第 51 卷 第 5 期：2529-2538　　高电压技术　　Vol.51, No.5: 2529-2538
2025 年 5 月 31 日　　High Voltage Engineering　　May 31, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240836

脉冲激光剥离硅橡胶伞裙表面老化层及其闪络特性

刘方斌[1]，胡玉耀[1]，蒋兴良[2]，刘明明[1]，刘　栋[1]，耿　凯[3]
（1. 山东理工大学山东省智能电网及装备工程实验室，淄博 255000;
2. 雪峰山能源装备安全国家野外科学观测研究站(重庆大学)，重庆 400044;
3. 山东汇能电气有限公司，淄博 255089）

摘　要：以硅橡胶材料为代表的有机外绝缘在电力系统中获得了大规模应用，但长期运行的硅橡胶外绝缘材料不可避免的出现老化问题，导致疏水性能下降，已成为制约电力系统可靠运行的瓶颈问题。文中提出应用脉冲激光剥离技术提升老化硅橡胶材料疏水性能的新思路，研究了激光剥离硅橡胶伞裙表面老化层的机制以及疏水/电气性能提升的原因。研究结果表明：脉冲激光连续剥离 10 次亦即剥离厚度约为 0.10 mm 后，伞裙表面的污秽、龟裂及老化层基本去除，其接触角最高可达 158.75°，达到超疏水状态；激光剥离虽未改变元素种类，但剥离后表面形成了微/纳米复合结构，且亲水性羟基基团(—OH)吸收峰高度降低，均有利于疏水性能的提升。因此，剥离后 5 串绝缘子的平均干闪电压和湿闪电压较剥离前分别提高了 22.69%和 17.39%。脉冲激光剥离过程是材料内部温度场和热应力场共同作用的结果。

关键词：脉冲激光；剥离；硅橡胶；老化层；憎水性

Aging Layer on the Surface of Silicone Rubber Shed Removal by Pulse Laser Lift-off Technique and Its Flashover Performance

LIU Fangbin[1], HU Yuyao[1], JIANG Xingliang[2], LIU Mingming[1], LIU Dong[1], GENG Kai[3]
(1. Shandong Engineering Laboratory of Smart Grid and Equipment, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;
2. Xuefeng Mountain Energy Equipment Safety National Observation and Research Station, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Shandong Huineng Electric Co., Ltd., Zibo 255089, China)

Abstract：Organic external insulation, represented by silicone rubber material, has been widely used in power systems. However, the long-term operation of silicone rubber external insulation material inevitably leads to aging problems, resulting in a decline in hydrophobic properties, which has become a bottleneck restricting the reliable operation of power systems. Consequetly, we proposed a novel approach to improve the hydrophobic properties of aged silicone rubber material using pulsed laser lift-off technique,and investigated the mechanism of laser lift-off for removing the aged surface layer of silicone rubber shed, as well as the reasons for the improvement in hydrophobic and electrical properties. The research findings indicate that, after 10 consecutive laser ablations, namely, a removal thickness of approximately 0.10 mm, the contamination, cracks and aged layer on the surface of the shed are essentially eliminated. As a result, the contact angle can reach up to 158.75°, achieving a superhydrophobic state. Although laser ablation does not change the types of elements, it creates a micro/nano composite structure on the ablated surface, and the height of the absorption peak of hydrophilic hydroxyl groups (—OH) decreases, both of which contribute to the improvement of hydrophobic properties. Therefore, compared with the unablated insulator strings, the average dry flashover voltage and wet flashover voltage of five insulator strings after ablation increase by 22.69% and 17.39%, respectively. Pulse laser lift-off process is the result of the combined action of the internal temperature field and thermal stress field of the material.

Key words：pulse laser; lift-off; silicone rubber; aging layer; hydrophobicity

基金资助项目：国家自然科学基金(52477147)；山东省自然科学基金项目(ZR2023ME129)；山东省高等学校“青创团队计划”(2023KJ148)；雪峰山能源装备安全国家野外科学观测研究站开放课题(N0RS-XFEES-23-04)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52477147), Shandong Natural Science Foundation (ZR2023ME129), Youth Innovation Team of Shandong Province (2023KJ148), Open Fund of Xuefeng Mountain Energy Equipment Safety National Observation and Research Station (Chongqing University) (N0RS-XFEES-23-04).

0 引言

硅橡胶因其优异的电气绝缘、耐高低温、耐腐蚀以及独特的憎水性和憎水迁移性等性能，广泛用作复合绝缘子、支柱绝缘子、避雷器、电缆附件和变压器套管等电力设备的外绝缘材料[1-2]。根据国家电网公司规划，为推进“双碳”目标的实现，“十四五”期间围绕新能源大基地建设“24 交 14 直”特高压工程，届时硅橡胶材料将大量应用于输电线路、变电站和换流站外绝缘[3]。然而，随着运行年限的增加，在强电场、紫外辐射和臭氧等因素的协同作用下硅橡胶逐渐发生老化，导致疏水/防冰性能下降，在冬季雨雪天气下更易引发冰闪事故[4-5]。因此，硅橡胶材料老化问题已成为制约电网长期可靠运行的关键难题。

现阶段主要采用化学清洗剂处理硅橡胶老化层，但清洗剂中的化学成分有可能与硅橡胶中的硅氧键或其他官能团发生化学反应，破坏硅橡胶表面的疏水结构，甚至有可能造成疏水性丧失。通过对老化层截面的微观形貌观察，发现厚度约为 0.05~0.10 mm[6-7]，其内侧仍然保持良好的电气和理化性能。而且硅橡胶在自然环境下的设计使用寿命在 40 年以上，如果盲目更换会造成大量的损失[8]。

为延长硅橡胶绝缘子的服役寿命，实现电网绿色低碳经济发展，本文提出应用脉冲激光剥离技术提升老化硅橡胶材料疏水/电气性能的新思路。脉冲激光剥离技术是指选择合适的激光类型、辐照参数及作用方式，采用激光辐照靶材，通过材料气化、热弹性膨胀、烧蚀、等离子冲击效应等物理化学过程实现靶材表层的去除，而不对基材造成损伤。

