

文章编号 1004-924X(2024)20-2999-07

激光诱导荧光辅助激光诱导击穿光谱对 合金结构钢中 Mo 的定量分析

莫凯峰, 唐云*, 杨泽恩, 王胜, 郭恩新, 廖嘉乐

(湖南科技大学 物理与电子科学学院 湖南省智能传感与新型传感器材料重点实验室,
湖南湘潭 411201)

摘要:合金结构钢中钼(Mo)元素的含量对性能有重要影响,因此检测合金结构钢中Mo元素的含量具有重要意义。然而,合金结构钢中基体元素Fe的谱线干扰和自吸收效应严重影响激光诱导击穿光谱对Mo元素定量分析的准确性。在这项工作中,使用了激光诱导荧光辅助激光诱导击穿光谱(LIBS-LIF)来解决这些问题。Mo I 379.83 nm, Mo I 386.41 nm, Mo I 390.30 nm 三条谱线被选为分析线。结果表明,LIBS-LIF 能够增强三条分析线的光谱强度,消除了光谱干扰,并且随着Mo含量从0.019 wt. %增加到1.4 wt. %, Mo元素谱线的光谱强度也明显增强。与传统的LIBS技术相比,Mo I 386.41 nm 谱线的自吸收因子降低了99.99%,交叉验证均方根误差降低了65.37%,平均相对偏差降低了85.69%,平均相对标准偏差降低了20.20%。因此,LIBS-LIF 可以有效地减小光谱干扰和自吸收效应,提高定量分析的准确性。

关键词:激光诱导击穿光谱;激光诱导荧光;合金结构钢;钼元素

中图分类号:O657.38;TG142.71 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243220.2999

Quantitative analysis of Mo in alloy structural steel using laser-induced fluorescence assisted laser-induced breakdown spectroscopy

MO Kaifeng, TANG Yun*, YANG Ze'en, WANG Sheng, GUO Enxin, LIAO Jiale

(Hunan Province Key Laboratory of Intelligent Sensors and Advanced Sensor Materials, School of
Physics and Electronics Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

* Corresponding author, E-mail: yuntang@hnust.edu.cn

Abstract: The content of molybdenum (Mo) element in alloy structural steel has significant effects on its performance, making the detection of Mo content in alloy structural steel of great significance. However, the spectral interference and self-absorption effects of matrix element (Fe) in alloy structural steel severely affect the accuracy of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) for quantitative analysis of Mo element. In this work, we employed laser-induced fluorescence-assisted laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS-LIF) to address these issues. We selected three spectral lines, Mo I 379.83 nm, Mo I 386.41

收稿日期:2024-06-05;修订日期:2024-08-14.

基金项目:湖南省自然科学基金面上项目(No. 2024JJ5166);国家自然科学基金(No. 62005078);湖南省教育厅科学研究项目(No. 21B0477);智能传感器与新型传感材料湖南省重点实验室开放基金项目(No. E22341)

nm, and Mo I 390.30 nm, as the analysis lines. The results showed that LIBS-LIF enhanced the spectral intensities of the three analysis lines, eliminating spectral interferences. As the Mo content increased from 0.019 wt. % to 1.4 wt. %, the spectral intensities of Mo element lines also significantly increased. Compared to the traditional LIBS technique, the self-absorption factor of the Mo I 386.41 nm line decreased by 99.99% in LIBS-LIF, the root mean square error of cross-validation decreased by 65.37%, the average relative deviation decreased by 85.69%, and the average relative standard deviation decreased by 20.20%. Therefore, LIBS-LIF can effectively reduce spectral interferences and self-absorption effects, improving the accuracy of quantitative analysis.

Key words: laser-induced breakdown spectroscopy; laser-induced fluorescence; alloy structure steel; molybdenum element

1 引言

钼(Mo)是合金结构钢中的主要合金组元之一。将钼元素添加到合金钢中能有效地提高铁基合金的强度和硬度^[1],同时能够使钢在高温下保持足够的强度,并改善钢材的耐蚀性和冷脆性,因此,钼广泛地应用于结构钢、耐热钢、耐酸钢和工具钢等领域^[2]。然而,增加钼含量会对合金钢的韧性产生不利影响,影响其加工性能^[3-4]。因此,在工业生产中,严格控制合金结构钢中的钼元素的含量变得非常重要。

