

传热学实验指导书

编写：刘 彬

编审：姜宝成

哈尔滨工业大学能源动力实验教学中心

2022 年

目 录

前言	2
实验一 准稳态法测绝热材料的导热系数和比热	4
实验二 不透明材料高温发射率测量实验	8
实验三 气流横掠单管表面对流换热实验	12
实验四 铂丝表面黑度的测定实验（不作要求）	17

前 言

一 实验目的

传热学是应用性较强的专业技术基础课，从学科的发展来看，实验是促进其发展的重要研究手段。由于传热过程十分复杂，对其进行科学研究与探索就更加离不开实验。因此，传热学实验是学习理论知识、探求传热过程基本规律的重要教学环节。

1. 根据实测结果验证传热学的基本理论或根据所观察的现象进行深入地思考，以加强和巩固理论知识的学习；
2. 学会使用传热学实验的基本测量仪器，掌握传热学基本量的测量实验技术；
3. 培养分析实验数据、整理实验成果和编写实验报告的能力；
4. 通过综合及设计性实验，学会搜集资料、设计实验方案、改装实验设备，独立完成实验并撰写实验论文，培养实验研究的初步能力；
5. 培养严谨踏实的科学作风和与人融洽合作的共事态度，为将来进行科学研究和实际工作打下良好的基础。

二 实验要求

1. 每次实验前，必须了解本次实验的目的、实验原理和实验所要验证的理论，因此应预习实验指导书和教科书中的有关内容；
2. 进入实验室后，应注意听取指导教师对实验方法的讲授，待完全弄清楚实验方法与步骤后，方能动手实验；
3. 实验中应注意观察实验现象，细心读取实验数据，若实验结果完全错误，应重做实验；
4. 应爱护仪器设备及实验室其他公物、注意安全，未经允许不得随便打开或关闭实验室的电路开关及做与所做实验无关的事情。如有损坏应立即报告指导教师，并按学校有关规定处理。在整个实验过程中，均须保持实验场所整洁安静，做到文明实验。

总之，应以严肃的态度、严格的要求、严密的方法及一丝不苟的操作来对待实验，只有这样，才能圆满完成实验技能的训练任务。

三 实验报告要求

实验报告一般包括以下几项内容：

1. 封面：实验名称、班级、姓名、同组人及实验日期；

2. 实验目的、实验原理、实验装置简图及仪器设备简介；
3. 实验操作步骤、现象的描述、原始数据记录、实验数据的处理及实验结果；
4. 在实验报告最后部分应对实验结果进行分析与评价，并回答有关思考题；
5. 实验结果的表示：在实验中除根据实测数据整理并计算结果外，有时还要采用曲线图来表示实验的结果。曲线均应画在坐标纸上，图中应标明坐标轴所代表的物理量及坐标分度，实验点应当用形如“。”、“×”、“·”、“△”等标记表示。当描绘曲线时，不要用直线逐点连接成折线。简单方法是根据多数点所在的位置，内插描绘成光滑的曲线；
6. 实验报告须每人独立完成，并以班级为单位收齐，在规定时间内交给实验指导教师。

一、准稳态法测绝热材料的导热系数和比热实验

一、实验目的

- 1、掌握使用热电偶测量温度及温差的方法；
- 2、认识和使用数字化仪表测量温度和温差；
- 2、快速测量绝热材料的导热系数和比热。

二、实验原理

本实验是根据第二类边界条件，无限大平板的导热问题设计的。设平板厚度为 $2d$ （见图 1），初始温度为 t_0 ，平板两面受恒定的热流密度 q 均匀加热。求任何瞬间平板厚度方向的温度分布 $t(x,t)$ 。导热微分方程式，初始条件和第二类边界条件如下：

$$\frac{\partial t(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 t(x,t)}{\partial x^2}$$

$$t(x,0) = t_0$$

$$\left. \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial x} \right|_{x=d} + \frac{q}{l} = 0$$

$$\left. \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0$$

解为：

$$t(x,t) - t_0 = \frac{q}{l} \left[\frac{at}{d} - \frac{d^2 - 3x^2}{6d} + d \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{m_n^2} \cos(m_n \frac{x}{d}) \exp(-m_n^2 Fo) \right] \quad (1)$$

式中： t —时间； s

q —沿 x 方向从端面向平板加热的恒定热流密度； W/m^2

l —平板的导热系数； $W/(m \cdot ^\circ C)$

a —平板的导温系数； m^2/s

$m_n = np, n = 1, 2, 3, \dots$ ；

$Fo = \frac{at}{d^2}$ 傅里叶准则数；

t_0 —初始温度； $^\circ C$

随着时间 t 的延长， Fo 数变大，式(1)中的级数和项变小。当 $Fo > 0.5$ 时，级数和项变得很小可以忽略，式(1)变成：

$$t(x,t) - t_0 = \frac{qd}{l} \left(\frac{at}{d^2} + \frac{x^2}{2d^2} - \frac{1}{6} \right) \quad (2)$$