激光剥离技术广泛应用在半导体材料加工[9]、柔性电子器件制造[10]、航空航天[11-12]等，其应用前景几乎涵盖整个工业领域。目前脉冲激光剥离技术研究多集中在金属等刚性基体表面漆层及污秽的去除[13-15]，而在电力领域的应用研究较少。袁田等采用脉冲激光剥离硅橡胶伞裙裂纹及污层，通过测试发现，剥离后的硅橡胶表面憎水性和憎水迁移性相比剥离前有了明显的提升[16]。张世泽等采用激光剥离高压电缆绝缘屏蔽，并对剥离后的界面性能开展测试，发现与传统砂纸打磨的电缆相比，激光剥离后的电缆表面更平整光滑、粗糙度较低，且剥离过程未对交联聚乙烯绝缘造成氧化损伤[17]。受限于硅橡胶材料特殊的分子结构和化学组成以及老化层的物化特性，目前少有的研究仅对激光剥离后的表面憎水性能开展测试，而对激光剥离的物理化学过程和剥离后的表面状态及其对电气性能的影响尚缺乏研究。

因此，本文基于脉冲激光剥离技术，研究了激光参数和剥离次数对老化硅橡胶伞裙表面憎水性的影响，并采用电子扫描显微镜、傅里叶红外光谱仪和能谱仪测试剥离前后材料表面微观形貌、官能团和元素含量的变化，阐释了脉冲激光剥离硅橡胶的物理化学过程。在此基础上，通过闪络试验对比分析了剥离前后硅橡胶绝缘子的放电发展过程，揭示了激光剥离技术提升绝缘子电气性能的原因。本文研究成果不仅适用于硅橡胶复合绝缘子，还可推广应用于电力系统其他硅橡胶外绝缘材料，可为延长硅橡胶材料的服役寿命提供理论依据和技术支撑。

1 试验准备

1.1 硅橡胶老化机理

复合绝缘子硅橡胶老化是一个由表及里的过程，即硅橡胶表面最先发生老化，随着服役时间的延长，老化逐步向绝缘子内部延伸，并最终引发绝缘性能劣化乃至失效[18]。在老化过程中，交联的聚二甲基硅氧烷(PDMS)分子链发生断裂，在断链反应的区域，原本的长链分子被打断，导致化学基团的比例发生显著改变。化学结构的变化不仅发生在绝缘子伞裙表面，还延伸至近表面区域，最终呈现出类似于分层老化模型的结构特征，主要由两部分组成：一是老化层，包括无机硅氧层和断链层；二是内部的硅橡胶基体，如图 1 所示。

1.2 样品制备

本文选取 6 支型号为 FXBW-35/70 的硅橡胶复

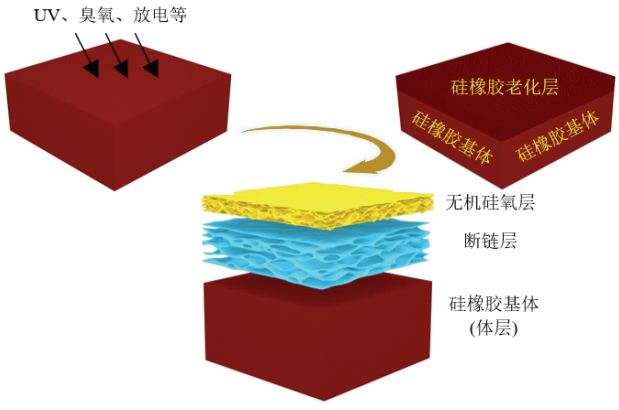


图 1 绝缘子伞裙老化模型

Fig.1 The aging model of insulator shed

合绝缘子作为试品，并从 1 号到 6 号依次编码。其中，1 号为未挂网运行的新绝缘子，2 号至 6 号为挂网运行且已老化的绝缘子，详细信息如表 1 所示。

1.3 激光参数选择

激光剥离装置采用 DFL-100C 光纤脉冲激光器，最大功率为 100 W，激光器手持端部的质量仅为 0.6 kg，激光器与试品最佳工作距离为(290±5) mm，参数如表 2 所示。

1.4 表征分析

激光剥离依赖于激光器所产生的光脉冲的特性，是由高强度的光束及老化层之间的相互作用所导致的物化反应。激光剥离硅橡胶绝缘子老化层示意图如图 2 所示。

为表征激光作用前后绝缘子伞裙表面形貌、憎水性、化学组成和闪络特性的变化，对样品分别进行了如下测试和分析。憎水性采用 JC2000D1 型测量仪测量接触角(contact angle, CA)和喷水分级法(hydrophobicity class, HC)；三维微观形貌采用 SU8010 型电子扫描显微镜(SEM)对表面形貌结构进行测量；使用能谱仪(EDS)和傅里叶红外光谱仪(FTIR)分别对元素含量和官能团进行定量分析。

闪络试验接线原理图如图 3 所示。试验变压器输出电压额定值为 300 kV，额定电流为 4 A，分压器分压比为 1 000:1。试验过程中采用高压微雾的方式湿润绝缘子表面，采用持续升压法获取闪络电压，相邻两次闪络试验时间间隔为 12~15 min。

2 老化层剥离效果与讨论

2.1 脉冲激光参数对剥离后表面状态的影响

当激光器输出功率为 95 W、脉冲频率为 100 kHz 时，对 6 号硅橡胶绝缘子开展剥离试验。通过测试发现，当扫描长度为 45 mm 时，脉冲激光沿伞裙表面剥离一圈时间约 210 s，剥离深度约 7.6~10 μm/圈。为探讨剥离深度和扫描速度对绝缘子伞裙憎水性的影响，对剥离前后 6 号绝缘子的接触角和表面水滴状态进行了测试，结果如图 4 和图 5 所示。由图 4 和图 5 可得如下结论：

1）经激光剥离后，硅橡胶绝缘子伞裙憎水性有了明显提升。在不同的剥离次数下，CA 均随着扫描速度的增大呈先升高后降低的趋势；对于不同的扫描速度，CA 均随着剥离次数的增大基本呈现增大的趋势，表明随着剥离深度的增加，绝缘子伞裙表面的憎水性逐渐改善，直至达到超疏水状态(158.75°)。

表 1 试样信息

Table 1 Sample information

运行环境	序号	初始憎水性	运行年限/a
无	1	HC2	0
成马线	2	HC3	4
	3	HC4	6
邹四 IV 线	4	HC3	5
	5	HC4	9
	6	HC6	13

表 2 DFL-100C 光纤脉冲激光器参数

Table 2 Parameters of DFL-100C fiber pulse laser

参数	数值
重复频率/kHz	55~100
脉冲宽度/ns	90~110
波长/nm	1064、1080
最大单脉冲能量(55 kHz)/mJ	1.8
功率/W	0~100
光束质量	1.6



