

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007294

## 新型高温薄膜热流传感器的研制\*

崔云先, 黄金鹏, 曹凯迪, 王浩宇, 殷俊伟  
(大连交通大学机械工程学院 大连 116028)

**摘要:** 航天飞行器在返回地球大气层时外表面会产生兆瓦级的热流, 瞬时温升可达 1 800℃, 为了保证飞行器的稳定安全运行, 准确实时测量飞行器热防护系统表面热流具有非常迫切和重要的意义。针对高温热流检测的技术难题, 提出了一种引线与基底一体化的新型热流传感器结构。结合陶瓷烧结静压成型和磁控溅射技术, 通过在嵌入 PtRh6 引线的 99 氧化铝陶瓷基底表面依次沉积 PtRh30-PtRh6 热电堆薄膜、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜、ZrO<sub>2</sub> 薄膜, 研制了一款新型高温薄膜热流传感器, 并对热流传感器进行了静态、动态性能、耐高温及重复性测试。结果表明, 所研制的传感器灵敏度可达 0.01 μV/(W/m<sup>2</sup>) 以上, 传感器动态响应时间为 3.97 s, 对传感器进行 1200℃ 高温实验, 结果显示传感器经历高温前后输出信号无明显变化, 传感器最大重复性误差为 2.38%。所研制的高温薄膜热流传感器可为高温热流测量和热防护系统优化提供科学依据。

**关键词:** 热流传感器; 薄膜热电堆; 磁控溅射; 陶瓷烧结; 高温

**中图分类号:** TH811 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Development of a new type of high temperature thin film heat flux sensor

Cui Yunxian, Huang Jinpeng, Cao Kaidi, Wang Haoyu, Yin Junwei

(College of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

**Abstract:** When the spacecraft reenters the earth atmosphere, the outer surface of spacecraft will generate megawatt of heat flux. As a result, the instantaneous temperature rise can reach 1800℃. In order to ensure the stability and safety of the spacecraft, it is significantly important to accurately measure the heat flux on the thermal protection system surface of the spacecraft in real time. Aiming at the technical difficulty of heat flux measurement in high-temperature condition, a novel heat flux sensor structure integrating the lead and substrate is proposed. Combining the ceramic sintering static pressing molding and magnetron sputtering technologies, a new high temperature thin film heat flux sensor was developed by sequentially depositing PtRh30-PtRh6 thermopile thin film, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film and ZrO<sub>2</sub> film on the substrate surface of 99 alumina ceramics where the PtRh6 leads are embedded. Then, the static and dynamic performance, high-temperature resistant and repeatability tests were conducted. The result shows that the sensitivity of the sensor reaches better than 0.01 μV/(W/m<sup>2</sup>), the dynamic response time is 3.97 s. High temperature test at 1200℃ was conducted on the sensor, the test result shows that the output signal of the sensor has no obvious change before and after the high temperature test, and the maximum repeatability error is 2.38%. The developed high temperature thin film heat flux sensor can provide scientific basis for the high temperature heat flux measurement and thermal protection system optimization.

**Keywords:** heat flux sensor; thin film thermopile; magnetron sputtering; ceramic sintering; high temperature

## 0 引 言

航天飞机及超高速飞行器在返回地球大气层时, 最

高飞行速度可达 30 马赫, 在航天器外表面会产生每平方米几兆瓦的热流, 瞬时温升可达 1 800℃<sup>[1]</sup>, 严重影响航天器的飞行安全。因此, 及时获取高温热端部件表面热流变化对于量化评估其性能和寿命具有重要意义。然

收稿日期: 2020-12-25 Received Date: 2020-12-25

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51905071)、辽宁省博士科研启动基金计划(2019-BS-043)、大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室研究基金(JMTZ201902)项目资助

而,由于传统热流传感器在高温强冲刷环境下无法正常工作,这导致目前高温热端部件表面热流数据的获取方式仍然以数值仿真和热传导反计算为主<sup>[2-3]</sup>,缺乏实时、准确的高温瞬时热流测量手段。因此,研发一种能够实时、稳定、准确的测量出航天器高温热端部件表面热流密度的传感器已经迫在眉睫。

近年来,国内外大学及相关研究机构对薄膜热流传感器进行了大量研究<sup>[4-7]</sup>,取得了一定成果。Zribi<sup>[6]</sup>设计制作了一种薄膜电阻式热流传感器,该传感器是利用铂电阻的电阻率随温度变化这一原理来实现对热流的测量。这种薄膜热流计虽然制作简单,但是其在使用过程中不可避免地需要通过引线将产生的电信号传出。目前,薄膜与引线之间主要是通过高温导电银胶进行连接,由于导电银胶在高温环境中容易发生失效、产生脱落现象,进而降低引线与薄膜传感器之间的连接强度。因此,这种薄膜电阻式热流传感器一般只适用于温度较低的场合,而且在使用时还需要外接电源激励。

随着现代科学技术的飞速发展,热电堆型薄膜热流传感器越来越受到重视<sup>[8-13]</sup>。这种薄膜热流传感器是由一个热阻层和多对串联热电偶构成,它是利用热电效应来实现对热阻层两侧温差随时间变化的测量,并通过多对热电偶结合的方式提高输出热电势。但是,在现有关于薄膜热电堆型热流传感器的文献中,最高工作温度在600℃以下的占绝大多数,未见有关薄膜热电堆型热流传感器可用于1 000℃以上高于温测量的研究报道。

鉴于此,本文提出了一种基于陶瓷粉料等静压成型技术的引线与传感器基底一体化新型结构,突破了薄膜传感器与信号引出线之间只能依靠导电银胶进行连接的技术瓶颈。在此基础上,利用磁控溅射技术制作了以陶瓷为基底的薄膜热流传感器,并对所研制薄膜热流传感器在高温环境下的准确性、稳定性、灵敏性、重复性等进行了研究。

