

表面粗糙度对激光诱导击穿光谱信号的影响

陈 凭¹, 王希林¹, 洪 骁², 王 晗³, 赵晨龙¹, 贾志东¹, 邹 林², 李彦民⁴, 范建华⁴

1. 深圳复杂滨海环境电力装备可靠性工程实验室, 清华大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055
2. 南方电网科学院有限责任公司, 广东 广州 510080
3. 国网南京供电公司, 江苏 南京 210019
4. 深圳森日有机硅材料有限公司, 广东 深圳 518000

摘 要 硅橡胶复合绝缘子是高压输电线路的关键设备, 长期在复杂外界环境条件下带电运行后会发​​生表面老化, 表现为粉化、褪色、粗糙度和硬度上升等现象。粗糙度作为复合绝缘子的老化特征量之一, 其测量是复合绝缘子在线带电检测的难题。激光诱导击穿光谱技术(laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS)适用于开展输电线路复合材料的远程在线检测, 但粗糙度对 LIBS 信号的影响还没有得到系统的研究, 利用这种基体效应进行绝缘子表面粗糙度的测量尚无报道。制备了不同粗糙度的硅橡胶新样品, 与 500 kV 线路退运的复合绝缘子样品进行对比分析, 研究了硅橡胶材料的粗糙度对 LIBS 信号的影响, 结果表明, 对于新制备硅橡胶材料随着粗糙度的增加, 各主体元素特征谱线强度会随之增强, 不同主体元素之间的原子谱线强度比(Si 288.2 nm/C 247.9 nm 和 Al 394.4 nm/Si 288.2 nm)随之下降, 说明样品粗糙度对 LIBS 测量结果影响显著。但特征谱线强度及不同主体元素原子谱线强度比与粗糙度之间的函数关系不明显, 难以用于粗糙度测量。硅橡胶的主体元素为 Si, Al, C 和 O 等, 考虑元素含量及特征谱线的选取方便选择 Si 为主要分析元素。对于 Si 原子谱线强度比, 选取了两条上能级相近($E_{li}=40\ 991.88, 39\ 955.05\ \text{cm}^{-1}$)的原子谱线(Si I 288.2 nm, Si I 250.7 nm)作为分析线, 在满足局部热力学平衡与光学薄的条件下两条谱线的强度比应为定值, 但样品粗糙度的改变会影响脉冲激光烧蚀材料表面的过程, 从而改变等离子体的状态, 使得谱线强度比值也随之变化。上述两条硅原子谱线强度比和粗糙度建立的定标关系, 线性相关系数为 0.88。对于 500 kV 输电线路退运的老化硅橡胶材料, 其表面由于老化有部分氢氧化铝填料析出, 使得基体成分不均匀性更为显著, 其表面也变得更为粗糙, 这导致一对谱线强度比值作为定标函数, 实用性降低。因此针对老化硅橡胶材料, 除了选择 Si 元素谱线(Si I 250.7 nm, Si I 251.4 nm, Si I 251.9 nm)以外, 还引入了 Al 元素谱线(Al I 305.7 nm, Al I 305.9 nm), 利用三组谱线强度比进行多元回归分析, 对于两个实测粗糙度为 2.659 和 2.523 μm 老化硅橡胶样品, LIBS 测量的相对误差分别为 0.218 和 0.189。结果表明对同样成分的复合材料, 表面粗糙度对 LIBS 信号的影响是必须考虑的, 而利用这种基体效应, 开展远程在线测试复合绝缘子表面粗糙度, 对于高压输电线路检测运维具有重要的应用价值。

关键词 激光诱导击穿光谱; 硅橡胶; 粗糙度

中图分类号: TM216 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)06-1929-06

引 言

硅橡胶复合材料具有优异电气绝缘性能, 广泛应用于电力系统外绝缘, 如涂敷于陶瓷和玻璃绝缘子表面的室温硫化硅橡胶涂料、高温硫化硅橡胶制成的复合绝缘子等, 其使用

预期寿命为 15 年以上^[1]。输电线路途经的气候和环境复杂, 长期运行的硅橡胶复合绝缘子受高电压、强光照、高温、重污秽等多种因素影响, 表面会发生老化, 出现憎水性下降、粗糙度上升和表面粉化等现象^[2-3], 退役的复合绝缘子串形貌如图 1 所示。

