

第三章 传热传质学

实验一：固体导热系数测定实验

导热系数是个重要的热物理参数，反映材料的热工性能，是鉴别材料保温性能优良的主要标志，对工程设计有重要作用。导热系数的应用十分广泛，特别是在石油、化工、材料、军工生产等部门的有关传热设计中是必不可少的。为了使工程设计合理，节省能源和原材料，提高产品的质量，都需要有准确且可靠的导热系数等热物理参数的资料。

本实验所用设备精度高，测试速率快。具有较大的导热系数测试的范围，可用于各种不同类型的材料，广泛应用在高等院校和生产过程的材料分析检测。

一、实验目的

使用导热系数测试仪采用热流法对材料导热性能进行测试，适用于测试固体材料的导热系数。

二、实验原理

基于无限大介质中阶跃加热的圆盘形热源产生的瞬态温度响应。利用热阻性材料做成一个平面的探头，同时作为热源和温度传感器。合金的热阻系数—温度和电阻的关系呈线性关系，通过了解电阻的变化可以知道热量的损失，从而反映了样品的导热性能。该方法的探头即是采用导电合金经刻蚀处理后形成的连续双螺旋结构薄片，外层为双层的绝缘保护层，厚度很薄，它令探头具有一定的机械强度并保持与样品之间的电绝缘性。在测试过程中，探头被放置于样品中间进行测试。电流通过探头时，产生一定的温度上升，产生的热量同时向探头两侧的样品进行扩散，热扩散的速度依赖于材料的热传导特性。通过记录温度与探头的响应时间，由数学模型可以直接得到导热系数。

三、实验步骤

1.制样：样品研磨到直径小于等于 30mm，高小于 20mm 得圆柱，样品底面与圆柱体轴得垂直度不大于 0.02mm，样品两端面得不平度小于 0.02mm。如果试样过薄，可采用多层叠加得办法。

2.装样：同时拧下两颗加压系统上得螺母，取下固定板，将把手拉起。装上厚度测试工具并记录其读数。在样品得两个面以及上下热极的断面涂覆层导热硅脂，将样品放置在上下热极之间进行合轴装配，然后加压（如果软性试样则不需加压），并将热极和样品间挤出的多余硅脂擦掉，装上反射屏。将把手放下，装上固定板，同时拧紧螺母。并再次记录测量工具的读数，两个读数的差值即为样品的厚度，并记录下来。

3.打开超级恒温箱水循环开关，主机电源开关，仪器加热开关和软件测试程序。具体步骤：

①按下 SET 键，开始设置温度；②按移位键改变设置位置；③利用加，减键对温度进行调整。设置超级恒温箱 SV 温度比 PV 温度高 5-10℃。注意观察温度端口是否正常，设置热极温度比 SV 温度高 100℃。输入试样面积和厚度，点击“加热”“开始测试”，仪器进入测试状态，测试完成后，点击“保存结果”并导热系数数据。

4.重复步骤可反复测试试样。按打印报告，实验数据传到 EXCEL，可修改，编辑，另存。关闭主机电源与超级恒温箱电源，取出样品并清理测试仪残余的导热硅胶，清理工具整理桌面

四、测量装置简介

仪器主要由测试头，测控系统，冷却恒温水槽，计算机系统组成。测试头由加热器，连接样品的上下热极，冷却器，测量热电偶，加压系统组成。加热器采用不锈钢材料加工而成，内装内热式加热器，由高精度数显温控表控温，提供稳定的热极温度。上下热极由不锈钢制成，表面安装有热电偶，热极的作用式传递热量和测试热量。冷却器也是不锈钢材料加工而成，内有水槽，通过导管与外恒温水槽相连，利用外恒温水槽与冷却器的水循环，才冷却器种形成第二恒温场，提供下热极冷端稳定温度。测量热电偶由 4 支组成，分别测量上，下热极表面的四个温度点，利用温度梯度计计算热流量。加压系统用于消除试样与热极的热阻。

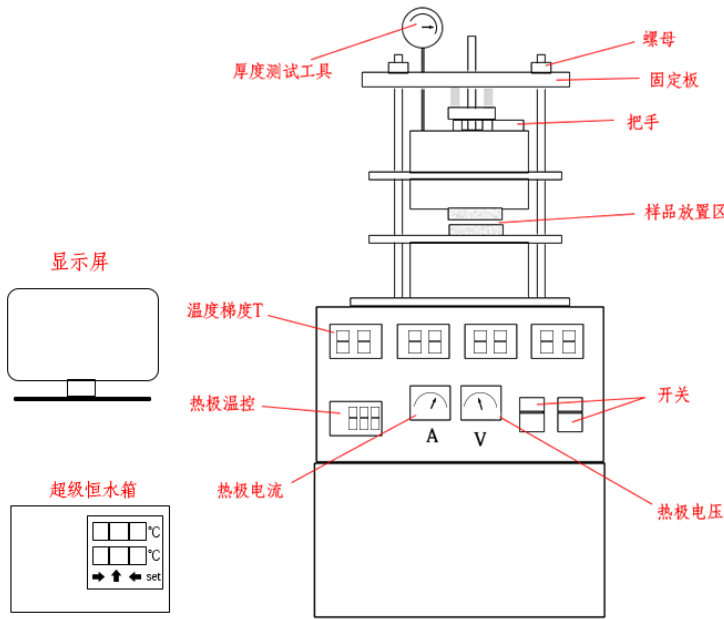


图 3-1-1 导热系数测试仪结构图

（一）样品及仪器的主要参数

试样大小：直径 30mm

试样厚度：0.01mm~2mm 或 0.1mm~45mm

试样直径：30mm 或者 50mm

测试温度范围：不大于 300.0℃

导热系数范围：0.005~10w/ (m.k)

