

电网异物激光清除器对导线的安全性研究*

梁伟¹ 陈杰¹ 周志成¹ 刘洋¹ 王小军² 张华良³

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究所 南京 211103; 2. 北京北创芯通科技有限公司 北京 100176;
3. 中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016)

摘要 对激光辐照线路导线的安全影响进行了多物理场有限元仿真和实验研究。仿真结果表明清异激光引起的温度升高不会造成钢芯涂镀层、铝线、钢芯线损坏;激光辐照架空线路铝导线实验结果表明,清异激光对铝导线体表无微观和宏观可见损伤,对铝导线电学和抗拉强度性能几乎没有影响。

关键词 异物清除 激光 温度 抗拉强度 多物理场有限元仿真

Effect of Laser – cleaner for Overhead Line Foreign Body on Overhead Conductors

LIANG Wei¹ CHEN Jie¹ ZHOU Zhicheng¹ LIU Yang¹ WANG Xiaojun² ZHANG Hualiang³

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute Nanjing 211103)

Abstract Multi – physics finite element simulation and experiments are carried out to research the safety of lines under laser irradiation. The simulation results show that the temperature rise caused by laser irradiation is unable to damage the metal coating of steel cored wire , aluminum wire and steel core wire. The experiment results of laser irradiates aluminum wire show that there is no macroscopic or microscopic visible damage on the aluminum wire after irradiated by the laser for laser – cleaner , and almost no effect on the electrical properties and tensile strength.

Key Words foreign body cleaning laser temperature tensile strength multi – physics finite element simulation

0 引言

架空输电线路分布面广,跨度大,线路长,沿线环境复杂,风筝、广告条幅、遮阳网等漂浮性异物缠绕架空线路事件频发,常引发相间短路、单相接地、放电,造成跳闸、停电、线路设施损坏等事故,垂落的异物和烧断损毁的导线可造成人畜伤亡,漂浮性异物已成为架空输电网络最大的安全危害之一。目前,清除架空路线异物的方法^[1-2]主要基于绝缘杆、异物清除杆、登高车、斗臂车、吊篮等工具,普遍具有耗时长、作业难度大、风险高、需停电作业等缺点。

基于定向能激光的新型电网异物清除器采用地对空的方式,发射激光对空中异物进行远程扫描切割,实现带电清除异物^[3-4],具有快速、方便、安全的特点,尤其在高电压等级线路异物的清除方面,由于可远程清除、可带电作业、无需攀爬杆塔,具有极大的技术优势,对于提高电力巡检部门的智能化水平和工作效率,降低安全风险和运营成本具有重要而现实的意义。

清除异物用激光(以下简称清异激光)在清除异

物时难免会辐照导线,有时甚至需要沿导线远程切割异物缠绕导线的部位,因此激光辐照引起的温度升高和不均匀分布可能对导线造成电学故障和力学性能退化,本文采用 COMSOL Multiphysics 多物理场有限元仿真和实验研究清异激光辐照对导线的安全影响。

1 电网异物激光清除器原理和介绍

架空线路上的异物大部分为非金属材料的塑料和化纤制品,异物激光清除器在地面上发射激光辐照异物的重力支撑部位、缠绕导线部位或黏附部位,使异物被辐照部位吸收激光造成局部温度急剧升高后熔化或气化、燃烧^[5-6],通过控制激光束移动进行切割使之掉落,达到远程清除异物的目的。

电网异物激光清除器采用出光功率约 100 W 的 10.6 μm 波段激光;为保证足够的激光能量密度,采用扩束准直聚焦镜头对激光光束进行整形处理,使作用范围内的光斑尺寸为 20 ~ 30 mm;采用同轴可见光光路,将可见光与红外光合束输出,可见光光斑所在位置就是红外光辐照位置。光路结构如图 1。异物激光清除器实物和示意如图 2 所示。

