

一维平板内介质和表面的辐射特性参数同时反演方法

周奕帆, 程 强

华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 考虑了实际物体表面 BRDF 的影响, 利用方向半球反射率、方向半球透射率、法向反射率和法向透射率等光谱数据, 同时反演了一维平板内介质和表面的辐射特性参数。将该方法用于吸收散射、强散射和强吸收三种介质的辐射特性参数反演, 反演结果与给定初值较吻合。

关键词 散射; 辐射传递; 双向反射分布函数; 反演方法

中图分类号 TK124 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0629001

Simultaneous Inversion Method of Radiative Characteristic Parameters of Internal Medium and Surface for One-Dimensional Slab

Zhou Yifan, Cheng Qiang

State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract The effect of the physical object BRDF surface is considered, and the radiative characteristic parameters of the internal medium and surface for a one-dimensional slab are inverted simultaneously by utilizing the spectral data such as directional hemisphere reflectivity, directional hemisphere transmissivity, normal reflectivity and normal transmissivity. The method can be applied to the inversion of radiative characteristic parameters of these three kinds of medium, such as the absorbing and scattering medium, the highly absorbing medium and the highly scattering medium, and the inversion result coincides well with its given initial value.

Key words scattering; radiative transfer; bidirectional reflectance distribution function; inversion method

OCIS codes 290.1483; 030.5620; 100.3190

1 引 言

当已知某种材料的辐射特性参数(表面反射特性、吸收系数、散射系数、相函数等)时,通过求解其辐射传输方程,可以知道该种材料的发射、反射及透射特性。但有些材料,如涂层材料,其辐射特性参数与其表面微观结构和内部所含晶粒粒径等都紧密相关,由于原材料与制造工艺的不同,实际制备样品的辐射特性参数与文献数据之间会存在一定差距。因此,如何准确测量材料的辐射特性参数受到越来越多学者的关注。

利用测得的材料光谱数据可以有效地计算出材料的辐射特性参数。Barker 等^[1]利用测得的单晶氧化铝的光谱反射率,用经典的洛伦兹振子模型计算了其介电常数。Zeng 等^[2]利用测得的二氧化硅气凝胶的法向反射率和法向透射率,计算了其复折射率。Wang 等^[3]在考虑了界面反射的情况下,研究了不同理论计算模型对氧化锆热障涂层辐射特性的影响。赵巧华^[4]利用检测得到的辐照度廓线分布反演了水体中介质的吸收系数。李栋等^[5]利用透射光谱反演了液态碳氢燃料的光学常数。王天恩等^[6]利用基于前向散射光分布的激光粒度仪测得的数据反演得到颗粒粒径分布。邢永春等^[7]通过研究生物组织的漫反射光分布,提出了一

收稿日期: 2017-01-20; **收到修改稿日期:** 2017-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(51676077)、中央高校基本科研业务费专项资金(2016YXZD009)

作者简介: 周奕帆(1991—),男,硕士研究生,主要从事辐射传热分析方面的研究。E-mail: hiyifan91@mail.hust.edu.cn

导师简介: 程 强(1979—),男,博士,副教授,主要从事辐射传热分析及燃烧温度场检测、微纳尺度传热等方面的研究。

E-mail: chengqiang@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

种改进的标准漫反射近似模型,该模型可以更精确地反演得到表征组织生理特性的光学参数。之前的研究大多集中在材料内部,如材料内部的杂质、孔隙率、非均匀性^[8-10]对光谱测量信息的影响,而通常把材料表面假设为满足漫反射或镜反射条件的理想表面。但是,材料的实际表面并非是理想表面。Zhu 等^[11]研究发现具有不同粗糙度的硅表面的双向反射分布函数(BRDF)分布不同,材料表面粗糙度对反射率的测量会产生很大影响。相关实验检测^[12]发现,将壁面设为漫灰壁面将带来较大的反射误差,在温度测量时甚至会偏差 100 °C。因此,在辐射传热分析时有必要考虑实际表面的影响。继 1970 年 Nicodemus^[13]提出了 BRDF 的概念之后,一些关于测量材料 BRDF 的研究相继展开。休斯顿航空公司为了测量材料不同角度的散射特性,研制了一款散射测量仪^[14]。Zhang 等^[15]利用三轴自动散射仪(TASS)测量了粗糙硅的 BRDF。吴振森等搭建了测量隐身材料的平台。章立民等^[16]研发了一种用绝对方法测量 BRDF 的仪器。在测量技术不断发展的同时,BRDF 的应用也越来越广泛,已被应用于测量遥感技术、计算机图形学等方面。而 Wang 等^[17]将 BRDF 引入到辐射传热分析中,利用 DRESOR (distributions of ratios of energy scattered or reflected) 法求解了一维梯度折射率介质内耦合表面 BRDF 的辐射传热问题,发现 BRDF 对于辐射热流的计算有非常大的影响。Chai 等^[18]研究发现,表面 BRDF 对瞬态辐射传热问题有重要影响。

