

# 格栅下游湍流特性的研究

李静美 赵润民 翟曼玲

中国科学院力学研究所, 北京(邮政编码 100080)

杨雅贤 宋政

中国科学院工程热物理研究所, 北京(邮政编码 100080)

**摘要** 用恒温热线风速仪在激波管中(来流条件  $T_0 = 290 \sim 315 \text{ K}$ ,  $U_\infty = 20 \sim 60 \text{ m/s}$ )测量了四种形状不同的格栅下游湍流特性。结果表明: 在相同条件下, 圆柱形格栅能产生较大的湍流度, 其下游湍流度随距离增加而减小, 随来流雷诺数增加而增加。

**关键词** 格栅, 湍流度, 热线, 激波管。

## 引言

通常不加辅助部件, 进行涡轮叶片传热实验研究时, 设备所能提供的来流湍流度与涡轮实际工况差别极大, 前者为千分之几, 后者高达百分之几。人所共知, 来流湍流度对边界层转捩及叶片热流率分布影响很大。为了使实验设备提供的来流尽可能接近实际情况, 需要在实验件前设置增加来流湍流度的格栅。以往关于这方面的论述多见长周期的低速风洞, 还很少见到在激波管中进行该题目的研究结果。为了给本实验室的激波管叶栅风洞装最佳格栅, 及发展在瞬态风洞中使用热线风速仪的技术, 在一个内径为80mm的激波管中, 用恒温热线风速仪测量了四种形状不同格栅下游湍流特性。来流条件:  $T_0 = 290 \sim 315 \text{ K}$ ;  $U_\infty = 20 \sim 60 \text{ m/s}$ 。

## 一、测量原理

热线风速仪是一种很通用的仪器, 本文将论述在激波管中用热线风速仪进行速度和湍流度测量的特殊问题。

激波管中被激波压缩后的气体温度均高于初温, 而一般热线探头的标定都在室温下进行。这种在室温下标定的探头用于激波管中进行速度测量, 必须要修正这一温度差。由著名的 King 公式<sup>[1]</sup>知: 从热线上传到速度为  $u$  的气流中的热流率

$$q = (A + B\sqrt{u})(T_w - T_\infty) \quad (1)$$

式中  $T_w$  为热线温度,  $T_\infty$  为来流静温,  $A$ 、 $B$  为待定常数。对于恒温热线风速仪, 反馈到热线上的电能必须等于  $q$ , 即

本文于1992年1月3日收到, 1992年8月17日收到修改稿。

$$q = i^2 R_w = V^2 / R_w = (A + B\sqrt{u})(T_w - T_\infty) \quad (2)$$

恒温热线风速仪  $R_w = \text{常数}$ , 上式也可简化为

$$V^2 / (T_w - T_\infty) = a + b\sqrt{u} \quad (3)$$

显然用(3)式作为校准公式即可解决温度修正问题。若标定时, 气流温度  $T_c$  与测量时气流温度  $T_w$  相等, 则(3)式就成为一般通用的校准公式

$$V^2 = A' + B'\sqrt{u} \quad (4)$$

用在室温下标定的探头测量温度不等于  $T_c$  的气流, 需给热线的输出电压乘一个系数  $C = (T_w - T_c) / (T_w - T_\infty)$ 。测量时若用了线化器, 此时校准曲线是  $V = A' + B'u$ , 则需给输出电压乘系数  $c' = [(T_w - T_c) / (T_w - T_\infty)]^2$  才能用室温下得到的标准曲线。

另一个问题是激波管实验时间只有 20ms, 热线输出电压中的脉动值无法象在长周期设备中那样测量, 由热线风速仪从总电压信号中分开单独送出。只能从采集得到的总电压数据计算得到, 即  $\Delta V(t) = V(t) - V_{\text{平均}}$ , 因此在激波管中进行湍流度测量, 必须选用较高精度的采集器, 否则误差较大。

## 二、实验装置

实验设备为内径等于 80mm 的激波管。长 6.77m, 用划线铝膜, 空气驱动空气, 低压段初压力  $p_1 = 1$  大气压。两个相距 1960mm 的压电晶体传感器测出激波扫过此距离的时间, 然后计算得到激波速度  $u_s$ 。激波后的气流速度  $U_\infty$ 、 $T_\infty$  即可由下面公式得到

$$U_\infty = [2a_1 / (\gamma + 1)] \left[ M_s - \frac{1}{M_s} \right] \quad (5)$$

$$T_\infty = \frac{[2\gamma M_s^2 - (\gamma - 1)][(\gamma - 1)M_s^2 + 2]}{(\gamma + 1)^2 M_s^2} \quad (6)$$

其中  $T_1$  为低压段初温,  $a_1$  是温度为  $T_1$  时的声速,  $M_s = u_s / a_1$  为激波马赫数, 空气比热比  $\gamma = 1.4$ 。

格栅有四种形状。市场出售的 30 目和 200 目的铁丝网, 直径 3mm, 间距分别为 6mm 和 9mm 的圆柱格栅。格栅先装在托架上, 托架用螺钉固定在低压段预定位置上。

