

文章编号:

塞型铜箔量热计制作工艺与散差分析

张仕忠, 陈宏, 姜杨, 董志成

(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 100190)

摘要: 塞型铜箔量热计在测量热流值高、冲刷大的场合应用十分广泛, 但由于其偏离非理想条件和制作工艺造成的散差分布也比较大。从塞型铜箔量热计的测热原理出发, 采用不同制作工艺制作了一批量热计, 通过爆轰驱动激波管实验测量驻点热流值, 根据实验结果分析不同的制作工艺对塞型铜箔量热计测量结果造成的误差, 从而提高塞型铜箔量热计的散差分布。

关键词: 塞型铜箔量热计; 爆轰驱动激波管; 驻点热流率测量

中图分类号: V211.79 **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, 气动热测量技术在实验研究中越来越重要。

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。

塞型铜箔量热计能经受气流冲刷, 测热热偶丝在铜箔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。

铜箔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可达 10% 以上。本文通过对不同传感器制作工艺对比, 从实验结果上分析造成传感器散差分布的主要原因, 从而找寻一种稳定可靠的塞型铜箔量热计结构形式, 改善传感器之间的散差分布。

1 塞型铜箔量热计原理

塞型铜箔量热计结构如图 1 所示, 前端为圆形铜箔, 铜箔背面中心处焊接细康铜丝, 该处即是热偶节点; 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缘管上。

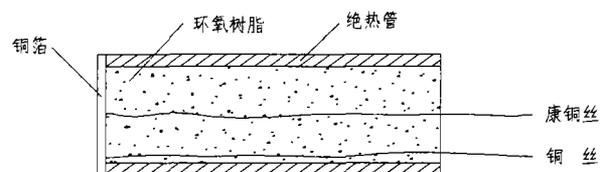


图 1 塞型铜箔量热计结构示意图

Fig. 1 Structure of Plug-shaped copper foil calorimeter

收稿日期: 2012.06

作者简介: 张仕忠, 工程师, 研究方向: 激波风洞实验测量

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。

$$q \cdot \Delta t = \sum \rho c \Delta T \cdot \Delta x$$

取极限得

$$q = \int \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx$$

若 ρ 和 c 为常数，则

$$q = \rho c \int \frac{\partial T}{\partial t} dx = \rho c l \frac{d\bar{T}}{dt}$$

测量出铜箔平均温度变化率就可以求出热流率。

2 塞形铜箔量热计制作工艺与散差

塞形铜箔量热计目前的主要制作工艺是采用点焊法焊接，在本文中，除了采用点焊法外，还采用了电镀法和其它机械结构连接形式的工艺方法，设计并制作出一批塞形铜箔量热计。下面对每种工艺做简要介绍，并根据实验结果做出分析讨论。

2.1 点焊法

使用点焊机焊接，由于康铜丝和铜丝都比较细，点焊时需要将康铜丝和铜丝在前端弯折一小段作为焊接压紧部分，然后使用脉冲放电使康铜丝和铜丝和铜片连接起来。

其优点：焊接比较牢固，有一定的强度，方便灌封；

缺点：需要弯折一段焊接，焊接接点变大，而且焊接有一定压力，放电时会造成铜片厚度变化，从而造成同一批次传感器散差较大。

图 2 为采用点焊法制作的量热计实验测试结果，表 1 为三个传感器测试结果对比。

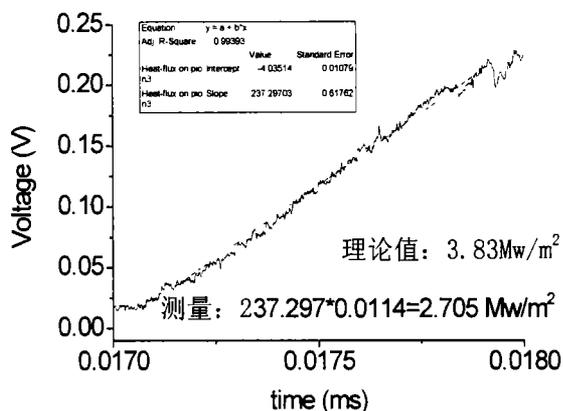


图 2 点焊法塞型量热计测量曲线

Fig.2 The curve of spot welding method

表 1 点焊法塞型量热计散差

Table 1 Scattered difference distribution of spot welding method

传感器编号	实验次数	传感器测量热流值 (Mw/m^2)	Fay-Riddle公式理论计算热流 (Mw/m^2)	和理论值相比误差
1	1	1.825	2.765	33.99%
	2	1.819	2.786	34.71%
2	1	1.848	2.841	34.93%
	2	1.821	2.802	35.03%
3	1	2.203	3.014	26.90%
	2	2.001	2.784	28.11%

