

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.04.019

耐冲刷薄膜铂电阻热流传感器研制

李 强 刘济春 孔荣宗

(中国空气动力研究与发展中心 超高速空气动力研究所 绵阳 621000)

摘 要:薄膜铂电阻热流传感器是激波风洞气动热环境试验的主要测量手段,其缺点是不耐冲刷、易损坏,影响风洞试验效率。为增强铂薄膜热流传感器的耐冲刷能力,以厚度 $0.06\text{ }\mu\text{m}$ 的铬薄膜作为底衬,既能增强铂薄膜在玻璃基体上的附着力,又不会影响铂薄膜的电阻温度系数,并覆盖厚度 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 的二氧化硅薄膜作为保护膜,制作了3层膜结构和两种两层膜结构的热流传感器样品。分析了铬膜及二氧化硅膜对热流传感器电阻温度系数的影响,对3层膜和单层膜热流传感器的一维传热过程进行对比仿真计算,证明二氧化硅膜不会对激波风洞热流测量结果带来明显的影响。通过开展热流传感器的对比验证试验,证明多层膜热流传感器热流测量结果的可靠性,其热流测量精度和耐冲刷能力都得到一定程度提升。

关键词:激波风洞;热流传感器;耐冲刷;多层膜

中图分类号: V216; TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.5030; 460.4020

Development of anti-erosion platinum thin film resistance thermal sensor

Li Qiang Liu Jichun Kong Rongzong

(Hypervelocity Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: Traditional Pt thin film resistance thermal sensor is easy to be damaged by erosion, which acts as the main limit to improve the efficiency of heat transfer measurement in shock tunnel. This paper is trying to find a method for developing the anti-erosion property of Pt thin film thermal gauge, with $0.06\text{ }\mu\text{m}$ chromium film as the backing film and $0.2\text{ }\mu\text{m}$ silica film as the protective film, samples of three-layer and two types of two-layer film sensor are made for test. The effect of chromium film and silica film for the resistance-temperature coefficient is analyzed, the numerical computations are taken to simulate the heat transfer process of single-layer and three-layer film model of the thermal sensor. The results show that the silica film has little influence on the heat transfer measurement in shock tunnel. The experiments are specially carried out for comparison and validation, which indicates the reliability of the new sensor measurement result and the progress on durability and accuracy of measurement.

Keywords: shock tunnel; thermal sensor; anti-erosion; multi-layer film

1 引 言

载人飞船、导弹和火箭等高超声速飞行器在大气层中高速飞行时,飞行器表面温度升高可能会对飞行器产生致命的损坏,因此必须对飞行器表面热流率进行测量并据此设计热防护方案。在激波风洞中开展的高超声速气动热环境测量试验是设计热防护方案的关键地面模拟

试验,其热流率测量手段主要是热流传感器技术(包括电阻温度计和热电偶)和大面积测热技术(包括红外测热技术和温敏热图技术等)。

目前国内测量瞬态热流率常用的是薄膜电阻热流传感器^[1-3],它是以镀在绝缘基底上的铂薄膜作为测温电阻膜测量温度变化,利用热电模拟网络获得被测物体表面热流密度,具有稳定性好、测量范围大、热响应时间短、灵敏度高、精度高、重复性好、静态标定及使用简单可靠等

特点。虽然同轴热电偶^[4-5]和大面积热流测量^[6-9]技术不断发展,铂薄膜热流传感器仍然是高超声速气动热环境风洞试验中的重要测量手段。但单层薄膜铂电阻传感器的缺点是抗冲刷能力差,风洞试验中作为测温敏感元件的铂薄膜直接暴露在试验气流中,非常容易因为冲刷导致铂薄膜电阻值显著升高而影响热流测量精度;也可能因为气流冲刷而导致铂电阻通电回路中断,使得传感器损坏。风洞中开展气动热环境测量试验时,需要经常更换热流传感器,严重影响风洞测热试验效率。提高激波风洞测热试验效率的关键之一是提高铂薄膜热流传感器的耐冲刷能力。