* 基金项目:国家自然科学基金(61233007) 国网江苏省电力公司科技项目(J2015023)。

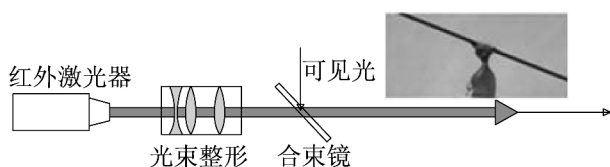


图1 光路原理

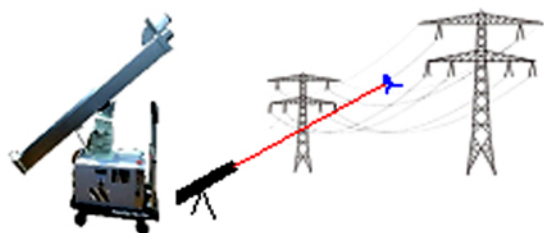


图2 电网异物激光清除器

2 激光辐照导线安全影响仿真

2.1 激光辐照导线有限元仿真原理和模型

架空导线类型较多,如硬铝线、钢芯铝绞线、铝合金线、铝包钢绞线等,低电压等级的架空线路异物一般离地面高度较低,采用普通清异工具和方法即可清除,激光清异设备的优势在于高电压等级线路异物带电清除,高电压等级线路中,钢芯铝绞线使用最广泛,具有一定代表性,因此本文主要以钢芯铝绞线(Aluminium Conductors Steel-Reinforced, AC-SR)为研究对象,采用 LGJ-70/10 和 LGJ-300/20 两种钢芯铝绞线进行激光辐照仿真分析和实验研究,具体规格参数见表 1。

表 1 两种钢芯铝绞线规格参数

标称截面 铝/钢/mm ²	结构(根数/直径)/mm		外径/mm	最大连续 载流量/A
	铝	钢		
70/10	6/3.8	1/3.8	11.4	255
300/20	45/2.93	7/1.95	23.43	655

铝绞线或钢芯铝绞线芯线之间存在空隙,为了便于计算仿真,不计芯线之间的空隙,并且认为材料各向同性,由于钢芯涂镀层厚度较小,可忽略不计,建立如图 3 所示几何模型,长度 $L=1\ 000\ \text{mm}$,内部圆柱为钢芯线。

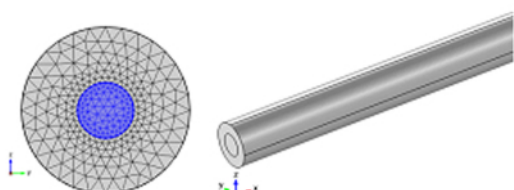


图3 钢芯铝绞线几何仿真模型

仿真模型尽量考虑实际运行状况下的环境条件,并根据极端原则选取和设定相关参数。载流导线因电流产生焦耳热,同时吸收日照能量升温,清异激光对导线作用时,金属导线被辐射部位吸收激光能量并

转换成热能,通过热传导将热量传到导线其它部位,导线通过热辐射、空气自然对流散热、强制对流散热将热量发散到空气中,最终达到热平衡,为使仿真条件尽量极端化,仿真中不考虑强制对流散热。

仿真中设定电流为相应规格导线的最大连续载流量,频率为 50 Hz;电导率随温度变化;日光从正上方辐照导线,激光从正下方辐照导线。清异激光功率 100 W;为使仿真条件极端化,取光束直径为 20 mm;光斑呈高斯分布;不考虑不同入射角下的激光吸收率差异,认为所有被辐照位置吸收率与正入射时的吸收率一样。

钢芯铝绞线内部的钢芯线,承担了主要的抗拉作用,钢芯线容易遭受腐蚀,因此在钢芯线上一一般镀锌或镀铝,外层为铝绞线,由于趋肤效应等原因,电流主要通过铝绞线传导。激光辐照钢芯铝绞线时,外层铝绞线被辐照位置直接遭受激光光热作用导致温度升高,通过热传导将热量向内部钢芯线及其涂镀金属层传递,导致镀铝层或镀锌层、钢芯温度升高,激光辐照导线最终可能导致:①镀铝层或镀锌层在高温下损坏,钢芯失去保护,加速腐蚀速度;②外层铝绞线电导率降低,局部电阻变大,局部载流温升加剧,高温熔断或损伤;③外层铝绞线高温熔化受损,甚至出现断股,屈服强度和抗拉强度降低,导电能力降低甚至失效;④钢芯线屈服强度和抗拉强度降低甚至失效。

