

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.03.11

入腔法校准辐射热流计入腔位置的确定

董磊, 蔡静, 杨永军

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 介绍了辐射热流计的校准方法, 并详细说明了入腔法校准辐射热流计的装置和原理。校准是在黑体腔直径 50 mm 的钠管炉和高温黑体辐射源上进行的。所采用的热流计为水冷圆箔式热流计。建立了等效腔体模型用以计算有效发射率。理论计算和试验结果均表明入腔最佳位置在热流计距黑体腔底面 1 倍黑体腔直径处。

关键词: 热流; 热流计; 黑体腔; 入腔法校准; 有效发射率

中图分类号: TB942

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2015)03-0043-05

Determination of the Location for Heat Flux Sensor Inside the Cavity Using In-cavity Calibration Method

DONG Lei, CAI Jing, YANG Yongjun

(Changcheng Institute of metrology & measurement Beijing, 100095 China)

Abstract: This paper introduces the methods of heat flux sensor calibration and gives detailed descriptions of in-cavity calibration instruments and principles. The calibration has been performed using a sodium heat pipe blackbody and a high temperature blackbody, both with 50-mm-diam cavities. Heat flux sensors used here are circular foil type and water-cooled. An equivalent cavity model has been established to calculate the effective emissivity. The computations and experimental results show that the optimum location for the sensor is at a distance of about one cavity diameter from the cavity bottom.

Key words: heat flux; heat flux sensor; blackbody cavity; in-cavity calibration; effective emissivity

0 引言

辐射热流计的校准方法可以分为绝对法和比较法。绝对法是将辐射热流量值溯源至温度标准或者其它物理参数的相关标准, 利用温度或者其它物理参数直接计算得出标准辐射热流值, 这种校准方法主要用于校准标准辐射热流计, 属于原级校准 (Primary Calibration)。比较法是将被校准的辐射热流计与标准辐射热流计进行比对, 实现标准辐射热流量值从标准辐射热流计至被校辐射热流计的传递, 这种校准方法主要用于校准工作用辐射热流计, 属于次级校准 (Secondary Calibration), 利用平板炉进行辐射热流计校准的方法即属于此类^[1]。

标准文献 ISO 14934^[2-4] 对热流计校准的相关基本概念和方法作了详细解释和规定, 其中提到的一种原级校准方法是利用高温黑体辐射源作为辐射热流源, 以替代绝对辐射计 (Electrical Substitution Radiometer,

ESR) 为标准, 校准辐射热流计, 并最终溯源至高精度低温辐射计 (High Accuracy Cryogenic Radiometer, HACR)。这是美国国家标准与技术研究院 (NIST) 所采用的校准方法, 热流校准范围上限为 50 kW/m^2 。该标准文献提到的另外两种原级校准方法, 一是利用真空式黑体辐射源, 一是利用球形腔黑体辐射源, 都是将热流量值溯源至温度标准, 热流校准范围上限为 75 kW/m^2 。

我们建立了一套绝对法辐射热流计校准装置, 采用入腔法校准辐射热流计, 将热流量值溯源至温度标准, 热流校准范围上限可达到 2 MW/m^2 , 同样属于原级校准。本文将首先介绍入腔法校准辐射热流计的装置及原理, 再介绍所校准的标准辐射热流计的选型与测量原理, 然后通过理论计算分析和试验分析确定入腔法校准辐射热流计的入腔位置, 这是该校准方法的关键技术之一。

1 校准方法

所谓“入腔法”即选择具有较长水冷套的辐射热流计, 可以深入到黑体辐射源的黑体腔内, 从而获得半

收稿日期: 2015-03-20

作者简介: 董磊 (1981-), 男, 工程师, 从事辐射温度、辐射热流量测量及校准研究工作。

球空间角的辐射热流, 这样辐射热流计所得到的辐射热流, 就不再受角系数的影响。但是, 对于在腔外的辐射热流计, 黑体辐射源的有效发射率可以认为是均匀一致且不随热流计位置发生变化(在离开黑体辐射源腔口一定的距离之外时); 而对于在腔内的辐射热流计, 黑体辐射源的有效发射率随热流计位置发生变化, 这就需要通过计算得出入腔后黑体辐射源对辐射热流计的有效发射率。

