

文章编号:1000-582X(2009)04-387-05

# CCD 辐射图像三维温度场可视化重构

张兴兰<sup>1</sup>, 欧阳奇<sup>2</sup>, 黄继平<sup>1</sup>

(1. 重庆理工大学 计算机科学与工程学院, 重庆 400050; 2. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400030)

**摘要:**针对燃烧室回流区三维辐射空间在 CCD(Charge coupled device)靶面的辐射图像分析局限于二维温度场计算,以及在三维温度场重构过程中摄像机安装台数受限问题,提出了二维矩形线性插值虚拟 CCD 探测器安装算法,解决了现场安装 CCD 探测器个数的受限和滤波后投影算法因投影数少导致的三维重构误差问题。通过对已知的 CCD 探测器和虚拟 CCD 探测器采集二维图像获取的投影数据进行滤波反投影得到燃烧室回流区深度方向辐射强度场分布,在此基础上,采用实验校正的双波长比色测温公式得到温度场分布,实现了燃烧室回旋区深度温度场分布的在线监控。实验室小型煤气实验表明,该算法是可行的,达到了燃烧室回流区工况在线监测的要求,为进一步研究燃烧室燃烧效率和稳定性奠定了基础。

**关键词:**三维重构;风口回旋区;图像处理;虚拟 CCD

中图分类号:TF538.6

文献标志码:A

## Three-dimensional temperature field visualization reconstruction of charge coupled device radiation image

ZHANG Xing-lan<sup>1</sup>, OU-YANG Qi<sup>2</sup>, HUANG Ji-ping<sup>1</sup>

(1. College of Computer Science & Engineering, Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400050, P. R. China;  
2. College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** Aiming at the questions of raceway section two-dimension temperature distribution from two-dimensional image accumulated by three-dimensional radiation space and three-dimensional temperature reconstruction error caused by limited charge coupled device (CCD) sensors for a sudden spread combustion chamber, the two-dimension rectangle interpolation virtual CCD sensor installation algorithm is provided as a new technology for solving the difficulties of installing more CCD sensors and filtered back projection reconstruction error caused by limited projection numbers. The radiation intensity projection data got from flame image collected from the installed CCD sensors and computed virtual CCD sensors is interpolated for filtered back projection to computer intensity distribution and calibrated bi-color method is used to calculation temperature in raceway depth direction. The results of experiments on a mini-type coal gas furnace and practice test showed that the algorithm is accurate and credible and realized the on-line monitoring for sudden spread combustion chamber raceway depth direction. At the same time, the useful information is provided for further studying combustion working state for the sudden spread combustion chamber.

**Key words:** three-dimensional reconstruction; raceway section; image process; virtual charge coupled device

收稿日期:2009-02-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50374085)

作者简介:张兴兰(1972-),女,重庆大学博士研究生,主要从事可视化诊断与过程控制等方面的研究,

(E-mail) yangqi@cqu.edu.cn。

欢迎访问重庆大学期刊社 <http://qks.cqu.edu.cn>

在燃烧室中,回流区的形状、大小和位置都直接影响燃烧过程、燃烧效率和火焰的稳定性,因此对燃烧室内回流区深度方向的辐射强度和温度场分布规律进行可视化研究对分析预测燃烧过程、改进燃烧器和在线监控燃烧工况具有重要意义<sup>[1]</sup>。常规研究方法是进行数值建模,采用流体仿真软件计算回流区的浓度分布、速率分布、流函数分布和温度场分布<sup>[2]</sup>。这种方法方程复杂,边界条件难以确定,同时难以在线运行。近年来,随着图像处理技术和辐射测温理论的发展,以面阵电子耦合器件(CCD)作为传感元件,对燃烧过程进行非接触辐射测量已逐渐成为一种有效的方法,从而得到广泛的应用<sup>[3]</sup>。该技术以辐射传递反问题重建和比色测温法为基础,通过燃烧室回流区的燃烧图像重建三维温度场。WEN Liang-ying 等<sup>[4]</sup>进行了高炉风口煤粉燃烧火焰与辐射图像的关联性研究。Fei Wang 等<sup>[5]</sup>通过 ART 迭代算法给出了离散的断面温度场计算模型;周怀春等<sup>[6]</sup>针对炉膛燃烧三维温度场重建中存在的严重变态问题提出了 Tikhonov 正则化的求解方法;Phillip M. Brisely 等<sup>[7]</sup>使用单灰度 CCD 探测器实现了燃烧火焰的三维温度场测量。所有这些研究成果为进一步研究燃烧室工况奠定了理论基础,但大都局限于发电锅炉三维温度场重构的研究和工程应用,没有深入展开燃烧室回流区火焰深度温度场可视化重构研究<sup>[8]</sup>。

