DOI:10.16136/j.joel. 2022.01.0299

基于平面反射镜约束的激光诱导击穿光谱技术 研究

李红莲^{1,2*},吕贺帅^{1,2},孟 岩^{1,2},李文铎^{1,2},谢红杰^{1,2}

(1.河北大学 质量技术监督学院,河北 保定 071000; 2.计量仪器与系统国家地方联合工程研究中心,河北 保定 071000)

摘要:为改善激光诱导击穿光谱技术(laser-induced breakdown spectroscopy,LIBS)的光谱特性,搭 建了平面反射镜约束下的LIBS检测系统,将平面反射镜放置于样品两侧,分别选取平面反射镜 间距7 mm,9 mm,11 mm,13 mm 开展实验,得到等离子体辐射强度随平面反射镜间距增加而减 小。研究了不同平面反射镜间距对土壤样品中 Fe,Al,Pb 3 种元素等离子体特性的影响,实验结果 显示:相比于无平面反射镜约束,在平面反射镜间距为 7 mm 时,样品中 Fe I,Al I,Pb I 等 3 种元素 的信噪比分别提高了 29.9%,39.4%,31.0%;计算得到等离子体温度提高了 484.54 K,等离子体电 子密度提高了 2.41×10¹⁵ cm⁻³。对有无平面反射镜约束下的 Pb 元素进行定量分析,得到检测限从 86.9 mg/kg 降低到 51.2 mg/kg,相对标准偏差从 7.8%降低到 4.6%。可见,利用平面反射镜是改 善激光光谱特性的一种简单有效的方法。

关键词:激光诱导击穿光谱技术;平面反射镜约束;等离子体温度;等离子体电子密度;定量分析 中图分类号:O657.38 文献标识码:A 文章编号:1005-0086(2022)01-0075-08

Research on laser-induced breakdown spectroscopy based on planar mirrors

LI Honglian^{1,2*}, LV Heshuai^{1,2}, MENG Yan^{1,2}, LI Wenduo^{1,2}, XIE Hongjie^{1,2}

(1. College of Quality and Technology Supervising, Hebei University, Baoding, Hebei 071000, China; 2. National and Local Joint Engineering Center of Measuring Instruments and Metrology Systems, Baoding, Hebei 071000, China)

Abstract: In order to improve the spectral characteristics of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), a LIBS detection system under the constraint of planar mirrors was built. The planar mirrors were placed on both sides of the sample. Planar mirror spacing of 7 mm,9 mm,11 mm and 13 mm were selected to carry out the experiment. It was obtained that the plasma radiation intensity decreases with the increase of the plane mirror spacing. The effects of different plane mirror spacing on the plasma properties of Fe, Al and Pb elements in soil samples were studied. The experimental results show that: compared with no plane mirror constraint, when the plane mirror spacing is 7 mm, the signal-to-noise ratio of the three elements Fe I, Al I, and Pb I in the sample is increased by 29.9%, 39.4%, and 31.0%, respectively. The plasma temperature was increased by 484.54 K, and the plasma electron density was increased by 2. 41×10^{15} cm⁻³. The detection limit was reduced from 86.9 mg/kg to 51.2 mg/kg and the relative standard deviation (RSD) was reduced from 7.8% to 4.6%. It can be seen that the use of planar mirrors is a simple and effective way to improve the spectral characteristics of laser.

Key words: laser induced breakdown spectroscopy; plane mirror constraint; plasma temperature; plasma electron density; quantitative analysis

 ^{*} E-mail:lihonglian@hbu.edu.cn
 收稿日期:2021-05-06 修订日期:2021-06-28
 基金项目:河北省自然科学基金重点项目(E2017201142)和河北省博士后科研项目(B2016003008)资助项目

1 引 言

近年来,由于工业"三废"以及城市污水排放 等问题,导致大量的重金属污染物以不同的形式 进入土壤,土壤重金属污染情况严重,亟须一种能 够对土壤重金属元素快速检测的方法^[1,2]。