硅橡胶复合材料表面粗糙度的测量对于判断复合绝缘子

收稿日期: 2018-05-05, 修订日期: 2018-10-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51607101), 深圳市基础研究项目(JCYJ20160301153442633), 清华大学深圳研究生院交叉研究基金项目(JC2017007)资助

作者简介: 王希林, 1983 年生, 清华大学深圳研究生院讲师 e-mail: wang.xilin@sz.tsinghua.edu.cn



图 1 500 kV 高压输电线路退役绝缘子串
Fig. 1 Composite insulator string retired from 500 kV AC transmission line

表面老化状态具有重要意义,但高压输电线路停电时间短,且无法直接利用粗糙度测试仪在绝缘子伞裙上进行测量。实时带电测量复合绝缘子的粗糙度是电网维护的难题。激光诱导光谱方法具有实时可在线远程测量的技术优势,且对复合绝缘子的破坏小,可以用于复合绝缘子的在线检测^[4-5]。近年陆续有研究提出 LIBS 光谱信号与样品粗糙度的相关性,Rapin 等提出火星岩石样品的粗糙度对 LIBS 光谱 H 信号的影响显著,Rauschenbach 等提出可用 LIBS 信号的特征光谱来区分不同粗糙度的岩石和土壤^[6-8]。也有一些光谱诊断手段与表面粗糙度密切相关,杨忠等建立了可见光-红外光谱与天然高分子材料表面粗糙度的关系,实测值与预测值相关系数达 0.9。李天子等^[9]研究了粗糙度对岩石热红外光谱发射率与解混精度的影响(见本刊 33 卷第 3 期和 37 卷第 10 期)。对于复合材料的 LIBS 测试信号与粗糙度的影响研究还未有报道,本研究以高温硫化硅橡胶复合材料为目标,研究了硅橡胶表面粗糙度与 LIBS 测试信号的关系,分析了利用其进行现场运行硅橡胶粗糙度测量的可行性。

1 实验部分

1.1 装置

实验装置示意图如图 2 所示。装置主要由 Nd:YAG 调 Q 开关脉冲激光器(镭宝,波长 1 064 nm,脉冲宽度 7 ns,最大单脉冲能量 900 mJ)、光谱仪(Avantes,波长分辨率 0.01 nm,波长范围 200~640 nm)、数字延时发生器 DG645、反射镜(反射率约 0.9)、聚焦透镜(焦距 10 cm)以及样品台组成。利用 DG645 触发激光器,让激光器发出 1 064 nm 脉冲激光,脉冲激光分别经过反射镜、凸透镜后聚焦在样品表面。聚焦后的高能激光强烈烧蚀硅橡胶材料并产生激光等离子体,等离子体冷却时发出的特征谱线信号经一分六光纤被传送到六通道光谱仪中进行分析。光谱仪在激光轰击发生后延时一段时间才进行光谱采集,以避免等离子体前期发射的大量连续辐射。

利用表面粗糙度测量仪(SJ-210)测量硅橡胶样品的表面粗糙度,以硅橡胶表面的轮廓算术平均偏差为 R_a 。样品的粗

糙度值,即采样长度内轮廓偏距绝对值的算术平均值。

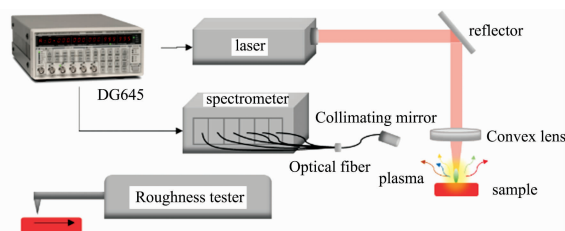


图 2 LIBS 装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of LIBS experimental setup



图 3 新制(a)与老化硅橡胶样品(b)

Fig. 3 New (a) and aged (b) silicone rubber samples

1.2 样品与仪器参数

实验中采用新制高温硫化硅橡胶与从退役的复合绝缘子串中采样得到的部分伞裙作为样品,如图 3 所示,硅橡胶复合绝缘子在长期运行后表面会逐渐粉化、褪色、粗糙度增加等现象。其中新制样品的主要成分及含量(质量分数)如表 1 所示。将硅橡胶分成多份并利用目数不同(1 000, 400, 280 和 220 目等)的砂纸分别将其打磨出具有不同粗糙程度的表面,在每个测量表面标出四对间距均约为 12.5 mm 的起点和终点,利用粗糙度测试仪分别在每对起点终点连成的线段上进行粗糙度测量。然后在上述所有线段上都均匀地选取 5 个不同点进行单脉冲 LIBS 测量,利用 5 次测量的光谱数据平均值作为该粗糙度对应的光谱数据值。

