

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2017.02.08

薄膜热电偶热电特性分析与试验

张轩铭, 王毅, 常蕾

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 薄膜热电偶具有体积小、操作简便、准确度高等优点, 在精确测温领域显出了极大优势。采用磁控溅射法生产的热电偶在材料组合上几乎是无限的。本文对 NiCr/NiSi 薄膜热电偶、NiCrSi/NiSiMg 薄膜热电偶静态下的重复性、使用寿命、温度上限等进行对比、分析, 以便在使用中可以更好地“因地制宜”。与大连某高校制作的薄膜热电偶进行对比试验, 验证制作工艺对薄膜热电偶性能的重要影响。薄膜热电偶作为一种新型热电偶, 在发动机叶片等特殊部件表面测温领域具有广泛的应用前景。

关键词: 薄膜热电偶; 材料; 工艺; 表面测温

中图分类号: TB942

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2017)02-0032-05

Thermo-electric Property Analysis and Experiment of Thin-film Thermocouple

ZHANG Xuanming, WANG Yi, CHANG Lei

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Thin-film thermocouples have advantages of small volume, simplicity of operation, high accuracy, etc. In some special cases for accurate temperature measurement, they show the great advantage. By means of magnetron sputtering method in the production of thermocouples, the material composition possibilities are almost unlimited. In this article, the NiCr/NiSi thin-film thermocouple is compared to the NiCrSi/NiSiMg thin-film thermocouple in terms of static repeatability, service life and temperature limit, in order to better adjust measures to local conditions. And a compare test was done with a thin-film thermocouple produced by a university in Dalian, verifying the important role of the process on the properties of thin-film thermocouples. Thin-film thermocouples as a new type of thermocouples have a wide application prospect for surface temperature measurement of engine blades and other special parts.

Key words: thin-film thermocouple; material; process; surface temperature measurement

0 引言

在薄膜热电偶研制初期, 采用磁控溅射的方法镀制膜层, 敏感层与基体之间的绝缘问题是制作过程中遇到的最大阻碍。为解决绝缘问题, 选用在陶瓷基体上镀制薄膜层。通过与大连某高校制作的薄膜热电偶进行对比试验, 发现薄膜热电偶的制作工艺尤为重要, 通过改变工艺反复制作、试验、分析, 找到较为合理有效的制作工艺, 制作出了 K 型与 N 型薄膜热电偶, 对其进行热电特性校准试验, 并对试验结果进行分析。结果表明: 制作的薄膜热电偶的重复性、稳定性基本上达到了使用要求。

1 薄膜热电偶结构

本文提到的 K 型与 N 型薄膜热电偶是以陶瓷为基底, 采用磁控溅射的方法分别以 NiCr/NiSi (K 型) 与 NiCrSi/NiSiMg (N 型) 为正负两级镀制在基底上, 在一端形成节点。薄膜热电偶见图 1~2。

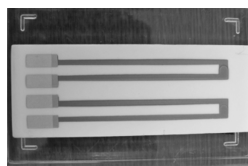


图 1 K 型薄膜热电偶

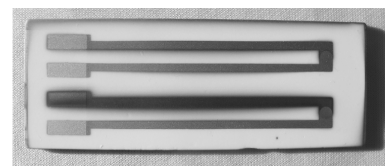


图 2 N 型薄膜热电偶

K 型薄膜热电偶在试制阶段, 选择耐高温绝缘性好的陶瓷热电偶做基底, 在陶瓷热电偶表面镀 NiCr-NiSi 薄膜层, 膜层厚度 $1\ \mu\text{m}$; 在敏感层表面镀制 $1\ \mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 做保护层。热电偶结构见图 3。N 型薄膜热电偶同理, 在陶瓷热电偶表面镀 NiCrSi-NiSiMg 薄膜层, 膜

