第 44 卷第 2 期
2025 年 4 月

红 外 与 毫 米 波 学 报
J. Infrared Millim. Waves

Vol. 44, No. 2
April, 2025

文章编号:1001-9014(2025)02-0241-17 DOI:10. 11972/j. issn. 1001-9014. 2025. 02. 012

低辐射率物体红外测温的研究进展

黄善杰[1,2], 赵劲松[3], 王岭雪[1*], 宋腾飞[2], 许方宇[2*], 蔡 毅[1]

(1. 北京理工大学 光电学院,北京 100081;
2. 中国科学院云南天文台,云南 昆明 650216;
3. 昆明物理研究所,云南 昆明 650223)

摘要:金属、光学镜面、硅晶圆等光滑物体一般具有极低的辐射率和较高的反射率,被称为低辐射率物体。微弱的低辐射率物体自身辐射会被其表面反射的环境辐射淹没。低辐射率物体的红外测温一直是红外测温领域的一个难题。随着金属冶炼、太阳望远镜热控、半导体生产等领域对低辐射率物体非接触测温需求的不断增长,人们提出了大量用于低辐射率物体的红外测温方法。文章首先阐述了低辐射率物体红外测温的难点,并将目前用于低辐射率物体的测温方法归纳为五类。然后,综述了每种测温方法的基本原理和技术路线,并详细分析了每种测温方法的优缺点。最后对低辐射率物体测温可能的发展方向进行了展望。

关 键 词:红外测温;低辐射率物体;信噪比;辐射率

中图分类号:Q434.3 **文献标识码**:A

Research progress on infrared temperature measurement for low emissivity objects

HUANG Shan-Jie[1,2], ZHAO Jin-Song[3], WANG Ling-Xue[1*], SONG Teng-Fei[2], XU Fang-Yu[2*], CAI Yi[1]

(1. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China;
3. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Smooth objects such as metals, optical mirrors, and silicon wafers generally have extremely low emissivity and high reflectivity, and are called low emissivity objects. The extremely weak radiation from low emissivity objects will be submerged by the environmental radiation reflected from their surfaces. Infrared temperature measurement of low emissivity objects has always been a challenge in the field of infrared temperature measurement. Due to the continuously growing demand for non-contact temperature measurement of low emissivity objects in fields such as metal smelting, solar telescope thermal control, and semiconductor production, a large number of infrared temperature measurement methods for low emissivity objects have been proposed. First, this paper elaborates on the difficulties of the infrared temperature measurement of low emissivity objects and summarizes the temperature measurement methods currently used for low emissivity objects into five categories. Then, the basic principles and technical routes of each temperature measurement method were summarized, and the advantages and disadvantages of each temperature measurement method were analyzed in detail. Finally, the possible development directions of temperature measurement for low emissivity objects were discussed.

Key words: infrared temperature measurement, low emissivity objects, signal-to-noise ratio, emissivity

收稿日期:2024-06-23,**修回日期**:2024-08-02 **Received date**:2024-06-23,**revised date**:2024-08-02

基金项目:国家自然科学基金(U2241226,U1931124);云南省基础研究计划项目(202401AT070140)

Foundation items:Supported by the National Natural Science Foundation of China (U2241226, U1931124), Yunnan Fundamental Research Projects (202401AT070140)

作者简介(Biography):黄善杰(1984-),男,山东菏泽人,中国科学院云南天文台高级工程师,北京理工大学博士研究生,主要研究领域为红外测温、红外探测器、太阳望远镜热控、热光学等. E-mail: 308762@163. com

[*] **通讯作者**(Corresponding authors): E-mail: neobull@bit. edu. cn, xu_fangyu@ynao. ac. cn

引言

红外测温具有响应速度快、不接触、不损伤被测物体的优点而被广泛用于人体和工业测温领域，目前主要用于高辐射率物体的温度测量。一般情况下，物体表面的辐射率越低，表面反射率则越高。常见的低辐射率物体包括金属、望远镜光学镜面、陶瓷、玻璃、半导体晶圆等，大多具有光滑的表面。红外测温用于低辐射率物体时，目标辐射会被其表面反射的环境辐射干扰，进而导致严重的测温误差。随着科学技术的不断发展进步，天文观测、半导体加工、强激光等领域对低辐射率物体的红外测温需求不断增长。太阳望远镜运行时，入射至光学镜面的太阳辐射中的5%~15%会被镜面膜层吸收，导致镜面温度显著高于周围空气[1,2]。文中的光学镜面指的是天文望远镜主/副镜的镜面，镜面为镜胚表面镀上的一层外反射膜，一般为金属膜。光学镜面发热不仅引起镜体热变形，还会加热镜面上方空气并产生热气流，导致望远镜像质衰减。与太阳望远镜相似，强激光发射系统的导光镜被强激光加热引起的镜面热变形和热气流也可导致激光束质量衰减，表现为激光束发散角增加，激光能量密度降低，成为制约大功率激光器的性能的重要因素[3-5]。太阳望远镜和强激光发射系统的导光镜主要采用控温系统来控制镜面发热。由于接触式测温的温度探头会损坏镜面膜层以及太阳辐射、激光辐照对探头的加热效应，接触测温难以用于望远镜光学镜面和导光镜的表面测温。光学镜面的红外测温技术是建立以实时镜面温度为反馈信号的太阳望远镜和导光镜闭环控温系统的关键。半导体加工中，晶圆尺寸越小，对工艺过程中温度控制的精度要求越高，晶圆温度的轻微偏离和超过1%的温度不均匀性会直接影响最终产品的良率。为实现温度与温度场分布的高精度控制，需要对晶圆进行精准测温[6]。此外，对于大尺寸硅晶圆，晶圆表面温度场的精准测量也是检测晶圆材料缺陷一种潜力方案，局部缺陷引起的传热不均匀会导致表面温度异常。此外，在金属、玻璃和光滑陶瓷等低辐射率物体的冶炼和加工领域，也有实时温度监测的需求。

一般情况下，金属、光学镜面、陶瓷、玻璃、半导体晶圆等低辐射率物体大多具有很高的反射率。红外测温用于低辐射率物体时存在以下难题：1）金属、光学镜面等低辐射率物体的辐射率可小于0.05，相同温度的低辐射率物体的辐射亮度远小于黑体。红外测温仪测量等温的低辐射率物体和黑体时，入射到探测器感光面的低辐射率物体的辐射功率显著小于黑体辐射功率。显然，对低辐射率物体的辐射测量信噪比也小于黑体。相同的红外测温仪测量低辐射率物体和黑体时，低辐射率物体的单位温度变化引起的探测器感光面辐射功率变化远小于黑体，导致红外测温仪对低辐射率物体的测温精度也远小于黑体。2）光滑金属、光学镜面、光滑陶瓷涂层等低辐射率物体在20 ℃时的辐射亮度小于-100℃黑体的辐射亮度。常规商品级红外测温仪的对黑体的测温下限仅为-40 ℃或-60 ℃。3）低辐射率物体为非朗伯体，其定向辐射率随角度变化有显著差异。金属、光学镜面的辐射方向与法线夹角越小，定向辐射率越小[7]。红外测温仪的传统镜头只能收集与法线夹角很小的金属辐射，导致其对低辐射率物体辐射的收集能力弱，辐射测量的信噪比低。4）低辐射率物体的反射率极高，其表面反射的周围环境辐射远大于自身辐射。甚至大气下行辐射在极低辐射率物体表面的反射大于其自身辐射。无论在室外还是室内，测量低辐射率物体时入射至探测器感光面的目标辐射容易被其表面反射的环境辐射淹没。传统红外测温仪对低辐射率物体的红外测温是不准确的[8-10]。红外测温的本质是红外辐射测量，精准的辐射测量是精准红外测温的基础。一般情况下，对低辐射率物体辐射的测量信噪比越高，测温精度越高。除了选择噪声等效功率小的红外探测器，提高低辐射率物体红外测温精度的基本方法是抑制环境辐射的反射干扰，并提升对目标辐射的测量信噪比。为了满足冶金、天文观测和半导体加工等领域对低辐射率物体的测温需求，人们发明了一些低辐射率物体红外测温方法。根据提升辐射测量信噪比的原理方法差异，本文将用于低辐射率物体的测温方法归纳为以下五类：基于环境辐射抑制的测温法，高辐射率涂层测温法，高辐射率波段测温法，基于反射器的测温法和基于光学特性的测温法。基于环境辐射抑制的测温法是最基本的低辐射率物体测温方法，通过环境辐射屏蔽[11]、液氮制冷[12]和校正算法[13]等技术，抑制或消除环境辐射的反射干扰，从而实现对低辐射率物体辐射的真正测量。然而，低辐射率物体的辐射率远低于黑体辐射率，即使在无环境辐射干扰的理想条件下，使用相同的红外测温仪，对低辐射率物体的辐射率测量精度和测温精度也远低于对黑体的

测量。

为了提高测温精度,人们探索从提高表面辐射率、选择辐射率高的测温波段和增强对低辐射率物体的辐射收集能力三方面着手,放大入射到探测器感光面的低辐射率物体辐射。提高表面辐射率是将高辐射率涂层覆盖在低辐射率物体表面,同时认为涂层温度等于低辐射率物体的温度[14]。该方法可以提高低辐射率物体局部区域的辐射率,被称之为高辐射率涂层测温法。选择辐射率高的测温波段指的是采用金属辐射率较高的近红外波段并结合单色、比色测温技术测量金属的温度。由于环境辐射在近红外波段的辐射强度一般远低于长波红外,该方法可以大幅提高辐射测量的信噪比,被称为高辐射率波段测温法。传统红外测温仪只能收集直接入射到红外镜头的低辐射率物体辐射,目标辐射收集能力较弱。红外测温仪的传统镜头被反射器替换后,靠近测量低辐射率物体时会形成反射腔,低辐射率物体辐射除了直接入射到探测器感光面,还可以在反射腔内经一次或多次反射后入射到感光面。基于反射器的测温法利用反射腔内的多次反射效应来增强对低辐射率物体辐射的收集能力[15-17],进而放大了入射至感光面的低辐射率物体辐射功率。传统红外测温仪测量黑体和低辐射率物体时,对两种被测对象具有相同的红外辐射收集能力,辐射收集能力的大小主要取决于红外镜头的F数。温度相等时,黑体和低辐射率物体的辐射亮度相差巨大,传统红外测温仪测量等温的黑体和低辐射率物体时,入射到探测器感光面的目标辐射功率的比值大致等于两者的辐射率比值。因此,可以认为低辐射率物体的单位温度变化引起的探测器感光面的目标辐射功率变化远小于黑体,红外测温仪对低辐射率物体的辐射测量信噪比也远小于黑体。上述三种方法可以提高低辐射率物体单位温度变化引起的感光面辐射功率变化,采用噪声等效功率相同的红外测温仪时,可以获得更高的辐射和温度测量精度。此外,针对低辐射率物体的光学特性,人们还开发了基于反射率、偏振等光学特性的红外测温法[8]。本文详细概述了各种低辐射率物体测温法的基本原理和技术路线,并分析了各种方法的应用场景及其优缺点。

