}$		

二氧化碳液体比容 (m^3/kg) 的部分数据如表 2—3

表 2—3

压力 (MPa)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)			
	0	10	20	30
4	0.001069			
5	0.001059	0.001147		
6	0.001050	0.001129	0.001276	
8	0.001035	0.001101	0.001212	0.001407
10	0.001022	0.001086	0.001170	0.001290

7、注意事项

1) 由于恒温器没有制冷设备,所以在测量时应由低温向高温进行测定,以免水域温度过高难以降温,导致无法测量低温时 CO_2 的 $P-V-T$ 关系。

2) 各等温线均在 $5\sim 7.8\text{MPa}$ 间测出 CO_2 柱的高度值,绝对不允许表压超过 8MPa ,最高温度不要超过 60°C 。

3) 一般取 CO_2 柱高度时压力间隔可选取 0.5MPa ,但接近饱和状态和临界状态时,取压力间隔应小一点为好。

4) 当玻璃管内水银升起来后,应足够缓慢的摇进活塞螺杆,以保证恒温条件,否则温度与压力不能及时平衡,读数不准。

5) 实验终了卸压时,应使压力逐渐下降,不得直接打开油杯阀门卸压,最后压力应全部卸载,绝对不能余留压力。

8、实验报告要求

根据测量数据计算出各状态参数,对照理论计算值与理论曲线(图 2-2)作分析比较。

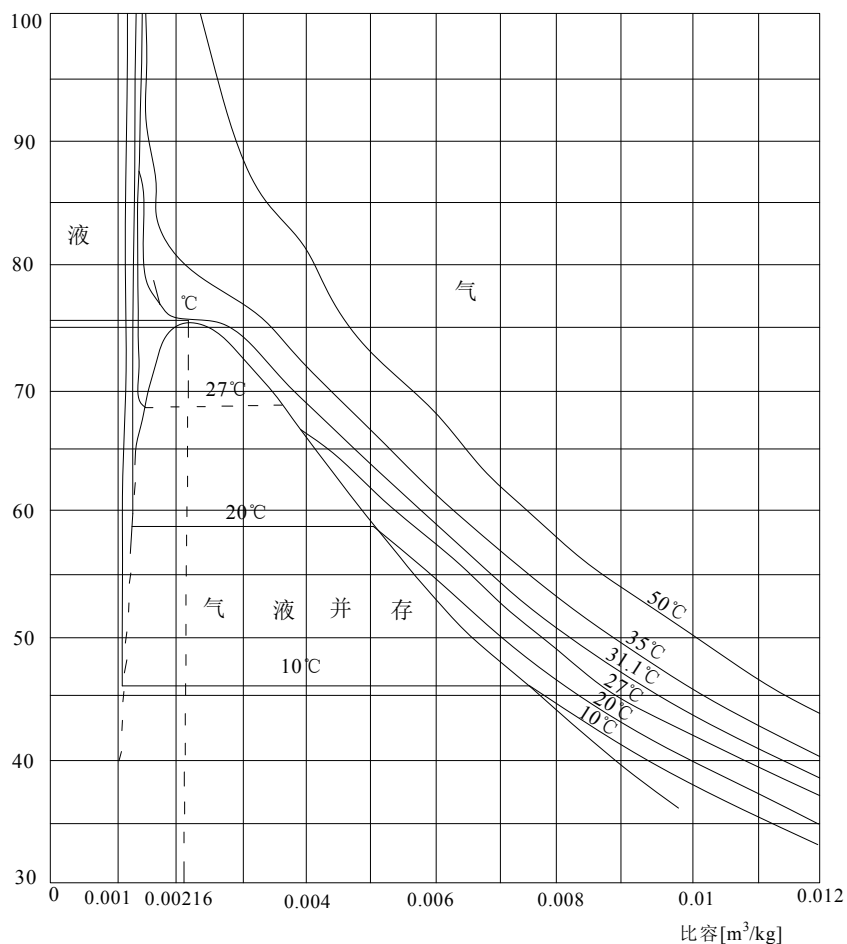


图2-2 实验曲线 ($P-V-T$ 关系)

实验三 非、准稳态法测非金属固体材料导热系数

实验项目 1 准稳态法测试部分

1、实验特点

实验类型：综合

实验类别：专业基础

计划学时：4 学时

每组人数：6~8 人

2、实验目的

- 1) 了解准稳态法的测量仪器的组成；
- 2) 掌握使用热电偶测量温差的方法；
- 3) 掌握用准稳态法测量试件的导热系数、导温系数和比热值。

3、测试原理

准稳态法的测试原理是根据平板导热微分方程，在第二类边界条件下加热问题的解来确定导热系数和比热。准稳态法是依据不稳定导热过程中，温度场变化的准稳定阶段，即被测试材中任意两点的温度差不随时间变化来安排测试的。这就兼有稳态和非稳态法两者特点。

根据导热方程在无限大物体中平面热流解准稳态阶段，其导热系数 λ 可按式计算：

$$\lambda = \frac{q_c \cdot \delta}{2 \cdot \Delta t} \quad (1)$$

式中： q_c —恒定功率加热热流强度，在实验条件下等于常数， W/m^2

δ —平板试样厚度， m

Δt —中心点与加热面之间的温度差， $^{\circ}C$

λ —导热系数， $W/m \cdot ^{\circ}C$

实际上，无限大平板是无法实现的，实验总是用有限尺寸的试件。一般可认为，试件的横向尺寸为厚度的六倍以上，两侧散热对试件中心温度的影响可忽略不计。试件中心处的温度等于无限大平板时两端面的温度差。

