

~40  $\mu\text{m}$ ; 样品加热系统采用导体自热的方式(仅适用于导体材料), 测量温度范围为 500~1 600 K; 样品形状为条状, 宽为 0.635 cm, 长为 20.32 cm, 厚度为 0.025~0.06 cm. oxidized inonel 和 oxidized kanthal 样品表面均做喷砂和氧化处理, Pt-13% Rh 样品表面抛光并做退火处理, 但未做粗糙度评定。

图 1—图 3 分别为在 800, 1 100 和 1 300 K 下三种材料的标准光谱发射率数据。测量波长为 1.09~15.2  $\mu\text{m}$ , 共取 156 个波长点, 并分别对同种材料的 7 个标准样品进行测量,

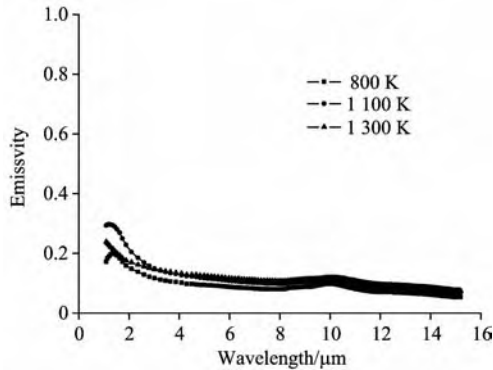


Fig. 1 Normal emissivity of Pt-13%Rh working standards

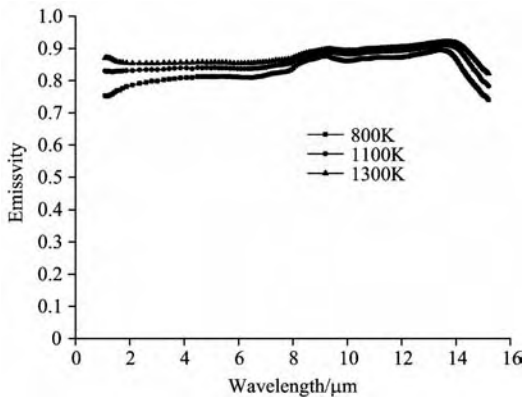


Fig. 2 Normal emissivity of oxidized inonel working standards

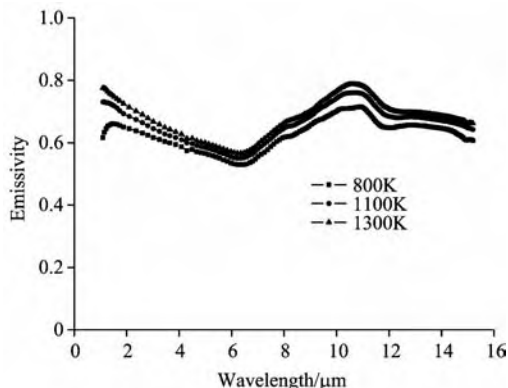


Fig. 3 Normal emissivity of oxidized kanthal working standards

每个样品测量 3 次, 取 21 个数据的平均值。由图 1—图 3 可知, 三种标准样品的光谱发射率随温度的升高而增大, 但随波长的变化关系较为复杂, 尤其是在短波段。Pt-13% Rh 的光谱发射率随波长的变化规律与其他金属的光谱发射率变化趋势基本一致<sup>[3]</sup>; oxidized inonel 和 oxidized kanthal 的光谱发射率随波长的变化较为复杂, 这可能是由于氧化层所引起干涉的缘故<sup>[4]</sup>。

## 2 NPL 和 IMGIC 提议的光谱发射率测量标准参考材料

虽然 NIST 颁布了光谱发射率标准参考材料的相关标准和数据, 但是并没有得到其他国家的认可。主要原因是: NIST 给出的光谱发射率数据是基于其研制的辐射能量对比法测量装置得到的数据, 并没有与其他测量装置进行大量的对比研究, 除此之外, 表面粗糙度和氧化是影响光谱发射率的两个最重要因素<sup>[5]</sup>, 但 NIST 并未对测量样品做粗糙度评定, 在加热过程中也未对加热系统进行抽真空或者气体保护。