## 1 测量原理

热电堆型薄膜热流传感器的工作原理如图1所示。传感器由基底、薄膜热电堆、薄膜热阻层构成,热阻层薄膜覆盖在热电堆的冷节点上方。当热流垂直通过传感器时,由于薄膜热阻层的存在,在薄膜热电堆的冷热节点将产生温度差,这个温度差使得薄膜热电堆产生一定的温差电动势。由于热阻层非常薄,传热迅速,其边界条件在短时间内可以认为几乎不变。因此,薄膜热流计的瞬态测量过程可近似按稳态情况进行处理。根据傅里叶定律<sup>[14]</sup>:

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta X} = -\lambda \frac{T_1 - T_2}{d_x} \quad (1)$$

式中: $q$ 为热流密度,单位 $W/m^2$ ;  $\lambda$ 为热阻层导热系数,单位 $W/(m \cdot K)$ ;  $\Delta T/\Delta X$ 为垂直等温面方向温度梯度;  $T_1$ 为热节点表面温度,单位 $^{\circ}C$ ;  $T_2$ 为冷节点表面温度,单位 $^{\circ}C$ ;  $d_x$ 为热阻层的厚度,单位 $mm$ 。

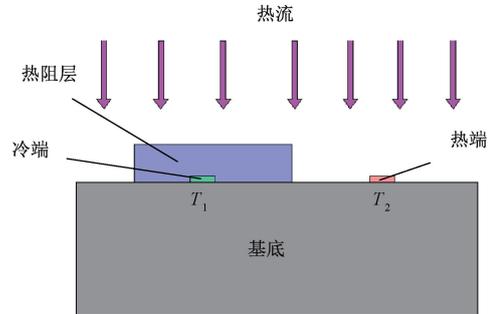


图1 热电堆式热流传感器工作原理

Fig. 1 Working principle of thermopile heat flux sensor

考虑到热阻层两侧表面的温度差非常小,单个热电偶输出的热电势也比较小,所以将多对薄膜热电偶串联成热电堆,以提高薄膜热流传感器的灵敏度和精度<sup>[15]</sup>。故 $N$ 对薄膜热电偶串联形成热电堆的输出电势可以表示为:

$$E = S \times \Delta T \times N \quad (2)$$

式中: $E$ 为薄膜热电偶输出热电势;单位 $mV$ ;  $S$ 为薄膜热电偶塞贝克系数;单位 $mV/^{\circ}C$ ;  $N$ 为组成热电堆的热电偶的数量;  $\Delta T$ 为冷热节点之间温度差;单位 $^{\circ}C$ 。

联立式(1)、(2)可以得到薄膜热流传感器所测热流值与输出热电势之间的关系式为:

$$q = \frac{\lambda}{S \times d_x \times N} E = kE \quad (3)$$

式中: $k$ 为薄膜热流传感器的传感区域系数,表示传感器测量到 $kW/m^2$ 的热流密度时,传感器输出 $1 mV$ 的热电势, $k$ 的单位为 $W/(m^2 \cdot mV)$ 。传感区域系数 $k$ 的倒数为传感器的灵敏度。

由式(3)可知,由于薄膜热阻层厚度 $d_x$ 、薄膜热电偶对数 $N$ 、薄膜热电偶的塞贝克系数和热阻层的导热系数 $\lambda$ 为固定值<sup>[16-17]</sup>,如果得到了 $k$ 或灵敏度,就可以根据薄膜热流传感器的输出热电势,换算得到对应的热流密度值。

## 2 高温薄膜热流传感器制备

### 2.1 传感器材料选择与结构设计

根据薄膜热流计的测量原理,当热阻层厚度、热电偶材料以及施加的热流密度相同时,热阻层的导热系数越小,在热阻层上下两侧表面所产生的温度差就会越大。因此,为了得到较大的灵敏度,薄膜热流计的热阻层材料

应选择导热系数小的材料。同时,为了确保所研制薄膜热流传感器能够在 1 000℃ 的高温环境下正常工作,这就要求热阻层薄膜在高温下的稳定性要好,同时发生成分和形貌变化的可能性要小。综合比较各种陶瓷材料,  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  都是比较理想的热阻层材料,但由于  $\text{SiO}_2$  的导热系数受温度变化的影响明显,在高温退火后很容易因热膨胀系数较大造成薄膜脱落。因此,本文采用导热系数小、绝缘性和热稳定性良好的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  作为热阻层的材料。

热电堆的电极材料采用纯度为 99.99% 的 PtRh30 和 PtRh6, 补偿导线采用的是与之对应的 PtRh6 丝,直径为 0.3 mm。根据美国 NASA 格伦研究院的研究报告,在 1 500℃ 的氧化环境中,无保护膜铂铑合金薄膜热电偶只能实现短时工作<sup>[18]</sup>,而通过增加保护性薄膜可以进一步改善其在高温氧化环境中的耐用度。 $\text{ZrO}_2$  具有较高的硬度,较好的耐磨损、耐腐蚀性质以及良好的化学稳定性<sup>[19]</sup>。因此,  $\text{ZrO}_2$  是制作高温传感器保护膜的首选材料。

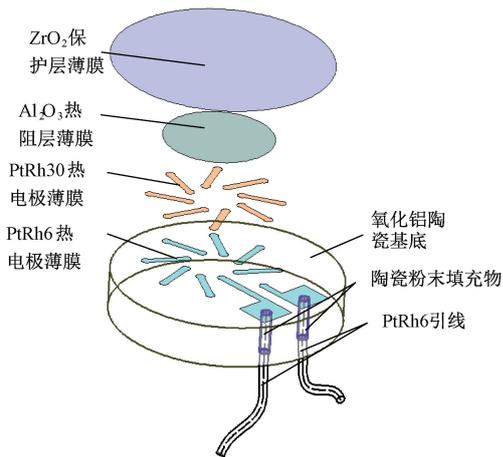


图2 传感器结构

Fig. 2 Sensor structure

薄膜热流传感器的结构如图 2 所示。该热流计是由 8 对 PtRh30/PtRh6 薄膜热电偶经环形排布串联成具有 16 个热电偶节点的热电堆。通过在薄膜热电堆的冷节点区域上方覆盖圆形  $\text{Al}_2\text{O}_3$  热阻层薄膜,使得传感器表面有热流施加时,热电堆的冷热节点能够形成温度差并产生热电势,进而实现热流密度的测量。

