

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.02.11

# 辐射热流计响应时间测量方法研究

任佳, 董磊

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**摘要:** 为满足瞬态热流的测量需求, 解决辐射热流计响应时间无法准确测量的问题, 设计辐射热流计响应时间测量装置。该装置利用高功率激光器快响应特性形成热流阶跃系统, 使用高速采集系统同步采集热流计输出, 对热流计响应曲线进行分析计算得到响应时间。对比多种响应时间测试方案, 并通过试验对辐射热流计响应时间测量装置的快响应特性进行了验证, 结果表明: 该装置测量辐射热流计响应时间最快为 4.4 ms, 能够有效满足大量程、快响应的辐射热流计响应时间精准、高效测试的需求, 促进了我国瞬态辐射热流计量技术的发展。

**关键词:** 辐射热流计; 响应时间; 测量装置

中图分类号: TB9

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)02-0091-07

## Research on response time measuring method of radiant heat flux meter

REN Jia, DONG Lei

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

**Abstract:** In order to meet requirements of transient heat flux measurement and solve the problem that the response time of radiant heat flux meter cannot be accurately measured, we designed a response time measuring device of radiant heat flux meter, which uses the fast response characteristics of high-power laser to form a heat flux step system, uses a high-speed acquisition system to collect the output of the heat flux meter synchronously. The response curve of the heat flux meter is analyzed and calculated to obtain the response time. A variety of response time testing schemes are compared, and the fast response characteristics of the radiation heat flux meter response time measurement device is verified through experiments. The results show that the fastest response time of the device to measure the radiation heat flux meter is 4.4 ms, which can effectively meet the response time test requirements of large-range and fast response radiation heat flux meter, and promote the development of transient radiant heat flux measurement technology in China.

**Key words:** radiant heat flux meter; response time; measuring device

## 0 引言

辐射热流计广泛应用于高超声速飞行器和运载火箭的研制、生产和试验测试等领域。在高超声速飞行器的热环境试验中, 通过辐射热流计测

量高超飞行器头部驻点热流, 可为热防护材料提供可靠数据<sup>[1]</sup>。在火箭发动机的地面试验中, 通过辐射热流计测量火箭尾焰热流, 可得到燃料的燃烧热量, 改进燃料配比<sup>[2]</sup>。在民用消防领域, 需要利用辐射热流计测量防火材料表面的辐射热

收稿日期: 2022-11-18; 修回日期: 2023-02-08

基金项目: 国家“十四五”技术基础项目(JSJL2020205B003)

引用格式: 任佳, 董磊. 辐射热流计响应时间测量方法研究[J]. 计测技术, 2023, 43(2): 91-97.

**Citation:** REN J, DONG L. Research on response time measuring method of radiant heat flux meter[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(2):91-97.



流,为材料设计提供指导。

我国针对辐射热流计的灵敏系数和示值误差测量校准已研制了一系列装置<sup>[3]</sup>,例如:航空工业计量所采用“入腔法”在黑体辐射源上实现了传递标准辐射热流计的绝对法校准,量程可达4 MW/m<sup>2</sup>;同时,研制了基于激光的测量上限为12 MW/m<sup>2</sup>的辐射热流计校准装置,可以实现大量程辐射热流计的校准。但目前我国仍缺乏针对高速辐射热流计响应时间的测量校准装置,只能使用辐射热流计生产厂家提供的根据测量原理推导出的数据进行校准。这种通过辐射热流计的原理推导计算的数据难以代表实际使用过程中的测试数据,因此亟需研究能够准确测量辐射热流计响应时间的校准装置。

针对辐射热流计响应时间校准问题,师钰璋等人提出了Gardon式辐射热流传感器动态特性测试方法,采用半导体激光器测量微透镜阵列光学系统实现光斑均匀性获取,并利用一阶系统响应曲线进行变换来确定时间常数。该方法需要进行一系列数据处理,计算时间常数,经微透镜阵列处理后的光斑均匀性在一定面积内不大于1%的测量值。

为满足我国瞬态热流领域的测量需求,并简化数据处理流程,本文基于高功率激光器快响应特性,通过研究响应时间校准方法,建立辐射热流计响应时间校准装置。通过一系列试验验证该装置的实际性能,并进行响应时间的测量不确定度评定。

