

不同环境气体下飞灰等离子体特性分析

沈跃良¹ 李旭² 刘亚明¹ 樊炬² 陈前明³ 陆继东^{2*} 姚顺春²

¹ 广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州 510600
² 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640
³ 广东省粤电集团有限公司沙角 C 电厂, 广东 东莞 523936

摘要 将激光诱导击穿光谱技术 (LIBS) 应用于测量飞灰中 C、Si、Al、Mg 和 Fe 等主要元素, 飞灰样品与粘结剂 KBr 混合压制成压片, 对比分析不同环境气体 (CO₂, 空气, N₂, Ar) 下飞灰等离子体特性, 探究环境气体对飞灰测量的影响。研究表明 Ar 环境下光谱强度最高, N₂ 次之, 空气环境下强度稍低于 N₂ 环境, 而 CO₂ 环境下不仅整体光谱强度最低, 且由于背景气体 CO₂ 中存在的 C 元素被激发, 对飞灰含碳量的测量存在严重的干扰。同时对比不同环境条件下的等离子体温度特性, 结果表明 Ar 条件下等离子体温度最高, CO₂ 条件下等离子体温度最低, 这也表明在 CO₂ 环境下最难激发。

关键词 光谱学; 激光诱导击穿光谱; 环境气氛; 飞灰; 等离子体; 光谱特性

中图分类号 O433 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0515002

Study on Plasma Characteristics of Fly Ash in Different Gas Environments

Shen Yueliang¹ Li Xu² Liu Yaming¹ Fan Ju² Chen Qianming³

Lu Jidong² Yao Shunchun²

¹ Electric Power Research Institute, Guangdong Power Grid Co., Ltd, Guangzhou, Guangdong 510600, China
² School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China
³ Shajiao C Power Station, Guangdong Yudean Group Co., Ltd, Dongguan Guangdong 523936, China

Abstract Using laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), the main elements in fly ash, including C, Si, Al, Mg and Fe, are measured. KBr is employed as binder to press the fly ash powder to pellets. The differences of fly ash plasma characteristics in different gas environments (CO₂, air, N₂, Ar) are analyzed, and their effects to unburned carbon measurements are studied. The results show that the spectral intensities obtained in argon are the highest among the four environments, and intensities in nitrogen take the second place. The intensities in air atmosphere are just a little less than those in nitrogen, while those in carbon dioxide are the least. Furthermore, carbon element in CO₂ disturbs the unburned carbon analysis extremely. Comparing the plasma temperatures in different environments, plasma in CO₂ atmosphere get the lowest temperature, implying it is the hardest to induce in CO₂.

Key words spectroscopy; laser-induced breakdown spectroscopy; gas environment; fly ash; plasma; spectral characteristics

OCIS codes 300.6365; 300.2140; 300.6170; 300.6210

1 引 言

锅炉飞灰含碳量反映了燃煤机械未完全燃烧损

失的大小, 是衡量燃煤电厂锅炉效率高低的重要指标, 是燃煤锅炉运行的一项主要技术经济指标。因

收稿日期: 2013-11-04; 收到修改稿日期: 2013-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(51206055、51071069)

作者简介: 沈跃良(1971—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事锅炉节能减排和燃烧测试等方面的研究。

E-mail: syl1971@163.com

* 通信联系人。E-mail: jdлу@scut.edu.cn

此,电厂都把降低飞灰含碳量作为一项重要工作。长期以来,飞灰含碳量一直采用传统的重量燃烧法测量,但是这种离线方法一般存在工作量大、采集的数据量小、分析时间长以及所测的含碳量比锅炉实际工况滞后几个小时以上等问题。人们一直在寻找一种能实时反映锅炉运行中飞灰可燃物变化情况的方法,以优化燃烧。目前在线检测飞灰含碳量的方法主要有:微波法、光学反射法、红外线测量法和 γ 射线法等。微波吸收法利用飞灰中碳对特定波长微波的吸收和对微波相位的影响来测量飞灰含碳量;光学反射法是将飞灰样放进辉光放电室内,用单色仪和光电探测器分辨辉光放电室内所产生的发射信号;红外线测量法是基于红外线对飞灰中碳粒反射率不同的原理进行测量,根据标定的反射率直接得出结果; γ 射线基于飞灰在放射源照射下产生的光电效应和康普顿散射效应的原理进行测量。激光诱导击穿光谱技术(LIBS)是一种新型原子发射光谱分析技术,以其能快速多元素同时检测的特点^[1-3]而被尝试应用于在线测量飞灰含碳量的工作中。

