

# 可调谐半导体激光吸收光谱技术应用于平面火焰中 气体浓度二维分布重建的研究

姜治深, 王飞\*, 邢大伟, 许婷, 严建华, 岑可法

浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

**摘要** 研究了可调谐半导体激光吸收光谱技术实现气体浓度二维分布测量的方法, 探索了重建气体浓度二维分布的模型和算法, 并采用数值模拟的方式对重建程序进行了可行性验证。搭建了由 24 束激光束构成的场参数测量系统, 以甲烷/空气预混火焰中  $H_2O$  为测量对象, 运用重建程序重建了火焰中  $H_2O$  浓度的二维分布, 实验结果分析表明, 重建结果较真实的反应了火焰中  $H_2O$  浓度的二维分布状态, 为实现优化燃烧控制提供重要数据。

**关键词** 可调谐激光吸收光谱; 二维重建; 代数迭代重建算法

**中图分类号:** TN247, TK16 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)11-2891-06

## 引言

可调谐半导体激光吸收光谱技术(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)是利用半导体激光器驱动电流和温度的变化实现波长的调制, 通过对待测气体的快速扫描, 实现诸如温度、浓度、压强、速度等参数的窄线宽测量方法<sup>[1-4]</sup>。该技术具有可靠性高、抗干扰能力强、响应速度快等特点, 已经广泛应用于环境监测、燃烧测量等领域<sup>[5-7]</sup>。

在碳氢燃料燃烧中,  $H_2O$  作为燃烧产物之一, 其浓度分布对监控燃烧的反应状态具有十分重要的意义。传统 TD-LAS 技术测量的气体浓度多为整个光路上的平均值, 当测量环境中气体浓度梯度变化较大时, 显然不能真实反应实际的状态。本工作以 TDLAS 技术为基础, 搭建了 24 束激光束平面火焰测量系统, 并利用代数迭代重建算法(algebraic reconstruction technique, ART)重建了甲烷/空气预混平面火焰中  $H_2O$  浓度的二维分布。通过数值模拟验证了该测量方法的可行性, 分析了重建浓度分布结果的选取原则。

## 1 基本原理与重建程序设计

### 1.1 TDLAS 测量原理

激光器发射一束频率为  $\nu(\text{cm}^{-1})$  的单色光穿过火焰区域, 当其频率与气体吸收组分频率相同时, 激光能量被吸收, 入射光强  $I_0$  和透射光强  $I_t$  遵循 Beer-Lambert 定律<sup>[8]</sup>

$$T_\nu = \left( \frac{I_t}{I_0} \right) = \exp(-PXL S(T)\varphi(\nu - \nu_0, T)) = \exp(-\alpha_\nu L) \quad (1)$$

其中  $T_\nu$  定义为传播分数,  $\alpha_\nu(\text{cm}^{-1})$  为吸收系数,  $P(\text{atm})$  为总压,  $X$  为组分摩尔浓度,  $L(\text{cm})$  为吸收气体的吸收光程,  $\varphi(\text{cm}^{-1})$  为线型函数, 满足  $\int \varphi d\nu = 1$ ,  $S(T)(\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1})$  为谱线强度, 是温度  $T(\text{K})$  的函数<sup>[9]</sup>。

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \exp\left[-\frac{hcE''_i}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \times \left[ \frac{1 - \exp(-hc\nu/kT)}{1 - \exp(-hc\nu/kT_0)} \right] \quad (2)$$

其中  $T_0(\text{K})$  为参考温度,  $h(\text{J}_s)$  为普朗克常数,  $E''_i(\text{cm}^{-1})$  为低能级能量,  $k(\text{J} \cdot \text{K}^{-1})$  为波尔兹曼常熟,  $c(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$  为真空中光速,  $\nu$  为跃迁频率,  $Q(T)$  为分割函数。定义积分吸收率  $A$

$$A = \int \alpha_\nu L d\nu = PLXS(T) \quad (3)$$

### 1.2 重建程序设计

首先将探测区域离散化为  $I=N \times N$  个网格, 任意第  $j$  条激光束  $S$  穿过待测区域第  $i$  个网格的长度为  $L_{ij}$ , 如图 1 所示。