激光诱导击穿光谱技术(laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS) 是一种操作简便的光谱 定性、定量分析技术,其具有样品预处理简单、分 析时间短、多元素同时检测等优点[3]。近年来,研 究人员在环境监测[4]、地质勘探^[5]、生物^[6]、太空 探测[7]等领域展开相关研究工作,但重复性差、探 测灵敏度低等不足限制了 LIBS 的发展及应用。 因此,提高光谱强度和改善信噪比成为 LIBS 技术 研究的热点话题。李兴文等[8]研究了平行板约束 下的 LIBS 光谱特性,并拍摄了等离子体的时间分 辨发射图。在无平行板约束时,等离子体的体积 较大,发光较弱。而当有平行板约束时,等离子体 受到了压缩,体积明显变小,且发光强度明显增 强。ZHANG 等^[9]发现光斑尺寸对平板约束等离 子体的光谱增强效果有很大的影响,不同的激光 聚焦位置直接影响了等离子体吸收激光能量的过 程。高勋等[10]研究了不同铝板间距下的光谱特 性,实验结果表明在空间限制的情况下,光谱强度 和信背比都有不同程度的增加,铝板间距为10 mm 时增强因子达到 4 倍。陈金忠等[11,12] 研究了 平面反射镜约束与普通玻璃约束的效果,结果表 明,平面反射镜约束会反射一部分激光作用在等 离子区域,因此比普通玻璃约束时的光谱强度、信 噪比的增强效果更大。随后,研究了在样品一侧 放置平面反射镜时与等离子体中心轴线间距的变 化对光谱特性的影响,结果显示随平面反射镜与 等离子体中心轴线之间距离的增大,等离子体辐 射强度逐渐减弱,且平面反射镜与等离子体中心 轴线间距为 3 mm 时光谱强度和信噪比增强效果 最大。

综上所述,针对平行板约束有大量的研究,但 针对平行板约束中的平面反射镜约束研究鲜少, 对平面反射镜不同间距下的光谱特性仍有研究空 间。因此本文开展对平面反射镜间距对光谱特性 影响的研究。

2 实验部分

采集的原始土壤样品经自然风干、去除杂质、过 筛、二次过筛、烘干、研磨后,在土壤中加入不等量的 光谱纯试剂 PbO,配置成 Pb 元素浓度分别为:0%、 0.1%、0.15%、0.35%、0.5%、0.9%、1.2%,研磨充 分后滴入少量粘合剂(饱和蔗糖溶液),用电子天平 称取等质量的土壤样品,制成圆片状样品,放入 80 ℃的烘干箱,烘干备用。

采用的实验系统原理图如图 1 所示,为保证系 统工作时处于稳定状态,首先需要进行预热。整个 采集过程在空气环境下完成,采用输出波长为 532 nm 的 Nd:YAG(型)脉冲激光器作为激发光源。脉 冲激光经过反射镜后垂直经过焦距为 100 nm 的聚 焦透镜汇聚在被测样品表面,产生的等离子体信号 直接耦合至光纤并传输到光谱仪(光谱仪采用的是 海洋光学 MAX2500+,波长范围是 200 nm—517 nm)完成光谱检测与分光。样品在有无平面反射镜 下对被烧蚀激发产生的等离子体通过光谱仪进行采 集,其中有平面反射镜约束时的间距分别为7 mm, 9 mm,11 mm 和 13 mm,采集到的光信号经过光谱 仪放大转换成电信号后将数据传输至计算机中。



图1 实验系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

3 实验结果与分析

3.1 光谱强度变化

为提高 LIBS 测量结果的可靠性,对待检测样品 进行 20 次重复测量,采集 20 幅光谱图,进行加和与 求平均。根据 NIST 数据库及谱线选取原则,分别选 取 Fe I 334.19nm、Al I 396.15 nm 和 Pb I 405.78 nm 为特征谱线,绘制如图 2 所示(No mirror 表示无 平面反射镜)的 Fe、Al 和 Pb 元素光谱强度随平面反 射镜间距的变化曲线。

