

# 炉膛内断面温度场与辐射参数同时重建实验研究

娄春, 周怀春, 姜志伟, 于鹏峰

(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北省武汉市 430074)

## Experimental Investigation on Simultaneous Reconstruction of Cross-section Temperature Distribution and Radiation Properties in a Boiler Furnace

LOU Chun, ZHOU Huai-chun, JIANG Zhi-wei, YU Peng-feng

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

**ABSTRACT:** In coal-fired boiler furnaces, the temperature distributions in furnaces can be reconstructed from radiation information in boundary. However, the radiation properties of medium in furnaces are calculated through the Lorentz-Mie theory. The radiation images of flame were captured by CCD cameras, and then the radiation intensity images and the radiation temperature images can be calculated from the images of flame through calibration. The temperature distribution can be reconstructed using an improved Tikhonov regularization method from radiation temperature images. The uniform absorption coefficient and scattering coefficient of the medium can be updated from the radiation intensity images. The experiment was done in a coal-fired boiler of a 300MW power generation unit and the experimental results under four different furnace loads have been given..

**KEY WORDS:** thermal power engineering; coal-fired boiler; cross-section temperature field; absorption coefficient; scattering coefficient

**摘要:** 在电站燃煤锅炉中, 可以通过检测边界辐射信息重建炉内的温度场, 炉内介质辐射参数则根据 MIE 理论分析得到。该文提出用 CCD 拍摄炉内火焰辐射图像, 通过黑体炉标定得到火焰辐射强度图像和辐射温度图像, 用正则化方法从辐射温度图像中重建介质温度场, 介质辐射参数从辐射强度图像中更新, 两者交替迭代, 直到收敛。在 1 台 300MW 机组燃煤锅炉上开展了实验研究, 给出了 4 种负荷工况下炉内介质辐射参数与断面温度场的重建结果。

**关键词:** 热能动力工程; 燃煤锅炉; 断面温度场; 吸收系数; 散射系数

## 0 引言

在电站燃煤锅炉中, 燃烧介质的温度分布以及辐射参数(包括吸收系数和散射系数)对于决定辐射传热的整个过程具有举足轻重的作用, 实现炉膛内温度场与辐射参数的可视化对于燃烧诊断、控制以及燃烧过程的数值模拟有着重要的意义。在实际应用中, 通过检测边界辐射信息, 可以重建燃煤锅炉内的二维/三维温度场<sup>[1-7]</sup>; 而对于求解炉内燃烧介质的辐射参数, 大多采用基于 MIE 理论的分析方法<sup>[8-9]</sup>, 也有研究人员通过对辐射逆问题的求解来反演辐射系统中介质的辐射参数<sup>[10-13]</sup>。要同时重建辐射系统中介质温度和辐射参数, 文献[11]提出要引入更多的边界测量信息, 并对一维系统开展了模拟研究; 文献[12]针对一个发射、吸收(不考虑散射)介质的二维炉膛, 同时重建了介质温度场、壁面吸收率以及介质吸收系数; 文献[13]对于一个发射、吸收、各向同性散射的二维炉膛, 开展了介质温度场、吸收系数和散射系数同时重建模拟研究, 结果令人满意。

本文以 1 台 300 MW 机组的燃煤锅炉为研究对象, 用 CCD(电荷耦合器件)拍摄炉膛内的火焰辐射图像, 通过黑体炉标定, 从火焰辐射图像得到了边界辐射强度信息和辐射温度信息, 用正则化方法以及最小二乘法对炉膛中一个横截面的温度分布、介质的吸收系数和散射系数进行了同时重建。

## 1 重建方法

对于一个二维炉膛系统, 壁面为灰性发射、吸收、漫反射表面, 其吸收率为  $\epsilon$ ; 空间介质为灰性发射、吸收、散射介质, 其散射系数为  $k_s$ , 吸收系数

