

煤及灰辐射特性参数的研究

阮立明 余其铮 刘林华 谈和平 (哈尔滨工业大学)

唐 明 (哈尔滨七〇三研究所)

【摘要】 利用在红外分光光度计上实验测出三种黑龙江省产煤及其灰的稀相均一微粒弥散系的透射率光谱,结合精确 Lorenz-Mie 电磁理论及色散 $K-K$ 关系式,反演微粒的基本辐射特性参数(复折射率),并进而求粒子的衰减因子、散射因子和吸收因子。由于计算的唯一简化条件为有限区域实验数据的外推关系式,因而本文方法精度高,适用范围广。本文对透射率实验误差对反演结果的影响进行了分析,指出透射率的实验精度将影响复折射率的求解。

关键词 辐射特性 Lorenz-Mie 理论 微粒 煤 灰

分类号 TQ531

0 引言

最近二十几年的研究表明,煤是当前世界上最充足、最经济的燃料。总的来说,由煤产生的能量要比核反应产生的能量便宜,而燃油电站有当油的价格降低 50%,才可能与燃煤电站相抗衡。因此,在一个相当长的时期,社会对煤的需求仍将很大。黑龙江省是一产煤大省,为了更好地利用有限的资源,需对有关煤的一些特性有所了解,特别是其辐射特性。当前,清洁有效的煤燃烧技术是工程上面临的一大挑战,因此广泛采用了粉碎煤的燃烧技术(如煤粉,流化床等)。炉内的燃烧、流动、换热是相互影响的过程,本文仅讨论换热过程,由于炉内温度较高,辐射换热占有相当大的比例。在煤颗粒燃烧过程中产生大量的粒子形态的燃烧产物(如焦炭,碳黑,飞灰等)将参与辐射换热,且这些粒子的辐射能力远强于气体(CO_2 ,水蒸气等)。因此,粒子的

辐射特性是研究炉内辐射换热的重要参数,而微粒的复折射率则是研究含粒子介质辐射行为的一个基本参数。

复折射率属基本物性参数,与其组成成分及温度水平等有关,同时也与表面状况有关。早期的研究认为,煤及灰在红外区为灰体^[1,2],我国锅炉计算标准一直沿用原苏联的标准,该标准中关于飞灰的辐射特性参数,就是在灰体假设的前提下,通过实验得到的。但随后的研究表明,煤及灰在红外区具有选择性^[3,4]。微粒的复折射率不可直接测量,而只能利用某种实验结果,结合相应的理论模型利用反问题研究方法计算求得。实验有多种,一般分为:测反射率,测方向散射率,测单色透射率光谱。

综合比较,透射法可直接得到某一光谱范围的粒子复折射率,并可使粒子保持自然状态,所需实验设备也相对简单,但理论模型相对复杂。目前国外对煤及灰粒子状态下辐

收稿日期 1994-12-12

射特性参数的研究很少,而国内几乎是空白^[3,6]。本文利用粒子溴化钾压片的透射率,求解煤及灰粒子的复折射率,该方法采用了精确 Mie 理论及介质色散 Kramers-kronig 关系式,使该法精度更高,适用范围广。

1 理论模型

1.1 Lorenz-Mie 理论

当一束平面电磁波投射到一各向同性均质光滑球形粒子时,其 Maxwell 方程的精确解可由 L-M 理论描述,据 L-M 理论其单频衰减因子 $Q_{ext,\omega}$ 可由下式表示:

$$Q_{ext,\omega} = \frac{4}{a^2} \text{Re}(S_0) = f(m, a) \quad (1)$$

$$S_0 = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n + 1)(a_n + b_n) \quad (2)$$

式中 S_0 为前向幅值函数,Re 表取实部, a_n 及 b_n 为由 Ricatti-Bessel 函数组成的 Mie 散射系数。 $a = \pi D/\lambda$ 为尺度参数, D 为粒子的平均粒径, λ 为波长。下标“ ω ”表明单频量。

1.2 满足 Kramers-Kronig 关系式的复函数

$$A(\omega)$$

构造一个满足介质色散 $K - K$ 关系式的复函数 $A(\omega)$

$$A(\omega) = i \cdot a^{-3} S_0 = Ar(\omega) + i \cdot Ai(\omega) \quad (3a)$$

设

$$y = Ar(\omega) + i \cdot Ai(\omega) - i \cdot a^{-3} S_0 = f_1(a, m, \omega) = 0 \quad (3b)$$