目前 LIBS 对 C 元素进行定量分析多选用 C I 193.09 nm 及 C I 247.86 nm 两条谱线,而飞灰中常见元素 Fe 的谱线 Fe I 247.95 nm 将会对 C I 247.86 nm 谱线造成重叠干扰^[4-5],故可选用于深紫外(DUV)区的 C I 193.09 nm。然而在 DUV 区的谱线探测,普通 CCD 探测器的光信号响应很低,同时氧气的存在造成一定的吸收干扰^[6],为了减弱干扰,往往采取抽真空或者充保护气体等措施^[7]。飞灰在线测量所处气体环境复杂,烟气中掺杂的二氧化碳气体会影响飞灰含碳量的准确度,因此有必要研究环境气体对飞灰等离子体特性的影响。

许多学者已就环境气体对不同样品激光诱导等离子体的影响机制展开研究。钟子铭等^[8]通过改变激发环境氛围(大气、氮气和氩气),分析激发环境氛围对不同形态碳元素的原子发射光谱和分子发射光谱激发机制的影响。玉世娟^[9]利用了高脉冲激光,以不锈钢样品为靶,选用原子气体(氩气)、分子气体(氮气、二氧化碳)和混合气体(空气)作为缓冲气体,研究了激光诱导不锈钢等离子体在不同气氛中的辐射情况。鲁先洋等^[10]对铜、镁铝合金和钢等金属材料的激光诱导等离子光谱进行了实验探测,发现适当的延迟时间和氩气环境能够显著改善谱线的信噪比,从而提高元素含量分析的精确度。Nakamura 等^[11]选用金属镍作为实验材料,通过改变环境气氛

(氩气、氮气、空气)和压力,研究了不同气氛和压力对于镍离子发射光谱的影响,氩气气氛下光谱强度最强,其次为氮气,空气气氛下光谱强度最低。在环境气氛下,压强降低 1400 Pa 时得到最佳背景信号比率,这种条件可以用于分析应用程序。

为了研究环境气体对 LIBS 测量飞灰的影响,本文研究不同环境气体下飞灰等离子体特性。所选环境气体包括氮气、空气、氩气以及燃煤电厂烟气中含有的常见气体二氧化碳,对比分析不同环境气体下的激光诱导等离子体特性差异,进而研究环境气体对 LIBS 测量飞灰的影响机制。

2 实 验

飞灰样品取自广东某电厂,采用重量燃烧法测得碳的质量分数为 11.18%。重量燃烧法测量飞灰含碳量的过程如下:使用电子天平称取该样品(1 ± 0.2) g,放入坩埚中后,再一并放入事先已经升到(815 ± 10) °C 的马弗炉中,灼烧 2 h 后取出,放在长石棉板上冷却约 5 min,再移至干燥器中,冷却到室温后(约 20 min),进行称样^[12]。两次称量的质量差与原灰样的质量比即为含碳量。将粉状样品压制成直径 30 mm 的片状样品进行测量,而仅飞灰样品难以压制成片,故采用粘结剂与灰样均匀混合压片,所用灰样粘结剂为 KBr。实验前将飞灰与 KBr 按照质量比 1:4 混合并搅拌均匀,每次称取 5 g 混合样品,利用压片机在 18 MPa 压强下压制 3 min,制得片状样品以备实验。

将制得的片状样品置于图 1 所示的 LIBS 测量系统中的电动平移台,由聚焦后的脉冲激光激发形成等离子体,再由集成 CCD 探测器的光纤光谱仪进行等离子体光谱探测,光谱仪可测光谱范围为 175~290 nm,分辨率为 0.09 nm,在充气装置中充氩气以减弱吸收。为了获取良好的信噪比,实验中采用 1064 nm 的 Quantel 脉冲激光器,激光能量为 51 mJ,相对标准偏差(RSD)为 1.45%,焦深为 -4 mm,收光角度为 45°,设置延迟时间为 1.6 μ s,采样门宽为 2 ms,采用激光器的 Q 输出信号控制光谱仪。为了削弱系统参数波动和样品不均匀性的影响,以获得良好的重复性,所有分析的光谱数据均来自 400 次单个脉冲激光作用获得的等离子体光谱的平均,实验分析统计误差棒为 400 次单点强度的标准偏差(SD)。

