

电网中激光除障技术的研究与分析

张志博¹, 王一波², 张梓奎^{1*}, 王华伟³, 张贵新¹

¹清华大学, 北京

²国网浙江省电力有限公司湖州供电公司, 浙江 湖州

³浙江泰仑电力集团有限责任公司, 浙江 湖州

Email: 503811409@qq.com, *zhangzikui@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2021年5月9日; 录用日期: 2021年6月15日; 发布日期: 2021年6月24日

摘要

电能是现代社会应用最广泛的能源之一, 输电线路上的覆冰、风筝、塑料薄膜等各类障碍物, 对电网的安全稳定运行造成了巨大的威胁。激光能够远距离、无接触地快速清除障碍物, 并且能够实现带电作业, 有着广阔的发展前景。本文主要研究了激光参数对于除障效果的影响。首先, 以两种典型障碍物, 覆冰与塑料薄膜为例, 分析了不同波长激光对不同类型障碍物的吸收与热熔效果。其次, 通过实验确定了熔穿塑料薄膜与有效切割透明薄膜所需的最小功率密度。接下来, 对比了激光输出模式的不同对除障效果的影响。还测量了激光除障中不同类型绝缘子损伤阈值数据, 研究了大气环境对于激光除障的影响。最后, 还介绍了已研发的不同类型的激光除障装置样机。

关键词

激光, 除冰, 异物清除, 电网, 激光除障

Research and Analysis of Laser Barrier Removal in Power Grids

Zhibo Zhang¹, Yibo Wang², Zikui Zhang^{1*}, Huawei Wang³, Guixin Zhang¹

¹Tsinghua University, Beijing

²State Grid Huzhou Power Supply Company, Huzhou Zhejiang

³Zhejiang Tailun Power Group Limited Liability Company, Huzhou Zhejiang

Email: 503811409@qq.com, *zhangzikui@mail.tsinghua.edu.cn

Received: May 9th, 2021; accepted: Jun. 15th, 2021; published: Jun. 24th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 张志博, 王一波, 张梓奎, 王华伟, 张贵新. 电网中激光除障技术的研究与分析[J]. 电气工程, 2021, 9(2): 76-85. DOI: 10.12677/jee.2021.92009

Abstract

Electricity is one of the most widely used energy sources in modern society. Ice, kites, plastic films and other types of barriers on transmission lines pose a huge threat to the safe and stable operation of the power grid. Laser technology has a broad development prospect as it can remove barriers contactless over long distances without power outage. Firstly, the absorption and thermal melting effects of different wavelengths of laser on different types of barriers are analyzed, using two typical barriers, ice and plastic film, as examples. Secondly, the minimum power density required to melt through and effectively cut transparent plastic film is also determined experimentally. Next, the influence of different laser output modes on the efficiency of barrier removal is compared. The damage thresholds for different types of insulators in laser barrier removal are studied by experiment measurement and the effect of atmospheric conditions on laser barrier removal is also investigated. Finally, different types of laser barrier removal device prototypes which have been developed are also presented.

Keywords

Laser, De-Icing, Removal of Foreign Body, Power Grid, Laser Barrier Removal

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

电能是现代社会应用最广泛的能源之一，近年来，随着我国社会的进步，电网中的输电线路长度也快速增长。截至 2019 年底，我国 110 千伏及以上的输电线路长度已经达到 109.34 万千米，相比于 2010 年增加了近一倍。附着于线路上的各类障碍物，可能造成线路损坏，甚至可能导致停电以及铁路停运等事故，对社会生产生活造成不利影响[1]。

常见的线路障碍物可分为三大类：一是塑料膜、布条、风筝等薄膜异物，此类障碍物的组成较为复杂，其熔穿功率密度、透明度、激光透射率各不相同，通常黏附、缠绕与输配电线路上。此类障碍减少了线与线、线与地之间的绝缘距离，极易引发输电线路单相接地、相间短路等故障；二是线路与绝缘子上的覆冰覆雪。导线覆冰过重可能引起线路舞动甚至断裂，导线因覆冰滑动可能造成相间短路，绝缘子覆冰后性能也会降低，可能导致冰闪事故；三是树障，这类障碍物可能在树木茂盛地区由于树木快速生长产生，造成高压线的绝缘距离减小，可能造成对地放电或者短路，甚至可能引起林区火灾[1] [2] [3] [4]。

