

doi:10.3788/gzxb20184708.0847004

水分含量对激光诱导岩屑等离子体特性的影响

贾军伟^{1,2}, 余明军³, 付洪波¹, 王华东^{1,2}, 倪志波¹, 董凤忠^{1,2}

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学, 合肥 230026)

(3 中石化中原石油工程有限公司录井公司, 河南 濮阳 457001)

摘 要: 对制备的七种不同湿度的岩屑样品进行实验, 研究了水分含量对激光诱导岩屑等离子体特性的影响以及不同水分含量下样品中各元素浓度值的修正方法. 实验分析了 Ca II 422.67 nm 谱线强度随岩屑样品含水量的变化, 通过 Ca II 和 Al I 各自四条谱线的玻尔兹曼图计算了不同水分含量下的等离子体平均温度, 并使用 Lorentz 拟合 Ca II 422.67 nm 谱线获得了不同水分含量岩屑等离子体的电子密度. 实验结果表明, 随着水分含量的增加, 光谱强度、等离子体温度和电子密度均线性降低, 各元素自由定标模型定量分析结果有较大差异, 但不同水分含量的岩屑等离子体均满足局部热力学平衡的 Mc Whirter 标准, 自由定标模型可以用于不同水分含量岩屑样品的分析及影响的简单修正.

关键词: 岩屑; 水分含量; 激光诱导击穿光谱; 等离子体温度; 电子密度; 热力学平衡

中图分类号: O657.3 O433.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)08-0847004-8

Effect of Moisture Content on Laser-induced Rock Cuttings Plasma Properties

JIA Jun-wei^{1,2}, SHE Ming-jun³, FU Hong-bo¹, WANG Hua-dong^{1,2}, NI Zhi-bo¹, DONG Feng-zhong^{1,2}

(1 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Sciences, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(3 Mud Logging Company of Zhongyuan Petroleum Engineering Co., Ltd., Puyang, Henan 457001, China)

Abstract: By preparing seven kinds of rock cutting samples with different moisture content, experiments were conducted to study the effect of moisture content on laser-induced rock cuttings plasma properties and the method for correcting the concentration of each element in different moisture content. The variation of the intensity of the Ca 422.67 nm line with the moisture content of the rock cutting samples was studied. The average plasma temperature under different moisture contents was calculated by the Boltzmann-plot of the four lines of Ca II and Al I. The electron density of the plasma with different moisture contents was obtained by using Lorentz fitting of the Ca 422.67 nm line. The results show that with the increase of moisture content, the spectral intensity, plasma temperature, electron density all decrease linearly and there are also great differences in the quantitative analysis results of the calibration free models for each element, but the laser-induced cuttings plasma with different moisture content all meet the Mc Whirter criterion of local thermodynamic equilibrium and the calibration free model can be used for the analysis and simple correction of moisture content effects.

Key words: Rock cuttings; Moisture content; LIBS; Plasma temperature; Electron density; Local thermodynamic equilibrium

OCIS Codes: 300.2140; 300.6210; 300.6500; 140.3440

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 61505223, 41775128), 中国科学院对外合作重点项目 (No. GJHZ1726) 和中国科学院知识创新工程 (No. Y03RC21124) 资助

第一作者: 贾军伟 (1987-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为激光诱导击穿光谱技术、光谱分析. Email: jjw2014@mail.ustc.edu.cn

导师 (通讯作者): 董凤忠 (1966-), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为高灵敏气体在线检测、工业过程控制、光纤传感等. Email: fzdong@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2018-06-23; **录用日期:** 2018-07-17

