

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.04.01

影响辐射测温用黑体辐射源应用的因素分析

张岚, 蔡静, 路林锋

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 介绍并分析了影响黑体辐射源应用的关键因素, 包括口径、有效发射率、测点温差及控温复现性。通过分析关键因素与黑体辐射源三种溯源方式的关系, 给出了关于黑体辐射源选型以及溯源方式的建议。

关键词: 黑体辐射源; 有效发射率; 测点温差; 控温复现性

中图分类号: TB942

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2020)04-0001-04

Analysis of Factors Affecting Application of Blackbody Radiator for Radiation Thermometry

ZHANG Lan, CAI Jing, LU Linfeng

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

Abstract: The key factors affecting the application of Blackbody Radiator are introduced, including caliber, effective emissivity, probe temperature difference and temperature control repeatability. Based on the analysis of the above factors, the corresponding verification methods and improvement measures are proposed in combination with specific examples. The relationship between the above four key factors and the three traceability methods of Blackbody Radiator is analyzed, and suggestions on the selection of Blackbody Radiator and the traceability methods are given.

Key words: blackbody radiator; effective emissivity; probe temperature difference; temperature control repeatability

0 引言

随着红外测温技术的发展, 开展红外温度计检定和校准的计量机构迅速增加, 检定所用标准器具——辐射测温用黑体辐射源(以下简称黑体辐射源)种类繁多、性能差异很大, 不同性能的黑体辐射源在相同测试条件下测试结果可能有很大的差异。依据黑体辐射源校准规范 JJF 1552-2015《辐射测温用-10℃~200℃黑体辐射源校准规范》, JJG(军工)162-2019《-50℃~1000℃辐射测温用参考黑体辐射源检定规程》, JJG(军工)161-2019《800℃~3000℃辐射测温用参考黑体辐射源检定规程》, JJG(军工)180-2019《-50℃~300℃辐射测温用浴式参考黑体辐射源》及 JJG 856-2015《工作用辐射温度计》中对黑体辐射源的要求, 结合市场上占有率比较高的黑体辐射源, 分析影响其应用的关键因素, 提出相应的改善方法。

1 影响黑体辐射源应用的因素介绍

目前, 黑体辐射源的溯源方式主要包括^[1]: ①以接触式温度计为标准直接溯源, 主要适用于恒温槽式黑体辐射源和热管式黑体辐射源; ②以辐射温度计为

标准直接溯源, 主要适用于高温黑体辐射源; ③以有效亮度温度整体进行溯源, 主要适用于中温参考黑体辐射源。针对三种溯源方式, 影响黑体辐射源应用的参数主要有: 口径、有效亮度温度、温度均匀度、温度波动度、有效发射率、测点温差以及控温复现性。

其中, 有效亮度温度、温度均匀度和温度波动度, 在黑体辐射源检定规程/校准规范上均有明确的测量方法, 在辐射温度计检定规程 JJG 856-2015 中对其技术指标也给出了明确的规定^[2-5]。因此, 本文主要对口径、有效发射率、测点温差以及控温复现性的影响进行分析 and 评价。

2 影响因素分析

2.1 黑体辐射源的口径

依据检定规程 JJG 856-2015 中的要求, 选用黑体辐射源的直径一般应不小于被检辐射温度计视场直径的 1.4 倍或 1.7 倍^[5]。直径较小会限制黑体辐射源的实际应用能力, 而直径过大会影响温度均匀性、有效发射率等指标。

对市场上已有的大部分辐射温度计视场进行分析, 具体可参见表 1。由表可以得出: 当 D:S 小于 20:1 时,

采用腔式黑体辐射源不能满足视场的要求，需要使用大口径 150 mm 的面辐射源进行测试。当 D:S 在 20:1 和 60:1 之间时，测温仪温度范围在 1600 °C 以内，要满足较大多数测温仪的视场要求，推荐口径为 60 mm (50 ~ 600 °C) 和 40 mm (300 ~ 1600 °C) 的腔式黑体辐射源。当 D:S 不小于 75:1 时，测温仪温度范围大于 1000 °C，要满足较大多数测温仪的视场要求，推荐口径为 40 mm (600 ~ 1600 °C) 和 25 mm (800 ~ 3000 °C) 的腔式黑体辐射源。