2.2 激光吸收率对辐照结果的影响

室温下光洁表面铝对 $10.6\ \mu\text{m}$ 激光的吸收率为 0.019^[5],架空导线吸收率与导线工艺、使用环境、服役时间等复杂因素相关,难以给出普遍适用的确切数值。不考虑吸收率随温度变化的情况,不考虑载流温升和日照温升,通过上述模型参数仿真得出 LGJ-70/10 和 LGJ-300/20 导线受清异激光辐照点最高温度与吸收率的关系曲线如图 4,可以看出,导线最高温度随吸收率增大而升高,同等辐照和吸收率条件下,导线直径越大,最高温度越低。

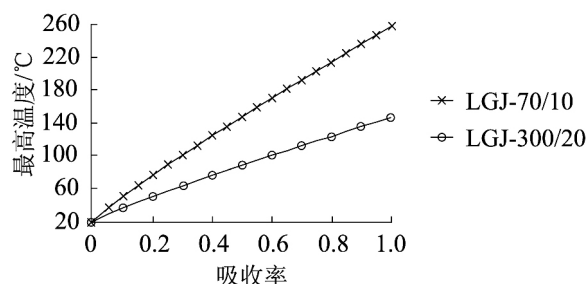


图4 吸收率与最高温度的关系

2.3 激光辐照对导线各金属层的影响

对激光辐照两种规格导线进行有限元仿

真 电流分别为 655 A 和 255 A ,日光照能量密度为 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$,日光吸收率 $0.5^{[7]}$,激光吸收率取极端数值 100% ,仿真结果如图 5 和图 6。

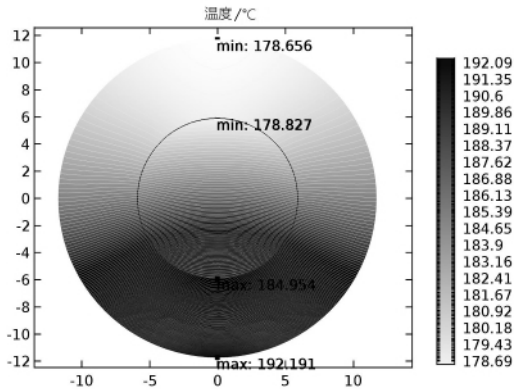


图 5 LGJ-300/20 钢芯铝绞线辐照点位置截面温度分布

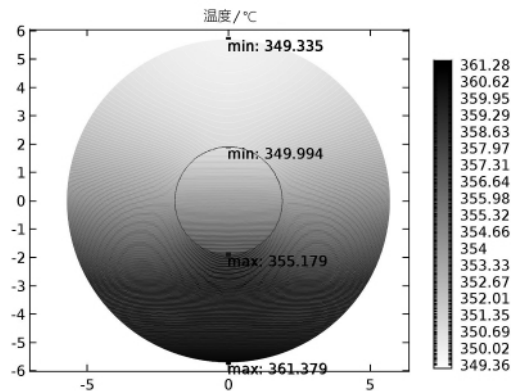


图 6 LGJ-70/10 钢芯铝绞线辐照点位置截面温度分布

图 5 为 LGJ-300/20 钢芯铝绞线辐照点位置截面温度分布图 ,在激光辐照点截面上 ,最高温度 $192.191\ \text{°C}$,最低温度 $178.656\ \text{°C}$,钢芯线上最高温度为 $184.954\ \text{°C}$;图 6 为 LGJ-70/10 钢芯铝绞线辐照点位置截面温度分布图 ,最高温度 $361.379\ \text{°C}$,最低温度 $349.335\ \text{°C}$,钢芯线上最高温度为 $355.179\ \text{°C}$ 。根据表 2 可知 ,两种规格导线的钢芯线上最高温度分别为 $184.954\ \text{°C}$ 和 $349.335\ \text{°C}$,小于镀锌层或镀铝层熔点 ,达不到熔化损伤涂镀层的温度 ,远小于钢的熔点 ,对钢芯无法造成损伤 ;铝绞线上最高温度分别为 $192.191\ \text{°C}$ 和 $361.379\ \text{°C}$,达不到熔化损伤铝绞线的温度。