图 2 激光剥离老化层示意图

Fig.2 Schematic diagram of laser peeling aging layer

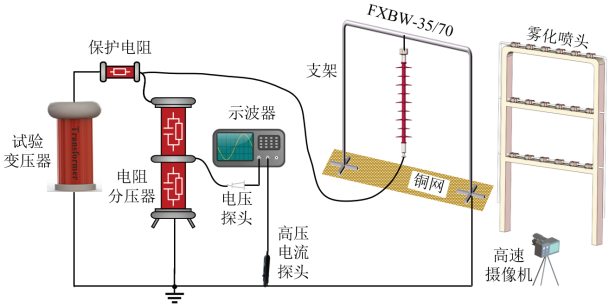


图 3 闪络试验接线图

Fig.3 Diagram of flashover test wiring

2）在本文研究的范围内，剥离 10 次与 20 次时，二者的 CA 变化曲线类似，其值均高于 140°。当剥离 10 次，对应的扫描速度为 4 000~6 000 mm/s

时，伞裙表面达到超疏水状态，此时剥离深度大约为 0.076~0.100 mm，近似认为老化层已经去除，伞裙内部的硅橡胶基体露出，与文献[7]试验测得的老化层厚度一致。

3）在图 5 中，剥离前 6 号绝缘子伞裙表面水滴互相融合呈扁平状的不规则分布，憎水性为 HC6 级。经激光剥离后，水滴近似呈球状均匀分布在伞裙表面，憎水性达到 HC1 级。而且，激光剥离伞裙老化层后表面污秽和龟裂明显减少，较剥离前平整。对于 1 号新绝缘子，在激光作用后表面憎水性也得到了提升，表明激光在提升硅橡胶憎水性方面具有普适性。

为探究剥离后样品表面的自清洁能力，采用石墨粉模拟灰尘平铺在样品表面。将水滴从样品较高一端距离表面 1 cm 处缓慢滴下，观察水滴滚落过程中样品表面石墨粉变化，结果如图 6 所示。由图 6 可知，单次水滴在样品表面滚落过程中将路径上的部分灰尘粘附并带走。同样的滚落过程重复 5 次后，滚动路径上的灰尘全部随水滴滚落，激光剥离后的表面展现出优异的自清洁效果。

2.2 脉冲激光剥离对伞裙表面微观形貌的影响

经脉冲激光剥离的硅橡胶绝缘子伞裙表面憎水性显著提高，甚至达到了超疏水状态。为探究激光剥离对伞裙表面微观形貌的影响，采用 SEM 对 6 号绝缘子剥离前后的表面进行了观测，结果如图 7(a)—(e)所示。由此可得以下结论：

1）与新绝缘子相比，6 号绝缘子因老化其表面积累了大量污垢并产生了龟裂。经激光剥离 1 次后，龟裂减少，并形成一级微米突起和二级纳米颗粒(见图 7(c))。其原因可以解释为：激光剥离过程中的高能脉冲使得伞裙表面材料气化，部分气化的熔融颗粒回落伞裙表面经再结晶后，在烧蚀的伞裙表面形成微纳米级的不规则突起。

2）随着剥离深度的增加，绝缘子表面的龟裂和污垢显著减少。当剥离 10 次后(约 0.1 mm)，龟裂已完全消失，如图 7(e)所示。对比图 7(a)发现此时的硅橡胶表面与新绝缘子表面已基本一致，可认为伞裙表面老化层已去除。硅橡胶表层龟裂清除可有效防止伞裙因振动时应力集中而造成的破裂现象[19]。

3）在图 7(a)和图 7(e)中，1 号绝缘子激光作用后和剥离 10 次后绝缘子伞裙表面均具备丰富的微/纳米颗粒，充分阻挡了水滴的浸润。此时空气被夹在液滴和谷底之间，形成固/液/气复合接触界面。

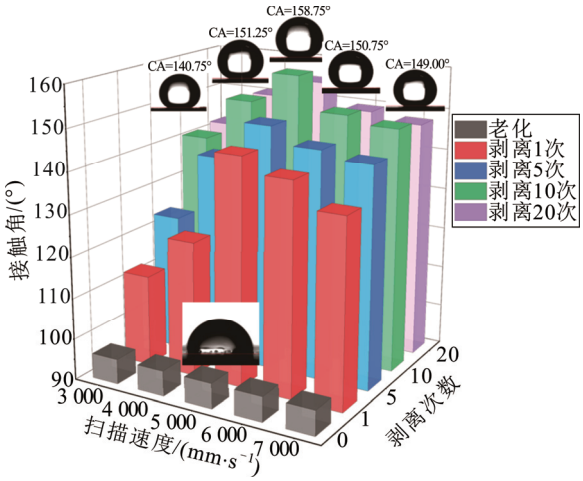
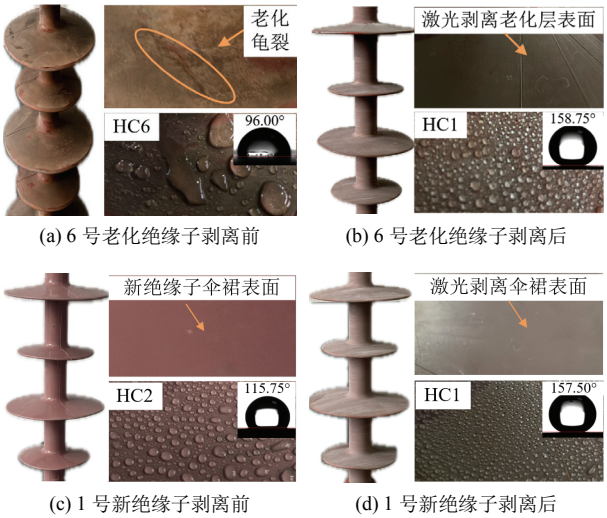


