

模拟树冠火条件下导线-板空气间隙直流击穿特性

李文荣¹, 杨跃光¹, 毕吉禹², 黄道春², 王华清², 罗瑞杰²

(1. 中国南方电网超高压输电公司电力科研院, 广州 510062; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072)

摘要: 为研究树冠火条件下的导线-板电极空气间隙直流击穿特性, 搭建松树木垛火与树冠火条件下 5 m 导线-板电极空气间隙击穿放电试验平台, 研究两种火焰形态不同燃烧阶段的燃烧特性与间隙直流击穿特性, 分析火焰高度与间隙击穿电压的关系, 并通过回归分析给出拟合表达式。研究结果表明: 不同燃烧阶段, 树冠火对导线-板电极空气间隙绝缘强度影响程度不同; 最大火势阶段, 松树木垛火平均击穿电压梯度为 104.5 kV/m, 松木树冠火平均击穿电压梯度为 84.7 kV/m, 分别为同海拔下空气间隙平均击穿电压梯度的 38.9% 与 31.6%; 松树木垛火与树冠火的间隙平均击穿电压梯度与火焰高度有良好的线性关系, 对比松树木垛火与树冠火间隙直流击穿电压值, 火焰区的温度与高度导致的火焰特性差异对间隙绝缘强度的影响弱于烟雾区中烟雾颗粒特性差异对间隙绝缘强度的影响。研究结果可为输电线路山火短路击穿风险评估提供指导。

关键词: 输电线路; 树冠火; 燃烧特性; 击穿特性; 击穿电压; 平均击穿电压梯度

DC Breakdown Characteristics of Conductor-Plane Air Gap Under Simulated Crown Fire Condition

LI Wenrong¹, YANG Yueguang¹, BI Jiyu², HUANG Daochun², WANG Huaqing², LUO Ruijie²

(1. Electric Power Research Institute, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510062, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to study the DC breakdown characteristics of the conductor-plane air gap under the crown fire conditions, a 5 m air gap conductor-plane breakdown test platform is set up. The combustion characteristics and the DC breakdown characteristics of the air gap of pine crib fire and crown fire at different combustion phases are studied. The relationship between the flame height and the breakdown voltage of the gap is analyzed and fitting equations are given through regression analysis. The results show that: at different combustion phases, the crown fire has different impacts on the insulation strength of the air gap between the conductor and the plane; at the maximum combustion phase, the average breakdown voltage gradient of the pine crib fire is 104.5 kV/m, and the average breakdown voltage gradient of the pine crown fire is 84.7 kV/m, which is 38.9% and 31.6% of the average breakdown voltage gradient of the air gap at the same altitude, respectively. The average breakdown voltage gradient of the gap has a good linear relationship with the flame height. Comparing the DC breakdown voltage between the pine crib fire and crown fire, the influence of the difference in flame characteristics between the temperature and height of the flame zone on the insulation strength of the gap is weaker than the influence of the difference in the characteristics of the smoke particles in the smoke zone on the insulation strength of the gap. The results could provide guidance for risk assessment of short-circuit breakdowns on transmission lines under forest fire conditions.

Key words: power transmission line; crown fire; combustion characteristic; breakdown characteristic; breakdown voltage; average breakdown voltage gradient

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51677138); 中国南方电网有限责任公司科技项目(CGYKJXM20220105)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51677138); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (CGYKJXM20220105).

0 引言

我国能源与负荷中心呈逆向分布,需要远距离、大容量传输电能^[1-3]。截至2022年12月,我国220 kV及以上电压等级输电线路累计长度达87.6万km^[4]。超、特高压输电工程跨越范围广,输电通道沿线地理环境复杂多变,途经森林、山地、草原等山火频发区域^[5-7]。据统计,南方电网2015—2020年110 kV及以上电压等级交直流输电线路共发生377次山火跳闸事故^[8],山火是威胁输电线路安全稳定运行的重要因素之一^[9-11]。

山火燃烧带来的高温、高电导率以及多种灰烬颗粒会导致输电线路空气间隙绝缘水平显著下降,易导致输电线路发生跳闸事故且重合闸成功率低^[12]。目前,国内外针对植被火引发的架空输电线路击穿放电故障已有相关研究,文献[13-19]分别研究了火焰高度、植被种类、灰烬颗粒、海拔等因素对导线间隙击穿特性的影响,目前输电线路间隙击穿特性已有研究结论主要基于木垛火条件下,未见考虑树冠火燃烧特性的导线-板电极间隙击穿特性研究。