收稿日期: 2016-01-18

作者简介: 张轩铭(1990-), 男, 助理工程师, 主要从事特种环境下温度领域的测试校准技术研究。

层厚度 1 μm，在敏感层表面镀制 1 μm 的 Al₂O₃ 做为保护层，热电偶结构见图 4。试验原理见图 5。

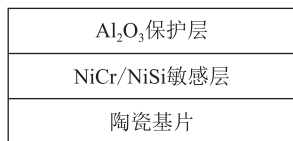


图 3 K 型热电偶结构



图 4 N 型热电偶结构

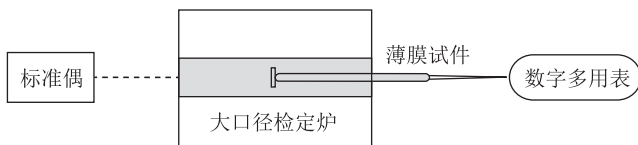


图 5 实验原理

2 薄膜热电偶制作工艺

在制作过程中通过改变工艺，制作出一套较好的试件，并与大连某高校制作的同样材质薄膜热电偶进行对比试验。试验结果见表 1，自研的薄膜热电偶更为优秀。

表 1 与大连某高校薄膜热电偶对比试验结果 °C

温度	温差	
	自研薄膜热电偶	大连薄膜热电偶
300	-0.04	58.4
400	0.82	57.1
500	0.64	66.2

3 薄膜热电偶热电特性试验原理

3.1 NiCr-NiSi (K 型) 薄膜热电偶温度标定

采用直径为 0.3 mm 的丝式标准 K 型热电偶作为参考热电偶进行热电特性试验，利用数字电压表对信号进行采集，输出信号为电压信号，参照《热电偶分度表》用差值法将电压信号计算为温度。在对电压信号进行处理之前，需要对薄膜热电偶 SeeBack^[1] 数进行评定，确定其是否适用分度表进行计算。对 K 型热电偶，其标准 SeeBack 约为 0.0425 mV/°C，SeeBack 校准结果为 5 次试验取每 50°C 计算的 SeeBack 系数的平均值，结果见表 2。由表 2 可认为其温度的处理适用分度表。

对图 1 所示薄膜热电偶采用破坏式标定，热电偶在控温 980°C 后输出数据较为混乱并在控温 1100°C 后输出为无穷大，薄膜表层颜色变成绿色，电极间绝缘电阻为无穷大，说明薄膜热电偶已经被破坏。

表 2 K 型薄膜热 SeeBack 系数结果

温度/°C	SeeBack 系数	
	1#	2#
300~350	0.0411	0.0410
350~400	0.0416	0.0415
400~450	0.0415	0.0415
450~500	0.0426	0.0426
500~550	0.0425	0.0427
550~600	0.0426	0.0426
600~650	0.0422	0.0423
650~700	0.0418	0.0418
700~750	0.0413	0.0414
750~800	0.0411	0.0411
800~850	0.0403	0.0405
850~900	0.0399	0.0398
900~950	0.0426	0.0426

3.1.1 NiCr-NiSi (K 型) 薄膜热电偶稳定性试验

对薄膜热电偶进行稳定性标定试验，检定炉控制温度 300~950°C，每 50°C 作为温度间隔，每个温度点以采样间隔 0.5 s 记录 300 组试验数据，对其进行试验结果稳定性计算，用离散系数^[2] 作为衡量其稳定性的标准，薄膜热电偶测温稳定性良好。试验结果见表 3。

表 3 K 型薄膜热电偶稳定性结果

温度/°C	离散系数	
	1#	2#
300	0.22%	0.24%
350	0.23%	0.26%
400	0.34%	0.39%
450	0.27%	0.20%
500	0.33%	0.24%
550	0.24%	0.20%
600	0.14%	0.15%
650	0.28%	0.28%
700	0.09%	0.10%
750	0.08%	0.08%
800	0.07%	0.07%
850	0.06%	0.05%
900	0.06%	0.07%
950	0.02%	0.01%

在计算其离散系数时采用标准偏差/平均值的方式。

3.1.2 NiCr-NiSi (K 型) 薄膜热电偶重复性试验

为保护热电偶不在高温时出现损坏，在对薄膜热电偶进行重复性标定试验时，分别在两个温度范围内进行试验。在检定炉控制温度 300~550°C 时，每 50°C 升温重复试验 5 次；在检定炉控制温度为 600~850°C 时，每 50°C 升温重复试验 3 次。用贝塞尔公式^[3] 对试

验结果标准值与被校准温差的标准偏差进行计算,用测温偏差的标准偏差作为衡量其重复性的方法。校准结果重复试验结果见图6~9;重复性结果见表4~5。

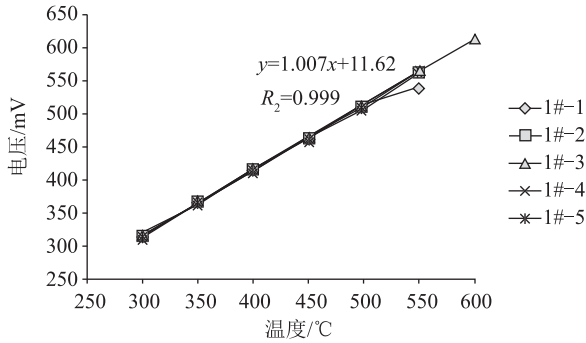


图6 K型薄膜热电偶1#温度曲线(300~550°C)