实验用的仪器参数如下:激光器电源氙灯电压 600 V,该电压下利用激光能量计在聚焦透镜下方测量 20 次得到的激光能量最大值为 108.4 mJ,最小值为 99.1 mJ,平均值为 102.6 mJ,标准差 2.8 mJ。激光波长为 1 064 nm。光谱仪采集的延迟时间为 4 μ s,积分时间为 30 μ s,聚焦后的光斑直径约为 200 μ m。表面粗糙度测量仪的采样长度为 12 mm,探针运动速度为 0.5 mm \cdot s⁻¹。激光聚焦点位于样品下方约 1 mm 处。

表 1 硅橡胶样品主要成分及含量对比
Table 1 Major compositions and concentrations of silicone rubber material

基胶份数	改性氢氧化铝份数	未改性白炭黑份数	其他助剂份数	胶含量	氢氧化铝百分数	白炭黑百分数
100	150	40	26.4	31.6	47.4	12.6

2 结果与讨论

2.1 粗糙度对主体元素谱线强度的影响

图 4 上方给出了新旧样品 200~640 nm 的 LIBS 光谱图。由于 LIBS 测试得到的光谱数据是一系列离散点, 原始采集数据的局部极大值往往不是真实峰值的位置, 为了获得波峰高度, 需要对光谱数据进行线型拟合。用洛伦兹线型对 LIBS 光谱数据进行拟合。由于 LIBS 光谱中包含一定的背景和噪声, 因此在拟合过程中对越靠近峰值处的点赋予越高的权重, 利用最速下降法进行迭代计算, 让线型拟合更准确, 图 4 下方为硅元素两条原子谱线 (Si I 288.2 nm, Si I 252.4 nm) 的拟合结果。

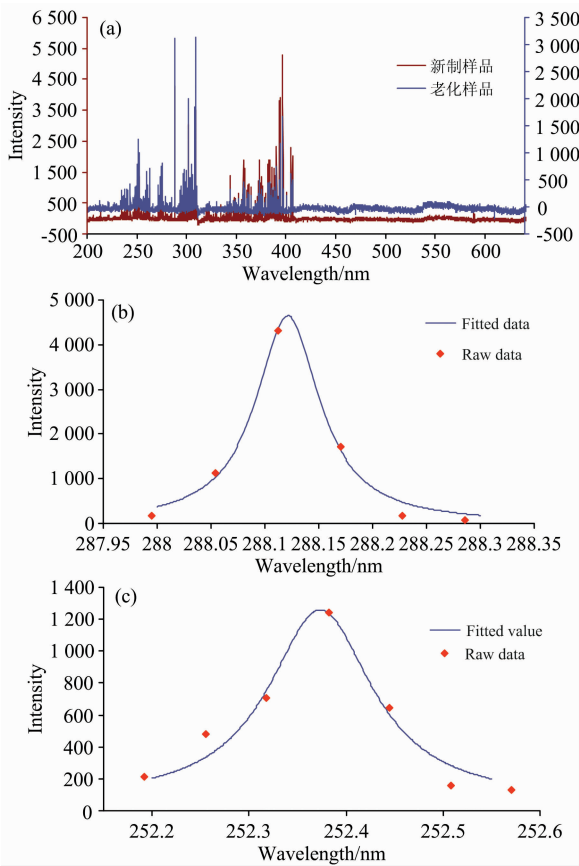


图 4 新旧样品光谱对比与洛伦兹线型谱线拟合

Fig. 4 Comparison between spectra of fresh & aged sample and Lorentz line-type fitting of spectral data

表面粗糙度的改变会影响材料对激光的吸收过程, 从而会影响后续激光等离子体的状态。随着样品表面粗糙程度变大, 相同参数的脉冲激光在材料表面烧蚀产生的等离子体谱线强度会逐渐增强, 图 5 列出了 C, Si, Al 等几条谱线强度的变化情况。可以看到表面粗糙度的改变对谱线强度影响很大, 同种硅橡胶材料的粗糙度从光滑 (约 0.5 μm) 变化到较为粗糙 (约 8 μm) 时, 硅元素的两条原子谱线 (Si I 288.2 nm, Si I 250.7 nm) 强度分别从 3 000, 800 增加到了 5 500, 1 800, Al 元素原子谱线 (Al I 309.3 nm) 强度从 3 000 增加到了

