

文章编号 1004-924X(2013)07-1651-08

# 激光诱导击穿光谱法测量煤粉流的控制因素

陈世和<sup>1</sup>, 陆继东<sup>2\*</sup>, 张博<sup>2</sup>, 陈华忠<sup>1</sup>, 姚顺春<sup>2</sup>, 李军<sup>1</sup>, 潘刚<sup>2</sup>, 张曦<sup>1</sup>

(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)

**摘要:**用激光诱导击穿光谱(LIBS)法直接检测煤粉流时需要主要控制因素进行优化, 本文采用正交实验法考察了3个主要控制因素: 功率密度、积分延迟时间和单位截面流量对 LIBS 测量煤粉流的影响。选用粒径小于 0.2 mm 的煤粉作为实验样品进行了统计分析和方差分析。结果显示: 在实验所选取的参数范围内, 功率密度、积分延迟时间对有效激发率有显著影响, 单位截面流量的影响程度最低。优化后的方案为: 功率密度  $9.4 \times 10^{11}$  W/cm<sup>2</sup>, 积分延迟时间 1 500 ns, 煤粉流量根据经济性原则在合理范围内选取。得到的结果表明该方法可用于指导煤粉流的实际在线测量。

**关键词:**激光诱导击穿光谱; 煤粉流; 有效激发率; 正交实验

**中图分类号:** O433.54 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132107.1651

## Controllable factors in detection of pulverized coal flow with LIBS

CHEN Shi-he<sup>1</sup>, LU Ji-dong<sup>2\*</sup>, ZHANG Bo<sup>2</sup>, CHEN Hua-zhong<sup>1</sup>,

YAO Shun-chun<sup>2</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, PAN Gang<sup>2</sup>, ZHANG Xi<sup>1</sup>

(1. *Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China;*

2. *School of Electric Power of South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: jdlu@scut.edu.cn*

**Abstract:** It is necessary to optimize operable factors in measurement of pulverized coal flow by Laser-induced Breakdown Spectroscopy(LIBS). Therefore, this paper investigated the effects of three main operable factors, irradiance, integration delay time and the rate of flow per unit area on the measurement of pulverized coal flow by LIBS based on orthogonal experiments. Pulverized coal was chosen for the experimental sample and the statistic analysis and variance analysis were performed. Experiment indicates that the irradiance and integration delay time are two remarkable factors for the effective excitation rate and the following is the rate of flow per unit area. The optimum parameters of control from the experiment are the irradiance of  $9.4 \times 10^{11}$  W/cm<sup>2</sup>, the integration delay time of 1 500 ns, and the rate of flow is selected reasonably based on economy principles. The results obtained demon-

收稿日期: 2013-01-07; 修订日期: 2013-02-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51206055); 煤燃烧国家重点实验室开放基金资助项目(No. FSKLCC1106)

strate that the method can direct the practical measurement of pulverized coal flows in real time.

**Key words:** Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS); pulverized coal flow; effective excitation rate; orthogonal analysis

## 1 引言

煤质特性的快速分析对合理利用煤炭资源、提高燃煤锅炉安全性和经济性具有重要意义,但常用的分析方法耗时长,难以做到实时监测<sup>[1]</sup>,因此,开发或改进煤质分析方法是该领域很活跃的研究方向之一。激光诱导击穿光谱(Laser-induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)法利用低能量脉冲激光作用在样品上,极少量样品蒸发并产生激光诱导等离子体,通过探测等离子体内的激发原子和离子谱线来定量和定性分析样品组成。国内外研究者对 LIBS 技术的影响因素做了大量的研究工作<sup>[2]</sup>,目的在于改善检测限、提高精确度和准确度,并指导实际应用。Jer-Shing Huang<sup>[3]</sup>等研究了能量和波长对液滴中痕量元素检测限的影响,通过增大脉冲能量并采用短波长激光来降低液滴中痕量元素的检测限;Xianglei Mao<sup>[4]</sup>等以固体铜为研究对象,提出随着激光功率密度增加,等离子体的初始温度和增长速率均增加的看法;Arnab Sarkar<sup>[5]</sup>等研究了 4 种钒的氧化物在 LIBS 检测过程中的激光能量、积分延迟时间对等离子体温度和电子密度的影响,并据此优化了以钒作为基体主要元素的测量参数;Doug Body 等<sup>[6]</sup>设计了一种用于煤质检测的装置,采用 1  $\mu\text{s}$  的积分延迟时间来提高信噪比。