2 耐冲刷能力增强方法

增强铂薄膜热流传感器抗冲刷能力的关键是提高铂薄膜在玻璃基底表面的附着力,孙亦宁^[10]、滕林等人^[11]研究了提高薄膜附着能力的办法。附着力是一个宏观的参数,它取决于薄膜与衬底之间结合的类型和强度、局部应力的分布和界面失效的方式。薄膜附着力主要受材料性质、清洗工艺、淀积工艺以及真空工艺等影响,比如基底表面是否存在污染层、基底表面状态能、基底与蒸发源材料的热膨胀系数是否匹配或相近、基底的光滑程度和结构缺陷、淀积速率和入射角、薄膜是否易氧化、加热薄膜等等因素都能影响薄膜附着力。

基底、薄膜材料的性质对附着力的影响很大,要形成牢固的附着,需要在薄膜和基底间形成化学键。但并不是所有的金属薄膜和非金属氧化物之间都能形成化学键,不同的金属薄膜与玻璃之间存在不同的附着性^[11],材料性质决定金属铂在玻璃表面的附着性较差,为克服这一问题,在玻璃基底与铂薄膜之间增加中间过渡层,一方面增加它们之间的附着力,另一方面减少它们之间的应力。通常情况下选择金属铬作为中间层^[10-11],金属铬与玻璃基底的附着性能较好,金属铬容易氧化与玻璃表面形成化学键,而铬与铂同为金属相互扩散,能形成较好的结合。

另外国外的 Lei 等人^[12]以及国内的张以忱等人^[13-14]都研究过热流传感器的多层膜制作问题。他们指出根据薄膜基体的不同,膜系分为 3 类。第 1 类是以导电金属为基体如超耐热合金。为了加强基体与传感薄膜之间的结合力,首先在基体上沉积一定厚度的过渡合金底膜,接着沉积一层温度传感薄膜,最后在其上沉积一层保护膜。第 2 类基体材料是导电的陶瓷材料如碳化硅,该衬底遇热氧化,表面生成氧化硅,为获得必要的绝缘电阻,在其上面沉积一层厚度约 5 μm 的氧化铝,在氧化铝膜上沉积温度传感薄膜,最后一层为保护膜。第 3 类基体衬底为绝缘物质例如氮化硅、氧化铝等。这类膜系比较简单,传感功能薄膜直接沉积在衬底上,再在其上沉积一层保护

膜。综上所述,为增强铂薄膜热流传感器抗冲刷能力,改变热流传感器单层膜为多层膜结构,拟在玻璃基体和铂薄膜之间增加一层铬膜,并在铂薄膜表面再沉积一层二氧化硅保护膜。

3 多层薄膜热流传感器制作

传统典型的柱状单层铂薄膜热流传感器制作流程为首先在直径 2 mm 玻璃棒抛光的端面上采用阴极溅射方法用掩膜镀 0.2 μm 厚铂膜,然后在电热炉中以 680 $^{\circ}\text{C}$ 的温度烘烤 2 h 以消除薄膜内应力和粒子间间隙,最后在玻璃棒上涂抹银浆烘烤制作成测温敏感元件的引线。

多层膜传感器制作方法类似,首先在直径 2 mm 玻璃棒抛光的端面上采用电子束蒸发方法镀厚度为 0.06 μm 的铬膜作为底衬。接下来直接在铬膜表面用阴极溅射方法镀铂膜,其厚度与普通热流传感器的厚度一样,保持在 0.2 μm 的厚度,并在电热炉中以 680 $^{\circ}\text{C}$ 的温度烘烤 2 h,以增强铂膜在衬底上的附着力,减小薄膜内应力及薄膜内粒子间的间隙。为达到测温敏感元件长度的要求,需要将铬膜和铂膜两层膜一起刻蚀制作成图 1 所示形状,薄膜刻蚀工艺^[1,15-16]比较多,本文采用激光刻蚀方法。然后与普通传感器引线的制作方法一样,在玻璃棒上涂抹银浆烘烤形成引线。最后采用电子束蒸发法镀厚度 0.2 μm 的二氧化硅膜,直接覆盖在玻璃棒端面上,制作完成的传感器样品如图 2 所示。为了更好地对