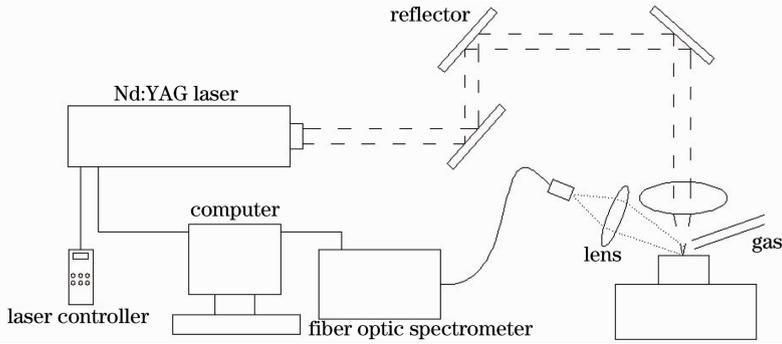


图 1 LIBS 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of LIBS experimental system

实验分别在二氧化碳、空气、氮气、氩气吹扫下进行。

为了验证 KBr 粘结剂对飞灰碳元素及其他主要元素的光谱测量无较大影响,进行了纯 KBr 和飞灰-KBr 混合样品在 Ar 环境下的 LIBS 实验,截取两种样品谱线在 192~248 nm 波段光谱图,如图 2 所示。

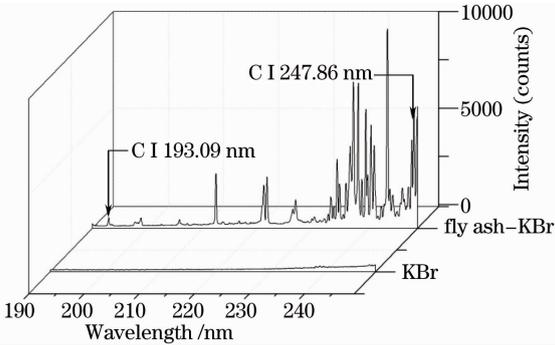


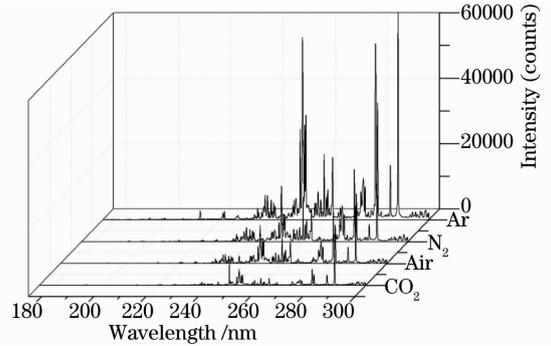
图 2 氩气环境下飞灰-KBr 混合样品与 KBr 纯样品光谱对比

Fig. 2 Comparison of Fly ash-KBr composite sample and pure KBr sample spectra in Ar environment

从图 2 中看出,同样的实验条件下,纯 KBr 样品的光谱对比飞灰-KBr 混合样品光谱,几乎没有特征峰,并且未观察到主要研究对象 C 元素的两条谱线及其他分析所用元素谱线的特征峰,验证了 KBr 作为粘结剂并不会影响实验分析。

3 结果与分析

对比实验所用 4 种不同环境气体(二氧化碳、空气、氮气、氩气)得到的光谱数据,作出 180~300 nm 波段范围内光谱图,如图 3 所示。

图 3 4 种环境气体下飞灰-KBr 混合样品光谱对比
Fig. 3 Comparison of Fly ash-KBr composite sample spectra in four different gas environments