测试精度：3%

热扩散率测量精度：5%

比热测量精度：7%

电源：220V/50HZ

操作采用全自动热分析测试软件，快速准确对样品进行试验分析和报告输出。

数据记录和计算

1.导热系数的计算

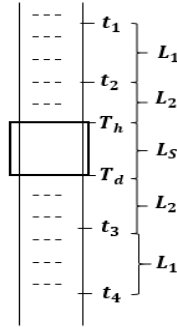
$$\lambda_s = \frac{QL_s}{A_s \Delta T} \quad (3-1-1)$$

式中： λ_s 为测定样品的导热系数，W/mK； A_s 为垂直于热流方向的样品截面积， m^2 ； Q 为通过样品的热流量，W； L_s 为样品厚度，m； ΔT 为样品冷热两表面的温差，K。

$$\Delta T = T_h - T_d \quad (3-1-2)$$

式中： T_h 为与试样接触的高测量块的温度，K； T_d 为与试样接触的低测量块的温度，K。

$$T_h = t_2 - \frac{L_2(t_1 - t_2)}{L_1}, \quad T_d = t_3 + \frac{L_2(t_3 - t_4)}{L_1}$$



2.通过样品的热流量计算

$$Q = A_{cu} \frac{\lambda_{cu}(t_1 - t_2)}{L_1} \quad (3-1-3)$$

式中： A_{cu} 为垂直于热流方向的铜热极截面积， m^2 ； λ_{cu} 为铜热极的导热系数，W/mK； L_1 为 t_1 与 t_2 之间的距离，m；最后化简得样品导热系数计算公式：

$$\lambda_s = \frac{1}{A_s} \times \frac{A_s \lambda_{cu}(t_1 - t_2) L_s}{L_1(t_2 - t_3) - L_2[(t_1 - t_2) + (t_3 - t_4)]} \quad (3-1-4)$$

注意事项：

样品最大直径为 30mm，可改变大小，改变时在面板中输入实际面积

注意水管接口：入-出，出-入；热极温度不能大于 300℃

五、实验结果分析（检测结果报告示例）

导热系数检测结果报告

送检单位：	机械工程学院	试样名称：		试样类别：	
检测仪器：	KY-DRX-RW导热仪	执行标准：	D5470	环境温度：	23.5° C
检测单位：	东莞理工学院	测试员：	张三	检测日期：	2019/4/2 星期二

序号	样品名称	热面温度	冷面温度	样品厚度	样品面积	热流量	样品热阻	导热系数
1	涂覆层导热硅脂样品	47.41	38.48	10.5	400	0.097	368.027	0.285
		(°C)	(°C)	(mm)	(mm ²)	(W)	(cm ² ·K/W)	(W/mK)

六、思考题

- 1.使用本设备测量导热系数，对样品有什么要求？
- 2.产生实验误差的原因有哪些？

实验二 液体导热系数测定实验

一、实验目的

1. 用稳态法测量液体的导热系数
2. 了解实验装置的结构和原理，掌握液体导热系数的测试方法。

二、实验原理

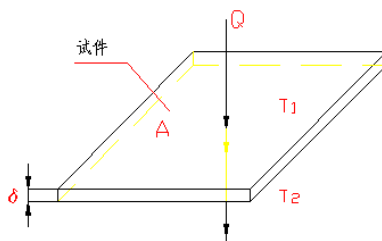


图 3-2-1 测试原理图

如图 1 测试原理图所示，平板试件（这里是液体层）的上表面受一个恒定的热流强度 q 均匀加热

$$q=Q/A \quad (3-2-1)$$

根据傅里叶单向导热过程的基本原理，单位时间通过平板试件面积 A 的热流量 Q

$$Q = \lambda \left(\frac{T_1 - T_2}{\delta} \right) A \quad (3-2-2)$$

从而，试件的导热系数 λ

$$\lambda = \frac{Q\delta}{A(T_1 - T_2)} \quad (3-2-3)$$

式中： A 为试件垂直于导热方向的截面积， m^2 ； T_1 为被测试件热面温度， $^{\circ}C$ ； T_2 为被测试件冷面温度， $^{\circ}C$ ； δ 为被测试件导热方向的厚度， m 。

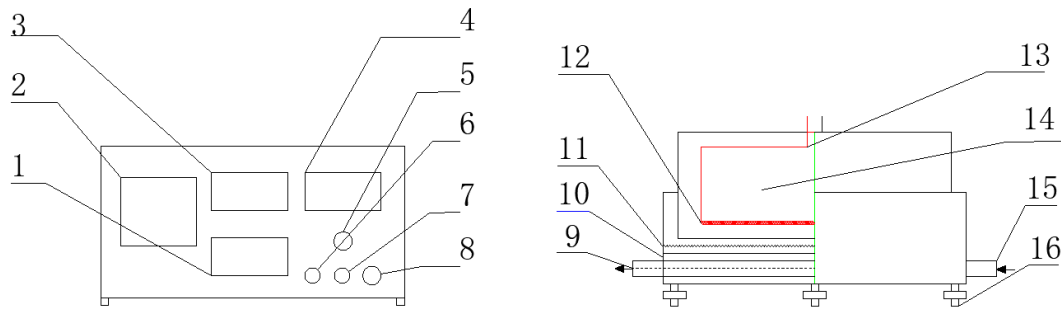
三、实验装置

装置如图 2 所示，主要由循环冷却水槽、上下均热板、测温热电偶及其温度显示部分、液槽等组成。

为了尽量减少热损失，提高测试精度，本装置采取以下措施：

1. 设隔热层 5，使绝大部分热量只向下部传导。
2. 为了减小由于热量向周围扩散所引起的误差，取电加热器中心部分（ $0.15 \times 0.15m$ ）作为热量的测量和计算部分。
3. 在加热器底部设均热板，以使被测液体热面温度（ T_1 ）更趋均匀。
4. 设循环冷却水槽 2，以使被测液体冷面温度（ T_2 ）恒定（与水温接近）。

