

# 激光清洗对铝导体绝缘涂层附着力的影响研究

袁 田, 王昱晴, 龚宇佳, 童 悦, 张 锦  
(中国电力科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:**为解决输变电设备导体绝缘化时铝导线表面附着力较小问题,本文详细阐述导体绝缘化涂层的附着机理,对激光清洗实验理论及方法展开分析。通过实验研究激光清洗次数对粗糙度的影响,并对测量附着力的拉开法和剪切法进行对比分析。结果表明:多次清洗后金属表面粗糙度 $R_a$ 明显降低,且第1次清洗效果与脉冲激光器单位区域覆盖能量成正比,但在 $R_a$ 达到 $2.5\ \mu\text{m}$ 时,清洗效果开始减缓;粗糙度降低可有效提高绝缘涂层表面的附着力,当环氧树脂在铝板表面粗糙度 $R_a$ 达到 $4.5\ \mu\text{m}$ ,硅橡胶在铝板表面粗糙度 $R_a$ 达到 $4.0\ \mu\text{m}$ 时,附着力开始出现再次下降。

**关键词:**附着力;激光清洗;膜层屈曲;绝缘涂层;金属导体

中图分类号:TM215 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)04-0103-06

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.04.015

## Effect of Laser Cleaning on Adhesion of Aluminum Conductor for Insulation Coating

YUAN Tian, WANG Yuqing, GONG Yujia, TONG Yue, ZHANG Jin  
(China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of small adhesion on the surface of aluminum wire during insulating for conductor in transmission and transformation equipment, the adhesion mechanism of conductor insulation coating was described in detail, and the experimental theory and method of laser cleaning were analyzed. The effect of laser cleaning times on the roughness was studied by experiments, and then pull method and shear method for measuring adhesion were compared and analyzed. The results show that the surface roughness  $R_a$  decreases significantly after cleaning for many times, and the first cleaning efficiency is proportional to the coverage energy per pulse area. However, when  $R_a$  reaches to  $2.5\ \mu\text{m}$ , the cleaning effect begins to slow down. The reduction of roughness can effectively improve the adhesion of the insulating coating surface, the adhesion of epoxy resin and silicone rubber on aluminum plate begins to decrease again when the surface roughness  $R_a$  reaches to  $4.5\ \mu\text{m}$  and  $4.0\ \mu\text{m}$ , respectively.

**Key words:** adhesion; laser cleaning; film buckling; insulating coating; metal conductor

## 0 引言

目前输变电设备中大量的导体用于输电,主要包含导线、母排、接头、引线等。近些年架空线路和电站绝缘事故频发,电力检修部门采用导体绝缘化改造来降低运行导体的故障,常见的做法是在运行导体上涂覆绝缘涂层<sup>[1-3]</sup>。绝缘涂层的涂料具有优

良的电绝缘性、热性能、力学性能和化学性能,可在导体表面形成一层具有较高体积电阻率、能承受较强电场而不被击穿的涂层。然而大部分导体为金属材料,在长期运行中导体表面会存在大量的附着物<sup>[4-7]</sup>,这些附着物会导致导体散热不均匀,严重影响绝缘涂层与导体的附着力,造成涂层剪切值小于 $1\ \text{MPa}$ ,因此在导体绝缘化之前需将导体表面进行清洗,避免导体表面附着物引起附着力下降造成故障。目前主要是利用钢刷清洗表面导体,该种清洗方式与刷子形状存在较大的关系,通常情况下,该种清洗方式能较容易除去上下轴线的污秽,而对于

收稿日期:2021-08-27 修回日期:2021-09-02

基金项目:中国电力科学研究院创新基金(SZ83-19-005)

