

文章编号: CSTAM2014-P19-0067

塞型量热计的激波风洞标定

张仕忠, 董志成, 李进平, 陈宏

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 采用高温燃气激波风洞对塞型量热计测热传感器进行标定, 由于工作气体为高温燃气, 来流组分不确定性加上喷管流动的非平衡效应导致理论驻点热流值计算不准确, 因此利用高精度同轴热电偶的平均热流值进行对比标定。首先在激波管运行状态下, 用空气作为工作气体验证了多个高精度同轴热电偶测量的平均热流值同Fay-Riddell公式计算的理论热流值相比精度在5%以内。由于塞型量热计频响的限制, 在有效试验时间(约30毫秒)较长的单爆轰运行状态下的高温燃气激波风洞开展塞型量热计对比性标定试验。塞型量热计标定系数结果表明, 塞型量热计传感器之间的散差非常大, 本批次量热计标定系数相差最大近3倍, 但同一个传感器重复性误差在6%左右。因此, 实际使用过程中必须先标定然后才能使用。

关键词: 塞型量热计标定; 激波风洞; 爆轰; 同轴热电偶

中图分类号: P111.46

文献标识码: A

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, 如何防热是飞行器设计的关键, 而准确地得出飞行器表面热流率是设计部门确定防热措施、选用可靠防热材料以及进行合理结构设计的重要依据。因此, 气动热测量技术在实验研究中越来越重要。

塞形量热计能经受气流冲刷, 测热热偶丝在量热片背面不受气流冲刷影响, 其稳定性好, 阻抗低, 干扰小, 材料普通, 容易获得, 结构简单, 制作过程中不需镀膜设备, 只要工艺和参数选择合适, 很适合在热流值大、冲刷厉害的场所使用。塞型量热计虽然结构简单, 但制作工艺不同造成的测量散差分布却很大, 同一批次传感器之间的散差非常大。

分析原因主要由以下几个非理想条件造成的^[1]:

1. 理论上应该测量的是量热片的实际平均温度, 但是平均温度难以测量, 一般是通过测量量热片背面的温度代替平均温度。
2. 采用热偶丝测温, 其中热偶丝散热也将影响量热片的温度分布。
3. 由于结构需要, 量热片背面用环氧树脂与绝缘管粘结, 粘附在量热片背面的环氧树脂吸热也将造成测量误差。

由于以上几个非平衡条件难以克服, 所以塞型量热计在实际使用过程中必须先标定才能使用。

可用于气动加热模拟的地面试验设备有很多, 激波管/风洞因其固有的特点, 使其多年来一直是热流率测量的最佳地面试验设备之一^{[2][3]}。首先激波管提供的气流参数值高, 能同时模拟高焓和高雷诺数。其次, 激波管/风洞属于脉冲型设备, 试验持续

收稿日期: 2014.04.20; 修订日期: 2014.05.21

作者简介: 张仕忠(1983-), 男, 湖北, 工程师, 研究方向: 气动热测量技术.E-mail: zhangshizhong191@163.com

时间短，一般只有几~几十毫秒，这给热流测量带来了许多好处。比如不需要模型冷却系统，使模型的设计和制造更简单；传感器材料的热特性在测量过程中几乎保持不变，使数据处理得到简化；对于高热流值的测量，由于侧向传热少，能较真实的反映出热流的分布规律，而且也不会导致传感器被烧毁。因此，采用爆轰驱动激波管/风洞作为塞型量热计系数标定装备。

本文的研究目标是标定塞型量热计的系数，提高塞型量热计的测量准确度。首先开展了激波管状态下热电偶测量一致性研究，在激波管状态下，气体来流状态可以测量出来，驻点理论热流值可以用Fay-Riddell公式计算^[4]，将热电偶的测量结果同理论值对比，验证热电偶热流传感器测量结果的准确性和一致性。第二步在激波风洞状态下开展塞型量热计系数标定实验，由于激波风洞状态下工作气体为高温燃气，来流组分不确定性加上喷管流动的非平衡效应导致理论驻点热流值计算不准确^{[5] [6]}，因此采用对比标定的方法，将塞型量热计的测量结果与同轴热电偶的测量结果对比进行标定。通过同炮对比实验，完成了塞型量热计的系数标定。标定中也存在着少量问题，在后续研究中需要进一步探索和研究。

1 同轴热电偶测量精度

1.1 爆轰驱动激波管运行原理

本试验在中科院力学所高温气体动力学国家实验室JF-14爆轰燃气激波管进行。激波管全长约为31米，由相同内径为224毫米的三段管子组成，即被驱动段（低压段）、爆轰驱动段（高压段）和卸爆段，每两段之间用膜片隔开。爆轰驱动段充入氢气、氧

