

K 型同轴热电偶制备工艺对热乘积系数的影响研究

林柯澄¹ 孔德仁¹ 陈 华² 徐春冬¹

(1. 南京理工大学机械工程学院 南京 210094; 2. 96901 部队 24 分队 北京 100080)

摘 要: 同轴热电偶凭借其出色的抗冲刷能力及在复杂恶劣环境中的测量能力,在爆炸场热流测量领域有巨大的应用前景。热乘积系数是同轴热电偶测量精度的重要参数之一,其值会随传感器材料的性质、类型以及制备过程中工艺差异而改变。因此,需要对制备的传感器进行热乘积系数的标定。K 型同轴热电偶的表面结点主要通过刀片划痕、金刚石磨棒和砂纸形成,不同结点形成方式对热乘积系数存在影响。目前,尚无从 200 目到 800 目之间的不同目数的砂纸对其影响的研究,通过对不同目数砂纸、刀片单向划痕和金刚石磨棒单向研磨制备的传感器的热乘积系数进行实验,研究其影响规律。实验结果表明,单向划痕和研磨的同轴热电偶的热乘积系数会更接近该方向上材料的热乘积系数值,而砂纸打磨制备的传感器随着砂纸目数的增加,其数值也会随之增大,200 目相较于 800 目制备的传感器热乘积系数低约 20%。同时通过数值模拟研究了横向传热会造成热结点存在过热情况,通过加装不锈钢衬套来降低其影响,表明有无衬套会相差约 1%~2%,为 K 型同轴热电偶传感器的结构优化提供理论基础。

关键词: K 型同轴热电偶; 表面结点; 横向传热; 热乘积系数; 标定

中图分类号: TN05 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410

Study on the influence of K-type axial thermoelectric couple fabrication process on thermal conductance coefficient

Lin Kecheng¹ Kong Deren¹ Chen Hua² Xu Chundong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. 24th Squadron, Unit 96901 of PLA, Beijing 100080, China)

Abstract: The coaxial thermocouple has a great application prospect in the field of heat flow measurement in explosion field because of its excellent anti-erosion performance and measuring ability in complex and harsh environment. The thermal product coefficient is one of the important parameters of the measurement accuracy of coaxial thermocouple, and its value will change with the nature and type of sensor material and the process difference in the preparation process. Therefore, it is necessary to calibrate the thermal product coefficient of the prepared sensor. At present, the surface joint of K-type coaxial thermocouple is mainly formed by blade scratches, diamond grinding rod and different mesh sandpaper, and different joint formation methods have an effect on the thermal product coefficient. At present, there is no research on the influence of sandpaper with different mesh numbers from 200 mesh to 800 mesh. The thermal product coefficient of the sensor prepared by sandpaper with different mesh numbers, single blade scratch and single diamond grinding rod was tested to study its influence rule. The experimental results show that the thermal product coefficient of the coaxial thermocouple with unidirectional scratch and grinding is closer to the value of the thermal product coefficient of the material in this direction, and the value of the sensor prepared by sandpaper will increase with the increase of the number of sand paper mesh, and the thermal product coefficient of the sensor prepared by 200 mesh is about 20% lower than that prepared by 800 mesh. At the same time, through numerical simulation, the transverse heat transfer will cause overheating of hot joints, and the influence is reduced by installing stainless steel bushing. The experimental results show that the difference between the presence and absence of bushing is about 1%~2%. The conclusion of this study can provide theoretical basis for the structural optimization of K-type axial thermocouple sensors.

Keywords: type K coaxial thermocouple; surface junction; transverse heat transfer; thermal product coefficient; calibration

0 引言

各种新型高能战斗部快速的更新与发展,其产生的热效应拥有巨大的毁伤效果,热流密度是爆炸场热毁伤威力的重要评估参量。传统的爆炸场热流密度测试方法是用红外拍摄爆炸场火球代入数学模型来计算得到火球形成的热流密度^[1]。此测量方法是非接触式测量,仅能对火球产生的辐射热流进行测量,而无法包含高温高速流场下的对流的热流密度,无法全面测量出热毁伤效果。薄壁式热流密度传感器是一种常用的接触式热流密度传感器,可以测量爆炸火球和爆炸流场产生的热流密度,但其精度受结构缺陷影响较大。丝式热电偶传感器热敏元件很薄,导致传感器十分脆弱,在爆炸场中使用易损毁、易劣化,无法满足环境需要。表面结点型热电偶是少数几种能够满足爆炸场热测量的传感器之一,同轴是其最典型的装配方式。本文制备的同轴热电偶直径为1 mm尺寸,可以便捷地安装在绝大多数的工况场合中,适用于爆炸场环境的温度和热流密度研究。