作者简介:袁田(1980-),男(汉族),吉林长春人,高级工程师,主要从事高电压绝缘技术方向的研究。

导线表面,由于结构受力特征两侧污秽无法清除干净,而且会引起表面粗糙度极不均匀<sup>[8-9]</sup>。

激光清洗是一种有效的非接触式气化清除污秽和金属氧化层的方式,通过高能激光束照射材料表面,利用污秽物和氧化层的高激光吸收系数,使表面的污物、锈斑或涂层发生瞬间蒸发或剥离<sup>[10-11]</sup>。由于激光光斑的高斯性特征,清洗深度可以精确到毫米或微米,基体在激光清洗时几乎不会产生大的损伤,反而可以在一定程度上降低金属表面的粗糙度<sup>[12]</sup>。激光清洗后表面可以形成规则的形貌,粗糙度呈现规律性分布,该表面经测试可有效使涂料与铝材表面均匀地粘接,在受到剥离剪切力时,不易发生剥离剪切力集中,抗剥离和耐用性更佳。

本文利用 1 064 nm 激光清洗设备对铝材料表面的污秽物和氧化物进行清洗,研究其表面粗糙程度以及附着力的变化,并通过拉开法和剪切法对附着力的影响进行分析,以期激光清洗在提高绝缘涂层附着力方面提供参考。

## 1 导体绝缘化涂层的附着机理

绝缘化涂层是导体表面绝缘成膜附着的结构,由于导体主要成分是铝、铜和铁等金属材料,铝材料暴露在自然条件下,其表面容易发生氧化并吸收水分,在较低的温度下,铝材料表面形成氢氧化铝膜层( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,即 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ),也是自然氧化膜的主要成分,膜层厚度大约在 $0.01 \sim 0.10 \mu\text{m}$ ,故本文选择铝导体为研究对象,对铝板表面进行激光清洗。

在铝导体绝缘化过程中,导体在长期运行中表面会出现氧化、污秽物附着等问题,严重降低导体涂层附着力的水平。其中,通常将附着力考虑成化学键作用,主要是指成膜物中所含有的一些极性基团与基材表面所含有的羟基或其他基团进行化学反应形成了离子键、共价键或氢键,增大了表面与涂层的结合力。例如,清理过的导体表面涂层剪切强度可达到 3 MPa,而不清理的表面涂层剪切强度在 1 MPa 左右,表面粉尘附着力小于 1 MPa。因此,在绝缘层涂覆或者包装前通过其他手段将导体表面的氧化层、污秽物、表面不规则损伤等逐一去除,可以增加导体的运行寿命,同时也可以降低对绝缘层附着力的影响。本文采用快干环氧胶黏剂以及常温硫化硅橡胶进行涂覆,用来检测激光清洗后表面附着力的变化情况。

## 2 激光清洗平台

激光清洗试验平台由清洗平台、激光清洗头、电脑控制端及烟尘净化器组成,如图 1 所示。设备型号为 SCL-50,属于单模输出,最大功率 $0 \sim 100 \text{ W}$ 可调,频率 $5 \sim 200 \text{ kHz}$ 可调,脉冲宽度为 100 ns,中心波长为 1 064 nm。激光扫描线长 $5 \sim 100 \text{ mm}$ 可调,激光束腰光斑直径为 $70 \sim 110 \mu\text{m}$ ,其准直距离为 $3.60 \sim 8.97 \text{ mm}$ ,经过准直镜后,其光斑半径为 6.5 mm。激光器输出端场镜的型号为 F160,即焦距约为 160 mm。场镜输出的光斑聚焦半径为 $0.07 \sim 0.12 \text{ mm}$ ,光斑输出为一维振镜双向直线填充。激光清洗头的工作距离为 $(18 \pm 0.5) \text{ cm}$ <sup>[13]</sup>,其关联的两个参数分别为激光光斑的能量特性和一维扫描特性。

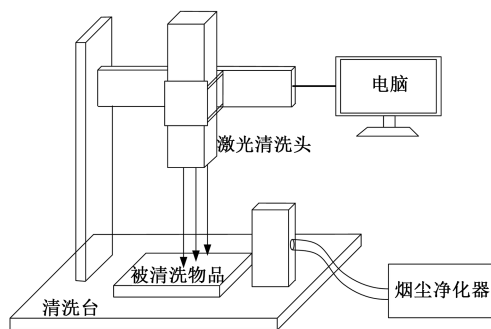


图1 激光清洗试验平台

Fig.1 Laser cleaning test platform

### 2.1 激光光斑的能量特性

在理想的情况下,激光振幅服从高斯光束的模型,如图 2 所示。其中  $z$  轴为光轴传播轴,也是双曲线的对称轴, $\omega_0$  为光束的束腰半径,也是平面波的投影半径(当 $x=0, y=0$ 时),此时通常称该点为高斯束腰<sup>[10-11]</sup>,清洗光斑尽量选择靠近该位置。