6 000, 而碳元素原子谱线 (C I 247 nm) 则从 300 增加到 700。

虽然单一元素谱线强度与表面粗糙度存在正相关的函数关系, 但单一谱线强度并不合适作为测量粗糙度的特征量。首先, 在测量中受环境温湿度、激光能量波动等因素的影响, 在同一粗糙度下单一谱线强度的波动较大, 容易使得测量结果不准确, 且谱线强度与粗糙度线性相关度不高, 尤其在粗糙度为 2~6 的范围内光谱强度的变化趋势并不显著, 难以作为定标函数进行准确测量。此外, 单一谱线强度与对应元素含量相关, 硅橡胶基体成分并不是完全均匀的, 即使粗糙度相差不大, 由于基体成分的影响可能会导致谱线强度也会发生较大变化, 因此单一元素谱线强度不合适直接用于测量材料表面粗糙度。

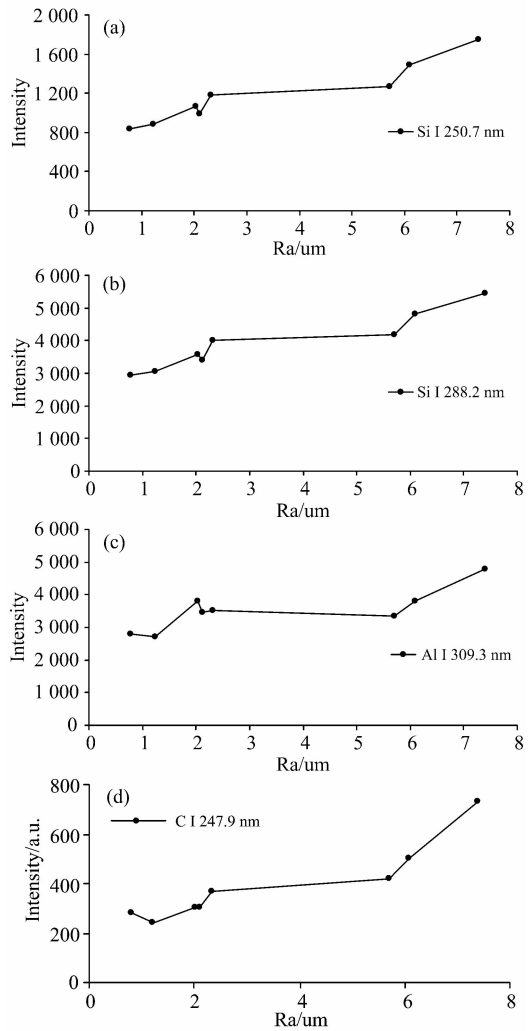


图 5 表面粗糙度与新制样品主体元素谱线的关系

Fig. 5 Relationship between roughness and major element line intensity of the new sample

2.2 粗糙度对元素谱线强度比的影响

粗糙度的不同会影响硅橡胶表面与脉冲激光的耦合过程, 不仅会导致光谱强度的变化, 对不同谱线强度之间的比值也会有影响。不同元素的谱线强度比值与待测样品组分、样品状态、激光能量、光谱仪采集延时、环境温湿度等因素

都有关,图 6 为不同粗糙度表面测量得到的 Si 和 C 原子谱线强度比值和 Al 和 Si 原子谱线强度比。可以看到随着粗糙度的增加,两者均随之下降,且变化幅度较大。Al 和 Si 元素谱线强度比值从 R_a 为 $0.5 \mu\text{m}$ 时的 1.6 下降到了 R_a 为 $8 \mu\text{m}$ 时的 0.9, Si 和 C 元素谱线强度比则从 20 下降到了 4 左右。不同元素的谱线强度比可以提供材料表面的粗糙度信息,但不同元素的谱线强度比也会受到基体变化带来的影响,因此不同元素谱线强度比也不适合作为测量表面粗糙度的指标。粗糙度对不同元素谱线强度比值的显著影响表明,在 LIBS 测试中需要关注样品表明粗糙度的一致性,否则粗糙度的变化可能会引起测量结果较大的波动。