传统的异物清除方法有停电作业法、绝缘杆作业法、斗臂车法等，传统的除冰方法包括机械除冰法，热方法除冰等。这些方法有的需要停电作业，造成经济损失，有的耗费能量较多，有的对作业人员操作要求较高[5] [6]。激光除障技术有着无接触、速度快、准确性高等优点，不需停电，便可远距离高效地清除输电线路上的障碍物，这一技术具有广阔的应用前景，近来受到了国内学者与技术人员的广泛关注[7]-[12]。

激光除障的基本原理是激光与材料的相互作用，这是光的高频电磁场与材料中电子相互作用的结果。当激光波长位于红外区时，物质吸收激光会产生激光热蒸发效应，使得物质温度升高并使其熔化、蒸发，如果物质内部产生了较大的温差，还可能在其内部产生热应力，激光除障技术正是应用了此特性，实现

了熔穿、切割异物或融化覆冰。实际使用中，很多因素包括激光参数，例如激光波长、功率密度等，作用时的环境条件，如空气湿度、温度、风速等，以及障碍物自身的物理性质都会对除障效果产生影响[13][14][15]。

本文主要研究了激光参数对除障效果的影响以及激光与不同类型障碍物之间的相互作用。本文以覆冰和塑料薄膜为例，分析并实验验证了不同波长激光与不同类型障碍物作用的光热吸收效果；通过实验研究了熔穿透塑料薄膜与有效切割透明塑料薄膜所需的激光功率；实验测量了激光对不同类型绝缘子的损伤功率密度阈值；分析比较了相同平均功率下不同输出模式的激光器除障效果的优劣。结合上述理论分析与实验结果，我们研发了不同类型的实验样机并进行了实地测试。

2. 激光波长对激光与障碍物相互作用的影响

物质对激光的吸收率很大程度上取决于激光波长与其自身的物理性质，输电线路障碍物的组成多种多样，其中部分障碍物，如鸟巢、树枝等基本不透光，其吸收率对波长不敏感；而部分障碍物，如浅色塑料薄膜等则具有一定的透光性。本文选取了两种吸收率对波长较为敏感的典型障碍物：塑料薄膜与覆冰，对其吸收率与激光波长间的关系进行了研究。

2.1. 激光波长对于除冰效果的影响

常见的覆冰包括雾凇、混合凇和雨凇等[2]，我们在实验室所制得的覆冰，其冰型接近雨凇，这也是实际覆冰中最难清除、对电网危害最大的类型。当激光在覆冰中传播时，光强有如下的变化规律公式：

$$I_{out} = I_{in} \exp(-\lambda d) \tag{1}$$

其中， I_{in} 、 I_{out} 和 λ 分别为激光的入射功率，经过入射距离 d 后的剩余功率和吸收系数。

不同波长的激光在纯冰中传输的吸收系数如图 1 所示，吸收系数越大，光在冰中的传输距离越远。

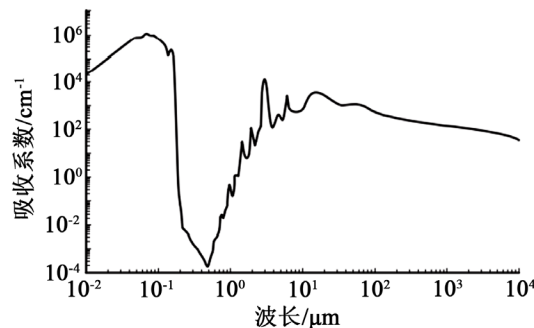


Figure 1. Laser absorption coefficient in pure ice as a function of laser wavelength

图 1. 激光在纯冰中的吸收系数与激光波长的关系曲线

激光波长会对于光在冰中的传输距离产生影响，进而对除冰时的作用效应与除冰效果产生影响。波长较长的激光(如 10.6 mm 的 CO₂ 激光)照射时，激光表现为面热源特性，冰层表面呈逐层融化；波长较短的激光照射时，由于激光穿透深度较大，表现为体热源特性，除冰层的温度上升外，还在冰层上下表面与内部产生了应力分布[7]。应力作用会使照射位置附近的覆冰变得疏松，甚至可能使其因重力作用掉落，曾有学者使用波长 1064 nm 的大功率脉冲激光源，利用应力作用震碎线路覆冰，但是所用激光器功率过高，不适于民用，也无法用于绝缘子除冰[16]。尽管如此，使用体热源特性的激光，可以将热效应与应力作用结合起来，其在相同功率下通常优于使用面热源特性的激光。

为验证上述理论分析, 利用 ANSYS 软件对于激光除冰过程进行了有限元仿真, 设定激光波长为 980 nm, 冰块为直径 120 mm、高 20 mm 的圆柱形, 冰层初始温度为 -5°C , 其温度场与应力场的分布分别如图 2、图 3 所示:

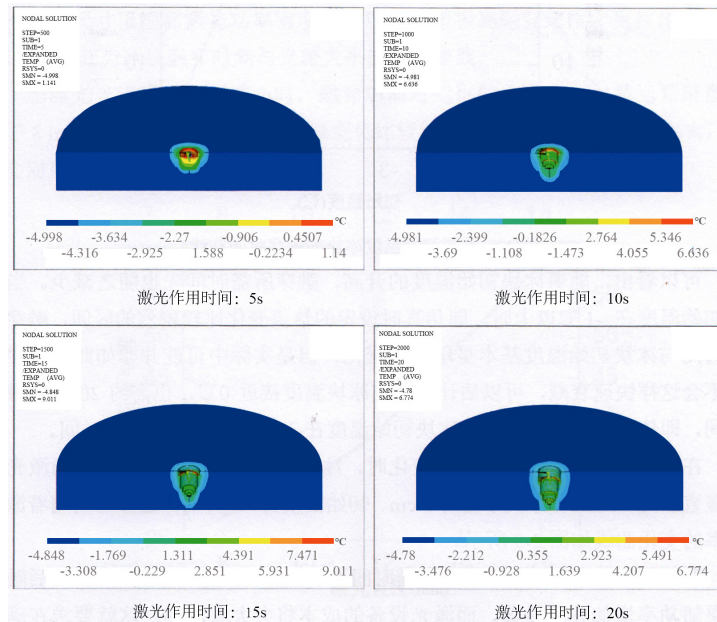


Figure 2. Simulation of the temperature field when laser irradiating ice

图 2. 激光照射覆冰时的温度场仿真结果

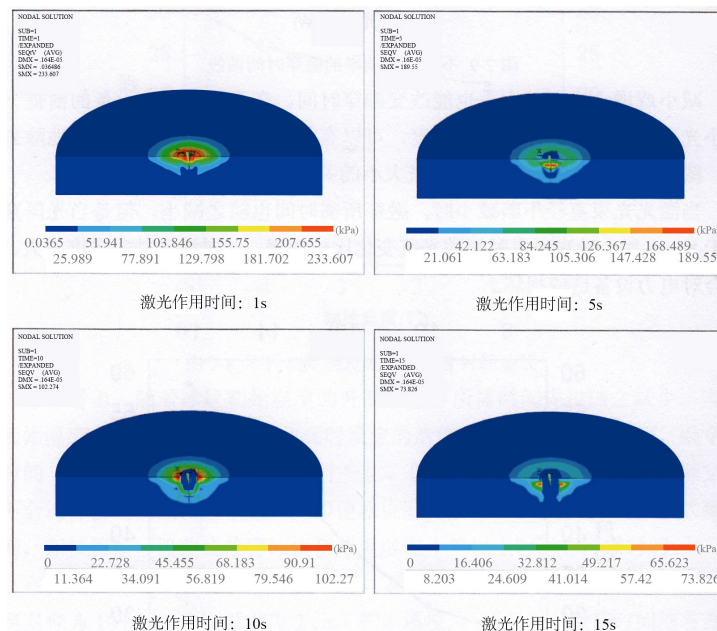


Figure 3. Simulation of stress field when laser irradiating ice

图 3. 激光照射覆冰时的应力场仿真结果

从图 2 中可以看出, 当激光波长为 980 nm (约 1 mm) 时, 激光在冰块中有一定的穿透深度, 融冰时随着时间的延续, 融冰孔径与孔深逐渐增大。纯冰在 0°C 时的抗压强度范围在 0.3~5.5 MPa, 抗剪强度与

抗弯强度分别为抗压强度的 1/2 与 1/5, 从图 3 中可以看出, 初始温度为-5℃时, 冰层内部的应力场完全可以达到这一数量级。温度梯度较大的地方应力场较大, 最大应力所在位置位于光斑的正下方, 随着冰块融化不断向下移动, 并且应力随着冰块的不断融化而减小。由于激光刚开始作用时应力比较大, 融冰的起始阶段可以用激光在冰块上做比较快速的扫描以尽可能使冰块碎裂, 从而加快融冰进程。

根据前文的分析, 近红外波段(波长 0.75~3 mm)的激光较适合用于除冰。本文对比了 3 种常见的波长约 1 mm 的半导体激光器的激光穿透率与融冰效率。在其他条件相同的情况下, 三种激光器对 40 mm 厚覆冰的透射率与作用效果如表 1 所示。

Table 1. Comparison of the ice melting test results using different wavelength laser
表 1. 不同波长激光的融冰对比实验数据