本文通过对耦合表面 BRDF 的一维平板的方向半球反射率、方向半球透射率、法向反射率和法向透射率进行分析,利用 DRESOR 法求解了样品内部的辐射传热问题,采用粒子群优化(PSO)算法^[19]反演求解了材料表面的 BRDF 参数以及内部介质的辐射特性参数。

2 理论方法

2.1 BRDF 模型

BRDF 用于定量描述表面对入射辐射的反射特性分布,其表达式为^[14]

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{I_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{I_i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\omega_i}, \quad (1)$$

式中 (θ_i, φ_i) 和 (θ_r, φ_r) 分别为入射和反射方向, θ 和 φ 分别为天顶角和方位角, ω_i 为入射光的立体角, I_i 为入射辐射强度, $I_i \cos \theta_i d\omega_i$ 为入射辐射力(单位投影面积上的能量), I_r 为反射辐射强度。

由于大部分工业应用材料的反射特性介于漫反射和镜反射之间,因此,本文选用能很好刻画这类材料反射特性的 Minnaert 模型^[20]进行计算和分析。Minnaert 模型可以描述 BRDF 随角度缓慢变化的情况,并且便于与对应的漫反射表面的反射特性进行对比,此外,它还满足互易性定理。

Minnaert 模型^[20]可以表述为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{\rho_0}{\pi} (\cos \theta_i \cos \theta_r)^{k-1}, \quad (2)$$

式中 ρ_0 为漫反射系数、 k 为模型参数。当 $k=1$ 时,表面 BRDF 分布退化为漫反射分布, k 值越大,则表面的镜反射分量越大。由 BRDF 的定义式可知,表面的作用会反射一部分能量 ρ_s :

$$\rho_s(\theta_i, \varphi_i) = \int_{2\pi} f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cos \theta_r d\Omega', \quad (3)$$

式中 Ω' 为反射辐射强度的立体角。

2.2 一维平行平板模型及辐射传递方程正问题计算

图 1 为平行光垂直入射到一维平行平板的物理模型,其中 R_c 为法向反射率, R_{dh} 为方向半球反射率, $R_{diffuse}$ 为漫反射分量, T_{dh} 为方向半球透射率, T_c 为法向透射率。一维平板的厚度 $L=0.5$ mm,平板沿厚度方向被均分成 N 等分,在能束追踪过程中每个计算单元的辐射强度被离散成 M 个方向($M=180$)。单元 0 和 $N+1$ 作为边界单元,平行光从单元 0 入射到介质内部。设每一根能束的初始能量 $E_0=1$,当平行光入射到表面 1 时,平行光会被表面反射掉一部分能量 ρ_s 。另外,还需要注意能束在满足 BRDF 分布表面的发射和反射方向的分布规律与漫反射和镜反射的不同,其方向具体的确定方法可以参考文献[21]。当剩余能量 $(1-\rho_s)$ 进入介质内部后,可以利用 DRESOR 法对能束的路径进行追踪,直到能束的剩余能量 E_0 小于 10^{-6} 结束追踪。

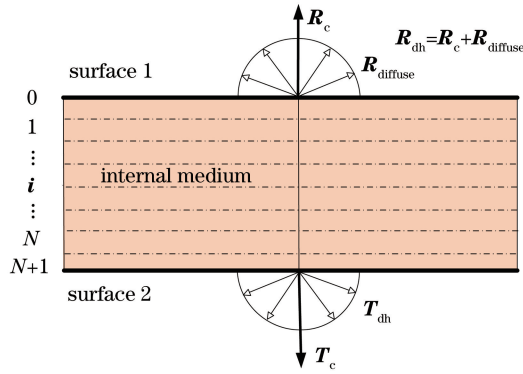


图 1 单色光正射入具有两个粗糙表面的一维平板的物理模型

Fig. 1 Physical model of normal incidence of monochromatic light on one-dimensional slab with two rough surfaces

描述固定折射率介质内一个空间单元 z , 方向的辐射传递方程可以表述为^[21]:

$$\frac{n^2}{c} \frac{d}{ds} \left[\frac{I(z, \hat{s})}{n^2} \right] = -\beta I(z, \hat{s}) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} I(z, \hat{s}') \Phi_\lambda(\hat{s}, \hat{s}') d\Omega', \quad (4)$$