1　基于环境辐射抑制的测温法

红外测温仪测量低辐射率物体时,入射至红外镜头的辐射可分为三部分:低辐射率物体辐射、经低辐射率物体表面反射的环境辐射以及测量路径的空气辐射。物体越光滑,表面反射的环境辐射越大。测温距离较近时可以忽略空气辐射。基于环境辐射抑制的低辐射率物体测温主要通过环境辐射屏蔽、液氮制冷镜筒以及校正计算等技术方法抑制或消除入射至探测器的环境辐射干扰,可以分为以下四种:

1.1　基于辐射屏蔽装置的测温法

为了消除周围环境辐射在低辐射率物体表面的反射干扰,美国阿贡国家实验室的Ellingson和弗罗里达大学的Hsieh提出了一种用辐射屏蔽装置(radiation shield)消除环境辐射在金属表面反射干扰的测温技术[11]。由于辐射屏蔽装置的辐射在常温金属表面的反射会大于金属自身辐射,该方法无法用于常温或低温金属,只能用于高温金属的温度测量。基于Ellingson的研究,黄善杰等人进一步提出了采用液氮冷却辐射屏蔽装置的方法,以降低辐射屏蔽装置自身的辐射强度。图1是一种基于液氮制冷辐射屏蔽装置的光学镜面红外测温原理示意图[18]。

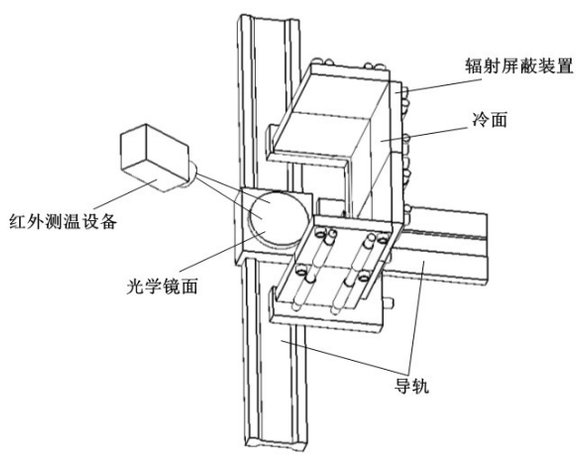

图1　基于辐射屏蔽装置的红外测温示意图

Fig. 1　Schematic diagram of infrared temperature measurement based on radiation shielding

红外测温仪倾斜测量光学镜面,辐射屏蔽装置安装在导轨上,与被测镜面之间的距离可调。辐射屏蔽装置形状和尺寸可以覆盖经镜面反射的红外测温仪视场。辐射屏蔽装置设有液氮的注入口和泄压口,内部有容纳液氮的腔体。冷面是由经过发黑处理的、具有高导热系数的金属材料制成的,有较高的红外辐射率和吸收率,用于消除环境辐射在

冷面的反射。测温时，入射到红外镜头的辐射包括镜面辐射、冷面辐射在镜面的反射和屏蔽装置与镜头之间的空气辐射，周围环境辐射被完全屏蔽。由于冷面温度接近液氮温度（-196 ℃），冷面辐射远小镜面辐射。冷面下端的狭缝状气口喷出的紧贴冷面的低温气流用于抑制冷面结冰。该测温方法可以屏蔽包括大气下行辐射在内的各种环境辐射干扰，但当周围空气被低温气流或冷面制冷后，空气内的水蒸气不可避免凝结成雾滴，雾滴辐射在镜面的反射会引入难以评估的测温误差。总的来说，基于辐射屏蔽装置的测温方法适用于高温低辐射率物体的红外测温。此外，由于低辐射率物体的辐射率远小于黑体，即使屏蔽掉所有环境辐射干扰，使用该测温方法对低辐射率物体进行测量时，其信噪比和测温精度也远低于对黑体的测量。

1.2 基于液氮制冷的测温法

辐射率为0.04、温度为20 ℃的极低辐射率物体在长波红外波段的辐射亮度，大致相当于零下103 ℃的黑体。若周围环境全部被液氮冷却至零下196 ℃，理论上可以有效抑制环境辐射对低辐射率物体红外测温的干扰。德国国家计量院（PTB）的Monte与全俄光学物理研究院（VNIIOFI）的Morozova等人联合研制了一种高精度辐射温度测量系统[12]。该系统的关键器件和光路的镜筒都使用了液氮进行冷却，且光路和腔室被抽成真空，以降低光路周围环境和空气的红外辐射干扰。该系统代表着目前红外测量的前沿技术水平，理论上可用于测量低辐射率物体的辐射率和温度。中国计量科学研究院的郝小鹏等人于2015年成功研制了真空红外温度标准设备（VRTSF）[19]。VRTSF的设备内部也采用了液氮制冷和真空设计，并内置了型号为Bruker VERTEX80V的傅里叶红外光谱仪[19]。VRTSF代表着国内红外测量的前沿水平，可用于测量低辐射率物体的温度、辐射量和辐射率。基于液氮制冷的测温法几乎能完全消除环境辐射的干扰，但全光路采用液氮制冷和真空设计的造价极其高昂，因此只能对腔内的小尺寸低辐射率物体进行测量，无法用于室外或大尺寸低辐射率物体。

1.3 基于校正算法的测温法

传统红外测温仪对低辐射率物体辐射和其表面反射的环境辐射具有相同的收集能力和路径衰减。因此，入射到红外镜头的低辐射率物体的辐射功率和反射的环境辐射功率的相对大小，可用低辐射率物体辐射亮度和反射的环境辐射亮度表示。为了便于计算，将入射到低辐射率物体的环境辐射等效为低辐射率物体表面一层温度为T_B的黑体发出的辐射，低辐射率物体向外辐射的总辐射亮度的等效黑体温度则记为T_R，存在如下关系：

$$L(T_R) = \rho \times L(T_B) + \varepsilon L(T_M), \tag{1}$$

式中$L(T_R)$为低辐射率物体总辐射亮度，T_M为低辐射率物体温度，ε表示低辐射率物体在测温波段的平均辐射率，ρ为低辐射率物体在测温波段的平均反射率。$\rho * L(T_B)$表示低辐射率物体反射的环境辐射亮度，$L(T_M)$为与低辐射率物体等温的黑体辐射亮度，$L(T_M)$则可表示为：

$$L(T_M) = \left(L(T_R) - \rho \times L(T_B)\right)/\varepsilon . \tag{2}$$

基于上述原理，杨桢等人提出一种用于低辐射率物体红外测温的环境辐射校正算法[20,21]：制造一个表面与被测低辐射率物体的辐射、反射等光学特性相同的薄膜，例如金属膜，放在低辐射率物体的平行位置。假设薄膜和低辐射率物体表面反射的环境辐射基本相同，薄膜的总辐射亮度记为$L(T_{AR})$：

$$L(T_{AR}) = \rho_A \times L(T_B) + \varepsilon_A L(T_A), \tag{3}$$

其中ρ_A为薄膜反射率，ε_A为薄膜辐射率。T_A为薄膜温度，与薄膜等温的黑体的辐射亮度用$L(T_A)$表示。T_{AR}是薄膜表面的总辐射亮度对应的等效黑体温度。杨桢假设金属膜的反射率ρ_A和ε_A之和约为1，且薄膜与环境温度达到热平衡，T_A约等于T_B。根据式（3），环境辐射等效温度T_B可认为等于将辐射系数设置为1.00的传统红外测温仪测量薄膜获得的温度值，即等效黑体温度T_{AR}。测量出低辐射率物体的$L(T_R)$后，把T_{AR}带入式（2），即可获得低辐射率物体的真实温度辐射亮度$L(T_M)$：

$$L(T_M) = \left(L(T_R) - \rho * L(T_{AR})\right)/\varepsilon . \tag{4}$$

根据$L(T_M)$计算出的黑体温度即为低辐射率物体温度T_M。该测温方法采用与环境等温的金属膜来获取环境辐射的反射。最后，通过扣除环境辐射的干扰，可以获得低辐射率物体的真正辐射亮度，这种方法适用于常温和高温低辐射率物体的测量。人们还提出了校正入射角变化以及环境光照对低辐射率物体测温结果影响的算法[22,23]。然而，即便完全消除了环境辐射的干扰，最理想的情况下的测温误差也会是红外测温仪器对黑体测温误差的几十倍。此外，薄膜与环境之间存在的微小温差，以及薄膜和被测低辐射率物体对环境辐射的反射差

异,都可能引入难以评估的测温误差。

1.4　基于外部辐射源的测温法

Alexa提出了一种基于两个外部辐射源的低辐射率物体红外测温的校正算法[13]。该方法通过红外热像仪测量低辐射率物体周围两个物体的红外温度以及其在低辐射率物体表面的表观反射温度(apparent reflected temperature),计算出低辐射率物体的温度和辐射率。红外热像仪测量周围物体在低辐射率物体表面的反射像的表观辐射记为M:

$$M = \sigma T_z^4 = \varepsilon\sigma T^4 + \sigma\rho T_b^4 = \varepsilon\sigma T^4 + \sigma(1-\varepsilon)T_b^4 ,\quad (5)$$

式中T_z是热像仪对反射像的表观温度,T是低辐射率物体的真实温度,T_b是周围的参考物体的真实温度,为低辐射率物体的辐射率,σ为斯忒藩-玻尔兹曼常数,ρ为低辐射率物体反射率。对于低辐射率物体,不同方向角(即辐射光线与法线夹角)的定向反射率和定向辐射率有明显的差异。为了简化计算,Alexa假设在0°到30°的方向角范围内,可以忽略反射率与辐射率随方向角的变化。此外,Alexa认为当低辐射率物体的温度变化范围较小时,低辐射率物体的反射率与辐射率随自身温度的变化可以忽略。当周围物体的温度与低辐射率物体大致相等时,低辐射率物体的辐射率与低辐射率物体对该物体辐射的吸收率基本相等,即低辐射率物体辐射率与其反射率ρ之和约等于1。红外热像仪的工作波段是8~14 μm。基于外部辐射源的红外测温原理,其示意图如图2所示。

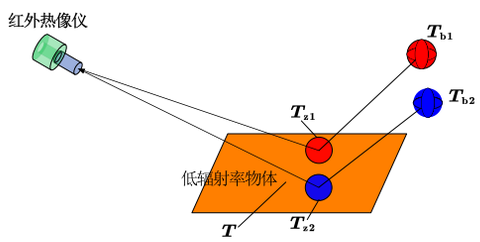

图2　基于外部辐射源的红外测温示意图

Fig. 2　Schematic diagram of infrared temperature measurement based on external radiation sources