1985 年 NPL 的 Redgrove 报道了一种非常具有特色的光谱发射率测量装置<sup>[6]</sup>, 该装置利用外推法能够精确的确定待测样品的表面温度, 不仅适用于金属材料, 而且也适用于非金属材料。测量温度范围为 473~1 273 K, 波长范围为 2~5  $\mu\text{m}$ , 并且可以测量从法向至 70° 范围内的方向光谱发射率。1990 年 Redgrove 利用研制的测量装置在 5 个波长点下对美国提出的标准参考材料 Pt-13% Rh 和 oxidised inonel 进行了测量, 样品温度为 774 K<sup>[7]</sup>。从图 4 和图 5 中可以看出, Redgrove 的测量值比 NIST 给出的标准参考值高出了 1%~2%, 而且随着波长的增加, 其结果与 NIST 数据误差也越来越小。这可能是由于随着波长的增大, 信噪比增大, 不确定度越来越小。

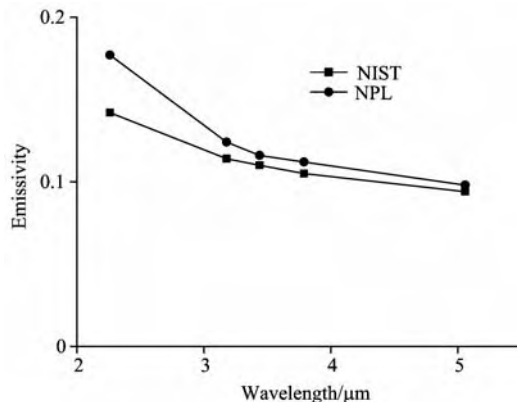


Fig. 4 Normal spectral emissivity of Pt-13%Ph at 774 K

IMGIC 的测量装置也很有特点, 它利用积分球反射计在 0.9  $\mu\text{m}$  波长下精确测量表面的温度, 然后利用能量对比法来测量待测样品的光谱发射率<sup>[8]</sup>。从 1989 年—1995 年 NPL, IMGIC 等欧洲国家的一些研究单位先后开展了光谱发射率测量的对比研究。他们主要测量了 Pt、铁镍合金 (fecral-

loy)、氮化硅( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )三种潜在的光谱发射率测量标准材料<sup>[8]</sup>。在测量初期,对比测量误差非常大,通过对黑体炉的比对校准后,测量误差有所减小,但对比测量结果在某些波段仍然存在差异,所以最后未能对光谱发射率标准参考材料达成一致的意见。

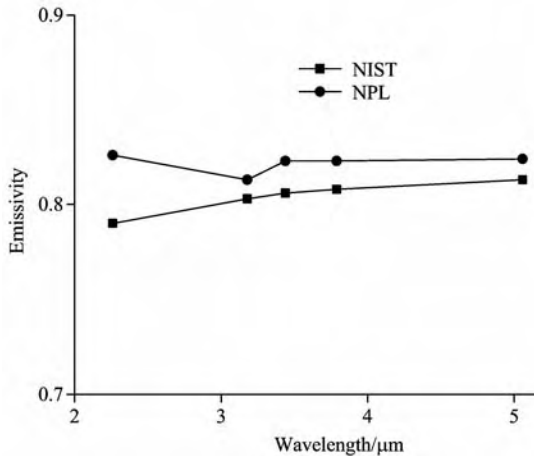


Fig. 5 Normal spectral emissivity of oxidized inconel at 774 K

1995年 Redgrove 报道了 NPL 与 IMGC 在 2.26, 3.79 和 5.06  $\mu\text{m}$  三个波长下对 Pt, fccralloy 和  $\text{Si}_3\text{N}_4$  对比测量的结果,样品温度为 773 K<sup>[9]</sup>。由图 6 可知, Pt 的光谱发射率变化规律基本上与 Pt-13% Rh 一致, NPL 和 IMGC 对比测量值误差在 1% 之内。对于非金属  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , 两者测量差值随着波长的增加而增大,误差在 2% 之内。对于 fccralloy, 在波长 3.79 和 5.06  $\mu\text{m}$ , 两者测量值几乎重合,误差小于 0.05%; 而在更短的波长 2.26  $\mu\text{m}$ , 测量差值有所增大,但误差仍然在 2% 以内。由此可见, NPL 和 IMGC 对比测量的结果是比较理想的。

