

# 基于 CCD 的高炉风口回旋区三维温度场的检测技术

王洪桥<sup>1)</sup>, 程树森<sup>2)</sup>, 赵立英<sup>1)</sup>✉, 张英伟<sup>2)</sup>

1) 北京科技大学数理学院, 北京 100083 2) 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083  
✉ 通信作者, E-mail: liyingzhao@ustb.edu.cn

**摘要** 在存在多介质的高炉回旋区内, 首先利用安装在风口直吹管窥视孔的电荷耦合器件( charged couple device, CCD) 摄像机可以获得高炉回旋区内累积的二维温度辐射图像, 然后将高炉回旋区均分成若干小块, 利用数学模型近似模拟回旋区内的辐射传热过程并建立矩阵方程, 通过求解方程获得高炉回旋区内的三维温度场. 在模拟辐射传热过程中, 本文提出了一种更有效也更符合实际生产的新方法——基于距离的高斯函数模型来模拟高炉内介质的辐射能量传播过程并获得了较好的三维温度场. 由于存在波动误差以及电荷耦合器件摄像机测量误差等, 所以我们通过在测量数据中添加随机误差来验证重构温度场的有效性以及稳定性. 结果显示重构的三维温度场与真实温度场非常接近, 误差在高炉工业允许的 5% 范围以内.

**关键词** 高炉; 三维; 温度分布; 检测技术; 电荷耦合器件摄像机

**分类号** TF573+.7

## A technique for measuring the three-dimensional temperature field of a blast furnace tuyere raceway based on CCD

WANG Hong-qiao<sup>1)</sup>, CHENG Shu-sen<sup>2)</sup>, ZHAO Li-ying<sup>1)</sup>✉, ZHANG Ying-wei<sup>2)</sup>

1) School of Mathematics and Physics, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China  
2) School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China  
✉ Corresponding author, E-mail: liyingzhao@ustb.edu.cn

**ABSTRACT** In a blast furnace raceway with many mediums, two-dimensional temperature radiant images are obtained with a CCD camera installed in the blowpipe peephole. After the blast furnace raceway is divided into many small pieces, the radiation heat transfer process in the blast furnace raceway is simulated and a matrix equation is established by using a mathematical model. Then the three-dimensional temperature field of the blast furnace raceway is derived from solving the equation. In simulating the radiation heat transfer process, a new method, which is more effective and accordant with actual production, is introduced that a distance-based Gaussian function model is used to simulate radiation energy propagation in the blast furnace raceway, and thus a better three-dimensional temperature field is got by this method. Due to the existence of fluctuation error, CCD camera measurement error and so on, random error is added in the measurement data to demonstrate the effectiveness and stability of the reconstructed temperature field. The results show that the three-dimensional temperature field is very close to the actual temperature field, and the error is within 5% that is allowed in the blast furnace industry.

**KEY WORDS** blast furnaces; three-dimensional; temperature distribution; measurement techniques; CCD cameras

高炉炼铁生产过程中, 通过风力将煤粉输送到风口燃烧, 由于高速度的热风鼓入使得焦炭煤粉颗粒在高炉内做回旋运动, 由此而形成回旋区. 风口回旋区

的温度大小是高炉生产过程中的关键因素, 它对炉缸内渣铁的形成以及生铁的质量具有重要的影响作用, 因此对高炉风口回旋区温度进行监控检测是高炉冶炼

过程顺利进行的保障. 高炉风口回旋区中是一个非常复杂的高温燃烧过程, 在高炉煤粉喷吹和高速鼓风生产条件下, 风口方向焦炭颗粒一方面在高温气流的带动下作回旋运动, 另一方面焦炭燃烧并不断和气流进行质量和热量交换. 文献 [1] 通过建立回旋区内非等温流动的方程组来模拟高炉内热量交换从而获得颗粒质量变化和温度变化. 但是这种方法边界条件难以确定, 方程也很复杂, 计算上难度较大. 另一种方法是采用热电偶通过接触式测温来获得风口回旋区内某一点温度. 这种方法测得的温度精确度高, 但是插入的水冷枪可能会对温度分布造成一定的影响, 而且测得的只是某一点的温度, 不能得到高炉内较为全面的温度场 [2].

近几年来, 随着光电技术、计算机以及图像处理技术的发展, 基于电荷耦合器件 (CCD) 的非接触式火焰燃烧监测和分析系统成为国内外燃烧诊断的一个新的研究方向. Yang 等 [3]、Luo 等 [4]、王飞等 [5] 利用电荷耦合器件摄像机拍摄的辐射图像对电站锅炉的温度场问题进行了重建研究. 在对高炉回旋区温度场研究中, 文献 [6] 中用常用的双色测温法得到了高炉诊断面的二维温度场; 但是由于高炉内含有吸收、发射和各向异性的散射介质, 如焦炭颗粒和煤粉, 通过安装在风口直吹管窥视孔的电荷耦合器件摄像机所拍摄得到二维辐射图像其实是炉内整个三维空间温度场的累积. 所以对于高炉内三维温度场的重建是一门非常关键且有意义的工作. 文献 [7-10] 采用了蒙特卡洛方法对高炉内辐射传热进行模拟, 获得了比较理想的三维温度场.