5.被测液体的厚度 δ 是通过放在液槽中的垫片来确定的,为防止液体内部对流传热的发生,一般取垫片厚度 $\delta \leq 2\text{—}5\text{ mm}$ 为宜。



- 1-加热电压 2-温控表 3-加热电流 4-测量电压 5-功率调节旋钮 6-水泵开关
7-加热器开关 8-电源开关 9-循环水出口 10-均流循环水槽 11-被测液体
12-加热热源 13-加热导线 14-绝热保温材料 15-循环水进口 16-调整水准的螺丝

图 3-2-2 实验装置简图

四、实验步骤

- 1.将选择好的三块垫片按等腰三角形均匀地摆放在液槽内（约为均热板接近边缘处）。
- 2.将被测液体缓慢地注入液槽中，直至淹没垫片约 0.5 mm 为止，然后旋转装置底部的调整螺丝，并观察被测液体液面，应是被测液体液面均匀淹没三片垫片。
- 3.将上热面加热器轻轻放在垫片上。
- 4.接通循环冷却水槽上的进出水管，并调节水量。
- 5.接通电源，调整输入电压（ V_1 ）达到其预定值（注意热面温度不得高于被测液体的闪点温度）。
- 6.按下 14.电流转换开关，并记录测量部位电压 V_2 及通过的电流 I 。
- 7.每隔 5 分钟左右从温度读数显示器记下被测液体冷、热面的温度值（ $^{\circ}\text{C}$ ）。建议将它们记入如表一的记录表中，并标出各次的温差 $\Delta T = T_1 - T_2$ 。当连续四次温差值的波动 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ 时，试验即可结束。

表 3-2-1 温度 T_1 , T_2 读数记录表

实验次数		1	2	3	4	5	6	7	8	备注
记录时间										
T_1	$^{\circ}\text{C}$									
T_2	$^{\circ}\text{C}$									
ΔT	$^{\circ}\text{C}$									

8. 试验完毕后，切断电源、水源并关闭电位差计。

五、思考题

1. 如何减少实验过程中的误差？
2. 所测液体的导热系数与液体的温度存在什么关系？

实验三：空气横掠单管强迫对流换热系数测定实验

一、实验概述

对流换热系数是衡量传热性能的重要参数，求解表面传热系数是传热计算的实验、工程中的重难点。本实验基于空气横掠单管对流换热模型，要求计算不同风速和热负荷下，空气与单管换热的表面传热系数，并利用实验数据建立努塞尔数（ Nu ）和雷诺数（ Re ）的准则方程。有助于加深学生对于传热学常用无量纲数与表面传热系数概念的理解，掌握表面传热系数的计算和相关物理量的测定方法。此外，空气横掠平板对流换热实验也可参考本实验的实验方法。

二、实验目的

1. 了解对流换热的基本实验研究方法。
2. 测定空气横向掠过单管表面时的表面传热系数 h ，掌握毕托管压力与风速的换算。
3. 了解 Re 、 Nu 、 Pr 三个无量纲数的定义并掌握基本计算方式，将结果整合为关联式。
4. 比较实验测量得出的关联式与教科书上准则式的区别，并分析差别原因。

三、实验原理

空气由风机吸入实验管段，与实验段中部的实验管进行热量交换。实验管段前后布置了温度传感器以测定进出风温度。实验管中部沿径向均匀布置了四只温度传感器，测定数值在巡检仪上分别显示为加热 1、2、3、4 的温度。测速毕托管置于测速段，以压力形式显示在巡检仪上，通过公式换算可得到空气流速。实验段前后布有压差计，显示实验段前后的压力差，即巡检仪上显示的前后阻力。

实验的主要目的之一是计算表面传热系数 h 。获得表面传热系数的表达式大致可以通过分析法、实验法、比拟法、数值法四种方法。而本实验中对流换热计算以牛顿冷却公式作为基础。

1. 表面传热系数的计算公式

$$h = \frac{Q_c}{(T_w - T_f)A} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{K}) \quad (3-3-1)$$

式中： T_w 为实验管壁平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ； T_f 为实验前后流体平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ； A 为管壁换热面积， m^2 ； Q_c —— 对流换热量， W 。

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

$$Q_c = Q - Q_r = IV - Q_r \quad (3-3-2)$$

$$Q_r = \varepsilon C_0 A \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right] \quad (3-3-3)$$

式中 Q_r 为辐射换热量， W ； ε 为实验管表面黑度，材料为铜 $\varepsilon = 0.06$ ； C_0 为绝对黑体辐

射系数, 取 $5.67 W/(m^2 \cdot K^4)$ 。

本实验的首要目的是建立 Nu、Re、Pr 之间的关联式。为计算雷诺数 $Re=ud/\nu$, 需要测定空气流速, 毕托管是一种借测量流体总压力与静压力之差来计算流速的仪器。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。

仪器测得毕托管压差为 P, 由伯努利方程:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + 0 \quad (3-3-3)$$

$$P = P_2 - P_1$$

$$u_{\text{测}} = \sqrt{\frac{2}{\rho} P} \quad (3-3-4)$$

式中: ρ ——空气的密度;

P ——动压。

由上式计算所得的流速 $u_{\text{测}}$ 是测速截面处的流速, 而准则式中的流速 $u_{\text{试}}$ 是指流体流过试验管截面的流速, 由连续性方程:

$$u_{\text{测}} \cdot A_{\text{测}} = u_{\text{试}} (A_{\text{试}} - L \cdot d \cdot n) \quad (3-3-5)$$

$$u_{\text{试}} = \frac{u_{\text{测}} \cdot A_{\text{测}}}{A_{\text{试}} - L \cdot d \cdot n} \quad (3-3-6)$$

