

航天器表面瞬态测温用薄膜热电偶的研制

李振伟¹, 董景龙², 刘畅¹, 刘泽元¹, 朱熙¹, 顾磊¹

(1. 北京卫星环境工程研究所; 2. 中国空间技术研究院 载人航天总体部: 北京 100094)

摘要: 根据航天器表面测温的需要, 研制了一种 K 型 (NiCr-NiSi) 薄膜热电偶。该型热电偶采用射频磁控溅射技术在针型高温陶瓷基体上制备薄膜热电偶, 其热电偶结点厚度为微米级, 能够与航天器表面有效贴合, 实现航天器表面的瞬态高温测量。通过物理试验验证, 该型薄膜热电偶测量最高温度能够达到 800 °C, 测量相对误差在±0.5%以内, 满足返回式航天器表面高温的瞬态测温需求。

关键词: 航天器; 表面测温; 薄膜热电偶; 瞬态温度测量

中图分类号: TP216

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2017)04-0393-05

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2017.04.009

Development of thin-film thermocouple for measuring transient high temperature on spacecraft surfaces

LI Zhenwei¹, DONG Jinglong², LIU Chang¹, LIU Zeyuan¹, ZHU Xi¹, GU Lei¹

(1. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering;

2. Institute of Manned System Engineering, China Academy of Space Technology: Beijing 100094, China)

Abstract: A K-type film thermocouple is developed for measuring the temperature on the spacecraft surface. The thermocouple film is fabricated on a high temperature ceramic substrate by the RF magnetron sputtering technology. The thickness of the thermocouple contacts is in the micron grade. The K-type film thermocouple can effectively fit the spacecraft surface and be used for high-temperature transient measurement on the spacecraft surfaces. Physical test verifies that the measuring temperature of this K-type film thermocouple can reach as high as 800 °C, and the relative measurement error is within ±0.5%. It can well fulfill the high-temperature transient measurement requirement of recoverable spacecrafts' surfaces.

Key words: spacecraft; surface temperature measurement; thin-film thermocouple; transient temperature measurement

收稿日期: 2017-06-01; 修回日期: 2017-07-28

基金项目: 装备发展部“十三五”装备预研领域基金重点项目(编号: 6140923020301)

引用格式: 李振伟, 董景龙, 刘畅, 等. 航天器表面瞬态测温用薄膜热电偶的研制[J]. 航天器环境工程, 2017, 34(4): 393-397
LI Z W, DONG J L, LIU C, et al. Development of thin-film thermocouple for measuring transient high temperature on spacecraft surfaces[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2017, 34(4): 393-397

0 引言

随着我国在深空探测、高超声速飞行器以及天地往返飞行器等领域的快速发展,对航天器试件表面瞬态温度测量提出了更高的要求^[1]。在航天器地面热试验中,航天器表面温度作为重要的测量参数之一,其获得的实时性和准确性对航天器热设计数学模型分析和热控制系统的验证,以及在高低温拉偏情况下航天器及其组件各种功能与性能的验证起着关键作用。特别是,在返回式航天器再入过程中,因高速摩擦气动热效应致使其表面温度急剧升高,对航天器及某些结构件的表面温度进行测量,能更好地反映试件表面的温度特征,为航天器防热系统功能的验证提供数据参考。

目前,航天器表面温度测量方面按温度传感器与被测对象的关系分为非接触式与接触式2种^[2]。非接触式测温方法包括红外热成像、激光测温及辐射测温等;接触式测温传感器包括热电偶式表面温度传感器、光纤温度传感器、电涡流式温度传感器和电阻式表面温度传感器等。在当前航天器热试验和飞行过程中,多采用普通热电偶对其表面温度进行测温;然而,对于高超声速飞行器和天地往返式飞行器而言,航天器表面温度会出现急剧变化,而普通热电偶因本身结构、比热容及安装方式等因素,测量结果存在明显迟滞性和较大误差,难以满足表面瞬态高温的准确测量要求。

为解决上述问题,本文对薄膜热电偶技术进行研究,研制了一种用于表面瞬态高温测量的针型薄膜热电偶^[3-4]。该型热电偶以耐高温陶瓷为基体组件,选用K型热电偶材料(NiCr-NiSi),并采用射频磁控溅射技术在基体组件上制备热电偶薄膜,其热结点厚度为微米级,比热容远远小于普通热电偶,能与产品表面有效贴合,迅速准确测量高达800℃的瞬态高温,响应时间小于50ms。