本文考虑到辐射传热与距离具有一定的关系, 提出了一种基于距离的高斯函数来模拟高炉内存在大量介质的辐射传热过程, 从而获得了比较稳定的三维温度场, 并通过误差分析检验温度场的有效性, 与蒙特卡洛方法相比精度度更高.

## 1 重建温度场

### 1.1 分析建立模型

为了计算方便, 我们将高炉回旋区假设成一个宽度为  $W$ , 高度为风口直径  $H$ , 深度为  $L$  的立方体, 如图 1 所示. 在高炉运行过程中, 我们通过电荷耦合器件摄像机拍摄的火焰图像是根据调节摄像机参数所获得某一个假设的虚假面的发光火焰辐射图像, 然后通过图像采集卡输入到计算机内得到高炉内火焰的数字图像.

假设我们通过电荷耦合器件摄像机拍摄的二维火焰数字图像像素为  $a \times b$ , 对应回旋区的宽度  $W$ , 风口直径  $H$  则有

$$\frac{W}{a} = \frac{H}{b}. \quad (1)$$

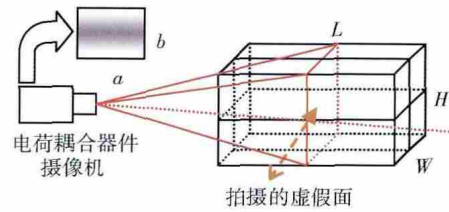


图 1 高炉回旋区简化图

Fig. 1 Simplified diagram of a blast furnace raceway

将高炉回旋区可分为  $a \times b \times c$  个像素, 则有

$$\frac{W}{a} = \frac{H}{b} = \frac{L}{c}. \quad (2)$$

为减少计算的复杂度而又不影响整体温度的测量, 将长、宽、高各 10 个像素长度作为一个体积单元对高炉回旋区进行分块, 其中每个体积单元块被看作是温度相同的, 介质吸收系数以及颗粒密度分布均匀的区域.

不少学者针对高炉回旋区内介质的运动状态建立了相应的回旋区宽度和风口直径以及回旋区深度之间的数学关系模型 [11-13], 借此我们仿真一个回旋区大小为  $2.0 \text{ m} \times 2.5 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$  的高炉, 通过电荷耦合器件摄像机最终获得一个  $200 \times 250$  像素的回旋区目标平面图像. 根据式 (2) 以及假设条件可将回旋区分成  $20 \times 25 \times 30$  个体积单元块. 我们令  $N$  是高炉内总的体积单元总数目, 则  $N = 20 \times 25 \times 30 = 15000$ ; 令电荷耦合器件摄像机目标平面被分成  $M$  个像素, 则  $M = 200 \times 250 = 50000$ . 由于回旋区内存在多组分、不均匀、能够产生发射、吸收和散射以及各向异性的气体-颗粒多相物质, 所以高炉内所有体积单元都有可能对摄像机目标平面的辐射能产生影响, 所以我们建立如下等式:

$$f_j \left( \sum_i E_{i \rightarrow j} \right) = G_j. \quad (3)$$

式中,  $E_{i \rightarrow j}$  代表高炉空间内第  $i$  个体积单元传到电荷耦合器件摄像机辐射图像中第  $j$  个像素的辐射能,  $G_j$  是电荷耦合器件摄像机辐射图像的第  $j$  个像素的灰度值,  $f_j$  代表  $\sum_i E_{i \rightarrow j}$  到  $G_j$  的关系映射,  $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $j = 1, 2, \dots, M$ .

令高炉空间内第  $i$  个体积单元温度为  $T_i$ , 发出的辐射能为  $E_i$ , 则  $E_i$  与温度  $T_i$  的关系通过下式 [8] 得到:

$$E_i = 4\Delta V_i \cdot (\alpha_{g,i} + \alpha_{p,i}) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} c_i \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T_i}\right) d\lambda \quad (4)$$

式中:  $\Delta V_i$  是高炉空间内第  $i$  个体积单元的体积;  $\alpha_{g,i}$  和  $\alpha_{p,i}$  分别是高炉空间内第  $i$  个体积单元气体吸收系数和颗粒吸收系数, 由于气体辐射吸收对波长具有明显的选择性, 故在电荷耦合器件摄像机可见光响应范围内可以忽略  $\text{CO}_2$  等气体对辐射能的吸收, 即  $\alpha_{g,i} = 0$ , 而对于单元内的煤粉焦炭大颗粒, 将其看作灰体, 其辐射

