

光学学报

高温石墨板短波红外光谱发射率-温度变化规律研究

卞宇涛¹, 潘军^{1*}, 蒋立军¹, 孙也涵¹, 曹宇¹, 范博文²

¹吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026;

²北京控制与电子技术研究所, 北京 100032

摘要 为了研究高温目标在短波红外波段内的发射率光谱特性以及发射率与温度的关联规律,以高温石墨板为例在暗室环境中使用光谱仪测量其辐射亮度及使用热电偶测量其表面温度,并基于黑体辐射定律获取高温石墨板在 9 组不同温度下短波红外波段(1300~2500 nm)的光谱发射率,同时采用方差分析方法对不同温度分组下发射率的差异进行分析。实验结果表明,不同温度下发射率光谱曲线的形态基本一致,发射谷和发射峰分别在 2200 nm 和 2380 nm 的波长处;随着温度的升高,发射率呈降低趋势;在信度为 0.05 的情况下,不同温度分组的发射率差异显著;发射率随温度变化显著,在 559~855 K 的温度范围内发射率从 0.77~0.83 降低至 0.62~0.70,变化规律可用线性模型进行拟合,确定系数均大于 0.87。

关键词 光谱学; 高温石墨板; 短波红外; 光谱发射率; 温度; 方差分析

中图分类号 O433

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1030003

Study on Variation of Short Wave Infrared Spectral Emissivity of High-Temperature Graphite Plate

Bian Yutao¹, Pan Jun^{1*}, Jiang Lijun¹, Sun Yehan¹, Cao Yu¹, Fan Bowen²

¹Key College of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun, Jilin 130026, China;

²Beijing Institute of Control and Electronics Technology, Beijing 100032, China

Abstract To study the emissivity spectrum characteristics of high-temperature targets in the short-wave infrared band and the correlation law between emissivity and temperature, a high-temperature graphite plates is measured using a spectrometer in a darkroom environment, and its surface is measured using a thermocouple based on the black body radiation law. Spectral emissivity of the high-temperature graphite plate in the short-wave infrared band (1300–2500 nm) at nine different temperatures is obtained. At the same time, the variance analysis method is used to analyze the differences in emissivity at different temperatures. The experimental results show that the shape of the emissivity spectrum curve is the same at different temperatures. The emission valley and emission peak appear at the wavelengths of 2200 and 2380 nm, respectively. As temperature increases, emissivity tends to decrease. In case of a confidence level of 0.05, the emissivity of different temperatures is significant; emissivity changes with temperature. In the temperature range of 559–855 K, the value of the emissivity from 0.77–0.83 to 0.62–0.70. The change law can be fitted with a linear model, and the coefficients determination are all greater than 0.87.

Key words spectroscopy; high temperature graphite plate; short wave infrared; spectra emissivity; temperature; variance analysis

OCIS codes 300.2140; 300.6340; 300.6190

收稿日期: 2020-10-28; 修回日期: 2020-11-16; 录用日期: 2020-12-21

* E-mail: panj@jlu.edu.cn

1 引言

高温目标(如森林、煤层和秸秆等燃烧温度显著高于常温的地物)的识别与温度反演的研究是遥感信息检测与反演领域的重要研究对象,其对遥感资源调查、环境监测和灾害预警等具有重要的理论与实用价值^[1]。与目前遥感温度反演主要利用的中、热红外遥感数据相比,短波红外遥感数据的空间分辨率更高且受大气辐射的影响更小^[2-3],在小面积高温目标的识别与温度反演的研究中具有更高的敏感性与精度^[4-6]。在短波红外对高温目标进行信息提取所用的识别模型和反演算法等均有诸多的研究且应用逐渐深入,其中光谱发射率作为表征物体表面辐射能力强弱的重要物理量之一,是制约反演精度的核心参数^[7],但物体的发射率会受到材料种类、表面粗糙程度、波长和温度等因素的影响,为此数值具有不确定性^[8],而且温度和发射率在数学关系上的耦合性也会给温度反演的研究带来困难^[9]。