图 4 接触角随扫描速度和剥离次数的变化规律

Fig.4 Variation law of CA with scanning speed and peeling times

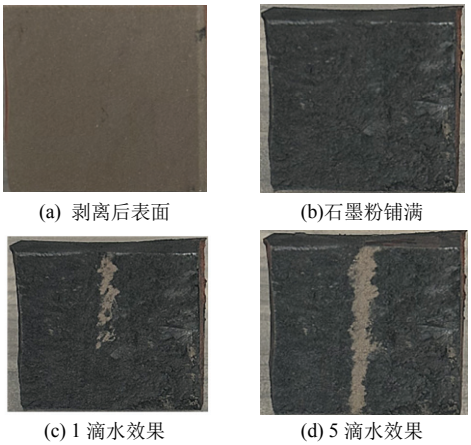


(a) 6 号老化绝缘子剥离前 (b) 6 号老化绝缘子剥离后

(c) 1 号新绝缘子剥离前 (d) 1 号新绝缘子剥离后

图 5 激光剥离前后绝缘子形貌及憎水特性

Fig.5 Morphology and hydrophobic performance of the insulator before and after laser ablation

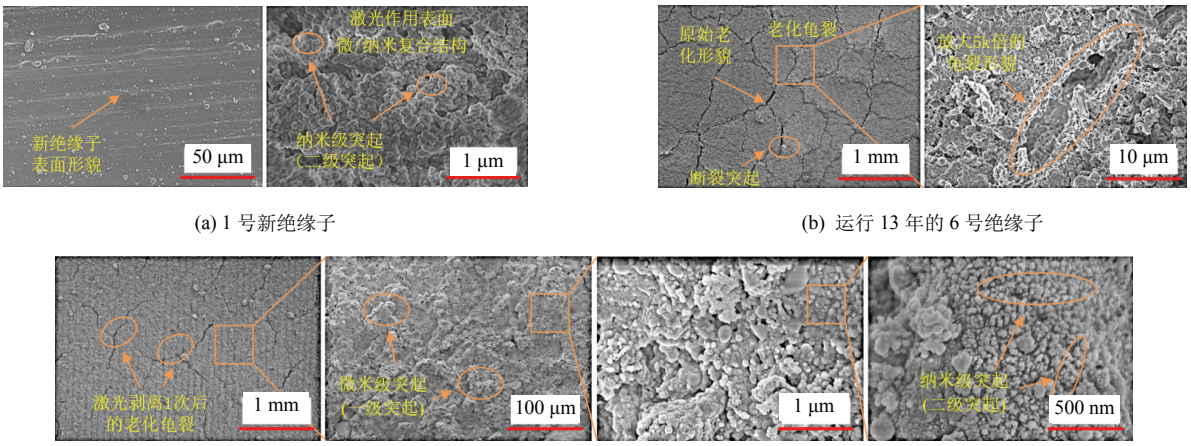


(a) 剥离后表面 (b)石墨粉铺满

(c) 1 滴水效果 (d) 5 滴水效果

图 6 剥离后伞裙表面的自清洁性能测试

Fig.6 Self-cleaning performance of the shed surface after laser ablation



(a) 1 号新绝缘子

(b) 运行 13 年的 6 号绝缘子

(c) 激光剥离 1 次

(d) 激光剥离 5 次

(e) 激光剥离 10 次

图 7 激光剥离前后绝缘子伞裙表面的微观形貌

Fig.7 Microcosmic appearance of insulator shed surface before and after laser ablation

而且，表面凹陷、孔洞等结构可以储存更多的空气，通过形成气体缓冲层，有效地减少水滴与硅橡胶表面的接触面积，使其表面处于超疏水状态，这也是激光剥离后伞裙表面达到超疏水的一个重要原因。

2.3 脉冲激光剥离对伞裙表面官能团和元素含量的影响

2.3.1 脉冲激光剥离对官能团的影响

为分析脉冲激光与硅橡胶老化层间的作用机理，采用 FTIR 对新绝缘子和激光剥离前后 6 号绝缘子伞裙表面官能团进行测试，结果如图 8 所示。由图 8 可知：

1）对于老化绝缘子伞裙表面，由于污秽和老化杂质的影响，表层存在各种官能团的碎片，吸收峰较宽，化学性质不稳定。随着剥离次数的增加，吸收峰逐渐变得尖锐，分子自由度降低，分子间结合力增强，表明脉冲激光剥离后伞裙表面的化学性质相比于老化表面更稳定。

2）文献[20]研究表明，Si—O—Si 的吸收峰和 Si—$(CH)_3$ 的吸收峰面积越小，硅橡胶的老化程度越严重。在图 8(b)与图 8(c)中，硅橡胶分子主链 Si—O—Si 的吸收峰高度由新绝缘子的 0.637 降至老化绝缘子的 0.489、侧链 Si—$(CH)_3$ 由 0.649 降至 0.181。剥离 10 次后，两者的吸收峰高度分别为 0.587 和 0.342，与新绝缘子相差不大。这是因为老化使得伞裙内部硅橡胶交联体系发生变化，分子主链断裂，侧链降解。随着剥离次数的增加，老化层去除，硅橡胶基体逐渐显露出来，Si—O—Si 和 Si—$(CH)_3$ 的吸收峰高度逐渐靠近新硅橡胶。

3）激光剥离 10 次后，老化层已经去除，此时可近似等效为新绝缘子伞裙，并在表面形成了微/纳米颗粒层。在图 8(d)与图 8(e)中，对比新绝缘子与剥离后绝缘子发现，亲水性羟基基团(—OH)的吸收峰高度由新绝缘子的 0.381 降至剥离后绝缘子的 0.012，含量减少，有利于绝缘子表面憎水性的提升，是使表面达到超疏水状态的另一个重要原因。而疏水性甲基基团(—CH_3)的吸收峰高度由新绝缘子的 0.091 降至剥离后绝缘子的 0.066，含量变化较小，对憎水性影响小。

2.3.2 脉冲激光剥离对元素含量的影响

为探究激光剥离过程对元素含量(元素强度与元素含量呈正相关)的影响，采用 EDS 对 1 号和 6 号绝缘子伞裙剥离前后表面的化学元素组成与强度进行了测试，结果如图 9 所示。