收稿日期: 2012-03-21, 修订日期: 2012-06-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB201506, 2009CB219802), 国家自然科学基金项目(51276165), 浙江省自然科学基金项目(R1100395)和高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110101110019)资助

作者简介: 姜治深, 1982 年生, 浙江大学能源清洁利用国家重点实验室硕士研究生 e-mail: jzshen@163.com

\* 通讯联系人 e-mail: wangfei@zju.edu.cn

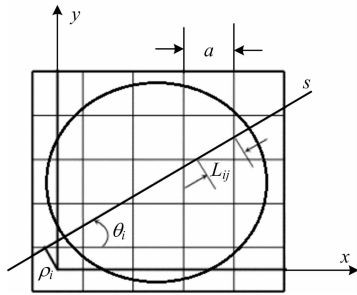


Fig. 1 Schematic of the laser passing through the test region

将坐标原点定在左下角网格的中心位置，建立任意激光束  $S$  与网格边界直线方程。由两交点的中点坐标确定所属网格的编号，再求出穿过相应网格距离  $L_{ij}$ 。

依据 Beer-Lambert 定律，频率为  $\nu_1$  的第  $j$  条激光束穿过待测区域的气体吸收离散化方程为

$$A_{\nu_1, j} = \sum_{i=1}^I [PS(T)X]_{\nu_1, i} L_{ij} = \sum_{i=1}^I \alpha_{\nu_1, i} L_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, J) \quad (4)$$

将上式的吸收系数  $\alpha_{\nu_1, i}$  按式(5)进行迭代<sup>[10]</sup>，当满足收敛条件式(6)时，输出相应的  $\alpha_{\nu_1, i}$ 。

$$\alpha_{\nu_1, i}(k+1) = \alpha_{\nu_1, i}(k) + \lambda \frac{A_{\nu_1, j} - \sum_{i=1}^I \alpha_{\nu_1, i}(k) L_{ij}}{\sum_{i=1}^I L_{ij}^2} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, I; j = 1, 2, 3, \dots, J) \quad (5)$$

$$\alpha_{\nu_1, i}(k+1) - \alpha_{\nu_1, i}(k) < \epsilon \quad (6)$$

网格内的温度已知时，可以通过线强计算公式，得到每

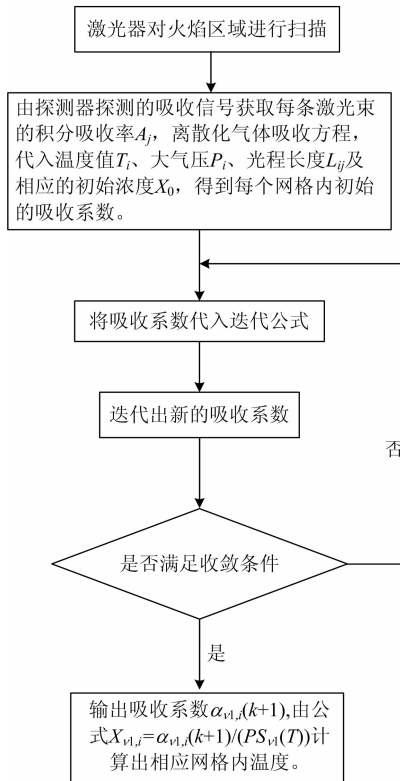


Fig. 2 Reconstruction flowchart of the gas concentration

个网格内的线强  $S_i(T)$  值，浓度值可由式(7)求出。

$$X_{\nu_1, i} = \alpha_{\nu_1, i}(k+1) / (PS_{\nu_1}(T)) \quad (7)$$

气体浓度二维分布重建流程图如图 2 所示。

## 2 系统设计

实验系统的总体设计如图 3 所示。

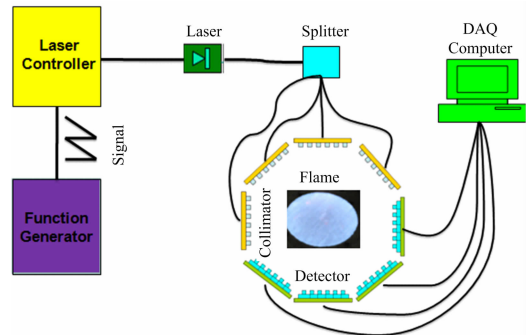


Fig. 3 Design of the experimental system

信号发生器产生一个频率为 1 kHz 的锯齿波扫描信号，将此信号加载到激光控制器 (LDC-3900) 上，控制激光器 (NLK1S5EAAA) 产生一条同时扫描到两条吸收谱线 ( $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ) 波长的激光束，由分光器分为 24 束后从 4 个不同角度扫描平面火焰区域，光电探测器获取吸收信号。