## 1 辐射热流计响应时间校准方法

由于辐射热流计热惯性的存在,一般将其视为一阶系统进行研究<sup>[4]</sup>。辐射热流计对阶跃热流输入的响应为

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

式中: $Q$ 为热流计显示热流值, W/cm<sup>2</sup>;  $Q_0$ 为热流计的初始显示热流值, W/cm<sup>2</sup>;  $Q_e$ 为阶跃热流输入值, W/cm<sup>2</sup>;  $t$ 为对阶跃热流的响应时间, s;  $\tau$ 为热流计的响应时间, s。

由式(1)可以看出热流计的响应时间属于典型的按指数变化量。当 $t = \tau$ 时,式(1)可简化为

$$Q - Q_0 = 0.632(Q_e - Q_0) \quad (2)$$

此时的响应时间是热流计的显示热流值与初始显示热流值之差达到热流阶跃的63.2%所需时间,如图1所示。

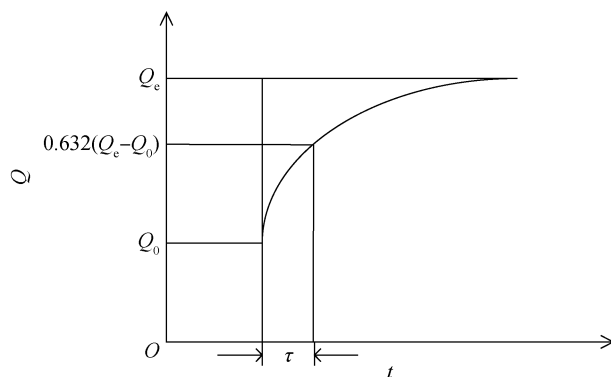


图1 辐射热流计动态特性响应曲线

Fig.1 Dynamic characteristic response curve of radiant heat flux meter

根据被校热流计量程范围选择合适的热流值进行响应时间校准,记录其输出曲线,取输出曲线中的输出最大值为 $Q_e$ ,热流输出之前初始状态为 $Q_0$ ,计算得到阶跃热流输出 $Q_e - Q_0$ 的63.2%,在响应曲线上找到对应的时间 $t$ ,根据阶跃热流起始时间 $t_0$ ,可计算得到响应时间 $\tau$ ,即

$$\tau = t - t_0 \quad (3)$$

## 2 辐射热流计响应时间校准装置

辐射热流计响应时间校准装置基于高功率激光器快响应特性(激光器启动时间小于0.1 ms)形成热流阶跃系统,并使用高速采集系统同步采集热流计的输出,对热流计的响应曲线进行分析,计算得出响应时间。辐射热流计响应时间测量装置原理框图如图2所示。

响应时间测量装置主要由高功率光纤激光器、光耦器<sup>[5]</sup>、光纤、外光路系统以及相配套的冷却系统、电源系统、高速数据采集系统组成。高功率激光器产生的激光经光耦器进入光纤,通过外光路系统的准直镜后输出平行光,平行光经过积分镜反射聚焦后,形成均匀的工作光斑。外光路系统集成在激光头内,主要由光纤接口、准直模块、积分镜模块、保护镜模块组成,通过阵列光学系统实现光纤传输激光的准直、聚焦功能,满

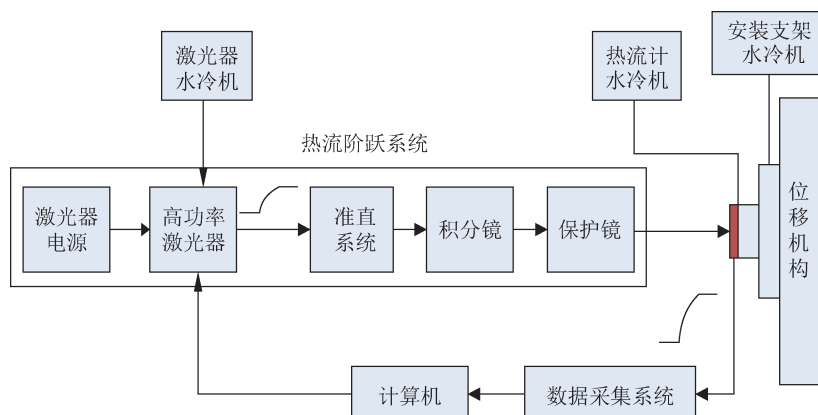


图2 热流计响应时间测量装置原理框图

Fig.2 Schematic diagram of response time measuring device of heat flux meter

足激光热流源的扩束、匀化要求，产生的激光信号通过外光路系统中的准直模块、积分镜模块、保护镜模块生成均匀的光斑，并作用在热流计的前端敏感面。激光头采用模块化设计，可实现快速切换，通过更换积分镜模块可以实现光斑大小的切换。冷却系统分别对激光器、辐射热流计及热流计安装支架进行循环水冷。通过Tektronix公司的DAQ6510高速采集系统实现热流计输出电压信号的采集与处理<sup>[6]</sup>，高速数据采集系统最高采样率达1 MS/s，能够有效满足辐射热流计输出电压信号的高速采集需求。激光热源系统具有光电转换效率高、输出激光可高速调制、光斑相对均匀、功率密度高等优点，作为辐射热流计响应时间校准装置的辐射热流源较为理想。辐射热流计响应时间校准装置实物图如图3所示。

