

# 同轴热电偶的热响应特性分析及标定方法

李进平, 张仕忠, 陈宏

(中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 北京海淀区 100190)

**摘要** 同轴热电偶广泛用于气动热测量实验中, 其优点是抗冲刷能力强, 但测量精度不高。为提高热电偶的测量精度, 本文对热电偶热响应特性进行了数值分析。分析结果表明, 在短时间内结点结构对热电偶的热响应特性影响显著, 但其影响随时间的增加逐渐减弱; 绝缘层厚度对热电偶的响应时间起决定作用, 厚度越小响应时间越快; 绝缘层的热特性对热电偶的热响应影响很小。因此, 热电偶的测量精度可通过增加实验时间和减小绝缘层厚度均得到有效提高。为对热电偶进行标定, 本文采用了激波管加热模型驻点区的方法, 该方法可实现对流加热, 而且热流可准确预测, 其实用性和准确性得到了实验的证实。

**关键词** 热流测量, 同轴热电偶, 热响应特性, 激波管

## 引言

气动加热的准确预测是高超声速飞行器研制过程中的重要方面。受气流焓值的限制, 在地面上开展气动热的实验研究通常采用脉冲型实验设备, 如激波管、激波风洞等。这类实验设备的优点是能够提供具有足够高焓值的气流, 但实验时间都很短, 一般不超过几个毫秒, 而且高焓气流冲刷侵蚀的能力很强, 因此高焓流动热流测量需要响应迅速且抗冲刷能力强的测热传感器。

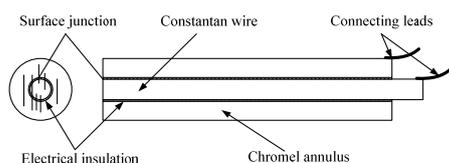


图 1 同轴热电偶示意图

表面结点型热电偶是少数几种能够满足高焓流动气动热测量的传感器之一, 同轴是其最典型的装配方式, 如图 1 所示。两种热电偶材料在长度方向绝缘, 为了使之能在表面形成尺度很小的结点并导通, 一般采用砂纸打磨的方式。一旦两种热电偶材料导通, 结点的温度可根据输出的电势确定 (Seebeck 效应)。同轴热电偶的这种结构形式不仅保证可以测出表面温度, 而且具有响应迅速抗冲刷能力强的优点。因此同轴热电偶也广泛应用于其它领域。

根据 Seebeck 效应, 同轴热电偶可测量出位于其表面的结点温度, 但并不能直接得出气动加热研究中更关心的热流率。通过结点温度变化确定加载与表面的热流率, 还需确定热电偶内部的热传导过程。通常, 为了简单起见, 假设热电偶内部的热传导过程是一维的, 由此可得出简单的表面温度变化与热流率之间的关系。关系式中包含唯一表征热电偶特性的参数为热乘积, 一般认为热乘积是传感器的固有属性, 不随测量时间和表面结点的变化而改变。为了标定出传感器的热乘积, 发展了多种标定热乘积的方法, 如滴水法, 激光加热法等。

然而, 热电偶测热传感器在实际应用中的表现却与理论预计有很大的偏差, 经常出现差大、一致性较差的测量结果。近年来的研究表明热电偶的响应特性与多种因素有关。Buttsworth 通过标定实验发现: 不仅结点的位置会导致热乘积发生较大变化, 而且热乘积会随着实验时间的增加而减小, Mohammed 和 Marineau 在数值模拟中得出了类似的结果。这些结果表明同轴热电偶内部的热传导过程远比一维热传导假设描述的复杂, 而且这些过程对热电偶的响应特性有着十分显著的影响。所以有必要采用多维热传导模型来对热电偶内部的热传导过程进行分析, 找出对热电偶的响应特性起决定性的因素, 进而为传感器的研制、应用提供参考信息。此外现有的标定方法都存在

着明显的不足，要么标定过程中热电偶内部的传热过程与实际实验不同，如滴水法；要么标定时间太短，如激光加热法，因此需要发展能够更准确完整地反映出测热传感器响应特性的标定方法。