1 薄膜热电偶测温原理

薄膜热电偶实质为普通热电偶的薄膜化,即将热电偶的两极以微米级薄膜形式沉积于特定基体。薄膜热电偶与普通热电偶测温原理相同,主要基于热电效应,又称塞贝克效应^[5]。本文选用NiCr和NiSi2种电极材料,设计并制作薄膜热电偶,热电

势计算原理为

$$E_{AB} = \int_{T_0}^T S_{AB}(T) dT = \int_{T_0}^T [S_B(T) - S_A(T)] dT, \quad (1)$$

式中: $S_{AB}(T)$ 为薄膜热电偶的塞贝克系数; $S_A(T)$ 为NiCr薄膜电极的绝对热电势率; $S_B(T)$ 为NiSi薄膜电极的绝对热电势率; T 为薄膜热电偶热端温度; T_0 为薄膜热电偶冷端温度。

在有限的温度范围($T - T_0$)内, $S_A(T)$ 和 $S_B(T)$ 基本上是恒定不变的,则式(1)可简化为

$$E_{AB} = (S_B - S_A)(T - T_0) = S_{AB}(T - T_0), \quad (2)$$

已知NiCr薄膜电极和NiSi薄膜电极的绝对热电势率,将冷端温度 T_0 保持在恒定温度环境下,热电势 E_{AB} 可转换为对热端温度 T 的单值函数。

薄膜热电偶与普通热电偶没有本质区别,但普通热电偶热结点尺寸通常在几百 μm ,而薄膜热电偶的薄膜一般只有几 μm 厚,因此薄膜热电偶的比热容更小,具备瞬态响应能力。

2 薄膜热电偶的设计与研制

本文所研制的薄膜热电偶主要用于航天器在返回时由于高速飞行的气动效应所产生的表面高温的测量。根据实际需求,薄膜热电偶应满足测量温度范围为0~800℃和最大测量误差不超出 $\pm 4\%$ 等技术指标。热电偶设计中,热电极材料的选取、基体材料的选择以及结构一体化设计是关键。

2.1 薄膜热电偶电极选取

目前常用的热电偶材料类型主要有B型(PtRh30-PtRh6)热电偶、S型(PtRh10-Pt)热电偶、R型(PtRh13-Pt)热电偶、K型(NiCr-NiSi)热电偶以及非标准热电偶等^[6]。

表1 热电偶典型温度热电势与服务温度
Table 1 Typical thermoelectric potential and service temperature for various types of thermocouples

| 热电偶类型 | 100℃时电势/mV | 使用温度/℃ | |
|-------|------------|--------|------|
| | | 长期 | 短期 |
| B型 | 0.034 | 1600 | 1800 |
| S型 | 0.643 | 1300 | 1600 |
| R型 | 0.826 | 1300 | 1600 |
| K型 | 4.100 | 1000 | 1200 |

由表1可见,K型热电偶在同样典型温度下的热电势较大,故测量相对误差较小,且使用温度能够满足实际工程需要,加之该材料成本较低,因此本文设计的薄膜热电偶选用该材料进行制备。

2.2 薄膜热电偶基体材料选取

薄膜热电偶非常薄, 需要将薄膜沉积在特定基体材料上, 以保证热电偶的物理刚度。

考虑到薄膜热电偶的使用温度高达 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, 薄膜与基体材料需具有较好的相容性与结合力, 我们选用比较常见的耐高温陶瓷材料——高纯度 Al_2O_3 (纯度 99%) 作为基体, 该材料整体具有良好刚度特性和绝缘特性, 热膨胀系数小, 能够满足再入过程恶劣的工作环境要求, 另外, 其经济性能能够降低将来工程中的批量使用成本。

2.3 薄膜热电偶结构一体化设计

按照结构分类, 薄膜热电偶主要包括片式、针式、夹板式、直接镀在被测物表面等类型^[7-9]。本文选取针状薄膜热电偶进行结构设计, 该型热电偶能够与被测航天器表面进行有效贴合, 测温时间常数较小, 且结构强度和可靠性较高。

