

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.03.019

## 基于激光诱导击穿光谱的绝缘子污秽度分析

晋涛<sup>1</sup>, 芦山<sup>1</sup>, 刘星廷<sup>1</sup>, 何永琪<sup>2</sup>, 王希林<sup>2</sup>, 贾志东<sup>2</sup>

(1. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001;

2. 广东省复杂滨海环境电力装备可靠性工程技术研究中心, 广东 深圳 518055)

**摘要:**污秽闪络是威胁电力系统安全的主要因素之一,为了预防污闪事故的发生,需要定期对绝缘子表面的污秽度进行检测,但传统的停电取样检测周期长,耗费大量人力物力。文中提出一种利用激光诱导击穿光谱(LIBS)技术对绝缘子表面污秽度进行分析的方法。以10个带有不同等值盐密、等值灰密的自然污秽玻璃绝缘子为主要研究对象,将其上表面分为内、中、外环3个区域,研究不同测试策略下定标模型的相关系数,采用Na 589.592 nm、Al 396.192 nm作为特征谱线,发现对于盐密的检测定标模型,采用内、中环联合区域的测试策略,相关系数可达0.948 1,检测相对误差在5%以内;对于灰密的检测定标模型,采用中环独立区域的测试策略,相关系数可达0.938 3,检测相对误差在15%以内。该分析手段能实现现场快速分析绝缘子表面污秽度,提升输电线路运行安全维护作业能力,具有重要的工程应用价值。

**关键词:**等值盐密(ESDD);等值灰密(NSDD);激光诱导击穿光谱(LIBS);自然污秽;定标模型;测试策略

**中图分类号:**TM85

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2022)03-0163-08

### 0 引言

在绝缘子的各类闪络中,污秽闪络对电力系统安全运行危害最大。随着我国工业水平的不断提高,各种工业粉尘、烟尘排放量大大增加,这些污秽可能附着于绝缘子的表面,当遇到雾、露、毛毛雨以及融冰、融雪等潮湿天气时,在绝缘子表面形成导电水膜,从而构成导电通道降低了污闪电压,导致绝缘子发生污秽闪络<sup>[1-4]</sup>。

对于绝缘子污秽度的表征,传统的检测方法<sup>[5-8]</sup>需要检修人员登上几十米甚至上百米的输电杆塔上手动擦取绝缘子污秽,带回实验室进行检测,不仅对检修人员的安全有巨大威胁,而且过程复杂、效率不高。寻找一种准确且可用于现场分析的绝缘子污秽度在线分析方法十分必要,对提高我国电力系统安全以及经济发展水平有重要意义。

激光诱导击穿光谱(laser-induced break-down spectroscopy, LIBS)技术是一种快速、在线、远程的化学分析手段,利用激光聚焦在物质表面烧蚀产生等离子体,通过检测等离子体光谱对物质进行定性及定量分析<sup>[9-11]</sup>。在收集光谱信号的过程中,可以通过调节延时控制器的延时时间对形成等离子体与采集光谱信号之间的时间间隔进行控制,由此可以提高得到的光谱的信噪比。LIBS操作简单、分析迅速、灵敏度高且可以实现远距离探测,广泛应用

于文物鉴定<sup>[12]</sup>、工业分析<sup>[13]</sup>、环境监测<sup>[14-16]</sup>、生物医学<sup>[17-18]</sup>以及太空探索<sup>[19]</sup>等领域。目前LIBS在电气工程领域的应用较少,西安交通大学的袁欢等利用LIBS研究了真空灭弧室真空度的在线检测<sup>[20]</sup>;清华大学的王希林等利用LIBS对绝缘子的老化特征进行了表征<sup>[21]</sup>。LIBS应用于外绝缘污秽诊断时光谱信号也会受到周围环境以及基体效应的影响,影响其定量分析准确性,目前通过归一化、内标法等手段可以有效改善这一情况,且文中研究对象为自然污秽,其主要元素一般差别较小,受基体效应影响较小。关于LIBS应用于污秽物的检测,一些学者也对某些盐类进行了定量分析,清华大学的王乃啸等研究了人工污秽中若干盐类离子含量与特征谱线强度的定量关系,结果表明,LIBS可检测污秽中绝大部分盐类元素含量<sup>[22]</sup>。Kumar等利用LIBS研究了近海环境中的盐沉积对风力涡轮机叶片的影响,结果表明,LIBS光谱特征峰(Na 588.99 nm)强度可以在一定程度上表征海上风机的污染物水平<sup>[23]</sup>。但以上研究并没有进一步将光谱强度与整体污秽水平代表值,如等值盐密(equivalent salt deposit density, ESDD)、等值灰密(non-soluble deposit density, NSDD)等定标,从而利用光谱强度对污秽度进行表征。

选取合适的绝缘子污秽测试策略,利用LIBS对其进行带电检测,可以将光谱强度与ESDD、NSDD联系起来,进一步对绝缘子表面污秽度进行表征,从而为ESDD、NSDD的测量提供一种简单快捷的新

收稿日期:2022-02-01;修回日期:2022-03-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777107)