在实际应用中,同轴热电偶的测量结果与理论值存在重复性和一致性较低的问题。热电偶的测量结果与其标定的热乘积系数^[2]准确性密切相关。Buttsworth^[3]采用滴水法和激波管法标定实验发现结点的形成位置会对热乘积系数产生较大影响,激波管法标定的数值比滴水法低大约30%,对打磨方向对热乘积系数的影响进行了研究,但他并未对砂纸打磨时间进行定量。Agarwal等^[4]通过水滴法和浸入法对比标定实验发现实际热乘积系数与理论值符合情况较好,同时发现采用水作为标定液体可能会对一些特定材质的热电偶标定结果造成约29%的偏差,针对这一不足,需要替换更合适的液体进行热乘积系数的实验标定。Rakesh等^[5]通过模拟仿真的结果表明了同轴热电偶的热传导并不是理想的一维热传导过程。齐力^[6]也通过数值模拟研究了横向导热所引起的偏差。张仕忠等^[7]研究了气隙对横向传热具有良好的隔绝作用。王兴虎^[8]研究了横向传热对结点平均温度的影响,发现有横向传热的平均温度更高,但针对减少横向传热对传感器的影响措施上,缺少更为低成本和简易的方案。

所以不仅有必要研究结点形成方式对热乘积系数结果的影响,而且也需要对结点加工的具体参数、如砂纸目数和打磨圈数、研磨时间等具体操作参数定量,同时对一维热传导存在的非理想情况、即横向传热进行考虑和分析,提出一种较低成本的方式来降低横向传热的影响。

针对这些情况,标定了刀片划刻、金刚石磨棒研磨以及200~800目间不同目数的砂纸打磨的热乘积系数值,分析了结点连接层的形成方式对热乘积系数的影响。其次,采用数值计算的方式模拟了热电偶结点的热传导过程,并通过实验对比结果来验证其规律。

1 同轴热电偶原理与制备

1.1 传感器工作原理

热电偶的温度测量是基于“温差热电效应”原理展开的。将两种不同的金属导体的两端焊接起来,形成一个闭合的电路,焊接的两个接点分别作为热端和冷端,当这两端的温度不同时,这两种金属组成的回路中将形成电动势,从而在金属导体中产生回路电流。如果将冷端作为参考端并令其温度保持恒定,则回路中的温差电动势则变成测量端(热端)温度的单值函数,通过回路中的热电动势便可以测量出热端的温度^[7],原理如图1所示。

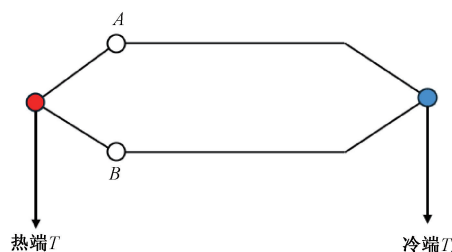


图1 热电偶工作原理

Fig. 1 Working principle of thermocouple

$$E_{AB} = E_{AB}(T, T_0) + E_{AB}(T_0, 0) \quad (1)$$

式中: T 为热电偶在热端温度; E_{AB} 为冷端温度 0°C 时的热电动势; $E_{AB}(T, T_0)$ 为热电偶在接点温度为 T 、冷端温度 T_0 的热电动势; $E_{AB}(T_0, 0)$ 为结点温度为 T_0 、冷端温度 0°C 时的热电动势^[9]。

本文实验室环境下制备的K型同轴热电偶是由镍铬和镍硅两种金属材料内外相套在一起形成的,其结构与普通热电偶不同,但测量原理是相同的。同轴热电偶的两极材料被绝缘层隔开,通过打磨或划痕的方式在一个端面处导通,形成结点。结点作为测量端(热端),两极材料的补偿导线的连接点作为参考端(冷端)。结点处的温度产生变化时就会与参考端之间产生热电动势,根据热电动势与温度的对应关系即可得到测量的温度。