如图 1 所示, 针状热电偶结构分为基体头部和基体尾座 2 部分。在进行薄膜热电偶加工时, 首先将基体头部端面进行研磨抛光, 并在端面沉积覆盖 Al_2O_3 绝缘膜; 然后在其上制备热电偶薄膜, 并制作热电偶热结点; 最后, 在热电偶薄膜上沉积 Al_2O_3 绝缘膜, 防止热电偶薄膜因长时间受到摩擦、冲刷、撞击、腐蚀等而脱落或断裂, 为热电偶薄膜提供良好的电气绝缘和物理保护。

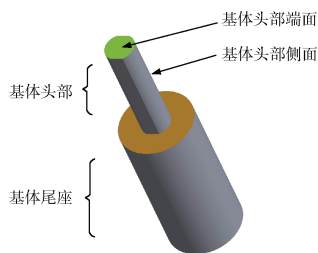


图 1 针型结构热电偶示意图
Fig. 1 Needle-type thermocouple

基体头部端面热电偶薄膜的制备分别选用 NiCr、NiSi 材料作为热电极正、负极, 采用射频磁控溅射技术, 在研磨抛光过的针型陶瓷基体头部端面左右半圆面制作 NiCr 薄膜和 NiSi 薄膜, 形成感温面, 如图 2 所示。薄膜面厚度约为 $2\text{ }\mu\text{m}$, 面积尽量大, 感温面等效于热电偶丝等温线布线。与此同时, 将 2 种热电偶电极材料薄膜进行小区域搭接, 形成 1 个热结点, 控制其直径在 0.2 mm 以下,

远小于感温面尺寸。该热结点是薄膜热电偶的感温点, 比热容远小于普通热电偶的。

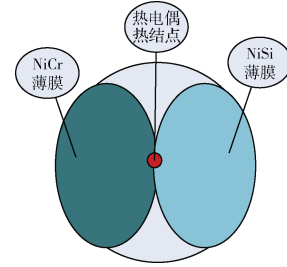


图 2 热电偶薄膜感温面示意图

Fig. 2 Film temperature sensing surface of thermocouple

在热电偶基体和薄膜制备完好的基础上, 热电偶 NiCr 薄膜和 NiSi 薄膜分别与 NiCr 导线和 NiSi 导线进行连接, 然后通过针型陶瓷基体的贯通圆孔与传感器引出导线进行熔焊连接, 最后引出薄膜热电偶传感器的 2 个输出端口, 结构如图 3 所示。实际使用时, 将引出导线通过冷端补偿点连接至测量仪器正负极测量端子, 测量得到热电偶输出的热电势, 并通过分度表换算得到热电偶所测温度值。

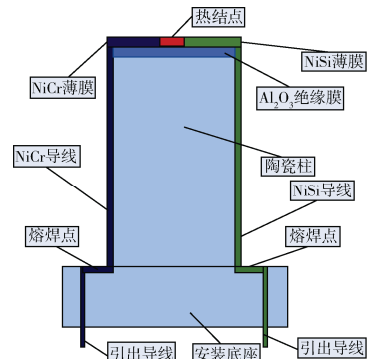


图 3 薄膜热电偶整体结构设计示意图

Fig. 3 The structure of the thin-film thermocouple

3 试验验证与结果分析

自行研发了由测控计算机、测量仪器、程控电源、红外灯阵、恒温场铜板及石墨毡等组成的热电偶性能测试系统, 对薄膜热电偶进行测试, 并以已标定的 K 型热电偶的温度测量值为实际值, 通过薄膜热电偶测量值与 K 型热电偶 (裸偶) 测量值的对比, 考核薄膜热电偶承受高温冲击的能力以及测温精度。

如图 4 所示, 热电偶测试时, 测控计算机通过对红外灯阵供电的程控电源 Agilent 5750 的闭环控制, 对大质量铜板前面进行加热, 并利用铜板优良的导热性能, 在铜板背面形成均匀恒温场。在铜板背面中心直径 200 mm 圆周上均匀安装 8 支 K 型热

电偶，铜板中间安装高温隔热石墨毡，石墨毡上面安装有用于压紧石墨毡的不锈钢板，压紧板中间开1个 $\phi 50\text{ mm}$ 的孔用于将2支K型薄膜热电偶的尾端引出，压紧板与安装螺钉之间用陶瓷隔热。2支薄膜热电偶穿过石墨毡与恒温铜板接触，安装于8支普通K型热电偶圆周中间，在同一恒温场中，温度具备一致性。通过测量仪器NI PIXe-4357板卡读取加热目标温度下薄膜热电偶和K型热电偶的热电势，并根据标定系数，换成得到薄膜热电偶的温度测量值和恒温场的温度测量值。其中NI PIXe-4357板卡设定测量频率100 Hz，测量通道数位分辨率为24位，能够满足系统快速测温要求。