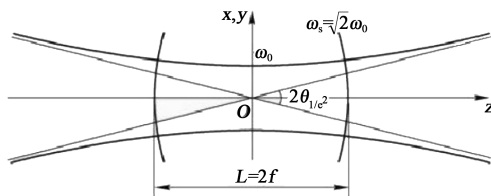


图2 激光束的高斯性示意图

Fig.2 Gaussian diagram of laser beam

根据振幅在  $z$  轴上的分布,通常情况下激光输出功率用式(1)表示。

$$E = E_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_2(z)}\right) \quad (1)$$

式(1)中: $E_0$ 为激光器的额定功率; $E$ 为在不同球面波相位的实际功率; $\omega(z)$ 为球面波在平面上的投影光斑半径; $r$ 为球面波距离原点的半径距离;一般规定,在垂直 $z$ 轴(光轴)投影光斑直径 $\omega_s=\sqrt{2}\omega_0$ 时,其激光束在图2中的准直距离 $L=2f$ 长度内高斯光束近似认为是平行的。

式(1)说明,光斑静态激光清洗的效果主要与镜面和清洗点的距离有关,距离过远或过近,会导致能量密度呈非线性减小。由于导线是柔性的,为了保证清洗的状态,其清洗的距离一定要保持稳定的焦距。

### 2.2 光斑一维移动的特征参数与清洗机制

导线清洗面为曲面,铝导线直径为30 mm,激光光斑一维振动行走能量的分布特征如图3所示<sup>[3]</sup>,其中纵向坐标 $z$ 为能量叠加参数。从图3可以看出,在一维清洗过程中,能量叠加较重的地方是两侧光斑移动方向出现变化的地方。

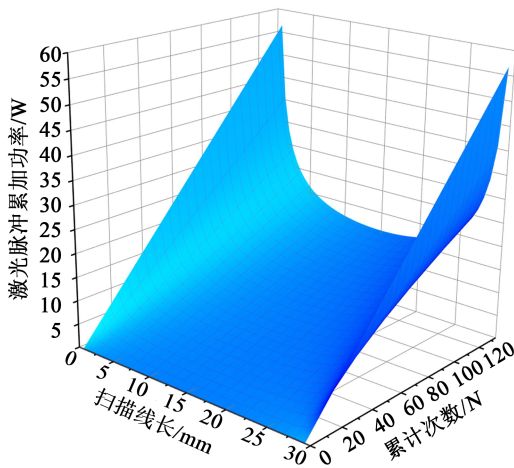


图3 一维清洗过程中能量叠加示意图(平面)

Fig.3 Schematic diagram of energy superposition in one-dimensional cleaning process (plane)

因为导线平面是弧状,两侧要低于中间,但激光清洗能量集中于辐射面,两端相对离焦较远,能量极小,可忽略不计,所以清洗过程可看作恒定的激光功率作用于铝导线表面。

在激光清洗的过程中,激光光斑尺寸相对于铝合金平板尺寸较小,可将脉冲激光照射过程看作点热源对半无限大物体进行加热,其温度模型如式(2)所示<sup>[4]</sup>。

$$\Delta T = \frac{2AE\sqrt{\lambda}}{K\sqrt{\pi t_1}} \quad (2)$$

式(2)中: $\Delta T$ 为涂层表面的温升; $A$ 为膜层的光吸收

系数,与膜层表面的颜色和粗糙度有关; $E$ 为激光的亮度,也是功率密度; $K$ 为传热系数,与涂层的厚度有关; $\lambda$ 为导热系数; $t_1$ 为激光的脉宽。