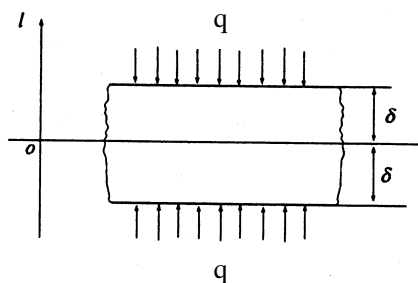


图 1 第二类边界条件无限大平板导热的物理模型

由此可见，当 $Fo > 0.5$ 后，平板各处的温度和时间成线性关系，温度随时间变化的速率是常数，并且到处相同，这种状态称为准稳态。在准稳态时，平板中心面 $x=0$ 处的温度为：

$$t(0,t) - t_0 = \frac{qd}{l} \left(\frac{at}{d^2} - \frac{1}{6} \right)$$

平板加热面 $x=d$ 处为：

$$t(d,t) - t_0 = \frac{qd}{l} \left(\frac{at}{d^2} + \frac{1}{3} \right)$$

此两面的温差为：

$$\Delta t = t(d,t) - t(0,t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{qd}{l} \quad (3)$$

如可知 q 、 d ，再测出 Δt ，就可以由式(3)得出导热系数的计算式：

$$l = \frac{qd}{2\Delta t} \quad (4)$$

实际上，无限大平板是无法实现的，实际总是用有限尺寸的试件。一般认为，试件的延展方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，试件两断面中心处的温度等于无限大平板时两断面的温度差。

根据热平衡原理，在准稳态时有下列关系：

$$q \cdot A = c \cdot r \cdot d \cdot A \cdot \frac{dt}{dt} \quad (5)$$

式中： A 为试件的横截面积； c 为比热容， r 为密度； $\frac{dt}{dt}$ 为准稳态时各点的温升速率。由上式可得：

$$c = \frac{q}{rd \frac{dt}{dt}} \quad (6)$$

用此式可求出试件比热， $\frac{dt}{dt}$ 采用试件中心处的温度数据来计算。

三、实验装置

按上述理论模型设计的实验装置如图 2，说明如下：

(1) 试件：

试件尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times d$ ，共四块，尺寸完全相同， $d=10\text{mm}$ 。每块上下面要平行，表面要平整。

(2) 加热器：

采用高电阻康铜箔平面加热器，康铜箔厚度仅 20mm ，加上保护箔的绝缘薄膜，总共只有 70mm 。电阻值稳定，在 $0\sim 100^\circ\text{C}$ 范围不变。加热器面积和试件的相同，是 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的正方形。两个加热器的电阻值应尽量相同，相差应在 0.1% 以内，本实验

所采用的加热器电阻值可按 $100\ \Omega$ 来计算。

(3) 绝热层:

用导热系数比试件小得多的材料做绝热层, 力求减少通过它的热量, 使试件 1、4 与绝热层的接触面接近绝热。这样, 可认为式(4)中的热流 q 等于加热器的热功率的 $1/2$ 再除以加热接触面积。

实验时, 将四个试件对齐叠放在一起, 分别在试件 1 和 2 之间、试件 3 和 4 之间放入加热器, 试件和加热器要对齐。热电偶的放置如图 2。很薄的热电偶测温头放在试件中心部位。放好绝热层后, 加适当压力以保持各试件之间接触良好。

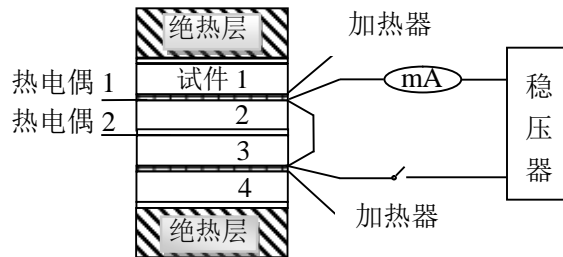


图 2 实验装置示意图

本实验台有 2 套实验设备, 一套采用数字仪表进行测量, 对应数据记录表 1; 一套采用传统直流电位差计进行测量, 对应数据记录表 2。

四、实验步骤

1. 将加热开关拨到非加热档位, 接通实验台电源, 打开加热器电源。
2. **采用传统直流电位差计进行实验测量:** 首先打开直流电位差计的电源旋钮, 对其进行调零和校准, 然后调到测量档位。
3. 将双刀双掷开关拨到左侧, 加热开关拨到左侧, 同时开始秒表计时, 整个测量过程中, 秒表要持续计时, 不能暂停或重新计时。
4. 调整直流电位差计的测量旋钮, 并随时修正偏差, 使仪表指针始终指零, 当秒表到达整数分钟时, 停止调整测量旋钮, 从测量旋钮上读取读数 (注意数据的单位)。记录到数据表 2 中“未知 1”下“热电势数值”列中。
5. 记下数据后, 将双刀双掷开关拨到右侧, 重复步骤 4, 但是数据记录到“未知 2”下“热电势数值”列中。
6. 多次重复步骤 4、5, 并同时观察所测数据的变化趋势, 依据实验原理, 判断出“未知 1”、“未知 2”分别对应的是中心点的温度、抑或是两点之间的温差。根据温差一系列的数据变化情况, 判断出实验是否进入准稳态工况。
7. 若进入准稳态工况, 则继续测量 6 行数据即可。记录加热电流后, 将加热开关拨到停止加热档位, 关闭直流电位差计的电源旋钮, 重置秒表。

