

火焰烟黑三维温度场和浓度场同时重建实验研究*

刘冬^{1)2)†} 严建华¹⁾ 王飞¹⁾ 黄群星¹⁾ 池涌¹⁾ 岑可法¹⁾

1) (浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027)

2) (Centre de Thermique de Lyon, Insa de Lyon, 69621, Lyon, France)

(2010年8月4日收到; 2010年9月1日收到修改稿)

利用电荷耦合器件摄像机采用烟黑温度场和浓度场同时重建模型对自由火焰烟黑的三维温度场和浓度场进行了同时重建实验研究, 所利用的重建模型是基于区域重建的方法. 将重建的烟黑温度场和浓度场与文献结果进行了对比, 而且还将重建温度场与热电偶所测量的温度场进行了对比. 结果表明, 重建的烟黑温度场和浓度场与文献结果趋势相一致, 重建温度值与热电偶测量值符合较好. 因此, 同时重建模型可以较好地重建出火焰烟黑的三维温度场和浓度场.

关键词: 火焰烟黑, 温度场, 浓度场, 三维同时重建

PACS: 07.20.Dt, 44.40.+a

1. 引言

火焰烟黑的温度场和浓度场分布的测量对于研究烟黑的生成特性和燃烧设备的辐射传热具有重要的科学意义和实用价值. 国内外许多学者致力于这方面的研究工作. Hall 和 Bonczyk^[1] 使用发射-吸收层析法对烟黑火焰温度场进行了测量. Greenberg 和 Ku 使用激光消光法对二维烟黑浓度分布进行了测量^[2], 并应用到常重力和低重力情况下扩散火焰烟黑浓度测量上^[3]. De Iuliis 等^[4] 使用多波长发射方法测量了乙烯扩散火焰烟黑的温度场和浓度分布. Cignoli 等^[5] 发展了二维发射法对烟黑的温度场和浓度场进行测量. De Iuliis 等^[6] 近来发展了一种双色激光诱导发光技术来测量二维乙烯扩散火焰烟黑的浓度. Snelling 等研究了二维衰减法进行烟黑浓度测量^[7], 并发展了多波长火焰发射方法进行火焰烟黑温度和浓度高分辨率测量^[8]. Thomson 等结合火焰发射法和衰减法研究了压力范围在 0.5—4.0 MPa 的火焰烟黑温度和浓度的测量^[9], 并扩展到漫射二维衰减法, 显示该方法在透射测量中已达到非常高的灵敏度^[10]. Huang 等^[11] 利用双目视觉原理和层析技术, 对对称火焰及非对

称火焰进行了温度场和浓度分布同时重建的研究, 但没有考虑实际火焰的成像过程.

现有的火焰烟黑的温度场和浓度场分布同时重建的研究, 大多数局限于对称火焰, 而且一般需要利用外部光源, 造成了系统的复杂性. 而少数的对于非对称火焰烟黑温度和浓度的重建研究, 有的需要外部激光光源, 有的没有考虑到实际火焰辐射成像过程, 有的需要移动接收设备进行分层重建, 都不是很方便. Liu 等^[12] 建立了可见光波段基于正向 Monte Carlo 方法的弥散介质三维温度场重建模型, 并详细地分析考察了各种重建因素对三维温度场重建的影响^[13]; 考虑到计算效率和时间, 提出了基于逆向 Monte Carlo 方法的弥散介质二维温度场快速重建模型^[14], 并扩展到了三维重建形式^[15]、二维温度场与辐射参数同时重建^[16] 及大型电站锅炉重建上^[17]. 基于以上模型, Liu 等^[18] 发展了一种不考虑重建区域内火焰形式的烟黑三维温度场和浓度场同时重建模型, 可以用于对称火焰和非对称火焰, 而且该模型利用的是电荷耦合器件 (CCD) 摄像机, 考虑了火焰三维成像, 不需要外部激光光源, 不需要移动接收设备进行分层重建. 本文利用此模型对自由火焰进行了烟黑三维温度场和浓度场同时重建实验研究, 由于该重建模型与所重建的火焰形式没有关系, 为了方便与文献及热电偶测

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2009CB219802)、高等学校学科创新引智计划 (批准号: B08026) 和国家高技术研究发展计划 (批准号: 2007AA061302-3) 资助的课题.

† E-mail: liudong118@gmail.com

量结果进行对比, 采用了一个稳定的对称自由火焰作为重建对象.