由图 3 可看出,氩气环境下整体光谱强度最强,而二氧化碳环境下总体强度最低。不同环境气体会对等离子体光谱产生不同的影响,陈金忠等^[13]研究了环境气氛和压力对等离子体辐射特性的影响,结果表明氩气气氛下光谱强度明显高于空气气氛。结合所观察到的光谱图,以及原子光谱标准和数据库(NIST),选取波段内灰分主要元素 C, Si, Al, Mg, Fe 等与煤种相关并在飞灰含碳量定标分析中需要进行关联的元素的特征光谱,选用部分谱线作为分析谱线进行光谱数据分析,选择的谱线参数如表 1 所示。

表 1 所选分析元素的参数

Table 1 Parameters of the analyzed elements

Wavelength λ /nm	Transition probability $A_{ki} / (10^8 \cdot s^{-1})$	Lower level E_i / eV	Upper level E_k / eV	Degeneracy of upper level g_k
C I 193.0905	3.51	1.263725	7.684766	
C I 247.856	0.34	2.684011	7.684766	3
Si I 212.412				

Wavelength λ /nm	Transition probability $A_{ki}/(10^8 \cdot s^{-1})$	Lower level E_i/eV	Upper level E_k/eV	Degeneracy of upper level g_k
Si I 221.667	0.55	0.0276679	5.6191926	7
Si I 251.6113	1.21	0.0276679	4.9537949	5
Si I 252.4108	1.81	0.0095610	4.9200848	1
Si I 252.8509	0.77	0.0276679	4.9296468	3
Si I 288.1579	1.89	0.7809578	5.0823456	3
Al I 236.7052	0.72	0.0	5.2363163	4
Al I 237.3124	0.86	0.0138938	5.2368173	6
Al I 256.7984	0.23	0.0	4.8266318	4
Al I 265.2484	0.133	0.0	4.6728906	2
Al I 266.0393	0.264	0.0138938	4.6728906	2
Mg II 279.5528	2.60	0.0	4.433784	4
Mg II 280.2704	2.57	0.0	4.422431	2
Mg I 285.2127	4.91	0.0	4.3458026	3
Fe II 259.940	2.2	0.0	4.7683056	10
Fe II 260.534	1.6	4.4791008	9.2365813	4
Fe II 261.382	2.0	0.106950	4.8489358	2
Fe II 263.161	0.53	2.8066555	7.5165972	12
Fe II 275.573	2.1	0.9863313	5.4841322	10

