

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2019091

基于激光诱导击穿光谱的岩屑岩性 在线识别试验研究

杨志强¹, 李光泉¹, 余明军^{2,3}

(1. 中石化石油工程技术服务有限公司科技信息部, 北京 100020; 2. 中石化中原石油工程有限公司录井公司, 河南濮阳 457001;
3. 濮阳市光谱油气检测分析工程技术研究中心, 河南濮阳 457001)

摘 要: 钻井新技术的发展及其推广应用, 在提高钻井时效的同时, 钻井产生岩屑的粒径变小, 给常规岩屑录井带来了困难。近年来, 基于激光诱导击穿光谱 (LIBS) 的岩屑岩性识别技术取得了较好的效果, 但该技术仍需要人工采集、清洗岩屑样品, 并存在钻遇地层岩屑样品代表性难以准确控制、岩屑岩性识别结果与钻遇地层真实岩性之间具有一定差异等问题。为了解决上述问题, 提出了利用 LIBS 在线识别岩屑岩性的技术构想, 在实验室构建了试验平台, 探索了激光器光源功率对岩屑样品 LIBS 信息的影响, 通过优选光源功率, 提高了岩屑样品 LIBS 信息的采集精度, 进行了干样与湿样、疏松与压实状态下岩屑样品的 LIBS 检测, 发现不同状态下岩屑样品的 LIBS 特征较为稳定, 岩屑样品的 LIBS 特征与其状态无关。试验结果表明, 录井过程中岩屑样品无需处理, 可以直接检测, 即利用 LIBS 技术在线识别岩屑岩性可行。

关键词: 激光诱导击穿光谱; 岩屑; 岩性识别; 试验平台; 可行性

中图分类号: TE142

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2019)04-0122-05

Test Research of Online Identification of Cuttings Lithology by LIBS Technology

YANG Zhiqiang¹, LI Guangquan¹, SHE Mingjun^{2,3}

(1. Technology & Information Department, Sinopec Oilfield Service Corporation, Beijing, 100020, China; 2. Mud Logging Company, Sinopec Zhongyuan Oilfield Service Corporation, Puyang, Henan, 457001, China; 3. Puyang Spectrum Oil & Gas Detection and Analysis Engineering Technology Research Center, Puyang, Henan, 457001, China)

Abstract: With the development and application of new drilling technologies, the drilling time efficiency has effectively improved while producing increasingly small particle sizes of cuttings, which presents challenges to conventional mud logging technologies. In recent years, laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) has achieved good application effect in cuttings lithology identification technology, but this technology still needs the manual collection and flushing of cuttings samples, and it faces the problems such as hard to collect the representative cutting samples for the encountered formation. Further, there have been challenges in resolving the difference between the identification results of cuttings lithology and the actual lithology of encountered formation. In order to solve the problems, the idea of using LIBS to identify cuttings lithology was proposed, and an indoor test platform was built, so as to explore the influence of laser source power on LIBS message. Through optimizing the laser source power, the acquisition accuracy of LIBS information was improved, and conducted LIBS measurement for the dry/wet cuttings samples and loose/compacted cuttings samples, respectively. The test found that the LIBS characteristics of cutting samples were stable under different states, and were in essence irrelevant to their states. The test results showed that the cuttings samples could be directly detected without any pre-treatment in the course of mud logging. Therefore, it is feasible to apply LIBS technology to realize the on-line identification of cutting lithology.

Key words: laser induced breakdown spectroscopy; cutting; lithology identification; test platform; feasibility

油气勘探开发过程中, 通过随钻描述钻遇地层的岩屑信息可以直接揭示地层的岩性、物性、源岩特性及含油气性等特征。传统的岩屑录井方法主要是现场地质技术人员根据钻井速度, 按照一定的取样间隔捞取岩屑样品并经过清洗、晾晒, 通过直接观察或借助于放大镜、显微镜等工具观察岩屑样品, 进而识别岩屑的岩性和判断地层的含油气性等。随着快速钻井技术的发展与广泛应用, 钻井速度大幅度提高, 岩屑粒径变小, 给传统的岩屑录井

带来了以下困难: 1) 钻速提高缩短了岩屑样品的取

收稿日期: 2019-06-07; 改回日期: 2019-06-26。

作者简介: 杨志强 (1966—), 男, 吉林镇赓人, 1988 年毕业于石油大学 (华东) 地球物理勘探专业, 1997 年获中国地质大学 (北京) 石油地质专业博士学位, 主要从事石油工程技术方面的研究与管理。E-mail: yangzq.os@sinopec.com。