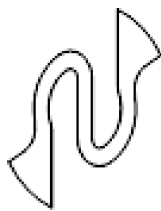


图 1 铬膜和铂膜形状

Fig. 1 Shape of chromium film and platinum film

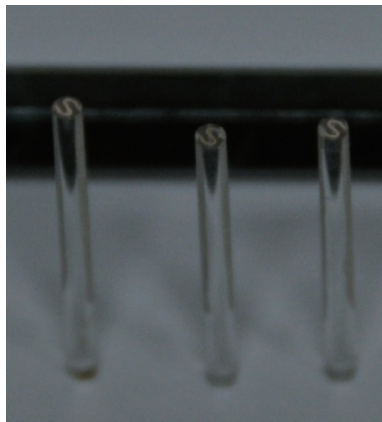


图 2 传感器样品

Fig. 2 Sensors sample

比验证传感器抗冲刷能力,另外制作了铬-铂膜和铂-二氧化硅膜两层膜的热流传感器。

4 传热仿真计算

铬-铂-二氧化硅三层膜结构中,铬膜底衬和二氧化硅保护膜的存在必然会对铂膜的热流测量及热流传导情况带来影响,有必要对此展开分析论证。

对于热流测量情况,铂薄膜测温主要依据是金属铂电阻值随着温度变化的线性度较好,如果加入其他金属势必会影响铂薄膜电阻温度系数,可能导致其线性度变差,从而影响热流测量精度。从文献[17]中可知,当铬薄膜的厚度为0.06 μm时,其电阻温度系数为0(图3),而二氧化硅是电的不良导体,因此从理论上说,这种3层膜结构热流传感器的电阻温度系数与单层膜热流传感器相比不会有明显变化。

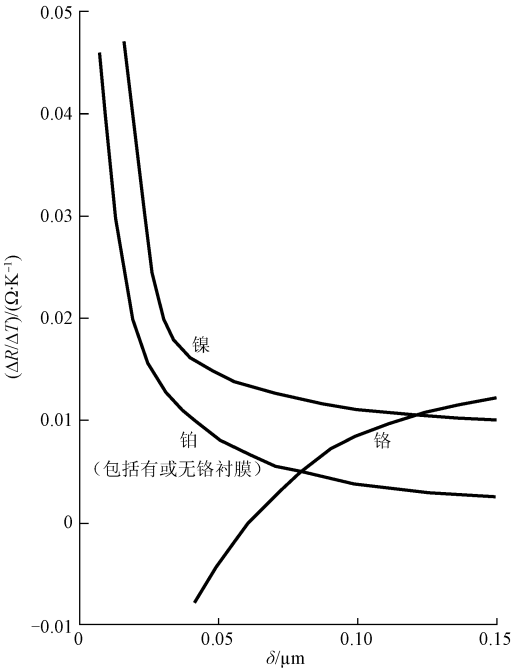


图3 薄膜电阻温度系数与膜厚关系^[17]

Fig. 3 The relationship of thin film resistance-temperature coefficient and film thickness

对于热流传导情况,金属铬导热系数相对较高,铬膜厚度较薄,其作为底衬不会对热流传导情况带来明显影响;二氧化硅为热的不良导体,其导热系数比金属铂小很多,但二氧化硅薄膜厚度只有0.2 μm,其对传热过程的影响应该相对较小,但具体影响程度需要对3层膜传热过程展开仿真计算来证明。

3层膜热流传感器传热过程,可简化为由4层材料构成的一维导热问题,第1层为二氧化硅膜,膜厚

0.2 μm;第2层为铂膜,膜厚0.2 μm;第3层为铬膜,膜厚0.06 μm;第4层为玻璃基底,半无限厚。从《实验传热学》^[17]中单膜热流传感器模型一维导热问题的导热微分方程出发,可以推导出3层膜热流传感器模型的导热微分方程为:

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \alpha_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, 0.2 \mu\text{m} \geq x \geq 0$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \alpha_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, 0.4 \mu\text{m} \geq x \geq 0.2 \mu\text{m}$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial \tau} = \alpha_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2}, 0.46 \mu\text{m} \geq x \geq 0.4 \mu\text{m}$$

$$\frac{\partial T_4}{\partial \tau} = \alpha_4 \frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2}, \infty \geq x \geq 0.46 \mu\text{m}$$

