

基于稳态卡计法的半球向全发射率 测量技术综述

辛春锁 何小瓦 杨阳 邓建兵
(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

摘要 综述了半球向全发射率测量技术研究现状,介绍了基于稳态卡计法的半球向全发射率测量原理,根据对试样加热方式的不同对测量装置进行了分类,并从技术层面剖析了各类测量装置的特点及存在的问题,讨论了基于稳态卡计法半球向全发射率测量技术存在的不足和未来的发展方向。

关键词 半球向全发射率 稳态卡计法 发射率 测量

A Review of Hemispherical Total Emissivity Measurement Technology Based on the Steady-State Calorimetric Bolometer

XIN Chun-suo HE Xiao-wa YANG Yang DENG Jian-bing
(Aerospace Research Institute of materials and processing Technology, Beijing 100076)

Abstract The present status of hemispherical total emissivity measurement technology is reviewed, the measurement theory of hemispherical total emissivity measurement technology based on a steady-state calorimetric bolometer is introduced, the measurement apparatus is classified based on the heating mode of specimen, the existing problem of emissivity measurement apparatus is analyzed from technical perspectives, the shortcoming of hemispherical total emissivity measurement technology based on a steady-state calorimetric bolometer is discussed, at last, its future trends is prospected.

Key words Hemispherical total emissivity Steady-state calorimetric bolometer Emissivity Measurement

1 引言

发射率是描述物体热辐射特性的重要参数,在航天、航空、国防、科学研究及工农业生产等领域具有重要的研究意义和应用价值。材料发射率不仅取决于材料的组成成分和材料的表面状态(粗糙度、氧化程度等)还与材料的温度、考察的波长及观察

的方向等因素有关。多年来,各国学者进行了大量和深入的研究,提出了很多测试方法,研制了种类繁多的测量设备,得到了大量材料在不同温度下的热物性数据。根据测量原理的不同,大致可将测量方法分为卡计法、反射率法和辐射计法。

由于基于卡计法的半球向全发射率测量不确定度最小,因此该方法已成为半球向全发射率材料

技术的主流方法,并被多个国家确定为国家标准和行业标准。本文将介绍基于卡计法的发射率测量技术原理和国内外在这方面的研究发展现状。

2 测量原理

在稳态法中,一般是用电加热方式为一平板试样提供一个连续的加热功率,使试样加热到测定温度,而试样通过热辐射与所处的液氮冷却黑体空腔进行热交换。这种方法常用于高温条件下的热辐射性能测量。

假设一个被测试样放置在真空室内,试样表面和真空室内壁之间只有辐射热交换,测试样发出的热辐射全部投射到真空室冷壁表面上。经公式推导,可得到计算半球向全发射率的函数表达式^[1]

$$\varepsilon_1 = \frac{KIV}{A_1\sigma(T_1^4 - T_2^4)} \quad (1)$$

式中: K ——电热当量; I ——外加电流, A; V ——外加电压, V; A_1 ——试样表面积; σ ——斯蒂芬-波尔兹曼常数; T_1, T_2 ——分别是试样和真空室冷壁的温度。

式(1)是稳态卡计法半球向全发射率测量的计算公式,也是相应测量装置的操作依据。通过改变外加输入功率的大小就可以得到不同平衡温度下的试样半球发射率。但必须注意该式的应用是以下列假设条件成立为基础的:

- a) 装置中热辐射的发射、吸收和反射都是漫反射形式;
- b) 与周围环境相比,被测试样的面积很小,测试腔体内表面是黑体,即发射率要恒等于1;
- c) 被测试样的发射率随波长变化很小或不发生变化。

3 测量技术研究现状

在稳态卡计法中,有四种可对试样进行加热的不同方法:其一是采用主加热器加热试样,并用补偿加热器进行保护,使主加热器产生的热量全部供给被测试样;其二是将加热的电阻丝放置在被测试样中间;其三是将试样直接通电加热;其四是采用辐射光源照射的方法对试样进行加热。