由图 9 可知：

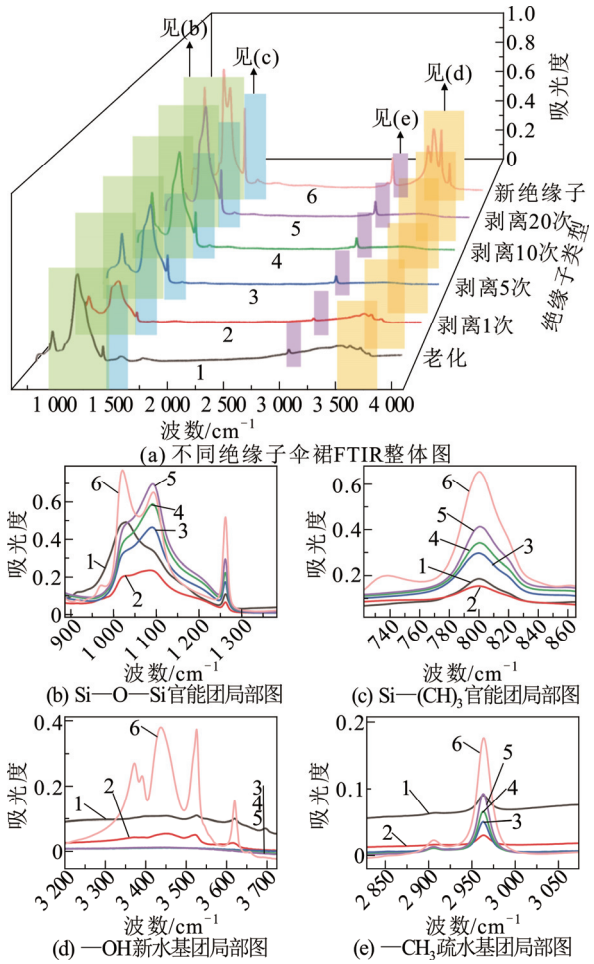


图 8 激光剥离前后表面的官能团对比

Fig.8 Comparison of functional groups on the surface before and after laser ablation

1）激光剥离前后样品表面元素种类没变，即没有引入新的元素，也没有导致原有元素消失，但元素含量发生了变化。

2）激光剥离过程中，外界的游离碳在脉冲激光作用下发生氧化反应生成具有疏水性的脂肪酸物质，有效地改善了表面憎水性[21]。氧元素含量提高，说明剥离过程中产生了热烧蚀现象，硅橡胶与空气中的氧气结合而发生氧化。

3）C、O 元素在激光剥离过程中易发生反应，而 Si 元素较为稳定。Si 元素主要存在于硅橡胶分子主链，而老化层因含污秽等杂质覆盖在硅橡胶基体上影响了 Si 元素含量测试，因此用其含量变化表征剥离老化层程度。当剥离 10 次后，Si 元素的含量明显上升，这是因为硅橡胶基体已经显露出来，进一步验证了激光剥离老化层的可行性。

2.4 脉冲激光剥离老化层机制

由 SEM、FTIR 和 EDS 测试分析可知，脉冲激光剥离老化层过程涉及老化层对激光的吸收和热传导，是硅橡胶材料内部温度场和热应力场共同作用的结果。

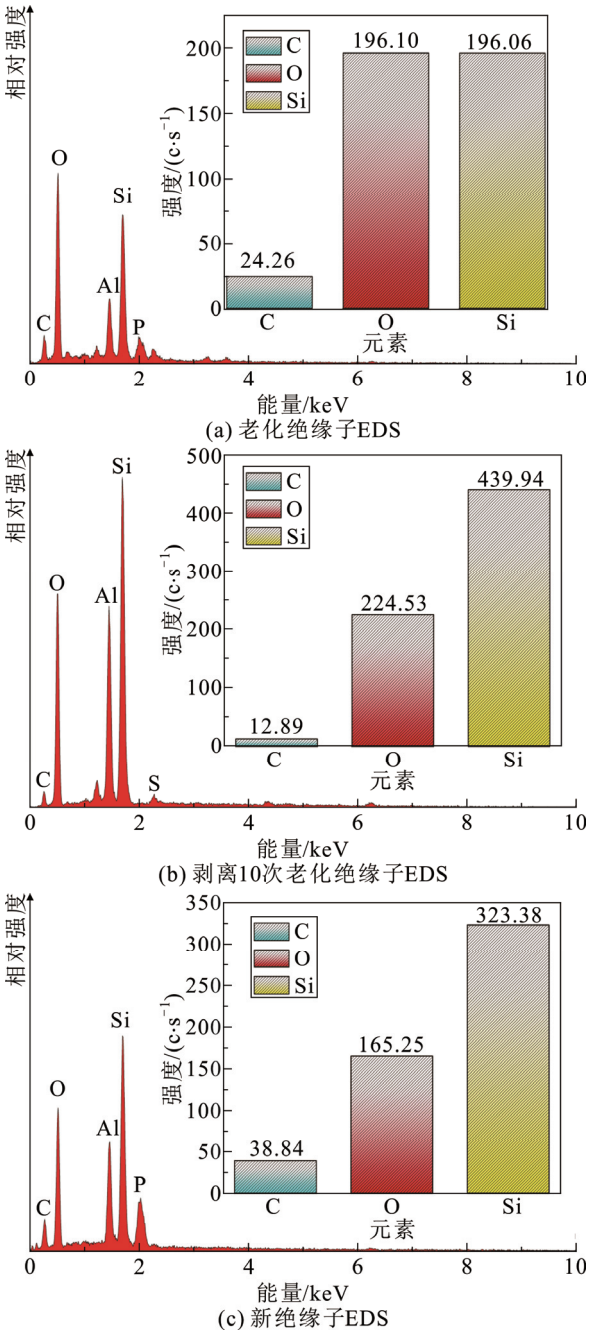


图 9 激光剥离前后绝缘子伞裙表面的 EDS 图谱

Fig.9 EDS spectra of insulator shed surface before and after laser ablation

激光辐照硅橡胶材料时，激光作为外部热源把能量传递给材料，硅橡胶由表及里沿深度方向分为吸收层、热影响区和基体，激光与硅橡胶作用示意图如图 10(a)所示。激光烧蚀去除硅橡胶老化层的温度场分布为瞬态热传导问题，其控制方程为：

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t}=k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+W(x,y,z,t) \tag{1}$$

式中：k 为材料导热系数；$\rho(T)$为密度；$c(T)$为比热容；$T(x, y, z, t)$为温度；$W(x, y, z, t)$为材料内部热源。当激光入射到无机硅氧层上时，硅氧层吸收激光，温度升高，随后经热传递到断链层，此时硅氧层和断链层同时产生了沿 Z 轴方向的热应力。该力作用于硅橡胶基体便产生反方向的作用力，沿 Z 轴正方向。基体吸收热量后，也会产生一个沿 Z 轴负方向的热应力，如图 10(b)所示。