初始条件为:

$$\tau = 0, T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T_i$$

边界条件为:

$$\left. \begin{aligned} x = 0, -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= q_0 \\ x = 0.2 \mu\text{m}, \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}, T_1 = T_2 \\ x = 0.4 \mu\text{m}, \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x}, T_2 = T_3 \\ x = 0.46 \mu\text{m}, \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} &= \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x}, T_3 = T_4 \\ x \rightarrow \infty, T_4 &= T_i \end{aligned} \right\}$$

对于上述微分方程,假设在第1层膜(即二氧化硅膜)表面施加 $q_0 = 1\,000 \text{ kW/m}^2$ 的阶跃热流,对该3层薄膜的一维传热过程进行仿真计算,可得到热流传感器敏感元件铂薄膜层感应到的热流,如图4所示虚线。对单层膜热流传感器模型的一维传热过程也进行类似的仿真计算,得出其铂薄膜层感应到的热流随时间变化曲线,如图4所示实线。

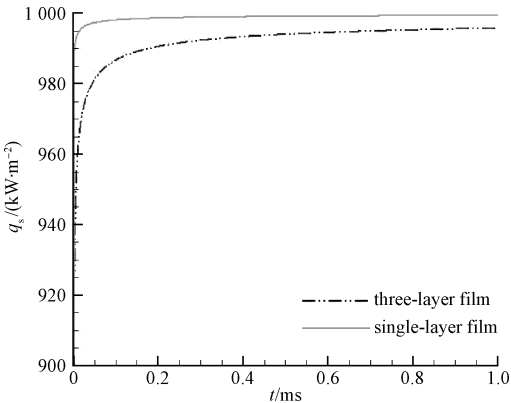


图4 热流传感器热流响应曲线

Fig. 4 Thermal response curve of thermal sensor

从图4可以看出,铂薄膜热流 q_s 随时间变化曲线是

一条无限逼近表面所施加热流 q_0 的曲线;3 层膜热流传感器中铂薄膜热流响应速度要比单层膜的响应速度慢,这主要就是二氧化硅膜对热传导的阻碍作用而导致的。假设以 q_s 达到 0.99 倍 q_0 作为铂薄膜热流响应标准,可以得出 3 层膜热流传感器响应时间约为 1.8×10^{-1} ms,而单层膜热流传感器响应时间约为 3.6×10^{-3} ms。从定量角度看,3 层膜热流传感器中铂薄膜热流响应速度要比单层膜的响应速度慢两个数量级。但是激波风洞的有效运行时间在毫秒量级,具体到 0.6 m 激波风洞,其有效运行时间为 2~13 ms,这比 3 层膜热流传感器响应时间大 1~2 个数量级,3 层膜传感器满足激波风洞热流测量响应速度要求。

图 5 所示为 3 层膜热流传感器所测量热流相对单层膜的误差曲线,从图 5 可以看出,随着时间增长,该误差逐渐变小;取 $t = 0.18$ ms 时,3 层膜热流传感器所测得的热流值相对单层膜热流传感器的误差为 0.86%; $t = 0.5$ ms 时,误差为 0.51%; $t = 1$ ms 时,误差为 0.36%。常规试验中,激波风洞采用单层薄膜铂电阻热流传感器测量模型表面热流密度的重复性精度在 $\pm 15\%$ 以内,3 层膜结构对热流测量精度的影响相对于热流传感器本身的测量误差比较小。综上所述,在激波风洞测热试验中应用 3 层膜结构的热流传感器能够满足测热试验的响应时间要求,二氧化硅膜不会对热流测量带来明显的影响。