对比不同环境气体下飞灰等离子体光谱的强度差异以分析等离子体特性，Si、Al、Mg 和 Fe 元素的

特征谱线强度对比如图 4 所示。

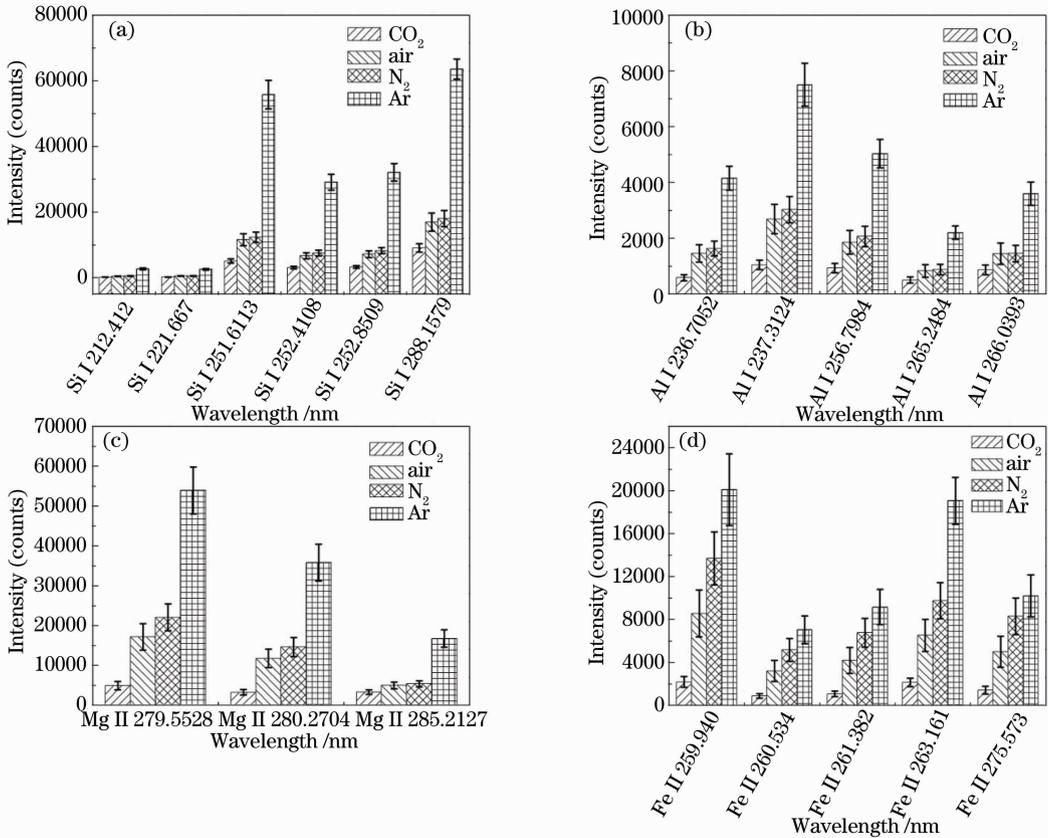


图 4 不同环境气体下各元素特征谱线强度对比。(a) Si; (b) Al; (c) Mg; (d) Fe

Fig. 4 Comparison of the spectral line intensities in different gas environments (a) Si; (b) Al; (c) Mg; (d) Fe

飞灰中一些主要元素包括 Si、Al、Mg、Fe 等，这些元素的谱线强度关系可从图 4 中清楚看出，环境

气体对谱线强度的影响是非常明显的，其关系表现为氩气环境下最高，其次为氮气下的强度，空气下的

强度稍低于氮气环境下,而二氧化碳环境下谱线强度是最低的。氩气环境下的光谱信号高于其他气体,其原因可以从等离子体激发机制方面分析。环境气体在高能量脉冲激光的作用下或者在从样品表面溅射出的高能电子作用下发生级联电离,形成一种气相等离子体。通过电子与原子、电子与离子间碰撞,电子将动能转变为在烧蚀过程中溅射出的原子、离子的激发能^[14]。而氩气环境下样品的电离概率比大气环境下样品的电离概率要大,氩气环境下更容易电离而产生电子,促进样品等离子体的形成和增强。这主要是因为,激光与样品的相互作用,涉及到很多复杂的过程,其中的一个重要过程是等离子体中各粒子与电子的相互碰撞。激光束穿过 Ar 缓冲气体时,一方面 Ar 会被电离($\text{Ar} + e^- \rightarrow \text{Ar}^+ + e^- + e^-$),另一方面样品表面附近的气体被电离,生成 Ar 亚稳态原子(Ar^m)后再电离($\text{Ar}^m + e^- \rightarrow \text{Ar}^+ + e^- + e^-$),通过这种逐层电离的方式($e^- + \text{Ar} \rightarrow e^- + \text{Ar}^m \rightarrow \text{Ar}^+ + e^- + e^-$),大大增加了等离子体中电子数,从而增加了等离子体中各粒子与电子的碰撞几率,提高发射谱线强度^[15],同时氩气的惰性特性又可以防止样品成分在高温下形成难解离的金属氧化物^[13]。

等离子体特性受环境气体的分子质量和电离能影响,Wen 等^[16-17]从理论和实验两方面分析了等离子体膨胀速度与气体质量、电离能的相关性。在所研究的 4 种环境气体中,氩气具有最高的电离能 15.75 eV,氮气为 14.53 eV,空气中除了体积分数为 78% 的氮气其余有 21% 的氧气,其电离能为 13.61 eV,而二氧化碳电离能为 13.77 eV。较高的电离能使背景气体在冲击波之后不容易发生电离,使得氩气环境下等离子体吸收更多能量,光谱强度最强。空气电离能介于氮气与氧气之间,故氮气环境下光谱强度高于空气环境。同时,气体分子质量将会影响等离子体与气体分子的相互作用,低分子质量的背景气体动量阻力较小^[18]。4 种气体中二氧化碳摩尔质量为 44 g/mol,高于空气分子 29 g/mol,氮气 28 g/mol 以及氩气 39.95 g/mol,二氧化碳气体抑制了等离子体的传播,激发程度较弱,因此光谱强度较低。