为  $k_a$ 。壁面区域被分成  $m$  个单元，空间介质区域被分成  $n$  个单元，系统温度分布为  $T_i, i=1, \dots, m+n$ ，其中前  $m$  个为壁面温度，后  $n$  个为空间介质温度。将 4 个 CCD 摄像机分别放在炉膛的 4 个角上，其水平视场角为  $90^\circ$ ，炉膛内介质以及壁面所辐射的能量可以全部被 CCD 接收到。CCD 摄像机的靶面划分为  $l$  个像素单元，根据辐射成像模型<sup>[1-2]</sup>，CCD 靶面上第  $j$  个像素单元所接收到的辐射强度为

$$I(j) = \sum_{i=1}^m R_d(i \rightarrow j) \epsilon_s T_i^4 \Delta S_i + \sum_{i=m+1}^{m+n} R_d(i \rightarrow j) 4k_a s T_i^4 \Delta V_i, \quad j=1, \dots, l \quad (1)$$

用矩阵形式表示为

$$\mathbf{I} = \mathbf{A} \mathbf{T} \quad (2)$$

$$\text{其中: } A(i, j) = \begin{cases} R_d(i \rightarrow j) \epsilon_s \Delta S_i, & i \leq m \\ R_d(i \rightarrow j) 4k_a s \Delta V_i, & i > m \end{cases}$$

$R_d(i \rightarrow j)$  表示第  $i$  个壁面或者气体单元发出的辐射能被第  $j$  个像素单元所接收到的份额，由介质的吸收系数、散射系数以及壁面的发射率所决定，文献[1-2]介绍了其计算方法。

根据辐射成像新模型<sup>[14]</sup>，CCD 靶面所接收到的辐射温度图像  $\mathbf{T}_{\text{CCD}}$  与炉膛温度场的关系如下

$$\mathbf{T}_{\text{CCD}} = \mathbf{A}' \mathbf{T} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{T}_{\text{CCD}} = \{t_{\text{CCD}}(j)^4, j=1, \dots, l\}$ ，为火焰温度图像，表示炉膛中的三维温度场在 CCD 二维平面上的叠加； $\mathbf{A}'$  是对  $\mathbf{A}$  做归一化。

电站锅炉中煤粉燃烧火焰的辐射波长范围主要是 300~1000nm，温度范围是 800~2000K，其辐射传递过程可以用 Wien 辐射定律描述。用彩色 CCD 摄像机摄取来自炉内的火焰辐射图像时，其接收到的辐射强度图像和辐射温度图像可以通过文献[15]的方法得到。该方法的基本思路是基于 Wien 辐射定律，利用 CCD 所摄取的火焰图像中的红、绿、蓝三基色下的单色图像，根据双色法测温原理得到辐射温度图像；从三幅单色图像所组成的灰度图像中得到辐射强度图像。该方法需要用黑体炉作为标准辐射热源对检测装置进行标定。

在辐射传热正问题计算的基础上，用一种修正的正则化方法可以从 CCD 接收到的辐射温度图像中重建出炉膛中介质温度分布<sup>[1-3]</sup>

$$\mathbf{T} = (\mathbf{A}'^T \mathbf{A}' + \mathbf{a} \mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{A}'^T \mathbf{T}_{\text{CCD}} \quad (4)$$

其中:  $\mathbf{D}$  为正则化矩阵； $\mathbf{a}$  为正则化参数。文献[2]

详细描述了正则化方法，并给出了  $\mathbf{D}$  矩阵的赋值方法，正则化参数可以根据式(5)估算得到

$$\mathbf{a} \approx 2 \|\mathbf{T}_{\text{CCD}} - \mathbf{A}' \mathbf{T}(0)\|^2 / \|\mathbf{D} \mathbf{T}(0)\|^2 \quad (5)$$