波长/nm	激光透射率	激光功率/W	光斑直径/mm	熔穿时间/min	实验现象
808	70%以上	10	4	>25	只出现直径 2 mm 深 1 mm 的小坑
980	30%~40%	10	4	8	覆冰被熔穿, 孔径 7 mm 左右
1075	约 23%	10	4	7	覆冰被熔穿, 孔径 6~7 mm

比较不同波长激光的融冰效果可以发现, 激光的穿透深度并非越大越好。808 nm 激光虽然穿透率最高, 但融冰效果最差, 这是因为覆冰厚度通常为厘米级, 大多能量在激光穿透覆冰后透射损失。980 nm 与 1075 nm 激光穿透深度适中, 反而融冰效果更好。

2.2. 激光波长对于除异物效果的影响

不同类型的异物对于不同波长的激光, 其吸收率也不相同。一般认为, 木材、塑料、棉麻织物、皮革等非金属异物对于 10.6 μm 的 CO₂ 激光吸收较好, 而金属材料对于波长 1 μm 左右的光纤激光吸收较好 [17], 本文主要研究了塑料薄膜对不同波长激光的吸收性能。由于激光的反射、散射等效应难以测量, 而透射率可以在一定程度上反应吸收率, 因此首先测量了常见的三种激光器: CO₂ 激光器、半导体激光器、光纤激光器对不同厚度的透明塑料薄膜与不同颜色的塑料薄膜的透射率, 结果如表 2 和表 3 所示:

Table 2. Transmittance of different wavelength laser on transparent plastic films with different thicknesses
表 2. 不同波长的激光照射不同厚度的透明塑料膜时的透射率

激光波长	激光透射率(薄膜厚度)		
	2 μm	10 μm	18 μm
CO ₂ 激光(10.6 μm)	0.755	0.732	0.706
光纤激光(1064 nm)	0.866	0.868	0.844
半导体激光(980 nm)	0.861	0.845	0.818

Table 3. Transmittance of different wavelength laser on different colored plastic films (10 μm thick)
表 3. 不同波长的激光照射不同颜色塑料膜时的透射率(厚度 10 μm)

激光波长	激光透射率(薄膜颜色)			
	黄色	蓝色	粉红色	黑色
CO ₂ 激光(10.6 μm)	0.925	0.860	0.801	0.754
光纤激光(1064 nm)	0.787	0.736	0.490	0.432
半导体激光(980 nm)	0.715	0.673	0.473	0.362

对于透明塑料膜而言, CO₂ 激光的透射率最低, 同时同一波长下, 塑料厚度越厚, 透射率越低。这与实验中, 厚度大的薄膜容易被熔穿, 且更容易被 CO₂ 激光熔穿的实际现象相符。对于透明薄膜, 透射率能够反映材料对激光的吸收率且 CO₂ 激光的处理效果最为理想。

对于每一种波长的激光, 均满足黄色薄膜透射率最高, 黑色薄膜透射率最低, 总体上呈现颜色越深的薄膜透射率越低的规律, 这与实验结果也相符; 对于同一种颜色的薄膜, CO₂ 激光的透射率最高, 980 nm 的半导体激光透射率最低, 而这与熔穿测试实验的结果相悖。在熔穿测试实验中, 对于 CO₂ 激光器, 当输出功率 4.5 W 左右时便出现了有色塑料薄膜的熔穿, 而光纤激光器与半导体激光器即使功率调节到 15 W 左右也不会有任何变化, 这可能是因为大量激光能量因为反射或散射损失掉了。直观来看有色塑料薄膜对于 10.6 μm CO₂ 激光的吸收率远高于其他波长的激光, 而透射率并不能完全反应材料的吸收率, CO₂ 激光在处理有色塑料薄膜方面效果同样最为理想。

3. 激光功率、有效功率密度及损伤阈值问题

激光与物质的相互作用不仅与激光波长有关, 也与激光能量密切相关。激光辐照障碍物时, 需要达到一定的功率密度, 方能实现有效除障。同时, 在设计除障仪的功率时, 也必须考虑不同环境条件下激光的大气传输问题与电气设备的损伤功率密度阈值问题。

3.1. 切割塑料薄膜的有效光功率密度

风筝、深色塑料膜等障碍物几乎完全不透光, 对这类障碍物的切割较为容易; 而浅色塑料薄膜具有一定透光性, 切割时常常存在困难, 这其中又以透明塑料膜的透射率最高。CO₂ 激光因其波长最适合用于切割塑料薄膜, 因此本文测量了 CO₂ 激光有效切割透明塑料薄膜的所需的激光功率密度。