由图 2 可以看出,在样品两侧放置平面反射镜 时,光谱强度呈现出随平面反射镜间距增大而逐渐 减小的变化趋势,且间距为 7 mm 时光谱强度有最大 值。经计算,相对于无平面反射镜约束,Fe、Al 和 Pb 元素的光谱强度在平面反射镜间距为 7 mm 时分别 提高了 65.9%、71.5%、57.4%。间距为 9 mm 时光 谱强度分别提高了 40.2%、35.3%、24.0%,间距为 11 mm 时光 谱强度分别提高了 26.1%、31.0%、 16.6%,间距为13 mm时 Fe、Pb 元素的光谱强度分 别提高了 3.2%、9.1%,Al 元素的光谱强度降低了 0.7%。间距为9 mm和11 mm时,光谱强度的增强 程度比间距为7 mm时低,间距为13 mm时,光谱强 度增强程度不明显。激光脉冲烧蚀样品表面产生等 离子体的期间,同时会产生冲击波,冲击波的扩散速 度大于等离子体扩散速度,冲击波扩散到平面反射 镜时会反射回等离子体区域,降低了等离子体的扩 散速度。但平面反射镜间距越大,被平面反射镜反 射回等离子体区域的冲击波所用时间越长,因此不 同的平面反射镜间距会导致光谱的增强程度不同。 此外平面反射镜间距会导致光谱的增强程度不同。 此外平面反射镜会反射一部分激光重新作用在等离 子体区域。因此,平面反射镜约束下光谱强度增强, 改善了样品粒子的激发条件,光谱强度的增强对于 提高光谱数据的测量精度具有重要意义。



图 2 光谱强度随平面反射镜间距的变化 Fig. 2 The change of spectral intensity with the distance between plane mirrors

光谱信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)是衡量 光谱质量的一个重要指标,光谱信噪比很大程度上 决定了光谱分析的检出限,从而决定了 LIBS 技术对 待测样品中痕量元素的检测能力。光谱信噪比通过 测量光谱信号强度 *I*s 和噪声强度 *I*N 来计算的,即:

$$R_{\rm SN} = \frac{I_{\rm S} - I_{\rm N}}{I_{\rm S}} \,. \tag{1}$$

图 3 为光谱信噪比随平面反射镜间距的变化曲线。从图中可以看出,在样品两侧放置平面反射镜时,信噪比呈现出随着平面反射镜间距的增大而逐渐减小的变化趋势。经计算,相对于无平面反射镜约束,Fe、Al和Pb元素的信噪比在平面反射镜间距为7 mm时分别提高了 29.9%、39.4%、30.9%,间距为9 mm时信噪比分别提高了 15.6%、8.1%、4.1%,间距为 11 mm时信噪比分别提高了 3.65%、

15.38%、8.4%,间距为13 mm时,Pb的信噪比提高 了8.8%,Fe、Al的信噪比分别降低了0.6%、7.4%。 信噪比在间距为7 mm时有最大值,在间距为9 mm、 11 mm时也有不同程度提高,间距为13 mm时信噪 比没有明显变化,信噪比的变化规律与光谱强度的 变化规律基本一致。



图 3 SNR 随平面反射镜间距的变化

Fig. 3 Variation of SNR with the distance between mirrors

3.2 等离子体参数

等离子体温度是激光诱导等离子体的一项重要参数,当被检测的等离子体处于局部热平衡(local thermal equilibrium,LTE)状态时,等离子体是光学薄的,即谱线不存在自吸收效应。并且不同能级的粒子数分布可由 Boltzmann 方程^[13]描述时,对等离子体温度的测量才具有意义。因此可采用Boltzmann作图方式计算等离子体温度T,计算式为:

$$\ln(\frac{\lambda I_{ki}}{g_k A_{ki}}) = \frac{-E_k}{K_{\rm B}T} + C, \qquad (2)$$

式中 $,\lambda$ 为谱线波长 $,I_{ki}$ 为光谱的强度 $,g_k$ 为谱线上能级的简并 $,A_{ki}$ 为跃迁概率 $,E_k$ 为谱线上能级能量 $,K_B$ 为玻尔兹曼常数,T为等离子体温度,C是常数。

实验采用 Fe 原子的 5 条发射谱线,谱线参数如 表1所示。将实验所得谱线强度带入式(2),绘制如

表 1 谱线参数 Tab. 1 Spectral line parameters

	λ/nm	E_k/ev	$A_{\rm ki}/{ imes}10^{7}~{ m s}^{-1}$	g_k
	306.744	4.913	3.13	9
Fe I	322.587	6.424	11.80	13
	355.392	6.319	14.00	13
	357.009	4.386	6.76	11
	364.784	4.312	2.91	11

• 78 •

图 4 Boltzmann 原子谱线图,根据 $\ln(\frac{\lambda I_{ki}}{g_k A_{ki}}) - E_k$ 曲线,便可求得等离子体温度。