目前,用 LIBS 分析煤质的研究主要针对块状或压片煤样,直接用 LIBS 检测煤粉流的相关研究还未充分开展。M Gaft<sup>[7]</sup>将 LIBS 技术应用于块状煤样灰成分的在线测量,测量结果达到了瞬发伽玛中子活化(PGNAA)在线检测方式的检测限和精度,分析了块状煤样测量中的主要影响因素。M. P. Mateo<sup>[8]</sup>等研究了压片煤样在不同波长的脉冲激光作用下无机物的测量精度。M. Noda<sup>[9]</sup>和 Miki Kurihara<sup>[10]</sup>采用 LIBS 技术测量了流动状态下的锅炉飞灰未燃碳含量,但未讨论颗粒流状态下控制因素的影响和激光与颗粒流作用机理问题。煤粉流的 LIBS 测量规律与块状和压片煤样的测量规律并不相同,这主要是由于煤

粉流是一种煤粉颗粒与气体组成的两相介质,它与激光相互作用的具体机制尚不清楚。本文选用燃煤电厂常用的粒径小于 0.2 mm 的煤粉颗粒为样品,结合正交实验法考察了 LIBS 测量煤粉流时 3 种控制因素的影响及其趋势,并在选取范围内得到了优化后的参数,用以指导煤粉流的实际在线测量。

## 2 实验

### 2.1 实验台架

实验研究搭建的台架如图 1 所示,激光光源为 Nd:YAG 固体脉冲激光器,工作波长为 1 064 nm,脉宽为 6 ns。实验采用的光纤光谱仪集成了 2 048 pixel CCD 作为探测器件,分为 2 个探测通道,波长分别为 235~380 nm 和 580~790 nm,光谱分辨率为 0.04 nm,光谱仪由激光器 Q 信号触发,积分时间调为 2 ms。煤粉下粉装置为一台螺杆式小型给粉机,在转速为 30~150 r/min 时粉量与转速可保证良好的线性关系。实验时,激光光束经焦距为 100 mm 的聚焦镜片以 1 Hz 的频率垂直入射到给粉机下粉口 5 mm 处的煤粉流束上。样品被激发后,等离子体光谱信号在侧面与激光入射方向呈 45° 处聚焦收集,进入光纤,并传输至光谱仪进行分光,由 CCD 探测并传至计算机,经处理后得到光谱数据。实验选用的粉状物料试样为电厂常用燃煤,通过研磨筛分成粒径小于 0.2 mm 的煤样,并烘制成空干基样品。

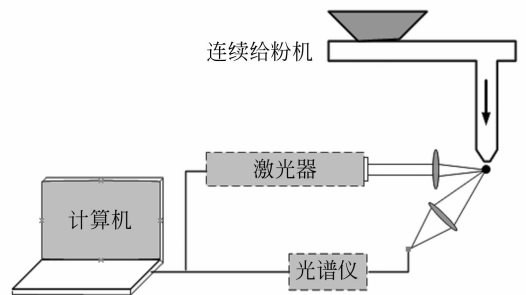


图 1 固体物料流 LIBS 试验台架示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LIBS experimental system for coal flow detection

## 2.2 聚焦光斑面积计算

激光聚焦后若聚焦区域能量密度达到样品的激发限将会产生等离子体。通过观察煤粉流的激发情况可知,其激发限比实验室空气的激发限略低。聚焦后光斑的直径大小为<sup>[11]</sup>:

$$\omega_2 \approx 2.44\lambda \times f/\omega_1. \quad (1)$$

其中: $\lambda$ 指激光波长, $\omega_1$ 为聚焦前激光光束的直径, $f$ 为聚焦镜片的焦距。

光斑面积  $S$  为:

$$S = \pi\omega_2^2/4. \quad (2)$$

实验用激光波长为 1 064 nm,聚焦前的光斑半径为 6 mm,聚焦镜片的焦距为 100 mm,根据以上公式计算得到本实验的聚焦点光斑面积约为  $1.47 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$ 。