式中  $\mathbf{T}(0)$  为式(3)的最小二乘解。

为了同时重建出介质的辐射参数，除了将辐射温度图像作为重建条件外，还要用辐射强度图像作为重建条件。根据式(1)，有  $\mathbf{I} = f(k_a, k_s, \mathbf{T})$ ，可以用最小二乘法从  $\mathbf{I}$  中迭代出介质辐射参数<sup>[13]</sup>。设第  $r$  次计算后得到的辐射强度分布为  $\mathbf{I}^{(r)}$ ，介质吸收系数为  $k_a^{(r)}$ ，散射系数为  $k_s^{(r)}$ 。在此需要从辐射强度图像  $\mathbf{I}$  中获得对吸收系数  $k_a^{(r)}$ 、散射系数  $k_s^{(r)}$  的更新值  $\Delta k_a^{(r)}$ 、 $\Delta k_s^{(r)}$ 。更新的依据是求解下式的  $\Delta k_a^{(r)}$ 、 $\Delta k_s^{(r)}$

$$\mathbf{I} \approx \mathbf{I}^{(r)} + \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{I}^{(r)}}{\partial k_a} & \frac{\partial \mathbf{I}^{(r)}}{\partial k_s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta k_a^{(r)} \\ \Delta k_s^{(r)} \end{pmatrix} \quad (6)$$

在最小二乘意义下，有

$$\begin{pmatrix} \Delta k_a^{(r)} \\ \Delta k_s^{(r)} \end{pmatrix} = \left( \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{I}^{(r)}}{\partial k_a} & \frac{\partial \mathbf{I}^{(r)}}{\partial k_s} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{I}^{(r)}}{\partial k_a} & \frac{\partial \mathbf{I}^{(r)}}{\partial k_s} \end{pmatrix} \right)^{-1} \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{I}^{(r)}}{\partial k_a} & \frac{\partial \mathbf{I}^{(r)}}{\partial k_s} \end{pmatrix}^T (\mathbf{I} - \mathbf{I}^{(r)}) \quad (7)$$

则

$$\begin{cases} k_a^{(r+1)} = k_a^{(r)} + \Delta k_a^{(r)} \\ k_s^{(r+1)} = k_s^{(r)} + \Delta k_s^{(r)} \end{cases} \quad (8)$$

温度场与辐射参数的迭代求解步骤如下：第 1 步，根据拍摄的火焰辐射图像计算出辐射强度图像与辐射温度图像，再给定辐射参数初始值  $k_a^{(0)}$  和  $k_s^{(0)}$ ，开始迭代计算( $r=0, 1, 2, \dots$ )；第 2 步，通过式(4)计算初始温度分布  $\mathbf{T}^{(r)}$ ；第 3 步，通过式(6)~(8)计算出辐射参数更新值  $k_a^{(r+1)}$  和  $k_s^{(r+1)}$ ；再回到第 2 步，直到计算次数达到设定值。可以看到，辐射参数在经过几次迭代后就能收敛到一个稳定值，所以只要到达一定的迭代次数就终止迭代。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 研究对象

实验系统结构示意图如图 1。在炉膛中上部(燃烧器以上折焰角以下)的炉壁四角布置 4 个 CCD 摄像机(图中 CCD<sub>1</sub>~CCD<sub>4</sub>)在同一时刻拍摄到的 4 幅火焰图像进入四画面分割器中，合成一幅图像，通过视频采集卡将四画面火焰图像采集到工控机中。

CCD 摄像机所在的一层炉膛断面为研究对象,将该断面空间分为  $10 \times 10 = 100$  的网格,系统将计算出每一个网格单元的温度值,炉膛断面的网格单元划分及每个 CCD 的位置如图 2 所示,断面温度场的重建只需要用到火焰图像的中间一层像素信息,因此将每个 CCD 所拍摄的火焰图像的中间一层像素划分为 90 个像素单元,共有 360 个像素单元。

