

薄膜瞬态温度传感器的制备及性能研究*

崔云先,薛帅毅,周 通,李东明,牟 瑜

(大连交通大学机械工程学院 大连 116028)

摘要:针对普通温度传感器存在响应时间长、无法快速测量瞬态温度以及薄膜热电偶引线困难的技术难题,研制了一种响应速度快、测量精度高、引线方便的薄膜瞬态温度传感器。采用直流脉冲磁控溅射技术,在嵌入 NiCr-NiSi 平行电极丝的陶瓷基体端面依次沉积 NiSi 功能薄膜和 SiO₂ 绝缘保护薄膜。利用自行研制的静态标定系统对薄膜传感器的静态性能进行了研究,结果表明所研制传感器在 50~400℃ 范围内具有良好的线性和热稳定性,塞贝克系数为 41.2 μV/℃,非线性误差不超过 0.05%,改变 NiSi 薄膜的厚度对传感器的塞贝克系数影响很小。利用 ANSYS 有限元仿真和动态标定实验对薄膜传感器的动态性能进行了研究,结果表明所研制传感器的响应时间为 μs 级,时间常数随着 NiSi 热接点薄膜厚度的增加而增大,改变激光脉冲能量对传感器时间常数的影响很小。利用温度检定炉对薄膜传感器进行了测温试验研究,结果表明所研制传感器能够快速响应温度的变化,可为瞬态温度的测试提供有效的方法和技术途径。

关键词: 瞬态温度;薄膜传感器;响应时间;有限元分析

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

Fabrication and performance analysis of thin film transient temperature sensor

Cui Yunxian, Xue Shuaiyi, Zhou Tong, Li Dongming, Mu Yu

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

Abstract: In regard to the technical problems of ordinary temperature sensors with the inadequacy of long response time to rapidly measure transient temperature and the difficulty to lead wires for thin film thermocouple, a thin film transient temperature sensor is developed with quick response time, high measurement accuracy and convenient to lead wires. The DC pulsed magnetron sputtering technology is applied to deposit NiSi functional thin film and SiO₂ insulating thin film on the surface of ceramic substrate embedded with NiCr-NiSi parallel electrode wires. The static performance of developed sensor is studied by utilizing a self-developed static calibration system. Experimental results show that developed sensor has good linearity and thermal stability in the range of 50 to 400℃. The seebeck coefficient is 41.2 μV/℃ with a nonlinear error less than 0.05%, which remains stable with the change of NiSi film thickness. The dynamic performance of developed sensor is studied by using ANSYS finite element simulation and dynamic calibration experiments, which has a microsecond response time increased with the increasing of NiSi film thickness. In addition, the response time of developed sensor has little effect with the change of energy of laser pulse. The temperature test of thin film transient temperature is conducted through utilizing the temperature calibration furnace. The results show that the sensor can quickly respond to temperature changes and the developed sensor can provide effective methods and technical approaches for transient temperature test.

Keywords: transient temperature; thin film sensor; response time; finite element analysis

0 引 言

随着科学技术的不断进步,温度传感器的发展趋向于

高温、快速响应方面,尤其是测量瞬态温度的薄膜传感器具有重要实际应用价值^[1-2]。薄膜热电偶是一种基于热电效应的微型温度传感器,将两种薄膜材料沉积在绝缘基体上形成闭合回路,通过测量热端和冷端之间的热电势来获

得被测点的温度。薄膜传感器的热接点体积小、响应速度快,在瞬态温度测试领域中占有非常重要的地位^[3-4]。

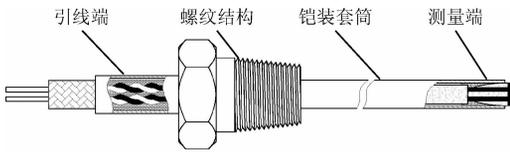
第 2 次世界大战期间,德国 Hackenann P^[5] 最先提出薄膜热电偶的概念,并成功制备出首批薄膜热电偶传感器;20 世纪 90 年代,美国 Lei J. F. 等人^[6] 将薄膜热电偶沉积在航空发动机的叶片上,并取得较好的实验结果;2007 年,美国 Choi H 等人^[7] 成功制备了一种独立传感单元可贴敷在发动机壁面进行温度测试的微型薄膜热电偶,在许多工程中获得实际应用;大连理工大学崔云先等人^[8-9] 针对瞬态切削温度的测量技术进行了研究,在刀头上制备了薄膜热电偶和绝缘保护层,在薄膜传感器的测温性能研究和模拟磨损实验中取得了满意的结果。

近年来,薄膜传感器在柴油机活塞表面和航天发动机壁面等瞬态温度测试中获得了实际的应用^[10-12]。本文利用直流脉冲磁控溅射技术在嵌入 NiCr-NiSi 平行电极丝的陶瓷基体端面依次沉积 NiSi 功能薄膜和 SiO₂ 绝缘保护薄膜,制备出一种可进行表面瞬态温度测试的薄膜传感器,并对其测温性能进行了研究。