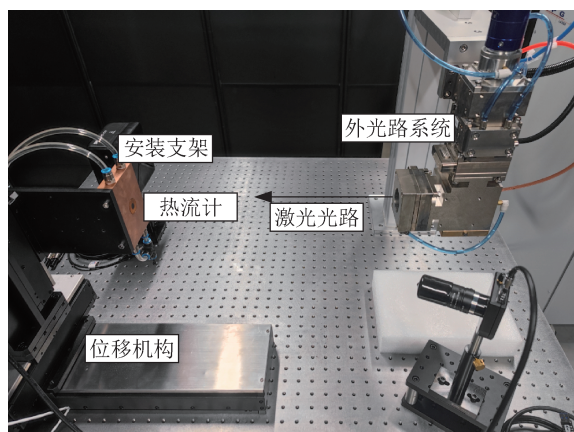


图3 辐射热流计响应时间测量装置实物图

Fig.3 Response time measuring device of radiant heat flux meter

### 3 试验验证

#### 3.1 试验方法

热流计动态特性校准方法如表1所示<sup>[7]</sup>，传统的激光器法采用负阶跃热流信号或机械斩波器激励热流计，该方法只能测量普通热流计，不适用于高速辐射热流计<sup>[8]</sup>。本文利用高功率激光器快响应特性形成热流阶跃系统，使用高速采集系统同步采集热流计的输，分析热流计的响应曲线并计算得到响应时间，实现对热流计动态特性的校准<sup>[9-10]</sup>。为了证明本文采用的方案适用于高速辐射热流计响应时间的测试，设计了快门动态特性测试系统<sup>[11]</sup>，针对快门与激光器激励两种动态特性测量方法开展响应时间测试试验，并对比分析测试结果。设定激光器功率为2900 W，工作光斑为15 mm × 15 mm，此时对应的输出热流约为12 MW/m<sup>2</sup>。对该条件下的热流响应时间进行多次测量，取平均值作为该热流计的响应时间<sup>[12-13]</sup>。

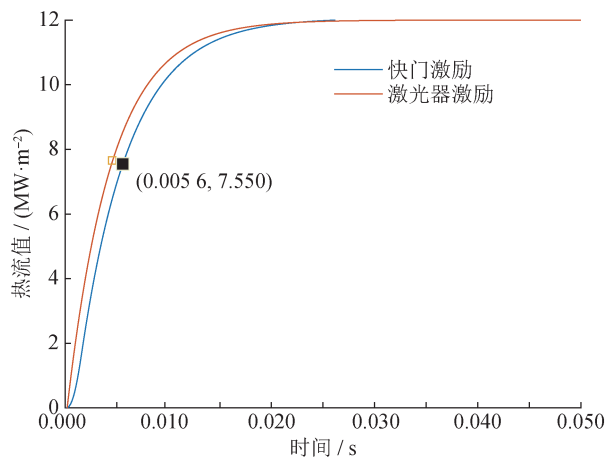
在使用快门装置进行响应时间测试时，快门开启时间为2 ms时，快门开度为 $\Phi 6$  mm。在使用激光器阶跃系统进行响应时间测试时，激光器激励阶跃为0.1 ms，激光器功率设为2900 W。对比两种激励方式采集到的热流计响应曲线，如图4所示。当采用快门开启时间为2 ms激励时，测得的热流计响应时间为5.6 ms；采用激光器激励时，测得的热流计响应时间为4.6 ms。

