

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.06.13

真空式高温黑体辐射源性能评价

董磊, 任佳, 张岚, 胡玮宸

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为解决真空环境下辐射热流传感器的校准问题, 采用热解石墨作为加热元件, 通过标准光电高温计测量并控制温度, 研建了 50 mm 大口径真空式高温黑体辐射源装置。开展了装置性能指标的测试试验和评价, 结果显示装置 10 min 内的温度稳定性不超过 0.5 °C, 径向温度均匀性不超过 0.1%(t 为设定温度点), 符合相应标准要求。最后计算分析了热流校准过程中真空式高温黑体辐射源装置性能指标引入的不确定度分量, 为推动该装置在热流校准、辐射温度校准等领域中的应用提供了重要支撑。

关键词: 高温黑体; 热流; 温度校准

中图分类号: TB94

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2023) 06-0114-07

Performance evaluation of vacuum high-temperature blackbody radiation source

DONG Lei, REN Jia, ZHANG Lan, HU Weichen

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

Abstract: In order to solve the calibration problem of radiation heat flux sensors in vacuum environments, a 50 mm large-diameter vacuum high-temperature blackbody radiation source device was developed by using pyrolytic graphite as the heating element, and measuring and controlling the temperature using a standard photoelectric pyrometer, and the performance indexes of the device were tested and evaluated. The temperature stability of the device within 10 min was not more than 0.5 °C, and the radial temperature uniformity was not more than 0.1% (t is the set temperature), which met the requirements of relevant regulations. Finally, the uncertainty components introduced by the performance indexes of the vacuum high-temperature blackbody radiation source in the process of heat flow calibration were calculated and analyzed. The research results provide strong support for promoting the application of the device in the calibrations of heat flow, radiation temperature and other fields.

Key words: high-temperature blackbody; heat flux; temperature calibration

0 引言

高温黑体辐射源是高温大热流(即温度高于 1 600 °C, 热流大于 500 kW / m²)的发生源, 采用石墨材料作为发热元件, 通过抽真空、灌注惰性气体或吹扫惰性气体的方式防止石墨高温氧化, 可

分为真空式(闭口式)高温黑体辐射源和开口式高温黑体辐射源。

高温黑体辐射源在热学、光学计量领域具有广泛用途, 主要应用于辐射温度计、热像仪的检定和校准^[1], 光谱辐照度测量^[2], 高温共晶点灌注及复现^[3-6], 高温钨铼热电偶校准^[7], 高温材料

收稿日期: 2023-11-27; 修回日期: 2023-12-20

基金项目: 国家“十四五”计量技术基础科研项目(JSJL2020205B003)

引用格式: 董磊, 任佳, 张岚, 等. 真空式高温黑体辐射源性能评价[J]. 计测技术, 2023, 43(6): 114-120.

Citation: DONG L, REN J, ZHANG L, et al. Performance evaluation of vacuum high-temperature blackbody radiation source[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(6): 114-120.



表面光谱发射率测量^[8]，高温热扩散率测量等，亦可用于校准热流传感器。

美国 Murthy A V 等人在常压条件下利用开口式高温黑体辐射源，实现了量程上限 500 kW/m^2 的热流传感器校准^[9]；法国国家计量院采用真空中温黑体辐射源作为标准温度源，在压强小于 1 Pa （可视为真空条件），温度 $100 \sim 900 \text{ }^\circ\text{C}$ （对应热流范围 $1 \sim 100 \text{ kW/m}^2$ ），将辐射热流量值溯源至温度标准——标准 S 型热电偶^[10]。

目前我国缺乏可在真空环境下进行大辐射热流校准的高温黑体辐射源^[11]，因此，本文研制了真空式高温黑体辐射源装置，其采用热解石墨作为加热元件并构成黑体空腔，通过标准光电高温计测量并控制温度，可作为标准温度源实施辐射热流传感器的绝对法原级校准^[12]，将辐射热流量值溯源至温度标准。对真空式高温黑体辐射源装置的关键性能指标（温度稳定性、温度均匀性、标准温度石英玻璃窗口透过率、黑体空腔有效发射率）进行测试试验及评价^[13-14]，并对热流校准过程中该装置性能指标引入的不确定度分量进行分析。