笔者在前人研究成果的基础上,提出了燃烧室回流区深度方向火焰切片的温度场分布的三维重构算法。首先建立燃烧室的 CCD 投影成像光学模型,并针对火焰深度方向切片三维重构投影个数的受限问题,提出了虚拟 CCD 探测器安装算法以获得相对完备的投影数据,以减少滤波后投影算法中辐射强度和温度场三维重构误差,实现了燃烧室回流区工况的实时监控。

## 1 CCD 投影成像光学模型

设  $O$  为燃烧室燃烧火焰中间平面的中心,矩形  $FGO_2E$  所在平面为 CCD 探测器平面,用坐标系  $IO_1J$  表示,其中  $I$  为探测器上的行位置, $J$  为探测器的列位置, $Z_r$  轴位于探测器平面内。 $O_2$  为 CCD 探测器的中心, $S, O, O_2$  3 点在同一直线上。燃烧室火焰的中间平面与探测器平面垂直; $SO_2G$  所在平面为燃烧室的中间平面,CCD 投影成像光学模型,如图 1 所示。

## 2 投影数据三维重构算法

### 2.1 二元矩阵插值虚拟 CCD 探测器安装算法

CCD 辐射投影数据的基本思想就是在实现燃烧室旋转角度  $\beta$  时,将火焰上各像素点在物体坐标系上的坐

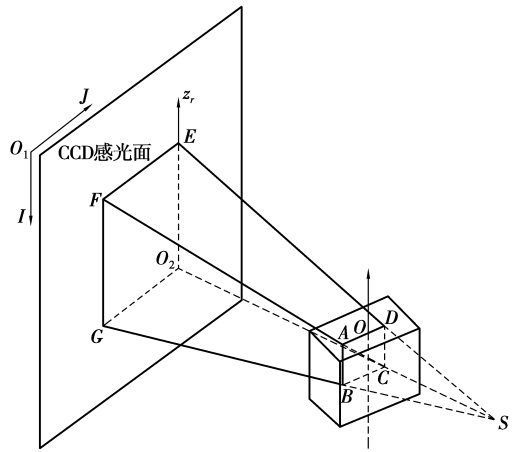


图 1 CCD 三维辐射成像空间示意图

标  $(i, j, k)$  转换到探测器平面上,确定物体任意一点在该旋转角度下投影到 CCD 探测器上的具体位置,并将该像素累加到 CCD 探测器上该像元的位置上,从而得到投影值<sup>[9]</sup>,设不同视角  $\beta$  方向安装 CCD 探测器,以某 CCD 探测器作为参照物,认为燃烧火焰沿  $\beta$  角旋转,即旋转后的  $Y_r$  轴与  $i'$  轴的夹角为  $\beta$ ,即旋转坐标系  $TOY_r$  相对与坐标系的旋转角度为  $\beta$ ;  $X_r$  轴位于探测器平面内以  $O_2$  为原点且垂直于  $Y_r$  轴。不同视角位置上 CCD 探测器所获得的二维图像可以理解为燃烧室相对 CCD 探测器旋转角度为  $\beta$  时,将燃烧火焰上的各像素点在物体坐标系上的坐标  $(i, j, k)$  转换到探测器平面上,确定燃烧火焰上任意一点在该旋转角度下投影到 CCD 探测器上的具体位置,并将该点像素值累加到探测器的像元位置上而得到视角  $\beta$  下的投影值<sup>[10]</sup>。虚拟 CCD 探测器安装示意图,如图 2 所示。