式中: $A_{\text{测}}$ ——测速外流道截面积; $[m^2]$

$$F_{\text{测}} = 0.1 \times 0.055 \quad (m^2)$$

$A_{\text{试}}$ ——放试管处流道截面积; $[m^2]$

$$F_{\text{试}} = 0.3 \times 0.1 \quad (m^2)$$

L ——试验管有效管长; $L = 0.295m$

d ——试验管外径; $d = 0.037m$

n ——试验管数; $n = 1$

$u_{\text{测}}$ ——测速段流体流速; $[m/s]$

$u_{\text{试}}$ ——试验管截面处流速; $[m/s]$

完成表面传热系数与空气流速计算后，即可建立 Nu、Re、Pr 之间的关联式。

根据传热学理论，表面传热系数与流速、管径、温度、流体物性等有关，并可用下列准则方程式关

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (3-3-7)$$

空气横掠单管换热时，实验关联式为：

$$Nu = C \cdot Re^n \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (3-3-8)$$

在定常性温度下(t_m)，普朗特数 Pr 可视为常数，故 (3) 简化为：

$$Nu = C' Re^n \quad (3-3-9)$$

式中

Nu — 努塞尔数， $Nu = \frac{hd}{\lambda}$ ，

Re — 雷诺数， $Re = \frac{ud}{\nu}$ ，

Pr — 普朗特数，

$$C' = C \cdot Pr^{\frac{1}{3}} = C \cdot \overline{Pr}^{\frac{1}{3}} \quad (3-3-10)$$

C, n — 由实验确定的常数，

t_m — 定性温度由下式确定：

$$t_m = \frac{(t_w + t_f)}{2} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3-3-11)$$

准则角码 m 表示用流体边界层平均温度 $t_m = \frac{1}{2}(\bar{t}_w + \bar{t}_f)$ 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：

$$Nu_m = C Re_m^n \quad (3-3-12)$$

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：电加热的

功率 N (即电加热器所产生的总热量 Q)、管壁温度 \bar{t}_w 、空气温度 \bar{t}_f 、测试段动压 P 。至于表面传热系数 h 和流速 u 在实验中无法直接测量，可通过计算求得，而物性参数可在有关书中查到。得到一组数据后，即可得一组 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。

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

$$\lg Nu_m = \lg C + n \lg Re_m \tag{3-3-13}$$

$\lg C$ 为直线的截距， n 为直线的斜率，取直线上的两点

$$n = \frac{\lg Nu_2 - \lg Nu_1}{\lg Re_2 - \lg Re_1} \tag{3-3-14}$$

$$C = \frac{Nu}{Re^n} \tag{3-3-25}$$

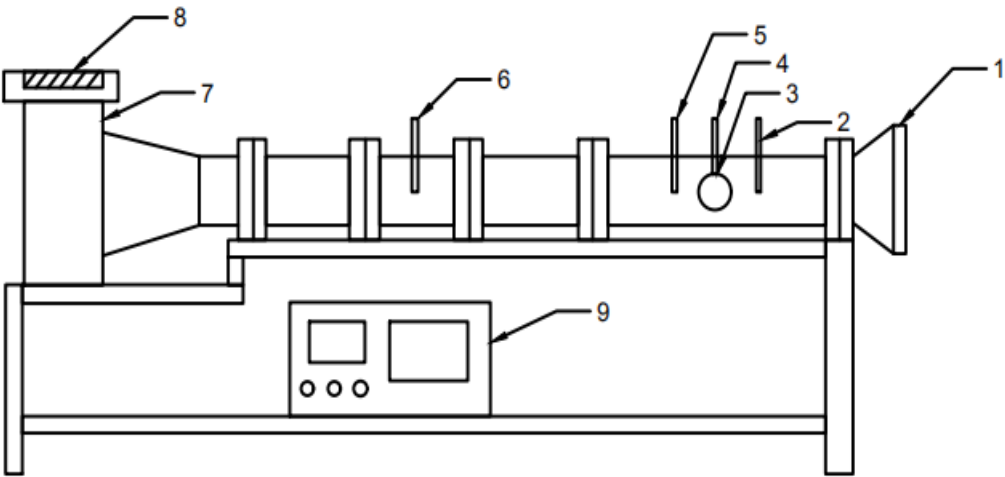
即可得出具体的准则方程式 $Nu = C Re^n$

表 3-3-1 C 与 n 取值表

Re	C	n
0.4~4	0.989	0.330
4~40	0.911	0.385
40~4000	0.683	0.466
4000~40000	0.193	0.618
40000~400000	0.0266	0.805

四、实验设备

实验台结构如实验原理中图 3-3-1 所示。实验装置主要由实验风洞本体（实验风洞为吸入式



风洞)、风机、实验管、电加热器、电测温度计、U 型管压力计、笛型管、电流表、电压表以及电子调压器组成。

1-进风口；2-流体进口温度测量热电偶；3-实验单管；4-单管表面温度测量热电偶；5-流体出口温度测量热电偶；6-毕托管；7-引风机；8-风速控制板（新版设备不设）；9-控制面板

图 3-3-1 实验台示意图

空气经集流器整流格栅稳流后，进入实验段。实验段的中部装有实验管，管内部放置了电

加热器，通电后作为热源，由电子调温装置调整其加热温度；管内壁面上沿径向均匀镶嵌了 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 四只测温传感器，用于测量试验管壁表面平均温度 \bar{t}_w ；实验管前后适当距离布置了 t_5 、 t_6 两只测温传感器，用于测量气流的平均温度。测速毕托管置于流速段，测速段截面较试验段小，以使流速提高，测量准确。在风机的出风口设有风量调节器，通过挡板开合改变实验风洞中的气流速度（新版设备可直接通过控制台旋钮改变）。