传统的钼元素定量分析方法包括电感耦合等离子体质谱法(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS)^[5]、X射线荧光光谱法(X-ray Fluorescence Spectrometry, XRF)^[6-7]和硫氰酸盐分光光度法^[8]。这些传统方法通常需要在检测前将样品溶解于酸中,在日常分析检测中过于繁琐。样品制备时间长,步骤繁琐且使用的酸溶试剂往往对人体和环境具有潜在的危害。而且,在高含量的钼合金钢中,硫氰酸盐分光光度法往往会导致较大的偏差。总之,这些传统方法由于操作过程繁琐、耗时长,无法满足快速检测的需求。

激光诱导击穿光谱(Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)技术^[9-11]是一种近年来飞速发展的光谱分析技术。该技术利用高功率激光脉冲聚焦在样品表面,产生的等离子体在衰竭过程中会辐射出光谱。通过对光谱进行分析,可以确定样品中的元素种类和含量。LIBS具有快速检测^[12-13]、无接触和简单样品处理等优点,因此在环境检测^[14-15]、工业生产^[16-17]、空间探

索^[18-19]和生物技术^[20-21]等领域具有广泛的发展潜力。然而,钼元素的特征谱线容易被基体元素谱线干扰,因此LIBS光谱分析方法在合金结构钢中的应用存在一定的局限。

激光诱导荧光辅助LIBS(LIBS-LIF)^[22]技术是一种能够增强LIBS光谱的方法。该技术利用波长可调谐的激光有选择性地激发等离子体中的目标元素原子发出荧光,可以显著提高检测的灵敏度和降低检测极限^[23-25]。同时,它还能消除光谱干扰和减小自吸收效应,从而提高元素检测的准确性。本研究以合金钢结构样品为例,利用波长可调谐激光辐射激光诱导等离子体,显著增强了微量钼元素的特征谱线 Mo I 379.83 nm, Mo I 386.41 nm, Mo I 390.30 nm。通过比较LIBS和LIBS-LIF技术对 Mo I 386.41 nm特征谱线的定量分析结果,进一步证实了LIBS-LIF技术的有效性。

2 实验部分

2.1 实验设备

本研究使用的实验装置示意图如图1所示。采用固定波长的Nd:YAG调Q脉冲激光器(Quantel Ultra 100,波长为532 nm,脉宽为7 ns,重复频率为10 Hz,脉冲能量为4 mJ)输出激光脉冲经过反射镜反射,并经过UV级石英透镜($f=25$ mm)进行聚焦,烧蚀样品产生等离子体。然后利用波长可调谐OPO激光器(OPOTEK, Inc., Vibrant HE 355 LD,波长范围225~2 400 nm连续可调,脉冲能量1 mJ,脉冲持续时间10 ns,重复频率为10 Hz)输出特定波长的激光对整

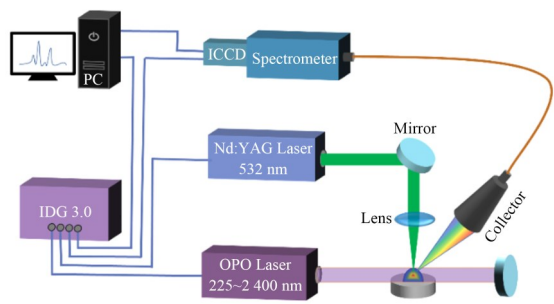


图1 实验装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup.

个等离子体进行辐照。采用光收集器(Ocean Insight,84UV-25,波长范围200~2 000 nm)收集等离子发射的光。使用CT 结构光谱仪(Andor Technology, Shamrock 500i,光栅设置为2 400 线/mm)进行光谱分析,并利用增强型电荷耦合器件(Intensified Charge-Coupled Device, ICCD)(Andor Technology, iStar 320T)进行光电转换。数字延迟发生器(Wuhan N&D Laser Engineering, LDG 3.0)用于触发两个激光器和ICCD。其中,OPO 激光器和ICCD 的触发时间相同。LIBS 和 LIBS-LIF 的ICCD 门宽分别设置为100 ns 和10 ns。为了避免激光脉冲能量对光谱稳定性的影响,目标样品放置在一个三维电动平移台