为了探究物体的发射率特性,国内外已经开展了大量的研究,研究的方法主要有发射率理论推导法、发射率地面实验测量法和发射率遥感反演法。柯维娜等^[10-13]根据经典的电磁学理论建立了热红外波段的方向发射率模型,由于模型中的参数(折射率和消光系数等)受到波长和温度等因素的影响较大且难以获取,并且模型受到理想光学表面这一假设的限制,难以对高温目标在短波红外波段的发射率进行推算。对于地面尺度材料发射率的实验观测,现使用的方法有量热法^[14]、能量法^[15-16]、反射率法^[17-18]以及多光谱法^[19-20],并有多位学者对不同材料的发射率随温度的变化进行了实验研究^[21-23]。根据辐射测温研究的需要,以往的研究波段多集中在辐射能量较强的中、热红外波段,在短波红外波段缺乏针对性的研究。在温度-发射率联合反演领域,众多学者对发射率温度分离(TES)算法进行了较为深入的研究,其中 TES 的代表性算法主要有参考波段法^[24]、包络线法^[25]、发射率归一化法^[26]、发射率之比方法^[27]、最大-最小值差值法^[28]、 α 剩余法^[29]、灰体发射率法^[30]和光谱平滑迭代法^[31-32]。上述算法均引入了发射率模型的额外约束条件,这些约束条件是从常温地物在热红外波段的发射率光谱的统计规律总结得来的^[33],但未考虑发射率随温度变化的特性。由于发射率具有光谱特性且高温目标与常温目标有较大的温度差异,上述算法是否适用于短波红外波段下高温目标的温度-发射率的反演还有待

验证。综上所述,作为高温目标的识别与反演的有利波段,高温目标在短波红外波段表现出显著区别于常温地物的特征,但短波红外波段的地物光谱发射率信息的未知性、不确定性及与温度耦合的特性都限制了遥感信息的识别与反演精度的提升。

采用实验观测方法探究高温目标在短波红外波段内的光谱发射率特性及其随温度变化的规律,最为直接简便且真实可信。同时,为了满足反演应用的需求以及从实验可行性的角度出发,可选择高温石墨板来代替有机质燃烧类的高温目标(石墨与有机质燃烧主要产物同为碳单质)进行实验研究。目前,相关学者针对石墨材料的光谱发射率已进行深入研究^[34-35],但受限于仪器的有效测量波长,其在短波红外波段内的光谱发射率信息仍然匮乏。

本文使用光纤式光谱仪搭建发射率测量系统,首先在暗室环境中使用光谱仪测量石墨板的法向辐射亮度,同步使用热电偶对其进行测温,根据光谱发射率定义和普朗克黑体辐射定律计算其光谱发射率,实验从低温到高温以固定的温度间隔分为多组,并对各组进行多次测量;然后利用方差分析方法分析不同分组的发射率差异;最后定量分析光谱发射率随温度变化的规律。该研究丰富了地物发射率光谱的数据库,为遥感信息反演的研究增添数据支撑。石墨作为一种耐高温且性质稳定的材料,了解其光谱发射率特性也为工业生产领域中的辐射测温等需求提供理论支持。

2 发射率测量实验原理

对于面辐射源的高温目标,其光谱辐射能力与具有相同温度的黑体的光谱辐射能力之比称为该目标的光谱发射率,表达式为

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{L_s(\lambda, T)}{L_b(\lambda, T)}, \quad (1)$$

式中: λ 为波长; T 为目标温度; $L_b(\lambda, T)$ 为黑体的辐射亮度; $L_s(\lambda, T)$ 为目标的辐射亮度。由(1)式可知,获取目标的辐射亮度以及目标具有相同温度的黑体的辐射亮度,即可求得目标的光谱发射率,目标温度 T 可由热电偶直接测得,与目标具有相同温度的黑体的辐射亮度 $L_b(\lambda, T)$ 可由普朗克公式求得,表达式为

$$L_b(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]}, \quad (2)$$

式中: h 为普朗克常数, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; c 为光速, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$; k 为玻尔兹曼常数, $k =$

$1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。光谱仪所测的值为目标辐射亮度与常温环境下目标反射的辐射亮度的叠加,表达式为

$$L_A = L_s(\lambda, T) + (1 - \epsilon)L_e(\lambda, T_e), \quad (3)$$

式中: $L_e(\lambda, T_e)$ 为环境辐射亮度; T_e 为环境温度。实验中,石墨表面的实际温度大于 559 K,常温下环境温度小于 303 K。假设环境背景为黑体且石墨由发射率为 0.6 的灰体组成,取石墨温度为 559 K,环境温度为 303 K,将二者代入普朗克公式中,得到在 1300~2500 nm 波段始终有 $L_A > 11000(1 - \epsilon)L_e(\lambda, T_e)$,反射能量最大值为 $2.821 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$,所以可忽略由反射能量带来的影响,即 $L_A = L_s(\lambda, T)$ 。目标的光谱发射率可表示为

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{L_s(\lambda, T)\lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]}{2hc^2}。 \quad (4)$$