激光器出口光斑的大小采用 90/10 刀口法测量[18] [19]。刀口法可以利用高斯光束在其截面上的能量分布特点计算激光的束腰大小。测量得到实验室所用的 CO₂ 激光器的出口光斑直径为 5.69 mm。功率密度可由下式计算:

$$\omega = \frac{P(1-\eta)}{S} = \frac{4P(1-\eta)}{\pi D^2} \quad (2)$$

式中, ω 为功率密度, P 为出口激光功率, D 为光斑直径, η 为透射率。当激光功率为 4.5 W 时, 10 mm 厚的黄色塑料薄膜正好熔穿, 此时的吸收光功率密度为 0.0133 W/mm²。实际应用时, 需要保证在一定切割速度下能够迅速连续地切开塑料薄膜。根据实际使用经验, 确定了 2 cm/s 是较为实际的切割速度。通过大量实验发现, 为达到这一切割速度, 切割 2 mm 的透明塑料薄膜时所需的最小吸收光功率密度为 0.565 W/mm²。该数据可以作为激光除障仪功率设计的参考。

3.2. 激光大气传输

实际应用中, 激光穿过一定距离的大气入射目标物前会产生衰减[20]。上一节测量了 CO₂ 激光有效切割塑料薄膜的功率密度, 因此继续以 CO₂ 激光为例, 研究激光在大气传输过程中的衰减问题, 使用 LOWERAN 软件对于 CO₂ 激光在不同天气下的衰减情况进行了仿真计算。大气对 10.6 μm 激光散射衰减主要是由大气中的气体分子和气溶胶的散射造成的, 本文从北京市在 1 月份与 7 月份的历史平均气象数值中, 选取了可视距离为 5 km、可视距离 0.2 km 且无云无雨、降水量 5 mm 的三种气象条件, 分别用以代表晴朗、雾霾、小雨这三类典型天气, 对 CO₂ 激光的 20 m 透射率做了仿真, 最终仿真结果如表 4 所示:

Table 4. 10.6 μm laser atmospheric transmission simulation in Beijing
表 4. 北京市 10.6 μm 激光大气传输仿真

仿真环境	一月平均透射率	七月平均透射率
晴朗天气	0.964	0.985
雾霾天气	0.640	0.635
小雨天气	0.747	0.750

从表 4 中可以看出，一月透射率与七月仿真透射率差异不大，说明温度对于激光的大气传输过程影响有限；晴朗天气下激光衰减不大，而雾霾与雨天下激光衰减较大。在雾霾与雨天下，影响较为明显的影响因素是气溶胶。由于在实验中对气溶胶参数进行控制较为困难，而湿度的上升会显著地使气溶胶的浓度上升[21]。因此实验了湿度对 CO_2 激光的传输影响，结果如图 4 所示，发现随相对湿度的增大，激光衰减程度也不断增大且衰减增速不断加快，这也从侧面验证了上述的仿真结果。

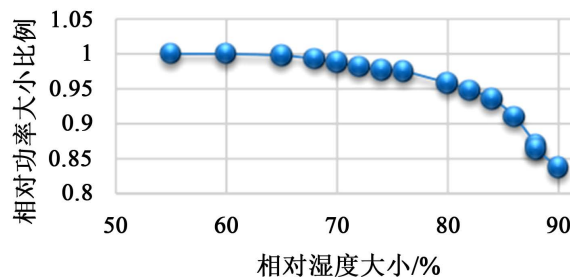


Figure 4. Effect of humidity on CO_2 laser atmospheric transmission
图 4. 湿度对 CO_2 激光大气传输影响

以透射率最低的 0.635 进行计算，假设在 20 m 处形成的光斑直径为 10 mm，为留有裕量，要求最低吸收光功率密度达到 0.6 W/mm^2 ，计算可得若需使用 CO_2 激光器切割 20 m 远处的 2 mm 厚透明塑料膜，出口功率应该不低于 74.21 W。

3.3. 绝缘子激光损伤阈值测定

增大激光功率密度固然可以提高除障效率，但为了保护电气设备，又需要将功率密度控制在某一个阈值以下。在实际的除障作业中，清除绝缘子表面覆冰是最常见的应用场景之一，并且绝缘子相比导线等其他设备也更容易受到激光辐照的损伤，因此有必要对绝缘子的激光损伤阈值进行测量。常用的绝缘子包括玻璃绝缘子、陶瓷绝缘子、复合绝缘子等不同类型，已有的研究大多只研究了瓷绝缘子的损伤阈值[22] [23]。本文对三类常见的绝缘子：玻璃绝缘子、陶瓷绝缘子和 HTV 硅橡胶绝缘子进行实验，研究了它们所能承受的最大光功率密度阈值。