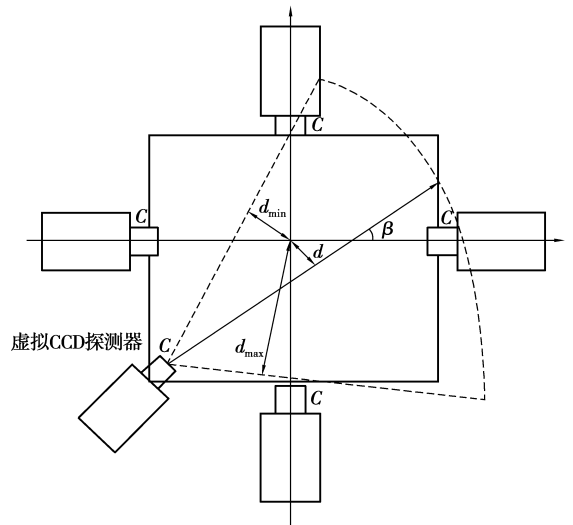


图 2 虚拟 CCD 探测器安装示意图

从图 2 可以看出,每一个 CCD 射线由 2 个参数  $(\beta, \theta)$  确定,其中  $\beta$  为 CCD 探测器的旋转角度,  $\theta$  为 CCD 探测器的探测角度。

d) 决定。因此首先对现场 CCD 靶面中获取的辐射强度投影值按照  $(\beta, d)$  2 个参数进行重排, 得到不同位置上的辐射投影值  $P_\lambda(\beta, d_i)$ 。

$$P_\lambda(\beta, d_i), \theta_i \in \{0 \leq \beta_0 \cdots \beta_i \cdots \beta_N \leq 2\pi\}, \quad (1)$$

式中,  $d_j \in \{d_{\min} \leq d_0 \cdots d_j \cdots d_N \leq d_{\max}\}$ 。  $d_{\max}, d_{\min}$  分别为视场角范围内射线与燃烧室中心的最大与最小距离;  $M_{\text{proj}}$  为每个 CCD 所取的射线数。为了满足反投影解析算法所需要的投影数据, 利用二元矩阵插值方法来弥补未安装 CCD 探测器(虚拟 CCD 探测器)位置上的三基色投影值, 在图 2 中所示的位置上, 三基色投影值可以通过下式插值公式得到<sup>[11]</sup>:

$$P_\lambda(\beta, d) = \frac{P_\lambda(\beta, d_j) + P_\lambda(\beta_{i+1}, d_j) + P_\lambda(\beta, d_{j+1}) + P_\lambda(\beta_{i+1}, d_{j+1})}{4} + \frac{P_\lambda(\beta_{i+1}, d_j) - P_\lambda(\beta_i, d_j)}{\beta_{j+1} - \beta_j}(\beta - \beta_j) + \frac{P_\lambda(\beta, d_{j+1}) - P_\lambda(\beta, d_j)}{d_{j+1} - d_j}(d - d_j), \quad (2)$$

式中,  $\beta_i \leq \beta \leq \beta_{i+1}; d_j \leq d \leq d_{j+1}$ 。

这样, 通过插值就可以得到未安装 CCD 探测器在 CCD 的视场范围内按照几何射线角度上的辐射强度值  $P_\lambda(\beta, d)$ 。

### 2.2 基于虚拟 CCD 的滤波后投影重构算法

滤波后投影技术和工业 CT 探伤反投影算法一样, 它是以雷顿(Radon)投影变化为基础。该算法不但重建速度快, 精度高, 同时可以选择不同的滤波函数来表现原投影场中不同的空间特征。但为了减少三维重构误差, 需满足 CCD 三维累积成像的视角相等(实际中, 可以沿火焰中心轴等角度安装 CCD 成像装置)和投影面个数尽可能多。为了增加投影面的个数, 采用二元矩形虚拟 CCD 安装算法<sup>[12]</sup>对有限的三维累积辐射图像投影个数进行插值运算, 以增加辐射图像投影个数。计算机实现滤波后投影算法分为如下几步<sup>[13]</sup>:

1) 通过图像采集卡同步采集不同视角  $\beta$  方向(含插值计算后的虚拟 CCD 探测器)的投影辐射图像  $P_\lambda(x')$ :

$$p_\lambda(\beta, n\tau), n = 1, 2, \dots, M_{\text{proj}}$$

其中,  $(\beta, n\tau)$  为投影射线在断面内的位置,  $\tau$  为射线与燃烧室中心之间量化单位距离。

2) 对投影数据进行滤波计算

$$P_\lambda(x') = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\bar{x}) \delta(\bar{x} \cdot \bar{n} - x') d^2 \bar{x}, \quad (3)$$