此外,在热阻层薄膜的上方设计有  $\text{ZrO}_2$  保护膜,其目的是为了确保护膜热流计有足够的耐高温性能。传感器基底采用的是耐高温、绝缘性和稳定性好的高纯度氧化铝陶瓷材料,直径为 25 mm,厚度为 6 mm,其上设计有两个通孔,直径均为 0.4 mm。这两个通孔用于将两根 PtRh6 丝与基底通过陶瓷烧结技术集成到一起,形成基

底与引线一体化的结构。

在此基础上,制备薄膜热电堆时,通过设计热电堆的图形化机械掩膜,确保基底上两根 PtRh6 丝恰好分别位于 PtRh6 薄膜两正方形热电极的中心。这样一来,薄膜热流传感器工作时产生的热电信号就会通过这两根 PtRh6 丝进行传输,避免了导电银胶的使用,极大地增强了引线的连接强度和可靠性。

## 2.2 基底-引线一体化结构构造

陶瓷基底为定制 99 氧化铝陶瓷,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷基底制备流程如下:

1) 将进行初步抛光的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷基体表面分别采用丙酮、无水乙醇、去离子水依次清洗 15 min,用氮气吹干<sup>[20]</sup>。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷基底直径为 24 mm,厚度 6 mm。

2) 将清洗过的 0.3 mm 的 PtRh6 电极丝穿入陶瓷基体预先设计的 0.4 mm 的通孔中,作为传感器的引出线。引线直径为 0.3 mm。在通孔中填充过渡陶瓷粉,将其固定于可编程真空高温炉的载物台上进行高温烧结。PtRh6 引线、过渡陶瓷、陶瓷基体三者在经过高温烧结制成嵌入 PtRh6 引出线陶瓷基底。

3) 将嵌入 PtRh6 引线的氧化铝陶瓷基底的测温端面进行机械研磨、抛光和超声清洗处理。为了检测陶瓷基体与 PtRh6 引线结合处是否满足制备薄膜的要求,用 JEM- 2100F 扫描电子显微镜 (scanning electronic microscope, SEM) 观测 PtRh6 引线陶瓷基底结合的表面形貌如图 3 所示。

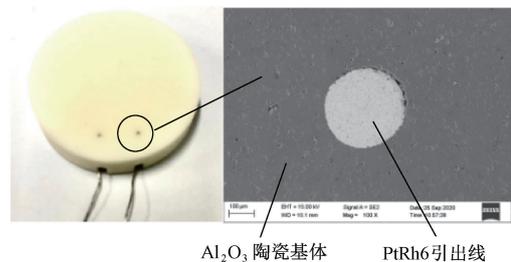


图3 陶瓷基底与引线结合的 SEM 图

Fig. 3 SEM image of ceramic substrate and lead bonding

在 SEM 下观察,抛光后,陶瓷基底与引线连接处结合状态良好,界面清晰,陶瓷基底表面致密均匀,满足制备薄膜的要求。

## 2.3 传感器功能薄膜的制备

氧化铝陶瓷基底制备完毕后进行传感器功能薄膜的制备。所研制的薄膜热流传感器功能薄膜主要包括 PtRh6 功能薄膜, PtRh30 功能薄膜,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  热阻层薄膜,  $\text{ZrO}_2$  保护层薄膜,经过试验探究,在氧化铝陶瓷基底上分别以不同的工艺参数制备了多组样品薄膜,对薄膜制备工艺参数进行了确定。薄膜制备流程如图 4 所示。

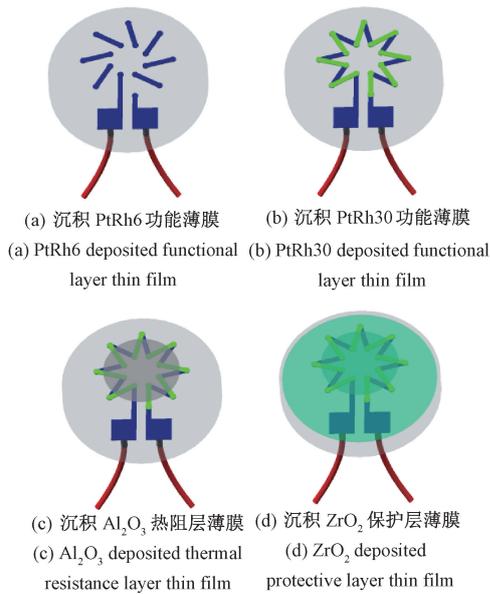


图 4 热流传感器功能薄膜的制备流程  
 Fig. 4 The preparation process of heat flux sensor functional thin film

1) PtRh6 功能薄膜的制备

利用高真空多功能复合镀膜机,采用直流脉冲磁控溅射技术在陶瓷基底的抛光端面沉积厚度为 400 nm 的 PtRh6 功能薄膜,如图 4(a) 所示。PtRh6 功能薄膜的制备工艺参数如表 1 所示。

表 1 PtRh6 薄膜制备工艺参数

Table 1 Preparation technological parameters of PtRh6 thin film

本底真空度 /Pa	工作气压 /Pa	Ar 流量 /sccm	溅射功率 /W	溅射时间 /min
$6.0 \times 10^{-4}$	0.7	20	100	40

