



推荐阅读:

选煤:

[煤泥水中微细高岭石/蒙脱石颗粒表面水化分子动力学模拟研究](#)

[细粒煤超声同步浮选的试验研究](#)

[基于水化膜弱化促进煤泥脱水的机理及试验](#)

[2-羟乙基三甲基氯化铵抑制蒙脱石水化膨胀的密度泛函计算](#)

[颗粒气泡黏附科学——宏观尺度下颗粒气泡黏附研究进展及困境](#)

[颗粒气泡黏附科学——基于 AFM 和 DWFA 的颗粒气泡间疏水作用力研究](#)

煤化学:

[电化学强化无烟煤吸水性的实验研究](#)

[泥炭基活性炭水蒸汽活化过程孔结构演化的碳烧失特征](#)

[活化过硫酸铵溶液对煤样氧化增透的实验研究](#)

[伊敏褐煤不同化学组分结构特征的红外光谱研究](#)

煤燃烧:

[O₂/CO₂气氛下煤焦恒温燃烧 NO_x 释放特性](#)

[燃用准东煤过程中碱/碱土金属迁移规律及锅炉结渣沾污研究进展](#)

[五彩湾煤半焦水热脱钠提质及其燃烧特性的演变](#)

[SOFA 参数对 W 锅炉燃烧及 NO_x 排放影响的数值模拟](#)

热解:

[低温热解对低阶煤表面疏水性的影响机制及半焦可浮性分析](#)

[微波辅助铁催化低阶煤热解特性](#)

[水溶 Na 对高碱煤热解及氮热变迁的影响](#)



推荐阅读:

[煤热解焦油催化裂解和乙烷水蒸气重整耦合提高焦油品质](#)

[大柳塔煤及显微组分在不同气氛下的热解行为](#)

[升温速率对准东褐煤热解特性及煤焦孔隙结构的影响](#)

气化:

[多喷嘴对置式气流床气化炉内热态行为的研究进展](#)

液化:

[褐煤直接液化过程中存在的问题与思考](#)

[煤基液体产物中酚类化合物的组成研究](#)

[煤液化条件下铁系催化剂的相变](#)

[基于分子质量的煤沥青芳香分组成结构表征](#)

[不同类型重油中碱性氮化合物分子组成及其加氢裂化转化规律](#)

清洁利用:

[煤炭分级利用新思路——事前分离与精准利用](#)

[煤基新材料-煤基石墨烯的制备及石墨烯在导热领域应用研究进](#)



移动阅读

姚禹歌,蒋苓,张缦,等. 煤燃烧成灰发射率研究进展[J]. 煤炭学报,2020,45(3):1170-1178. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.0306

YAO Yuge,JIANG Ling,ZHANG Man,et al. Research progress review on the emittance of the ash from coal combustion[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(3):1170-1178. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.0306

煤燃烧成灰发射率研究进展

姚禹歌¹,蒋 苓¹,张 缦¹,杨海瑞¹,吕俊复¹,何 维²,周 棋²

(1. 清华大学 能源与动力工程系,北京 100084; 2. 东方锅炉股份有限公司 清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室,四川 自贡 643001)

摘 要:煤燃烧成灰发射率是炉内传热的重要参数,对于电站锅炉的设计与安全运行均有重要意义。为了系统性地概述煤灰发射率的研究现状,为实际应用中煤灰发射率的确定提供参考,总结了煤灰发射率的主要影响因素和预测模型。煤灰发射率主要影响因素包括:波长、温度、表面状态和化学组成。煤灰不是灰体,其光谱发射率随波长变化。波长与表面状态是煤灰光谱发射率的主要影响因素;温度与表面状态是煤灰总发射率的主要影响因素。Fe元素是主要影响煤灰发射率的化学元素,然而化学组成对于煤灰发射率的影响相对较小,并取决于波长、温度和表面状态。目前关于煤灰发射率影响因素的研究大多属于定性研究,难以给出具有普适性的定量结论。煤灰发射率的预测模型可以分为两类,一类是基于物理过程建立的预测模型,一类是基于实验数据得到的经验模型和半经验模型。前者涉及到散射相关的计算和光学常数的选取,较为复杂;后者虽然具有形式较为简单的表达式,便于计算,但是有较多特定的限制条件,应用范围相对较小。目前还几乎没有同时涵盖多种影响因素,可以广泛应用的经验模型或半经验模型,因此煤灰发射率的测量是必要的。有关数据的补充,建立起不同种类煤灰和主要成分发射率的数据库,对于实际应用和预测模型的完善都会有很大帮助。

关键词:煤燃烧;发射率;煤灰颗粒;影响因素;预测模型

中图分类号:TQ534 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2020)03-1170-09

Research progress review on the emittance of the ash from coal combustion

YAO Yuge¹,JIANG Ling¹,ZHANG Man¹,YANG Hairui¹,LÜ Junfu¹,HE Wei²,ZHOU Qi²

(1. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Clean Combustion and Flue Gas Purification Key Laboratory of Sichuan Province, Dongfang Boiler Co. Ltd., Zigong 643001, China)

Abstract: The emittance of the ash from coal combustion is a key parameter of heat transfer in the furnace and significant to design and safe operation of power plant boilers. To systematically present the current states of the coal ash emittance and provide some reference for the determination of the coal ash emittance in practical applications, the major influencing factors and prediction models were summarized. The major influencing factors of the coal ash emittance are the wavelength, temperature, surface structure and chemical composition. The coal ash is not a gray body and its spectral emittance varies with wavelength. The wavelength and surface structure are the major influencing factors of the spectral coal ash emittance. The temperature and surface structure are the major influencing factors of the total coal ash emittance. Fe is the major chemical element affecting the coal ash emittance. However, the chemical composition has a comparatively small influence on the coal ash emittance, which depends on the wavelength, temperature, surface struc-

收稿日期:2019-03-12 修回日期:2019-04-17 责任编辑:常明然

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0600201)

作者简介:姚禹歌(1996—),男,吉林长春人,博士研究生。E-mail:yyg18@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者:张 缦(1971—),女,黑龙江齐齐哈尔人,副教授。Tel:010-62781559, E-mail:zhangman@mail.tsinghua.edu.cn

ture. Most research in the coal ash emittance was qualitative and it is not easy to give a quantitative conclusion. The prediction models of coal ash emittance can be divided into two groups, e. g. models based on physical processes and the empirical and semi-empirical models derived from the experimental data. Models in the former group involve calculation related to scattering and determination of the optical constants which can be relatively complex. Although the empirical and semi-empirical models have simple expressions, they also have many constraints and narrow applied ranges. There are few empirical and semi-empirical models simultaneously taking into account various influencing factors and widely used, therefore the measurement of coal ash emittance is necessary. Emittance data supplement and establishment of database will be of great help to the practice application and perfection of prediction models.