式中,  $\delta(\bar{x} \cdot \bar{n} - x')$  为狄拉克脉冲函数;  $\bar{n} = (\cos\theta, \sin\theta)$  为沿投影束的单元矢量,  $g(\bar{x})$  为物空间断面滤

波后投影值,  $\bar{x}$  为燃烧室断面坐标矢量,  $\bar{x} = (x, y)$ 。根据中心切片定理得到<sup>[14]</sup>:

$$g(\bar{x}) = \int_0^\pi Q_{\lambda, \beta}(\bar{x} \cdot \bar{n}) d\beta, \quad (4)$$

其中

$$Q_{\lambda, \beta}(\bar{x} \cdot \bar{n}) = h * P_\lambda(x'), \quad (5)$$

式中,  $h$  为滤波器函数, 常用的函数有: 广义 Hamming 滤波器; SL(Shepp-logan)滤波器; \* 为卷积;  $Q_{\lambda, \beta}(\bar{x} \cdot \bar{n})$  为滤波后的位置  $(\beta, n\tau)$  上的投影值。

3) 反投影

$$g(\bar{x}) = \frac{\pi}{M_{\text{proj}}} \sum_{i=1}^{M_{\text{proj}}} Q_{\lambda, \beta_i}(\bar{x} \cdot \bar{n}_i), \quad (6)$$

### 2.3 校正比色测温模型

对于 CCD 探测得到的两波长  $\lambda = \lambda_1, \lambda = \lambda_2$  对应的辐射信号响应之比和空间某处 ( $\xi$  处) 的黑体辐射信号之比存在着比例关系。根据热辐射定律, 发射连续光谱物体的热辐射亮度与温度关系, 由维恩辐射定律得<sup>[15]</sup>:

$$E_\lambda(T) = \frac{C_1}{\lambda} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) \epsilon(\lambda, T), \quad (7)$$

如果在波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  下同时测量由某点发出的单色辐射能  $E_{\lambda_1}(T)$  和  $E_{\lambda_2}(T)$ , 则根据两者的比值得温度  $T_s$  关系式

$$T_s = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)}{\ln \frac{E_{\lambda_1}(T)}{E_{\lambda_2}(T)} - \ln \frac{\epsilon(\lambda_1, T)}{\epsilon(\lambda_2, T)} - 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}}, \quad (8)$$

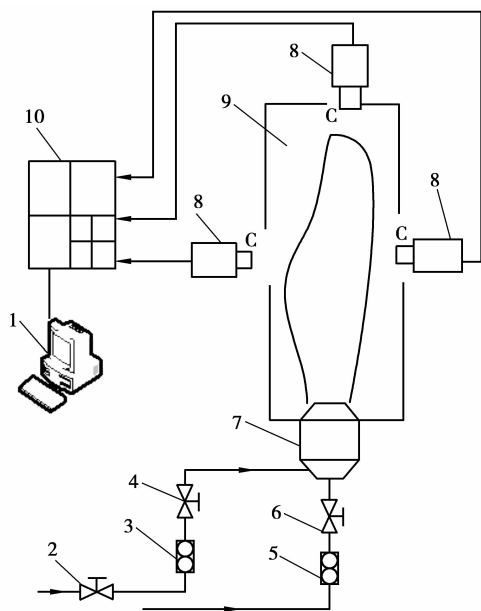
若  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  选取得比较靠近, 则  $\epsilon(\lambda_1, T) \approx \epsilon(\lambda_2, T)$ , 可得彩色 CCD 双色法的测温公式

$$T_s = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)}{\ln \Phi(L_r, L_g, L_b) \frac{L_{\lambda_1}}{L_{\lambda_2}} - 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}}, \quad (9)$$

式中, 分别为波长  $\lambda_1, \lambda_2$  的亮度值,  $\Phi(L_r, L_g, L_b)$  是根据标准黑体标定的修正系数, 由  $(L_r, L_g, L_b)$  亮度值和具体光路系统确定。