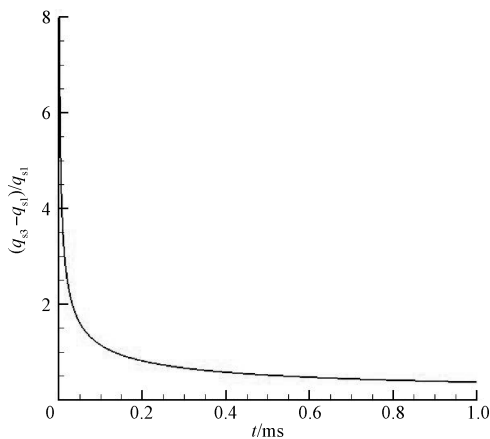


图 5 三层膜热流传感器测量误差曲线

Fig. 5 Measurement error curve of three-layer film sensor

5 验证试验

验证试验在 $\phi 0.6$ m 激波风洞上开展,该风洞是由内径为 80 mm,高压段、低压段长度分别为 7.5 和 15 m 的激波管和相应的喷管、试验段、真空箱组成,其型面喷管出口直径为 0.6 m。风洞试验气体为氮气或者空气,驱动气体采用氢气或者氢气和氮气的混合气体,驱动压力

目前可达 32 MPa。风洞通过更换喉道来获得不同的来流马赫数,通过调节高低压段的压力和充气比例来获得不同的雷诺数,以实现不同的模拟环境。目前该风洞所能模拟的马赫数范围是 6~12,雷诺数范围是 $2.1 \times 10^5 \sim 6.5 \times 10^7/\text{m}^{-1}$,试验段的横截面是直径为 1 m 的圆截面,攻角可变化范围为 $-10^\circ \sim 18^\circ$,试验的有效时间为 2~13 ms。

验证试验选取两个流场,流场 I 马赫数 6.13、总压 13.23 MPa、总温 685 K,流场 II 马赫数 8.42、总压 18.2 MPa、总温 902 K;共开展了 19 车次试验,在流场 I 条件下开展了 9 次试验,在流场 II 条件下开展了 10 次试验。

验证试验共选取了 9 支普通热流传感器、9 支铬-铂膜传感器、8 支铂-二氧化硅膜传感器、8 支铬-铂-二氧化硅膜传感器,安装在如图 6 所示的支架模型上,支架前端为半径 5 mm 的半圆柱前缘。

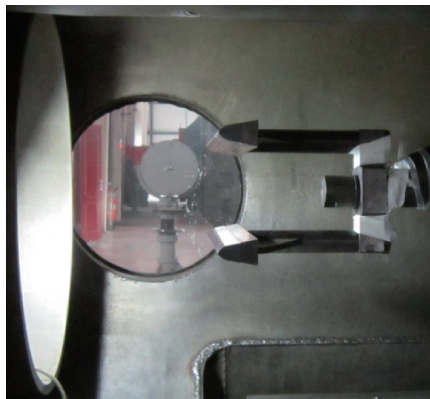


图 6 传感器验证模型

Fig. 6 Verification model of sensor

试验结果显示,经过 19 车次的风洞试验气流冲刷,普通传感器损坏 3 支、铬-铂膜传感器损坏 1 支、铂-二氧化硅膜传感器损坏 1 支、铬-铂-二氧化硅膜传感器损坏 5 支。

图 7~10 所示为 4 种传感器敏感元件电阻相对初始电阻变化结果。图 8 中显示铬-铂膜传感器中铬膜的存在对铂薄膜的电阻变化影响不明显;图 9 中二氧化硅膜对铂薄膜的保护效果较明显;图 10 中铂薄膜的电阻比普通传感器铂薄膜的相对变化幅度更大。

表 1 所示为 4 种传感器热流测量平均值和标准差,激波风洞热流传感器热流测量重复性精度在 $\pm 15\%$ 以内,因此从表 1 中看 4 种传感器的热流测量结果没有明显差异,都在传统普通铂薄膜热流传感器热流测量误差范围之内;而 3 种多层膜热流传感器热流测量结果比普通传感器热流测量结果的标准差小,说明底衬和保护膜对提高热流传感器测量精度也有一定作用。

