

# 基于 TDLAS 技术在垃圾焚烧中 HCl 的在线监测应用

刘立富<sup>1,2</sup> 张 涵<sup>1</sup> 温作乐<sup>1</sup> 蒋嗣航<sup>1</sup> 于志伟<sup>1</sup>

<sup>1</sup>杭州泽天科技有限公司, 浙江 杭州 310052

<sup>2</sup>浙江工业大学经贸管理学院, 浙江 杭州 310023

**摘要** HCl 气体是垃圾焚烧排放的污染气体之一, 不仅能够对焚烧设备和监测仪器造成腐蚀, 而且会对人体产生危害。对 HCl 浓度进行有效在线监测关系到焚烧设备的使用和监测仪器的运行。基于可调谐半导体激光吸收光谱 (TDLAS) 技术, 研发出一种在线监测 HCl 浓度的激光气体分析仪。通过实验室测试可知, 基于 TDLAS 技术的激光气体分析仪线性误差不高于  $\pm 1\%$  F.S 且具有很好的稳定性指标。该气体分析仪在垃圾焚烧烟气排放处的应用, 表明  $1.742\ \mu\text{m}$  吸收谱线能够进行 HCl 浓度的检测。该分析仪具有不受背景气体交叉干扰、不受粉尘与视窗污染影响、响应速度快以及可靠性高等优点。

**关键词** 大气光学; 可调谐半导体激光吸收光谱; HCl 监测; 垃圾焚烧

中图分类号 O433.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.110101

## Application of TDLAS Technique to HCl Online Monitoring in Waste Incineration

Liu Lifu<sup>1,2</sup> Zhang Han<sup>1</sup> Wen Zuole<sup>1</sup> Jiang Sihang<sup>1</sup> Yu Zhiwei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hangzhou Zetian Technology Co., Ltd, Hangzhou, Zhejiang 310052, China

<sup>2</sup>College of Economics and Management, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

**Abstract** HCl gas is one of the waste incineration emissions. It does not only corrode the incineration equipment and monitoring instrument, but also harms human health. Effective online monitoring of the HCl gas concentration ensures normal use of the incineration equipment and function of the monitoring instrument. An online HCl concentration analyzer based on tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) is presented. The laboratory tests show that the linearity error of the analyzer is not higher than  $\pm 1\%$  F.S and the stability of the analyzer is good. The analyzer has been successfully applied to the exhaust vent of a waste incineration equipment for continuous monitoring. The results show that the  $1.742\ \mu\text{m}$  absorption spectrum can be used to measure HCl concentration. The analyzer has the advantages of short response time, high reliability and the measurement does not be interfered by background gas, dust and window stains.

**Key words** atmospheric optics; tunable diode laser absorption spectroscopy; HCl monitoring; waste incineration

**OCIS codes** 010.1030; 010.1120; 120.3930; 220.4830

## 1 引言

随着城市的扩张和工业的发展, 城市生活垃圾和工业垃圾处理问题日益突出。同垃圾填埋方式相比, 焚烧技术具有处理量大、处理速度快、减量化明显(体积减少 80% 以上)、无害化彻底以及可利用余热发电实现资源优化等显著特点。因此, 垃圾焚烧成为了许多发达城市选择的主要垃圾处理方式之一<sup>[1]</sup>。然而, 垃圾焚烧排放烟气造成的二次污染问题也逐渐引起人们的重视。其中, 排放烟气中的 HCl 是垃圾焚烧产生的主要污染气体之一。自 2016 年 1 月 1 日起, 现有生活垃圾焚烧炉排放烟气中 HCl 气体污染限值为 24 h 取值均值不超过  $50\ \text{mg}/\text{m}^3$ <sup>[2]</sup>。在环保监测领域, 需要有效实现低浓度 HCl 的在线监测, 为环保提供可靠数据。不仅排放到大气中的 HCl 气体会造成环境污染, 焚烧系统中的 HCl 还会影响焚烧设备的安全运行。因此, 实现 HCl 浓度的在线监测对垃圾焚烧炉优化工艺和达标排放具有重要的意义。

收稿日期: 2015-05-14; 收到修改稿日期: 2015-06-01; 网络出版日期: 2015-10-20

作者简介: 刘立富(1985—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事激光光谱分析技术方面的研究。E-mail: lifu\_liu@126.com