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

岩屑录井是指地质人员根据一定取样间距和迟到时间,连续收集、观察和分析岩屑从而获得地下地质剖面信息的一种录井方法.相对于其它录井方法,岩屑录井具有直观性、简单经济性、连续性、基础性等特点,这使其成为油气田勘探开发过程中普遍采用的录井方法.常用的岩屑定性或定量分析方法主要有 X 射线荧光法(X Ray Fluorescence, XRF)^[1,2]、数字图像处理^[3]及 X 射线衍射分析(X Ray Diffraction, XRD)^[4]等.由钻井液上返至地面携带的岩屑具有一定的水分含量,上述定性或定量分析方法要求对岩屑进行捞取、清洗、烘干、研磨、压饼等,需要较为复杂的样品预处理,不能满足录井现场实时在线分析的迫切需求.激光诱导击穿光谱(Laser-induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)技术,由于采用高能脉冲激光作为激发源,LIBS 具有实时、在线、远程分析能力,且无样品预处理等优点^[5].近年来 LIBS 被广泛应用于环境监测^[6]、材料分析^[7-10]和光谱特性分析^[11,12]等领域.目前针对样品含水量或湿度对激光诱导等离子体特性影响的研究还比较少,仅有的几项研究也主要是土壤^[13]和煤^[14]样品,而且缺少对不同水分含量下样品浓度值的转换和修正.本文使用 7 种不同水分含量的砂岩岩屑样品,研究了水分含量对激光诱导岩屑等离子体发射光谱强度、温度和电子密度等特性的影响,并且研究了水分含量对样品中元素浓度影响的修正方法.

1 实验系统和样品

1.1 实验系统

实验所使用的 LIBS 分析系统装置如图 1.实验中所使用的激光器为带有调 Q 开关的 Nd:YAG(镱宝, Dawa100)脉冲激光器,波长为 1 064 nm,单脉冲能量为 32 mJ,频率为 1 HZ,脉冲宽度为 7 ns.激光器发出的激光脉冲经过反射镜(Mirror)和焦距为 100 mm 的会聚透镜(Lens1)聚焦在样品表面,产生的等离子体光经过收集透镜(Lens2)耦合到光纤中,并传输至光谱仪.本次实验采用的光谱仪为中阶梯光栅光谱仪(Andor, Mechelle 5 000),分辨率为 $0.1 \text{ nm} \pm 0.05 \text{ nm}$,可探测光谱波长范围为 220 nm~950 nm,设置的采集延迟时间为 $2 \mu\text{s}$,门宽为 500 ns,ICCD 探测器的曝光时间 2 ms.探测器将采集的光信号换成电信号,并由光谱仪配套的 Andor Solis 软件进行光谱数据的采集和保存.半导体连续激光器 2 作为指示光,在样品表面的光斑与采样点位置重合,可以确保每次采样点的位置和会聚透镜(Lens1)的距离是相同的,可实现厚度不同或表面不平整样品的光谱数据有效采集.实验是在空气环境中完成的,为减少空气击穿,样品表面和会聚透镜(Lens1)间的距离略小于其焦距 100 mm,样品被放置在三维移动平台上,可实现样品多个位置的光谱数据采集.

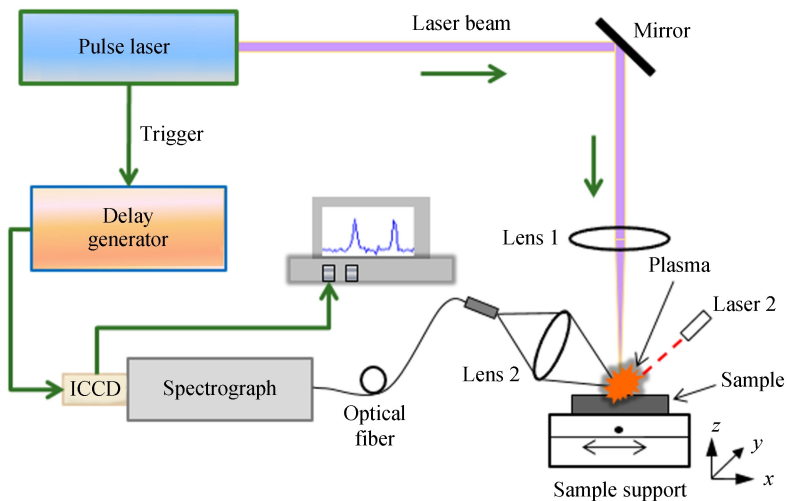


图 1 LIBS 分析系统装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of LIBS analysis system

1.2 样品制备

实验样品是由中国石油化工集团公司中原石油工程有限公司录井公司提供的砂岩岩屑,相比其他类型岩屑,砂岩具有高度的多孔性和渗透性,比其他岩石类型更容易吸收水分,而且砂岩是一种沉积岩,主要含硅、钙、黏土等,是一种重要的储油岩,对石油的勘探开采具有指导性的意义.通过控制样品在去离子水中的浸泡时间和烘箱中烘干的时间,得到不同水分含量的砂岩岩屑样品,样品水分含量可根据式(1)计算获得.

$$M_c = \frac{M_1 - M_0}{M_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中, M_c 为样品水分含量值, M_1 为含水样品质量, M_0 为样品烘干至质量不变时的样品质量.