绘制平面反射镜间距下等离子体温度变化曲线 如图5所示。由图可以看出,在平面反射镜间距为 7 mm、9 mm、11 mm时,等离子体温度都有不同程度 的提高,经计算,相对于无平面反射镜约束时,平面 反射镜间距为7mm、9mm、11mm时等离子体温度 分别提高了484.54K、305.31K、392.94K,间距为 13mm时等离子体温度降低了20.58K。利用平面 反射镜作为等离子体的空间约束提高了等离子体温 度,这是改善样品物质的原子化效率和对发光粒子



图 4 Boltzmann 原子谱线图:(a) 无平面反射镜;(b) 平面反射镜间距为 7 mm; (c) 平面反射镜间距为 9 mm;(d) 平面反射镜间距为 11 mm;(e) 平面反射镜间距为 13 mm Fig. 4 Boltzmann atomic spectrum:(a) No plane mirror; (b) Plane mirror spacing of 7 mm; (c) Plane mirror spacing of 9 mm;(d) Plane mirror spacing of 11 mm;(e) Plane mirror spacing of 13 mm



的激发能力的重要因素。

图 5 不同平面反射镜间距下等离子体温度 Fig. 5 Plasma temperature at different plane mirror spacing

等离子体的电子密度是激光诱导等离子体的另 一项重要参数,考虑到激光等离子体发射光谱的谱 线展宽与等离子体电子数密度的关系,目前计算激 光等离子体的电子数密度的最常见方法是通过分析 谱线的展宽来获得^[14]。由于激光等离子体主要由电 子和离子组成,因此 Stark 展宽在谱线展宽中占主 导,假设激光诱导等离子体满足 LTE 条件时,电子 密度与 Stark 展宽的半高宽 Δλ_{1/2}之间的关系为:

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2\omega(\frac{N_{\rm e}}{10^{16}}) + 3.5A(\frac{N_{\rm e}}{10^{16}})^{\frac{1}{4}}(1 - 0.75N_{\rm D}^{-1/3})\omega(\frac{N_{\rm e}}{10^{16}}), \qquad (3)$$

式中,等号右侧表示不同粒子的展宽贡献,但实际 中,粒子展宽很小,可以忽略,因此上式可化简为:

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2\omega(\frac{N_{\rm e}}{10^{16}}), \qquad (4)$$

式中, $\Delta\lambda_{1/2}$ 为 Stark 展宽的半高宽, ω 为电子碰撞参数, N_e 为等离子体密度。实验选取 Fe I 谱线测量电子密度,并绘制 Fe I Lorentz 拟合曲线图如图6 所示。





1 500

333.8

334.0

334.2

Wavelength/nm

(d)

334.4

334.6



- Fig. 6 Fe I Lorentz fitting curve: (a) No plane mirror;
 - (b) Plane mirror spacing of 7 mm;
 - (c) Plane mirror spacing of 9 mm;
 - (d) Plane mirror spacing of 11 mm;
 - (e) Plane mirror spacing of 13 mm

绘制不同平面反射镜间距下等离子体电子密度 变化情况如图 7 所示,由图可以看出,在平面反射镜 间距为 7 mm、9 mm、11 mm 时,等离子体的电子密 度都有不同程度的提高,经计算,相对于无平面反射 镜时,平面反射镜间距为 7 mm、9 mm、11 mm 时电 子密度分别提高了 2.41×10¹⁵ cm⁻³、1.65×10¹⁵ cm⁻³、1.42×10¹⁵ cm⁻³,间距为13 mm 时电子密度降 低了1.42×10¹⁴ cm⁻³。在无平面反射镜及平面反射 镜间距为 13 mm 时,电子密度较低,间距为 7 mm 时 等离子体密度提升最多。分析认为,等离子体形成 过程中产生的冲击被平面反射镜反射到等离子体区 域,提高了等离子体粒子之间的碰撞概率,减缓了等 离子的扩散速度,这有利于获得更强的等离子体发 射光谱。

通过假设激光诱导等离子体满足 LTE 条件求 得等离子体温度和电子密度,而按 McWhirter 的标 准可验证激光诱导等离子体是否满足 LTE 条件,满 足 LTE 所需的最小电子密度式为^[19]:

 $N_{e} \geq 1.6 \times 10^{12} \Delta E^{3} T_{e}^{1/2}$, (5) 式中, ΔE 为所求等离子体温度谱线中最大谱线跃迁 上下能级差,由式(5)得到在无平面反射镜及平面反 射镜间距为 7 mm、9 mm、11 mm、13 mm 满足 LTE 下所需最小电子密度分别为: 1.467×10^{15} cm⁻³, 1.503×10^{15} cm⁻³, 1.490×10^{15} cm⁻³, 1.479×10^{15} cm⁻³, 1.465×10^{15} cm⁻³,n实验数据所得等离子体 密度分别为 1.280×10^{16} cm⁻³, 1.522×10^{16} cm⁻³, 1.446×10^{16} cm⁻³, 1.423×10^{16} cm⁻³, 1.266×10^{16} cm⁻³,均高于满足 LTE 所需的最小电子密度。由此 可知,本实验的激光诱导等离子体满足 LTE 条件。



图 7 不同平面反射镜间距下等离子体电子密度 Fig. 7 Electron density of plasma with different plane mirror spacing

3.3 定量分析

为了定量评价有无平面反射镜约束对分析结果的准确性,通过实验研究,在平面反射镜间距为7 mm时,光谱强度、信噪比、等离子体温度和电子密度所提升最多,因此选择平面反射镜间距为7 mm和 无平面反射镜时进行定量分析。

本实验采用内标法对所测定的土壤样品中的 Pb 元素进行定量分析,将被测元素与内标元素的特征 谱线作为一组分析线,以它们的相对强度比与浓度 的对应关系作定标曲线^[15],本文实验内标元素选择 Fe 元素,所选择元素的分析谱线波长为 Pb I 405.78 nm,Fe I 419.83 nm,图 8 为有无平面反射镜约束下 元素 Pb 的校正曲线。

在有平面反射镜下Pb的校正曲线方程为 y=0.990 8x+1.185 2,32性相关系数 R^2 为0.991, 无平面反射镜下Pb的校正曲线方程为y=1.015 4x+1.0869,32性相关系数 R^2 为0.970。可以看出,实 验采用平面反射镜约束时,测得元素校正曲线的线 性相关系数比无平面反射镜约束要好,这是光谱质 量提高的结果。

元素的检出限(limits of detection,LOD)反映出

在 LIBS 技术定量分析中目标元素最小含量的检测 值和检测能力,根据国际理论和应用化学协会(IU-PAC)的规定,元素分析的检出限的计算式为:

$$LOD = k \frac{S_{b}}{S}, \tag{6}$$

式中,S_b为目标元素附近空白背景信号的相对标准 偏差,S为定标曲线的斜率,k为与置信度有关的常数,对于光谱定量分析中一般取 k 值为 3。



Fig. 8 Correction curve of Element Pb with and without plane mirror

相对标准偏差(relative standard deviation, *RSD*)反映出检测结果的准确性。其式为:

$$RSD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (X_i - \overline{X})}}{\overline{X}} \times 100\% \,. \tag{7}$$

表 2 是有无平面反射镜约束下 Pb 元素的检测限(LOD)、相对标准偏差(RSD)和定标曲线相关拟 合系数(R²)。

表 2 Pb 元素的 LOD、RSD 和 R² Tab. 2 LOD, RSD and R² of Pb

	LOD	RSD	R^2
Without plane mirror	86.9 mg/kg	7.86%	0.970
Plane mirror	51.2 mg/kg	4.63%	0.991

由表2可知,相对于无平面反射镜约束时,有平 面反射镜约束时的元素检测限降低,平均相对标准 偏差降低,定标曲线拟合系数提高。光谱信号强度 与检测元素的浓度有关,所以微量元素或低浓度元 素往往因为含量低导致谱线强度较低,在平面反射 镜约束条件检测下,能够更好地探测出样品中重金 属微量元素的特征谱线,降低检测限,提高定量分析 的精度。

4 结 论

本文搭建了平面反射镜约束下的激光诱导击穿 光谱检测系统,对土壤中的金属元素进行检测分析。 通过比较无平面反射镜约束及不同间距下平面反射 镜约束时的光谱特性,得到平面反射镜间距为7mm 时,光谱强度、等离子体参数提升效果最明显。在平 面反射镜约束下提高了定量分析的精度以及降低了 样品中重金属元素检出限。实验结果表明,平面反 射镜约束改善了LIBS 技术的光谱特性,因此采用平 面反射镜约束可为 LIBS 技术定量分析土壤样品中 的痕量元素提供支持。