以功率密度为 1.4 W/mm^2 的激光长时间照射玻璃绝缘子，既未损坏，也未出现烧蚀痕迹，这是因为激光在玻璃绝缘子中的透射率较高，被吸收的能量较少。

激光照射陶瓷绝缘子时，当激光功率超过某一阈值，会产生裂纹、表面脱釉、甚至断裂等损伤[18]。为确定此损伤阈值，对不同颜色的陶瓷绝缘子进行了反复的实验，结果如表 5 所示。

从表 5 中可以看出，当辐照时间为 1 min 时，棕色绝缘子安全阈值约 1.0 W/mm^2 ，白色绝缘子的安全阈值约 0.7 W/mm^2 。在实际操作中，若使激光不断移动而非静止在一点，这一安全阈值还能进一步提高。

复合绝缘子的损伤阈值远低于瓷绝缘子，在激光照射时易发生冒烟和燃烧的现象，损坏后的绝缘子呈现白色，不同功率密度下，硅橡胶绝缘子的实验结果如表 6 所示。

Table 5. Experimental data on laser power density thresholds of ceramic insulators**表 5.** 陶瓷绝缘子激光功率密度阈值实验数据

绝缘子颜色	激光功率(W)	功率密度(W/mm ²)	作用时间	激光作用后现象
棕色	55	1.1	1 min	表面轻微变黑, 基本可恢复
棕色	50	1.0	1 min	无明显现象
棕色	75	1.4	10 s	出现黑斑, 部分恢复
棕色	65	1.3	10 s	无明显现象
白色	35	0.7	1 min	无明显现象
白色	50	1.0	15 s	无明显现象

Table 6. Experimental data on laser power density thresholds of silicone rubber insulators**表 6.** 硅橡胶绝缘子激光功率密度阈值实验数据

激光功率(W)	功率密度(W/mm ²)	作用时间	激光作用后现象
9	0.18	1 min	不明显的小黑斑, 基本可恢复
8	0.16	1 min	无明显现象
16	0.32	10 s	不明显的黑斑, 几乎完全恢复
15	0.30	10 s	无明显现象

从表 6 中可看出, 激光持续照射 1 min 时, 硅橡胶绝缘子的损伤阈值约为 0.18 W/mm²; 当照射时间为 10 s 时, 绝缘子的损伤阈值增至 0.32 W/mm²。

4. 连续与脉冲激光除障效果的对比分析

脉冲激光可以分为两种, 一种开启后只在一个很短的时间间隔内有能量输出; 另一种每隔一定时间输出一束激光, 并形成一串脉冲。前者称为单脉冲输出, 后者则称为重频输出。相较于连续型激光器, 相同平均功率下, 脉冲型激光器瞬时功率峰值更高[24]。重复频率激光辐照下, 材料的烧蚀阈值比单脉冲激光辐照下的烧蚀阈值下降很多, 而激光除障领域主要关注的是重频输出的脉冲型红外激光器[25]。

连续激光器照射异物材料时, 异物表面温度连续上升; 脉冲激光照射异物材料时, 脉冲间隔期间, 材料上积累的热量会散失, 异物表面呈出“齿状”升温。激光入射材料时, 只有当光斑能量超过材料的烧蚀阈值, 即对材料产生不可逆的破坏时去除单层材料所需的能流密度时, 材料才能去除[26]。由于脉冲激光的瞬时功率更高, 更容易达到物质的烧蚀阈值, 相同平均功率下, 连续激光不能顺利切割时, 脉冲激光可能能够顺利切割。已有学者进行了利用重频率脉冲激光加热或者烧蚀不同材料的研究并指出, 相同平均功率下, 重频脉冲激光对材料的加热及烧蚀效应更明显[27]。但在实际使用中, 脉冲激光与连续激光, 究竟哪种除障效果更好, 还取决于作业时的环境条件、障碍物自身的物理性质等因素, 需要根据实际情况做具体的仿真或实验分析。

我们以脉冲型和连续型的 CO₂ 激光器进行了清除异物的实验验证, 所用的脉冲型激光器频率为 100 Hz, 在平均功率相同的情况下, 对纸与干木材这两种常见的异物材料进行了烧蚀实验, 实验结果如图 5 所示。

图 5(a)和图 5(b)中上方的斑痕均为脉冲激光作用, 下方的为连续激光作用, 明显均为上方的斑痕较大。在临界条件下, 脉冲功率的瞬时功率较高, 可以更快地达到物质的燃烧阈值。在相同平均功率下, 尤其是当不希望所用激光器功率过大时, 使用脉冲型激光器可能可以获得更好的清除异物效果。