辐射热流计测得的辐射热流可用式(1)计算得出:

$$q = \sigma \varepsilon_b T_b^4 \quad (1)$$

式中: q 为辐射热流值, kW/m^2 ; σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; ε_b 为入腔后黑体辐射源对辐射热流计的有效发射率; T_b 为黑体辐射源温度, K 。

1.1 校准装置及原理

中温段辐射热流计绝对法校准装置的辐射源为钠

管炉, 实际使用温度范围 $600 \sim 900^\circ\text{C}$, 黑体腔为圆柱形腔体, 内径 50 mm , 用标准热电偶进行温度测量; 高温段辐射热流计绝对法校准装置的辐射源为高温黑体辐射源, 实际使用温度范围为 $900 \sim 2200^\circ\text{C}$, 黑体腔内径 50 mm , 用石墨作为发热元件, 用标准光电高温计进行标定。辐射热流计绝对法校准装置原理图详见图 1 和图 2。

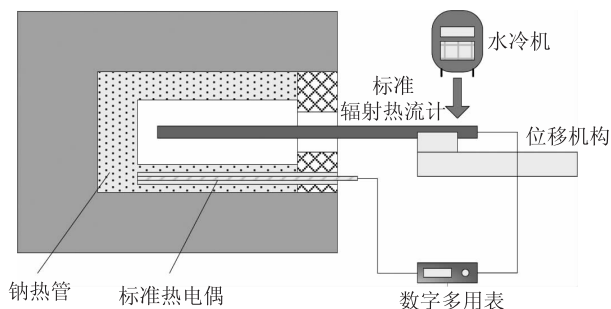


图 1 中温段辐射热流计绝对法校准装置(钠管炉)原理图

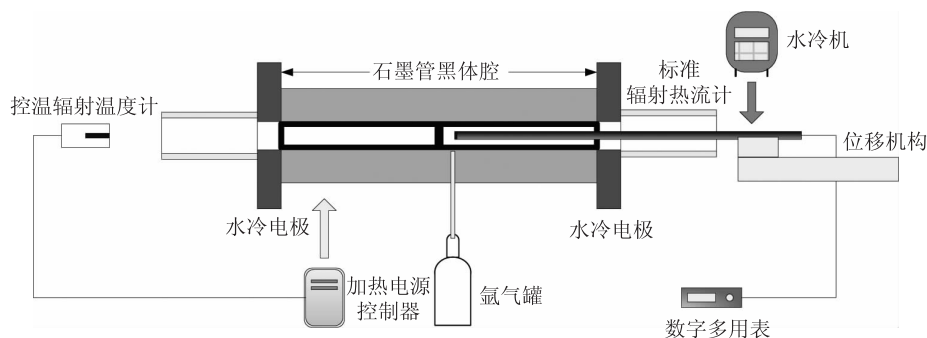


图 2 高温段辐射热流计绝对法校准装置(高温黑体辐射源)原理图

1.2 标准辐射热流计的选型与测量原理

我们选用的标准辐射热流计为圆箔式热流计(Gardon 型), 由康铜圆箔周边接纯铜热沉构成。圆箔上热量径向流动, 温度呈中心最高、并沿径向递减的抛物线式分布, 其输出电压正比于感应面吸收的热流密度^[5]。圆箔式热流计结构简单, 适用于大热流测量, 测量的最高热流密度可达 $10 \text{ MW}/\text{m}^2$ 以上, 连续使用时需水冷。热流计原理结构如图 3 所示。

