

电站锅炉烟气成分检测的新方法研究

李应保¹, 王东风^{1,2}, 谢天¹, 吴海中²

(1. 华北电力大学 自动化系, 保定 071003;

2. 河北省发电过程仿真与优化控制工程技术研究中心, 保定 071003)

摘要: 电站锅炉尾部烟气成分检测是指导锅炉高效生产和低碳排放的重要手段, 但高温、成分复杂的特殊测量环境导致锅炉烟气成分的测量成为一个难题。应用微积分推导出光吸收度与气体浓度的定量关系, 并对激光测量原理和可调谐二极管激光吸收光谱技术(简称 TDLAS)进行了深入研究, 提出了在锅炉尾部烟道这样的非均匀介质环境中气体浓度测量的新方法。从电厂实际测量结果可以发现, 激光测量方法具有精度高, 安全可靠等优点, 具有很好的应用前景。

关键词: 烟气成分检测; 电站锅炉; 高效生产; 低碳排放; 激光测量技术

中图分类号: TK223.72

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)04-0055-04

Research on New Method of Flue Gas Composition Detection for Utility Boiler

LI Yingbao¹, WANG Dongfeng^{1,2}, XIE Tian¹, WU Haizhong²

(1. Department of Automation North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Hebei Engineering Research Center of Simulation & Optimized Control for Power Generation, Baoding 071003, China)

Abstract: The detection of flue gas in the tail of the utility boiler is the important mean to guide the efficient production and low carbon emission for boiler, however, the accurate measurement of flue gas composition has been a thorny problem resulting from the special measurement environment with high temperature and complex composition. The quantitative relationship between light absorbance and gas concentration was deduced by calculus, and a new method for the measurement of gas concentration in a nonuniform medium environment such as boiler flue gas was obtained by in-depth study for the principle of laser measurement and tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS). The actual measurement results in a boiler show that the laser measurement method has the advantages of high precision, safety and reliability, which has a good application prospect.

Key words: detection of flue gas; utility boiler; efficient production; low carbon emission; laser measurement technology

传统的烟气成分检测方法为直接接触式测量方法, 测量原理基本是根据单一烟气成分的物理化学反应特征与该气体浓度的关系推算该成分的含量。例如, 氧化锆管测量氧浓度的原理就是利用氧化锆探头反应电极的电势差与氧浓度的关系得到锅炉烟气中的含氧量^[1]。类似的测量装置都摆脱不了接

触式测量方法误差大、易损坏等缺点。

近年来, 激光测量技术作为一种新型的非接触式测量^[2]技术得到迅速发展, 国内外已经有相应的研究成果问世并成功应用于电厂、化工厂等大型工业生产领域, 从现场的应用效果来看, 这种非接触式测量技术具有精度高, 易安装和维护等优势。Martz S. 等人^[3]针对激光测量在奥塔姆瓦电站的应用做了详细的调查和研究, 发现电站锅炉的燃烧效率较以前提高了三个百分点, 并有效控制了炉膛内煤灰结渣, 管壁超温等问题。中国科学院力学研究所的李飞等人^[4]采用可调谐二极管激光器吸收光谱技术建立了温度和 H₂O 浓度的测量系统; 胡慧铺等人^[5]开发了一套基于 HITRAN 数据库的甲烷浓度测量装置。

收稿日期: 2017-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61203041); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014MS139); 河北省自然科学基金资助项目(F2014502059)

作者简介: 李应保(1991), 男, 山东临沂人, 在读研究生, 主要从事火力发电过程的燃烧优化和检测技术等方面的研究(e-mail) liyingbao_1991@163.com。

基于激光测量技术的近期研究进展和最新应用成果,本文讨论了光吸收度与气体浓度的定量关系以及可调谐二极管激光器吸收光谱技术在非均匀介质环境中的测量原理。最后,从锅炉现场测量的结果中发现激光测量技术具有灵敏度高,准确,灵活方便等优点,对提高锅炉效率、低碳排放以及降低氮氧化物等有害气体的排放具有意义。