实验台架的仪器布置如图 4 所示。

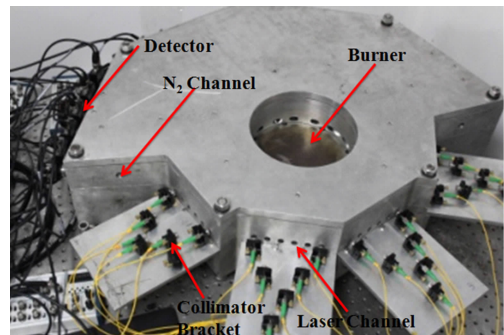


Fig. 4 Layout of the experimental apparatus

装有光纤准直器的光学调整架固定在 4 个支架上，光电探测器安装到另一端，通过光学调整架来校准光路。测量时， $N_2$  孔内通有  $N_2$ ，用来吹扫激光测孔，以防止燃烧产生的  $H_2O$  进入激光测孔内对吸收信号产生影响。中间圆形区域为甲烷/空气平面火焰燃烧炉，其下面经电动升降机以改变火焰探测位置。

## 3 气体浓度二维分布数值模拟重建

为了验证重建程序以及实际测量重建结果的正确性，对气体浓度二维分布进行了数值模拟。数值模拟与实际测量重建的主要区别为获取气体吸收积分率  $A_j$  的方式不同：数值模拟中，根据给定假设原始的温度与气体浓度分布计算出气体积分吸收率  $A_j$ ；实际测量中，吸收信号经拟合、积分等数

据处理都得到气体积分吸收率  $A_j$ 。

数值模拟试验中, 选取的  $H_2O$  吸收谱线 ( $7\ 154.354\ cm^{-1}$ ) 作为参考谱线来计算相应参数。为了模拟实际的测量误差, 将计算得到的气体积分吸收率  $A_j$  分别添加不同的随机误差 (0%, 1%, 5%, 8%) 进行重建。假设原始的温度与气体浓度分布如图 5 所示, 数值模拟实验表明, 不同的迭代初始值  $X_0$  对重建结果无影响, 但是初始值与真实值相差越大, 所需要的迭代次数也会随之增加。重建出的不同随机误差下气体浓度二维分布如图 6 所示, 重建结果的比较如图 7 所示。