其对应的边界条件为

$$I_w(z_w, \hat{s}) = \epsilon(z_w) I_b(z_w) + \frac{1}{\pi} \int_{n \cdot \hat{s}' < 0} \rho''(z_w, \hat{s}', \hat{s}) I(z_w, \hat{s}') |\mathbf{n} \cdot \hat{s}'| d\Omega', \quad (5)$$

式中 λ 为入射波长, Ω 为入射辐射强度的立体角, n 为折射率, c 为能束在介质中的传播速度, ϵ 为壁面发射率, $\rho''(z_w, \hat{s}', \hat{s})$ 表示壁面 z_w 对 \hat{s}' 方向上的入射辐射在 \hat{s} 方向的反射率, \mathbf{n} 为壁面单位外法向量, I 是辐射强度, I_b 为介质的辐射强度, $\beta = \kappa + \sigma_s$ 为衰减系数, κ 为吸收系数, σ_s 为散射系数, Φ 为相函数, z_w 为壁面位置处表面的法线方向。本文假设介质为均匀折射率介质 ($n = 1.76$), 散射相函数为各向同性散射函数。

基于辐射强度的分布, 其方向半球反射率、方向半球透射率、法向反射率和法向透射率的计算公式分别为^[22]

$$\begin{cases} R_{dh}^j = -\frac{1}{I_{inc\ m=1}} \sum_{m=1}^M I_m^j(0, \hat{s}) \\ R_c^j = -\frac{1}{I_{inc}} I_{180}^j(0, \hat{s}) \\ T_{dh}^j = \frac{1}{I_{inc\ m=1}} \sum_{m=1}^M I_m^j(L, \hat{s}) \\ T_c^j = \frac{1}{I_{inc}} I_0^j(L, \hat{s}) \end{cases}, \quad (6)$$

式中 I_{inc} 表示入射光的辐射强度; m 为被离散网格的编号, $m = 0$ 为表面 1 的位置, $m = 180$ 为表面 2 的位置; $j = 1$ 表示入射光从表面 1 入射进入平板, $j = 2$ 表示入射光从表面 2 入射进入平板。

参照文献[23], 实际样品光谱数据 R_{dh} 和 T_{dh} 可以通过单色仪或者 FTIR 结合积分球测量法得到, 法向透射率 T_c 可以通过单色仪或者傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR) 测量得到。

当光束以一个小角度 (约为 5°) 倾斜入射时, 使用积分球测量法可以有效收集样品表面的镜反射分量, 得到的反射率为样品镜反射分量和漫反射分量的总和; 当正入射时, 测量得到的反射率只是样品表面的漫反射分量。因此, 其法向反射率 R_c 为

$$R_c = R_{dh} - R_{diffuse}, \quad (7)$$

式中 R_{dh} 为材料表面的方向半球反射率, $R_{diffuse}$ 为材料表面的漫反射分量。方向半球透射率 T_{dh} 是在入射光垂直入射条件下测量得到。法向透射率 T_c 是在入射光垂直入射时, 不使用积分球的条件下所测得的透射率。

在本文中, 当已知材料两个表面的 BRDF 参数 ρ_1, k_1, ρ_2, k_2 和材料内部的吸收系数 κ , 散射系数 σ_s 后, 通过 DRESOR 法求解辐射传递方程可以得到材料表面的辐射强度分布, 进而得到材料表面的方向半球反射率、方向半球透射率、法向反射率和法向透射率的模拟测量值。

2.3 利用 PSO 算法求解辐射传递方程反问题

反问题是利用测量得到的方向半球反射率、方向半球透射率、法向反射率和法向透射率来反演辐射特性参数和表面特性参数。在反问题计算过程中,先给定待参数一组初值 $(\kappa, \sigma_s, \rho_1, k_1, \rho_2, k_2)$,通过正问题的计算方法得到材料的光谱数据,并与光谱数据的实验测量值比较。定义目标函数为

$$F_{obj} = \sqrt{\sum_{j=1}^2 \left(\left| \frac{R_{dh,mea}^j - R_{dh,cal}^j}{R_{dh,mea}^j} \right|^2 + \left| \frac{T_{dh,mea}^j - T_{dh,cal}^j}{T_{dh,mea}^j} \right|^2 + \left| \frac{R_{c,mea}^j - R_{c,cal}^j}{R_{c,mea}^j} \right|^2 + \left| \frac{T_{c,mea}^j - T_{c,cal}^j}{T_{c,mea}^j} \right|^2 \right)}, \quad (8)$$