1 激光测量原理

物质对光吸收的定量关系很早就得到科学家的研究。18世纪末的德国物理学家朗伯(Lambert)和19世纪初的光学科学家奥古斯特·比尔(August Beer)都发现了物质对光的吸收与吸光介质的尺寸以及浓度有一定的关系。近现代光学物理实验验证了两者的推论,形成了一个光学基本定律,简称朗伯-比尔定律^[6]。该定律的核心指出任何吸光物质对单色光的吸收程度的大小与该物质的浓度和光程有关,而与单色光的入射强度无关。

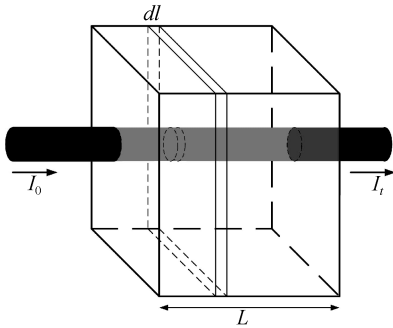


图1 激光穿过介质的示意图

Fig. 1 Diagram of the laser through the medium

应用微积分的原理可推导出光强度与介质浓度的定量关系。如图1所示,在吸光光程为 L 的空间中将垂直入射光光束分割成无限多个厚度为 dl 的小薄片,每个薄片上含有吸光质点的个数为 dn ,且每个吸光质点的平均面积为 s 。则在该小薄片上所有吸光质点的总面积为 $dn \cdot s$ 。

如果一束入射光强度为 I 的激光束垂直射入到该小薄片 dl 上,激光强度被吸光质点吸收后,强度减少了 dI 。由光吸收的微观原理, dI 与薄层中吸光质点的总截面积 $dn \cdot s$ 以及入射光的强度 I_0 成正比^[7],关系式如下:

$$-dI = k_1 \cdot I_0 \cdot dn \cdot s \quad (1)$$

式中: dI 前加上负号的目的是表示激光强度随物质

的吸收而降低; k_1 为比例系数。

假设在浓度为 c 的吸光物质进行实验,则小薄片 dl 中所含的吸光质点 dn 可以转化为用下式表示:

$$dn = NA \cdot c \cdot S \cdot dl \quad (2)$$

式中: NA 为阿伏伽德罗常数,值为 6.02×10^{23} ; S 为激光垂直入射的横截面积。

将式(2)代入式(1),令 $k_2 = k_1 \cdot NA \cdot s \cdot S$,经整理得:

$$-\frac{dI}{I} = k_2 \cdot c \cdot dl \quad (3)$$

对式(3)进行积分:

$$-\int_{I_0}^{I_t} \frac{dI}{I} = \int_0^L k_2 \cdot c \cdot dl \quad (4)$$

可得:

$$\ln \frac{I_0}{I_t} = k_2 \cdot c \cdot l \quad (5)$$

式(5)经常表示为以10为底的对数关系式^[7-8]:

$$\lg \frac{I_0}{I_t} = 0.434 \cdot k_2 \cdot c \cdot l = K \cdot c \cdot l \quad (6)$$

式中: I_0 为激光的入射强度; I_t 为透射强度; $\lg(I_0/I_t)$ 定义为吸光度 A , $1/(\text{mol} \times \text{cm}^{-2})$; K 为吸光系数,是浓度测量中重点研究的一个光学参数。

以上就是朗伯-比尔定律(Beer-Lambert)定量计算光吸收的原理表达式。被测介质的浓度 c (mol/L)可以通过式6得到:

$$c = \frac{K \cdot l}{A} \quad (7)$$

每种气体分子都有自己独特的光谱吸收特性,就像每个人的指纹一样。对于激光这种单色光,每种气体分子对激光的吸收的强弱在波长 λ (cm)上表现不一致,将吸收最强的定义为分子的最大吸收波长 λ_{max} 。在最大吸收波长的窄段内被测分子的吸收强度最大,测量的灵敏度和准确性就越高。HITRAN数据库^[8]将会帮助我们选择出最佳的激光测量波长。