为了提高热电偶测热传感器的测量精度，本文首先采用数值计算的方法模拟了热电偶内部的热传导过程，分析了结点结构、绝缘层热特性等因素对热电偶响应特性的影响。其次，为了考察热电偶在实际测热实验中响应特性，利用激波管开展了标定实验，这种标定方法可实现对流加热，而且可更完整的反映出热电偶的响应特性。

### 1 热电偶测热原理

表面温度计类热流传感器（薄膜热电阻温度计、同轴热电偶等）的工作原理均基于一维热传导理论，为了下文讨论的方便，本文在此作简要的介绍。均质半无限体内的热传导过程可用如下方程描述：

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中  $T$ 、 $t$  和  $x$  分别为温度、时间和空间坐标； $\rho$ 、 $c$  和  $k$  分别为半无限体材料的密度、比热和热传导系数。若半无限体的初始温度为  $T_\infty$ ，并且有强度为  $\dot{q}$  的热流瞬间加载在其表面，即

$$T(x,0) = T_\infty \quad (1a)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = -\frac{\dot{q}}{k}; \quad t > 0 \quad (1b)$$

则半无限体表面温度变化为

$$T = \frac{1}{\sqrt{\pi} \sqrt{\rho c k}} \int_0^t \frac{\dot{q}}{\sqrt{t-\tau}} d\tau \quad (2)$$

若已知表面温度变化，可得出表面的热流为

$$\dot{q}(t) = \sqrt{\rho c k} \int_0^t \frac{dT}{dt} \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} d\tau \quad (3)$$

上述关系式对于均质半无限体是严格成立的，但对实际应用的热流传感器，只是近似成立。

### 2 数值模拟

本文以康铜和镍铬构成的 E 型热电偶为研究对象，采用二维轴对称热传导方程来描述热

电偶内部的热传导过程，方程的求解采用有限差分的方法。计算中所涉及材料的热特性如表 1 所示。从表中可见，虽然两种热电偶材料的热特性非常接近，但它们与绝缘层相差很远，这表明其内部的传热过程仍会与半无限体假设存在着明显的差异。

表 1 材料热特性

	康铜	镍铬	环氧树脂
导热系数 $k$ [J/sm <sup>2</sup> K]	21.17	19.25	0.20
比热 $c$ [J/kgK]	393.1	447.5	1960.0
密度 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	8920	8730	1060

热电偶传感器在实际应用中，为了能够在表面形成两种材料的结点，使之导通，通常采用砂纸打磨的方式。这种方法简便易行，但结点的结构和成分具有很大的随机性，难以定量的确定。为了能够对热电偶内部的传热过程进行数值模拟，本文将结点简化成截面为矩形的圆环，并且位于绝缘层的上方。结点的热特性参数假设为镍铬与康铜的平均值。

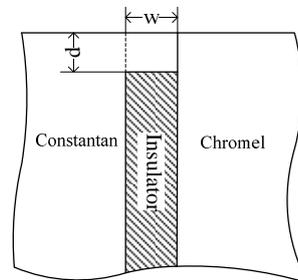


图 2 同轴热电偶结点示意图

#### 2.1 结点对热电偶响应的影响

结点对热电偶响应的影响本文将通过 3 个算例来考察。在这些算例中，结点的宽度保持不变，为  $w=10$ ；结点的深度分别为  $h=2、5$  和  $10 \mu m$ 。热电偶的初始温度为  $T_\infty=298K$ ，加载于表面的恒定热流为  $q_a=5MW/m^2$ 。

典型的热电偶内部温度分布如图 3 所示，其中的结点厚度为  $5\mu m$ ，时刻为  $t=3ms$ 。从该图中可以看出：在热电偶内部，尤其是结点附近，热传导过程远比一维模型描述的复杂。由于绝缘层（环氧树脂）的导热性较差，阻碍了结点吸收的热量直接向深度方向传导，导致结