2) PtRh30 热阻层薄膜的制备

将制备完毕 PtRh6 薄膜的陶瓷基底进行清洗处理,装配 PtRh30 功能膜机械掩模,更换靶材,沉积厚度为 400 nm 的 PtRh30 功能薄膜,如图 4(b) 所示,PtRh6 功能薄膜的沉积工艺参数如表 2 所示。

表 2 PtRh30 薄膜制备工艺参数

Table 2 Preparation technological parameters of PtRh30 thin film

本底真空度 /Pa	工作气压 /Pa	Ar 流量 /sccm	溅射功率 /W	溅射时间 /min
$6.0 \times 10^{-4}$	0.7	20	100	40

3) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 热阻层薄膜的制备

PtRh30-PtRh6 热电堆功能膜冷端不能通过补偿导线外接,需要在热电堆薄膜上制作一层热阻层薄膜使热电堆薄膜冷热节点间产生温度差。

将制备 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜所需的机械掩模与基底通过高温胶带固定,在热电堆功能薄膜表面沉积厚度为 2 μm 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜,如图 4(c) 所示,薄膜的沉积工艺参数如表 3 所示。

表 3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜磁控溅射制备工艺参数

Table 3 Preparation technological parameters of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film magnetron sputtering

本底真空度 /Pa	工作气压 /Pa	Ar 流量 /sccm	O <sub>2</sub> 流量 /sccm	溅射功率 /W	溅射时间 /h
$1.0 \times 10^{-3}$	0.6	20	8	350	7

4) ZrO<sub>2</sub> 保护层薄膜的制备

传感器功能薄膜在空气中长时间放置容易被污染,破坏,为了延长传感器的使用寿命,在功能膜表面沉积一层绝缘保护薄膜。按照表 4 所示的参数在测量端表面沉积厚度为 800 nm 的 ZrO<sub>2</sub> 薄膜,如图 4(d) 所示。

表 4 ZrO<sub>2</sub> 薄膜磁控溅射制备工艺参数

Table 4 Preparation technological parameters of ZrO<sub>2</sub> thin film magnetron sputtering

本底真空度 /Pa	工作气压 /Pa	Ar 流量 /sccm	O <sub>2</sub> 流量 /sccm	溅射功率 /W	溅射时间 /min
$1.0 \times 10^{-3}$	0.6	20	8	400	40

2.4 热流传感器功能薄膜的表征

利用 JEM-2100F SEM 对同炉制备的样品功能薄膜表面微观形貌进行观测,PtRh6, PtRh30, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的表面形貌如图 5~7 所示。

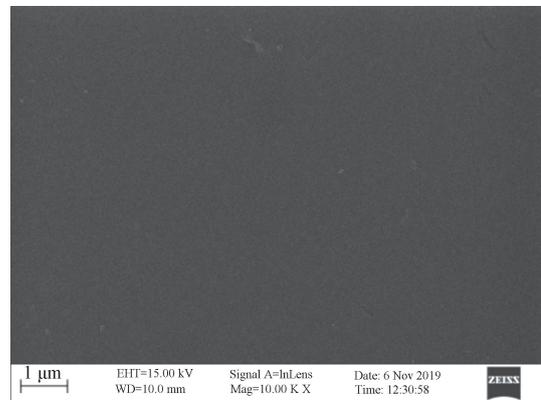


图 5 PtRh6 薄膜表面 SEM 图

Fig. 5 SEM image of PtRh6 thin film surface

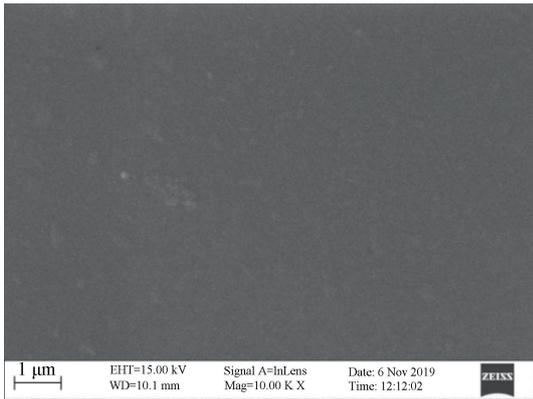


图 6 PtRh30 薄膜表面 SEM 图

Fig. 6 SEM image of PtRh30 thin film surface

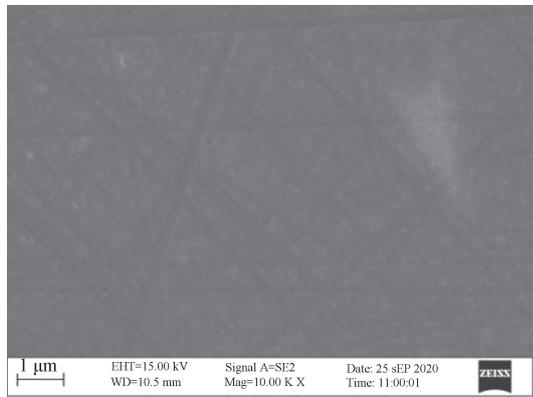


图 7 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜表面 SEM 图

Fig. 7 SEM image of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film surface

从图 5~7 中可以看出, PtRh6, PtRh30, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的表面致密平整, 分布均匀, 无明显缺陷, 达到实验预期要求。

采用能谱分析仪 (energy dispersive spectrometer, EDS) 对沉积的 PtRh6, PtRh30, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜成分进行了分析, 结果如图 8~10 所示。



图 8 PtRh6 功能薄膜的能谱分析

Fig. 8 Energy spectrum analysis of PtRh6 functional thin film

从图 8~10 中可以看出, PtRh6 薄膜的 Pt、Rh 原子组成比例为 93.4:6.5, 同靶材成分的原子比例 94:6 接近, PtRh30 薄膜的 Pt、Rh 原子组成比例为 69.1:30.9, 同靶