特性与波长无关, 即  $\alpha_{p_i}$  是一个常数, 本文取为  $0.20 \text{ m}^{-3}$ ;  $\lambda$  表示波长,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  是电荷耦合器件摄像机的光谱响应范围, 一般为可见光区域, 即  $380 \sim 760 \text{ nm}$ ;  $c_1 = 3.742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2}$ , 称为普朗克第一常数;  $c_2 = 1.4388 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ , 称为普朗克第二常数。

假设高炉空间内第  $i$  个体积单元到达电荷耦合器件摄像机辐射图像的第  $j$  个像素的辐射能占第  $i$  个体积单元发出的总辐射的比例为  $D_{i \rightarrow j}$ , 那么高炉空间内第  $i$  个体积单元传到电荷耦合器件摄像机辐射图像的第  $j$  个像素的辐射能为

$$E_{i \rightarrow j} = E_i \cdot D_{i \rightarrow j} \quad (5)$$

联立式(4)和式(5)可以得到

$$E_{i \rightarrow j} = 4\Delta V_i \cdot D_{i \rightarrow j} \cdot (\alpha_{g_i} + \alpha_{p_i}) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} c_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T_i}\right) d\lambda \quad (6)$$

文献[14]中出辐射能大小与辐射图像亮度是呈正比例关系, 如式(7)表达式, 其中系数  $K$  由黑体炉实验标定确定, 通过四次实验标定系数, 求算术平均值得到系数  $K = 33.4$ .

$$G_j = K \cdot \sum_i E_{i \rightarrow j} \quad (7)$$

令

$$Y_i = 4\Delta V_i \cdot (\alpha_{g_i} + \alpha_{p_i}) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} c_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T_i}\right) d\lambda \quad (8)$$

显然  $Y_i$  只与  $T_i$  有关, 则

$$G_j = K \cdot \sum_i (D_{i \rightarrow j} \cdot Y_i) \quad (9)$$

将式(9)写成矩阵形式:

$$\mathbf{G} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{D} \mathbf{Y} \quad \mathbf{D} \in \mathbf{R}^{M \times N} \quad \mathbf{Y} \in \mathbf{R}^N \quad \mathbf{G} \in \mathbf{R}^M \quad (10)$$

其中:  $\mathbf{D}$  是份额矩阵, 其元素  $D_{i \rightarrow j}$  将在下部分详细给出; 矩阵  $\mathbf{Y}$  的元素  $Y_i$  表达式, 参见式(8); 矩阵  $\mathbf{G}$  是辐射图像灰度值排列的矩阵。

### 1.2 建立矩阵 $\mathbf{D}$ 的数学模型

为方便计算, 我们建立如图 2 的  $o-xyz$  坐标系, 以一个像素为一个单位长度。由前面可以知道, 回旋区被分成  $N = 20 \times 25 \times 30$  个单元块, 而电荷耦合器件摄像机目标平面被分成  $M = 200 \times 250$  个像素, 下面先求高炉回旋区内第  $i$  个体积单元在  $o-xyz$  空间坐标系下对应的三维坐标。不妨假设回旋区空间  $1, 2, \dots, N$  个单元是按照

$$\begin{aligned} & (1, 1, 1), (2, 1, 1), (3, 1, 1), \dots, \\ & (20, 1, 1), (1, 2, 1), (2, 2, 1), (3, 2, 1), \dots, \\ & (20, 2, 1), \dots, (20, 25, 1), \dots, (20, 25, 30) \end{aligned}$$

的序列排列, 即依次以  $x, y, z$  的优先顺序排列。令第  $i$  个体积单元在  $o-xyz$  空间坐标系下对应的三维坐标为  $S_i = (a_i, b_i, c_i)$ , 因为每个单元块的边长为 10 个像

素, 所以有

$$\begin{cases} c_i = 10 \times \left[ \text{int} \left( \frac{i-1}{20 \times 25} \right) + 1 \right], \\ k_i = \text{mod} \left( \frac{i-1}{20 \times 25} \right) + 1, \\ b_i = 10 \times \left[ \text{int} \left( \frac{k_i-1}{20} \right) + 1 \right], \\ a_i = 10 \times \left[ \text{mod} \left( \frac{k_i-1}{20} \right) + 1 \right]. \end{cases} \quad (11)$$

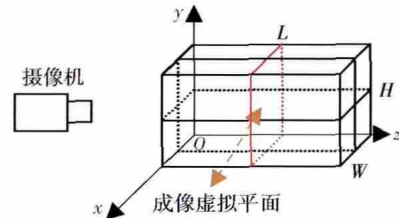


图 2 高炉风口回旋区基于  $o-xyz$  坐标系模拟图

Fig. 2 Simulation diagram of the blast furnace tuyere raceway based on the  $o-xyz$  coordinate system

同样对于电荷耦合器件摄像机目标平面第  $j$  个像素在  $o-xyz$  空间坐标系下对应的三维坐标为  $R_j = (u_j, v_j, w_j)$ , 则有

$$\begin{cases} w_j = \gamma_0 \times 300, \\ v_j = \text{int} \left( \frac{j-1}{200} \right) + 1, \\ u_j = \text{mod} \left( \frac{j-1}{200} \right) + 1. \end{cases} \quad (12)$$