K型同轴热电偶根据温差热电效应进行温度的测量,热流密度通过温度对时间的积分中获得。通常假设同轴热电偶的内部热传导过程是一维的,通过求解半无限介质阶跃温度下的一维热传导方程得到表面热流密度。对于已知的表面温度变化情况 T_s ,热流密度 q_s 可以由热流密度积分公式推导出来。

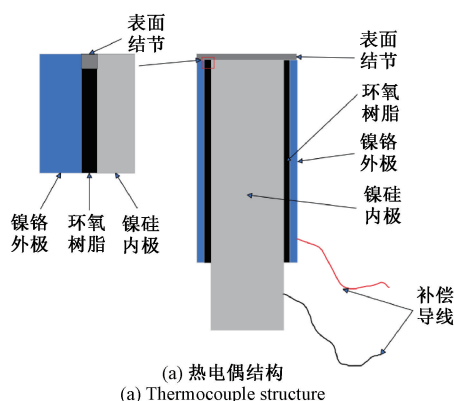
$$q_s(t) = \frac{\beta}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} \frac{d\{T_s(\tau)\}}{d\tau} d\tau \quad (2)$$

式中: ρ 为密度; c 为比热容; k 为材料的导热系数; β 定义表征热电偶材料热特性的参数热乘积系数, $\beta = \sqrt{\rho ck}$ 是计算热流密度的重要参数之一。热乘积系数是同轴热电偶制备完成后的固有属性,由于制作过程中的不确定性很大,得到的热乘积系数值会有很大差异,导致根据式(2)计算出的热流值也出现很大差别,因此有必要进行标定。

1.2 传感器总体结构

同轴热电偶由管状外电极(镍铬)、柱状内电极(镍硅)和中间绝缘层共同组成^[2]。将外电极材料制作成内部为直径1 mm 通孔的管状外壳,内电极材料制成直径为0.95 mm 的内芯,内芯直径比外壳中心通孔直径略小。在内芯的外表面涂抹均匀耐高温环氧树脂作为绝缘材料,内外电极相配合,形成复合柱状结构。内外电极在其中一个端面用砂纸研磨、刀片划痕的方法实现连接导通形成热结点。

在表面连接结点形成过程中利用万用表对热电偶内外极之间的电阻进行连续监测,当电阻 Ω 数值为个位数级时即可认为该热电偶形成了稳定的导通连接。然后,通过点焊的形式将补偿导线焊接在热电偶内极和外极的另一端上。K 型同轴热电偶的设计结构和实物照片如图2所示。



(b) 热电偶实物照片
(b) Thermocouple real photos

图2 热电偶结构和实物照片

Fig. 2 Thermocouple structure diagram and real photos

1.3 热乘积系数理论数值计算

根据式(2)可知,热流密度的测量准确度依赖于热乘积系数的数值。热乘积系数值由热电偶制备过程中结点的材料热特性决定。传感器的制备材料和不同的结点形成方式(镀膜、划刻、打磨等),都对热流密度的计算有重要影响。

正负极材料(镍铬、镍硅)和中间绝缘层材料(耐高温环氧树脂)的热性能值可由相关资料查得,根据1:1加权平均的方式计算出K型同轴热电偶结点形成处的理论热乘积系数。理论值并不能完全符合实际制备的传感器的

热乘积系数值,结点连接处的塑性变形也会随制备方法和材料纯度的差异而变化。

实验室制备的K型同轴热电偶的3种材料的热特性如表1所示。两种热电偶材料之间的间隙,也就是环氧树脂的厚度,大约是10 μm 。在25 $^{\circ}\text{C}$ 的室温环境下,制备的热电偶的灵敏度平均值为41.7 $\mu\text{V/K}$ ^[10]。

表1 同轴热电偶组成材料热特性参数
Table 1 Thermal characteristics parameters of coaxial thermocouple components

材料名称	k /(W/m·K)	ρ /(kg·m ⁻³)	c /(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
镍铬	19.25	8 732	448
镍硅	27	8 585	460
环氧树脂	0.2	1 960	1 060
热结点	23.125	8 658.5	454
衬套(不锈钢)	14.9	7 900	477