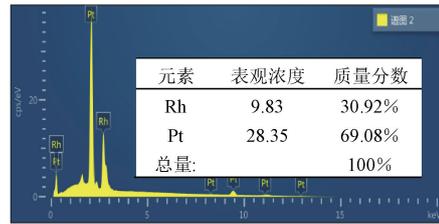


图 9 PtRh30 功能薄膜的能谱分析

Fig. 9 Energy spectrum analysis of PtRh30 functional thin film



图 10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 功能薄膜的能谱分析

Fig. 10 Energy spectrum analysis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> functional thin film

材成分的原子比例 70:30 接近。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的 Al、O 原子组成比例为 56:44, 同 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的原子比例 3:2 接近。

由于制备薄膜时成膜形状不可控, 需借助机械掩模将不需镀膜的部分遮挡。本文制备所需掩模如图 11 所示。陶瓷基底与机械掩模按照设计的位置进行装配, 确保制备的薄膜引脚覆盖引线区域。采用上述薄膜制备工艺参数并结合机械掩模制备传感器功能薄膜。制备好的热流传感器如图 12 所示。

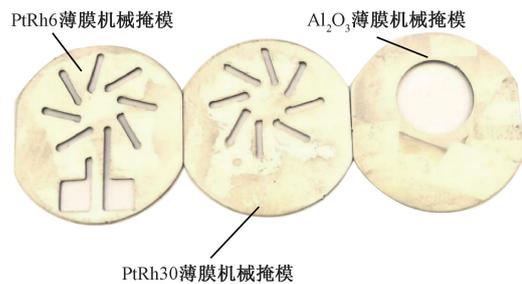


图 11 传感器机械掩模实物

Fig. 11 Physical picture of the mechanical mask of the sensor

### 3 高温薄膜热流传感器静动态标定

热流传感器是非标准测温元器件, 为了能够准确测量热流密度的变化, 在对传感器制造、装配之后必须对其参数和性能进行标定实验, 确定传感器的基本特性<sup>[21]</sup>。

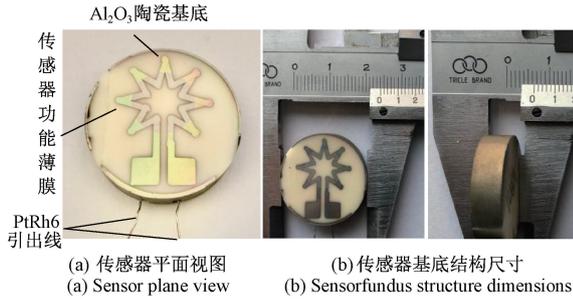


图 12 高温薄膜热流传感器实物  
Fig. 12 Physical image of the high temperature thin film heat flux sensor

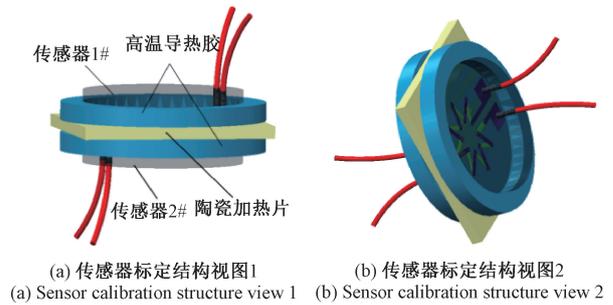


图 14 高温薄膜热流传感器标定结构  
Fig. 14 High temperature thin film heat flux sensor calibration structure

### 3.1 高温薄膜热流传感器的静态标定

本文采用高温陶瓷加热片对热流传感器进行灵敏度标定,利用可调直流稳压电源确定陶瓷加热片的加载的电压和电流和已知的陶瓷加热片工作面积,计算出陶瓷加热片表面产生的热流,同时采集待标定热流传感器的输出热电势,对热流传感器进行静态标定。

标定系统包括 Fluke 9 118 A-C-256 高温卧室计量炉、可调直流稳压电源、30 mm×30 mm×2 mm 高温陶瓷加热片、Tektronix-DMM7510 数字万用表等,所搭建的测试系统如图 13 所示,传感器标定结构如图 14 所示。实验现场如图 15 所示。

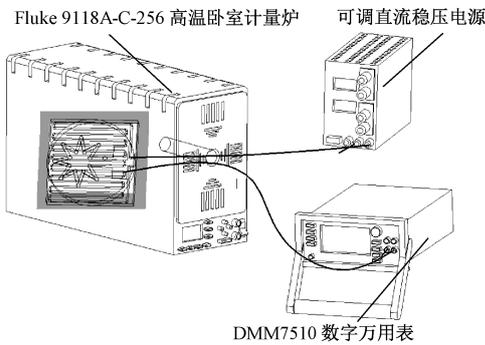


图 13 高温薄膜热流传感器标定系统  
Fig. 13 High temperature thin film heat flux sensor calibration system



图 15 高温薄膜热流传感器标定现场  
Fig. 15 High temperature thin film heat flux sensor calibration site

表 5 热电势  $E$  与测量端热流  $q$  之间的关系

Table 5 Relationship between thermoelectric potential  $E$  and heat flux  $q$  at measuring end

输入电压 /V	输入电流 /A	热流值 /(kW·m <sup>-2</sup> )	传感器 1#热 电势/mV	传感器 2#热 电势/mV
18	0.51	5.10	0.028	0.030
19	0.55	5.80	0.034	0.036
20	0.59	6.55	0.042	0.044
21	0.62	7.25	0.049	0.048
22	0.64	7.80	0.057	0.056
23	0.68	8.70	0.066	0.067
24	0.69	9.20	0.071	0.070
24.5	0.71	9.65	0.076	0.075
25	0.72	10.00	0.083	0.081
25.5	0.73	10.35	0.088	0.087
26	0.74	10.70	0.094	0.092