在电站锅炉多灰尘的烟气环境中,激光会受到灰尘的散射作用,激光透射光强度会减小,气体分子的吸光度 A 不容易得到,可调谐二极管激光吸收光谱技术^[9-12]的发明解决了这一难题,它的测量原理是通过调谐同一激光器的波长使扫描覆盖某气体分子吸收和非吸收波段,进而得到激光测量路径上的吸光度 A ,计算出测量气体的体积分数。

TDLAS技术利用被测气体分子光谱吸收的"选

频"特性实现对被测气体浓度的测量。TDLAS 技术的工作原理为: 通过对二极管激光器的输入电流进行控制, 激光器的输出激光波长会随着输入电流的变化而改变, 激光束穿入被测气体后, 获取待测气体在一个完整周期内的吸收光谱曲线和扣除待测气体部分的背景谱线, 对比两谱线的强度可以得出气体的体积分数^[13]。应用 TDLAS 技术在一定范围内波长可调的特点, 可以同时测量锅炉尾部烟气中多种气体的体积分数, 比如氧气、一氧化碳、一氧化氮和水等。

2 实例分析

以国内某电厂引进的美国佐炉科技公司 Zolo-BOSS® 燃烧监控系统^[14]在电站锅炉尾部烟气成分检测中的应用为例, 分析激光在锅炉尾部烟气含氧量, 一氧化碳和氮氧化物的质量浓度测量上的优势以及应用前景。

图 2 是激光测量仪器在锅炉尾部炉墙上的实物安装图。激光测量设备一般成对平行安装在锅炉尾部的同一截面上, 多对激光器构成一个测量网格, 如图 3 所示。每个激光器仅需要在炉墙开 4 cm × 4 cm 的孔即可, 有些锅炉还在锅炉主燃烧区安装多条激光测量路径, 目的是测量燃烧区域的重要参数。