8. 采用数字仪表进行实验测量：加热开关拨到右侧，同时开始秒表计时，整个测量过程中，秒表要持续计时，不能暂停或重新计时。
9. 每当秒表到达整数分钟时，记录数字仪表显示的两个温度值，记录到数据表 1 中，并计算出两个温度的温差。根据温差一系列的数据变化情况，判断实验是否进入准稳态工况。
10. 若进入准稳态工况，则继续测量 10 行数据即可。记录加热电流后，将加热开关拨到停止加热档位，重置秒表，并关闭总电源。

五、分析与思考：

- 1、 讨论稳态、准稳态、非稳态传热过程的差异？
- 2、 本方法能否测量金属材料的导热系数，为什么？

六、实验数据

加热器电流 I [A]: 电流表量程×表盘读数%

两加热器电阻的平均值 R [Ω]: 100 Ω

试件截面尺寸 A [m^2]: 0.01 m^2

试件厚度 d [m]: 0.01m

试件材料密度 r [kg/m^3]: 1180

热流密度 q [W/m^2]: $I^2R/(2A)$

导热系数经验值约 0.18~0.2 W/m·K。

要求：根据每张数据记录表，都要计算出导热系数和比热容。

二、不透明材料高温发射率测量实验

一、实验目的

- 1、了解红外光谱仪测试测量光谱发射率测量原理及方法；
- 2、掌握利用红外测温仪测量材料发射率测量原理及方法；

二、实验原理

发射率是表征材料表面辐射本领的物理量，是一项极其重要的热物性参数。其定义为同等温度下材料表面辐射能与黑体辐射能的比值。根据波长范围、发射率可分为全发射率、光谱发射率和波段发射率；根据测量方向，可分为半球发射率和方向发射率。不同的发射率定义有不同的应用场合。研究辐射传热问题时，采用半球全发射率，一般用量热法测量。在红外成像测温、热红外伪装设计等应用中，采用的是红外波段（亦即测温仪工作波段）的波段发射率。

波段发射率的测量主要有两种方法：

(1)采用红外光谱仪测试光谱发射率，再求出波段发射率；

(2)采用测温仪测量波段发射率。而红外光谱仪比较昂贵，采用测温仪测量波段发射率有利于提高仪器利用率，节约研究成本。

红外测温仪的测量原理是靠接收被测表面发射的辐射来确定其温度，辐射测量温度和真实温度之间的能量关系式如下所示：

$$e' T_r^n + (1 - e') T_u^n = e T_d^n + (1 - e) T_u^n$$

式中： T_r 为红外测温仪测得的温度，单位 K；

T_d 为所测量试件的实际外表面温度，由达到稳态时试件内表面温度计算得到，单位 K；

T_u 为环境温度，单位 K；

e 为所测试件的实际发射率；

e' 为红外测温仪设定的发射率；

n 为指数：测温仪工作波段 $8 \mu\text{m} \sim 14 \mu\text{m}$ 时取 4。

若已知表面的发射率，则可由上式求出较准确的表面温度。而反过来，如果已知较准确的表面温度，而不知道其发射率，则可以通过红外测温仪求出其发射率。从上式可推出测温仪测量目标发射率计算公式如下：

$$e = \frac{e'(T_r^n - T_u^n)}{T_d^n - T_u^n}$$

本实验采用热电偶测量试件外表面的较准确的温度，同时用红外测温仪测量测量试件外表面温度。

三、实验系统

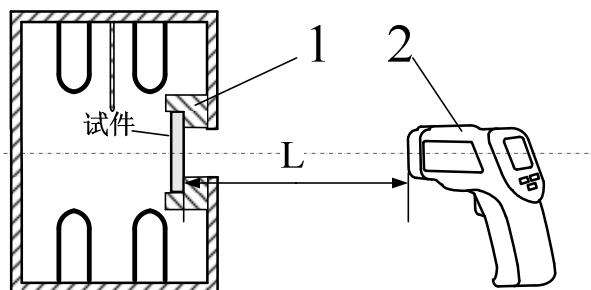


图 1 实验系统示意图

1.试件加热炉；2.红外测温仪

实验系统结构示意图如图 1 所示。该实验系统包括红外测温仪，试件加热炉，热电偶。试件加热炉采用电加热原理且带有反馈控制系统能够自动保持恒温，用来将试件加热至实验温度。热电偶用于测量试件外表面较准确的温度。红外测温仪用来测定试件的红外温度，测温仪可以设定三档不同的目标发射率预计值，LO、MED、HI 分别对应发射率预计值为 0.3、0.7、0.95。通过上文的公式可以计算得到表面的发射率。