为了进一步分析造成谱线强度差异的原因,利用玻尔兹曼平面法计算等离子体温度。若等离子体处于局部热平衡(LTE)状态,特征谱线的强度遵从玻尔兹曼法则^[19]为

$$I_{ki} = \frac{hc}{4\pi\lambda_{ki}} \frac{N(T)}{U(T)} g_k A_{ki} \exp\left(-\frac{E_k}{kT}\right), \quad (1)$$

式中 I_{ki} 为测量的谱线强度, λ_{ki} 、 A_{ki} 和 g_k 分别为该谱线的波长、跃迁几率和上能级简并度, E_k 为高能级能量, T 为等离子体温度, k 为玻尔兹曼常数, h 为普朗克常数, $N(T)$ 为总电子数, $U(T)$ 为配分函数,体现了粒子在各能级上的分配特性, $U(T) = \sum g_k \exp\left(-\frac{E_k}{kT}\right)$ 。

对(1)式两边同取对数,可化简为

$$\ln\left(\frac{\lambda_{ki} I_{ki}}{g_k A_{ki}}\right) = \ln\left[\frac{hc}{4\pi} \frac{N(T)}{U(T)}\right] - \frac{E_k}{kT}, \quad (2)$$

式中 λ_{ki} 、 A_{ki} 和 g_k 可由原子光谱标准和数据库查出,结果见表 1。

根据(2)式,可以绘出 $(E_k, \ln \frac{\lambda_{ki} I_{ki}}{g_k A_{ki}})$ 构成的玻尔兹曼平面图,其斜率为 $-\frac{1}{kT}$ 。选取 Al I 236.7052 nm、Al I 237.3124 nm、Al I 256.7984 nm、Al I 265.2484 nm 及 Al I 266.0393 nm 5 条谱线,由其测得的强度及查表参数计算拟合 $(E_k, \ln \frac{\lambda_{ki} I_{ki}}{g_k A_{ki}})$ 玻尔兹曼平面。

各环境气体下的等离子体温度的玻尔兹曼平面如图 5 所示。

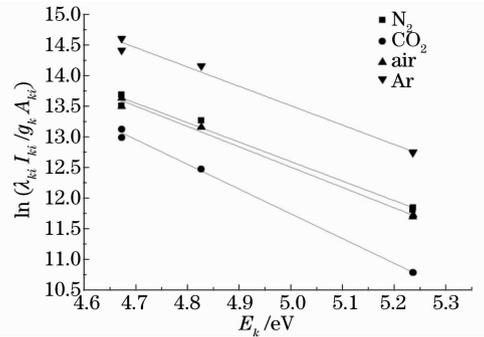


图 5 不同环境气体下飞灰-KBr 混合样品的玻尔兹曼平面图

Fig. 5 Boltzmann plots of fly ash-KBr composite sample in different gas environments

二氧化碳、空气、氮气、氩气环境下的等离子体玻尔兹曼平面拟合度分别为 0.997、0.994、0.986、0.987,由拟合出的直线的斜率计算得到的等离子体温度分别为 2869 K、3491 K、3642 K、3667 K,其中氩气环境下等离子体温度最高,其次为氮气、空气环境下的等离子体,二氧化碳环境下的等离子体温度远低于其他三种气氛,这说明了二氧化碳环境下的等离子体激发程度低于其他环境环境,这也是二氧

氧化碳环境下光谱强度最低的原因。

C 谱线很大程度上表征着样品含碳量的高低,这也是飞灰测量中一个重要的指标。根据所测波段及 C 元素的激发情况选取 C I 193.0905 nm 及 C I 247.856 nm 两条谱线作分析对比,强度对比关系如图 6 所示。