Z 轴方向热膨胀的长度为：

$$\Delta l = l\gamma\Delta T \tag{2}$$

式中：γ 为该物体的线膨胀系数；l 为物体的初始长度；ΔT 为温度的变化量。

热膨胀产生了应变，并同时产生了应力。硅氧层、断链层和硅橡胶基体本身均为弹性体，对于这类物体，单位面积上的应力 σ 为：

$$\sigma = Y\varepsilon = Y\Delta l / l \tag{3}$$

式中：Y 为材料的杨氏模量；ε 为应变。

硅氧层、断链层和硅橡胶基体的热应力可分别表示为：

$$\begin{cases}\sigma_{\mathrm{a}} = Y_{\mathrm{a}}\varepsilon_{\mathrm{a}} = Y_{\mathrm{a}}\gamma_{\mathrm{a}}\Delta T_{\mathrm{a}}\\ \sigma_{\mathrm{b}} = Y_{\mathrm{b}}\varepsilon_{\mathrm{b}} = Y_{\mathrm{b}}\gamma_{\mathrm{b}}\Delta T_{\mathrm{b}}\\ \sigma_{\mathrm{s}} = Y_{\mathrm{s}}\varepsilon_{\mathrm{s}} = Y_{\mathrm{s}}\gamma_{\mathrm{s}}\Delta T_{\mathrm{s}}\end{cases} \tag{4}$$

式中：下标 a 代表硅氧层；下标 b 代表断链层；下标 s 代表硅橡胶基体。

在脉冲激光辐照硅橡胶伞裙表面时，由于激光的峰值功率较高，老化层温度远高于硅橡胶基体，导致热应力分布不均匀，进而促使老化层剥离。

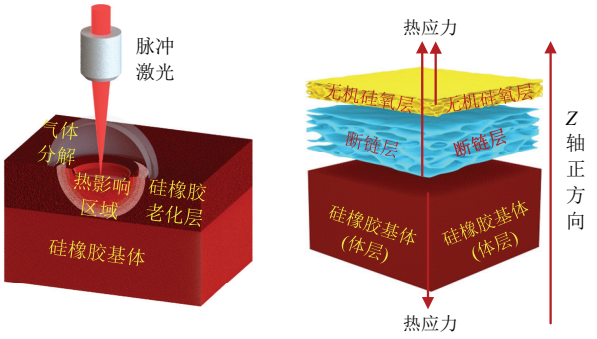
3 脉冲激光剥离对绝缘子电气特性的影响

为进一步探究脉冲激光剥离老化层对绝缘子电气特性的影响，本文对比分析了未剥离以及剥离 10 次后 5 串硅橡胶绝缘子的干闪和湿闪电压，结果如图 11 所示。由图 11 可知：

1）经激光剥离后所有绝缘子的干闪和湿闪电压均有大幅度提升。对比剥离前，激光剥离后 5 串绝缘子的平均干闪电压和湿闪电压分别提高了 22.69%和 17.39%。

2）以试验测得的新绝缘子的沿面干闪电压 215.5 kV 和湿闪电压 168.4 kV 作为参考，6 号绝缘子在激光剥离后干闪电压达到 245.9 kV，较新绝缘子提高了 14.11%。类似地，剥离后湿闪电压达到 149.2 kV，与新绝缘子湿闪电压相差不大。

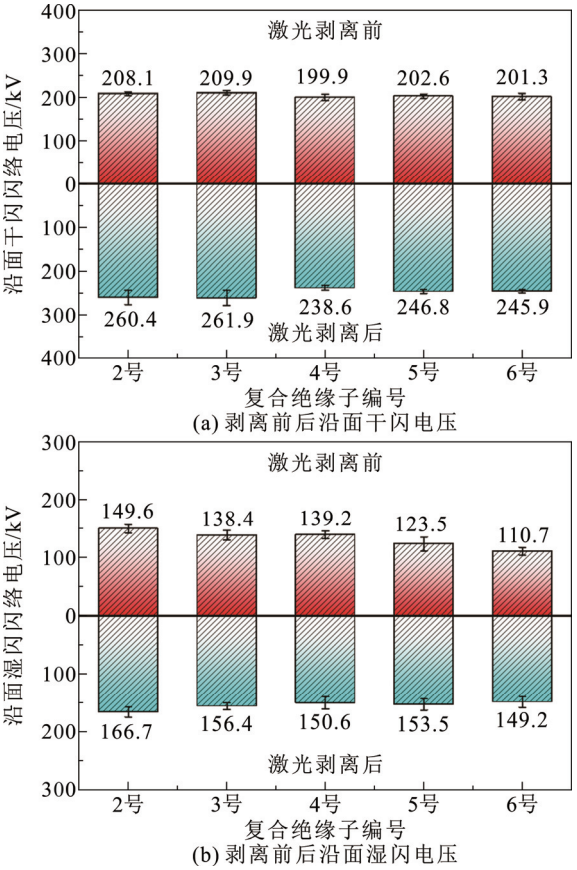
3）激光剥离前，对比所有绝缘子的干闪电压发现，老化现象对闪络电压的影响较小，最大差值为 10.0 kV。而湿闪电压差值较大，达到 50.9 kV。激光剥离后，湿闪电压的最大差值缩小至 17.5 kV，表明激光剥离老化层不但能有效提升绝缘子的干闪/湿闪电压，且具有较好的一致性。



(a) 温度场分布 (b) 热应力

图 10 脉冲激光剥离老化层机制

Fig.10 Mechanism of pulse laser ablation of aging layer



(a) 剥离前后沿面干闪电压

(b) 剥离前后沿面湿闪电压

图 11 激光剥离前后绝缘子沿面干闪/湿闪闪络电压变化

Fig.11 Change in dry/wet flashover voltage along the insulation surface before and after laser ablation

4）为探究脉冲激光对新绝缘子的效果，采用同样的激光参数对其表面进行剥离，并对比剥离前后的干/湿闪电压。结果表明，新绝缘子剥离后干闪电压和湿闪电压分别提升了 15.34%和 10.17%，提升效果不如剥离具有老化层的硅橡胶绝缘子显著。

为探究激光剥离对绝缘子闪络过程的影响，采用高速摄像机记录了 6 号绝缘子老化层剥离前后干闪和湿闪放电发展过程，结果如图 12 和图 13 所示。

由图 12 和图 13 可知：

1）激光剥离前，对比图 12(a)和图 13(a)发现，绝缘子湿闪时由于表面的水滴相互融合形成水膜溶解了表面污秽，水膜几乎贯通了高低压两端，导致电弧沿伞裙-护套表面发展，形成沿面闪络。