其中  $\gamma_0$  是电荷耦合器件摄像机目标平面  $z$  轴坐标系数, 本文取为 0.5, 即假设虚拟平面在高炉正中间;  $\text{int}$  是取整函数;  $\text{mod}$  是取余函数。

由此可以得到高炉回旋区内第  $i$  个体积单元传到电荷耦合器件摄像机目标平面第  $j$  个像素的空间像素距离:

$$p_{i \rightarrow j} = \| S_i - R_j \|. \quad (13)$$

将式(13)转化为空间实际距离为

$$d_{i \rightarrow j} = p_{i \rightarrow j} \cdot \frac{W}{a}. \quad (14)$$

定义份额  $D_{i \rightarrow j}$  是关于距离  $d_{i \rightarrow j}$  的函数:  $D_{i \rightarrow j} = f(d_{i \rightarrow j})$ 。由于在实际高炉冶炼中随着回旋区体积单元与电荷耦合器件摄像机目标平面像素的距离增加, 接受到的能量会逐渐减少, 所以利用基于距离的高斯函数模拟份额矩阵  $\mathbf{D}$ 。如图 3(a) 所示, 高斯函数很好地模拟了辐射能量与距离的函数关系, 所以份额与距离的关系也同样采用高斯函数模拟。为方便计算, 不妨定义如下的高斯函数:

$$D_{i \rightarrow j} = \begin{cases} e^{-\frac{d_{i \rightarrow j}^2}{\delta^2}}, & 0 \leq d_{i \rightarrow j} \leq 1; \\ 0, & d_{i \rightarrow j} > 1. \end{cases} \quad (15)$$

本文取  $\delta^2 = 1.5$ , 则有如图 3 (b) 所示的份额分布, 这样

便获得了比较稀疏的份额矩阵  $D$ .

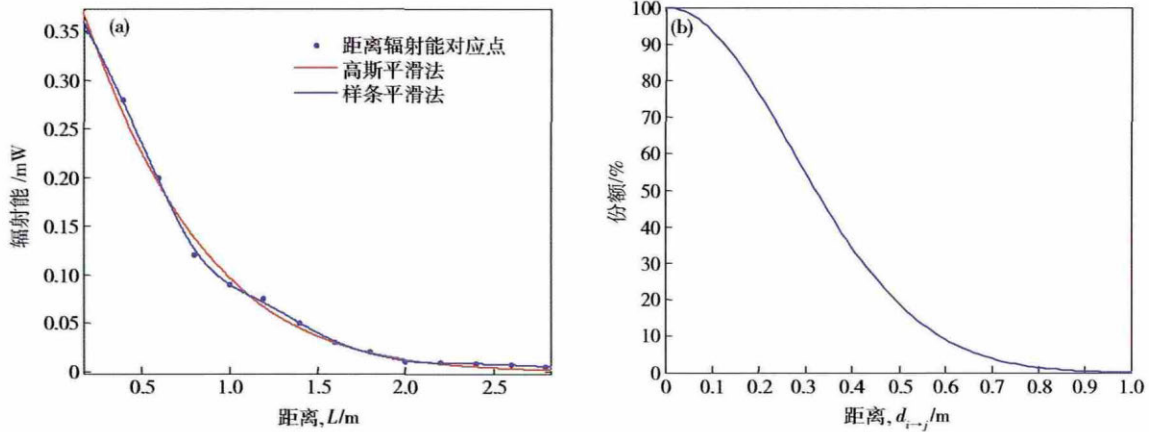


图 3 基于距离的高斯函数模拟。(a) 距离与辐射能量的关系; (b) 份额与距离关系

Fig. 3 Distance-based Gaussian function simulation: (a) radiation energy in relation to distance; (b) share in relation to distance

### 1.3 求解向量 $Y$

求解向量  $Y$  是一个关于矩阵方程求逆问题, 在第一步中根据高斯距离函数模型获得了份额矩阵  $D$ , 所以当我们通过电荷耦合器件摄像机得到的辐射图像获得灰度值矩阵  $G$  后, 便可以通过式 (10) 矩阵求逆问题得到向量  $Y$ . 由于矩阵  $D$  并不是一个方阵, 所以这是一个病态方程求解问题, 对此引入正交分解最小二乘法 (LSQR) 是一个有效的解决办法. LSQR 算法是由 Paige 和 Saunders<sup>[15-16]</sup> 于 1982 年提出, 它是基于 Lanczos 迭代方法的一种算法. 对于病态问题, LSQR 算法具有较好的数值稳定性和抗测量误差能力强的优点, 适合高炉燃烧温度场特别是高温区的重建, 且计算效率高, 重建时间短, 显示了其在温度场重建方面的优点. 文献 [17] 详细介绍了利用 LSQR 算法及阻尼 LSQR 算法对三维炉膛温度场重建过程中出现的大型病态矩阵方程求解过程, 具体步骤此处不再赘述.

