

《物理实验（二）》：金属热学性质的测量

【实验目的】

1. 掌握铂电阻测量物体温度的原理；
2. 强制对流冷却环境下、自然冷却环境下测量金属材料的比热容；
3. 了解热传导现象的物理过程，理解物体散热速率和传热速率的关系；
4. 掌握流体换热法测量金属材料导热系数的实验方法。

【实验 1：金属比热容测量】

单位质量的物质，其温度升高 1K（1°C）所需的热量叫做该物质的比热容，其值随温度而变化。比热容是一个重要的物理量，它是物质热学性质的一个特征量，对研究物质的宏观物理现象和微观结构之间的关系有重要意义。热学实验中测量比热容的方法有混合量热法、电热法和冷却法等。冷却法是 P.-L.杜隆和 A.T.珀替在其对热容的著名研究工作中引进的。若已知标准样品在不同温度的比热容，通过作冷却曲线可测量各种金属在不同温度时的比热容，无论实验方法还是数值计算都要求很仔细才能得到可靠的结果。

本实验以铜作为标准样品，在两种不同冷却环境下，测量金属铝样品在 100°C 时的比热容，了解金属的冷却速率与冷却环境的关系，并掌握冷却法测量金属比热容的实验方法。

一. 冷却法测量金属比热容实验原理

导体的电阻值随温度变化而变化，通过测量其电阻值可推算出被测物体的温度。PT100 就是利用铂电阻的阻值随温度变化而变化这一特性来进行测温。在 0°C 时，PT100 的阻值为 100Ω，它的阻值会随着温度上升而成近似匀速的增长，但它们之间的关系并不是简单的线性关系，而更趋近于一条抛物线，通常可通过查表的方式来得到较为准确的温度值。

将质量为 M_1 的金属样品加热后，放到较低温度的介质中（例如：室温的空气），样品将逐渐冷却，样品单位时间的热量损失（ $\Delta Q/\Delta t$ ）与温度下降的速率成正比：

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = C_1 M_1 \frac{\Delta \theta_1}{\Delta t} \quad (1-1)$$

式中 C_1 为金属样品在温度 θ_1 时的比热容， $\Delta \theta_1/\Delta t$ 为金属样品在 θ_1 时的温度下降速率。根据牛顿冷却定律：

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = a_1 s_1 (\theta_1 - \theta_0) \quad (1-2)$$

式中 a_1 为热交换系数， s_1 为样品外表面的面积， θ_1 为样品温度， θ_0 为周围介质温度。由式(1)和(2)，可得：

$$C_1 M_1 \frac{\Delta \theta_1}{\Delta t} = a_1 s_1 (\theta_1 - \theta_0) \quad (1-3)$$

同理，对质量为 M_2 ，比热容为 C_2 的另一种金属样品，可有同样的表达式：

$$C_2 M_2 \frac{\Delta \theta_2}{\Delta t} = a_2 s_2 (\theta_2 - \theta_0) \quad (1-4)$$

由式(3)和(4)，可得：

$$\frac{C_2 M_2 \frac{\Delta \theta_2}{\Delta t}}{C_1 M_1 \frac{\Delta \theta_1}{\Delta t}} = \frac{a_2 s_2 (\theta_2 - \theta_0)}{a_1 s_1 (\theta_1 - \theta_0)}; \text{ 继而得到: } C_2 = C_1 \frac{M_1 \frac{\Delta \theta_1}{\Delta t} a_2 s_2 (\theta_2 - \theta_0)}{M_2 \frac{\Delta \theta_2}{\Delta t} a_1 s_1 (\theta_1 - \theta_0)}$$

如果两样品的形状尺寸都相同，即 $s_1=s_2$ ；两样品的表面状况也相同（如涂层、色泽等），而周围介质

(空气)的性质也不变,则有 $\alpha_1=\alpha_2$ 。于是当周围介质温度不变(即样品室内温度恒定)而样品又处于相同温度 $\theta_1=\theta_2=\theta$ 时,上式简化为:

$$C_2 = C_1 \frac{M_1(\Delta\theta/\Delta t)_1}{M_2(\Delta\theta/\Delta t)_2} \quad (1-5)$$