近年来,光学非接触式气体检测技术发展十分迅速,基于可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)的气体测量技术具有无需预处理、响应快速、测量准确等优势,成为了当前气体实时在线检测的代表技术之一。TDLAS技术的发展为HCl的在线监测提供了一种可行的技术手段<sup>[3-4]</sup>。目前,国内外针对TDLAS技术的研究机构逐渐增加<sup>[5]</sup>,技术研究的重心更多集中在钢铁冶金和石油化工等行业应用,如对O<sub>2</sub>和CO的测量<sup>[6-7]</sup>等,国内基于TDLAS技术在垃圾焚烧行业中对HCl监测的应用并不多。

本文介绍了一种基于TDLAS技术的HCl在线监测激光气体分析仪,该设备采用垂直腔面发射激光器(VCSEL)作为可调谐激光光源,将频率发生电路产生的三角波信号和正弦波信号叠加在激光器驱动电流上,对半导体激光器输出波长进行扫描和调制。在接收端将调制的激光进行光电转换,并将输出电信号通过锁相放大器的同步检波得到二次谐波信号。通过实验室测试和现场实际使用验证,证明了该激光气体分析仪能够满足垃圾焚烧行业对HCl浓度在线监测的使用要求。

## 2 基本原理

### 2.1 Beer-Lambert 定律

在未饱和的弱吸收情况下,发射出的激光通过被测气体的光强衰减可以使用Beer-Lambert关系进行表述<sup>[8]</sup>:

$$I_{\nu} = I_0 T(\nu) = I_0 \exp[-S(T)g(\nu - \nu_0)PXL], \quad (1)$$

式中 $I_0$ 和 $I_{\nu}$ 分别为频率为 $\nu$ 的窄带激光入射时和经过光程为 $L$ 、气体压力为 $P$ 和体积浓度为 $X$ 的气体后的光强, $S(T)$ 为气体吸收的谱线强度,线型函数 $g(\nu - \nu_0)$ 表示该吸收谱线的形状<sup>[9]</sup>,它与气体温度、压力及成分含量等因素有关。在近红外区域,气体谱线吸收强度较弱,一般会满足

$$S(T)g(\nu - \nu_0)PXL \leq 0.05. \quad (2)$$

当满足(2)式条件时,被测气体浓度结果会有较好的线性,此时(1)式可近似等于(3)式:

$$I_{\nu} \approx I_0 [1 - S(T)g(\nu - \nu_0)PXL]. \quad (3)$$

### 2.2 谱线强度

谱线强度 $S(T)$ 是气体温度的函数,常规气体的 $S(T)$ 参数可在分子光谱数据库HITRAN中查询,一定温度下的 $S(T)$ 计算公式为

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \exp\left[-\frac{hcE}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \times \left[\frac{1 - \exp(-hc\nu_0/kT)}{1 - \exp(-hc\nu_0/kT_0)}\right], \quad (4)$$

式中 $Q(T)$ 为分子内部分割函数, $E$ 为分子跃迁基能,  $h$ 为普朗克常数, $k$ 为波尔兹曼常数, $c$ 为光速, $\nu_0$ 为谱线中心频率, $S(T_0)$ 为参考温度 $T_0$ 下的谱线强度。

$Q$ 可以通过多项式拟合得到近似值:

$$Q(T_i) = a + bT_i + cT_i^2 + dT_i^3, \quad (5)$$

式中系数 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 根据不同的气体和温度范围有不同的取值<sup>[10]</sup>。表1为HCl分子内部分割函数的多项式系数在不同温度范围内的取值。

表1 HCl分子内部分割函数(TIPS)多项式系数  
Table 1 Polynomial coefficients of HCl TIPS

Coefficient	70 K ≤ T ≤ 500 K	500 K < T ≤ 1500 K	1500 K < T ≤ 3005 K
$a$	2.8627	2.5039	9.2445 × 10 <sup>1</sup>
$b$	0.53122	0.5443	0.35539
$c$	6.7464 × 10 <sup>-6</sup>	-3.8656 × 10 <sup>-5</sup>	9.6272 × 10 <sup>-5</sup>
$d$	1.673 × 10 <sup>-9</sup>	3.9793 × 10 <sup>-8</sup>	7.1602 × 10 <sup>-9</sup>