由图 6 可以看出,与其他元素不同,C 元素在二

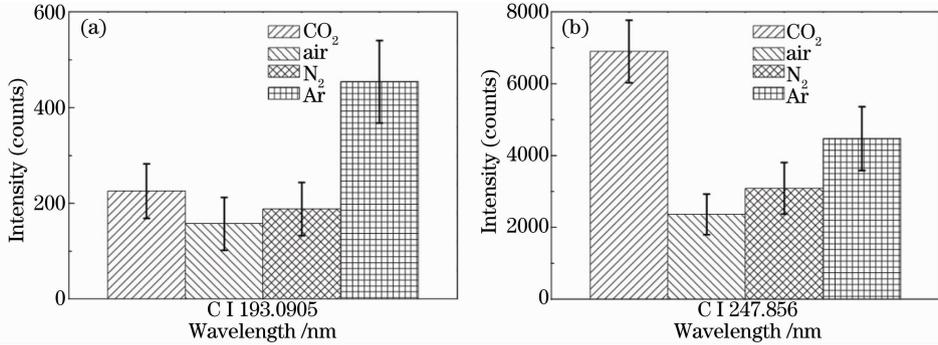


图 6 不同环境气体下 C 谱线的强度对比。(a) C I 193.0905 nm; (b) C I 247.856 nm

Fig. 6 Comparison of C spectral line intensities in different gas environments. (a) C I 193.0905 nm; (b) C I 247.856 nm

由图 2 可知,KBr 压片在氩气环境下的光谱不含有 C 的两条谱线,因此可以证明该样品中未含 C 元素。可以说明 CO₂ 环境下击打纯 KBr 样品所观察到的这两条谱线来源于环境气体 CO₂ 中的 C 元素受激光束激发产生的等离子体,故击打飞灰-KBr 样品收集的等离子体光信号中 C I 193.0905 nm 及 C I 247.856 nm 两条谱线部分来源于环境气体 CO₂。在用 LIBS 进行飞灰含碳量的测量时,需要考虑样品周围环境中可能掺混的 CO₂ 对飞灰中 C 元素的测量造成的干扰作用。

4 结 论

通过不同环境气体下对飞灰进行 LIBS 实验,结果表明环境气体对光谱特性有很大的影响,其中氩气环境能够很好地提高信号强度,而二氧化碳环境下不仅测量信号强度最低,且将对含碳量的测量造成影响。电厂现场测量环境中烟气所含的二氧化碳会对飞灰含碳量的测量造成一定影响,因此应当采取相应措施改善二氧化碳的干扰以便准确测量飞灰含碳量。

参 考 文 献

1 Yan Jing, Ding Lei, Ge Linlin, *et al.*. Research and analysis of heavy metals in liquid jet by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0215001.
 闫 静, 丁 蕾, 葛琳琳, 等. 液体射流激光击穿光谱检测重金属研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0215001.
 2 Chen Tianbing, Yao Mingyin, Liu Muhua, *et al.*. Analysis of

氧化碳环境下的谱线强度高于空气及氮气下的 C 谱线强度,甚至 C I 247.856 nm 谱线的强度高于激发状况良好的氩气环境下的同一条谱线强度。使用纯 KBr 在二氧化碳下进行对比实验,结果表明 C I 193.0905 nm 及 C I 247.856 nm 处有明显的特征峰。

the Pb element in gan nannavel orange based on laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(10): 101406.
 陈添兵, 姚明印, 刘木华, 等. 脐橙含铅量的激光诱导击穿光谱检测实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(10): 101406.
 3 Lin Yongzeng, Yao Mingyin, Chen Tianbing, *et al.*. Detection of Cu and Cr in the soil of navel orange plantation in gannan by LIBS [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 053002.
 林永增, 姚明印, 陈添兵, 等. 激光诱导击穿光谱检测赣南脐橙种植土壤的 Cu 和 Cr[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 053002.
 4 Robson M da Silva, Debora M B P Milori, Edilence C Ferreira, *et al.*. Total carbon measurement in whole tropical soil sample[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2008, 63(10): 1221-1224.
 5 Michael H Ebinger, M Lee Norfleet, David D Breshears. Extending the applicability of laser-induced breakdown spectroscopy for total soil carbon measurement[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(5): 1616-1619.
 6 Yao Shunchun, Lu Jidong, Pan Shenghua, *et al.*. Analysis of unburned carbon in coal fly ash by using laser-induced breakdown spectroscopy in deep UV[J]. Chinese J Laser, 2010, 27(4): 1114-1117.
 姚顺春, 陆继东, 潘圣华, 等. 粉煤灰未燃碳的深紫外激光诱导击穿光谱分析[J]. 中国激光, 2010, 27(4): 1114-1117.
 7 Béatrice Sallé, Jean-Luc Lacour, Evelyne Vors, *et al.*. Laser-induced breakdown spectroscopy for mars surface analysis: capabilities at stand-off distances and detection of chlorine and sulfur elements [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2004, 59(9): 1413-1422.
 8 Zhong Ziming, Lu Jidong, Zheng Jianping, *et al.*. Study on properties of plasma spectroscopy of laser-induced carbon materials with different chemical forms[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1230001.
 钟子铭, 陆继东, 郑建平, 等. 激光诱导不同化学形态碳等离子体光谱特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1230001.
 9 Yu Shijuan. Study of Spectral Characteristics of Laser-Induced Metal Plasma[D]. Baoding: Hebei University, 2011.

