

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209285

基于脉冲激光负阶跃响应的高速热电偶 时间常数测量方法*

刘宁^{1,2}, 徐毅^{3,4}, 刘显明^{1,2}, 熊兵⁴, 雷小华^{1,2}

(1. 重庆大学光电工程学院 重庆 400044; 2. 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室 重庆 400044;
3. 北京航空航天大学航空发动机研究院 北京 100191; 4. 中国航发四川燃气涡轮研究院 四川 610500)

摘要: 热电偶的时间常数是表征其动态特性的关键参数, 利用激光激励获得温度阶跃是测量高速热电偶时间常数的主要手段。本文对比分析了正、负阶跃激光激励时的热电偶传热过程, 指出负阶跃过程更符合时间常数测量的基本理论。通过建立阶跃调制激光和脉冲调制激光的负阶跃过程中热电偶的响应模型并计算, 表明脉冲激光激励可有效解决阶跃调制激光测试结果偏慢的问题。通过搭建实验系统, 相同条件下测得时间常数分别为 73.78 和 41.34 ms, 脉冲激光测试更能体现热电偶的极限测温速度。实验结果还表明不同脉冲能量对时间常数测量结果基本没影响, 更小尺寸热电偶响应速度更快, 强制对流环境对热电偶时间常数测量结果影响巨大。

关键词: 高速热电偶; 时间常数; 激光加热; 测量

中图分类号: TH-811 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Time constant measurement method of high-speed thermocouple based on negative step response of pulsed laser

Liu Ning^{1,2}, Xu Yi^{3,4}, Liu Xianming^{1,2}, Xiong Bing⁴, Lei Xiaohua^{1,2}

(1. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
3. Research institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 100191, China; 4. AECC Sichuan Gas Turbine Research Establishment, Chengdu 610500, China)

Abstract: The time constant of the thermocouple is a key parameter of its dynamic characteristics. Obtaining temperature step by laser excitation is the main way to measure the time constant of the high-speed thermocouple. The heat transfer process of thermocouple excited by positive and negative step laser is compared and analyzed in this article. It is pointed out that the negative step is more consistent with the theory of time constant. The response model of thermocouple in the negative step of step modulated laser and pulse modulated laser is formulated. It shows that the pulsed laser can effectively solve the problems existing in experimental results of the step laser. The time constants measured under the same conditions are 73.78 and 41.34 ms, respectively. The limit performance of thermocouple response can be obtained by pulse laser test. Experimental results also show that the pulse energy has little effect on the measurement results of the time constant. Smaller thermocouples respond faster. The forced convection has a great influence on the measurement results of the thermocouple time constant.

Keywords: high-speed thermocouple; time constant; laser heating; measurement

收稿日期: 2022-02-10 Received Date: 2022-02-10

* 基金项目: 国家自然科学基金(61875023, 52175530)、国家重大专项项目(J2019-V-0002-0093)、重庆市自然科学基金(cstc2019jcyj-msxmX0036)项目资助

0 引言

对瞬态温度的高速准确测量在诸多应用领域具有至关重要的作用,例如弹药爆炸,枪膛内壁,航空发动机变工况试验等场合^[1-3]的温度测量,需要测温系统具有高速测温的能力。热电偶是最常用的接触式测温方法,具有高精度、大量程和高可靠性的优点^[4],在动态测温领域应用最为广泛。热电偶的动态响应特性是其在特定环境下对温度响应快慢能力的体现,与热电偶材料属性、结构尺寸参数、加工工艺等密切相关。由于涉及热物性参数较多,且感温结点的结构形貌难以准确获得,难以在理论上实现对热电偶动态响应特性的精准计算,通常采用实验方法进行测试分析^[5]。

目前高速热电偶的尺寸已达到微米甚至纳米量级,对响应速度可达到微秒级^[6-9]。要了解高速响应热电偶的动态性能,首先应提供高速的温变条件,调控激光器开关施加热激励的时间可以达到纳秒级^[10],因此,激光是目前高速热电偶动态性能测试实验最常用的激励热源。根据激光信号调制方式,通常可进行阶跃和脉冲式的热源信号加载,分别测试升温或降温过程的响应信号并计算时间常数。国内外诸多机构在热电偶动态性能测试领域开展了深入研究与应用试验^[11-16]。其中美国国防部、兰州交通大学基于阶跃调制激光进行了动态性能实验,美国国防部采用调制斩波激光激励热敏电阻,测得响应时间约为100 ms^[11]。兰州交通大学分别使用正、负阶跃激励微细T型热电偶,时间常数为分别为80.3和75.1 ms^[12]。正、负阶跃测试法的主要区别为传热方式不同,只有负阶跃过程与时间常数理论模型的边界条件相符。法国弗朗什孔德大学^[14]、大连交通大学^[15]、中国计量大学^[16]、中北大学^[17]等基于脉冲调制激光开展了热电偶动态性能测试研究,得到微秒级的响应时间测量结果,这表明激光激励在高速热电偶动态性能测试领域具有较大潜力。但目前已有研究主要根据响应信号的上升过程计算时间常数,激光加热过程中主要换热方式为辐射,而时间常数理论模型的换热边界条件为对流,直接使用时间常数作为指标进行研究存在理论缺陷。