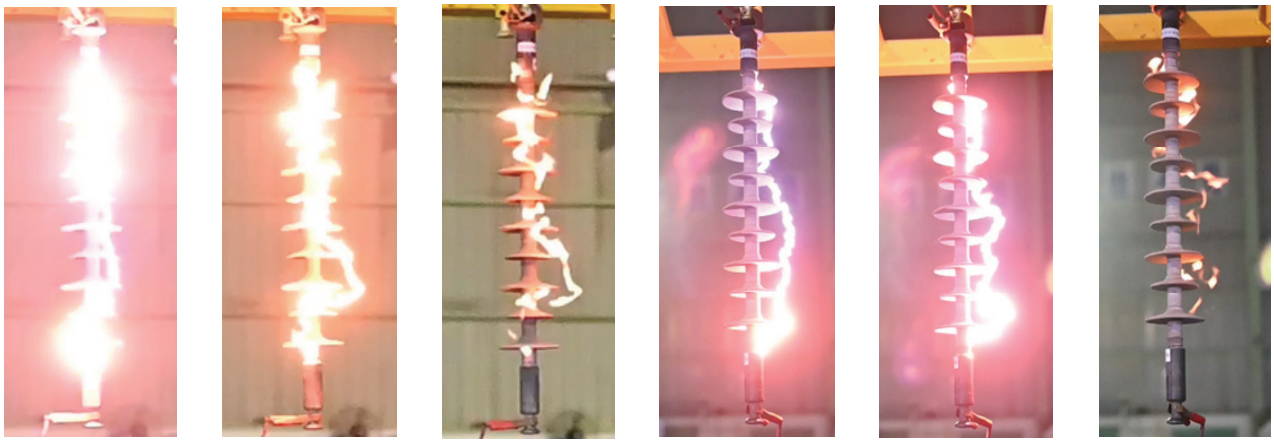
2）激光剥离后，绝缘子干闪/湿闪时，电弧的发展路径较剥离前发生了一定的改变。电弧不再沿着伞裙-护套的表面发展，而是更倾向于沿着伞裙边缘的空气间隙发展，导致闪络电压高于沿面闪络的情况，干闪和湿闪电压分别提高了 22.16%和 34.78%。

为进一步探究激光剥离后闪络电压提升的原因，从微观层面对电弧发展过程中电子迁移进行分析，如图 14 所示。由图 14 可知：

1）由前文 SEM 可知，激光剥离老化层后，伞裙表面出现大量的微/纳米结构，在电弧发展过程中自由电子可能因陷入微/纳米结构而被束缚，表面电荷不易聚集，大大降低参与放电的二次电子的数目。

2）微纳米复合结构间的凹陷、孔洞等引入了更多的深陷阱，被捕获的电荷会形成空间电荷层，削弱了与电极之间的电场。

3）微/纳米结构使得伞裙表面在微观上凹凸不平，载流子在沿表面输运过程中迁移距离增加，增大了放电形成的难度，使沿面闪络电压升高。



(a) 激光剥离前　　(b) 激光剥离后

图 12　激光剥离前后 6 号绝缘子沿面干闪过程

Fig.12　Dry flashover process of No.6 insulator before and after laser ablation



(a) 激光剥离前　　(b) 激光剥离后

图 13　激光剥离前后 6 号绝缘子沿面湿闪过程

Fig.13　Wet flashover process of No.6 insulator before and after laser ablation

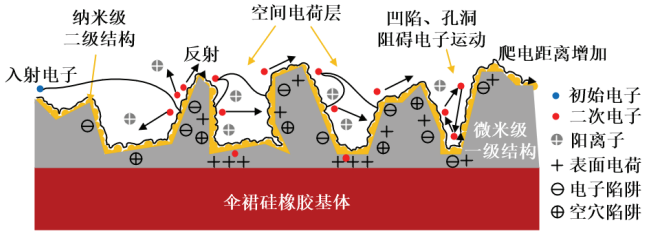


图 14 微/纳米结构阻碍表面电子迁移示意图

Fig.14 Schematic of micro/nanostructures hindering surface electron migration

4 结论

1）脉冲激光连续剥离硅橡胶绝缘子伞裙表面老化层 10 次即剥离厚度为 0.10 mm 后，近似认为老化层已经去除，剥离后表面的憎水性由 HC6 级提升至 HC1 级，同时形成超疏水表面，CA 最高可达 158.75°。

2）剥离后表面的 CA 变化是由微/纳米复合结构、亲水性基团(—OH)与疏水性基团(—CH_3)3 种因素协同作用的结果。微纳米颗粒能有效减少液体与硅橡胶表面的接触面积；亲水性基团—OH 吸收峰高度下降程度远远大于疏水性基团—CH_3，因此—OH 含量的降低占据主导地位，有利于提高硅橡胶表面的 CA。

3）脉冲激光剥离过程是材料内部温度场和热应力场共同作用的结果。硅橡胶伞裙老化层经剥离后表面发生了物理化学方面的改性。在物理方面，伞裙表面污秽和龟裂去除的同时形成了大量的微/纳米颗粒；在化学方面，随着硅橡胶基体的露出，主链 Si—O—Si 和侧链 Si—$(CH)_3$ 的吸收峰高度接近新硅橡胶。

4）经激光剥离后，绝缘子的沿面干闪/湿闪电压提升，与微/纳米颗粒增加爬电距离等原因有关。以运行年限为 13 年的绝缘子为例，激光剥离后干闪电压和湿闪电压较剥离前分别提高了 22.16%和 34.78%。

5）激光剥离技术相比更换新绝缘子更具经济性，而且适用于现场处理难以拆卸的绝缘子，对于延长绝缘子使用寿命，降低运维成本具有重要意义。这一技术可推广应用于其他硅橡胶外绝缘材料。

参考文献 References

[1] AKBARI M, SHAYEGANI-AKMAL A A. Experimental investigation on the accelerated aging of silicone rubber insulators based on thermal stress[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 149: 109049.

[2] 谢从珍，苟 彬，李 煜，等. 界面缺陷加速高温硫化硅橡胶在酸热环境下的老化开裂研究[J]. 高电压技术，2023，49(5)：1907-1916.
XIE Congzhen, GOU Bin, LI Yu, et al. Research on aging and cracking of high temperature vulcanized silicone rubber accelerated by interfacial defects in acid-heat environment[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1907-1916.