热线探头支杆  $\phi = 5\text{mm}$ ,  $5\mu\text{m}$  白金丝焊在间距为 3mm 的针形支柱上。热线探头位置距膜片下游 1.025m 处。热线与气流垂直, 与激波管轴线相交。移动格栅托架可改变格栅与探头间距离  $L$ 。

为防止膜片屑打断热丝, 在距膜片下游 235mm 处装一个孔径为 3mm 的孔板。

热线探头与日本 Kanomax 恒温热线风速仪连接, 其输出电压信号由 DM-7100 瞬态记录仪以  $20\mu\text{s}$  的间隔采集下来, 经 SM-2100 数据处理机处理后, 即可得到所要的湍流度值。

Kanomax 热线风速仪备有线化器(即模拟计算机), 经过线化器输出的电压与气流速度成线性关系。  $V = KU_\infty$ , 湍流度即为:  $\varepsilon = \sqrt{\Delta u^2} / u = \sqrt{\Delta V^2} / V$

## 三、实验结果和讨论

### 1. 热线探头的标定

在激波管中热线探头输出电压的典型曲线见图 1。由图中曲线看出, 大约 0.1ms 时

间内,电压即达到定常值,平坦段维持2~3ms后,曲线出现了较大的波动,这表明激波管气流已经由层流转换为湍流。由于格栅形状,位置及来流雷诺数都影响转换时间,所以曲线上平坦段的长短因上述因素而异。

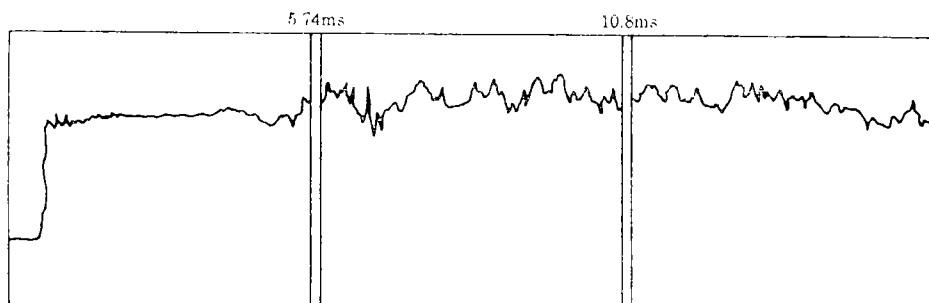


图1 热线输出电压典型曲线

Fig.1 Typical output voltage history of a hotwire in the shock tube

在激波管中,气流速度范围  $U_\infty = 20 \sim 60 \text{ m/s}$ ,  $T_0 = 290 \sim 315 \text{ K}$  进行了探头标定。用线化器,过热比为1.5。图2是1195\*探头的标定结果。由图中结果看出,经温度修正后的激波管标定数据与校准风洞中得到的数据基本一致,说明温度修正系数很合适。

## 2. 格栅下游的湍流特性

在来流速度  $U_\infty = 30 \sim 60 \text{ m/s}$ , 格栅下游  $L = 190, 490$  和  $790$  处测量了30目、200目, 格栅6和格栅9四种形状格栅下游的湍流度特性。热线探头在校准风洞中标定, 过热比取1.5, 信号经线化器处理后送出。结果表明,30目下游湍流度随来流速度增加而增加,

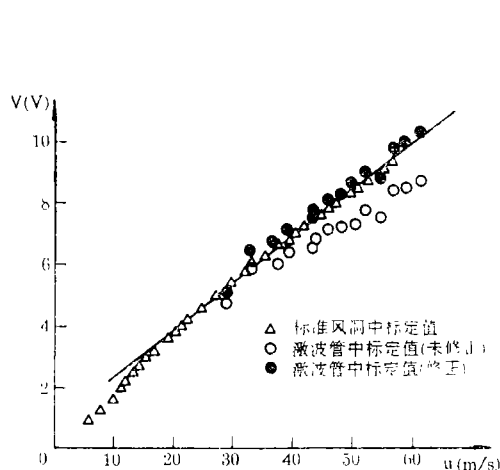


图2 1195\* 探头标定结果

Fig.2 Calibrated results on 1195\* hotwire

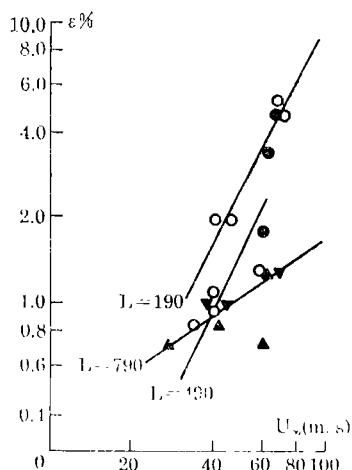


图3 格栅6~9下游湍流度随来流速度的变化  
Fig.3 The turbulence against freestream velocity downstream the grid 6~9