基金项目: 中国石化集团科技攻关项目“钻井液地质信息激光在线检测技术研究” (编号: JP16024)、中石化石油工程技术服务有限公司科技攻关项目“激光在线识别岩性技术应用研究” (编号: SG17-45K) 资助。

样时间,增大了岩屑捞取的工作强度,且捞取不及时会有降低样品可靠性的风险;2)采用 PDC 钻头或其他优快钻井技术钻进时产生的岩屑粒径很小,肉眼难以识别。因此,为确保岩屑录井的及时性与准确性,研究岩屑的在线检测十分必要^[1-2]。

激光诱导击穿光谱(laser induced breakdown spectroscopy, LIBS)技术自引入国内以来取得了很大进展,在很多行业得到了广泛应用:在检测方法方面,分析了 LIBS 检测的影响因素,并制定了对应的消除措施,建立了样品中元素的检测模型,实现了元素信息的定量检测^[3-18];在石油录井方面,建立了岩屑元素的量化检测模型,开发了相关软件,研制了检测设备,为录井施工现场解决岩屑识别技术难题提供了技术支持^[19-27],但其采用的均为离线检测方式。利用 LIBS 技术识别岩性还存在一些技术问题,比如岩屑需要人工取样、不能连续识别地层岩性等,制约了其应用。为进一步发挥 LIBS 技术在快速钻井条件下识别地层岩性的作用,笔者提出了基于 LIBS 技术的岩屑岩性在线识别技术的构想,并开展了相关试验,验证了其可行性。

1 LIBS 技术基本原理及特点

1.1 基本原理

LIBS 是一种原子发射光谱技术,根据电子能级跃迁发射的原子(离子)谱线进行定性和定量分析,其测量原理如图 1 所示。其中,激光器选用 Nd:YAG 激光器,探测器选用增强型光电耦合型探测器 ICCD。

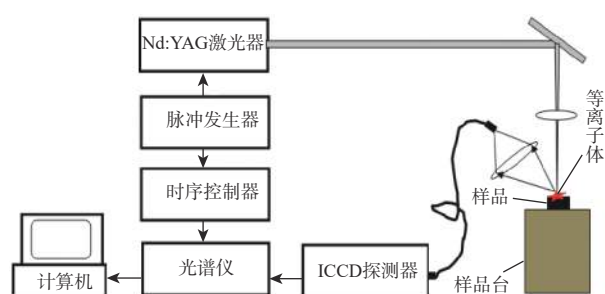


图 1 LIBS 测量原理示意

Fig. 1 The principle of LIBS measurement

激光器产生的激光光束(通常几十到几百毫焦)经过透镜后聚焦到样品表面,聚焦点处的样品吸收激光能量后产生等离子体。利用透镜采集部分等离子体发射光并由光纤传送到光谱仪,光谱仪进一步处理光谱信号,并转换成数字信号传输到计算机进

行光谱分析。根据原子(离子)谱线的波长分析元素的种类,根据谱线强度分析元素的含量。

1.2 技术特点

1)多元素同时检测。LIBS 技术采用强激光激发样品,常见元素均能被激发出诱导击穿光谱,因此可以定性、定量检测分析出样品中的元素信息。

2)分析周期短、实时性强。应用 LIBS 技术分析样品的时间与激光器的频率、光谱仪的积分时间有关,激光器频率和光谱仪的积分时间小于 100 ms,样品的分析时间也为毫秒级,具有较强的实时性。

3)具有剥离检测特性。LIBS 技术在无损检测的基础上,通过调整激光器功率、光路聚焦焦距,可以对样品表面进行剥离处理,以检测其真实信息。

2 基于 LIBS 的岩性识别技术进展与不足

为了解决钻井过程中细小岩屑岩性识别困难的问题,国内外利用 LIBS 的技术特点,开展了基于 LIBS 的岩性识别技术研究。国内多所高校开展了利用 LIBS 技术量化检测岩屑元素含量信息的研究工作,初步实现了 8 种元素的量化检测和岩性识别。中国石化与中国科学院合作,进行了技术攻关,形成了基于 LIBS 的岩性识别技术——通过优选硬件系统参数,利用高能激光直接照射岩屑样品,可以检测出样品中的 26 种特征元素,通过元素含量比和岩性特征谱图等岩性识别模型,实现砂岩、泥岩、页岩、灰岩、白云岩、膏岩、盐岩、煤和沥青等 9 种岩性或矿物的准确识别。该技术已在多个油气田的勘探开发中应用,对快速准确识别钻遇地层的岩性、提高岩性剖面符合率发挥了重要作用。