Key words: coal combustion; emittance; ash particle from coal combustion; influencing factor; prediction model

煤炭是中国的基础能源。煤燃烧后其中的矿物质形成底渣和飞灰,烟气中的飞灰影响着烟气对受热面的热辐射特性。经过长期的运行,粉尘会沉积附着在水冷壁、过热器、再热器等受热面管壁表面,形成灰污层。灰污层的形成,在高温火焰和受热面之间构成了一层导热热阻,同时改变管壁表面的辐射换热特性,进而影响管内工质的换热和流动状态,对机组的经济性甚至安全性产生影响^[1]。煤粉燃烧中,炉膛传热主要是以辐射换热的形式进行的^[2],火焰和烟气中粉尘的辐射特性对此有重要影响^[3-4],因此灰的发射率的确定对于煤粉锅炉的数值模拟^[5-6]、设计与运行有着重要的意义^[7]。

相比于燃烧优质动力煤的煤粉锅炉,循环流化床锅炉可以燃用劣质煤^[8],煤中的灰分对于循环流化床燃烧的循环物料具有至关重要的作用^[9-11],煤灰发射率也是CFB主循环回路内传热研究的重要参数^[12-13],尤其是某些事故条件下颗粒堆积向受热面的辐射,危及设备安全,因此煤灰发射率的研究具有重要意义。人们对这个问题已经有一些研究,笔者对此问题的国内外研究进行综述。

1 发射率的概念

普朗克定律描述了绝对黑体光谱辐射力 $E_{b,\lambda}(T)$ 与波长 λ 和温度 T 的关系:

$$E_{b,\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T} - 1\right)} \quad (1)$$

其中, C_1 和 C_2 分别为普朗克第一和第二常数。根据式(1),可以得到黑体总辐射力 $E_b(T)$:

$$E_b(T) = \int_0^\infty E_{b,\lambda}(T) d\lambda = \sigma_b T^4 \quad (2)$$

式中, σ_b 为黑体辐射常数。

实际物体的表面发射能力低于同温度下黑体的发射能力,二者的比值定义为发射率,则实际物体的光谱发射率 $\varepsilon_\lambda(T)$ 与总发射率 $\varepsilon(T)$ 可分别由

式(3)和(4)得到:

$$\varepsilon_\lambda(T) = \frac{E_\lambda(T)}{E_{b,\lambda}(T)} \quad (3)$$

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_0^\infty E_\lambda(T) d\lambda}{E_b(T)} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon(\lambda, T) E_{b,\lambda}(T) d\lambda}{E_b(T)} \quad (4)$$

实际物体的光谱发射率 $\varepsilon(\lambda, T)$ 与总发射率 $\varepsilon(T)$ 均在 $0 \sim 1$ 。

对于实际物体,所有投射到表面的热辐射能量都会被物体吸收、反射或穿透物体表面,故有

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (5)$$

式中, α 为物体表面的吸收率; ρ 为物体表面的反射率; τ 为物体穿透率。

对于某一特定波长 λ , 则有

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (6)$$

又由基尔霍夫定律,对于漫射表面(如煤灰),有

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda = 1 - \rho_\lambda - \tau_\lambda \quad (7)$$

2 煤灰发射率影响因素

2.1 波长 λ 对于煤灰光谱发射率的影响

早期学者假定煤灰属于灰体,即煤灰的光谱发射率等于总发射率,与波长无关。GOETZ 等于 1979 年利用单色仪和红外探测仪测量 4 种煤灰样品在颗粒状态和熔融态的光谱发射率^[14]。实验结果表明煤灰的表面光谱发射率在 $0.65 \sim 10 \mu\text{m}$ 波长内不为常数,有明显的变化,证明煤灰不属于灰体,不具有灰体的性质。WALL 等最早利用窄角辐射计和带通滤波器测量 6 种煤灰颗粒样品和 4 种合成样品在 5 个不同波段内($1 \sim 2, 2 \sim 3, 3.0 \sim 4.3, 4.3 \sim 5.8$ 和 $5.8 \sim 35.0 \mu\text{m}$) 的平均发射率^[15]。结果表明,对于全部样品, $5.8 \sim 35.0 \mu\text{m}$ 波段的平均发射率显著大于 $4.3 \sim 5.8 \mu\text{m}$ 波段的平均发射率, $4.3 \sim 5.8 \mu\text{m}$ 波段的平均发射率显著大于 $1 \sim 2, 2 \sim 3$ 和 $3.0 \sim 4.3 \mu\text{m}$ 波段的平均发射率,可推测随着波长的增大,煤灰光谱发射率从 $4.3 \mu\text{m}$ 处开始将呈现显著上升的趋势,

但是无法对于波长较大时光谱发射率的变化规律做出预测。

20世纪80年代末期,傅里叶变换红外光谱(FT-IR)技术已经广泛应用于光谱发射率的测量^[16-18],以此可以测量煤灰在一定波长范围内的光谱发射率。MARKHAM等最早利用FT-IR在1.6~20 μm波长范围内测量4种煤灰样品的光谱发射率^[19]。图1展示了其中1种煤灰样品的光谱发射率测量结果,表明表面经过熔化过程的煤灰光谱发射率整体较高,变化范围较小,在0.8~1.0上下波动;经过烧结过程的煤灰光谱发射率可分为3段,在1.6~3.0 μm波长内波动较小,近似为常值,在3.0~8.0 μm波长内随波长的增大而明显增大,与波长近似呈线性关系,在8.0 μm左右光谱发射率达到最大值,并在8.0~20 μm内小范围上下波动;未经过烧结或熔化过程的煤灰颗粒与经过烧结过程的煤灰光谱发射率变化规律相似,但是未经过烧结或熔化过程的煤灰颗粒的光谱发射率数值较低,在3.0~8.0 μm波长内的增长更加迅速。煤灰颗粒光谱发射率与波长呈现显著的相关性。