气和氮气的混合气体；被驱动段中充入空气；卸爆段抽真空。位于爆轰驱动段下游端末的膜片附近安装点火管，点火后产生爆轰波向上游方向传播，将辅膜破裂进入卸爆段，从而缓解爆轰波对端面的冲击。爆轰波及紧随的泰勒波之后形成均匀高温高压流场将主膜片破裂后，在被驱动段产生入射激波压缩被驱动段空气，在被驱动段端末附近形成试验流场。爆轰驱动激波管波系图如图1所示。

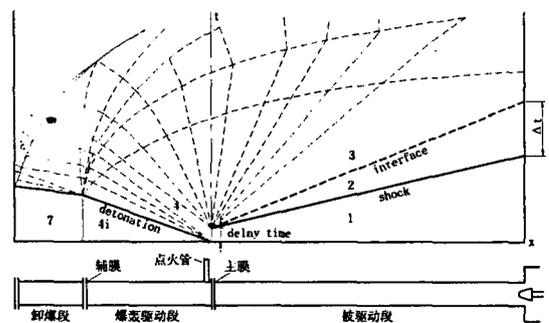


图1 爆轰驱动激波管波系图

Fig.1 Detonation driven shock tube wave

模型选R=20mm的二维圆柱模型，同轴热电偶传感安装在前缘圆柱驻点处，传感器的安装如图2所示：

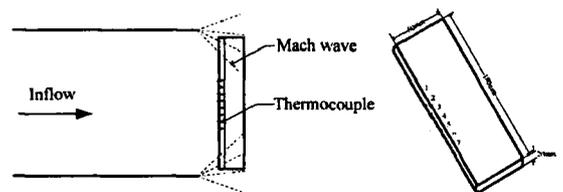


图2 同轴热电偶安装示意图

Fig.2 Coaxial thermocouple installation

1.2 驻点热流理论计算

关于驻点热流率有很多经验和理论的计算方法，但在理论上比较严格又经实验检验的要首选Fay-Riddell公式。平衡边界层Fay-Riddle公式为：

$$\phi_w = 0.763 Pr^{0.6} (\rho \mu)_w^{0.1} (\rho \mu)_e^{0.4} \left[1 + \left(Le^{0.52} - 1 \right) \frac{h_D}{h_{ce}} \right] (h_{ce} - h_{wall}) \sqrt{\left(\frac{du_x}{dx} \right)} \quad (1)$$

其中hD为气体平均离解焓

$$h_D = \sum c_i (\Delta h_f)_i^0$$

驻点速度梯度由Newton理论得出

$$\left(\frac{du_c}{dx}\right)_s = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{2(p_c - p_\infty)}{\rho_c}} \quad (2)$$

以上各式中 ρ 为密度, p 为压力, h 为焓, μ 为动力粘性系数, R 为驻点曲率半径, Pr 为Prandtl常数, 一般取0.71, Le 为Lewis数, 一般取1.4。下标“w”表示壁面, “0”表示驻点, “ ∞ ”表示来流, “e”表示边界层外缘。上述公式中各参量需要通过平衡流计算获得。

对于圆柱模型,平衡边界层Fay-Riddle公式系数需要进行修正, 将0.763修正为0.571。

1.3 同轴热电偶测量结果

表1 同轴热电偶测量结果与理论值对比 (圆柱半径 $R=20\text{mm}$)

Table 1 Coaxial thermocouple measurement results compared with the theoretical value

实验序号	驱动段 比例	被驱动段 P_{4i} (bar)	实际 Ms	理论热 流值	传感器 编号	1	2	3	4	5	6	7	平均值	
YC14044	$H_2: N_2: O_2 = 2:1.5:1$		2.98	1.063	测量值	1.11	1.14	1.11	1.07	1.11	1.09	1.07	1.1	
误差					4.70%	7.30%	4.40%	0.80%	3.90%	2.70%	0.60%	3.50%		
YC14045		1.2	25000	2.95	1.032	测量值	1.02	1.07	0.99	1.03	1.05	1.07	1.01	1.04
误差		0.80%	3.40%	4.00%	0.20%	1.90%	3.90%	2.50%	0.30%					
YC14046				2.92	0.944	测量值	0.99	0.96	0.97	0.98	0.98	1.01	1.01	0.99
误差						5.20%	2.00%	2.80%	3.30%	3.30%	7.00%	6.50%	4.30%	

激波管运行高压段压力 P_{4i} 为1.2bar, 低压端压力 P_1 为25000Pa, $R=20\text{mm}$ 模型上的7个同轴热电偶传感器测量结果如表1所示。

表1中误差指热流测量值与理论值相比, 平均值误差为平均热流值与理论热流值相比。

将热电偶测量热流值同Fay-Riddell公式计算的理论热流值对比, 可以看出, 单个热电偶热流传感器的测量误差在8%以内, 而热电偶平均热流值同理论热流值相比, 测量精度在5%以内, 所以可以用热电偶平均热流值作为标准热流值进行对比实验来标定被测塞型量热计系数。