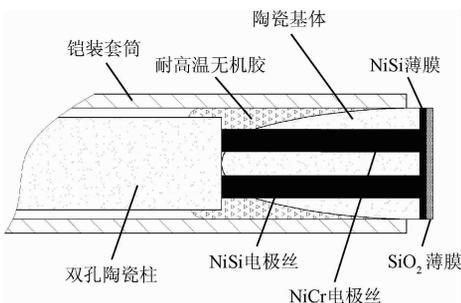
1 薄膜瞬态温度传感器的结构与制备

1.1 薄膜瞬态温度传感器的结构

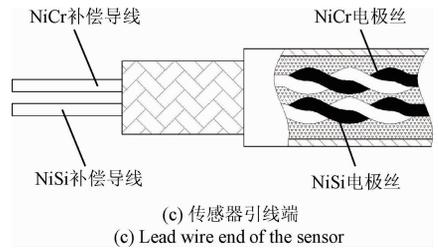
所研制的薄膜传感器由测量端、引线端、铠装套筒和螺纹结构组成,针对不同的测温环境,可调节铠装套筒外壁设置的螺纹结构,方便传感器的安装与测试,如图 1(a)所示。传感器的测量端包括嵌入 NiCr-NiSi 平行电极丝的陶瓷基体、NiSi 功能薄膜、SiO₂ 绝缘保护薄膜,其中陶瓷基体与铠装套筒之间采用耐高温无机胶灌封,如图 1(b)所示。NiCr-NiSi 补偿导线与 NiCr-NiSi 平行电极丝对应缠结,用耐高温无机胶将其封装在铠装套筒内,形成传感器的引线端,如图 1(c)所示。



(a) 传感器整体结构
(a) Overall structure of the sensor



(b) 传感器测量端
(b) Measuring end of the sensor



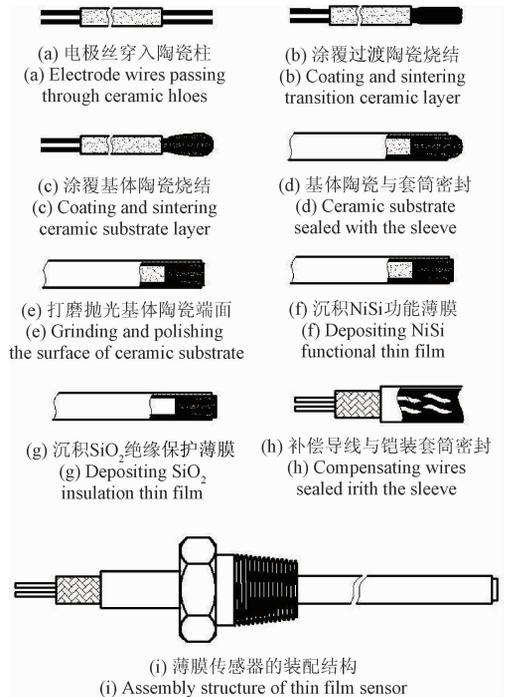
(c) 传感器引线端
(c) Lead wire end of the sensor

图 1 薄膜瞬态温度传感器的结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of thin film transient temperature sensor

1.2 薄膜瞬态温度传感器的制备

薄膜传感器的制备需要经历以下几个步骤,其工艺流程如图 2 所示。



(i) 薄膜传感器的装配结构
(i) Assembly structure of thin film sensor

图 2 薄膜瞬态温度传感器的制备流程
Fig. 2 Preparation process of thin film transient temperature sensor

1) 元件的表面处理。在超声波清洗机中,对 NiCr-NiSi 电极丝、双孔陶瓷柱和铠装套筒分别采用丙酮、酒精、蒸馏水依次清洗 25 min,用氮气吹干。

2) 陶瓷基体的制备。将已清洗过的 NiCr-NiSi 电极丝平行地穿入双孔陶瓷柱,形成平行电极。任取平行电极的一端,在其表面涂覆一层厚度为 0.2 ~ 0.3 mm 的过渡陶瓷层,将其固定于可编程真空烤瓷炉的载物台上高温烧结。在已烧结过渡陶瓷层的平行电极表面再次涂覆一层厚度为 2 ~ 3 mm 的基体陶瓷层,将其固定于烤瓷炉的载物台上高温烧结。NiCr-NiSi 平行电极丝、过渡陶瓷

和基体陶瓷高温烧结后共同形成陶瓷基体,陶瓷基体的烧结工艺参数如表1所示。

表1 陶瓷基体的烧结工艺参数

Table 1 Sintering process parameters of ceramic

参数	substrate	
	过渡陶瓷	基体陶瓷
干燥时间/s	120	300
预热时间/s	240	360
真空时间/s	30	90
烧成时间/s	60	120
冷却时间/s	180	180
设定真空/kPa	96	96
预热温度/°C	600	600
烧成温度/°C	930	940