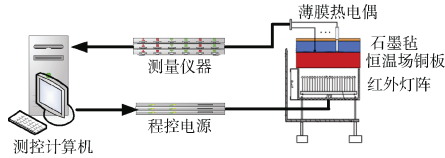


图4 薄膜热电偶性能测试系统

Fig. 4 Performance test system of thin-film thermocouple

8支K型热电偶编号为1#~8#；2支薄膜热电偶编号为9#、10#。为验证本文所研究的薄膜热电偶测温范围满足0~800℃的性能，以K型热电偶的测温结果为准，将铜板加热至850℃，超出的50℃作为余量，以验证薄膜热电偶的可靠性。试验后，测温点数据结果及其分析见图5~图8。

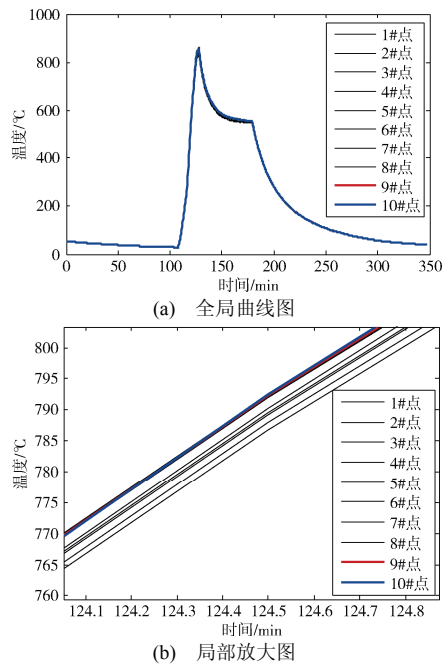


图5 K型热电偶与薄膜热电偶测量温度数据曲线
Fig. 5 Measured temperature data curve for K-type thermocouple and thin-film thermocouple

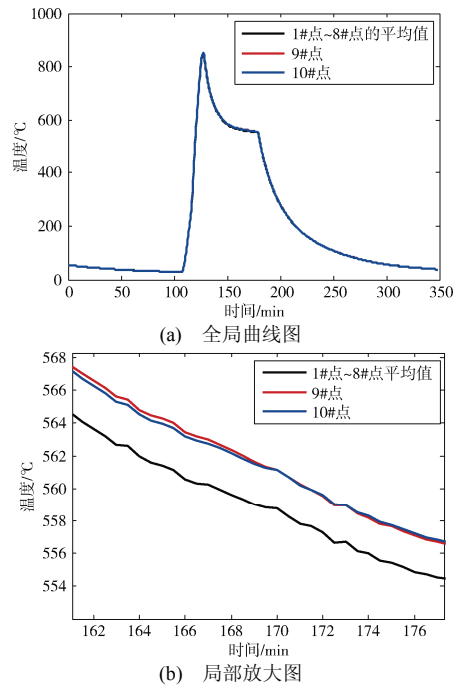


图6 铜板实际温度与薄膜热电偶温度对比曲线
Fig. 6 Temperature of the copper clappers and the thin-film thermocouple

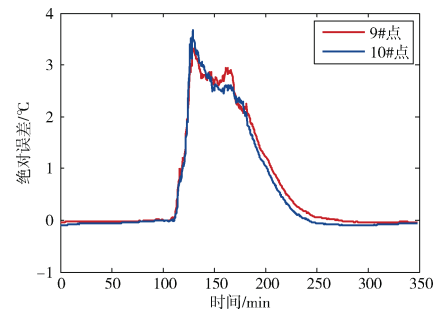


图7 薄膜热电偶温度测量绝对误差曲线
Fig. 7 Absolute measurement error of temperature for the thin-film thermocouple

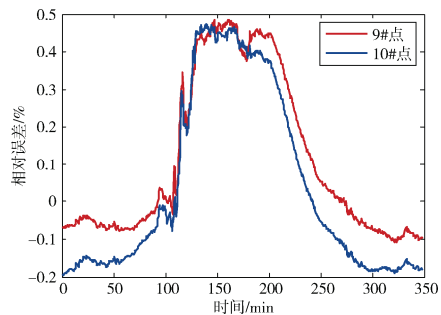


图8 薄膜热电偶温度测量相对误差曲线
Fig. 8 Relative measurement error of temperature for the thin-film thermocouple