上,进行弓形运动,单幅光谱强度累积100个激光脉冲,每个样品重复采集10次。

2.2 实验样品

本文采用的合金结构钢样品(GBW001666a-01673a)中钼元素含量如表1所示。

表1 合金结构钢样品中钼(Mo)元素含量表(wt. %)
Tab.1 Certified concentration of Mo elements in the alloy structure steels sample (wt. %)

编号	1	2	3	4	5	6	7	8
Mo	0.21	0.019	0.556	1.4	0.864	0.118	0.305	0.423

3 实验结果与讨论

3.1 Mo 谱线的光谱干扰和自吸收

Mo I 379.83 nm, Mo I 386.41 nm, Mo I 390.30 nm 的共振原子线强度较高,因此这三条谱线通常用于 Mo 的光谱分析。在本研究中,选择 Mo I 379.83 nm, Mo I 386.41 nm, Mo I 390.30 nm 作为分析线。图2(a),2(c),2(e)展示了8种样品含量下的 LIBS 光谱图。Fe 元素作为合金结构钢中的基体元素,其含量大约在90%。需要注意的是,由图2(a),2(c),2(e)可见,在三

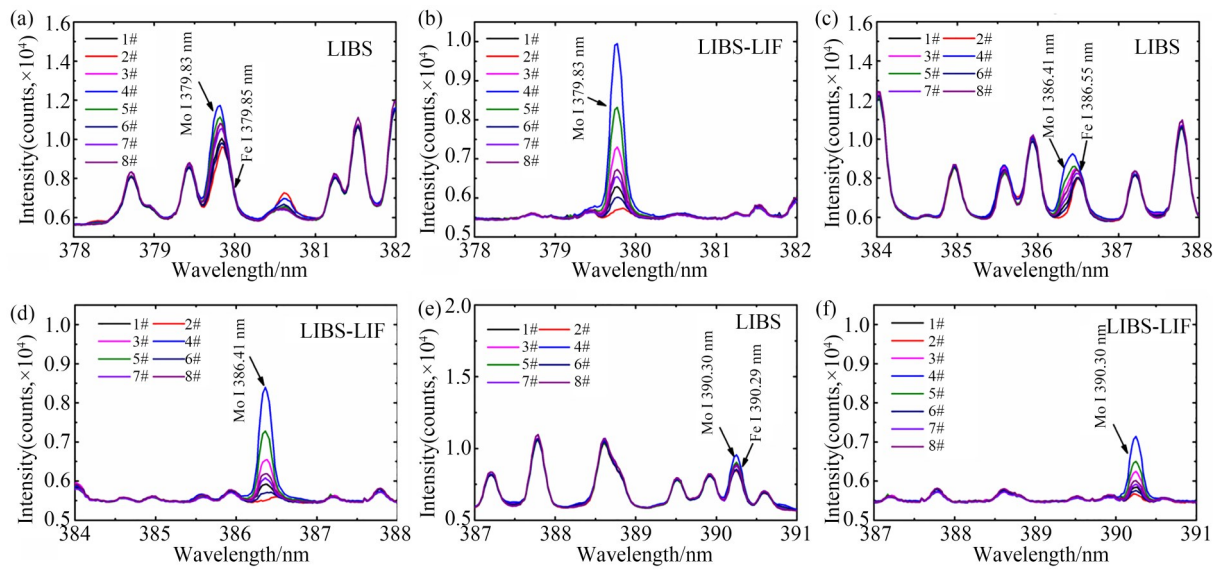


图2 Mo I 379.83 nm(a), Mo I 386.41 nm(c), Mo I 390.30 nm(e) 的8种含量的样品 LIBS 光谱图。Mo I 379.83 nm (b), Mo I 386.41 nm(d), Mo I 390.30 nm(f) 的8种含量的样品 LIBS-LIF 光谱图
Fig. 2 The LIBS spectra of samples with eight different concentrations for Mo I 379.83 nm (a), Mo I 386.41 nm (c), and Mo I 390.30 nm (e). The LIBS-LIF spectra of samples with eight different concentrations for Mo I 379.83 nm (b), Mo I 386.41 nm (d), and Mo I 390.30 nm (f)