若使两样品的温度下降范围 $\Delta\theta$ 相同, (5)式可进一步简化为:

$$C_2 = C_1 \frac{M_1(\Delta t)_2}{M_2(\Delta t)_1} \quad (1-6)$$

如果已知标准金属样品的比热容 C_1 质量 M_1 ; 待测样品的质量 M_2 及两样品在温度 θ 时冷却速率之比, 就可以求出待测的金属材料的比热容 C_2 。

常见金属材料的比热容公认值: 铜: $C_{\text{Cu}}=0.39\text{J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ 、铁: $C_{\text{Fe}}=0.46\text{J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ 、铝: $C_{\text{Al}}=0.88\text{J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

二、实验仪器

如图 1, FD-JSBR-B 型固体比热容实验仪由实验主机、加热器、样品室、风扇、PT100 铂电阻等组成。相关的技术参数如下:

金属样品: 铜、铝、铁各一个; 直径: 8mm; 长度: 65mm。

数字欧姆表: 量程: 0-199.99 Ω ; 分辨率: 0.01 Ω 。

温度传感器 Pt100: 温度分辨率不低于 0.1 $^\circ\text{C}$, 测量范围-200 $^\circ\text{C}$ ~400 $^\circ\text{C}$ 。

PTC 加热器: 工作电压 AC 30V; 稳定温度>200 $^\circ\text{C}$, 依室温略有浮动; 限制温度 260 $^\circ\text{C}$ 。



图 1 (左) 实验主机; (右) 加热器、样品室

三. 实验内容与步骤

1. 加热器与风扇通过电缆线分别连接至实验主机面板上的相应位置, 位于滑杆末端的两根引线为 PT100 铂电阻的两端, 通过手枪插与实验主机面板上的欧姆表相连。
2. 开启主机加热器电源, 预热 20 分钟左右。电子天平称量铜、铝、铁 3 个金属样品的质量, 并记录下来。
3. 强制对流冷却的环境下测量铝、铁样品在 100 $^\circ\text{C}$ 时的比热容
 - (1) 开启风扇电源, 打开样品室上盖, 将标准铜样品套在封装有 PT100 铂电阻的不锈钢圆柱上, 手动旋上样品底部的螺纹(不必旋得很紧), 盖回样品室上盖;
 - (2) 滑杆推到底使样品进入加热器, 观察 PT100 铂电阻的阻值。当铂电阻温度超过 115 $^\circ\text{C}$ 时, 拉出滑杆, 此时风扇对样品进行强制对流冷却(强制对流冷却时, 不要使其他热源靠近进风口, 并保持进、出风口的畅通)。参数设置中, 设置自动计时。主菜单, 光标移到【开始计时】, 按下确定, 当温度降低到 105 $^\circ\text{C}$ 时自动计时, 当温度降低到 95 $^\circ\text{C}$ 时自动停止, 记录所需时间 Δt , 重复测量 5 次。注: 因热传导产生的延后性, 铂电阻所测得的温度会上升一端时间后才开始下降。
 - (3) 样品温度降至 45 $^\circ\text{C}$ 以下(小心烫伤), 更换为金属铝、铁样品, 测量样品的 Δt 。

4. 自然冷却的环境下测量铝、铁样品在 100℃时的比热容

关闭风扇电源，用实验过程 3 中所述同样的方法测量并计算铝、铁样品的比热容，并与实验过程 3 所测得的结果作比较（更换样品时可用风扇冷却）。

表 1 样品由 105℃降至 95℃所需时间 Δt (s)

	强制对流冷却环境						自然冷却环境					
	1	2	3	4	5	Δt 平均值	1	2	3	4	5	Δt 平均值
铜												
铝												
铁												

5. 实验完成后关闭加热器，利用风扇为样品降温，而后取下样品，关闭风扇及实验主机电源。

【实验 2：流体换热法测量金属的导热系数】

利用稳态平板法测量热不良导体的导热系数，可以得到很精确的实验结果。但测量热的良导体的导热系数时，往往误差很大，其原因是样品是暴露在外面，以致测量时侧边的热损失比较严重。流体换热法采用冷却水的吸收低温端热量，并将样品密封以防止热量损失，可以较长时间保持待测样品热流恒定，从而保证即使是良导体样品，也可以达到很好的测量结果。