## 2.3 影响因素与参数选取

在煤粉流 LIBS 测量中,激光能量、积分延迟时间和煤粉流量是 3 个需要控制的重要参数,因此需要研究这 3 个控制量对激光检测的影响趋势,找到最优方案,进而指导实际测量。参考 LIBS 用于分析煤质的常用能量范围,实验选取的能量为 50~135 mJ,对应的功率密度为  $5.6 \times 10^{11} \sim 15.3 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ ;由于实验中采用激光器 Q 信号触发光谱仪接收信号,最小积分延时间

为 1 280 ns,当积分延迟时间增大至 3 500 ns 左右时,信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)已经降至较低水平<sup>[12]</sup>,因此积分延迟时间选择 1 280~3 500 ns;另外采用 3 mm 的下粉口径,单位截面流量为  $0.4 \sim 1.2 \text{ g/min} \cdot \text{mm}^2$  的煤粉流量,以使高流量时不致堵塞下粉口,且低流量时不会出现下粉不均匀的现象。采用正交实验设计方法以减少实验次数,实验因素和水平如表 1 所示。参考相关文献<sup>[13-14]</sup>中煤质分析谱线的选取,本实验选取了 C I 247.8 nm、Si I 288.1 nm 和 Al I 308.2 nm 3 条谱线进行分析,相关的特征谱线如图 2 所示。

表 1 正交实验因素和水平表

Tab. 1 Factors and levels of orthogonal experiment

	Irradiance/ Level ( $10^{11} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	Integration delay time/ns	Rate of flow/ ( $\text{g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mm}^{-2}$ )
	(A)	(B)	(C)
1	5.6	1 280	0.397
2	6.4	1 500	0.516
3	9.4	1 800	0.651
4	12.7	2 500	0.873
5	15.3	3 500	1.175

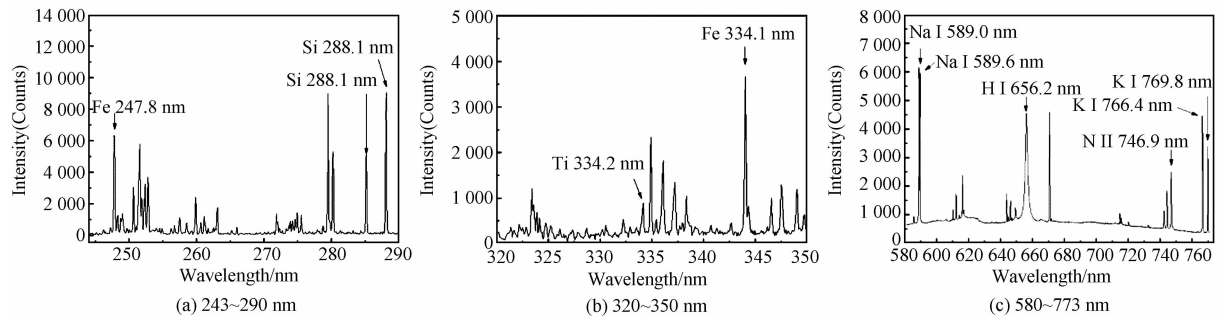


图 2 煤粉流典型光谱图

Fig. 2 Typical spectra recorded from pulverized coal flow

根据所选的参数,实验次数将达到  $5^3$ 。如果选用正交实验设计方法,实验次数为  $5^2$  次,在考察因素影响趋势以及得到可用于实际在线测量的参数的前提下,实验次数将大大减少。实验选用  $L_{25}(5^3)$  正交表,假设激光能量、积分延迟时间和物料流量 3 个参数之间相互独立。所用粉状物料为电厂常用燃煤,通过研磨筛分成粒径小于 0.2 mm 的煤样,并烘制成干基样品。在煤粉颗粒流状态下的光谱数据可