- 玉世娟. 激光诱导金属等离子体光谱特性研究[D]. 保定: 河北大学, 2011.
- 10 Lu Xianyang, Xu Guowei, Fei Teng, *et al.*. Experimental elemental content analysis in metal materials by laser-induced plasma spectroscopy[J]. Chinese J Quantum Electronics, 2011, 28(1): 1-5.
- 鲁先洋, 徐国伟, 费腾, 等. 金属材料的激光诱导等离子体光谱法成分分析的实验研究[J]. 量子电子学报, 2011, 28(1): 1-5.
- 11 Shuya Nakamura, Kazuaki Wagatsuma. Emission characteristics of nickel ionic lines excited by reduced-pressure laser-induced plasmas using argon, krypton, nitrogen, and air as the plasma gas[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2007, 62(12): 1303-1310.
- 12 Wu Ge, Lu Jidong, Yu Liangying, *et al.*. Measurements of carbon content of fly ash by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 20(4): 365-368.
- 吴戈, 陆继东, 余亮英, 等. 激光感生击穿光谱技术测量飞灰含碳量[J]. 热能动力工程, 2005, 20(4): 365-368.
- 13 Chen Jinzhong, Zhao Shurui, Wei Yanhong, *et al.*. effects of gas composition and pressure on the intensity and quality of the plasma induced by a high-energy neodymium glass laser[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005, 25(3): 341-345.
- 陈金忠, 赵书瑞, 魏艳红, 等. 环境气氛对高能量激光诱导等离子体辐射特性的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(3): 341-345.
- 14 Zheng Xianfeng, Tang Xiaoshuan, Feng Erying, *et al.*. An investigation on the property of the laser-produced plasma under the buffer gas[J]. Chinese J Atomic and Molecular Physics, 2002, 19(3): 267-271.
- 郑贤锋, 唐晓闫, 凤尔银, 等. 缓冲气体对激光等离子体光谱特性影响的实验研究[J]. 原子与分子物理学报, 2002, 19(3): 267-271.
- 15 Valeri I Babushok, Frank C DeLucia Jr, Paul J Dagdigian, *et al.*. Experimental and kinetic modeling study of the laser-induced breakdown spectroscopy plume from metallic lead in argon[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2005, 60(7): 926-934.
- 16 Sy-Bor Wen, Xianglei Mao, Ralph Greif, *et al.*. Laser ablation induced vapor plume expansion into a background gas. II. experimental analysis[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(2): 023115.
- 17 Sy-Bor Wen, Xianglei Mao, Ralph Greif, *et al.*. Expansion of the laser ablation vapor plume into a background gas. I. analysis[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(2): 023114.
- 18 Meirong Dong, Xianglei Mao, Jhanis J Gonzalez, *et al.*. Time-resolved LIBS of atomic and molecular carbon from coal in air, argon and helium [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2012, 27(12): 2066-2075.
- 19 Mohanad Sabsabi, Paolo Cielo. Quantitative analysis of aluminum alloys by laser-induced breakdown spectroscopy and plasma characterization[J]. Applied Spectroscopy, 1995, 49(4): 499-507.

栏目编辑: 史敏