## 3 实验验证

煤气燃烧器由圆柱形钢筒、耐火材料以及楔形钝体组成, 燃烧火焰呈旋转对称分布。实验装置如图 3 所示。光学成像系统组选用 2/3' Computar M0814-MP 型镜头, 景深为 mm 量级, C 接口, 摄像机型号为 IPX-1M48-G, 快门控制为 1/10~1/50000 sec, 2/3' 靶面, 燃烧室尺寸为 1 000 mm×500 mm×500 mm。耐火材料镶嵌在圆柱形钢筒的内壁, 形成了煤气燃烧空间; 加装楔形钝体的作用是为了保证煤气着火和燃烧。由于楔形钝体后回流区的湍流混



1. 计算机 2. 空气节流阀 3. 空气流量计 4. 空气调节阀  
5. 煤气流量计 6. 煤气节流 7. 点火器 8. CCD 探测器  
9. 燃烧室 10. 视频多路转换器  
图 3 煤气燃烧实验装置示意图

合强烈,具有足够高的回流烟气温度、足够强的热质交换和足够低的流动速度,为着火及火焰稳定创造了有利的条件。炉膛一侧开有 3 个  $20\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  的矩形孔,用来摄取燃烧火焰。采用甲烷为燃料,入口温度  $15\text{ }^\circ\text{C}$ ,以  $15\text{ m/s}$  速度射入,流量  $25\text{ m}^3/\text{h}$ ,助燃空气从喷嘴以  $20\text{ m/s}$  射入。为了研究燃烧室回流区不同深度方向火焰切片的辐射强度和温度场分布,将等视角安装的 3 个 CCD 采集的回流区断面图像分别按照火焰高度  $H$  为  $800\text{ mm}$ 、 $600\text{ mm}$ 、 $400\text{ mm}$ 、 $200\text{ mm}$  进行切片(如图 4 所示)。

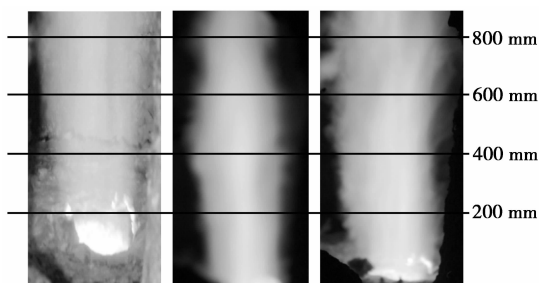


图 4 等视角 CCD 辐射图像不同深度方向的切片图

通过比较,考虑温度变化的连续性,选用广义 Hamming 窗对插值后的投影数据和虚拟 CCD 探测器插值投影数据进行滤波。反投影重建后得到的温度场分布分别如图 5 所示。

从图中可以看出,沿燃烧室喷嘴中心轴线上,喷出口温度最高,沿两边逐渐降低。这主要是因为燃

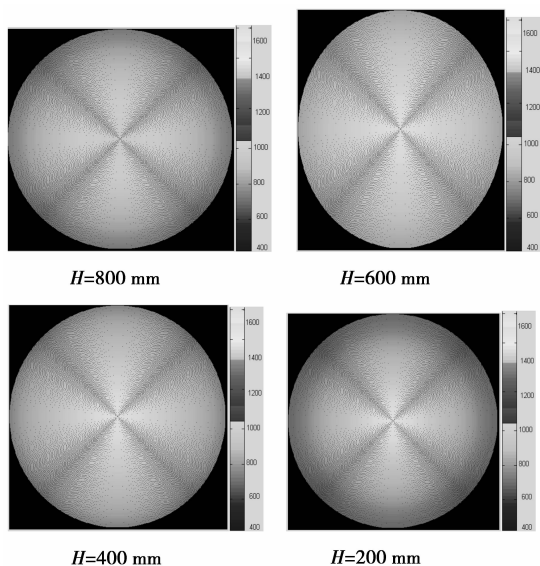


图 5 回流区不同深度切片温度场分布

烧器出口处钝体的存在,会在钝体周围形成一个高温回流区。由于在回流区内存在大量的高温烟气,故火焰的中心区域温度较高。沿火焰深度方向上,温度变化曲线呈现缓变单峰曲线,即随火焰深度方向先升高,后降低,呈对称分布,说明沿火焰深度方向,中心温度最高,两边低,符合燃烧火焰本身的特性。