3.1 补偿电加热稳态卡计法

补偿电加热稳态卡计法的测试设备主要包括真空系统、真空室、主加热器、补偿加热器和测试系统等部分,Brunotte等人^[2]采用类似结构研制了相应的半球向全发射率测试系统,测试温度范围为100℃~400℃,主要是用于测量0.015~0.15之间的低发射率材料,最大测量误差为6%。与PTB抛光不锈钢参考材料进行比对测试,测量误差在2%以内。

DiFilippo等人^[3]采用这种补偿电加热稳态卡计法研制了一套真空量热法热辐射性能测试系统,此系统将被测试样放置在低温真空黑体腔侧壁上的特殊的结构上,以此来实现既可测量半球向全发射率,也可以测量光谱发射率的功能,最高测试温度为900K。DiFilippo等人通过该测试系统对八种不同发射率的材料进行了测试,在每一项测试中试样与试样支架的温度都不同,越是发射率大的试样越是具有较大的温差。另外,还对相同的材料分别进行了半球向全反射率测量和光谱发射率测量,并对测量结果进行了分析比对。

根据稳态卡计法原理,Hager和Jaouen等人提出了在常规护热板法热导率测试设备上进行板状试样半球发射率测量的方法,这种方法后被用于评价具有高发射率的平板加热器表面的辐射特性,并在ISO 8302:1991标准测试方法中有相关描述^[4]。但对于测量较低发射率的材料,由于辐射热流与空气传导热流相比很小,所以必须在真空环境下才能采用这种方法测量低发射率材料。另外,这种方法的一个显著特点是测量面积较大,对非均质材料测量更具有代表性。这样比小试样的光谱光学测量方法更具有优势。

基于补偿电加热稳态卡计法的测量装置是半球发射率测量的通用装置,一般也称该类装置为半球发射率测量的标准设备。虽然结构比较复杂,但它的测量准确度也是比较高的。根据田光义等人^[5]对这种方法所引入测量误差的分析,在实际应用时需要注意以下几方面因素:

- a) 试样发射率的测试结果一般比真正发射率要高,尤其对低发射率试样更是如此,必要时应进行修正。当然,在发射率很低时(如抛光的金、银表面发射率小于0.10)不能用补偿加热稳态卡计方法测试;
- b) 对发射率较低的试样,测量时必须采用液氮冷壁;

c) 对于高准确度的测量必须采用液氮冷壁,但对于发射率比较高的试样,或者只作一般测量,水冷壁还是可以满足要求的;

d) 在一定的壁温条件下,提高试样温度也能减小测量误差;

e) 引起误差的主要因素,一是试样表面的一对热偶丝导热损失影响相当大,二是试样表面温度的测量不准确,影响也不小。所以,如何减小这二项误差是提高测量准确度的主要途径。

3.2 间接电加热稳态卡计法

间接电加热稳态卡计法的真空系统、真空室与补偿电加热稳态法相同。所以,该方法的结构比较简单,放置试样方便,操作也比较简便。但由于要把加热电阻丝镶嵌在被测试样中间(如图1所示),因此这种方法的试样制作比较复杂和困难。

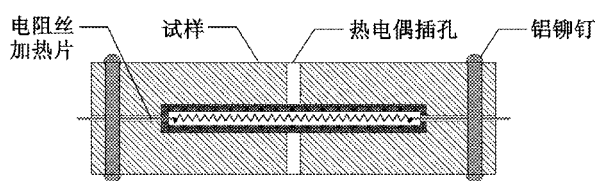


图1 间接电加热法的试样剖面图

Hameury 等人^[6]采用这种间接电加热稳态卡计法研制了相应的测量装置,测试温度范围为 $-20^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ 。在 Hameury 等人设计的装置中(如图2所示),采用经典的热导率测量方法——护热法的原理,制作了一个可将热损降低到最小的极其复杂加热和护热装置来对试样进行加热,相当于把一个完备的典型护热板法热导率测量装置放置在真空黑体腔内进行半球向全发射率测量,只是尺寸较小。