3 实验观测

根据发射率的测量原理,设计了发射率测量实验以及数据处理方法。

3.1 发射率测量实验的设计

发射率测量的实验装置如图 1 所示。为了消除外界环境光的干扰,实验是在无风和室温的暗室环境中进行的。高温目标材料为三晶碳素公司生产 euz 型号的高纯石墨,尺寸为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$;常温下,热导率为 $120 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;电阻率为 $11 \mu\Omega \cdot \text{m}$;体积密度为 $1.75 \text{ g}/\text{cm}^3$;表面平整均匀,呈钢灰色,金属光泽不透明,极完全平行解理,加热过程中表面状态不发生改变。以配备比例-积分-微分控制器(PID)的智能控温仪中的电加热板作为加热源,加热板表面的长宽与石墨一致,可设置加热范围为 $0 \sim 1000 \text{ K}$,加热温度稳定。实验采用 ASD 公司生产型号为 FiledSpec3 的光纤式野外光谱仪对辐射亮度进行测量,能够测量可见光到近红外波段($350 \sim 2500 \text{ nm}$)的地物反射率光谱或辐射光谱。光谱仪由三个独立的探测器组成:一个为可测波段为 $350 \sim 1100 \text{ nm}$ 的 512 阵元光二极管阵列(PDA)的近红外(VIR)探测器,准确度为 0.02% ;其他两个均为可测波段分别为 $1000 \sim 1900 \text{ nm}$ 和 $1700 \sim 2500 \text{ nm}$ 的 InGasA 短波红外(SWIR)探测器,准确度为 0.01% 。不同的探测器工作状态有所差异,在光谱仪启动后至少预热 90 min 才能达到稳定的工作状态。当使用裸光纤探头进行测量时,探测的全视场角为 25° ,测量过程中可以设置每条光谱曲线的积分次数。为了使石墨板充满观测视域以测量辐射亮度,将光谱仪探头垂直对准石墨板的中心,固定

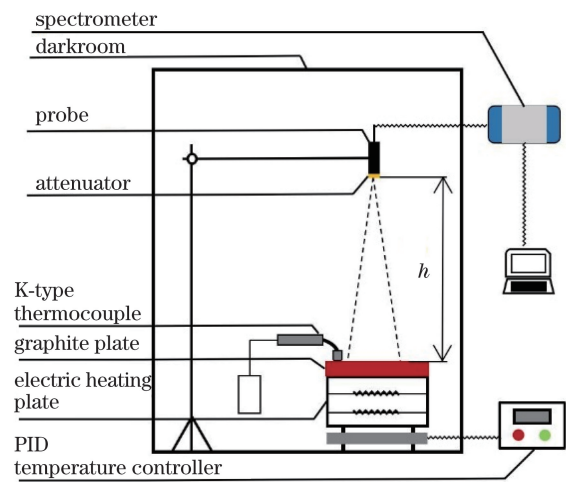


图 1 发射率测量的实验装置

观测高度后进行观测。当石墨板的温度过高时,辐射亮度会超出光谱仪量程,此时要在探头前安装型号为 ZAB20 的衰减片。在实际的加热过程中,由于石墨和空气的热交换作用,石墨表面的温度并不等于设置的加热温度,需要使用手持式 K 型热电偶测温仪对其进行测量。为了增大探头与被测目标的接触面积以提高测温速度与准确性,装载接触式表面测温探头能够在非还原性气体的环境中数秒内就可测得固体的表面温度,测温量程的上限为 1073 K ,准确度为 $0.3\%t + 1^\circ \text{C}$ (t 为温度,单位为 $^\circ \text{C}$)。按照设置温度的不同,温度从 573 K 开始增加到 923 K (设置温度在 923 K 以内,因石墨的实际温度小于 873 K ,而在 873 K 以上石墨会发生氧化,其化学性质会发生改变),以 50 K 为间隔将实验分成 8 组。由于测量过程中存在随机误差,则每组均进行 200 次观测以对数据进行统计分析。

3.2 实验流程

发射率测量实验开始前,先对衰减片进行标定,用来获得衰减片在短波红外波段的透过率。实验开始,在暗室中先将石墨板水平置于电加热板上,固定光谱仪探头的高度 $h = 12.5 \text{ cm}$,探头半视场角 $\beta = 12.5^\circ$,观测视域被石墨充满且视域为 2.77 cm 半径的圆形区域。测量开始前,先开启光谱仪进行预热,60 min 后开启电热板将温度加热到 573 K ,在经过 30 min 后光谱仪达到稳定工作状态的同时石墨板温度达到恒定状态。开始观测,先使用光谱仪记录辐射亮度,每次积分 10 次光谱曲线。待辐射亮度测量完毕后,使用热电偶从视域范围内的石墨板上随机取点来测量温度,如此记为一次观测,共测 200 次,一组实验完毕后,将温度调高 50 K 准备开始下一组实验。

