

文章编号: 1671-7449(2024)04-0420-07

基于激光法的圆箔式热流传感器动态特性研究

成 龙^{1,2}, 董和磊^{1,2*}, 汤 丽³

(1. 中北大学 半导体与物理学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 动态测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051;
3. 中国航天科工二院二十五所, 北京 100076)

摘要: 为使圆箔式热通量传感器满足不断发展的高超声速风洞等极端环境中动态热通量监测需求, 采用了大功率半导体激光器作为热通量源, 搭建了热流动态标定平台, 并对系统产生的激光束能量进行了测量分析, 确保了后续实验的科学性与合理性。系统产生热流密度达每平方米兆瓦级别, 脉冲激励宽度为毫秒级别。通过动态响应实验, 研究了戈登计动态响应时间与激励激光参数的关系。结果表明, 在一定范围内, 时间常数与激光功率、脉冲宽度为负相关关系。当激光脉冲宽度小于传感器时间常数一个数量级附近时, 可以被视为理想脉冲激励。同时还得到了激光参数与产生热通量的线性关系, 证明了采用激光法进行测试标定的可行性。

关键词: 热流传感器; 热通量; 时间常数; 激光功率; 激光脉冲宽度

中图分类号: TP212; V19 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-7449.2024054

引用格式: 成龙, 董和磊, 汤丽. 基于激光法的圆箔式热流传感器动态特性研究[J]. 测试技术学报, 2024, 38(4): 420-426.

CHENG Long, DONG Helei, TANG Li. Dynamic characterization of circular foil heat flow sensor based on laser method[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(4): 420-426.

Dynamic Characterization of Circular Foil Heat Flow Sensor Based on Laser Method

CHENG Long^{1,2}, DONG Helei^{1,2*}, TANG Li³

(1. College of Semiconductors and Physics, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;
3. 25th Institute of Aerospace Science and Industry Second Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to make the circular foil heat flux sensor meet the ever-developing needs of dynamic heat flux monitoring in extreme environments such as hypersonic wind tunnels, a heat flux dynamic calibration platform was constructed by adopting a high-power semiconductor laser as the heat flux source, and the laser beam energy generated by the system was measured and analyzed to ensure the scientificity and reasonableness of the subsequent experiments. The system generates heat flow densities in the megawatt per square meter class with pulse excitation widths in the millisecond class. The relationship between the time constant measured by the Gordon gauge and the excitation laser parameters was investigated through dynamic response experiments. The results show that the time constant is negatively correlated with the laser power and pulse width within a certain range. When the laser pulse width is less than one order of

收稿日期: 2023-10-30

作者简介: 成 龙(1997-), 男, 硕士生, 主要从事高温热流传感器研究。E-mail: chenglong_strive@163.com.

* 通信作者: 董和磊(1985-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事特种微纳传感器器件与集成系统等研究。E-mail: donghelei@nuc.edu.cn.

magnitude near the sensor time constant, it can be regarded as an ideal pulse excitation. The linear relationship between the laser parameters and the generated heat flux is also obtained, indicating the feasibility of using the laser method for test calibration. The related research content provides a reference for the dynamic calibration of sensors using the laser method.

Key words: heat flow sensor; heat flux; time constant; laser power; laser pulse width

0 引言

圆箔式热流传感器又名戈登计,是目前应用最为广泛的一种热流传感器^[1-3]。因其具有量程大、线性度好、寿命长等优点^[4-6],所以在航空航天等极端环境中更是发挥着关键作用。风洞实验是一种用于模拟高速飞行器在大气中飞行过程中所遇到的气动载荷和热负荷的实验方法。热通量,又称为热流密度,表示单位时间通过单位面积的热量,是温度的派生参数,能够更清晰地描述出热量传递的过程。准确评估飞行器表面热通量分布可以提供有关高超声速飞行器热学性能的关键信息,有助于优化设计和改进性能,对热防护系统的设计和评价至关重要^[7]。随着各类高速飞行器的速度提升,风洞研究也不断推进。其中高超声速风洞试验往往在毫秒级别,且热通量能达到兆瓦/平方米级别^[8],这对戈登计的动态性能及使用量程也提出了更高要求。