式中下标 mea 表示实验测量值, cal 表示计算值。

解决反问题有两个关键因素,一是如何准确测量材料的光谱数据,二是使目标函数最小化所使用的优化算法,本文采用 PSO 算法。

PSO 算法是基于群体智能理论的优化算法,利用群体中粒子间的合作与竞争产生的群体智能指导优化搜索。在开始时得到一群随机初始化的粒子,其中第 k 个粒子在 d 维解空间的位置 $X_k = (x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kd})$, 粒子飞行的速度 $V_k = (v_{k1}, v_{k2}, \dots, v_{kd})$, 并以此来确定每一个粒子的位置和更新速度。每一次迭代,粒子通过动态跟踪两个极值来更新粒子群中新一代个体的速度和位置:第一个极值是个体最优解,即粒子从初始到当前迭代次数搜索所产生的最优解 P_{best} ; 第二个是群体最优解,即所有粒子种群目前的最优解 G_{best} 。

2.4 灵敏度分析

为了验证反演方法的可行性,引入变量的灵敏度分析,灵敏度计算公式为^[24]

$$S_{m_x}(\rho) = \frac{\partial \delta}{\partial m_x} \Big|_{m_x=m_0} = \frac{\delta(m_0 + m_0 \Delta) - \delta(m_0 - m_0 \Delta)}{2\delta(m_0) \Delta}, \quad (9)$$

式中 m_x 表示独立的变量,在本文中代表复吸收系数、散射系数和表面 BRDF 参数; Δ 表示微小变化,设为 0.5%; m_0 代表初始设定参数值, δ 代表测量得到的反射和透射数据。

3 结果和讨论

3.1 算例设计

以强吸收介质、强散射介质和吸收散射介质三种典型算例来分析验证反演方法的可行性。在反演迭代的过程中,为了使 PSO 算法得到比较好的收敛结果,迭代次数设为 70。同时,为了进一步减少 PSO 算法带来的随机性影响,每个算例都重复计算 20 次,以考察每次 PSO 算法收敛结果的一致性,并根据(8)式函数值最小化原则选取最终反演结果。

三种算例的辐射特性参数和表面特性参数的初始设定值(标准值)见表 1,通过正问题计算得到的与其对应的反射和透射光谱测量数据的模拟值见表 2。

表 1 三种算例的初始设定参数值

Table 1 Initialized parameter value for three numerical examples

Numerical example	κ / mm^{-1}	$\sigma_s / \text{mm}^{-1}$	ρ_1	k_1	ρ_2	k_2
Highly absorbing medium	2.300	0.300	0.320	1.400	0.400	2.100
Highly scattering medium	0.120	4.800	0.260	1.360	0.300	2.360
Absorbing and scattering medium	1.200	2.300	0.260	1.200	0.400	2.200

表 2 三种算例的初始光谱测量数据的模拟值

Table 2 Simulation value of initial spectral measurement data for three numerical examples

Numerical example	R_{dh}^1	T_{dh}^1	R_{dh}^2	T_{dh}^2	R_c^1	T_c^1	R_c^2	T_c^2
Highly absorbing medium	26.710	1.500	25.490	1.440	10.190	0.010	13.370	0.010
Highly scattering medium	45.958	23.074	41.163	26.699	8.400	0.152	9.699	0.165
Absorbing and scattering medium	30.696	11.966	30.403	13.992	8.315	0.060	12.770	0.076

3.2 吸收散射介质

分析材料光谱测量数据的模拟值后,可以合理地设置 PSO 算法中吸收系数和散射系数的搜索区间,以

达到更好的收敛效果。对于吸收散射介质,从表 2 中的光谱模拟测量数据可以看出,该样品吸收率较高,表明样品散射和吸收的量级相当,因此 κ 和 σ_s 的搜索空间均设定为(1,4),其两个表面 BRDF 参数 ρ_1, k_1, ρ_2, k_2 的搜索空间分别设定为(0,0.5), (1,2.5), (0,0.5)和(1,2.5)。

3.2.1 吸收散射介质的反演结果

图 2 为吸收散射介质的 20 次反演的独立运行结果。20 次运行结果的目标函数值均小于 0.84,其中第 19 次的运行结果的目标函数值最小(0.11);6 个反演参数 $\kappa, \sigma_s, \rho_1, k_1, \rho_2, k_2$ 的 20 次的反演值与标准值相比误差最大不超过 7.9%,13.37%,12.69%,18.37%,13.25%,4.16%,20 次反演的平均值与标准值相比误差分别为 0.2%,2.75%,4.23%,8.85%,0.19%,1.26%。可以看出,20 次独立运行的反演结果基本都在各参数的原始值附近波动,说明反演算法具有较好的稳定性。