从式（1）可知：测得在准稳态阶段的平板表面和中心面的温差、平板表面（加热面）上的恒定热流强度和试样厚度等数据，比热 C 可按式计算：

$$C = \frac{q_c}{\gamma \cdot \delta \cdot \frac{\Delta t'}{\Delta \tau}} \quad (2)$$

式中： C—材料的比热值， $J/kg \cdot ^{\circ}C$

γ —材料的容量， kg/m^3

$\frac{\Delta t'}{\Delta \tau}$ 一温升速率，在准稳态阶段，平板中任何点的温升速率都相同，因此可以

用中心面某一时间间隔的温升来求得， $^{\circ}\text{C}/\text{s}$

$$\text{由导热系数公式可得: } \alpha = \frac{\lambda}{C \cdot r} \quad (3)$$

公式中符号意义同前。

4、测试装置和测量仪表

测试装置的示意图如图 3—1 所示。正方形断面的四块试样，在试块 2, 3 两面有恒定功率的加热器，为了保证上下温度分布对称，这两个加热器电阻必须相等。本设计采用的是一种高阻箔式加热器。箔厚仅 $20\mu\text{m}$ ，加上保护箔的绝缘膜，总厚为 $70\mu\text{m}$ 。在四块试样的底部和顶部，要设置热绝缘层进行绝热。绝热层采用聚乙烯硬泡沫塑料（或聚苯乙烯泡沫塑料），其厚度可取 $80\sim 100\text{mm}$ ，顶部加压板靠加压螺帽压紧以减少接触热阻影响。电源可采用二级稳压，交流稳压电源可采用一般自动稳压电源即可（自配），如电网电压稳定，可不用交流稳压电源。交流稳压电源和直流稳压电源采用两串联稳压。加热器电功率的测量，采用 0.01Ω 标准电阻再加 $UJ33a$ 直流电位差计，测量电流（ $I = U/R_s$ ， U 是电位差计读数 R_s 是标准电阻数值； $R_s = 0.01\Omega$ ； $I = U/R_s = \frac{U}{10}(\text{A})$ ）。也可采用精度较高的直流电流表直接测量电流。功率是用测得的电流数值和事先测得的加热器的电阻值来计算电功率。温度感应元件—热电偶由直径为 0.1mm 左右的铜—康铜丝组合而成。热电偶的冷结点放置在盛有冰水混合物的保温瓶中。其温度与热电势的换算见表 1。

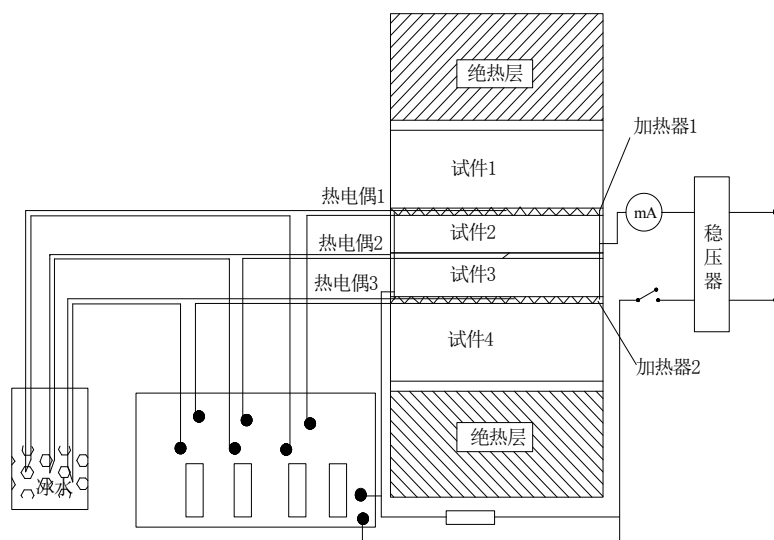


图 3—1 准稳态导热实验装置

试块尺寸是四块 $200 \times 200 \times \delta \text{mm}$ （ $\delta=10\sim 30\text{mm}$ ） r 的平板，其加热尺寸也是 $200 \times 200 \text{mm}$ ，一般要求试件的长宽为试件厚度的 $6\sim 10$ 倍。四块试件必须是同一种材料，一次成型。试件相互接触的表面要求制作得平整，接合紧密，这样可以避免形成缝隙而受空气的影响，造成测试结果的误差，四块试件的厚度要处处均匀一致。

实验室内的气温波动尽量减小，以免试件内部初始温度引起不均匀而影响测量结果。

5、实验步骤

1) 用游标卡尺测量试件的尺寸，面积和厚度。

2) 将四块试样及两个平面加热器竖直对齐迭放，在试件 2 和试件 3 之间接触面及试件 2（或 3）与平面加热器的接触表面内各放置一个测温热电偶，热电偶的热接点放在接触面中心处（如图 3—1），而后将整体加以固定，即可测得温差。