四、实验操作规程

- (1)、将试样置于加热炉中正确位置，固定好。
- (2)、打开加热炉电源开关，设置好所需测量实验温度，启动加热炉，开始加热试件。
- (3)、用热电偶测量试件表面温度随时间的变化，并将其记录在表 1 中，直至达到稳态。
- (4)、打开红外测温仪，设置好实验参数，使用红外测温仪测量试件外表面温度并记录，注意红外测温仪入瞳口中心与试件外表面中心之间的距离 $L \leq d \times D/S$ (D/S 为红外测温仪参数，表示测量距离与测量光斑之比， d 为试件可视直径，本实验中 $D/S = 12$ ， $d = 4\text{cm}$)。
- (5)、关闭加热炉及热电偶的电源，整理好实验设备。

五、数据处理

1、将加热炉炉膛温度、试件表面实际温度随时间的变化记录在如下表 1 中，绘制非稳态加热过程的温升曲线，观察并判断何时达到稳态。

表 1 加热炉炉膛温度随时间的变化记录

加热炉设定温度 (°C)															
时间 (t / min)															
炉膛实际温度 (°C)															
试件表面实际温度 (K)															

2、炉膛实际温度与试件表面实际温度稳定后，用红外测温仪对试件表面温度进行测量，将红外测温仪测得的试件外表面温度和达到稳态后的试件内表面温度记录到如下表 2 中，并计算出试件的发射率。

表 2 不透明材料高温发射率测量实验数据记录表

加热炉设定温度 (°C)															
试件外表面实际温度 T_d (K)															
红外测温仪设定发射率 e'															
红外测温仪测量温度 T_r (K)															
环境温度 T_u (K)															
试件发射率															

六、分析与思考

1. 观察非稳态加热温升曲线，分析试件的非稳态加热过程。
2. 分析讨论发射率测量实验中误差的可能来源。

三、气流横掠单管表面对流换热实验

一、实验目的

- 1、了解对流放热的实验研究方法；
- 2、学习测量风速、温度及热量的基本技能；
- 3、测定空气横掠单管表面的平均表面传热系数，并将实验数据整理成准则方程式。

二、实验原理

根据牛顿公式，壁面平均表面传热系数 h ，可由下式计算：

$$h = \frac{\Phi}{A(t_w - t_f)} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (1)$$

式中： F ：单位时间对流放热量，W；

A ：试验管有效传热面积， m^2 ；

t_w ：试验管壁面平均温度， $^\circ\text{C}$ ；

t_f ：试验管前后流体平均温度， $^\circ\text{C}$ 。

根据相似理论，流体受迫外掠物体的表面传热系数 h 与流速 w 、物体几何尺寸及流体的物性等因素有关，可整理成下述准则方程式：

$$Nu = cRe^n Pr^m \quad (2)$$

由于本实验中，流体为空气， $Pr = \text{常数}$ ，故式（2）可简化为：

$$Nu = cRe^n \quad (3)$$

式中： Nu ：努塞尔准则， $Nu = \frac{hd}{\lambda}$ ；

Re ：雷诺准则， $Re = \frac{wd}{\nu}$ ；

d ：实验管外径，m；

w ：实验段来流速度，m/s；

λ ：流体导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ；

ν ：流体运动粘度， m^2/s ；

准则中的定性温度 $t = \frac{1}{2}(t_w + t_f)$ 。

本实验的任务是测定 Nu 和 Re 准则中所包含的各量，如 t 、 w 、 d 、 ν 、 λ ，用式(1)求出 h 后再计算各准则，然后通过数据处理，求得 c 与 n 值，从而建立准则方程式(3)。

三、实验设备

本对流放热实验在风洞中进行。实验风洞主要由有机玻璃风洞本体构架、风机、实验管、

电加热器及热工仪表组成，见图 1。

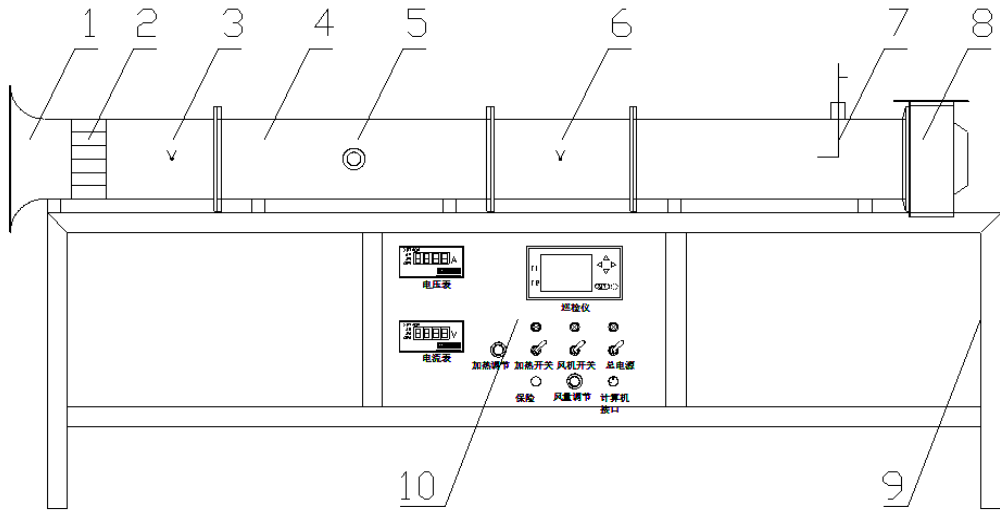


图 1. 单圆管表面横向强迫对流放热实验装置示意图

1. 整流进风口
2. 整流段
3. t_{ri} 测温段
4. 测试段
5. 试件（加热圆管）
6. 过渡段 t_{ra} 测温段
7. 毕托管测速段
8. 风机
9. 支架
10. 仪表箱