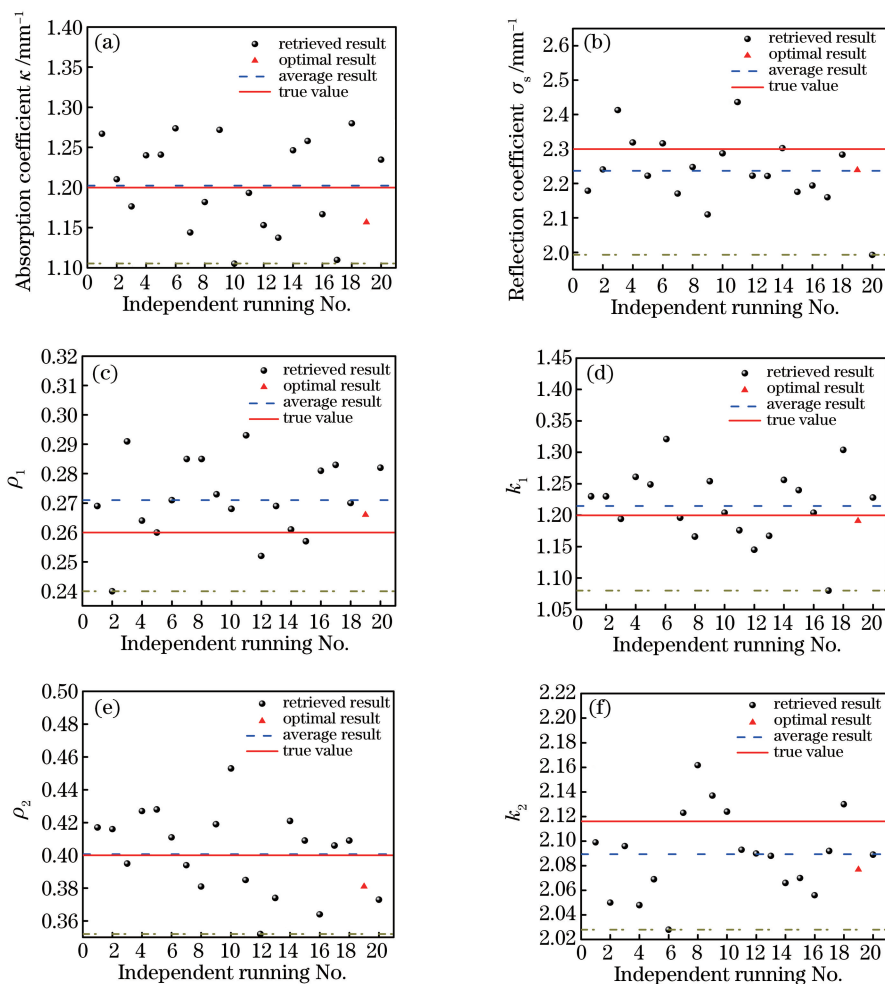


图 2 吸收散射介质的反演结果。(a) κ ; (b) σ_s ; (c) ρ_1 ; (d) k_1 ; (e) ρ_2 ; (f) k_2

Fig. 2 Inversion results for absorbing and scattering medium. (a) κ ; (b) σ_s ; (c) ρ_1 ; (d) k_1 ; (e) ρ_2 ; (f) k_2

表 3 为吸收散射介质的辐射特性参数和 BRDF 参数的初始设定参数值(标准值)、20 次独立运行中的反演最优解以及两者之间的相对误差。可以看出,所有相对误差不超过 5.59%,反演最优解已经接近于材料的标准值,证明该算法可以较准确地同时反演内部介质辐射特性及表面反射特性参数。表 4 为吸收散射介质的光谱模拟测量值(标准值)、20 次独立运行中的反演最优计算值以及两者之间的相对误差,其中对应的最小目标函数值为 0.11。可以看出,最大的相对误差为 7.89%,说明反演结果与所有测量参数较吻合。独立运行反演的时间与材料的辐射特性有关,散射系数越大,吸收系数越小,则反演所需的时间越长。当材料的辐射特性参数一定时,其每次独立运行的反演时间基本相同。该吸收散射介质算例的反演运行时间为 3174 s。

表 3 吸收散射介质反演参数的初始值、最优解和相对误差

Table 3 Initial value, optimal results and relative errors of inversion parameters for absorbing and scattering medium

Parameter	κ / mm^{-1}	$\sigma_s / \text{mm}^{-1}$	ρ_1	k_1	ρ_2	k_2
Initial value	1.200	2.300	0.260	1.200	0.400	2.200
Optimal result	1.157	2.239	0.266	1.191	0.381	2.077
Relative error / %	3.58	2.65	2.31	0.75	4.75	5.59