由表1可得,镍铬的热乘积系数值为8 677 $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-0.5}$,镍硅的热乘积系数值为10 325 $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-0.5}$,两者相差约19%。实验室制备的K型同轴热电偶热乘积系数的理论值为9 534 $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-0.5}$ 。而传感器的实际值可能会随着制备过程中的不确定性因素与理论值产生较大差异,因此,为了获得准确的结果,需要对每个特定的温度传感器进行动态校准。

1.4 热乘积系数的影响因素分析

传感器的热乘积系数主要受传感器组成材料和结点的制备方式影响,同时在浸入标定液体时也会受到来自横向的液体传热影响,导致热结点区域温度过热。因此,需要对这些情况进行分析。

1) 制备工艺对热乘积系数影响

刀片划痕法是使用薄刀片在内外电极端面间单向划刻,通过塑性变形使内外电极在端面桥接形成热结点的制备工艺。

研磨法是使用砂纸或金刚石磨棒在内外电极端面间单向或反复研磨,通过大面积的塑性变形使内外电极端面之间形成较为广泛的热结点的工艺。相比于刀片划痕,研磨法形成的热结点较多,质量更为稳定,端面质量也较为平整光洁。使用砂纸与同轴热电偶90°垂直方式交叉画十字的方式打磨30次为一次完整的热结点制备操作。金刚石磨棒单向研磨也以30次研磨作为标准。热结点损坏或失效后,只需再次对热电偶端面进行研磨即可形成新的热节点,极大地节约了后期维护的成本^[11-13]。

2) 横向传热对热乘积系数影响

结点不仅受接触时来自端面的热量传递,同时由于传感器直径仅为1 mm,横向传热也会热结点产生影响,因此有必要对传感器进行热隔绝。

内外电极和热结点的材料的热传导系数和比热容通常随温度变化而改变,根据 Caldwell^[14]和 Touloukian^[15]对 K 型热电偶元素的导热系数和比热与温度的关系的研究,可以知道由数据整合建立的方程均是斜率接近的线性方程,在室温(此处取 25 °C)到 100 °C 的加热过程中,导热系数和比热的变化幅值非常小,因此在此处影响可以暂不考虑。

使用 COMSOL 软件对表面受热的同轴热电偶进行建模仿真分析,该模型是三维对称圆柱体,因此为简化计算过程,采用二维方式建模,如图 3 所示。上表面和左右两表面施加温度载荷输入,下表面热绝缘,最终提供三维等效输出^[13]。

由仿真结果可知,由于结点附近材料热性质的差异,结点温度存在过热情况,而又由于存在横向传热时,结点的温度比无横向传热时更高,则根据式(2)可知,其他参量不变的情况下,热乘积系数随接触后的温度的增大而减小,因此,有横向传热时的热乘积系数将会比无横向传热时小。所以,当有衬套对传感器进行横向热隔绝时,结点温度变化情况会更符合一维半无限体传热理论,热乘积系数标定的准确性也更高。

2 基于浸入法的热乘积系数标定实验研究

2.1 浸入法标定原理

浸入法实验标定系统可以在毫秒级的时间尺度上测量和计算所制备的 K 型同轴热电偶的热乘积系数值,对比不同的表面结点连接处形成方法,对它们的热乘积系数值进行分析,以确定其影响。浸入法在实验成本和效率上有明显优势,因此,本文实验使用该方案,并对标定系统进行改进,提高标定的准确性。

浸入法的标定的原理是基于两个半无限大物体突然接触时的导热理论,假设有两个不同材料的半无限大物体,初始时刻温度均匀分布,若两个物体突然紧密接触且不存在接触热阻,那么从相互接触的时刻开始,该界面就具有恒定的温度。界面温度可以通过热扩散方程得出:

$$\frac{T - T_s}{T_s - T_w} = \frac{\beta_w}{\beta_w + \beta} \quad (3)$$

式中: β_w 为标定液体的热乘积系数。参考文献[3]可知,室温下的水的热乘积系数值为 $1\,643\text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-0.5}$,实验标定采用的二甲基硅油的密度 $\rho=0.96\times 10^3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,导热系数 $k=0.14\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,比热容 $c=1.63\times 10^3\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,故热乘积系数值为 $468\text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-0.5}$, T 为待标定传感器测出的瞬时温度, T_s 为室温, T_w 为浸入标定液体的温度, β 为待标定传感器的热乘积系数。