3) 将所有线路接好，检查各仪表是否正常，然后调整电位差计，将倍率开关选择到 20mv 挡，并且调零。

4) 电源与稳压电源接通后，利用电位差计检查试件初始温差，将测量转换开关转到“2”处，再转换到“1”或“3”处，确定加热面和中心面的热电偶的电势差是否一样，如果相差在 $4\mu\text{V}$ (0.1°C) 以内时，实验即可进行。

5) 将测温热电偶的外端放入盛有冰水混合物的保温瓶中，测量初始时加热器表面与中心面的温差，并记录在表 3—1 中。

6) 开启稳压稳流电源开关，按所测材料导热性大小，调整加热器两端的电压，（稳压输出值一般在 30-40V，电流值一般在 0.2A 左右，）要求在准稳定阶段加热的表面与中心面的温度差保持 5°C 左右。约 30 分钟后，稳压电源工作状态趋向稳定。

7) 启动秒表，将转换开关切换到“a”，用电位差计测量通过 0.01Ω 标准电阻上的电压降，换算成电流值。一般在 10~30 分钟后，即可达到准稳定阶段，可先将开关切换到 1，读取在此时的加热器表面与中心面的温差，即可算得导热系数，此时的温差将不随时间变化，然后将开关切换到 2，利用秒表与电位差计配合测出单位时间内中心面的温度变化率 $\Delta t' / \Delta \tau$ ，即可据此算得比热。进入准稳态后记录电流、电压值。

8) 关掉电源，将电位差计里电池取出，此实验结束。

6、实验数据整理

表 3—1

试 件							加 热 器				
名称		容量 γ (kg/m^3)		厚度 δ (mm)		长×宽 (mm ²)		面积 F (m^2)		电阻 $R(\Omega)$	
有机玻璃		1.2×10 ³		10		200×200		0.0361			
记 录 数 据											
时间		热电势		时间		热电势		时间		热电势	
分	未知	未知	分	未知	未知	分	未知	未知	分	未知	未知
0			13			26			39		
1			14			27			40		
2			15			28			41		
3			16			29			42		
4			17			30			43		
5			18			31			44		
6			19			32			45		
7			20			33			46		
8			21			34			47		
9			22			35			48		
10			23			36			49		
11			24			37			50		
12			25			38			51		
准稳态阶段电流值						准稳态阶段电压值					
加热器总电流 $I = \frac{U}{10}$ (A)						标准电阻上的压降 U (mv)					
计 算 数 据											
加热器联接方式		加热器的热流量 $q = \frac{I^2 R}{F}$				温差 $\Delta t(^{\circ}C)$		中心面温升速率 $\frac{\Delta t'}{\Delta \tau}^{\circ}C/s$			
串联 并联											
导热系数 $\lambda = \frac{q \cdot \delta}{2\Delta t}(w/m^{\circ}C)$		导温系数 $\alpha = \frac{\lambda}{C\gamma}(m^2/s)$				比热 $C = \frac{q}{\gamma \cdot \delta \cdot \Delta t / \Delta \tau}$		傅立叶准则 $F_0 = \frac{\alpha \cdot \tau}{\delta^2}$			

铜——康铜热电偶温度——毫伏对照表

附表 3—1

	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV	mV
温度	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.000	0.039	0.078	0.110	0.155	0.194	0.234	0.273	0.312	0.325
10	0.391	0.431	0.471	0.510	0.550	0.590	0.630	0.671	0.711	0.751
20	0.792	0.832	0.893	0.914	0.945	0.995	1.036	1.077	1.118	1.159
30	1.201	1.242	1.284	1.325	1.367	1.408	1.450	1.492	1.534	1.576
40	1.618	1.661	1.703	1.745	1.788	1.830	1.873	1.916	1.958	2.001
50	2.044	2.084	2.130	2.174	2.217	2.260	2.304	2.347	2.391	2.435
60	2.478	2.522	2.566	2.610	2.654	2.698	2.743	2.787	2.831	2.867
70	2.920	2.965	3.010	3.054	3.099	3.144	3.189	3.234	3.279	3.325
80	3.370	3.415	3.459	3.506	3.552	3.597	3.643	3.689	3.735	3.781
90	3.827	3.873	3.919	3.965	4.012	4.058	4.105	4.151	4.198	4.224
100	4.281	4.338	4.385	4.432	4.479	4.526	4.573	4.621	4.668	4.715
110	4.763	4.810	4.858	4.906	4.953	5.007	5.049	5.099	5.146	5.193
120	5.241	5.289	5.338	5.386	5.434	5.483	5.531	5.580	5.629	5.677
130	5.726	5.775	5.824	5.873	5.922	5.971	6.020	6.070	6.119	6.168
140	6.218	6.267	6.317	6.367	6.416	6.466	6.516	6.566	6.616	6.666
150	6.716	6.766	6.816	6.867	6.917	6.967	7.018	7.066	7.116	7.169

实验项目 2 常功率平面热源法测试部分

1、实验特点

实验类型：验证

实验类别：专业基础

计划学时：2 学时

每组人数：6~8 人

2、测试原理

常功率平面热源法是根据半无限大物体常热流密度作用下的分析解和它在工程实际中的应用，是根据一种以不稳定导热理论拟定的测试方法，其过程属于第二类边界条件，即常热流密度作用下的不稳定导热过程。