实验装置主要由一简单的风洞和圆管加热器组成。风洞是用有机玻璃制成的方形流道[尺寸为 $a \times b(\text{mm})$]。为了避免涡流的影响，风道内表面保持光滑。当风机启动后，室内空气经过吸入口 2 被吸入风洞内。吸入口做成双扭线形以保证进出口气流平稳并减少损失，并且使进口处气流速度分布均匀。在吸入口后连接入口段和工作段。在工作段中有被研究的圆管(同时也是加热器)、加热前流体的测温热电偶、加热后流体的测温热电偶。在工作段之后有一支测量流速的毕托管、引风机。为减少风机振动对风洞内的速度场的影响，工作段之后的风道用软胶管与风机相接。风洞内毕托管与差压变送器相连接后可用来测量流速。工作段前后的空气温度，即 t_{ri} 、 t_{ra} ，用热电偶来测量。加热器结构示意图见图 2。

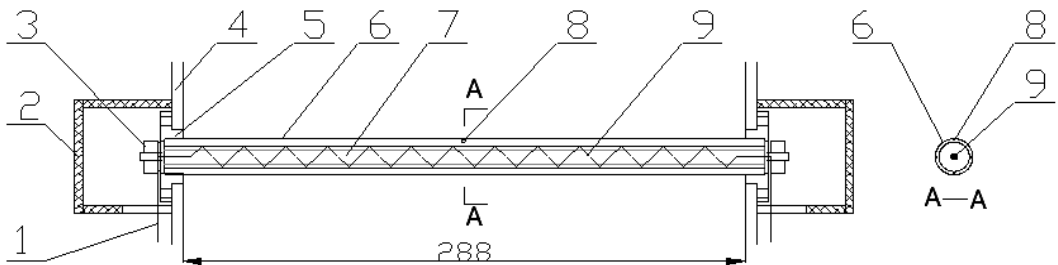


图 2 加热器简图

1. 电源线
2. 保护盖
3. 压紧螺母
4. 风洞侧板
5. 绝缘板
6. 铜管
7. 填料
8. 热电偶
9. 加热器

加热器用铜管做成，管内有电加热电阻，用交流电加热。电热器所消耗的功率即是圆管表面所放出的热量。圆管表面温度 t_w 用焊在管壁上的三对热电偶测量。电路及测量系统如图三所示：

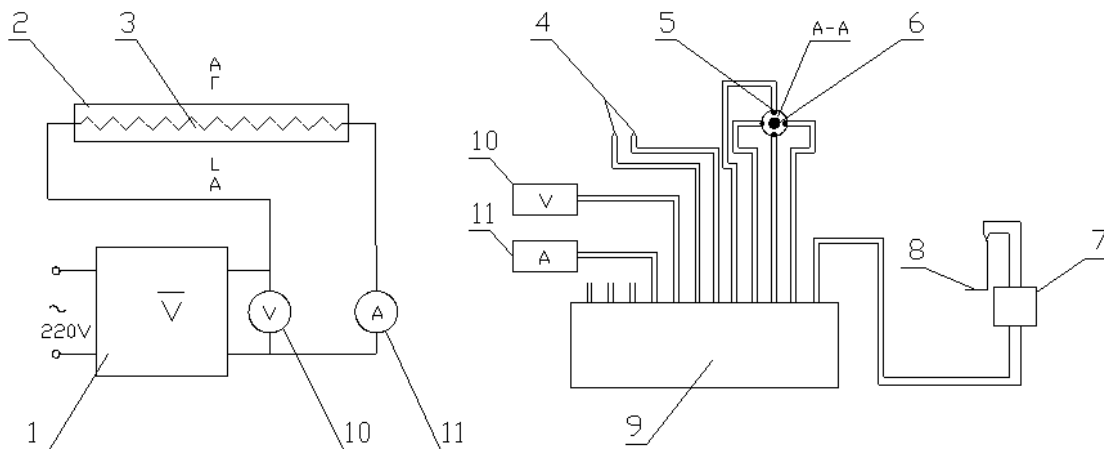


图3 电路及测量系统示意图

1. 功率调节装置 2. 试件 3. 加热器 4. 测气体温度传感器 5. 测管子表面度T型热电偶（4点） 6. 加热管剖面
7. 差压传感器 8. 毕托管 9. 液晶显示巡检仪 10. 电压表 11. 电流表

