

# 高焓激波管驻点热流率测量

张仕忠 陈宏 董志成 俞鸿儒

(中国科学院力学研究所高温气体动力学重点实验室, 北京 100190)

**摘要:** 本文分析了几种常见热流传感器的原理和应用场合, 并通过爆轰驱动激波管作为气动加热模拟实验设备, 用自己研制的同轴热电偶测量出模型驻点区的热流值, 采用数值积分作为温度-热流转换的数据处理手段, 为临近空间飞行器驻点区热流率测量提供实验依据。

**关键词:** 爆轰驱动激波管, 驻点热流率测量, 同轴热电偶

## Heat-flux Measurement at Stagnation Point in High-enthalpy shock tubes

Zhang Shi-zhong, Chen Hong, Dong Zhi-cheng, Yu Hong-ru

(Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China)

**Abstract:** By analyzing the principles and using occasions of common heat-flux sensors, self-made coaxial thermocouple heat-flux sensors are used to measure the heat-flux values in stagnation zone in this paper. The detonation-driven shock tube is applied as aerodynamic heating equipment in this simulation experiment, and the temperature-heat conversion data is processed by numerical integration. Finally, an experimental result of heat-flux measurement at stagnation point is provided for near space aircraft.

**Key words:** shock tube; heat-flux measurement; coaxial thermocouple

## 0 引言

随着临近空间飞行器研究的发展, 飞行器表面气动热及热防护技术成为与推进技术并列的高超声速飞行的关键之一, 气动热测量技术在实验研究中越来越重要。可用于气动加热模拟实验的设备有很多, 其中激波管和激波风洞具有一些独特的优点, 一直是气动加热实验研究的有力工具之一。首先, 激波管和激波风洞试验气流的参数值较高, 能同时模拟高速高焓或者高雷诺数; 其次, 流动持续时间短, 一般只有几毫秒至十几毫秒, 方便热流测量。由于流动时间短, 试验模型不需要冷却系统, 模型的设计和制造变的比较简单; 在一次实验中模型的温度变化很小, 可以认为在实验过程中保持室温, 使得数据处理大大简化。

在进行钝头体头部驻点热流试验中, 激波管较激波风洞有更为明显的优点。在模拟相同的驻点总焓和总压时, 由于激波风洞中的试验流马赫数一般比激波管的高, 激波风洞中气流的总压损失远高于激波管, 所以激动风洞所需驱动压力要远远高于激波管, 而且投资运行费用也较激波管高很多, 因此

本试验中驻点热流率测量采用激波管作为气动加热模拟的实验设备, 驱动方式采用爆轰驱动。

## 1 驻点热流测试技术

驻点热流的测量关键问题是驻点处的热流冲刷比较大, 对传感器的抗冲刷能力要求比较高, 常用的测热传感器主要分为表面温度计类和量热计类。

表面温度计类是利用表面温度计测出半无限体的表面温度随时间变化的历史, 然后按热传导理论计算表面热流率, 如: 薄膜电阻温度计, 同轴热电偶。量热计类是利用量热元件吸收传入其中的热量, 测量量热元件的平均温度变化率再计算表面热流率。

### 1.1 薄膜电阻温度计

薄膜电阻温度计是将金属薄膜镀在非金属材料上, 当金属薄膜受到气动热时其电阻值发生改变从而测出表面温度, 一般是将铂通过真空溅射的方法溅射到玻璃的表面。薄膜电阻温度计的优点是反应快, 灵敏度高; 缺点是使用的温度范围较小, 温

升过大会导致基底物性发生变化, 从而引起较大误差。抗冲刷能力差, 薄膜与气流直接接触, 经不住含固体微粒气流的正面冲刷。薄膜受气流冲刷过程中自身电阻发生变化从而引起严重的实验测量误差。当空气发生解离时, 电阻也会发生变化, 从而引起较大的测量误差。

## 1.2 同轴热电偶

热电偶是一种基于热电效应的温度传感器, 其测量原理是将两种不同材料的导体或半导体 A 和 B 连接成一个闭合回路。当导体 A 和 B 之间存在温差时, 两者之间便产生电动势, 因而在回路中形成电流, 这种现象称为塞贝克效应。同轴热电偶的结构如图 1 所示, 将康铜丝穿入紫铜管中, 使用环氧树脂隔离, 表面使用机械打磨使其导通, 从而构成铜—康铜热电偶。