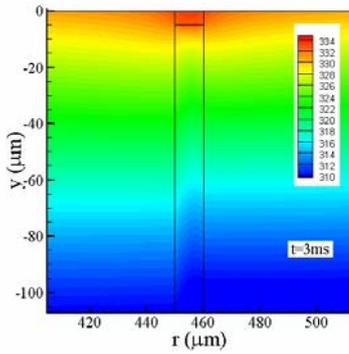


图3 热电偶内部温度分布

点的温度较其它位置的高，即结点过热。结点过热表明在其周围存在着温度梯度，同时也意味着存在着横向传热，这与常用的一维热传导假设明显不符，必然会导致温度变化与一维假设时不同。

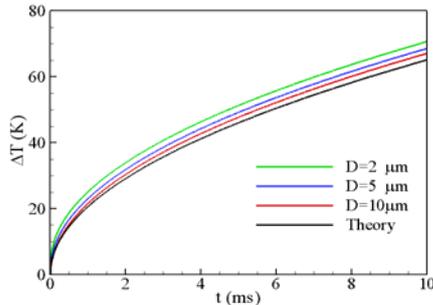


图4 结点温度随时间的变化

三个算例中结点温度随时间的变化如图4所示。为了便于比较，在该图中同时给出了一维假设时的理论值。从图中可见三个算例中的结点温度都高于理论值，而且随着结点深度的减小和时间的增加，偏离的程度越大。这是由于结点的深度越小，需要的温度梯度更大才能导出结点从其表面吸收的热量。然而进一步的观察可以发现，在长时间时，三个算例中的结点温度偏离理论值的程度几乎保持不变，这意味着尽管结点温度的绝对值与理论值不同，但变化率相同。式(2)表明根据温度导出热流值主要取决于温度变化率，而不是温度本身，因此这一现象值得进一步确认。

图5给出了结点温度变化率随时间的变化。从图中可见，三个算例中结点温度变化率虽然在起始阶段有很大的不同，但随着时间的增加迅速趋近与理论值，在0.1ms时，最大偏差不超过5%。这说明尽管热电偶内部的传热过程与一维假设不同，即结点吸收的热量主要通

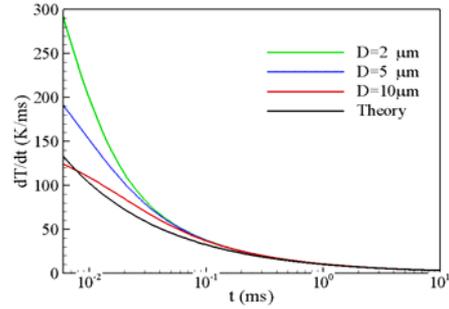


图5 结点温度变化率随时间的变化

过侧向温度梯度向外传播，但长时间来看结点温度的变化率与一维假设是一致的。相应地利用式(5)计算热流时，必然在短时间内受结点的具体形式显著影响，但时间较长时结点的影响减弱，热流都会趋近于恒定值，如图6所示。在1ms时，三个算例与它们平均值的偏差不超过6%。但值得注意的是图6中热流趋近于恒定值所需的间远长于结点温度变化率趋于理论值的时间，且热流值大于计算时所设定的值(5MW/m<sup>2</sup>)。这主要是式(5)计算热流为积分过程，每一时刻的结点温度变化率都会对计算值有贡献，且越靠近积分上限贡献越大。若保证根据式(5)计算出的热流值与加载的热流值一致，式(5)中的热乘积需要修正。根据本文计算结果，热乘积减小8~10%较为合适。

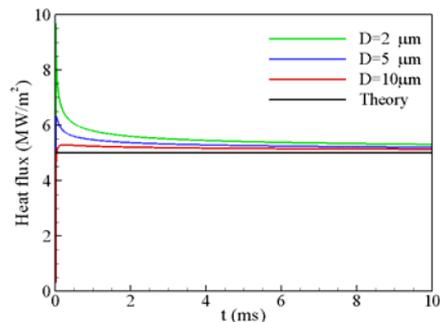


图6 热流随时间的变化

需要指出的是，尽管上述现象是在对结点结构简化的基础上得出的，但对于更复杂的结点结构这些现象也应该出现的。这是因为无论对于何种形式的结点，其周围都会存在着温度梯度，且温度梯度与结点的温度变化率间存在着负反馈的关系，温度梯度越大，结点的温度变化率越小，反之亦然。上述结论也是成立的，结点的影响主要在起始阶段，随着时间的增加会逐渐的减小。

