

热工实验2 by 燕天润

1 正规状况法测定粒状材料热扩散率系数

1. 温差热电偶：一端在恒温水浴中，一端在试件的中心位置

a. 和电位计串联

2.

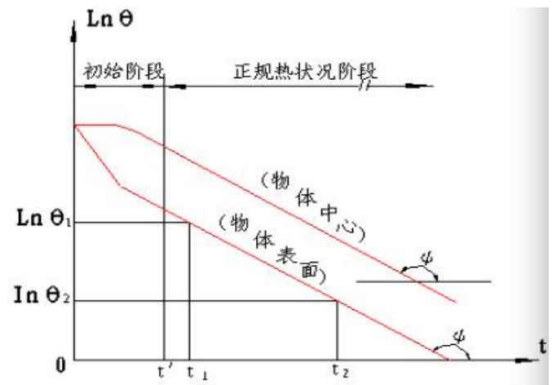
二、实验原理

1、正规状况法

- 初始阶段：温度分布主要受初始温度分布的控制。
- 正规状况阶段：温度分布主要受热边界条件的影响。
- 正规状况法是基于物体被加热或者冷却时，非稳态导热过程中的温度场变化规律来测定块状或粒状材料的热扩散系数。

2、热扩散系数(导温系数)

- 反映了加热或冷却时，物体内部各部分温度趋于一致的能力，反映了材料中传播温度变化能力的大小。



$$\text{热扩散系数: } a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad \text{m}^2/\text{s} \quad \lambda - \text{材料的热导系数 } \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$
$$\rho \cdot c_p - \text{单位体积 (m}^3\text{) 物体温度升高 } 1^\circ\text{C} \text{ 所需热量}$$

3、准则数

- 毕渥数 Bi 的定义: $Bi = \frac{\text{导热热阻}}{\text{对流热阻}} = \frac{\delta/\lambda}{1/h} = \frac{\delta h}{\lambda}$
- 傅里叶数的定义: $Fo = \frac{\tau}{(V/A)/a} = \frac{\text{换热时间}}{\text{边界热扰动扩散到}(V/A)^2\text{面积上所需时间}}$
- Fo 越大，热扰动就能越深入地传播到物体内部，因而，物体各点的温度就越接近周围介质的温度。

4、半径 R 长 L 的圆柱体初始温度均匀分布，突然将它浸入内有强烈搅拌且温度为 T_∞ ($T_\infty > T_0$) 的水浴中，考察柱体内各点温度的变化规律。当时间 τ 达到一定值后，

$$\theta = \theta_0 \cdot e^{-Bi \cdot Fo} = \theta_0 \cdot e^{-m\tau}$$
$$\ln(T_\infty - T) = -m\tau + C'$$
$$\frac{\partial(\ln \theta)}{\partial \tau} = -m$$
$$m = \frac{\ln \theta_1 - \ln \theta_2}{\tau_2 - \tau_1}$$

当物体加热或冷却过程进行了一段时间之后(初始阶段结束)，物体中各点过余温度的对数值将随时间呈线性下降规律，并且对于物体内部不同位置的点，此直线的斜率(-m)将保持不变。

5、半径 R 长 L 的圆柱体：二维导热问题。

可以看作是厚度为 L 的无限大平板和半径为 R 无限长的圆柱体的一维导热问题的组合。热扩散系数与斜率

6、热电偶

热电偶是温度测量仪表中常用的测温元件，是由两种不同成分的金属导体两端接合成回路时，当两接合点热电偶温度不同时，就会在回路内产生热电势。

7、UJ-36 直流电位差计使用方法

1. 首先将热电偶正负电极接在标有“未知”的二个接线柱上
2. 把倍率开关旋向所需位置上，旋转“调零”旋钮，使检流计指针指零
3. 将电键开关 K 扳向“标准”，调节 RP 使检流计 G 指零
4. 再将 K 扳向“未知”，旋动滑线盘及步进盘，使检流计 G 再次指零
5. 两个测量盘读数之和乘上倍率数即为被测量的热电势
6. 测试完成，把倍率开关关断，把热电偶从接线柱拆下