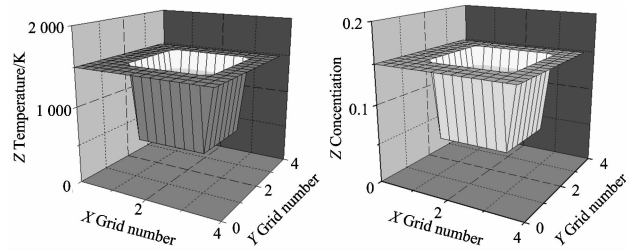


Fig. 5 Assumed temperature and gas concentration distribution

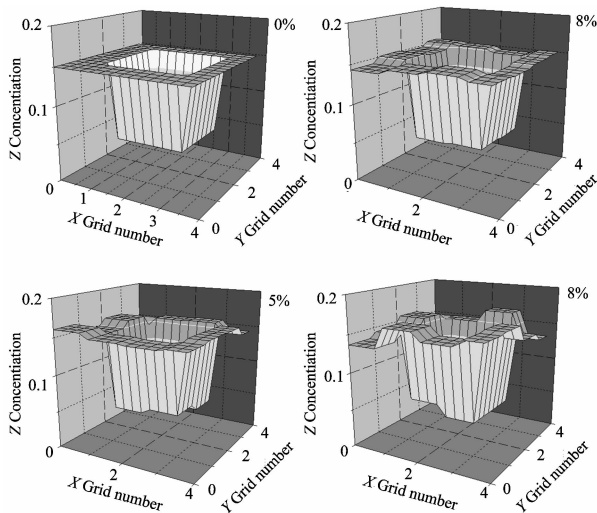


Fig. 6 Reconstruction results with different random errors

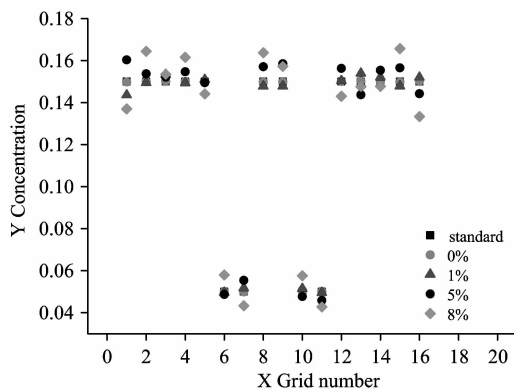


Fig. 7 Comparison of gas concentration reconstructed with different random errors

从不同随机误差下重建结果可以看出, 重建的气体浓度二维分布较准确反应假定的气体浓度分布情况。为了比较重建误差的大小, 给定图像重建中两个评价指标:

最大相对误差  $e_{max}$ , 其定义式(8)如下

$$e_{max} = \text{Max}_i \frac{|r_i - o_i|}{o_{max} - o_{min}} \quad (8)$$

平均误差  $e_{aver}$ , 其定义式(9)如下

$$e_{aver} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|r_i - o_i|}{o_{max} - o_{min}} \quad (9)$$

其中,  $r_i$  为重建图像中的像素值,  $o_i$  为假定图像中相应网格内的像素值,  $N$  为网格数量, 即图像像素总数,  $i$  为网格数编号,  $o_{max}$  为假定图像像素的最大值,  $o_{min}$  为假定图像像素的最大值。

不同随机误差下重建结果的最大相对误差  $e_{max}$  与平均误差  $e_{aver}$  如图 8 所示。

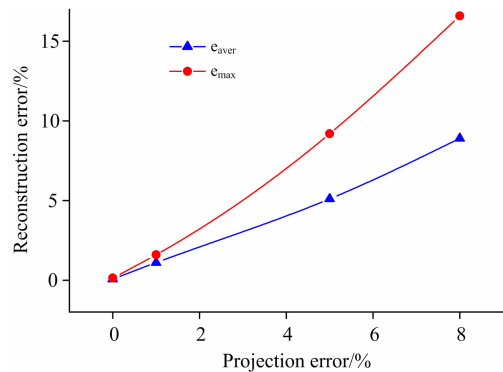


Fig. 8 Comparison of reconstruction error at different random errors

从比较图中可以更清晰的发现, 随着对投影数据添加随机误差的增加, 重建结果的误差也急剧上升。为此, 实验中尽量降低测量与数据处理过程中带来的误差。

#### 4 平面火焰中 $H_2O$ 浓度二维分布的测量重建

测量过程中, 在平面火焰炉上面的多孔板上安放一块金属块, 这样炉子的中心区域就不能燃烧, 将使中间区域气体浓度与温度低, 边缘高, 即产生较大的浓度与温度梯度, 其火焰的形状如图 9 所示。

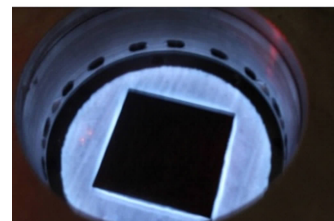


Fig. 9 Photograph of flame

热电偶测量火焰区域的温度约为 920 K, 中间无火焰区域的温度约为 510 K, 因此, 重建区域的温度分布如图 10 所

示。

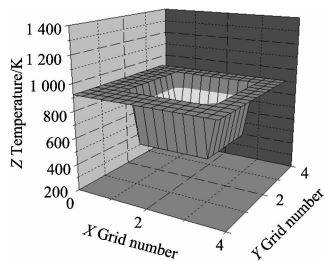


Fig. 10 Temperature distribution measured by thermocouple

测量时, 光电探测器从扫描锯齿波的下降沿开始采集数据, 吸收前的初始信号及未经处理的原始吸收信号如图 11 和图 12 所示。为了吸收信号图像清晰辨认且由于激光束布置的对称性, 这里给出了 12 束激光束 (7 153.748 和 7 154.354  $\text{cm}^{-1}$ ) 经数据处理后的频域吸收信号, 如图 13 所示。再经积分计算得到每束光路的气体积分吸收率  $A_i$ , 利用气体浓度重建程序计算出气体浓度分布如图 14 所示。