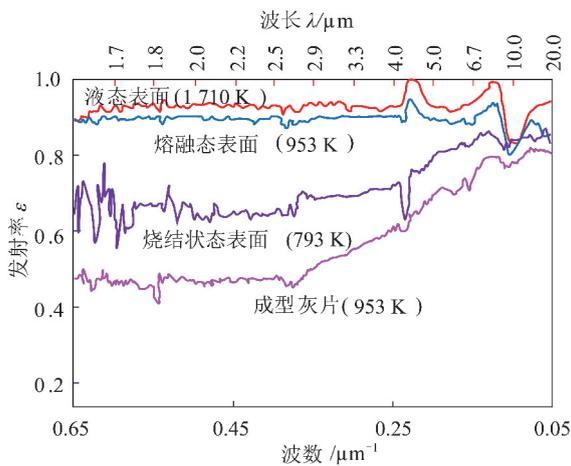


图1 一种煤灰样品光谱发射率的测量结果^[19]

Fig. 1 Measured spectral emittance of a coal ash sample^[19]

此后,很多研究也利用FT-IR技术测量不同形态下的煤灰样品或者人工合成灰的光谱发射率,得到与图1所示结果相似的3段变化规律^[20-24]。同时,BOHNES等^[23]和SALJNIKOV等^[24]发现,在低于3 μm时(对应图1中第1段)光谱发射率也可以随波长增大呈现不同的变化规律(增大、不变、下降),变化规律的差异与煤灰样品的成分和表面温度有关。

2.2 表面温度 T 对于煤灰发射率的影响

如前所述,煤灰不是灰体,根据式(1)~(4),其表面发射率与表面温度相关。MULCAHY等最早在550~1 650 K测量了褐煤煤灰样品在总半球发射

率^[25-26]。

如图2所示,从低温开始加热煤灰,随着样品表面温度的上升,煤灰的总发射率降低,到900℃左右,发射率下降缓慢,近似不变;随后加热至1 000℃左右,发射率开始随温度上升而增大,直至熔化。冷却过程中,从温度最高点开始,发射率始终随着温度的降低而减小,并且冷却过程的发射率变化曲线始终位于加热过程的发射率变化曲线(A段)之上。表面经过熔化过程煤灰的降温曲线(C段)位置经过烧结的煤灰的降温曲线(B段)之上,该研究同样测量了波长0.9 μm的光谱发射率,所得曲线与总发射率有相同的变化趋势。其余不同学者的实验结果也呈现了相似的变化规律^[15,27-28]。

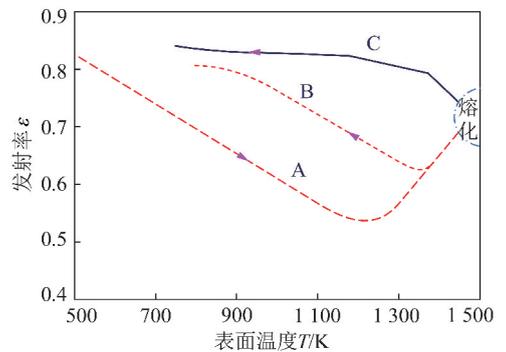


图2 表面温度对于一种煤灰总半球发射率的影响^[25]

Fig. 2 Effect of surface temperature on total hemispherical emittance of a coal ash sample^[25]

温度同样对于光谱发射率产生影响。如图3所示,BOHNES等的实验结果表明在波长1.0~5.0 μm,煤灰样品的光谱发射率随着温度的上升而增大,增大量较小,在5.0~15.0 μm光谱发射率与温度没有显著的相关性,整体来看温度变化对于光谱发射率的改变较小^[23]。SALJNIKOV等的实验结果表明,对于部分煤灰样品,在波长1.0~5.0 μm区域内,随着温度的升高,光谱发射率随波长的相关性从正相关逐渐变为负相关^[24]。

根据式(1),当煤灰发生烧结前,随着温度的升高,黑体的主要辐射区域在光谱上的相对位置几乎不变,位于1.0~3.0 μm,并且随着温度的增加,该区域的辐射能量占比显著增大。由图1,3的测量结果,煤灰光谱发射率在1.0~3.0 μm的光谱发射率相对较低,并且温度改变对于煤灰光谱发射率的影较小,因此总发射率将会随着温度的升高而降低。当温度加热至900℃左右时,高温使得煤灰表面发生了不可逆的物理变化,导致了温度继续升高后发射率变化趋势的改变,也使得降温过程的发射率大于升温过程。

2.3 表面状态对于煤灰发射率的影响

随着煤灰表面温度的升高,煤灰颗粒经历烧结和

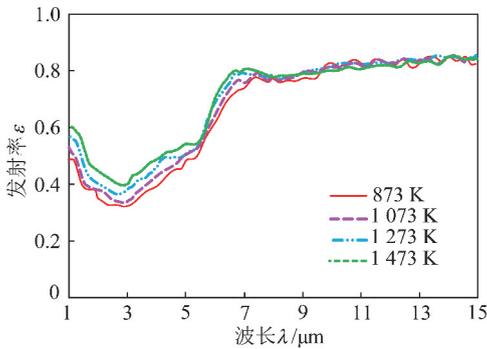


图3 表面温度对于一种煤灰光谱发射率的影响^[23]

Fig. 3 Effect of surface temperature on spectral emittance of a coal ash sample^[23]

熔化2个过程,这2个过程对于煤灰颗粒表面均造成了不可逆的物理变化。GREFFRATH等在500~1 100℃测量了3种褐煤煤灰样品的总发射率,并对于部分样品进行1 400℃高温加热的预处理,以改变表面状态^[29]。结果表明表面经过高温处理,经历了烧结或熔化的煤灰样品具有更高的总发射率。图2中的光谱发射率也呈现了相似的规律,结合2.2节中温度变化对于光谱发射率的改变较小的结论,可以推断表面状态是煤灰光谱发射率的主要影响因素。烧结过程和熔化过程将煤灰颗粒表面变成了“玻璃状”,在该状态下煤灰表面具有更高的透射率和更低的反射率,从煤灰内层传输至表面更多的能量。因此相比于颗粒状煤灰,经过烧结过程或熔化过程的煤灰,在同等表面温度的条件下具有更高的发射率^[30-31]。