3) 陶瓷基体的端面处理。将嵌入 NiCr-NiSi 平行电极丝的陶瓷基体穿入铠装套筒,用耐高温无机胶将陶瓷基体与铠装套筒接触的一端灌封,然后对陶瓷基体的测温端面进行研磨、抛光和清洗。用型号为 JSM-6360LV 的扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 观测 NiCr-NiSi 平行电极丝与陶瓷基体结合的表面形貌,如图3所示。从图3中看出,NiCr-NiSi 平行电极丝与陶瓷基体的结合状态良好,陶瓷基体表面致密均匀。

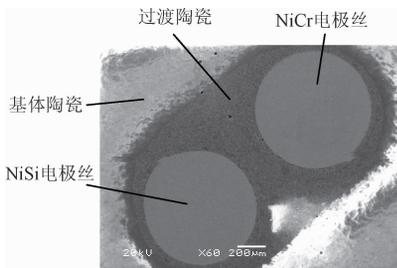


图3 陶瓷基体与平行电极丝结合的 SEM 图

Fig. 3 SEM diagram of ceramic substrate and parallel electrode wires

4) NiSi 功能薄膜的制备。常用的薄膜制备方法主要有离子镀、蒸发镀、气相反应法和溅射法等^[13]。采用直流脉冲磁控溅射技术在陶瓷基体的抛光端面沉积厚度为 400 nm 的 NiSi 功能薄膜。NiSi 功能薄膜与嵌入陶瓷基体的 NiCr 电极丝搭接形成热接点薄膜,NiSi 功能薄膜的沉积工艺参数如表2所示。

表2 NiSi 功能薄膜的沉积工艺参数

Table 2 Deposition parameters of NiSi functional thin film

极限真空度/Pa	工作压力/Pa	Ar 流量/sccm	偏压/V	电源功率/W	溅射时间/min
5.0×10^{-3}	0.6	20	-150	350	15

在 SEM 下观测 NiSi 功能薄膜的表面形貌,如图4所示。从图4中看出,NiSi 功能薄膜的表面形貌致密平整,没有明显的表面缺陷。

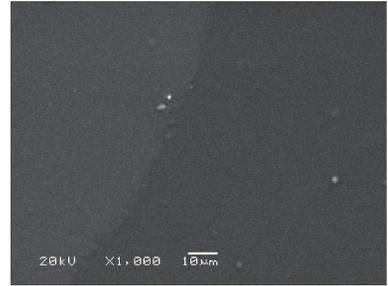


图4 NiSi 功能薄膜的 SEM 图

Fig. 4 SEM diagram of NiSi functional thin film

采用 X 射线光电子能谱 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) 对沉积的 NiSi 功能薄膜成分进行了分析,结果如图5所示。从图5中看出,薄膜成分由 Ni-Si 原子组成,其比例接近 8.9:1.1,同靶材成分的原子比例 9.0:1.0 接近。

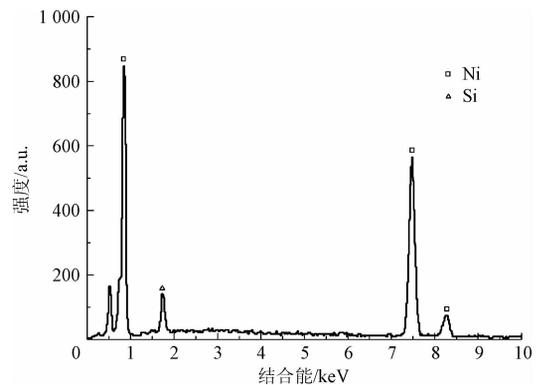


图5 NiSi 功能薄膜的 XPS 图谱

Fig. 5 XPS energy spectrum of NiSi functional thin film

5) SiO₂ 绝缘保护薄膜的制备。薄膜热电极在空气中长时间放置容易被氧化,在 NiSi 功能薄膜的表面沉积一层绝缘保护薄膜,可延长薄膜传感器的使用寿命。SiO₂ 薄膜材料具有良好的绝缘性和稳定性,因此选用 SiO₂ 作为 NiSi 功能薄膜的绝缘保护薄膜。在 NiSi 功能薄膜的表面沉积厚度为 800 nm 的 SiO₂ 薄膜,SiO₂ 薄膜的沉积工艺参数如表3所示。

表3 SiO₂ 绝缘保护薄膜的沉积工艺参数

Table 3 Deposition parameters of SiO₂ insulation thin film

极限真空度/Pa	工作压力/Pa	Ar 流量/sccm	O ₂ 流量/sccm	电源功率/W	溅射时间/min
5.0×10^{-3}	0.6	20	5	600	30