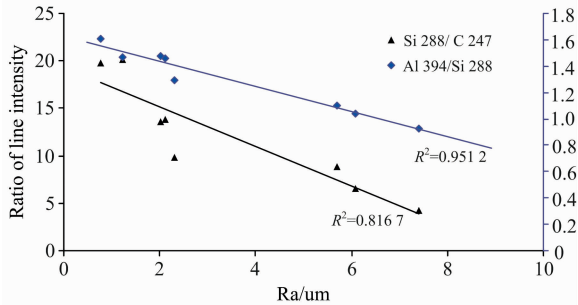


图 6 表面粗糙度对不同元素谱线强度比的影响
Fig. 6 Relationship between surface roughness and line intensity of different element

考虑作为硅橡胶主体元素之一的 Si 元素的谱线强度比与粗糙度的关系。假设激光等离子体满足局部热力学平衡状态,且不考虑谱线的自吸收效应,则等离子体从上能级 E_k 跃迁到下能级 E_i 时发射的谱线强度为

$$I_{\lambda}^{ki} = FC_s A_{ki} \frac{g_k \exp\left(-\frac{E_k}{k_b T}\right)}{\lambda U_s(T)} \quad (1)$$

式(1)中, λ 为跃迁时发射谱线的波长, g_k 为统计权重, C_s 为谱线对应的元素浓度, F 是跟系统相关的常数, A_{ki} 是谱线跃迁概率, $U_s(T)$ 为配分函数。将式子两边取对数,可以得到

$$\ln \frac{I_{\lambda}^{ki}}{g_k A_{ki}} = -\frac{E_k}{k_b T} + \ln \frac{FC_s}{U_s(T)} \quad (2)$$

根据式(2),以 E_k 为横轴, $\ln \frac{I_{\lambda}^{ki}}{g_k A_{ki}}$ 为纵轴可以画出某一

元素多条谱线的玻尔兹曼斜线,直线的斜率与等离子体温度有关。对于同一元素上能级 (E_k, E_i) 相近的两条原子谱线,假设它们的下能级分别为 E_m 和 E_n ,则它们在玻尔兹曼图上的点应重合或者十分接近,因此可以得到

$$\frac{I_{\lambda}^{km} \lambda_{km}}{g_k A_{km}} \approx \frac{I_{\lambda}^{in} \lambda_{in}}{g_i A_{in}} \quad (3)$$

即在理想条件下,元素的两条上能级十分接近的谱线强度之比应该是一个常数。但由于影响等离子体的因素很多,这个比值常常并不等于理论值。在保持装置参数不变的情况下,硅橡胶表面粗糙度的变化会影响等离子体状态,改变上述谱线强度比值。选取了 Si 元素上能级相近 ($E_{ki} = 40\ 991.88$ 和 $39\ 955.05 \text{ cm}^{-1}$) 两条原子谱线 Si I 288.2 nm 以及 Si I 250.7 nm,两条谱线的参数如表 2 所示,用它们的强度比来反映材料粗糙度的变化。这两条谱线的周围不存在其他峰的干扰,因此拟合的强度更准确。结果如图 7 所示,随着样品

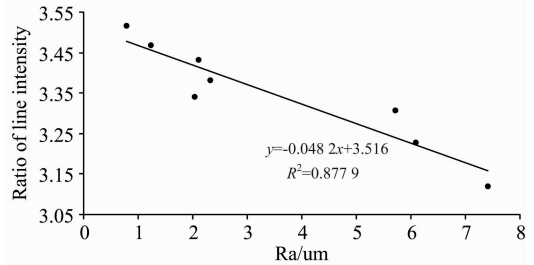


图 7 表面粗糙度对不同 Si 原子谱线强度比的影响
Fig. 7 Relationship between surface roughness and line intensity of the Si

表 2 Si 原子线 250.7 和 288.2 nm 的原子参数
Table 2 Information about atomic spectral line 288.2 and 250.7 nm of Si

λ/nm	E_i/cm^{-1}	E_k/cm^{-1}	A_{ki}	g_k
250.7	77.12	39 955.05	54 700 000	5
288.2	6 298.85	40 991.88	217 000 000	3