条 Mo 元素的特征谱线 (Mo I 379.83 nm, 386.41 nm 和 390.30 nm) 附近存在 Fe 元素的谱线 (Fe I 379.85 nm, 386.55 nm 和 390.29 nm), 导致了谱线的重叠, 对光谱分析造成了严重干扰。特别是 Mo I 390.30 nm 的特征谱线受到的干扰最为严重, 几乎无法区分。另外, 从图 2(a), 2(c), 2(e) 可见, 随着 Mo 元素浓度的增加, Mo 元素的三条特征谱线强度并未线性增加, 这是由于等离子体的自吸收

效应造成的。在之前的研究中^[26], 我们描述了如何通过 LIBS-LIF 减少自吸收效应, 并在本研究中采用了相同的方法。三个分析谱线的下能级为基态。因此, 最佳激发线的下能级应该也为 0 eV^[27]。此外, 通常选择跃迁几率较高的谱线作为激发线。根据以上要求, 激发波长被设定为 317.03 nm。Mo 原子谱线的光谱参数如表 2 所示。共振激发能级跃迁过程如图 3 所示。

表 2 Mo 元素谱线的光谱参数

Tab. 2 Spectroscopic parameters of the Mo element spectral lines

	Wavelength/nm	Lower-level energy E_i /ev	Upper-level energy E_k /ev	Transition probability A_{ki} ($\times 10^7$)	Upper statistical weight g_k
Exciting lines	317.03	0	3.909 6	1.37	7
	379.83	0	3.263 3	6.89	9
Analytical lines	386.41	0	3.207 7	6.23	7
	390.30	0	3.175 8	6.17	5

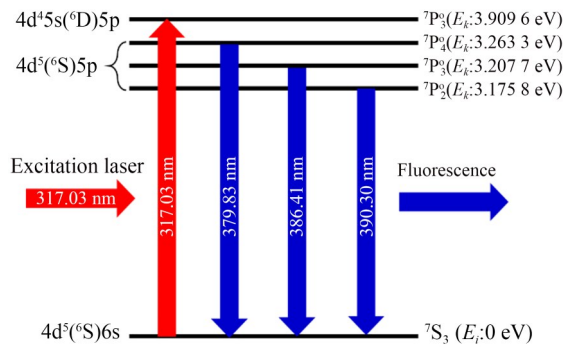


图 3 Mo 原子能级图

Fig. 3 Mn atomic energy level diagram

当等离子体产生时, OPO 激光器输出 317.03 nm 的激光照射整个等离子体, 并同时收集光谱。因此, 光谱采集的延时时间与激光脉冲间延迟相同。由于 OPO 激光器的脉冲宽度为 10 ns, 为了捕获整个荧光信号, ICCD 的门宽也被设置为 10 ns。图 4 显示了样品 4 的 LIBS 和 LIBS-LIF 光谱对比图 (彩图见期刊电子版)。黑线对应 LIBS 光谱图, 红线对应 LIBS-LIF 光谱图。从图中可以清楚地看出, LIBS 的光谱非常弱, 而经过共振激发后的 Mo 元素的三条分析谱线明显增强。

LIBS 采集的 8 种含量样品的光谱图如图 2 (a), 2(c), 2(e) 所示, LIBS-LIF 系统采集的 8 种

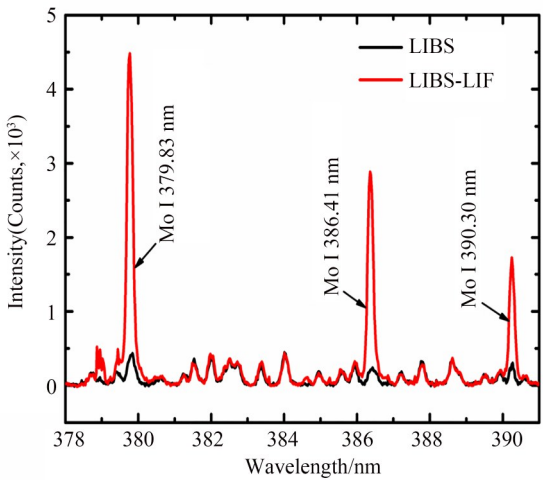


图 4 样品 4 的 LIBS 和 LIBS-LIF 光谱图

Fig. 4 LIBS and LIBS-LIF spectra of sample 4

含量样品的光谱图如图 2(b), 2(d), 2(f) 所示。在 LIBS-LIF 中, Mo I 379.83 nm, Mo I 386.41 nm, Mo I 390.30 nm 三条谱线得到了增强, 谱线重叠的情况减弱, Fe 元素谱线的干扰消失。LIBS-LIF 光谱图表明, 随着 Mo 含量从 0.019 wt. % 增加到 1.4 wt. %, Mo 元素谱线的光谱强度也显著增加, 显示出 LIBS-LIF 对抑制自吸收效应的有效性。