在 SEM 下观测 SiO₂ 薄膜的表面形貌,结果如图 6 所示。从图 6 中看出,SiO₂ 薄膜的表面致密平整。

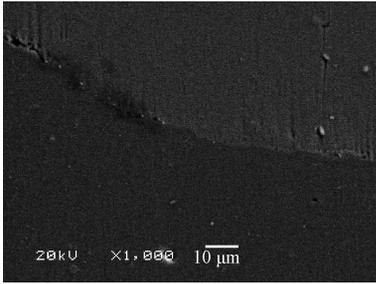


图 6 SiO₂ 绝缘保护薄膜的 SEM 图

Fig. 6 SEM diagram of SiO₂ insulation thin film

6) 补偿导线与铠装套筒的封装。NiCr-NiSi 补偿导线与 NiCr-NiSi 电极丝对应缠结,用耐高温无机胶将其灌封在铠装套筒内,在铠装套筒外壁设置位置可调的安装螺纹结构,方便在不同的环境中进行温度测试。

2 薄膜瞬态温度传感器的静态性能研究

薄膜传感器是非标准测温器件,为了能够准确测量瞬态温度的变化,在研制薄膜传感器的过程中,需要对其能否准确获取测量点温度的性能进行评价^[14]。本文利用自行研制的静态标定系统对薄膜传感器的温度特性进行了研究。

2.1 薄膜瞬态温度传感器的静态标定

薄膜传感器的静态标定系统包括温度计量炉、冰点恒温器、信号放大电路和数据采集装置,所研制薄膜传感器的静态标定系统框图如图 7 所示。

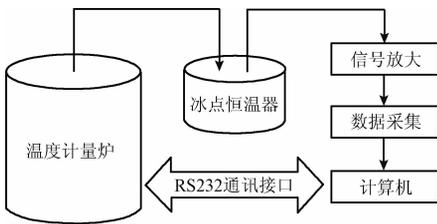


图 7 薄膜瞬态温度传感器的静态标定系统

Fig. 7 Schematic diagram of static calibration system for thin film transient temperature sensor

所研制的薄膜传感器针对 50 ~ 400℃ 的温度测试环境,选择 FLUKE 干式检定炉作为薄膜传感器的标定热源,为其提供 30 ~ 660℃ 范围的准确温度,在 50 ~ 400℃ 的温度范围内对薄膜传感器进行静态标定。将所研制薄膜传感器的测量端置于干式检定炉中,引线端置于 0℃ 的冰点恒温器中,设置干式检定炉控温系统的温升速率和保持时间,采用 LabVIEW 编写的自动标定系统记录全

部的温度标定数据。

静态标定温度从 50℃ 开始,每隔 50℃ 记录 1 次热电势值。当 NiSi 薄膜厚度为 0.42 μm 时,薄膜传感器的热电势 E 与测量端温度 θ 之间的关系如表 4 所示。

表 4 热电势 E 与测量端温度 θ 之间的关系

Table 4 Relationship between thermoelectric potential E and measuring end temperature θ

温度 $\theta/^\circ\text{C}$	50	100	150	200	250	300	350	400
热电势 E/mV	1.93	4.00	6.10	8.15	10.07	12.32	14.41	16.55

采用最小二乘法对标定数据点进行线性拟合,结果如图 8 所示薄膜传感器的输出热电势 E 与测量端温度 θ 之间的关系为 $E = 0.0417\theta - 0.1821$,塞贝克系数 S (即灵敏度)为 41.7 μV/℃。从图 8 中看出,所研制的薄膜传感器线性度好,在 50 ~ 400℃ 的温度范围内,非线性拟合误差为 0.023%。

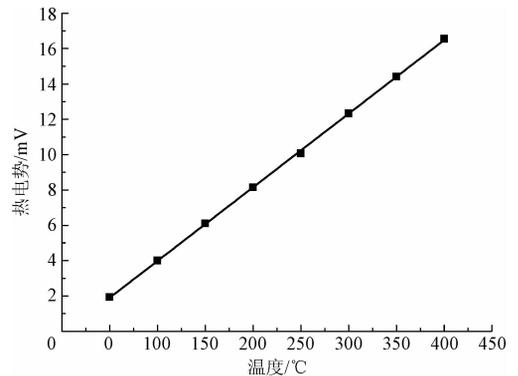


图 8 薄膜瞬态温度传感器的静态标定曲线

Fig. 8 Static calibration curve of thin film transient temperature sensor

2.2 NiSi 功能薄膜厚度不同时的静态性能研究

为了研究热接点薄膜厚度对传感器静态性能的影响,对 5 组不同 NiSi 薄膜厚度的传感器进行了静态标定实验。表 5 所示为各编号传感器的静态标定结果以及数据处理后的拟合方程、灵敏度和非线性误差。

表 5 不同 NiSi 薄膜厚度的静态性能参数

Table 5 Static performance parameters of different NiSi film thickness

编号	NiSi 薄膜厚度/ μm	线性拟合方程	灵敏度/ $(\mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	非线性误差/%
1	0.42	$E = 0.0417\theta - 0.1821$	41.7	0.023
2	0.61	$E = 0.0411\theta - 0.0875$	41.1	0.013
3	0.82	$E = 0.0409\theta - 0.1175$	40.9	0.049
4	1.01	$E = 0.0412\theta - 0.0764$	41.2	0.009
5	1.20	$E = 0.0411\theta - 0.0621$	41.1	0.014