测量过程中,当设置的温度高于 773 K 时,则石墨板的辐射亮度超出光谱仪量程,此时在探头前加装衰减片再进行测量,重复上述步骤直至完成 8 组实验。

3.3 数据处理

对实验数据进行整理,发现存在部分异常的辐射亮度数据,异常数据是测量过程中光纤探头的位置偏移所引起的,将这部分异常数据剔除,共剔除 1 次实验数据。

对剔除后的实验数据进行处理,利用衰减片的

透过率 τ_λ 并根据(4)式将加装衰减片测得的辐射亮度 $L(\lambda, T)$ 换算成目标实际的辐射亮度,再根据(3)式计算发射率。目标实际的辐射亮度可表示为

$$L_s(\lambda, T) = \frac{L(\lambda, T)}{\tau_\lambda} \quad (5)$$

各组每次测量的数据中包含一个温度值、一条辐射亮度曲线和一条发射率曲线。实验获取的各组温度分布如表 1 所示,辐射亮度均值曲线如图 2 所示,光谱发射率均值曲线如图 3 所示。

表 1 各组的温度值分布

Table 1 Temperature distribution of each group

Temperature /K	Mean /K	Median /K	Mode /K	Minimum /K	Maximum /K	Standard deviation /K
573	558.565	559.150	559.150	552.150	563.150	2.436
623	604.930	605.150	605.150	600.150	609.150	1.983
673	648.505	648.650	649.150	641.150	655.150	2.480
723	692.460	692.150	692.150	686.150	698.150	2.461
773	732.115	732.150	733.150	723.150	740.150	3.224
823	772.675	773.150	773.650	764.150	779.150	3.122
873	815.572	816.150	817.150	809.150	822.150	3.158
923	855.410	856.150	855.150	842.150	864.150	4.660

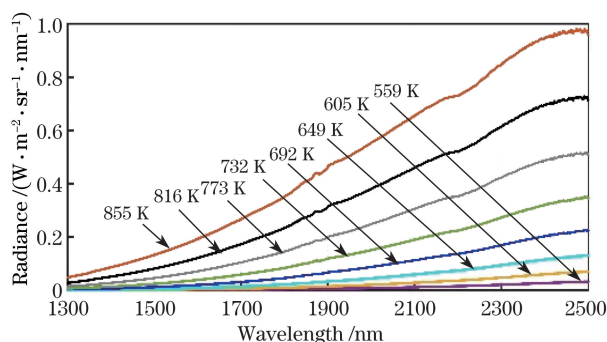


图 2 各组辐射亮度的变化曲线

Fig. 2 Change curves of radiance of each group

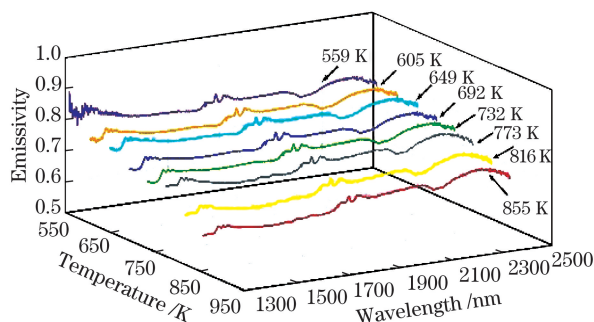


图 3 各组发射率的光谱曲线

Fig. 3 Spectral curves of emissivity of each group

从图 3 可以看到,不同温度点下的发射率光谱曲线形态基本一致,发射率光谱曲线均在 1380 nm 和 1870 nm 波长附近出现剧烈震荡,考虑是由空

气中水蒸气的吸收作用所引起的;在 2200 nm 和 2380 nm 波长处分别存在一个发射谷和发射峰;忽略 559 K 温度下 1300~1400 nm 波段内由光谱仪测量信号信噪比较低造成的数据波动,温度在 559~855 K 之间,随着温度的升高,发射率从 0.77~0.83 降低至 0.62~0.70,变化率为 15.7%~19.5%,测量结果与文献[35]光谱发射率随温度变化的趋势相同。

4 发射率-温度关联分析

为了探究发射率随温度的变化规律,以温度作为分组条件,采用方差分析方法分析不同温度下发射率的差异,并对发射率光谱曲线随温度变化的规律进行定性分析,采用回归分析方法建立发射率随温度变化的关系模型。

4.1 不同温度下发射率差异分析

4.1.1 方差分析原理

为了研究不同温度下发射率的差异,采用方差分析方法对差异进行分析,计算并分析组间离差是否远大于组内离差。其中不同温度分组间发射率数据的差异为组间离差,同一温度分组内发射率数据的差异为组内离差。

组间离差平方和的计算公式为

$$Q_A = \sum_{j=1}^m (\bar{\epsilon}_j - \bar{\epsilon})^2, \quad (6)$$

式中： m 为分组个数； n 为每个温度分组内的样本个数； $\bar{\epsilon}_j$ 为第 j 组发射率样本的均值； $\bar{\epsilon}$ 为发射率样本的总体均值。