为了减少水分含量变化引起的实验误差,砂岩岩屑样品的 LIBS 分析和水分含量测量同时进行,每个样品在相同实验条件下采集 5 个不同的位置,每个位置采集 1 组光谱数据,每组光谱数据为 10 幅光谱数据的累积平均.

2 实验结果与讨论

2.1 水分含量对谱线强度的影响

由于Ca II 422.67 nm谱线拥有良好的信噪比和谱线强度,其被选为参考谱线用于研究水分含量为0%~2.04%的岩屑样品对 LIBS 光谱强度的影响.Ca II 422.67 nm 谱线的洛伦兹拟合强度随岩屑样品含水量的变化如图 2.

由图 2 可知,随着水分含量的增加样品中 Ca II 422.67 nm 的拟合强度逐渐降低,并且与样品含水量具有很好的线性相关性,相关系数均达到了 0.9 以上.这主要是由于激光与样品作用时,样品中的水吸收了一部分激光能量,使得用于击穿样品的激光能量降低,样品烧蚀量减少,导致 Ca 谱线强度降低.不同水分含量谱线强度最高相差近 10 倍,这表明样品水分含量将会对 LIBS 定量分析结果产生较大影响,因此对水分含量的补偿修正是必要的.

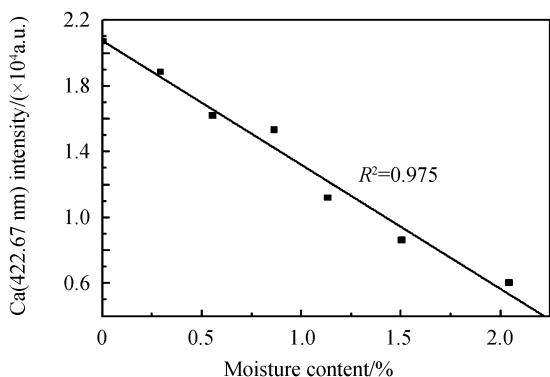


图 2 不同水分含量下岩屑中 Ca 元素谱线强度
Fig.2 Spectral lines intensity of Ca in cuttings under different moisture contents

2.2 水分含量对等离子体温度的影响

针对不同含水量岩屑样品,使用玻尔兹曼平面图(Boltzmann-plot)^[15,16]的方法,分别使用 Ca II 和 Al I 的四条谱线计算等离子体温度.

根据激光诱导击穿光谱自由定标模型,LIBS 谱线强度表示为

$$I_k = FC_s \frac{g_k A_{ki} \exp(E_k/k_B T)}{U(T)} \quad (2)$$

式中, I_k 为谱线强度, C_s 为谱线所对应元素浓度, g_k 为上能级简并度, A_{ki} 为跃迁几率, E_k 为高能级跃迁能量, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为等离子体温度, F 为与实验有关的常数, $U(T)$ 为配分函数. g_k, A_{ki}, E_k 均可从美国 NIST 原子光谱数据库中查询得到.

激光诱导等离子体发射光谱的积分强度表示为

$$\ln\left(\frac{I_k}{g_k A_{ki}}\right) = -\frac{E_k}{k_B T} + \ln\left[\frac{FC_s}{U(T)}\right] \quad (3)$$

根据玻尔兹曼图法,假设

$$\begin{cases} x = E_k \\ y = \ln\left(\frac{I_k}{g_k A_{ki}}\right) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} k = -\frac{1}{k_B T} \\ q_s = \ln\left(\frac{FC_s}{U(T)}\right) \end{cases} \quad (5)$$

分别选择 Ca II 和 Al I 的四条特征谱线用于计算等离子体温度,所用特征谱线参数如表 1.