### 2.3 波长调制光谱

在气体检测与浓度分析中,为了提高探测灵敏度,一般会根据现场工况选择合适的吸收谱线和合适的激光器调制参数。利用波长调制技术,用正弦信号调制和锁相放大器提取气体吸收信号的二次谐波成为抑制噪声的重要手段<sup>[11]</sup>。TDLAS技术利用激光波长的可调谐性,获取待测气体特征吸收的光谱谱线进行定量分析。波长调制光谱技术在TDLAS系统的具体应用是高频正弦信号对激光发射频率进行高频调制,调制后

的激光发射频率为

$$\nu(t) = \bar{\nu}(t) + a \cos(2\pi ft), \quad (6)$$

式中  $\bar{\nu}(t)$  为未加正弦波调制的激光频率,  $a$  为正弦波电流调制引起的激光频率变化幅值,  $f$  为正弦波调制频率。波长调制光谱技术使用锁相放大器检测激光束穿过被测气体后激光透射率信号的二次谐波分量, 在弱吸收情况下, 输出二次谐波信号为<sup>[12]</sup>

$$V_{2f} \propto I_0 \frac{S(T)PXL}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} g(\bar{\nu} - \nu_0 + a \cos \theta) \cos 2\theta d\theta. \quad (7)$$

通过(7)式可知, 在特定的吸收谱线和一定的温度、压力、光程及激光频率调制幅度下, 可以得到气体浓度与二次谐波之间的关系为

$$X = K \frac{V_{2f}}{I_0}, \quad (8)$$

式中  $V_{2f}$  为二次谐波分量信号,  $I_0$  为光强直流分量,  $K$  为标定系数, 通过分析这些参数, 即可获取气体浓度信息。

### 3 产品结构

随着 TDLAS 技术的成熟和经验的积累, 激光气体分析仪在现场的稳定性和可靠性越来越好。图 1 为杭州泽天科技有限公司自主研发设计的 LGT-100 激光气体分析仪的现场安装示意图, 采用一体化隔爆的防爆型式, 可应用在 1 区和 2 区爆炸性场合。

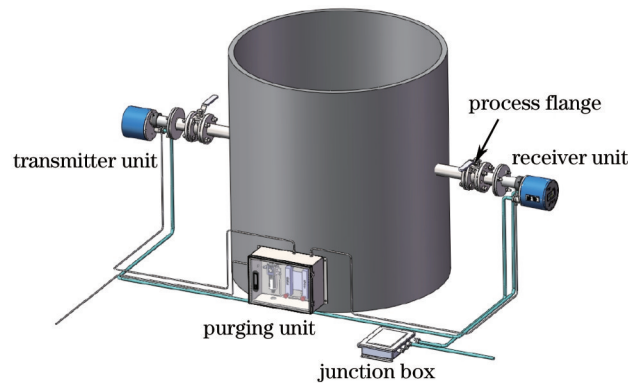


图 1 LGT-100 激光气体分析仪安装示意图

Fig.1 Installation schematic of LGT-100 laser gas analyzer

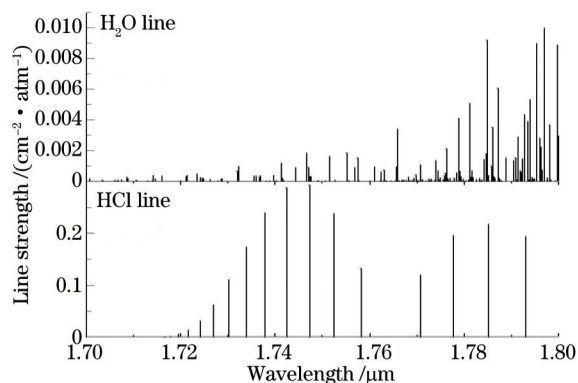
LGT-100 激光气体分析仪主要由发射单元、接收单元、吹扫单元、接线盒及法兰部件等组成。发射单元包括半导体激光器、准直光学系统和驱动电路板等。激光器被调制到特定的波长范围内, 使其能够进行气体检测。接收单元包括光电检测器、透镜、接收主板、检测器板和显示板。透镜将准直激光聚焦于光电检测器上, 探测到的光信号被转化为电信号进行处理后, 得到二次谐波信号信息, 再将二次谐波信息转化为浓度信息, 并将浓度信息显示在有机发光二极管(OLED)屏上。吹扫单元由过滤器、减压阀和稳流装置等组成, 可为 LGT-100 激光气体分析仪的吹扫提供稳定的流量。接线盒内含有输入输出信号接口, 方便用户接入电源信号以及对外接出 4~20 mA 输出信号、4~20 mA 输入信号和开关量输出信号等。仪器发射单元和接收单元通过仪器法兰和焊接法兰安装在烟囱管道两侧, 光路调节方便, 实现非耦合方向调节。