1 装置原理及特点

真空式高温黑体辐射源原理示意图如图 1 所示，其采用由热解石墨环构成的石墨组件作为加热元件（石墨组件结构示意图如图 2 所示），通过水

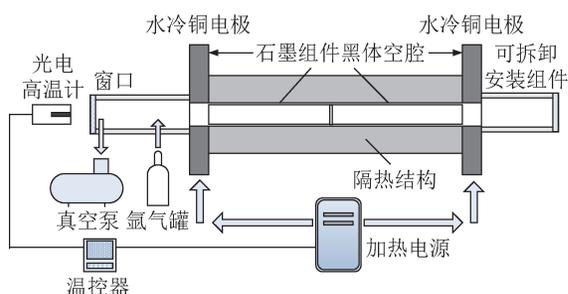


图 1 真空式高温黑体辐射源原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the principle of vacuum high-temperature blackbody radiation source

冷铜电极以低电压大电流的方式进行通电加热，采用外层石墨隔热屏、石墨毡、水冷罩作为隔热结构。多片内径为 50 mm 的热解石墨环构成一定长径比的黑体空腔，中间为靶面（黑体空腔底面），其中一侧腔体用于温度测量及控制，称为测控腔，另一侧用于实施辐射温度计、辐射热流计等仪器

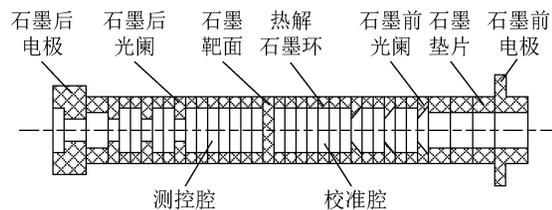


图 2 石墨组件结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of graphite component structure

的校准，称为校准腔。

真空式高温黑体辐射源装置实物图如图 3 所示，其特点如下：①采用升华速率较低的热解石墨材料作为加热元件，加热元件的使用寿命较长；②热解石墨环及石墨光阑叠加构成黑体空腔的形式，易于黑体空腔结构调整，便于单片元件更换；③通过标准光电高温计测量并控制黑体温度，装置的测温准确度高，控温稳定性好。自主研制的 UP PRO 型标准光电高温计^[15]具备高精度模拟量控制信号输出、自动切换量程、多点控温等功能，与具备 PID 调节功能的 SR23 型温控器、加热电源配合，实现了装置温度的闭环控制；④装置基于



图 3 真空式高温黑体辐射源装置实物图

Fig.3 Device of vacuum high-temperature blackbody radiation source

可拆卸安装组件设计，既可以闭口式运行，又可以开口式运行。装置闭口式运行时，可抽真空至 10^{-1} Pa 或更高真空度，亦可灌注惰性气体氩气，内部保持微正压。可根据不同测试试验需求，安装

热流传感器、热电偶等，亦可安装光学镜片窗口；⑤采用直流电源对加热元件进行供电加热，相较于变压器交流加热方式，电磁干扰小，对电网品质无影响；⑥装置安装了冷却水流量、冷却水超温等自动报警系统，使用安全可靠。

2 装置性能指标测试试验及评价

2.1 温度稳定性

分别采用LP4型标准光电高温计在1000、1500、2000、2700℃温度点，B型热电偶在1000、1500℃温度点，对黑体辐射源温度稳定性进行测试试验。温度稳定性测试试验原理示意图如图4所示。