表 1 Ca 和 Al 元素特征谱线参数

Element	Wavelength/nm	$A_{ki}/10^8$	E_i/eV	E_k/eV	g_k
Ca II	315.89	3.10	3.123 349	7.047 169	4
Ca II	317.93	3.60	3.150 984	7.049 550	4
Ca II	393.37	1.47	0	3.150 984	4
Ca II	396.85	1.40	0	3.123 349	2
Al I	308.22	0.587	0	4.021 484	4
Al I	309.27	0.729	0.013 893 8	4.021 650	6
Al I	394.40	0.499	0	3.142 721	2
Al I	396.15	0.985	0.013 893 8	3.142 721	2

由多个 (x, y) 点可获得二维玻尔兹曼平面图,根据所得直线的斜率 k ,根据式(5)可求得各水分含量下等离子体温度 T 及 Al 和 Ca 的平均等离子体温度,如表 2 所示.

表 2 不同水分含量下等离子体温度

Table 2 Plasma temperature under different moisture contents

Moisture/%	Al plasma temperature/K	Ca plasma temperature/K	Average plasma temperature/K
0	14 696.08	15 598.01	15 147.05
0.29	13 236.07	13 701.95	13 469.01
0.55	11 063.97	10 791.41	10 927.69
0.86	10 611.00	9 908.43	10 259.72
1.13	9 082.13	8 690.27	8 886.20
1.50	7 996.79	7 536.22	7 766.51
2.04	6 765.60	6 443.85	6 604.73

由表 2 和图 3 可知,随着水分含量的增加,等离子体温度均逐渐降低,并且水分含量和平均等离子体温度具有较好的相关性,相关系数达到了 0.9 以上.

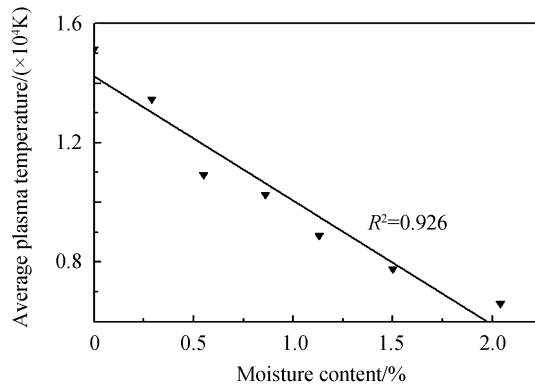


图 3 不同水分含量下等离子体温度及平均等离子体温度

Fig.3 Average plasma temperature under different moisture contents

2.3 水分含量对等离子体电子密度的影响

根据谱线的 Stark 展宽可得到电子密度 N_e ,电子密度和谱线展宽之间存在关系

$$\Delta\lambda_{\text{FWHM}} \approx 2 \times 10^{-16} \omega N_e \quad (6)$$

式中, ω 为相应谱线的碰撞系数,可在文献[17]中查表得到, $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$ 为相应特征谱线的 Lorentz 拟合线宽, N_e 为电子密度.

根据 McWhirter 标准^[18],满足局部热力学平衡(Local Thermodynamic Equilibrium, LTE)的条件为

$$N_e \geq 1.6 \times 10^{12} T^{1/2} \Delta E^3 \quad (7)$$

式中, N_e 为电子密度, T 为等离子体温度, ΔE (eV) 为最大跃迁能量.

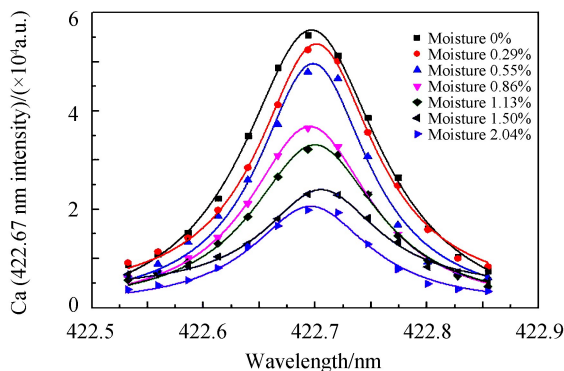


图4 不同水分含量下 Ca 谱线 Lorentz 拟合

Fig.4 Lorentz fitting of Ca line under different moisture contents

选择 Ca II 422.67 nm 谱线进行 Lorentz 拟合计算不同水分下的等离子体密度,如图 4 所示,不同水分含量的岩屑样品 Ca II 422.67 nm 谱线 Lorentz 拟合的决定系数均在 0.9 以上.分别根据式(5)和(6)得到了不同水分含量样品中等离子体电子密度和满足局部热力学平衡所要求的电子密度最低值,如表 3 所示.