2.2 标定实验系统设计

根据浸入法标定的原理,本文设计了以电动夹具作为运动系统的浸入式标定系统,系统组成如图 4 所示。主要由恒温油槽控制系统、传感器运动系统(电动夹具)、信号采集系统构成。因为二甲基硅油的热乘积系数稳定,受热之后不易挥发,比热容大,热导率低,且不导电,故实验选

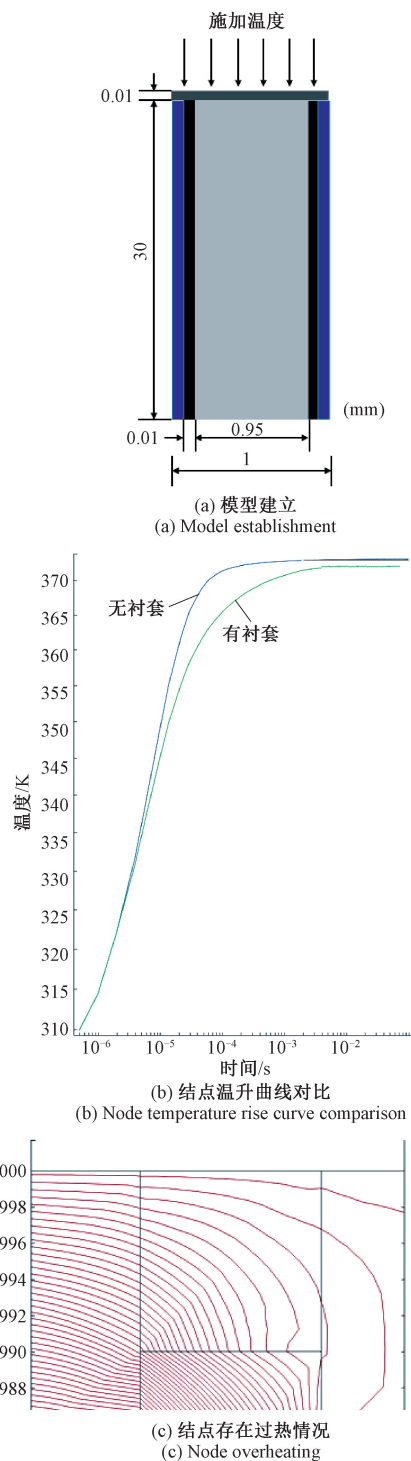


图 3 数值模拟

Fig. 3 Numerical simulation

用二甲基硅油作为标定时的参考液体。

标定的实验过程如下:将 K 型同轴热电偶通过信号调理器和数采系统连接,并将同轴热电偶固定在传动杆的端头。先用标准温度计记录室温,作为同轴热电偶的初始温度。打开温度可调节恒温油槽,用隔热板挡在热电偶

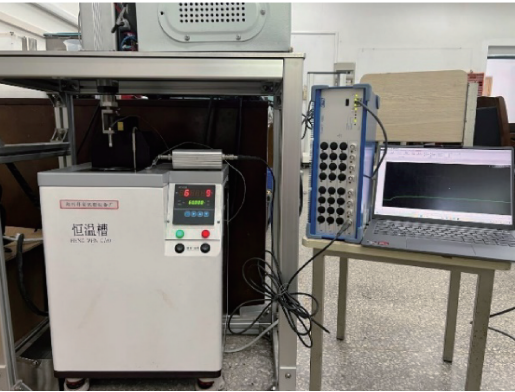
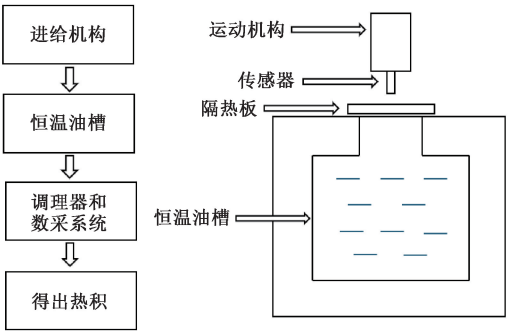