但基于 LIBS 的岩性识别技术也存在着一些不足,主要表现在以下几个方面:

1)岩性识别符合率有待进一步提高。应用 LIBS 进行岩性识别时,需要人工采集、清洗岩屑样品,快速钻井条件下岩屑粒径细小不易捞取,在清洗过程中容易流失,岩屑样品代表性差,直接影响岩屑岩性识别符合率。

2)地层岩性识别成果不连续。岩屑样品按照钻进时间间隔采集数据,但地层岩性识别结果是按照单位进尺给出结果,钻遇地层岩性识别结果不连续,难以及时准确发现薄层岩性的变化情况,因此需要进一步提高和完善基于 LIBS 的岩性识别技术。

3)现有设备的性能需要进一步提高。激光岩性

分析仪对每包岩屑样品进行多点检测,并对检测结果进行分析,输出该样品的岩性。目前,其硬件系统不具备在线识别功能,其软件也在岩屑样品对应井深归位方面存在不足。

3 基于 LIBS 的岩屑岩性在线识别技术可行性试验

3.1 试验平台

在基于 LIBS 的岩性识别技术的基础上,模拟录井施工现场环境,构建了试验平台,如图 2 所示。

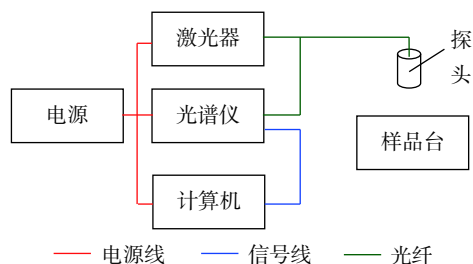


图 2 LIBS 在线识别岩屑岩性试验平台

Fig. 2 Test platform for LIBS online identification of cuttings lithology

试验平台中,探头固定在样品台上方,用于激发样品产生等离子体,同时具有收光功能。样品台为一传输带,岩屑样品置于传输带上方,通过转动传输带模拟施工现场岩屑的运动状态。在计算机系统控制下,激光器发出的激光通过光纤传输到探头并诱导样品台上的岩屑样品产生等离子体,同时采集 LIBS 光谱信号并由光纤传输到光谱仪,光谱仪进行分光处理及转换后传输到计算机,进一步分析 LIBS 信息和识别样品的岩性。

3.2 试验结果

3.2.1 岩屑样品状态试验

利用试验平台,检测不同状态条件下的岩屑样品,即对处于干/湿状态、疏松和压实状态的同一岩屑样品进行了检测,得到了同一岩屑样品不同状态下的 LIBS 信息。同一岩屑样品干/湿状态下的 LIBS 信息对比如图 3 所示,同一岩屑样品疏松和压实状态下的 LIBS 信息对比如图 4 所示。

由图 3 可知,同一个样品在干/湿状态下的 LIBS 信息特征具有较好的一致性,拟合优度 $R^2=0.9177$;由图 4 可知,岩屑样品压实状态下的光谱强度高于疏松状态下的光谱强度,但二者的特征信息之间存

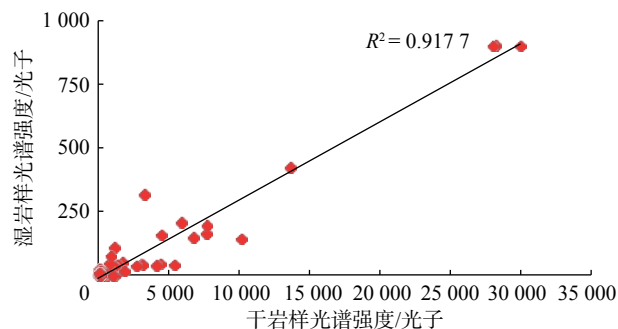


图 3 岩屑样品干/湿状态下 LIBS 特征的相关性

Fig. 3 Correlation of LIBS characteristics under dry/wet conditions of cutting samples