以归纳为以下两类:(1)包含了需要分析的元素的主要特征谱线;(2)仅包含部分需要分析元素的主要特征谱线。前一类可以用来进行多元素同时在线分析,获得这一类光谱数据的激发过程定义为有效激发。后一类激发可能由以下原因造成:(1)煤粉流束的波动和向周围扩散的微量煤粉颗粒造成的激发点变动导致反映基体元素含量的特征谱线收集不完全;(2)在较小流量下流动间隙造成激光聚焦区域内

煤粉颗粒未能完全激发。正交实验选取有效激发率作为评价参数之一,分别以谱线 CI247.8 nm 和 SiI 288.1 的信噪比阈值 3.9 和 4.7 为依据进行数据筛选,得出有效激发次数。有效激发率是指有效激发次数占每个实验点实验次数的比例。

### 3 结果及讨论

#### 3.1 实验结果及统计分析

正交试验中各因素对有效激发率的影响程度不同,初步用极差分析来区别各个因素对有效激发率的影响程度。因素的极差(Range)越大,说明该因素对实验评价指标的影响越显著;反之,则为不显著因素。表 2 中 Average  $x$  值为对应控制因素对应水平  $x$  的有效激发率的均值,Range 值为极差,是控制因素的 Average 值中最大值和最小值之差,表示控制因素对分析结果的影响程度。由表 2 可知,积分延迟时间对有效激发率的影响较大,其次为功率密度和单位截面流量。

效应曲线趋势如图 3 所示,分别以 3 个控制因素为横坐标,以有效激发率为纵坐标。由图 3(a)可知,有效激发率随功率密度的增大先急剧增大而后保持基本稳定的趋势。功率密度在  $10 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$  以下时,随能量增大颗粒流的有效激发率增长较快;而当功率密度增大至  $10 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$  后,有效激发率随激光能量强度增长的趋势明显放缓,并稳定在 85% 上下;当功率密度增大到  $15 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$  时,有效激发率略有降低。煤粉流是一种包含空气和煤粉颗粒的两相介质,高能量激光在命中煤粉流束后会击穿空气。空气击穿电离是激光场中电子级联碰撞所导致的雪崩电离效应<sup>[15]</sup>,当激光功率密度大于  $15 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$  时,每个脉冲激光都会造成空气击穿<sup>[16]</sup>,从而影响样品的稳定烧蚀,增加谱线强度的波动;而且高能量激光在作用样品后形成等离子体,等离子体迅速膨胀并吸收入射激光,使激光无法到达样品,无法得到足够的分析信号<sup>[17-18]</sup>,降低了信噪比。因此,在煤粉流的实际 LIBS 测量中需要平衡激光能量强度和有效激发率两方面的因素,功率密度设定在  $10 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$  左右,可以在尽量短的时间内得到更多的有效数据量,并降低不利因素,提高煤粉检测的准确度。因此,功率密度的最优水平为  $9.4 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 。

表 2 正交实验结果分析

Tab. 2 Analysis of orthogonal experiment results

Sample number	Irradiance/ ( $10^{11} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	Integration delay time/ns	Rate of flow per unit area/ ( $\text{g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mm}^{-2}$ )	Effective excitation rate/%
1	5.6	1 280	0.397	73
2	5.6	1 500	0.516	79
3	5.6	1 800	0.651	76
4	5.6	2 500	0.873	72
5	5.6	3 500	1.175	52
6	6.4	1 280	0.516	90
7	6.4	1 500	0.651	91
8	6.4	1 800	0.873	91
9	6.4	2 500	1.175	75
10	6.4	3 500	0.397	75
11	9.4	1 280	0.651	93
12	9.4	1 500	0.873	96
13	9.4	1 800	1.175	81
14	9.4	2 500	0.397	86
15	9.4	3 500	0.516	70
16	12.7	1 280	0.873	94
17	12.7	1 500	1.175	94
18	12.7	1 800	0.397	81
19	12.7	2 500	0.516	87
20	12.7	3 500	0.651	83
21	15.3	1 280	1.175	93
22	15.3	1 500	0.397	92
23	15.3	1 800	0.516	88
24	15.3	2 500	0.651	86
25	15.3	3 500	0.873	62
Average 1	70	89	81	
Average 2	84	90	83	
Average 3	85	83	86	
Average 4	88	81	83	
Average 5	84	68	79	
Range	18	22	7	

