

# 空气横掠单圆管时强迫对流换热实验

## 一、实验目的与任务

1. 了解对流放热实验装置，熟悉管壁温度及电加热功率的测量技术，掌握利用毕托管-微压差变送器测量空气流速的方法。
2. 通过实验测定空气横掠单管时的对流换热平均表面传热系数  $h$ 。
3. 通过实验数据的整理，掌握强迫对流换热实验数据整理的方法。
4. 在  $Nu-Re$  对数坐标图上给出空气强迫对流横掠单圆管时换热的实验点，结合与已有关系式的比较，给出对本实验结果的讨论。

## 二、实验原理

根据相似理论，空气横掠单圆管强迫对流的换热规律可用下列准则关系式来表示：

$$Nu = CRe^n \quad (1)$$

式中，努谢尔特准则数  $Nu$  为：

$$Nu = hD/\lambda \quad (2)$$

雷诺准则数  $Re$  为：

$$Re = uD/\nu \quad (3)$$

这里， $\lambda$  为空气的导热系数， $\nu$  为空气的运动粘度，是平均温度  $t_m = (t_f + t_w)/2$  的函数，其中  $t_w$  为管外壁温， $t_f$  为空气温度； $D$  为实验管的外径， $u$  为空气的流速。关键的是对流换热平均表面传热系数  $h$  的确定。

由对流换热平均表面传热系数  $h$  的定义：

$$h = Q_a / F(t_w - t_f) \quad (4)$$

式中， $Q_a$  为管外表面与周围空气之间的对流换热量，管的外表面积  $F = \pi DL$ ， $L$  为横管的有效长度。考虑到管外表面在与周围空气对流换热同时，与周围环境间存在辐射换热。即管的实际传出热量为：

$$Q = Q_a + Q_r = hF(t_w - t_f) + \varepsilon C_0 F(T_w^4 - T_f^4) \times 10^{-8} \quad (5)$$

其中， $\varepsilon$  为实验管外表面的黑度，黑体辐射系数  $C_0 = 5.67 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ 。这里，假定环境温度即空气温度。因此，横管外表面对流换热平均表面传热系数就可以由下式确定：

$$h = [Q/F - \varepsilon C_0 (T_w^4 - T_f^4) \times 10^{-8}] / (t_w - t_f) \quad (6)$$

因此，对给定实验管，通过测量管的实际传出热量  $Q$ 、管外壁温  $t_w$ 、来流空气的温度  $t_f$ ，就可通过实验确定管外表面与周围空气之间对流换热平均表面传热系数  $h$ 。由式 (2) 和 (3)，通过改变气流速度或实验管直径，就可得到一系列  $Nu-Re$  对应数据。在数据足够多、 $Re$  变化范围足够大的条件下，就可确定式 (1) 中的  $C$  和  $n$  的值。

## 三、实验系统

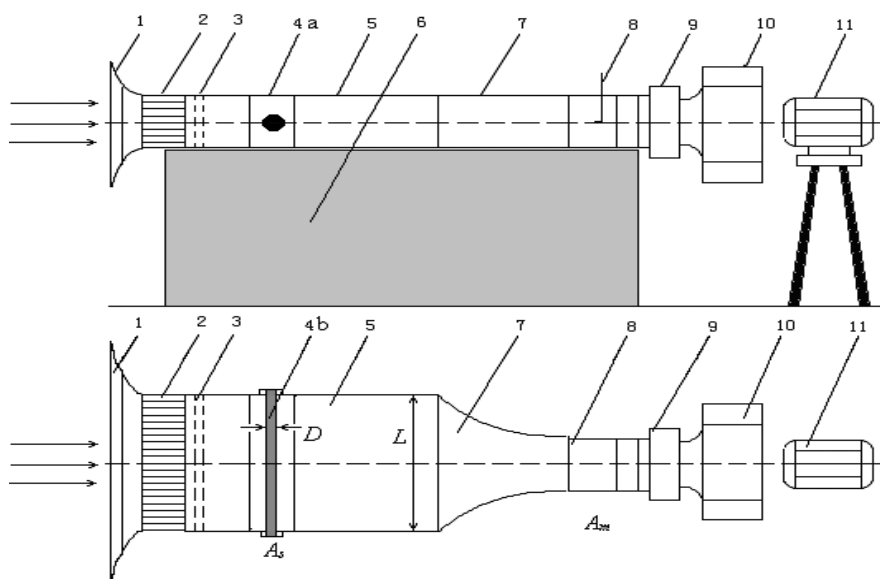
实验室有 A、B 两套实验系统。A 实验系统实验管外径  $D_A = 19.8 \text{ mm}$ ，B 实验系统实验管外径  $D_B = 39.82 \text{ mm}$ 。实验系统主要由实验本体系统和测量系统两部分组成。