目前,热流传感器动态标定有多种方式可以实现。安万清等^[9]采用了电弧灯完成了改进的耐高温戈登计的标定,结果表明,传感器响应时间小于1s;陶伯万等^[10]利用热流密度最大为 8.58 W/cm^2 的高温黑体作为热辐射源,测得制备的基于横向热电效应的热流传感器具有 $15\sim 40\text{ ms}$ 左右的快速响应时间;张仕仲等^[11]采用爆轰驱动的激波管/隧道进行了瞬态热通量传感器动态标定实验,验证了提出的动态修正方法;付小丽等^[12]利用在两个铜电极之间的石墨板为热通量源,产生了 1 W/m^2 的脉冲热通量,并采用戈登计为标准热流计,完成了自制薄膜热流计的标定;牛艳艳等^[13]采用热风枪测得自制厚膜热流传感器的时间常数为 2.3 s ,比仿真结果时间长,原因是热风枪无法产生理想的阶跃热通量信号。

上述几种标定方式都存在一些缺陷,例如标定实验时间长、提供热流密度低、成本高、无法产生理想激励信号等。而采用激光器作为热通量源受到了更多研究人员的关注,因为采用激光法进行传感器的动态标定和研究具有容易操作、实验时间短、成

本低、产生的热通量值稳定等优点^[14]。李志玲等^[15]利用半导体激光器进行了薄膜热电堆热通量传感器的时域和频域动态标定,在脉冲响应实验中发现脉冲宽度和传感器的动态特性有关系,但未开展进一步研究;中国科学院上海微系统与信息技术研究所李铁等^[16]利用二氧化碳激光器产生了 0.44 mW/m^2 的脉冲热流,然后测得制备的微型机械热电堆传感器响应时间为 14 ms ,并且发现在确定频率(或波长)的激光照射下,激光功率与传感器输出电压之间存在一定的线性关系;Kegerise等^[17]提出了一种基于激光的辐射加热系统,用于测量自制的原子层热电堆(ALTP)热通量传感器的频率响应函数。测量结果显示,传感器的截止频率为 650 kHz ,但研究仅限于具有高频响应特性的ALTP热通量传感器。

总体看来,目前对于戈登计的动态特性研究很少,而且在时域中,大多数研究都是利用热流传感器阶跃响应的经典方法获得其时间常数。此外,在采用激光法进行其他类型热流传感器高速动态标定时,发现激光参数对传感器动态特性产生了影响,这可能会增大标定误差,加上缺乏相应的动态标定准则,导致目前的研究水平无法满足不断发展的航空航天领域动态热通量监测需求。

在本研究中,以可高速调制的大功率半导体光纤激光器作为热通量源搭建了可以产生与风洞实验相近或者更短实验时间的热通量动态标定实验平台,并对产生激光束进行测量分析。通过动态标定实验,建立了阶跃响应和脉冲响应中激光脉冲宽度和激光功率与戈登计动态响应时间常数的关系,并得到了戈登计动态标定中理想脉冲激励的条件。实验中施加最大热流密度达 3.49 mW/m^2 ,脉冲激励最小脉冲宽度为 1 ms 。

1 动态测试原理

结合理论和实际经验,由于戈登计热惯性的存在,一般将其视为一阶系统进行研究^[18]。戈登计阶跃响应曲线如图1(a)所示。响应信号可以表示为

$$Q - Q_0 = (Q_e - Q_0)(1 - e^{-t/\tau}) \quad (1)$$

当 $t=\tau$ 时,式(1)可以写成

$$Q = Q_0 + \left(1 - \frac{1}{e}\right)(Q_e - Q_0) \approx Q_0 + 0.632(Q_e - Q_0), \quad (2)$$

式中: Q 为传感器的显示热通量; Q_0 为传感器初始显示热通量; Q_e 为阶跃热流条件下传感器测得最终热通量; τ 为传感器时间常数,即热通量差值达到 $(Q_e - Q_0)$ 的63.2%所需时间。

戈登计被脉冲信号激励时的脉冲响应曲线如图1(b)所示。响应信号可以表示为^[19]

$$Q - Q_0 = (Q_p - Q_0)e^{-t/\tau}. \quad (3)$$

当 $t=\tau$ 时,式(3)可以写成

$$Q = Q_0 + \frac{1}{e}(Q_p - Q_0) \approx Q_0 + 0.368(Q_p - Q_0), \quad (4)$$

式中: Q_0 为传感器初始显示热通量也为响应结束热通量; Q_p 为脉冲热流条件下传感器显示最大热通量; τ 为传感器时间常数,即测得热通量差值减小至 $(Q_p - Q_0)$ 的36.8%所需时间。