此外, 仪器采用重量轻、视角宽、响应快的 OLED 屏幕, 工作温度可以达到  $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 可以满足工业、环保监测场合环境温度变化范围的使用要求。仪器提供 RS-232 端口和 RS-485 端口, 可以连接上位机进行数据连续读取和存储, 提供数字量/模拟量输入输出接口, 进行温度、压力补偿和数据信息传输。

## 4 实验数据

### 4.1 吸收谱线选择

通过 HITRAN 光谱数据库在 296 K 温度下从  $1.7 \sim 1.8\text{ }\mu\text{m}$  查询 HCl 和  $\text{H}_2\text{O}$  的吸收谱线, 如图 2 所示。尽量选择谱线吸收明显且与背景气体谱线相隔较远的谱线, 故选择  $1.742\text{ }\mu\text{m}$  处的吸收谱线。

图2 HCl和H<sub>2</sub>O在1.7~1.8 μm波长范围内的吸收谱线Fig.2 Absorption spectra of HCl and H<sub>2</sub>O in the range of 1.7~1.8 μm

#### 4.2 实验装置

HCl在线监测激光气体分析仪利用波长可调谐性选择合适的激光器参数,使用德国Vertilas公司生产的SE-A4型激光器,日本HAMAMATSU品牌的G12181-020K光电探测器。三角波扫描频率为10 Hz,扫描幅度为1.5 V,正弦波调制信号频率为40 kHz,幅度为320 mV。将激光器工作电流调节到5 mA,工作温度控制在30 ℃,实现激光器中心输出波长为1.742 μm,输出激光功率约为0.8 mW。气体吸收池长度为0.5 m,该特定波长的激光通过被测HCl气体后,由光电探测器接收。光电探测器将光信号转换为电信号,再通过锁相电路进行信号处理。该实验装置的工作原理如图3所示。

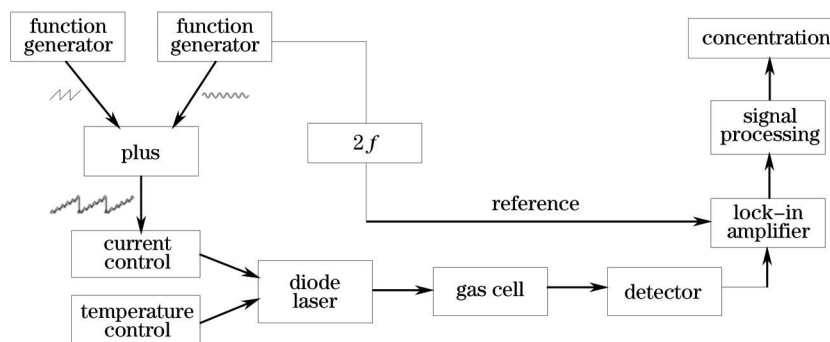


图3 工作原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of working principle

#### 4.3 实验结果

实验中使用200 μmol/mol的HCl标气(以N<sub>2</sub>为底),通过瑞士Vogtlin公司高精度Red-y smart质量流量控制器(MFC)对200 μmol/mol的HCl和N<sub>2</sub>(纯度大于等于99.99%)进行配气验证分析仪线性度,测试数据表明该款仪器的线性误差不大于±1% F.S,线性测试结果如表2和图4所示。由此可见,在1.742 μm激光吸收波长处可进行HCl气体浓度分析。