表 3 不同水分含量下电子密度和最低电子密度

Table 3 Electronic density and lowest electron density under different moisture contents

Moisture/%	Electron density/cm ³	Lowest electron density/cm ³
0	2.11×10^{17}	1.69×10^{15}
0.29	1.88×10^{17}	1.60×10^{15}
0.55	1.80×10^{17}	1.44×10^{15}
0.86	1.62×10^{17}	1.39×10^{15}
1.13	1.57×10^{17}	1.30×10^{15}
1.50	1.46×10^{17}	1.21×10^{15}
2.04	1.34×10^{17}	1.12×10^{15}

由表 3 可知,电子密度和最低电子密度均随样品水分含量的增加线性下降,这是因为相比岩屑样品,水更加难以离子化,激光能量一定时,随着水分含量的增加电子密度有所降低.不同水分含量下最低电子密度均小于对应水分含量下的电子密度,说明不同水分含量下等离子体均满足局部热力学平衡的 Mc Whirter 标准,可以使用自由定标模型对不同水分含量下的样品进行定量分析.

2.4 不同水分含量样品浓度修正

根据式(2)可得到对应水分含量下的样品浓度,但是在相同水分含量 M_{cx} 下描述样品浓度才有实际的应用价值,因此需要对不同水分含量下求得的样品浓度加以修正,使之转换为参考水分含量下的样品浓度.

使用自由定标法需要用样品中所有粒子浓度进行归一化处理,由于只分析了砂岩岩屑样品中的 Al、Ca、Si 和 Mg 四种主量元素,因此在归一化处理时只按照这四种成分的总含量进行归一化,如式(8)所示.

$$\sum C_s = \frac{1}{F} \sum U(T) \exp(q_s) = 1 \quad (8)$$

求得 F , 可得到各元素浓度为

$$C_s = \frac{U(T)}{F} e^{q_s} \quad (9)$$

根据式(8)和式(9)可求得各组分含量如表 4 所示.

表 4 不同水分含量下 Ca、Al、Si 和 Mg 浓度值

Table 4 Ca, Al, Si and Mg concentrations values under different moisture contents

Moisture/%	Ca/%	Al/%	Si/%	Mg/%
0	17.22	3.99	69.26	9.21
0.29	16.68	6.83	67.51	8.77
0.55	18.43	6.53	67.39	7.33
0.86	16.96	6.68	67.29	8.73
1.13	16.52	7.22	66.04	9.93
1.50	15.68	8.75	65.52	9.81
2.04	15.35	8.85	64.16	11.43

由表 4 可知,不同水分含量下各元素浓度值具有一定的差异,尤其较高水分含量下的浓度值具有较大的差异,因此需要对不同水分含量的浓度值加以修正.

由于不同水分含量下的等离子体温度、电子密度、实验参数 F 及配分函数 $U(T)$ 均是复杂变化的,直接加以修正具有很大的难度,因此选择了对不同水分含量下得到的样品浓度值进行修正,使其全部转换为相同参考水分含量下的样品浓度,从而实现水分含量对样品浓度影响的修正.

根据自由定标模型的假设,等离子体中的元素浓度和样品中对应元素的浓度是相同的,等离子体中水分含量和样品中的水分含量也是相同的,因此可以通过自由定标模型将任意水分含量下的样品浓度转换为同一参考水分含量下样品浓度,实现水分含量对样品浓度影响的简单修正.

假设 M'_0 为激发样品中干样品质量,激发的含水样品质量为 M'_1 ,可知所激发样品中的水分含量 M_{cs} 为

$$M_{cs} = \frac{M'_1 - M'_0}{M'_1} \times 100\% \quad (10)$$

此时,所激发等离子体中样品浓度为 C_s 为

$$C_s = \frac{M'_0}{M'_1} \quad (11)$$

假设,所激发等离子体水分含量为 M_{cx} 作为参考水分含量,即

$$M_{cx} = \frac{M'_{cx} - M'_0}{M'_{cx}} \times 100\% \quad (12)$$

式中,激发的含水样品质量为 M'_{cx} ,此时,所激发等离子体中样品浓度为

$$C_x = \frac{M'_0}{M'_{cx}} \quad (13)$$

由式(10)~(13)可得,样品浓度 C_s 与某一参考水分含量下样品浓度 C_x ,即两种不同水分含量的样品浓度之间的关系为

$$C_s = \frac{1 - M_{cs}}{1 - M_{cx}} C_x \quad (14)$$

参考水分含量 M_{cx} 为 0 时,各水分含量进行浓度转换修正后结果如表 5 所示.