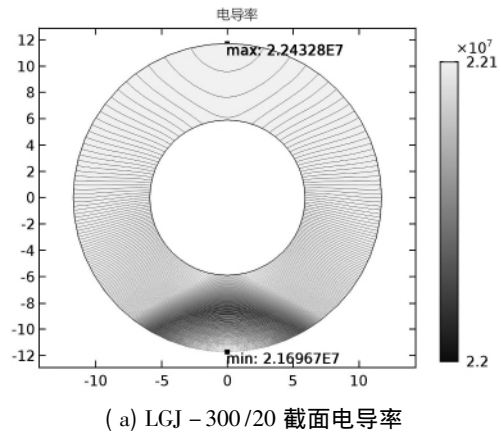
表 2 金属材料的热物理参数^[8]

材料	热导率/ $\text{W} \cdot (\text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	比热容/ $\text{J} \cdot (\text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})$	熔点/ °C
碳钢	35 ~ 81	455 ~ 480	1 300 ~ 1 400
锌	113	382	420
纯铝	247	900	600
铝合金	100 ~ 247	904	500 ~ 600

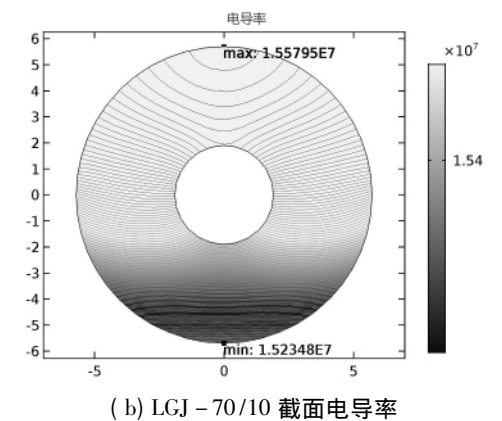
2.4 电导率和电流密度分布影响

铝的电导率约为 $3.73 \times 10^7\ \text{S}/\text{m}$,随着温度的升

高 ,电导率会发生相应的变化 ,图 7 为 LGJ-300/20 和 LGJ-70/10 导线电导率在激光作用下的分布图。



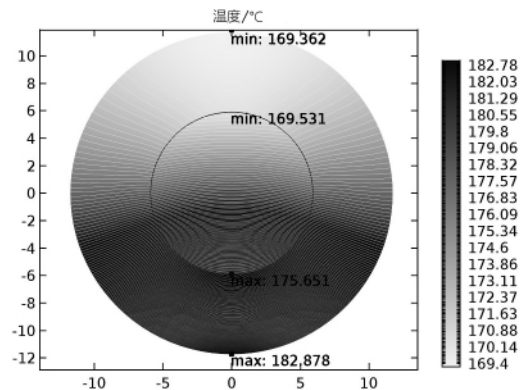
(a) LGJ-300/20 截面电导率



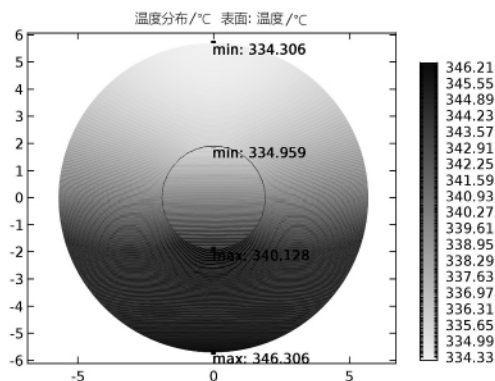
(b) LGJ-70/10 截面电导率

图 7 导线截面电导率分布

由图 7 可见 ,电导率随温度的升高而降低 ,激光辐照导线引起温度升高和不均匀分布 ,导致电导率的降低和不均匀分布 ,由于总电流可认为是恒定值 ,电导率的变化将造成进一步的载流温升 ,图 8 为无电流时激光辐照两种导线温度分布 ,最高温度分别为 $346.306\ \text{°C}$ 和 $182.878\ \text{°C}$,有电流情况下温度为 $361.379\ \text{°C}$ 和 $192.191\ \text{°C}$,两种情况下的温差为 $15\ \text{°C}$ 和 $9.3\ \text{°C}$,可见 ,载流温升对导线温度的影响较小 ,电导率的变化以及相应的载流温升对于导线的运行无显著影响。