通过改变快门装置的气缸压力，调整快门开启时间，当快门开启时间为10 ms时，测得的热流计响应时间为9.3 ms，如图5所示。显然快门激励

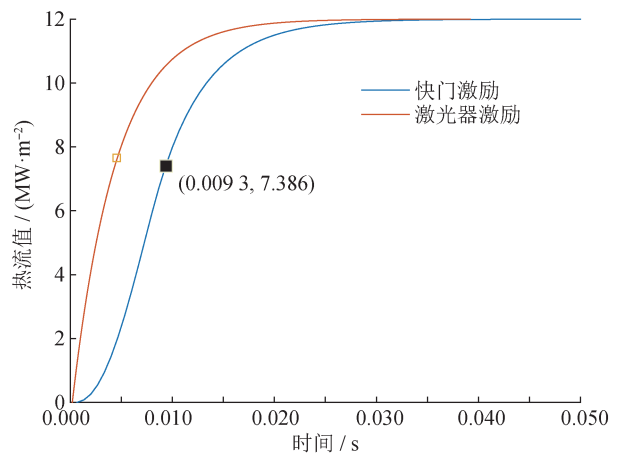
表1 热流计动态特性校准方法

Tab.1 Calibration methods of dynamic characteristics of heat flux meter

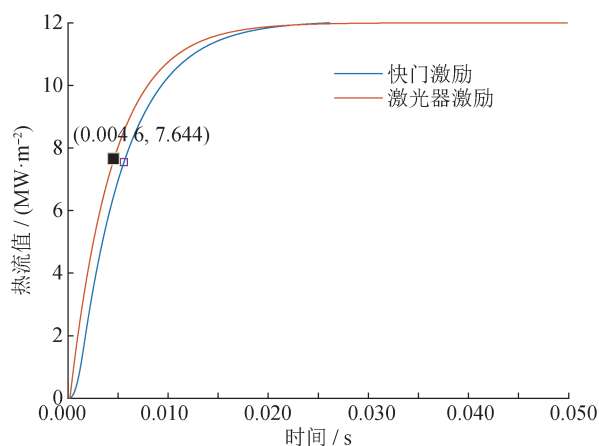
方法	原理	缺点
电弧风洞法	由风洞和内置加热器产生高温稳定气流,通过外部弹射装置产生热流阶跃信号	热流阶跃信号延迟时间过长,设备研建成本高,对热流计表面冲刷严重,通常一次试验后热流计寿命严重受损
激波管法	通过激波的压缩作用使膜片破裂,产生阶跃的热流激励信号	设备结构复杂,作用时间过短,重复性差
黑体辐射源、弧光灯法	采用加装有光阑的黑体炉、弧光灯等作为热源,产生调制的热流信号	无法产生大热流,且设施庞大
传统激光器法	采用激光器作为热源,利用负阶跃热流信号或机械斩波器激励热流计	只能测量普通热流计,无法测量高速辐射热流计



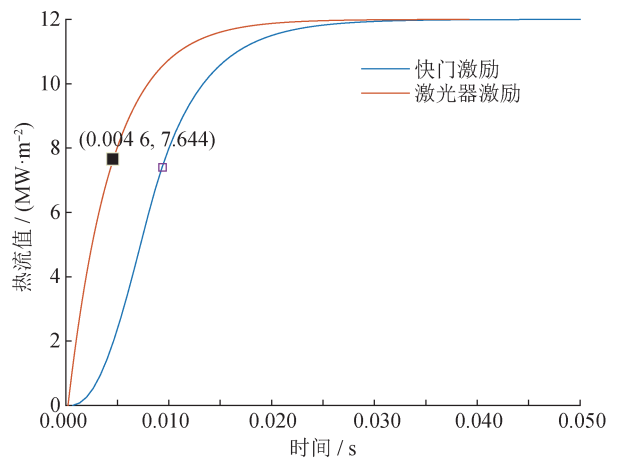
(a) 快门激励测量热流计响应曲线  
(a) Response curve of heat flux meter measured by shutter excitation



(a) 快门激励测量热流计响应曲线  
(a) Response curve of heat flux meter measured by shutter excitation



(b) 激光器激励测量热流计响应曲线  
(b) Response curve of heat flux meter measured by laser excitation



(b) 激光器激励测量热流计响应曲线  
(b) Response curve of heat flux meter measured by laser excitation

图4 快门时间为2 ms时,快门与激光器激励测量热流计响应曲线

Fig.4 Response curves of heat flux meter measured by shutter and laser excitations at the shutter time of 2 ms

图5 快门开启时间为10 ms时,快门与激光器激励测量热流计响应曲线

Fig.5 Response curves of heat flux meter measured by shutter and laser excitations at the shutter time of 10 ms

得到的响应时间相较激光器激励得到的响应时间滞后，产生这种现象的原因是：快门装置受限于机械件的运动，最快开启时间为 2 ms，而高功率激光器的启动时间为 0.1 ms，启动明显更快。故最终选择利用激光器快响应特性，建立热流计响应时间测量装置。