表2 线性数据

Table 2 Linear data

Measured concentration /(μmol/mol)	Theoretical concentration /(μmol/mol)	Fitting concentration /(μmol/mol)	Relative error /(% F.S)
0.2	0	-0.1	-0.05
40.2	40	40.1	0.05
60.8	60	60.8	0.40
98.9	100	99.0	-0.50
139.5	140	139.8	-0.10
159.8	160	160.1	0.05
199.8	200	200.3	0.15

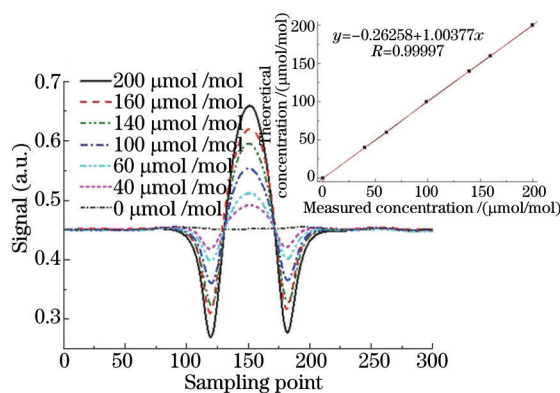


图4 不同浓度的二次谐波与线性曲线

Fig.4 Second harmonic of different concentrations and linear curves

LGT-100激光气体分析仪在实验室进行较全面的系统测试,包括功能测试、性能测试、安规测试、电磁兼容性测试以及环境测试等。一台HCl激光气体分析仪在空气中的零点稳定性如图5所示,从图5看出该款产品的稳定性能可以满足用户的现场使用。

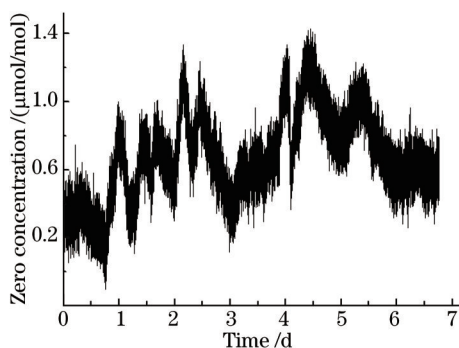


图5 激光气体分析仪在空气中的零点稳定性

Fig.5 Zero stability of the laser gas analyzer

## 5 现场应用

研制的LGT-100激光气体分析仪应用于垃圾焚烧行业。在垃圾焚烧厂的不同烟气排放口处分别安装4台激光气体分析仪进行HCl气体浓度的监测,均采用原位测量方式。以其中一台仪器为例,停炉与进行垃圾焚烧时的测量曲线如图6所示。通过测量曲线得出,进行垃圾焚烧时,LGT-100激光气体分析仪能够快速检测到HCl气体的浓度值,响应时间可达到1 s。

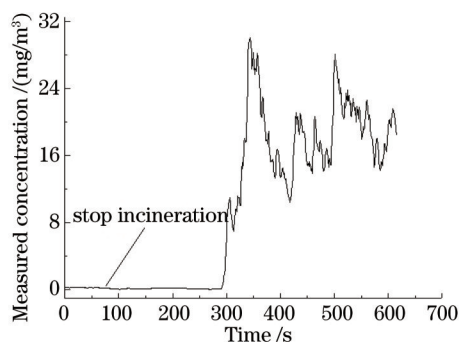


图6 现场原位测量数据

Fig.6 *In situ* measured data

由于垃圾焚烧工况比较恶劣,含有较高浓度的粉尘和水汽,LGT-100激光分析仪在现场使用时为保证窗片不受污染,将吹扫单元流量控制在不小于1000 L/h条件下,在一个月的运行过程中,4台仪器的透射率均未出现明显下降趋势。随着仪器的长期使用,粉尘杂质会附着在光学窗片表面,导致透射率逐渐降低,当透射率低于10%时测量误差会偏大。此时,只需将发射单元和接收单元从仪器法兰上面拆卸下来,使用酒精