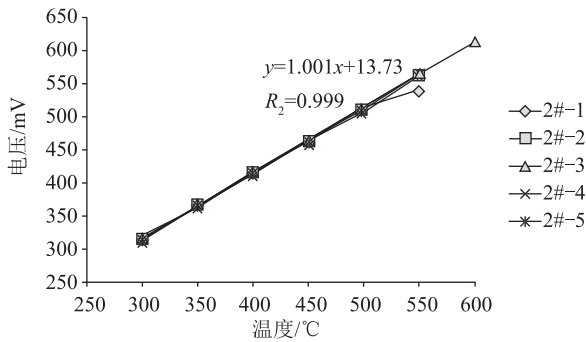


图7 K型薄膜热电偶2#温度曲线(300~550°C)

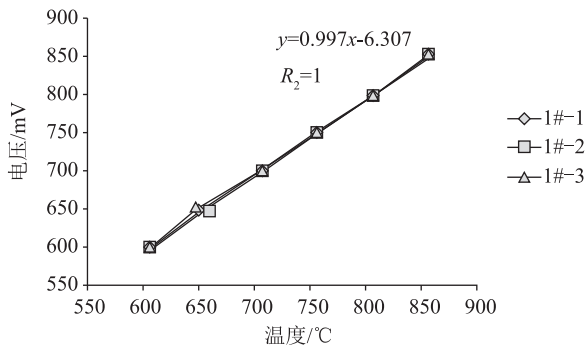


图8 K型薄膜热电偶1#温度曲线(600~850°C)

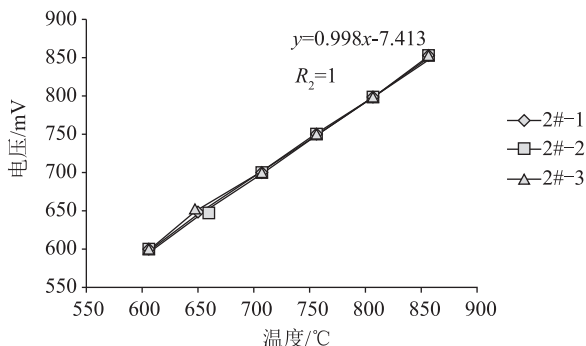


图9 K型薄膜热电偶2#温度曲线(600~850°C)

表4 K型薄膜热电偶重复性结果(300~550°C)

温度/°C	标准偏差	
	1#	2#
300	1.953	1.267
350	0.693	0.332
400	0.197	0.153
450	0.418	0.467
500	1.223	0.833
550	2.693	1.183

表5 K型薄膜热电偶重复性结果(600~850°C)

温度/°C	标准偏差	
	1#	2#
600	0.053	0.000
650	0.030	0.000
700	0.003	0.030
750	0.213	0.163
800	0.030	0.000
850	0.083	0.013

用贝赛尔公式计算实验标准偏差。

由试验结果可以得出如下结论:

1) K型薄膜热电偶的离散系数小,在900°C以下稳定性好。

2) 由于在高温下没有信号输出,故使用温度范围在900°C以下,且试验结果标准值与被校准温差的标准偏差小,重复性好。

3) 曲线中R为相关系数,曲线图6~9中趋势线进行拟合处理,由R²值可以看出线性关系密切。

4) 线性关系结合K型薄膜热电偶SeeBack系数结果,可以直接体现薄膜热电偶满足利用SeeBack系数对温度计算的要求。

3.2 NiCrSi-NiSiMg(N型)薄膜热电偶温度标定

N型热电偶在900°C高温下抗氧化性能良好,但800°C后热电偶膜层测温无数据输出。在薄膜热电偶试制阶段,选择耐高温绝缘性好的陶瓷热电偶做基底,在陶瓷热电偶表面镀NiCrSi-NiSiMg薄膜层,膜层厚度1 μm;在敏感层表面镀制1 μm的Al₂O₃做保护层;利用数字电压表对信号进行采集,输出信号为电压信号;参照《热电偶分度表》用差值法将电压信号计算为温度。在对电压信号进行处理之前,需要对薄膜热电偶SeeBack数进行评定,确定其是否适用分度表进行计算。对N型热电偶,其标准SeeBack约为0.0390 mV/°C,SeeBack校准结果为3次试验取每升温50°C计算的SeeBack系数的平均值,结果见表6。可认