2. 火焰烟黑三维温度场和浓度分布同时重建模型

重建系统如图 1 所示, 标号从 CCD (1) 到 CCD (4) 的 4 个 CCD 摄像机布置在火焰四周, 重建区域

的尺寸为 $W \times L \times H$, 从 CCD 摄像机到重建区域边沿的距离为 Le . 重建区域划分为 $NX \times NY \times NZ$ 体元, 体元由以下顺序进行编号为 1 到 $N = NX \times NY \times NZ$: $(i, j, k), (1, 1, 1), (2, 1, 1), \dots, (NX, 1, 1), (1, 2, 1), \dots, (NX, NY, 1), (1, 1, 2), \dots, (NX, NY, NZ)$. 两个 CCD 摄像机之间的连线与中心线夹角为 β . CCD 摄像机视场角火焰重建区域划分为 M_r 个离散方向.

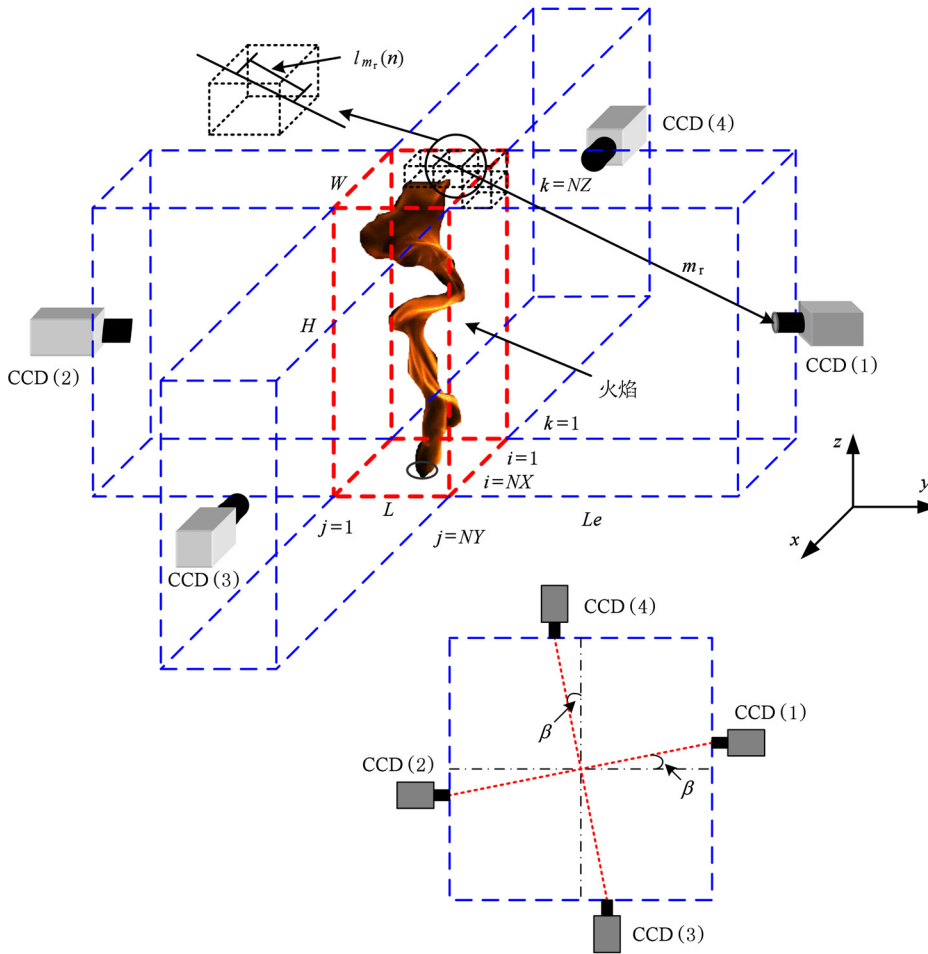


图 1 重建系统示意图

对于一条从火焰到 CCD 摄像机的辐射射线 m_r 其到达 CCD 摄像机的单色辐射强度 $I_\lambda(m_r)$ 可表示为^[18]

$$\begin{aligned}
 I_\lambda(m_r) &= \int_0^{l_{m_r}} [\kappa_\lambda(s) I_{b,\lambda}(s)] ds \\
 &= \int_0^{l_{m_r}} [H_\lambda(s)] ds \\
 &= \sum_{n=1}^N \kappa_\lambda(n) I_{b,\lambda}(n) l_{m_r}(n) \\
 &= \sum_{n=1}^N H_\lambda(n) l_{m_r}(n), \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中, $\kappa_\lambda(s)$ 是局部吸收系数, $I_{b,\lambda}(s)$ 是局部单色黑体辐射强度, $H_\lambda(s)$ 是局部辐射源项, $\kappa_\lambda(n)$ 是体元 n 局部吸收系数, $I_{b,\lambda}(n)$ 是体元 n 局部单色黑体辐射强度, 体元 n 温度 $T(n)$ 可以由维恩定律求得, $I_{b,\lambda}(n) = c_1 / \{ \lambda^5 \pi \exp[c_2 / (\lambda T_n)] \}$, c_1 和 c_2 是第一和第二辐射常数, $H_\lambda(n)$ 是体元 n 局部辐射源项, $H_\lambda(n) = \kappa_\lambda(n) I_{b,\lambda}(n)$, $l_{m_r}(n)$ 是射线 m_r 在体元 n 中的射线长度.