五、实验内容与步骤

- 1.检查设备。检查热电偶、毕托管以及传感器等设备是否安装完好。
- 2.打开加热器和引风机。接通电源，打开引风机，调整至合适风速，打开加热器并调节功率到 80W 左右。当实验管表面温度稳定后（壁温在三分钟内保持读数不变，即可认为已达到稳定状态），开始记录巡检仪上的数据（记录于表格 2），每隔 1 分钟记录一组数据，并求出平均值作为计算数据。巡检仪可通过点按右三角“▷”键切换手动/自动巡检。
- 3.改变风速记录多组数据。通过改变引风机出风口风量调节板（新版通过控制面板的调节旋钮）来控制风道内的空气流速，待工况稳定后，记录巡检仪的数据，每隔 1 分钟记录 1 组数据，并求出平均值。流速由小到大，根据毕托管压力读数，可改变多个风速值。
- 4.改变电加热器功率，重复上述步骤，记录为实验二和实验三。
- 5.整理仪器。实验数据记录结束后，关闭加热器，待单管表面温度降低至 40℃ 以下时，关闭引风机。最后，关闭电源并整理实验台。
- 6.进行实验数据的整理和计算，对实验结果进行分析和讨论。
- 7.完成实验报告。

六、注意事项

- 1.实验过程中，先启动风机，检查部件正常运转后，再开启加热器。
- 2.在调节加热器功率时，应缓慢旋转电加热器功率旋钮以免调节过快。
- 3.确保测定进出口温度的两个测温头已塞入测温管底部。
- 4.风机电机运转一段时间后温度较高，请勿触碰以免烫伤。
- 5.风机风量较大，入风口附近请勿放置物品。

七、结果处理与分析

- 1.记录实验数据，填写实验原始数据记录表（表 2）。
- 2.完成实验数据处理（表 3），并绘制 $\lg Nu - \lg Re$ 图像以得出 Nu 与 Re 之间的关联式。空气参数可根据风道平均温度 t_f 查教科书附录表。
- 3.通过测量计算出平均换热系数 $h_{\text{实验}}$ ，通过 Chilton-Colburn 比拟准则式计算出平均换热系数 $h_{\text{计算}}$ ，绘制在横坐标为风速，纵坐标为 h 的坐标图上，试分析图像与图像形成的原因。
- 4.思考题：

I.如何改进实验装置以减少表面传热系数测定的误差？

II.影响表面传热系数的因素有哪些，这些因素的变化会引起表面传热系数如何变化？

III.将得到的 Nu-Re 关联式与课本中的雷诺比拟与 Chilton-Colburn 比拟两个准则式相比较，计算 c 与 n 的误差，并分析误差形成的原因。

八、实验表格

表 3-3-2：空气横掠单管强迫对流换热系数测定实验数据记录表格

实验一

数据名称	加热 1 温度 (°C)	加热 2 温度 (°C)	加热 3 温度 (°C)	加热 4 温度 (°C)	进风温度 (°C)	出风温度 (°C)	加热功率(W)	毕托管压力 (Pa)	测试段阻力
记录 1									
记录 2									
记录 3									
平均值									

实验二

数据名称	加热 1 温度 (°C)	加热 2 温度 (°C)	加热 3 温度 (°C)	加热 4 温度 (°C)	进风温度 (°C)	出风温度 (°C)	加热功率 (W)	毕托管压力 (Pa)	前后阻力 (Pa)
记录 1									
记录 2									
记录 3									
平均值									

实验三

数据名称	加热 1 温度 (°C)	加热 2 温度 (°C)	加热 3 温度 (°C)	加热 4 温度 (°C)	进风温度 (°C)	出风温度 (°C)	加热功率 (W)	毕托管压力 (Pa)	前后阻力 (Pa)
记录 1									
记录 2									
记录 3									
平均值									

表 3-3-3：空气横掠单管强迫对流换热系数测定实验数据计算表格

数据名称	空气流速 $u(m/s)$	Re	Nu	总热量 $Q(W)$	对流换热 热量 $Q_c(W)$	辐射换热 热量 $Q_r(W)$	$h_{\text{实验值}}$	$h_{\text{计算值}}$
实验一								
实验二								
实验三								

实验四：中温法向辐射率测量实验

一、概述

辐射是指能量以电磁波或粒子的形式向外扩散。辐射传热广泛应用于航空事业、工业锅炉及太阳能集热器中，对材料表面覆盖涂层是提高光谱吸收比的有效手段，也是提高集热器效率的重要措施。

二、实验目的

1. 了解测量物体表面法向辐射率的基本原理，加深对法向辐射的理解。
2. 熟悉仪器及操作步骤，测定典型辐射表面的法向辐射率。
3. 用比较法，定性地测量中温辐射时物体的黑度 ϵ 。

三、实验装置

实验装置包括实物和电气控制部分，实物由绝热腔体、温度传感器、热源、传导体和受体组成。通过热传导使热源和传导体的测量点稳定在同一温度，并采用比较法测量物体的法向辐射率。通过温控仪监控温度，调压旋钮及调压模块来调节加热器的功率。实验装置主要结构包括 1 热源，2 传导圆筒，3 待测物体。

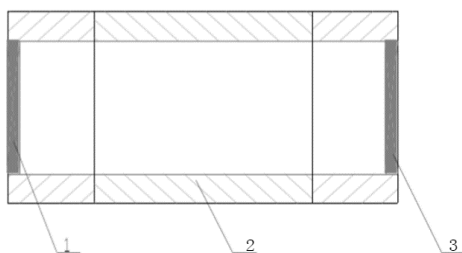


图 1 辐射换热简图

四、实验原理

在由 n 个物体组成的辐射换热系统中，利用净辐射法，可以求物体 i 的纯换热量 $Q_{\text{net},i}$ 。

$$Q_{\text{net},i} = Q_{\text{abs},i} - Q_{e,i} = \alpha_i \sum_{k=1}^n \int_{F_k} E_{\text{eff},k} \psi_i(dk) dF_k - \epsilon_i E_{b,i} F_i \quad (3-4-1)$$