四、操作方法和实验步骤

- 1、将恒温水浴加满水，旋转电接点温度计顶端的磁铁帽，将水浴温度设定在 80°C 左右。把主、辅电加热器和电动搅拌器打开，开始加热和搅拌。当达到设定温度后，指示灯灭，关闭主加热器，由辅助加热器控制加热
- 2、然后打开电位差计，并进行调零（2 次）
- 3、待恒温水浴温度稳定后，将试件的温差热电偶的正负极分别接入电位差计的正负极；把试件放入恒温水浴，同时按下秒表开始记时，并每隔 30 秒记录一次电位差计 mV 数。当温差热电偶的热电势不再有明显变化时，即可停止记录（测量时间约 15 分钟左右）。把试件温差热电偶的正负极从电位差计的接线柱上断开，从恒温水浴取出试件置于冷水中冷却至室温
- 4、另取一个室温的试件重复第 3 步，一共做 3 个试件。

3. a 的单位： m^2/s

4. 斜管微压计标准工作液--酒精 0.810

5. m 是冷却率，K 为比例系数，其大小仅取决于物体的几何形状和尺寸

$$\ln(T_{\infty} - T) = -m\tau + C' \quad (5-30)$$

可见 $\ln(T_{\infty} - T) \sim \tau$ 是直线关系，根据式（5-29）由斜率 m 值可以求得材料的导温系数 a 。

式中 $\theta = (T_{\infty} - T) / (T_{\infty} - T_0)$ ，为无因次过余温度。

2 圆球法测定粒状材料导热系数

二、实验原理

1、两个同心放置的直径不同的薄壁空心圆球，两球之间充满一定密度的待测颗粒状材料。电加热器产生的热量 Q 将沿圆球表面法线方向通过颗粒状材料向外传递。

达到稳定状态时，根据稳定导热傅里叶定律：

$$Q = -\lambda A \frac{dt}{dr} = -\lambda \cdot 4\pi r^2 \frac{dt}{dr}$$
$$\text{积分得 } \int dt = \int -\frac{Q}{4\pi r^2 \lambda} dr \Rightarrow t = \frac{Q}{4\pi \lambda} \cdot \frac{1}{r} + C$$
$$\text{代入边界条件 } \begin{cases} r=r_1, t=t_1 \\ r=r_2, t=t_2 \end{cases} \text{ 消去 } C \text{ 得 } \begin{cases} \bar{\lambda} = \frac{Q(d_1 - d_2)}{2\pi(t_1 - t_2)} \\ Q = UI \end{cases}$$

注意 $\bar{\lambda}$ 是 $\frac{1}{2}(t_1 + t_2)$ 温度下的导热系数。

d_1, d_2 : 内球与外球直径/m	I : 通过电加热器电流/A	λ 是 $t_1 \sim t_2$ 范围内的平均 导热系数 $W/(m \cdot K)$
t_1, t_2 : 内球与外球壁温/ $^{\circ}C$	U : 电加热器两段电压/V	

2、导热系数

- 数值上等于在单位温度梯度作用下物体内热流密度矢量的模。
- 单位为: $W/(m \cdot K)$ 。
- 数值取决于物质的种类和温度等，表征物质的导热能力的大小。

3、保温材料

平均温度不高于 $350^{\circ}C$ 时，导热系数不大于 $0.12 W/(m \cdot K)$ (1992 年国标)。

4、热电偶冷端补偿问题

(1) 计算法

- 热电偶测温时，热端为 $t^{\circ}C$ ，冷端为 $t_0^{\circ}C$ ，测得的电势为 $E(t, t_0)$ 。
- 根据中间温度定律有: $E(t, 0) = E(t, t_0) + E(t_0, 0)$ ，可查表得 $E(t_0, 0)$ ，求出 $E(t, 0)$ ，查表得 t 。

(2) 冷端恒温法

- 热电偶测温时，如果保持冷端为 $0^{\circ}C$ ，则可直接应用分度表，所以将冷端放置到冰点槽中，冰点槽保持在 $0^{\circ}C$ 。

(3) 仪表机械零点调整法

当冷端温度比较稳定时，测出 t_0 ，将显示仪表零点调整到 t_0 ，热电偶电势输入后，便可指示出热端温度 t 。

(4) 补偿电桥法

- 在热电偶回路中串联一个不平衡电桥，此电桥输出的电压随冷端温度变化，从而修正热电偶冷端温度波动引起的误差。

2、测定仪特点

测量温度 ≤ 200 摄氏度	加热电流 $< 1A$	加热电压 $< 80V$
测量材料: 颗粒状固体材料	稳定时间 2~4 小时	导热系数测量精度 < 10

1. 误差分析:

- 使用直流电位差计时，手动调节滑线盘及步进盘并读数，肉眼观察检流计 G 是否归零，电压表和电流表的使用，有读数误差。
- 受重力等因素的影响，圆球内的电阻丝分布不完全均匀，使得表面温度有差异

3 横管表面空气自然对流传热

三、主要实验装置设备

1、主要由加热系统和测试系统组成。

- 加热系统：实验横管、电加热器等
- 测试系统：热电偶温度传感器、电功率表、多功能采集板和计算机等

2、各装置作用

- 六根横管挂在密封的测试间里,以减小因人员走动而引起的空气扰动对实验工况的影响。
- 每根横管内放置电加热器作为热源,电加热端连接有功率表以测量发热功率得到发热量 Q 。
- 每根横管的外表面嵌有三对 T 型热电偶,以测量横管的外壁温度 t 。
- 空气温度由两个 T 型热电偶上下分布,最后读数取平均值。

四、操作方法和实验步骤

- 1、联接实验装置的线路(电加热器的电源由直流稳压电源提供,而壁温热电势信号由电子电位差计测量)
- 2、将直流稳压电源的输出电压调至某一设定值并保持不变,直至实验系统进入稳定状态(大约需要 4 个小时,故在实验测量前已完成)
- 3、在热电偶补偿端的冰瓶中加入冰块,形成冰水混合物,使热电偶的补偿端温度保持在 0°C
- 4、将面板上热电偶信号的接线柱与电子电位差计的接线柱连接,打开电子电位差计,并认真调零
- 5、分别按下 1、2、3 号琴键开关,接通第 1、第 2、第 3 号热电偶,测量三个不同位置壁温的热电势信号并记录,每隔 3 分钟重复测量一次,共测量 3~4 次
- 6、记录下其它各组横管的实验数据,进行数据处理,并最终得出实验准则方程式
- 7、不同热负荷条件下的实验,只要调节变压器改变电加热器功率,重复上述实验步骤。

1. 室内空气扰动,会产生什么后果?

- 空气的扰动会破坏横管表面空气自然对流的稳定状态,改变横管表面的温度场分布,使得横管表面温度波动,带来较大的误差。

2. 热管是一种高效传热元件,它将沸腾和凝结两种相变换热过程巧妙地结合

3. 实验原理

2、加热的水平横管,其表面具有均匀的壁温 t_w ,周围环境空气温度为 t_f 。当 $t_w > t_f$ 时,横管附近空气受到加热升温,密度变小而引起浮升力,形成自然对流换热。由系统热平衡可得到:

$$\begin{array}{l} Q = UI \quad Q = Q_R + Q_C \quad \textcircled{1} \quad (\text{单位为 W}) \\ \text{对流换热 } Q_C = hA\Delta t \quad \textcircled{2} \\ \text{辐射散热 } Q_R = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma_0 \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right] \quad \textcircled{3} \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} Q = UI \\ Q = Q_R + Q_C \\ Q_C = hA\Delta t \\ Q_R = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma_0 \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right] \end{array}} \right\} \text{由 } \textcircled{1}, \textcircled{2}, \textcircled{3} \text{ 可得 } h$$

4. 准则数和准则数方程

3、根据相似理论，自然对流的准则方程可整理成：

$$Nu = C(G_r \cdot Pr)^n$$

取对数后： $\ln Nu = \ln C + n \ln(Gr \cdot Pr)$

式中： Nu ——努塞尔数， $Nu = \frac{hD}{\lambda}$ ；

Gr ——葛拉晓夫数， $Gr = \frac{g\alpha D^3 \Delta t}{\nu^2}$ ；

Pr ——普朗特数，对于空气，见附录

5. 格拉晓夫数 Gr 范围是多少可达到紊流状态？ $Gr > 10E9$

6. 实验中横管的真空度很高。（T）

4强迫对流--空气横掠单管时平均表面传热系数的测定

1. 斜管微压计

a. 优点：使用方便、可视性强。由于有放大功能，使得测量较为准确，能测量微小差压，且适合变工况动态测量。

b. 步骤

- （1）测量正压时，待测压力与容器相通；测量负压时与倾斜管相通；测量压差时较高的压力与容器相通，而较低压力与倾斜管相通。
- （2）使用前应用仪器底板左右两个调整螺调节水准仪的位置，将微压计调到水平。
- （3）测量前用液面零位调整活塞调节倾斜管中的液位，使其保持零位。
- （4）使用标称工作液密度 $\rho = 0.810 \text{ g/cm}^3$ 。若不同时，可根据下式换算
- （5）测量时将读数乘以管支架上固定点的刻度值，如0.1、0.2、0.3、0.4、0.6、0.8等，即可得到待测压力值（mmHO）。