已有关于树冠火的研究多集中于树冠火的燃烧特性。赵凤君等研究了树冠火发生机制以及燃烧特征,认为树冠火产生的强大对流柱是引起火势快速蔓延的重要原因^[20]。牟春杰针对单树树冠火进行试验研究,开展了含水率、树高以及树种三因素对于单树树冠火燃烧特性影响的研究,火持续时间随含水率增加而增加,火持续时间随树高的增加而降低^[21]。树冠火作为一种特殊的山火燃烧形式,其火焰燃烧特性异于木垛火,以往研究多采用木垛火模拟山火条件下导线-板电极间隙击穿特性,为更接近工程实际,需开展模拟树冠火条件下导线-板电极间隙击穿特性研究。树冠火燃烧以及蔓延速度快,对输电线路危害较大^[22],因此有必要分析树冠火火焰燃烧特性对导线-板电极间隙击穿特性的影响。本文搭建了长间隙山火击穿模拟试验平台,以云南松作为高风险植被,开展了木垛火与树冠火条件下导线-板电极5 m间隙直流击穿试验,对比分析木垛火与树冠火条件下导线-板电极间隙直流击穿特性,研究成果可为架空输电线路山火短路击穿风险评估提供指导。

1 试验设置

1.1 试验平台及布置

树冠火条件下的间隙击穿特性试验平台布置如图1所示,采用导线-板电极间隙模拟实际输电线路中极-地间隙,模拟导线通过绝缘子吊装在空中进行试验,间隙距离通过控制行吊高度精确调节,板电极通过耐火绝缘材料与地面隔开。模拟导线电极水平放置在板电极正上方;方形植被垛与模拟树冠放置在可靠接地的板电极中心,位于模拟导线中心下方。试验过程通过一台水平布置的可见光摄像机全程记录,摄像机所处位置可无死角地记录火焰整体形态与击穿过程。使用红外热像仪与可见光摄像机并列摆放,可同步记录试验平台及间隙温度,并可配合软件提取试验全过程任意点位温度,量程0~2 000 ℃。试验中的火焰、烟雾高度通过摄像机拍摄的图像与垂直放置的标尺比对得到,间隙击穿电压通过分压器采集。

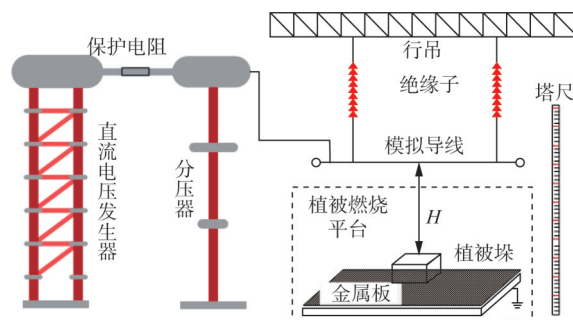


图1 试验平台布置图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental platform

直流试验电源额定电压 $\pm 1\ 600\text{ kV}$,额定电流50 mA。所用分压器测量比为1 000 : 1,电压测量误差小于3%。选用模拟LGJ-400/50型导线作为模拟导线,采用钢管焊接为四分裂导线;导线两端为减小电场畸变均焊接有均压环。板电极采用厚度为5 mm的钢板并与槽钢焊接。

1.2 试验方法

云南松为南方电网山火跳闸典型高风险植被^[12],搭建松树树冠火模拟试验平台与木垛火模拟试验平台,开展间隙直流击穿特性对比试验研究。为模拟单树树冠部分燃烧特性,忽略对树冠火燃烧特性影响较小的单树树干部分。搭建树冠火的火焰燃烧特性模拟试验平台如图2(a)所示:选取当日切

割、枝条长度各异的树冠枝条, 堆叠固定于同树种的木质框架之中, 每次试验保持模拟试验平台中的树冠体积与实际单树树冠体积接近, 并在树冠火模拟试验平台框架底端平铺三层稀疏木条作引燃物, 模拟树冠部分整体尺寸约为 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 2\text{ m}$ 。搭建木垛火模拟试验平台如图 2(b) 所示, 将松木加工为标准木条并摆放呈立方体木垛, 与模拟树冠相比, 木垛木质紧密且湿度低, 燃烧时木垛内各向热量传递均匀且热释放速率更高。为保证木垛火与树冠火燃烧特性对比有效, 基于前期木垛燃烧试验数据与单树树冠火燃烧调研结果, 在保证每次试验模拟树冠体积与实际单树体积一致的前提下, 调整木垛摆放方式与尺寸, 使得最大火势阶段的木垛火与模拟树冠火火焰高度接近。木垛布置方式如下: 木垛每层摆放 8 根木条, 共摆放 18 层, 整体尺寸为 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ 。