铝基体本身光吸收系数较小,表面粗糙度也很低,导致大部分激光被反射,在表面膜层和污秽物脱离干净后,缺少中间层激光吸收辅助,铝基体激光吸收系数很小,导致表面粗糙度 $R_a$ 下降效果明显放缓。

## 3 激光清洗铝导体绝缘涂层实验

### 3.1 粗糙度特性

为了研究激光清洗对绝缘层与金属附着力的影响,根据导线表面为铝绞丝,选用了不同老化程度的铝板和铝条进行实验。选择氧化严重的金属铝板,在其表面按照区域分别进行1~7次清洗,如图4所示。激光清洗功率为100 W,脉冲频率为200 kHz。考虑到导线清洗的效率需求,设计了不同的行走速度,其速度为4~33 mm/s。

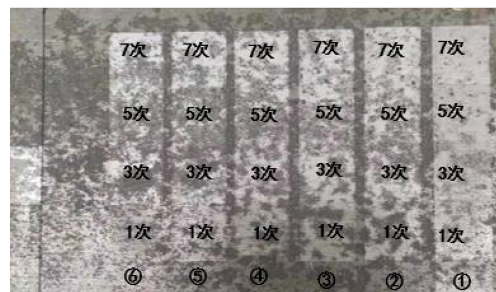


图4 激光清洗的铝板标记

Fig.4 Laser cleaned aluminum plate marking

铝板表面原始粗糙度按照规定进行测量,测量部位分别为测量区域的中间和4个角,粗糙度初始值取5个测量值的中位数。粗糙度选择表面粗糙度 $R_a$ ,即取样长度轮廓峰和轮廓谷的算术平均差<sup>[15]</sup>。

图5为表面粗糙度 $R_a$ 的下降百分比。从图5可以看出,经过清洗后,铝板的表面粗糙度明显降低。导线绝缘层附着力的提升机理与两个方面有关,一方面是表面羟基的数量及其分布程度,这个与材料本身活性有关;另一方面就是表面粗糙度,表面粗糙度是化学键和物理形态的综合体现。根据图5可以发现,随着激光清洗次数增多,清洗后铝板的表面粗糙度降低的百分比也出现明显减少。当激光器行走距离较快时,在第1次清洗时表面粗糙度下降较慢,在第3次清洗时粗糙度下降增快,但清洗到第7次时粗糙度差别减小。

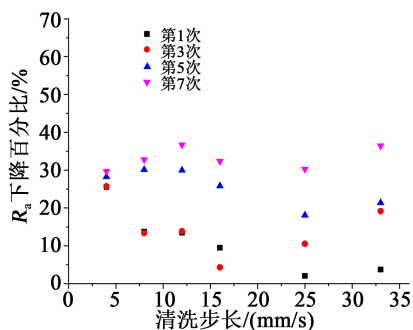
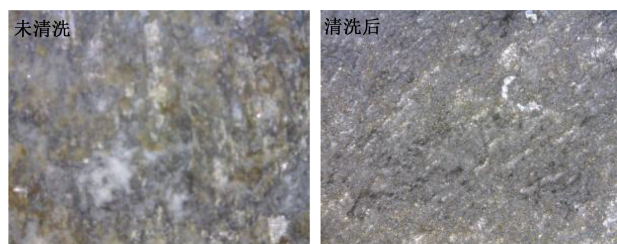
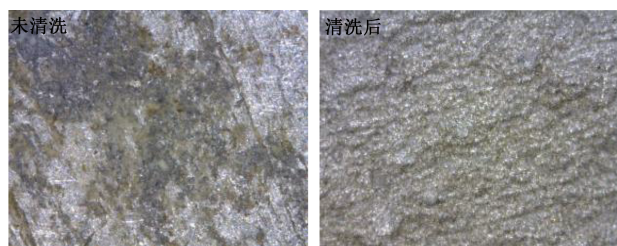


图5 表面粗糙度  $R_a$  下降百分比  
Fig.5 Surface roughness  $R_a$  reduction percentage

图6为同部位不同清洗次数的表面微观结构。从图6可以看出,未清洗的铝板表面有严重不规则伤痕,在清洗后出现了明显的改观。在清洗次数增加到第7次后,表面粗糙度下降开始减缓。