相比正阶跃测试法,负阶跃测试法利用激光关断后的降温过程进行测试试验,主要换热方式为对流,与时间常数理论模型相符。因此,采用负阶跃测试法能够有效解决正阶跃测试法换热方式不一致的问题。目前利用激光负阶跃进行的研究几乎都采用阶跃调制激光激励方式^[12,17],在激光加热过程中热电偶的感温结点会持续吸收激光能量,并向偶丝部分不断进行热传递,导致非感温结点部分也会达到高温状态。在停止加热后,由于感温结点与偶丝间的温差较小,导致偶结点降温缓慢,测试得

到的降温曲线偏慢,难以反映高速热电偶的极限测温速度。为了解高速热电偶在特定环境下的极限测温速度,本文提出基于单脉冲激光激励下负阶跃响应的热电偶时间常数测试方法。通过对阶跃调制和脉冲调制两种激光调制方式的光热效应及动态响应进行理论和实验的对比分析,验证单脉冲激光作为激励源在热电偶动态响应特性测试中的对比优势。最后利用单脉冲激光激励方法开展不同激光参数和不同样品的实验测量,对实验结果及影响因素进行了分析。

1 激光激励热电偶的传热过程

热电偶是由两种不同材料的金属偶丝连接形成的感温器件,由偶丝和连接处的感温结点两部分构成。激光加热时感温结点吸收激光辐射的能量,结点温度持续上升。热电偶输出热电势取决于感温结点的温度,也将同步增加。感温结点温度升高后,内部热量向偶丝方向传导。同时,感温结点与测试环境的空气之间通过对流换热。感温结点还会通过辐射作用对外释放能量,温度越高辐射作用越强。因此,激光对热电偶的加热过程同时存在辐射、对流和传导3种传热方式。

在对热电偶动态响应特性分析研究中,往往认为热电偶感温结点与环境换热速度远大于内部的热传导速度,感温结点的温度是均匀变化的。因此,可将感温结点的质量和热容量等视为集中在一点,热电偶的动态响应特性符合集总参数模型^[18]。以负阶跃测试过程为例,此时的导热微分方程为:

$$\rho V c \frac{dT}{d\tau} = -hA(T - T_{\infty}) \quad (1)$$

式中: ρ 、 V 、 c 、 A 分别为感温结点的密度、体积、比热容和换热面积; h 为感温结点与测试环境的换热系数; T 为测试过程中感温结点的瞬时温度; T_{∞} 为被测对象温度,对上式积分并代入初始条件可得:

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = \exp\left(-\frac{hA}{\rho V c} \tau\right) \quad (2)$$

其中, T_0 为环境和感温结点处于初始平衡状态的温度。若时间 $\tau_c = \rho V c / (hA)$,此时温度阶跃量降到初始状态的 $1/e = 36.8\%$,由此定义 τ_c 为热电偶的时间常数。

然而,在激光加热热电偶的过程中,热电偶的温度变化涉及多种传热方式,由式(3)表示:

$$mC \frac{\partial T}{\partial t} = Q + hA(T_{air} - T) + \sigma \varepsilon A(T_{exh}^4 - T^4) - kA \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

式(3)中等号左侧为温度变化,右侧分别代表热源提供能量,以及对流、辐射和传导3种传热过程交换的能量。由于式(3)包含多个分量,无法如式(1)直接求出温

度分布解析解并得到此条件下的时间常数。因此,基于激光加热过程的正阶跃测试法直接以时间常数作为动态响应特性的指标存在理论缺陷。而利用激光关断的负阶跃过程进行测试时,换热方式主要为对流,与集总参数模型边界条件相符。

要实现激光负阶跃调制,将激光开启一段时间后再关断即可。根据关断前的开启时间长短,可分为阶跃调制激光负阶跃和脉冲调制激光负阶跃,如图1所示,分别对应较长的加热时间和极短的加热时间,对时间常数测试结果有显著影响。

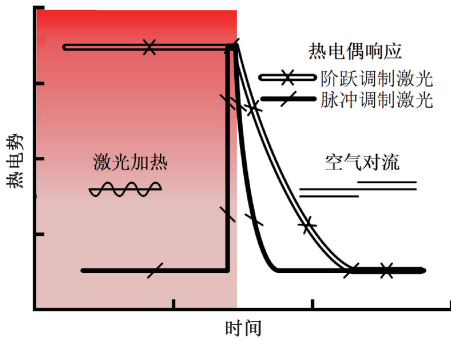


图1 热电偶在不同调制方式激光激励时的负阶跃响应

Fig. 1 Negative step response of laser excitation with different modulation modes

2 热电偶动态温度响应仿真

为对比不同加热方式下的热电偶动态温度响应特性,采用有限元分析方法建立物理模型进行分析。模型基于高速热电偶的实际结构确定,高速热电偶分为感温结点和偶丝两部分,偶丝材料为镍,对应K型热电偶。偶丝直径0.05 mm,长度10 mm,感温结点长度0.1 mm。材料的导热系数、密度和比热容参数分别为 $0.907 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、 $8.9 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、 $0.46 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