为了进一步分析 Mo 元素谱线的自吸收减少情况, 采用自吸收因子 (α) 进行评估。自吸收因

表 3 LIBS 和 LIBS-LIF 对合金结构钢中钼元素的定量分析性能对比
Tab. 3 Quantitative analyses comparison for Mo element by LIBS and LSA-LIBS

谱线	方法	α	线性 R^2	RMSECV (wt. %)	ARE/%	ARSD/%
Mo I 386.41 nm	LIBS	0.708 95	0.976 5	0.113 78	1.011 5	0.007 733
	LIBS-LIF	0.000 007	0.996 8	0.039 402	0.144 74	0.006 171

子可以通过谱线半高宽、谱峰比值和定标曲线等方式获得。在本研究中,采用指数定标曲线法来获取自吸收因子。

3.2 定量分析

采用指数定标曲线进行评估,其函数如式(1)所示:

$$I(C)=A(1-e^{-\alpha C})+I_b, \tag{1}$$

其中: C 是元素浓度, $I(C)$ 是光谱强度, α 是自吸收因子, I_b 为常数。 α 的值越小说明自吸收越弱。建立了 Mo I 386.41 nm 的 LIBS 和 LIBS-LIF 定标曲线,如图 5 所示(彩图见期刊电子版)。图中黑色实线代表 LIBS 的指数定标曲线,红色实线代表 LIBS-LIF 的指数定标曲线,绿色虚线代表 LIBS 的线性定标曲线,蓝色虚线代表 LIBS-LIF 的线性定标曲线。指数拟合定标曲线的 R^2 均大于 0.99,表明获得的 α 具有很高的可靠性。同时,从图中可以观察到,LIBS 的指数定标曲线呈现向下弯曲的趋势,而 LIBS-LIF 的指数定标曲线和线性定标曲线基本一致。这表明采用 LIBS-LIF 后,定标曲线的线性度得到了显著改善。

为了更准确地比较 LIBS 和 LIBS-LIF 定量分析性能,计算了线性定标曲线的 R^2 ,自吸收因子 α ,交叉验证均方根误差(RMSECV),平均相对误差(ARE),平均相对标准偏差(ARSD),具体结果详见表 3。一般来说, α 值越小,自吸收效应越弱,RMSECV 和 ARE 越低,定量分析的准确性越高。此外,还通过 ARSD 评估了光谱的稳定性。结果显示,LIBS-LIF 的 α 值减小,自吸收效应减弱,RMSECV 和 ARE 的值均小于 LIBS,说明定量分析的准确性大大提高。ARSD 的值也减小,表示 LIBS-LIF 光谱的稳定性增加。具体而言,Mo I 386.41 nm 谱线的自吸收因子 α 降

低了 99.99%,RMSECV 降低了 65.37%,ARE 降低了 85.69%,ARSD 降低了 20.20%。结果表明,LIBS-LIF 能够有效抑制自吸收效应,提高定量分析的准确性。

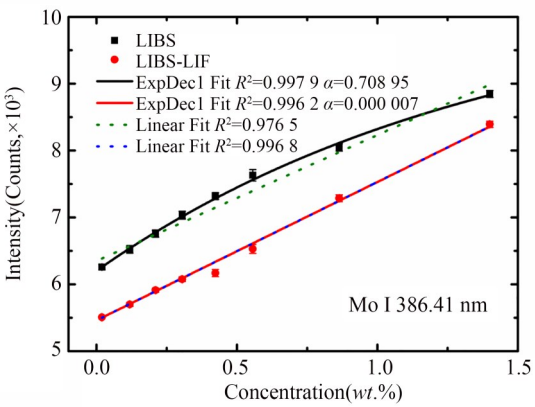


图 5 Mo I 386.41 nm 的 LIBS 和 LIBS-LIF 校准曲线
Fig. 5 Calibration curves of LIBS and LIBS-LIF for Mo I 386.41.