表 3 多元回归拟合结果

Table 3 Results of multivariate regression

实测粗糙度/ $R_a/\mu\text{m}$	Si I 251.4/ Si I 251.9	Si I 251.4/ Si I 250.7	Al I 305.7/Al I 305.9	拟合粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	拟合相对 误差/%
2.635	1.190	0.894	1.165	3.315	25.8
2.545	1.164	0.837	1.168	3.068	20.6
2.314	1.200	0.903	1.150	3.220	39.1
2.256	1.120	0.778	1.124	2.712	20.2
5.637	1.156	0.916	1.299	4.445	21.1
4.122	1.183	0.834	1.118	2.629	36.2
2.392	1.177	0.755	1.123	2.037	14.8
2.865	1.174	0.835	1.252	3.377	17.9
2.910	1.107	0.878	1.048	3.292	13.1
2.582	1.175	0.937	0.925	2.606	0.9
2.822	1.064	0.839	0.851	2.344	16.9

粗糙度的增加, 谱线强度比随之变大, 且两者之间存在较好的线性关系, 当粗糙度从 $0.8 \mu\text{m}$ 增加到 $7.4 \mu\text{m}$ 时, 谱线强度比约从 3.5 减小到了 3.1。图中八个点拟合相对误差的最小值为 7.1%, 最大值为 19.8%, 平均误差为 12.8%。

2.3 老化硅橡胶的粗糙度测量

选取 500 kV 高压线路停运下的老化复合绝缘子伞裙作为待测样品, 与新制硅橡胶样品作相同的试验, 同样在粗糙度测量仪的取样线段上利用 LIBS 轰击 5 个点获取光谱数据。老化后的硅橡胶由于粉化以及白炭黑、氢氧化铝填料析出等原因, 表面成分不均匀性比新制样品更显著, 因此 Si 元素的一组谱线强度比值难以反应粗糙度的变化, 需要引入 Al 元素谱线强度比。针对老化样品的成分不均匀性, 共选取了硅橡胶主体元素 Si 和 Al 的 5 条谱线, 共 3 组谱线强度比, 利用多元回归方法对数据进行拟合, 并利用拟合结果对粗糙度及逆行预测。从测量得到的谱线强度比值中选取中位数作为最终测量结果, 表 3 展示了硅橡胶伞裙的不同位置处实测的

粗糙度值、谱线强度比以及粗糙度拟合值, 最大拟合偏差在 $1 \mu\text{m}$ 左右。表 4 为利用所得到的回归方程根据 LIBS 数据对粗糙度的预测结果。从表中可看到预测偏差在 $0.5 \mu\text{m}$ 左右, 考虑到现场绝缘子表面粗糙程度通常是不均匀, 这个测量精度可以满足现场测量要求。

3 结 论

研究了硅橡胶材料表面粗糙度对激光诱导击穿光谱信号的影响, 结果表明硅橡胶表面粗糙度对单一元素谱线强度以及谱线强度比影响较大, 粗糙度越大, 谱线强度越高。利用相同元素上能级相近的两条谱线强度之比作为反映粗糙度变化的特征变量, 并最终选取了硅橡胶材料主体元素 Si 的两条原子谱线 (Si I 288 nm 以及 Si I 250.7 nm) 强度之比跟表面粗糙度建立了定标函数曲线, 相关系数为 0.88。老化后的硅橡胶由于基体成分不均匀性更显著, 难以利用 Si 元素的一组谱线强度比跟粗糙度建立函数关系, 因此加入了 Al 元素的特征谱线进行多元回归分析, 并利用拟合方程对粗糙度进行了测量, 测量偏差、相对误差分别为 0.581, 0.476 μm 和 0.218, 0.189, 满足现场测量的要求。利用 LIBS 技术可以实现对硅橡胶表面粗糙度的无接触测量, 对输电线路在线状态监测具有重要意义。

表 4 利用 LIBS 测量老化绝缘子样品的结果

Table 4 Surface roughness of aged HTV insulators by LIBS

实测粗糙度值/ μm	预测值/ μm	偏差绝对值/ μm	相对误差/%
2.659	3.240	0.581	21.8
2.523	2.047	0.476	18.9