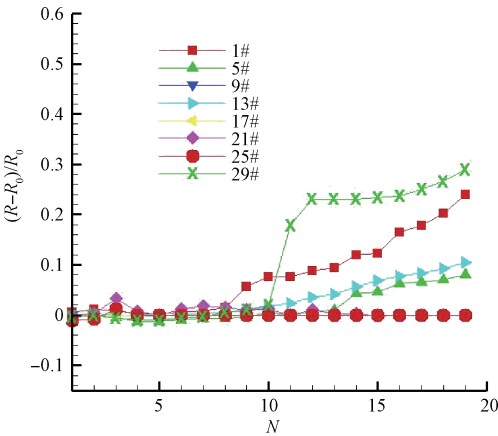


图7 单层膜传感器电阻变化

Fig. 7 Resistance change of single-layer film sensor

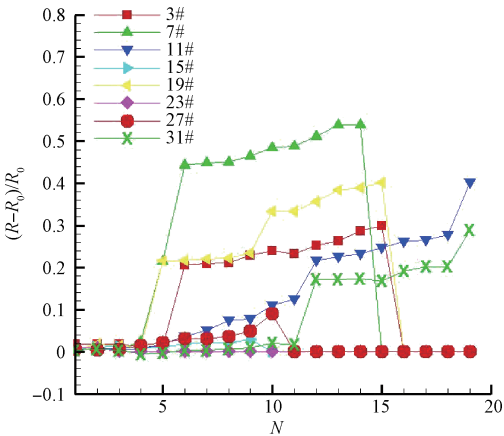


图10 铬-铂-二氧化硅膜传感器电阻变化

Fig. 10 Resistance change of three-layer film sensor

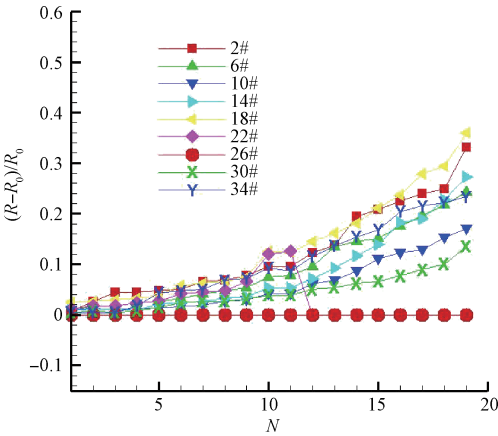


图8 铬-铂膜传感器电阻变化

Fig. 8 Resistance change of Cr-Pt film sensor

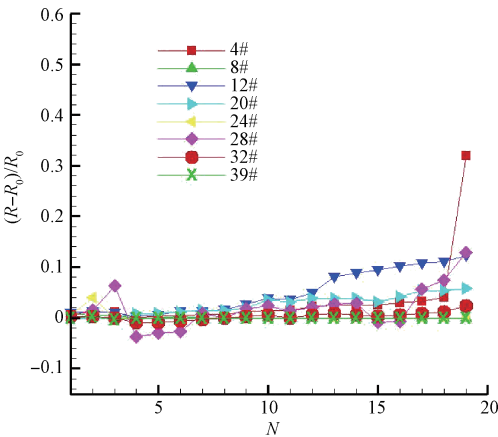


图9 铂-二氧化硅膜传感器电阻变化

Fig. 9 Resistance change of Pt-silica film sensor

表1 4种传感器测量平均值和标准差

Table 1 Measurement mean value and standard deviation of four types of sensor (kW/m²)

传感器	流场	平均值	标准差
普通铂膜	流场Ⅰ	705	42.2
	流场Ⅱ	781	53.3
铬-铂膜	流场Ⅰ	728	32.1
	流场Ⅱ	786	41.5
铂-二氧化硅膜	流场Ⅰ	702	33.9
	流场Ⅱ	749	45.9
铬-铂-二氧化硅膜	流场Ⅰ	745	32.0
	流场Ⅱ	775	41.7

一定程度的提升;铬-铂-二氧化硅膜传感器的耐冲刷能力降低,分析其原因可能是三层混合膜制作工艺不合格导致传感器样品没有达到预期目标。

6 结 论

本文调研增强铂薄膜热流传感器耐冲刷能力的方法,采用增加铬膜底衬和覆盖二氧化硅保护膜的方法来增强耐冲刷能力,并制作了铬-铂-二氧化硅膜3层膜和铬-铂膜、铂-二氧化硅膜两种两层膜传感器样品。分析了铬膜和二氧化硅膜对热流测量的影响,推导出3层膜传感器导热微分方程,并对3层膜和单层膜热流传感器模型的一维传热过程进行仿真计算,证明二氧化硅膜等非金属膜不会对激波风洞热流测量带来明显的影响。最后通过开展热流传感器的对比验证试验,验证传感器的耐冲刷能力。