从实验数据可以看出，通过点焊测得热流数据和理论值相比，要比理论值小百分之三十左右，同一批次热流传感器之间散差 10%左右。

2.2 化学镀

尝试使用化学镀膜工艺制造热电偶接点，由于化学镀膜沉积速率慢，造成接点松散，没有强度，制造节点失败，实验不成功。

2.3 电镀

通过电镀的方法使热偶丝和铜片导通，设计的初衷是将漆包康铜丝和漆包铜丝垂直压在铜箔背面，通过电流使热偶丝端头和铜箔导通。由于漆包

线的疏水性，漆包线表面不会沉淀铜，只有热偶丝端头才会沉积铜，使得热偶丝和铜箔导通，从而达到塞型铜箔量热计的设计目的。理论上讲，这种加工工艺使得热偶丝和铜箔连接处不用弯折，热电偶的节点很小，实验结果应该接近塞型量热计的设计理论值。

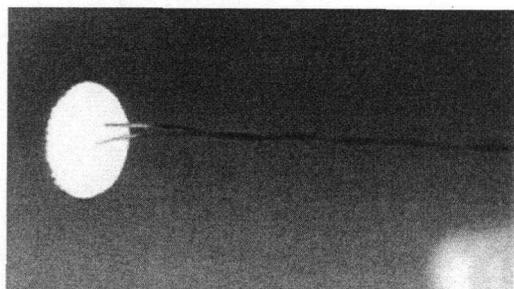
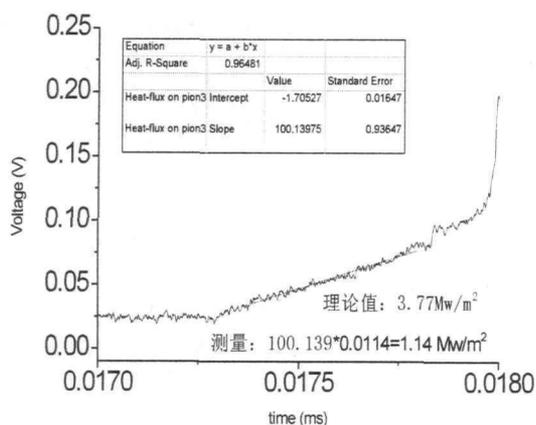


图3 电镀法制作的塞型量热计

Fig.3 The calorimeter made by electroplate method

实验曲线:

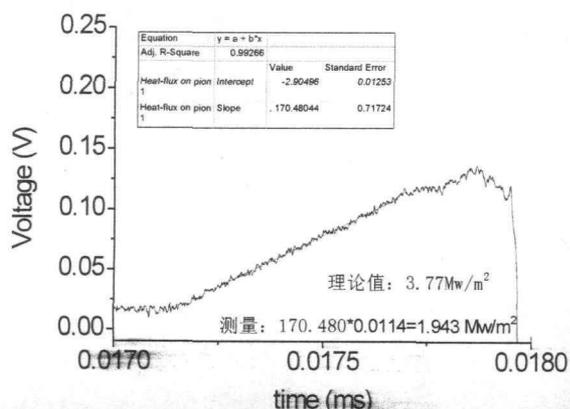


(a)

(b)