(a) 松树树冠火模拟试验平台



(b) 松树木垛火模拟试验平台

图 2 树冠火与木垛火试验平台

Fig. 2 Crown fire and crib fire experiment platform

试验中选取的间隙距离为模拟导线最低点到板电极的高度, 参考超特高压直流输电通道山火高发区域输电导线对地距离^[23], 并考虑松树树冠火、木垛火火焰高度, 选取间隙距离为 5 m 开展试验。

1.3 试验步骤

树冠火与木垛火对输电线路间隙击穿特性影响对比试验步骤如下。

1) 按照图 2 所示分别搭建试验平台, 将分裂导线通过绝缘子悬挂在板电极中心正上方;

2) 调整可见光摄像机拍摄位置到试验平台正前方, 调低光圈大小, 可见光摄像机选用高帧率模

式, 将红外热像仪与可见光摄像机并列摆放;

3) 通过塔尺调节模拟导线-板间隙距离, 树冠火模拟装置放置于板电极中心, 导线与板电极平行且位于植被垛正上方, 调节导线-板电极间隙距离为 5 m ;

4) 向平台底部引燃木条泼洒适量汽油并引燃, 汽油首先燃烧, 并将枝条引燃, 后开启摄像机, 拍摄试验平台与间隙试验现象;

5) 采用直接升压法对间隙进行加压, 记录加压过程中出现击穿现象时的试验参数和击穿电压;

6) 清理灰烬, 搭建新的树冠模拟平台, 重复试验。

松树树冠枝叶为典型针叶结构, 枝条与叶子含油量高于常见阔叶植物而燃烧阶段变化较快, 松木垛燃烧时间相对较长, 综合考虑试验数据分散性与试验数据获取速度, 本试验采用直接升压法开展试验^[15], 升压速度为 $6 \sim 7\text{ kV/s}$, 选取树冠火、木垛火火焰发展典型阶段, 施加电压直至导线-板电极间隙击穿, 并重复加压、击穿。

2 两种火焰类型燃烧特性分析

2.1 松树树冠火火焰燃烧特性

按照实验步骤开展试验, 使用新鲜云南松搭建树冠火燃烧试验平台, 云南松的树叶为针叶, 单片针叶较长, 约 $5 \sim 8\text{ cm}$, 成簇分布; 单簇树叶排列密集, 簇与簇之间、枝条与枝条之间分布较稀疏。使用德力西木材水分检测仪测量松树枝条湿度, 仪器测量范围为 $5\% \sim 70\%$, 分辨率为 0.1% , 可自动补偿环境温度。新鲜云南松枝条平均湿度为 57.0% , 云南松木条平均湿度为 15.0% 。

松树树冠火平台整体燃烧过程平均持续 12 min , 分为烘干阶段、快速上升阶段、最大火势阶段、火势维持阶段与衰退熄灭阶段。给出树冠火燃烧前四阶段如图 3 所示。在烘干与快速上升阶段, 因云南松针叶单簇密集且含油量高, 燃烧速度快, 树冠火着火点集中, 火焰呈暗红色并伴随大量明显烟雾上升, 烟雾颜色为灰白色与黑色, 烟雾主要成分为蒸发的水蒸气、燃烧后的灰烬以及未燃烧完全产生的炭黑; 树冠火最大火势阶段, 树冠整体剧烈燃烧, 灰白烟雾产生稍少, 火焰颜色依旧为暗红色, 且火焰尖端伴随黑烟升腾, 最大火焰高度为 3.35 m , 火焰区对导线-板电极空气间隙的桥接比

例为 67%，树冠火燃烧火焰无法桥接整个间隙；树冠火火势维持阶段，树冠较密集部位燃烧结束，但由于松树树叶簇之间分布稀疏，热量在水平方向传递存在差异，导致树冠部分位置处于不同燃烧阶段，在竖直方向上产生浓度不同的烟雾颗粒，持续时间较长；衰退熄灭阶段，部分树枝针叶处于阴燃状态，整体树冠骨架已经熄灭。