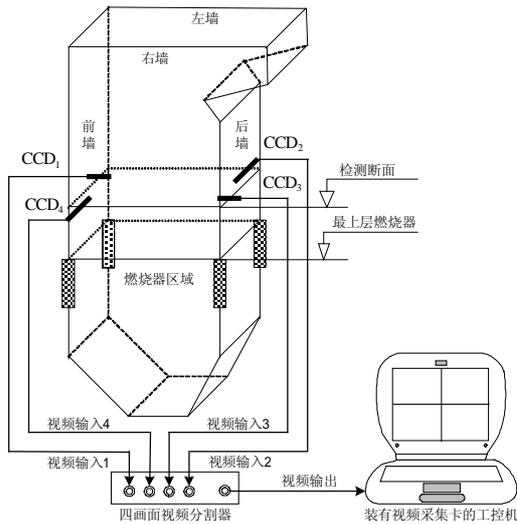


图 1 炉膛及实验装置  
Fig. 1 Furnace and experimental setup

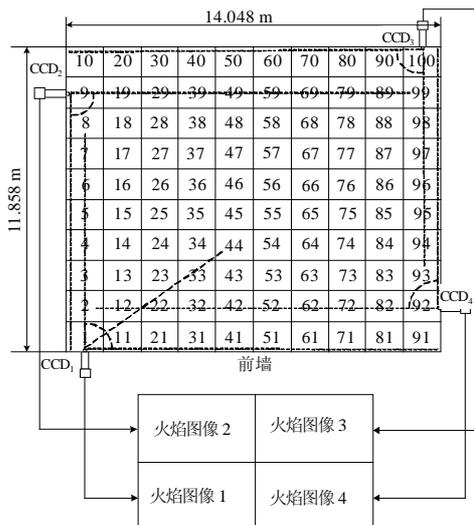


图 2 炉膛断面的网格划分及 CCD 位置  
Fig. 2 Cross section of furnace and position of CCD

2.2 系统标定及设置

由于整套成像系统(包括 CCD 摄像机和图像采集卡)要经过光电、数模转换等一系列中间过程,最后进入计算机内的火焰图像的红绿蓝三基色已经不能完全反映单色辐射能的大小。为了检测到准确的辐射强度和辐射温度,必须对系统进行标定。标定的思想是以黑体炉为标准辐射热源,对彩色火焰图

像的红、绿、蓝三色分量进行修正<sup>[15]</sup>,文献[15]给出了详细的标定方法以及标定后的修正系数。

由于锅炉炉膛中的火焰辐射强度变化范围较大,CCD 拍摄的火焰图像必须正确的反应火焰辐射的强弱变化,根据已有的研究<sup>[15]</sup>,可以通过调整 CCD 的快门速度、白平衡设置来扩大 CCD 的测量范围,实验中选用的 CCD 型号为三星 SCC-833P,快门速度设置为  $1/250$  s,白平衡设置为:红色分量增益减 78,蓝色分量增益加 78。通过这样的处理后,在现场应用的情况来看,当机组负荷为 200 MW 到 300 MW 之间时,所得到的火焰图像即不会饱和,也不会太暗(即 CCD 输出太小),这样才能实现准确的检测。

2.3 实验结果

在燃煤煤质不变的情况下,同时重建了 4 种不同的负荷工况下的断面温度场与辐射参数。每种负荷下,以 1 s 为间隔,连续拍摄 30 幅火焰图像,图 3 给出了 4 种工况下的火焰辐射图像,图 3(d)中白色虚线所标的位置即为该层温度场断面所在位置。从图中可以看出,负荷高时,火焰图像较为明亮。