NiSi 薄膜厚度与塞贝克系数的关系如图 9 所示。当 NiSi 薄膜厚度不同时,薄膜传感器的塞贝克系数稳定在 $41.2 \mu\text{V}/\text{C}$ 附近,与普通 K 型热电偶的塞贝克系数相近,随着 NiSi 薄膜厚度的增加,塞贝克系数并无明显的变化趋势。从图 9 中看出,NiSi 薄膜厚度的变化对薄膜传感器的静态性能影响很小。

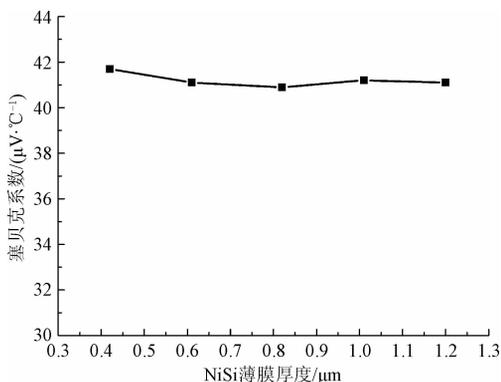


图 9 NiSi 薄膜厚度与塞贝克系数的关系

Fig. 9 Relationship between NiSi film thickness and Seebeck coefficients

3 薄膜瞬态温度传感器的动态性能研究

3.1 薄膜瞬态温度传感器的动态性能仿真研究

NiSi 功能薄膜与 SiO_2 绝缘保护薄膜依次沉积在陶瓷基体的测温端面上,薄膜的厚度远小于陶瓷基体的厚度,表面热量向陶瓷基体传导时衰减速度很快,可视为半无限大体的一维瞬态热传导过程,材料物性参数不因温度而变化,热传导模型如图 10 所示。

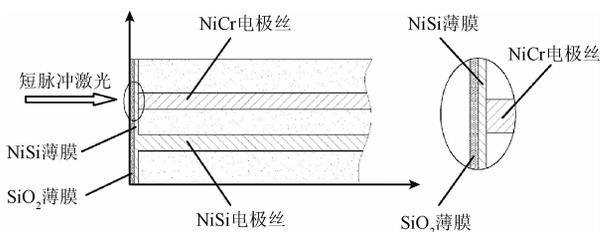


图 10 热传导过程的简化模型

Fig. 10 Simplified model of heat conduction process

针对所研制薄膜传感器的瞬态热传导过程,用 ANSYS Workbench 软件进行了有限元分析。网格单元类型为 SOLID70-8 节点六面体,网格生成总数为 74 403, NiSi 薄膜处网格生成总数为 10 022。有限元模型的网格生成结果如图 11 所示。

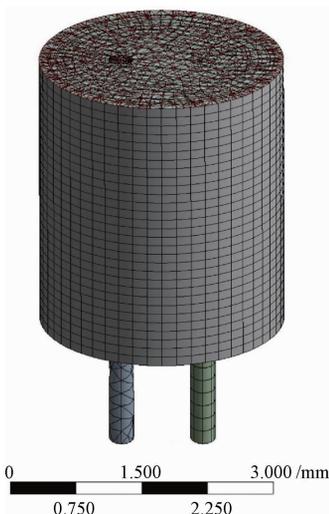


图 11 有限元模型的网格划分

Fig. 11 Mesh generation of finite element model

用时间常数 τ 表示薄膜传感器的动态性能指标,随着时间常数 τ 的增加,动态响应速度越慢,动态测量的误差也越大^[15]。所研制薄膜传感器的物性参数如表 6 所示。

表 6 薄膜瞬态温度传感器的物性参数

Table 6 Physical parameters of thin film transient temperature sensor

材料	热导率/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
SiO_2	1.0	966	2 100
NiSi	17.1	469	8 585
NiCr	12.2	455	8 732
陶瓷	23.0	780	3 800

薄膜传感器的热接点处所加载的脉冲激光半径为 0.20 mm ,脉冲宽度为 8 ns ,脉冲能量为 0.3 mJ 。由式(1)计算获得脉冲激光的热流密度。

$$q = 2(1 - R) \frac{P}{\pi\omega^2} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2}\right]$$

$$-\omega \leq r \leq \omega \quad (1)$$

光束某点与光束中心的距离为 r , $r^2 = x^2 + y^2$,激光功率为 p ,薄膜反射率为 R ,光束半径为 ω 。由式(2)计算获得脉冲激光能量。脉冲激光宽度为 t_h ,环境温度为 22C 。

$$Q = p \times t_h \quad (2)$$

为了研究 NiSi 薄膜厚度对传感器动态性能的影响,不改变 SiO_2 薄膜厚度的情况下,设置 5 组不同的 NiSi 薄膜厚度依次代入仿真模型进行计算,获得薄膜传感器的动态响应曲线,如图 12 所示。