### 1.4 求解温度场 $T$

根据式 (8), 选取光谱波长响应范围为 380 ~ 760 nm, 可以得到  $Y_i$  和温度的曲线关系图如图 4 所示.

由于当温度  $T_i$  处于低温段时对应的  $Y_i$  数量级变化较大, 而当温度  $T_i$  处于高温段时  $Y_i$  数量级数变化越少, 所以为了较为清楚地看到  $Y_i$  与温度  $T_i$  的对应关系, 列出每隔 100 K 所对应的  $Y_i$  值的关系如表 1 所示. 所以当求得  $Y_i$ , 相对应的温度  $T_i$  就能得到, 这样对于高炉回旋区空间内每一个体积单元的温度便求解出来, 整个空间三维温度场  $T$  便由此而得到. 我们通过以上的方法利用计算流体动力学仿真实验计算出一个精确的喷煤高炉温度场, 得到温度场如图 5 所示.

由求解的温度场可以看出越靠近回旋区中心位置的温度越高. 这是因为一方面在回旋区外表面喷煤技术使得大量的煤粉不能与氧气充分反应, 放热少; 另一方面喷入的煤粉先进行煤粉热分解, 需要耗用更多的

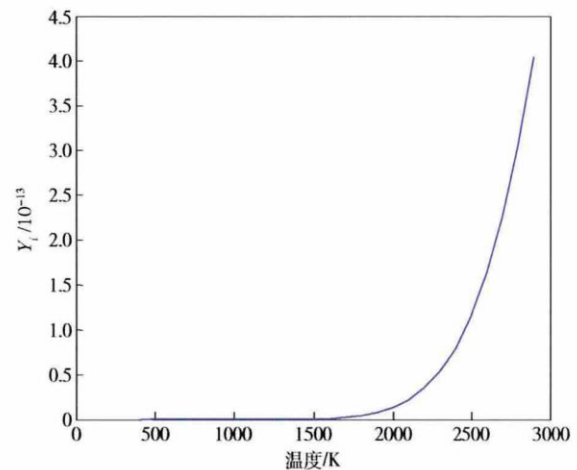


图 4  $Y_i$  与温度的函数关系

Fig. 4 A function between temperature and  $Y_i$

表 1 表达式  $Y_i$  和温度  $T_i$  的数值关系

Table 1 Numerical relationship between  $Y_i$  and temperature  $T_i$

温度 $T_i$ /K	$Y_i$	温度 $T_i$ /K	$Y_i$
400	$7.698 \times 10^{-32}$	1500	$3.556 \times 10^{-16}$
500	$1.588 \times 10^{-27}$	1600	$8.650 \times 10^{-16}$
600	$7.747 \times 10^{-25}$	1700	$1.428 \times 10^{-15}$
700	$8.595 \times 10^{-23}$	1800	$3.835 \times 10^{-15}$
800	$2.536 \times 10^{-21}$	1900	$7.507 \times 10^{-15}$
900	$4.241 \times 10^{-20}$	2000	$1.773 \times 10^{-14}$
1000	$4.874 \times 10^{-19}$	2100	$2.403 \times 10^{-14}$
1100	$2.178 \times 10^{-18}$	2200	$3.343 \times 10^{-14}$
1200	$1.183 \times 10^{-17}$	2300	$5.062 \times 10^{-14}$
1300	$4.162 \times 10^{-17}$	2400	$7.306 \times 10^{-14}$
1400	$1.994 \times 10^{-16}$	2500	$1.510 \times 10^{-13}$

热量. 在回旋区的中心区域的煤粉经过热分解后与氧气接触面增大, 反应更强烈, 放出的热量也变大, 温度

也就越高,可见得到的温度场与实际生产是符合的.一般认为,高炉理论燃烧温度应控制在 2100 ~ 2400 K,温度过高会给高炉顺行带来不利影响,温度太低又不能使得高炉内煤粉充分燃烧放热且污染环境.从图 5

中可以看出本模型高炉内中心温度基本处于 1800 ~ 2400 K,高于 2400 K 的部分很少.通过编写程序统计计算,15000 个点中高于 2400 K 的点有 126 个点,占总体比例仅为 0.84%,这在实际生产中是可行的.