四、实验步骤

在熟悉实验装置后可把线路接好，调整好测量仪表，经教师检查许可后方可开始实验，实验步骤如下：

1、接通总电源；

2、先向左旋转风量调节旋钮，再合上风机马达的电源。逐渐向右旋转风量调节旋钮，调大风量，根据需要调节风量。

3、打开电加热器开关，调节加热电压至某一定值持续加热。

4、加热并观察各测点的温度直到稳定为止，（温度在 3 分钟内保持读数基本不变可认为达到稳定）然后记录各热电偶的温度读数及压差读数。

5、保持加热器功率不变，调节风量来改变工况，重复步骤 4，总共测量 3 个工况。

6、实验中应注意以下几点：

（1）数字化智能仪表通常具有较多的功能和按键，在不确定其功能时，不得随便调整，以免改变设备参数从而影响实验台的功能；

（2）必须待风机启动后再合上加热器电源而实验结束时应先停止加热再停风机。

（3）实验完毕应关闭总电源，经教师检查同意后方可离去。

五、实验数据记录与整理

加热管直径： $d = 0.02\text{m}$ ； 加热管长度： $l = 0.3\text{m}$ ； 实验段截面积 $F = 0.0311\text{m}^2$ ；

测速段截面积 $F' = 0.0095\text{m}^2$ ； 毕托管修正系数 $j = 1.02$

所用热电偶种类：T 型（铜-康铜）

实验数据记录时必须采用稳定状态下的数据。

1、平均放热系数的计算：

$$h = \frac{Q - Q_R}{(t_w - t_f) \pi \cdot d \cdot l} \quad [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{°C}] \quad (4)$$

式中： Q ——电加热器所消耗的功率（W） $Q = IU$ ；

U ——加热器中的电压降，（V）；

I ——加热器中的电流强度，（A）；

D, l ——圆管的直径、长度，（m）；

Q_R ——辐射放热量，按式（6）计算；

t_w ——管壁的平均温度（用每一对热电偶所对应温度的平均值） $^{\circ}\text{C}$ ；

t_f ——流体的平均温度 $^{\circ}\text{C}$ 。

2、来流速度的计算：

测量计算测速段速度，毕托管所在处流体流速度，通过差压变送器测量出其动压头然后用下式进行计算出的。

$$w_{cp} = j \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_a}} \quad [\text{m}/\text{s}] \quad (5)$$

式中： Δp ——毕托管所在处风洞截面上测点动压头，单位 Pa。

应将测速段速度换算成为实验段来流的度，根据连续性方程：

$$w_{cp} \cdot F = w \cdot F'$$

式中： w_{cp} ——毕托管所在截面之平均流速[m/s]；

w ——实验段来流速度[m/s]；

F, F' ——分别为毕托管所在截面及加热圆管所在最窄通风截面处的面积[m²]。

3、辐射散热量的计算：

$$\Phi_e = e s A \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right] \quad (6)$$

e ：试验管表面黑度，见设备规范表；

s ：黑体辐射系数， $s = 5.67 [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$ ；

A : 试验管表面积 $[\text{m}^2]$;

T_w : 试验管壁面平均温度 $[\text{K}]$;

T_f : 空气进出口平均温度 $[\text{K}]$ 。

4、准则方程式的建立:

根据所求得的实验数据, 即可求得 Re 数及相对的 Nu 数。对式 (3) 取对数可得:

$$\lg Nu = \lg c + n \lg Re \quad (7)$$

可见, 将各点的 $\lg Nu$ 和 $\lg Re$ 值点在双对数坐标图上, 可得一条直线。 n 值可根据这条直线的斜率求得。根据直线上任一点的 $\lg Nu$ 和 $\lg Re$ 数值求得 c 值, 即:

$$c = \frac{Nu}{Re^n} \quad (8)$$

也可以利用最小二乘法直接回归准则方程式。

实验数据处理中, 要求绘制出圆管测点 1 的温度随时间变化曲线, 以及 $\lg Nu$ 与 $\lg Re$ 的关系曲线。

六、分析与思考

- 1、分析讨论影响表面传热系数的因素。
- 2、为什么要求在实验管壁面温度稳定时记录数据?
- 3、简述实验的收获和体会。

四、铂丝表面黑度的测定

一、实验目的

- 1、掌握相关测量仪表的工作原理和使用方法；
- 2、测量铂丝的表面黑度，巩固已学过的辐射换热理论和知识。

二、实验原理

在真空腔内，腔内壁 2 面（凹物体）与 1 面（凸物体）组成两灰体的辐射换热系统如图 1 所示。1、2 面的表面绝对温度、黑度和面积分别为 T_1 、 T_2 、 e_1 、 e_2 和 A_1 、 A_2 。表面 1、2 间的辐射换热量 F_{12} [W] 为：

$$\Phi_{12} = \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})}{1/e_1 + A_1/A_2(1/e_2 - 1)} \quad (1)$$

表面积 $A_2 \gg A_1$ ，即 $A_1/A_2 \rightarrow 0$ ，这样式 (1) 可简化为：

$$\Phi_{12} = e_1 A_1 S_0 (T_1^4 - T_2^4) \quad (2)$$

式中： $S_0 = 5.67 \times 10^{-8}$ [W/m²·K⁴]，根据式(2)可得：

$$e_1 = \frac{\Phi_{12}}{A_1 S_0} (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

