

高压输电线异物激光清除三维仿真研究

程茁栋 李 凡

咸宁市国网咸宁供电公司 湖北 咸宁 437100

【摘要】：激光因其优良的性能，被广泛地用于电力线路中的杂质清除。为了安全、高效地去除电力线路中的杂质，必须对其机制进行深入的研究。本文对激光与尼龙材料的热作用机制进行了分析和探讨，并对激光切入尼龙材料进行了三维数值仿真研究。研究发现，在激光功率、光点大小不变的情况下，最大烧蚀温度和烧蚀深度与光束速度呈反比关系；在相同的激光功率和速度下，最大的烧蚀温度和腐蚀深度与光斑大小成反比关系。在 100W 的激光功率下，光点半径 1 厘米，在不亮火焰的情况下，激光的最小燃烧速率是 0.5 厘米/秒。当激光速度为 2 厘米/秒，功率为 100W 时，无火焰照射时，其最小光点直径为 0.3 厘米。

【关键词】：高压输电线；异物激光清除；三维仿真

Three-Dimensional Simulation of Laser Removal of Foreign Matters in High Voltage Transmission Lines

Zhuodong Cheng, Fan Li

Xianning State Grid Xianning power supply company Hubei Xianning 437100

Abstract: Because of its excellent performance, laser is widely used to remove impurities in power lines. In order to remove impurities in power lines safely and efficiently, the mechanism must be studied in depth. In this paper, the thermal interaction mechanism between laser and nylon material is analyzed and discussed, and the laser cutting into nylon material is studied by three-dimensional numerical simulation. It is found that the maximum ablation temperature and depth are inversely proportional to the beam velocity when the laser power and spot size are constant; At the same laser power and speed, the maximum ablation temperature and corrosion depth are inversely proportional to the spot size. At a laser power of 100 W, the spot radius is 1 cm, and the minimum burning rate of the laser is 0.5 cm / s without a bright flame. When the laser speed is 2 cm / s and the power is 100 W, the minimum spot diameter is 0.3 cm without flame irradiation.

Keywords: High voltage transmission line; Laser removal of foreign matters; 3D simulation

引言

电线中的杂质是导致线路短路的主要原因。最常用的异物有风筝，风筝绳，农用塑料片，尼龙布，孔明灯等。在大雾等环境中，由于绝缘性能较差，很容易发生单相接地、相间短路等故障，因此必须予以删除。目前，电力线路中的杂质清除方法有人工清除、绝缘叉车人工清除、无人机清除等。这种传统的方式存在着必须提前关机、人工安装线路、工作效率低下、线路破损、存在着火风险、多人共同作业、劳动强度大、造价高等问题。

激光技术的发展使其在电子线路中具有很好的方向性、良好的相干性和较高的亮度。为了解决上述问题，本文通过对尼龙材料的性能及激光烧蚀目标的特点，采用 COMSOL 软件建立了多物理场的激光切割模型，并对不同的激光半径和运动进行了仿真。用速率记录了尼龙的烧蚀形式，并对其进行了数据分析。通过 MATLAB 软件对模拟结果进行了分析，得出了激光与尼龙材料之间的交互作用机制，并给出了无明火焰下的激光速度、激光半径的临界值。

1 激光技术清除异物的由来

1.1 异物上线对线路运行的影响

电线断裂的原因有：异物、雷击、鸟害、外部故障、风偏等，而以塑料薄膜等异物为主。其共同特征是，其延伸线较长，在裸线或桅杆吊点处的导线上，极易发生相间短路或接地放电，常使钢索在强风、湿环境下发生跳跃，从而对钢丝绳的安全、稳定产生不利影响。

在不同电压等级的输电线路中，特高压线路的铁塔通常高于 60m，这些常见杂质不能在导线上漂浮；220kV 及以下线杆进线高、杂质去除困难、线路负载大、供电时，特高压是本地电网的主体，是省内和相邻省间的重要输送通道，对大部分人的生产、生活都有很大的影响。

1.2 激光清除异物的优势

在航道中清除异物的传统方式是利用爬塔工人，使用绝缘杆、清除异物杆，并使用爬升机、高空作业平台、吊篮等设备。这样做需要时间和很大的风险。激光杂质清理技术是利用地面的激光进行远距离切割，使物体的局部温度迅速升高，然后熔化、蒸发和燃烧分离。采用电排线、清理杂质，使用简单、快速、安全，尤其是在高压电线中清理杂质，由于其能远距离清

理、电气控制、不需要攀爬，所以在技术上有很大的优越性。

2 光纤激光与二氧化碳激光的对比

2.1 光束质量对比

在光束质量上,二氧化碳激光器的光束发散角度为 5.2mR ,而光纤激光器的光束质量低于 0.7mR 。

2.2 清除异物的效果

第一,“实验室”效果。在架空线上要清理的杂质是由塑料、非金属材料做成的纤维产品,如温室薄膜、防尘网、风筝等。理论上,这种塑料和纤维材料对 10.6 微米的二氧化碳激光有较高的吸收性,特别是白色的透明塑料薄膜,能有效地吸收二氧化碳激光^[1]。