组内离差平方和的计算公式为

$$Q_e = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\epsilon_{ij} - \bar{\epsilon}_j)^2, \quad (7)$$

式中： ϵ_{ij} 为第 j 个温度组第 i 个发射率样本值。为了判断组间离差的平方和是否显著大于组内离差的平方和，引入可分性度量评价指标 F 进行评价，表达式为

$$F = \frac{Q_A f_e}{Q_e f_A}, \quad (8)$$

表 2 不同组合的方差结果

Table 2 Variance results for different combinations

Combination of temperature /K	Q_A	f_A	Q_e	f_e	P	F	F_a
573,923	1.282	1	0.543	398	8.000×10^{-107}	939.770	3.865
573-923	2.227	7	1.692	1591	8.500×10^{-285}	299.170	20.150
573,623	0.009	1	0.578	398	1.459×10^{-2}	6.018	3.865
623,673	0.002	1	0.364	398	1.800×10^{-1}	1.804	3.865
673,723	0.036	1	0.398	398	3.538×10^{-9}	36.483	3.865
723,773	0.008	1	0.444	398	9.190×10^{-3}	6.852	3.865
773,823	0.010	1	0.419	398	2.750×10^{-3}	9.080	3.865
823,873	0.150	1	0.341	397	3.273×10^{-33}	174.070	3.865
873,923	0.055	1	0.298	397	2.480×10^{-16}	73.299	3.868

从表 2 可以看到，在信度 $\alpha=0.05$ 的情况下，除了 623 K 和 673 K 这种分组组合的 $F < F_a$ ，其余分组组合均有 $F > F_a$ ， P 值均接近于 0，原因在于温度变化较小，则发射率的变化也较小。综合以上结果，不同温度分组的发射率差异显著。

4.2 发射率-温度变化趋势

以 2200 nm 波长为例，各组每个测量数据中发

式中： f_A 为组间自由度， $f_A = m - 1$ ； f_e 为组内自由度， $f_e = mn - m$ 。

建立零假设，假设各组均值相等，给定信度 α （一般取 0.05），查表获取临界值 $F_a(f_A, f_e)$ 。如果 $F > F_a(f_A, f_e)$ ，则在信度 α 下拒绝原假设，即各组均值不相等，认为温度对发射率的影响显著，否则接受原假设，认为影响不显著^[36]。

4.1.2 方差分析结果

以 2200 nm 波长为例，先对 573 K 和 923 K 两个最大温度间隔分组组合进行方差分析；然后对 573~923 K 中的 8 个分组组合进行方差分析；再对每相邻两个温度分组组合进行方差分析。9 组方差分析结果如表 2 所示，其中 P 为差异不显著的概率。

射率和与之对应的实测温度的分布如图 4 所示，各组发射率数据统计值的分布如表 3 所示。从图 4 和表 3 可以看到，发射率测量数据的统计值均随着温度的升高呈降低的趋势，数据基本服从正态分布，各组发射率和温度数据的中值、中位数和众数近似一致，因此以各组发射率数据和温度数据的均值作为数据的代表值。

表 3 发射率数据的统计值

Table 3 Statistics for emissivity data

Temperature /K	Mean	Median	Mode	Minimum	Maximum	Standard deviation
573	0.769	0.770	0.761	0.686	0.876	0.045
623	0.760	0.769	0.756	0.701	0.841	0.029
673	0.756	0.757	0.771	0.683	0.848	0.031
723	0.737	0.738	0.754	0.667	0.821	0.032
773	0.728	0.732	0.738	0.652	0.804	0.035
823	0.718	0.722	0.722	0.656	0.798	0.030
873	0.679	0.675	0.665	0.621	0.748	0.029
923	0.656	0.652	0.658	0.611	0.736	0.026

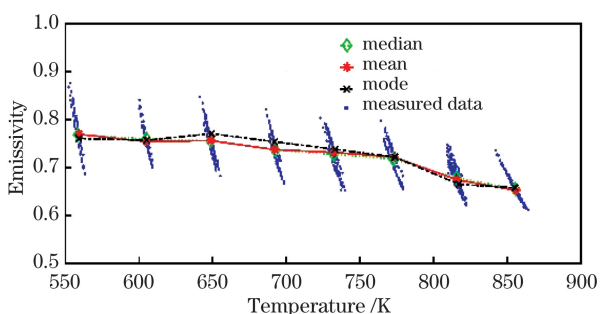


图 4 原始测量数据的分布

Fig. 4 Distribution of original measurement data

4.3 不确定度分析

在各温度点下采用多次测量取平均值的方法来减少测量过程中随机误差所带来的影响,现对不同温度点下光谱发射率均值进行不确定度分析。光谱发射率主要由温度和辐射亮度这两个测量值间接求得,因此光谱发射率的合成不确定度为

$$\Delta \varepsilon(\lambda, T) = \sqrt{\left[\frac{\partial \varepsilon(\lambda, T)}{\partial L_s} \right]^2 \Delta L_s^2 + \left[\frac{\partial \varepsilon(\lambda, T)}{\partial T} \right]^2 \Delta T^2} \quad (9)$$