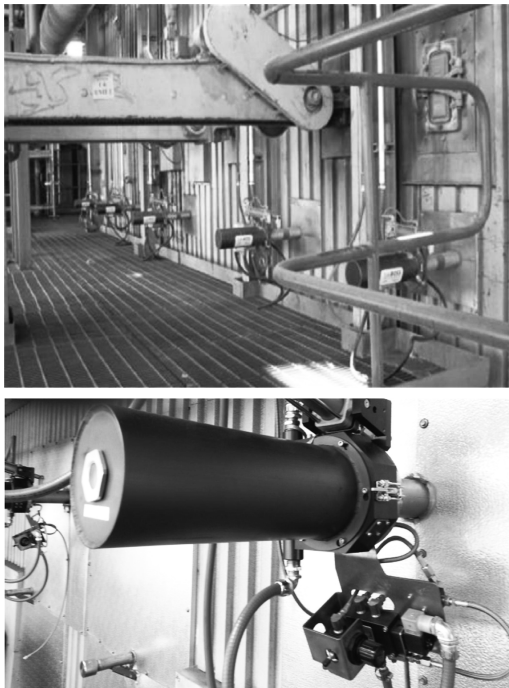


图 2 激光测量器炉外安装示意图

Fig. 2 Laser measurement instrument's installation diagram outside furnace

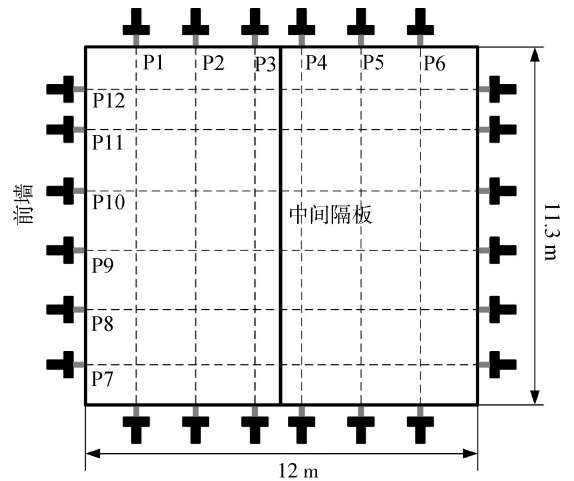


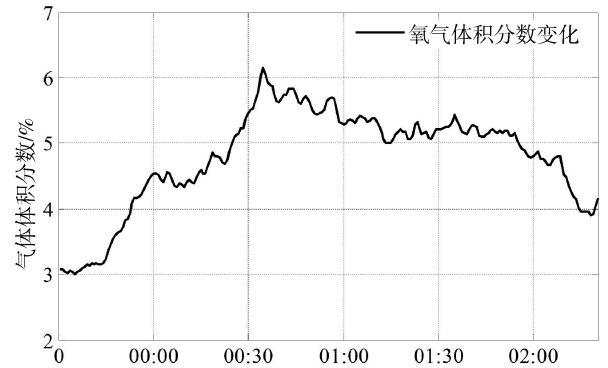
图 3 激光测量截面图

Fig. 3 Laser measurement sectional diagram

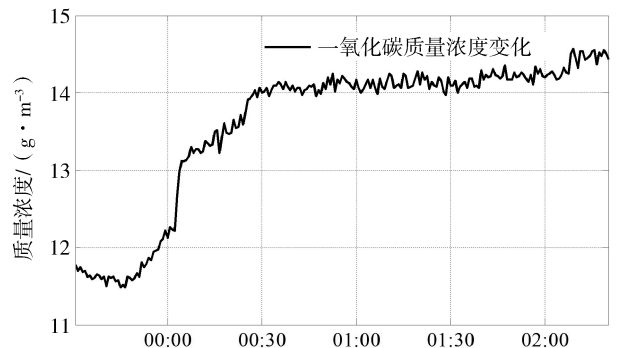
2.1 测量结果与分析

通过连续采集 2 h 内某条激光测量路径上的氧气, 一氧化碳和一氧化氮的体积分数变化, 得到图 4 所示的三组浓度变化趋势图。

由图 4 激光测量路径 P3 上的氧气体积分数, 一氧化碳质量浓度和一氧化氮体积分数平均值的变化趋势可以看出, 激光测量技术具有精度高, 实时性强, 并可以连续无接触地测量。



(a) 氧气含量变化



(b) 一氧化碳含量变化

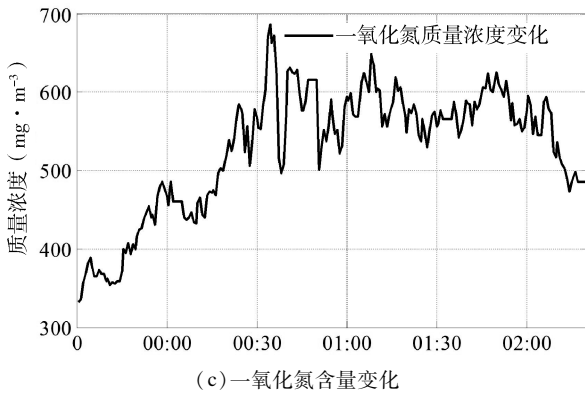


图4 测量路径 P3 上的烟气成分测量结果趋势图

Fig. 4 Flue gas's measurement trends in P3

从夜间 23 点到凌晨 2 点以后的这一时间段, 机组负荷下降的很快, 这会导致炉内燃烧状态发生巨大变化, 给煤量的减少不能及时跟随负荷的降低, 热量得不到有效转换, 烟气出口的氧气, 一氧化碳和二氧化氮体积分数均会攀升, 热力工况的变化可以从锅炉尾部烟气成分的激光测量结果中直观地反映, 协助运行人员及时调节锅炉的风煤比例, 降低热损失和有害气体的排放。

锅炉尾部激光测量网络由前后 6 条和左右 6 条测量路径构成, 通过一定的二维场信息重建技术, 可以得到烟道横截面上的烟气成分的场分布信息, 图 5 为氧气含量的场分布信息。可以发现, 烟道横截面上氧气含量较高区域分布在烟道的左侧, 可以推断是由于左侧空气预热器漏气程度高所导致。