初始温度为 t_0 的半无限大均质物体，当表面被常功率热流加热时，温度场有以下导热微分方程求解：

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (1)$$

当 $\tau=0$, $\theta=0$ 时

$$x=0, q = -\lambda \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=0} = \text{const (常数)} \quad (2)$$

式中： θ —过余温度，以 t_0 为基准。例如， τ_1 时刻离表面距离为 δ_1 的点的过余温度

$$\theta_{\delta_1, \tau_1} = t_{(\delta_1, \tau_1)} - t_0 ;$$

t_0 —半无限大物体的初始温度

q —热流密度 W/m^2

λ —导热系数 $\text{W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$

在 (2) 式条件下，求解式 (1) 得

$$\theta_{x, \tau} = \frac{2q}{\lambda} \sqrt{a\tau} \text{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) \quad (3)$$

式中：ierfcy—代表变量 y 的高斯补误差函数的一次积分，其值可由数学函数表或传热学书中查到本文中见表 2。

在初始温度 t_0 分布均匀的半无限大物体内部，从 $\tau=0$ 起，半无限大物体表面，受均匀分布的平面热源 q 的作用，测出 τ_1 时刻表面温度 θ_{0, τ_1} 以及 τ_2 时刻离表面 δ_1 距离处的温

度 $\theta_{\delta_1, \tau_2}$ (δ_1 是设定的测点位置)，则由下列运算可得出该物体的导温系数及导热系数：

$$\text{在 } \tau_1 \text{ 时刻, } \theta_{0,\tau_1} = \frac{2q}{\lambda} \sqrt{a\tau_1} \operatorname{ierfc}(0) = \frac{2q}{\lambda} \sqrt{a\tau_1} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \quad (4)$$

$$\text{在 } \tau_2 \text{ 时刻, } \theta_{\delta_1,\tau_2} = \frac{2q}{\lambda} \sqrt{a\tau_2} \operatorname{ierfc}\left(\frac{\delta_1}{2\sqrt{a\tau_2}}\right) \quad (5)$$

则根据式 (5) 除以式 (4) 得出:

$$\operatorname{ierfc}\left(\frac{\delta_1}{2\sqrt{a\tau_2}}\right) = \frac{\theta_{\delta_1,\tau_2}}{\theta_{0,\tau_1}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_2}} \quad (6)$$

于是, 由已测量量 $\Phi = \frac{\theta_{\delta_1,\tau_2}}{\theta_{0,\tau_1}} \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_2}}$, 可求出 $\operatorname{ierfc}\left(\frac{\delta_1}{2\sqrt{a\tau_2}}\right) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \Phi$, 从误差

函数表中确定 $y = \frac{\delta_1}{2\sqrt{a\tau_2}}$ 的值, 从而可计算出导温系数:

$$a = \frac{\delta_1^2}{4y^2\tau_2} (m^2/s) \quad (7)$$

式中: δ_1 —试件厚度, m

根据上式 a 值, 代入式 (4), 就可求得试件的导热系数为:

$$\lambda = \frac{2q}{\theta_{0,\tau_1}} \sqrt{a\tau_1} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \quad W/m \cdot ^\circ C \quad (8)$$

则试件的比热值可由下式求得:

$$C = \frac{\lambda}{a\gamma} \quad (J/kg \cdot ^\circ C) \quad (9)$$

此法测出的数据, 可认为平均温度 $t = \frac{1}{2}(t_{0,\tau_1} + t_{\delta_1,\tau_2})$ 时的导热物性数据。

3、测量装置和测量仪表

常功率平面热源法测试部分仪器的装置简图及接线原理图见图 3—2。根据其基本原理可分三部分。

第一部分为试件及试件夹具。为了便于放置加热器及测量温度用的热电偶, 试件分为三块, 中间一块比 δ_1 较薄, 两边 δ_2 与 δ_3 较厚, $\delta_3 = \delta_1 + \delta_2$, 且 $\delta_2 > 3\delta_1$, 试件 I 和试件 III 之间夹以很薄的平面型加热器 (用厚度为 10 μm 左右的镧铜箔或 0.1mm 镧铜丝等制作的平板状的加热器); 热电偶放在试件 I 的上下面。

如果试件长和宽各为 δ_1 的 8~10 倍, 试件 I 就可以看作是无限大平壁, 在被康铜箔通电加热的条件下, 试件 I 的两个表面中央地区都将在整个升温期间各保持为等温面。随着时间的延长, $\tau > 0$, 试件紧挨加热器面的部分首先开始升温, 逐步向远离加热面的两边延伸, 直到 $\tau = \tau_{\text{限}}$ 时, 试件 II 的上表面和试件 III 的下面表也将开始升温, 在 $0 < \tau < \tau_{\text{限}}$ 期

间，试件 I、II 叠接在一起，以及试件 III 都将表现为事实上的半无限大物体，而且康铜箔热源也将均等地向两侧供热，每侧各为 $q_0 (W / m^2)$ ，即 $2q_0 = q = \frac{Q}{F} (W / m^2)$