2. 改变工作点的方法？

- 自然对流：改变管径或电压
- 强制对流：改变管径或流速

3. 绕流脱体--强化散热--位置取决于 Re

4. 准则数

- a. 普朗特数 $Pr = \nu / \alpha$ 动量扩散和热量扩散的能力比
- b. 努塞尔数 $Nu = hD / \lambda$ 对流换热的强弱
- c. 雷诺数 $Re = uD / \nu$ 流体流速 特征长度 流体的运动黏度 惯性力和粘性力之比

5. 准则方程--用特征数表达的计算关系式

- a. 空气温度变化不大时， Pr 可以看做常数。通过改变管径或者流体流速改变 Re ，测 Nu ，找两者的关系
- b. 除此之外，还用到牛顿冷却方程和伯努利方程

6. 测量方法

☒ 测量空气流速：毕托管+倾斜式微压计，测出试验段中空气来流的动压力头 Δh 毫米水柱，计算得到空

气来流的速度 u 。空气流速可调整 6~7 个工况。

☒ 测定加热功率：电位差计+标准电阻 R ，测定试验段内的电压降 V 和流过试验管的工作电流 $I = \Delta V/R$ 。

加热电流可根据管子直径及风速大小适当调整，保持管壁与空气间有适当的温度差。

☒ 测量来流温度 t_f ：水银温度计。

☒ 确定管壁温度 t_w ：铜-康铜热电偶+电位差计。管壁很薄，仅 0.2 ~0.3 毫米，可认为 $t_{wi} = t_{wo}$ 。

7. 步骤

- 1.开启电位差计，进行二次调零。调整倾斜式微压计水平及零位。
- 2.将风机出口喇叭形风门关闭，开启风机,然后把风门开到最大，读取斜管微压计读数。
- 3.接通硅整流电源，红灯亮;调节变压器至零伏开机，绿灯亮。
- 4.转换开关置 mV 档,缓慢调节变压器，监视电位差计读数，使得过余电动势3.0~4.0mV；待加热、风速稳定后，测单管壁温与气温过余温差，温差=mV 数 $\times 23.1^{\circ}\text{C}/\text{mV}$ 。
- 5.转换开关置 V 档，测加热电压，电压数=mV 数 $\times 0.201\text{V}/\text{mV}$ 。
- 6.转换开关置 A 档，测加热电流，电流数=mV 数 $\times 1\text{A}/\text{mV}$ 。
- 7.加热电流不变，调小风门，改变 8~9 次风速，待加热、风速稳定后，重复测量。
- 8.试验结束先调节变压器到零位，再关硅整流电源；3 分钟后，关风机电源。
- 9.关闭电位差计电源，把倾斜式微压计开关打到校准位置。

8. 变工况调节

- a. 提高热负荷时须先开大风门，后增加工作电流
- b. 减少热负荷时必须先减小工作电流，后关小风门。

9. 控制温差 $<100^{\circ}\text{C}$ ，约 $<4\text{mV}$

10. 硅整流设备具有什么特点？

- 硅整流设备具有低电压、大电流的特点。
- 电压低，保证了实验人员的安全；电流大，使得实验加热功率足够大。

11. 为什么横管的辐射传热可以忽略不计？

- 假设考虑辐射传热，且认为试件是黑体的情况下，计算的最大的辐射换热量为 0.84W，占对流传热的 6%，所以可以忽略不计。

空气横掠单管时平均表面传热系数的测定

1. 将风机出口喇叭形风门反向开至最大时，开启风机。√
2. 接通硅整流电源，绿灯亮；调节变压器至零伏开机，红灯亮。X
3. 试验结束关闭顺序正确的是（a）
 - a. 调节变压器到零位---关硅整流电源--关风机电源--关电位差计，倾斜式微压计复位
 - b. 调节变压器到零位--关风机电源--关电位差计，倾斜式微压计复位---关硅整流电源
 - c. 调节变压器到零位--关电位差计，倾斜式微压计复位---关风机电源---关硅整流电源