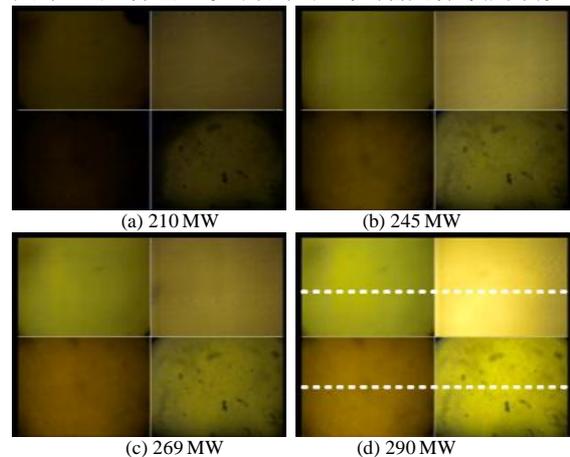


图 3 火焰辐射图像

Fig. 3 Radiation images of flame

每种工况下,火焰辐射图像变化不大,图 4、图 5 分别给出了上述 4 种负荷工况下,4 个 CCD 所接收到的边界辐射强度图像和辐射温度图像。图中,横坐标的像素数表示四幅火焰图像的中间一层像素的编号,即图 3(d)中白色虚线所标的位置,编号 1 到 90 为 CCD<sub>1</sub> 所拍摄火焰图像的中间层像素的编号,91 到 180 为 CCD<sub>2</sub>,181 到 270 为 CCD<sub>3</sub>,271 到 360 为 CCD<sub>4</sub>。因为每个 CCD 都是从炉膛的一角来拍摄火焰图像,所以 4 个 CCD 所接收的火焰辐射强度在数量上基本相当。

图 6 给出了 290 MW 负荷下,辐射参数初始值分别是  $k_a^{(0)} = k_s^{(0)} = 0.8$ ,  $k_a^{(0)} = k_s^{(0)} = 0.6$ ,  $k_a^{(0)} = k_s^{(0)} =$

0.2,  $k_a^{(0)} = k_s^{(0)} = 0.05$ , 时的迭代结果, 从图中可以看出, 对于不同的迭代初值, 辐射参数都能收敛到一个稳定的值, 说明了重建算法具有较好的收敛性。

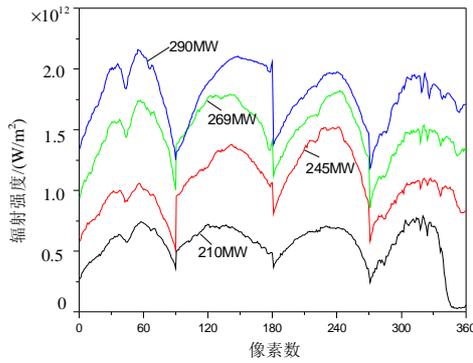


图 4 辐射强度图像  
Fig. 4 Radiation intensity images

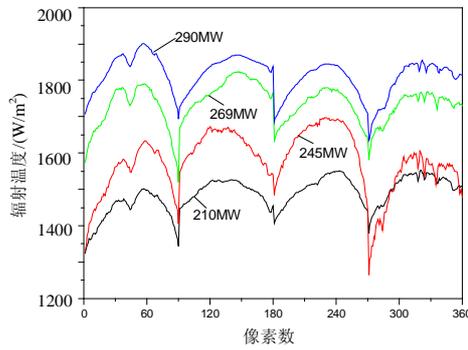
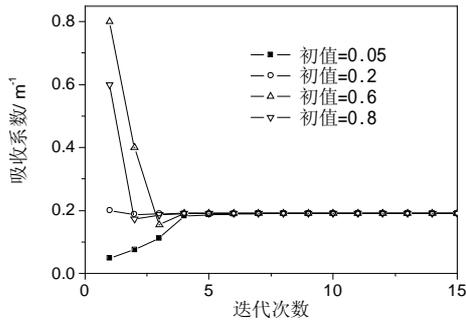
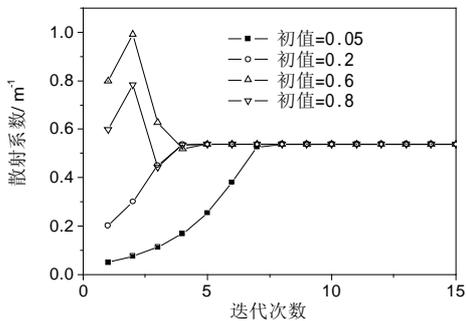