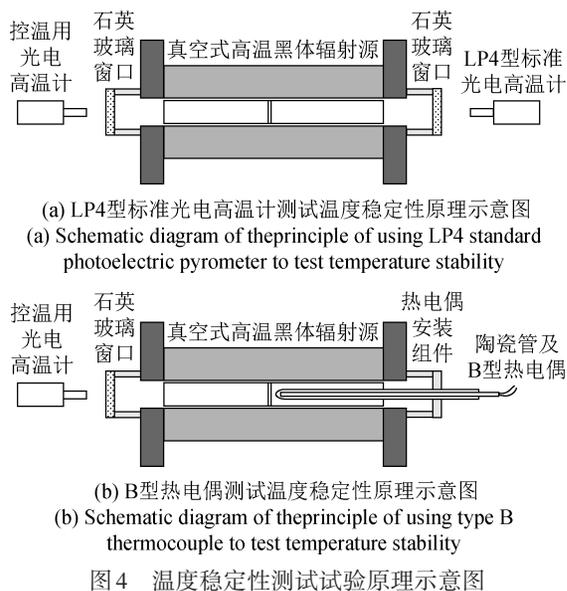


图4 温度稳定性测试试验原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of the principle of temperature stability test

参照JJG(军工)161-2019《800℃~3000℃辐射测温用参考黑体辐射源检定规程》^[14]，分别利用LP4型标准光电高温计和B型热电偶在设定的温度点测量高温黑体辐射源的温度，每1min测量1次，10min共测量10次，计算得出高温黑体辐射源的稳定性。测试试验中，LP4型标准光电高温计距离靶面约800mm，透过石英玻璃窗口测量黑体辐射源温度。B型热电偶放置在陶瓷管内，可沿黑体辐射源径向自由移动，前端距离靶面约5mm，陶瓷管沿轴线深入到黑体空腔内，通过热电偶安装组件进行固定，并保证系统内部密封。温度稳定性测试试验结果详见表1。

表1 温度稳定性测试试验结果

Tab.1 Test results of temperature stability 单位:℃

温度点	10 min内LP4型光电高温计测试稳定性	10 min内B型热电偶测试稳定性
1 000	0.5	0.3
1 500	0.4	0.4
2 000	0.4	
2 700	0.5	

根据温度稳定性测试试验的结果可以得出：不论采用腔外辐射测温法还是腔内测温法，在1000~2700℃的温度范围内，真空式高温黑体辐射源的10min温度稳定性均不超过0.5℃，符合JJG 856-2016《工作用辐射温度计检定规程》中规定的温度稳定性不超过0.1%t的要求。

2.2 温度均匀性

首先，采用LP4型标准光电高温计在1000、1500、2000、2700℃温度点对黑体辐射源靶面径向温度均匀性进行测试，然后采用B型热电偶在1000、1500℃温度点对黑体辐射源轴向温度均匀性进行测试。温度均匀性测试试验原理示意图如图5所示。