表 4 吸收散射介质光谱参数的初始值、最优解和相对误差

Table 4 Initial spectral value, optimal spectral results and relative errors for absorbing and scattering medium

Parameter	R_{dh}^1	T_{dh}^1	R_{dh}^2	T_{dh}^2	R_c^1	T_c^1	R_c^2	T_c^2
Initial spectral value	30.696	11.966	30.403	13.992	8.315	0.060	12.770	0.076
Optimal spectral result	30.640	12.320	29.940	14.420	8.510	0.060	12.170	0.070
Relative error / %	0.18	2.96	1.52	3.06	2.35	0	4.70	7.89

3.2.2 吸收散射介质的灵敏度分析

表 5 为吸收散射介质的 6 个待反演参数对各个光谱测量数据的灵敏度。灵敏度越大,说明该待反演参数对相应光谱测量数据的依赖性越高,根据该光谱测量数据反演得到的参数越精确。从表 5 可以看出,吸收系数 κ 和散射系数 σ_s 对方向半球反射率和方向半球透射率有较高的灵敏度。入射光从表面 1 正入射 ($j=1$)时,表面 1 的 BRDF 参数 (ρ_1, k_1)对测得的光谱数据 ($R_{\text{dh}}^1, T_{\text{dh}}^1, R_c^1, T_c^1$)有较高的灵敏度值。入射光从表面 2 正入射 ($j=2$)时也有类似的规律。由此可以看出,利用入射光从不同表面入射所测得的方向半球反射率,方向半球透射率,法向反射率和法向透射率来反演材料的吸收系数、散射系数和表面 BRDF 特性参数具有较高的可靠性。

表 5 吸收散射介质的辐射特性参数和表面 BRDF 参数的灵敏度

Table 5 Sensitivity of radiative characteristic parameters and BRDF surface parameters for absorbing and scattering medium

Parameter	Sensitivity							
	R_{dh}^1	T_{dh}^1	R_{dh}^2	T_{dh}^2	R_c^1	T_c^1	R_c^2	T_c^2
κ	5.600	10.350	4.490	7.140	0.040	0.400	0.020	0.240
σ_s	0.510	2.060	0.420	1.380	0.020	0.020	0.090	0.170
ρ_1	80.881	20.006	3.113	5.511	31.884	1.445	0.009	0.473
k_1	10.823	7.372	0.830	0.841	0.082	0.166	0.016	0.008
ρ_2	0.215	16.777	53.871	8.741	0.444	0.045	31.527	0.886
k_2	0.865	1.816	7.634	3.397	0.030	0.003	0.017	0.060

3.3 强吸收介质

强吸收介质和强散射介质的 20 次独立运行结果的分布规律和灵敏度分析结果与吸收散射介质的基本相同,因此后续部分不再一一枚举,仅给出该两种算例的最优解。

对于强吸收介质,从表 2 中可以看出其吸收率较高,因此设定 κ 和 σ_s 的搜索空间分别为 (1,3) 和 (0,1),其两个表面 BRDF 参数 ρ_1, k_1, ρ_2, k_2 的搜索空间分别为 (0,0.5)、(1,2.5)、(0,0.5),和 (1,2.5)。

表 6 为强吸收介质反演参数的标准值,20 次独立运行的最优解以及两者之间的相对误差。从中可以看出,散射系数的反演误差最大,为 8.00%。而其他参数的反演误差不超过 1.750%。由此可见,对于强吸收介质,表面 BRDF 参数的反演效果均较好,吸收系数的反演准确度高于散射系数的。表 7 为强吸收介质的光谱数据的标准值,20 次独立运行中的最优解以及两者之间的相对误差。从表 7 中可以看出,强吸收介质透射光谱的反演误差较大,其中 T_c^1 的反演结果误差甚至达到 120.00%,导致其目标函数值较大 (1.54)。强吸收介质的透射率较小 (0.01),有效的测量数据较少,造成反演准确度变差。这也说明,对于不透明材料,其反演结果比透明或半透明材料的差;如果要进一步增加不透明材料的反演准确度,可以考虑用多方向的反射率测量值来增加有效测量数据。强吸收介质反射光谱的收敛性仍然良好,反演误差不超过 5.11%,反演结果的收敛性也较好。该算例的反演运行时间为 2493 s。

表 6 强吸收介质反演参数的初始值、最优解和相对误差

Table 6 Initial value, optimal results and relative errors of inversion parameters for highly absorbing medium