表 1 辐射温度计视场分析表

辐射温度计 D:S 值	视场/mm@ 焦距/mm	1.4 倍视场/mm
8:1	75@ 600	105
10:1	60@ 600	84
12:1	50@ 600	70
	75@ 900	105
20:1	78@ 1000	109
	50@ 1000	70
	40@ 800	60
30:1	30@ 600	42
	30@ 900	42
50:1	38@ 1200	53
	18@ 900	25
	6@ 300	9
60:1	20@ 1000	28
	24@ 1200	34
75:1	19@ 1150	27
75:1	16@ 1200	22

2.2 黑体辐射源的有效发射率^[6-7]

黑体辐射源的有效发射率是最关键的技术指标，但目前还没有明确的测试方法可以对任意形状和性能的黑体辐射源的有效发射率进行评价和验证。

对于以接触式温度计为标准直接溯源的恒温槽式黑体辐射源或热管式黑体辐射源而言，其温场均匀性比较好，且具有明确的空腔形状设计，内部喷涂已知发射率的高发射率涂层，可采用等温腔模型依据 Monte-carlo 法进行有效发射率的计算。对于其他的腔式黑体辐射源，可使用多种方法对黑体辐射源的理论有效发射率进行验证，对该指标进行评价。下面以同一台黑体辐射源 HW112 为例，介绍两种常用方法对有效发射率进行计算和验证。

1) 理论计算分析

根据黑体辐射源空腔的形状、轴向温度分布、黑体空腔表面材料光谱发射率的实测值，依据 Monte-carlo 法进行有效发射率的计算。采用标准热电偶传感

器对黑体腔轴向温度场进行测试，测试步骤为：在黑体辐射源黑体腔内放入两根标准 S 型热电偶(加陶瓷套管)，待温度稳定之后，记录两根标准偶的温度；移动一根标准偶，分别至距离靶底位置 0, 2, 3, 4, 5, 8, 10 cm 处，温度稳定后，记录两根标准偶温度，计算得出轴向温度分布场。以 600 °C 和 1000 °C 测量结果为例，将测试数据代入 STEEP 软件，采用 Monte-carlo 法进行有效发射率计算，结果见图 1。

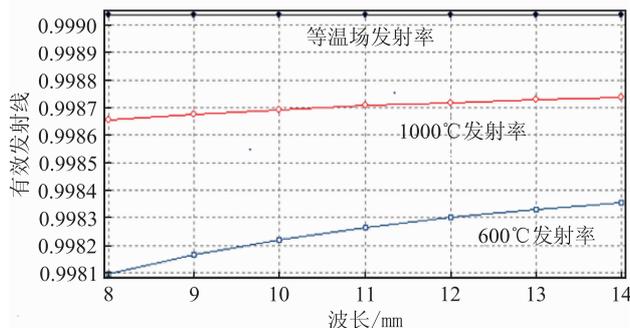


图 1 黑体辐射源有效发射率计算结果

由图 1 可得，通过轴向温度场进行理论计算得出：600 °C 时有效发射率约为 0.9983；1000 °C 时有效发射率约为 0.9987。

2) 不同波长下有效亮度温度校准结果验证

由于黑体辐射源有效发射率不等于 1，相同温度下，不同波长的亮度温度存在一定的差异，因此可采用不同波长下有效亮度温度校准结果的差异对其有效发射率进行验证。当有效发射率 $\varepsilon = 0.995$ 和 0.998 时，采用普朗克定律计算，不同波段下亮度温度的误差值见表 2 和表 3。

对同一台黑体辐射源，在 600 °C 和 1000 °C 时分别用传递用辐射温度计 TRT2 (波段为 3.9 μm) 和 TRT4.82 (波段为 8 ~ 14 μm) 对黑体辐射源进行测试^[8]，测试结果见表 4 所示。其中实测差值为辐射温

表 2 $\varepsilon = 0.995$ 时亮度温度误差 °C

温度	误差值		
	波段: 2.2 ~ 2.7 μm	波段: 3.9 μm	波段: 8 ~ 14 μm
300	-0.28	-0.44	-0.96
400	-0.39	-0.61	-1.30
500	-0.51	-0.80	-1.67
600	-0.65	-1.02	-2.05
700	-0.81	-1.26	-2.45
800	-0.98	-1.51	-2.87
900	-1.16	-1.79	-3.29
1000	-1.36	-2.08	-3.72