图 4 浸入法热乘积系数标定系统组成

Fig. 4 Composition diagram of the immersion method thermal product coefficient calibration system

和油槽上方以隔绝热量的影响。设定好油槽的温度后,待其保持稳定时,拿掉隔热板,通过控制系统操作传动机构向下运动。同轴热电偶端面接触到油槽液面后,会输出电压信号,将信号传递信号调理器滤波放大后由数采采集存储^[16]。然后根据电压信号的跃变值即可计算出同轴热电偶的热乘积系数^[8]。

当 K 型同轴热电偶瞬间浸入标定液体中时,结面温度阶跃上升,并产生电压信号。实验室制备的同轴热电偶的样本典型电压信号如图 5 所示,输出的电压信号的两个拐点之间的时间差越短、拐点斜率变化越明显,越有利于读取出需要的电压差数据,从而求得热乘积系数。

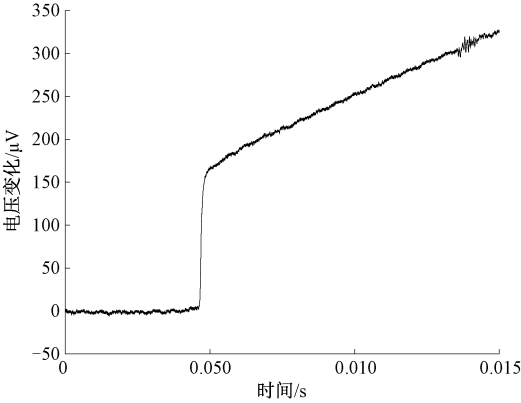


图 5 浸入法标定时的典型电压信号

Fig. 5 Typical voltage signal during immersion calibration

2.3 实验结果

将每个同轴热电偶分别浸入 60℃、80℃、100℃ 的恒温油槽进行标定,记录得到同一支热电偶在不同温度下的数值,如图 6 所示。

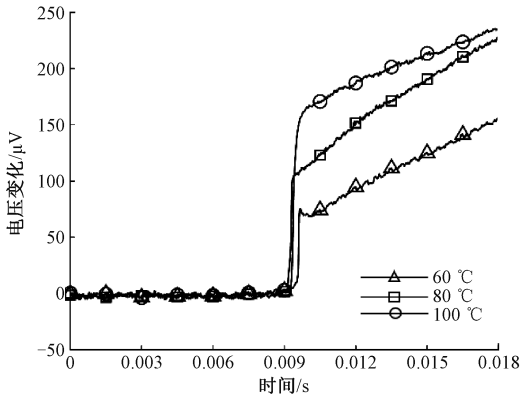


图 6 不同温度下的电压信号

Fig. 6 Voltage signals at different temperatures

每个热电偶采集 10 次数据,以电压变化曲线求导后的斜率拐点作为上升起始和结束区间,进行热乘积系数的计算,剔除粗大误差,最后对其取平均值。分析计算后的结果如表 2 所示。

表 2 浸入法实验结果总结

Table 2 Summary of experimental results of immersion method

组号	结点制造方式	热乘积系数 $/(J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot s^{-0.5})$	标准 差 σ	组号	结点制造方式	热乘积系数 $/(J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot s^{-0.5})$	标准 差 σ
1(无衬套)	刀片从内极向外极	8 788	2.1	9(有衬套)	刀片从内极向外极	8 913	2.9
2(无衬套)	刀片从外极向内极	10 656	1.5	10(有衬套)	刀片从外极向内极	10 892	2.3
3(无衬套)	研磨从内极向外极	8 913	2.2	11(有衬套)	研磨从内极向外极	9 193	2.6
4(无衬套)	研磨从外极向内极	11 092	2.3	12(有衬套)	研磨从外极向内极	11 320	1.9
5(无衬套)	200 目砂纸	8 640	0.8	13(有衬套)	200 目砂纸	8 783	2.2
6(无衬套)	400 目砂纸	8 721	1.4	14(有衬套)	400 目砂纸	8 891	1.7
7(无衬套)	600 目砂纸	9 312	1.8	15(有衬套)	600 目砂纸	9 505	1.7
8(无衬套)	800 目砂纸	10 833	1.7	16(有衬套)	800 目砂纸	10 991	1.9