### 1. 实验本体系统

实验本体系统由实验圆管和提供恒定气流的风洞两个基本部件组成。

实验圆管是对流换热的感受元件。它的内部带有电加热器、圆管中部对称埋设有四对热电偶的镀铬圆管。镀铬管在电加热器的加热作用下向来流放热。

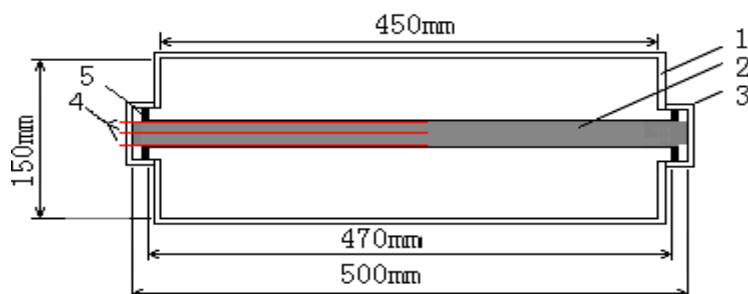
图 1 为风洞系统的示意图。风洞用有机玻璃制成。空气依次经过进风口、蜂窝器、整流器、测试段、实验段、收缩段和测速段，最后由引风机引出风洞系统。可通过改变引风机运转频率和引风机出口挡板开度，调节实验所需风速大小。



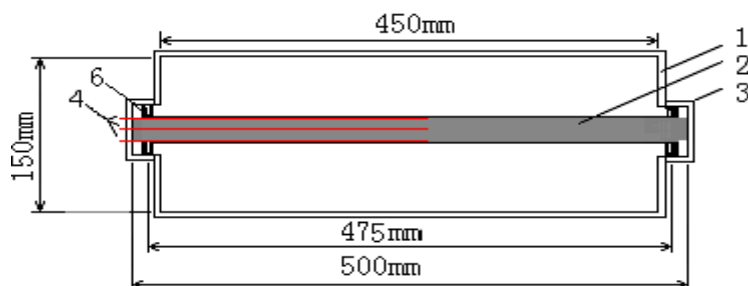
1. 进风口 2. 蜂窝器 3. 整流器 4a. 测试段 4b. 实验单管(及法兰) 5. 实验段  
6. 支持物 7. 收缩段 8. 测速段 9. 橡皮连接管 10. 风机 11. 电机

图 1. 实验风洞示意图

实验段风道横截面宽  $L=450\text{mm}$ ，高  $150\text{mm}$ ，实验圆管水平横穿实验段风道截面。实验管长  $500\text{mm}$ ，两端部嵌有法兰；A、B 两套实验系统圆管固定方法的不同，故实验圆管暴露在流动空气中的有效长度也不同。A 管采用胶木塞固定，有效长度  $L_A=470\text{mm}$ ；B 管采用软胶和金属法兰固定，有效长度  $L_B=475\text{mm}$ 。图 2 为实验段风道横截面示意图。



(a) A 实验段



(b) B 实验段

1. 风道壁面 2. 实验圆管 3. 有机玻璃套管 4. 热电偶(四对) 5. 胶木塞 6. 软胶和金属法兰

图 2. 实验段风道横截面示意图

## 2. 测量系统

测量系统包括风速的测量、加热功率的测量以及温度的测量等。

(a) 风速的测量。风速的测量使用毕托管-微压差变送器测量，如图 3 所示。对空气驻点所在流线应用伯努里方程：

$$\frac{P^*}{\rho_f} + \frac{v^{*2}}{2} = \frac{P}{\rho_f} + \frac{v^2}{2} \quad (7)$$

可得驻点所在流线的来流的速度：

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho_f}(P^* - P)} \quad (8)$$

其中， $P^*$ 为驻点压力， $P$ 为来流压力， $\rho_f$ 为来流密度， $v$ 为来流速度， $v^*$ 为驻点速度（ $v^*=0$ ）。通过测量总压  $P^*$ 和静压  $P$ 的差值（即动压值），即可计算来流速度  $v$ 。由于总压孔和静压孔不能在同一个位置，从总压孔和静压孔得到读数  $P'^*$ 和  $P'$ 不能反映  $P^*$ 和  $P$ 的真实值，故：

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho_f}(P^* - P)} = \sqrt{\frac{2}{\rho_f}(P'^* - P')}\xi \quad (9)$$