PtRh30-PtRh6 热电极材料在低温环境输出热电势较小,同时为传感器提供一个稳定的环境温度,故选择在 450℃ 恒定温度条件下对热流传感器进行标定。为了避免陶瓷加热片热损失造成标定误差,用高温导热胶将两个待标定热流传感器分别固定在陶瓷加热片两面,以实现测量热量均匀的目的。为了减少四周热量散失,采用高温棉将陶瓷加热片四周包裹,达到使热量从陶瓷片上下两面传导的目的。

随着陶瓷加热片热流值的变化,记录 1#,2#传感器输出的热电势值,结果如表 5 所示。

采用最小二乘法对采集的数据进行线性拟合,结果如图 16 所示。从图中或数据计算得出,该批制备的热流传感器灵敏度可以达到  $0.01 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$  以上,线性拟合相关系数  $R^2$  达到 0.99 以上。实验结果表明,所研制的热流传感器具有较高的灵敏度及线性度。

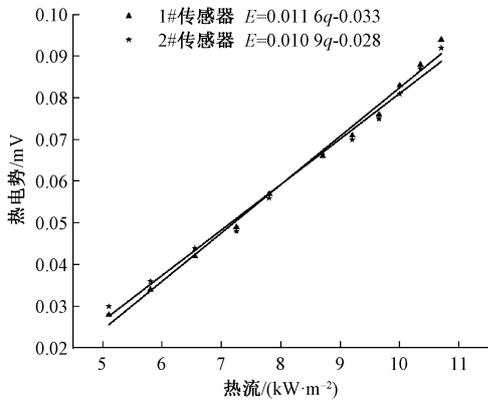


图 16 高温薄膜热流传感器的标定曲线

Fig. 16 Calibration curve of the high temperature thin film heat flux sensor

### 3.2 高温薄膜热流传感器的动态标定

为保证所研制薄膜热流传感器能实时准确的测量被测物表面热流,其时间常数  $\tau$  应足够小。因此,对传感器进行动态标定实验显得至关重要。常用的动态标定方法主要有阶跃响应法、斜坡响应法和脉冲响应法<sup>[17]</sup>3种。

本文采用最简单有效的阶跃响应法。动态测试系统如图 17 所示。热流传感器的动态标定系统包括 Fluke 9118A-C-256 高温卧式计量炉,可调直流稳压电源、高温陶瓷加热片、DMM7510 数字万用表采集装置等。

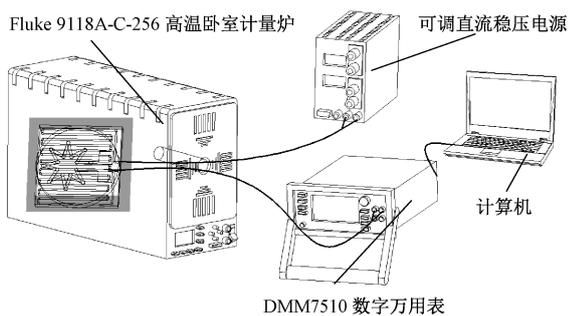


图 17 高温薄膜热流传感器动态标定系统

Fig. 17 High temperature thin film heat flux sensor dynamic calibration system

高温卧式计量炉为传感器动态标定提供稳定温度场,用于提高 PtRh30-PtRh6 热电极材料的输出热电势。在此基础上,设置可调直流稳压电源工作参数,输入电压 25 V,电流为 0.73 A,待数字万用表检测到的传感器输出

信号稳定之后,迅速按下可调直流稳压电源的开关,接通高温陶瓷加热片,通过高温陶瓷加热片给传感器加热一段时间,待数字万用表检测到的信号再次稳定之后,迅速关闭电源,使高温陶瓷加热停止加热,由此便可得到阶跃热流信号。采用 DMM7510 配套采集软件 KickStart 对 1# 传感器输出信号进行显示与储存。通过处理得到如图 18 所示的热流传感器阶跃响应曲线。根据曲线计算出热流传感器达到稳态值的 63.2% 时所需的时间,即时间常数  $\tau=3.97 \text{ s}$ 。

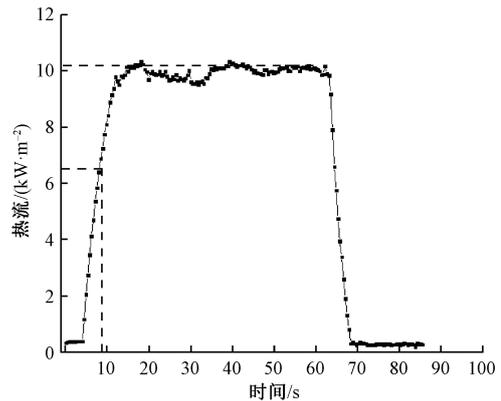


图 18 高温薄膜热流传感器阶跃响应测试曲线

Fig. 18 Step response test curve of the high temperature thin film heat flux sensor

## 4 传感器的高温稳定性及重复性测试

### 4.1 高温薄膜热流传感器的高温稳定性测试

高温服役性能是衡量传感器使用寿命的重指标<sup>[22]</sup>。为了研究高温环境是否会对研制的传感器的服役性能、灵敏度产生影响,取两组同种参数的热流传感器,其中一组放入陶瓷纤维马弗炉中进行高温实验。设定炉腔温度为  $1200^\circ\text{C}$ ,温升速率设定  $2^\circ\text{C}/\text{min}$ ,保温 1 h 后随炉冷却,待炉腔温度冷却至室温后取出热流传感器。将两组热流传感器在相同环境下进行测试,结果如图 19 所示。