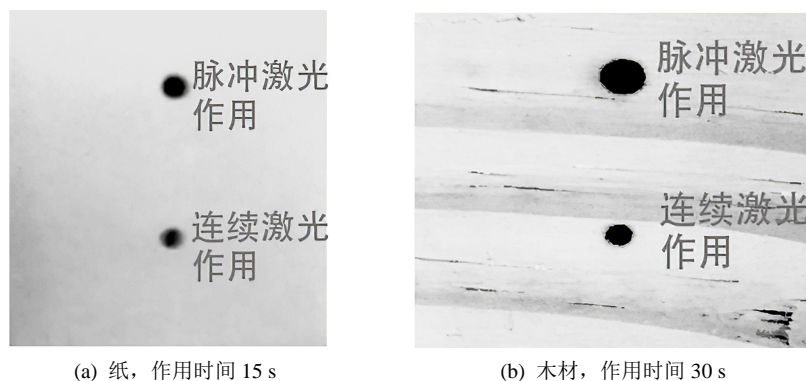


Figure 5. Comparison of ablation results using continuous and pulsed laser
图 5. 连续和脉冲激光器作用的烧蚀效果对比

5. 不同类型样机的研制与测试

基于上述的研究, 我们根据不同需求研制了可应用于不同场景下的除障样机, 下面分别做简要介绍。

CO₂ 激光器技术成熟、应用广泛, 其成本也较低。同时, 10.6 μm 的波长对非金属异物的切割效率相较其他波长的激光更高。CO₂ 激光除障仪可以用于处理风筝、塑料膜等大多数无机材料, 也可以用于清除线路覆冰, 但其光束质量较差, 通常用于 50~100 米, 较近距离障碍物的清除。

与 CO₂ 激光相比, 半导体激光器体积小、效率高, 更适合户外作业, 同时它的电光转化效率与光束质量更高, 波长相比 CO₂ 激光也更适合用于除冰。因此, 我们已研发了一种半导体激光融冰装置并进行了现场除冰实验, 成功清除了附着于绝缘子、导线、杆塔上的覆冰。但目前, 由于除冰效率不高、消耗能量较大, 激光除冰技术仍然有待改进与发展。

当清除异物时, 光纤激光器也是选择之一。尽管在对塑料薄膜等材料的吸收率低于 CO₂ 激光, 但实际使用中异物表面的污秽在一定程度上补偿了这一点。而光纤激光器在光束质量、电光转化效率、维护性等方面都优于 CO₂ 激光器, 近年来光纤激光器的成本也大幅下降了。我们研发了一种使用光纤激光器的除障装置, 可用于清理附着于线路上的塑料、风筝等常见异物, 同时因为其光束质量较好, 可用于 50~300 米, 较远距离障碍物的清除, 这类装置目前已在多地投入实际使用。除此之外, 我们还研制了一种便携式的激光除障仪, 整机重量仅为 6 kg, 可以用于城市铁路接触网或者山区等交通不便地区异物的快速处理。

6. 结语

激光除障的效果受到多种因素, 例如激光参数、作业环境条件、障碍物物理性质的影响。本文主要分析了激光波长、激光能量、激光功率密度、激光输出模式等激光参数对于除障效果的影响, 研究了绝缘子损伤的功率密度阈值问题, 研究了湿度、温度等环境因素对激光大气传输的影响。将理论分析与实验仿真的结论简要总结如下:

1) 激光波长会影响物质对激光的吸收率与穿透深度, 近红外波段的激光较适合于除冰, 而非金属异物对 CO₂ 激光的吸收效果更好。

2) 激光功率密度必须达到一定的阈值, 才可以有效清除障碍物; 在确定所用激光器功率时, 除障碍物本身性质外, 还必须考虑作业环境对激光大气传输的影响; 文中对利用 CO₂ 激光切割 2 μm 透明塑料薄膜进行了试验, 发现若希望达到 2 cm/s 的切割速度, 激光出口功率需至少达到 74.21 W。

3) 在确定作业的激光功率密度与辐照时间时, 必须考虑障碍物附近的电力设备(如绝缘子)的损伤阈值。当辐照时间为 1 min 时, 白色瓷绝缘子的安全阈值为 0.7 W/mm², 硅橡胶绝缘子的为 0.18 W/mm²。

4) 当平均功率相同时, 使用脉冲型激光器清除障碍物可能比使用连续型激光器效果更好。

5) 根据所用激光器的不同, 目前已有适用于不同场合的多种除障设备。其中, CO₂ 激光器对非金属异物的清除效果较好, 但光束性能较差, 通常用于清除 50~100 m 的障碍物; 半导体激光器与光纤激光器相比之下光电转换性能与光束质量都更好, 可用于较远距离的异物与覆冰清除。