(a)第1次清洗前后对比



(b)第7次清洗前后对比

图6 同部位激光清洗后对比

Fig.6 Comparison of the same part after laser cleaning

通过增加脉冲幅值也有相同的效果,但振镜运动存在一定误差,部分振镜振动迟缓的地方会导致清洗效果不佳。清洗到一定程度时,清洗效果开始减缓。可以得出清洗效果与脉冲激光器在单位面积内积累的能量成正比,能量越高表面粗糙度减小效果越明显,当在表面粗糙度  $R_a$  达到  $2.5 \mu\text{m}$  以下时,金属表面激光吸收系数远小于金属氧化层,因此随着清洗次数的增加,表面粗糙度下降不明显。

## 3.2 附着力特性

### 3.2.1 拉开法

为了验证导体表面氧化层、污秽物清除及粗糙度变化后附着力的变化,在铝板表面进行了拉开法

实验。依据 GB/T 5210—2006<sup>[16]</sup> 进行实验,根据标准推荐的胶黏剂,选用的是双组份快干环氧胶黏剂。环氧胶表面粗糙度与附着力实验结果如图7所示。

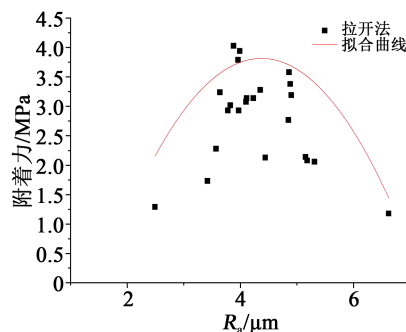


图7 环氧胶表面附着力的变化曲线(拉开法)

Fig.7 Surface adhesion curve of epoxy adhesive (pull method)

从图7可以看出,表面粗糙度比较大时,附着力较差,随着激光清洗将表面杂质和氧化物气化后,铝基体表面开始裸露。当目标位置离开焦点范围时,激光能量集中方式由平面波转向环形波,能量将呈指数级下降,清洗效果不佳。在某种程度上,该方式可为金属材料在一定程度上实现毛刺清除。当  $R_a$  达到  $4.5 \mu\text{m}$  以上时,表面附着力开始出现下降;当  $R_a$  达到  $6.5 \mu\text{m}$  时,附着力下降到初始未清洗的状态。其数据结果可拟合成公式(3)。

$$\sigma = -0.47x^2 + 4.11x - 5.17 \quad (3)$$

式(3)中: $\sigma$ 为拉开法的破坏强度; $x$ 为表面粗糙度系数  $R_a$ 。

### 3.2.2 剪切法

硫化橡胶领域更加重视拉伸剪切强度测量方法<sup>[17]</sup>,实验采用的胶黏剂为常温硫化硅橡胶。硫化硅橡胶表面粗糙度与附着力实验结果见图8。从图8中可以看出,剪切法测量的附着力结果与拉开法的类似,随着粗糙度下降,附着力逐渐上升; $R_a$ 在  $4.0 \mu\text{m}$  附近,附着力开始出现下降,下降的速度低于拉开法。 $R_a$ 在  $2.49 \mu\text{m}$  附近,附着力下降到  $1.93 \text{MPa}$ ,仍高于有污秽的表面, $R_a$ 为  $6.68 \mu\text{m}$  时,附着力最小。此污秽表面在正常冲洗条件下,混杂着无法清除的污染物和氧化层,当出现重度污秽覆盖时,其附着力还会有大幅度下降。其数据结果可拟合成公式(4)。

$$\sigma = -0.59x^2 + 4.62x - 6.29 \quad (4)$$

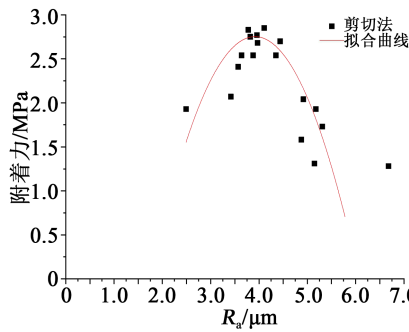


图8 硫化硅橡胶表面附着力变化曲线(剪切法)  
Fig.8 Surface adhesion curve of vulcanized silicone rubber (shear method)