式中：Q—康铜箔加热源的热功率，(W)；

F—康铜箔热源的面积， m^2 。

第二部分为测量系统，其感应元件和二次仪表均同前一节准稳态法测试部分。

第三部分为加热系统，除了将准稳态中二个加热器拿掉一个外，其它均同准稳态部分。

此外，为记录加热时间需自备秒表（或电子带连续记时秒表一块）。

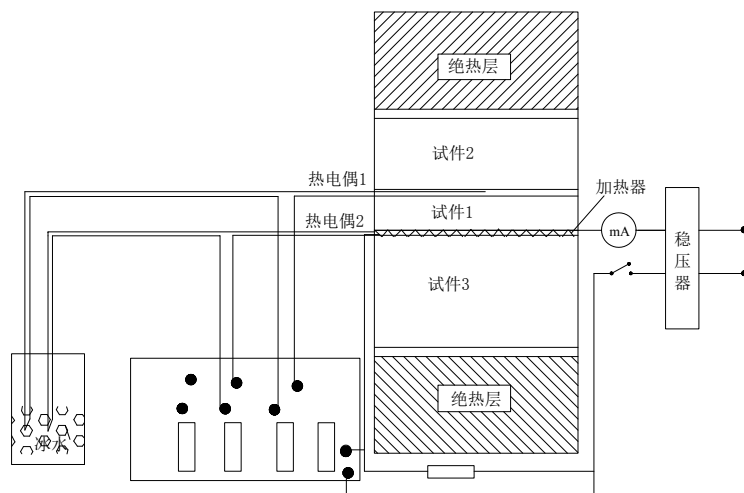


图 3-2 常功率平面热源法实验装置

4、实验条件的控制

1) 试件尺寸的确定

试件的尺寸按下列关系确定

薄试件一块 $200 \times 200 \times 10 \sim 30 \text{ mm}$

厚试件二块 $200 \times 200 \times 60 \sim 100 \text{ mm}$

2) 关于平面热源功率的测量

由图3—2中 R_s 为 0.01Ω 标准电阻，当利用 UJ33a 电位差计测得其两端的电压降(mV)，则通过其中的电流强度 I 即为通过加热器的电流强度，即：

$$I = \frac{U}{R_s} = \frac{U \times 10^{-3}}{0.01} = 0.1U \quad (A)$$

式中：U—标准电阻上的电压降，mV。

当已知加热器的电阻值 R 时，通过加热器平面热源的热功率将是：

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{1}{F} \cdot I^2 R = \frac{1}{F} (0.1U)^2 = \frac{U^2 R \times 10^{-2}}{F} \quad (10)$$

5、测试步骤

1) 按下列顺序安装试件

①试件III放在最下面；②加热器；③热电偶 1；④试件 I；⑤热电阻 2；⑥试件 II；⑦压板夹紧。

2) 紧压板上四个压紧螺母，使加热器与试件充分接触，盖上有有机玻璃罩。

3) 接线路，(加热系统，测温系统)。如果线路已接好，则要检查一遍各线路的联接和指示系统，一定要保证线路的正确连接。

4) 将电位差计调零，对标准后，测试件 I 上、下表面的初温，即 $t_{0,0}$ 和 $t_{\delta_1,0}$ ，如果温差在 0.1°C 以内，即热电势相差 $\leq 4\mu\text{V}$ ，即可认为温度场均匀了，并记录 $t_{0,0}$ 和 $t_{\delta_1,0}$ ；

5) 开始加热(加热器功率应能使 θ_{0,τ_1} 达到 10°C 以上，由此可选用单位面积上的功率为 $q = 30 \frac{\lambda}{\delta_1} \text{ W/m}^2$ 较大的 q 对提高准确度有利)，同时启动秒表，加热 10~20 分钟之间，

测得 n 组试件 I 上，下表面的终温，即 $t_{(0,\tau_0)}$ 及 $t_{(\delta_1,\tau_{\delta_1})}$ ；测温的同时，记下相应的时间，即 τ_0 和 τ_{δ_1} ；

6) 测 U 的数值，因是常功率，测此项不受时间限制；

7) 关掉电源，用游标卡尺测量薄试件厚度，再将电位差计里电池取出，实验结束。

6、数据整理

常功率平面热源法测定材料的导热系数、导温系数、比热等测试记录计算表

表 3—2

试材					加热器				
名称	厚度 (mm)		容量 γ (kg / m^3)	长×宽(mm ²)		电阻 $R(\Omega)$	面积 F(m ²)		
	试件 δ_1	试件 δ_2							
有机玻璃	10	60	1.2×10^3	200×200			0.0361		
序号				1	2	3	4	5	
数据代号									
原始记录	试件初温	t_0	mV						
			℃						
		t_{δ_1}	mV						
			℃						
	$\Delta \tau_0^n$		分秒						
	t_0^n		mV						
			℃						
	$\Delta \tau_{\delta_1}^n$		分秒						
	$t_{\delta_1}^n$		mV						
			℃						
	U		mV						
计算数据	τ_0^n		S						
	$\theta_{0,\tau_0} = t_0^n - t_0$		℃						
	$\tau_{\delta_1}^n$		S						
	$\theta_{\delta_1,\tau_{\delta_1}} = t_{\delta_1}^n - t_{\delta_1}$		℃						
	$ie\gamma fc(y) = \frac{\theta_{\delta_1,\tau_{\delta_1}}}{\theta_{0,\tau_0}} \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau_{\delta_1}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}}$								
	$y = \frac{\delta_1}{2\sqrt{\alpha \tau_{\delta_1}}}$								
	$q = \frac{I^2 R}{F} \times 10^{-2}$		W/m^2						
	$a = \frac{\delta_1^2}{4y^2\tau_{\delta_1}}$		m^2/S						
	$\lambda = \frac{2q}{\theta_{0,\tau_0}\sqrt{\pi}} \sqrt{a\tau_0}$		$W/m \cdot ^\circ C$						
	$C = \frac{\lambda}{a\gamma}$		$J/kg \cdot ^\circ C$						