图 3 松树树冠火燃烧不同阶段

Fig. 3 Pine crown fire in different phases

通过 FLIR T1050sc 红外热像仪对 5 m 间隙下松木树冠火不同高度下温度进行采集并制成温度随时间变化折线图，如图 4 所示，此处高度指的是温度测量点与板电极的竖直距离。可以看出，模拟松木树冠火不同高度温度随时间变化有着相近的趋势，主要分为如下阶段：1) 烘干阶段温度缓慢上升，此阶段燃烧主体为树冠火燃烧试验平台底部木条，木条燃烧释放热量主要对松树新鲜枝条进行烘干；2) 快速上升阶段，各高度温度上升，代表树冠密集部位开始燃烧，热释放速率开始显著增加，先行燃烧部位释放热量对周围未燃烧部位进行烘干，为树冠最大火势制造前序条件；3) 最大火势阶段，树冠枝叶聚集密集区域猛烈燃烧，热释放速率处于最大阶段，各高度温度处于高位且保持 30~40 s；4) 火

势维持阶段，由于松树树叶簇之间分布稀疏，松树枝条之间热量传递效率较低，因而在树冠密集部位燃烧殆尽后，边缘树冠部分接续燃烧并持续较长时间，表现在温度折线图上则是不同高度的温度在 350~550 s 未有明显下降且有多处显著上升；5) 衰退熄灭阶段，树冠易燃的针叶完成燃烧，不同高度温度显著下降，松树枝干因含水较多且木质紧密难以燃烧，但仍有较高温度。

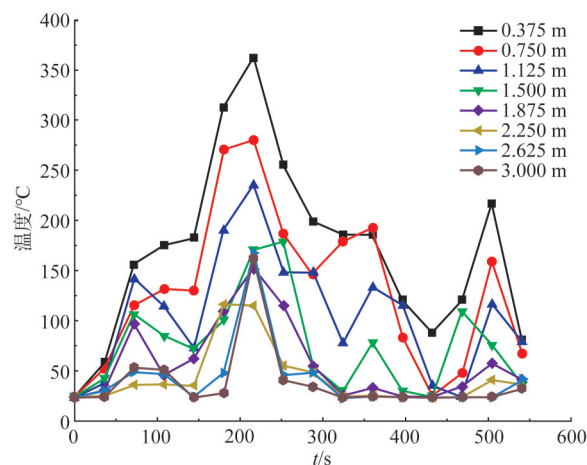


图 4 5 m 间隙下松树树冠火试验平台不同间隙高度下温度随时间变化图

Fig. 4 Temperature variation over time at different gap heights of 5 m gap under pine crown fire

由前文分析可知，松树树冠火的燃烧不同阶段燃烧特性明显不同，松树针叶含油量高，火焰上升阶段与最大火势阶段到来早，持续时间短。需要注意的是：单树松树树冠不同部位疏密度具有显著差异，致使燃烧热量在水平与竖直层面传递存在各向异性，进而导致最大火势过后仍有树冠部分区域仍处于接连燃烧状态，持续时间较长，不断释放出热量。松树树冠火火焰温度在距板电极 0.375 m 处最高可以达到 364 °C，在距板电极 0.750 m 处火焰温度最高可以达到 275 °C，距板电极 2.25~3 m 处的空气间隙处的最高温度为 168 °C。

热像仪视角有限，且记录的温度分布为树冠火模拟试验平台正面的二维分布，同时树冠火不同方向热量传递的不均匀导致树冠火在同一高度会处于不同燃烧阶段，因此在某些时段，热像仪记录的高度与温度关系并非单调。

2.2 松树木垛火火焰燃烧特性

按照试验步骤搭建松木木垛火模拟试验平台，

松木木垛火燃烧典型过程可分点燃初期阶段、快速上升阶段、最大火势阶段、熄灭阶段 4 个阶段。其各阶段典型火焰形态如图 5 所示。松木垛燃烧时间相对松木树冠火更长, 平均燃烧时间约为 24 min。点燃初期, 火焰颜色较暗, 伴有黑色烟雾颗粒升腾; 木垛火快速上升阶段与最大火势阶段, 木垛火燃烧时火焰颜色较树冠火颜色更为明亮, 并有大量的炭黑和颗粒产生, 烟雾量也相对较多, 在此阶段, 木垛火火焰高度最高可达 4.15 m, 占据导线-板电极间隙长度的 83 %, 火焰燃烧剧烈; 木垛火在最大火势阶段与火势维持阶段的火焰桥接间隙比例平均值为 71 %, 与树冠火最大火焰阶段火焰桥接比例接近。木垛火火焰中上部火焰体较树冠火更为粗壮, 脉动更为频繁, 连续性更好; 木垛火下降熄灭阶段, 木垛中心主体已经燃烧殆尽并发生塌陷, 木垛周围部分仍在燃烧, 火焰高度明显降低。