红球和蓝球分别表示低辐射率物体周围的两个物体,即两个外部辐射源。低辐射率物体表面的红圆和蓝圆分别表示两个物体的反射像。红外热像仪直接测量两个物体的温度值,分别记为T_{b1}和T_{b2},两个反射像的表观反射温度分别记为T_{z1}和T_{z2}。两个物体的表观反射温度、真实温度和低辐射率物体温度之间存在以下关系式:

$$T_{z1}^4 = \varepsilon T^4 + (1-\varepsilon)T_{b1}^4 ,\quad (6)$$

$$T_{z2}^4 = \varepsilon T^4 + (1-\varepsilon)T_{b2}^4 .\quad (7)$$

根据上述关系,可以计算出低辐射率物体的温度和辐射率:

$$T = \left(\frac{T_{z1}^4 T_{b2}^4 - T_{z2}^4 T_{b1}^4}{T_{z1}^4 - T_{b1}^4 - T_{z2}^4 + T_{b2}^4}\right)^{1/4} ,\quad (8)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{T_{z1}^4 - T_{z2}^4}{T_{b1}^4 - T_{b2}^4} .\quad (9)$$

该测温方法巧妙地采用两个物体消除环境辐射干扰,若红外热像仪对这两个物体及其反射像的红外测温误差为零且两个反射像位置处的低辐射率物体温度相等,则可以获得不受环境辐射干扰影响的理想测温结果。实际上,低辐射率物体在不同方向上的表面反射率和辐射率存在差异、红外热像仪测量两个物体及其反射像的误差和两个反射像位置处低辐射率物体的表面温差都会引入难以评估的最终测温误差。

1.5　基于环境辐射抑制的测温法的优缺点分析

低辐射率物体红外测温时,入射至红外测温仪镜头的低辐射率物体辐射会被其表面反射的环境辐射完全淹没。抑制环境辐射干扰,是实现低辐射率物体真正红外测温的前提。表1展示了四种基于抑制环境辐射的测温方法的基本原理和优缺点。

基于辐射屏蔽装置的测温法和基于液氮制冷的测温法在原理上能够消除环境辐射干扰,理论上可以达到红外测温仪对低辐射率物体的无干扰测温精度。基于环境辐射校正的红外测温技术,采用与被测目标光学特性相同的薄膜,获取环境辐射,并进一步扣除环境辐射,以获得低辐射率物体的辐射亮度和温度。然而,薄膜温度与环境温度并不完全相等;光滑薄膜为非朗伯体,T_{AR}并不能认为等于环境T_B;薄膜和被测目标反射的环境辐射之间存在不可避免的差异,这些因素会引入难以评估的测温误差。对于基于外部辐射源的测温法,两个反射像位置处的低辐射率物体的温差、与法线不同夹角方向的低辐射率物体的反射率和辐射率差异以及红外热像仪的测量误差都会增加最终的测温误差。Alexa实验数据显示于外部辐射源的测温法对金属的测温误差超过了±20 ℃。实际上,即使环境辐射干扰被完全消除,上述四种方法对低辐射率物体的测温精度也远低于黑体,这主要是因为低辐射率物体的辐射率极小,传统红外测温仪对其的辐射测量信噪比远低于对黑体的测量。为了提高辐射测量信噪比和测温精度,人们采用了高辐射率涂层、选

表1 基于环境辐射抑制的四种测温法的基本原理和优缺点

Table 1 Basic principles, advantages and disadvantages of four temperature measurement methods based on environmental radiation suppression

测温方法	基本原理	优点	缺点
基于辐射屏蔽装置的测温法	利用屏蔽装置遮挡住环境辐射	屏蔽装置结构较简单;可用于室外环境	只能用于高温低辐射率物体。测量常温低辐射率物体时,屏蔽装置引入的辐射大于低辐射率物体辐射。
基于液氮制冷的测温法	液氮制冷镜筒以消除环境辐射	几乎可以完全消除环境辐射的干扰;测量精度高	成本高昂,无法用于室外或大尺度的低辐射率物体
基于校正算法的测温法	利用金属膜并结合算法,校正环境辐射	方法简单易实现,测温成本低	金属膜与环境的温差,金属膜和低辐射率物体反射的环境辐射差异会引入测温误差
基于外部辐射源的测温法	利用外部辐射源并结合算法,校正环境辐射	只需两个常规物体、简单易实现;测温成本最低	两反射像处的低辐射率物体温差,以及对物体及反射像的测温误差都会恶化最终测温误差

择高辐射率波段和提高辐射收集能力等方法增加入射到探测器感光面的低辐射率物体辐射功率。

2 高辐射率涂层测温法

高辐射率涂层测温法是在低辐射率物体表面涂覆高辐射率涂层或其他覆盖物的方法[14,24],并测量该涂层的温度,以代表低辐射率物体的温度。该方法已在输电电缆的温度测量中得到广泛应用,特别是用于电缆连接处的温度监测。高辐射率涂层不仅增加了入射到感光面上的辐射功率,也降低了环境辐射的反射干扰,可以获得更高的辐射测量信噪比。当然,高辐射率涂层也可以替换为高辐射率纸胶带。如图3所示,我们采用FLIR公司的T425热像仪在室外测量光学镜面温度的结果。

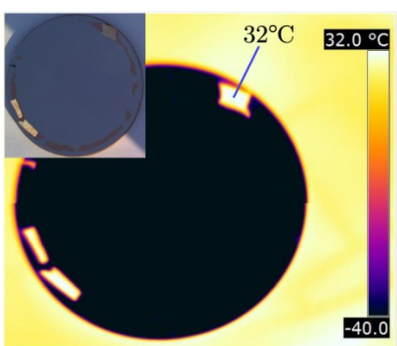

图3 光学镜面的室外红外测温结果

Fig. 3 Infrared temperature measurement results of optical mirrors outdoors

图3的左上角插图展示了光学镜面的实物照片,镜面边缘处贴有三条纸胶带,纸胶带的辐射率大约是0.95。在T425热像仪设置辐射率为0.95的条件下,热像图显示,除了三个纸胶带,其他镜面区域的温度显示为-40 ℃,这是T425的测温下限。镜面区域入射到红外镜头的辐射包括镜面自身的辐射以及大气下行辐射在镜面上的反射,这两者的总和低于T425的辐射探测下限。三个纸胶带的温度为32 ℃,代表镜面的真实温度。高辐射率涂层测温法仅适用于可以在其上覆盖涂层的低辐射率物体,不适用于望远镜主镜、硅晶圆和强激光发射系统的导光镜等表面膜层容易受损的低辐射率物体。

3 高辐射率波段测温法

金属在近红外波段的辐射率通常显著大于长波红外的辐射率[25]。在红外测温时,周围环境的各种物体在近红外波段的辐射亮度也远低于长波红外波段。为了提高金属辐射测量的信噪比,人们通常采用近红外波段的单色、比色以及多色测温仪测量温度较高的金属,当然也可以用于测量近红外辐射率高的其它低辐射率物体。根据维恩位移定示,金属的温度越高,其辐射的峰值波长就越短。根据德国Sensor Therm公司[26]和Optris GmbH公司[27]提供的多款金属红外测温仪产品参数,用于测量温度大于550 ℃金属的红外测温仪,其测温波长通常在0.7~1.1 μm波段,采用硅基探测器。用于测量温度范围为200~550 ℃的金属的红外测温仪,其测温波长主要在1.45~1.8 μm波段,多为InGaAs探测器。用于测量温度50~200 ℃温度范围内金属的测温波长通常在2~2.6 μm波段,也多采用InGaAs探测器。由于常温金属自身的辐射会被其表面反射的环境辐射淹没,目前商品级金属红外测温仪的测温下限为50 ℃。

单色测温仪是用于高温金属、陶瓷、玻璃等低辐射率物体红外测温的常见仪器,利用入射至探测器的窄波段单色辐射功率来确定低辐射率物体的温度,其温度测量值与真实温度、光谱辐射率存在如下关系[28]:

$$\frac{1}{T_c}=\frac{1}{T_r}-\frac{\lambda}{c_2}\ln\varepsilon(\lambda), \tag{10}$$

式中 T_c 为温度测量值,T_r 为真实温度,c_2 为普朗克第二辐射常数,λ 为测温波长,$\varepsilon(\lambda)$ 为物体在波长 λ 处的光谱辐射率。从式(10)中可知,除了理想黑体,单色测温的温度测量值永远不等于真实温度。为了获得真实温度,需要准确的低辐射率物体光谱辐射率。凭经验或参考手册预设的低辐射率物体光谱辐射率与实际辐射率的差异是单色测温的重要误差来源。此外,灰尘、烟雾、镜头表面污染物也会导致严重的测温误差。低辐射率物体温度越低,低辐射率物体辐射的峰值波长越长。常温低辐射率物体在近红外波段的辐射弱且反射率较高,低辐射率物体辐射会被表面反射的环境辐射淹没。近红外波段限制了单色测温仪对常温和低温低辐射率物体的测量能力,导致目前对低辐射率物体的测温下限为 50 ℃。测温下限为 50 ℃的单色测温仪型号有德国 SensorTherm 公司的 M32 3 和 Sirius SI23[26] 和德国 Optris GmbH 公司的 CSmicro-3ML 等[29],上述测温仪均采用波段为 2~2.6 μm 的 InGaAs 探测器。低辐射率物体辐射率越低,单色测温仪的金属测温误差越大,上述几款单色测温仪对黑体的测温精度为±2 ℃,没有给出对低辐射率物体的测温精度。

根据维恩位移定律,物体温度变化时,不仅物体辐射的峰值波长会变化,两个不同波长的光谱辐射亮度的比值也随之变化,比值大小可以表征物体温度。比色测温法利用两个测温波长的窄带光谱辐射功率的比值获得被测目标温度。比色测温仪一般有两个红外探测器,用两个波长探测同一个目标。比色测温的温度测量值(T_c)和真实温度值(T_r)的关系为[30-32]:

$$\frac{1}{T_c}=\frac{1}{T_r}+\frac{\lambda}{c_2\left(\frac{1}{\lambda_1}-\frac{1}{\lambda_2}\right)}\ln\frac{\varepsilon(\lambda_1)}{\varepsilon(\lambda_2)}, \tag{11}$$