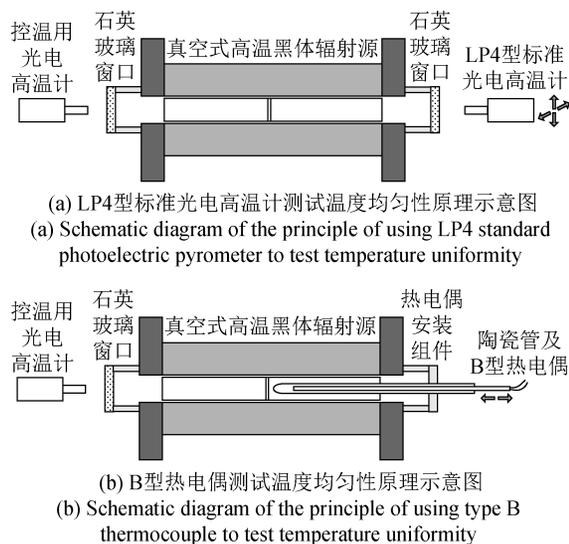


图5 温度均匀性测试试验原理示意图

Fig.5 Schematic diagram of the principle of temperature uniformity test

对黑体辐射源靶面径向温度均匀性进行测试时，参照JJG(军工)161-2019检定规程的要求，在设定的温度点条件下，将LP4型标准光电高温计

上、下、左、右依次移动相同距离，各位置与中心位置温度之差的绝对值的最大值，即为黑体辐射源的靶面径向温度均匀性。靶面径向温度均匀性测试位置示意图如图6所示。

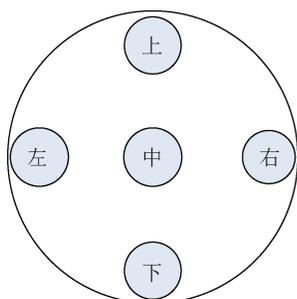


图6 靶面径向温度均匀性测试位置示意图

Fig.6 Schematic diagram of the testing location for the target surface radial temperature uniformity

黑体空腔内径为50 mm，为了改善内部温场而设置的光阑孔径为38 mm，考虑到LP4型标准光电高温计的视场范围，将其移动距离分别设为5、8 mm（对应的测试范围直径分别为10、16 mm），实际测量过程中沿靶面径向移动超过10 mm时，温度会发生较明显的改变。测试试验时，LP4型标准光电高温计距离靶面约800 mm，其测点直径约为1 mm。靶面径向温度均匀性测试试验结果如表2所示。

根据靶面径向温度均匀性测试试验的结果可以得出：温度范围为1 000 ~ 2 700 °C，直径16 mm测试范围内，真空式高温黑体辐射源的靶面径向

表2 靶面径向温度均匀性测试试验结果

Tab.2 Test results of target surface radial temperature uniformity 单位：°C

温度点	直径10 mm 测试范围的 温度均匀性	直径16 mm 测试范围的 温度均匀性
1 000	0.7	0.9
1 500	1.0	1.3
2 000	1.6	1.9
2 700	1.7	2.2

温度均匀性不超过0.1%*t*，符合JJG 856-2016检定规程中规定的温度均匀性不超过0.15%*t*的要求。

大口径的高温黑体辐射源可以更好地满足被校仪器视场要求，提高黑体辐射源的实际应用能

力^[16]，但是温度均匀性可能会相对较低。如文献[17]中所述，加热电流通过构成黑体空腔的石墨管壁截面传输，黑体空腔靶底的电流几乎为0 A，不产生电热，靶面温场的形成是黑体空腔壁面对靶面辐射换热的结果，因此靶面边缘温度必然相较靶面中心温度更高，实际测量结果也显示上、下、左、右位置温度相较中心温度更高。

通过在陶瓷管内移动B型热电偶，对黑体辐射源轴向温度均匀性进行测试。在一定距离内，各测量点处温度最大值减去最小值，即为黑体辐射源的轴向温度均匀性。轴向温度均匀性测试试验结果如图7所示。

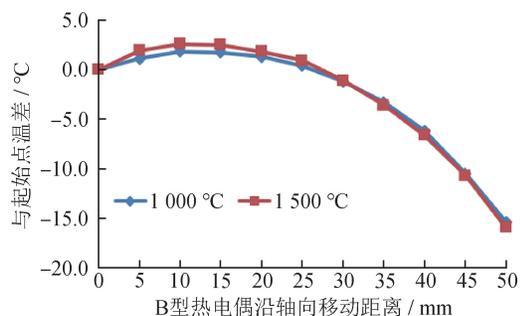


图7 轴向温度均匀性测试试验结果

Fig.7 Test results of axial temperature uniformity

根据轴向温度均匀性测试试验的结果可以得出：真空式高温黑体辐射源在1 000 °C温度点时的轴向温度均匀性相较1 500 °C温度点时更好；在1 500 °C温度点，B型热电偶轴向移动距离为0 ~ 50 mm时，真空式高温黑体辐射源的轴向温度均匀性最优为0.7 °C。