高斯补误差函数的一次积份值

附表 3—2

y	ierfc(y)	y	ierfc(y)	y	ierfc(y)	y	ierfc(y)	y	ierfc(y)
0.00	0.5642	0.17	0.4104	0.35	0.2810	0.56	0.1724	0.90	0.0632
		0.18	0.4024	0.36	0.2758	0.58	0.1640		
		0.19	0.3944	0.37	0.2722	0.60	0.1559	0.92	0.0642
0.01	0.5542	0.20	0.3866	0.38	0.2637			0.94	0.0606
0.02	0.5444			0.39	0.2579	0.62	0.1482	0.96	0.0569
0.03	0.5350	0.21	0.3789	0.40	0.2521	0.64	0.1407	0.98	0.0535
0.04	0.5251	0.22	0.3713			0.66	0.1335	1.00	0.0503
0.05	0.5156	0.23	0.3638	0.41	0.2456	0.68	0.1267	1.10	0.0365
0.06	0.5062	0.24	0.3564	0.42	0.2409	0.70	0.1201	1.20	0.0260
0.07	0.4960	0.25	0.3491	0.43	0.2354			1.30	0.0183
0.08	0.4878	0.26	0.3410	0.44	0.2300	0.72	0.1138	1.40	0.0127
0.09	0.4787	0.27	0.3348	0.45	0.2247	0.74	0.1077	1.50	0.0086
0.10	0.4698	0.28	0.3278	0.46	0.2195	0.76	0.1020	1.60	0.0058
		0.29	0.3210	0.47	0.2144	0.78	0.0965	1.70	0.0038
0.11	0.4610	0.30	0.3142	0.48	0.2094	0.80	0.0912	1.80	0.0025
0.12	0.4523			0.49	0.2045			1.90	0.0016
0.13	0.4437	0.31	0.3075	0.50	0.1996	0.82	0.0861	2.00	0.0010
0.14	0.4352	0.32	0.3010			0.84	0.0813		
0.15	0.4268	0.33	0.2945	0.52	0.1902	0.86	0.0767		
0.16	0.4186	0.34	0.2882	0.54	0.1811	0.88	0.0724		

实验四 强迫流动单管管外放热系数测定实验

1、实验特点

实验类型：综合

实验类别：专业基础

计划学时：4 学时

每组人数：6~8 人

2、实验目的

- 1) 了解对流传热的实验研究方法；
- 2) 测定空气横向流过单管表面平均放热系数 α ，并将实验数据整理成准则方程式；
- 3) 掌握测量风速、温度、热量的基本技能。

3、实验原理

根据相似理论，流体受迫外掠物体时的放热系数 α 与流速、物体几何形状及尺寸、流体物性间的关系可用下列准则方程式描述：

$$Nu = f(Re, Pr)$$

实验研究表明，流体通过横向单管表面时，一般可将上式整理成下列具体指数形式：

$$Nu_m = c Re_m^n \cdot Pr_m^m$$

式中：c、n、m 均为常数，由实验确定，

$$Nu_m \text{—努谢尔特准则 } Nu_m = \frac{\alpha d}{\lambda_m}$$

$$Re_m \text{—雷诺准则 } Re_m = \frac{wd}{v_m}$$

$$Pr_m \text{—普朗特准则 } Pr_m = \frac{v_m}{\alpha_m}$$

上述各准则中，d—实验管外径，作定性尺寸 [m]

w—流体流过实验管外最窄面处流速；[m/s]

λ —流体导热系数 [$W/m \cdot K$]

v —流体运动粘度 [m^2/s]

α —对流传热系数 [$W/m^2 \cdot K$]

准则各物性参数(角码“m”表示)采用流体边界层平均温度 $t_m = \frac{1}{2}(t_w + t_f)$ 作定性温度。

鉴于实验中流体为空气， $Pr_m = 0.7$ ，故准则式可化成： $Nu_m = c Re_m^n$

本实验的任务在于确定 c 与 n 的数值，首先使空气流速一定，然后测定有关的数据：电流 I、电压 V、管壁温度、空气温度、微压计动压头。至于 a 、 w 在实验中无法直接测得，可通过计算求得，而物性参数可在有关书中查得，得到一组数据后，可得一组 Re 、 Nu 值，改变空气流速，又得到一组数据，再得一组 Re 、 Nu 值，改变几次空气流速，就可得到一系列的实验数据。(空气粘度变化只受温度变化的影响，而压力变化对其影响甚微可忽略不计。)

空气运动粘度与温度的关系表

空气温度℃	0	5	10	20	30	40	60	80	100
粘度 $m/s(\times 10^{-4})$	0.136	0.142	0.147	0.157	0.166	0.176	0.196	0.210	0.238

空气导热系数与温度的关系表

空气温度℃	-50	-20	0	10	20	30	40
导热系数 $w/m \cdot K$	0.0203	0.0203	0.0237	0.0245	0.0252	0.0253	0.0256