对于颗粒状煤灰,BOOW等最早测量了4组化学组成相同的合成灰在表面温度200~1 000℃的总发射率,样品的平均粒径在104~211 μm^[32]。实验结果表明,随着粒径的增大,样品的总发射率增大,该结论也适用于其余不同种类的煤灰、合成灰与石英砂^[33]。ZYGARLICHE等也报告了粒径与发射率呈正相关的规律,并发现粒径是影响煤灰发射率的主导因素^[34]。GOREWODA及其同事对于煤灰颗粒化学组成中的重要含氧化合物(SiO₂, Fe₂O₃和CaCO₃等)进行了测量,发现所有样品的发射率均随粒径的增大而增大^[35]。SIH等关于SiO₂颗粒的测量结果也支持上述结论^[36]。MULCAHY等认为烧结过程可以视作增大了煤灰表面粒径,因此增大了发射率^[25-26]。

2.4 化学组成对于煤灰发射率的影响

煤灰的化学组成比较复杂,主要含有Si, Al, Fe, Ca和Mg等元素的化合物,主要以氧化物的形式存在^[37-39],其中Fe元素或Fe₂O₃被普遍认为是影响煤灰发射率的主要成分。BOOW等最早利用合成灰探

究Fe₂O₃含量对于总发射率的影响,结果表明含5% Fe₂O₃的合成灰样品的总发射率显著高于不含Fe₂O₃的合成灰^[32]。GREFFRATH等在煤灰样品中掺入了2%和30%的Fe₂O₃,结果表明含30% Fe₂O₃的样品总发射率显著高于含2% Fe₂O₃的样品^[33]。MOORE等也将现场测量中次烟煤煤灰样品光谱发射率小于烟煤煤灰样品的原因归结于煤灰中Fe₂O₃等效质量分数的差异^[40]。GOREWODA及其同事对于比例不同的SiO₂和Fe₂O₃的混合物样品进行测量,结果表明当Fe₂O₃等效质量分数超过10%时,样品的总发射率随着Fe₂O₃等效质量分数的增大而增大,并且该实验现象在平均粒径较低的样品中更为显著,含10% Fe₂O₃的混合物样品与纯SiO₂的总发射率几乎相等,该实验结果也表明Fe₂O₃等效质量分数对于煤灰发射率的影响受到煤灰粒径的影响^[35]。实际上,相比于煤灰粒径,化学组成对于发射率的影响程度较小,甚至在一定条件下可以忽略^[32,34]。对于Fe₂O₃在化学组成中主导煤灰发射率的原因,BOOW及其同事认为Fe₂O₃含量较高的煤灰样品具有更高的吸收能力,因此测量得到的发射率就越高。Fe₂O₃含量与样品的颜色有关,Fe₂O₃含量越高的煤灰样品,通常具有较深的红色,因此颜色较深的样品通常具有较高的发射率^[32]。该研究同时也发现含有碳颗粒的合成灰样品拥有更高的发射率,这也验证了上述分析。

对于除了Fe₂O₃以外的其余化学组成,BOHNES等认为SiO₂是决定煤灰发射率随温度改变趋势的重要成分,纯Fe₂O₃的发射率随温度变化反而不显著^[23]。化学组成的改变也会影响着煤灰的熔融特性^[41-45],进而改变发射率随温度的变化曲线。LINKA等则发现由于煤灰中大量存在SiO₂, Al₂O₃和MgO,因此在波长较大时煤灰光谱发射率较大;FeO(Fe²⁺)则对于1 μm附近的光谱发射率有重要影响^[46]。

2.5 煤灰发射率影响因素分析

除了波长、表面温度、表面性质、化学组成外,颗粒孔隙率对颗粒堆积表面发射率也有重要影响^[36],SALJNIKOV等发现当灰层厚度大于1 mm时,发射率与灰层厚度无关^[28]。

目前关于煤灰发射率影响因素的研究大多属于定性研究,对于影响趋势给出结论。由于煤灰种类较多,与发射率有关的影响因素也很多,因此很难进行具有普适性的定量研究,甚至会有不同的变化趋势。但是在一定实验条件下,煤灰发射率的变化规律可以为实际应用中发射率的预测提供有价值的参考。

3 煤灰发射率的预测

3.1 基于物理过程的预测

灰颗粒层可以视为不透明物体^[28]:

$$\tau_\lambda = 0 \quad (8)$$

因此式(7)可以写成

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda = 1 - \rho_\lambda \quad (9)$$

因此通过对于物体表面反射率的分析与计算,可以得到煤灰的光谱发射率。目前对于这一问题的求解模型可以大致分为 3 类。在所有的求解模型中,都对于煤灰灰层做出了假设:① 煤灰颗粒尺寸一致;② 煤灰颗粒化学组成一致;③ 煤灰颗粒光学性质(复折射率)一致;④ 灰层是一个对称的无限大平壁。

第 1 类求解模型是 MARKHAM 等^[19]提出的均匀表面模型:

$$\varepsilon_\lambda = 1 - \frac{(n_\lambda - 1)^2 + k_\lambda^2}{(n_\lambda + 1)^2 + k_\lambda^2} \quad (10)$$

式中, n 和 k 分别为煤灰的实折射率和吸收系数,是复折射率 $m = n - ik$ 中的实部和虚部。

该模型仅适用于足够光滑的表面,BHATTACHARYA 指出该模型的适用条件是 $h < \lambda / (8 \cos \theta)$,其中 h 为表面不规则尺寸, θ 为入射角度,即煤灰颗粒粒径相比于波长要足够小,因此该模型仅适用于经过熔化过程的煤灰^[47]。MARKHAM 等对于该模型的计算结果也表明,该模型在预测表面经过熔化过程的煤灰时具有较好的准确性,然而无法应用于颗粒状煤灰的光谱发射率预测^[19],但是该模型可以给出煤灰光谱发射率的上限^[48]。

第 2 类模型是 BHATTACHARYA 提出的基于煤粉锅炉换热器灰渣的辐射传递模型。该模型对于炉膛内部从火焰到换热器表面灰渣和换热器管壁的辐射传递过程,考虑了到飞灰对于这一过程的影响^[47,49]。该模型中,辐射强度在灰层内部一维传递,满足

$$\frac{dI(x, \mu)}{dx} = -\frac{K_e}{\mu} [I(x, \mu) - T(x, \mu)] \quad (11)$$

式中, μ 为入射角的余弦值,即 $\mu = \cos \theta$; $I(x, \mu)$ 为某一位置某一方向的辐射强度,如图 4 所示。 K_e 为消光系数; $T(x, \mu)$ 为某一位置某一方向的能量参数,与 $I(x, \mu)$ 、黑体辐射和散射有关参数等有关。