Parameter	κ / mm^{-1}	$\sigma_s / \text{mm}^{-1}$	ρ_1	k_1	ρ_2	k_2
Initial value	2.300	0.300	0.320	1.400	0.400	2.100
Optimal result	2.316	0.324	0.318	1.383	0.407	2.072
Relative error / %	0.70	8.00	0.63	1.21	1.75	1.33

表 7 强吸收介质光谱参数的初始值、最优解和相对误差

Table 7 Initial spectral value, optimal spectral results and relative errors for highly absorbing medium

Parameter	R_{dh}^1	T_{dh}^1	R_{dh}^2	T_{dh}^2	R_c^1	T_c^1	R_c^2	T_c^2
Initial value	26.710	1.500	25.490	1.440	10.190	0.010	13.370	0.010
Optimal result	26.930	1.973	26.792	2.042	10.116	0.022	12.967	0.018
Relative error / %	0.82	31.53	5.11	41.81	0.73	120.00	3.01	80.00

3.4 强散射介质

从表 2 中可以看出,对于强散射介质,其反射率与透射率之和较大,而吸收率较小,因此设定其 κ 和 σ_s 的搜索空间分别为(0,1)和(1,5),其两个表面 BRDF 参数 ρ_1, k_1, ρ_2, k_2 的搜索空间分别为(0,0.5), (1,2.5), (0,0.5)和(1,2.5)。

表 8 为强散射介质反演参数设定的标准值,20 次独立运行的最优解以及两者之间的相对误差。可以看出,吸收系数的反演误差最大,为 4.17%。其余各参数的反演误差不超过 2.67%。由此可见,强散射介质的散射系数的反演准确度要高于吸收系数的,表面 BRDF 参数的反演效果均较好。表 9 为强散射介质的光谱数据的标准值,20 次独立运行的最优解以及两者之间的相对误差。从表中可以看出,其目标函数值为 0.04,各参数的反演误差均不超过 2.02%,反演结果的收敛性良好。同时可以看出,由于强散射介质的强散射特性,其方向半球反射率和方向半球透射率较大,而法向透射率和法向反射率较小,待反演参数对方向半球反射率和方向半球透射率有较高的依赖性。该算例的反演运行时间为 7014 s。

表 8 强散射介质反演参数的初始值、最优解和相对误差

Table 8 Initial value, optimal results and relative errors of inversion parameters for highly scattering medium

Parameter	κ / mm^{-1}	$\sigma_s / \text{mm}^{-1}$	ρ_1	k_1	ρ_2	k_2
Initial value	0.12	4.800	0.26	1.36	0.3	2.36
Optimal result	0.125	4.820	0.26	1.359	0.308	2.36
Relative error / %	4.17	0.42	0	0.07	2.67	0

表 9 强散射介质光谱参数的初始值、最优解和相对误差

Table 9 Initial spectral value, optimal spectral results and relative errors for highly scattering medium

Parameter	R_{dh}^1	T_{dh}^1	R_{dh}^2	T_{dh}^2	R_c^1	T_c^1	R_c^2	T_c^2
Initial value	45.958	23.074	41.163	26.699	8.400	0.152	9.699	0.165
Optimal result	45.606	22.612	41.147	26.159	8.400	0.153	9.882	0.164
Relative error / %	0.77	2.00	0.04	2.02	0	0.66	1.89	0.61

4 结 论

将表面 BRDF 引入到一维平板的辐射特性参数的反演计算过程中,提出了一种利用测得的方向半球反射率、方向半球透射率、法向反射率和法向透射率反演一维平行平板的辐射特性参数和表面 BRDF 参数的方法,通过强吸收、强散射和吸收散射介质三种典型算例验证了该反演方法的可行性,得出以下结论。

1) 吸收散射介质、强吸收介质和强散射介质的反演最优解的目标函数值均较小,说明反演算法的收敛性较好。通过灵敏度的分析,可以看出光谱数据对介质内吸收系数、散射系数和表面 BRDF 参数的变化均具有较高的灵敏度,验证了反演方法的可行性。

2) 对于吸收散射介质,介质内吸收系数、散射系数和表面 BRDF 辐射特性参数的反演结果与给定的初始值间的误差不超过 5.59%,反演结果比较理想。

3) 对于强吸收介质,吸收系数的反演精确性高于散射系数的;由于透射率较小,反演参数对反射率的测量数据有更高的依赖性,若用多方向的反射率测量值来进行反演,反演结果会更加可靠。