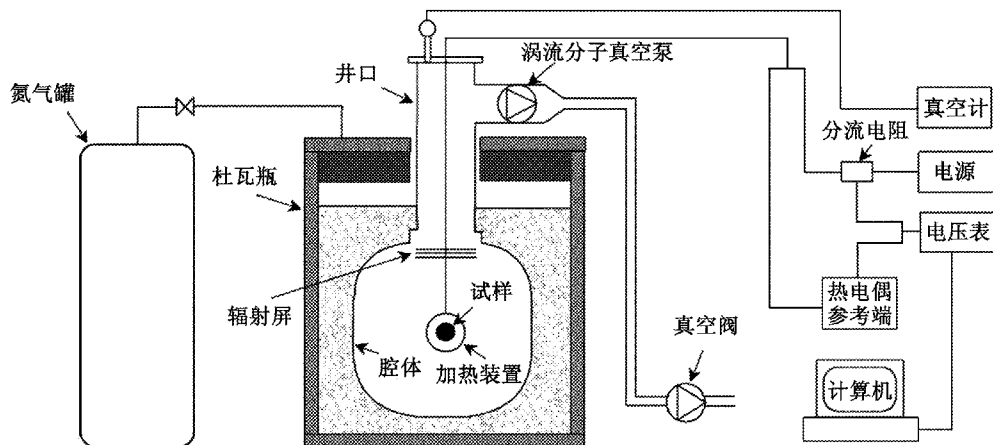


图2 Hameury 等人设计的测量装置结构示意图

在空间环境下,绝热材料的热特征主要体现在两个性能参数上,一个是涂层的半球向全发射率,另一个是绝热材料的热导率,如果知道其中一个参数,另一个参数就可以计算获得。Varenne 等人根据这一原理对空间用绝热材料以及具有较高发射率涂层的热性能测试评价进行了研究,设计并研制了相应的测试系统^[7]。如图3所示,该测试系统中试样装置是由圆柱形绝热材料试样($\Phi 50 \times 10$) mm 和涂层材料($\Phi 52.5$ mm) 堆积构成,并且采用两个分离的单元以便于进行相应测量和参数估计计算,其中一个单元是已知光学参数的涂层材料,以此来比较几种绝热材料的热传导性能;另一个单元为已知热导率的绝热材料,以此来估算出不同涂层材料的半球向全发射率参数。采用 Varenne 等人的测试方法进行测试时,试样背面温度为恒定,可以设定在 $243\text{K} \sim$

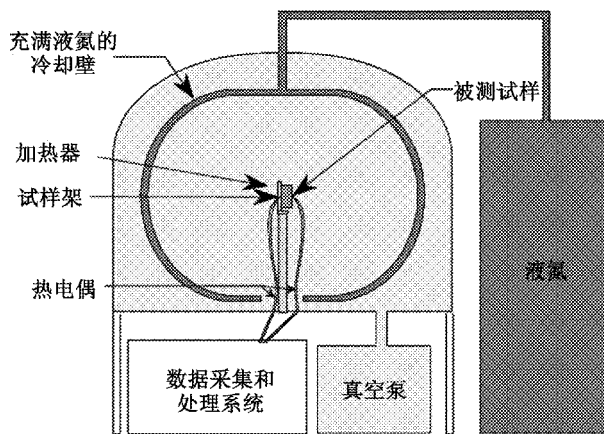


图3 Varenne 等人设计的测试系统结构示意图

300K 间任一温度下,那么通过前表面涂层发射出去的热量将取决于涂层的温度和发射率,并取决于测

试试样安装的几何形貌。由于绝热材料试样的四周存在辐射热损会影响试样上的一维热流模型,因此特别设计了反射屏,以起到护热板的作用。另外,Varenne等人还对反射屏进行了数值模拟以实现高效热屏,如反射屏内壁具有高反射率而且发射屏的内径可以根据相应的热导率进行调节,尽管不能完全消除辐射热损,但由此可以大幅度的降低。

Varenne等人提出的这种测试方法具有很高的测量准确度,但冷却时间总是长于加热时间,一般需要几乎一天的时间才能达到第一个试验点需要的条件,然后经过8h后才能进行后续温度点的测量。