表3 $\epsilon = 0.998$ 时亮度温度误差 $^{\circ}\text{C}$

温度	误差值		
	波段: 2.2~2.7 μm	波段: 3.9 μm	波段: 8~14 μm
300	-0.11	-0.44	-0.38
400	-0.16	-0.24	-0.52
500	-0.20	-0.32	-0.67
600	-0.26	-0.41	-0.82
700	-0.32	-0.50	-0.98
800	-0.39	-0.60	-1.15
900	-0.46	-0.71	-1.32
1000	-0.54	-0.83	-1.49

度计 TRT2 与 TRT4.82 测量结果之差; $\epsilon = 0.995$ 理论差值为有效发射率 0.995 时, 相同温度下 3.9 μm 与 8~14 μm 亮度温度差值, 可参照表 2 计算得出; $\epsilon = 0.998$ 理论差值为有效发射率 0.998 时, 相同温度下 3.9 μm 与 8~14 μm 亮度温度差值, 可参照表 3 计算得出。根据表 4 可看出, 600 $^{\circ}\text{C}$ 和 1000 $^{\circ}\text{C}$ 时, 有效发射率均位于 0.995 与 0.998 之间。

表4 黑体辐射源亮度温度测试结果 $^{\circ}\text{C}$

温度	实测差值	$\epsilon = 0.995$ 理论差值	$\epsilon = 0.998$ 理论差值
600	0.9	1.03	0.41
1000	1.0	1.64	0.66

根据图 1 和表 4 可以看出, 采用理论计算分析方法与采用多波长有效亮度温度校准结果推算两种方法得出的有效发射率存在一定的差异, 分析原因主要是: 理论计算分析方法中, 使用标准热电偶测量轴向温度有一定的测量误差, 靶底温度存在鼓肚现象, 造成有效发射率偏高; 多波长有效亮度温度校准结果推算方法中, 两台辐射温度计固有误差的不确定度较大, 对测量结果造成一定影响。

2.3 黑体辐射源的测点温差

黑体辐射源的测点温差是指由于黑体辐射源的温度不均匀性引起的黑体空腔底部的辐射面中心温度与确定控温表温度的温度计(或者是直接作为标准的测温温度计)的测点之间的温度差。该因素主要对以接触式温度计作为标准器类的黑体辐射源产生影响。对于以辐射温度计作为标准器和以有效亮度温度整体溯源的黑体辐射源, 则消除了测点温差造成的影响。

对于使用接触式温度计作为标准器的恒温槽式黑体辐射源和热管式黑体辐射源, 温度均匀性好, 可将

其测温区域近似为等温区, 即空腔底部辐射面温度与接触式温度计测得的温度温差小, 测点温差的影响可忽略不计。

由于影响因素较多, 测点温差不易准确测量, 因此除均匀性较好的恒温槽式黑体辐射源和热管式黑体辐射源以外, 其他不等温腔黑体辐射源不建议使用接触式温度计作为标准器进行溯源, 以消除测点温差的影响。

2.4 黑体辐射源的控温复现性

黑体辐射源的控温复现性是指当黑体辐射源控温仪表设置相同温度, 多次升降温并达到稳定状态时, 黑体辐射源亮度温度的复现性。

对于以辐射温度计作为标准器的黑体辐射源, 能够消除控温复现性造成的影响。对于接触温度计作为标准器和以有效亮度温度整体溯源的黑体辐射源, 无法消除控温复现性的影响, 使用过程中需要对该参数进行评价。

以黑体辐射源 HW1012 为例进行说明, 在 600 $^{\circ}\text{C}$ 和 1000 $^{\circ}\text{C}$ 使用稳定性较好的辐射温度计 (TRT2) 验证其控温复现性, 具体方法为短时间内对黑体辐射源进行 10 次升降温测试, 待温度稳定之后分别记录实验数据, 以未加修正的原始数据进行控温复现性的分析。测试结果如图 2 所示。