图 5 辐射温度图像  
Fig. 5 Radiation temperature images



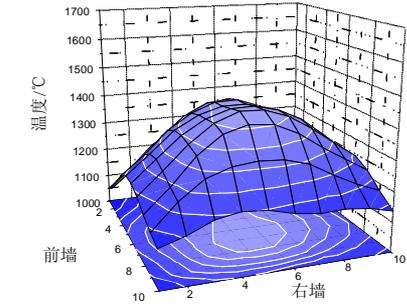
(a) 吸收系数迭代过程



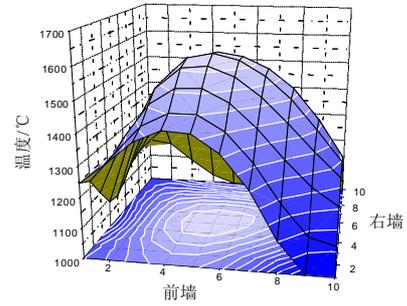
(b) 散射系数迭代过程

图 6 负荷为 290MW 时介质辐射参数的迭代过程  
Fig. 6 The iterative processes of radiation properties at load of 290MW

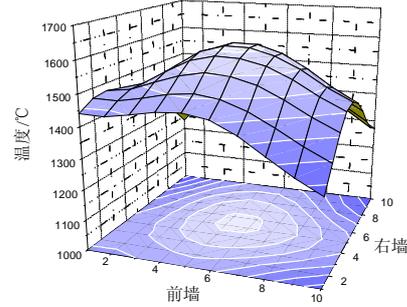
图 7 和表 1 分别给出了 4 种负荷下介质温度场与辐射参数的重建结果。重建的断面温度场为中间高, 四周低的单峰分布, 当负荷增加时, 炉内的温度也随之增加。从表 1 可以看出, 当负荷增加时, 燃烧介质的吸收系数和散射系数也在增加。煤粉燃烧产物包括水蒸气、CO<sub>2</sub> 等气态产物, 还有飞灰、碳粒、烟黑、煤粉等颗粒产物, 气体产物的辐射光谱



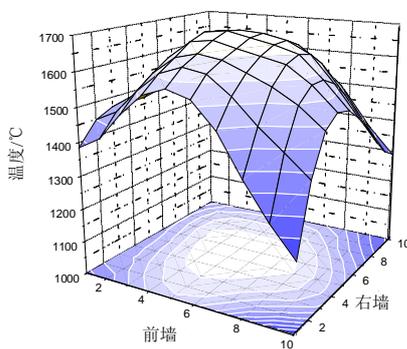
(a) 210 MW



(b) 245 MW



(c) 269 MW



(d) 290 MW

图 7 炉膛断面温度场  
Fig. 7 Temperature distribution of cross-section

表1 辐射参数重建结果  
Tab. 1 Results of radiation properties

负荷/MW	210	245	269	290
吸收系数/ $m^{-1}$	0.12	0.17	0.18	0.2
散射系数/ $m^{-1}$	0.26	0.3	0.45	0.54

主要在红外区域,颗粒物的辐射光谱主要在可见光区域,颗粒物的辐射能力远强于气体产物的辐射能力,本文采用的是基于可见光测量方法,所以得到的结果主要是颗粒物的辐射特性。当负荷增加时,需要增加加入炉的燃料量,这时,燃烧介质中颗粒物的浓度也相应增加,所以吸收系数及散射系数也相应增加。