$\varepsilon(\lambda_1)$ 和 $\varepsilon(\lambda_2)$ 分别为被测物体在波长 λ_1 和 λ_2 处的光谱辐射率。当被测物体的两个光谱辐射率相等时,温度测量值等于真实温度。理论上,在两个测温波长具有相同影响的各种干扰因素,都不影响比色测温结果。因此,比色测温技术可以克服包括烟雾、灰尘、蒸汽、空气颗粒、被测物体没有覆盖视场等诸多干扰因素引起的测温误差。根据式(11),被测物体在两个测温波长的光谱辐射率差异越小,比色测温精度就越高。因此比色测温技术对近似理想灰体的测温精度高于单色测温。然而,金属、光学镜面等低辐射率物体在不同测温波长的光谱辐射率有差异[33]且辐射率本身很小。比色测温法用于低辐射率物体时,微小的光谱辐射率差异会引起较大的 $\ln\frac{\varepsilon(\lambda_1)}{\varepsilon(\lambda_2)}$ 差异,进而带来较大的测温误差。比色测温技术应用于金属测温时的误差甚至大于单色测温技术[34]。目前用于金属测温的代表性比色测温仪包括 Optris 公司的 CTratio 1M 型比色测温仪[35],SensorTherm 公司的 Metis_M322 和 Capella C322 比色测温仪[36]。CTratio 1M 的两个测温波长位于 0.8~1.1 μm 波段,测温下限为 450 ℃,对黑体的测温误差为±(1% of reading +1 ℃),没有对金属的测温误差数据。Metis_ M322 和 CAPELLA C322 的两个测温波长在 1.45~1.8 μm 范围内,测温下限为 300 ℃,其黑体测温误差与 CTratio 1M 相近。

多波长测温方法也常被用于高温金属的温度测量[37],是比色测温法的延伸。多波长测温一般采用 3~5 个波长进行测温,利用被测物体在多个波长的光谱辐射亮度信号,同时测量出物体的温度和光谱辐射率[38-40]。温度为 T_0,光谱辐射率为 ε 物体的光谱辐射亮度,记为 $L(\lambda, T_0)$,可表示为:

$$L(\lambda,T_0)=\varepsilon L_0(\lambda,T_0), \tag{12}$$

其中 $L_0(\lambda, T_0)$ 为温度为 T_0 的黑体在波长 λ 处的光谱辐射亮度。假定采用 n 个测温波长分别为记 λ_i(i=1,2,3,…,n),则温度为 T_0 的物体在各个测温波长的光谱辐射亮度记为 $L(\lambda_i, T_0)$:

$$L(\lambda_i,T_0)=\varepsilon_i L_0(\lambda_i,T_0). \tag{13}$$

根据式(13)可以获得 n 个方程,进而组成一个欠定方程组。欠定方程组含有 n +1 个未知量,包括 n 个光谱辐射率和一个物体温度,显然无法求解。为了求解出所有未知量,需要一个光谱辐射率与波长的关系式。多波长测温采用一个似乎得到了普遍接受的简单假设,即光谱辐射率随着波长而变化。辐射率与波长的常用函数形式包括线型、多项式、抛物线等。通过人为建立一个光谱辐射率函数,使方程组变为正定方程组,用迭代方法求解出真实温度和光谱辐射率。除了高温金属,多波长测

温方法也被用于高温火焰的温度测量[41]。基于高辐射率波段的单色、比色和多波长测温方法本质上层层递进，三种测温法的基本原理和优缺点如表2所示。

4 基于光学特性的测温法

与常规物体相比，低辐射率物体在反射率、吸收率和偏振等光学特性方面具有显著的差异。人们针对低辐射率物体的特殊光学特性，开发了一些应用于低辐射率物体的新型测温方法，主要包括以下三种方法。

4.1 基于反射特性的测温法

低辐射率物体的辐射率非常小，并且会随着温度、表面粗糙度、氧化程度等因素变化，低辐射率物体的辐射率本质上是难以测量的，尤其是极低辐射率的物体。与测量辐射率相比，测量低辐射率物体的反射率要简单和精确得多，因此研究人员探索使用反射率来测量低反射率物体的表面温度。基于反射特性测温法的理论基础在于金属的光学性质与金属等离子体频率、金属电子的弛豫时间等参数有关，其中弛豫时间是电子与声子碰撞频率的倒数，这与金属中的声子数量成正比。由于声子的数量多少取决于金属温度的高低，因此，金属的温度变化能够引起电子-声子碰撞频率的变化，这进而影响金属的反射率[8,42]。基于温度如何影响金属反射率的物理机制，Ujihara等人首次对金、银、铝、铜、钠、钾六种金属从室温到熔点范围内的反射率变化进行了数值计算，计算结果如图4所示[42]。

表2 基于高辐射率波段的测温方法的基本原理和优缺点

Table 2 Basic principles, advantages and disadvantages of temperature measurement methods based on high emissivity bands

测温方法	基本原理	优点	缺点
单色测温法	利用窄波段的单色辐射功率来确定被测目标温度	只需要一个探测器，测温成本低、结构简单	辐射率设定值与实际值的差异，灰尘、烟雾、镜头污染物，以及被测目标未充满视场等因素会带来严重的测温误差。
比色测温法	两个测温波长的窄带光谱辐射功率的比值获得被测目标温度	可以克服包括烟雾、灰尘、蒸汽、空气颗粒，被测目标没有覆盖视场等因素引起的测温误差	两个测温波长的光谱辐射率差异会带来较大的测温误差
多波长测温法	利用多个波长的光谱辐射亮度信号获得被测目标温度	测温精度高，还可同时获得物体的光谱辐射率	测温成本较高；建立的光谱辐射率函数形式与实际函数的差异会引入测温误差

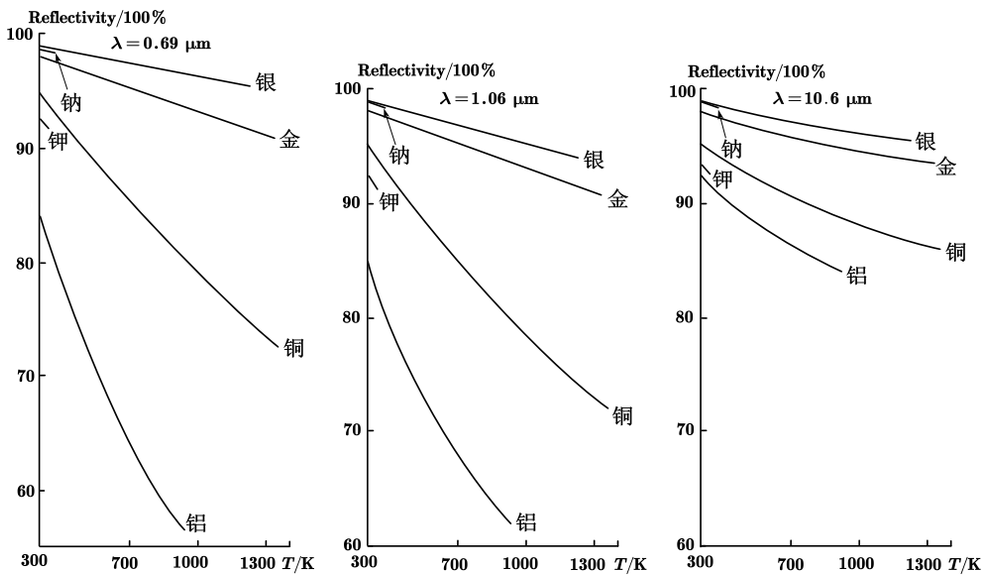

图4 六种金属在不同波长处的反射率随温度的变化曲线：(a) λ= 0.69 μm；(b) λ= 1.06 μm；(c) λ= 10.6 μm

Fig. 4 Temperature dependent reflectance curves of six metals at different wavelengths: (a) λ= 0.69 μm; (b) λ= 1.06 μm; (c) λ= 10.6 μm

图 4 显示,六种金属的反射率均随着温度的升高而降低,熔点处的反射率最低。三个不同波长(0.69 μm,1.06 μm,10.6 μm)的反射率曲线对比可知:波长越长,六种金属的反射率越高,温度变化引起的反射率变化幅度也更小。随着温度从室温增加到金属熔点,波长为 0.69 μm 和 1.06 μm 的银反射率降幅均小于 5%,但铝的反射率降幅达到 30%。Ujihara 的计算结果不涉及入射角因素。为了研究金属辐射率与温度的变化关系,Decker 等人测量了不同波长时抛光铜面的反射率随温度的变化,测量结果如图 5 所示[43]。

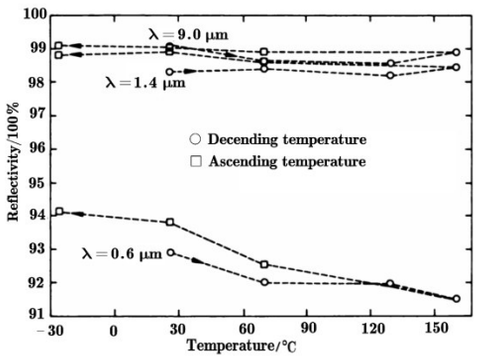

图 5　铜在不同波长处的反射率随温度的变化曲线

Fig. 5　The temperature dependent reflectance curves of copper at different wavelengths

Decker 使用单色仪发射波长分别为 0.6 μm、1.4 μm 和 9 μm 的单色光,用于反射率测量。图 5 中三个波长的反射率曲线可以发现,波长越长,铜表面的反射率越高,铜表面的单位温度变化引起的反射率变化越小。波长为 0.6 μm 和 9 μm 的铜反射率随着温度的升高而变小,随着温度的降低而变大。1.4 μm 波长的反射率随温度的变化幅度小于 0.6 μm 和 9 μm。总体而言,尽管 Decker 的测量结果与 Ujihara 的数值计算结果存在一定差异,但变化趋势大致相符。Decker 的论文中没有给出反射率测量实验的入射角,也没有详细研究入射角和反射率的关系。在 Decker 的研究基础上,Mitra 等人进一步测量了铝和铝钛合金在 633 nm 波长下的反射率,以及它们如何随温度和入射角变化。研究结果显示,当入射角为 50°时,铝金属的反射率随着温度的增加而持续降低。升温阶段时,反射功率(P)与铝面温度(T_{al})的函数关系为[8]:

$$P = -0.0002T_{al}^2 - 0.003T_{al} + 8.3816 . \quad (14)$$

30~190 ℃的升温过程中,反射率变化幅度可达 65%。当入射角为 30°时,铝的反射率随着温度的升高而先增后减,降温时反射率则先减后增。30~190 ℃温度范围内的反射率变化幅度约为 10%。升温阶段时,反射功率(P)与铝面温度(T_{al})的函数关系为:

$$P = -5 \times 10^{-5}T_{al}^2 + 0.0127T_{al} + 4.4614 . \quad (15)$$

降温阶段的函数关系与升温阶段略有差异。与铝金属不同,铝钛合金在各种入射角时的反射率均随着温度的增加而持续降低。在升温阶段,入射角为 20°和 50°的反射功率(P)与铝钛合金温度(T_{al})的函数关系为:

$$P = -3 \times 10^{-5}T_{al}^2 - 0.0055T_{al} + 6.3838 , \quad (16)$$

$$P = -3 \times 10^{-5}T_{al}^2 - 0.0027T_{al} + 5.7817 . \quad (17)$$

30~190 ℃的温度变化范围内,入射角为 20°时的反射率变化幅度为 14%,远小于入射角 50°时的变化幅度 61%。反射率随温度的变化为人们提供了一种金属测温的方法,入射角越大,单位温度变化引起的反射率变化越大,基于反射特性的测温法的灵敏度越高。李新梦等人进一步测量了 45# 钢在 3.8 μm 单色光的反射率,结果表明,45# 钢的反射率随温度的升高而减小,其变化趋势与 Ujihara 的计算结果大致相符[44]。李新梦[44]等人认为,反射率随温度变化的一个重要原因是温度导致电导率发生了变化。除了光滑金属表面,人们也研究了粗糙金属表面反射率随温度的变化。国防科学技术大学龙超等人测量了经金刚砂研磨后粗糙金属表面的反射率,测量结果表明,532 nm 激光在金属靶表面的反射率会随着温度变化,靶面温度从 250 ℃升高到 320 ℃的过程中,反射率的最大变化幅度达到了 25%[45]。不同入射角下,反射率随金属温度也有不同的变化关系。粗糙金属靶板表面近似为朗伯面,表面反射接近理想漫反射。基于反射特性的测温法不仅可用于光滑金属,也可用于粗糙金属测温。