方法,该方法能够克服传统 ESDD、NSDD 法操作复杂、效率低下等缺陷。文中选取 10 个污秽程度不同的自然污秽玻璃绝缘子,对其进行 LIBS 检测得到光谱数据,通过选取合适的特征谱线,对比不同测试策略下的特征谱线强度与 ESDD、NSDD 的定量模型,得到最优的绝缘子表面污秽度测试策略。

## 1 实验装置及样品

### 1.1 LIBS 装置及参数设置

实验装置的信息如下:激光器为 Nimma-900 型,波长可设置为 1 064 nm,532 nm,266 nm。当激光脉冲为 1 064 nm、脉冲持续时间为 10 ns 时,输出能量可达 900 mJ。光谱仪为爱万提斯 6 通道光谱仪,对应于从 190 nm 到 640 nm 的 6 个不同波段,采样间隔约为 0.01 nm。延时控制器为 DG645 数字延时发生器,脉冲重复频率为 10 mHz。为了获得最大信噪比的光谱,延时时间和分光计的积分时间分别设置为 3  $\mu$ s 和 30  $\mu$ s<sup>[24]</sup>。

实验过程如下:调整样品台的高度,使样品位于凸透镜的焦点上。延时控制的具体过程为一个外部触发信号被发送到 DG645,使其向激光器发射信号控制释放脉冲激光,激光经过光学系统反射聚焦于待测样品表面以下 2 mm 处,烧蚀样品产生等离子体。以触发激光器的时刻为起点,经过 3  $\mu$ s 后 DG645 向光谱仪发射信号控制开始采集光谱信号,积分时间为 30  $\mu$ s。光信号经光电倍增管增强后,由电荷耦合器件转换成电信号并存储在计算机中<sup>[25]</sup>。实验测量得到实际到达样品表面的激光能量范围为 50~500 mJ。

### 1.2 LIBS 在线检测安全性评估

对于 LIBS 在高压环境下在线检测的安全性,文献[26]对高压直流下的纳秒激光诱导间隙击穿放电现象进行了研究,模拟了 2.4 cm 空气间隙开关的激光触发,发现激光入射与放电通道形成之间的时间延迟随间隙电压升高呈现近似指数形式的减小。在 LIBS 检测过程中,绝缘子出现的放电类型应为沿面闪络,并且绝缘子的电极间距离一般远远大于空气间隙开关的间隙,因此不能直接沿用激光诱导间隙放电的研究结论。为了进一步研究激光诱导等离子体对绝缘子绝缘水平的影响,文中研究了激光等离子体对泄漏电流以及沿面放电电压的影响。

利用 2 块平板电极给高温硫化硅橡胶试片施加交流电压,利用泄漏电流测量装置实时检测泄漏电流变化情况,从而研究激光等离子体对工频交流电压作用下绝缘材料泄漏电流的影响。采用平板电

极在样品两端施加幅值为 16.3 kV 的交流电压,得到的实时泄漏电流波形如图 1(a)所示。用单脉冲能量低至 70 mJ,高至 380 mJ,重复率 1~15 Hz 的脉冲激光轰击高温胶试片的中部及端部,同样采用平板电极在样品两端施加幅值为 16.3 kV 的交流电压,得到的实时泄漏电流波形如图 1(b)所示。由图 1 可知,不施加激光作用时,实时测量得到的泄漏电流只有几十微安,并且电流抖动较大。电流抖动较大主要是因为电极处发生了电晕放电,实验过程中能听到电晕放电的声音。施加激光作用时,泄漏电流的幅值与未施加激光作用时接近,均为 60  $\mu$ A 左右,因此可以认为,在不同的激光器设置情况下激光等离子体对泄漏电流的影响并不明显。

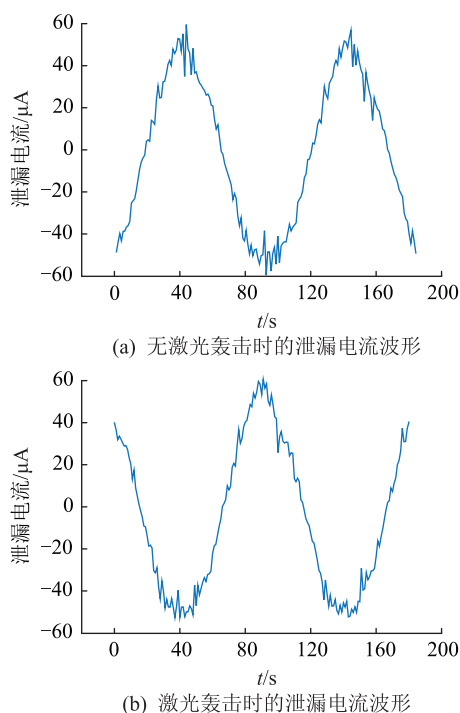


图 1 有/无激光轰击时的泄漏电流波形

Fig.1 Waveforms of leakage current with laser bombardment or not

虽然发现在单脉冲激光能量低于 400 mJ,脉冲重复率低于 15 Hz 时激光等离子体对泄漏电流的影响不显著,但仍应考虑其对沿面闪络有无诱导作用,因此进行了激光等离子体对沿面放电电压影响的实验。