激光对金属的热效应与其波长显著相关,激光的波长越短金属材料吸收率越高,模型中金属材料吸收率可由式(4)计算^[19]:

$$\alpha = 0.1457 \sqrt{\frac{\rho}{\lambda}} + 0.09e^{-0.5\sqrt{(\lambda-m/N)/\rho}} + \frac{\rho}{N\lambda - 1 \times 10^{-6}} \quad (4)$$

式中: ρ 为金属的电阻率, λ 为激光波长, m 为与金属的自由频率有关的常数, N 为金属原子的核外电子层数。热电偶主要组成材料是镍,激光器的波长为 $1.064 \mu\text{m}$,由上式可计算对应波长激光辐照的吸收率为0.052。根据金属的吸收率与激光器参数可由式(5)计算激光的热流密度^[12]。

$$q = 2\alpha \frac{P}{\pi\omega^2} \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega^2}\right) \quad (5)$$

其中, α 为材料吸收率, P 为激光功率, r 为光束中某点与光斑中心的距离,光斑半径为 ω 。根据金属吸收率公式和激光功率计算热流密度,即可实现不同调制方式下的热电偶温度动态响应的理论计算。

2.1 阶跃调制激光激励

采用阶跃调制激光进行热激励时,加热阶段的激光功率不能过高,否则会导致结点处吸收热量远超流出热量,结点处热量不断累积,结点温度急剧升高并超过偶丝熔点。在仿真中设置激励激光的功率为0.2 mW,施加热流密度载荷后传热模型不同位置的温度分布如图2所示,加热到目标温度的过程中热传导现象非常明显。热电偶感温结点尺寸仅为0.1 mm,但热量传递的距离持续增加,且远大于感温结点尺寸。

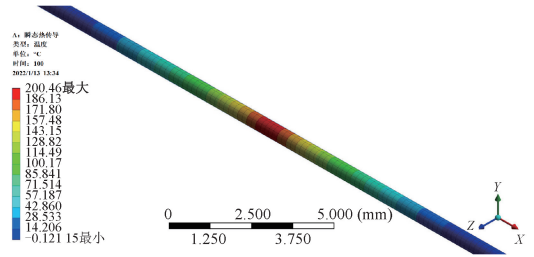


图2 阶跃调制激光激励时热电偶温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of thermocouple excited by step modulated laser

以感温结点中心为原点,在1 mm(长径比20)范围内以步长0.25 mm作为测点,各测点温度随时间的变化关系如图3所示。各测点在加热30 s后基本达到热平衡,此后处于稳定的高温状态。距感温结点1 mm处的温度幅值与感温结点处比较相近,即加热过程中大量热量已由感温结点传递到偶丝,感温结点与较长距离处偶丝测点的温差较小,将导致负阶跃测试法的动态响应特性测试结果偏慢。

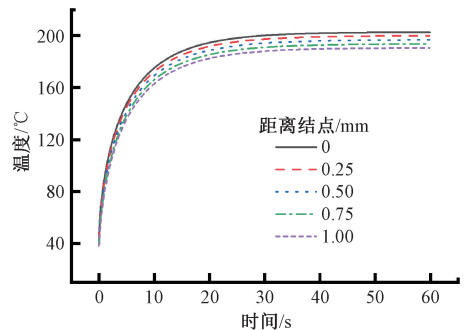


图3 阶跃调制激光激励时偶结点附近温度变化

Fig. 3 Temperature variation near the junction of thermoelectric couple excited by step modulated laser

2.2 脉冲调制激光激励

采用脉冲调制激光进行热激励时,单脉冲激光提供总能量为定值。激光加热时间虽短,但瞬时功率高,在极短时间内即可实现感温结点的迅速温升。在仿真中设置激光功率为 20 W,脉冲宽度为 0.3 ms。根据计算结果施加加热流密度载荷,传热模型不同位置的温度分布如图 4 所示。加热到目标温度的过程中,热电偶整体吸收的能量远少于阶跃调制激光加热。

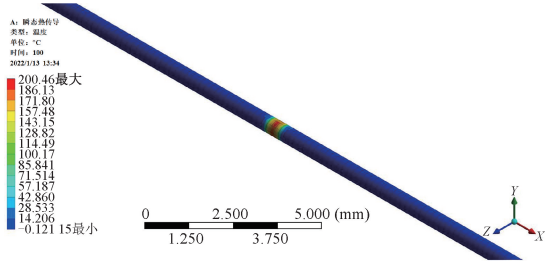


图 4 脉冲调制激光激励时热电偶温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of thermocouple excited by pulse modulated laser

同样以感温结点中心为原点,结点附近 1 mm 范围内各测点的温度随时间变化关系如图 5 所示。热量传递的距离显著短于阶跃调制激光加热,激光激励只让感温结点达到高温状态。因此,采用脉冲调制激光激励时,能解决施加瞬态高温的过程中大量热量由感温结点传递到偶丝的问题。