从制备的热电偶传感器中获得的有无衬套热乘积数值对比情况如图7所示,标定结果与数值模拟分析结论相符合。

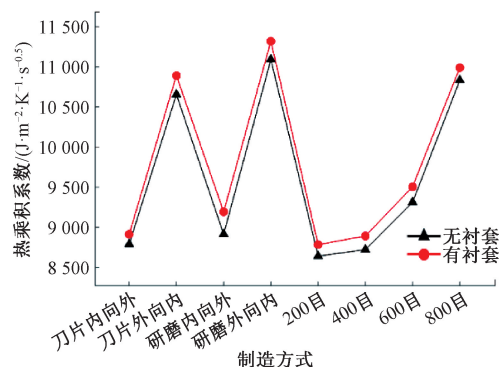


图7 热乘积系数的对比情况

Fig. 7 Comparison of thermal product coefficients

2.4 分析与讨论

当传感器表面结点是由刀片形成时,从内极向外极制造划痕的热乘积系数平均值为 $8788 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-0.5}$,从外极向内极制造划痕的热乘积系数平均值为 $10656 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-0.5}$,前者数值接近材料镍铬的热乘积系数值,后者接近镍硅材料的数值。这是因为当通过刀片从镍铬外极向镍硅内极制造划痕形成结点时,该结实际上是在镍硅上形成的,所以结点的热乘积系数与镍硅的热乘积系数更相近,反之同理。因此,不同方向划痕形成的热电偶热积值之间的差异较大,但是同方向划痕形成的热积值趋于接近。这一结果表明,刀片划痕形成的同轴热电偶具有相对一致的热乘积系数值,没有必要对由刀片划痕形成的同轴热电偶进行单独标定校准。

相比较之下,用砂纸研磨形成连接时,比刀片产生的划痕要细得多,因此热电偶表面结点的有效位置比使用刀片创建连接时更接近绝缘层。当用磨料砂砾形成细结时,绝缘材料的热性能可能对热乘积系数的有效值有更大的影响。由于砂纸摩擦形成的连接的数量可能不相等,可能其中一极的材料占主导地位,并且很难量化表面结点上的结点数量。因此,正负极和绝缘层材料的不同热参数以及每种材料的不确定权重都可能导致结果的不确定性。而对于用更细砂纸形成的表面结点,同轴热电偶可能会有着更高的热乘积系数值。这一结果表明,对于使用不同粒度的砂纸制备的同轴热电偶,需要进行单独标定校准。

同轴热电偶在浸入液体的过程中不仅有来自端面的传热,也有来自横向的传热,这会造成传感器结点存在过热的情况,从而影响最后的标定结果。因此通过加装衬套对比标定实验发现加装衬套的传感器的热乘积系数比无衬套情况下高出 $1\% \sim 2\%$,与仿真数值模拟的结果较为符合。

3 结论

直接采用理论热乘积系数数值,可能会产生很大的误差,所以需要标定来纠正直接使用理论值可能产生的误差。设计了一套基于浸入法的实验标定系统,对使用不同的结点连接层加工方法制成的热电偶传感器标定结果进行对比。

1)由刀片划痕和单向研磨形成的结点的热电偶的热乘积系数会更接近该方向的电极材料的数值,并且具有相对一致的热乘积系数值。而砂纸打磨的情况热乘积系数会受砂纸粗细的影响,制造的热电偶的热乘积系数值随着200目、400目、600目、800目砂纸增加。

2)因为存在横向传热,所以理想的一维半无限导热模型会受到影响,因此通过仿真情况和实验结果对照,分析了横向传热存在对其的影响,从而在制备的热电偶外加装不锈钢衬套,以提高标定结果的准确性。