积分延迟时间也是影响煤粉流有效激发率的一个因素。由图3(b)可以看出,随着积分延迟时间的增大,有效激发率呈现下降趋势。这是因为激光诱导等离子体的寿命约为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$  s<sup>[19]</sup>,而实验选用的积分时间为2 ms,远大于等离子体寿命。光谱仪CCD探测开始后,等离子体发射的光谱会完全被探测到,积分延迟时间过小,等离子体

发初期韧致辐射导致的光谱背景较大,信噪比会降低;积分延迟时间过大,有效光谱信息的减少同样会造成信噪比降低。Dolores Romero<sup>[20]</sup>改变积分延迟时间来提高信噪比,随着积分延迟时间的增加,信噪比先增大后减少,这和本实验得到的规律基本一致。本实验选取的最优积分延迟时间为1 500 ns。

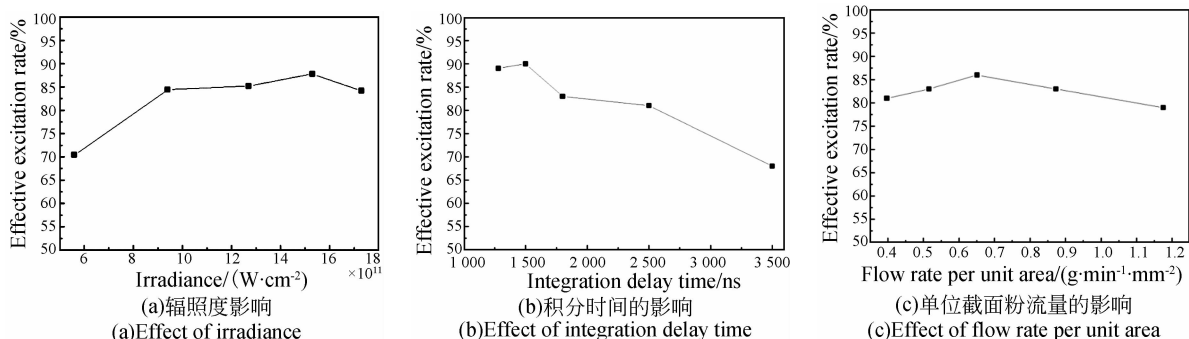


图3 有效激发率的因素效应曲线

Fig. 3 Influence of factors on effective excitation rate

从图3(c)可以看出,随着单位截面颗粒流量的增大,有效激发率有微弱的先增大后减少的趋势,取得最高有效激发率的单位截面颗粒流量为 $0.651 \text{ g/min} \cdot \text{mm}^2$ 。有效激发率的变动在7%以内,对于浓相的粉状固体物料流LIBS检测,激光激发区域颗粒密度的降低不会显著降低有效激发率。而煤粉颗粒流未能有效激发的原因有:(1)煤粉流束的波动和向周围扩散的微量煤粉颗粒造成的激发点变动导致特征

谱线收集不完全;(2)在较小流量下流动间隙造成激光聚焦区域内煤粉颗粒未能完全激发。在本实验所选的煤粉颗粒流量范围内,可能主要是由于煤粉流束的波动造成激发点变动而导致未完全激发。煤粉流束的波动和微量煤粉颗粒的扩散规律随机性较大,在一定流量范围内变化不大,因而激光激发区域颗粒密度的降低与有效激发率的降低并无直接关系,具体的机制需要更进一步的研究来揭示。