对于辐射传递逆问题重建结果的检验,通常是将逆问题的解带入正问题中,检查正问题方程左右两边是否相等。对于本文实验结果的检验也是采用该方法,在得到断面温度场及辐射参数的重建结果后,可以根据式(2)和式(3)计算辐射温度图像及辐射强度图像,将其与直接检测到的辐射强度图像、辐射温度图像相比较。图8给出了290MW负荷工况下辐射强度图像、辐射温度图像的检测值与计算值,可以看出断面温度场及辐射参数的重建结果能够很好满足重建前的辐射温度图像和辐射强度图像,这说明了重建算法的可靠性。

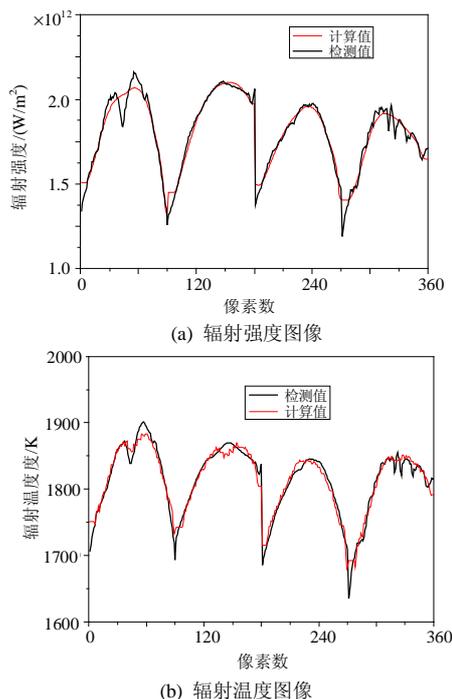


图8 辐射强度图像、辐射温度图像的检测值与计算值的比较

Fig. 8 Comparison of the measured radiation temperature and radiation intensity with those calculated

### 3 结论

从 CCD 所接收到的辐射图像中同时重建出炉膛中介质温度场与辐射参数具有非常重要的意义,不仅可以进一步提高燃烧火焰三维温度场可视化监测的精度,还可以为炉内燃烧过程的数值模拟计算提供检测所得的输入参数。本文提出了一种基于辐射逆问题求解的温度场与介质辐射参数同时重建方法,并将该方法用于电站锅炉中断面温度场与辐射参数的检测,利用 4 个 CCD 摄像机在炉膛四角采集火焰辐射图像,根据黑体炉标定及相关图像处理方法得到边界辐射温度图像和辐射强度图像,同时重建出炉膛中一个横截面的温度分布以及这个截面中燃烧介质的吸收系数和散射系数,并给出 4 种负荷工况下的重建结果。

在实际情况中,由于炉内燃烧介质分布是非均匀的,其吸收系数和散射系数也应该是非均匀分布。

### 参考文献

- [1] Zhou Huaichun, Lou Chun, Cheng Qiang, et al. Experimental investigations on visualization of three-dimensional temperature distributions in a large-scale pulverized-coal-fired boiler furnace [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(1): 1699-1706.
- [2] Zhou Huaichun, Han Shudong, Sheng Feng, et al. Visualization of three-dimensional temperature distributions in a large-scale furnace via regularized reconstruction from radiative energy images: numerical studies[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2002, 72(4): 361-383.
- [3] 娄春,周怀春,刘浩,等.一种煤粉炉内断面温度场在线监测系统[J].电站系统工程,2004,20(2):5-7.  
Lou Chun, Zhou Huaichun, Liu Hao, et al. An on-line monitoring system for cross-section temperature in pulverized coal-fired furnaces [J]. Power System Engineering, 2004, 20(2): 5-7(in Chinese).
- [4] 王飞,马增益,卫成业,等.根据火焰图像测量煤粉炉横截面温度场的研究[J].中国电机工程学报,2000,20(7):40-43.  
Wang Fei, Ma Zengyi, Wei Chengye, et al. Study on section temperature measurement of power plant boiler based on flame image [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 40-43(in Chinese).
- [5] 丁经纬,马增益,卫成业,等.炉膛火焰温度场重建非线性优化算法研究[J].中国电机工程学报,2003,23(2):136-139.  
Ding Jingwei, Ma Zengyi, Wei Chengye, et al. Research on reconstruction of temperature field in furnace and nonlinear optimization method[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 136-139(in Chinese).
- [6] 黄群星,马增益,严建华,等.应用插值滤波反投影快速重建300MW电站锅炉准三维温度场[J].中国电机工程学报,2005,25(6):134-138.  
Huang Qunxing, Ma Zengyi, Yan Jianhua, et al. 300MW boiler quasi-three-dimensional temperature field fast reconstruction based on interpolated filter back projection method[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 134-138(in Chinese).