图4 电镀法制作的塞型量热计测试结果

Fig.4 The curve of electroplate method



371

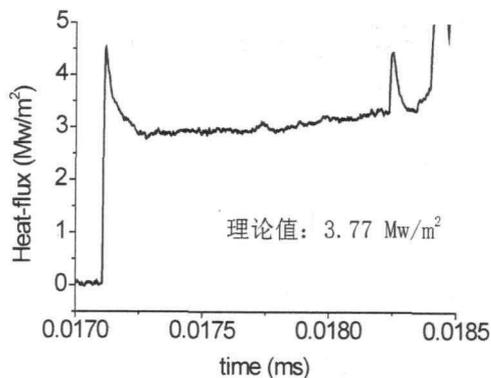


图5 同轴热电偶测热实验数据

Fig.5 The curve of thermocouple

图4中(a)和图(b)为相同电镀工艺制作的两支量热计的实验测试结果,从实验曲线可以看出,两支传感器的实验结果都比理论值偏小很多,而且同一批次实验结果散差也较大。图5为安装在同一位置的同轴热电偶做对比实验的测量结果,其实验测试值比理论计算值偏小,与热电偶的材料物性参数选取有关。

分析结果为:

1.电镀法虽然可以将热偶丝连接在铜箔背面,但是强度依然非常低,很容易就和铜箔分离,实际制作困难比较大。

2.由于电镀的时候铜箔本身也沉积的有铜,所以造成铜箔厚度很不均匀,而塞型量热计数据处理的时候铜片厚度 l 是直接相乘在结果里面的,所以厚度对测量结果影响非常大。

3.由于接点很脆弱,虽然制作的时候接点没有断,但实验一次后接点就断开了,不耐气流冲刷,还不能重复使用。

电镀这种工艺最符合塞型量热计的设计初衷,可以将康铜丝垂直焊接到铜箔背面,但在实际应用中还必须解决两大难题:1.如何不让铜箔沉积铜;2.如何保证接点的强度。

2.4 “针接”形式

由于铜箔背面的康铜丝散热对量热计结果有影响，所以热偶丝要求越细越好，采用这种机械结构形式连接，要求康铜丝有一定的强度才能顶住铜箔，达到导通的目的。所以需要将康铜丝端部磨得很细很细，以减少热偶丝散热影响，尽可能的减少偏离理想条件的误差因素。

实验曲线频响可以满足测量要求，但是由于这种“针接”工艺中铜片和康铜丝是靠灌密封胶密封导通的，在实验过程中发现，由于气流对铜片加热，造成铜片膨胀会造成康铜丝和铜箔断开，实验一次传感器就坏掉了。实验结果如图 6 所示：

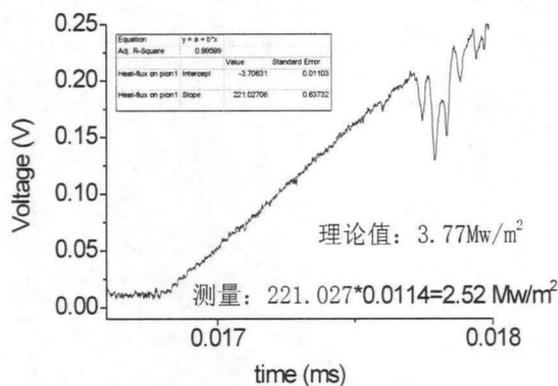


图 6 “针接”形式量热计测试结果

Fig. 6 The curve of Pin-Push method

这种“针接”形式也比较符合塞型量热计的设计思想，但对胶的选择还得继续研究，要保证康铜丝和铜箔的连接强度。

2.5 “卡接”形式

采用如下的结构形式，铜丝和康铜丝在支座管两侧，将拐角处的漆包层给刮掉，然后将铜片压接在支座上，然后使用灌密封胶密封。这种结构形式制作简单，很容易实现。

“卡接”形式制作结构示意图如图 7 所示：

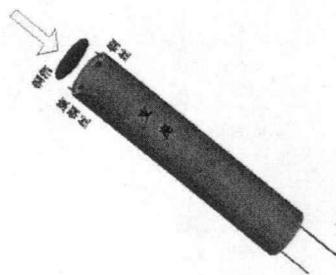
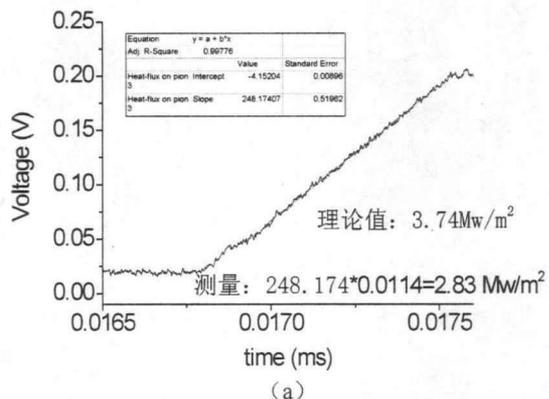