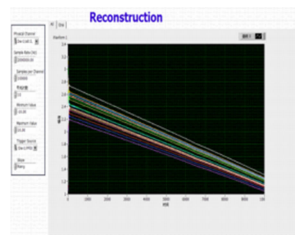


Fig. 11 Original signal

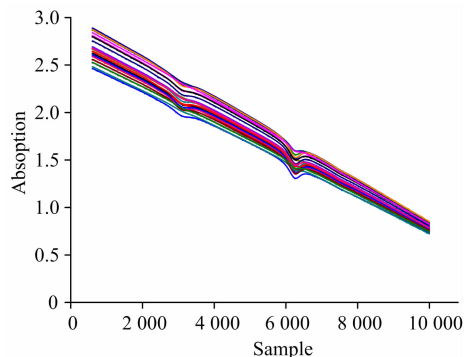


Fig. 12 Absorption signal

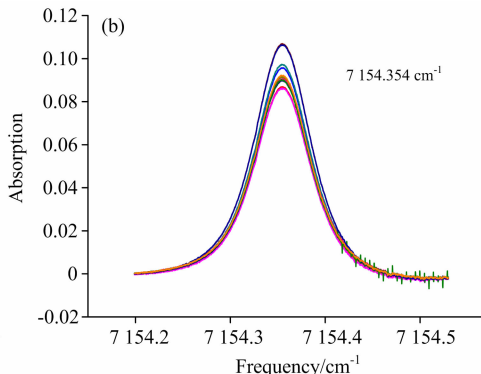
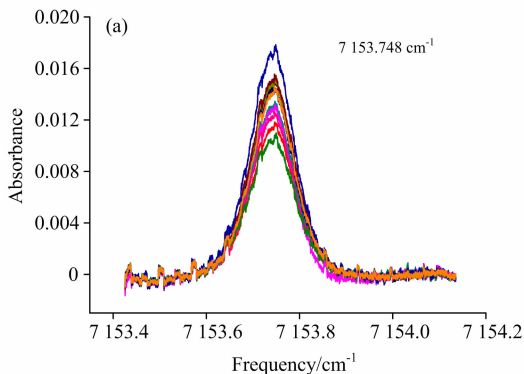


Fig. 13 Absorption signal after data processing

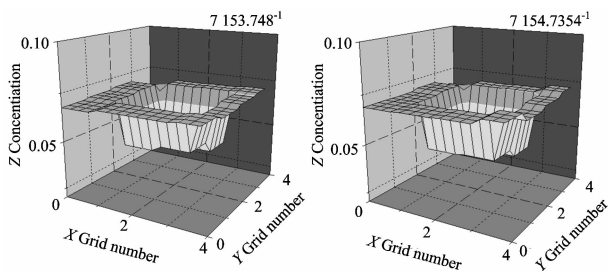


Fig. 14 Gas concentration reconstruction (7 153.748 and 7 154.354  $\text{cm}^{-1}$ )

为了对两条吸收谱线 (7 153.748 和 7 154.354  $\text{cm}^{-1}$ ) 的重建结果进行分析, 在此将重建的气体浓度分布进行比较, 如图 15 所示。

从两条吸收谱线重建出的  $\text{H}_2\text{O}$  浓度分布比较图可以看出, 重建结果相差很小, 又由于两条测量谱线具有相对独立性, 因此可以认为重建结果较好的反应了甲烷/空气平面火

焰中  $\text{H}_2\text{O}$  浓度的二维分布。

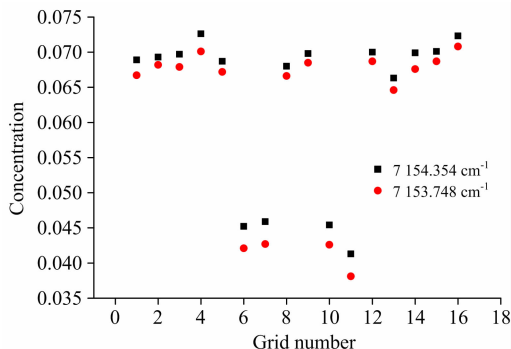


Fig. 15 Comparison of gas concentration reconstructed respectively by the two absorption lines