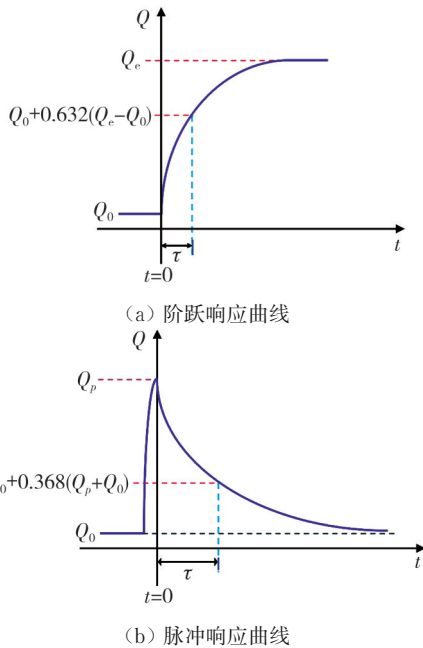


图1 戈登计动态标定原理

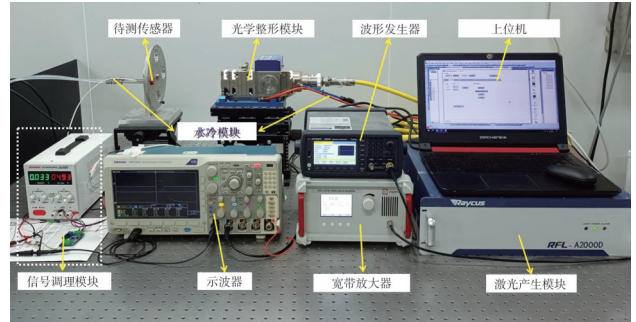
Fig. 1 Principle of dynamic calibration of gordon meters

2 实验平台设计搭建

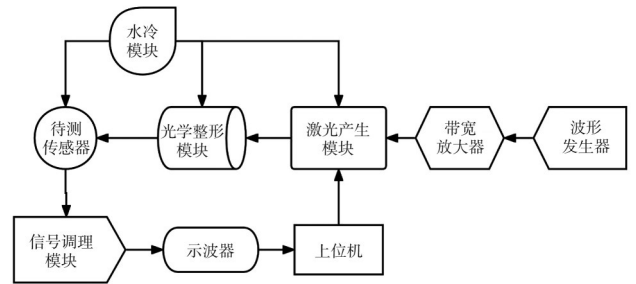
2.1 平台组成

如图2(a)所示,搭建的热通量动态标定平台包括上位机、激光产生模块(锐科,中国)、波形发生器(KEYSIGHT,美国)、带宽放大器(Aigtek,

中国)、光束整形模块、信号调理模块、示波器(Tektronix,美国)、传感器(GD-B5-5M,中国)及水冷模块组成。



(a) 热通量动态标定平台照片



(b) 热通量动态标定平台系统原理图

图2 动态标定平台系统

Fig. 2 Dynamic calibration platform system

图2(b)为动态标定平台系统原理图。激光由半导体光纤激光器输出,具有电光转换效率高、输出激光可高速调制、能量损失小等优点;波形发生器可以产生不同频率、脉宽的信号,通过宽带放大器达到激光器出光使能信号要求,实现激光调制。并且可以通过激光器上位机软件操作实现激光器功率的调节;光束整形模块可以使通过的激光束在某一位置获得不同大小的圆形光斑区域,并提升光束质量;待测戈登计通过夹具固定在光学升降台上,便于实现光路的对准及保证测试过程中传感器空间位置的一致性;信号调理模块主要包含高速放大电路和低通滤波电路,可以减小各类噪声,提高信号质量;实验数据的采集由示波器完成,并最后在上位机进行处理和显示;水冷模块对激光器及光束整形模块进行冷却,以确保激光稳定高效地输出,同时对被测传感器进行冷却,防止其在实验过程中被损坏。