References

- [1] GUAN Zhi-cheng(关志成). Insulators and Outdoor Insulation of Power Transmission Lines(绝缘子及输变电设备外绝缘). Beijing: Tsinghua University Press(北京: 清华大学出版社), 2006. 11.
- [2] DENG Tao, YANG Di, TAO Wen-biao, et al(邓桃, 杨滴, 陶文彪, 等). Power System Technology(电网技术), 2016, 40(1): 328.
- [3] LIU Yun-peng, WANG Qiu-sha, LÜ Fang-cheng, et al(刘云鹏, 王秋莎, 律方成, 等). High Voltage Engineering(高电压技术), 2010, (11): 2634.
- [4] WANG Xi-lin, WANG Han, ZHAO Chen-long, et al(王希林, 王晗, 赵晨龙, 等). Journal of Electrical Engineering & Technology(电工技术学报), 2016, 31(24): 96.
- [5] WANG Xi-lin, HONG Xiao, WANG Han, et al(王希林, 洪晓, 王晗, 等). Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(41): 415601.
- [6] Rauschenbach I, Lazic V, Pavlov S G, et al. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2008, 63(10): 1205.
- [7] Rapin W, Bousquet B, Lasue J, et al. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2017, 137: 13.
- [8] Klus J, Pořizka, et al. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2016, 126: 6.
- [9] LI Tian-zi, LIU Shan-jun(李天子, 刘善军). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2017, 37(10): 3051.

Influence of Sample Surface Roughness on Signal of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy

CHEN Ping¹, WANG Xi-lin¹, HONG Xiao², WANG Han³, ZHAO Chen-long¹, JIA Zhi-dong¹, ZOU Lin², LI Yan-min⁴, FAN Jian-hua⁴

1. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China

2. China Southern Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510080, China

3. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China

4. Shenzhen Square Silicone Co., Ltd., Shenzhen 518000, China

Abstract Silicone rubber composite insulators are key equipment of HV transmission lines. Their surfaces will gradually deteriorate after running under a harsh environmental condition for a long time, and become chalked, faded, more rough and tough. As one of the characteristics of aging, surface roughness measuring is always difficult in power transmission line condition monitoring. Laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) is suitable for remote condition monitoring in power system, but the influence of roughness on LIBS signal hasn't been systematically studied, and taking advantage of this matrix effect for insulator surface roughness testing hasn't been reported yet. New silicone rubber samples with different surface roughness were made, compared with those retired from a 500 kV power transmission line. The influence of roughness of new silicone rubber material on LIBS signal was studied and the results showed that when roughness increases, the spectral line intensity increases, while the ratio of different element line intensity (Si 288.2 nm/C 247 nm and Al 394 nm/Si 288.2 nm) decreases. It showed that roughness has a significant effect on LIBS signal. However, since there had been no obvious linear relationship between intensity and roughness or intensity ratio and roughness, it was hard to measure roughness by these relationships. The major elements of silicone rubber material were Si, Al, C, O and so on. Si was selected as the analytical element considering element content and spectral line selection convenience. Two atomic lines of Si (Si I 288.2 nm, Si I 250.7 nm) were selected as the analytical lines whose upper energy levels were nearly the same ($E_{hi} = 40\,991.88$ and $39\,955.05\text{ cm}^{-1}$). When the laser induced plasma satisfies LTE and optically thin condition, the ratio of line intensity should be constant, but the ablation process is affected by material surface roughness, and then the plasma state and intensity ratio will be changed. A calibration line of roughness and the above ratio was established and the linear correlation coefficient was 0.88. As for the aged silicone rubber material retired from the 500 kV transmission line, the surface was precipitated by some ATH fillers because of the aging process, leading to a more inhomogeneous content in the matrix and a rougher surface. So it is not practical to measure roughness by only one couple of spectral lines. Therefore it is necessary to introduce Al atomic lines (Al I 305.7 nm, Al I 305.9 nm) in the calculation model besides Si atomic lines for the aged silicone rubber material. Multivariate regression was carried on with 3 sets of spectral intensity ratios, and then 2 aged silicone rubber material were measured by LIBS whose actual roughness were 2.659 and 2.523 μm . The relative error was 0.218 and 0.189, respectively. The results show that roughness cannot be ignored in LIBS measurement for material with the same constitution, and the exploitation of this matrix effect for the remote measuring of composite insulators is meaningful for the checking and operation of HV transmission lines.

Keywords Laser induced breakdown spectroscopy; Silicone rubber; Surface roughness

(Received May 5, 2018; accepted Oct. 30, 2018)