从图 19 中可以看出,研制的高温薄膜热流传感器在经过  $1200^\circ\text{C}$  高温实验之后,仍可正常工作,两次测量传感器灵敏度误差为 3.3%。考虑到标定过程中外界气流,陶瓷加热片局部温度差异等因素的影响。实验结果证明,热流传感器具有较好的高温稳定性,经过高温实验后仍可正常稳定工作。

### 4.2 高温薄膜热流传感器的重复性测试

为了对薄膜热流传感器进行重复性探究实验,将同一只传感器置于  $450^\circ\text{C}$  稳定温度环境下,加载相同热流进行 3 次重复测试,对采集的热电势进行记录并拟合,实验结果如表 6 所示,结果如图 20 所示。

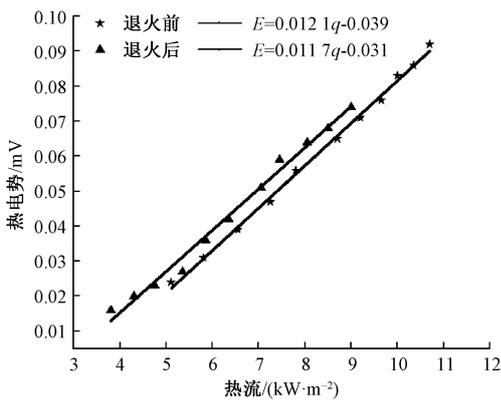


图19 传感器高温实验前后数据对比

Fig. 19 Comparison of the sensor data before and after high temperature test

表6 同一支热流传感器相同条件下输出热电势比较

Table 6 Comparison of the output thermoelectric potentials of the same heat flux sensor under the same condition

热流值 /(kW·m <sup>-2</sup> )	第1次测试热 电势/mV	第2次测试热 电势/mV	第3次测试热 电势/mV
7.10	0.043	0.041	0.042
7.70	0.051	0.052	0.050
8.45	0.066	0.064	0.063
9.05	0.072	0.071	0.073
9.55	0.079	0.076	0.077
10.00	0.084	0.086	0.085
10.50	0.092	0.093	0.094
10.85	0.103	0.101	0.102

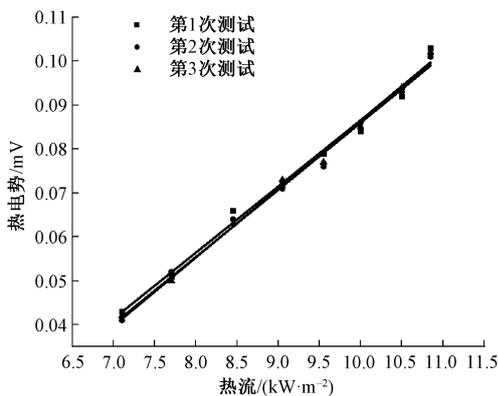


图20 同一支热流传感器相同条件下输出热电势

Fig. 20 The output thermoelectric potentials of the same heat flux sensor under the same condition

由图20可知,薄膜热流传感器3次测量结果接近,

对数据进行重复性误差分析:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x)^2}{n - 1}} \quad (4)$$

式中: $n$ 为实际测量次数; $x_i$ 为每次测试的结果; $x$ 为多次测量的平均值; $\sigma$ 为标准差。

重复性误差:

$$\delta = \frac{\sigma}{x} \times 100\% = 2.38\%$$

采用误差公式对实验数据进行误差分析,实验结果表明,同一支热流传感器在相同热流密度条件下最大重复性误差为2.38%。通过上述实验得出,研制的热流传感器具有优良的重复性,可以极大程度的减轻批量传感器标定的工作量,为热流传感器标准化生产提供了良好的技术基础。

## 5 结 论

本文针对航天高温高热流测试环境,研制了一种适用于高温环境的薄膜热电堆式热流传感器。本文采用陶瓷烧结静压成型技术将PtRh6引线嵌入到99氧化铝陶瓷基底中,实现了引线与传感器基底的结构一体化。本文采用磁控溅射技术在嵌入PtRh6引线的陶瓷基底测量端依次沉积制备了PtRh30-PtRh6热电堆薄膜、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜、ZrO<sub>2</sub>薄膜,使用多种薄膜微观表征方法对传感器薄膜进行表征。结果显示所制备的功能薄膜符合传感器薄膜性能要求。本文对高温薄膜热流传感器进行静态标定,结果显示传感器灵敏度达到为0.01 μV/(W/m<sup>2</sup>)以上,传感器动态响应时间为3.97 s,对热流传感器进行了1200℃高温实验。实验结果表明,在经过高温试验后,输出信号无明显变化,热流传感器的最大重复性误差为2.38%。

## 参考文献

- [1] 侯玉柱,郑京良,董威.高超声速飞行器瞬态热试验[J].航空动力学报,2010,25(2):343-347.  
HOU Y ZH, ZHENG J L, DONG W. Transient test of aerodynamic heating for hypersonic vehicle [J]. Journal of Aerospace, 2010, 25(2): 343-347.
- [2] 钱炜祺,蔡金狮.再入航天飞机表面热流密度辨识[J].宇航学报,2000,21(4):1-6.  
QIAN W Q, CAI J SH. Surface heat flux identification of reentry space shuttle[J]. Journal of Astronautics, 2000, 21(4): 1-6.
- [3] 谢吉慧,苏新明,秦家勇,等.大型航天器与外热流模拟装置的数字化结构匹配方法[J].航天器环境工程,2018,35(3):288-292.