2.2 激光束测试分析

为了保证后续实验结果的准确性和可靠性,必须对系统产生的激光束进行分析。使用光电探

测器(美国 THORLABS)捕捉系统输出激光束的部分能量,通过采集得到的电压信号可以显示激光束能量的变化情况。

针对阶跃响应情况,选取 3 个实验范围内的功率值进行测试。图 3 是不同激光功率连续激光束的测量结果。可以看出,电压信号在 500 ms 的范围内波动极小,表明激光束强度的时间稳定性很好。还可以看出,采集到的信号上升时间极短,因此,该系统能够产生所需的理想阶跃激光信号。

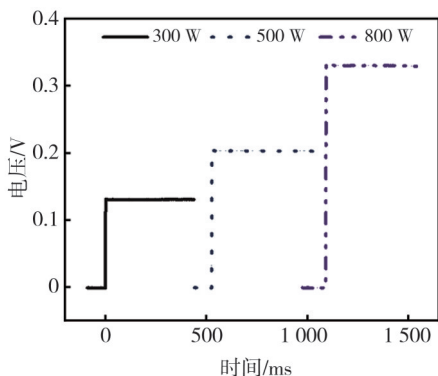


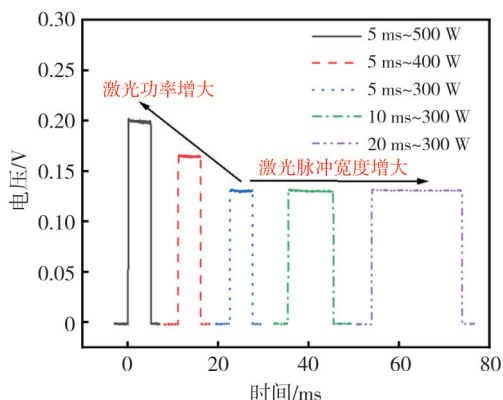
图 3 不同激光功率激光束的测量结果

Fig. 3 Measurement results of laser beams with different laser powers

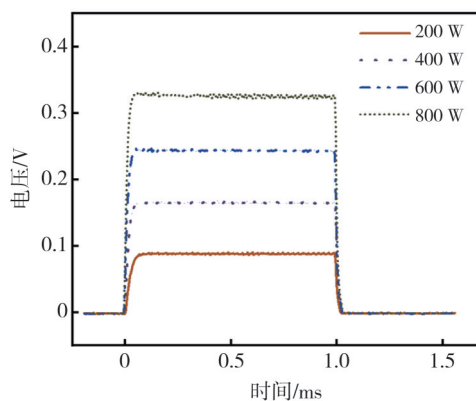
针对脉冲响应情况,先选取几组激光参数进行对照实验。图 4(a) 是不同参数下的脉冲激光束测量结果。可以看出,当脉冲宽度一定时,随着激光功率的增加,光电探测器输出电压成比例增加,说明系统设定的功率与输出激光能量的线性度较好。此外,在激光功率不变的情况下,脉宽增大,采集到的电压信号值基本一致,反映出系统在不同脉宽参数下输出激光束能量的一致性。

随后选取比实验用更窄的脉冲宽度来测试脉冲激光上升时间。图 4(b) 是不同激光功率的脉冲宽度为 1 ms 的脉冲激光束测量结果。采用信号曲线纵坐标值从阶跃值的 10% 到 90% 所需时间作为脉冲激光信号的上升时间。计算得到图示 4 个功率条件下相应曲线的上升时间分别为: 44.48, 30.40, 29.18, 22.51 μ s, 可以看出,不同激光功率下测得电压信号的上升时间均在十微秒级,远小于传感器动态响应时间,表明系统产生激光激励信号对动态实验结果的影响完全可以忽略不计。

通过上述分析,可以知道搭建的系统平台能够产生不影响后续动态响应实验的脉冲和连续激光信号。



(a) 不同参数的脉冲激光束测量结果



(b) 1 ms 脉冲激光束测量结果

图 4 脉冲激光束测量结果

Fig. 4 Pulsed laser beam measurement results

3 动态测试实验

3.1 阶跃响应

图 5(a) 是传感器在不同激光功率下的阶跃响应曲线,横坐标为时间,纵坐标为传感器测得热通量。

图 5(b) 给出了激光功率和传感器测得稳定热通量值 Q_c 、以及激光功率和传感器时间常数的关系。结果显示激光功率与 Q_c 有较好的线性正相关关系。根据式(5)可以知道,在其他参数不变的情况下,随着激光功率的增加,在戈登计表面产生的稳定热通量也会线性增加。