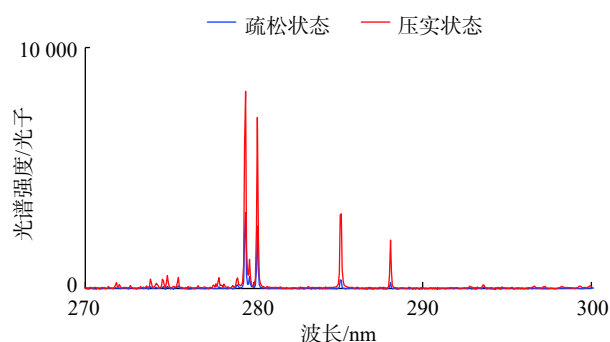


图 4 岩屑疏松/压实状态下 LIBS 特征对比

Fig. 4 Comparison of LIBS characteristics under the loose/compacted states of cutting samples

在较好的相关性,拟合优度 $R^2=0.9326$ 。

试验结果表明,岩屑样品的状态只影响其 LIBS 信息强度的高低,不影响其自身的 LIBS 特征。因此,基于 LIBS 的岩屑岩性在线识别结果与岩屑样品检测时的状态无关。

3.2.2 剥蚀试验

页岩气钻井中广泛应用油基钻井液,油基钻井液条件下岩屑样品表面污染严重,难以清洗处理,影响样品岩性识别的准确率。借鉴 LIBS 具有剥蚀的特性,进行了油基钻井液岩屑样品 LIBS 剥蚀表面污染层的试验。通过调整激光器功率及光路,对油基钻井液岩屑样品表面进行剥蚀处理,得到了波长 287.30~288.61 nm 岩屑样品原始状态下及多次剥蚀后的检测数据,结果见表 1。

由表 1 可知,原始状态下的检测数据与第 1 次剥蚀后数据之间的拟合优度 $R^2=0.5735$,第 1 次剥蚀后检测数据与第 2 次剥蚀后检测数据之间的拟合优度 $R^2=0.6943$,第 2 次剥蚀后检测数据与第 3 次剥蚀后检测数据之间的拟合优度 $R^2=0.7330$,第 3 次剥蚀后检测数据与第 4 次剥蚀后检测数据之间的拟合优

表 1 油基钻井液岩屑样品剥蚀检测结果对比

Table 1 Comparison of the denudation effects of cutting samples in oil-based drilling fluid

波长/nm	原始状态	检测数据/光子			
		第1次 ^①	第2次 ^①	第3次 ^①	第4次 ^①
287.30	189	297	332	385	361
287.35	185	237	234	229	222
287.41	273	409	516	344	219
287.47	136	226	324	185	278
287.52	153	218	386	297	184
287.58	159	205	366	236	228
287.64	210	159	198	225	334
287.70	268	205	411	303	368
287.75	232	199	256	284	458
287.81	127	163	205	198	240
287.87	235	191	337	209	257
287.92	232	136	175	341	380
287.98	410	352	405	412	456
288.04	947	869	1 133	996	1 130
288.10	3 870	5 917	6 030	6 430	6 934
288.15	8 111	12 936	12 372	14 075	15 359
288.21	3 334	3 436	3 645	3 767	4 659
288.27	854	727	880	811	1 166
288.32	532	448	669	646	604
288.38	468	379	467	421	604
288.44	269	283	364	364	269
288.49	101	268	190	232	153
288.55	204	132	337	402	269
288.61	190	189	309	146	355

注: ①为剥蚀次数。

度 $R^2=0.928\ 7$; 岩屑样品同一表面位置在经过 3 次剥蚀后, LIBS 信息稳定, 表明第 4 次剥蚀检测到的 LIBS 信息是岩屑样品的真实信息。试验结果表明, LIBS 技术可以有效消除油基钻井液对岩屑表面的污染, 利用 LIBS 的剥蚀特性, 可以剥蚀掉上返地面岩屑样品表面的污染物, 消除油基钻井液的影响。