4、实验设备

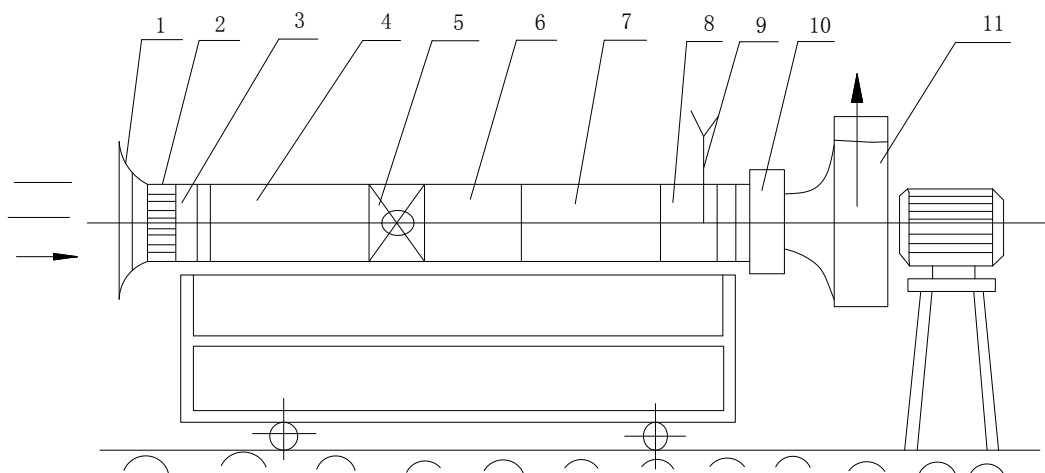


图 4--1 实验风洞简图

1双曲线进风口 2蜂窝器 3整流金属网 4第一测试段 5实验段
6第二测试段 7收缩段 8测速段 9皮托管 10橡皮连接管 11风机

本对流实验在一实验风洞中进行。实验风洞主要由风洞本体、风机、构架、实验管及其加热器、水银温度计、倾斜式微压计、毕托管、电位差计、电流表、电压表以及调压

变压器组成。

由于实验段前有两段整流，可使进入实验段前的气流稳定。毕托管置于测速段，测速段截面较实验段小，以使流速提高，测量准确。风量由风机出口挡板调节。实验风洞中安装了一根实验管，管内装有电加热器作为热源，管壁嵌有四对热电偶以测壁温。

5、实验步骤

1) 将毕托管与微压计连接好，校正调平；连接热电偶与电位差计，再将加热器、电流表、电压表以及调压变压器线路连接好，电位差计要调零。

2) 在启动风机前，关闭风机出口挡板，让风机空载启动，然后根据需要开启出口挡板，调节风量。

3) 把自由端标准探针放入装有冰水混合物的冰瓶里，以保证自由端为“0”度。

4) 在调压变压器指针位于零位时，合电闸加热实验管，根据需要调整变压器，使其在某一热负荷下加热，并保持不变，使壁温达到稳定（壁温热电偶电势在三分钟内保持读数不变或较小波动，即可认为已达到稳定状态）后，开始记录热电势、电流、电压、空气进出口速度及微压计的读数。

5) 在一定热负荷下，通过调整风量来改变 Re 数的大小，因此保持调压变压器的输出电压不变，依次调节风机出口挡板，在各个不同的开度下测得其动压头，空气进、出口温度以及电位差计的读数，即为不同风速下，同一负荷时的实验数据。

6) 不同热负荷条件下的实验，仅需利用调压器改变电加热器功率、重复上述实验步骤即可。

7) 实验完毕后，先切断实验管加热电源，待实验管冷却后再停止风机。同时要把电池从电位差计取出来。

6、实验数据的整理计算

1) 根据实验所测数据，通过计算或查表，进行数据整理，填写下表：

表 4—1

次数	气流温度			热电偶						微压差 (mm)	
	管前温度	管后温度	平均 (°C)	电位差 1	电位差 2	电位差 3	电位差 4	平均 (mv)	对应温度	倾斜压差	竖直压差
1											
2											
3											

2) 壁面平均放热系数 α

电加热器所产生的总热量 Q ，除以对流方式由管壁传给空气外，还有一部分是以辐射方式传出去的，因此，对流放热量 Q_c 为

$$Q_c = Q - Q_r = IV - Q_r$$

$$Q_r = \varepsilon C_0 F \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right]$$

Q_r —辐射换热量；

ε —试管表面黑度； $\varepsilon=0.6\sim 0.7$

C_0 —绝对黑体辐射系数； $C_0 = 5.67 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

T_w —管壁面的平均绝对温度 K；

T_f —流体的平均绝对温度 K；

F —管表面积 m^2 ；

根据牛顿公式，壁面平均对流传热系数为 $\alpha = \frac{Q_c}{(T_w - T_f)F}$ $[\text{W/m}^2 \cdot \text{K}]$

3) 空气流速的计算

采用毕托管在测速段截面中心点进行测量，由于实验风洞测速段分布均匀，因此不必进行截面速度不均匀的修正。

若采用倾斜式微压计测得的动压头为 H ，则由能量方程式：

$$\frac{P_1}{\gamma_{\text{空}}} + \frac{w^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma_{\text{空}}} + 0 \text{ 而 } P_2 - P_1 = (\gamma_{\text{水}} - \gamma_{\text{空}})H$$

$$w_{\text{测}} = \sqrt{\frac{2g}{\gamma_{\text{空}}}(P_2 - P_1)} = \sqrt{\frac{2g}{\gamma_{\text{空}}}(\gamma_{\text{水}} - \gamma_{\text{空}})H} = \sqrt{\frac{2gH(\rho_{\text{水}} - \rho_{\text{空}})}{\rho_{\text{空}}}}$$