为在 700℃ 以下，其温度的处理适用分度表。

表 6 N 型薄膜热 SeeBack 系数结果

温度/℃	SeeBack 系数	
	1#	2#
400~450	0.035	0.035
450~500	0.038	0.038
500~550	0.037	0.037
550~600	0.039	0.039
600~650	0.039	0.039
650~700	0.044	0.044
700~750	0.054	0.051
750~800	0.058	0.055

3.2.1 NiCrSi-NiSiMg(N 型)薄膜热电偶稳定性试验

对薄膜热电偶进行稳定性标定试验，在 N 型薄膜热电偶结点的背部位置焊接 0.5 mm 的 N 型热电偶丝，将热电偶固定在检定炉核心区位置，用数字多用表采集信号。每个温度点以采样间隔 0.5 s 记录 300 组试验数据，对其试验结果稳定性进行计算，用离散系数作为衡量其稳定性的标准，薄膜热电偶测温稳定性能良好。试验结果见表 7。

表 7 N 型薄膜热电偶稳定性结果

温度/℃	离散系数	
	1#	2#
400	0.003%	0.005%
450	0.002%	0.004%
500	0.003%	0.004%
550	0.005%	0.005%
600	0.004%	0.003%
650	0.003%	0.003%
700	0.004%	0.004%
750	0.007%	0.006%
800	0.010%	0.007%

3.2.2 NiCrSi-NiSiMg(N 型)薄膜热电偶重复性试验

对薄膜热电偶进行重复性标定试验，在 N 型薄膜热电偶结点的背部位置焊接 0.5 mm 的 N 型热电偶丝，将热电偶固定在检定炉核心区位置，用数字多用表采集信号。检定炉控制温度 400~800℃，每升温 50℃ 重复试验 3 次，用贝塞尔公式对 5 次试验结果标准值与被校准温差的标准偏差进行计算，用测温偏差的标准偏差作为衡量其重复性的方法。试验结果温度曲线见图 10、图 11；重复性结果见表 8。

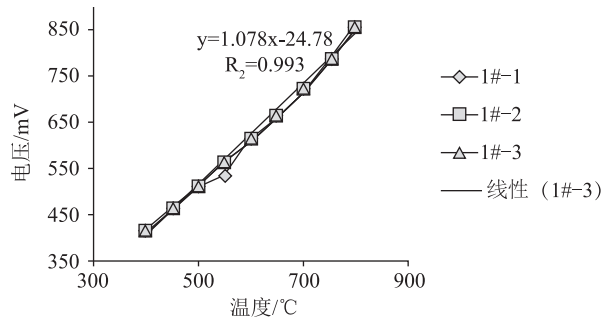


图 10 N 型薄膜热电偶 1#温度曲线

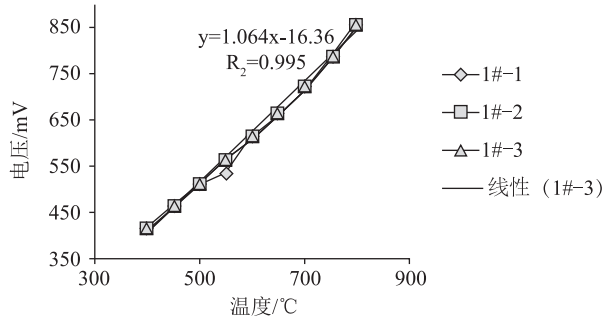


图 11 N 型薄膜热电偶 2#温度曲线

表 8 N 型薄膜热电偶重复性结果

温度/℃	标准偏差	
	1#	2#
400	1.453	1.083
450	0.543	0.663
500	0.090	0.493
550	0.570	1.890
600	0.333	0.563
650	2.613	0.120
700	0.000	0.000
750	0.000	0.000
800	0.000	0.000