3.3 直接通电加热稳态卡计法

直接通电加热稳态卡计法的主要特点是可以实现高温下半球向全发射率测量,因而应用十分广泛,并有相应的标准测试方法,如ASTM C835-06^[8,9]。

美国橡树岭国家实验室Wilkes等人^[10]参考ASTM C835对用于超级真空绝热材料构件的带状不锈钢半球向全发射率进行了测量,同时还测量了材料的电阻率和热导率。为了给计算机模拟计算提供准确的发射率数据,Thomason^[11]采用Wilkes等人研制的测量装置对用于SP-100空间核反应堆芯的可裂变涂层(Nb-1%Zr)半球向全发射率进行了测试研究。由于实际模拟计算的需要,Thomason将被测试样从ASTM C835规定的带状试样改成了薄壁筒状试样。尽管在实际应用中关心的是高达2000K范围以内的参数性能,但由于所研制的设备限制,最高测试温度只能达到1300K。同时,在测试过程中还发现,热电偶温度测量的偏差会对测量结果带来很大的影响,所以一定要对热电偶进行正确的安装、校准和测量数据修正处理。

为了给非接触辐射温度测量提供较为准确的发射率修正数据,Greene等人研制了一套装置对200℃~1000℃温度范围内氧化和未氧化的Inconel 718试样的半球向全发射率做了测量,不确定度优于3%^[12]。测试结果显示,氧化前后发射率变化很大。在200℃~1000℃的范围内,未氧化条件下的发射率从0.24变化到0.33,氧化处理后发射率从0.85变化到0.90。另外,发射率的变化与氧化处理时间没有规律性的关系。Greene等人还在测试中还发现一个特殊的现象,就是经过最长时间氧化处理后(60min),升温过程中的发射率测量值要大于降温过程中的发射率重复测量值,这可能是由于温度引起试样表面尺寸变化而给氧化涂层带来散裂造成

的。在真空中所产生的这种效应,在氧化气氛中将自动消除。当测量温度超过1000℃时,热电偶输出值波动很大,这成为该装置需要解决的主要问题。

通过Greene等人的实验验证和相关测量装置的测量结果可以发现,这些方法的测试温度都不高,这是因为在测量过程中温度需要恒定,在测试过程中较长时间的高温恒定势必会对真空腔体提出更高的低温恒温制冷要求,否则会损坏真空腔,因此稳态方法也限制了测量温度上限。另外,由于以上方法都是用热电偶测量试样表面温度,而热电偶一般是焊接在被测试样上,这种结构的测温热电偶需要特别的校准手段。否则,会带来很大的测温误差,特别是在在温度超过1000℃后,由于不明原因测温数据呈现不规则的读数。

近些年来,快速热脉冲技术在热物理性能参数的测量中应用得到了深入研究和快速发展,该技术不仅可以实现1500K以上的半球向全发射率测量,还可以进行多个热物理性能参数的测试,如热导率、电阻率、比热容、光谱发射率、半球向全发射率等,戴景民教授带领的课题组在这一方向做了很多探索和研究工作,处于国际领先水平。

3.4 辐射加热稳态卡计法

辐射加热方式就是通过各种非接触方式把被测试样加热到设定温度。辐射加热方式主要有光加热、电子束加热和加热炉加热等形式。

Gaumer等人^[13]采用光辐射加热的方式研制一套稳态卡计法测量装置,该辐射加热方法的测量装置和非稳态卡计法大致一致,只是真空室开有两个进光窗口,其材料选用蓝宝石或石英玻璃。从辐射源来的光辐射,经过窗口从两面照射悬挂在真空室内的待测试样。只要测出试样热平衡温度和量热计的温度,就能计算出试样吸收率和发射率的比值,从而也就得到了试样的发射率。

德国斯图加特大学的Neuer等人^[14]采用电子束加热方式,研制了一套可以测量材料光谱发射率和半球向全发射率的测试系统(如图4所示),以重点研究高温防热抗氧化涂层的热辐射特性。被测试样尺寸 $\Phi 15 \times (3 \sim 6)$ mm,采用电子束加热被测试样,试样的径向有一个 $\Phi(1 \sim 2) \times 7$ mm的测温孔,采用光电微探测器测量半球向全发射率,采用滤光片测量1.3 μ m~8.3 μ m光谱发射率。对于0.5 μ m~0.95 μ m波长范围,线性高温计LP2同时也作为测温仪使用。