其中:

$$Ai(\omega) = \text{Re}(A(\omega)) = \text{Re}(S_0) \cdot a^{-3} \quad (4a)$$

$$Ar(\omega) = \text{Im}(A(\omega)) = -\text{Im}(S_0) \cdot a^{-3} \quad (4b)$$

式中 Im 表取虚部, Re 表取实部。比较式(1)(4a)则:

$$Ai(\omega) = \frac{Q_{ext,\omega}}{4a} \quad (5)$$

据 K-K 关系式,则:

$$Ar(\omega) = \frac{2}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\Omega Ai(\Omega)}{\Omega^2 - \omega^2} d\Omega \quad (6)$$

式中符号 P 表示柯西主值积分。

1.3 透射比光谱与衰减因子的关系

当粒子群的温度较低本身辐射可忽略不计,且为稀相系,粒子的散射为互不影响的一次独立散射时,均匀粒子系的单频透射率 τ_ω 可直接与单频衰减因子 $Q_{ext,\omega}$ 建立下面关系式:

$$\tau_\omega = \exp\left(-\frac{1}{4}\pi D^2 \cdot N \cdot L \cdot Q_{ext,\omega}\right) \quad (7)$$

式中: N 为粒子数目浓度, L 为粒子群行程长度。

联立式(3)(5)(6)(7), $Q_{ext,\omega}$ 由式(7)求得,代入式(5)则 $Ai(\omega)$ 可求,而 $Ar(\omega)$ 则据 $Ai(\omega)$ 由式(6)得到。将 $Ai(\omega)$ 及 $Ar(\omega)$ 代入式(3)解复数方程,则复折射率 m 可求。式中 S_0 由精确 Mie 理论求解。

2 实验求煤及灰粒子的复折射率

本文选取三种黑龙江产煤及其灰进行了透射率实验,实验是在双光路红外分光光度计上完成的,其波长范围 $2.5 \mu\text{m} \sim 25 \mu\text{m}$ 。试样为压制而成的含均匀分布粒子系的 KBr 薄片。将一同厚的纯 KBr 压片做为参考片,置于参比光路,而将含粒子 KBr 压片置于测试光路则可直接测出灰粒子系的透射率光谱。由于 KBr 极易潮解,因而在制备压片过程中,应保持在干燥的环境中进行。

为了反演粒子的复折射率除了透射率实验外,还需进行大量的非辐射特性的测量。

2.1 粒子的制备与粒径测量

由于当粒子的尺度参数过大时,会存在解的严重多值性,为了避免多值性的影响,需

粒子尽量的小(大概 1 μm 左右)。首先将试样粒子在振动筛上筛分,得到 ≤ 20 μm 的粒子系,然后将其在玛瑙研钵中研磨,在研磨过程中需不断在高倍显微镜下观察粒径的大小,以控制粒子研磨的程度。为了得到更小的、均匀的微粒子系,还需将研磨后的粒子在粘度比较小的液体中沉降,沉降时为了避免粒子粘结成块,加超声波振荡,数小时后,把沉积粒子(粒径较大)去除,将悬浮在液体中的微粒子经烘干提取出来。其粒径利用透射镜照片测量分析得到,在测量之前为了避免微粒子的聚集,还需加超声波振荡一段时间,其测量的原理为:假设粒子为球形,在保持粒子总的投影面积及粒子数目不变的前提下,求得平均粒径。

2.2 粒子密度的测量

采用比重瓶称重法,预先测得粒子的质量 G ,将其放入比重瓶并盛满某种液体(已知密度 ρ_1),称得质量为 G_1 ,而只盛满该种液体的比重瓶质量为 G_2 ,则可用下式计算粒子的密度 ρ_p ,

$$\rho_p = \frac{G \cdot \rho_1}{[G_2 - (G_1 - G)]}$$

2.3 粒子数目浓度 N 的确定

N 为单位体积中的粒子数,可由下式计算,

$$N = \frac{f_v}{(\frac{1}{6}\pi D^3)} = \frac{6\{\frac{\rho_m}{\rho_m + A_p \cdot \rho_p}\}}{(\pi D^3)}$$

式中, f_v 为介质中的粒子的体积百分比, D 为

粒子的平均直径(假设粒子为球形), ρ_p 为粒子密度, m_p 为压片中粒子的质量, ρ_m 为介质的密度, m_m 为压片中介质的质量, A_p 为介质与粒子的质量比。