该模型所预测的光谱发射率与前述的煤灰颗粒光谱发射率测量结果的趋势相同。该模型对于总半球发射率的计算结果可以正确地预测煤灰颗粒粒径

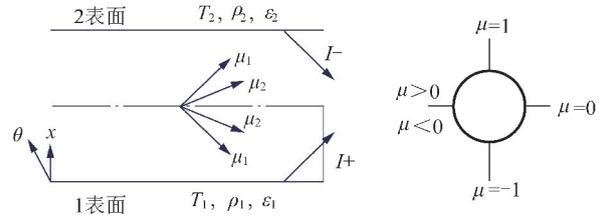


图 4 BHATTACHARYA 提出的光谱发射率模型^[47]

Fig. 4 Model for spectral emittance presented by BHATTACHARYA^[47]

和 Fe 的含量对于总发射率的影响趋势。同时该模型指出光学性质(复折射率)对于发射率有显著影响。

第 3 类模型是基于 BOHREN 提出的双通量模型进行反射率或光谱发射率的求解^[50]。该模型将灰层中的辐射视作两个相对的半球辐射,其辐射强度只有正负两个方向,在这两个方向的半球内辐射具有各向同性。该模型可以适用于三维空间的建模。最终求得光谱发射率:

$$\varepsilon_\lambda = 1 - \frac{\sqrt{1 - \omega_0 g} - \sqrt{1 - \omega_0}}{\sqrt{1 - \omega_0 g} + \sqrt{1 - \omega_0}} \quad (12)$$

其中, ω_0 为灰颗粒散射率; g 为非平衡因子,二者的求解均与 MIE 散射理论有关。刘东等采用这一类模型,并进行了相关散射修正,得到相比于 BHATTACHARYA 的模型更加准确的预测结果^[51]。文献[48]是对于散射的进一步修正。

以上总结的基于物理过程对于煤灰发射率进行建模和预测的过程,均涉及散射理论及其计算,过程较为复杂^[52],上述模型难以应用于实际生产过程中;同时上述模型对于复折射率中 n 和 k 的选取也受到煤灰粒径、孔隙率和化学组成等很多因素的影响^[53-54],给模型的使用带来一定的困难。

3.2 基于实验结果的预测

为了便于实际应用,很多学者也基于实验结果给出了不同的预测方式和经验或半经验公式。

MULCAHY 等发现波长为 $0.9 \mu\text{m}$ 时的光谱发射率与总发射率有相同的变化趋势,但数值稍微小于总发射率^[25-26]。变化趋势的相同预示着在一些特定情境下可用某一波长下的光谱发射率来代替总发射率。WALL 等提出利用有限波段内的平均发射率对总发射率 ε_i 进行估算^[15],并将式(4)改写成

$$\varepsilon_i(T_0) = \frac{\sum_{j=1}^n \varepsilon_{\lambda_j}(T_0) \Delta E_{b,\lambda_j}(T_0)}{\sum_{j=1}^n \Delta E_{b,\lambda_j}(T_0)} \quad (13)$$

其中, λ_j 选取为该波段内的平均值,即

$$\lambda_j = \frac{\lambda_l + \lambda_u}{2} \quad (14)$$

式中, λ_l 和 λ_u 分别为该波段内的最小波长和最大波长。

BOOW 及其同事针对粒径和含 Fe 量(颜色)的影响,给出了在表面温度为 500 °C 时半球发射率 ε_h 与粒径 d 的关系式^[32],该关联式适用于 7 ~ 420 μm 粒径。对于不含 Fe(无颜色)的煤灰:

$$\varepsilon_h = 0.25 \lg d + 0.13 \quad (15)$$

对于含 Fe(有颜色)的煤灰:

$$\varepsilon_h = 0.30 \lg d + 0.16 \quad (16)$$

该研究也发现半球发射率 ε_h 与煤灰导热系数 k 的自然对数值 $\ln k$ 近似呈线性关系,在表面温度为 500 °C 时给出预测公式:

$$\varepsilon_h = 0.51 \lg k + 2.44 \quad (17)$$

其相关系数可达 0.94。

ZBOGAR 等给出了如下的预测方法^[55]:当温度低于烧结温度时,可以根据 BOOW 等的实验数据建立发射率与温度的线性关系式^[32];当温度高于熔化温度,法向发射率可以选取为 0.955,对于半球发射率可以用 WALL 等提出的 $\varepsilon_h = 0.92\varepsilon_n$ 来确定^[15];当温度处于烧结温度和熔化温度之间时,可以根据 BOOW 等的实验数据建立发射率与温度的线性关系式^[32];对于含铁量的影响,可以参照 $\varepsilon(5\% \text{Fe}_2\text{O}_3)/\varepsilon(1\% \text{Fe}_2\text{O}_3)$ 为 1.12 的经验值。

WALL 等指出^[1],BOOW 等的实验数据^[32]与实际煤粉锅炉中灰渣发射率相比偏低,这是由于灰渣附着在换热器管壁表面,灰渣表面会存在一定的曲率而并非平面。该研究给出了实际锅炉中灰渣发射率 ε_e 与实验得到的平面半球发射率 ε_h 的经验关联式:

$$\varepsilon_e = \frac{\pi\varepsilon_h}{1 + (\pi - 1)\varepsilon_h} \quad (18)$$

SIH 和 BARLOW^[36]认为,煤灰表面发射率 ε 可以视作颗粒固体表面发射率 ε_s 和煤灰颗粒间空腔的发射率 ε_H 的加权平均数:

$$\varepsilon = A_H\varepsilon_H + (1 - A_H)\varepsilon_s \quad (19)$$

其中, ε_H 可以表达为 ε_s 和煤灰颗粒孔隙率 φ 的函数:

$$\varepsilon_H = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s + f(1 - \varepsilon_s)} \quad (20)$$

$$f = \frac{\left(\frac{\varphi}{1 - \varphi}\right)^2}{2\left(\frac{\varphi}{1 - \varphi}\right)^2 + 3.082} \quad (21)$$