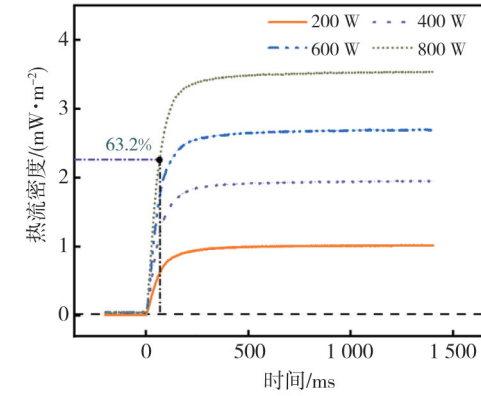
$$q = bP/A, \tag{5}$$

式中: b 为涂层吸收率; A 为传感器接受热载荷作用部分的面积。

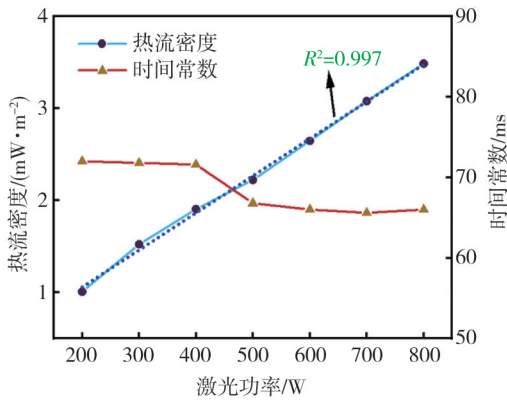
结果还显示,当激光功率处于不同的区间范围内,时间常数有一定的差值。分析原因可能是施加的热通量较大时,传感器达到热平衡时圆箔的温度更高,而康铜材料的热扩散系数在 273 K

以上随着温度的增加而略微增大^[20],又因为热扩散系数与时间常数成反比例关系,因此,传感器的时间常数会有所减小。但这还需要通过更多的实验进一步考究。

加,施加在传感器上的能量变多,使得传感器有了更大的输出值。因此,通过控制激光功率和脉冲宽度的值可以获得确定的热通量值,可用来完成戈登计的动态标定,以及确保实验中产生的最大热通量不超过传感器的测量极限。



(a) 不同激光功率下传感器阶跃响应曲线



(b) 激光功率与输出稳定热流、时间常数的关系曲线

图5 阶跃响应实验结果

Fig. 5 Step Response Experimental Results

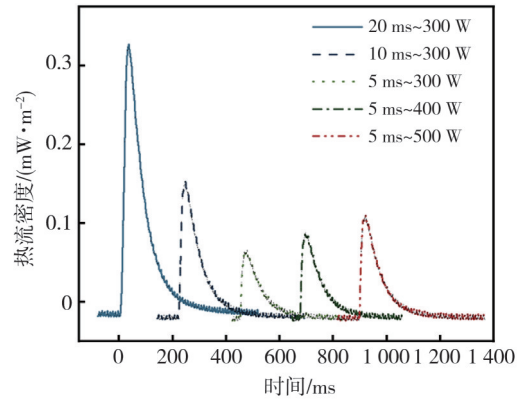
3.2 脉冲响应

接下来在多个不同的脉冲宽度下,调整激光功率值进行实验,部分传感器脉冲响应曲线如图6(a)所示。结果表明,传感器测得热通量值 Q 与激光脉冲宽度和功率均有关系。

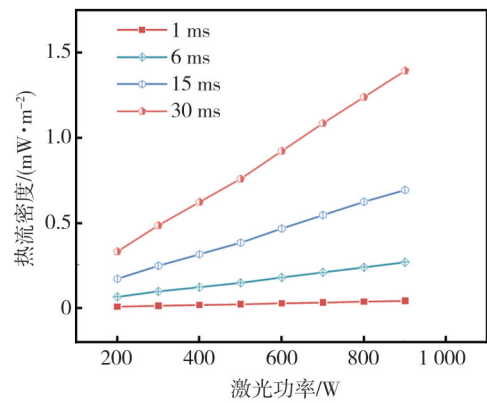
图6(b)给出了激光参数和 Q 的关系。结果表明,激光功率和脉冲宽度与 Q 均为线性正相关关系。单个激光脉冲的能量 Q_p 可以表示为^[15]