5发射率测定

1. 原理图
 - a. 感温元件得到的辐射有哪几部分、净辐射能包括哪几部分
2. 法向发射率（即发射率）：实际物体的辐射力 E 总是小于同温度下黑体的辐射力 E_b ，两者的比值称为实际物体的发射率（Emissivity），通常称为黑度。记为： ϵ
 - a. 物体表面的发射率取决于物质种类、表面温度和表面状况。只与发生辐射的物体本身有关
3. 金属的发射率与表面温度成正比，而非金属的发射率与表面温度成反比。
4. 3的面积远小于1，所以3对1的辐射忽略不计
5. 3的净辐射量=3向温度 T_2 环境所释放的热量
6. 基本原理：
 - 封闭空腔由待测表面1，人工黑体筒2，热感温表面3组成。
 - 三个表面具有不同温度，表面3的温度受到表面1加热后向其热辐射的影响。
 - 在相同温度下，不同辐射率的物体，对热感温元件表面3的热辐射不同，导致其表面温度不同：辐射率越大，表面3温度越高。
7. 待测试样、黑体腔--恒温热水
 - 零点校正腔、感温元件--冷水
8. 待测试样装在有水套的样品盒上
 - a. 为了使试样的温度均匀一致：样品盒与套管式水冷却管之间装有热绝缘块。
 - b. 为了使输出热电势增大：装置使用热电堆作为接收器的吸热面。
9. 温度保持
 - a. 接收器同样装有水套，将接收器水套与套管式水冷却管水套相连，并由一台恒温水浴供给冷却水，使二者具有相同的恒定温度。

- b. 标准表面体（人工黑体表面）的加热水套与样品盒的加热水套套管式水冷却管水套相连，并由一台恒温水浴供给冷却水，使二者具有相同的恒定温度。

10. 实验步骤

- a. 用橡皮管将热水及冷水循环系统连接好，感温元件平面热电堆的引出线接二次仪表。
- b. 开启恒温水浴，旋转水浴上 **电接点温度计** 顶端帽形磁铁，使热水调到约80℃，冷水调到冷水的温度，将待测试样紧固在样品室底部，开启水泵开关，进行加热。
- c. 待冷、热水温度稳定后，调好二次仪表的零点，开始测量。先将**感温件腔**对准**零点校正腔**，记录二次仪表的读数；再移动箱体，使**黑体腔与感温元件所在腔体对准**，同样记下二次仪表输出数。然后再移动箱体，使**试件所在的箱体与感温元件对准**，记录二次仪表的输出数。重复进行三次。

11. 思考题

1、材料表面状态（抛光、不抛光、涂层等）与n的关系如何？

同样材料，相同温度下，抛光<不抛光<涂层。

2、测定法向辐射率有何实际意义？

选择发射率不同的材料，提高热量的利用率。

- 工业炉的炉膛、发热元件如果涂上高发射率材料，能促进辐射传热，可达到节能的目的。
- 太阳集热器采用选择性吸收涂层材料，提高表面对辐射能量吸收。
- 飞机表面涂低辐射率的材料。

3、待测试件的厚度是否影响测试结果？对于不良导体是否适用？

会。待测试件的厚度加大后，表面温度会降低，对外辐射减弱，待测材料和黑体的表面温度不相同，会使得测量结果偏小。

对不良导体不适用，因为不良导体表面的温度会小于对照黑体表面的温度。

4、试分析影响测试准确性的因素。

- (1) 系统误差：黑体腔和被测材料腔与感温元件腔的不一定完全对准。
- (2) 读数误差：检流计的读数可能有误差。
- (3) 温度误差：被测材料表面和黑体材料表面的温度不一定一致；恒温水浴的温度稳定性不一定很好