A_H 为空腔的面积占比,可表达为 φ 的函数:

$$A_H = \frac{0.908\varphi^2}{1.908\varphi^2 - 2\varphi + 1} \quad (22)$$

由式(20)和式(21)可以看出, ε_H 显著大于 ε_s , 并且在 φ 很小的时候可以接近 1。又结合式(22)可知表面发射率 ε 可以写成 φ 的函数,进而通过孔隙率的测定即可得到表面发射率。

上述预测方法均针对总发射率。对于光谱发射率,SHIMOGORI 等将光谱发射率分为两段^[56],第 1 段在波长 0 ~ 8 μm 单调增加:

$$\varepsilon_\lambda = k_1\lambda^2(k_2 - \lambda) + k_3 \quad (23)$$

在 8 μm (λ_{\max}) 以上光谱发射率为常数 $\varepsilon_{\max} = 0.85$ 。

在式(23)中:

$$k_1 = \frac{0.85 - \varepsilon_{1.6}}{229.38} \quad (24)$$

$$k_2 = 1.5\lambda_{\max} \quad (25)$$

$$k_3 = 1.12\varepsilon_{1.6} - 0.10 \quad (26)$$

其中, $\varepsilon_{1.6}$ 为波长 1.6 μm 的光谱发射率,可以根据 Fe_2O_3 含量 $C_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$ 预测:

$$\varepsilon_{1.6} = (0.164 + 0.25 \lg C_{\text{Fe}_2\text{O}_3}) \times (0.001767T - 1.065) \quad (27)$$

其中,温度 T 的单位为 K。该预测模型与对于大量实验数据的预测误差在 $\pm 20\%$ 以内。

TSUDA 等将光谱发射率分为 3 段^[57],当 2 $\mu\text{m} \leq \lambda < 4 \mu\text{m}$ 时,有

$$\varepsilon_\lambda = A + B\lambda \quad (28)$$

当 4 $\mu\text{m} \leq \lambda \leq 8 \mu\text{m}$ 时,有

$$\varepsilon_\lambda = E_0 + E_1(\lambda - 4) + E_2(\lambda - 4)^2 + E_3(\lambda - 4)^3 \quad (29)$$

当 $\lambda > 8 \mu\text{m}$ 时,有

$$\varepsilon_\lambda = C + D\lambda \quad (30)$$

该模型中 A, B, C 和 D 为根据实验值确定的参数, E_0, E_1, E_2 和 E_3 为与 A, B, C 和 D 有关的参数。

SALJNIKOV 等假设半球发射率等于法向发射率,结合 2.5 ~ 25 μm 波长的管沟发射率实验数据,给出以下的光谱发射率预测式^[28]:

$$\varepsilon_{\lambda, h} \cong \varepsilon_{\lambda, n} = \frac{\varepsilon_{\min} + \varepsilon_{\max} \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^p}{1 + \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^p} \quad (31)$$

其中, $\varepsilon_{\max}, \varepsilon_{\min}$ 和 p 可以写成与温度 T 有关的函数; λ_m 为实验数据中光谱发射率上升段的中点波长, λ_m 的选取对于光谱发射率的预测影响不显著。该研究中提供了 4 种煤灰样品 $\varepsilon_{\max}, \varepsilon_{\min}$ 和 p 与温度 T 的拟合公式和 λ_m 的取值。

上述基于实验数据给出的预测方法或经验公式在实际应用中比较简便,往往通过1个或少量几个煤灰的特性参数就可以推出发射率的预测值。然而由于煤灰种类较多,其发射率的影响因素也很多,因此绝大多数经验公式的适用范围较小,并依赖于一定数量的实验测量值。

4 结 语

煤灰发射率是探究煤燃烧形成的灰颗粒以及炉内传热的关键参数,对于煤粉锅炉和CFB锅炉的安全运行均有重要的意义。笔者对数十年来国内外学者对于煤灰发射率的研究进行综述。基于不同学者的实验研究,总结了煤灰发射率的影响因素,包括波长,温度,表面状态,化学组成等。煤灰不能视为灰体,其光谱发射率随波长变化明显。温度和表面状态对于煤灰发射率的影响相比于化学组成更为显著,Fe元素是影响煤灰发射率的主要化学元素。基于影响因素的实验探究大多只能给出定性的结论。也对于不同学者提出的发射率的预测模型进行综述。基于物理过程建立的模型涉及散射理论相关的计算过程,应用较为复杂。基于实验结果的经验模型将发射率表示为1个或少量几个影响因素的函数,拥有较为简便的表达形式。然而经验模型往往具有严格的限制条件,应用范围较小,并且依赖于实验数据。因此对于煤灰发射率的实际测量是必要的,然而电站锅炉现场测量往往较为困难,不易实现。

目前有关于煤灰发射率的探究还难以给出具有普适性的定量的结论,也几乎没有同时涵盖多种主要影响因素的经验模型,目前已有的测量数据也不足以填补上述研究的空白。研究现状表明,对于不同种类煤灰发射率以及煤灰主要组成成分发射率的数据库的建立将对于实际应用有很大的帮助。因此,在未来的研究中,不同种煤灰在不同实验条件下测量数据的收集,整理与完善是非常重要的。测量数据的不断补充,会给实际应用中发射率的选取提供更多的参考信息,也有助于煤灰发射率预测模型的进一步完善。

参考文献(References):