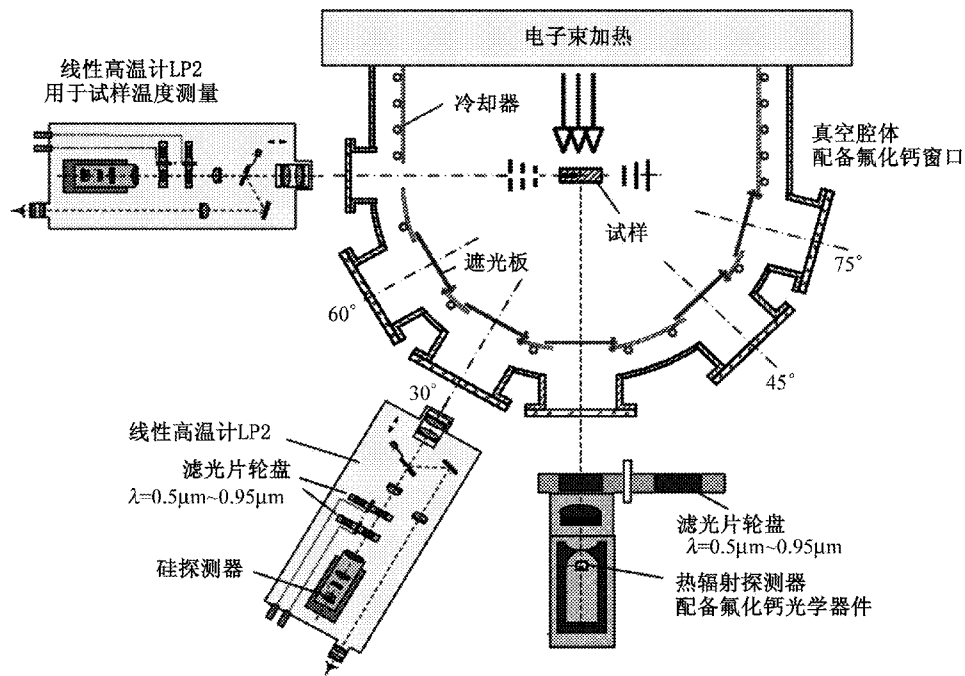


图4 电子束加热热辐射性能测试系统结构示意图

Neuer 等人采用电子束加热测试系统对三种 X 射线阳极涂层材料试样在 $1\ 600^{\circ}\text{C}$ 高真空 (1×10^{-3} Pa) 下进行 1h 或 10h 两种退火老化过程后的发射率进行了测量。文中提到测量准确度主要受测温准确度和从测温孔测温推到出试样表面温度的计算准确度影响。在 $2\ \mu\text{m}$ 以上波段, 光谱发射率和半球向全发射率的测量不确定度分别为 3% 和 6%; 在短波段, 测量不确定度为 5% ~ 10%。从测量结果可以看出, OT13 材料的半球向全发射率最大, 但经过 10h 老化后, OT13 的发射率反而下降到三种材料中最低值。

4 结束语

综上所述, 基于稳态卡计法的半球向全发射率测试技术虽然已发展得较为成熟并建立了相应的 ASTM 标准, 但如果仅采用一种方法很难满足不同温度范围和不同材料的发射率测试评价要求。因此, 这项发射率测量技术仍存需要进一步完善的地方, 具体表现在:

(1) 多种方法并存, 各种方法既有各自的优点, 也有相对的局限性, 具有很强的互补性。如何在现有基础上进一步解决测试温度范围、适用材料种类、

测试效率等瓶颈问题, 将成为下一阶段的研究重点。

(2) 发射率受测试材料表面状态、测试条件等因素影响很大, 增大了各实验室测量结果比对的难度, 也影响了权威数据库的建立。标准材料的选取和权威数据的测定将推进国际间测试结果的比对和推进相应学术活动的开展。