4 结论与建议

1) 试验证明, 基于 LIBS 的岩屑岩性在线识别可

行。该技术可以解决现有 LIBS 岩性识别技术存在的检测数据不连续、岩性识别成果易受干扰等问题, 且检测速度非常快。

2) LIBS 在线识别岩屑岩性与岩屑样品的状态无关, 可以直接原位检测岩屑样品的 LIBS 信息, 有利于在线识别岩屑岩性。

3) 通过调整激光器功率和优化光路, 利用 LIBS 的剥蚀特性, 可以在油基钻井液条件下准确识别岩屑的岩性, 为页岩气开发提供技术支撑。

4) 基于 LIBS 的岩屑岩性在线识别技术是基于光谱检测分析而进行的, 岩屑样品的 LIBS 信息弱, 对检测设备光路稳定性要求较高。因此, 为提高岩屑岩性识别的准确性, 在应用该技术时建议采取必要的防振措施, 以确保光路系统稳定。

参 考 文 献

References

- [1] 田京燕, 徐玉超. 微心 PDC 钻头设计及现场试验 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(1): 65–68.
TIAN Jingyan, XU Yuchao. Design and field application of a micro-coring PDC bit[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(1): 65–68.
- [2] 汪绪刚, 张文华, 李应光, 等. 伊拉克艾哈代布油田快速钻井技术 [J]. 石油钻探技术, 2013, 41(1): 35–39.
WANG Xugang, ZHANG Wenhua, LI Yingguang, et al. Rapid drilling technology in Ahdeb Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(1): 35–39.
- [3] 路辉, 胡晓军, 曹斌, 等. 普铝中 Fe、Si 元素的激光诱导击穿光谱测试条件及定量分析研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(4): 1267–1273.
LU Hui, HU Xiaojun, CAO Bin, et al. Investigation on experimental conditions and quantitative analysis for Fe and Si elements in general aluminum by laser induced breakdown spectroscopy technique[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(4): 1267–1273.
- [4] 檀兵. 激光诱导击穿光谱谱峰元素的自动识别 [D]. 无锡: 江南大学, 2018.
TAN Bing. Automatic identification of spectral peaks elements in laser-induced breakdown spectroscopy[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.
- [5] 檀兵, 黄敏, 朱启兵, 等. 激光诱导击穿光谱谱峰元素自动识别方法研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(8): 273–279.
TAN Bing, HUANG Min, ZHU Qibing, et al. Method on elements automatic identification of spectral peaks in laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 273–279.
- [6] 张海滨. 激光诱导击穿光谱定量分析算法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
ZHANG Haibin. Research on quantitative analysis algorithm of laser-induced breakdown spectroscopy[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [7] 张斌. LIBS 在金属元素定量分析中的应用及其影响因素研究 [J]. 中国石油石化, 2017(12): 33–34.