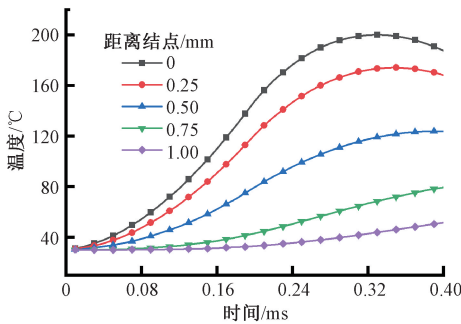


图 5 脉冲调制激光激励时偶结点附近温度变化

Fig. 5 Temperature variation near the junction of thermoelectric couple excited by pulse modulated laser

2.3 不同脉冲能量激励

上述两种激光加热方式都可以使热电偶结点达到相同的初始温度。在单脉冲调制激光加热时,吸收能量和向偶丝传导热量的过程均在短时间内完成,测试结果更能反映热电偶的极限测温速度。热电偶动态响应特性曲线的温度幅值由激光脉冲能量决定。为分析基于脉冲调制激光激励的负阶跃测试法的时间常数与初始温度幅值之间的关系。以 100°C 为步长,采用有限元分析方法计

算温度变化 100°C ~ 500°C 的时间常数。基于脉冲激光激励的负阶跃测试法在不同初始温度幅值的动态响应特性仿真曲线如图 6 所示。

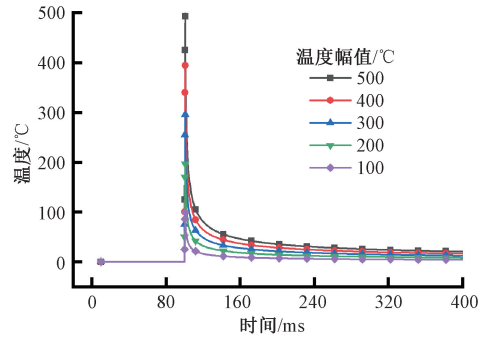


图 6 不同能量脉冲激光激励时偶结点温度变化
Fig. 6 Temperature variation of thermocouple junction excited by different energy pulsed laser

选择温度最高点为起始点,达到阶跃量的 36.8% 处为终点,计算得到 5 组仿真数据的时间常数均为 3.26 ms。即初始温度幅值不同时,时间常数仍然相等。因此,对于单脉冲激光激励时,只要加热引起的温升在热电偶工作范围内,脉冲能量对时间常数测量结果的影响可忽略。

3 不同调制方式对比实验

3.1 实验系统与样品

基于激光激励的高速热电偶动态响应特性测试系统如图 7 所示,包括激光光源,高速热电偶样品及连接线(含冷端补偿),数据采集电路,数据处理模块 4 部分。激光光源对热电偶的感温结点进行热激励,热电偶响应信号经过冷端补偿后由数据采集设备采集响应信号,将数据传输到上位机中进行数据处理并计算时间常数。在进行实验时两种激励方式只有光源的工作模式有区别,其他步骤和设置完全相同。

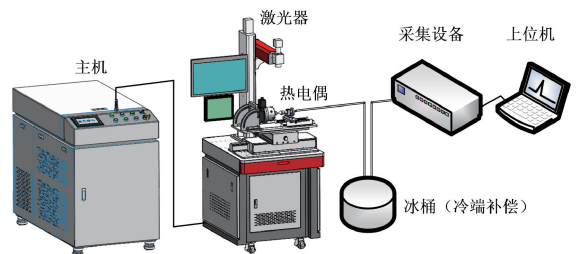


图 7 高速热电偶动态响应特性测试系统
Fig. 7 Experimental system of dynamic response characteristics of high speed thermocouple

脉冲激光激励时间很短,激光器的功率需要足够大才能给予热电偶达到目标温度。选择最大功率 400 W 的 Nd:YAG 激光器作为高速热电偶动态性能测试的激励源,调节激光器参数能够给予待测热电偶合适的温度激励。激光器电流幅值 30~400 A 可调。脉冲激光宽度 0~20 ms 可调,最小步长为 0.1 ms。激光光斑直径为 0.3 mm,能够实现全覆盖热电偶的感温结点。激光器配置光纤传导光路,样品台配有显微观测系统以及精密电机运动控制系统,可实现对热电偶样品进行精准定位和加热。

热电偶测温速度主要由其几何尺寸决定。本研究选择 OMEGA 公司生产的 0.05 mm 丝径的 K 型热电偶偶丝,正极材料为 NiCr,负极材料为 NiSi,采用激光焊接工艺制作微细热电偶。所制作的微细热电偶如图 8 所示,热电偶感温结点尺寸与偶丝直径基本相等。高精度万用表采集响应信号并传输至上位机,采样间隔为 0.17 ms,100 mV 量程档的精度为 6 位半,测量精度为 1 μV 。