由以上试验结果可以得出以下结论：

- 1) N 型薄膜热电偶的离散系数小，在 800℃ 以下稳定性好。
- 2) 相比于 K 型薄膜热电偶，其使用温度上限略显不足。
- 3) 曲线中 R 理解为相关系数，直观反应两个变量间是否存在相关关系及这种相关性的程度，由曲线图 10 中趋势线进行拟合处理 $y = 1.078x - 24.78$ ， $R^2 = 0.993$ ，曲线图 11 中趋势线进行拟合处理 $y = 1.064x - 16.36$ ， $R^2 = 0.995$ 可以看出线性关系密切。
- 4) 线性关系结合 N 型薄膜热电偶 SeeBack 系数结果，可以直接体现薄膜热电偶满足利用 SeeBack 系数

对温度计算的要求。

4 结论

薄膜热电偶具有体积小、精度高等特点，根据不同使用温度，选取不同材质薄膜热电偶可以体现出更好的效果。通过对不同材质制作的薄膜热电偶性能的分析，得到以下结论：

1)在 950℃ 以下，NiCr/NiSi 薄膜热电偶优势较为明显，无论是稳定性，还是重复性，SeeBack 系数的线性上，都优于 N 型薄膜热电偶，在后续制作、应用中优先选择 NiCr/NiSi 薄膜热电偶。

2)K 型薄膜热电偶，使用温度上限更高，在高温环境下抗氧化能力更强，改变其膜层厚度可以使其应用在更多的环境中。

3)通过对两种薄膜热电偶稳定性、重复性的分析比较，可以认为在特定温度下可以替代常规热电偶对

静态温度进行测量。同时，其体积小特点可以在稳定流场的动态环境下、空间狭小无法用常规热电偶进行布点等特殊情况下完成常规热电偶完成不了的测温任务，例如发动机叶片表面温度的测量等。

4)在薄膜热电偶的生产、使用过程中，还需对其生产工艺进一步研究，对其使用环境、条件进一步验证。

参 考 文 献

- [1] Wrbanek J D, Gustave C. A multilayered thin film insulator for harsh environments[R]. National Aeronautics and Space Administration, 2002.
- [2] 朱亚民. NiCr_NiSi 薄膜热电偶传感器的研制及有限元模拟[J]. 仪表技术与传感器, 2008(9): 15-17.
- [3] 叶方伟. 薄膜热电偶的发展及其应用[J]. 材料导报, 1995(5): 28-32.
- [4] 黄吕权, 李付国. 薄膜热电偶的技术特性研究[J]. 中国机械工程, 1996(5): 34-36.



(上接第 18 页)

温 25℃，马赫数为 1.6 的条件下，总压系数由总压 101325 Pa 下的 -0.355 提升到了 0.5 MPa 下的 -0.268，提升了 24%。总体来说，总压系数的绝对值随着温度和压力的升高而减小。

在总压为 101325 Pa，总温为 25℃ 的条件下，总压系数由马赫数为 0.8 下的 -0.132 降低到了 2.0 下的 -0.358，压力探针总压系数在亚音速条件下绝对值更接近 1。总压系数的绝对值随着马赫数的升高而增大。

5 结论

本次研究针对倒角总压探针，在超音速条件下对其校准特性进行了数值模拟研究工作，成功摸索了一套在超音速条件下对总压探针校准的数值模拟方法，并对影响校准特性的关键影响量进行了分析，得到了总压系数随着位置、压力、总温、马赫数几个关键参数的变化规律。与实验结果做对比验证，数值模拟与实

验结果对比较为接近。研究表明：①安装位置的选择对倒角总压探针总压系数影响较大，越往试验段前面安装，总压系数绝对值越小；②倒角总压探针总压系数的绝对值随着温度和压力的升高而减小，随着马赫数的升高而增大。

参 考 文 献

- [1] 何中伟, Dr. SislianJP, DechambaultRL. 新型高超音速静压探针的设计和实验[J]. 推进技术, 1992, 13(6): 53-60.
- [2] 沈天荣, 刘海涌, 刘松龄, 等. 风洞七孔压力探针的校准技术[J]. 风机技术, 2006(4): 15-19.
- [3] 马宏伟, 蒋浩康. 速度梯度、近壁效应和 Re 数对压力探针测量误差的影响[J]. 航空动力学报, 1995, 10(4): 337-342.
- [4] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A new k-ε eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows [J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [5] 赵飞, 张延玲, 朱荣, 等. 超音速射流流场中湍流模型[J]. 工程科学学报, 2014(3): 366-372.
- [6] 赵彬, 赵俭. 超音速条件下 K 型温度传感器恢复特性数值模拟[J]. 计测技术, 2016, 36(5): 1-4.