表 5 不同水分含量下 Ca、Al、Si 和 Mg 浓度修正值

Table 5 Ca, Al, Si and Mg corrected concentration values under different moisture contents

Moisture/%	Ca/%	Al/%	Si/%	Mg/%
0	17.22	3.99	69.26	10.21
0.29	16.73	6.85	67.71	8.79
0.55	18.53	6.57	67.76	7.37
0.86	17.11	6.74	67.87	8.81
1.13	16.71	7.30	66.79	10.04
1.50	15.92	8.88	66.52	9.96
2.04	15.67	9.03	65.49	11.67

因为自由定标模型具有一定的局限性,如对误差较为敏感,一种元素浓度计算不准确将直接影响其他元素的计算结果等,而且样品的均匀性也直接影响计算结果.由表 5 可知,主量元素的浓度修正值和参考水分

含量下的浓度值较为接近,低浓度的元素如 Al 和 Mg 元素的含量修正后仍然和参考水分含量下的浓度值具有较大的差异。

由式(2)和(14)可知,修正后的样品浓度 C_x 和光谱强度值之间的关系为

$$I_k = \frac{1 - M_c}{1 - M_{cx}} C_x F g_k A_{ki} \frac{e^{-E_k/K_B T}}{U(T)} \quad (15)$$

根据式(14)可以将不同水分含量下得到的样品浓度转换为任意参考水分含量下样品的浓度,使定量分析结果更加具有实用价值,同时由式(15)可以看出,光谱强度随样品水分含量 M_c 的增加是降低的,与实验结果也是相符的。

3 结论

使用 LIBS 技术分析了水分含量对激光诱导岩屑等离子体特性的影响,随着水分含量的增加,不同水分含量的砂岩岩屑样品等离子体发射光谱强度、等离子体温度和电子密度均线性降低,岩屑样品的水分含量严重影响岩屑定量分析的精确度.不同水分含量下等离子体均满足局部热力学平衡的 Mc Whirter 标准,通过自由定标模型得到各水分含量下的样品浓度,并将其转换为参考水分含量下的浓度值,修正了水分含量对样品浓度值的影响.修正后主量元素的浓度值与参考值较为接近,由于样品的均匀性及自由定标模型的一些局限性,微量元素的修正值和参考值仍然具有较大的差异,但结果表明自由定标模型直接用于不同水分含量岩屑样品的定量分析是可行的,进一步对不同水分含量 LIBS 谱线进行修正后,可以实现水分含量对微量元素定量分析结果影响的修正。