从图5可知，升温过程中，所有测温点的温度均匀性在 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内，8支K型热电偶温度平均值可以反映铜板的温度值。2支薄膜热电偶之间的测量偏差小于 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，且薄膜热电偶响应快于K型热

电偶。图6为8支K型热电偶的平均值和薄膜热电偶的温度曲线。从图6可知,在107 min处,设备对铜板进行加热时,所有热电偶测量温度值均快速上升,并在127 min时达到850℃左右。其中,8支K型热电偶平均温度在20 min内从29.6℃升至850.1℃,平均升温速率41.2℃/min,最大升温速率为78.8℃/min。2支薄膜热电偶平均温度在20 min内从29.6℃升至853.2℃,平均升温速率41.2℃/min,最大升温速率为78.9℃/min。

为提高铜板温度测量的有效性和准确性,在数据分析时,将1#~8#热电偶所测温度的平均值作为铜板恒温场的实际值,并将9#、10#薄膜热电偶温度测量值与铜板实际值进行对比分析,得到图7、图8。其中图7中的绝对误差值为薄膜热电偶温度测量值与铜板实际温度的差值,图8中的相对误差为各个时刻薄膜热电偶的温度测量绝对误差与铜板实际温度值的比值。由图7、图8可知,薄膜热电偶能够及时对铜板温度进行跟踪,响应时间短。其中薄膜热电偶的测量温度最大绝对误差值为3.67℃,最大相对误差不超过±0.5%。

通过试验结果分析可知,薄膜热电偶尽管受基底材料漏热影响,但因其比热容小,快速升温过程中,其响应时间仍能快于普通K型热电偶(裸偶),而且相对误差小,能够满足800℃以上高温测量,最大测温误差在±4℃以内,能够满足后续试验使用要求。

4 结束语

本文针对高超声速飞行器以及天地往返飞行器等领域的器表高温瞬态测量的需求,研制了一种针型薄膜热电偶。该型热电偶选用耐高温陶瓷材料制作针型基体,并采用射频磁控溅射技术在基体顶端制备K型热电偶薄膜及其热结点,然后进行封装。利用热电偶性能测试系统对上述薄膜热电偶进行性能验证试验,结果表明该型热电偶能够实现对

最高800℃的温度测量,测量相对误差不超过±0.5%,且实时性较好,响应时间短,满足薄膜热电偶的设计指标,具备应用超高速飞行器在复杂环境下器表高温瞬态测量的条件。

参考文献 (References)

- [1] ZHANG S Y, MA Y H, ZHAO X J. The experimental study of heat-flux identification technology for hypersonic aerothermodynamics[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2013, 27(5): 33-37
- [2] 朱晓旭, 周修文. 温度传感器[J]. 电子测试, 2013(5): 44-45
ZHU X X, ZHOU X W. Temperature sensor[J]. Electronic Test, 2013(5): 44-45
- [3] MANOJ K S, DEWAL M L. Simulation of thin film thermocouple for high temperature measurement applicable to missiles[J]. Defence Science Journal, 2015, 65(5): 385-389
- [4] DOGHMANE M Y, LANZETTA F, GAVIGNET E. Dynamic characterization of a transient surface temperature sensor[J]. Procedia Engineering, 2015, 120: 1245-1248
- [5] ATHERTON J J, TOSAMOND M C, JOHNSTONE S. Thermal characterisation of μL volumes using a thin film thermocouple based sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 166(1): 34-39
- [6] 王健石, 朱炳林. 热电偶与热电阻技术手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 78-95
- [7] CHEN Y Z, JIANG H C, ZHAO W Y, et al. Fabrication and calibration of Pt-10%RH/Pt thin film thermocouples [J]. Measurement, 2014, 48: 248-251
- [8] CHEN Y Z, JIANG H C, ZHANG W L. Film thickness influences on the thermoelectric properties of NiCr/NiSi thin film thermocouples[J]. World Scientific, 2013, 27(14): 1350103-1-1350103-6
- [9] 杨遂军, 邬云晨明, 于方舟, 等. 基于电子印刷工艺的薄膜热电偶研制[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(1): 85-88
YANG S J, WUYUN C M, YU F Z, et al. Research and fabrication of thin film thermocouple based on electronic printing technology[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014, 33(1): 85-88

(编辑: 冯露漪)