同样使用高温硫化硅橡胶试片夹在 2 块平板电极之间,测量得到样品的沿面闪络电压约为 29 kV。当样品两端电压加到 28 kV 时,用激光能量 50~420 mJ,重复率 1~15 Hz 的激光脉冲持续不断地轰击样品中部及端部,发现即使在最大能量、最高的脉冲重复率下,无论轰击多久,均未引起沿面闪络。说明当激光能量低于 400 mJ,重复率低于 15 Hz 时,激

光等离子体对绝缘子沿面放电电压并无影响。

综上所述,可以认为在单脉冲激光能量小于400 mJ,脉冲重复率不超过15 Hz时,在样品中部或端部产生的激光等离子体对泄漏电流以及沿面放电电压的影响不明显,即LIBS在线检测基本不会对绝缘子的绝缘水平造成影响。

### 1.3 样品准备及测试

文中采用的样品为10个表面污秽程度不同的绝缘子,分别编号为1号~10号,其中1号~4号为表面涂覆室温硫化硅橡胶(room temperature vulcanized, RTV)的玻璃绝缘子,5号~10号为玻璃绝缘子。

为了更全面地反映绝缘子表面的污秽度,获取尽可能多的光谱信息,将绝缘子上表面分为内、中、外环,分别记为A、B、C,每环上均匀选取10个点,每个绝缘子共选取30个点,用圈标注,作为LIBS测试点,如图2所示。

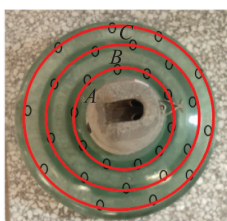


图2 绝缘子表面测试点选取

Fig.2 Insulator surface test points selection

完成LIBS测试后,根据标准DL/T 1884.1—2018,采用擦拭和过滤法对10份样品上表面的ESDD和NSDD进行测量,测量结果如表1所示。

表1 绝缘子样品的ESDD和NSDD值

Table 1 ESDD and NSDD of insulator samples

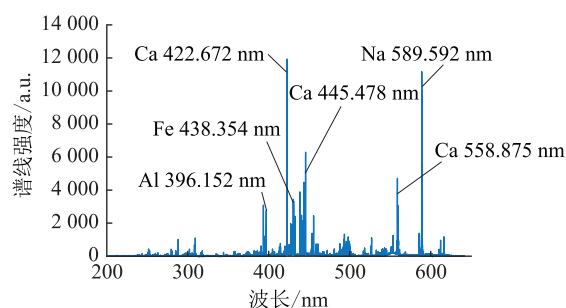
编号	ESDD 值/( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	NSDD 值/( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ )
1	0.028 4	0.617 9
2	0.017 8	0.198 5
3	0.029 8	0.512 5
4	0.031 4	0.642 7
5	0.014 6	0.086 6
6	0.011 5	0.030 3
7	0.010 8	0.078 9
8	0.010 5	0.107 1
9	0.006 8	0.014 4
10	0.008 4	0.088 9

## 2 LIBS 光谱分析及测试策略

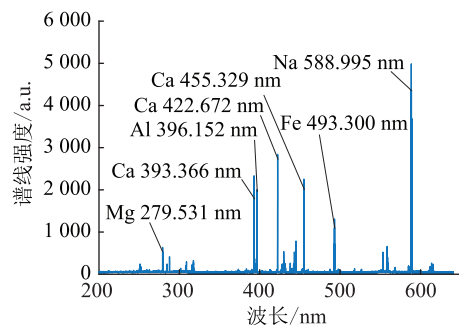
### 2.1 自然污秽的LIBS全谱分析

样品分析测试中,按照1.3节中所选取的分析

点,运用单脉冲能量为75 mJ的高能脉冲激光束,按照设定的激光脉冲频率,对选取的分析点进行连续5次轰击。在各次轰击后,按照选定的3  $\mu\text{s}$  时延与光谱仪积分时间对等离子体冷却时的发射光谱进行采集,获取样品在不同脉冲激光轰击次数后的光谱信息,然后,依据美国国家标准与技术研究院的原子光谱数据库,查找光谱中各波长谱线对应的元素种类以及相关的谱线信息,完成谱线波长与元素种类间的对应,光谱主要谱线对应元素种类如图3所示。



(a) 涂覆RTV的玻璃绝缘子自然污秽LIBS全谱图



(b) 未涂覆RTV的玻璃绝缘子自然污秽LIBS全谱图

图3 自然污秽的LIBS全谱图

Fig.3 LIBS full spectrum of natural filth

由图3可知,自然污秽中主要含有Na、Ca、Al、Fe这4种元素,未涂覆RTV的玻璃绝缘子表面还检测到了Mg元素。

### 2.2 特征谱线选取

ESDD主要与盐类的含量有关,从自然污秽LIBS全谱图中也可以看出Na元素的谱线强度较高,适宜作为表征元素;而对于NSDD, Ca元素作为盐类主要元素之一显然不适宜作为表征元素,而Al作为高岭土中的主要元素之一,在自然污秽LIBS全谱图中强度也不低,适宜作为其表征元素。最终选取Na 589.592 nm、Al 396.152 nm谱线分别作为ESDD、NSDD的特征谱线。