参考文献

- [1] LI Yi-chao, LI Chun-shan, LIU De-lun, *et al.* X ray fluorescence cutting logging technology [J]. *Mud Logging Engineering*, 2008, **19**(1):1-8.
李一超,李春山,刘德伦,等. X 射线荧光岩屑录井技术[J]. 录井工程, 2008, **19**(1):1-8.
- [2] WELTJE G J, TJALLINGII R. Calibration of XRF core scanners for quantitative geochemical logging of sediment cores: theory and application[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2008, **274**(3):423-438.
- [3] SUN Zheng, LI Wen-dong, CHENG Kai, *et al.* Design and realization of cuttings recognition system based on linear CCD [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2010, **1**(12):1825-1828.
孙政,李文东,程凯,等. 基于线阵 CCD 的岩屑识别系统设计与实现[J]. 光电子·激光, 2010, **1**(12):1825-1828.
- [4] SOUZA A J, PINHEIRO BC A, HOLANDA J N F, *et al.* Processing of floor tiles bearing ornamental rock-cutting waste[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, **210**(14):1898-1904.
- [5] CREMERS D A, KNIGHR A K. Laser - induced breakdown spectroscopy[M]. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, John Wiley & Sons, Ltd, 2006:640-69.
- [6] WANG Qing, TAN Juan, WU Jian, *et al.* Application progress of laser induced breakdown spectroscopy in the field of environment[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, **31**(03), 123-131.
王卿,谭娟,吴健,等. 激光诱导击穿光谱技术在环境领域中的应用动态[J]. 中国环境监测, 2015, **31**(3), 123-131.
- [7] COUSIN A, MESLIN P Y, WIENS R C, *et al.* Compositions of coarse and fine particles in martian soils at gale a window into the production of soils[J]. *Icarus*, 2015, **249**(1), 22-42.
- [8] SENESI G S. Laser-induced breakdown spectroscopy applied to terrestrial and extraterrestrial analogue geomaterials with emphasis to minerals and rocks [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, **139**(1), 231-267.
- [9] SHEN Qin-mei, ZHOU Wei-dong, *et al.* Laser induced breakdown spectroscopy combined with neural network for determination of Cr and Ba in soil[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12):2134-2138.
沈沁梅,周卫东. 激光诱导击穿光谱结合神经网络测定土壤中的 Cr 和 Ba[J]. 光子学报, 2010, **39**(12):2134-2138.
- [10] CHEN Xing-long, DONG Feng-zhong, TAO Guo-qiang, *et al.* Fast lithology identification by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(12):237-242.
陈兴龙,董凤忠,陶国强,等. 激光诱导击穿光谱在地质录井岩性快速识别中的应用[J]. 中国激光, 2013, **40**(12):237-242.
- [11] YU Jian-hua, DONG Mei-rong, LU Ji-dong, *et al.* Spectral characteristics of nitrogen in laser induced organics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(10):1030003.
余建华,董美蓉,陆继东,等. 激光诱导有机物中氮元素的光谱特性分析[J]. 光子学报, 2016, **45**(10):1030003.
- [12] DAI Ruan, LI Jun, LI Wen-sheng, *et al.* Laser induced plasma spectral characteristics of TP347H steel with different surface states[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(7):0714002.
戴沅,李军,李文胜,等. 激光诱导不同表面状态 TP347H 钢的等离子体光谱特性[J]. 光子学报, 2016, **45**(7):

0714002.

- [13] LU Cui-ping, LIU Wen-qing, ZHAO Nan-jing, *et al.* Influence of humidity on characteristic of laser-induced soil plasmas[J]. *Spectroscopy & Spectral Analysis*, 2010, **30**(11):2885-2888.
鲁翠萍, 刘文清, 赵南京, 等. 湿度对激光诱导土壤等离子体特性的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, **30**(11):2885-2888.
- [14] CHEN Meng-yuan, YUAN Ting-bi, HOU Zong-yu, *et al.* Effects of moisture content on coal analysis using laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2015, 112:23-33.
- [15] PANDHIJA S, RAI N K, RAI A K, *et al.* Contaminant concentration in environmental samples using LIBS and CF-LIBS[J]. *Applied Physics B*, 2010, **98**(1):231-241.
- [16] CIUCCI A, CORSI M, PALLESCHI V, *et al.* New procedure for quantitative elemental analysis by laser-induced plasma spectroscopy[J]. *Applied Spectroscopy*, 1999, **53**(8):960-964.
- [17] GRIEM H. Plasma spectroscopy mcgraw-hill book company[M]. New York 1964,320-357.
- [18] WANG Hui-li, WANG Jian-wei, ZHOU Qiang, *et al.* Quantitative analysis of Cu in cement by laser induced breakdown spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, **38**(11): 1553-1558.
王慧丽, 王建伟, 周强, 等. 激光诱导击穿光谱法定量分析水泥中的铜元素[J]. 发光学报, 2017, **38**(11): 1553-1558.
- [19] FUJIMOTO T, MCWHIRTER R W. Validity criteria for local thermodynamic equilibrium in plasma spectroscopy[J]. *Physical Review A*, 1990, **42**(11):6588-6591.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 61505223, 41775128), the External Cooperation Program of Chinese Academy of Science (No. GJHZ1726), the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (No. Y03RC21124)

引用格式: JIA Jun-wei, SHE Ming-jun, FU Hong-bo, *et al.* Effect of Moisture Content on Laser-induced Rock Cuttings Plasma Properties [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8):0847004

贾军伟, 余明军, 付洪波, 等. 水分含量对激光诱导岩屑等离子体特性的影响[J]. 光子学报, 2018, **47**(8):0847004