一、实验原理

如图 2，设有一粗细均匀的金属圆柱体，其一端为高温端 AA'，另一端为低温端 BB'，热量将从高温端流向低温端。高温端被加热一段时间之后，若圆柱体上各处的温度不变，而且向圆柱体侧面散失的热量也可以忽略时，则在相同时间内，通过圆柱体各横截面的热量应该相等，达到稳定导热状态。在 t 时间内，沿圆柱体各截面流过的热量 Q 满足：

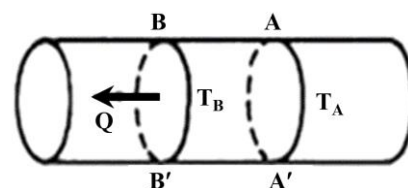


图 2 良导体导热系数测定的原理图

$$Q = \lambda S t \frac{T_A - T_B}{l} \quad (2-1)$$

式中 S 为圆柱体横截面积， T_A 、 T_B 为截面 AA'、BB' 处的温度， l 为截面间距离， λ 即为材料的导热系数。

由方程（1）可知，测定良导体导热系数的关键问题是维持热量稳定导热状态的同时，精确测定 t 时间内从圆柱体棒中所传过的热量 Q 。这个测量思想与稳态平板法是相同的，这里采用流体换热法。流体换热法是用一定温度、已知比热容的液体（通常用水）稳定流过向外传递热量的部件；液体因受热而温度升高，根据流过的液体质量、其温度升高的数值以及液体的比热容就可计算液体在流动期间内所传递的热量。因为一般液体的比热容较大，这个方法适用于测量单位时间内传递热量数值较大的情况（图 3）。

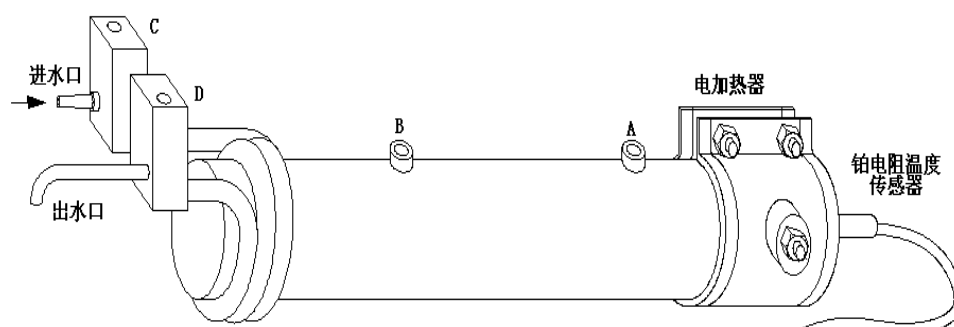


图 3 流体换热法原理图

稳定导热状态下， t 时间内流出的冷却水质量为 m ，温度由流入的 T_C 升高到 T_D ，则被水带走的热量为：

$$Q = mc(T_D - T_C) \quad (2-2)$$

式中 c 为水的比热容。

将式 (1) 以及 $S = \pi d^2/4$ (d 为圆柱体直径) 代入式 (2) 便可求出：

$$\lambda = \frac{4mhc(T_D - T_C)}{\pi d^2 t (T_A - T_B)} \quad (2-3)$$

为实现热量通过样品稳定流动的目的，该方法采用三项措施：（a）防止从圆柱体侧面向外界散发热量，将整个圆柱体用保温棉缠绕并放在保温箱中；（b）高温端热源采用精密温控器稳定热端的温度，以利于缩短试样热流达到稳定所需的时间；（c）采用液位控制器使流入仪器的冷却水保持恒定的水压，使冷却水的流速稳定，从而较长时间保持待测样品热流恒定。

二、实验仪器

FD-CHM-A 型良导体导热系数测量实验仪由实验仪主机箱、样品盒、四个集成温度传感器、铂电阻温度传感器、电加热器、PID 温控单元、液晶显示模块及具有流速控制功能的水箱等组成，如图 4。