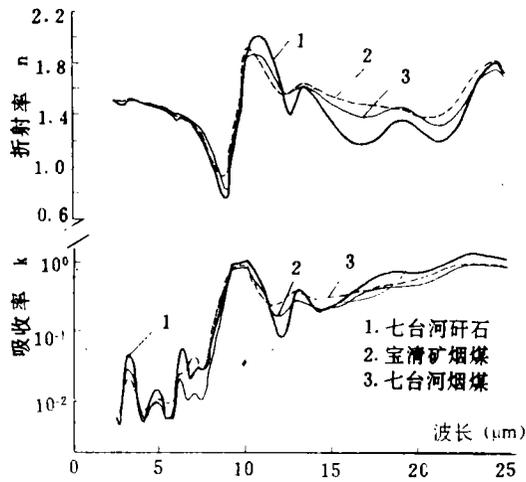


图 1 煤粒子的复折射率

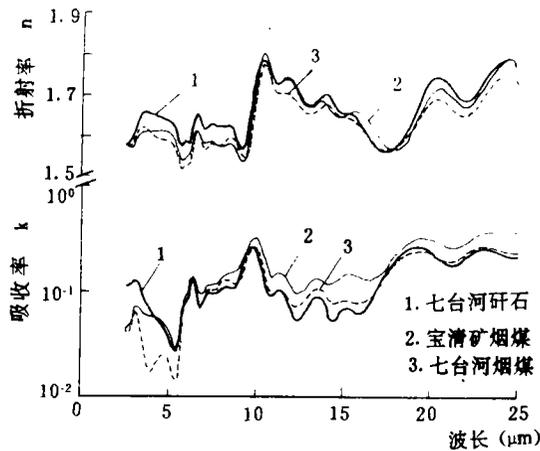


图 2 灰粒子的复折射率

表 1 煤及灰的成份

	煤的元素分析 %					灰的成份分析 %								
	C	H	O	N	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃
七台河矽石	26.9	1.96	3.73	0.54	0.77	65.55	23.39	3.46	2.13	0.50	0.18	1.98	0.90	2.68
宝清矿烟煤	58.5	3.60	9.09	0.84	0.31	64.00	25.17	3.40	2.00	0.70	0.40	2.40	0.90	0.90
七台河烟煤	68.7	3.81	4.11	1.12	1.00	67.86	23.00	2.29	1.96	0.19	0.54	2.50	1.30	0.30

