

# 含灰气体平板气动加热实验研究

林建民 李仲发 张欣玉 俞鸿儒

中国科学院力学研究所, 北京(邮政编码 100080)

**摘要** 利用灰尘激波管入射激波后平衡区两相流开展平板传热实验。在低灰尘负荷率、来流分别为亚声速和超声速流条件下测量平板在零攻角及小攻角 ( $\alpha=3^\circ$ ) 情况沿轴向的热流分布。

**关键词** 激波 激波管 两相流 热流率

## 1 前言

高速飞行器在含有云粒子的大气环境中飞行, 所承受的气动加热量不同于纯净大气环境中的数量。驻点区中, 含灰气体加热量远超出其它条件相同时纯净气体加热量已被许多实验证实<sup>[1]</sup>。飞行器身部与来流具有较小攻角的表面处, 其气动加热特性目前仍不十分清楚。本项研究, 利用灰尘气体激波管入射激波后平衡区两相流进行平板传热实验, 探索低灰尘负荷率条件下平板在零攻角和小攻角 ( $\alpha=3^\circ$ ) 条件下的气动加热特性。

## 2 实验装置及实验描述

实验在中科院力学所的竖直灰尘气体激波管中进行。具体几何尺寸见图1。

实验中采用直径  $30\sim 50\ \mu\text{m}$  玻璃微珠作为灰粒, 并用本实验室扬灰装置在激波管被驱动段内均匀散布灰粒。由于灰粒沉降速度小, 与入射激波速度相比可以忽略。入射激波扫过含灰气体后, 经一段时间气体与灰粒速度、温度达到平衡。本实验利用平衡气、固两相流进行平板表面热流量测量。

实验中激波速度及波后压力由置于实验段附近管壁上两个压力传感器监测, 并用消光法测量激波前后灰尘浓度。

平板模型置于实验段, 总长  $L =$

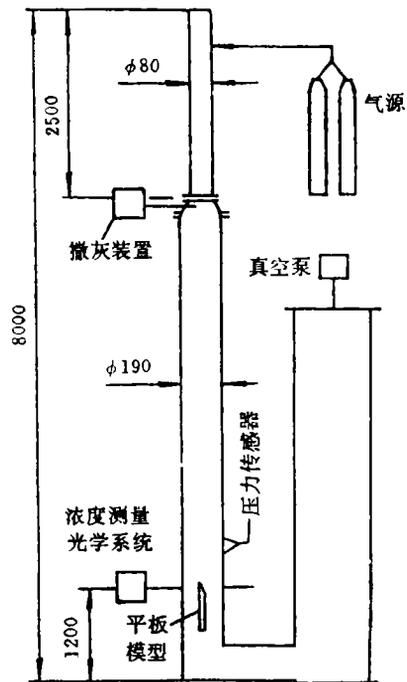


图1 竖直灰尘气体激波管简图

1995年7月4日收稿。

280mm, 在距平板前缘 23, 27.5, 42.5, 52, 61, 82, 95.5, 110.5, 140 和 180mm 中心线上布置十个铂膜电阻温度计。测得的热流信号经放大器和热电模拟网络变换为热流率, 送瞬态记录仪, 再经微机处理输出。

在入射激波马赫数为  $M_1=1.67$  和  $M_1=3$  条件下, 分别开展了零攻角及  $3^\circ$  攻角的平板气动加热实验, 相应的灰尘负荷率  $\eta$  为 0, 0.01, 0.04, 0.12, 其中  $\eta=0$  对应于纯净空气条件。