因此，只要测出 F_{12} ， A_1 ， T_1 ， T_2 ，即可由式(3)求得物体 1 表面的黑度 e_1 。

三、实验设备

实验设备包括辐射实验台本体、直流稳压源、电位差计、直流电流表及水浴等。

- 1、实验台本体构造如图 2 所示：铂丝封闭在真空玻璃腔内，真空腔内真空度达 5×10^{-4} 毫米汞柱。铂丝直径为 $d=0.2$ mm，实验段长 $L=100$ mm，故铂丝实验段表面积 $A_1=6.28 \times 10^{-5}$ [m²]，与铂丝两端相连的是与玻璃具有同样膨胀系数的钨丝，钨丝与电源相连接。另外在铂丝实验段还引出两根导线测电压。腔外加一层玻璃套，套中通冷却水，分别留有进、出水口。循环水温由水浴控制。

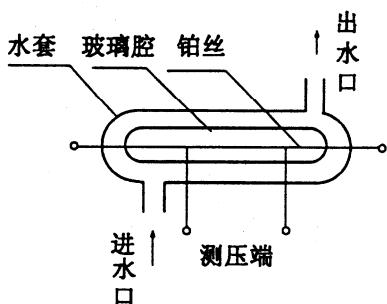


图 2 实验台本体构造示意图

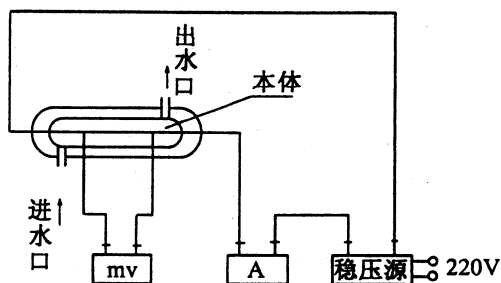


图 3 系统示意图

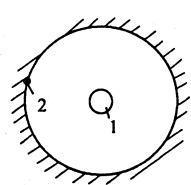


图 1 两灰体组成的封闭辐射换热系统

2、实验系统如图 3 所示，本装置的电路系统功率大小由稳压电源控制，通过铂丝实验段的电压和电流由电位差计和电流表读出。

四、温度与热量测量原理

1、铂丝表面温度 t_1 的测定

在实验台中，铂丝本身既为发热元件，又是测量元件。测温采用电阻法，铂丝表面温度可通过下式求得

$$t_1 = (R_t - R_0)/(R_0 a) \quad (4)$$

式中： R_0 、 R_t 为铂丝在 0°C 和 $t^\circ\text{C}$ 时的电阻 $[\Omega]$ ； $R_0=0.28[\Omega]$ 。 a 为铂丝的电阻温度系数， $a=3.9\times 10^{-3} [1/^\circ\text{C}]$ 。

2、玻璃表面温度 t_2 的测定

由于 2 表面的热流密度小，而水与玻璃的换热系数又较大，冷却水温度变化不大，故可直接用出口水温代替平均温度。出口水温用玻璃温度计测量。

3、辐射换热 F_{12} 的测量与计算

用测出的电压 V 及电流 I 值算出热量 Q ，它是铂丝实验段的产热量，等于实验段与腔壁的辐射换热量 F_{12} 及实验段端部导线的导热损失。实验段外的铂丝部分，由于也产生热量，故可认为其表面温度与实验段相近，通过这部分的导热损失可忽略不计。导热损失主要是由测电压引线引起的。这部分热量损失主要和导热系数、表面黑度、平均温度、两端温差、表面积、长度及空腔环境有关。由于环境温度、导线温度和两端温差与实验段产热值 Q 及 $t_1-t_2=\Delta t$ 成比例。故辐射换热量 F_{12} 可写为：

$$F_{12}=BQ \quad (5)$$

式中： B 为系数，通过大量实验得

$$B=\exp(0.00377 \Delta t - 4.074) \quad (6)$$

上式适用范围 $\Delta t=100\sim 500^\circ\text{C}$ ，冷却水为室温。

五、实验步骤

- 1、按图连接有关仪表：稳压源、电流表、电位差计等。
- 2、按照每个仪表的操作规程进行调试。
- 3、调节稳压源控制铂丝的电流 I 。
- 4、待铂丝温度稳定（约 5 分钟），记录 I 、 V 及出水口温度。
- 5、重复 3、4，做另一温度下的铂丝黑度。

六、数据整理

- 1、黑度计算，可根据式(3)计算出黑度，以例说明之。

(1) 已知参数

$$R_0 = 0.28[\Omega]; \quad a = 3.9 \times 10^{-3} [1/^\circ\text{C}]; \quad s_0 = 5.67 \times 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4]$$

$$A_1 = 6.28 \times 10^{-5} [\text{m}^2]; \quad B = \exp(0.00377 \Delta t - 4.074)$$

(2) 实验参数

$$I = 0.7[\text{A}]; \quad V = 0.2998[\text{V}]; \quad t_2 = 13.9^\circ\text{C}$$