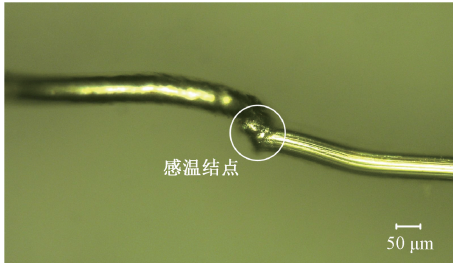


图 8 微细 K 型热电偶实验样品

Fig. 8 Experimental sample of the micro K-type thermocouple

根据动态校准规范,热电偶首先应经过静态标定,静态标定装置如图 9 所示,由 CARBOLITE GERO TF1-1200 管式高温炉提供稳定温度场,冰桶进行冷端补偿,万用表采集电压信号。高温炉配备有标准 B 型热电偶,使用夹具将待测热电偶和 B 型热电偶固定至高温炉内相同位置,设置目标温度分别为 100 $^{\circ}\text{C}$ 、200 $^{\circ}\text{C}$ 、300 $^{\circ}\text{C}$ 、400 $^{\circ}\text{C}$ 、500 $^{\circ}\text{C}$,待 B 型热电偶的输出达到对应温度值时,分别测量自制 K 型热电偶的输出信号,并与 K 型热电偶分度表中的标准热电势对比。

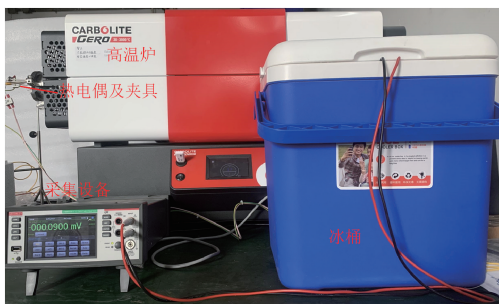


图 9 静态标定装置

Fig. 9 Static calibration device

0.05 mm 的 K 型热电偶的静态标定实验结果如表 1 所示,在各测点温度热电偶的热电势与分度表对应值较为接近。

表 1 静态标定结果

Table 1 Static calibration results

温度 / $^{\circ}\text{C}$	标准电势 / mV	$D=0.05\text{ mm}$ / mV	$ \Delta V /\mu\text{V}$ $ \Delta T /^{\circ}\text{C}$
100	4.096	4.137	41/0.99
200	8.138	8.109	29/0.73
300	12.209	12.275	66/1.59
400	16.397	16.354	43/1.10
500	20.64	20.581	59/1.40

0.05 mm 微细热电偶在各测点的静态标定结果如图 10 所示,最大误差为 1.59 $^{\circ}\text{C}$,表明自制热电偶具有合格的测温性能。

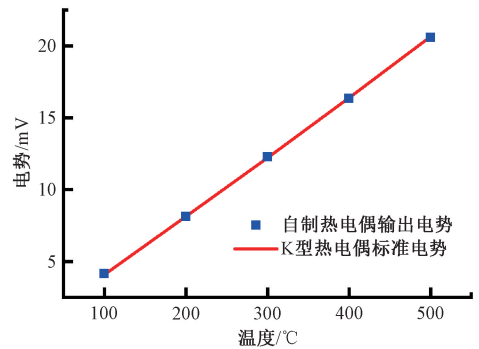


图 10 静态标定测点分布

Fig. 10 Distribution of static calibration measuring points

3.2 不同调制方式激光激励对比实验

利用脉冲调制和阶跃调制两种不同方式对热电偶动态响应特性进行实验,通过调整激光器参数可使两种激励方式后热电偶的起始温度幅值基本相同。阶跃调制方式下测试得到的实验结果如图 11 所示。选择激光器关闭的时刻为起点,输出信号幅值下降到阶跃量的 36.8% 处为终点时刻,平均时间常数为 74.413 ms。多次动态响应特性测试的响应输出曲线基本一致。根据贝塞尔公式计算时间常数估计值 $\bar{\tau}$ 的 A 类不确定度为 $u_A = 1.566\text{ ms}$,采集设备的采样间隔为 0.17 ms,被测时间常数估计值均匀分布在 $[\bar{\tau} - \Delta t, \bar{\tau} + \Delta t]$ 区间内,因此时间常数估计值 $\bar{\tau}$ 的 B 类不确定度 $u_B = 0.0981\text{ ms}$,合成不确定度 $u_C = 1.569\text{ ms}$ 。

基于脉冲激光激励的负阶跃测试法实验结果如图 12 所示,多次动态特性测试结果也基本一致,实验结果具有较好的重复性。以相同的数据处理方法计算时间

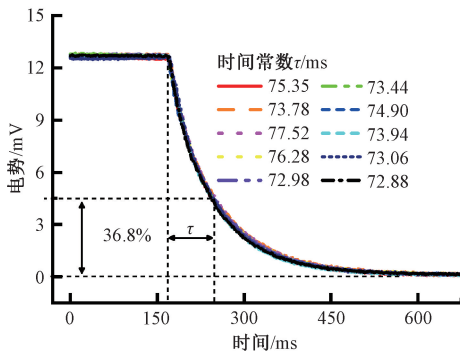


图 11 阶跃调制激光激励实验结果

Fig. 11 Experimental results of step modulated laser excitation

常数,平均时间常数为 43.809 ms。A 类不确定度为 $u_A = 1.784$ ms, B 类不确定度 $u_B = 0.0981$ ms,合成不确定度 $u_C = 1.787$ ms。