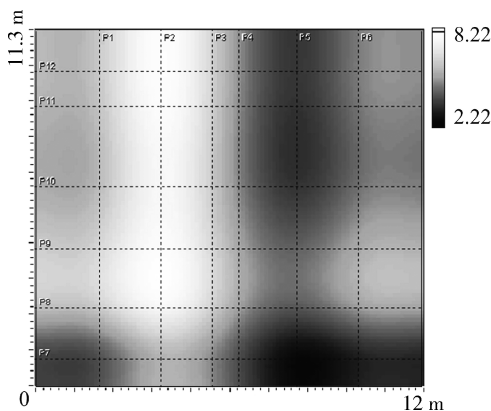


图5 氧气含量的场分布信息

Fig. 5 Oxygen content field distribution information

3 结论

激光测量技术以 HITRAN 数据库为测量辅助工

具, 利用光吸收的朗伯-比尔定律可得出气体分子的浓度值, 测量原理简单, 计算量少, 分子光谱吸收特性具有唯一性, 提高了测量的抗干扰性。从电厂实际测量结果可以得出, 激光光谱测量技术具有精度高, 可测的气体种类多, 安装和维护方便等优势, 适应于粉尘, 烟雾等恶劣环境的气体浓度测量。可见, 激光测量技术在电力、钢铁等工业生产, 化工有害气体检测等领域具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 孙爱玲. 氧化锆氧分析仪在锅炉中的应用及常见故障分析 [J]. 石油和化工设备, 2013, 16(3): 47-49.
ZHANG A L. Application of zirconia oxygen analyzer in boiler and analysis of common faults [J]. Oil and Chemical Equipment, 2013, 16(3): 47-49.
- [2] 肖武华, 李明, 柳静, 等. 非接触测量规范的建立方法研究 [J]. 机械工程与自动化, 2015(1): 145-149.
XIAO W H, LI M, LIU J, et al. Method of establishing non-contact measurement norms [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2015(1): 145-149.
- [3] MARTZ S, HIMES R, HUELSON E. Alliant energy ottumwa generating station with electric power research institute and Zolo technologies [J]. Technical Report, 2012(1): 1-14.
- [4] 李飞, 余西龙, 陈立红, 等. TDLAS 测量甲烷/空气预混平面火焰温度和 H₂O 浓度 [J]. 实验流体力学, 2009, 23(2): 40-44.
LI F, YU X L, CHEN L H, et al. Temperature and water vapour concentration measurements of CH₄ air premixed flat flame based on TDLAS [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2009, 23(2): 40-44.
- [5] 胡慧铺, 徐晓洁, 张阿宏, 等. HITRAN 数据库在甲烷检测仪开发中的应用 [J]. 传感器与仪器仪表, 2008, 24(10): 204-213.
HU H P, XU X J, ZHANG A H, et al. The application of HITRAN database in the exploitation of methane measuring instruments [J]. Instrumentation Technique and Sensor, 2008, 24(10): 204-213.
- [6] 丛日进, 汪井源, 王荣, 等. 近中远红外光在雾中的传输损耗研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(8): 46-51.
CONG R J, WANG J Y, WANG R, et al. Study on the attenuation of different infrareds transmission in fog [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(8): 46-51.
- [7] 赵勇. 色度计的研制及比尔朗伯定律的应用分析 [J]. 科技创新导报, 2013(19): 26-27.
ZHAO Y. The development of colorimeter and the application of Beer-Lambert law [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013(19): 26-27.

配套辅机造价增加 7 550 万元,但由于可以节约大量的燃煤,单台炉每年可节约燃料费用 8 905 万元,1 年即可回收,因此具有巨大的经济效益。

随着社会的发展,国内外钢铁企业产能也将逐步增加,这就使得很多钢铁企业存在着改、扩建的情况,随之将产生大量的剩余煤气,为实现废气零排放,钢铁企业自备电厂也将进行大规模的改、扩建。随着本项目的顺利投产标志着我们在掺烧高炉煤气上又取得了巨大的成果,大比例掺烧高炉煤气工程也将随着钢铁企业的发展而增多。因此本项目研究成果具有良好的市场前景。

本项目的研究、投产不论是经济效益还是社会效益都非常巨大。同时本项目是目前国内外掺烧比例最大的 300 MW 等级亚临界锅炉发电机组,对以后更大容量机组掺烧高炉煤气的研究具有借鉴和指导意义。

参考文献:

[1] 王春波,魏建国,黄江城. 300 MW 高炉煤气与煤粉混燃锅炉热力特性及经济性分析 [J]. 动力工程学报, 2012, 32(7): 517-522.