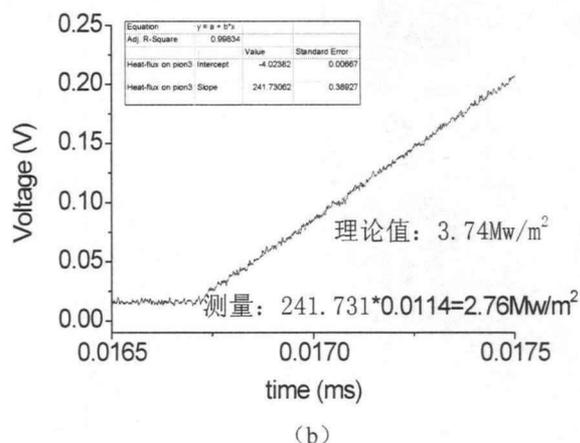
图 7 “卡接”形式结构示意图

Fig. 7 The Structure of Stuck style

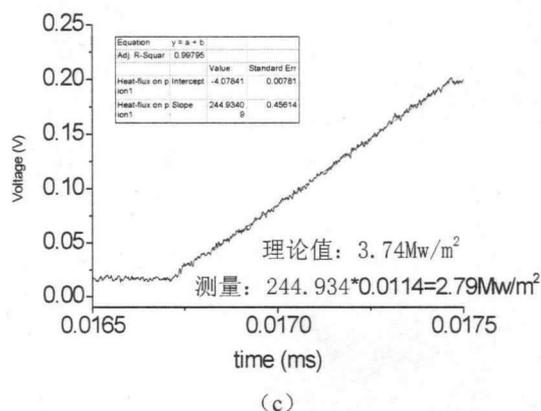
实验曲线：



(a)



(b)



(c)

图 8 (a) (b) (c) “卡接”形式量热计测试结果

Fig. 8 The curve of Stuck method

图 8 中 (a) (b) (c) 为采用同一制作工艺制作的三支热流传感器, 从实验结果可以看出, 这三支传感器之间的散差相对比较小, 传感器一致性比较好。分析原因是在这种制作工艺中, 铜箔可以最大程度的保持厚度均匀, 表面变形小, 从而保证了传感器的测量结果一致性很好。

虽然热偶丝不在铜箔正中心, 但实验测试结果还是很理想的。测量结果跟理论值相比还是偏小, 这种“卡接”形式做出的传感器稳定性和一致性都比较好, 在后续工艺改进中还是需要将康铜丝的热偶接点移到铜箔正中心, 重新设计支座管的结构形式。

3 结论

由以上几种方法可以看出, 不管是点焊接或者卡接形式制作出来的塞型量热计实际测试结果跟理论值比都要偏小, 分析原因主要由以下几个非理想条件造成的:

1.理论上应该测量的是铜箔的实际平均温度, 但是平均温度难以测量, 所以本铜箔量热计通过测量铜箔背面的温度代替铜箔的平均温度。

2.采用热偶丝测温, 其中热偶丝散热也将影响铜箔的温度分布。只能尽量减小热偶丝的直径, 本次采用的热偶丝直径为 0.06mm。

3.由于结构需要, 铜箔背面用环氧树脂与绝缘管粘结, 粘附在铜箔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然后才能使用。

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.

The fabrication processes and consistency analysis of Plug-shaped copper foil calorimeter

Zhang Shi-zhong, Chen Hong, Jang Yang, Dong Zhi-cheng

(State Key Laboratory of High Temperature Gas dynamics, Institute of Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China)

Abstract: Plug-shaped copper foil calorimeter, which is widely used in harsh situations with high heat flux, has a poor consistency because of its deviation from the non-ideal conditions due to different fabrication processes. Base on the principle of the calorimeter, several calorimeters are manufactured by different fabrication processes, and are used to measure the heat-flux values at stagnation point of a semi-sphere model through detonation driven shock tube experiments. The experimental results are analyzed to find out feasible methods for improving the performance of the sensors.

Key words: plug-shaped copper foil calorimeter; detonation-driven shock tube; heat-flux measurement