受加工工艺的限制，不同热电偶传感器其绝缘层的厚度可能是不同的，这会直接导致结点的尺寸发生变化。结点的尺寸对热电偶响应的影响可量纲分析的方法得出。从量纲分析可知温度场的所需的时间与热结构特征尺度的平方成正比，而与加载的热流无关。举例来说，若结点的尺寸增加或减小一倍，会使结点温度变化率趋近与理论值的时间增加或减小4倍，从而导致热电偶传感器响应的的时间增加或减小4倍。因此减小绝缘层的厚度是提高热电偶传感器性能非常有效的方法，该方法虽然不能完全消除结点的影响，但可以大幅减小结点影响的持续时间。从本文的计算结果来看，若要满足毫秒量级的测量需求，绝缘层的厚度应保证在  $10\ \mu\text{m}$  左右。

## 2.2 绝缘层热特性对热电偶响应的影响

因热电偶中的绝缘层可采用不同的非金属材料，比如环氧树脂、绝缘漆或云母等，它们热特性可能变化很大或不能准确确定。计算结果如图所示。从计算结果中可以看出：绝缘层导热特性的变化并没有使计算出的热流发生显著的改变，只是随着导热系数的增加，计算出的热流略微向加载值靠近。这个结果说明通过改变绝缘层热特性来提高热电偶传感器性能并不是非常有效的方法，除非将绝缘层热特性改变至与热电偶材料相同的水平。

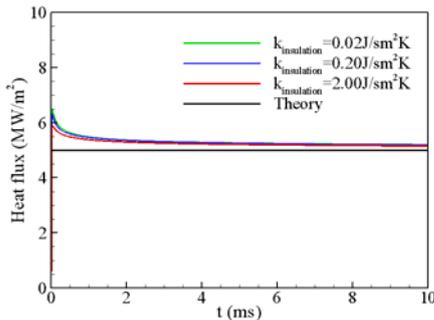


图7 热流随时间的变化

## 3 标定实验

为了考察同轴热电偶在实际测热实验中的响应特性并验证上述数值模拟结果，本文利用激波管开展了标定实验。在标定实验中，利用入射激波后的超声速气流作为实验气体加热安装于模型驻点处的热电偶传感器。这种标定方

法不仅可以实现对流加热，而且热流值可以准确预测，因此能够更准确真实地反映出测热传感器的响应特性。

### 3.1 爆轰驱动激波管

本文标定实验中所采用的激波管为爆轰驱动激波管。激波管由卸爆段、驱动段、被驱动段和试验段组成，其中前三者的内径相同，皆为  $224\text{mm}$ ，长度分别为  $5\text{m}$ 、 $10\text{m}$  和  $13\text{m}$ 。实验中采用  $\text{N}_2+\text{O}_2+2\text{H}_2$  混合气作为驱动气体，试验气体为空气。为了监测入射激波的传播，被驱动段侧壁安装了两个压力传感器，分别距离被驱动段末端  $0.5\text{m}$  和  $1.5\text{m}$ 。根据已知的试验气体初始状态和测量出的激波速度，试验气体的状态可由下式确定

$$\frac{P_1}{P_2} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma+1} (M_s^2 - 1) \quad (4)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = 1 + \frac{2(\gamma-1)}{(\gamma+1)^2} \left[ \gamma M_s^2 - \frac{1}{M_s^2} - \gamma + 1 \right] \quad (5)$$

$$\frac{u_2}{a_1} = \frac{2}{\gamma+1} \left( M_s - \frac{1}{M_s} \right) \quad (6)$$