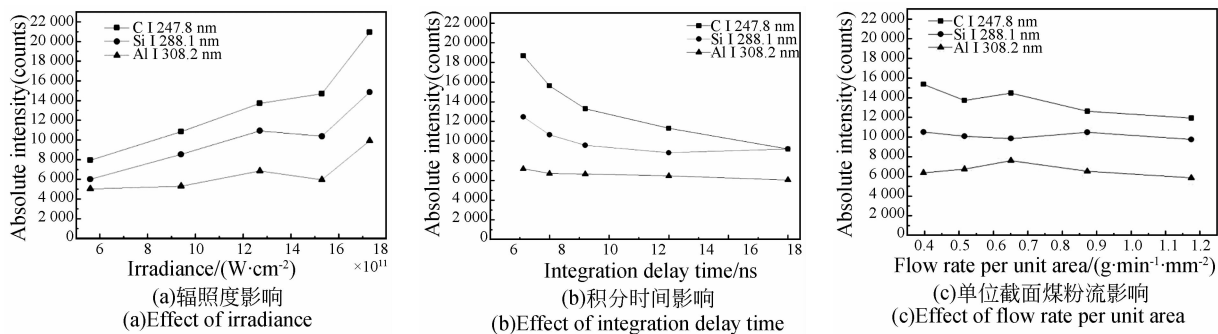


图4 光谱绝对强度的因素效应曲线

Fig. 4 Influence of factors on absolute intensity

3个影响因素下谱线绝对强度的变化趋势如图4所示。从图中可明显看出,随激光能量的增大,C I 247.8 nm、Si I 288.1 nm和Al I 308.2 nm 3条谱线的绝对强度呈增大的态势;而随着积分延

迟时间的增大,3条谱线的绝对强度呈现降低趋势。相比之下,单位截面颗粒流量对绝对强度的影响并不明显,这说明光谱强度对在实验选取的浓相范围内的单位截面颗粒流量变化并不敏感。在实

际测量中,由于粉状物料抽取装置的不稳定造成的流量波动对光谱有效信息的干扰并不明显,取粉装置可以更为简化。

### 3.2 方差分析

方差分析的目的在于判断各因素对实验指标是否有显著影响。以离差平方和  $SS_j$  表示实验结果对其平均值的偏离程度,第  $j$  列离差平方和的计算公式如下:

$$SS_j = m \sum_{r=1}^t \left( \frac{T_{jr}}{m} - \bar{Y} \right)^2, \quad (3)$$

其中: $m$  表示各水平的重复数; $t$  表示水平数; $T_{jr}$  代表第  $j$  列水平数为  $r$  的实验结果; $SS_j$  的自由度  $f_j = t - 1$ ; $n = m \times t$  表示总实验组数。

当正交表排满因素时,误差平方和  $SS_e$  是  $SS_j$  的最小值:

$$SS_e = \min\{SS_j\}, \quad (4)$$

$$f_e = f_{\min\{SS_j\}}. \quad (5)$$

总方差和  $SS_t$  为离差平方和  $SS_j$  和误差平方和

$SS_e$  之和,其自由度  $f_t = n - 1$ 。构造  $F$  分布:

$$F_j = \frac{SS_j/f_j}{SS_e/f_e} \sim F(f_j, f_e). \quad (6)$$

当计算出的  $F_j$  大于  $F_{1-\alpha}(f_j, f_e)$  时,推断此因子作用显著;当  $F_j$  小于  $F_{1-\alpha}(f_j, f_e)$  时推断此因子作用不显著。也可以通过  $P$  值来判断因子的显著性, $P$  值表示某一因素各水平有显著差异时犯错误的概率。当  $P \leq 0.05$  时,认为该因素各水平间的差异显著; $P$  值越小,差异越显著。

表 3 为以有效激发率作为评价指标的方差分析结果。从表 3 可以看出:取显著性水平  $\alpha = 0.05$  时,积分延迟时间的显著性概率为 0.000 2,功率密度的显著性概率为 0.002,远小于  $\alpha$ ,故激光能量强度、积分延迟时间对有效激发率的影响是极其显著的。因此,在实际测量中较优化的方案为:功率密度为  $9.4 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 、积分延迟时间为 1 500 ns,而煤粉流量从节约成本的角度在合理范围内选取,其它参数保持不变。