4) 对于强散射介质,散射系数的反演准确性高于吸收系数的;反演参数对方向半球反射率和方向半球透射率的测量数据有较高的依赖性。

参 考 文 献

- [1] Barker A S. Infrared lattice vibrations and dielectric dispersion in corundum[J]. *Physical Review*, 1963, 132(4): 1474-1481.
- [2] Zeng J S Q, Greif R, Stevens P, *et al.* Effective optical constants n and κ and extinction coefficient of silica aerogel[J]. *Journal of Materials Research*, 1996, 11(3): 687-693.
- [3] Wang L, Eldridge J I, Guo S M. Comparison of different models for the determination of the absorption and scattering coefficients of thermal barrier coatings[J]. *Acta Materialia*, 2014, 64: 402-410.
- [4] Zhao Qiaohua. Inversion of absorption coefficient of medium in shallow lake[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1766-1771.
赵巧华. 浅水湖泊中介质吸收系数的反演[J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 1766-1771.
- [5] Li Dong, Qi Hanbing, Wu Zhongguo. Transmittance spectra measurement and optical parameters inversion of liquid hydrocarbon fuel[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(s1): s112009.
李 栋, 齐晗兵, 吴忠国. 液态碳氢燃料透射光谱测量和光学参数反演[J]. *光学学报*, 2014, 34(s1): s112009.
- [6] Wang Tianen, Shen Jianqi, Lin Chengjun. Vector similarity retrieval algorithm in particle size distribution analysis of forward scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0629002.
王天恩, 沈建琪, 林承军. 前向散射颗粒粒径分布分析中的向量相似度反演算法[J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0629002.
- [7] Xing Yongchun, Zhu Qibing, Huang Min. Inversion of optical parameters of biological tissues based on improved standard diffusion approximation model[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(9): 091701.
邢永春, 朱启兵, 黄 敏. 基于改进标准漫射近似模型的生物组织光学参数反演[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(9): 091701.
- [8] Handwerker C A, Morris P A, Coble R L. Effects of chemical inhomogeneities on grain growth and microstructure in Al_2O_3 [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1989, 72(1): 130-136.
- [9] Jackson T B, Virkar A V, More K L, *et al.* High-thermal-conductivity aluminum nitride ceramics: The effect of thermodynamic, kinetic, and microstructural factors[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1997, 80(6): 1421-1435.
- [10] Boey F Y C, Tok A I Y. Porous AlN ceramic substrates by reaction sintering[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 140(1-3): 413-419.
- [11] Zhu Q Z, Zhang Z M. Correlation of angle-resolved light scattering with the microfacet orientation of rough silicon surfaces[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(7): 073601.
- [12] Burnell J G, Nicholas J V, White D R. Scattering model for rough oxidized metal surfaces applicable to radiation thermometry of reformer furnaces[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(6): 1749-1755.
- [13] Nicodemus F E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity[J]. *Applied Optics*, 1970, 9(6): 1474-1475.
- [14] Scheele S R. Scattering from infrared transparent materials[C]. SPIE, 1977, 107: 48-56.
- [15] Zhu Q Z, Sin S, Zhang Z M. Surface characterization of the rough side of silicon wafers[C]//Kassab A J, Nicholson D W, Ionescu I. *Developments in theoretical and applied mechanics*. Orlando: Rivercross Publishing, 2002: 49-55.
- [16] Zhang Limin, Wei Qingnong, Jiang Rongxi, *et al.* A new goniophotometer[J]. *Optical Instruments*, 1988(4): 29-37.
章立民, 魏庆农, 江荣熙, 等. 一种新型的变角光度计[J]. *光学仪器*, 1988(4): 29-37.
- [17] Wang Z C, Song J L, Cheng Q, *et al.* The effect of BRDF surface on radiative heat transfer within a one-dimensional graded index medium[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 77: 116-125.
- [18] Chai J L, Cheng Q, Song J L, *et al.* The DRESOR method for one-dimensional transient radiative transfer in graded index medium coupled with BRDF surface[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2015, 91: 96-104.
- [19] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, 1995, 6: 1942-1948.

- [20] Minnaert M. The reciprocity principle in lunar photometry[J]. The Astrophysical Journal, 1941, 93: 403-410.
- [21] Modest M F. Radiative heat transfer[M]. 2nd ed. New York: Academic Press, 2003.
- [22] Wang Zhichao. A study on radiative heat transfer within 1-D graded index medium by the DRESOR method[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
王志超. 一维梯度折射率介质内辐射传递问题的 DRESOR 法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [23] Cheng Q, Yang P Y, Zhang Z M. Radiative properties of ceramic Al_2O_3 , AlN , and Si_3N_4 : I. Experiments[J]. International Journal of Thermophysics, 2016, 37(6): 62.
- [24] Ren Y T, Qi H, Chen Q, *et al.* Simultaneous retrieval of the complex refractive index and particle size distribution[J]. Optics Express, 2015, 23 (15): 19328-19337.