### 3.2 试验结果

采用热流计响应时间测试装置测量量程为 12 MW/m<sup>2</sup> 的热流计响应时间，实测动态特性响应曲线如图 6 所示，取多次测量的平均值，得到响应时间为 4.8 ms。测量量程为 2 MW/m<sup>2</sup> 的热流计响应时间，取多次测量的平均值，得到响应时间为 4.4 ms，如

表 2 所示。针对薄膜热流计<sup>[14-15]</sup>等响应时间更短的热流计，该装置也可满足其响应时间测量需求。

## 4 测量不确定度评定

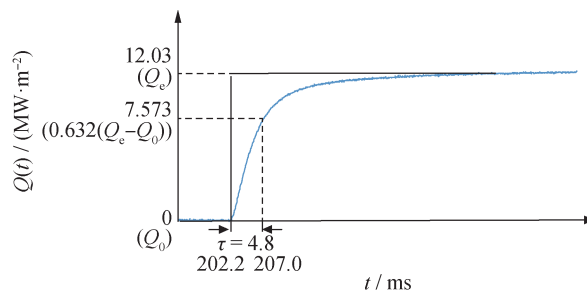


图 6 12 MW/m<sup>2</sup> 辐射热流计动态特性响应曲线

Fig.6 Dynamic characteristic response curve of 12 MW/m<sup>2</sup> radiant heat flux meter

表 2 各量程范围热流计响应时间

Tab.2 Response time of heat flux meter in each range

阶跃热流/(MW·m <sup>2</sup> )	响应时间平均值/ms	扩展不确定度 $U(k=2)$ / ms
2	4.4	0.6
12	4.8	0.5

热流计响应时间校准不确定度来源主要包括：  
 ①测量重复性引入的标准不确定度  $u_1$ ：可通过贝塞尔公式计算实验标准偏差得出；  
 ②测量装置启动时间引入的标准不确定度  $u_2$ ：测量装置启动时间约为 0.1 ms，按均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则  $u_2 = 0.06$  ms；  
 ③热流阶跃系统均匀性引入的标准不确定度  $u_3$ ：热流阶跃系统均匀性取 1%，在产生阶跃的 63.2% 时，取热流变化 ±1% 所对应的的时间变化量，按均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ；  
 ④数据采集系统引入的标准不确定度  $u_4$ ：数据采集系统引入的不确定度分量主要包括电压幅值测量引入的

不确定度分量、采集时间测量引入的不确定度分量以及采样速率引入的不确定度分量，由于数据采集系统电压测量功能的精度等级为 0.05 级，采样速率不小于 1 MHz，故数据采集系统引入的不确定度分量可忽略不计。

测量结果的合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \quad (4)$$

扩展不确定度为

$$U = k \cdot u_c \quad (k=2) \quad (5)$$

计算扩展不确定度为 0.4 ms。热流计响应时间校准不确定度分量一览表如表 3 所示。

表 3 热流计响应时间校准标准不确定度分量一览表

Tab.3 List of uncertainty components of response time calibration of heat flux meter

序号	来源	分类	符号	灵敏系数	分布	k 值	标准不确定度
1	测量重复性引入的不确定度分量	A 类	$u_1$	1	-	-	0.19 ms
2	激光热源系统启动时间引入的不确定度分量	B 类	$u_2$	1	均匀	$\sqrt{3}$	0.06 ms
3	热流阶跃系统均匀性引入的不确定度分量	B 类	$u_3$	1	均匀	$\sqrt{3}$	0.09 ms
4	数据采集系统引入的不确定度分量	B 类	$u_4$	1	均匀	$\sqrt{3}$	忽略不计

## 5 结论

研制了辐射热流计响应时间测量装置,该装置可准确获取辐射热流计响应曲线并直接得到响应时间,且经准直系统、积分镜、保护镜后获取的光斑均匀性为0.5%。通过试验测试辐射热流计响应时间测量装置的实际性能,数据结果证实其测量辐射热流计响应时间最快为4.4 ms。该装置能够为快响应辐射热流计响应时间的测量校准提供准确可靠数据,为高超声速飞行器及火箭等领域的瞬态热流测量提供有力保障。