表 3 方差分析表

Tab. 3 Analysis of variance ( $\alpha = 0.05$ )

Origin of variance	Sum of square	Freedom	$F$	$P$
Irradiance/( $\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	941.2	4	8.227	0.002 0
Integration delay time/ns	1 504.4	4	13.150	0.000 2
Flow rate per unit area/( $\text{g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mm}^{-2}$ )	123.2	4	1.077	0.410 4
Error	343.2	12		
Summation	2 912.0	243		

## 4 结 论

本文采用正交实验分析了煤粉流 LIBS 检测中功率密度、积分延迟时间和颗粒流单位截面流量的影响。结果表明,功率密度、积分延迟时间对有效激发率有显著影响,煤粉流单位截面流量的影响

程度最低。通过实验得到了煤粉流 LIBS 检测的优化方案,该方案中功率密度为  $9.4 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 、积分延迟时间为 1 500 ns,煤粉流量从节约成本的角度在合理范围内选取,其它参数保持不变。由于光谱强度对在实验选取的浓相范围内的单位截面颗粒流量变化并不敏感,可以据此简化测量取粉装置。

### 参考文献:

[1] 仇韬,丁艳军,孔亮,等. CFB 锅炉动态特性与负荷和煤质的关系研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(32):46-51.  
 QIU T, DING Y J, KONG L, et al.. Research of relationship between CFBB dynamic behavior and

power and coal quality [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(32): 46-51. (in Chinese)

[2] CREMERS D A, RADZIEMSKI L J. *Handbook of Laser-induced Breakdown Spectroscopy* [M]. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.  
 [3] HUANG J S, KE C B, HUANG L S, et al.. The correlation between ion production and emission in-