6热工综合试验台

1. 换热器

- a. 间壁式--夹套式、板式、管壳式、套管
- b. 混合式--冷却塔
- c. 蓄热式（介质混合要求较低）

2. 各个参数怎么测定?
 - a. 水侧--流量+温度
3. 喷嘴法测空气流量
 - a. 喷嘴设置在风机出口和被测换热器之间
 - b. 喷嘴两侧的静压差=出口的动压（进口动压和阻力忽略不计）
 - c. 伯努利方程得到流速
 - d. 计算空气流量，把试件条件换算成标准条件
4. 风机
 - a. 风系统中的所有电加热器，必须在风机工作后才能通电。
 - b. 实验结束后，应先切断加热器电源，待电加热管冷却后，再停风机。
5. 平衡点温度不刻意去调，平衡在哪里用哪里
6. 热水箱的温度怎么控制到稳态
 - a. 电热丝--固定的/可变的
 - b. 可变的用PID来控制
 - c. PID控制了（原理无需掌握）：冷热水箱、增速器、空气加热的一路
7. 冷水箱的温度怎么控制到稳态（7.5℃）
8. 冷水箱用制冷剂制冷--怎么控制温度湿度？
9. 环境分别高于和低于指定温度时，分别应该怎么调节
10. 制冷机组功率大--冷凝器散热用冷却塔
11. 冷却塔的开启顺序--冷却系统先开
12. 冷却塔的工作原理
13. 水侧--变速器和仪表
14. 气测--喷嘴+斜管微压计
15. 测绝对压力--大气压读数+斜管微压计测压差
16. 参数调节
 - a. 流量和风速--变频器
 - b. 调节风速原理？这里不是调节风门的大小，而是改变风机输入电压电流的频率
17. 热工试验台的辅助功能
 - a. 校验涡轮流量计 称重法的基础上调仪表的系数 称重测量装置(称重水箱和电子台称)

18. 制冷机的四大部件？压缩机、冷凝器、节流装置、蒸发器

19. 能做的其他实验

- A.管内水流量测量
- B.管内空气流量、流速测量
- C.冷水机组 性能测定
- D.冷却塔 性能演示实验
- E.组合式空调机组 性能演示实验
- F.表面式空气换热器热工 性能测定

20. 风速要求

- a. 湿球温度--3.5-10 m/s
- b. 喷嘴流量计出口流速--15-35 m/s
- c. 水速0.15-2
- d. 通过被测换热器的迎面风速控制在 1~7m/s 之间。
- e. 被测换热器进风干球温度波动不超过+0.2℃。
- f. 被测换热器进水温度波动不超过+0.1℃。

21. 水侧和空气侧的计算

1、被测换热器水侧换热量计算

$$Q_w = C_{p,w} \cdot m_w \cdot (t_{w2} - t_{w1})$$

式中：

Q_w ——被测换热器水侧换热量，kw

m_w ——通过被测换热器热水平均流量，kg/s

$C_{p,w}$ ——水的定压比热，kJ/(kg·℃)

t_{w2} 、 t_{w1} ——进入和离开被测换热器的热水温度，℃

2、被测换热器空气侧换热量计算

$$Q_a = G \times \rho \times (h_2 - h_1)$$

$$h_1 = 1.005t_1 + d(2501 + 1.86t_1)$$

$$h_2 = 1.005t_2 + d(2501 + 1.86t_2)$$

$$G = C_n \cdot N \cdot A \sqrt{2\Delta P / \rho}$$

$$\rho = \frac{P(1 + d)}{461 \cdot T \cdot (0.622 + d)}$$

- G：通过喷嘴的空气流量。测量风量
- ρ ：喷嘴处空气密度

- mw: 涡流流量传感器直接测水流量

22. 被测试换热器

- ☒ 水温的测试精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
- ☒ 风温的测试精度自动控制在 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$
- ☒ 风量的测试精度为 $\pm 1\%$
- ☒ 水量的测试精度为 $\pm 1\%$ (涡轮流量计测)
- ☒ 热平衡偏差小于 $\pm 3\%$

23. 试验台简介

- 整个试验装置由风路系统、水路系统、电气系统以及计算机辅助测试系统四部分所组成。
- 风路系统主要由空气预处理设备、空气取样设备、空气流量测量设备、被测换热器、风道风阀和消声整流设备组成。水路系统分为换热器水系统和表冷器水系统，其中换热器水系统主要由被测换热器、热水箱、称重水箱、换热器泵、涡轮流量变送器、水管和阀门组成：表冷器水系统主要由冷水箱、表冷器泵、冷冻水泵、冷却水泵、玻璃转子流量计、表冷器、制冷机、冷却塔、管道和阀门组成。电气系统主要由电控柜、PID数显调节仪表、交流变频器、电加热器等组成。计算机辅助测量系统由高精度温度传感器、差压变送器、涡轮流量变送器、空气温湿度取样装置等组成，可采集系统各部位的温度、压力、流量等数据，并可作相关运算。

24. 水银气压计的使用步骤

- 调节旋钮使得指针恰好接触水银液面。
- 调节上部旋钮，使得游标零位和水银的凸液面相切。
- 读出此时的气压值即可。