## 4 结 论

基于虚拟 CCD 二元矩阵插值安装的滤波反投影算法为研究燃烧室回流区燃烧工况的变化及燃烧诊断提供了新的手段。

1) 该算法对有限的等视角的 CCD 辐射二维投影数据进行二元矩阵插值处理,以补充其它视角上未安装的 CCD 探测器(虚拟 CCD 探测器)得到相对完备的投影数据,

2) 通过滤波后投影算法和校正的比色温度测量公式计算回流区不同高度切片断面温度场分布。通过对燃烧室天然气燃烧火焰现场监控实验表明,该算法达到了在线监测的要求,为燃烧室回流区工况监控和最优化燃烧诊断提供了可视化监控调节手段。

## 参考文献:

- [1] XIN Y, FILATYEV S A, BISWAS K, et al. Fire dynamics simulations of a one meter diameter methane fire [J]. Combustion and Flame, 2008, 153(4):499-509.
- [2] ASOTANI T, YAMASHITA T, TOMINAGA H, 欢迎访问重庆大学期刊社 <http://qks.cqu.edu.cn>

- et al. Prediction of ignition behavior in a tangentially fired pulverized coal boiler using CFD[J]. *Fuel*, 2008, 87(5): 482-490.
- [3] FSIN GUNGOR. Two-dimensional biomass combustion modeling of CFB[J]. *Fuel*, 2008, 87(9): 1453-1468.
- [4] WEN LIANG-YING, BAI CHEN-GUANG, OU YANG-QI, et al. Radiant image simulation of pulverized coal combustion in blast furnace raceway[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2006, 13(2): 18-21.
- [5] WANG FEI, LIU DONG, CEN KE-FA, et al. Efficient inverse radiation analysis of temperature distribution in participating medium based on backward monte carlo method [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2008, 109(12): 2171-2181.
- [6] 周怀春,韩曙东,盛锋,等. 炉膛燃烧温度场三维可视化监测方法模拟研究[J]. *动力工程*, 2003, 23(1): 2154-2159.
- ZHOU HUAI-CHUN, HAN SHU-DONG, SHENG FENG, et al. Numerical simulation on a visualization monitoring method of three-dimensional temperature distribution in furnace[J]. *Power Engineering*, 2003, 23(1):19-34.
- [7] PHILLIP M BRISLEY, LU GANG, YAN YONG, et al. Three-dimensional temperature measurement of combustion flames using a single monochromatic CCD camera [J]. *IEEE Transaction and Measurement*, 2005, 54(4):1417-1420.
- [8] MERIAUDEAU F. Real time multi-spectral high temperature measurement[J]. *Application to Control in the Industry Image and Vision Computing*, 2007, 25(7): 1124-1133.
- [9] 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):134-137.
- HUANG QUN-XING, MA ZENG-YI, YAN JIAN-HUA, 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): 134-137.
- [10] ATSUSHI ISHIHARA, YUKIO SAKAI, KATSUYUKI KONISHI, et al. Correlation between burning surface temperature and regression rate for polymethylmethacrylate [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30:2123-2130.
- [11] ATSUSHI ISHIHARA, YUKIO SAKAI, KATSUYUKI KONISHI. Measurement of the burning surface temperature in ammonium perchlorate [J]. *Symposium (International) on Combustion*, 2000, 28(1):855-862.
- [12] MANCA D, ROVAGLIO M. Infrared thermo-graphic image processing for the operation and control of heterogeneous combustion chambers[J]. *Combustion and Flame*, 2002, 130(4):277-297.
- [13] 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[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(13):3434-3441.
- [14] ALAA OMRANE, FREDERIK OSSLER, MARCUS ALDEN, Temperature measurements of combustible and non-combustible surfaces using laser induced phosphorescence experimental[J]. *Thermal and Fluid Science*, 2004, 28(7): 669-676.
- [15] PETER E RAAD, PAVEL L KOMAROV, MIHAI G BURZO. Thermal characterization of embedded electronic features by an integrated system of CCD thermography and self-adaptive numerical modeling [J]. *Microelectronics Journal*, 2008, 39(7): 1008-1015.

(编辑 陈移峰)