- XIE J H, SU X M, QIN J Y, et al. A digital method for structure matching between large spacecraft and external heat flux simulation device[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2018, 35(3):288-292.
- [ 4 ] HAMADI D, GARNIER B, WILLAIME H, et al. A novel thin-film temperature and heat-flux microsensor for heat transfer measurements in microchannels[J]. *Lab on a Chip*, 2012, 12 ( 3 ) : 652-658.
- [ 5 ] AMMAR H, GARNIER B, AHMED O E M, et al. Thermal analysis of chemical reactions in microchannels using highly sensitive thin-film heat-flux microsensor[J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 94:150-155.
- [ 6 ] AYMEN Z, MAGALI B, SYLVIE B, et al. Design, fabrication and characterization of thin film resistances for heat flux sensing application[J]. *Sensors & Actuators: A. Physical*, 2016, 245(4):26-39.
- [ 7 ] D'ALEO F P, PRASSER H M. Design, calibration and testing of a thin film temperature gauge array for temperature and heat flux measurements in fluid mixing experiments[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2012, 24(1):29-35.
- [ 8 ] CLAYTON A. PULLINS. In situ high temperature heat flux sensor calibration [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2010, 53 ( 17-18 ) : 3429-3438.
- [ 9 ] 储小刚. 热电堆式热流传感器的设计与实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- CHU X G. Design and experimental study of thermopile heat flow sensor [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2016.
- [ 10 ] 廖亚非, 张青文, 何容盛. 热流计的发展、国际领先技术与改进方向研究[J]. *重庆建筑大学学报*, 2005, 27(3): 84-87.
- LIAO Y F, ZHANG Q W, HE R SH. Development of heat flow meter, research of international leading technology and improvement direction [J]. *Journal of Architecture University of Chongqing*, 2005, 27 ( 3 ) : 84-87.
- [ 11 ] 杨凯. 一种薄膜热电堆热流传感器灵敏度系数的实验研究[J]. *宇航计测技术*, 2018, 38(3):71-76.
- YANG K. Experimental study on the sensitivity coefficient of a thin-film thermopile heat flow sensor[J]. *Astronautics and Measurement Technology*, 2018, 38(3):71-76.
- [ 12 ] LI H, CHOI H, MA C, et al. Transient temperature and heat flux measurement in ultrasonic joining of battery tabs using thin-film microsensors [ J ]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2013, 135(5): 051015.
- [ 13 ] SINGH S K, YADAV M K, KHANDEKAR S. Measurement issues associated with surface mounting of thermopile heat flux sensors [ J ]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 114: 1105-1113.
- [ 14 ] 戴自祝. 热流测量与热流密度传感器[M]. 北京: 计量出版社, 1986.
- DAI Z ZH. Heat flow measurement and heat flow density sensor[M]. Beijing: Beijing Metrology Press, 1986.
- [ 15 ] 李娟. 用于航空发动机热端部件表面热流测量的薄膜热流计研制[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- LI J. The development of high-temperature thin film thermopile sensor for heat flux measurement of aeroengine hot section [ D ]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [ 16 ] 蔡岸. 激光闪光法研究氧化铝薄膜在 220 到 480K 的导热系数[J]. *热物性学*, 2010, 55(11):4840-4843.
- CAI AN. Thermal conductivity of anodic alumina film at (220 to 480K) by laser flash technique [J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2010, 55 ( 11 ) : 4840-4843.
- [ 17 ] 白素媛. 亚微米薄膜导热特性的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- BAI S Y. Study of the thermal conductivity of submicron thin films[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [ 18 ] ALIFANOV O M, CHEREPANOV V V, MORZHUKHINA A V. Investigation of the formation mechanism and the magnitude of systematic error of thermocouple measurements in high-temperature heat shield aerospace materials [ J ]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, 91(3): 574-584.
- [ 19 ] 崔云先, 杨琮, 薛生俊, 等. C/SiC 复合材料表面高温瞬态温度传感器的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(3):163-171.
- CUI Y X, YANG C, XUE SH J, et al. Study on high temperature transient temperature sensor on C/SiC composite surface [ J ]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(3):163-171.
- [ 20 ] 马春雨, 李智, 张庆瑜. 反应溅射法制备铝掺杂氧化锆薄膜及其热稳定性的研究[J]. *无机材料学报*, 2007, 22(6):1206-1210.
- MA CH Y, LI ZH, ZHANG Q Y, et al. Thermal

stability of Al-doped ZrO<sub>2</sub> films prepared by reactive RF magnetron sputtering[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2007, 22(6): 1206-1210.

- [21] ALI R, HOSSEIN B, MOSTAFA A. Design of on-board calibration methods for a digital sun sensor based on Levenberg-Marquardt algorithm and Kalman filters[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(1): 339-351.
- [22] NENAROKOMOV A V, ALIFANOV O M, BUDNIK S A, et al. Research and development of heat flux sensor for ablative thermal protection of spacecrafts [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 97(2): 990-1000.

### 作者简介



**崔云先**, 2011年在大连理工大学获得博士学位, 现为大连交通大学机械工程学院教授, 主要研究方向为传感与测控技术和先进制造技术。

E-mail: dlcyx007@126.com

**Cui Yunxian** received her Ph. D. degree in 2011 from Dalian University of Technology. Now, she is professor in College of Mechanical Engineering in Dalian Jiaotong University. Her main

research interest includes sensing and measurement & control technology, advanced manufacturing technology.



**黄金鹏**, 2018年于内蒙古科技大学获得学士学位, 现为大连交通大学硕士研究生, 主要研究方向为传感与测控技术。

E-mail: 17866546229@163.com

**Huang Jinpeng** received his B. Sc. degree from Inner Mongolia University of Science & Technology in 2018. Now he is an M. Sc candidate in Dalian Jiaotong University. His main research interest is sensing and measurement & control technology.



**殷俊伟**(通信作者), 2018年于大连理工大学获得博士学位, 现为大连交通大学机械工程学院副教授, 主要研究方向为智能检测与智能加工。

E-mail: yjwzx@djtu.edu.cn

**Yin Junwei** (Corresponding author) received his Ph. D. in 2018 from Dalian University of Technology. Now, he is an associate professor in College of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University. His main research direction is intelligent detection and intelligent machining.