为了实现入腔法校准, 我们选用的标准辐射热流计水冷套长度超过 600 mm , 因此可以将热流计的前端感应面一直深入到黑体腔的最底部。另外, 可以很容易理解, 辐射热流计外径尺寸越小, 其对黑体辐射源的影响越小, 但水冷散热能力也会越低。我们经过有效发射率相关计算分析, 综合考虑后, 热流计外径尺寸定为 12.7 mm , 约为黑体辐射源黑体腔内径的 0.25 倍。

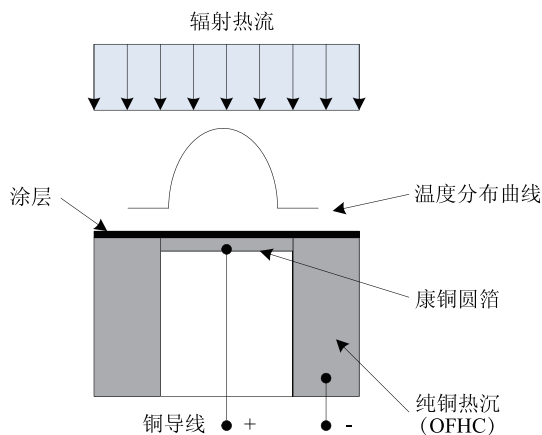


图 3 Gardon 型圆箔式热流计原理结构图

2 理论计算分析

2.1 建立等效腔体模型

依照图 4 建立入腔法校准辐射热流计的等效腔体

表 4 钠管炉入腔法校准热流计等
效腔体模型有效发射率(腔口处 950K)

辐射热流计与黑体 腔底面距离 x	黑体腔壁面材料发射率 ε_e		
	0.75	0.85	0.95
0.5 d_c	0.985	0.992	0.998
d_c	0.990	0.995	0.999

表 5 钠管炉入腔法校准热流计等
效腔体模型有效发射率(腔口处 900K)

辐射热流计与黑体 腔底面距离 x	黑体腔壁面材料发射率 ε_e		
	0.75	0.85	0.95
0.5 d_c	0.984	0.992	0.998
d_c	0.989	0.995	0.998

计算结果表明,辐射热流计距离黑体腔底面 1 倍黑体腔直径的位置处,等效腔体的有效发射率最大,入腔法校准辐射热流计的入腔最佳位置应该就在此处,评估的等效腔体有效发射率为 0.995(3)。

3 试验分析

为了最终确定辐射热流计入腔校准位置,我们进行了辐射热流计入腔位置影响测试试验:分别在中温段辐射热流计绝对法校准装置——钠管炉和高温段辐射热流计绝对法校准装置——高温黑体辐射源上,将辐射热流计伸入到距离黑体辐射源黑体腔底面不同的轴向位置处,测得辐射热流计相应的电压输出值,其中钠管炉的试验温度点为 800 ℃,高温黑体辐射源的试验温度点为 1800 ℃。试验结果如图 6 和图 7 所示。

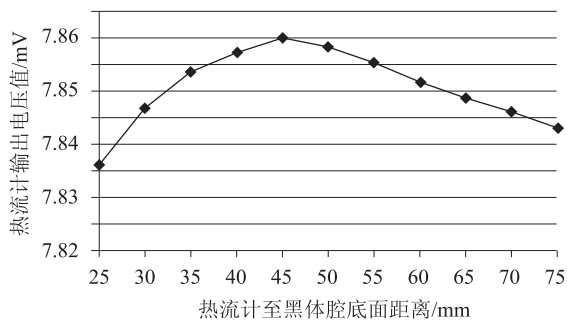


图 6 800 ℃温度点(钠管炉)热流随入腔位置变化图

通过对试验结果的分析发现,在辐射热流计接近黑体腔底面 1 倍直径(50 mm)位置处,测得的热流出现峰值,此处热流计输出电压值明显大于距黑体腔底面 0.5 倍直径(25 mm)处的热流计输出电压值,即可以认为在距黑体腔底面 1 倍直径处的有效发射率大于距底面 0.5 倍直径处的有效发射率,这与理论计算的结果吻合,因此入腔法校准辐射热流计的入腔最佳位