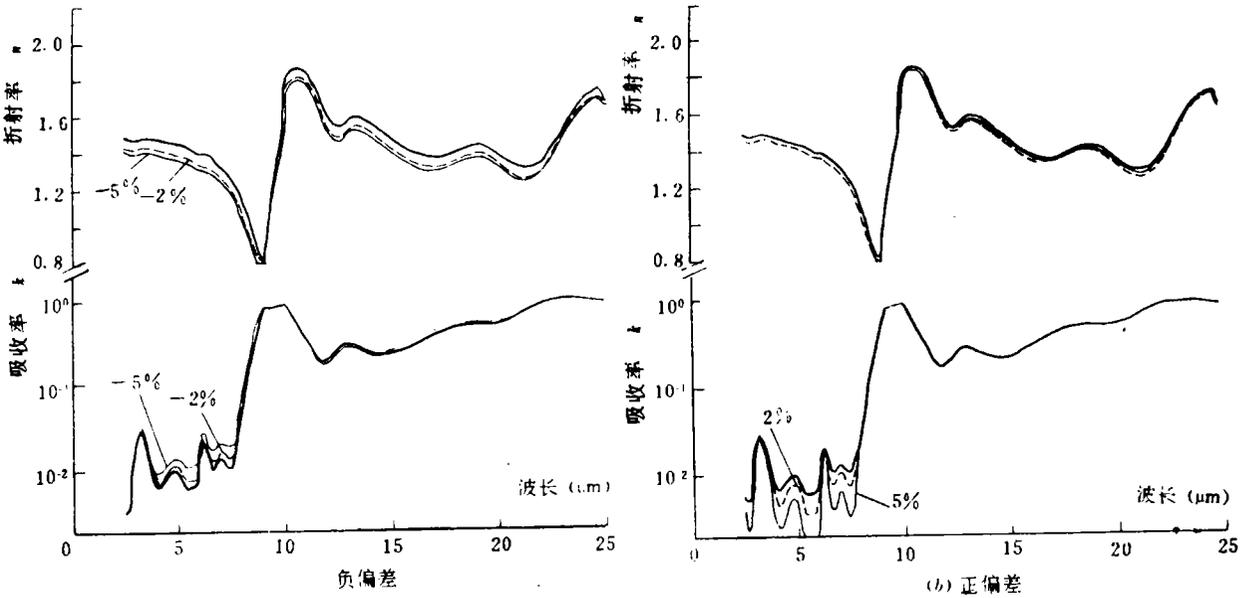


图 3 透射率实验存在偏差时七台河烟煤灰复折射率

实验所用煤及灰的成份见表 1。其复折射率数值见图 1 及图 2。

3 实验误差分析

由于本实验需经过测量粒子系的质量浓度,测量压片的厚度及透射率实验等几个步骤,每一步都可能有一定的实验误差,其中以分光光度计的误差为大。本文以七台河烟煤灰为例,分别假设透射率在整个实验光谱范围内存在 ± 2.0% 及 ± 5.0% 的误差,并计算此时的复折射率,图 3 示出该计算结果。分析结果可知,当透射率存在正偏差时,对实部的反演结果影响很小,而对虚部的反演结果则存在很大影响,当透射率存在负偏差时,对实部的反演结果影响较大,而对虚部的反演结果则影响较小。因此透射率实验的精度将影响复折射率的反演结果。

4 粒子系辐射特性

含粒子气流中固体弥散相的辐射特性可用吸收因子 Q_{abs} 、吸收系数 K_{abs} 、散射因子 Q_{sca} 、散射系数 K_{sca} 、衰减因子 Q_{ext} 、衰减系数 K_{ext} 来表示。吸收因子、散射因子和衰减因子表示单个粒子的辐射性质,而吸收系数,散射系数和衰减系数则表示粒子系的辐射性质。

已知粒子的复折射率分布,由 Mie 散射理论可计算单频衰减因子、单频散射因子和单频吸收因子的分布

$$Q_{ext,s}(m, a) = \frac{2}{a^2} \text{Re} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (2n + 1) \times (a_n + b_n) \right\} \quad (9a)$$

$$Q_{sca,s}(m, a) = \frac{2}{a^2} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (2n + 1) \times (|a_n|^2 + |b_n|^2) \right\} \quad (9b)$$

$$Q_{abs} = Q_{ext} - Q_{sca} \quad (9c)$$

七台河烟煤灰的计算结果如图 4 所示,粒径 D 取 $5.0 \mu\text{m}$ 。

在此基础上,如果粒子系的粒径分布函

数 $P(D)$ 已知, 则球形粒子弥散系的单频衰减系数、单频散射系数和单频吸收系数可求

$$K_{\text{ext},\omega} = \frac{\pi}{4} \int_0^{\infty} Q_{\text{ext},\omega} D^2 P(D) dD \quad (10a)$$

$$K_{\text{sca},\omega} = \frac{\pi}{4} \int_0^{\infty} Q_{\text{sca},\omega} D^2 P(D) dD \quad (10b)$$

$$K_{\text{abs},\omega} = K_{\text{ext},\omega} - K_{\text{sca},\omega} \quad (10c)$$

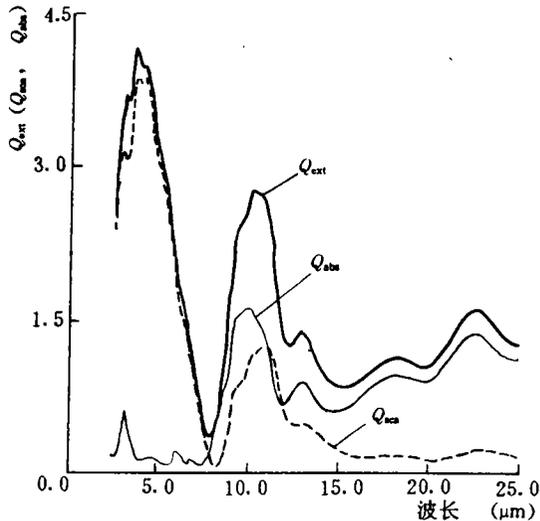


图 4 灰粒子的衰减因子、散射因子、吸收因子 ($D = 0.5 \mu\text{m}$)

5 结论

复折射率是反映粒子辐射特性的基本参数, 利用它可以计算粒子系的辐射特性。本方

法在反演计算时采用了精确 Mie 理论, 使模型更接近真实的物理本质, 因而本文方法精度较高, 适应性好, 适用范围广。通过对煤及灰粒子的计算表明:

1 煤及灰在红外区为非灰体具有选择性;

2 灰由于其主要组成成分相似, 因而其复折射率分布相近。在近红外区 ($2.5 - 8 \mu\text{m}$) 其吸收指数较小, 而随后 ($8 - 12 \mu\text{m}$) 存在一吸收峰;