- [1] 吕俊复,史航,吴玉新,等. 燃用准东煤过程中碱/碱土金属迁移规律及锅炉结渣沾污研究进展[J]. 煤炭学报,2020,45(1):377-385.
LÜ Junfu, SHI Hang, WU Yuxin, et al. Transformation of AAEM and ash deposition characteristics during combustion of Zhundong coal[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 377-385.
- [2] WALL T F, BHATTACHARYA S P, ZHANG D K, et al. The properties and thermal effects of ash deposits in coal-fired furnace[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 1993, 19(6): 487-504.
- [3] 张大龙,蒙晨玮,朱余乐,等. 燃烧无烟煤的W火焰锅炉热流密度分布的数值模拟[J]. 煤炭学报,2016,41(10):2495-2502.
ZHANG Dalong, MENG Chenwei, ZHU Yule, et al. Numerical simulation of the heat flux distribution of water wall of an anthracite coal fired arch-fired boiler[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(10): 2495-2502.
- [4] 王为术,刘军,王保文,等. 超临界锅炉劣质无烟煤燃烧NO_x释放特性的数值模拟[J]. 煤炭学报,2012,37(2):310-315.
WANG Weishu, LIU Jun, WANG Baowen, et al. Numerical simulation on the NO_x release characteristics during the combustion of poor-quality anthracite in supercritical boiler[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(2): 310-315.
- [5] 李振山,张志,陈登高,等. 煤粉燃烧中NO_x的预测:模型开发及Fluent实现[J]. 煤炭学报,2016,41(10):2426-2433.
LI Zhenshan, ZHANG Zhi, CHEN Denggao, et al. Prediction of NO_x during pulverized coal combustion: part 1-Model development and its implementation with Fluent[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(10): 2426-2433.
- [6] 纪任山. 煤粉工业锅炉燃烧的数值模拟[J]. 煤炭学报,2009,34(12):1703-1706.
JI Renshan. Numerical simulation of combustion in the industrial pulverized-coal boiler[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(12): 1703-1706.
- [7] 刘建忠,周俊虎,黄镇宇,等. 65 t/h燃油锅炉改烧水煤浆技术研究[J]. 煤炭学报,2005,30(6):773-777.
LIU Jianzhong, ZHOU Junhu, HUANG Zhenyu, et al. Study on technology of coal-water slurry in a 65 t/h oil-fired boiler[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(6): 773-777.
- [8] YUE G, CAI R, LU J, et al. From a CFB reactor to a CFB boiler-The review of R&D progress of CFB coal combustion technology in China[J]. Powder Technology, 2017, 316: 18-28.
- [9] 史航,吴玉新,吕俊复,等. 循环灰吸附碱金属机理研究[J]. 煤炭学报,2017,42(4):1063-1068.
SHI Hang, WU Yuxin, LÜ Junfu, et al. Mechanism study of adsorption of alkali with bed material[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 1063-1068.
- [10] YANG H, YUE G, XIAO X, et al. 1D modeling on the material balance in CFB boiler[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(20): 5603-5611.
- [11] 葛荣存,张贤,蔡润夏,等. 流化床选择性排渣的实验研究[J]. 煤炭学报,2018,43(4):1134-1139.
GE Rongcun, ZHANG Xian, CAI Runxia, et al. Experimental study on the bottom ash discharging and separating in fluidized beds[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 1134-1139.
- [12] LU J, ZHANG J, YUE G, et al. Method of calculation of heat transfer coefficient of the heater in a circulating fluidized bed furnace[J]. Heat Transfer-Asian Research, 2002, 31(7): 540-550.
- [13] 李金晶,李燕,吕俊复,等. 循环流化床锅炉炉内传热影响因素分析[J]. 清华大学学报(自然科学版),2007,47(11):25-28.
LI Jinjing, LI Yan, LÜ Junfu, et al. Analysis of heat transfer factors in furnace of circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2007, 47(11): 25-28.

- [14] GOETZ G J,NSAKALA N Y,BORIO R W. Development of method for determining emissivities and absorptivities of coal ash deposits [J]. *Journal of Engineering for Power*,1979,101(4):607.
- [15] WALL T F,BECKER H B. Total absorptivities and emissivities of particulate coal ash from spectral band emissivity measurements [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*,1984,106(4):771-776.
- [16] SOLOMON P R,CARANGELO R M,BEST P E, et al. Analysis of particle emittance, composition, size and temperature by FT-IR emission/transmission spectroscopy [J]. *Fuel*,1987,66(7):897-908.
- [17] SOLOMON P R,CHIEN P L,CARANGELO R M, et al. Application of FT-IR emission/transmission (E/T) spectroscopy to study coal combustion phenomena[J]. *Symposium on Combustion*,1989,22(1):211-221.
- [18] BAXTER L L,FLETCHER T H,OTTESEN D K. Spectral emittance measurements of coal particles[J]. *Energy & Fuels*,1988,2(4):423-430.
- [19] MARKHAM J R,BEST P E,SOLOMON P R, et al. Measurement of radiative properties of ash and slag by FT-IR emission and reflection spectroscopy [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*,1992,114(2):458-464.
- [20] RICHARDS G H,HARB J N,BAXTER L L, et al. Radiative heat transfer in pulverized-coal-fired boilers;Development of the absorptive/reflective character of initial ash deposits[J]. *Symposium on Combustion*,1994,25(1):511-518.
- [21] BHATTACHARYA S P,WALL T F,ARDUINI-SCHUSTER M. A study on the importance of dependent radiative effects in determining the spectral and total emittance of particulate ash deposits in pulverised fuel fired furnaces [J]. *Chemical Engineering & Processing*,1997,36(6):423-432.
- [22] SCHERER V,LINKA S,WIRTZ S. Spectral radiation characteristics of coal ashes and slags[J]. *Clean Air*,2005,6(3):329-341.
- [23] BOHNES S,SCHERER V,LINKA S, et al. Spectral emissivity measurements of single mineral phases and ash deposits [A]. *ASME Summer Heat Transfer Conference [C]*. San Francisco,2005.
- [24] SALJNIKOV A,VUCICEVIC B,KOMATINA M, et al. Spectroscopic research on infrared emittance of coal ash deposits[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*,2009,33(8):1133-1141.
- [25] MULCAHY M F R,BOOW J,GOARD P R C. Fireside deposits and their effect on heat transfer in a pulverized-fuel boiler; Part I [J]. *Journal of the Institute of Fuel*,1966,39(308):385-394.
- [26] MULCAHY M F R,BOOW J,GOARD P R C. Fireside deposits and their effect on heat transfer in a pulverized-fuel boiler; Part II [J]. *Journal of the Institute of Fuel*,1966,39(308):394-398.
- [27] MAKINO T,UCHIYAMA M,BRAJUSKOVIC B D. Total emittances of ash deposit layers in a power-plant boiler system[J]. *Japan Journal of Thermophysics Properties*,1992,6(1):8-13.
- [28] SALJNIKOV A,KOMATINA M,MANOVI V, et al. Investigation on thermal radiation spectra of coal ash deposits[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*,2009,52(11):2871-2884.
- [29] GREFFRATH F,SCHIEMANN M,SCHERER V, et al. Spectral emittance characteristics of powdery and molten coal ashes [A]. *World of Coal Ash (WOCA) Conference [C]*. Denver,2011.
- [30] SHIMOGORI M,YOSHIZAKO H,SHIMOGORI Y, et al. Characterization of coal ash emissivity in high temperature atmospheres[J]. *JSME International Journal Series B*,2005,49(2):265-270.
- [31] GOREWODA J,SCHERER V. Key parameters for the radiative emittance of ashes of solid fuels[J]. *Energy Procedia*,2017,120:181-188.
- [32] BOOW J,GOARD P R C. Fireside deposits and their effect on heat transfer in a pulverized-fuel boiler; Part III [J]. *Journal of the Institute of Fuel*,1969,42(346):412-419.
- [33] GREFFRATH F,GOREWODA J,SCHIEMANN M, et al. Influence of chemical composition and physical structure on normal radiative emittance characteristics of ash deposits[J]. *Fuel*,2014,134:307-314.
- [34] ZYGARLICK C J,MCCOLLOR D P,CROCKER C R. Ash emissivity characterization and prediction [R]. U. S. Pittsburgh; Department of Energy-NETL,1999.
- [35] GOREWODA J,SCHERER V. Influence of carbonate decomposition on normal spectral radiative emittance in the context of oxy-fuel combustion[J]. *Energy & Fuels*,2016,30:9752-9760.
- [36] SIH S S,BARLOW J W. The prediction of the emissivity and thermal conductivity of powder beds[J]. *Particulate Science and Technology*,2004,22(4):427-440.
- [37] 王进伟,赵新木,李少华,等. 循环流化床锅炉煤灰成分对其磨耗特性的影响[J]. *化工学报*,2007,58(3):739-744.
WANG Jinwei,ZHAO Xinmu,LI Shaohua, et al. Influence of coal ash components on attrition characteristics in circulating fluidized bed [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*,2007,58(3):739-744.
- [38] FRYDA L,SOBRINO C,GLAZER M, et al. Study of ash deposition during coal combustion under oxyfuel conditions [J]. *Fuel*,2012,92(1):308-317.
- [39] 李竞岌,张翼,杨海瑞,等. 煤中灰成分对 CO 还原 NO 反应影响的动力学研究[J]. *煤炭学报*,2016,41(10):2448-2453.
LI Jingji,ZHANG Yi,YANG Hairui, et al. Study of the effect of ash composition in coal on the kinetic parameters of NO reduction reaction by CO [J]. *Journal of China Coal Society*,2016,41(10):2448-2453.
- [40] MOORE T J,CUNDICK D P,JONES M R, et al. In situ measurements of the spectral emittance of coal ash deposits[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*,2011,112(12):1978-1986.
- [41] SASI T,MIGHANI M,ÖRS E, et al. Prediction of ash fusion behavior from coal ash composition for entrained-flow gasification [J]. *Fuel Processing Technology*,2018,176:64-75.
- [42] TAMBE S S,NANIWADEKAR M,TIWARY S, et al. Prediction of coal ash fusion temperatures using computational intelligence based models[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*,2018,5(4):486-507.
- [43] 郑常昊,王倩,张建胜. 气化中煤灰熔点 and 黏度预测模型[J]. *燃料化学学报*,2016,44(5):521-527.
ZHENG Changhao,WANG Qian,ZHANG Jiansheng. Predic-