### 3.2 同轴热电偶和实验模型

标定实验中采用的热流传感器为实验室自行研制的 E 型同轴热电偶。该传感器由镍铬合金和康铜构成，采用绝缘漆保证两者在轴线方向绝缘，如图 1 所示。镍铬合金管的外径为  $1.4\text{mm}$ ，中间康铜丝的直径为  $0.9\text{mm}$ ，绝缘层的厚度约为  $11\ \mu\text{m}$ 。静态标定实验测量出的灵敏度为  $63\ \mu\text{V}/\text{K}$ 。为了将传感器测量出的表面温度转换为表面热流，在测量系统中采用了热电模拟网络，其中涉及的热乘积根据上文中的数值模拟结果给出  $\sqrt{\rho c k} = 8000$ 。

实验中安装传感的模型采用前缘为圆柱的平板，其中圆柱的半径为  $20\text{mm}$ ，模型的展向方向长度为  $200\text{mm}$ ，流向方向为  $100\text{mm}$ 。模型驻点处共安装 7 只传感器，传感器间的间距为  $10\text{mm}$ 。模型前缘距被驱动段末端  $50\text{mm}$ ，可避免实验过程中脱体激波在被驱动段侧壁反射而干扰流场，如图 8 所示。驻点处的理论热流由 Fay-Riddle 公式确定

$$q = 0.57 \text{Pr}^{-0.6} (\rho_e \mu_e)^{0.4} (\rho_w \mu_w)^{0.1} \sqrt{\left(\frac{du_e}{dx}\right)_0} (h_e - h_w) \quad (7)$$

其中，Pr 为普朗特数， $\rho$  和  $\mu$  分别为密度和粘性系数，h 为焓值。下标 e 和 w 分别表示壁面和边界层外缘条件。

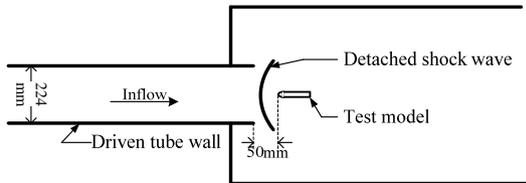


图 8 标定实验布置图

### 3.3 实验结果及讨论

标定实验共进行了 7 次，其运行状态及测量结果如表 2 所示。典型的热流测量结果如图 9 所示。从长时间来看各个传感器间的一致性较好，而且与理论预测值非常接近，但在起始阶段各传感器间差异明显。这与前文中的数值模拟结果相符，验证了数值模拟结果的合理性，即结点的不确定性会导致热流测量结果在在短时间内散差很大，但随着时间的增加，结点的影响减弱，测量结果趋于一致，可获得较高的测量精度。

由于在起始阶段，热流测量结果散差较大，而且随时间变化剧烈，因此标定结果并无实际意义。表 2 中给出的测量结果为热流曲线

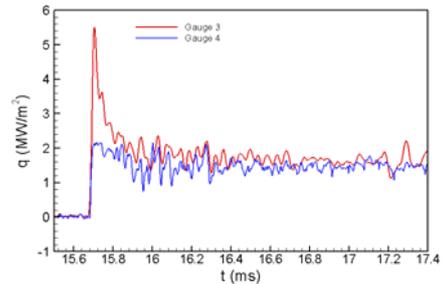
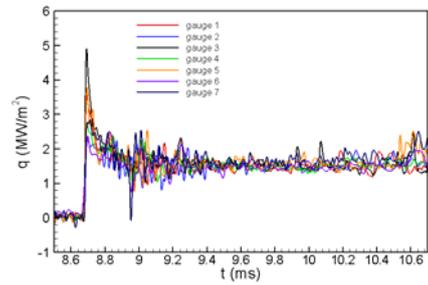


图 9 典型热流测量结果

起跳后 0.8~1.5ms 内的平均值。从这些结果中可以看出它们与理论预测值基本一致，这说明考虑绝缘层的影响将热电偶的热乘积减小 8% 是合理的。以上测量结果中，最大偏差约为 7%，略大于滴水标定实验中的 5%，这除了与所采用的传感器有关外，还有试验气流的一致性、稳定性有关。尽管如此，这些实验结果表明利用激波产生的高温超声速气流来实现对测热传感器的对流加热标定是一种可行的方法，而且该方法不仅限于对热电偶类型的传感器，其它诸如薄膜热电阻温度计、塞型铜箔量热计也可以用这种方法标定。