基于反射特性的测温法需要建立表面反射率与表面温度的函数关系。太原理工大学的贾华宇等人提出了一种基于反射率的半导体激光器腔面测温方法[46]:将测试光束通过偏振分光器分离成参考光束和测试光束,反射后测试光束通过第二偏振分光器与参考光束共同聚焦在差分检测器上,通过锁相放大器测量所得的差分信号,获得反射率的变化量。反射率变化量带入前期建立的腔面温度与反射率之间的函数关系,计算出腔面温度的变化。

目前基于反射特性的测温方法并不成熟，测温应用场景也较为稀少。随着反射率与温度关系研究的不断深入以及反射率高精度测量技术的不断进步，该测温法有望逐渐走入人们的视野。

4.2 基于吸收特性的测温法

该方法采用脉冲激光加热金属薄片，薄片吸收激光热量后温度上升，用红外测温仪测量出激光加热区背部的金属温升，测量温升时可以在背部刷涂高辐射率涂层。根据温升和激光总能量，计算出被测金属对激光的吸收率并作为金属辐射率；最后结合金属辐射亮度的测量值，获得金属温度[47]。该测温方法只能用于薄片金属的温度测量，理论基础是测量热扩散率的激光闪光技术（laser-flash technique）。该测温方法假定金属对激光的吸收率等于金属辐射率且需要直接测量金属的辐射亮度，难以用于常温金属。由于抛光金属、光学镜面等极低辐射率物体的金属辐射亮度无法准确测量，该方法对极低辐射率物体测温是不准确的。

4.3 基于偏振特性的测温法

Tohru Iuchi研究证实，金属辐射率是波长、表面粗糙度和金属偏振辐射亮度比值的函数，且该函数关系与金属温度无关[48]。测量波长确定后，Tohru Iuchi建立了不同表面粗糙度金属的法向辐射率与不同出射方向的P和S偏振辐射亮度比值的函数关系式。金属测温时，Tohru Iuchi首先测定被测金属的表面粗糙度，然后测量特定出射方向的P/S金属偏振辐射亮度比值；将偏振辐射亮度比值和出射角带入建立的函数关系式，计算出法向辐射率；最后测量金属的法向辐射亮度，结合法向辐射率获得金属温度。为了准确测量金属的偏振辐射亮度和法向辐射亮度，需要被测金属的法向辐射亮度和偏振辐射亮度大于周围环境在金属表面的反射辐射亮度。因此，该测温方法只能用于温度较高的低辐射率物体，例如金属和硅晶圆[49]，难以用于常温的极低辐射率物体。

4.4 基于光学特性的测温法的优缺点分析

由于极低辐射率物体的自身辐射会被其表面反射的周围环境完全淹没，偏振辐射和法向辐射都难以测量，因此基于偏振辐射和吸收特性的红外测温方法都无法用于极低辐射率物体。只要反射率的测量精度足够高，基于反射率-温度函数测温法理论上可以测量任何温度范围的极低辐射率物体。基于光学特性的三种测温方法的基本原理和优缺点归纳如表3所示。

5 基于反射器的测温法

由于低辐射率物体辐射率远小于黑体辐射率，传统红外测温仪测量低辐射率物体时，低辐射率物体的单位温度起伏在探测器感光面引起的辐射功率起伏远小于黑体，进而辐射测量信噪比也远小于黑体。辐射率是物体的固有属性，提高入射至感光面的低辐射率物体辐射功率起伏的一种方法是提高测温仪对低辐射率物体辐射的收集能力。当红外测温仪对低辐射率物体辐射的收集能力越强，低辐射率物体的单位温度变化在感光面引起的辐射功率起伏越大，辐射测量的信噪比也越大，对低辐射率物体的测温精度也越高。反射器被人们用于提高红外测温仪对金属的辐射收集能力[50,51]，进而获得更高的辐射测量信噪比和测温精度。最早的反射器是内表面镀金膜的半球型反射器[15,16,52-55]，Drury等人研制了配有半球型无控温反射器的Land表面高温计，测温原理如图6所示[9]。

半球型镀金反射器的半径记为R，探测孔半径记为r，反射器与金属之间的间隙记为H，其中r和H

表3 基于光学特性的测温法的基本原理和优缺点

Table 3 Basic principles, advantages and disadvantages of temperature measurement methods based on optical properties

测温方法	基本原理	优点	缺点
基于反射特性的测温法	利用温度与反射率的关系，测量反射率获得温度值	测温范围广，可远距离测量	需要极高的反射率测量精度
基于吸收特性的测温法	利用激光闪光技术测量金属的激光吸收率并视为金属辐射率；结合辐亮度的测量值获得温度值	可远距离测量吸收率和温度	测量辐射亮度时会受到环境辐射的反射干扰，只能用于高温金属片
基于偏振特性的测温法	根据波长、偏振辐射亮度比值和粗糙度等参数计算出低辐射率物体辐射率；结合辐亮度的测量值获得温度值	利用三个辐射亮度，计算出辐射率	测量三个辐射亮度时会受到环境辐射的反射干扰，只能用于高温物体

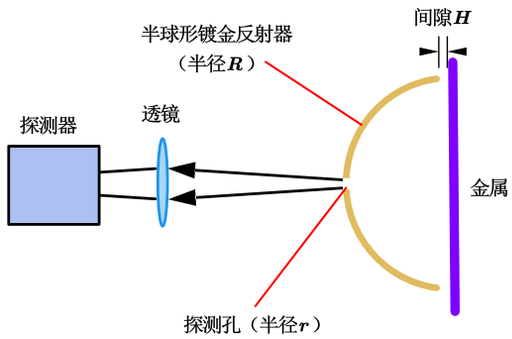

图6　Land表面高温计的测温原理示意图

Fig. 6　Schematic diagram of the temperature measurement principle of Land surface pyrometer

一般为毫米量级。反射器靠近金属时,反射器和金属表面之间构成反射腔。探测器感光面上不仅有直接入射的经透镜汇聚的金属辐射,还有经反射腔一次和多次反射后入射至感光面的金属辐射。与传统红外测温仪相比,反射器不仅消除了周围物体在金属表面的反射辐射干扰,反射腔内的多次反射效应还大幅度增强了其对金属辐射的收集能力,本质上提高了低辐射率物体的等效辐射率。然而,多次反射效应也导致反射器红外测温仪无法进行热成像测温。被测金属在满足漫反射(朗伯面)的假设下,Drury给出了半球型反射器对金属辐射的收集能力提升倍数,如式(18)所示:

$$M = \frac{1}{1-(1-\varepsilon)(1-\varepsilon_{\mathrm{R}})\left[1-\left(\frac{r}{R}\right)^2-\left(\frac{r}{H}\right)^2\right]}, \quad (18)$$

其中,ε是被测金属的辐射率,ε_{R}是反射器内表面的辐射率。反射器提高了红外测温仪对金属辐射的收集能力和测量信噪比,进而获得更高的测温准确度[56]。计算反射器对金属辐射收集能力的方法大多假设被测金属为理想漫反射表面,满足朗伯面模型[57-59]。该假设适用于金属冶炼过程中的表面较粗糙的金属,不适用于抛光金属、光学镜面等极低辐射率物体。针对极低辐射率物体,黄善杰等人提出了一种基于Zemax非序列光线追迹的反射器收集非朗伯面辐射的数值计算方法[60]。除了半球型反射器,常用的无控温反射器形状还包括截断半球型、双楔型、圆柱型、圆锥型、抛物面型等[57-63],其中圆锥型和抛物面型反射器具有最突出的辐射收集能力[60-63]。近年来,反射器红外装置还可用于低辐射率物体的辐射率测量[64-67]。车勋建等人进一步发明了一种内置有可移动管子的半球型反射器并研制出ReFaST测温仪,其测温原理如图7所示[56]。

测温时半球形镀金反射器靠近被测金属,反射器探测孔内安装有内表面发黑的可移动管子,红外探测器位于管子上方。如图7(a)所示,当管子底端移至贴近金属表面时,探测器测量出的辐射亮度被视为金属辐射亮度L_{s},忽略入射至探测器的管子内表面辐射。管子底端退至反射器顶部时,如图7(b),测量出经反射器放大后的金属辐射亮度L_{a}。车勋建将L_{a}视为与金属等温的黑体辐射亮度,根据L_{a}计算出的黑体温度为被测金属温度,L_{s}与L_{a}比值即为金属辐射率。基于反射器的红外测温仪测量极低辐射率物体时,反射器内表面辐射也会经反射腔放大后入射至探测器感光面并被视为低辐射率物体辐射。由于极低辐射率物体和反射器内表面的辐射率相当,极低辐射率物体与反射器的温度接近

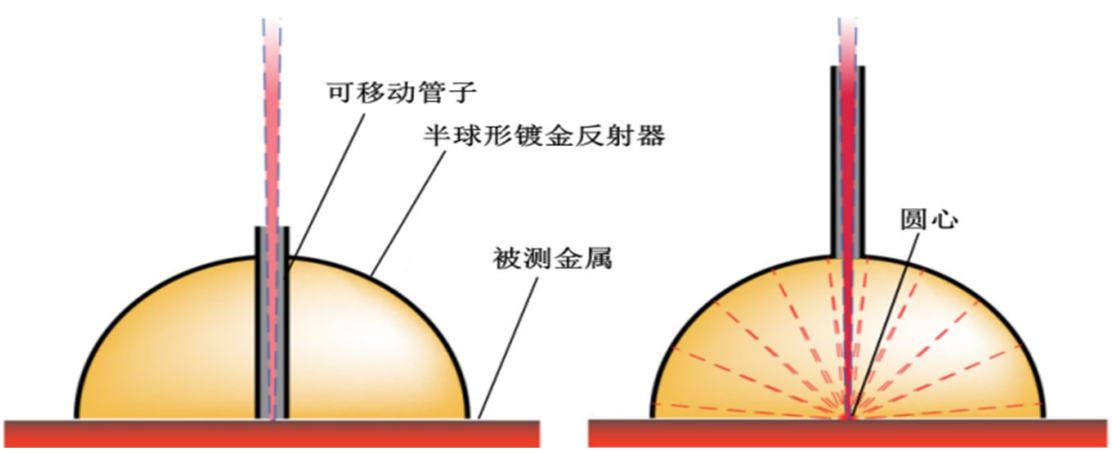

图7　ReFaST的测温原理图:(a)直接测量金属辐射亮度;(b)测量经放大器放大后的金属辐射亮度

Fig. 7　Temperature measurement principle diagram of ReFaST: (a) direct measurement of the metal radiance; (b) measurement of the metal radiance after amplification by a reflector