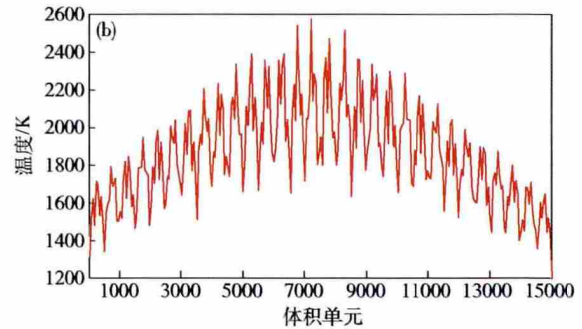
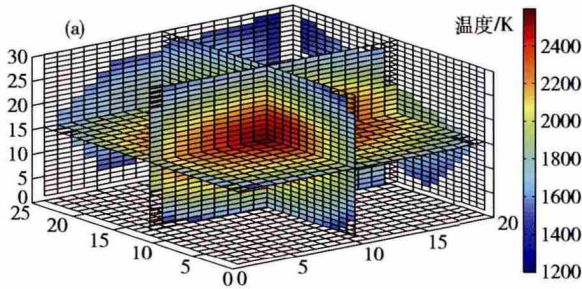


图 5 真实的高炉温度场。(a) 高炉三维温度场; (b) 高炉体积单元温度变化曲线

Fig. 5 Real blast furnace temperature field: (a) three-dimensional temperature field of the blast furnace; (b) temperature change curve of the blast furnace volume unit

## 2 结果误差分析

由于电荷耦合器件摄像机光谱响应不一致性、积分时间不确定性等问题,所以得到的图像灰度矩阵  $G$  存在一定的偏差;另外,由于测量不精确,辐射的波动特性,计算不严密等也会造成份额矩阵  $D$  存在误差.为研究温度场重建算法的误差敏感性,分别对矩阵图像灰度矩阵  $G$  和份额矩阵  $D$  分别添加一定的正态分布随机波动误差,如下所示:

$$G_{err\ j} = (1 + \varphi_j) \cdot G_j, \quad (16)$$

$$D_{err\ i-j} = (1 + \phi_{i-j}) \cdot D_{i-j}. \quad (17)$$

式中  $G_{err\ j}$  是带有误差的能量矩阵  $G_{err}$  中的元素,  $D_{err\ i-j}$  是带有误差的份额矩阵  $D_{err}$  的元素,  $G_j$  是准确的能量矩阵  $G$  中的元素,  $D_{i-j}$  是精确的份额矩阵  $D$  中的元素.  $\phi_j$  和  $\varphi_{i-j}$  是期望为 0,方差为 0.05,服从正态分布的随机变量.

定义温度场的整体的重建误差以及每个单元体积的温度的相对误差如下:

$$E_{recon} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i^{recon} - T_i^{exact})^2} / \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i^{exact} \right) \times 100\%, \quad (18)$$

$$E_{rel\ j} = \frac{|T_i^{recon} - T_i^{exact}|}{T_i^{exact}} \times 100\%. \quad (19)$$

式中  $T_i^{recon}$  和  $T_i^{exact}$  分别代表重建温度和真实温度.

接下来,我们分以下三种情形进行误差分析:第一种情形如图 6 表示的图像灰度矩阵  $G$  含有误差,而份额矩阵  $D$  不含误差;第二种情形如图 7 表示的份额矩阵  $D$  含有误差,而图像灰度矩阵  $G$  不含误差;第三种情形如图 8 表示的图像灰度矩阵  $G$  和份额矩阵  $D$  均含有误差.

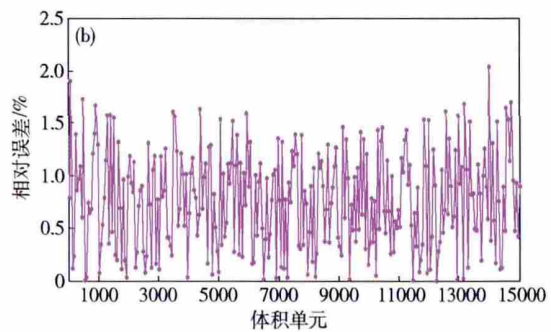
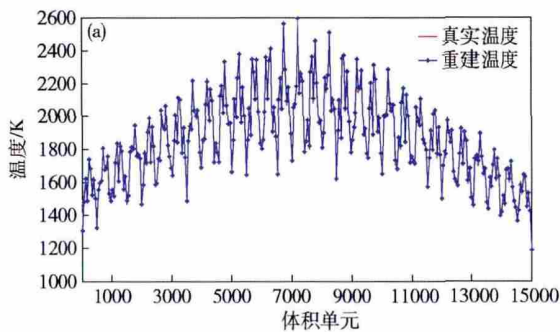


图 6 仅有图像灰度矩阵  $G$  含误差。(a) 重建温度场; (b) 每个体积单元重建温度的相对误差

Fig. 6 Error only in the gray matrix  $G$ : (a) reconstructed temperature field; (b) relative error of reconstructed temperature for each volume element

通过式(18)和式(19)计算得出:在第一种情形下只有灰度矩阵含有误差时,平均重建误差 0.81%,单元体积中最大误差 1.93%;在第二种情形下只有份额矩阵存在误差时,通过计算得到平均重建误差

1.29%,单元体积中最大误差 5.33%;在第三种情形中灰度矩阵和份额矩阵都存在误差时,通过计算得到平均重建误差 1.56%,单元体积中最大误差 5.94%.可以看出,当只有图像灰度矩阵  $G$  含有误差时引起的