试验中采用了二氧化碳激光和纤维激光。上方是二氧化碳激光，下面是纤维激光。二氧化碳激光是绿色的，其中含有的指示灯是红色的。在现场试验中，这两种产品的功率都达到了13.55W。

第一组实验对象是一张 A4 型黑白纸：两束激光在发出后 2 秒钟之内，几乎同一时间穿过纸张。再用一张白色的纸张，二氧化碳激光和普通的黑纸一样，不能用来烧掉白色纸张。

第二组试验对象是在大棚内使用的透明塑料膜和黑色塑料袋。在 45s 发出荧光后, 二氧化碳激光可以形成一条连续的直线, 但是光纤激光器对此无影响。

用一个黑色的塑料袋代替。两道激光射出后,就像是 A4 级的黑色纸张一样。纸在同一时间被烧焦,并具有同样的横向切割作用。此外,还发现了 10.6 微米二氧化碳激光吸收塑料膜、快速蒸发面积等原因,其灼伤痕迹相对较少。结果表明,在相同功率密度下,二氧化碳激光与光纤激光对不透光塑料薄膜的燃烧作用是一样的。

结论: 实验结果与理论预测相符。光纤激光因其波长较短而不能有效地处理透明的白色杂质。

第二，现场效果。网络上的外来物质是一种非常强烈的季节性现象，通常是在春天。因多风、农业生产、传统的放风筝等传统的休闲活动，如大棚膜、防尘网、网上放风筝等。所有的事情都是围绕着春季展开的。

在处理各类杂质时,二氧化碳激光对透明塑料薄片的清除效果与预期相同,而实验室性能较差的光纤激光器同样可以有效地进行切割,但所需的时间较长。主要原因有:一是在野外,长时间用透明塑料薄膜作薄膜,会产生很大的污渍,透明度下降;二是用塑料薄膜包裹着所有的电线或金属零件,在身体表面反复的缠绕,其实是一层又一层的透明膜;三是现场应用的光纤激光功率为 200W,比试验功率高出 10 倍^[2]。

而滤网，则是以环保的聚乙烯为原料，具有同样的特性。

在清除风筝线的过程中，无论是大力马线，凯夫拉线，还

是规整的编织线，都没有显著的差别。

在离支问题上, 由于受到散热器的影响, 光纤激光器的优越性更为突出。目前市场上的二氧化碳激光器功率在 100W 左右, 在不采用水冷的情況下, 可以达到 200W 的功率。

结论:二氧化碳和光纤激光都可以在不同的异物种类下进行原位清除。

2.3 对线路导线的影响

激光切割是一种非常重要的金属加工方法，在金属丝上，一般的金属激光材料，其表面的反射率随激光波长的增大而增大，而吸收量则随激光波长的增大而减小。常规的 UHVVT 线路是绞合铝线，其内部有钢心。在 10.6 微米时，对铜、铝等金属的吸收能力很弱，对 1.06 微米的吸收有很大影响。

在 50 米、60 米的旷野中,使用二氧化碳和光纤激光对金属丝的作用,最大功率为 400mm^2 的超高压钢芯铝丝输送线 10 分钟后,其表面无任何融化迹象。在 20 米到 10 米的距离,用纤维激光照射的金属丝有融化的征兆,但二氧化碳激光器没有任何反应。由于地面与地面之间的距离很短,而且在清除杂质时,激光对齐固定点所需的时间通常不会超过 1 分钟。

结论: 二氧化碳激光和光纤激光在 UHT 线路中清除杂质不会对线路产生损伤, 但对各种电压等级、线路间隙较小的线路, 有可能导致线路的损伤, 尤其是避雷线。

2.4 激光器使用维护对比

由于激光环境的差异,使得其在使用和维修上具有许多优点,其中包括:

首先，体积小，结构简单。激光振荡器由激光管、光腔、电源和泵浦所组成。光纤激光器因其缠绕而使其体积缩小、体积增大。其次，无需维护，稳定性强。在光纤激光器的腔体中没有任何的光学反射，不需要调节，而且维修费用很低。三是光纤导出。光纤激光器的光输出是由光纤连接到本体上的，可以任意变换方向，其灵活性要优于二氧化碳激光。四是适应能力强。光纤激光器具有良好的抗尘性、振动、湿度、温度等特性，采用陶瓷管式谐振器对二氧化碳激光器的适应性也有很大的改善。

结论：与二氧化碳相比，光纤激光器具有更大的便利性。

3 激光辐照输电线异物三维模型建立

为充分模拟聚合物的激光切割,使得它能真实地反映出激光的切割状况,需要建立一种动态的三维立体模型,以探讨激光与材料的相互作用机制。用激光辐照的高分子材料的立体模型。COMSOL 技术在模拟多个物理场中有着不可替代的优越性,它能在微机上精确地模拟各种物理现象。在 COM-SOL 中,采用了基于三维激光与高分子相互作用机制的三维模型,可以在传热模组中选取固态传热模组,在数学模组中由变形几何模