式中： $Q_{\text{net},i}$ 为 i 面的净辐射换热量； $Q_{\text{abs},i}$ 为 i 面从其他表面的吸热量； $Q_{e,i}$ 为 i 面本身的辐射热量； ϵ_i 为 i 面的黑度； $\psi_i(dk)$ 为 k 面对 i 面的角系数； $E_{\text{eff},k}$ 为 k 面有效的辐射力； $E_{b,i}$ 为 i 面的辐射力； α_i 为 i 面的吸收率； F_i 为 i 面的面积。

根据本实验的设计，传导圆筒 2 为黑体；热源腔体端面 1，传导圆筒 2，受体 3，它们表面上的温度均匀。

因此, 3-4-1 可写成:

$$Q_{net.3} = \alpha_3(E_{b.1}F_1\psi_{1.3} + E_{b.2}F_2\psi_{2.3} + \varepsilon_3E_{b.3}F_3)$$

因为 $F_1 = F_2$; $\alpha_3 = \varepsilon_3$; $\psi_{2.3} = \psi_{1.2}$ 又根据角系数的互换 $F_2\psi_{2.3} = F_3\psi_{3.2}$, 则 3-4-2:

$$q_3 = Q_{net.3} / F_3 = \varepsilon_3(E_{b.1}\psi_{1.3} + E_{b.2}\psi_{1.2}) - \varepsilon_3E_{b.3} = \varepsilon_3(E_{b.1}\psi_{1.3} + E_{b.2}\psi_{1.2} - E_{b.3}) \quad (3-4-2)$$

由于受体 3 与环境主要以自然对流方式换热, 因此:

$$q_3 = h_d(t_3 - t_f) \quad (3-4-3)$$

式中: h_d 为换热系数; t_3 为待测物体 (受体) 温度; t_f 为环境温度。

由 3-4-2、3-4-3 得:

$$\varepsilon_3 = \frac{h_d(t_3 - t_f)}{E_{b.1}\psi_{1.3} + E_{b.2}\psi_{1.2} - E_{b.3}} \quad (3-4-4)$$

当热源 1 和黑体圆筒 2 的表面温度一致时, $E_{b.1} = E_{b.2}$, 并考虑到, 体系 1,2,3, 为封闭系统, 则:

$$\psi_{1.3} + \psi_{1.2} = 1$$

由此, 3-4-4 可写成:

$$\varepsilon_3 = \frac{h(t_3 - t_f)}{E_{b.1} - E_{b.3}} = \frac{h(t_3 - t_f)}{\sigma_b(T_1^4 - T_3^4)} \quad (3-4-5)$$

式中: σ 称为斯蒂芬——玻尔茨曼常数, 其值为 $5.7 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$.

对不同待测物体 (受体) a, b 的黑度 ε 为:

$$\varepsilon_a = \frac{h_a(T_{3a} - T_f)}{\sigma(T_{1a}^4 - T_{3a}^4)}$$

$$\varepsilon_b = \frac{h_b(T_{3b} - T_f)}{\sigma(T_{1b}^4 - T_{3b}^4)}$$

设 $h_a = h_b$, 则

$$\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_b} = \frac{T_{3a} - T_f}{T_{3b}^4 - T_f^4} \cdot \frac{T_{1b}^4 - T_{3b}^4}{T_{1a}^4 - T_{3a}^4} \quad (3-4-6)$$

当 b 为黑体时, $\varepsilon_b \approx 1$, 3-4-6 可以写成:

$$\varepsilon_a = \frac{T_{3a} - T_f}{T_{3b}^4 - T_f^4} \cdot \frac{T_{1b}^4 - T_{3b}^4}{T_{1a}^4 - T_{3a}^4} \quad (3-4-7)$$

根据 3-4-6, 本实验所用计算公式为:

$$\frac{\varepsilon_{\text{受}}}{\varepsilon_0} = \frac{\Delta T_{\text{受}}(T_{\text{源}}^4 - T_0^4)}{\Delta T_0(T_{\text{源}}^4 - T_{\text{受}}^4)} \quad (3-4-8)$$

式中: ε_0 为相对黑体的黑度, 该值可假设为 1; $\varepsilon_{\text{受}}$ 为待测物体 (受体) 的黑度; $\Delta T_{\text{受}}$ 为受体与环境的温差; ΔT_0 为黑体与环境的温差; $T_{\text{源}}$ 为受体为相对黑体时热源的绝对温度; $T_{\text{源}}$ 受体为被测物体时的热源绝对温度; T_0 为相对黑体的绝对温度; $T_{\text{受}}$ 为待测物体 (受体) 的绝对温度。

五、实验步骤

通过改变三组加热源温度 (热源一组, 导体二组), 使热源和导体的测量点稳定在同一温度上, 然后分别测出“待测物体” (受体为待测物体, 具有原来的表面状态) 和“黑体” (受体仍为待测物体, 但表面熏黑) 两种受体在恒温条件下受到辐射后的温度, 再根据公式计算出“待测物体”的黑度。

步骤一: 将受体腔 (先用“待测”状态的受体) 对正靠近导体。

步骤二: 接通电源, 调整热源、导体左、导体右加热棒的调压旋钮, 使热源温度处在某一温度下, 通过温控仪测量热源、导体左、导体右的温度, 并根据测得的温度微调相应的调压旋钮, 使三点温度尽量一致。