时，反射器辐射及其随环境温度的变化将导致严重的测温误差。因此，目前带有反射器的红外测温仪多用于自身辐射远大于反射器和管子内表面辐射的高温金属。ReFaST测温仪主要用于温度超过600 ℃的高温金属。此外，ReFaST测温仪中入射至感光面的管子内表面辐射也会引起测温误差。

基于ReFaST测温方法，Terada等人进一步提出了一种基于圆柱型无控温反射器的红外测温法[63]，测温原理如图8所示。

如图8(a)所示，首先利用单色测温仪直接测量金属辐射亮度，然后测量经圆柱型反射器放大后的金属辐射亮度，见图8(b)。最后，采用激光器发射532 nm激光测量金属的镜面反射参数，参见图8(c)。Terada根据两个辐射亮度的比值和反射参数计算出金属辐射率，最后结合辐射亮度获得金属温度。由于测量金属辐射亮度时会受到环境辐射、测温仪镜头辐射和反射器内表面辐射的干扰，该测温技术只适用于高温金属，而无法用于常温低辐射率物体。此外，目前采用激光束在低辐射率物体表面的反射信号测量低辐射率物体辐射率的各种方法，都需要对低辐射率物体表面的镜面反射和漫反射间的关系做一些假设[59]，而这些假设会引起难以评估的测温误差。目前基于反射器的测温方法常用于高温金属，难以用于常温低辐射率物体，如抛光金属或光学镜面等。

光学镜面大多采用与反射器内表面相似的镀膜工艺，常用膜层包括铝膜、银膜和金膜等。光学镜面和反射器内表面的辐射率相差不大。基于反射器的红外测温仪测量常温光学镜面时，入射到感光面的镜面辐射会被反射器内表面辐射淹没。基于反射器的测温方法难以剥离出镜面辐射，无法对常温镜面的辐射和温度进行真正测量。为了实现常温镜面的红外测温，黄善杰等人从提高镜面辐射收集能力和消除环境辐射、仪器自身辐射干扰等方面入手，提出了可用于常温光学镜面的红外测温解决方案[60]：设计了对镜面辐射收集能力高的两种反射器，把入射至红外探测器感光面的镜面辐射功率放大至传统红外仪器的20倍，进而使得镜面辐射测量信噪比和镜面测温精度也大幅度提高。图9是研制的两种镜面测温仪(infrared mirror thermometer，IMT)的设计示意图。

IMT主要由反射器、控温系统和红外探测器三部分组成。设计了抛物面型和圆锥型反射器用于替换传统红外镜头，如图9所示。反射器材质为紫铜，内表面镀金膜，中心有圆形通孔。被测目标的辐射通过圆形通孔入射至红外探测器的感光面。反射器靠近被测镜面时形成反射腔，除了直接入射至感光面的镜面辐射(图9中红色线所示)，还有部分镜面辐射经反射器内表面一次反射(蓝色线)和二次反射(紫色线)后入射至感光面。更重要的是，还有更多的镜面辐射在反射器和镜面之间经过多次反射后入射至感光面。由于反射腔内的多次反射效应，反射器对镜面辐射的收集能力相较于F#1红外镜头放大了20倍以上。反射器靠近被测镜面的测温距离设计不仅可以放大微弱的镜面辐射，还能大幅度抑制环境辐射干扰。反射器内表面的金

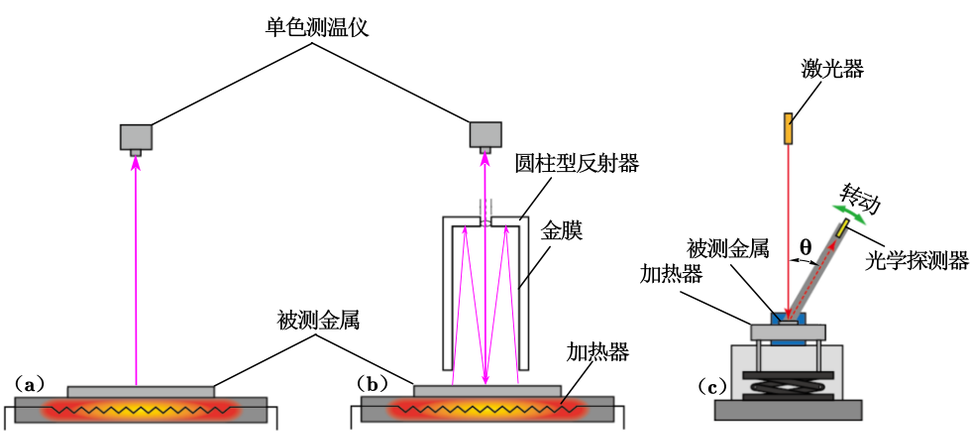

图8 基于圆柱型反射器的红外测温原理示意图：(a)直接测量金属辐射亮度；(b)测量经放大器放大后的金属辐射亮度；(c)测量镜面反射参数

Fig. 8 Schematic diagram of infrared temperature measurement principle based on cylindrical reflector: (a) direct measurement of the metal radiance; (b) measurement of the metal radiance after amplification by a reflector; (c) measurement of specular reflection parameter

膜和光学镜面的辐射率相差不大,且金膜面积大于被测镜面。入射至探测器感光面的镜面辐射容易被金膜辐射淹没。反射器温度变化导致入射至感光面的反射器辐射功率也不断变化。为了稳定入射至感光面的反射器辐射功率变化,使其不受环境温度变化的影响,研制的反射器设有温度控制系统。温控系统主要由 Water Jacket(水套)和水冷机组成,原理如图 10(a)所示。

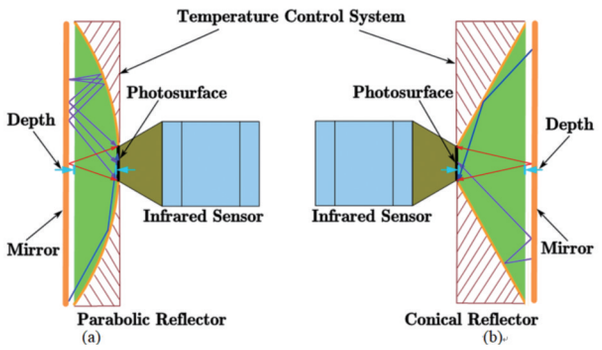

图 9　IMT 的设计示意图:(a)抛物面型 IMT;(b)圆锥型 IMT

Fig. 9　Schematic diagrams of the proposed IMT designs: (a) parabolic IMT; (b) conical IMT

紫铜水套在反射器外表面形成一个环形水腔,水冷机组提供的循环水通过水腔下方的进水口流入,并从顶部的出水口流出。重力作用下,环形水腔内充满循环水。紫铜反射器壁厚约为 1 mm,鉴于铜的导热系数极高,循环水的温度可视为反射器内表面的温度。反射器循环水的温度决定了反射器内表面金膜的辐射亮度。图 10(b)为抛物面型 IMT 测量光学镜面的实物照片,图中光学镜面温度可以被精准控制,以便验证测温结果。IMT 采用反射器精准控温、温度调制和辐射提取方程,从而把入射至探测器感光面的镜面辐射从反射器内表面辐射和探测器自身辐射中剥离出来,实现对镜面辐射和温度的真正测量。为了提高 IMT 的镜面测温性能,黄善杰等人还对反射器的开口直径、深度和测温距离进行了优化设计。

目前,基于反射器的红外测温仪可以把低辐射率物体的辐射放大,并从入射至感光面的各种辐射中剥离出来,从而获得远高于传统红外测温仪的测温精度。然而,目前各种基于反射器的红外测温法仅适用于近距离测温。测温距离的增加会减少反射腔内的多次反射效应,进而影响辐射收集能力和测温结果[17,68]。具体来说,随着测温距离的增加,反射器对低辐射率物体的辐射收集能力会迅速下降,因此测温距离多被限制在几厘米或毫米的量级[69,70]。这种只能近距离测量的限制在很大程度上制约了基于反射器的红外测温仪在低辐射率物体测温方面的应用潜力。

6　总结与展望

低辐射率物体自身辐射容易被其表面反射的环境辐射所淹没,低辐射率物体的红外测温一直是红外测温领域中的一个难题。低辐射率物体红外测温技术的发展离不开应用需求牵引和探测技术的不断推动。除了传统金属冶炼过程的测温,随着金属冶炼、天文望远镜、强激光系统的光学镜面,半导体晶圆以及热防护陶瓷涂层等低辐射率物体测温需求的不断增长,低辐射率物体红外测温技术得到了大幅度发展。

本文介绍了用于低辐射率物体的各种红外测

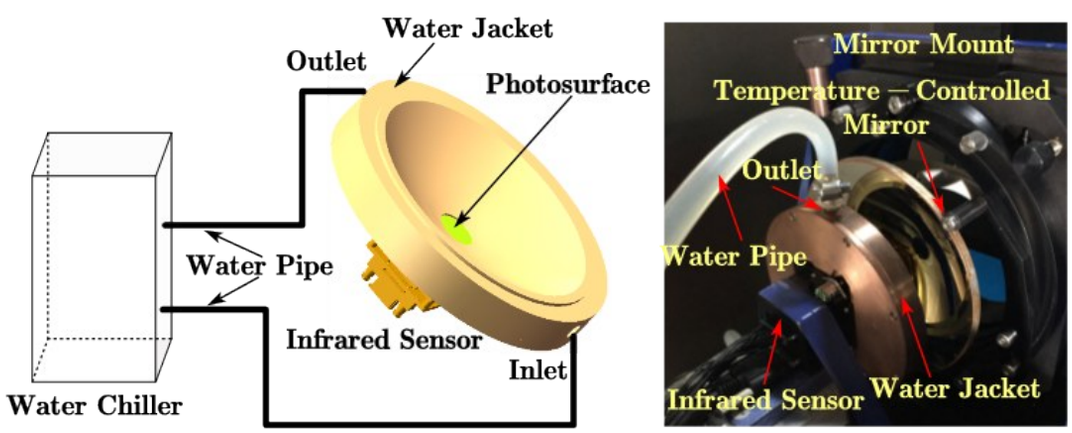

图 10　IMT 的控温原理和镜面温度测量图:(a) 控温系统的原理示意图;(b)测量光学镜面的实物图

Fig. 10　Temperature control principle of IMT and experimental diagram of optical mirror temperature measurement: (a) schematic diagram of the IMT's temperature control system; (b) a photo of the IMT measuring an optical mirror