### 参考文献

- [1] 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 Y Z, WANG G, LI Z L, et al. Dynamic measurement technology of Gardon heat-flux gauges[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2021, 34(5): 575-580. (in Chinese)
- [2] 高庆华, 郗殿福. 热流测量技术发展综述[J]. 航天器环境工程, 2020, 37(3): 218-227.  
GAO Q H, HONG D F. The development of heat flux measurement technology [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2020, 37(3): 218-227. (in Chinese)
- [3] 张翠平. 大量程热流传感器标定方法研究[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(10): 77-79.  
ZHANG C P. Research on calibration method of large range heat flow sensor [J]. Measurement and Testing Technology, 2018, 45(10): 77-79. (in Chinese)
- [4] 张俊祺, 邝浩欣, 赵化业, 等. 热流响应时间测试方法研究[J]. 宇航计测技术, 2020, 40(4): 75-77.  
ZHANG J Q, KUANG H X, ZHAO H Y, et al. Study of measurement for response time of heat flux sensor [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2020, 40(4): 75-77. (in Chinese)
- [5] 杜高社, 卜英华, 薛常佳, 等. 大功率高光斑均匀性半导体激光复合光源[J]. 应用光学, 2011, 32(3): 574-578.  
DU G S, BU Y H, XUE C J, et al. High power high spot homogeneity semiconductor laser composite light source [J]. Applied Optics, 2011, 32(3): 574-578. (in Chinese)
- [6] 蒋洪明. 动态测试理论与应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 1999.  
JIANG H M. Theory and application of dynamic testing [M]. Nanjing: Southeast University Press, 1999. (in Chinese)
- [7] 杨军, 张力, 李新良. 动态计量技术发展中的几个关键问题[J]. 计测技术, 2021, 41(2): 8-18.  
YANG J, ZHANG L, LI X L. Several primary problems in the development of dynamic metrology [J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(2): 8-18. (in Chinese)
- [8] 赵业辉, 包轶颖, 赵瑜, 等. 固体火箭发动机羽流温度和热流密度测量[J]. 固体火箭技术, 2018, 41(3): 289-294.  
ZHAO Y H, BAO Y Y, ZHAO Y, et al. Measurement of plume temperature and heat flux of solid rocket motor [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2018, 41(3): 289-294. (in Chinese)
- [9] 于靖. 圆箔式辐射热流传感器的温度补偿方法研究[J]. 计量技术, 2016, 2016(3): 3-5, 37.  
YU J. Research on temperature compensation method of circular foil radiant heat flow sensor [J]. Metrology Technology, 2016, (3): 3-5, 37. (in Chinese)
- [10] 田玉坤, 何钦华, 吴江, 等. Gardon式热流传感器测试误差分析[J]. 强度与环境, 2019, 46(2): 51-58.  
TIAN Y K, HE Q H, WU J, et al. Test error analysis of Gardon heat flow sensor [J]. Intensity and Environment, 2019, 46(2): 51-58. (in Chinese)
- [11] 张翔宇, 刘佩进, 李鹏, 等. 固定火箭发动机热流测量方法及试验研究[J]. 固体火箭技术, 2011, 34(1): 131-134.  
ZHANG X Y, LIU P J, LI P, et al. Heat flux measurement method and experimental research in SRM [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2011, 34(1): 131-134. (in Chinese)
- [12] 王劲松, 迟晓珠. 特种传感器发展及趋势[J]. 计测技术, 2019, 39(4): 57-63.  
WANG J S, CHI X Z. Development trend of special sensors [J]. Metrology & Measurement Technology, 2019, 39(4): 57-63. (in Chinese)
- [13] 董磊, 蔡静, 杨永军. 入腔法校准辐射热流计入腔位

- 置的确定[J]. 计测技术, 2015, 35 (3): 43-47.
- DONG L, CAI J, YANG Y J. Determination of the location for heat flux sensor inside the cavity using in-cavity calibration method [J]. Metrology & Measurement Technology, 2015, 35(3): 43-47. (in Chinese)
- [14] 金新航, 马炳和, 邱涛, 等. 超燃冲压发动机温度及热流测量技术研究进展[J]. 试验流体力学, 2018 (4): 74-81.
- JIN X H, MA B H, QIU T, et al. Temperature and heat flux measurement technologies in scramjet [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2018(4): 74-81. (in Chinese)
- [15] ZHANG C. Experimental study on measurement and calculation of heat flux in supersonic combustor of scramjet

[J]. Journal of Thermal Science, 2015, 24 (3) : 254-259.

(本文编辑:刘圣晨)



第一作者:任佳(1990—),女,工程师,硕士,主要研究方向为热流及热物性测量技术。