试验结果显示,相较于普通单县膜传感器,铬-铂膜传感器的耐冲刷能力得到一定程度的提升,铬膜作为底衬能增强铂膜的附着力,但铬膜对铂膜电阻变化的影响不明显;铂-二氧化硅膜传感器的耐冲刷能力得到一定程

综合上述传感器损坏结果、铂薄膜电阻相对变化结果以及传感器热流测量结果,可以得出结论,铬-铂膜和铂-二氧化硅膜这两种两层膜传感器的耐冲刷能力得到

度的提升,二氧化硅膜对铂膜起到了保护作用;从理论上和两层膜传感器的试验结果来看,3层膜传感器的耐冲刷能力应该得到提升,但铬-铂-二氧化硅膜传感器抗冲刷试验结果显示其耐冲刷能力降低,分析其原因可能是3层膜传感器的制作工艺相对复杂,制作出来的样品不合格而导致耐冲刷能力下降。

继续调研多层膜特别是金属与非金属混合多层膜的制作工艺问题,提高3层膜结构热流传感器的耐用性是今后的工作重点。

参考文献

- [1] 孔荣宗,刘济春,吴云峰,等. 激光刻蚀半球型铂电阻的定位研究[J]. 激光技术, 2014, 38(3): 321-324.
KONG R Z, LIU J C, WU Y F, et al. Positioning study in laser corrosion hemisphere platinum resistors [J]. Laser Technology, 2014, 38(3): 321-324.
- [2] 周勇,赵晓路,徐建中. 短周期实验台涡轮机匣换热实时测量初探[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(2): 208-212.
ZHOU Y, ZHAO X L, XU J ZH. Time-resolved heat transfer measurements on turbine outer endwall in a blown-down transient test facility [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(2): 208-212.
- [3] 徐多,谷笏华,吴松. 柔性基底瞬态热流率测量传感器的研制及其应用[J]. 科学通报, 2009, 54(4): 414-419.
XU D, GU J H, WU S. Development and application of transient heat flux sensor on flexible substrate [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(4): 414-419.
- [4] COBLISH J J, COULTER S M, NORRIS J D. Aero-thermal measurement improvements using coaxial thermocouples at AEDC hypervelocity wind tunnel No.9[J]. Simulation, 2007, 50(100): 146-150.
- [5] 秦峰,何川,曾磊,等. 驻点热流测量试验技术研究[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(6): 1072-1077.
QIN F, HE CH, ZENG L, et al. Experimental research of heat-transfer measurements on stagnation points[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(6): 1072-1077.
- [6] MOSHAROV V, ORLOV A, RADCHENKO V. Temperature sensitive paint (TSP) for heat transfer measurement in short duration wind tunnels[R]. IEEE0-7803-8149-1, 2003.
- [7] 周嘉穗,孔荣宗,江涛,等. 激波风洞红外测热试验技术研究[J]. 江汉大学学报:自然科学版, 2010, 38(1): 37-39.
ZHOU J S, KONG R Z, JIANG T, et al. Experimental study of infrared thermographic technique in shock tunnel [J]. Journal of Jiangnan University, 2010, 38(1): 37-39.
- [8] 周嘉穗,张扣立,江涛,等. 激波风洞温敏热图技术初步试验研究[J]. 实验流体力学, 2013, 27(5): 79-82.
ZHOU J S, ZHANG K L, JIANG T, et al. Preliminary experimental study on temperature sensitive thermography used in shock tunnel [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2013, 27(5): 79-82.
- [9] 张扣立,常雨,孔荣宗,等. 温敏漆技术及其在边界层转捩测量中的应用[J]. 宇航学报, 2013, 34(6): 860-865.
ZHANG K L, CHANG Y, KONG R Z, et al. Temperature sensitive paint technique and its application in measurement of boundary layer transition [J]. Journal of Astronautics, 2013, 34(6): 860-865.
- [10] 孙亦宁. 中间层对薄膜附着强度的改进[J]. 真空与低温. 1999, 5(2): 70-76.
SUN Y N. Using inter-layer to improve adhesion between films and substrates[J]. Vacuum and Cryogenics, 1999, 5(2): 70-76.
- [11] 滕林,杨邦朝,崔红玲,等. 金属薄膜附着性的改进[J]. 电子元件与材料. 2003, 22(6): 41-44.
TENG L, YANG B CH, CUI H L, et al. Improvement of adhesion between metallic films and substrates [J]. Electronic Components and Materials, 2003, 22(6): 41-44.
- [12] LEI J F, WILL H A. Thin-film thermocouples and strain gauge technologies for engine applications [J]. Sensors and Actuators, 1998, 65(2-3): 187-193.
- [13] 张以忱,巴德纯,刘希东,等. 温度传感功能薄膜技术[J]. 真空科学与技术学报, 2003, 23(5): 334-339.
ZHANG Y CH, BA D CH, LIU X D, et al. Latest progress in development of thin film temperature sensors[J]. Vacuum Science and Technology, 2003, 23(5): 334-339.
- [14] 张以忱,张健,巴德纯. 磁控溅射制备镍薄膜热阻温度传感器工艺研究[J]. 真空, 2006, 43(6): 1-4.
ZHANG Y CH, ZHANG J, BA D CH. Technological study on Ni thin film thermistor as temperature sensor during magnetron sputtering [J]. Vacuum, 2006, 43(6): 1-4.
- [15] 赵文杰,王欣,王暄,等. 陶瓷微板热隔离半导体气体传感器阵列设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1539-1547.
ZHAO W J, WANG X, WANG X, et al. Design and realization of ceramic microplate thermal isolation