(3) 计算

$$R_t = \frac{V}{I} = \frac{299.8}{700} = 0.4283 [\Omega]$$

$$Q = I \cdot V = 0.7 \times 0.2998 = 0.20986 [\text{W}]$$

$$t_1 = \frac{R_t - R_0}{R_0 \cdot a} = \frac{0.4283 - 0.28}{0.28 \times 3.9 \times 10^{-3}} = 135.8 [^\circ\text{C}]$$

$$T_1 = 135.8 + 273 = 408.8 [\text{K}]$$

$$T_2 = 13.9 + 273 = 286.9 [\text{K}]$$

$$B = \exp[0.0037(135.8 - 13.9) - 4.074] = 0.027$$

$$F_{12} = Q \cdot B = 0.20986 \times 0.027 = 0.00567 [\text{W}]$$

$$e = \frac{\Phi_{12}}{s_0(T_1^4 - T_2^4)} A_1$$

$$= \frac{0.00567}{5.67 \times 10^{-8} (408.8^4 - 286.9^4) \times 6.28 \times 10^{-5}}$$

$$= 0.075$$

2、黑度随温度变化的关系式

在 100~500°C 之间，铂丝的真实黑度与温度之间近似地有线性关系

$$e = a + bt$$

如用图表表示，可将 $e = f(t)$ 的实验数据点到直角坐标纸上，连接成直线（如图 4），求出 a 和 b 来，也可用最小乘法计算 a 和 b 。

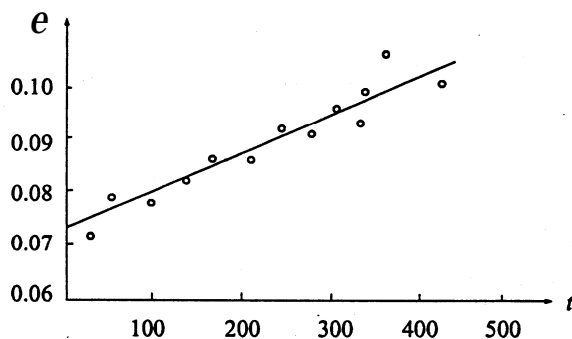


图 4 铂丝表面黑度与温度的关系

七、分析与思考

- 1、如腔内非真空能否准确测量铂丝黑度？
- 2、为什么用非常细的铂丝做试件？

实验数据记录与整理表

实验 次序	电流	电压	腔体 温度	试件 功率	试件 电阻	试件 温度	修正 系数	辐射换 热量	试件 黑度
	I	V	t_2	Q	R	t	B	F_{12}	e
	A	V	°C	W	Ω	°C		W	
1	0.2								
2	0.3								
3	0.4								
4	0.5								
5	0.6								
6	0.7								
7	0.8								
8	0.9								

一、准稳态法测绝热材料的导热系数和比热实验数据表

班级: 学号: 姓名: 实验台号:

实验时间: 同组人: 实验指导教师:

加热器电流 I [A]: 两加热器电阻的平均值 R [Ω]:

试件截面尺寸 A [m^2]: 试件厚度 d [m]:

试件材料密度 r [kg/m^3]: 热流密度 q [W/m^2]: $I^2R/(2A)$

实验数据记录与整理表 1

	温度 t_1 [$^{\circ}C$]	温度 t_2 [$^{\circ}C$]	$\Delta t = t_2 - t_1$ [$^{\circ}C$]
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

一、准稳态法测绝热材料的导热系数和比热实验数据表

班级: 学号: 姓名: 实验台号:

实验时间: 同组人: 实验指导教师:

加热器电流 I [A]: 两加热器电阻的平均值 R [Ω]:

试件截面尺寸 A [m^2]: 试件厚度 d [m]:

试件材料密度 r [kg/m^3]: 热流密度 q [W/m^2]:

实验数据记录与整理表 2

	未知 1		未知 2	
	热电势数值	温度 [$^{\circ}C$]	热电势数值	温度 [$^{\circ}C$]
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

二、不透明材料高温发射率测量实验实验数据表

班级: 学号: 姓名: 实验台号:

实验时间: 同组人: 实验指导教师:

表 2 不透明材料高温发射率测量实验数据记录表

加热炉设定温度 (°C)									
试件外表面实际温度 T_d (K)									
红外测温仪设定发射率 e'									
红外测温仪测量温度 T_r (K)									
环境温度 T_u (K)									
试件发射率									

加热炉设定温度 (°C)									
试件外表面实际温度 T_d (K)									
红外测温仪设定发射率 e'									
红外测温仪测量温度 T_r (K)									
环境温度 T_u (K)									
试件发射率									

三、空气横掠单圆管表面换热系数实验数据表

实验数据处理表

	加热功率 Q	空气平均温度 t_f	壁面平均温度 t_w	辐射热量 F_e	对流热量 F_c	定性温度 t	导热系数 λ	运动粘度 ν	对流换热系数 h	测速段风速 w'	实验段风速 w	努塞尔数 Nu	雷诺数 Re
单位	[W]	[°C]	[°C]	[W]	[W]	[°C]	W/(m·°C)	m ² /s	W/(m ² ·°C)	[m/s]	[m/s]		
1													
2													
3													
4													
5													

图 1.圆管测点 1 温度随时间变化曲线

图 2. $\lg Nu$ 与 $\lg Re$ 双对数曲线