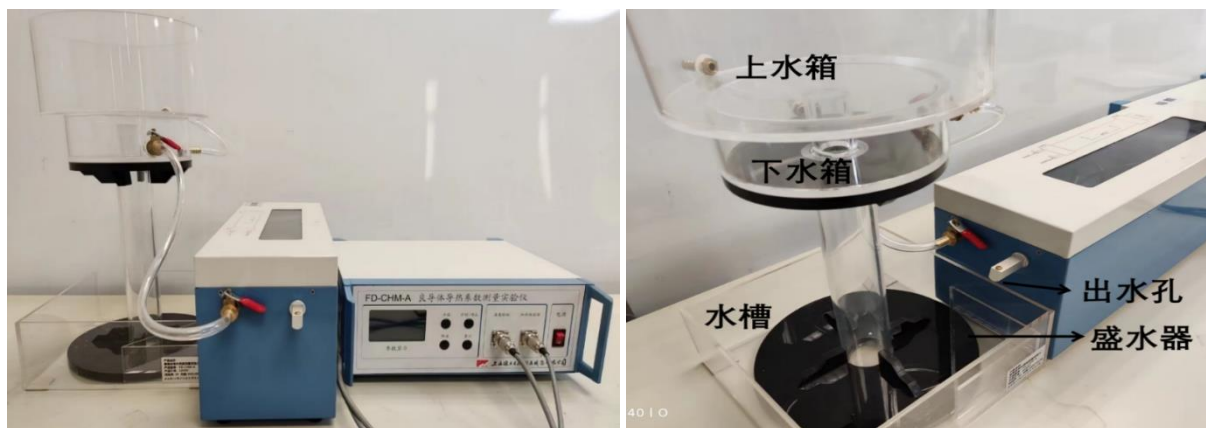


图 4 FD-CHM-A 型良导体导热系数测量实验仪

三、实验内容及步骤

1. 选择样品硬铝合金（黄铜样品选做），检查连线是否正确，方形水槽置于水口下方。
 2. 通过主机箱上“温度控制”的两个按键设置样品热端加热温度（70℃），开始对样品一端进行加热。
 3. 打开流管道上的各个水阀（水阀把手方向与水管方向平行为开启），注射器向最上方的水箱内注入冷水，直至中间水箱蓄水，并开始从中心管道下漏时，可认为中间水箱的水位基本恒定。调节水阀（只打开很小角度），使得单位时间内有适量的稳定流速的水流过样品冷却端（不宜过快）。
- 注：如打开阀门，出水口没有水流出。有可能水管中存在空气气泡，或者样品内部水管有杂质造成堵塞。
- （1）排出气泡：关闭下水箱阀门，进水口处拔出软管；打开下水箱阀门，将气泡冲出；冲出后，关闭下水箱阀门，重新插入软管。（2）抽出杂质：关闭下水箱阀门，下水箱阀门处拔出软管；拔出的软管，接上注射器，抽出样品内部水管中的杂质；抽出杂质后，重新插入软管。
4. 观察样品上 ABCD 四点温度值的变化，等待温度值稳定。此过程中，随时观察水箱中的水，保持时刻有水从中心管道下漏。水位过低时，用注射器从水槽中吸水补充到上水箱中。
 5. 待 ABCD 四点 5 分钟内温度值基本没有波动，记录四个温度值，干的三角型盛水器天平上称质量 m_1 。
 6. 如图 4 盛水器搁置在方形水槽一角，接出水口流出的热水，同时按下主机箱上“开始/停止”键，测量 100s 时间内三角型盛水器盛水后的质量 m_2 ，得出 100s 流出的水质量 Δm ，再次记录 ABCD 四点温度值。

表 2 良导体导热系数各部分温度

	$T_A/^\circ\text{C}$	$T_B/^\circ\text{C}$	$T_C/^\circ\text{C}$	$T_D/^\circ\text{C}$
测量开始				
测量结束				
平均值				

三角型盛水器质量 $m_1 =$ _____; $m_2 =$ _____; $\Delta m =$ _____; 测量时间 $t =$ _____。

8. 改变冷却水的流速或者样品热端的温度，多次做实验，并验证实验结果。

四、注意事项

1. 实验用的水要干净，不能带有残渣，以防止堵塞管道。用手指弹动水流管道，可排除管道中的气泡。若出水速度过慢，可用针型器物对各管道接口进行疏通。
2. 防止流速控制器下方盛水箱中的水溢出。使用完毕后，用注射器将所有水箱及管道内的水排干。