温方法，并详细阐述了每种方法的核心原理和优缺点。

基于辐射屏蔽装置的测温法和基于液氮制冷的测温法采用物理方法抑制环境辐射的干扰，以消除入射到探测器感光面的环境辐射。这两种方法可以有效提高对低辐射率物体的测温精度，但成本极其高昂且难以用于室外物体测温。基于校正算法的测温法巧妙利用光学特性与被测低辐射率物体相同的薄膜测量出环境辐射的数值，然后在测量低辐射率物体的温度时，将其从总辐射中扣除。基于校正算法的测温法可以在一些假设前提下消除环境辐射的干扰，但实际上存在很大的测温误差。基于外部辐射源的测温法首先利用周围两个物体遮挡环境辐射，然后通过红外热像仪测量出两个物体的自身温度（T_{b1}，T_{b2}）和两物体在低辐射率物体表面的反射像表观温度（T_{z1}和T_{z2}），利用四个温度值计算出被测物体的温度。上述四种抑制环境辐射的测温法使用的测温设备均为传统红外测温仪。由于低辐射率物体的辐射率远小于黑体，即便在完全消除环境辐射干扰的理想情况下，对低辐射率物体的辐射测量信噪比和测温精度也低于其对黑体测量。高辐射率涂层测温法在低辐射率表面覆盖高辐射率涂层，进而提高被测目标辐射信号强度和测温精度。该方法多用于电缆检测，无法用于光学镜面、半导体晶圆以及金属冶炼、玻璃加工等领域。金属在近红外波段的光谱辐射率大于长波红外，一般环境在近红外波段的辐射亮度也远小于长波红外，高辐射率波段测温法采用近红外波段测量金属温度。与中波和长波红外波段相比，该方法可以获得更高的辐射测量信噪比和金属测温精度。但由于环境辐射的反射干扰，高辐射率波段测温法难以用于低温的低辐射率物体。鉴于金属反射率高且反射率与温度之间存在物理关系，基于反射特性的测温法通过测量反射率获得金属温度。基于吸收特性的测温法使用激光闪光技术来测量金属薄片的吸收率，并将其作为薄片辐射率。然后结合金属辐射亮度的测量值来确定金属的温度。基于偏振特性的测温法通过测量P和S偏振辐射亮度比值来计算法向辐射率，进一步结合金属的法向辐射亮度测量值获得金属温度。基于吸收、偏振特性的测温方法目前只能用于高温的低辐射率物体，无法用于极低辐射率物体和常温的低辐射率物体。

基于反射器的测温法利用反射器和低辐射率物体构成的反射腔内多次反射效应，与传统红外测温仪相比，基于反射器的测温法利用反射器和低辐射率物体构成的反射腔内的多次反射效应提升反射器测温仪对低辐射率物体辐射收集能力。虽然辐射收集能力增强并不是低辐射率物体表面的真实辐射的增强，但从入射至探测器感光面（接收端）的目标辐射功率来看，辐射收集能力提升引起的辐射功率增强等效于物体表面真实发射辐射的增强。人们一般认为，反射器的多次反射效应等效于提高了低辐射率物体的辐射率，且辐射收集能力提升倍数等于辐射率的提升倍数。反射器的多次反射效应对低辐射率物体辐射信号的增强相当于一个增益固定的辐射信号放大器，进而获得更高的辐射测

表4 五类低辐射率物体测温方法的核心原理和优缺点

Table 4 Core principles and advantages and disadvantages of five temperature measurement methods for low emissivity objects

测温方法	核心原理	优点	缺点
基于环境辐射抑制的测温法	抑制环境辐射的干扰，提高辐射测量信噪比	实现了对低辐射率物体辐射的真正测量	测温精度低；屏蔽环境辐射的成本高；实际场景难以满足校正算法的假设条件
高辐射率涂层测温法	刷涂高辐射率涂层，涂层与低辐射率物体等温	等价于提高了低辐射率物体辐射率；测温精度高	高辐射率涂层会损害低辐射率物体表面
高辐射率波段测温法	选择辐射率高的测温波段	高辐射率提高了辐射测量信噪比；测温精度高于基于环境辐射抑制的测温法	低辐射率物体在近红外波段的辐射率仍然较低；难以用于常温或低温低辐射率物体
基于光学特性的测温法	建立并利用光学特性和温度的关系测温	无需直接测量辐射率	反射率测温法需要极高的反射率测量精度；基于吸收和偏振特性测温易受环境辐射的反射干扰
基于反射器的测温法	利用反射器放大低辐射率物体辐射并屏蔽环境辐射；同时，结合反射器的温度调制，以分离出目标辐射	大幅度提高了辐射测量信噪比；测温精度高	目前只能近距离测温

量信噪比和测温精度。反射器测温仪可以大幅放大入射到探测器感光面的低辐射率物体辐射,进而获得远高于传统红外测温仪的测温精度。反射器测温仪的一个不足是,随着测温距离的增加,反射器的辐射收集能力会衰减,进而导致测温误差。为了提高测温距离,需要结合辐射数值模拟对反射器形状进行优化设计,以降低入射至感光面的目标辐射功率与测温距离之间的相关性。表4总结了用于低辐射率物体的五类测温方法的原理和及其优缺点。

低辐射率物体的红外测温技术的发展离不开应用需求牵引和探测技术的不断推动。除了传统金属冶炼过程的测温,太阳望远镜,强激光系统的导光镜,半导体晶圆等领域对低辐射率物体测温需求的不断增长,大幅促进了低辐射率物体红外测温技术的发展和应用价值的提升。当前针对低辐射率物体的大多数测温方法都面临低辐射率的挑战,低辐射率及其伴随的高反射率特性会导致严重的测温误差。低辐射率测温技术的发展目标是消除低辐射率对测温精度的制约。反射器测温法通过大幅增强对低辐射率物体辐射的收集能力,提升低辐射率物体的等效辐射率,进而打破了低辐射率对测温精度的制约。基于反射特性的测温法不涉及辐射率,彻底消除了低辐射率对测温的限制。两种测温方法有望成为未来低辐射率物体测温的重要发展方向。

References

[1] Volkmer R. Thermal characteristics of the solar telescope GREGOR [C]. Ground-based and Airborne Telescopes II. SPIE, 2008, 7012: 220-228.

[2] Hasan S S, Soltau D, Karcher H, et al. NLST: the indian national large solar telescope [C]. Ground-based and Airborne Telescopes III. SPIE, 2010, 7733: 215-226.

[3] Hu X C, Peng J Q, Zhang B. Thermal distortion of deformable mirror and its influence on beam quality [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 45-53.
胡小川, 彭家琪, 张彬. 变形镜热形变及其对光束质量的影响分析[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 45-53.

[4] Du Y Y, An J Z, Shu X J. Effect of thermal distortion of mirror on characteristics of laser beam in unstable resonator [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(8): 1333-1338.
杜燕贻, 安建祝, 束小建. 腔镜热变形对非稳腔光场特性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(8): 1333-1338.

[5] Liu Z J, Zhou P, Xu X J. Study on universal standard for evaluating high energy beam quality [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(4): 773-778.
刘泽金, 周朴, 许晓军. 高能激光光束质量通用评价标准的探讨[J]. 中国激光, 2009, 36(4): 773-778.

[6] Jia J C, Zhong Y K, Zhang Z Z, et al. Wafer temperature monitoring technology in the integrated circuit manufacturing process [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 15-29.
贾镜材, 钟业奎, 张泽展, 等. 集成电路制造过程中的晶圆温度监测技术[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 15-29.

[7] Yang S M, Tao W Q. Heat transfer [M]. 4th Edition. Beijing: Higher Education Press, 2006: 367-368.
杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 第四版. 北京:高等教育出版社.

[8] Mitra C , Banerjee A, Maity S, et al. An optical method for measuring metal surface temperature in Harsh environment conditions [C]. Optical Sensing and Detection. SPIE, 2010, 7726: 384-391.

[9] Yang Z, Zhang S C, Yang L. Calculation of infrared temperature measurement on non-lambertian objects [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(08): 2093-2097.
杨桢, 张士成, 杨立. 非朗伯体红外测温计算研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(08): 2093-2097.

[10] Chen S Q, Chen H S. Influence and analysis of surface material to veracity of measuring temperature by using infrared thermal image instruments [J]. Experimental Technology and Management, 2008, 25(011): 41-43.
陈水桥, 陈洪山. 表面材料对红外热成像仪测温准确性的影响和分析[J]. 实验技术与管理, 2008, 25(011): 41-43.

[11] Hsieh C K, Ellingson W A. A quantitative determination of surface temperatures using an infrared camera [J] Metal Science and Heat Treatment, 1979, 21(5): 346-349.

[12] Monte C, Gutschwager B, Morozova S P, et al. Radiation thermometry and emissivity measurements under vacuum at the PTB [J]. International Journal of Thermophysics, 2009, 30: 203-219.

[13] Alexa P, Solař J, Čmiel F, et al. Infrared thermographic measurement of the surface temperature and emissivity of glossy materials [J]. Journal of Building Physics, 2018, 41(6): 533-546.

[14] Raj V C, Prabhu S V. Measurement of surface temperature and emissivity of different materials by two-colour pyrometry [J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(12): 124903.

[15] Drury M D, Perry K P, Land T. Pyrometers for surface-temperature measurement[J]. Journal of the Iron and Steel Institute, 1951, 169(3): 245-250.

[16] Becker H B, Wall T F. Effect of specular reflection of hemispherical surface pyrometer on emissivity measurement [J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1981, 14(8): 998-1001.

[17] Bedford R E, Ma C K, Chu Z X, et al. Calculation of the radiant characteristics of a plane diffuse surface covered by a specular hemisphere[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1988, 21(8): 785-791.

[18] Huang S J, Cheng X M, Zhang T, et al. A shielding method and device for high reflectivity infrared radiation measurement: China, CN105043558B[P]. 2015-11-11.
黄善杰, 程向明, 张涛, 等. 一种用于高反面红外辐射

测量的屏蔽方法及装置：中国，CN105043558B[P]. 2015-11-11.

[19] Hao X P, Song J, Xu M, et al. Vacuum radiance-temperature standard facility for infrared remote sensing at NIM [J]. International Journal of Thermophysics, 2018, 39: 1-14.

[20] Yang Z, Yang L. Calculation and error analysis of infrared temperature measurement using reflected temperature compensation [J]. Optical Technique, 2008, 34 (S1): 154-156.
杨桢，杨立. 反射温度补偿法对红外测温的补偿计算与误差分析[J]. 光学技术，2008，34 (S1)：154-156.