其中， $\xi$ 为动压管的校准系数。本实验系统，测速段风洞截面/毕托管横截面 $\gg 1$ ，毕托管前开孔与侧壁开孔距离很近，研究问题涉及速度不高，阻力损失可以不予考虑。因此，实验中取  $\xi = 1$ 。

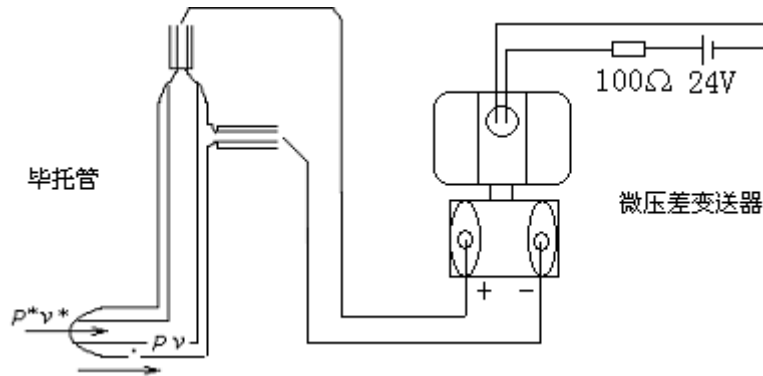


图 3. 毕托管-微压差变送器测量来流速度原理图

微压差变送器里有一个可变电容传感器，它是一个完全密封的组件，微压差通过隔离膜片和灌充液硅油传到传感膜片引起位移。传感膜片和两电容之间的电容差由电路转成直流电压信号。该电路中直流电源的输出电压为 24V，分压电阻的阻值为 100Ω。当输入变送器的压差信号为零时，记录分压电阻两端的分压读数  $V_0$ （约为 400mV）；在风机开启后，并且实验圆管对应时对热电偶的读数稳定时，记录分压电阻两端的分压读数  $V$ ；则对应的微压差值为  $\Delta P = (V - V_0) \times (1\text{Pa/mV})$ 。分压的测量采用高精度万用表 HP34401A。将总压孔接在微压差变送器的正端，静压孔接在微压差变送器的负端，从微压差变送器可直接测得动压值。可知测量段的风速为：

$$v = \sqrt{2\Delta P / \rho_f} \quad (10)$$

其中，空气密度  $\rho_f$ 等物性由  $t_m$  确定。由于空气流量不变，而实验中风速的测量是在测速段

完成的，可知所在实验段处的风速为：

$$u=(v \cdot A_m)/(A_s-LD) \tag{11}$$

其中， $A_m$  为毕托管测速所在位置的流道截面积 ( $A_m=0.012\text{m}^2$ )， $A_s$  为圆管所在实验段处的流道截面积 ( $A_s=0.0675\text{m}^2$ )。

(b) 加热功率的测量。实验管由直流稳压电源供电加热。因此，加热功率可直接由电压乘以电流得到。在本实验加热供电电路中，串联了一个阻值为  $0.1\Omega$  的标准电阻。实验中，可以通过测量其两端的分压  $U_R$  来确定加热电流  $I=U_R/R$ 。电源电压  $U$  和标准电阻电压降均采用高精度万用表 HP34401A 测量。忽略电路损失，实验管的加热功率可由下式得到：

$$Q=(U-U_R)U_R/R \tag{12}$$

(c) 温度的测量。温度的测量采用不同的测量方法。实验管壁温采用热电偶的方法测量。热电偶在单管管壁的埋设方法如图 4 所示。测量壁温的热电偶均以冰-水混合物（要求冰为碎冰，且冰明显多于水）温度 ( $0^\circ\text{C}$ ) 作为参考温度。因此，热电偶反映的就是圆管壁面温度。使用附表中铜-康铜热电偶分度表计算得到管外壁温。