【数据处理】

1. **比热容实验：**报告上原始数据规范作表；利用两种冷却环境下的数据，以铜样品为标准，计算铝、铁样品的比热容；与公认值比较，分析误差，比较分析两种冷却环境下的实验结果。
2. **导热系数实验：**报告上原始数据规范作表；计算导热系数与标称值比较，计算相对误差；根据实验过程和数据分析，分析误差的关键原因，提出可行的实验改进方案。实验待测样品为圆柱体硬铝合金、黄铜，直径为 38.0mm，样品 A、B 之间的距离 l 为 80.0mm。其中硬铝合金导热系数参考值 $170\sim 180\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ，黄铜导热系数参考值 $110\sim 120\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ，水的比热 $c = 4200\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ 。

【思考题】

1. 冷却法测金属比热容的理论根据是什么？分析本实验中哪些因素会引起系统误差？
2. 分析流体换热法测量良导体导热系数时误差的来源，提出改进方案。

【附录】

Pt100 铂电阻分度表（-40℃—299℃）

温度 /℃	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	电阻值/Ω									
-40	84.27	83.87	83.48	83.08	82.69	82.29	81.89	81.50	81.10	80.70
-30	88.22	87.83	87.43	87.04	86.64	86.25	85.85	85.46	85.06	84.67
-20	92.16	91.77	91.37	90.98	90.59	90.19	89.80	89.40	89.01	88.62
-10	96.09	95.69	95.30	94.91	94.52	94.12	93.73	93.34	92.95	92.55
0	100.00	99.61	99.22	98.83	98.44	98.04	97.65	97.26	96.87	96.48
0	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51
10	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.40
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.73	110.12	110.51	110.90	111.29
30	111.67	112.06	112.45	112.83	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.15
40	115.54	115.93	116.31	116.70	117.08	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01
50	119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.47	122.86
60	123.24	123.63	124.01	124.39	124.78	125.16	125.54	125.93	126.31	126.69
70	127.08	127.46	127.84	128.22	128.61	128.99	129.37	129.75	130.13	130.52
80	130.90	131.28	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.57	133.95	134.33
90	134.71	135.09	135.47	135.85	136.23	136.61	136.99	137.37	137.75	138.13
100	138.51	138.88	139.26	139.64	140.02	140.40	140.78	141.16	141.54	141.91
110	142.29	142.67	143.05	143.43	143.80	144.18	144.56	144.94	145.31	145.69
120	146.07	146.44	146.82	147.20	147.57	147.95	148.33	148.70	149.08	149.46
130	149.83	150.21	150.58	150.96	151.33	151.71	152.08	152.46	152.83	153.21
140	153.58	153.96	154.33	154.71	155.08	155.46	155.83	156.20	156.58	156.95
150	157.33	157.70	158.07	158.45	158.82	159.19	159.56	159.94	160.31	160.68
160	161.05	161.43	161.80	162.17	162.54	162.91	163.29	163.66	164.03	164.40
170	164.77	165.14	165.51	165.89	166.26	166.63	167.00	167.37	167.74	168.11
180	168.48	168.85	169.22	169.59	169.96	170.33	170.70	171.07	171.43	171.80
190	172.17	172.54	172.91	173.28	173.65	174.02	174.38	174.75	175.12	175.49
200	175.86	176.22	176.59	176.96	177.33	177.69	178.06	178.43	178.79	179.16
210	179.53	179.89	180.26	180.63	180.99	181.36	181.72	182.09	182.46	182.82
220	183.19	183.55	183.92	184.28	184.65	185.01	185.38	185.74	186.11	186.47
230	186.84	187.20	187.56	187.93	188.29	188.66	189.02	189.38	189.75	190.11
240	190.47	190.84	191.20	191.56	191.92	192.29	192.65	193.01	193.37	193.74
250	194.10	194.46	194.82	195.18	195.55	195.91	196.27	196.63	196.99	197.35
260	197.71	198.07	198.43	198.79	199.15	199.51	199.87	200.23	200.59	200.95
270	201.31	201.67	202.03	202.39	202.75	203.11	203.47	203.83	204.19	204.55
280	204.90	205.26	205.62	205.98	206.34	206.70	207.05	207.41	207.77	208.13
290	208.48	208.84	209.20	209.56	209.91	210.27	210.63	210.98	211.34	211.70