B型热电偶放置在陶瓷管内，前端与靶面存在一定距离，实际测量起始点距离靶面约为5 mm。由图7可以看出，B型热电偶移动距离为0 ~ 15 mm时，轴向温度逐渐增加，主要原因为测温部件与黑体空腔辐射换热角系数中靶面换热角系数占比较大，且靶面自身温度较低，导致靠近靶面处温度较低。B型热电偶移动距离为0 ~ 40 mm时，轴向温度变化在10 °C以内，但随着热电偶向黑体空腔口移动，黑体空腔向外辐射增加，导致壁面温度降低，测量温度急剧下降。热电偶所测轴向温场能够在一定程度上反映出黑体空腔壁面的温度梯度。

2.3 标准温度石英玻璃窗口透过率修正

如果将真空式高温黑体辐射源作为标准温度

源，控温的UP PRO型标准光电高温计需要能够测量出黑体空腔的标准温度。测量温度时，光电高温计的探测光必须穿石英玻璃窗口，因此需要给出标准温度下石英玻璃窗口透过率的修正值。UP PRO型标准光电高温计的工作单波长为0.66 μm，所测温度为亮度温度，因此标准温度下石英玻璃窗口透过率修正值，即为光电高温计所测亮度温度的石英玻璃窗口透过率修正值。

$$\Delta T = T - c_2 \cdot \frac{1}{\lambda \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{1}{\tau} \left[\frac{\tau}{\exp(c_2/(\lambda \cdot T)) - 1} + (1 - \tau) \frac{1}{\exp(c_2/(\lambda \cdot T_{bg})) - 1} \right] \right\}} \quad (1)$$

式中： ΔT 为亮度温度石英玻璃镜片透过率修正值， T 为所需修正的亮度温度， c_2 为第二辐射常数， λ 为光电高温计工作波长， τ 为石英玻璃镜片透过率， T_{bg} 为环境温度。

表3 亮度温度石英玻璃镜片透过率修正值

Tab.3 Brightness temperature correction for quartz glass lens transmittance 单位: °C

亮度温度	按透过率0.92 计算得到修正值	实测修正值
1 000	6.2	6.5
1 100	7.2	7.4
1 200	8.3	8.6
1 300	9.4	9.5
1 400	10.6	10.4
1 500	11.9	11.1
1 600	13.3	12.8
1 700	14.8	14.1
1 800	16.3	15.7
1 900	17.9	17.1
2 000	19.6	18.2
2 100	21.3	19.5
2 200	23.2	21.2
2 300	25.1	22.9
2 400	27.0	24.9
2 500	29.1	27.2
2 600	31.2	29.8
2 700	33.4	32.1

采用第2种方法测试得出加石英玻璃镜片的光电高温计的修正值，亮度温度石英玻璃镜片透过率修正值如表3所示。

获得窗口透过率修正值的方法有2种：①测量得出窗口透过率，然后依据普朗克定律计算得出修正值；②在UP PRO型标准光电高温计前面放置石英玻璃镜片，利用辐射温度计检定装置进行测量，将测量结果与其它温度标准LP4测量得到的结果进行比对，从而得到光电高温计修正值。

采用第1种方法，依据式(1)计算得到窗口透过率修正值。

按透过率0.92计算得到的修正值和实测值接近，证明石英玻璃镜片透过率在0.92左右。

在真空式高温黑体辐射源装置上，可以直接采用实测的亮度温度石英玻璃镜片修正值，对UP PRO型标准光电高温计测得的黑体空腔温度进行修正，从而确定黑体空腔的标准温度。

2.4 黑体空腔有效发射率

在高温条件下，测定黑体空腔的有效发射率十分困难，测量不确定度很大，因此一般采用建模仿真计算方法评估黑体空腔的有效发射率，本文利用基于蒙特卡洛法的STEEP321软件对真空式高温黑体辐射源黑体空腔有效发射率进行建模计算。