根据(4)式和(9)式,可以得到

$$\Delta \varepsilon(\lambda, T) = \sqrt{\frac{1}{L_b^2(\lambda, T)} \Delta L_s^2 + \left[\frac{\lambda^4 L_s \exp(hc/\lambda kT)}{2kT^2 c} \right]^2 \Delta T^2} \quad (10)$$

式中: ΔL_s 为辐射亮度的不确定度,可根据光谱仪的准确度求出,即

$$\Delta L_s = 0.0001 L_s \quad (11)$$

温度的不确定度 ΔT 可根据热电偶的准确度求出,即

$$\Delta T = 0.003(T - 273.15) + 1 \quad (12)$$

不同温度点下,光谱发射率的合成不确定度如图 5 所示。从图 5 可以看到,随着温度和波长的增加,

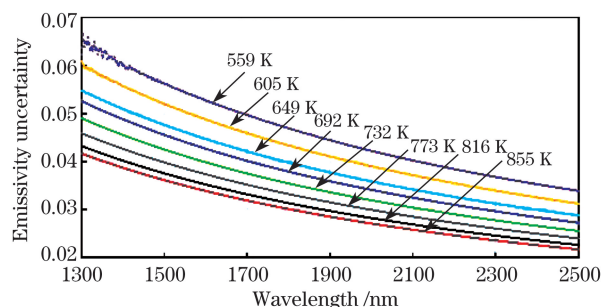


图 5 不同温度下发射率的合成不确定度

Fig. 5 Synthetic uncertainty of emissivity at different temperatures

发射率的合成不确定度逐渐减小,所以该测量系统在高温度点及长波段范围内的光谱发射率测量结果比低温度点及短波段范围内更加准确。

4.4 发射率-温度关系模型

为了探究发射率随温度变化的函数关系,以 100 nm 为波长间隔,采用最小二乘法对各组发射率均值和温度均值进行线性拟合,结果如图 6 所示,拟合参数如表 4 所示。拟合函数为 $\varepsilon = a_0 T + a_1$,其中 a_0 为函数的一次项系数, a_1 为函数的常数项系数,确定系数(R^2)均大于 0.87,说明线性拟合的可信度较高。从图 6 可以看到,随着波长的增加,线性拟合函数的斜率总体呈缓慢降低的趋势。

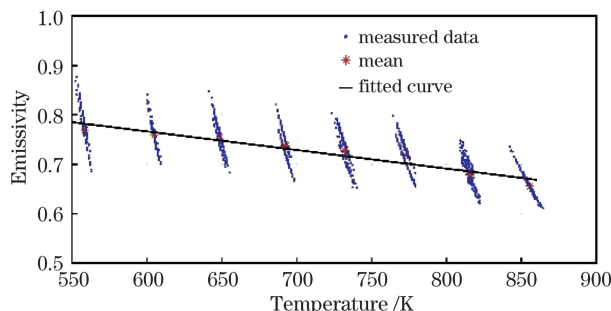


图 6 发射率-温度的拟合曲线

Fig. 6 Fitted curves of emissivity-temperature

表 4 拟合参数

Table 4 Fitting parameters

Wavelength /nm	$a_0/(10^{-4} \text{ K}^{-1})$	a_1	R^2	Wavelength /nm	$a_0/(10^{-4} \text{ K}^{-1})$	a_1	R^2
1300	-7.582	1.273	0.875	2000	-4.113	1.033	0.922
1400	-5.870	1.159	0.934	2100	-3.898	1.022	0.919
1500	-5.545	1.117	0.929	2200	-3.700	0.988	0.918
1600	-5.338	1.095	0.923	2300	-3.585	1.006	0.903
1700	-5.023	1.075	0.918	2400	-3.546	1.015	0.912
1800	-4.484	1.038	0.912	2500	-3.856	0.997	0.920
1900	-4.522	1.075	0.921				

5 结 论

以高温石墨板为例的高温目标面辐射源在短波红外波段(1300~2500 nm)和一定的温度范围(559~855 K)内,其光谱发射率有如下特征。不同温度下发射率光谱的曲线形态一致,在 2200 nm 和 2380 nm 波长处分别存在一个发射谷和发射峰。发射率随着温度的上升有显著变化;在各波长处的发射率随着温度的升高均呈现降低的趋势。发射率与温度的关系可以使用线性函数来表达,随着波长的增加,发射率随着温度的升高而降低的速率变缓。后期拟研究石墨在更高温度发生氧化反应过程中的光谱发射率特性,以及利用不同材质模拟实际高温地物以测量光谱发射率,并探究不同样品发射率特性变化规律的差异,总结经验以对遥感信息的反演增添更多的理论支撑。