$$Q_p = P \times T_p \quad (6)$$

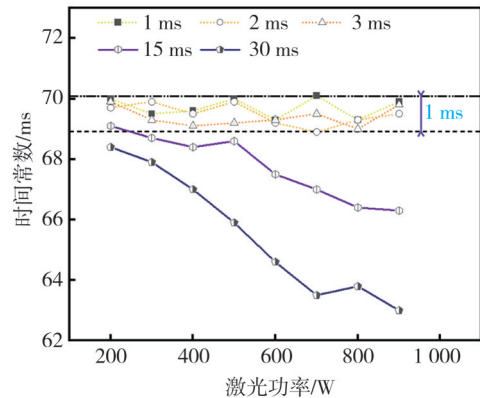
根据式(6)可知,在脉冲宽度一定时,激光功率越大,相同时间内施加在传感器上的能量越多,可转化成更多的热量,使得 ΔT 更大,因此,传感器测得热通量值线性增加。同样的,当脉冲激光功率一定时,随着激光脉冲宽度沿着图中箭头方向增大,相同能量强度的激光作用时间增



(a) 不同激光参数下的脉冲响应结果



(b) 激光参数与传感器测得热通量的关系曲线



(c) 激光参数与时间常数的关系曲线

图6 脉冲响应实验结果

Fig. 6 Plus response experimental results

图6(c)给出了激光参数和戈登计时间常数的关系。可以发现当脉冲宽度足够小即小于时间常数一个数量级大小附近时,激光参数对时间常数影响较小。但随着激光功率和脉冲宽度的增加,

时间常数会逐渐减小。结合图 6(b)可以看出,时间常数和热通量随激光参数的变化趋势恰好相反。分析原因可能是热通量的增大,使得箔片温度升高,从而康铜热扩散系数增大,使得传感器达到热平衡的时间缩短。

通过上述实验研究可以知道:连续激光功率设置为 800 W 时,测得最大热流密度为 3.49 mW/m^2 ;阶跃激励下测得戈登计的最小时间常数为 65.6 ms,最大时间常数为 72 ms。在脉冲激励下,脉冲宽度最大设置为 30 ms,激光功率 900 W 时,测得最大热流密度为 1.39 mW/m^2 ,同时测得最小时间常数为 63 ms;实验脉冲宽度最小设置为 1 ms;测得最大时间常数为 70.1 ms。

综上,阶跃响应测得时间常数在 70 ms 附近,且随着激光功率增大,会产生一定偏差;而理想脉冲激励条件下脉冲响应测得时间常为 69.5 ms 左右,在脉宽较大的情况下,测得时间常数与激光功率为负相关关系,且相同功率下随着脉宽的增大,时间常数也会增大。总体看来,选择理想脉冲激励进行戈登计动态测试相关误差会更小。

4 结 论

本文利用半导体激光器搭建了热流传感器动态测试平台,研究了激光参数对戈登计动态性能参数时间常数标定结果的影响。研究表明:激光参数在一定范围内会对传感器时间常数标定结果产生较大的影响。阶跃响应实验中,最大热流密度值达 3.9 mW/m^2 ,测得最小时间常数为 65.6 ms。脉冲响应实验中,最大热流密度值达 1.39 mW/m^2 ,测得最小时间常数为 63 ms。脉冲激励下,当激光脉冲宽度足够小时,激光参数对传感器时间常数的影响较小,可以视为理想的脉冲激励。因此,要在与实际使用情景一致的条件下进行标定,或者在标定时要考虑由于激光参数变化产生的误差部分。此外,还得到了激光参数与产生热通量的关系,证明了激光法标定的合理性。这些工作有助于推进更准确、更可靠的高超声速风洞热通量测量技术的开发。在未来,还需通过更优异的数据处理方法,建立更准确的模型,进一步提高动态标定精度。

参考文献:

[1] LUBBOCK R J, LUQUE S, ROSIC B R. A new

transient high heat flux convection calibration facility for heat transfer gauges in high enthalpy flows [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2018, 140(4): 041701.