### 2.3 测试策略

为了降低偶然误差,对于内、中、外环3个区域,分别对各区域所选取的10个点的光谱数据取平均值。选取4号和7号样品作为检验样品,其余8个



样品作为定标样品,进行最优测试策略的研究。

图4为A、B、C 3个单独区域的Na特征谱线强度分别对ESDD的定标结果。其中 $R^2$ 为拟合直线的相关系数。

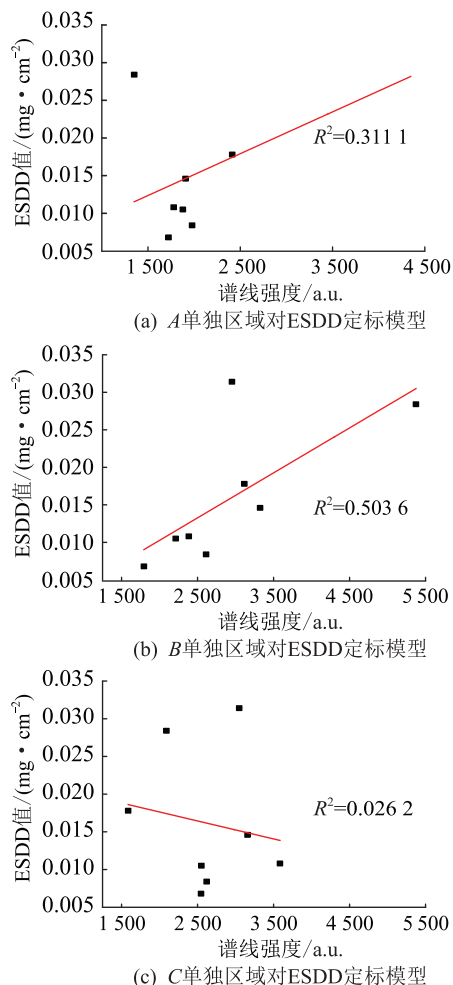


图4 单独区域对ESDD定标结果

Fig.4 Calibration results for ESDD in separate regions

图4中各单独区域拟合直线的相关系数分别为0.3111,0.5036,0.0262,其中C单独区域定标结果甚至呈负相关状态,可以看出仅通过某一区域的光谱数据对ESDD进行表征是远远不够的,并且猜测C区域光谱数据不利于Na特征谱线强度对于ESDD的定标,接下来通过2种或3种区域的特征谱线强度取平均值后再对ESDD进行表征,图5为分别采用AB、AC、BC、ABC联合后对ESDD的定标结果。

图5中各联合区域拟合直线的相关系数分别为0.9481,0.1200,0.4084,0.7605,可以发现相关系数 $AC < A, BC < B, ABC < AB$ ,和之前C区域不利于ESDD定标的猜想一致,并且AB联合区域定标结果的相关系数最高,已达到0.9以上,可以认为采用AB联合区域的特征谱线强度对ESDD进行定标

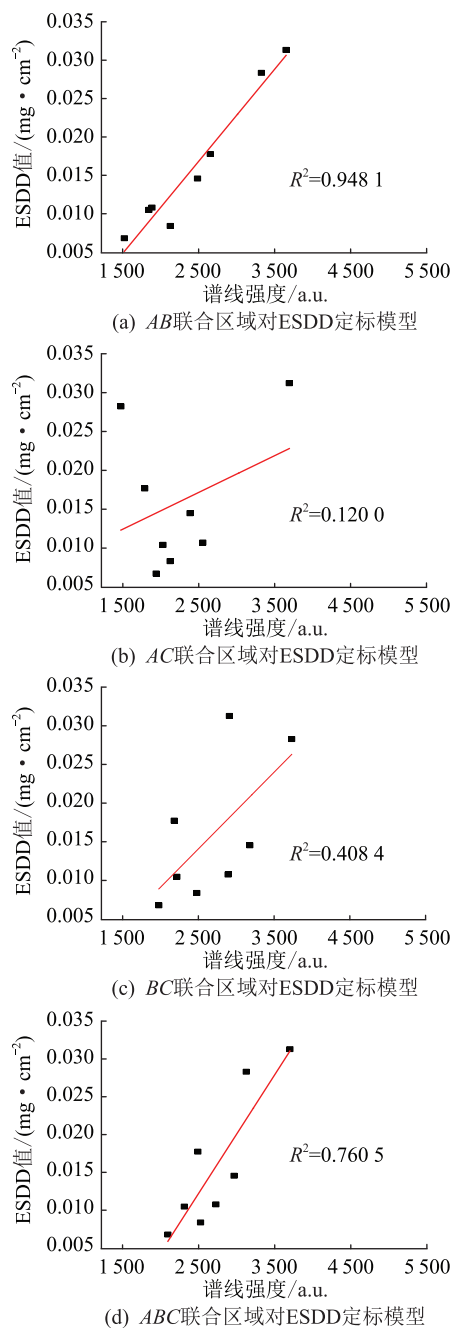


图5 联合区域对ESDD定标结果

Fig.5 Calibration results for ESDD in joint regions

效果最优。

下文讨论Al特征谱线强度对NSDD的定标模型,类似于之前的思路,先讨论单独区域对NSDD的定标结果,图6为A、B、C单独区域的特征谱线强度分别对NSDD的定标结果。