组完成,例如:温度场。该模型的建立包括:建立几何模型,指定边界区域,划分网格,计算分析。

根据高压电线常用的高分子材料,其几何形状可设定为10厘米,厚度可设定为0.1厘米。因为裁切区沿宽度方向很小,所以试验材料的宽度是按照激光作用的最大半径而定的。为了方便观看,这张图被放大,x轴是25,y轴是25,z轴是500。为了保证计算精度和连接精度,利用空间激光光场强度具有很高的非线性特性。这样可以改善收敛。拖动网格的原始平面采用“自由三角形网格”,并以三角形的形式进行卷取。为了达到精确,需要用到的激光切割路径与剩余的超细网格对准^[1]。

聚合物激光切削加工工艺比较复杂,需要综合考虑多种因素。为了更好地了解材料的激光切割机理,本文提出了一种基于以下假设的方法:在没有内部热源的情况下,在切割时,材料的吸收率是恒定的,而不是由于热辐射引起的热量损耗。

这个仿真用激光切割尼龙材料。在切削加工中,材料不但会产生形变,而且会产生相变,所以需要采用变形几何模型的界面。自由变形特性让你可以改变范围的尺寸,以适应边缘的情况。在四边,规定的变形保证了边界不会发生变化,也就是将栅格偏移设定为0dx,0为dy。

4 仿真研究

在激光的照射下,材料的表面会发生一些变化。在高温下,表面会以一种速率向内渗透。等温面的最大传播距离为烧蚀深度,而烧蚀深度是影响激光与非金属材料交互作用的主要因素。从实验结果可以看出,切削度是由烧蚀深度决定的,因此,该数值模拟将利用刻蚀深度来研究激光的运动速度和光斑大小对烧蚀的影响,从而得出一个合理的激光运动轨迹。雷射的速度和范围使得更安全,更有效,更便宜地清理电力网中的杂质。例如同光斑半径不同移动速度下材料的烧蚀情况,采用MATLAB软件对不同速率的尼龙烧蚀实验数据进行了拟合,得出了不同速率下的尼龙材料烧蚀速率与材料内部最高温度及烧蚀深度之间的关系。在速度低于2厘米/秒的情况下,激光熔化时的最大温度受到光点运动速率的影响,并随运动速率的

增大而快速降低;在速度低于4厘米/秒时,光点的运动速度对烧蚀深度有很大的影响,并且对烧蚀深度的影响也很大,而且这种影响会随运动速率的增大而快速降低。结果表明,当激光功率为100W、光点半径为1cm时,尼龙材料的烧蚀深度和最大温度均随光点速度的增大而减小。当激光功率和半径相同时,激光在单位面积内停留的时间越短,温度越低,烧蚀深度越浅。

5 尚须解决的问题

激光清除外来物质是由于外来物质的局部温度突然上升,然后熔化、蒸发、燃烧,从而将杂质和金属丝分开。在这个过程中,掉落的物体会带着残留的热量,坠落到附近相似的物质上,从而引发火灾。注意:外来物质进入的地区多是农村地区,尤其是塑料大棚,存在着一定的火灾风险。在实际操作过程中,曾经有一些物体从下方的塑料大棚附近掉落,并在温室的薄膜上造成灼伤。要注意消防隐患,如果存在很多的异物,而天气比较干燥,就会容易引发火灾。针对这种情况,有两种方法:一是在拔出时,派遣工作人员在异物附近站岗,一旦发现异物,立刻将其取出,检查是否有异物的迹象。二是操作人员驾驶专用车配有灭火器,用灭火器迅速灭火。

6 结语

由于不清楚激光是怎样作用于外来物质的,因此,清除杂质的效率很低,有着火的危险。为及时、高效、安全地去除杂质,采用COMSOL模拟软件建立了三维多物理场模型,通过MATLAB对测量结果进行了分析,得出了尼龙的烧蚀规律、不同激光半径、不同激光速度的材料,并给出了激光阈值。在不使用火焰时,激光的运动速度和距离。首先,在100W激光功率和1厘米光点的情况下,不使用明火的安全燃烧速度应控制在0.5-3厘米/秒。其次,在100W激光功率和2厘米/秒的光斑速度下,不着火的安全半径为0.3-1.4cm。其三,当激光功率和光点半径不变时,烧蚀深度和最大温度均随光速的增大而减小。其四,当激光功率和光速不变时,烧蚀深度和最大温度均随光斑半径的增大而降低。

参考文献:

- [1] 刘雷,刘霞,单宁.高压输电线路异物激光清除三维仿真研究[J].激光与红外,2021,51(10):1286-1293.
- [2] 徐北方,冯军森.激光技术应用于清除超高压架空输电线路异物的探讨[J].农村电气化,2019(7):43-46.
- [3] 吴弟友.特高压输电线路新型激光除异物技术的应用[J].通讯世界,2018(11):211-212.