- ZHANG Bin. Application and research on its influencing factors of LIBS in quantitative analysis of metal elements[J]. China Petrochem, 2017(12): 33–34.
- [8] 胡志裕. 利用激光诱导击穿光谱定性与定量分析固体中元素方法研究 [D]. 太原: 山西大学, 2013.
- HU Zhiyu. Study on qualitative and quantitative analytical method for elements in solid state matter by laser-induced breakdown spectroscopy[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2013.
- [9] 郭志卫, 孙兰香, 张鹏, 等. 基于 LIBS 技术的水泥粉末在线成分分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(1): 278–285.
- GUO Zhiwei, SUN Lanxiang, ZHANG Peng, et al. On-line component analysis of cement powder using LIBS technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(1): 278–285.
- [10] 辛勇, 李洋, 蔡振荣, 等. 激光诱导击穿光谱液态金属成分在线分析仪在线监测熔融铝液中元素成分 [J]. 冶金分析, 2019, 39(1): 15–20.
- XIN Yong, LI Yang, CAI Zhenrong, et al. On-line monitoring of elemental composition in molten aluminum by laser-induced breakdown spectroscopy online analyzer for liquid metal composition[J]. Metallurgical Analysis, 2019, 39(1): 15–20.
- [11] 钱燕. 激光诱导击穿光谱技术对于煤中有机元素的测量研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- QIAN Yan. Research on the measurement of organic elements in coal using laser induced breakdown spectroscopy[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [12] 于巧玲, 张毅驰. 激光诱导击穿光谱技术在重金属检测中的应用 [J]. 化工技术与开发, 2018, 47(10): 26–30, 42.
- YU Qiaoling, ZHANG Yichi. Application of laser induced breakdown spectroscopy in heavy metals detections[J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2018, 47(10): 26–30, 42.
- [13] 姚平, 王阳恩, 程庆华. 基于激光诱导击穿光谱的油菜籽含油量测定研究 [J]. 粮食与油脂, 2018, 31(7): 49–51.
- YAO Ping, WANG Yang'en, CHENG Qinghua. Study on rapeseed oil content measurement based on laser induced breakdown spectroscopy[J]. Cereals & Oils, 2018, 31(7): 49–51.
- [14] 李艳, 翟开华, 李艳丽, 等. 基于激光诱导击穿光谱技术的城市土壤重金属含量检测与分析 [J]. 湘潭大学自然科学学报, 2018, 40(3): 86–88, 128.
- LI Yan, ZHAI Kaihua, LI Yanli, et al. Detection and analysis of heavy metal content in urban soil by laser induced breakdown spectroscopy[J]. Journal of Natural Science of Xiangtan University, 2018, 40(3): 86–88, 128.
- [15] 杨文斌. 激光诱导击穿光谱技术在气体检测中的应用研究 [D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2018.
- YANG Wenbin. Research on the application of laser induced breakdown spectroscopy in gas detection[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Photoelectric Technology, Chinese Academy of Sciences), 2018.
- [16] 王成皓. 基于 LIBS 技术的矿石分选装置关键技术研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- WANG Chenghao. Research on key technologies of ore separation equipment based on LIBS technology[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [17] 王亚军. 基于激光诱导击穿光谱技术的宝玉石成分分析方法与应用研究 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2017.
- WANG Yajun. Study on gemstone component analysis methods and applications using laser induced breakdown spectroscopy[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2017.
- [18] 王鑫. 基于激光诱导击穿光谱煤质分析仪的研制 [D]. 太原: 山西大学, 2015.
- WANG Xin. Development of a coal quality analyzer based on laser-induced breakdown spectroscopy[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2015.
- [19] 张新华, 余明军, 王葵舒, 等. 激光技术在录井工程中的应用进展及展望 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46(6): 111–117.
- ZHANG Xinhua, SHE Mingjun, WANG Yanshu, et al. The progress and potential of the application of laser technology in mud logging[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(6): 111–117.
- [20] 余明军, 付洪波, 贾军伟, 等. 激光诱导击穿光谱判定岩石陆相和海相沉积 [J]. 光子学报, 2018, 47(8): 0847009.
- SHE Mingjun, FU Hongbo, JIA Junwei, et al. Determination of terrestrial and marine sedimentary rocks by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(8): 0847009.
- [21] 贾军伟, 付洪波, 王华东, 等. 基于激光诱导击穿光谱技术的岩性识别方法研究 [J]. 量子电子学报, 2018, 35(3): 264–270.
- JIA Junwei, FU Hongbo, WANG Huadong, et al. Lithology identification methods based on laser-induced breakdown spectroscopy technology[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2018, 35(3): 264–270.
- [22] 陈楠, 杨燕婷, 田地, 等. 录井专用型激光诱导击穿光谱仪测定岩屑中的 8 种元素 [J]. 分析化学, 2018, 46(1): 74–80.
- CHEN Nan, YANG Yanting, TIAN Di, et al. Determination of eight kinds of elements in cuttings by logging special laser-induced breakdown spectrometer[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2018, 46(1): 74–80.
- [23] 陈楠. 基于 LIBS 技术的录井岩屑定量分析方法及软件研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- CHEN Nan. Study on quantitative analysis methods and software of log rock cuttings based on LIBS[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [24] 余明军, 李油建, 李胜利, 等. 激光诱导击穿光谱自动识别泥岩颜色试验分析 [J]. 录井工程, 2015, 26(1): 5–8.
- SHE Mingjun, LI Youjian, LI Shengli, et al. Experimental analysis of automatic identification of mudstone color by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Mud Logging Engineering, 2015, 26(1): 5–8.
- [25] 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): 1215001.
- CHEN Xinglong, DONG Fengzhong, TAO Guoqiang, et al. Fast lithology identification by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(12): 1215001.
- [26] 田野, 王振南, 侯华明, 等. 基于激光诱导击穿光谱的岩屑识别方法研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(8): 2027–2031.
- TIAN Ye, WANG Zhennan, HOU Huaming, et al. Study of cuttings identification using laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(8): 2027–2031.
- [27] 任立辉, 李文东, 慈兴华, 等. 基于 LIBSVM 的石油录井中岩屑岩性识别方法研究 [J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(9): 131–136.
- REN Lihui, LI Wendong, CI Xinghua, et al. A method for identification of cuttings in petroleum logging by LIBSVMs[J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(9): 131–136.