烟黑局部吸收系数可以由 Rayleigh 近似表示为^[19]

$$\begin{aligned} \kappa_\lambda(n) &= 6\pi f_v(n) E(m)/\lambda \\ &= \frac{36\pi nk}{(n^2 - k^2 + 2)^2 + 4n^2 k^2} \frac{f_v}{\lambda}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $f_v(n)$ 是体元 n 局部烟黑浓度; $E(m) \equiv \text{Im}[(m^2 - 1)/(m^2 + 2)]$, 是随波长变化的烟黑复折射率 $m = n - ik$ 的函数; n 和 k 可以从文献[20]中进行选择,

$$n = 1.811 + 0.1263 \ln \lambda + 0.027 \ln^2 \lambda + 0.0417 \ln^3 \lambda, \quad (3)$$

$$k = 0.5821 + 0.1213 \ln \lambda + 0.2309 \ln^2 \lambda - 0.01 \ln^3 \lambda. \quad (4)$$

设三维空间的离散方向数为 M_r , 那么根据(1)式可以得到 M_r 个方程^[18],

$$\begin{aligned} I_\lambda(1) &= \sum_{n=1}^N \kappa_\lambda(n) I_{b,\lambda}(n) l_1(n) \\ &= \sum_{n=1}^N H_\lambda(n) l_1(n), \\ &\vdots \\ I_\lambda(m_r) &= \sum_{n=1}^N \kappa_\lambda(n) I_{b,\lambda}(n) l_{m_r}(n) \\ &= \sum_{n=1}^N H_\lambda(n) l_{m_r}(n), \\ &\vdots \\ I_\lambda(M_r) &= \sum_{n=1}^N \kappa_\lambda(n) I_{b,\lambda}(n) l_{M_r}(n) \\ &= \sum_{n=1}^N H_\lambda(n) l_{M_r}(n). \end{aligned} \quad (5)$$

将方程组(5)改写为矩阵方程的形式

$$I_\lambda = l \cdot H_\lambda, \quad (6)$$

式中, I_λ 是 CCD 摄像机接收到的单色辐射强度向量, $I_\lambda \in R^{M_r}$, l 是每条射线在每个体元中的射线长度矩阵, $l \in R^{M_r \times N}$, H_λ 是所要求的局部辐射源项, $H_\lambda \in R^N$.

方程(6)是大型的稀疏矩阵, 重建问题是一个严重的病态问题, 这里使用最小二乘 QR 分解 (LSQR) 系列算法对其进行求解^[21,22]. 在两个波长下的 H_λ 求得之后, 双色法可以用来得到烟黑温度和浓度, 对于体元 n 可以得到

$$\begin{aligned} f_1[T(n), f_v(n)] &= H_{\lambda_1}(n), \\ f_2[T(n), f_v(n)] &= H_{\lambda_2}(n). \end{aligned} \quad (7)$$

在方程组(7)式中, 有两个方程和两个未知数, 因此可以求解体元 n 的烟黑温度和浓度, 最终可以得到三维的温度和浓度分布.

3. 实验结果及讨论

3.1. 火焰图像及处理

由于重建对象是对称火焰, 因此利用一个 CCD 摄像机所拍摄的图像即可. CCD 所拍摄的图像如图 2 所示. 由于三维重建需要较大的离散角度, 同时还需要大火焰或者摄像机与火焰之间的距离较近. 本实验采用拉近摄像机与火焰之间的距离的办法, 但由于摄像机镜头的视场角较小且是固定的, 因此实验中只能拍到火焰的局部.