图6中各区域拟合直线的相关系数分别为0.4739,0.9383,0.1536,发现利用B单独区域的特征谱线强度对NSDD进行定标效果最好且达到0.9以上。但是为了寻找最优的测试策略,考虑到可能会出现与ESDD类似的联合区域定标结果优于单独区域的情况,仍然考虑通过2种或3种区域的特征

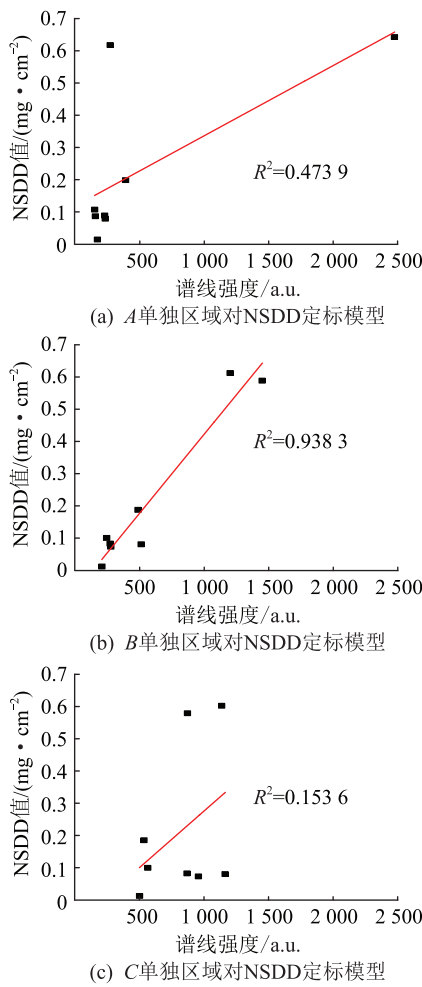


图6 单独区域对 NSDD 定标结果

Fig.6 Calibration results for NSDD in separate regions  
谱线强度取平均值后再对 NSDD 进行表征,图7为分别采用 AB、AC、BC、ABC 联合后对 NSDD 的定标结果。

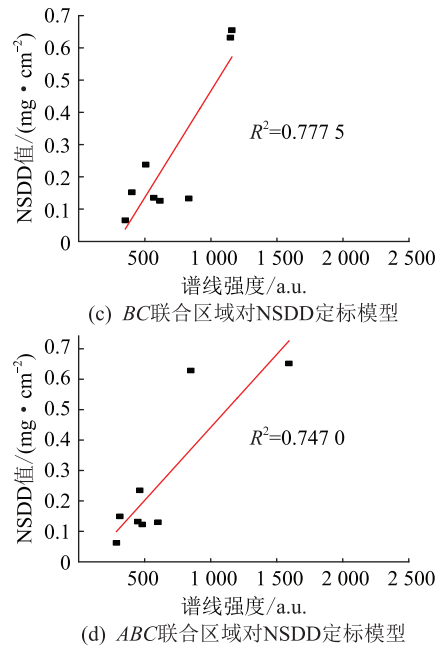
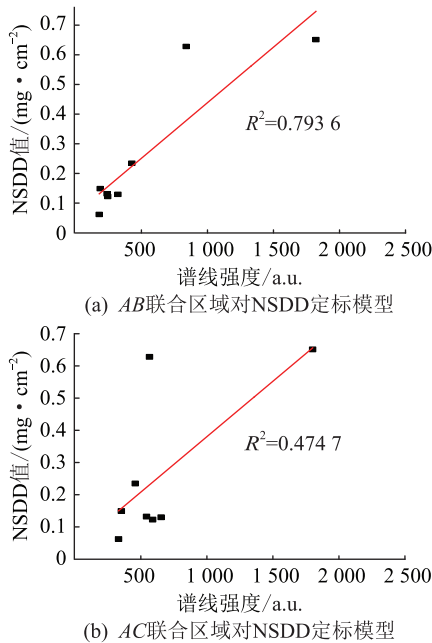


图7 联合区域对 NSDD 定标结果

Fig.7 Calibration results for NSDD in joint regions

图7中各联合区域拟合直线的相关系数分别为0.7936,0.4747,0.7775,0.7470,可以看出AB、BC、ABC联合区域的定标结果均不如B单独区域的定标结果,其中AB联合区域定标结果的相关系数最高,但相对于B单独区域定标结果的相关系数仍然略低,并且AC联合区域的定标结果也不理想,因此最终可以认为B单独区域的特征谱线强度对NSDD进行定标效果最优。

通过对比研究得到ESDD与NSDD的定标模型关系式分别为  $y = 70\ 632x + 1\ 352.8$ ,  $y = 1\ 677x + 151.75$ ,其中y为特征谱线强度值,x为ESDD或NSDD值。将检验样品4号和7号的特征谱线强度代入定标模型中,得到的结果如表2所示。