置确定为距离黑体腔底面 1 倍直径处。

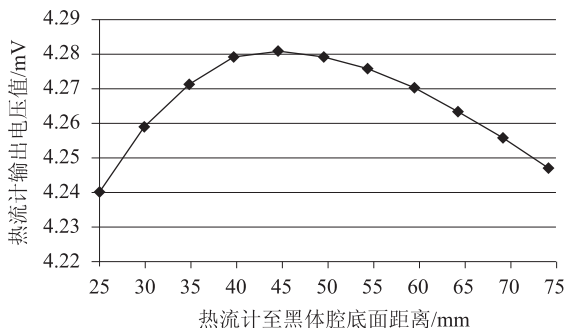


图 7 1800 ℃温度点(高温黑体辐射源)热流
随入腔位置变化图

4 结论

A. V. Murthy 等人用入腔法校准辐射热流计时,认为入腔最佳位置在热流计距黑体腔底面 0.5 倍黑体腔直径处^[6],在黑体腔 50 mm 内径的高温黑体辐射源上进行试验的结果显示:热流计距黑体腔底面 0.5 倍直径处至距黑体腔底面 1 倍直径处,测得的热流基本不变^[7],而实际上距黑体腔底面 1 倍直径处的热流还是稍大于距黑体腔底面 0.5 倍直径处的热流。

我们和 A. V. Murthy 的结论之所以会有差别,主要在于计算等效腔体模型的有效发射率时,黑体腔壁面轴向温度梯度的假设不一样。A. V. Murthy 假设黑体腔壁面轴向温度梯度从腔底到腔口呈线性递减,而我们假设了等温段的存在,认为距黑体腔底面 2 倍黑体腔直径以内的范围内,形成了温度均匀的等温段,过了等温段之后,温度才呈线性递减,由于等温段的存在,腔口至等温段之间的温度梯度对距黑体腔底面 1 倍直径处的有效发射率影响很小。

等温段是因为黑体腔壁面与底面辐射换热角系数的关系而必然存在的,前提是黑体腔被均匀加热。等温段并不是指温度绝对一致,而是指实际温差相对较小,在理论分析时可以当作等温段来假设。实际测量黑体腔的壁面温度梯度时,都会发现等温段的存在,但是等温段的长度可能会有所不同,2 倍黑体腔直径长度的等温段是常见黑体腔设计制作所能达到的指标。热管具有很高的导热性和优良的等温性,因此热管炉黑体腔的壁面温度梯度较小,等温段较长^[8];而高温黑体辐射源性能相对较差,黑体腔的壁面温度梯度较大,等温段较短^[9]。这里特别指出,在计算黑体腔有效发射率时,不考虑等温段的存在,简单认为黑体腔壁面轴向温度梯度呈线性分布,往往不能对黑体腔有

效发射率做出正确评估。

综上所述,在建立了入腔法校准辐射热流计的等效腔体模型后,合理假设了黑体腔壁面轴向温度梯度,理论计算获得的等效腔体有效发射率最大位置与试验结果显示的热流峰值位置相一致。因此,最终确定入腔法校准辐射热流计时,入腔最佳位置在热流计距黑体腔底面1倍黑体腔直径处。

参 考 文 献

- [1] 董磊,杨永军,蔡静.利用平板炉校准辐射热流计时角系数影响的分析[J].计测技术,2014,34(6):62-65.
- [2] ISO 14934-1:2010(E), Fire tests-Calibration and use of heat flux meters-Part 1: General principles, First edition [S]. 2010.
- [3] ISO 14934-2:2013(E), Fire tests-Calibration and use of heat flux meters-Part 2: Primary calibration methods, Second edition [S]. 2013.
- [4] ISO 14934-3:2012(E), Fire tests-Calibration and use of heat flux meters-Part 3: Secondary calibration method, Second

edition [S]. 2012.