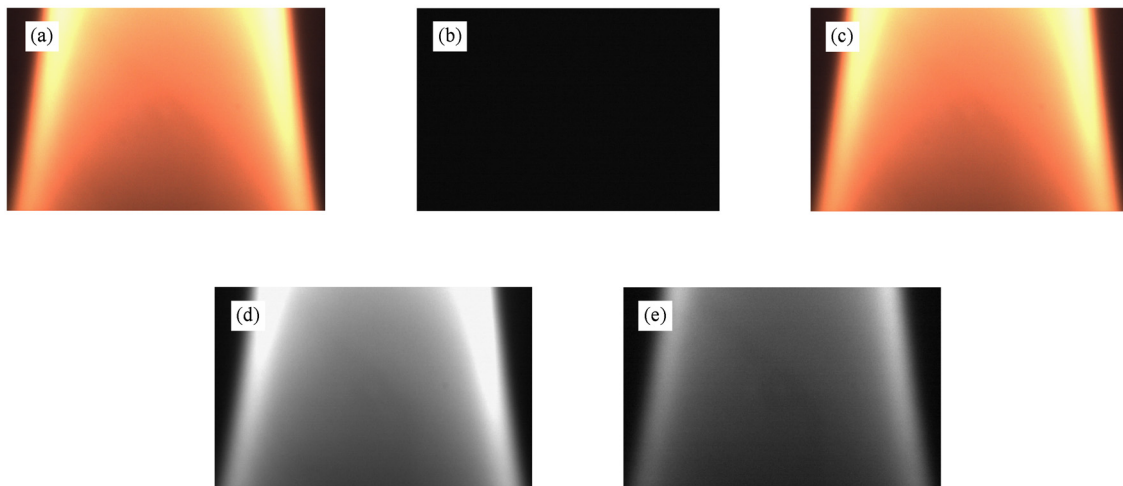


图2 火焰图像及处理结果 (a)为原火焰图像,(b)为背景图像,(c)为除去背景噪声图像后的火焰图像,(d)和(e)分别为原火焰图像的绿色分量图和蓝色分量图

3.2. 数值模拟重建

火焰为扩散燃烧火焰,燃气为乙烯,乙烯流量为 0.2 L/min,空气流量为 200 L/h,燃气管四周为方形多孔介质材料,能起整流作用,喷口内径为 12 mm. 火焰划分为三层,每层划分为 7×7 网格,单个摄像机发射射线数量设为 140 条. 为了检验重建算法的正确性,实验前首先进行了数值模拟重建研究,数值模拟中假定的三维烟黑温度场和浓度分布已在文献[18]中讨论过.

在正问题中求得的精确辐射强度上加入均值为零、均方差为 σ 正态分布的随机误差来模拟 CCD 摄像机所接收到的测量辐射强度,

$$I_{\lambda,j}^{\text{measured}} = (\mu + \sigma\xi)I_{\lambda,j} + I_{\lambda,j}, \quad (8)$$

式中, $I_{\lambda,j}^{\text{measured}}$ 表示模拟测量辐射强度向量元素, $I_{\lambda,j}$ 表示精确辐射强度向量元素, ξ 是标准正态分布的随机变量,在 $-2.576 < \xi < 2.576$ 的概率为 99%, $j =$

$1, 2, \dots, M_r$.

CCD 摄像机所接收到的精确辐射强度可以用假定的烟黑温度和浓度分布通过正问题求得. 在以图像传感器为基础的重建系统中,3 个主要噪声来源为光子噪声、暗噪声和读取噪声,都可用系统的信噪比 r_{SN} 进行考量, r_{SN} 定义如下^[11, 18]:

$$r_{\text{SN}} = 20\lg\left(\left[\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \sigma^2 \xi_j^2\right]^{-1/2}\right). \quad (9)$$

烟黑温度和浓度的重建相对误差表示如下

$$E_{T, \text{rel}, i} = 100 \frac{|T_i^{\text{recon}} - T_i^{\text{exact}}|}{T_i^{\text{exact}}}, \quad (10)$$

$$E_{f_v, \text{rel}, i} = 100 \frac{|f_{vi}^{\text{recon}} - f_{vi}^{\text{exact}}|}{f_{vi}^{\text{exact}}}, \quad (11)$$

其中, T_i^{recon} 和 f_{vi}^{recon} 表示重建温度和浓度, T_i^{exact} 和 f_{vi}^{exact} 表示假定温度和浓度, $i = 1, 2, \dots, N$.

在不同测量误差下的数值模拟重建结果如图 3 和图 4 所示.