(a) LGJ-300/20 截面温度



(b) LGJ-70/10 截面温度

图8 无电流时辐照点位置 yz 截面温度分布

3 激光辐照后的铝导线的性能影响实验

激光灼烧清除异物所需时间一般为 10 ~ 1 800 s, 实际辐照导线同一位置的时间为 1 ~ 30 s。理论上, 单根铝线散热能力和热容低于多根铝绞线, 因此如果单根铝线能够承受住某一功率密度的激光辐照, 多根铝绞线必然能承受住这一功率密度激光辐照。直接受激光辐照的铝导线在辐照后的性能影响通过采用前述两种型号的铝绞线上的单股铝线进行实验研究。

3.1 近距离下激光对导线的影响分析

采用电网异物激光清除器在距离出光口 5 cm 处进行激光烧蚀单股铝线试样试验, 激光光束不整形, 光束半径约为 3.5 mm, 激光功率 100 W, 辐照时间分别为 1, 5, 10 min, 每个时间段下的不同型号的导线试样数量均为 3 根, 所有试验结果均为 3 根试样的算术平均值。对辐照前后的单根铝线进行电阻率试验、机械拉断试验^[9]和显微观察试验。

(1) 电阻率试验。近距离下激光辐照前后的电阻率测量结果见表 3。

表3 近距离下激光辐照前后的电阻率测量结果

试样名称	辐照时间/min	辐照前 ρ_{20} / (nΩ·m)	辐照后 ρ_{20} / (nΩ·m)	电阻率变化的绝对值
70/10	1	29.007	28.967	0.040
70/10	5	29.002	29.275	0.273
70/10	10	29.547	29.947	0.400
300/20	1	29.269	30.491	1.222
300/20	5	28.959	30.246	1.287
300/20	10	29.140	29.907	0.767

通过表 3 可以看出, 近距离下激光辐照前后单股铝线的电阻率有一定变化, 但变化不大, 最大变化百分比为 4%, 考虑到仪器固有误差和误差允许范围, 电阻率变化在可接受范围内。

(2) 机械拉断力试验。机械拉断力试验结果见表 4。

表4 机械拉断力试验结果

试样名称	辐照时间/min	最大拉伸力/MPa	标准要求的最小值/MPa
70/10	0	169.4	152
70/10	1	160.7	152
70/10	5	153.0	152
70/10	10	155.7	152
300/20	0	206.7	160
300/20	1	190.1	160
300/20	5	192.8	160
300/20	10	186.7	160

通过表 4 可以看出, 在 3.5 mm 半径的激光光束辐照下两种导线随着辐照时间的增加, 抗拉强度均有一定程度的减弱, 但依然满足标准^[9]要求。抗拉强度的减弱由高温蠕变引起^[10-11]。

(3) 显微观察试验。对比分析辐照一段时间 (10 min) 前后的两种规格单股导线显微观察, 辐照前后导线的表面显微图像上无明显变化。

3.2 远距离下激光对导线的影响分析

整形后的远距离清异激光光束直径为 20 ~ 30 mm, 在 10 m 和 20 m 处对两种规格导线的单股铝线进行辐照实验, 光束直径为 20 mm。

(1) 电阻率试验。远距离下激光辐照前后的电阻率测量结果见表 5。

表5 远距离下激光辐照前后的电阻率测量结果

试样名称	时间/min	作用距离/m	辐照前 ρ_{20} / (nΩ·m)	辐照后 ρ_{20} / (nΩ·m)	变化绝对值
70/10	5	10	30.199	30.156	0.043
70/10	10	10	29.132	29.213	0.081
70/10	5	20	29.582	29.825	0.243
70/10	10	20	29.488	29.451	0.037
300/20	5	10	30.020	30.513	0.493
300/20	10	10	30.293	30.271	0.022
300/20	5	20	30.129	30.595	0.466
300/20	10	20	30.550	30.994	0.444

通过表 5 可以看出, 远距离下激光辐照前后单股铝线的电阻率变化较小, 最大变化百分比为 1.6%, 考虑到测量仪器固有偏差和误差允许范围, 电阻率变化可以忽略不计。