[21] Yang Z, Zhang S C, Yang L. Reflection temperature compensation method and its experimental verification [J]. Optical Precision Engineering, 2010, 18 (9): 1959-1964.
杨桢，张士成，杨立. 反射温度补偿法及其实验验证[J]. 光学精密工程，2010，18 (9)：1959-1964.

[22] Wei S L, Han L W, Cheng F Y. Compensation algorithm to improve the influence of ambient light on the infrared temperature measurement accuracy of a strong reflector surface [J]. Infrared Technology, 2020, 42(12): 1179-1184.
魏绍亮，韩连伟，程奉玉. 改善环境光照对强反光体表面红外测温精度影响的补偿算法研究[J]. 红外技术，2020，42(12)：1179-1184.

[23] Wei S L, Wang J S, Han L W, et al. Algorithm of compensation infrared temperature measurement error on strong reflector [J]. Laser & Infrared, 2019, 49(2):187-193.
魏绍亮，王敬山，韩连伟，等. 补偿强反光体表面红外测温误差的算法研究[J]. 激光与红外，2019，49(2):187-193.

[24] Höser D, Wallimann R, Von Rohr P R. Uncertainty analysis for emissivity measurement at elevated temperatures with an infrared camera [J]. International Journal of Thermophysics, 2016, 37: 1-17.

[25] Optris pi 1M shortwave infrared cameras [EB/OL]. (Last revised: 2022-09-30) http://optris.com.cn/thermal -imager-optris-pi-1m.

[26] Monochrome temperature measurement series [EB/OL]. (Last revised: 2022-06-20) http://www.sensortherm. cn/products/hw/4.html.

[27] Infrared Thermometers [EB/OL]. (Last revised: 2022-09-30) http://optris.com.cn/infrared-thermometers.

[28] Zhang C G. The research of infrared radiation temperature measurement key techniques [D]. Harbin Engineering University, 2013.
张崇关. 红外辐射温度测量关键技术研究[D]. 哈尔滨工程大学，2013.

[29] CSmicro 3M [EB/OL]. (Last revised: 2022-09-30) http://optris.com.cn/csmicro-3m.

[30] Müller B, Renz U. Development of a fast fiber-optic two-color pyrometer for the temperature measurement of surfaces with varying emissivities [J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(8): 3366-3374.

[31] Hosseini S B, Beno T, Johansson S, et al. A methodology for temperature correction when using two-color pyrometers-compensation for surface topography and material [J]. Experimental Mechanics, 2014, 54: 369-377.

[32] Lowe D, Machin G, Sadli M. Correction of temperature errors due to the unknown effect of window transmission on ratio pyrometers using an in situ calibration standard [J]. Measurement, 2015, 68: 16-21.

[33] Ke W N, Zhu D Q , Cai G B. Simulation and analysis of spectral emissivity of metal [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2010, 31(11): 2139-2145.
柯维娜，朱定强，蔡国飙. 金属光谱发射率的仿真与分析[J]. 航空学报，2010，31(11)：2139-2145.

[34] Che X J. Development of blackbody converting-type method and instrument for precise measurement of surface temperature [D]. Northeastern University, 2017.
车勋建. 黑体转换式表面温度精确测量方法研究和仪器研制[D]. 东北大学，2017.

[35] Optris CTratio 1M [EB/OL]. (Last revised: 2022-09-30) http://optris.com.cn/ctratio-1m.

[36] 2-color pyrometers [EB/OL]. (Last revised: 2022-06-20) https://www.sensortherm.de/en/2-color-pyrometers.

[37] Yang Z J, Dai J M, Lin Y, et al. A multi-spectral pyrometer for measuring cathode temperature field of vacuum arc plasma discharge [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(1): 60-64.
杨宗举，戴景民，杨林，等. 用于真空弧等离子体放电阴极温度场测量的多光谱高温计[J]. 光谱学与光谱分析，2021，41(1)：60-64.

[38] Dai J M. Study of the technique of multi-spectral radiation thermometry[D]. Harbin Institute of Technology, 1995.
戴景民. 多光谱辐射测温技术研究[D]. 哈尔滨工业大学，1995.

[39] Dai J M, Yang M H, Chu Z X. Multi-wavelength pyrometer and its application [J] Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1995, 14 (6): 461-466.
戴景民，杨茂华，褚载祥. 多波长辐射测温仪及其应用[J]. 红外与毫米波学报，1995，14 (6)：461-466.

[40] Dai J M. Survey of radiation thermometry [J]. Techniques of Automation &Applications, 2004, 23(3): 1-7.
戴景民. 辐射测温的发展现状与展望[J]. 自动化技术与应用，2004，23(3)：1-7.

[41] Wang Z T, Dai J M, Yang S. Research on a multispectral thermal imager for true temperature field measurement of explosion flames [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(12): 3885-3890.
王振涛，戴景民，杨森. 用于爆炸火焰真温场测量的多光谱热成像仪研究[J]. 光谱学与光谱分析，2023，43 (12)：3885-3890.

[42] Ujihara K. Reflectivity of metals at high temperatures [J]. Journal of Applied Physics, 1972, 43(5): 2376-2383.

[43] Decker D L, Hodgkin V A. Wavelength and temperature dependence of the absolute reflectance of metals at visible and infrared wavelengths [J]. Natl. Bur. Stand. US Spec. Publ, 1981, 620: 190-200.

[44] Li X M, Jiang H M, Zhang T Y. Reflectivity change of 45# steel at 3.8 μm under 915 nm laser irradiation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 071401.
李新梦，江厚满，张天宇. 915 nm 激光辐照下 45# 钢在 3.8 μm 处反射率变化[J]. 激光与光电子学进展，2017，54(7)：071401.

[45] Long C , Chen J Y, Yang Y C, et al. Temperature dependence of reflectance and irradiation of the ground metallic target [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37

(12): 1566-1570.
龙超,陈军燕,杨雨川,等.温度变化下研磨金属表面反射率和发射率的测量[J].发光学报, 2016, 37(12): 1566-1570.
[46] Jia H Y, Zhao J M, Sun Y X, et al. A method for measuring the cavity surface temperature of a semiconductor laser: China, CN115219058A[P]. 2021-04-20.
贾华宇,赵菊敏,孙元新,等.一种半导体激光器腔面温度测量的方法: 中国, CN115219058A[P]. 2021-04-20.
[47] Krenek S, Anhalt K, Lindemann A, et al. A study on the feasibility of measuring the emissivity with the laser-flash method [J]. International Journal of Thermophysics, 2010, 31: 998-1010.
[48] Iuchi T, Furukawa T. Some considerations for a method that simultaneously measures the temperature and emissivity of a metal in a high temperature furnace [J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(12): 5326-5332.
[49] Iuchi T, Gogami A. Simultaneous measurement of emissivity and temperature of silicon wafers using a polarization technique [J]. Measurement, 2010, 43(5): 645-651.
[50] Machin G, Anhalt K, Battuello M, et al. The European project on high temperature measurement solutions in industry (HiTeMS) - a summary of achievements [J]. Measurement, 2016, 78: 168-179.
[51] Che X J, Xie Z. Surface tmperature measurement with unknown emissivity using a two-color Pyrometer placed with a reflector [C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2018, 398 (1): 012005.
[52] Yao C C, Ge X S, Cheng S X, et al. The research on a new kind of blackbody radiation source [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1991, 12(2): 164-168.
姚成才, 葛新石, 程曙霞, 等. 一种新型人工黑体辐射源的理论和实验研究[J]. 工程热物理学报, 1991, 12(2): 164-168.
[53] Zhang P. A study of the system error of surface pyrometer [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1986, 5(3): 164-168.
张平. 前置反射器辐射温度计系统误差研究[J]. 红外与毫米波学报, 1986, 5(3): 164-168.
[54] Turner S F, Metcalfe S F, Mellor A, et al. Accurate thermal imaging of low-emissivity surfaces using approximate blackbody cavities [C]. Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIV. SPIE, 2012, 8354: 309-316.
[55] Song Y. Study of spectral emissivity on-line measurement technology [D]. Harbin Institute of Technology, 2009.
宋扬. 光谱发射率在线测量技术研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2009.
[56] Che X J, Xie Z. Development of ReFaST pyrometer for measuring surface temperature with unknown emissivity: Methodology, implementation, and validation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(7): 1845-1855.
[57] Krapez J C, Belanger C, Cielo P. A double-wedge reflector for emissivity enhanced pyrometry [J]. Measurement Science and Technology, 1990, 1(9): 857-864.
[58] Cielo P G, Krapez J C, Lamontagne M, et al. Conical-cavity fiber optic sensor for temperature measurement in a steel furnace [J]. Optical Engineering, 1993, 32(3): 486-493.
[59] Krapez J C, Cielo P G, Lamontagne M. Reflecting-cavity IR temperature sensors: an analysis of spherical, conical, and double-wedge geometries [J]. Proc. SPIE, 1990, 1320: 186-201.
[60] Huang S J, Wang L X, Hu X, et al. Research on accurate non-contact temperature measurement method for telescope mirror [J]. Optics Express, 2023, 31(13): 21521-21541.
[61] Peacock G R. Review of noncontact process temperature measurements in steel manufacturing [C]. SPIE conference on Thermosense XXI, 1999, 3700: 171-189.
[62] Ridley I, Beynon T G R. Infrared temperature measurement of bright metal strip using multiple reflection in a roll-strip wedge to enhance emissivity [J]. Measurement, 1989, 7(4): 171-176.
[63] Terada D, Takigawa R, Iuchi T. Automatically emissivity-compensated radiation thermometry [C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2018, 1065(12): 122008.
[64] Zhu C X, Hobbs M J, Willmott J R. An accurate instrument for emissivity measurements by direct and indirect methods [J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(4): 044007.
[65] Zhu C X. Design and realisation of high accuracy emissivity measurement instruments for radiation thermometry [D]. University of Sheffield, 2019.
[66] Wang J L, Xie Z, Che X J. A novel accuracy validation method of surface temperature measurement by the ReFaST pyrometer [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 72: 1-9.
[67] Xie Z, Wang J L, Che X J. Research on the methodology and instrument of traceable measurement of surface temperature based on an "ideal plane" model [J]. AIP Advances, 2022, 12(6): 065009.
[68] Gao K M, Liu H L, Chen W Q. Study on radiation pyrometer preceded with a reflector [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 1984, 5(3): 39-47.
高魁明, 刘怀良, 陈万庆. 前置反射器辐射温度计的研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1984, 5(3): 39-47.
[69] Zhang Z M, Zhou Y H. An effective emissivity model for rapid thermal processing using the net-radiation method [J]. International Journal of Thermophysics, 2001, 22: 1563-1575.
[70] Zhou Y H, Shen Y J, Zhang Z M, et al. A Monte Carlo model for predicting the effective emissivity of the silicon wafer in rapid thermal processing furnaces [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(9): 1945-1949.