- [7] 田丰, 孙小平, 邵富群, 等. 基于高斯函数与正则化方法的复杂温度场图像重建算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 212-215.  
Tian Feng, Sun Xiaoping, Shao Fuqun, et al. A study on complex temperature field reconstruction algorithm based on combination of Gaussian function with regularization method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 215-220(in Chinese).
- [8] 郑楚光, 柳朝晖. 弥散介质的光学特性及辐射传热[M]. 武汉, 华中理工大学出版社, 1996.
- [9] 刘林华, 余其铮, 阮立明, 等. 煤粉燃烧产物的辐射特性[J]. 动力工程, 1996, 16(6): 14-21.  
Liu Linhua, Yu Qizheng, Ruan Liming, et al. Radiation properties of combustion products of pulverized coal[J]. Power Engineering, 1996, 16(6): 14-21(in Chinese).
- [10] 张昊春, 谈和平, 甄欠. 一维辐射系统吸收系数的反问题[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(2): 293-295.  
Zhang Haochun, Tan Heping, Zhen Bing. Inverse problem of absorption coefficient in one-dimensional radiative system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(2): 293-295(in Chinese).
- [11] Zhou Huaichun, Hou Yubo, Chen Donglin, et al. An inverse radiative transfer problem of simultaneously estimating profiles of temperature and radiative parameters from boundary intensity and temperature measurements[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2002, 74(5): 605-620.
- [12] Zhou Huaichun, Han Shudong. Simultaneous reconstruction of temperature distribution, absorptivity of wall surface and absorption coefficient of medium in a 2-D furnace system [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(14): 2645-2653.
- [13] 娄春, 周怀春. 二维炉膛中介质温度场与辐射参数同时重建模拟研究[J]. 动力工程, 2005, 25(5): 623-626.  
Lou Chun, Zhou Huaichun. Simultaneous reconstruction of temperature distribution and radiation properties of medium in a 2-D furnace system[J]. Power Engineering, 2005, 25(5): 623-626(in Chinese).
- [14] 娄春, 韩曙东, 刘浩, 等. 一种煤粉燃烧火焰辐射成像新模型[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(增刊): 93-96.  
Lou Chun, Han Shudong, Liu Hao, et al. A new model of radiative image formation for flames of pulverized-coal combustion[J]. Journal of engineering thermophysics, 2002, 23(Sup): 93-96(in Chinese).
- [15] 姜志伟, 周怀春, 娄春, 等. 基于图像处理的火焰温度及辐射率图像检测方法[J]. 华中科技大学学报, 2004, 32(6): 32-34.  
Jiang Zhiwei, Zhou Huaichun, Lou Chun, et al. Method of detecting flame temperature and emissivity based on color image processing [J]. J. of Huazhong Univ. of Sci. & Tech, 2004, 32(6): 32-34(in Chinese).

收稿日期: 2006-02-23。

作者简介:

娄春(1977—), 男, 重庆人, 博士研究生, 讲师, 研究方向为燃烧检测与分析, [lou\\_chun@sina.com](mailto:lou_chun@sina.com);

周怀春(1965—), 男, 湖北仙桃人, 教授, 博士生导师, 研究方向为辐射传递过程分析、燃烧监测与控制。

(编辑 贾瑞君)