表2 4号和7号样品预测结果

Table 2 Prediction results of samples No.4 and No.7

参数	4号	7号
ESDD 预测值/(mg·cm <sup>-2</sup> )	0.0325	0.0103
ESDD 实际值/(mg·cm <sup>-2</sup> )	0.0314	0.0108
相对误差/%	3.50	4.63
NSDD 预测值/(mg·cm <sup>-2</sup> )	0.6084	0.0675
NSDD 实际值/(mg·cm <sup>-2</sup> )	0.6427	0.0789
相对误差/%	5.34	14.45

可以看出,利用定标模型对检验样品进行预测所得的ESDD、NSDD值误差较小,只有7号样品的NSDD预测值误差较大,但也在15%以内,可以认为文中测试策略具有实用意义。

综上所述,对于ESDD的测量,将绝缘子上表面

分为内、中、外环,分别在环和中环上均匀选取 10 个点,共选取 20 个点,运用单脉冲能量为 75 mJ 的高能脉冲激光束,按照设定的激光脉冲频率,对选取的分析点进行连续 5 次轰击,将所收集的光谱数据取平均值,提取出 Na 589.92 nm 特征谱线的强度,对比定标模型,获取 ESDD 值。考虑到能够对绝缘子进行带电检测,受到绝缘子串形状的影响,绝缘子下表面不易被激光探测,而绝缘子上、下表面的污秽度又有着很大的区别,但其比值在某一地区通常较接近,瓷和玻璃绝缘子上、下表面 ESDD 比值一般为 1:5~1:10,对于下表面的 ESDD,可以参考当地的上、下表面 ESDD 比值确定<sup>[27-31]</sup>。

对于 NSDD 的测量,将绝缘子上表面分为内、中、外环,仅在中环上均匀选取 10 个点,运用单脉冲能量为 75 mJ 的高能脉冲激光束,按照设定的激光脉冲频率,对选取的分析点进行连续 5 次轰击,将所收集的光谱数据取平均值,提取出 Al 396.152 nm 特征谱线的强度,对比定标模型,获取 NSDD 值。对于下表面的 NSDD 值,处理方法同理于 ESDD。

### 3 结论

文中搭建 LIBS 实验平台,以 10 个 ESDD、NSDD 值不同的自然污秽玻璃绝缘子为研究对象,选取合适的特征谱线,分别对 ESDD、NSDD 定标模型的最优测试策略进行研究。结论如下:

(1) 相比于之前的人工污秽样品,文中完全基于自然污秽进行研究,并且将特征谱线强度与 ESDD、NSDD 联系起来,得出 LIBS 技术可以用于绝缘子自然污秽度的表征,为 LIBS 现场应用于绝缘子表面污秽的在线检测进一步奠定了理论基础。

(2) 对于 ESDD 的表征,采用单独区域的表征效果较差,采用联合区域的表征效果较好且可以满足需求,测试策略为选取绝缘子内环和中环作为测试对象,选取 Na 589.592 nm 作为特征谱线,利用联合区域平均特征谱线强度对 ESDD 进行定标。

(3) 对于 NSDD 的表征,采用联合区域的表征效果较差,采用单独区域的表征效果较好且可以满足需求,测试策略为选取绝缘子中环作为测试对象,选取 Al 396.152 nm 作为特征谱线,利用单独区域特征谱线强度对 NSDD 进行定标。

由于激光在玻璃绝缘子内部也会形成光路,激光能量以及探测频率等过高会对玻璃绝缘子造成损害甚至爆炸,因此 LIBS 对于玻璃绝缘子的烧蚀阈值仍须进一步讨论。

本文得到国网山西省电力公司科技项目(SG-

SXDK00SPJS1900162)资助,谨此致谢!