3.2.3 实验结果分析及对比

通过两种实验方法可知,在激光清洗初期,随着表面粗糙度逐渐下降,附着力明显提升。主要原因在于导体表面氧化膜和污秽被清除后,其表面粗糙度相对减小,胶黏剂对导体浸润程度增加,胶黏剂可以充分依附在导体的表面。图9为两种表面粗糙度下胶黏剂的浸润情况,从图9可以看出,表面粗糙度对胶黏剂浸润程度有着明显影响。

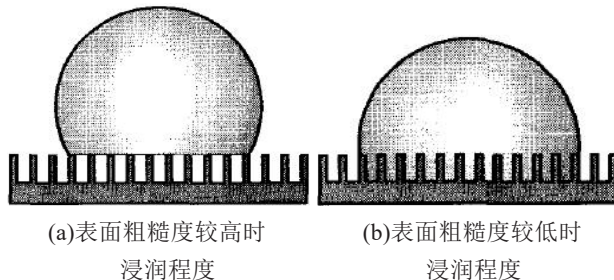


图9 表面不同形貌下胶黏剂浸润程度

Fig.9 Wetting degree of adhesives under different surface morphology

随着清洗次数的增加,表面形貌发生了变化,由于轮廓较深和距离束腰部位受到遮挡(图2中y轴的位置),其辐射的能量减少(见式(1))。氧化铝的耐高温性能好,在激光清洗机理中通常采用膜层屈曲方式使其氧化层脱离和膜层振动剥离,如图10所示<sup>[8]</sup>。因为铝合金熔点为660.37℃,而氧化铝的气化点为2980℃,所以在清除过程中,氧化铝膜层振动脱落,部分激光光斑处铝基体溶解填平表面形貌,偏离焦点表面的铝基体吸收的热量会远小于焦点处,因此凹进去的表面形貌受到的影响不大,凸起的形貌在氧化层剥离振动和光吸收上受到的影响会高于凹处,凸处会逐渐被剥离,使得粗糙度持续下降,形貌越来越光滑,展现导体材料原本的光

亮形态,如图11所示。最终导致胶黏剂浸润面积开始减小,反而导致附着力下降。

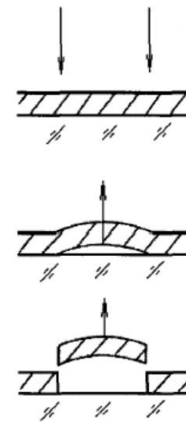


图10 膜层屈曲过程示意图

Fig.10 Schematic diagram of film buckling process



图11 经过多次激光清洗的铝条粗糙度对比

Fig.11 Comparison of aluminum strips roughness after multiple laser cleaning

对比拉开法和剪切法可以看出,环氧树脂表面能低于常温硫化硅橡胶,从拉开法得出的数据,在 $R_a$ 达到4.5  $\mu\text{m}$ 时,附着力最佳,随着清洗次数增多,表面粗糙度再次减小,附着力测量值出现下降。

由两种方法结果数据可知,环氧树脂的附着力测量值离散性要大于硅橡胶,主要原因是铝板表面较脏,表面形貌重构后由于浸润不均匀,部分附着力数值较低。剪切法相对稳定,剪切法粘接时是错位粘接,为了保证试板中心面积重合,通常会采用夹具来保证位置不发生偏移。因硅橡胶表面能高,在未硫化时出现液态硅橡胶流动很容易带着试板偏移,制样时都需带力固定,故铝条数据离散性较小。

从附着力测量数据分析, $R_a$ 在4.0  $\mu\text{m}$ 附近,硅橡胶附着力达到顶峰,随后开始持续下降,而环氧树脂的附着力顶峰在 $R_a$ 为4.5  $\mu\text{m}$ 时。对比环氧树脂,硅橡胶的附着力测试方法更加适合略糙的表