根据黑体空腔的几何形状建立模型，在参考相关实测数据的基础上，设定空腔壁面温度分布以及黑体空腔表面材料光谱发射率，黑体空腔有效发射率计算模型如图8所示。

真空式高温黑体辐射源黑体空腔法向有效发

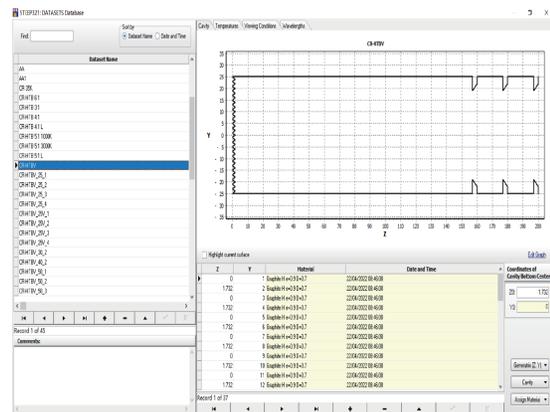


图8 黑体空腔有效发射率计算模型

Fig.8 Calculation model for effective emissivity of blackbody cavity

射率计算结果评估为0.998(2), 对应波长范围0.6~5 μm, 满足JJG 856-2016检定规程中规定的发射率指标要求。

3 装置测量不确定度分析

实施热流校准过程中, 真空式高温黑体辐射源装置性能指标引入的不确定度分析如下:

1) 装置温度稳定性为0.5 °C, 在1 000 °C温度点引入的相对不确定度最大, 约为0.05%, 依据斯蒂芬-玻尔兹曼定律, 辐射热流与温度的4次方成正比, 装置温度稳定性对热流测量引入的相对不确定度为0.2%, 按均匀分布, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则装置温度稳定性引入的相对标准不确定度为0.12%。

2) 装置径向温度均匀性为0.1%*t*, 则装置径向温度均匀性对热流测量引入的相对不确定度为0.4%, 按均匀分布, 包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则装置径向温度均匀性引入的相对标准不确定度为0.24%。本文采用“入腔法”实施热流传感器校准, 未来将进一步测试分析热流传感器入腔位置对热流测量的影响, 确定热流传感器入腔测量时径向位置和轴向位置引入的不确定度。

3) 装置标准温度引入的相对不确定度为0.2%, 该不确定度由加了石英玻璃镜片的温度标准器——光电高温计通过辐射温度计检定装置与其它温度标准装置进行比对校准获得。装置标准温度对热流测量引入的相对不确定度为0.8%, 包含因子 $k = 2$, 则装置标准温度引入的相对标准不确定度为0.4%。

4) 装置黑体空腔法向有效发射率为0.998(2), 只能作为腔外辐射温度计校准时的影响因素进行分析, 未来将建立热流传感器入腔的等效腔体模型, 进一步计算分析等效腔体模型的有效发射率及其引入的不确定度。

4 结论

研制了50 mm大口径真空式高温黑体辐射源装置, 对该装置的温度稳定性、径向温度均匀性、黑体空腔有效发射等性能指标进行了测试试验及计算评估, 指标满足JJG 856-2016检定规程以及JJF(军工)161-2019检定规程的要求, 装置可应用

于辐射温度计的检定和校准。开展了装置轴向温度均匀性、标准温度石英玻璃窗口透过率修正测试试验, 相关数据可为本装置实施热流传感器或高温钨铼热电偶校准提供参考。利用真空式高温黑体辐射源装置, 可以实现辐射热流至标准温度的量值溯源, 解决真空环境下热流校准瓶颈问题, 为航天器真空热环境模拟试验以及热防护系统热真空模拟试验提供计量保障。此外, 装置也将在大口径共晶点研制、超高温特种传感器标定等方面发挥作用。