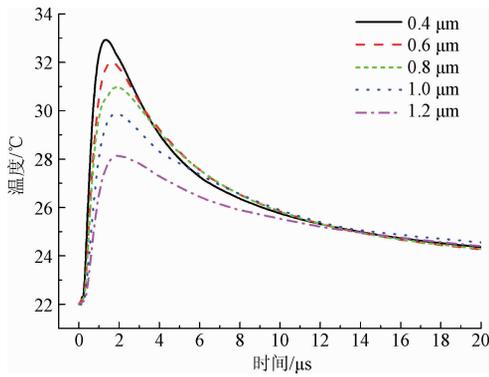


图 12 不同 NiSi 薄膜厚度的动态响应曲线
Fig. 12 Dynamic response curves of different NiSi film thickness

动态响应曲线的最高点向时间轴作垂线所得交点的坐标值为 t_1 ; 动态响应曲线最高点处的切线与时间轴所得交点的坐标值为 t_2 , t_1 与 t_2 的差值即为时间常数^[16], 表 7 所示为 5 组不同 NiSi 薄膜厚度的时间常数, 可以看出随着 NiSi 薄膜厚度的增加, 时间常数依次增大, 同时动态响应曲线的峰值依次降低。

表 7 不同 NiSi 薄膜厚度的时间常数

Table 7 Time constants of different NiSi film thickness

NiSi 薄膜厚度/ μm	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20
时间常数/ μs	7.26	8.62	10.99	12.57	15.14

为了研究脉冲激光能量对薄膜传感器动态性能的影响, 在 NiSi 薄膜厚度和 SiO_2 薄膜厚度均为 $0.8 \mu\text{m}$ 的情况下, 设置 5 组不同脉冲激光能量依次代入仿真模型进行计算, 获得薄膜传感器的动态响应曲线, 如图 13 所示。

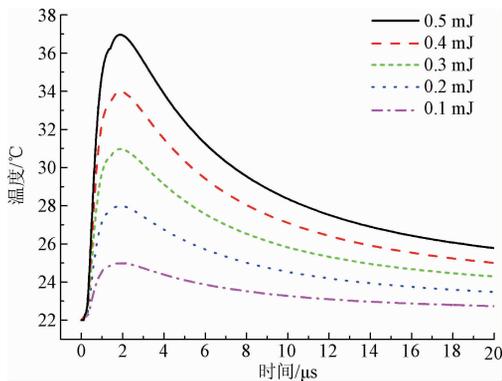


图 13 不同脉冲能量的动态响应曲线
Fig. 13 Dynamic response curves of different pulse energy

从图 13 可知, 不同脉冲能量下, 薄膜传感器的时间常数稳定在 $10.99 \mu\text{s}$ 附近, 脉冲能量的改变对传感器时间常数的影响很小。

3.2 薄膜瞬态温度传感器的动态标定实验研究

为了保证对瞬态温度测试的准确性, 需要对薄膜传感器的动态性能进行标定。所研制薄膜传感器的热接点是由 NiCr 电极丝与 NiSi 功能薄膜搭接形成的, 能够快速响应瞬态温度的变化。薄膜材料在脉冲激光的作用下可产生瞬态升温, 采用脉冲激光标定法对薄膜传感器的动态性能进行了研究, 动态标定系统框图如图 14 所示。

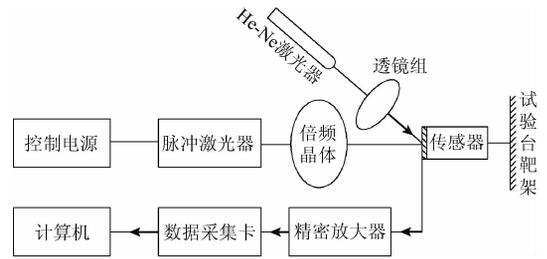


图 14 薄膜瞬态温度传感器的动态标定系统
Fig. 14 Schematic diagram of dynamic calibration system for thin film transient temperature sensor

采用脉冲宽度为 8 ns 的短脉冲激光器进行动态标定实验, 重复频率可调范围为 $1 \sim 20 \text{ Hz}$, 脉冲能量在 $0.1 \sim 0.5 \text{ mJ}$ 可调节。由动态性能的仿真结果可知, 脉冲能量的改变对薄膜传感器时间常数的影响很小, 设置 0.3 mJ 作为脉冲激光的能量值, 设置 1 Hz 作为脉冲激光的重复频率, 设置 100 kHz 作为 NI 采集卡的采样频率。测试结果表明, 当 NiSi 薄膜厚度为 $0.42 \mu\text{m}$ 时, 薄膜传感器的时间常数为 $36.5 \mu\text{s}$, 动态标定曲线如图 15 所示。

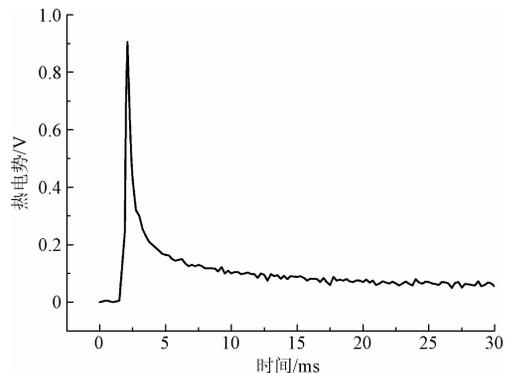


图 15 薄膜瞬态温度传感器动态标定曲线
Fig. 15 Dynamic calibration curve of thin film transient temperature sensor