参考文献

- [1] 郭雨岩. 高能战斗部热毁伤威力参量测试关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
GUO Y Y. Research on key technology of thermal damage power parameter test for high energy warhead [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [2] 刘济春, 周嘉穗, 贾国鹏, 等. 燃烧试验用同轴热电偶研制及应用[C]. 第十五届全国激波与激波管学术交流会, 2012: 432-439.
LIU J CH, ZHOU J H, JIA G P, et al. Development and application of coaxial thermocouple for combustion test [C]. Proceedings of the 15th National Shock Wave and Shock Tube Academic Exchange Conference, 2012: 432-439.
- [3] BUTTSWORTH D R. Assessment of effective thermal product of surface junction thermocouples on millisecond and microsecond time scales [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2001, 25(6): 409-420.
- [4] AGARWAL S, SAHOO N, SINGH K. Experimental techniques for thermal product determination of coaxial surface junction thermocouples during short duration transient measurements [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.062.
- [5] RAKESH K M, NIRANJAN S. Dynamic calibration of a coaxial thermocouples for short duration transient measurements[J]. Journal of Heat Transfer, 2013: 1-7.
- [6] 齐力. E型同轴热电偶热响应特性数值模拟研究[C]. 中国力学大会, 2021.

- QI L. Numerical simulation of thermal response characteristics of E type coaxial thermocouple [C]. Proceedings of Chinese Mechanics Congress, 2021.
- [7] 张仕忠,李进平,汪球,等. 快速响应同轴热电偶在长时间热流测量中的应用[C]. 高温气体动力学国家重点实验室 2020 年度夏季学术研讨会, 2020: 65-74.
ZHANG SH ZH, LI J P, WANG Q, et al. Application of fast response coaxial thermocouple in Long time heat flow measurement [C]. Proceedings of the 2020 Summer Symposium of State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, 2020: 65-74.
- [8] 王兴虎. 同轴热电偶的响应特性分析与实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
WANG X H. Response characteristics analysis and experimental research of coaxial thermocouple [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [9] 张明春,肖燕红. 热电偶测温原理及应用[J]. 攀枝花科技与信息, 2009, 34(3): 58-62.
ZHANG M CH, XIAO Y H. Principle and application of thermocouple temperature measurement [J]. Panzhihua Technology and Information, 2009, 34(3): 58-62.
- [10] 代云瑜. 高温热端部件用温度传感器探针制备与性能研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
DAI Y Y. High temperature hot end components with temperature sensor probe preparation and performance study [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2023.
- [11] 李国梁. 高压柴油喷雾火焰撞壁过程中瞬态传热量测量器件与方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
LI G L. Research on measurement devices and methods of transient heat transfer during high pressure diesel spray flame collision [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [12] LI J P, CHEN H, ZHANG S Z, et al. On the response of coaxial surface thermocouples for transient aerodynamic heating measurements [J]. Experimental Thermal and Fluid Science: International Journal of Experimental Heat Transfer, Thermodynamics, and Fluid Mechanics, 2017, DOI: 10.1016/j.expthermflusci. 2017. 04. 011.
- [13] ANIL K R, NIRANJAN S, PANKAJ K. Characterization of high-frequency thermal sensor for transient temperature measurement [C]. Advances in Materials and Manufacturing Engineering: Proceedings of ICAMME. Springer, 2020: 99-106.
- [14] CALDWELL F R. Thermocouple Materials [M]. Applied Methods and Instrument; Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry, 1962, 3(2): 81-134.
- [15] TOULOUKIAN S Y. Specific heat; Metallic Elements and Alloys[M]. Thermophysical Properties of Matter; TPRC Data Series. New York: IFI/Plenum Press, 1970.
- [16] 李亚政,甄国涌,贾兴中,等. 基于 AD590 的热电偶冷端方法优化设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(12): 156-160.
LI Y ZH, ZHEN G Y, JIA X ZH, et al. Optimization design of thermocouple cold end method based on AD590 [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(12): 156-160.

作者简介

林柯澄, 硕士研究生, 主要研究方向为同轴热电偶传感器设计制备与标定。

E-mail: 1378510699@qq.com

孔德仁(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为爆炸动态参量测试、测控技术及仪器、现代传感器技术及系统。

E-mail: derenkong@hotmail.com

陈华, 助理研究员, 主要研究方向为材料动态力学性能及测试技术。

E-mail: chenhuahua1020@126.com

徐春冬, 博士, 副教授, 主要研究方向为动态参量测试。

E-mail: chundongxu@126.com