### 参考文献:

- [1] 关志成,刘瑛岩,周远翔. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京:清华大学出版社,2006.  
GUAN Zhicheng, LIU Yingyan, ZHOU Yuanxiang. External insulation of insulator and transmission equipment[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [2] 芦山,王希林,刘星廷,等. 基于激光诱导击穿光谱的绝缘子污秽自由定标定量分析[J]. 智慧电力,2021,49(10):90-96.  
LU Shan, WANG Xilin, LIU Xingting, et al. Calibration-free quantitative analysis of insulator pollution via laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Smart Power, 2021, 49(10):90-96.
- [3] 魏韬,沈平,王伟,等. 基于随机森林模型的瓷绝缘子污秽等级判定研究[J]. 电瓷避雷器,2018(1):202-207.  
GUO Tao, SHEN Ping, WANG Wei, et al. Research on determination of pollution class for porcelain insulators based on random forest model[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(1):202-207.
- [4] 王自立,卢明,姜昀芃,等. 基于遗传神经网络对运行线路绝缘子污秽度的预测[J]. 电瓷避雷器,2018(2):172-179.  
WANG Zili, LU Ming, JIANG Yunpeng, et al. Prediction of contamination degree of line insulators based on genetic neural network[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(2):172-179.
- [5] 浙江省电力公司. 输电线路绝缘子运行技术手册[M]. 北京:中国电力出版社,2003.  
Zhejiang Electric Power Company. Transmission line insulator operation technical manual[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2003.
- [6] 梅红伟,毛颖科,卞星明,等. 相对湿度对绝缘子泄漏电流最大值的影 响[J]. 高电压技术,2010,36(3):627-631.  
MEI Hongwei, MAO Yingke, BIAN Xingming, et al. Effect of relative humidity on the maximum leakage current of insulators[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3):627-631.
- [7] 方春华,王建国,操平梅,等. 污秽绝缘子泄漏电流与环境温、湿度相关分析[J]. 高电压技术,2012,38(4):885-891.  
FANG Chunhua, WANG Jianguo, CAO Pingmei, et al. Correlation analysis of contaminative insulator leakage current, environmental temperature and humidity[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4):885-891.
- [8] 国家技术监督局. 高压架空线路和发电厂、变电所环境污区分级及外绝缘选择标准:GB/T 16434—1996[S]. 北京:中国标准出版社,1996.  
State Bureau of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. Environmental pollution classification and external insulation selection for high voltage transmission line, power plant and substation: GB/T 16434-1996[S]. Beijing:Standards Press of China, 1996.
- [9] BRECH F, CROSS L. International conference on spectroscopy[J]. Analytica Chimica Acta, 1961, 25(1):204.
- [10] 陈家壁,彭润玲. 激光原理及应用[M]. 4版. 北京:电子工业出版社,2019.

- CHEN Jiabi, PENG Runling. Principles of laser and its applications[M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2019.
- [11] 马腾才, 胡希伟, 陈银华. 等离子体物理原理[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2012.
- MA Tengcai, HU Xiwei, CHEN Yinhu. Plasma physics principle[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2012.
- [12] YOON Y, KIM T, YANG M, et al. Quantitative analysis of pottery glaze by laser induced breakdown spectroscopy[J]. Microchemical Journal, 2001, 68(2/3): 251-256.
- [13] 胡志裕, 张雷, 尹王保, 等. 激光诱导击穿光谱技术在燃煤电厂及土壤污染物在线检测中的应用研究[J]. 大气与环境光学学报, 2013, 8(1): 26-35.
- HU Zhiyu, ZHANG Lei, YIN Wangbao, et al. Application of laser-induced breakdown spectroscopy to coal-fired power plants and soil contaminants on-line monitoring[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2013, 8(1): 26-35.
- [14] GAUDIUSO R, DELL'AGLIO M, DE PASCALE O, et al. Laser induced breakdown spectroscopy for elemental analysis in environmental, cultural heritage and space applications: a review of methods and results[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2010, 10(8): 7434-7468.
- [15] 鲁翠萍, 刘文清, 赵南京, 等. 土壤重金属铬元素的激光诱导击穿光谱定量分析研究[J]. 物理学报, 2011, 60(4): 395-399.
- LU Cuiping, LIU Wenqing, ZHAO Nanjing, et al. Quantitative analysis of chrome in soil samples using laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(4): 395-399.
- [16] MOON Y, HAN J H, LEE J J, et al. Influence of water content on the laser-induced breakdown spectroscopy analysis of human cell pellet[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2015, 114: 27-33.
- [17] KUMAR A, YUEH F Y, SINGH J P, et al. Characterization of malignant tissue cells by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Applied Optics, 2004, 43(28): 5399-5403.
- [18] 吴金泉, 林兆祥, 刘林美, 等. 藏药七十味珍珠丸的激光诱导击穿光谱检测[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2009, 28(2): 53-56.
- WU Jinqian, LIN Zhaoxiang, LIU Linmei, et al. Determination Tibetan medicine of the 70 pearl flavor pill by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Journal of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition), 2009, 28(2): 53-56.
- [19] LANZA N L, WIENS R C, CLEGG S M, et al. Calibrating the ChemCam laser-induced breakdown spectroscopy instrument for carbonate minerals on Mars[J]. Applied Optics, 2010, 49(13): 211-217.
- [20] 袁欢, 宋立冬, 刘平, 等. 基于激光诱导击穿光谱的真空灭弧室真空度在线检测实验研究[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 230-234.
- YUAN Huan, SONG Lidong, LIU Ping, et al. Experimental study of vacuum degree online detection of vacuum interrupter based on laser induced breakdown spectroscopy[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 230-234.
- [21] 王希林, 洪骁, 王晗, 等. 室温硫化硅橡胶的激光诱导击穿光谱特性与老化研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2774-2782.
- WANG Xilin, HONG Xiao, WANG Han, et al. Study of spectral characteristics and aging performance of room temperature vulcanized silicone rubber using laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2774-2782.
- [22] 王乃啸, 王希林, 贾志东, 等. 基于激光诱导击穿光谱的绝缘子污秽可溶盐定量关系[J]. 电工技术学报, 2019, 34(3): 620-627.
- WANG Naixiao, WANG Xilin, JIA Zhidong, et al. Quantitative relationship of contaminated soluble salts of insulators using laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(3): 620-627.
- [23] SATHIESH K V, VASA N J, SARATHI R. Detecting salt deposition on a wind turbine blade using laser induced breakdown spectroscopy technique[J]. Applied Physics A, 2013, 112(1): 149-153.
- [24] 李勋, 吕启深, 艾精文, 等. 基于激光诱导击穿光谱的装置参数优化与硅橡胶材料的主组分分析[J]. 智慧电力, 2019, 47(1): 72-76, 93.
- LI Xun, LYU Qishen, AI Jingwen, et al. Parameter optimization of laser-induced breakdown spectroscopy device and principal ingredient analysis of silicone rubber material[J]. Smart Power, 2019, 47(1): 72-76, 93.
- [25] GRUBER J, HEITZ J, STRASSER H, et al. Rapid in situ analysis of liquid steel by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2001, 56(6): 685-693.
- [26] 刘之方, 魏文赋, 董勤晓, 等. 高压直流下激光触发空气间隙放电的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(21): 3527-3533.
- LIU Zhifang, WEI Wenfu, DONG Qinxiao, et al. Experimental study on air gap discharge triggered by pulsed laser under HVDC condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(21): 3527-3533.
- [27] 李震宇, 梁曦东, 王彬, 等. 直流电压下复合绝缘子的自然积污试验[J]. 电网技术, 2007, 31(14): 10-14.
- LI Zhenyu, LIANG Xidong, WANG Bin, et al. Natural pollution deposit test of polymeric insulators operated under DC voltage[J]. Power System Technology, 2007, 31(14): 10-14.
- [28] 夏谷林, 卢喜龙, 赖光霖, 等. 运行中 500 kV 输电线路绝缘子串自然积污及污闪特性研究[J]. 陕西电力, 2013, 41(4): 24-30.
- XIA Gulin, LU Xilong, LAI Guanglin, et al. Pollution accumulation and flashover performance of insulator strings on 500 kV AC transmission line under service voltage[J]. Shaanxi Elec-