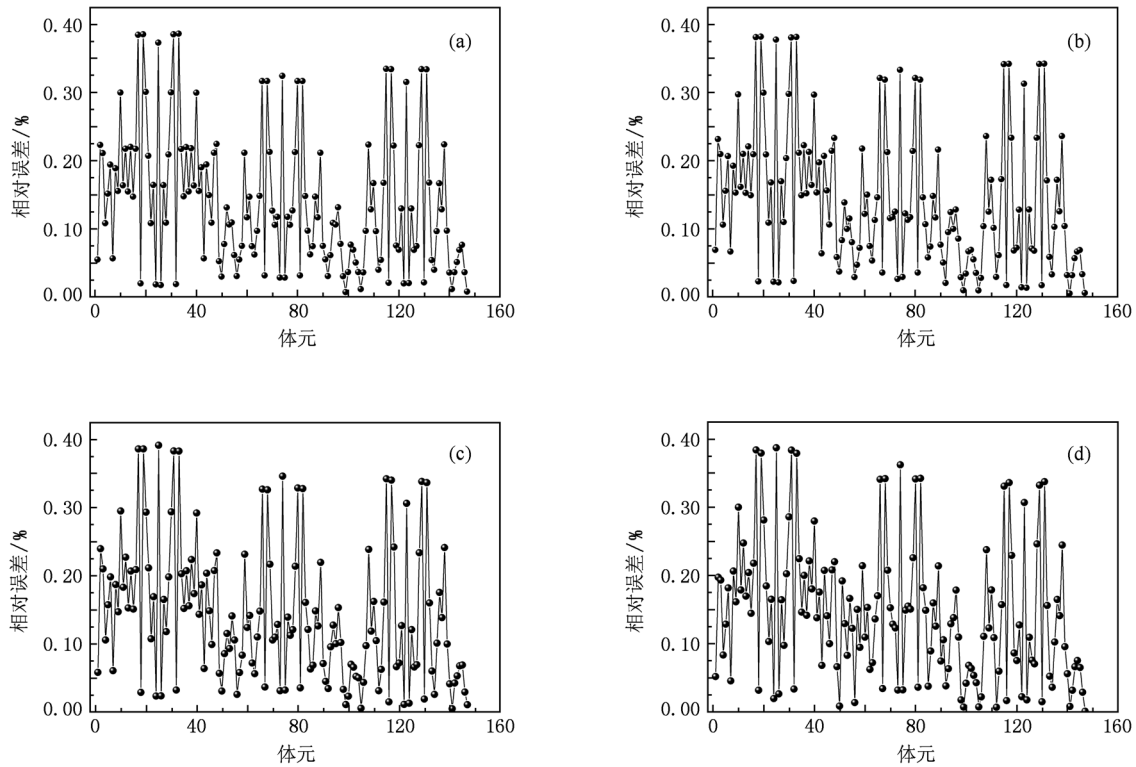


图 3 不同测量误差下温度场重建相对误差 (a) 无误差, (b) $r_{\text{SN}} = 80$ dB, (c) $r_{\text{SN}} = 65$ dB, (d) $r_{\text{SN}} = 60$ dB

1) 当无测量误差时,最大和平均温度场重建相对误差分别为 0.3863% 和 0.1382%,最大和平均浓度场重建相对误差分别为 2.3003% 和 0.7226%.

2) 当 $r_{\text{SN}} = 80$ dB 时,最大和平均温度场重建相对误差分别为 0.3819% 和 0.1397%,最大和平均浓

度场重建相对误差分别为 2.4297% 和 0.7371%.

3) 当 $r_{\text{SN}} = 65$ dB 时,最大和平均温度场重建相对误差分别为 0.3914% 和 0.1409%,最大和平均浓度场重建相对误差分别为 2.3365% 和 0.7641%.