[3] 苏 南，杨晓冉. 电网加速构建新型电力系统[N]. 中国能源报，2023-01-16(001).
SU Nan, YANG Xiaoran. Power grid accelerates the construction of new power system[N]. China Energy News, 2023-01-16(001).

[4] LIU Z Y, HU Y Y, JIANG X L, et al. Influence of positive DC electric field on rime icing on the insulator and its experimental verification in the natural environment[J]. High Voltage, 2023, 8(5): 954-966.

[5] 胡玉耀，刘宗源，李 欣，等. 正极性直流电场对绝缘子雾凇覆冰的影响机理及覆冰试验验证[J]. 高电压技术，2024，50(2)：793-804.
HU Yuyao, LIU Zongyuan, LI Xin, et al. Influence mechanism of positive DC electric field on rime ice accretion on the insulators and its experimental verification[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 793-804.

[6] 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 vulcanzied silicone rubber using laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2774-2782.

[7] 彭向阳，林宏升，黄 振，等. 应用显微红外法的硅橡胶复合绝缘子伞裙老化深度研究[J]. 电网技术，2017，41(4)：1350-1356.
PENG Xiangyang, LIN Hongsheng, HUANG Zhen, et al. An infrared microspectroscopy method for determining degradation depth of silicone rubber composite insulator shed[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1350-1356.

[8] 陈 原，薛文祥，刘云鹏，等. 伞套硅橡胶含量对复合绝缘子运行寿命的影响[J]. 高电压技术，2022，48(2)：736-752.
CHEN Yuan, XUE Wenxiang, LIU Yunpeng, et al. Influence of silicone rubber content of shed and sheath on composite insulator lifespan[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 736-752.

[9] 赵树森，何宏智，韩世飞，等. 透明硬脆材料激光剥离关键问题研究(特邀)[J]. 红外与激光工程，2024，53(1)：20230487.
ZHAO Shusen, HE Hongzhi, HAN Shifei, et al. Research on key issues of laser splitting of transparent hard and brittle materials (invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(1): 20230487.

[10] 季凌飞，马 瑞，张熙民，等. 激光剥离技术在柔性电子制造领域的应用研究进展[J]. 中国激光，2020，47(1)：9-18.
JI Lingfei, MA Rui, ZHANG Ximin, et al. Application of laser lift-off technique in flexible electronics manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 9-18.

[11] 张天刚，黄嘉浩，侯晓云，等. 激光清洗铝合金表面复合漆层作用机制[J]. 航空学报，2023，44(11)：427656.
ZHANG Tiangang, HUANG Jiahao, HOU Xiaoyun, et al. Mechanism for composite paint layer on aluminum alloy surface cleaned by laser[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(11): 427656.

[12] 杨文锋，李 庆，李绍龙，等. 激光除漆对铝合金飞机蒙皮微观组织的影响[J]. 表面技术，2024，53(11)：239-247.
YANG Wenfeng, LI Qing, LI Shaolong, et al. Influence of laser paint removal on microstructure of aluminum alloy aircraft skin[J]. Surface Technology, 2024, 53(11): 239-247.

[13] TIAN Z, LEI Z L, CHEN Y B, et al. Inhibition effectiveness of laser-cleaned nanostructured aluminum alloys to sulfate-reducing

bacteria based on superwetting and ultraslippery surfaces[J]. ACS Applied Bio Materials, 2020, 3(9): 6131-6144.

[14] WANG X L, WANG H, XU X R, et al. A new method to remove the aging RTV coatings on glass insulators[C]//2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD). Montpellier, France: IEEE, 2016: 709-711.

[15] 许巧云，田 骥，吴昌盛，等. 1 064 nm 激光清洗玻璃绝缘子表面微米级 SiO_2 污秽[J]. 高电压技术，2022，48(3)：883-891.
XU Qiaoyun, TIAN Ji, WU Changsheng, et al. Cleaning of micrometer SiO_2 contamination on glass insulator surface by 1 064 nm laser[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 883-891.

[16] 袁 田，龚宇佳，张 锦，等. 激光清除硅橡胶伞裙污秽及老化表层技术研究[J]. 电网技术，2021，45(7)：2896-2903.
YUAN Tian, GONG Yujia, ZHANG Jin, et al. Technology of removing pollution and aging surface of silicone rubber shed[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2896-2903.

[17] 张世泽，陶霰韬，龚 慧，等. 高压交联聚乙烯电缆绝缘屏蔽层的激光剥离方法及机制研究[J]. 中国电机工程学报，2022，42(11)：4238-4246.
ZHANG Shize, TAO Xiantao, GONG Hui, et al. Study on method and mechanism of laser stripping insulation shielding of high voltage XLPE cable[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 4238-4246.

[18] 关志成，刘瑛岩，周远翔，等. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京：清华大学出版社，2006：136-161.
GUAN Zhicheng, LIU Yingyan, ZHOU Yuanxiang, et al. Insulators and external insulation of power transmission and substation equipment[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2006: 136-161.

[19] 袁 田，应 斯，向孟宇，等. 玻璃绝缘子裂缝的激光检测方法[J]. 电网技术，2020，44(8)：3156-3163.
YUAN Tian, YING Si, XIANG Mengyu, et al. Research on laser detection method of glass insulator crack[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3156-3163.

[20] 谢从珍. 硅橡胶复合绝缘子伞裙优化研究[D]. 广州：华南理工大学，2010.
XIE Congzhen. The shed optimization on silicone rubber composite insulators[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2010.

[21] 汪 幸. 纳秒激光诱导硅橡胶超疏水表面及其抗冰冻性能研究[D]. 武汉：湖北工业大学，2018.
WANG Xing. Study on superhydrophobic surface of silicone rubber induced by nanosecond laser and analysis of anti-icing property[D]. Wuhan, China: Hubei University of Technology, 2018.



刘方斌
2000—，男，硕士
主要研究方向为高电压与绝缘技术
E-mail: fangbinliu@outlook.com

LIU Fangbin



胡玉耀(通信作者)
1989—，男，博士，副教授，硕导
主要从事极端环境下输电线路外绝缘状态评估的研究工作
E-mail: hyuyao@sdut.edu.cn

HU Yuyao
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期 2024-05-28 修回日期 2024-11-20 编辑 曹昭君