参考文献:

- [1] YANG D Q, YAN C W, ZHANG J, et al. Chloride threshold value and initial corrosion time of steel bars in concrete exposed to saline soil environments[J]. Construction and Building Materials, 2020, 267(3):120979.
- [2] LIHL,XIEHJ,LVHS,et al. Auxiliary measurement of metal matrix based on laser induced breakdown spectroscopy[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2021, 32 (2):166-172.
 李红莲,谢红杰,吕贺帅,等.基于激光诱导击穿光谱技 术的金属基体辅助测量研究[J].光电子•激光,2021, 32(2):166-172.
- [3] WANG Z, YUAN T B, HOU Z Y, et al. Laser induced breakdown spectroscopy in China[J]. Frontiers of Physics, 2014, 9(4):419-438.
- [4] ZHAO Y,XU X,SUN M,et al. He. Deep learning associated with laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) for the prediction of lead in soil[J]. Applied Spectroscopy, 2019, 73(5):565-573.
- [5] ZHANG T T, SHU R, LIU P X, et al. Analysis of rock element composition by remote laser induced breakdown spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017,37(2):594-598.
 章婷婷,舒嵘,刘鹏希,等. 远程激光诱导击穿光谱技术

分析岩石元素成分[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37 (2):594-598. [6] LIU X Y, WANG Z Y, HAO L Q, et al. Application of laser

induced breakdown spectroscopy in biomedicine[J]. Laser Technology,2008,32(2):134-136. 刘宪云,王振亚,郝立庆,等.激光诱导击穿光谱在生物 医学中的应用[J].激光技术,2008,32(2):134-136.

[7] MISRA A K, ACOSTA-MAEDA T E, PORTER J N, et al. EXPRESS:a two-component approach for long range remote Raman and laser-induced breakdown (LIBS) spectroscopy using low laser pulse energy[J]. Applied Spectroscopy,2018,73(3):000370281881214.

- [8] LI X W, YANG Z F, WU J, et al. Spatial confinement in laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Journal of Phvsics D Applied Physics, 2017, 50(1):015203.
- [9] ZHANG D, CHEN A M, WANG X, et al. Influence of the distance between target surface and focal point on the expansion dynamics of a laser-induced silicon plasma with spatial confinement[J]. Spectrochimica Acta Part B Atomic Spectroscopy, 2018, 143(4): 71-77.
- GAO X,LIU L,SONG C,et al. The role of spatial confinement on nanosecond YAG laser-induced Cu plasma[J].
 Journal of Physics D Applied Physics, 2015, 48 (17): 175205.
- [11] CHEN J Z, BAI J N, SONG G J, et al. Enhancement effects of flat-mirror reflection on plasma radiation [J]. Applied Optics, 2013, 52(25); 6295-6299.
- [12] CHEN J Z, CHEN Z Y, SUN J, et al. Enhancement of laserinduced plasma spectrum by planar mirror[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2013, 24(9):1838-1843.
 陈金忠,陈振玉,孙江,等.平面反射镜对激光诱导等离

子体光谱的增强作用[J].光电子・激光,2013,24(9): 1838-1843.

- [13] STAVROPOULOS P, PALAGAS C, ANGELOPOULOS G N, et al. Calibration Measurements in laser-induced breakdown spectroscopy using nanosecond and picosecond lasers[J]. Spectrochimica Acta Part B Atomic Spectroscopy,2004,59(12):1885-1892.
- [14] PRAHER B, PALLESCHI V, VISKUP R, et al. Calibration free laser-induced breakdown spectroscopy of oxide materials[J]. Spectrochimica Acta Part B Atomic Spectroscopy, 2010, 65(8): 671-679.
- HUANG J S, CHEN Q L, ZHOU W D. Analysis of Cr and Sr in soil by laser induced breakdown spectroscopy [J].
 Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(11): 3126-3129.

作者简介:

李红莲 (1979一),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光谱检测 技术及其在气体以及固体测量中的应用和可调谐光纤激光器及应用 等方面的研究.