步骤三: 系统温度稳定 (各测温点基本接近, 误差不超过 2°C , 且在五分钟内各点温度波动小于 3°C) 后, 开始记录受体温度, 当受体温度五分钟内的变化小于 3°C 时, 记下一组数据, 分别为热源温度, 导体左测温度, 导体右测温度, 受体温度。

步骤四: 取下“待测物体”, 将受体更换为“黑体”, 然后重复以上实验, 测得第二组数据。

将两组数据代入公式 (8) 即可得出待测物体的黑度 $\varepsilon_{\text{受}}$, 即待测物体辐射率为 $\varepsilon_{\text{受}}$ 。

六、数据记录

1.记录表格

表 1 中温法向辐射率测量实验数据记录表

序号	热源/℃	传导/℃		受体/℃	备注
		1 (左)	2 (右)		
1					室温： T= ℃
2					
3					
平均值					
序号	热源/℃	传导/℃		受体/℃	
		1 (左)	2 (右)		
1					
2					
3					
平均值					

2.计算，以上数据代入式 (8)，求出黑度。

七、注意事项

1.热源及传导体的温度不可超过 95°C ，热源及导体调节电压不宜超过 100V ；实验过程中不要直接和腔体接触，以免烫伤。

2.做实验时，热源腔体和“待测物体”的腔体要紧密接触，不能有缝隙。

3.在做实验前，需检查待测物体表面及黑体表面，确保待测物体表面光洁，否则用酒精将表面擦净，确保黑体表面黑度均匀，否则用蜡烛进行表面熏黑。

八、实验报告

分析腔体内温度的分布情况对实验结果的影响。

九、思考题

1. 分析随着热源温度的升高，受体黑度的变化规律。
2. 分析热源与受体之间的距离改变对实验结果的影响。

十、仪器说明

1.仪器一

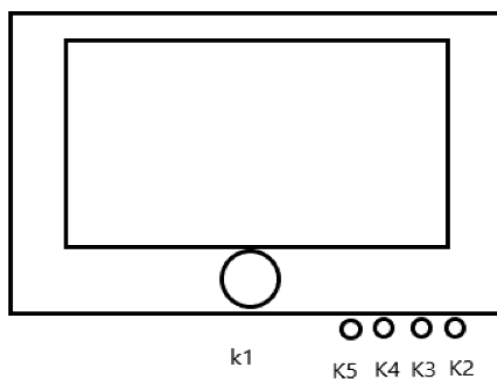


图 2 仪器面板

面板按钮说明：K1 为开机/说明/设置；K2 为退出；K3 为查看设定/加；K4 为起动停止开关/减；K5 为计时器清零/进位。

操作一：开机

打开电源后指示灯频闪，按 K1 即可正常工作，此时 K3 可查看设定温度，K4 是起动/停止开关，此时按 K1 可进入说明页，再按返回工作状态。

操作二：设置

在工作状态下按 K1 不放（大于 2 秒）即可进入设置状态，此时按 K1 作设置选择，按 K2 退出。

最高温度设定：此时 K3 是加，K4 是减，K1 是设置选择/保存，K2 是退出/保存。

设置时间：此时 K3 是加、K4 是减、K5 是进位、K2 保存退出。

2.仪器二

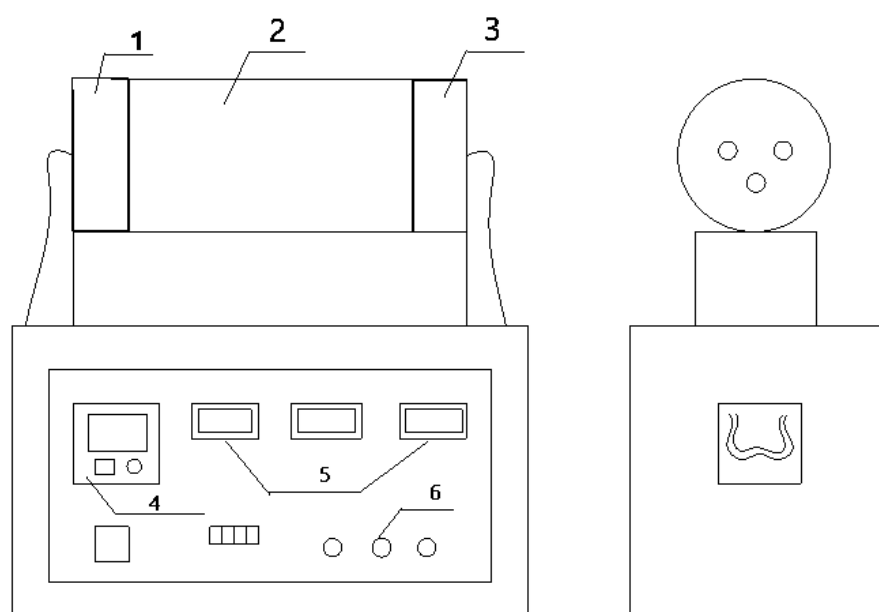


图 3 实验装置简图

1—热源、2—传导圆筒、3—受体、4—数显测温

5—调压指示、6—调压旋钮

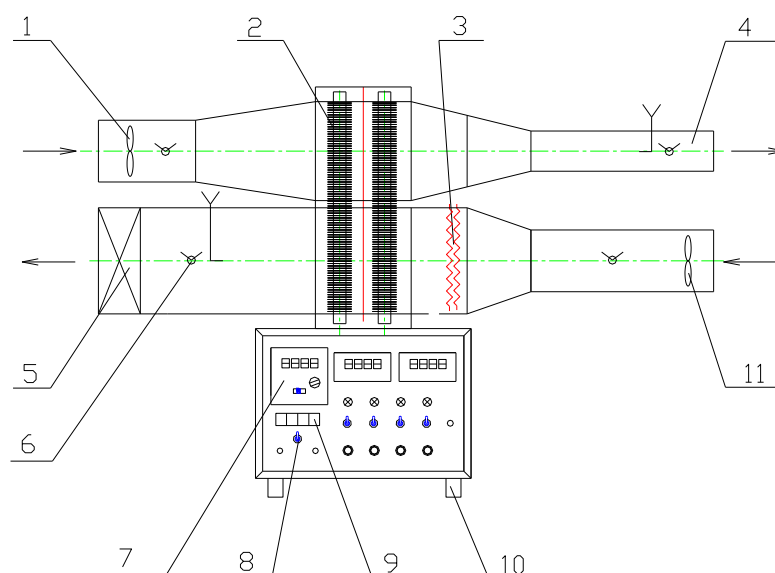
实验五：热管换热器性能测试实验

一、实验目的

- 1.了解热管换热器实验台的工作原理；
- 2.熟悉热管换热器实验台的使用办法；
- 3.掌握热管换热器换热量 Q 和传热系数 K 的测试和计算方法。

二、实验台的结构及其工作原理

热管换热器实验台的结构如图 1 所示。实验台由翅片管(整体绕制)、热段风道、冷段风道、冷段和热段风机、电加热器(I—450W, II—1000W)、热电偶、琴键开关、热球风速仪(独立仪表用户自备)、冷段热电偶接线柱、电位差计接线柱和支架等组成。



1—冷段风机 2—热管换热器 3—电加热器 4—冷段出风口 5—热段出风口
6—测温元件 7—温度数显表 8—温度符号表 9—琴键开关 10—支架 11—热段风机

图 3-5-1 实验台结构示意图

热段中的电加热器使空气加热，加热后的空气经热段风道时，通过翅片热管进行换热和传递热量，从而使冷段风道的空气温度升高。利用风道中的热电偶对冷、热段的进、出口温度进行测量，并用热球风速仪对冷、热段的出口风速进行测量，从而可以计算出换热器的换热量 Q 和传热系数 K 。