2 塞型量热计标定

由于激波管运行状态有效实验时间只有几毫秒, 而量热计响应时间也为毫秒量级, 在激波管运行状态下响应时间不够, 需要延长有效实验时间, 只能选取爆轰驱动高温燃气激波风洞运行状态。高温燃气激波风洞有效时间约为30ms, 可以满足量热计测量时间要求。

2.1 爆轰燃气激波风洞运行原理

爆轰燃气激波风洞工作原理如图3所示, 单爆轰管预先充满一定比例的氢氧混合气体, 实验时在喷管喉道上游附近点火, 产生直接起始爆轰向上游卸

爆段传播。单爆轰是运用CJ爆轰后的气流经过泰勒波等熵膨胀, 产生平稳实验气流的过程。在这一过程中, 存在着等熵膨胀, 因而使得CJ爆轰后的气流温度和压力都减小, 从而降低了燃烧气体的温度和压力, 但燃气总温通常也在2500K以上。由于经过泰勒波等熵膨胀后, 气流稳定实验时间长 (大于30ms), 能够充分满足测量的要求。

图4是典型的单爆轰运行时, 喷管上游燃气总压曲线。可以看出, 单爆轰运行状态喷管上游燃气压力在30ms左右都比较平稳, 说明气流参数比较稳定, 可以用来做热流标定实验。

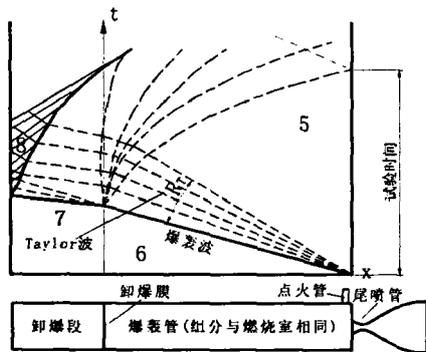


图3 单爆轰驱动产生高温燃气原理图

Fig.3 Single detonation driven high temperature gas

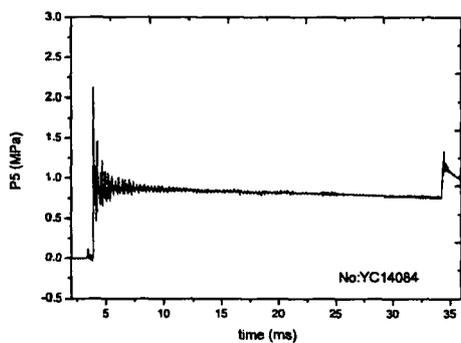


图4 典型单爆轰运行状态喷管上游燃气总压曲线

Fig.4 Typical upstream gas pressure curve in detonation running state

2.2 塞型量热计对比标定

在塞型量热计系数对比标定实验中，在圆柱模型（同图2形式相同）上间隔安装了5个塞型量热计和6个同轴热电偶，圆柱模型半径 $R=20\text{mm}$ ，风洞运行状态为单爆轰状态。高温燃气激波风洞的单爆轰高压段分别充入初始压力为1.5bar和2.5bar，分别对应低和高两个热流状态。

图5为高温燃气激波风洞运行状态下多个同轴热电偶测得的热流曲线，可以看出同轴热电偶测得的热流一致性非常好。

图6为高温燃气激波风洞运行状态下量热计所测得的原始温度信号（电压信号），可以看出，五只量热计测得的温度信号散差非常大，由于本次量热计制作选取的量热片厚度为0.3mm，所以传感器的

响应时间比较长，数据处理中选取30ms有效时间段中的最后5ms时间内的温度曲线进行拟合求斜率，再将标准量热片物性参数带入计算，从而得出量热计测得热流值 $\bar{W}_{\text{量热计}}$ 。