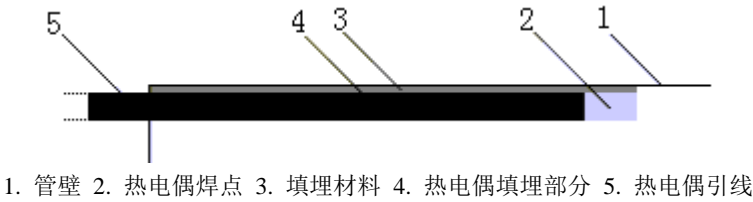


图 4. 管壁处热电偶埋设方法示意图

#### 四、实验步骤

1. 将高精度万用表与控制柜的测量引线连接；检查加热线路，将加热电源电流和电压调节旋钮调到最低，启动风机，然后再开启加热器电源。
2. 根据需要开启风机出口挡板，确定电机频率，进行风量的调节。
3. 根据需要调节加热电压，使实验管在一定的热负荷下加热；其中 A 管的加热电压约为  $90\text{V}$ ，B 管加热电压约为  $147\text{V}$ 。检测实验管温度变化，当实验管壁温 5 分钟变化小于  $0.1^\circ\text{C}$ （对应热电势变化  $0.004\text{mV}$ ）时，通过切换测量柜上的琴键开关分别记录标准电阻上的分压、微压差变送器对应读数、各热电偶所对应的热电势、空气温度对应热电势等，注明所用标准电阻阻值。加热电源电压由于属于强电，需单独通过高精度万用表进行测量。
4. 重复 2、3 过程，获取另一组计算  $Re$  和  $Nu$  准则数所需的实验数据。
5. 实验完毕时，先切断实验段加热电源，待实验管冷却以后再停止风机。
6. 注明实验风洞号，将记录数据交带实验教师签字。需记录数据的表格如下：

管号	$f$	$V_0/\text{V}$	$V/\text{V}$	$U/\text{V}$	$U_R/\text{V}$	$T_1/\text{mV}$	$T_2/\text{mV}$	$T_3/\text{mV}$	$T_4/\text{mV}$	$T_5/\text{mV}$
A										
A										
A										
B										
B										
B										

其中,  $f$  为风机转速频率,  $V_0$  为压差变送器初始读数 (流速为 0 时对应的读数),  $V$  为实验工况下压差变送器读数,  $U$  为加热电压,  $U_R$  为标准电阻两端分压,  $T_1, T_2, T_3, T_4$  为测壁温的四个热电偶热电势值,  $T_f$  为测环境温度热电偶热电势值。

7.

## 五、数据整理

1. 壁面强迫对流平均放热系数  $h$  的计算。电加热器所产生的总热量  $Q$  按式 (5) 计算。放热系数  $h$  按式 (6) 计算, 取实验管表面黑度  $\varepsilon = 0.1$ 。
2. 空气流速的计算。空气速度按式 (10) (11) 计算。
3. 准则方程中两个常数的确定。将计算得到的数据代入相应公式, 得到准则数后, 以  $Nu$  数为纵坐标, 以  $Re$  数为横坐标, 将这两组数据画在以 10 为底的对数坐标上, 并对实验点进行线性拟合, 由于

$$\lg Nu = \lg C + n \lg Re \quad (13)$$

因此, 拟合得到的直线截距为  $\lg C$ , 直线的斜率为  $n$ 。由此即可计算出准则方程式中的常数  $C$  和  $n$ 。

## 六、实验报告要求及注意事项

### 实验报告要求:

1. 写出实验原理, 整理出实验数据列表。
2. 在对数坐标纸上绘出各实验点, 对实验点进行线性拟合, 求出准则方程式中的常数  $C$  和  $n$ 。
3. 将实验结果与下列有关参考书<sup>1</sup>给出的空气横掠单管时强迫对流换热经验准则方程式进行比较, 并给出必要分析。

$$\begin{aligned} Re=0.4 \sim 4, Nu &= 0.989 Re^{0.330} Pr^{1/3} \\ Re=4 \sim 40, Nu &= 0.911 Re^{0.385} Pr^{1/3} \\ Re=40 \sim 4,000, Nu &= 0.683 Re^{0.466} Pr^{1/3} \\ Re=4,000 \sim 40,000, Nu &= 0.193 Re^{0.618} Pr^{1/3} \\ Re=40,000 \sim 250,000, Nu &= 0.0266 Re^{0.805} Pr^{1/3} \end{aligned} \quad (14)$$

4. 分析实验偏差及其产生原因。
5. 思考题
  - (1) 流体横掠圆管的平均表面传热系数关联式为  $Nu = C Re^n Pr^{1/3}$ , 本实验中为何采用关联式  $Nu = C Re^n$  进行拟合, 依据是什么?
  - (2) 请解释用于测流速的毕托管为什么要放置在实验段圆管后较远距离收缩的流道里?

### 注意事项:

1. 首先了解整个实验装置的各个部分, 并熟悉仪表的使用方法, 特别是电机控制柜、测量柜和高精度万用表都必须按照操作步骤使用, 以免损坏设备。
2. 为确保管壁温度不超过允许的范围, 启动及工况改变时都必须注意操作顺序。启动时必须先开风机, 调整电机频率, 然后对实验管通电加热, 并调整到要求的。实验完毕时, 必须先关加热电源, 待实验管段冷却以后再关风机。

<sup>1</sup> Holman, J. P., Heat transfer, Fifth Edition, McGraw-Hill, Inc., 1981

清华大学热能系热工学实验室  
联系教师：李辉  
手机：13910997103  
邮箱：hui-li@mail.tsinghua.edu.cn