(下接第 58 页 Continued from Page 58)

[8] ROTHMAN L S, GORDON I E, BABIKOV Y, et al. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2013 (130): 4-50.

[9] 王东风,刘千. 面向燃烧优化的电站锅炉炉膛参数光谱测量与场重建 [J]. 动力工程学报, 2014, 34(8): 599-605.

WANG D F, LIU Q. Combustion optimization-oriented spectral measurement and field reconstruction of furnace parameters for power station boilers [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014, 34(8): 599-605.

[10] 刘慧军,陶少华,杨兵初,等. 基于光谱吸收率积分的气体浓度测量方法 [J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(12): 3490-3494.

LIU H J, TAO S H, YANG B C, et al. Gas concentration measurement based on the integral value of absorptance spectrum [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(12): 3490-3494.

[11] 高强. TDLAS 气体检测灵敏度增强方法及其在漫反射率测量中的应用 [D]. 哈尔滨工业大学, 2014: 20-35.

GAO Q. TDLAS gas detection sensitivity enhancement and ap-

WANG C B, WEI J G, HUANG J C. Thermodynamic characteristics and economic analysis of a BFG/pulverized coal mixed combustion boiler [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(7): 517-522.

- [2] 方立军,武生,胡月龙,等. 掺烧高炉煤气对锅炉传热特性影响的研究 [J]. 华北电力大学学报, 2013, 40(1): 66-70.
- FANG L J, WU S, HU Y L, et al. Study on blended BFG boiler's combustion characteristics [J]. Journal of North China Electric Power University, 2013, 40(1): 66-70.
- [3] 方立军,武生. 掺烧高炉煤气锅炉的热力计算研究 [J]. 电力科学与工程, 2012, 28(9): 53-56 +62.
- FANG L J, WU S. Research of thermodynamic calculation for boiler bended with blast furnace gas [J]. Electric Power Science and Engineering, 2012, 28(9): 53-56 +62.
- [4] 王春波,魏建国,盛金贵,等. 300 MW 煤粉/高炉煤气混燃锅炉燃烧特性数值模拟 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(14): 14-19.
- WANG C B, WEI J G, SHENG J G, et al. Numerical simulation of combustion characteristics of a 300 MW blast furnace gas/pulverized coal combined combustion boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(14): 14-19.

(责任编辑 高春萌)

plication in diffuse reflectance measurement [D]. Harbin Institute of Technology, 2014: 20-35.

- [12] 齐汝宾,赫树开,李新田,等. 基于 HITRAN 光谱数据库的 TDLAS 直接吸收信号仿真研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(1): 172-177.
- QI R B, HE S K, LI X T, et al. Simulation of TDLAS direct absorption based on HITRAN database [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(1): 172-177.
- [13] 何祥林,潘勇刚. TDLAS 技术的发展现状及其应用研究 [J]. 鄂州大学学报, 2017, 24(1): 102-104.
- HE X L, PAN Y G. Research on the Development of TDLAS Technology and Its Application [J]. Journal of Ezhou University, 2017, 24(1): 102-104.
- [14] 刘千,王东风,韩璞. 基于炉膛参数场测量和支持向量机的电站锅炉燃烧状况评价 [J]. 中国测试, 2015, 41(9): 6-10.
- LIU Q, WANG D F, HAN P. Evaluation on combustion condition of power plant boiler based on furnace parameters measurement and support vector machine [J]. China Measurement & Test, 2015, 41(9): 6-10.

(责任编辑 黄肇和)