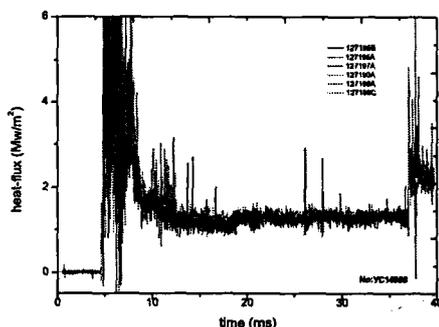


图5 高温燃气激波风洞运行状态下同轴热电偶热流曲线

Fig.5 Coaxial thermocouple heat-flux curve

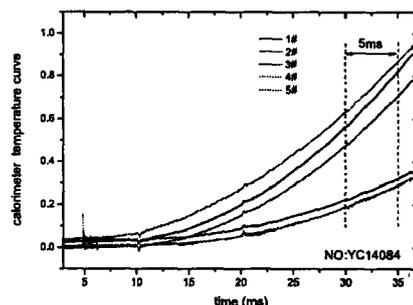


图6 高温燃气激波风洞运行状态下量热计测得的温度曲线

Fig.6 Calorimeter temperature curve

由于工作气体为高温燃气，来流组分不确定性加上喷管流动的非平衡效应导致理论驻点热流值计算不准确，因此将热电偶测量结果的平均值 $\bar{W}_{\text{热电偶}}$ 作为该圆柱模型的理论驻点热流值。用上述计算出的量热计测得的热流值 $\bar{W}_{\text{量热计}}$ 和同轴热电偶测得的平均热流值 $\bar{W}_{\text{热电偶}}$ 对比计算出塞型量热计系数，塞型量热计标定系数结果如表2所示。

标定实验在初始压力为1.5bar和2.5bar两种状态下各进行三次实验，气体组分及实际测的气流状态参数如表2所示。从表2中可用看出，塞型量热计标定系数之间差异很大，说明不同塞型量热计输出

灵敏度的差异较大。本次实验塞型量热计标定系数相对误差（置信区间0.95）为6%左右。

表2 塞型量热计标定系数

Table 2 Calibration coefficient of the calorimeter

编号	充气比例	P_{a1} (bar)	实际 M_s	热流值	标定系数 ($\bar{W}_{热电偶} / W_{量热计}$)				
					1#	2#	3#	4#	5#
YC14084	1:1	5.35	1.329	1.044	1.161	2.592	1.141	2.667	
YC14086			1.315	1.028	1.153	2.681	1.072	2.461	
YC14088	2:1	5.35	1.296	1.084	1.193	2.733	1.113	2.581	
YC14091			2.075	1.117	1.262	2.870	1.173	2.724	
YC14096	10:1	2.5	5.38	2.083	1.076	1.092	2.802	1.048	2.844
YC14097			2.061	1.028	1.133	2.612	1.040	2.841	
标定结果				1.063	1.166	2.715	1.098	2.686	
相对误差 (P=0.95)				3.51%	5.19%	4.19%	5.09%	5.86%	

3 结论

通过激波管实验结果表明，同轴热电偶热流传感器测量精度比较高，测量结果同Fay-Riddell公式计算的理论热流值相比，单个热电偶测量精度在8%以内，多个热电偶测量的平均热流值的测量精度在5%以内，所以在理论热流值难以计算的场合，可以采用多个热电偶测量的热流值取平均热流作为标准热流值来标定其他热流传感器。

高温燃气激波风洞在单爆轰运行状态下实验有效试验时间约30毫秒，基本满足量热计类传感器响应时间要求，通过对比标定实验，塞型量热计传感

器之间的散差非常大，同一批次量热计标定系数相差最大近3倍，本次塞型量热计标定系数重复性误差在6%左右。

本文为热流传感器标定提供了一套完整的标定设备，包括标定激波管/风洞及标定用同轴热电偶，这种热流标定方法可以用于各种热流传感器标定，为热流传感器标定提供了一种可靠的标定方法。

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] 卞荫贵, 气体热力学, 中国科学技术大学出版社, 1997年
- [3] Carslaw H S, Jaeger J C. Conduction of Heat in Solids. Clarendon Dress, Oxford, 1986.
- [4] D.L.Schultz, T.V.Jones. Heat-transfer measurement in short-duration hypersonic facilities. AGARD-AG-165.
- [5] Peter H. Rose. Development of the Calorimeter Heat Transfer Gauge for Use in Shock Tubes. Review of Scientific Instruments, 1958.
- [6] Gulhan. Heat Flux Measurements in High Enthalpy Flows. ADP010750.

Calibration of the calorimeter by using shock wave wind tunnel

Zhang Shizhong, Dong Zhicheng, Li Jinping, Chen Hong

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Because of the influence of non-ideal conditions, plug-type calorimeter must be calibrated before using. High temperature gas shock wave wind tunnel can be used to calibrate the coefficient of calorimeter, but the calculation value of theoretical heat flux on stagnation point is not accurate as the uncertainty of high temperature gas flow parameters, so the average heat flux value of high precision coaxial thermocouple is used as the standard heat flux value to calibrate the coefficient of calorimeter. In shock tube running state, the precision of the average heat flux value measured by the high precision coaxial thermocouple is within 5% compared with the theory heat flux value calculated by Fay-Riddell formula. Under single detonation operation state, the effective experimental time is about 30 milliseconds, which can meet the requirement of the response time of calorimeter. Through the contrast calibration experiment, the repeatability error of the coefficient is about 6%. The calibration results shows that the difference of the coefficient between plug-type calorimeters may be very big, which is largest up to 3 times.

Key words: calorimeter calibration; shock wave wind tunnel; single detonation; coaxial thermocouple