或丙酮擦拭光学窗片即可。

通过在垃圾焚烧厂的HCl浓度监测,发现激光气体分析仪的二次谐波信号仅扫描到HCl气体的吸收峰,未扫描到任何干扰气体的吸收峰。因此,TDLAS技术在1.742  $\mu\text{m}$ 波长处进行HCl气体浓度测量时能够有效地避免背景气体的交叉干扰。

## 6 结 论

基于TDLAS技术的激光气体分析仪发出窄频激光,使得垃圾焚烧中的HCl浓度测量不受背景气体的干扰。采用三角波扫描技术和吹扫保护措施,保证透射率的降低满足现场测量要求。原位激光测量方式响应速度快、可靠性高、维护周期短,能够有效地对垃圾焚烧中排放的HCl气体浓度进行在线测量,为环保监测提供可靠数据。

### 参 考 文 献

- 1 Yi Jing, Liu Yangsheng. Research advances in mechanisms of hydrogen chloride generation during municipal solid waste incineration and ITS removing technologies[J]. *Environmental Engineering*, 2012, 30(5): 50-53.  
衣 静, 刘阳生. 垃圾焚烧烟气中氯化氢产生机理及其脱除技术研究进展[J]. *环境工程*, 2012, 30(5): 50-53.
- 2 Ministry of Environmental Protection, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB18485-2014 Standard for pollution control on the municipal solid waste incineration[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014.  
环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. GB 18485-2014生活垃圾焚烧污染控制标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- 3 Shu Xiaowen, Zhang Yujun, Kan Ruifeng, *et al.*. An investigation of temperature compensation of HCl gas online monitoring based on TDLAS method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(5): 1352-1356.  
束小文, 张玉钧, 阚瑞峰, 等. 基于TDLAS技术的HCl气体在线探测温度补偿方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(5): 1352-1356.
- 4 P Werlea, F Slemra, K Maurer, *et al.*. Near- and mid-infrared laser-optical sensors for gas analysis[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, 37(2): 101-114.
- 5 Yuan Song, Kan Ruifeng, He Yabai, *et al.*. Laser temperature compensation used in tunable diode-laser absorption spectroscopy[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0515002.  
袁 松, 阚瑞峰, 何亚柏, 等. 可调谐半导体激光吸收光谱中激光器温度补偿[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0515002.
- 6 Yuan Song, Kan Ruifeng, He Yabai, *et al.*. Tunable diode laser spectroscopy system for carbon dioxide monitoring[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(12): 1208003.  
袁 松, 阚瑞峰, 何亚柏, 等. 基于可调谐半导体激光光谱大气CO<sub>2</sub>监测仪[J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1208003.
- 7 He Ying, Zhang Yujun, Wang Liming, *et al.*. Laser technology for CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O on-line detection in large-scale region[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0115003.  
何 莹, 张玉钧, 王立明, 等. 大尺度区域CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O的激光在线检测技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0115003.
- 8 J Wang, M Maiorov, D Baer, *et al.*. *In situ* combustion measurements of CO with diode-laser absorption near 2.3  $\mu\text{m}$ [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(30): 5579-5589.
- 9 Wang Jian, Huang Wei, Gu Haitao, *et al.*. Gas temperature measurement with tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(9): 1639-1642.  
王 健, 黄 伟, 顾海涛, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱法测量气体温度[J]. *光学学报*, 2007, 27(9): 1639-1642.
- 10 Li Ning. Gas In-Site Measurement and Study of 2D Distribution Reconstruct Using Tunable Diode-Laser Absorption Spectroscopy Technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008: 24-30.  
李 宁. 基于可调谐激光吸收光谱技术的气体在线检测及二维分布重建研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008: 24-30.
- 11 Yang Jiewen. Study and Optimization of Gas Measurement System Using Tunable Laser Absorption Spectroscopy Technology [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009: 14-17.  
杨杰文. 基于调谐激光吸收光谱技术的气体检测系统研究及优化[D]. 天津: 天津大学, 2009: 14-17.
- 12 Gu Haitao, Chen Ren, Ye Huajun, *et al.*. A field gas concentration analyzer based on diode-laser absorption spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Science Instrument*, 2005, 26(11): 1123-1126.  
顾海涛, 陈 人, 叶华俊, 等. 基于DLAS技术的现场在线气体浓度分析仪[J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(11): 1123-1126.

栏目编辑: 吴秀娟