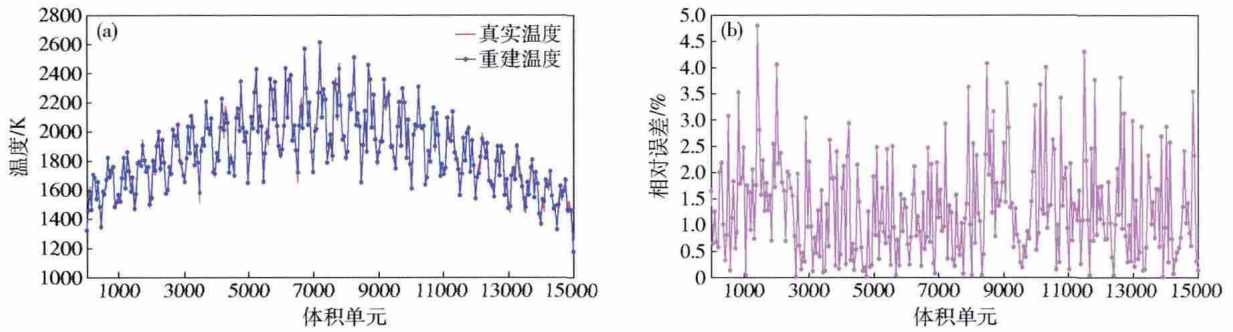


图 7 仅有份额矩阵  $D$  含误差. (a) 重建温度场; (b) 每个体积单元重建温度的相对误差

Fig. 7 Error only in share matrix  $D$ : (a) reconstructed temperature field; (b) relative error of reconstructed temperature for each volume element

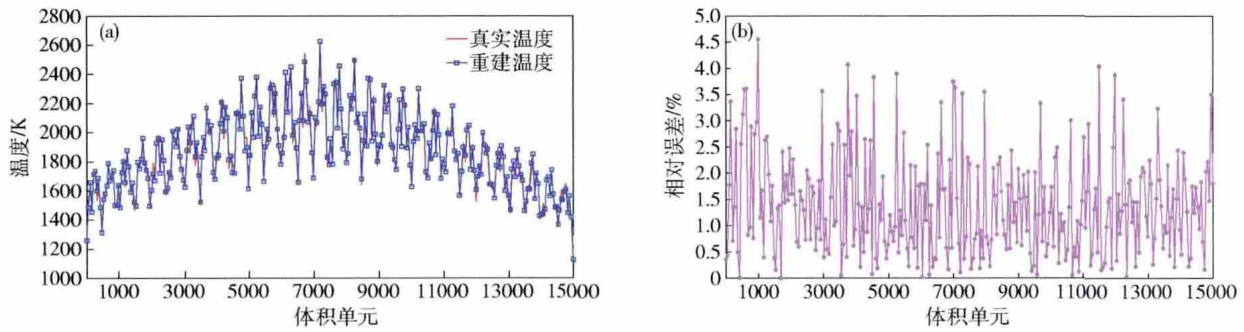


图 8 图像灰度矩阵  $G$  和份额矩阵  $D$  均含误差. (a) 重建温度场; (b) 每个体积单元重建温度的相对误差

Fig. 8 Error existing in both the gray matrix and share matrix: (a) reconstructed temperature field; (b) relative error of reconstructed temperature for each volume element

重建温度场误差最小,当只有份额矩阵  $D$  含有误差时引起的重建温度场误差稍大一些;当两者均含有误差时引起的重建温度场误差最大.这是因为所求温度场需要通过阻尼 LSQR 方法对份额矩阵  $D$  求逆,而矩阵  $D$  并不是一个方阵,所以只能求取广义逆,对结果造成的误差也就稍大些.

图 9 是不同方差下,本文提出的高斯距离方法误差与文献 [9] 的蒙特卡洛方法重建误差的对比.从图 9 可以看出在重构温度场精度方面,本文重构的三维温度场优于文献 [9] 的重构温度场.

### 3 结论

(1) 针对高炉回旋区内含有不均匀性、吸收、发射和各向异性的散射介质,在模拟辐射传热过程中,本文提出了一种更有效也更符合实际生产的新方法——基于距离的高斯函数模型来模拟高炉内介质的辐射能量传播过程并获得了较好的三维温度场.

(2) 在求解矩阵方程过程中考虑到测量误差以及系数波动误差的存在,分析了各自以及综合对温度场测量的影响关系.结果显示这种方法具有较好的鲁棒稳定性,得到了较为精确的三维温度场,符合工业需求.