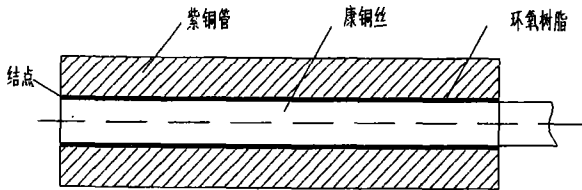


图1 同轴热电偶热流传感器结构示意图

同轴热电偶优点是频响高, 适用温度范围较宽, 抗冲刷能力较好, 其灵敏度虽然相对薄膜电阻温度计低一些, 但由于驻点热流率大, 信号强度能满足测量要求。这种结构的同轴热电偶体积可以做的很小 ( $\phi 1.6\text{mm}$  左右, 长  $1\sim 2\text{cm}$ ), 便于安装和使用。

基体材料长度至少要大于  $x = 4\sqrt{\alpha t}$  才能被认为是半无限体, 本文中紫铜管长度取  $2\text{cm}$ , 满足条件要求。如果结点是通过镀膜连接的话, 需要镀膜的厚度由膜厚与传感器频响关系公式决定:

$$t = \frac{l^2}{\pi y^2 \alpha} \left( \frac{2-a^2}{2a} \right)^2$$

$$\text{其中: } y = \frac{q_0 - q}{q_0}, \quad a = \sqrt{\frac{\rho_2 c_2 k_2}{\rho_1 c_1 k_1}}$$

本文中是通过机械打磨使铜和康铜两极导通, 通过机械打磨的温度结点很薄, 温度结点本身吸收的热量可以忽略不计, 温度结点的温度可以近似认为就是传感器的表面温度。而且实验时间很短, 热流深入传感器得表面很浅, 基本可以认为是半无限体。沿表面的温度梯度比垂直于表面的温度梯度小得多, 根据半无限体一维热传导理论, 可以得出热流率与模型表面温度的关系, 然后根据数值积分计算, 把表面温度转变成热流率曲线。积分公式如下:

$$q_n(t) = \frac{2\sqrt{\rho c k}}{\sqrt{\pi} \alpha_R E_0} \left[ \sum_{i=1}^n \frac{E(t_i) - E(t_{i-1})}{(t_n - t_i)^{1/2} + (t_n - t_{i-1})^{1/2}} \right]$$

对于同轴热电偶,  $\Delta E / \Delta T = \alpha_R E_0$ , 即为铜—康铜热电偶的灵敏度系数, 通过查分度表获得。

## 1.3 塞形铜箔量热计

塞形铜箔量热计结构如图 2 所示, 前端为圆形铜箔, 铜箔背面中心处焊接细康铜丝, 该处即是热偶结点; 圆周附近焊细铜丝, 作为铜—康铜热偶引出线; 将铜箔用环氧树脂粘在绝热管上。

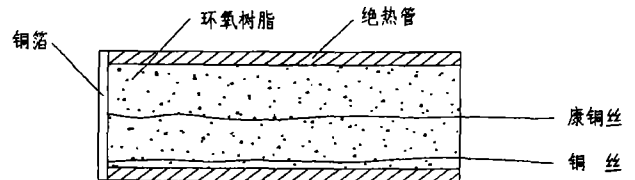


图2 塞形铜箔量热计结构示意图

塞形铜箔量热计测量原理是假定铜箔背面及侧面绝缘无热损失, 则单位面积铜箔在某一时间间隔传入其中的热量应等于铜箔蓄积的热量, 只要测出铜箔平均温度变化率即可计算热流率。塞形铜箔量热计的优点:

1. 铜箔能经受气流冲刷, 测温热偶丝在铜箔背面不受气流冲刷影响。

2. 与一般的热电偶相比, 塞形铜箔量热计改变了热偶结的结构形式, 它以量热片代替了原来的一个结点, 以尽可能远离热偶结、尽量细的铜丝引出线代替了从热偶结直接引线的方法, 从而大大减小了引出线对结点附近温度分布的影响。