参 考 文 献

- [1] Yu Y F, Pan J, Xing L X, et al. Identification of high temperature targets in remote sensing imagery based on mahalanobis distance [J]. Remote Sensing Information, 2013, 28(5): 90-94.
于一凡, 潘军, 邢立新, 等. 基于马氏距离的遥感图像高温目标识别方法研究 [J]. 遥感信息, 2013, 28(5): 90-94.
- [2] Zhu Y J, Xing L X, Pan J, et al. Method of identifying high-temperature target using shortwave infrared remote sensing data [J]. Remote Sensing Information, 2011, 26(6): 33-36, 41.
朱亚静, 邢立新, 潘军, 等. 短波红外遥感高温地物目标识别方法研究 [J]. 遥感信息, 2011, 26(6): 33-36, 41.
- [3] Yu Y F, Pan J, Xing L X, et al. Identification of high temperature targets in remote sensing imagery based on factor analysis [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8(8): 083622.
- [4] Yuan Y, Pan J, Xing L X, et al. Identification of high temperature targets based on Fisher two types discrimination [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(9): 109-113.
袁悦, 潘军, 邢立新, 等. 基于 Fisher 两类判别的高温目标精确识别方法 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15(9): 109-113.
- [5] Ji Y, Pan J, Jiang L J, et al. Methods of identifying high temperature target from Landsat8 data using variance analysis [J]. Global Geology, 2017, 36(4): 1297-1302.
季悦, 潘军, 蒋立军, 等. 基于方差分析的 Landsat8 数据高温目标识别方法研究 [J]. 世界地质, 2017, 36(4): 1297-1302.
- [6] Wang P J, Pan J, Jiang L J, et al. Method of remote sensing multispectral recognition index construction for forest fire [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 312-319.
王鹏举, 潘军, 蒋立军, 等. 林火目标遥感多光谱识别指数构建方法研究 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 312-319.
- [7] Yu Y F, Xing L X, Pan J, et al. Study of high temperature targets identification and temperature retrieval experimental model in SWIR remote sensing based Landsat8 [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 46: 56-62.
- [8] Tang B H, Li Z L, Wu H, et al. Remote sensing inversion of thermal infrared surface emissivity [M]. Beijing: Science Press, 2014: 1-2.
唐伯惠, 李召良, 吴骅, 等. 热红外地表发射率遥感反演研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1-2.
- [9] Becker F, Li Z L. Surface temperature and emissivity at various scales: definition, measurement and related problems [J]. Remote Sensing Reviews, 1995, 12(3/4): 225-253.
- [10] Ke W N, Zhu D Q, Cai G B, et al. Simulation and analysis of spectral emissivity of metals [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(11): 2139-2145.
柯维娜, 朱定强, 蔡国飙, 等. 金属光谱发射率的仿真与分析 [J]. 航空学报, 2010, 31(11): 2139-2145.
- [11] Xiao B A, Gong L H, Zeng R, et al. Analysis and simulation of metallic infrared emissivity [J]. Infrared Technology, 2008, 30(6): 358-360.
肖斌安, 龚烈航, 曾锐, 等. 金属红外发射率的分析 and 仿真研究 [J]. 红外技术, 2008, 30(6): 358-360.
- [12] Zhang H B, Cheng S X. Research on the directional emittance of solid surfaces [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 1998, 28(2): 221-226.
张洪波, 程曙霞. 固体表面定向发射率的计算模型与试验研究 [J]. 中国科学技术大学学报, 1998, 28(2): 221-226.
- [13] Connell G A N. Optical properties of amorphous metals using a ratio reflectance method [J]. Applied Optics, 1990, 29(31): 4560-4562.
- [14] Xin C S, He X W, Yang Y, et al. A review of hemispherical total emissivity measurement technology based on the steady-state calorimetric bolometer [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2011, 31(4): 38-43.
辛春锁, 何小瓦, 杨阳, 等. 基于稳态卡计法的半球