参考文献

- [1] KOZLOVA O, BRIAUDEAU S, RONGIONE L, et al. Calibration of radiation thermometers up to 3 000 °C: effective emissivity of the source [J]. *Int J Thermophys*, 2015(36): 1726-1742.
- [2] 吴志峰, 代彩虹, 于家琳. 高温黑体性能评定和温度测量[J]. *应用光学*, 2012, 33(5): 926-930.
WU Z F, DAI C H, YU J L. Performance investigation of blackbody BB3500M and temperature measurement [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(5): 926-930. (in Chinese)
- [3] WANG T, DONG W, LIU F. Optimization of the thermogauge furnace for realizing high temperature fixed points [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2013.
- [4] KHLEVNOY B, GRIGORYEVA I. Development of large-area high-temperature fixed-point blackbodies for photometry and radiometry[J]. *Metrologia*, 2018.
- [5] 孟苏, 刘旭东, 蔡静, 等. 高温共晶点灌注方法研究[J]. *计测技术*, 2020, 40(5): 48-52.
MENG S, LIU X D, CAI J, et al. Research on filling method of high temperature wutectic point [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2020, 40(5): 48-52. (in Chinese)
- [6] 孟苏, 刘旭东, 蔡静, 等. ZrC-C包晶固定点研制及评价[J]. *计量学报*, 2022, 43(1): 35-39.
MENG S, LIU X D, CAI J, et al. The development and evaluation of the ZrC-C peritectic point [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2022, 43(1): 35-39. (in Chinese)
- [7] 牛兴军, 张婷婷, 方立德, 等. 基于高温黑体炉的钨铼热电偶校准方法研究[J]. *计量学报*, 2022, 43(5): 590-596.
NIU X J, ZHANG T T, FANG L D, et al. Calibration of tungsten-rhenium thermocouple based on high temperature

- blackbody furnace[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2022, 43(5): 590-596. (in Chinese)
- [8] 袁良, 袁林光, 董再天, 等. 高温状态下的材料法向光谱发射率测量[J]. *应用光学*, 2023, 44(3): 580-585.
YUAN L, YUAN L G, DONG Z T, et al. Measurement of normal spectral emissivity of materials at high temperature [J]. *Applied Optics*, 2023, 44(3): 580-585. (in Chinese)
- [9] MURTHY A V, FRASER G T, DEWITT D P. Experimental in-cavity radiative calibration of high-heat-flux meters [J]. *Journal of Thermophysics & Heat Transfer*, 2006, 20(2): 327-335.
- [10] FILTZ J R, VALIN T, HAMEURY J, et al. New vacuum blackbody cavity for heat flux meter calibration [J]. *Int J Thermophys*, 2009, 30: 236-248.
- [11] 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)
- [12] Fire tests - calibration and use of heat flux meters: ISO 14934-2[S]. 2013.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. 工作用辐射温度计检定规程: JJG 856-2016 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China. Verification regulation of radiation thermometers for work use: JJG 856-2016 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2016. (in Chinese)
- [14] 国家国防科技工业局. 800 °C ~ 3000 °C辐射测温用参考黑体辐射源检定规程: JJF(军工) 161-2019[S]. 北京: 国防科技工业出版社, 2019.
State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense. Verification regulation of reference blackbody radiation sources for radiation temperature measurement between 800 °C ~ 3000 °C: JJF (Military Industry) 161-2019 [S]. Beijing: National Defense Science and Technology Industry Press, 2019. (in Chinese)
- [15] 李丹, 张学聪, 蔡静. 应用于标准光电高温计的多点控温系统设计[J]. *计测技术*, 2022, 42(4): 63-68.
LI D, ZHANG X C, CAI J. Design of multi-point temperature control system applied to standard photoelectric pyrometer [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2022, 42(4): 63-68. (in Chinese)
- [16] 张岚, 蔡静, 路林锋. 影响辐射测温用黑体辐射源应用的因素分析[J]. *计测技术*, 2020, 40(4): 1-4.
ZHANG L, CAI J, LU L F. Analysis of factors affecting application of blackbody radiator for radiation thermometry [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2020, 40(4): 1-4. (in Chinese)
- [17] 潘亦捷, 原遵东, 陆启迪, 等. 黑体辐射源 HT-9500 的空腔温场测量[J]. *计量技术*, 2018(4): 10-13.
PAN Y J, YUAN Z D, LU Q D, et al. HT-9500 measurement of cavity temperature field of blackbody radiation source [J]. *Measurement Technique*, 2018(4): 10-13. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 董磊 (1981—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为热流及辐射温度测量技术。