3. 在空气发生解离的情况下也能准确的进行

测量。

4. 只要各种参数选择妥当,可以适用于激波管和激波风洞传热测量。

但是在实际应用中由于焊接工艺达不到,实际制作有困难,而且塞形铜箔量热计输出灵敏度相对薄膜电阻温度计要低。

在本文激波管中进行的钝头模型实验中发现,由于薄膜电阻温度计安装位置离驻点很近,实际热流冲刷比较大,前端的薄膜电阻温度计一次冲刷就导致损坏,采集的信号不可用。更换传感器再次进行实验,结果也是一次冲刷即损坏。拆下模型发现,安装的薄膜电阻温度计表面严重烧蚀,所以在本文中薄膜电阻温度计不能用来测驻点热流率,其抗冲刷能力差。通过试验分析,目前最有效可行性最高

的测量驻点热流率的方法还是同轴热电偶。

## 2 高焓激波管试验装置

本文实验所用的爆轰激波管如图3所示。该设备激波管全长31m,包括驱动段、被驱动段和卸爆段,内径均为224mm;试验段直径1m、长大于8m。实验气体为空气,驱动气体是乙炔和氧气,使用火花塞+点火管装置点火。

为了获得最佳的运行时间,驱动段和被驱动段最佳长度比是根据模拟飞行马赫数不同计算出来,如图3所示。该激波管比较适合模拟飞行高度 $H=30\sim 60\text{km}$ ,飞行马赫数8~18范围内的模型头部驻点区气动加热实验。

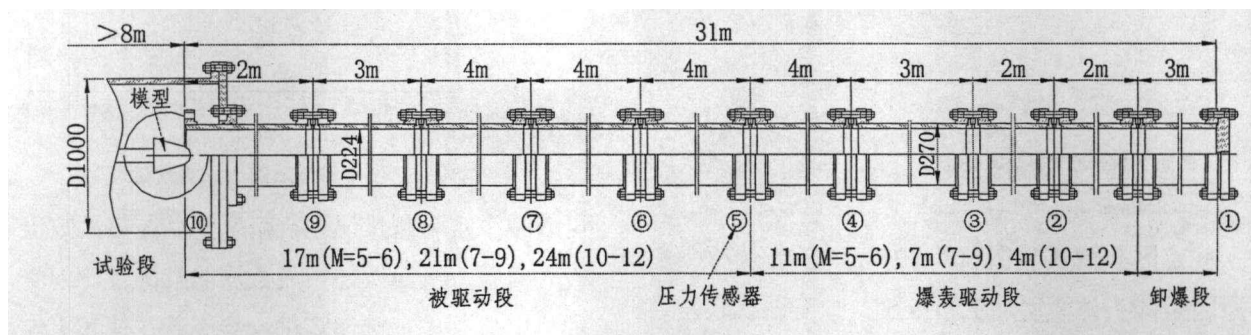


图3 爆轰激波管实验装置

## 3 驻点热流测量

对于驻点热流测量,我们首先在本爆轰激波管试验段进行了皮托耙小钝头体驻点热流测试,半径 $R=10\text{mm}$ 的小钝头体热流测量结果如图4所示,根据F-R驻点热流公式计算,在此激波管运行参数下, $R_0=10\text{mm}$ 的小钝头体驻点热流理论值为 $1.2\text{KJ/cm}^2 \cdot \text{s}$ ,实验结果和理论值误差小于10%,由此可以说明同轴热电偶测量驻点热流值是可靠的。

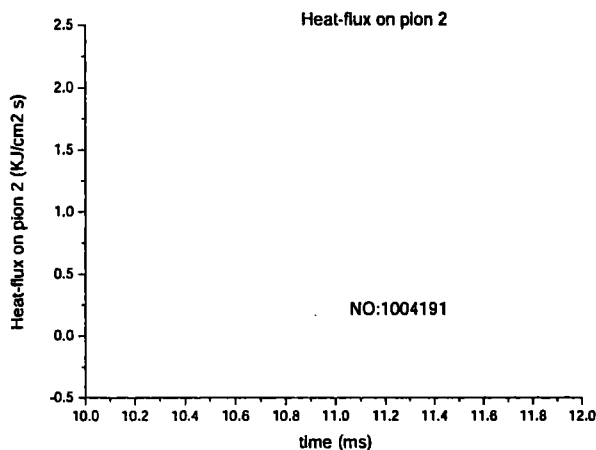


图4 小钝头体热流测量结果 ( $H=40\text{km}$ ,  $M_\infty=10$ ,  $R=10\text{mm}$ )

在大钝头体( $R_0=40\text{mm}$ )驻点区热流测量试验中,我们在模型不同位置安装了7只同轴热电偶测热,进行了几次验证性测量实验,实验结果如表1所示,其中理论值取自文献[4]。