三、实验台参数

- 1.冷段出口内径 $D=60mm$
- 2.热段出口内径 $D=160mm*75mm$

- 3.冷段传热表面参数：翅片管长 140mm；钢管直径 21mm；翅片直径 40mm；翅片个数 52 个
- 4.热段传热表面参数：翅片管长 140mm；钢管直径 21mm；翅片直径 40mm；翅片个数 52 个
- 5.笛形管修正系数
- 热端：动压修正系数 $\zeta=0.845$ ；流量修正系数 $\alpha=0.925$
- 冷端：动压修正系数 $\zeta=0.943$ ；流量修正系数 $\alpha=0.980$
- 6.换热器面积 $1.662m^2$

四、实验步骤

- 1.将热电偶、电加热器、风机与电控箱联接；
- 2.接通电控箱风机 1、2 开关，测出并记录此时的风速；
3. 接通加热 1、2 开关，并右旋调温旋钮，直至加热功率达到工况 I—450W 左右；
4. 待工况稳定后（约 40 分钟后），按下琴键开关，切换测温点，逐点测量并记录冷、热段进口 t_{L1} 、 t_{L2} 、 t_{R1} 、 t_{R2} ，间隔 5 分钟记录一组数据，共记录三组数据；
5. 继续右旋调温旋钮，使加热功率达到工况 II—1000W 左右，待工况稳定后（约 40 分钟后），按下琴键开关，切换测温点，逐点测量并记录冷、热段进口 t_{L1} 、 t_{L2} 、 t_{R1} 、 t_{R2} ，间隔 5 分钟记录一组数据，共记录三组数据；
6. 实验结束后，首先左旋调温旋钮至电压为零，断开加热 1、2 开关，使风机继续运转 5 分钟，断开风机 1、2 开关，再切断电源。

五、实验数据整理及记录

计算换热量、传热系数及热平衡误差：

- 1.冷段换热量计算

$$Q_L = \rho_L \bar{v}_L \cdot F_L \cdot C_{PL} (t_{L2} - t_{L1}) \quad (3-5-1)$$

- 2.热段换热量计算

$$Q_R = \rho_R \bar{v}_R \cdot F_R \cdot C_{PR} (t_{R2} - t_{R1}) \quad (3-5-2)$$

- 3.热平衡误差计算

$$\delta = \frac{(Q_R - Q_L)}{Q_R} \quad (3-5-3)$$

- 4.传热系数计算

$$K = \frac{Q_L}{f_i \Delta t} \quad (3-5-4)$$

$$\Delta t = \frac{t_{r1} + t_{l2}}{2} - \frac{t_{r2} - t_{l1}}{2} \quad (3-5-5)$$

式中： \bar{v}_L, \bar{v}_R 为冷、热段出口平均风速, m/s ; F_L, F_R 为冷、热段出口断面面积, m^2 ; $t_{L1}, t_{L2}, t_{R1}, t_{R2}$

为冷、热段进出口温差, $^{\circ}C$; ρ_L, ρ_R 为冷、热段出口空气密度, kg/m^3 ; f_l 为冷段传热面积, m^2 。

表 3-5-1 实验数据记录表格

工况	序号	风速 m/s		冷、热段进出口温度/ $^{\circ}C$				备注
		冷段 \bar{v}_L	热段 \bar{v}_R	t_{L1}	t_{L2}	t_{R1}	t_{R2}	
I	1							
	2							
	3							
	平均							
II	1							
	2							
	3							
	平均							

将上面数据整理所求得的工况的实验结果填入下表，并进行比较分析。

工况	冷段换热 Q_L W	热段换热 Q_R W	热平衡误差 δ %	传热系数 K W/m^2K
I				
II				

六、思考题

1. 简述实验原理及过程。
2. 分析影响热平衡误差大小的因素有哪些。
3. 如何减小实验所产生的热平衡误差。
4. 通过本次实验你收获到了什么。