4) 当 $r_{\text{SN}} = 60$ dB 时,最大和平均温度场重建相

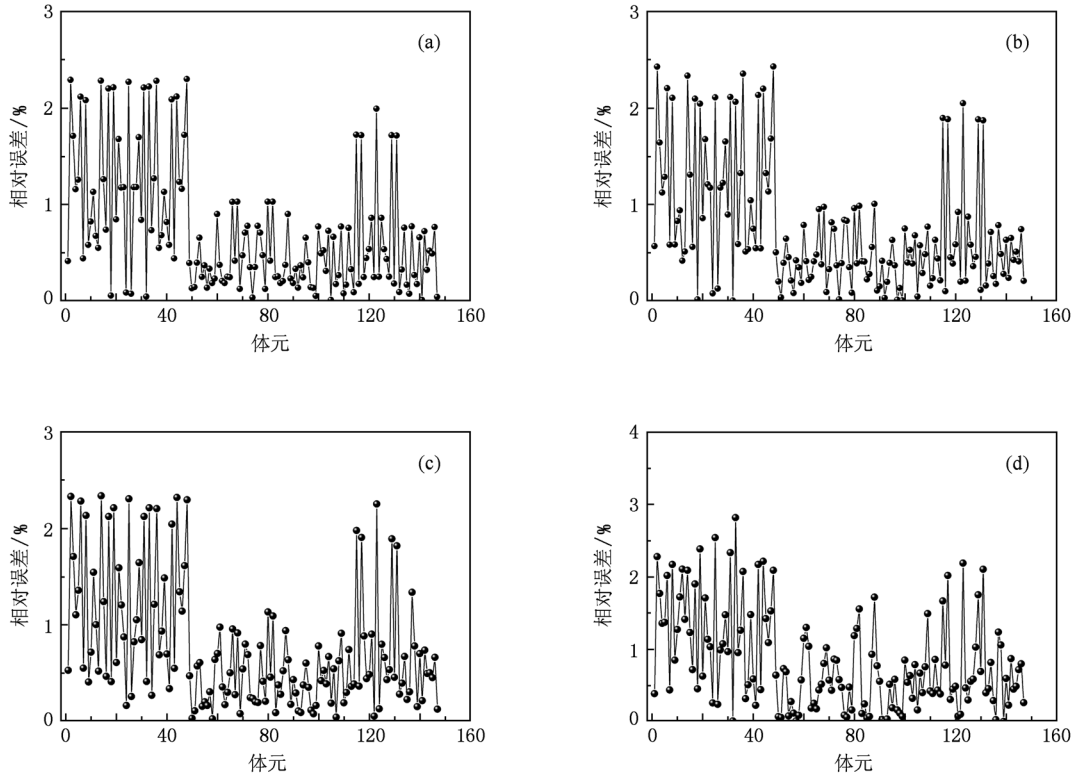


图4 不同测量误差下浓度场重建相对误差 (a)无误差, (b) $r_{SN} = 80$ dB, (c) $r_{SN} = 65$ dB, (d) $r_{SN} = 60$ dB

对误差分别为0.3873%和0.1437%,最大和平均浓度场重建相对误差分别为2.8185%和0.8274%.

由此可知,即使 r_{SN} 低到60 dB,重建也能得到较好的结果.实际上,实验中所用到的 CCD 摄像机的动态范围大于 80 dB,因此可以获得更好的重建结果.

3.3. 火焰烟黑三维温度场及浓度场实验重建结果及讨论

使用上述数值模拟所选取的网格划分及摄像机处发射的射线数量,得到的重建结果如图5—7所示.