semiconductor gas sensor arrays[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1539-1547.

- [16] 郑志霞, 冯勇建. 大面积悬空浓硼硅薄膜 ICP 刻蚀工艺研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(11): 1706-1710.

ZHENG ZH X, FENG Y J. Research on ICP etching technique of large scale free-handing p + diaphragm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2015, 29(11): 1706-1710.

- [17] 曹玉璋, 邱绪光. 实验传热学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

CAO Y ZH, QIU X G. Experimental Heat Transfer[M]. Beijing: National Defend Industry Press.

作者简介



李强, 1982 年出生, 2005 年于国防科技大学获得学士学位, 2007 年于国防科技大学获得硕士学位, 现为中国空气动力研究与发展中心超高速所助理研究员, 主要研究方向为高超声速气动热环境试验研究。

E-mail: 409195707@qq.com

Li Qiang was born in 1982, received B. Sc. from National University of Defense Technology in 2005 and M. Sc. from National University of Defense Technology in 2007, respectively. Now he is research assistant in Hypervelocity Aerodynamics Institute, CARDC. His main research interest includes

hypersonic aerothermal experimental study.



Liu Jichun was born in 1972, received B. Sc. from Xidian University in 1995 and M. Sc. from Chongqing University in 2005, respectively. Now he is senior engineer in Hypervelocity Aerodynamics Institute, CARDC. His main research interest includes hypersonic aerothermal measuring technique study.



Kong Rongzong was born in 1970, received B. Sc. from Xi'an Jiaotong University in 1994 and M. Sc. from Sichuan University in 2005, respectively. Now he is associate research fellow in Hypervelocity Aerodynamics Institute, CARDC. His main research interest includes hypersonic aerothermal testing technique and equipment study.

刘济春, 1972 年出生, 1995 年于西安电子科技大学获得学士学位, 2005 年于重庆大学获得硕士学位, 现为中国空气动力研究与发展中心超高速所高级工程师, 主要研究方向为高超声速气动热测量技术研究。

E-mail: ch136xqd@qq.com

孔荣宗, 1970 年出生, 1994 年于西安交通大学获得学士学位, 2005 年于四川大学获得硕士学位, 现为中国空气动力研究与发展中心超高速所副研究员, 主要研究方向为高超声速气动热试验技术和设备研究。

E-mail: 1347010859@qq.com