(2) 机械拉断力试验, 机械拉断力试验结果见表 6。

表6 机械拉断力试验结果

试品名称	辐照距离/m	辐照时间/min	最大拉伸力/MPa	标准要求的最小值/MPa
70/10	-	-	169.4	152
70/10	10	5	166.9	152
70/10	10	10	162.0	152
70/10	20	5	160.6	152
70/10	20	10	166.3	160
300/20	-	-	206.7	160
300/20	10	5	194.4	160
300/20	10	10	205.2	160
300/20	20	5	211.9	152
300/20	20	10	214.7	152

通过表6可以看出,对于钢芯铝绞线 LGJ-70/10 和 LGJ-300/20 的单股铝线,远距离长时间激光辐照下的最大拉伸力均大于标准值且没有明显的变化规律,因此,远距离(10 m 和 20 m)下激光辐照对钢芯铝绞线的抗拉强度性能没有明显影响。

(3) 显微观察试验,在出光距离 20m 的情况下,辐照一段时间(10 min)前后的单股导线显微观察结果,辐照前后导线的表面显微图像上无明显变化。

4 结语

采用极端原则设定环境参数和属性参数,对激光辐照架空导线进行了多物理场有限元仿真,实际情况下,导线对激光的吸收率远远达不到 100%,入射角的变化会使总吸收率降低,空中导线在风的作用下存在强制对流散热,因此清异激光实际辐照导线时,导线温升小于仿真结果。由仿真结果可知,清异激光辐照钢芯铝绞线导致的温度升高小于镀锌层或镀铝层熔点,不会破坏钢芯外层保护,更不能导致铝线或钢芯金属熔化;仿真结果显示激光辐照导致的温升和不均匀分布引起导线局部电导率的降低和不均匀分布,电导率降低造成载流导线温度进一步升高,但升高的幅度较小,对导线运行安全影响不大。

对 2 种钢芯铝绞线的单股铝导线进行实验测试结果表明,近距离位置未整形激光光束功率密度较大,导线被辐照后,电阻率变化非常小,高温蠕变对导线抗拉强度有一定影响,但未超出标准要求范围;

远距离下清异激光功率密度较低,对单股导线的电阻率和最大拉伸力等性能几乎没有影响。

因此,电网异物激光清除器所发射的激光,对架空导线影响有限,不会造成导线损伤,不会严重影响在运导线的电学性能和机械性能,清异激光对导线是安全的。

参考文献

- [1]刘明亮,杨厚峰.导线易漂浮物清除工具的研制与应用[J].自动化博览,2011(2):185-187.
- [2]王昌幼.输电线路导线异物处理方法[J].青海电力,2014,33(1):20-22.
- [3]梁伟,陈杰,刘洋,等.清除架空线路异物的新型装置及其试验研究[J].中国电机(技术版),2015(9):57-59.
- [4]李鸿泽,陈光,刘洋,等.架空线路典型导线与异物激光烧蚀特性试验研究[J].高电压技术,2015,41(S):107-111.
- [5]READY J F. Industrial applications of lasers [M]. New York: Academic Press, 1997: 320-330.
- [6]Laser Institute of America. LIA handbook of laser materials processing [M]. New York: Laser Institute of America, 2001: 182.
- [7]柳亚芳.基于参数辨识的架空导线载流温升热路模型研究[D].南京:南京理工大学,2015.
- [8]任志俊,薛国祥.实用金属材料手册(精)[M].南京:江苏科技出版社,2007.
- [9]铝绞线及钢芯铝绞线:GB 1179-83[S].
- [10]李力,刘厚满,文中.输电线路受外力破坏应变监测方法研究[J].工业安全与环保,2011,37(5):30-32.
- [11]KIM S D, MORCOS M M. Mechanical deterioration of ACSR Conductors due to forest fires[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(7): 63-63.

作者简介 梁伟,男,1988年生,硕士,工程师,从事输电线路技术研究。

陈杰,男,1984年生,博士,高级工程师,从事输电线路技术研究。

周志成,男,1977年生,博士,高级工程师,从事输变电技术管理工作。

刘洋,男,1982年生,博士,高级工程师,从事输电线路技术研究。

(收稿日期:2016-09-21)