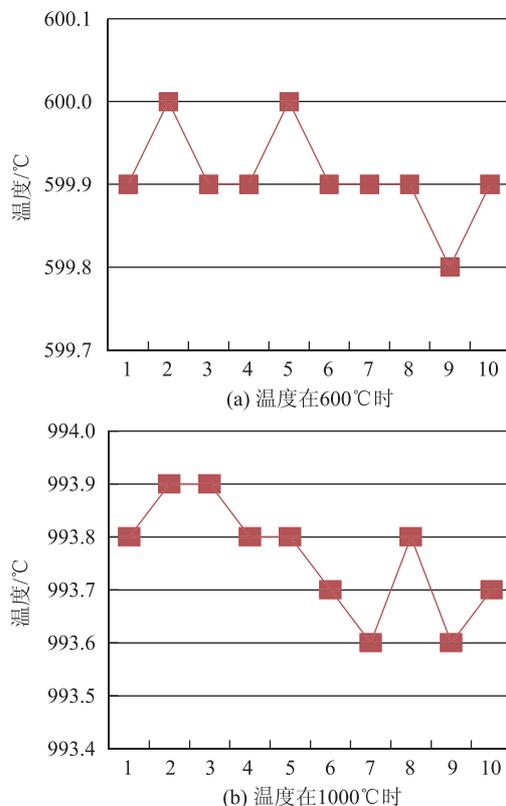


图2 控温复现性测试结果

由图2可得出,该黑体辐射源在600℃和1000℃时,10次测量结果的波动分别为0.2℃和0.3℃,约为0.3%左右,在使用过程中可忽略该部分的影响。以接触温度计作为标准器和以有效亮度温度整体溯源的黑体辐射源,如何保证较好的控温复现性,可从以下几个方面考虑:

1)采用性能较好的控温温度计。例如选用经检定合格的精密铂电阻,标准热电偶或者高精度辐射温度计作为控温传感器,并对其稳定性进行考察。

2)控温温度计与测温孔的热接触特性以及相对位置关系。例如控温传感器的测温孔可设计一定的长径比,并使其底部形状与控温传感器吻合,以保障传热性能。

3)升降温时的热胀冷缩效应,震动或运输导致的结构的变化;尤其是控温传感器位置的变化,将大大影响控温复现性。

3 结论

以某黑体辐射源HW112为例,分别对口径、有效发射率、测点温差以及控温复现性等影响因素进行分析,并提出了相应的验证方法和改进建议。对于以接触式温度计为标准直接溯源的恒温槽式黑体辐射源或热管式黑体辐射源,各项技术指标均较好,关键因素对其影响较小;以标准辐射温度计为标准直接溯源的黑体辐射源,非相同/相近波段量传时需考虑有效发射率的影响,可通过上述介绍的理论计算分析与多波长有效亮度温度校准结果推算两种方法对有效发射率进行验证;以有效亮度温度整体进行溯源的黑体辐射源、有效发射率和控温复现性对其结果影响较大。

经分析,三种溯源方式各有优缺点,可根据黑体

辐射源的具体性能结合使用者的要求,选择合适的溯源方式,为广大计量用户在进行黑体辐射源选型与性能分析方面提供了可靠地技术支撑与建议。

参考文献

- [1] 原遵东,柏成玉,邢波,等.工作用辐射温度计[M].北京:中国质检出版,2016.
- [2] 王景辉,邢波,原遵东,等.JJF 1552-2015 辐射测温用-10℃~200℃黑体辐射源校准规范[S].北京:中国质检出版社,2016.
- [3] 蔡静,张岚,张学聪,等.JJG(军工)162-2019 -50℃~1000℃辐射测温用参考黑体辐射源检定规程[S].2019.
- [4] 蔡静,张岚,张学聪,等.JJF(军工)161-2019 800℃~3000℃辐射测温用参考黑体辐射源检定规程[S].2019.
- [5] 原遵东,傅承玉,邢波,等.JJG 856-2016 工作用辐射温度计[S].北京:中国质检出版社,2016.
- [6] 原遵东,邢波,柏成玉,等.有效亮度温度测量中发射率影响的修正[J].计量学报,2014,35(6):578-582.
- [7] 方茜茜,方伟,王凯.蒙特卡罗法计算黑体空腔有效发射率[J].中国光学,2012,5(2):167-173.
- [8] 原遵东,郝小鹏,王景辉,等.黑体辐射源的多波长有效亮度温度校准和不同溯源方式特点分析[J].计量学报,2017,38(2):135-140.

收稿日期:2020-03-16

作者简介

张岚(1988-),女,工程师,硕士,主要从事辐射温度计量和黑体辐射源研制工作。