在相同的测试条件下,对5组不同 NiSi 薄膜厚度的传感器进行动态标定,时间常数如表 8 所示。动态标定实验结果表明,随着 NiSi 薄膜厚度的增加,动态响应时间也越长。NiSi 薄膜厚度与动态响应时间的关系如图 16 所示。

表 8 不同 NiSi 薄膜厚度的时间常数

Table 8 Time constants of different NiSi film thickness

NiSi 薄膜厚度/ μm	0.42	0.61	0.82	1.01	1.20
时间常数/ μs	36.5	47.5	58.0	67.5	83.0

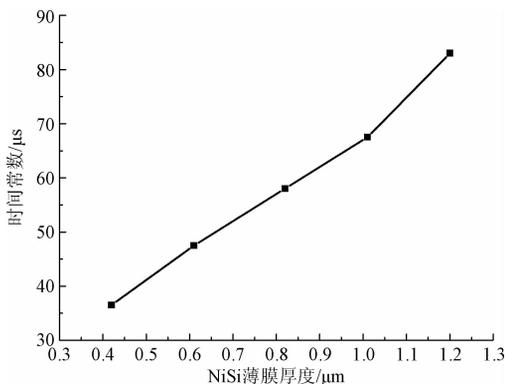


图 16 NiSi 薄膜厚度与时间常数关系

Fig. 16 Relationship between NiSi film thickness and time constants

由动态性能仿真分析和动态标定实验结果发现薄膜传感器的时间常数为 μs 级,随着 NiSi 热接点薄膜厚度的增加,传感器的动态响应时间也越长。有限元仿真结果和实测数据虽然存在一定的误差,但两者的变化规律一致。一方面,由于仿真过程中材料的属性选取为块状材料的物性参数,直流脉冲磁控溅射技术会使块状材料成分析及尺寸效应,造成薄膜传感器热电特性的差异。另一方面,动态标定过程中所使用的实验设备和测试环境造成的系统误差也会对实验结果产生一定的影响。

3.3 薄膜瞬态温度传感器的测温试验研究

为了验证薄膜传感器的实际使用性能,选择 FLUKE 干式检定炉作为传感器的测试热源,将所研制的薄膜传感器放置在 4 组不同的恒定温度场中,温度梯度为 100°C ,整个温度测试过程持续 2 min,薄膜传感器分别经历升温、稳定和降温 3 个阶段,结果如图 17 所示。从图 17 可以看出,薄膜传感器在室温至 400°C 范围内具有良好的热稳定性和耐高温性,测量精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

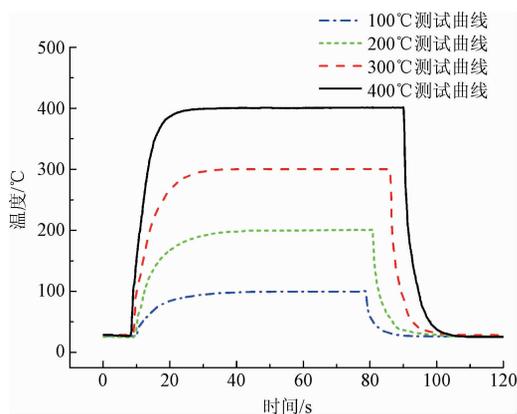


图 17 薄膜瞬态温度传感器的温度测试曲线

Fig. 17 Temperature test curves of thin film transient temperature sensor

4 结 论

研制了一种响应速度快、测量精度高、耐高温性能好的薄膜瞬态温度传感器。采用直流脉冲磁控溅射技术,在嵌入 NiCr-NiSi 平行电极丝的陶瓷基体测温端面依次沉积 NiSi 功能薄膜和 SiO_2 绝缘保护薄膜,并将其封装在设置有螺纹结构的铠装套筒内,方便在不同的环境中安装与测试。

对所研制薄膜传感器的静态性能进行了研究,在 $50 \sim 400^\circ\text{C}$ 的范围内具有良好的线性和热稳定性,塞贝克系数为 $41.2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$,与普通 K 型热电偶的塞贝克系数相近,非线性误差不超过 0.05%,NiSi 薄膜厚度的变化对薄膜传感器的塞贝克系数影响很小。

对所研制薄膜传感器的动态性能进行了研究,ANSYS 有限元仿真结果表明,薄膜传感器的时间常数随着 NiSi 薄膜厚度的增加而增大,激光脉冲能量对薄膜传感器的时间常数影响很小。动态性能仿真研究和动态标定实验结果表明,薄膜传感器的时间常数为 μs 级,随着 NiSi 薄膜厚度的增加,薄膜传感器的动态响应时间也越长。测温试验结果表明,所研制薄膜传感器具有良好的热稳定性和耐高温性,测量精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$,能够满足快速变化温度的测量要求。