面,主要原因是硅橡胶需要表面更加宽广的轮廓结构以保证胶黏剂可充分地渗入,表面缝隙过小会导致黏稠胶黏剂无法将表面轮廓缝隙中的气体排出,使得胶黏剂渗入,形成附着力。由于制作方法的差别,剪切法的离散性要小于拉开法,但从数据的变化规律分析,拉开法对表面形貌变化敏感程度要高于剪切法。

两种方法均证实,运行和严重氧化的金属材料(铝板)通过激光清洗均可以实现表面涂层附着力的提升。

#### 4 结论

(1)脉冲激光清洗可有效改变金属导体的表面形貌,去除铝材表面的氧化层;当清洗到粗糙度 $R_a$ 小于 $2.5\ \mu\text{m}$ 时,清洗效果开始减缓,清洗效果与脉冲激光器单位区域覆盖能量成正比。

(2)金属表面进行激光清洗后,粗糙度降低,可有效提高漆膜的附着力,环氧树脂拉开法在表面粗糙度 $R_a$ 达到 $4.5\ \mu\text{m}$ 时,附着力开始出现下降,硅橡胶剪切法在表面粗糙度 $R_a$ 达到 $4.0\ \mu\text{m}$ 时,附着力开始出现下降。

(3)在激光清洗中氧化铝和污秽物的脱离主要靠膜层屈曲和污秽物气化震荡,铝基体本身光吸收系数较小,在表面膜层和污秽物脱离干净后,其表面粗糙度 $R_a$ 下降,效果明显放缓。

#### 参考文献:

- [1] 袁田,肖仁杰,王利伟.无溶剂绝缘防腐防水涂料的研发[J].涂料工业,2019,49(8):41-46.
- [2] 武文华,张锐,袁田,等.盘形悬式绝缘子涂敷RTV后空气中冲击击穿耐受性能分析与建议[J].绝缘材料,2018,51(8):81-85.
- [3] 袁田,张锐,吴光亚,等.运行复合绝缘子表面粗糙度对憎水性特性的影响[J].高电压技术,2012,38(11):2993-2999.
- [4] 卜珍宇,赵晓琴.电机轴承防护措施及 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷绝缘涂层研究现状[J].表面技术,2021,50(5):51-59.
- [5] 何广飞,罗旭光,卢玉龙,等.地铁防杂散电流的钢轨绝缘涂层研究[J].现代城市轨道交通,2020(10):107-109.
- [6] 郝犇珂,陈俊武,谢毅,等.超疏水和RTV涂层表面覆冰剪切强度及其影响因素的对比分析[J].高电压技术,2020,46(12):4227-4233.
- [7] 刘云鹏,周国杨,律方成,等.污秽物对交流输电导线起晕特性影响的试验研究[J].高电压技术,2013,39(6):1312-1316.
- [8] 李书兴,陈斯华.西北风沙地区输电导线侵蚀及起晕电压实验模拟研究[J].长春理工大学学报(自然科学版),2014,37(3):151-154.
- [9] 成健,方世超,刘顿,等.金属表面激光清理技术及其应用[J].应用激光,2018,38(6):1028-1037.
- [10] TANG Q H, ZHOU D, WANG Y L, et al. Laser cleaning of sulfide scale on compressor impeller blade[J]. Applied Surface Science,2015,355:334-340.
- [11] GUAN Y C, NG G K L, ZHENG H Y, et al. Laser surface cleaning of carbonaceous deposits on diesel engine piston[J]. Applied Surface Science,2013,270:526-530.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 陈怡星.脉冲激光表面微造型的数值模拟与实验研究[D].苏州:江苏大学,2007.
- [15] 袁田,张锐,吴光亚,等.运行复合绝缘子表面粗糙度对憎水性特性的影响[J].高电压技术,2012,38(11):2993-2999.
- [16] 全国涂料和颜料标准技术委员会.色漆和清漆 拉开法附着力试验:GB/T 5210—2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [17] 全国橡胶与橡胶制品标准化技术委员会.硫化橡胶与金属粘接拉伸剪切强度测定方法:GB/T 13936—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [18] 俞鸿斌.金属表面激光清洗技术研究[D].武汉:华中科技大学,2015.