### 3 实验结果

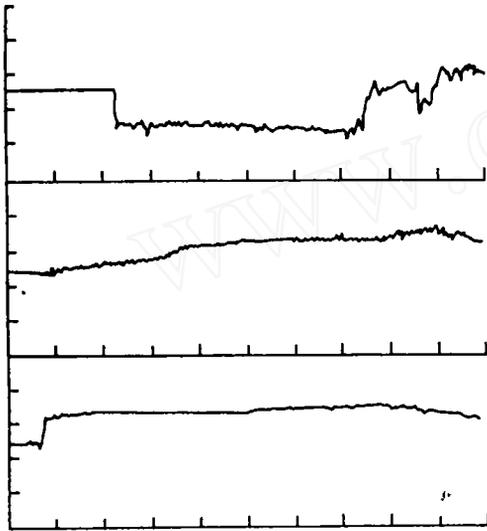


图 2 自上而下典型热流、浓度、压力曲线

典型的热流随时间变化曲线绘于图2, 图中同时给出典型激波前后灰尘浓度及压力曲线。实验数据按图中有效实验时间内平均值给出。

实验结果以斯坦顿数 ( $S_t = q / [\rho u c_p (T_r - T_w)]$ ) 随无量纲长度  $x/L$  变化曲线表示。曲线实质上给出了  $S_t$  数沿平板轴向随雷诺数 ( $Re = \rho u x / \mu$ ) 的变化趋势。其中  $q$  为平板轴向不同测点测得的热流值,  $x$  为测点至平板前缘距离,  $L$  为平板总长度,  $T_w$  为平板壁温, 这里取室温,  $\rho, u, c_p, T_r$  分别为激波后气流密度、速度、定压比热和恢复温度。来流为含灰气流时 ( $\eta > 0$ ) 参数取激波后平衡区参数<sup>[2]</sup>, 来流为纯净空气时 ( $\eta = 0$ ) 取激波后参数。

入射激波马赫数  $M_1=1.67$  时, 零攻角平板在不同灰尘负荷率条件下  $S_t \sim x/L$  曲线绘于图3,  $3^\circ$  攻角时相应曲线绘于图4。

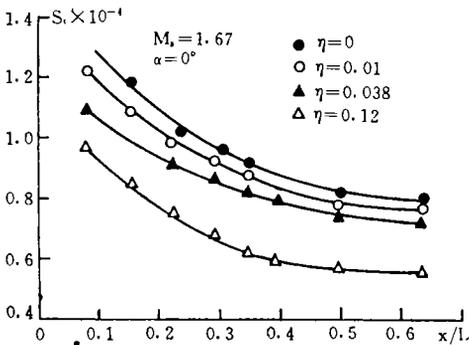


图 3  $M_1=1.67, \alpha=0^\circ$  时沿平板轴向热流分布

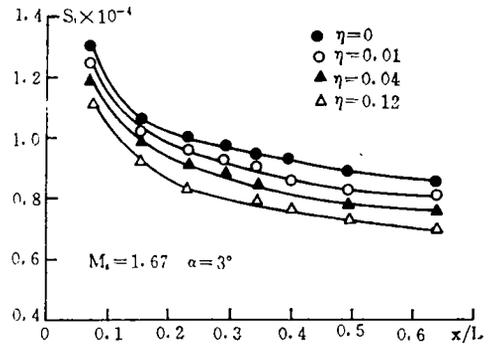


图 4  $M_1=1.67, \alpha=3^\circ$  时沿平板轴向热流分布

由图3可以看出: 平板模型为零攻角时, 含灰气流中传热曲线变化规律与纯净空气时相同,  $S_t$  随平板轴向距离  $x/L$  增加逐渐下降, 亦即随雷诺数  $Re$  增加而下降, 随着灰尘负

荷率增加热流率降低。

图 4 曲线表明：平板模型具有 3° 攻角时， $S_t$  曲线随  $x/L$  的变化规律与零攻角时相似，随灰尘负荷率  $\eta$  的增加传热率呈下降趋势。

为便于比较零攻角与小攻角时传热率沿平板轴向变化规律，图 5 给出  $\eta=0$  和  $\eta=0.12$  时零攻角与 3° 攻角时  $S_t \sim x/L$  曲线。从中可以看出无论  $\eta=0$  还是  $\eta=0.12$ ，3° 攻角时  $S_t$  随  $x/L$  变化均较零攻角时平缓，且 3° 攻角时传热率普遍高于零攻角时的相应值。这一现象正反映出平板具有小攻角时灰粒直接冲刷平板表面的效应。

入射激波马赫数  $M_1=3$ ， $M_2=1.31$ （对应于激波管②区为超声速流），零攻角平板与 3° 攻角平板在不同灰尘负荷率条件下的  $S_t \sim x/L$  曲线分别绘于图 6、7。