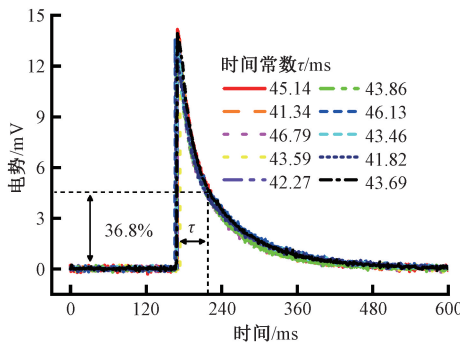


图 12 脉冲调制激光激励实验结果

Fig. 12 Experimental results of pulse modulated laser excitation

在初始温度基本相同时,两种加热方式的动态特性测试结果对比如图 13 所示。脉冲激励下负阶跃测试法得到的时间常数显著小于阶跃调制激励的结果,与理论分析一致。基于脉冲调制激光激励的负阶跃测试法获得的测试结果更能体现高速热电偶的极限测温速度。

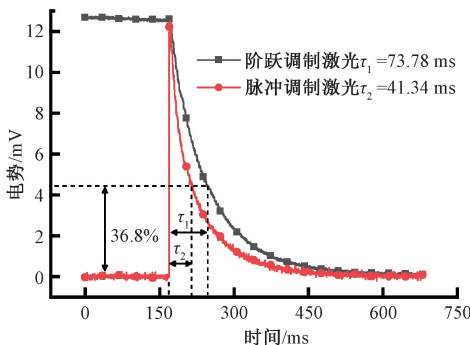


图 13 不同调制方式激光激励的实验结果对比

Fig. 13 Experimental results of laser excitation with different modulation modes

4 单脉冲调制激光激励实验

热电偶的极限测温速度取决于材料和尺寸等属性,并受测试环境影响。本节对不同实验样品在不同测试环境下的动态性能进行测试,探究不同实验条件下基于脉冲激光激励的负阶跃测试法的影响因素。

4.1 不同直径样品实验

本研究选择 OMEGA 公司生产的 0.05、0.13 和 0.25 mm 3 种规格的 K 型热电偶丝,与前文介绍一样采用激光焊接工艺制作微细热电偶。通过调节激光器参数,尽可能使 3 种热电偶在负阶跃响应前具有相同的初始温度,即输出的热电势相同,实验中对应的激光器参数如表 2 所示。

表 2 不同规格热电偶实验时激光器参数设置

Table 2 Laser parameters setting of thermocouples with different sizes in experiment

丝径/mm	电流幅值/A	脉宽/ms
0.05	45	0.4
0.13	54	0.5
0.25	61	0.6

不同直径实验样品的动态响应特性测试结果如图 14 所示,分别为 42.27、53.80 和 129.23 ms。不同样品的实验结果都表明搭建的测试系统能够对亚毫米级裸丝热电偶的动态响应特性进行精确测试。热电偶的几何尺寸是其动态性能的决定因素,减小感温结点的体积能够显著减小热容并增加热电偶的响应速度。但偶丝直径不能过小,否则在一些高速温度冲击应用场景下可能因结构强度不足影响正常使用。

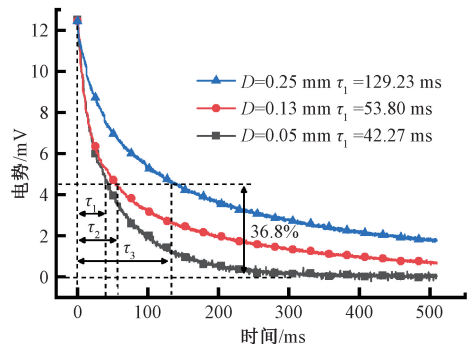


图 14 不同直径热电偶的实验结果

Fig. 14 Experimental results of samples with different diameters

4.2 不同对流条件实验

从时间常数的计算公式可知,对流换热系数是其中唯一和测试环境相关的参数。对流换热系数实际上是一个非常复杂的参数,在实际使用中都进行了大量的简化。对流换热系数的大小与气体流速直接相关,气流速度越快,对流换热系数越大。本研究采用压缩空气作为气源,通过调节出气口阀门的方式控制气流速度。其中,0.05 mm 热电偶在强制对流条件下晃动比较剧烈,对响应信号影响十分明显,因此选择 0.13 mm 热电偶测量其在不同风速下的响应曲线和时间常数。实验中对应的脉冲调制激光电流幅值为 54A,脉宽为 0.5 ms。

实验时首先用热敏风速仪测量高压气瓶出口风速,热敏风速仪风速测量范围为 0~30 m/s。调整气瓶减压阀,并测量观察此过程的风速变化,待风速接近至 10、20 和 30 m/s 附近时,如图 15 所示,固定阀门位置进行微调,将风速控制在目标值附近。

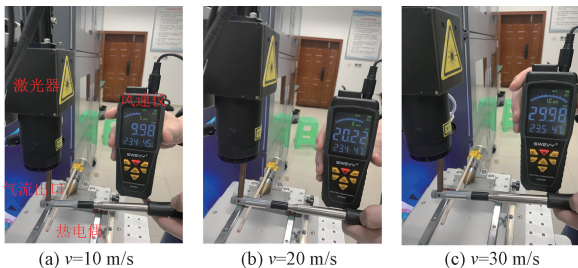


图 15 风速测量值

Fig. 15 Wind speed measurement results

待风速完全稳定后进行脉冲激光激励的动态响应特性实验,采集热电偶响应信号。实验结果如图 16 所示,随着风速不断增加,时间常数分别为 53.80、46.24、39.61 和 33.35 ms。