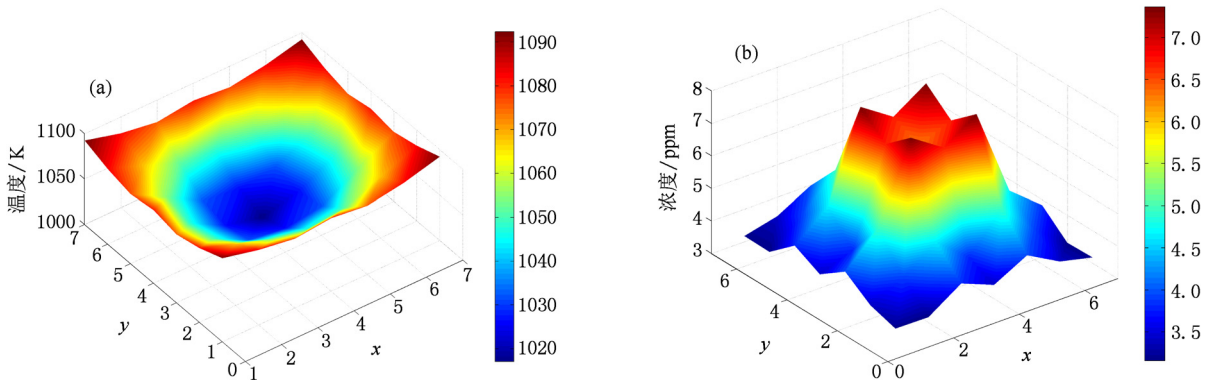


图5 第一层烟黑温度场与浓度场重建结果 (a)重建温度场, (b)重建浓度场

由图5—7可以看出,重建出的温度场和浓度场具有较好的对称性,重建浓度场呈现中心部分低,中间部分高,外面部分低的分布情况,与文献[1, 2,

5]上所报道的分布情况较为符合,尤其是与文献[5]比较接近.然而中间部分出现了4个尖峰分布,其原因可能与燃烧器的设计有关.文献[1,2,5]的

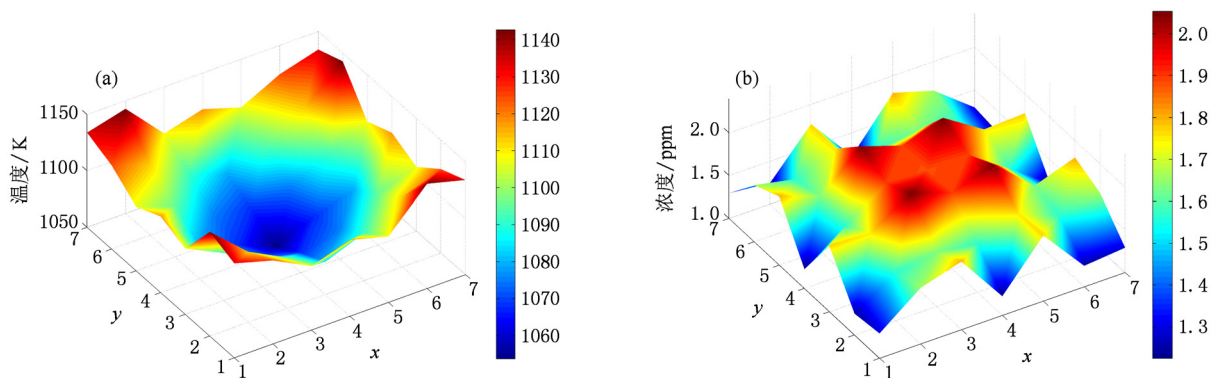


图6 第二层烟黑温度场与浓度场重建结果 (a) 重建温度场, (b) 重建浓度场

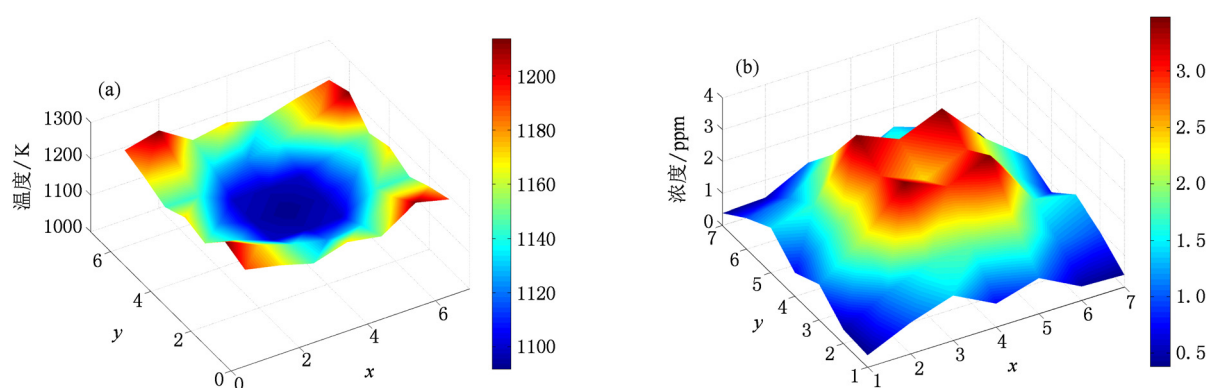


图7 第三层烟黑温度场与浓度场重建结果 (a) 重建温度场, (b) 重建浓度场

燃烧器为同心圆结构,而本实验的燃烧器中心部分是通燃气的圆管,外面部分为通空气的方形多孔介质材料,起到整流作用,4个尖峰恰巧分布在两条对角线上,与燃烧圆管外的多孔介质形状具有一致性,说明火焰重建参数的分布既受到本身燃烧管的影响,同时还受到火焰周围空气流的影响.当然,也有可能是由于网格划分较为粗的原因.从总体上看,这里的浓度重建分布应该是合理的.对于温度分布,呈现出中心部分温度低,外面部分温度高的分布特点,与文献[5, 8]所报道的温度分布具有一致性,分布于边缘的火焰温度仅代表火焰部分的温度.

为了验证重建温度分布值的准确性,使用K型细丝热电偶对同一流量下的火焰第一层温度分布大致进行了测量,测量结果与重建结果对比如图8所示.从图8可以看出,温度重建结果与测量结果符合较好,尤其在靠近火焰边缘处两者相差很小,而最大误差大约为54 K,出现在火焰中心处.这可能是由于热电偶插到火焰中心,造成重建结果与测

量结果在该位置存在较大的误差.从图8还可以看出,重建的烟黑浓度分布与文献[2, 5]报道的结果一致.

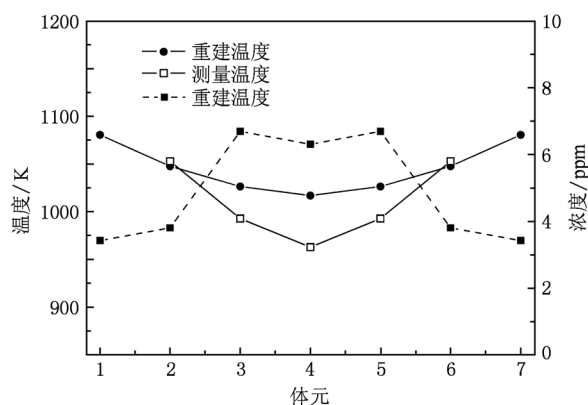


图8 测量结果与重建结果对比

4. 结 论

利用 CCD 摄像机采用烟黑温度场和浓度场同

时重建模型对自由火焰烟黑的三维温度场和浓度场进行了同时重建实验研究,得到烟黑的三维温度场和浓度场. 将所重建结果与文献结果进行了对

比,重建的温度分布与文献结果相一致. 同时还将重建温度场与热电偶所测量的温度场进行了对比,重建温度值与热电偶测量值符合较好.