- 向全发射率测量技术综述[J]. 宇航计测技术, 2011, 31(4): 38-43.
- [15] Honner M, Honnerová P. Survey of emissivity measurement by radiometric methods [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(4): 669-683.
- [16] Zhao W M, Li L F, Yuan Z Y, et al. Directional spectral emissivity of Ti-6Al-4V alloy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0830002.
赵晚梦, 李龙飞, 原泽野, 等. Ti-6Al-4V 合金方向光谱发射率特性研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(8): 0830002.
- [17] Shao C T, Huan K W, Li Z B, et al. Research on integrated blackbody emissivity measurement based on laser integral sphere reflectometry [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2019, 40(3): 427-431.
邵春滕, 宦克为, 李志彬, 等. 基于激光积分球反射计的集成黑体发射率测量研究[J]. *计量学报*, 2019, 40(3): 427-431.
- [18] Zhang R H, Mi S J, Tian J, et al. A new method on estimating object emissivity by using four times measuring and principle of temperature compensation [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, 36(6): 783-789, 794.
张仁华, 米素娟, 田静, 等. 一种物体比辐射率的新型四次测量法及增温补偿[J]. *红外与毫米波学报*, 2017, 36(6): 783-789, 794.
- [19] Duvaut T, Georgeault D, Beaudoin J L, et al. Multiwavelength infrared pyrometry: optimization and computer simulations [J]. *Infrared Physics & Technology*, 1995, 36(7): 1089-1103.
- [20] Zhang F C, Sun B J, Sun X G, et al. Multispectral true temperature inversion based on multi-objective minimization optimization method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0212008.
张福才, 孙博君, 孙晓刚, 等. 基于多目标极值优化法的多光谱真温反演[J]. *光学学报*, 2019, 39(2): 0212008.
- [21] Fan Y, Dai J M, Chu Z X, et al. Normal spectral emissivity changes of niobium measured by a pulse heating reflectometric technique [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2003, 37(2): 285-288.
范毅, 戴景民, 褚载祥, 等. 积分球反射法测量铌的发射率随温度的变化[J]. *上海交通大学学报*, 2003, 37(2): 285-288.
- [22] Yu K, Liu Y F, Jia G R, et al. Analysis on factors affecting the infrared spectral emissivity of steel surface [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(5): 289-292.
于坤, 刘玉芳, 贾光瑞, 等. 影响钢表面红外光谱发射率的因素分析[J]. *红外技术*, 2011, 33(5): 289-292.
- [23] Wang P, Hu Z W, Xie Z, et al. A new experimental apparatus for emissivity measurements of steel and the application of multi-wavelength thermometry to continuous casting billets [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(5): 054903.
- [24] Kahle A B, Alley R E. Separation of temperature and emittance in remotely sensed radiance measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 42(2): 107-111.
- [25] Tian G L, Liu Q H, Chen L F, et al. *Thermal remote sensing* [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2014: 208-213.
田国良, 柳钦火, 陈良富, 等. *热红外遥感* [M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2014: 208-213.
- [26] Gillespie A R. Lithologic mapping of silicate rocks using TIMS [C]//The TIMS Data Users' Workshop, June 18-19, 1985, Pasadena, CA, United States. California: JPL Publication, 1986: 29-44.
- [27] Watson K. Two-temperature method for measuring emissivity [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 42(2): 117-121.
- [28] Matsunaga T. A temperature-emissivity separation method using an empirical relationship between the mean, the maximum, and the minimum of the thermal infrared emissivity spectrum [J]. *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, 1994, 14(3): 230-241.
- [29] Kealy P S, Hook S J. Separating temperature and emissivity in thermal infrared multispectral scanner data: implications for recovering land surface temperatures [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(6): 1155-1164.
- [30] Barducci A, Pippi I. Temperature and emissivity retrieval from remotely sensed images using the "grey body emissivity" method [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(3): 681-695.
- [31] Miao X Y, Zhang Y, Zhang J P, et al. Temperature and emissivity smoothing separation with nonlinear relation of brightness temperature and emissivity for thermal infrared sensors [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(24): 2959.
- [32] Borel C C. Iterative retrieval of surface emissivity and temperature for a hyperspectral sensor [C]//Proceedings for the First JPL Workshop on Remote Sensing of Land Surface Emissivity, May 6-8, 1997, Pasadena, California. New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 1997.
- [33] Zhang Y X, Li X, Wei W, et al. Infrared characteristics of Dunhuang site based on multichannel temperature

- and emissivity separation algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1028003.
- 张允祥, 李新, 韦玮, 等. 基于多通道温度与发射率分离算法的敦煌场地红外特性研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1028003.
- [34] Neuer G. Spectral and total emissivity measurements of highly emitting materials[J]. *International Journal of Thermophysics*, 1995, 16(1): 257-265.
- [35] Kostanovskii A V, Zeodinov M G, Kostanovskaya M E, et al. Experimental determination of the emissivity of isotropic graphite at temperatures above 2300 K[J]. *High Temperature*, 2001, 39(1): 159-161.
- [36] Chen X Y, Pan J, Xing L X, et al. Correlation analysis and classification of DEM topographic features and lithology in Guilin-Yangshuo, China[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(12): 1867-1876.
- 陈霄燕, 潘军, 邢立新, 等. 桂林-阳朔地区 DEM 地形特征与岩性相关性分析及分类研究[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(12): 1867-1876.