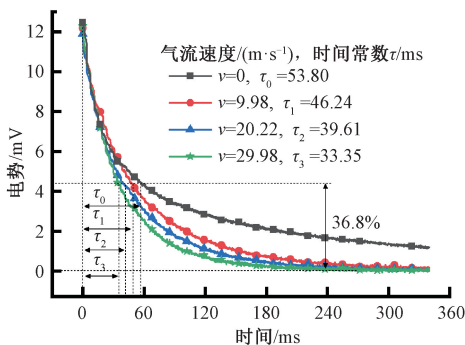


图 16 不同风速对流时的实验结果

Fig. 16 Experimental results of convection at different wind speeds

时间常数随风速的变化关系如图 17 所示,随着风速逐渐增加,时间常数测试结果显著减小,近似满足的线性关系,后续若进行高速风洞实验,可能获得更快的响应结果。

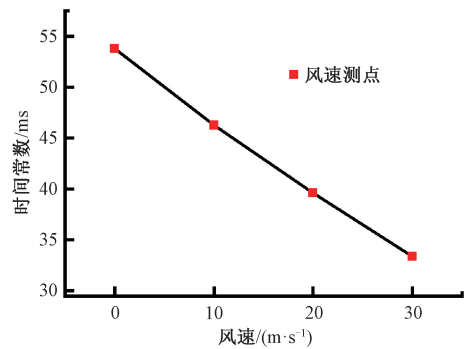


图 17 风速对时间常数测试的影响

Fig. 17 Influence of wind speed on results of time constant

4.3 不同初始温度/脉冲能量实验

在使用脉冲调制激光激励的动态响应特性实验中,激光能量直接决定响应曲线的温度幅值,即负阶跃的初始温度。在前文的仿真分析中,假设热电偶的材料热物性参数不随温度发生变化,但实际上热物性参数与温度密切相关。为了解此影响,通过改变脉冲激光参数获得不同温度幅值,并进行对比实验。实验采用 0.05 mm 热电偶为样品,产生不同温度幅值时对应的激光参数如表 3 所示。

表 3 不同温度幅值时对应激光器参数

Table 3 Laser parameters laser parameters at different temperature amplitudes

阶跃量/℃	电流幅值/A	脉宽/ms
100	32	0.3
200	59	0.3
300	45	0.4
400	54	0.4
500	39	0.5

热电偶动态响应的测试结果及归一化结果如图 18 所示。计算 100℃~500℃的时间常数分别为 46.14、44.37、43.76、46.33、44.78 ms。可见初始温度对负阶跃下时间常数测试结果几乎没有影响,与理论分析结果基本一致。大连交通大学的实验结果也表明脉冲激光能量并不影响时间常数测量值^[15],但其使用的激光器功率较小,不同能量脉冲激光激励后温度区间大致为 25℃~37℃。高温环境下热电偶的物理参数可能发生变化,对时间常数测试结果造成影响,本文实验结果更完整地验证了脉冲激光能量对时间常数的影响。

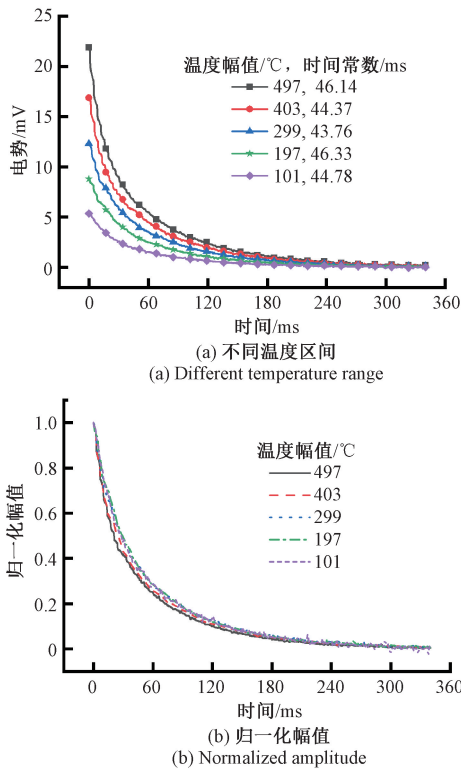


图 18 不同温度区间的实验结果

Fig. 18 Experimental results in different temperature ranges

5 结 论

本文进行了基于激光激励的高速热电偶时间常数测量方法研究,通过对比分析正阶跃和负阶跃激光激励时的热电偶传热过程,指出负阶跃测试更符合时间常数测试的基本理论。进一步利用有限元分析方法,建立了基于阶跃调制激光和脉冲调制激光的负阶跃过程中热电偶的响应模型,分析表明脉冲调制激光能得到热电偶的极限测温速度,更适用于高速热电偶的动态响应特性测试。通过搭建实验测试系统,进行了阶跃和脉冲调制下的热电偶动态响应实验,相同条件下测得时间常数分别为 73.78 和 41.34 ms,充分体现脉冲激光测试的优势。最后,利用单脉冲激光进行实验测试,结果表明不同脉冲能量对时间常数测试结果基本没影响,更小尺寸热电偶可获得更快响应速度,强制对流环境对测试结果影响巨大。因此,本研究所提出的单脉冲激光激励的负阶跃测试方法,更符合时间常数测量的基础理论,更能体现热电偶的极限测温速度,对于高速响应热电偶的动态特性测试研究具有重要意义。