重建过程中是以  $\alpha_{\nu_i, i} = S(T_i)X_i$  作为变量进行迭代, 而探测区域温度由热电偶测量获得, 存在误差, 将使计算相应探测区域网格内的谱线线强  $S(T_i)$  产生误差, 进而使重建的

浓度产生误差, 因此, 在相同的温度误差前提下, 选取测量谱线线强  $S(T)$  在测量温度范围内随温度变化梯度小的重建结果作为探测区域  $H_2O$  浓度的二维分布。由 HITRAN 数据

库查得的两条吸收谱线线强  $S(T)$  随温度的变化如图 16 所示。

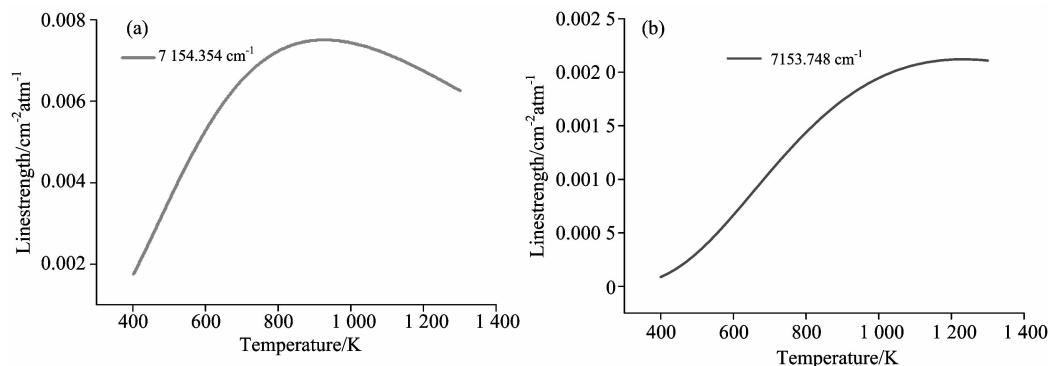


Fig. 16 Line strength as a function of temperature ( $7153.748$  and  $7154.354\text{ cm}^{-1}$ )

探测的火焰区域(900 K), 吸收谱线( $7154.354\text{ cm}^{-1}$ )在此温度范围内线强  $S(T)$  随温度的变化梯度小, 取其重建结果作为火焰区域内  $H_2O$  浓度的二维分布; 非火焰区域(500 K), 吸收谱线( $7153.748\text{ cm}^{-1}$ )在此温度范围内线强  $S(T)$  随温度的变化梯度小, 取其重建结果作为非火焰区域内  $H_2O$  浓度的二维分布。

方法, 克服了传统 TDLAS 技术只是测量光路上气体平均浓度的局限, 实现了火焰中  $H_2O$  浓度的二维分布进行了重建。为了验证重建结果的准确性, 采用了数值模拟的方法对重建程序的可行性进行验证, 然后分析利用两条谱线重建出气体浓度分布的选取原则。

## 5 结 论

利用多角度多光纤同时扫描甲烷/空气预混平面火焰的

## References

- [1] LOU Xiutao, Somesfalean G, CHEN Bin, et al. *Applied Optics*, 2009, 2: 990.
- [2] Wagner Steven, Fisher B T, Fleming J W, et al. *Proceedings of The Combustion Institute*, 2009, 5: 839.
- [3] Lindberg Sven, Lewanderh Marta, Svensson Tomas, et al. *Annals of Otology Rhinology and Laryngology*, 2012, 3: 217.
- [4] ZHANG Liang, LIU Jian-guo, KAN Rui-feng, et al(张亮, 刘建国, 阚瑞峰, 等). *Acta Physica Sinica(物理学报)*, 2012, 61(3): 214.
- [5] Wang Fei, Cen Kefa, Li Ning, et al. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2010, 21: 382.
- [6] Shemshad J, Aminossadati S M, Bowen W P, et al. *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 2012, 106(4): 979.
- [7] Kuu W Y, O'Bryan Kevin R, Hardwick Lisa M, et al. *Pharmaceutical Development and Technology*, 2012, 16(4): 343.
- [8] CHAO Xing, Jeffries J B, Hanson R K. *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 2012, 106(4): 987.
- [9] WANG Jian, HUANG Wei, GU Hai-tao, et al(王健, 黄伟, 顾海涛, 等). *Journal of Optoelectronics Laser(光电子·激光)*. 2006, 10(17): 1233.
- [10] Wang Fei, Cen Kefa, Li Ning, et al. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21: 04531.