tric Power, 2013, 41(4):24-30.

[29] 蔡炜,肖勇,吴光亚.  $\pm 500$  kV 直流线路绝缘子串自然积污规律初探[J]. 高电压技术, 2003, 29(6):4-40.  
CAI Wei, XIAO Yong, WU Guangya. Elementary analysis of pollution rules of insulators on  $\pm 500$  kV DC transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(6):4-40.

[30] 蒋兴良,舒立春,孙才新. 电力系统污秽与覆冰绝缘[M]. 北京:中国电力出版社, 2009.  
JIANG Xingliang, SHU Lichun, SUN Caixin. Pollution and Ice-coated insulation in power system[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2009.

[31] 高思明,周志成,王黎明,等. 无降雨影响的绝缘子自然积污研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(5):245-251.

GAO Siming, ZHOU Zhicheng, WANG Liming, et al. Study on natural contamination of insulators without effect of rainfall[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(5):245-251.

作者简介:



晋涛

晋涛(1978),男,硕士,高级工程师,从事输变电设备运维技术相关工作(E-mail:jintao@sx.sgcc.com.cn);

芦山(1983),男,硕士,高级工程师,从事输变电设备运维技术相关工作;

刘星廷(1989),男,硕士,工程师,从事物资检测工作。

### Insulator contamination analysis based on laser-induced breakdown spectroscopy

JIN Tao<sup>1</sup>, LU Shan<sup>1</sup>, LIU Xingting<sup>1</sup>, HE Yongqi<sup>2</sup>, WANG Xilin<sup>2</sup>, JIA Zhidong<sup>2</sup>

(1. State Grid Shanxi Electric Power Company Research Institute, Taiyuan 030001, China;

2. Guangdong Engineering Technology Research Centre of Power Equipment Reliability in Complicated Coastal Environments, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** Pollution flashover is one of the main factors threatening the safety of power system. In order to prevent pollution flashover accident, it is necessary to regularly analyze the contamination of insulator surface. However, the traditional power outage sampling method has a long detection period and consumes a lot of manpower and material resources. In this paper, a strategy and a model for the surface pollution analysis of insulators using laser-induced breakdown spectroscopy are proposed. 10 glass insulators with different equivalent salt deposit density (ESDD) and non-soluble deposit density (NSDD) are taken as research object, and the glass insulator's surface can be divided into inner, middle and outer ring. The calibration of coefficient of correlation of the model under different test strategy is studied, using Na 589.592 nm, Al 396.192 nm as characteristic spectral lines. The result shows that for ESDD, the coefficient of correlation can reach 0.948 1 when inner and middle rings are selected as test objects. And the relative error of detection is within 5%. For NSDD, the coefficient of correlation can reach 0.938 3 when middle ring is selected as test object. And the relative error of detection is within 15%. The analysis method can realize the quick on-site analysis of insulator surface contamination and improve the operation ability of transmission line operation safety maintenance, which has important engineering application value.

**Keywords:** equivalent salt deposit density (ESDD); non-soluble deposit density (NSDD); laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS); natural pollution; calibration model; strategy of test

(编辑 方晶)