4 结 论

综上所述,研究了 LIBS-LIF 对合金结构钢中 Mo 元素的谱线干扰和自吸收效应的影响。当等离子体受到 OPO 激光器发出的 317.03 nm 的激光辐照时,Mo I 379.83 nm, Mo I 386.41 nm, Mo I 390.30 nm 三条谱线得到了增强,消除了基体 Fe 元素的干扰。特别是 Mo I 386.41 nm 的自吸收因子降低了 99.99%,交叉验证均方根误差减少了 65.37%,ARE 降低了 85.69%,ARSD 降低了 20.20%。这些结果表明,LIBS-LIF 可以有效地减少光谱干扰和自吸收效应的影响。

参考文献:

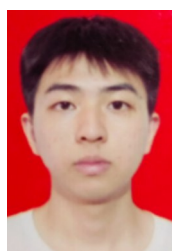
[1] 陈敏,汤爱涛,刘胜明,等. TiCN 复合粉及 Mo 添加剂对铁基复合材料组织和性能的影响[J]. 功能

材料, 2013, 44(23): 3378-3382, 3387.
CHEN M, TANG A T, LIU S M, *et al.* Effect of TiCN and Mo addition on microstructure and me-

- chanical properties of iron matrix composites [J]. *Journal of Functional Materials*, 2013, 44 (23): 3378-3382, 3387. (in Chinese)
- [2] 杨林, 程印, 王新广, 等. Mo 对含 Ru 单晶高温合金显微组织和蠕变性能的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2021, 43(3): 284-289.
- YANG L, CHENG Y, WANG X G, *et al.* Effect of Mo addition on microstructure and creep properties of Ru-containing single crystal superalloys [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2021, 43(3): 284-289. (in Chinese)
- Ru-containing single crystal superalloys [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2021, 43(3): 284-289. (in Chinese)
- [3] 王楚凡, 蔡奇, 刘金旭, 等. Mo 含量对粉末冶金 Ti-Mo 合金组织与力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(2): 328-342.
- WANG C F, CAI Q, LIU J X, *et al.* Effects of Mo content on microstructure and mechanical properties of Ti-Mo alloys prepared by powder metallurgy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2023, 33(2): 328-342. (in Chinese)
- [4] 李世磊, 胡平, 段毅, 等. 掺杂方式对钼合金组织与力学性能影响的研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(9): 132-142.
- LI S L, HU P, DUAN Y, *et al.* Research status of the effect of doping methods on microstructure and mechanical properties of molybdenum alloy [J]. *Materials Reports*, 2020, 34 (9): 132-142. (in Chinese)
- [5] LU Y H, MAKISHIMA A, NAKAMURA E. Co-precipitation of Ti, Mo, Sn and Sb with fluorides and application to determination of B, Ti, Zr, Nb, Mo, Sn, Sb, Hf and Ta by ICP-MS [J]. *Chemical Geology*, 2007, 236(1/2): 13-26.
- [6] EL-TAHER A. Elemental analysis of granite by instrumental neutron activation analysis (INAA) and X-ray fluorescence analysis (XRF) [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2012, 70(1): 350-354.
- [7] NAKAZAWA T, TSUJI K. Development of a high-resolution confocal micro-XRF instrument equipped with a vacuum chamber [J]. *X-Ray Spectrometry*, 2013, 42(5): 374-379.
- [8] 蒋克旭, 邓桂春, 姚林, 等. 硫氰酸盐分光光度法测定钼精矿的含钼量 [J]. 稀有金属与硬质合金, 2010, 38(4): 52-55.
- JIANG K X, DENG G C, YAO L, *et al.* Thiocyanate spectrophotometric determination of the molybdenum content in molybdenum concentrate [J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 2010, 38 (4): 52-55. (in Chinese)
- [9] ZOU Z R, DENG Y J, HU J, *et al.* Recent trends in atomic fluorescence spectrometry towards miniaturized instrumentation-a review [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2018, 1019: 25-37.
- [10] HAHN D W, OMENETTO N. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), part II: review of instrumental and methodological approaches to material analysis and applications to different fields [J]. *Applied Spectroscopy*, 2012, 66 (4): 347-419.
- [11] BUSSE B, MONCAYO S, COLL J L, *et al.* Elemental imaging using laser-induced breakdown spectroscopy: a new and promising approach for biological and medical applications [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2018, 358: 70-79.
- [12] GUO L B, ZHU Z H, LI J M, *et al.* Determination of boron with molecular emission using laser-induced breakdown spectroscopy combined with laser-induced radical fluorescence [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2634-2642.
- [13] GUO Y, GUO L B, HAO Z Q, *et al.* Accuracy improvement of iron ore analysis using laser-induced breakdown spectroscopy with a hybrid sparse partial least squares and least-squares support vector machine model [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2018, 33(8): 1330-1335.
- [14] HARMON R S, RUSSO R E, HARK R R. Applications of laser-induced breakdown spectroscopy for geochemical and environmental analysis: a comprehensive review [J]. *Spectrochimica Acta-Part B Atomic Spectroscopy*, 2013, 87: 11-26.
- [15] BABOS D V, CRUZ-CONESA A, PEREIRA-FILHO E R, *et al.* Direct determination of Al and Pb in waste printed circuit boards (PCB) by laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS): evaluation of calibration strategies and economic - environmental questions [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 399: 122831.
- [16] HUDSON S W, CRAPARO J, DE SARO R, *et al.* Applications of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) in molten metal processing [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2017, 48(5): 2731-2742.