# The Reconstruction of Two-Dimensional Distributions of Gas Concentration in the Flat Flame Based on Tunable Laser Absorption Spectroscopy

JIANG Zhi-shen, WANG Fei\*, XING Da-wei, XU Ting, YAN Jian-hua, CEN Ke-fa

State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

**Abstract** The experimental method by using the tunable diode laser absorption spectroscopy combined with the model and algo-

rithm was studied to reconstruct the two-dimensional distribution of gas concentration. The feasibility of the reconstruction program was verified by numerical simulation. A diagnostic system consisting of 24 lasers was built for the measurement of H<sub>2</sub>O in the methane/air premixed flame. The two-dimensional distribution of H<sub>2</sub>O concentration in the flame was reconstructed, showing that the reconstruction results reflect the real two-dimensional distribution of H<sub>2</sub>O concentration in the flame. This diagnostic scheme provides a promising solution for combustion control.

**Keywords** Tunable diode laser absorption spectroscopy; Two-dimensional reconstruction; Algebraic reconstruction technique

(Received Mar. 21, 2012; accepted Jun. 20, 2012)

\* Corresponding author

欢迎投稿

欢迎订阅

欢迎刊登广告

## 《光谱学与光谱分析》2013年征订启事

国内邮发代码：82-68

国外发行代码：M905

《光谱学与光谱分析》1981年创刊，国内统一刊号：CN 11-2200/O4，国际标准刊号：ISSN 1000-0593，CODEN码：GYGFED，国内外公开发行，大16开本，292页，月刊；是中国科协主管，中国光学学会主办，钢铁研究总院、中国科学院物理研究所、北京大学、清华大学共同承办的学术性刊物。北京大学出版社出版，每期售价40.00元，全年480元。刊登主要内容：激光光谱测量、红外、拉曼、紫外、可见光谱、发射光谱、吸收光谱、X射线荧光光谱、激光显微光谱、光谱化学分析、国内外光谱化学分析领域内的最新研究成果、开创性研究论文、学科发展前沿和最新进展、综合评述、研究简报、问题讨论、书刊评述。

《光谱学与光谱分析》适用于冶金、地质、机械、环境保护、国防、天文、医药、农林、化学化工、商检等各领域的科学研究单位、高等院校、制造厂家、从事光谱学与光谱分析的研究人员、高校有关专业的师生、管理干部。

《光谱学与光谱分析》为我国首批自然科学核心期刊，中国科协优秀科技期刊，中国科协择优支持基础性、高科技学术期刊，中国科技论文统计源刊，“中国科学引文数据库”，“中国物理文摘”，“中国学术期刊文摘”，同时被国内外的CSCD，SCI，AA，CA，Ei，PJK，MEDLINE，Scopus等文献机构收录。根据国家科技部信息研究所发布信息，中国科技期刊物理类影响因子及引文量《光谱学与光谱分析》都居前几位。欢迎国内外厂商在《光谱学与光谱分析》发布广告（广告经营许可证：京海工商广字第8094号）。

《光谱学与光谱分析》的主编为高松院士。

欢迎新老客户到全国各地邮局订阅，若有漏订者可直接与《光谱学与光谱分析》期刊社联系。

联系地址：北京市海淀区学院南路76号（南院），《光谱学与光谱分析》期刊社 邮政编码：100081

联系电话：010-62181070，62182998

电子信箱：chnghpxygpfx@vip.sina.com；修改稿专用邮箱：gp2008@vip.sina.com

网 址：http://www.gpxygpfx.com