但对距离增加无明显的变化。200目下游湍流度基本上不随来流速度和距离改变,保持在1%量级。格栅6和格栅9的数据重合在一起,见图3。其下游湍流度特性有相同的规

律, 即随来流速度增加而增加, 随距离增加而减少。可见圆柱间距从6增加到9对湍流速度无多大影响。由以上结果看出格栅形状对格栅下游湍流速度特性影响极大。图4中 $L=190$ 处各格栅下游的湍流速度数据可清楚地看到这一点。这是格栅下游湍流速度形成机制决定的, 气流通过格栅后, 形成大小、强弱不同的旋涡, 旋涡大, 能量大, 其湍流速度就强, 衰减也慢, 反之亦然。构成格栅6~9的 $\phi 3$ 圆柱尺度比200目和30目铁丝尺度大, 其下游旋涡就大, 所以湍流速度也高。在粘性作用下, 小涡比大涡衰减快, 所以200目和30目下游湍流速度在目前来流范围内不随距离变化, 而格栅6~9直到 $L=790$ 湍流速度仍随距离变化。图3还可看出, 在 $L=190$ 和490处, 格栅6~9下游湍流速度随来流规律相同, 而在 $L=790$ 直线斜率明显变小。这是由于雷诺数增大, 涡尺寸变小, 衰减快; 而雷诺数增加也使涡能量大, 不容易衰减, 目前的结果说明前者占了上风。

由于实验时激波管中均装有孔板。为了区分孔板的作用, 有一组实验是在只有孔板不加格栅条件下进行的, 结果也见图4。在孔板下游 $L=970$ 湍流速度与30目(实际是孔板+30目)下游 $L=190$ 处湍流速度量级相同, 略低一点。说明孔板下游的大涡被30目网破碎了, 这在200目下游的结果看得更清楚, 已经看不出孔板下游的湍流特性了。

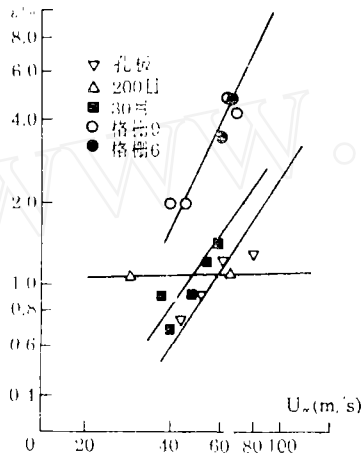


图4  $L=190$ 不同格栅下游湍流速度随来流速度的变化  
Fig.4 The turbulence against freestream velocity for 5 kinds of grids at  $L=190$

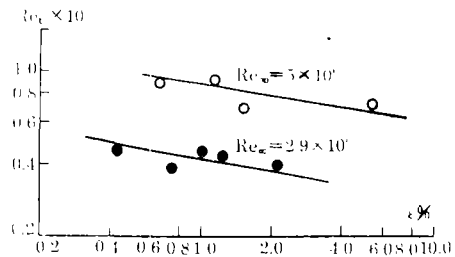


图5 激波管中气流转捩雷诺数随湍流度的变化  
Fig.5 The effect of the turbulence on transition Reynolds number in the shock tube

由图1热线输出信号可以清楚地看出, 激波管中气流转捩时间, 由此可计算出转捩雷诺数。进而可得到激波管转捩雷诺数与来流雷诺数的关系。图5可看出转捩雷诺数随来流湍流度增加而减小, 随来流雷诺数增加而增加, 这符合边界层转捩的一般规律<sup>[2]</sup>, 说明实验可靠。

#### 四、结 论

1. 引入温度修正后, 可以用热线风速仪在激波管中进行湍流速度测量。
2. 在相同条件下, 圆柱格栅下游的湍流速度最大, 其下游湍流速度随来流雷诺数增

而增加, 随距离增大而减小。

3. 在激波管中测得气流转捩雷诺数随来流雷诺数和湍流度变化的规律符合一般边界层转捩规律, 证明本实验技术是可靠的。

### 参 考 文 献

- 1 King L V. On the Convection of Heat from Small Cylinders in a Stream of Fluid with Applications to Hotwire Anemometry. Phil. Trans. Roy. Soc. London, 1914, 214(14): 373
- 2 Harvey W P, Bobbitt P J. Some Anomalies Between Wind Tunnel and Flight Transition Results. AIAA Paper 81-1225, 1981.

## The Measurement of Turbulence Characters of the Grids in a Shock Tube

Li Jingmei Zhao Runming Zhai Manling

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Yang Yaxian Song Zheng

(Institute of Engineering Thermophysics, Academia Sinica)

**Abstract** The turbulent characters for four kinds of the grids downstream were measured in a shock tube, using a constant temperature anemometer at free stream conditions;  $U_{\infty} = 20 \sim 60 \text{ m/s}$ ;  $T_0 = 290 \sim 315 \text{ K}$ . The results indicate that more intense turbulence appears downstream of the bars-grid than other grids at same free stream conditions. The turbulence decreases with increasing distance downstream from the bars-grid, and increases with increasing freestream Reynolds number.

**Key words** grids, turbulence, hotwire, shock tube.