表 1 钝头体热流率分布实验结果 (H=40km,  $M_\infty=10$ , R=40mm)

编号 流值 位置	10012802	10020301	10020302	10020303	10020304
	$KJ/cm^2 \cdot s$	$KJ/cm^2 \cdot s$	$KJ/cm^2 \cdot s$	$KJ/cm^2 \cdot s$	$KJ/cm^2 \cdot s$
15°	0.092436	0.095251	0.104634	0.112392	0.12638
30°	0.10756	0.092632	0.102668	0.113695	0.097361
45°	0.065421	0.077771	0.066806	0.069969	0.072674
60°	0.035178	0.035347	0.037476	0.043304	0.053692

绘制成图 5 所示:

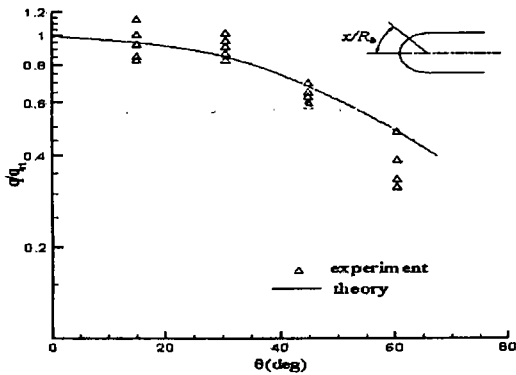


图 5 大钝头驻点区热流实验曲线  
(H=40km,  $M_\infty=10$ , R=40mm)

驻点区热流实验在 60° 时热流值误差较大, 主要原因是钝头体模型加工不准确, 加工曲线较差导致实验结果误差比较大。同时, 对于上述曲线的波动干扰问题, 由于进行小钝头体测热实验时激波管驱动气体为乙炔, 燃烧后激波管内有大量炭黑沉淀, 而且卸爆段的膜片为涤纶膜, 燃烧后有颗粒物, 从而影响了实验气流品质, 造成曲线波动较大。我们将驱动气体改为氢气, 不加卸爆段, 从而消除了上述分析带来的实验干扰问题, 多次重复测量同一状态下同一位置热流值如图 6 所示, 可以看出同轴热电偶测量驻点热流值重复性很好, 可以用来测量驻点热流值。

**结论**

同轴热电偶重复性和准确性可以保证, 可以用来测量驻点区热流率值。使用氢气作为驱动气体,

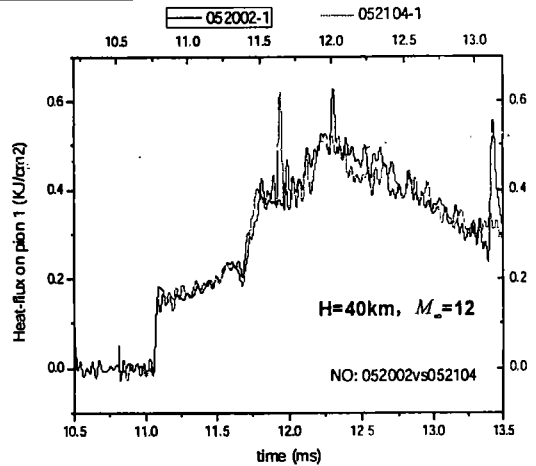


图 6 改进后的热流测量结果

可以减少实验测量误差, 减少驻点区热流数值散布较大问题, 从而保证热流数据的准确性。但是, 同轴热电偶制作工艺还需进一步完善, 使其更加小型化, 从而适应更多应用场合。对不同尺度的模型测热数据验证实验需要进一步研究, 分析影响测量结果原因。对测量数据处理需要进一步分析, 特别是热流值换算因子的取值, 从而提高测量精度。同时需要研究新型的驻点热流传感器, 克服同轴热电偶灵敏度低的弱点, 使其耐冲刷、可靠性好。

**参考文献:**

[1] 俞鸿儒. 激波风洞传热测量用塞形铜箔量热计. 力学情报. 1976 年第 4 期.  
 [2] Carslaw H S, Jaeger J C. Conduction of Heat in Solids. Clarendon Dress, Oxford, 1986.  
 [3] D.L.Schultz, T.V.Jones. Heat-transfer measurement in short-duration hypersonic facilities. AGARD-AG-165.  
 [4] 卞荫贵, 气体热力学, 中国科学技术大学出版社, 1997 年