-
- [1] Hall R J, Bonczyk P A 1990 *Appl. Opt.* **29** 4590
- [2] Greenberg P S, Ku J C 1997 *Appl. Opt.* **36** 5514
- [3] Greenberg P S, Ku J C 1997 *Combust. Flame* **108** 227
- [4] De Iuliis S, Barbini M, Benecchi S, Cignoli F, Zizak G 1998 *Combust. Flame* **115** 253
- [5] Cignoli F, De Iuliis S, Manta V, Zizak G 2001 *Appl. Opt.* **40** 5370
- [6] De Iuliis S, Migliorini F, Cignoli F, Zizak G 2007 *Proc. Combust. Inst.* **31** 869
- [7] Snelling D R, Thomson K A, Smallwood G J, Gülder Ö L 1999 *Appl. Opt.* **38** 2478
- [8] Snelling D R, Thomson K A, Smallwood G J, Gülder Ö L, Weckman E J, Fraser R A 2002 *Am. Inst. Aeronaut. Astronaut. J.* **40** 1789
- [9] Thomson K A, Gülder Ö L, Weckman E J, Fraser R A, Smallwood G J, Snelling D R 2005 *Combust. Flame* **140** 222
- [10] Thomson K A, Johnson M R, Snelling D R, Smallwood G J 2008 *Appl. Opt.* **47** 694
- [11] Huang Q X, Wang F, Liu D, Ma Z Y, Yan J H, Chi Y, Cen K F 2009 *Combust. Flame* **156** 565
- [12] Liu D, Wang F, Huang Q X, Yan J H, Chi Y, Cen K F 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1312
- [13] Liu D, Wang F, Yan J H, Huang Q X, Chi Y, Cen K F 2008 *Int. J. Heat Mass Transfer* **51** 3434
- [14] Liu D, Wang F, Huang Q X, Yan J H, Chi Y, Cen K F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4812 (in Chinese) [刘冬、王飞、黄群星、严建华、池涌、岑可法 2008 物理学报 **57** 4812]
- [15] Liu D, Wang F, Cen K F, Yan J H, Huang Q X, Chi Y 2008 *Opt. Lett.* **33** 422
- [16] Liu D, Yan J H, Wang F, Huang Q X, Chi Y, Cen K F 2010 *Int. J. Heat Mass Transfer* **53** 4474
- [17] Wang F, Liu D, Cen K F, Yan J H, Huang Q X, Chi Y 2008 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* **109** 2171
- [18] Liu D, Huang Q X, Ma Z Y, Wang F, Yan J H, Chi Y, Cen K F 2010 *J. Heat Transfer* **132** 061202
- [19] Modest M F 2003 *Radiative Heat Transfer* (2nd Ed.) (San Diego: Academic Press)
- [20] Chang H, Charalampopoulos T T 1990 *Proc. Roy. Soc. Lond. A* **430** 577
- [21] Paige C C, Saunders M A 1982 *AMC Trans. Math.* **8** 43
- [22] Paige C C, Saunders M A 1982 *AMC Trans. Math.* **8** 195

Simultaneous experimental reconstruction of three-dimensional flame soot temperature and volume fraction distributions *

Liu Dong^{1)2)†} Yan Jian-Hua¹⁾ Wang Fei¹⁾ Huang Qun-Xing¹⁾ Chi Yong¹⁾ Cen Ke-Fa¹⁾

1) (*State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

2) (*Centre de Thermique de Lyon, Insa de Lyon, 69621, Lyon, France*)

(Received 4 August 2010; revised manuscript received 1 January 2010)

Abstract

Three-dimensional (3D) flame soot temperature and volume fraction distributions are simultaneously reconstructed experimentally by the simultaneous reconstruction model through using charge-coupled device cameras. The reconstruction model is based on the area reconstruction. The reconstructed 3D soot temperatures and volume fraction distributions are compared with those reported in the literature. The reconstructed temperatures are also compared with those measured by thermocouples. It is shown that the reconstructed temperature distribution and the volume fraction distribution are consistent with the reported results. The reconstructed temperatures in good agreement with the measured temperatures by thermocouples. So the simultaneous reconstruction model can obtain the soot temperature and volume fraction distributions successfully.

Keywords: flame soot, temperature, volume fraction, three-dimensional simultaneous reconstruction

PACS: 07.20.Dt, 44.40.+a

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2009CB219802), the Programme of Introducing Talents of Discipline of Universities of China (Grant No. B08026), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA061302-3).

† E-mail: liudong118@gmail.com