- tensity in the laser-induced breakdown spectroscopy of liquid droplets[J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2002, 57 (1) :35-48.
- [4] MAO X L, SHANNON M A, FERNANDEZ A J, *et al.*. Temperature and emission spatial profiles of laser-induced plasmas during ablation using time-integrated emission spectroscopy [J]. *Applied Spectroscopy*, 1995, 49(7) :1054-1062.
- [5] SARKAR A, SHAH R V, ALAMELU D, *et al.*. Studies on the ns-IR-laser-induced plasma parameters in the vanadium oxide[J]. *Journal of Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 2011, 17:504-704.
- [6] BODY D, CHADWICK B L. Simultaneous elemental analysis system using laser induced breakdown spectroscopy [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 72(3) :1625-1629.
- [7] GAFT M, SAPIR-SOFER I, MODIANO H, *et al.*. Laser induced breakdown spectroscopy for bulk minerals online analyses [J]. *Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy*, 2007, 62 (12) : 1496-1503.
- [8] MATEO M P, NICOLAS G, YANEZ A. Characterization of inorganic species in coal by laser-induced breakdown spectroscopy using UV and IR radiations [J]. *Applied Surface Science*, 2007, 254 (4) : 868-872 .
- [9] NODA M, DEGUCHI Y, IWASAKI S, *et al.*. Detection of carbon content in a high-temperature and high-pressure environment using laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy*, 2002, 57(4) :701-709.
- [10] KURIHARA M, IKEDA K, IZAWA Y, *et al.*. Optimal boiler control through real-time monitoring of unburned carbon in fly ash by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(30) :6159-6165.
- [11] TOGNONI E, PALLESCHI V, CORSI M. Quantitative micro-analysis by laser-induced breakdown spectroscopy: a review of the experimental approach [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2002, 57 (7) :1115-1130.
- [12] 李捷, 陆继东, 谢承利, 等. 激光感生击穿煤质实验中延迟时间的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(4) :736-739.
- LI J, LU J D, XIE CH L, *et al.*. Investigation on the delay time of coal experiment by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(4) :736-739. (in Chinese)
- [13] 谢承利, 陆继东, 李捷, 等. 激光诱导煤粉发射光谱的基体效应研究[J]. *工程热物理论*, 2008, 29 (2) :331-334.
- XIE CH L, LU J D, LI J, *et al.*. Matrix effect on laser-induced breakdown spectroscopy of fine coal [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(2) :331-334. (in Chinese)
- [14] BODY D, CHADWICK B L. Optimization of the spectral data processing in a LIBS simultaneous elemental analysis system [J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2001, 56 (6) : 725-736.
- [15] HONG M H, LU Y F, BONG S K. Time-resolved plasma emission spectrum analyses at the early stage of laser ablation[J]. *Applied Surface Science*, 2000, 154:196-200.
- [16] TAMBAY R, THAREJA R K. Laser-induced breakdown studies of laboratory air at 0. 266, 0. 355, 0. 532, and 1. 06  $\mu\text{m}$  [J]. *Journal of Applied Physics*, 1991, 70(5) :2890-2892.
- [17] 章玉珠, 王广安, 沈中华, 等. 等离子体屏蔽和稀疏波对冲量耦合系数的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19 (4) :585-585.
- ZHANG Y ZH, WANG G A, SHEN ZH H, *et al.*. Influences of plasma shielding and rarefaction wave on impulse coupling coefficient [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19 (4) : 585-585. (in Chinese)
- [18] 姚顺春, 陆继东, 谢承利, 等. 激光能量对粉煤灰未燃碳测量的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29 (8) :2025-2029.
- YAO SH CH, LU J D, XIE CH L, *et al.*. Impact of laser energy on measurement of fly ash carbon content[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*. 2009, 29(8) :2025-2029. (in Chinese)
- [19] CORSI M, CRISTOFORETTI G, HIDALGO M, *et al.*. Temporal and spatial evolution of a laser-induced plasma from a steel target [J]. *Applied Spectroscopy*, 2003, 57(6) :715-721.
- [20] ROMERO D, ROMERO J M F, LASERNA J J, *et al.*. Distribution of metal impurities in silicon wafers using imaging-mode multi-elemental laser-induced breakdown spectrometry [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 1999, 14 (2) : 199-204.

## 作者简介:



**陈世和**(1965—),男,广东阳春人,高级工程师,工学硕士,热工所所长,长期从事电厂生产过程自动化控制系统开发研究和技术管理的工作。E-mail: chen\_shi\_he@163.com



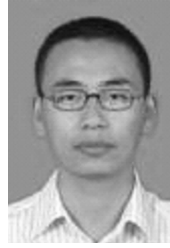
**陆继东**(1957—),男,江苏常熟人,教授,博士生导师,长江学者特聘教授,研究方向为清洁燃烧理论与技术、热力系统的优化运行以及激光测量与诊断技术。E-mail: jdлу@scut.edu.cn



**张博**(1989—),甘肃白银人,男,博士研究生,2012年于山东理工大学获得学士学位,研究方向为热力系统的测量与诊断技术。E-mail: zhblink@163.com



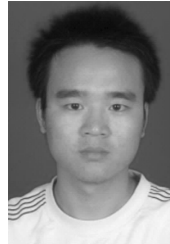
**陈华忠**(1971—),广东茂名,男,高级工程师,主要从事火电机组控制系统的开发和研究工作。E-mail: chenhua-zhong168@126.com



**姚顺春**(1983—),男,浙江龙游人,博士,讲师,主要从事燃烧诊断与排放监测技术的研究, E-mail: epscyao@scut.edu.cn



**李军**(1962—),男,湖北人,工程师,长期从事计算机控制与通讯等试验的研究工作。E-mail: lijun\_87389@163.com



**潘刚**(1987—),男,重庆合川人,硕士研究生,2012年于华南理工大学获得学士学位,主要从事激光诱导击穿光谱技术应用的开发和研究。E-mail: 474029614@qq.com



**张曦**(1974—),男,山东临沂人,工学博士,高级工程师,主要从事火电机组先进控制技术的研究。E-mail: zhangxi\_sjtu@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)