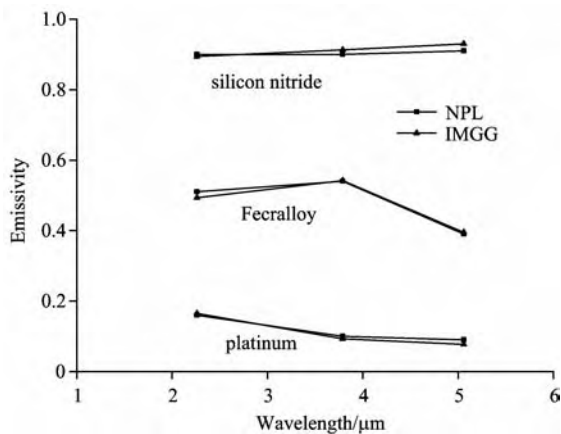


Fig. 6 Normal emissivity of silicon nitride, fccralloy and platinum at 773 K

值得注意的是, NPL 与 IMGC 的光谱发射率测量装置的测量原理并不相同,而且选择的三种材料也非常具有代表性,其中包含一种非金属,光谱发射率也涉及到了高、中、

低值。遗憾的是, NPL 和 IMGC 仅对三个波长和一个温度点的光谱发射率进行了对比测量,其测量结果并不具有很强的说服力。虽然他们不认同 NIST 提出的三种标准样品作为光谱发射率测量标准材料,但是也未对相关的测量标准达成共识。

Pt 具有优异的抗氧化、抗腐蚀、耐高温等特性,光谱发射率较为稳定<sup>[10]</sup>, NIST 在 1963 年报道了 Pt 的光谱发射率,但在随后发布的标准参考材料中,却改为了 Pt-13% Rh。2004 年 Bauer 指出,虽然 Pt 有许多优点,但是其价格昂贵,作为光谱发射率标准并不合适。这可能是 NIST 最初用 Pt-13% Rh 替代 Pt 的缘故。另外,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  是一种抗氧化、耐高温的超硬材料,光谱发射率随着波长的变化受温度和波长的影响相对较大<sup>[11]</sup>,并且不易加工,所以不太适合作为标准参考材料。fccralloy 是一种抗高温氧化的合金,光谱发射率非常稳定,随波长的变化几乎呈线性关系<sup>[12]</sup>,比较适合作为标准参考材料。

### 3 Armco 铁作为光谱发射率测量标准参考材料

在 2004 年第 9 届国际工业与科学中的温度和热测量学术会议上,德国的 Bauer 和 NIST 的 Rink 提议把 Armco 铁作为光谱发射率测量的标准参考材料,并报道了所得的测量数据<sup>[13]</sup>。Bauer 设计的光谱发射率测量装置是基于辐射能量对比法,为防止在加热过程中待测样品表面氧化,加热系统处于真空或保护气体中,利用傅里叶红外光谱仪测量 1—24  $\mu\text{m}$  的光谱发射率。

Bauer 分别在 473, 673, 873, 1 073 和 1 273 K 下测量了三种不同粗糙度表面的样品。在测量之前,样品表面分别做喷砂、研磨、抛光处理,并用粗糙度轮廓仪标定样品表面的粗糙度。图 7 为在 1 273 K 下对三种不同粗糙度表面的样品所测量的结果<sup>[13]</sup>。从图中可以看出,表面粗糙度对 Armco 铁的光谱发射率影响很大,Armco 铁的光谱发射率随波长的增大而减小。此外, Bauer 在不同的温度下分别对几种样品进行退火处理,并对其光谱发射率进行了测量。结果表明,在两次退火处理后,表面的光谱发射率有明显的变化,此后

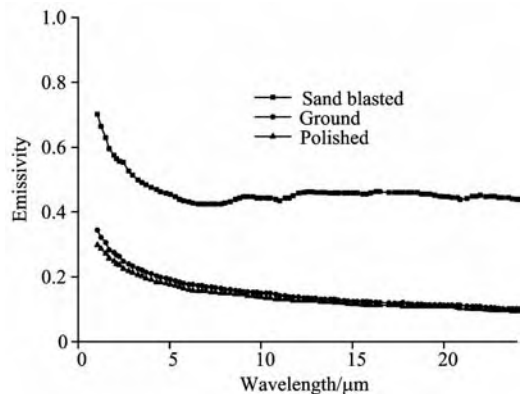


Fig. 7 Normal emissivity of three Armco specimens at 1 273 K