表 2 实验状态及热流测量结果

Run No.	1	2	3	4	5	6	7
$T_1$ [K]	24	24	24	24	24	23	23
$P_1$ [kPa]	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
$M_s$	2.98	2.98	2.98	2.98	2.97	2.98	2.97
Theory Heat flux [MW/m <sup>2</sup> ]	1.51	1.51	1.51	1.51	1.49	1.51	1.49
Gauge 1	1.62	1.56	1.65	1.48	1.46	1.43	1.49
Gauge 2	1.48	1.51	1.53	1.39	1.39	1.53	1.44
Gauge 3	1.65	1.67	1.66	1.65	1.53	1.61	1.43
Gauge 4	1.54	1.54	1.50	1.42	1.52	1.58	1.54
Gauge 5	1.60	1.50	1.58	1.53	1.38	1.41	1.42
Gauge 6	1.39	1.43	1.46	1.50	1.39	1.65	1.42
Gauge 7	1.61	1.65	1.65	1.67	1.48	1.46	1.56

## 参考文献

### 3 结论

本文利用数值模拟和激波管标定实验考察了同轴热电偶的响应特性。研究表明,在短时间内结点结构对热电偶的热响应特性影响显著,但其影响随时间的增加逐渐减弱;绝缘层厚度对热电偶的响应时间起决定作用,厚度越小响应时间越快;绝缘层的热特性对热电偶的热响应影响很小。因此,热电偶的测量精度可通过增加实验时间和减小绝缘层厚度均得到有效提高。

利用激波管加热模型驻点区来标定测热传感器是一种可行的方法,该方法可实现与实际实验一致的对流加热,而且可以更完整的反映出测热传感器的响应特性,从而提高测量精度。

- [1] Sundqvist B., Sandberg O. and Backstrom G., The thermal properties of an epoxy resin at high pressure and temperature, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 10, 1977, pp. 1397-1403
- [2] Buttsworth D. R., Assessment of Effective Thermal Product of Surface Junction Thermocouples on Millisecond and Microsecond Time Scales, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 25 (2001), 6, pp. 409-420
- [3] Davis L., Bow-Shock Establishment and Stagnation-Point Pressure Measurement for a Blunt-Nosed Body at Supersonic Speeds, *Aeronautical Research Council Current Papers*, Her Majesty's Stationery Office, London, 1965
- [4] Mohammed H., Salleh H. and Yusoff M. Z., The Transient Response for Different Types of Erodable Surface Thermocouples Using Finite Element Analysis, *Thermal Science*, Vol. 11 (2007), No. 4, pp. 49-64
- [5] S. R. Sanderson) and B. Sturtevant)
- [6] ASTM, Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement, ASTM Special Technical Publication 470A, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1981.

## ON THE RESPONSE OF COAXIAL THERMOCOUPLE AND CALIBRATION METHOD FOR TRANSIENT HEAT FLUX MEASUREMENT

LI JINPING ZHANG SHIZHONG CHEN HONG

(Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, C A S, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China)

**Abstract** Thermocouples are widely used for transient heat flux measurement due to their high resistance to erosion, but sometimes the measurement accuracy is not high enough. In this paper, several factors which may associate the thermal response of coaxial thermocouple are analyzed numerically, aiming to improve the measurement accuracy. The results show that, the thermal response characteristic of the thermocouple is affected significantly by the junction structure, but its influence is only limited to short time; the response time mainly depends on the thickness of insulation, which increases with the increase of the insulation layer thickness; the thermal properties of the insulation layer has little effect on the response of the thermocouple. Hence, the measurement accuracy can be improved by increasing test time and decreasing the thickness of insulation layer. In addition, for calibration of the thermocouple, a convective heating calibration method using a shock tube is introduced and employed, which ensures a step heat flux with a known intensity to be experienced by the thermocouple. The practicality and accuracy of this method have been confirmed by experiments.

**Key words** heat flux measurement, coaxial thermocouple, thermal response, shock tube