- [17] GIRÓN D, DELGADO T, RUIZ J, *et al.* In-situ monitoring and characterization of airborne solid particles in the hostile environment of a steel industry using stand-off LIBS[J]. *Measurement*, 2018, 115: 1-10.
- [18] CHEVRIER V F, ROY R, MESLIN P Y, *et al.* Geochemical and spectral characterization of an altered Antarctic dolerite: implications for recent weathering on Mars[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 194: 105106.
- [19] ZOU Y L, ZHU Y, BAI Y F, *et al.* Scientific objectives and payloads of Tianwen-1, China's first Mars exploration mission[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 67(2): 812-823.
- [20] MUHAMMED SHAMEEM K M, CHAWLA A, MALLYA M, *et al.* Laser-induced breakdown spectroscopy-Raman: an effective complementary approach to analyze renal-calculi[J]. *Journal of Biophotonics*, 2018, 11(6): e201700271.
- [21] WANG Y M, HUANG D, SHU K Q, *et al.* Optimization of machine learning classification models for tumor cells based on cell elements heterogeneity with laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Journal of Biophotonics*, 2023, 16 (11) : e202300239.
- [22] KANG J, LI R H, WANG Y R, *et al.* Ultrasensitive detection of trace amounts of lead in water by LIBS-LIF using a wood-slice substrate as a water absorber[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2017, 32(11): 2292-2299.
- [23] SONI S, VILJANEN J, UUSITALO R, *et al.* Phosphorus quantification in soil using LIBS assisted by laser-induced fluorescence [J]. *Heliyon*, 2023, 9(6): e17523.
- [24] LI J M, XU M L, MA Q X, *et al.* Sensitive determination of silicon contents in low-alloy steels using micro laser-induced breakdown spectroscopy assisted with laser-induced fluorescence [J]. *Talanta*, 2019, 194: 697-702.
- [25] JIANG Y H, KANG J, WANG Y R, *et al.* Rapid and sensitive analysis of trace leads in medicinal herbs using laser-induced breakdown spectroscopy-laser-induced fluorescence (LIBS-LIF) [J]. *Applied Spectroscopy*, 2019, 73(11): 1284-1291.
- [26] TANG Y, GUO L B, LI J M, *et al.* Investigation on self-absorption reduction in laser-induced breakdown spectroscopy assisted with spatially selective laser-stimulated absorption[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2018, 33 (10) : 1683-1688.
- [27] TANG Y, MA S X, YUAN R, *et al.* Spectral interference elimination and self-absorption reduction in laser-induced breakdown spectroscopy assisted with laser-stimulated absorption [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106254.

作者简介:



莫凯峰(2003—),男,湖南邵阳人,本科生,2021年就读于湖南科技大学。主要研究激光诱导击穿光谱技术。E-mail: mkf@mail.hnust.edu.cn

通讯作者:



唐云(1983—),女,湖南永州人,博士,副教授,硕士生导师。2019年获华中科技大学武汉光电国家实验室电子科学与技术博士学位。主要从事激光诱导击穿光谱技术相关的理论和应用研究工作。E-mail: yuntang@hnust.edu.cn