(3) 很少有商业化设备的出售。测试标准的建立将促进商业化设备的生产和销售, 也必将促进发射率测试技术的普及和应用。因此, 早日建立我国的发射率测试标准已刻不容缓。

参考文献

- [1] 葛绍岩, 那鸿悦. 热辐射性质及其测量 [M]. 科学出版社, 1989: 41 ~ 43.
- [2] Brunotte A, Lazarov M and Sizmann R. Calorimetric measurements of the total hemispherical emittance of selective surfaces at high temperatures [J]. Proc. SPIE, 1992(1727): 149 ~ 160.
- [3] DIFILIPPO F, MIRTICH M J, BANKS B A et al. Total hemispherical emittance measured at high temperatures by the calorimetric method [R]: NASA Tech. Memo. 102322. 1989.
- [4] ISO 8302-1991 Thermal insulation-Determination of steady-

- state thermal resistance and related properties-Guarded hot plate apparatus [S].
- [5] 田光义,华诚生,那鸿悦. 半球向发射率的测定 [J]. 太阳能学报, 1982, 3(2).
- [6] Hameury J, Hay B, Filtz J R Measurement of Total Hemispherical Emissivity Using a Calorimetric Technique [J]. International Journal of Thermophysics, Vol. 28 (Issue 5): 1 607 ~ 1 620.
- [7] VARENNE-PELLEGRINI M, PUIGSEGUR L, PAVIE J et al. Comparison of thermal conductivities of highly insulating materials and estimation of thermoradiative properties of coatings in spatial conditions: The 17th European Conference on Thermophysical Properties, Bratislava, Slovak Republic, 2005(9): 5 ~ 8.
- [8] 中国科学院金属所. 高温半球向全发射率的测定 [C]: 第一届空间热物理会议文集 1974, 中国宇航学会.
- [9] ASTM C835-06 Standard Test Method for Total Hemispherical Emittance of Surfaces up to 1 400°C [S]. 2006.
- [10] WILKES K E, STRIZAK J P and WEAVER F J. Thermophysical Properties of Stainless Steel Foils: Thermal Conductivity 24, Proceedings of the 24th International Thermal Conductivity Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, 1997(10): 26 ~ 29.
- [11] THOMASON J E. Total Hemispherical Emittance of Niobium-1% Zirconium Fuel Cladding for the SP-400 Space Reactor [R]: AD-A270 456; AFIT/GNE/ENP/92D-4. 1992: 70.
- [12] Greene G A, Finrock C C and Irvine Jr T F. Total Hemispherical Emissivity of Oxidized Inconel 718 in the Temperature Range 300°C ~ 1 000°C [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2000(22): 145 ~ 153.
- [13] GAUMER R E and STEVAE J U. Calorimetric Determination of Infrared Emittance and the α/ε Ratio [R]: NASA. 1963: 127
- [14] NEUER G and JAROMA-WEILAND G. Spectral and Total Emissivity of High Temperature Materials [J]. International Journal of Thermophysics, 1998, 19(3): 917 ~ 929.

(上接第 26 页)

机动性特别强的运动时,短时间内还可用时间的 3 ~ 4 次多项式来描述目标质心的运动^[4],从而实现目标不是受恒定外力作用下的质心位置测量问题。对于测量的准确度,本文进行了简要的仿真验证,下一步可以从多角度进行系统性的分析。

参考文献

- [1] 卢志辉,孙志扬,李祥云,薄悦,张磊乐. 高精度质心测量方法研究 [J]. 兵工学报, 30(12): 1 748 ~ 1 752.
- [2] 戎军. 消防车质心位置的测试方法与研究 [J]. 消防科学与技术, 2004, 23(5): 477 ~ 479.
- [3] 刘君,夏智勋. 动力学系统辨识于建模 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2007.
- [4] 于起峰,尚洋,周剑,张小虎,李立春. 测量点目标运动参数的单目运动轨迹交会法 [J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(12): 1 919 ~ 1 927.