参考文献

- [1] ZHANG L, LIAO X, ZHANG B, et al. Research on dynamic compensation method for explosion transient temperature in finite space [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2020, 33(6) :861-866.
- [2] JIA C, XU D, LIU G, et al. Design of gun barrel exterior wall temperature measurement device [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 184: 1546-1549.
- [3] LAWTON B. The influence of additives on the temperature, heat transfer, wear, fatigue life, and self ignition characteristics of a 155 mm gun [J]. Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the Asme, 2003, 125(3) :315-320.
- [4] WANG J Y, TIAN W, WANG Y, et al. Micromachined thermocouple for rapid detection of ultrahigh heat flux at high temperature [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(2) :2099-2106.
- [5] 国家技术监督局. 温度传感器动态响应校准: JJF 1049-1995 [S]. 1995.
The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Calibration of Temperature Sensor's Dynamic Response: JJF 1049-1995 [S]. 1995.
- [6] 张茹开. 爆炸瞬态温度测试方法研究 [D]. 太原:中北大学, 2013.
ZHANG R K, Explosion transient temperature measurement [D]. Taiyuan: North University of China, 2013.
- [7] DENG J, ZHANG L, HUI L, et al. Indium tin oxide thin-film thermocouple probe based on sapphire microrod [J]. Sensors, 2020, 20(5) :1-8.
- [8] SZAKMANY G P, ORLOV A O, BERNSTEIN G H, et al. Evaluating the frequency response of nanoscale thermocouples using temperature oscillations in nanoscale heaters [J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2016, 15(4) :567-573.
- [9] 彭晨. 快速响应型薄膜温度传感器的制备及性能测试 [D]. 成都:电子科技大学, 2020.
PENG CH, Preparation and test of fast response thin film temperature sensor [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [10] 崔云先, 杨琮, 薛生俊, 等. 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.
- [11] BUDWIG R, QUIJANO C. A new method for insitu dynamic calibration of temperature sensors[J]. Review of Scientific Instruments, 1989, 60(12): 3717-3720.
- [12] NA X, XIE J B, XU L X, et al. A rapid response micro-thermocouple used for transient temperature measurement of high-speed gas flow [J]. Chinese Science Bulletin-Chinese, 2019, 64(31):3223-3231.
- [13] BUTTSWORTH D R, STEVENS R, STONE C R. Eroding ribbon thermocouples: Impulse response and transient heat flux analysis [J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16(7): 1487-1494.
- [14] SERIO B, NIKA P, PRENEL J P. Static and dynamic calibration of thin-film thermocouples by means of a laser modulation technique [J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(11): 4306-4313.
- [15] 崔云先, 薛帅毅, 周通, 等. 薄膜瞬态温度传感器的制备及性能研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(12): 3028-3035.
- CUI Y X, XUE SH Y, ZHOU T, et al. Fabrication and performance analysis of thin film transient temperature sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(12):3028-3035.
- [16] 祁漫宇. 薄膜热电偶动态特性标定中的传热分析[D]. 杭州:中国计量学院,2016.
- QI M Y. Heat transfer analysis on dynamic characteristics calibration of thin-film thermocouple [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2016.
- [17] 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.
- [18] XU Q, LIAO G X. Dynamic modeling and compensation of fine wire thermocouple based on rocket engine [C]. Smart Structures and Materials 2001: Modeling, Signal Processing, and Control in Smart Structures, 2001: 123-130.
- [19] 李岩峰. 接触式温度传感器动态校准技术研究[D]. 太原:中北大学, 2018.
- LI Y F, Research on dynamic calibration technology of contact temperature sensor [D]. Taiyuan: North University of China, 2018.

作者简介



刘宁, 2019年于吉林大学获得学士学位, 现为重庆大学硕士研究生, 主要研究方向为测试技术。

E-mail: 201908021005@cqu.edu.cn

Liu Ning received his B.Sc. degree from Jilin University in 2019. He is currently a master student at Chongqing University. His main research interest is testing technology.



徐毅, 2013年于哈尔滨工程大学获得硕士学位, 现为北京航空航天大学航空发动机研究院高级工程师, 主要研究方向为航空发动机特种测试技术。

E-mail: xuyi950@163.com

Xu Yi received his M.Sc. degree from Harbin Engineering University in 2013. He is currently a senior engineer at Beihang University Research Institute of Aero-Engine. His main research interest is special testing technology of aeroengine.



刘显明(通信作者), 2005年于山东大学获学士学位, 2010年于中国科学院光电技术研究所获博士学位, 现为重庆大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为传感与测试技术。

E-mail: xianming65@163.com

Liu Xianming (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Shandong University in 2005 and received his Ph.D. degree from Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences in 2010. He is currently an associate professor and a Ph.D. advisor at Chongqing University. His main research interest is sensing and testing technology.