参考文献

- [1] ADNANE L, WILLIAMS N, SILVA H, et al. High temperature setup for measurements of Seebeck coefficient and electrical resistivity of thin films using inductive heating [J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(10):105119.
- [2] AGARWAL S, SAHOO N, SINGH R K. Experimental techniques for thermal product determination of coaxial

- surface junction thermocouples during short duration transient measurements [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2016, 103(12):327-335.
- [3] 吴朋, 林涛. 基于 QGA-SVM 的铠装热电偶传感器辨识建模研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(2):343-349.
WU P, LIN T. Research on identification modeling of sheathed thermocouple sensor based on hybrid QGA-SVM [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(2):343-349.
- [4] DESIKAN S L N, SURESH K, SRINIVASAN K, et al. Fast response co-axial thermocouple for short duration impulse facilities [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 96(5):48-56.
- [5] 赵源深, 杨丽红. 薄膜热电偶温度传感器研究进展[J]. *传感器与微系统*, 2012, 31(2):1-3.
ZHAO Y SH, YANG L H. Research process of thin film thermocouple temperature sensor [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2012, 31(2):1-3.
- [6] LEI J F, WILL H A. Thin-film thermocouples and strain-gauge technologies for engine applications [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 1998, 65(2-3):187-193.
- [7] CHOI H, LI X CH. Fabrication and application of micro thin film thermocouples for transient temperature measurement in nanosecond pulsed laser micromachining of nickel [J]. *Sensors and Actuators*, 2007, 136(1):118-124.
- [8] 崔云先. 瞬态切削用 NiCr/NiSi 薄膜热电偶测温刀具研究[D]. 大连:大连理工大学, 2011.
CUI Y X. Development of testing temperature cutter with NiCr/NiSi thin film thermocouple for transient cutting [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [9] 崔云先, 赵家慧, 刘友, 等. 内燃机活塞表面瞬态温度传感器的研制[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(9):1142-1147.
CUI Y X, ZHAO J H, LIU Y, et al. Development of transient surface temperature sensor on internal combustion piston [J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(9):1142-1147.
- [10] 孙怀远, 宋来全, 杨丽英, 等. 热电偶温度检测系统设计与应用[J]. *电子测量技术*, 2014, 37(12):86-89.
SUN H Y, SONG L Q, YANG L Y, et al. Application and design of thermocouple temperature detection system [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2014, 37(12):86-89.
- [11] SONKER M K, DEWAL M L. Simulation of thin film thermocouple for high temperature measurement applicable to missiles [J]. *Defence Science Journal*, 2015, 65(5):385-389.
- [12] SATISH T N, RAKESH K P, UMA G, et al. Functional validation of K-Type (NiCr-NiMn) thin film thermocouple on low pressure turbine nozzle guide vane (LPT NGV) of gas turbine engine [J]. *Experimental Techniques*, 2016, 41(2):1-8.
- [13] 崔云先, 张子超, 丁万昱, 等. NiCr 高温薄膜电阻应变计制备及耐高温性能研究[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(7):1548-1555.
CUI Y X, ZHANG Z CH, DING W Y, et al. Study on fabrication of Ni Cr films based high temperature resistance strain gauge and its high temperature performance [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(7):1548-1555.
- [14] 宋川川, 李永新. 铜-康铜热电偶热镀锡膜焊及其性能对比研究[J]. *电子测量技术*, 2014, 37(4):15-18.
SONG CH CH, LI Y X. Hot tinning welding method of copper-constantan thermocouples and performance research by comparison [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2014, 37(4):15-18.
- [15] 徐立新, 谢建斌, 杨智伟, 等. 微细热电偶的制作与时间常数标定方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(7):1023-1028.
XU L X, XIE J B, YANG ZH W, et al. Preparation of micro thermocouple and calibration method of time constant [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(7):1023-1028.
- [16] 祁漫宇, 丁炯, 杨遂军, 等. 薄膜热电偶温度传感器动态标定的仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2016, 33(6):325-330.
QI M Y, JING J, YANG S J, et al. Simulation research on thin-film thermocouple temperature sensor dynamic character calibration [J]. *Computer Simulation*, 2016, 33(6):325-330.

作者简介



崔云先(通讯作者), 2011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 (Corresponding author) received her Ph. D. degree from Dalian University of Technology in 2011. Now she is a professor in Mechanical Engineering College in Dalian Jiaotong University. Her main research interests include sensing and controlling technology, advanced manufacturing technology.



薛帅毅, 2015年于大连交通大学获得学士学位, 现为大连交通大学研究生, 主要研究方向为传感与测控技术。

E-mail: xue_sy2018@126.com

Xue Shuaiyi received his B. Sc. degree from Dalian Jiaotong University in 2015. Now he is a M. Sc. candidate in Dalian Jiaotong University. His main research interest is sensing and controlling technology.