- [5] ASTM E511-07, Standard Test Method for Measuring Heat Flux Using a Copper-Constantan Circular Foil, Heat-Flux Transducer [S]. 201.
- [6] Murthy A V, Prokhorov A V, DeWitt D P. High Heat-Flux Sensor Calibration: A Monte Carlo Modeling [J]. AIAA, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2004, 18(3): 333-341.
- [7] Murthy A V, Fraser G T, DeWitt D P. Experimental In-Cavity Radiative Calibration of High-Heat-Flux Meters [J]. AIAA, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2006, 20(2): 327-335.
- [8] 张学聪.热管式黑体辐射源研制与评价技术研究[J].计测技术,2012,32(4):30-32,44.
- [9] Amanie N, Abdelmessih, Thomas J. Horn. Experimental and Computational Characterization of High Heat Fluxes During Transient Blackbody Calibrations [J]. ASME, Journal of Heat Transfer, 2010, 132(2): 24-36.

(上接第13页)

了几种脉冲电流测量方法,并对其测量原理、适用条件、测量准确度等做了介绍与比较。每种测量方法都有一定的优缺点和适用场合,在工作中可根据需求选用一种或几种比较测量。采用计算机处理数据、提高应对电磁干扰对策、开发新型传感器、引入新技术提高测量准确度等一直是脉冲电流测量领域的研究方向。本文提出的分流器法,测量结果准确稳定,可作为标准类仪器使用,但目前高频和大电流限制了其测量范围,需要进一步研究,以促进脉冲电流校准技术的发展。

参 考 文 献

- [1] 韩旻,邹晓兵,张贵新.脉冲功率技术基础[M].北京:清华大学出版社,2010:145-176.
- [2] 叶石华.脉冲电流测量及其运用研究[J].科技创新导报,2010(5):71.
- [3] 曾正华.脉冲大电流测试技术研究[D].南京理工大学,2006:23-25.
- [4] 张德会.脉冲电流测量的研究[D].华中科技大学,2007:8-62.
- [5] Jeremy A, Schaeffer, Lea-Der Chen, etc. Shunt current calculation of fuel cell stack using Simulink-R[J]. Journal of Power Sources, 2008, 182(2): 599-602.
- [6] 郑锦秀,童欣.一元线性回归方程在大电流分流器测量中的应用[J].计测技术,2009,29(5):17-19.
- [7] Shengyi Liu, Roger A. Dougal, Eugene V. Solodovnik. Maximum Power Tracking and Pulse-Width-Modulated Shunt for Sat-

ellite Power Systems [J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(5): 911-918.

- [8] I P Shcherbakov, S D Samuilov, Yu. N. Bocharov. A Unit for Measuring the Electrical Current in Complex (Including Coaxial) Circuit Sections [J]. Instruments and Experimental Techniques, 2009, 52(2): 207-208.
- [9] 李红梅,邱景辉,林澍.脉冲电流测量线圈的理论分析与实验研究[J].电子测量与仪器学报,2004,25(4):386-389.
- [10] 王冰,王端,宋耀东,等.小型化脉冲电流测量线圈的设计[J].电子世界,2014(9):136-137.
- [11] Togawa, Sanbonsugi, Lapicki. High-sensitivity In Sb thin-film micro-Hall sensor arrays for simultaneous multiple detection of magnetic beads for biomedical applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(10): 3661-3663.
- [12] 马仙云,苏进喜,吴维韩,等.磁光式光电电流互感器幅值精确度的研究[J].清华大学学报(自然科学版),1997,37(4):89-92.
- [13] 朱卫安,刘国瑛,候鑫瑞,等.基于法拉第磁光效应的大电流测量技术[J].电焊机,2014,44(1):22-25.
- [14] LIN Min, SU Dan, CHEN Yi-zhen, etc. Study on Calibration of Proton Absorbed Dose of Alanine With Faraday Cup [J]. Annual Report of China Institute of Atomic Energy, 2009(1): 249-250.
- [15] 何小平,石磊,张嘉生,等.用偏压法拉第筒测量强流脉冲离子束[J].强激光与粒子束,2000,12(6):753-755.