激光技术能够有效清除影响电网工作的各类障碍物, 将来, 随着大功率激光器性能与成本的不断进步与光学系统的改良, 这一技术将在电气工程领域得到更为广阔的应用。

参考文献

- [1] 侯福营. 电网输电线路故障原因与对策分析[J]. 集成电路应用, 2020, 37(4): 144-145.
- [2] 蒋明, 赵汉棣, 马小强. 高压输电线路覆冰及防冰、除冰技术综述[J]. 电力安全技术, 2020, 22(4): 26-32.
- [3] 黄程, 马珂. 基于激光技术的接触网异物除障器研究及应用[J]. 电气化铁道, 2019, 30(5): 89-90+93.
- [4] 范杨, 张鼎, 程绳, 等. 基于线激光技术的输电线路树障清除装置研制及应用研究[J]. 湖北电力, 2020, 44(5): 65-70.
- [5] 陈安, 马永增. 输电线路智能除异物装置的研制与应用[J]. 电工电气, 2019(12): 59-62.
- [6] 巢亚锋, 岳一石, 王成, 等. 输电线路融冰、除冰技术研究综述[J]. 高压电器, 2016, 52(11): 1-9+24.
- [7] 齐丽君. 输电线路激光除冰的理论与实验研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [8] 刘磊. 脉冲激光与冰相互作用研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [9] 陈杰, 梁伟, 张志坚, 等. 架空线路异物激光清除技术研究[J]. 激光技术, 2017, 41(5): 659-663.
- [10] 徐北方, 冯军淼. 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.
- [11] 陈胜, 张贵新, 徐曙光, 等. 电网中激光除冰技术分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51(1): 47-52.
- [12] 赵宇明, 张贵新, 罗兵, 等. 大功率半导体激光除冰技术[J]. 南方电网技术, 2011, 5(5): 60-64.
- [13] 陈胜. 激光技术在电网中的除冰应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2010.
- [14] 谢宏, 邓磊, 陈诚, 等. 激光技术对架空线路塑料薄膜异物处理特性的研究[EB/OL]. 北京: 中国科技论文在线. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201705-1341>, 2017-05-25.
- [15] 陈陶. 激光与物质热作用过程的数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [16] 万敏, 杨锐, 路大举, 邹凯, 冷杰, 余鸿铭, 苏毅, 胡晓阳, 杜祥琬. 利用激光为架空高压输电线路除冰的方法[P]. 中国专利, CN101325321. 2008-12-17.
- [17] 龚正烈. 用 CO₂ 激光束切割非金属材料[J]. 激光与光电子学进展, 1979(9): 38-42.
- [18] 樊心民, 郑义, 孙启兵, 等. 90/10 刀口法测量激光高斯光束束腰的实验研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(6): 541-543.
- [19] 杨晓冬, 邵建新, 廖生鸿, 等. 刀口法测量高斯光束光斑半径研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(8): 829-832.
- [20] 孙硕, 刘超. CO₂ 激光大气传输特性及估算方法研究[J]. 科技资讯, 2013(16): 194-197.
- [21] 韩道文, 刘文清, 张玉钧, 等. 温度和相对湿度对气溶胶质量浓度垂直分布的影响[J]. 中国科学院研究生院学报, 2007, 24(5): 619-624.
- [22] 齐丽君, 朱晓, 朱长虹, 郭飞, 朱广志, 谷山强. 瓷绝缘子表面激光损伤的数值模拟和实验研究[J]. 激光技术, 2011, 35(6): 844-848.
- [23] 方春华, 周秋雨, 李景, 等. 瓷质绝缘子表面激光辐射温度和应力特性研究[J]. 高压电器, 2019, 55(6): 151-156+163.
- [24] 江伟, 谢小柱, 魏昕, 胡伟, 任庆磊, 翁清. 脉冲光纤激光控制断裂切割超薄钛酸锶陶瓷基片[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 91-99.
- [25] 郑直, 蒋晓东, 祖小涛, 黄进, 王凤蕊, 刘红婕, 周信达, 李春宏, 魏晓峰, 郑万国. 重频脉冲激光辐照光学材料特性的研究进展[J]. 材料导报, 2010, 24(23): 8-12.
- [26] 张著军. 天然金刚石刀具的激光切割技术研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [27] 胡鹏, 陈发良. 重复频率脉冲激光辐照金属材料热效应模拟分析[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 43-49.