式中： $\rho_{\text{水}}$ —微压计中水的密度； $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

$\rho_{\text{空}}$ —空气的密度，根据空气的平均温度与压强关系试确定。

$$\rho_{\text{空}} = \frac{1.293 \cdot P}{760(1 + 0.00367t)} \quad (P \text{ 是压强, } t \text{ 是温度})$$

H —动压头，用液柱高表示。

由上式计算所得的流速是测速截面处的流速，而准则式中的流速 W 是指流体流过试验管最窄截面的流速，由连续性方程：

$$w_{\text{测}} \cdot F_{\text{测}} = w (F_{\text{实}} - L \cdot d \cdot n)$$

式中： $F_{\text{测}}$ —测速处流道截面积； $[m^2]$ $F_{\text{测}}=150 \times 80 mm^2$

$F_{\text{实}}$ —放试管处流道截面积； $[m^2]$ $F_{\text{实}}=450 \times 150 mm^2$

L —实验管有效管长； $L=450 mm$

d —实验管外径； $d=40 mm$

n —实验管数； $n=1$

$w_{\text{测}}$ —测速处流体流速； $[m/s]$

w —实验管截面处流速； $[m/s]$

4) 确定准则方程式：

将数据代入，得到准则数，即可在 Nu_m 为纵坐标，以 Re_m 为横坐标的常用对数坐标图上，得到一些实验点，然后用直线连起来，因

$$\lg Nu_m = \lg c + n \lg Re_m$$

$\lg c$ 为直线的截距， n 为直线的斜率，取直线上的两点

$$n = \frac{\lg Nu_2 - \lg Nu_1}{\lg Re_2 - \lg Re_1}$$

$$c = \frac{Nu}{Re^n}$$

即可得出具体的准则方程式 $Nu = c Re^n$ 。

7、注意事项

- 1) 开启风机前，必须关闭风机挡板，空载启动。
- 2) 电压不能超过 180V。
- 3) 在一次风量测试过程中，不可改变调压阀门的开度。微压计液面上下波动时，应取波动的平均值。在改变阀门开度时，注意微压计的量程，以免水喷出微压计。
- 4) 在计算微压差时，应注意微压计的档位，是在“*2”档还是在“*4”档。
- 5) 实验完毕后，先切断实验管加热电源，待实验管冷却后再停止风机，以免实验管余留热量。同时要把电池从电位差计中取出来，以免电池被损坏导致电位差计被破坏。

镍铬—镍硅(镍铝)热电偶分度表
(自由端分度为 0℃)

附表 4—1

分度号: EU—2

温度 (℃)	电压 (mv)	温度 (℃)	电压 (mv)	温度 (℃)	电压 (mv)	温度 (℃)	电压 (mv)	温度 (℃)	电压 (mv)
-50	-1.86	220	8.93	500	20.65	780	32.46	1060	43.59
-40	-1.50	230	9.34	510	21.08	790	32.87	1070	43.97
-30	-1.14	240	9.74	520	21.50	800	33.29	1080	44.34
-20	-0.77	250	10.15	530	21.93	810	33.69	1090	44.72
-10	-0.38	260	10.56	540	22.35	820	34.10	1100	45.10
-0	-0.00	270	10.97	550	22.78	830	34.51	1110	45.48
+0	0.00	280	11.38	560	23.21	840	34.91	1120	45.85
10	0.40	290	11.80	570	23.63	850	35.32	1130	46.23
20	0.80	300	12.21	580	24.05	860	35.72	1140	46.60
30	1.20	310	12.62	590	24.48	870	36.13	1150	46.97
40	1.61	320	13.04	600	24.90	880	36.53	1160	47.34
50	2.02	330	13.45	610	25.32	890	36.93	1170	47.71
60	2.43	340	13.87	620	25.75	900	37.33	1180	48.08
70	2.85	350	14.30	630	26.18	910	37.73	1190	48.44
80	3.26	360	14.72	640	26.60	920	38.13	1200	48.81
90	3.68	370	15.14	650	27.03	930	38.53	1210	49.17
100	4.10	380	15.56	660	27.45	940	38.93	1220	49.53
110	4.51	390	15.99	670	27.87	950	39.32	1230	49.89
120	4.92	400	16.40	680	28.29	960	39.72	1240	50.25
130	5.33	410	16.83	690	28.71	970	40.10	1250	50.61
140	5.73	420	17.25	700	29.13	980	40.49	1260	50.96
150	6.13	430	17.67	710	29.55	990	40.88	1270	51.32
160	6.53	440	18.09	720	29.97	1000	41.27	1280	51.67
170	6.93	450	18.51	730	30.39	1010	41.66	1290	52.02
180	7.33	460	18.94	740	30.81	1020	42.04	1300	52.37
190	7.73	470	19.37	750	31.22	1030	42.43		
200	8.13	480	19.79	760	31.64	1040	42.83		
210	8.53	490	20.22	770	32.06	1050	43.21		