(3) 针对重建高炉三维温度场内误差的来源分三种不同的情况进行了讨论,分析了灰度矩阵和份额矩

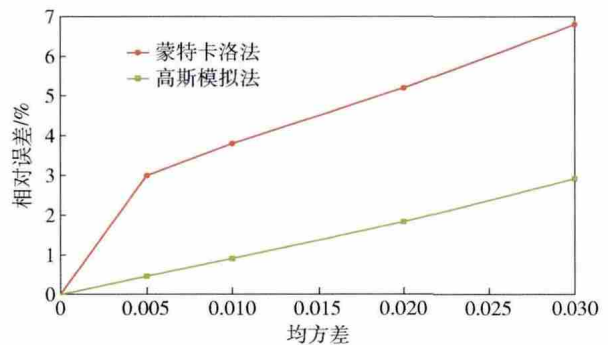


图 9 本文高斯方法与文献 [9] 蒙特卡洛方法在不同方差下重构误差对比

Fig. 9 Reconstruction error comparison of the Gaussian method in this paper and the Monte Carlo method in Ref. [9] at different variances

阵的变化对重构温度场的影响.灰度矩阵误差对重构三维温度场影响最小,份额矩阵误差影响稍大些,当两种误差均存在时获得温度场的误差也变大.在与蒙特卡洛方法比较时,本文的重构温度场具有更小的误差.

### 参 考 文 献

[1] Zhang L L, Zhou S J, Chen J H. Numerical simulations of three-dimensional gas-particle turbulent flow and pulverized coal combustion in blast furnace. *J Nanjing Univ Sci Technol*, 2007, 31

- (2): 163  
(张丽丽,周慎杰,陈举华. 高炉三维气固湍流和煤粉燃烧过程数值模拟. 南京理工大学学报, 2007, 31(2): 163)
- [2] Yu K, Duan P N, Zhang S Q. New exploration of temperature monitoring and forecast in a blast furnace. *J Northeast Univ Nat Sci*, 1997, 18(3): 247  
(余琨,段培宁,张绍启. 高炉炉温监测与预报的新探索. 东北大学学报: 自然科学版, 1997, 18(3): 247)
- [3] Yang C, Zhou H C, Huang Z F. Visualization of 3-D temperature distribution in a 300 MW twin-furnace coal-fired boiler. *J China Univ Min Technol*, 2008, 18(1): 33
- [4] Luo Z X, Zhou H C. A combustion-monitoring system with 3-D temperature reconstruction based on flame-image processing technique. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2007, 56(5): 1877
- [5] Wang F, Ma Z Y, Yan J H, et al. Model and experiment for three-dimensional temperature measurement based on flame image. *J Combust Sci Technol*, 2004, 10(2): 140  
(王飞,马增益,严建华,等. 利用火焰图像重建三维温度场的模型和实验. 燃烧科学与技术, 2004, 10(2): 140)
- [6] Zhang S F, Wen L Y, Bai C G, et al. The temperature field digitization of radiation images in blast furnace raceway. *ISIJ Int*, 2006, 46(10): 1410
- [7] Liu D, Yan J H, Wang F, et al. Experimental reconstructions of flame temperature distributions in laboratory-scale and large-scale pulverized-coal fired furnaces by inverse radiation analysis. *Fuel*, 2012, 93: 397
- [8] Liu D, Wang F, Yan J H, et al. Inverse radiation problem of temperature field in three-dimensional rectangular enclosure containing inhomogeneous anisotropically scattering media. *Int J Heat Mass Transfer*, 2008, 51(13): 3434
- [9] Wang F, Liu D, Chen K F, et al. Efficient inverse radiation analysis of temperature distribution in participating medium based on backward Monte Carlo method. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2008, 109(12): 2171
- [10] Ouyang Q, Zhao L M, Wen L Y, et al. Simulation study on radiative imaging of pulverised coal combustion in blast furnace raceway. *Ironmaking Steelmaking*, 2011, 38(3): 181
- [11] Helle M, Saxen H. Simulation of tuyere-raceway system in blast furnace. *Ironmaking Steelmaking*, 2006, 33(5): 407
- [12] Gupta G S, Rudolph V. Comparison of blast furnace raceway size with theory. *ISIJ Int*, 2006, 46(2): 195
- [13] Yuu S, Umekage T, Kadowaki M. Numerical simulation of particle and air velocity fields in raceway in model blast furnace and comparison with experimental data (cold model). *ISIJ Int*, 2010, 50(8): 1107
- [14] Ouyang Q, Wen L Y, Bai C G, et al. Raceway section temperature measurement algorithm based on machine vision. *J Iron Steel Res*, 2007, 19(2): 5
- [15] Paige C C, Saunders M A. LSQR: an algorithm for sparse linear equations and sparse least squares. *AMC Trans Math*, 1982, 8(1): 43
- [16] Paige C C, Saunders M A. LSQR: sparse linear equations and least squares problems. *AMC Trans Math*, 1982, 8(2): 195
- [17] Liu D, Wang F, Huang Q X, et al. Study on solving ill-posed matrix equation in reconstruction of three-dimensional temperature distribution in furnace. *Proc CSEE*, 2007, 27(26): 72  
(刘冬,王飞,黄群星,等. 三维炉膛温度场重建中病态矩阵方程的求解研究. 中国电机工程学报, 2007, 27(26): 72)