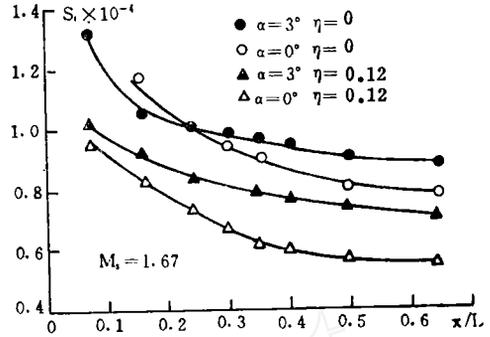


图 5  $\alpha=0^\circ, \alpha=3^\circ$  时热流分布曲线比较,  $M_s=1.67$

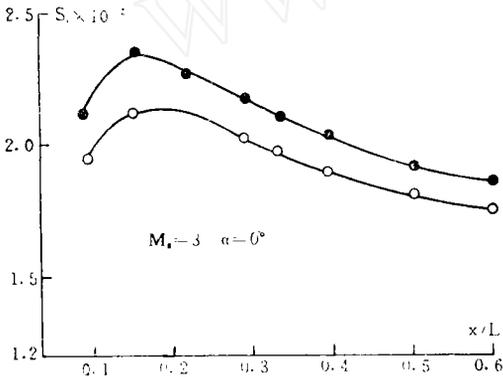


图 6  $M_s=3, \alpha=0^\circ$  时沿平板轴向热流率分布  
○  $n=0.121$  ●  $n=0$

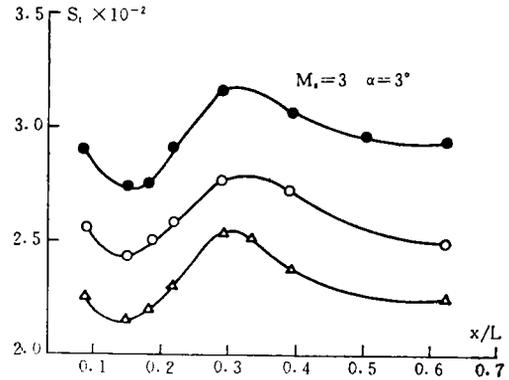


图 7  $M_s=3, \alpha=3^\circ$  时沿平板轴向热流分布  
○  $n=0.08$  ●  $n=0$  △  $n=0.105$

图 6 曲线表明：来流为超声速情况下，零攻角平板沿轴向传热率变化规律与亚声速来流时相似。含灰时传热率变化规律与纯净空气中相同，但  $\eta=0.12$  时传热率仍低于纯净空气中数值。

图 7 中 3° 攻角情况下传热率沿轴向分布曲线出现波动。这是由于小攻角平板在超声速流场中，为满足流动条件，平板前缘产生斜激波，该波在激波管壁反射后与平板边界层相互干扰造成局部热流率增加。图中诸曲线在  $x/L > 0.4$  以后的数值，因位于两道斜激波之后故均高于  $x/L < 0.2$  时数值。尽管受到斜激波干扰，图中曲线仍显示出传热率  $S_t$  随灰尘负荷率增加而逐渐降低的规律。

### 4 结 论

(1) 零攻角平板在亚声速和超声速含灰气流中传热曲线变化规律与纯净空气时相同。 $S_t$  随  $x/L$  (亦即随  $Re$ ) 增加而逐渐下降，随灰尘负荷率  $\eta$  增加而降低。

(2) 小攻角 ( $3^\circ$  攻角) 平板在亚声速含灰气流中沿平板轴向传热曲线变化趋势与零攻角相近来流条件时相似。  $S$ , 随  $x/L$  增加而下降, 随  $\eta$  增加而降低。超声速流场中虽受斜激波干扰仍显示出  $S$ , 随  $\eta$  增加而降低的特性。

(3) 小攻角平板传热率  $S$ , 随  $x/L$  变化比零攻角平板时平缓, 且热流值普遍高于零攻角平板热流值。

### 参 考 文 献

- 1 Dunbar L F, et al. *AIAA J VBNT*, 1975
- 2 俞鸿儒等. 含灰气体激波结构实验观察. 力学学报, 1983, (6), 531~537

## THE STUDY OF HEAT TRANSFER ON A FLAT PLATE IN DUST GAS

Lin Jianmin Li Zhongfa Zhang Xinyu Yu Hongru  
(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences*)

**Abstract** Heat transfer measurements on a flat plate are performed in the vertical dust shock tube in which the equilibrium dust gas flow in 2 range has been used. The experiment is made under the conditions of lower particle loading ratio, subsonic and supersonic upstream, at zero and  $3^\circ$  attack angles, respectively.

**Key words** shock wave shock tube two phase flow heat transfer