- tion model of ash fusion temperature and viscosity in coal gasification[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2016, 44(5): 521-527.
- [44] 陈登高, 李振山, 蔡宁生. 煤粉空气分级燃烧中还原性气氛的模拟预测及分析[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(1): 109-122.
CHEN Denggao, LI Zhenshan, CAI Ningsheng. Numerical simulation and analysis of reductive atmosphere in air staged pulverized coal combustion [J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(1): 109-122.
- [45] 张恬, 闫凯, 乌晓江, 等. O_2/CO_2 气氛下烟气物性参数对燃煤锅炉对流传热影响的模拟研究[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(1): 123-130.
ZHANG Tian, YAN Kai, WU Xiaojiang, et al. Effect of flue gas physical properties on convective heat transfer of coal-fired boiler in O_2/CO_2 atmosphere [J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(1): 123-130.
- [46] LINKA S, WIRTZ S, SCHERER V. Spectral thermal radiation characteristics of coal ashes and slags: Influence of chemical composition and temperature [A]. ASME Summer Heat Transfer Conference [C]. Las Vegas, 2003.
- [47] BHATTACHARYA S P. A theoretical investigation of the influence of optical constants and particle size on the radiative properties and heat transfer involving ash clouds and deposits [J]. Chemical Engineering and Processing, 2000, 39(5): 471-483.
- [48] LIU D, DUAN Y Y, YANG Z, et al. Theoretical predictions of spectral emissivity for coal ash deposits [A]. ASME Summer Heat Transfer Conference [C]. Minneapolis, 2013.
- [49] BHATTACHARYA S P. Spectral emittance of particulate ash-like deposits: Theoretical predictions compared to experimental measurement [J]. Journal of Heat Transfer, 2004, 126(2): 286.
- [50] BOHREN C F. Multiple scattering of light and some of its observable consequences [J]. American Journal of Physics, 1987, 55(6): 524-528.
- [51] 刘东, 段远源, 杨震. 关于积灰光谱发射率的解析模型与讨论 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(11): 69-74, 12.
LIU Dong, DUAN Yuanyuan, YANG Zhen. Ash deposit spectral emissivity: Analytical model and discussion [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(11): 69-74, 12.
- [52] 项建胜, 何俊华. Mie 光散射理论的数值计算方法 [J]. 应用光学, 2007, 28(3): 363-366.
XIANG jiansheng, HE Junhua. Numerical calculation of Mie theory [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(3): 363-366.
- [53] GOODWIN D G, MITCHNER M. Infrared optical constants of coal slags-Dependence on chemical composition [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1989, 3(1): 53-60.
- [54] ITAYA Y, NISHIO N, HATANO S, et al. Near-infrared radiation and scattering properties of coal fly ash particles cloud [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2006, 39(7): 718-723.
- [55] ZBOGAR A, FRANSEN F J, JENSEN P A, et al. Heat transfer in ash deposits: A modelling tool-box [J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2005, 31(5-6): 371-421.
- [56] SHIMOGORI M, YOSHIKAWA H, MATSUMURA Y. Determination of coal ash emissivity using simplified equation for thermal design of coal-fired boilers [J]. Fuel, 2012, 95: 241-246.
- [57] TSUDA S, OKAZAKI T, GWOSDZ A. Proposal for predictive expressions of emissivity spectra for powdery coal ash [J]. Journal of Power and Energy Systems, 2012, 6(3): 360-377.