3 煤的折射指数在红外区变化较小 ($1.6 - 1.9$ 范围), 吸收指数的变化范围也没有灰的广;

4 透射率的实验误差将影响复折射率的反演结果。

参 考 文 献

- 1 Агабабов С Г. Теплоэнергетика, 1958 (8), 56~60
- 2 Mulcahy M F R, Boow J, Goard P R C. Institute of Fuel Journal, 1966, P385~394
- 3 Khrustalev B A, Rakov A M. Heat Transfer-Soviet Research, 1969, 1(4), 163~177
- 4 Goetz G L, Nsakala N Y, Borio R W. Journal of Engineering for Power, 1979, 101(4), 607~614
- 5 余其铮, 谈和平, 阮立明, 苏建良. 用简化 Mie 理论及 K-K 关系求微粒复折射率的透射法. 红外毫米波学报, 1993, 2(5)
- 6 阮立明, 余其铮, 谈和平. 透射法求灰粒的辐射特性参数. 中国工程热物理学会燃烧学学术会议论文集, 天津, 1993, 10

作者简介: 唐明, 男, 1965 年生。1991 年哈尔滨工业大学工程热物理专业研究生毕业, 现为哈尔滨七〇三研究所汽轮机室辅机组工程师, 从事过核反应堆操纵、制冷专业教学、计算传热学研究。现从事冷凝器管束水模拟试验研究。

通讯处: 150030 哈尔滨 77—3 信箱

Based on years of engineering practice the authors have summed up the design experiences and features of waste-heat recovery boilers for gas turbines, noting that the present technology of home-made waste-heat recovery boilers of gas turbines has already attained a quite advanced level with a strong competitive position on both the domestic and international market. Key words: gas turbine, waste-heat boiler, design features

首座小型天然气发电锅炉的设计与运行 = The Design and Operation of the First Home-made Low-capacity Natural Gas-fired Power Plant Boiler [刊, 中]/Li Zongxi, Liu Wanzhen (Harbin 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -291-296

A brief description is given of the thermodynamic characteristics of a first home-made low-capacity boiler installed in a power station. Also discussed are some specific features concerning the selection of boiler furnace and burners, etc. All the above can provide useful hints for the further improvement of new designs. Key words: boiler, natural gas, combustion, electric power generation

煤及灰辐射特性参数研究 = A Study on Coal and Ash Radiation Characteristics Parameters [刊, 中]/Tang Min (Harbin 703 Research Institute) Ruan Liming, Yu Qizheng, Liu Linhua, Tan Heping (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -297-301

Through the utilization of the transmissivity spectrum of rare-phase homogeneous microparticle dispersion system of three types of Heilongjiang Province coal and its ash, experimentally determined by an infrared spectrophotometer, coupled with the adoption of a highly precise Lorenz-Mie electromagnetic theory and dispersion K-K relation, the authors have made an inverse computation of the basic radiation characteristics parameters (compound refractive index) of microparticles and on this basis determined the decay factor, scattering factor and absorption factor of the said particles. As the only simplification condition of the computation is the extrapolation relation of a limited domain experimental data, the method under discussion in this paper features high precision and a wide applicability. The authors have analysed the effect of transmissivity experimental error on the result of inverse computation and pointed out that the experimental precision of the transmissivity will exercise an influence on the solution of the compound refractive index. Key words: radiation characteristics, Lorenz-Mie theory, microparticle, coal, ash

汽轮机隔板分离器的内流场的数值研究 = A Numerical Study on the Inner Flow Field of a Steam Turbine Diaphragm Moisture Separator [刊, 中]/Luo Chunxin, Sun Xianliang (Harbin 703 Research Institute), Li Xuelai (Dalian University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -302-305

By use of a SIMPLE method a numerical calculation is conducted of the vapor-liquid dual phase flow field in the moisture separator of a steam turbine diaphragm. Also discussed in the paper is the effect of relevant working parameters of such a separator on the moisture removal efficiency. Key words: diaphragm moisture separator, steam turbine, internal moisture removal

新型高效汽水分离元件研究 = A Study on a New Type of High-efficiency Moisture Separating Elements [刊, 中]/Lu Yibo, Ren Abao, Chen Yuxiang (Harbin 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -306-309

On the basis of theoretical analyses and experimental tests the authors have proposed a new type of high-efficiency moisture separating elements, which can retain their highly effective moisture separation performance even at an inner flow speed as high as 4.5-5.0 m/s. This makes it possible to considerably reduce the space occupied by the separator and also its metallic material consumption. Key words: moisture separation, test elements, efficiency