[2] STATHOPOULOS P, HOFMANN F, ROTHENFLUH T, et al. Calibration of a gardon sensor in a high-temperature high heat flux stagnation facility[J]. *Experimental Heat Transfer*, 2012, 25(3): 222-237.

[3] GUILLOT E, ALXNEIT I, BALLESTRIN J, et al. Comparison of 3 heat flux gauges and a water calorimeter for concentrated solar irradiance measurement [J]. *Energy Procedia*, 2014, 49: 2090-2099.

[4] PURPURA C, TRIFONI E, PETRELLA O, et al. Gardon gauge heat flux sensor verification by new working facility [J]. *Measurement*, 2019, 134: 245-252.

[5] FU T, ZONG A, TIAN J, et al. Gardon gauge measurements of fast heat flux transients [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 100: 501-507.

[6] YU J, BU X Z, CHU X G. Research and design of gardon heat flux sensor [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 889/890: 833-837.

[7] HERMANN T, NAVEDI I, MCGILVRAY M. Tool for rapid transient transpiration-cooled reentry simulation[J]. *AIAA Journal*, 2019, 58(2): 842-853.

[8] JIANG Z, HU Z, WANG Y, et al. Advances in critical technologies for hypersonic and high-enthalpy wind tunnel[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(12): 3027-3038.

[9] AN W, LIU X, ZHANG Y, et al. Research and development of surface heat flux sensor for high speed aircraft [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1345(3): 32086.

[10] SONG S, WANG Y, YU L. Highly sensitive heat flux sensor based on the transverse thermoelectric effect of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7-\delta$ thin film[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(12): 123902.

[11] ZHANG S, WANG Q, LI J, et al. A fast-response calorimeter with dynamic corrections for transient heat transfer measurements [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(17): 6143.

[12] FU X, LIN Q, PENG Y, et al. High-temperature heat flux sensor based on tungsten-rhenium thin-film thermocouple [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(18): 10444-10452.

[13] DONG H, NIU Y, WANG H, et al. All-ceramic heat-flux sensor for continuous measurement under high temperature and harsh environmental conditions [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Mea-*

- surement, 2023, 72(0): 1-8.
- [14] MARTUCCI A, De GREGORIO F, MUSTO M, et al. Innovative calibration methodology for gardon gauge heat flux meter [C]//2020 IEEE 7th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), Pisa, Italy, 2020: 288-293.
- [15] LI Z, YIN J, WANG G, et al. Dynamic calibration of a thin-film heat-flux sensor in time and frequency domains[J]. *Sensors*, 2022, 22(14): 1-18.
- [16] TIAN W, WANG Y, ZHOU H, et al. Micromachined thermopile based high heat flux sensor[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2020, 29(1): 36-42.
- [17] KEGERISE M A, RUFER S J. Unsteady heat-flux measurements of second-mode instability waves in a hypersonic flat-plate boundary layer [J]. *Experiments in Fluids*, 2016, 57(8): 1-35.
- [18] 师钰璋, 王高, 李志玲, 等. 戈登式辐射热流传感器动态特性测试技术[J]. *传感技术学报*, 2021, 34(5): 575-580.
- SHI Yuzhang, WANG Gao, LI Zhiling, et al. Dynamic measurement technology of gardon heat-flux gauges [J]. *Journal of Transduction Technology*, 2021, 34(5): 575-580. (in Chinese)
- [19] 黄漫国, 师钰璋, 梁晓波, 等. 基于脉冲热流激励的戈登式热流传感器动态测试[J]. *测控技术*, 2023, 42(2): 19-23.
- HUANG Manguo, SHI Yuzhang, LIANG Xiaobo, et al. Dynamic test of gardon heat flux sensor based on pulse heat flux excitation [J]. *Measurement & Control Technology*, 2023, 42(2): 19-23. (in Chinese)
- [20] SUNDQVIST B. Thermal diffusivity and thermal conductivity of chromel, alumel, and constantan in the range 100 — 450 K [J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 72(2): 539-545.

声 明

本刊已许可中国知网、万方数据知识服务平台、超星网等多家单位以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述各家网络著作权使用费，所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议，请在投稿时说明，本刊将按作者说明处理。