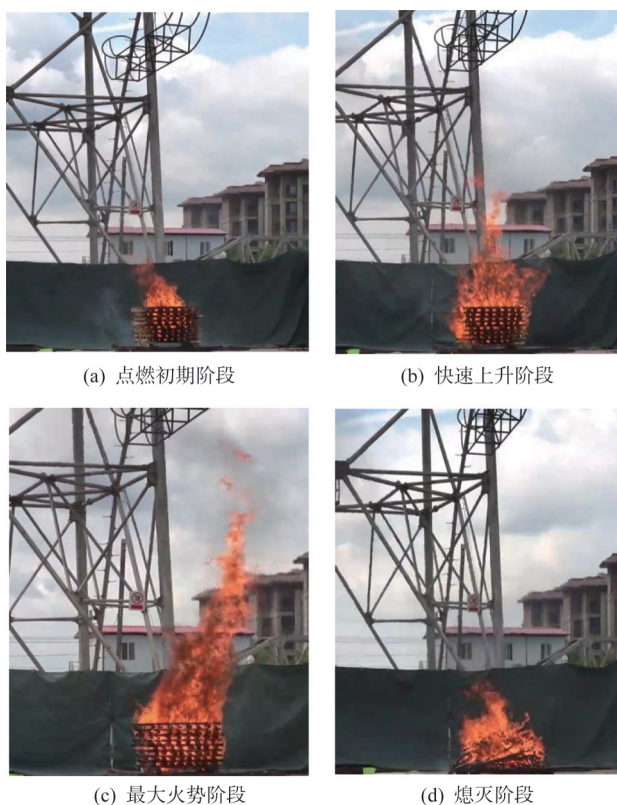


图 5 松树木垛火燃烧不同阶段

Fig. 5 Pine crib fire in different phases

木垛火快速上升阶段约持续 420 s, 最大火势阶段约持续 600 s, 熄灭阶段约持续 420 s。使用热像仪对木垛火燃烧最大火势阶段前后不同高度温度采样并制成折线图后进行分析, 如图 6 所示。可以

看出, 木垛火最大火势阶段, 木垛顶端温度最高可以达到 700 °C, 间隙内不同高度温度在此阶段有所上升。在经过最大火势之后, 木垛顶端平均温度为 550 °C, 木垛上方空气间隙受火焰与热流影响也有较高温度, 火焰温度仍能在高位保持一段时间, 表明木垛火的热释放较树冠火更为稳定、持久。

对比树冠火与木垛火两种火焰燃烧形态: 树冠火火焰形态更为分散, 火焰颜色较木垛火更暗, 火焰粗壮度、连续性较木垛火更差; 对比树冠火与木垛火温度, 树冠火的最高火焰温度与最大火焰高度分别只有木垛火的 52 % 与 80 %。在散热量一致的前提下, 火焰温度与产生的热量有关, 松木木垛火更高的燃烧温度、更长的火焰高度以及更久的燃烧时间表明松木木垛火单位时间燃烧释放出来的热量明显高于松木树冠火。

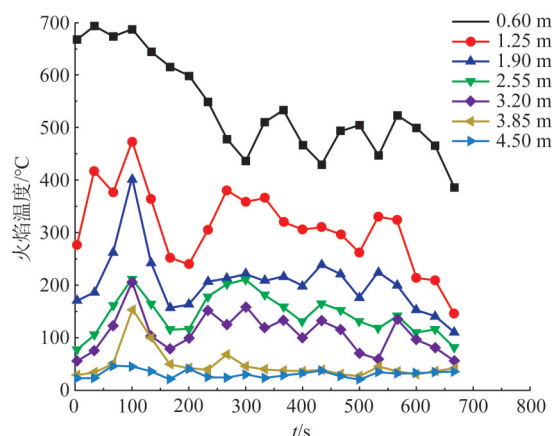


图 6 5 m 间隙下松树木垛火试验平台不同间隙高度下温度随时间变化图

Fig. 6 Temperature variation over time at different gap heights of 5 m gap under pine crib fire

3 火焰类型对间隙直流击穿特性的影响

3.1 不同火焰类型下松木间隙直流击穿过程分析

根据上文对树冠火火势发展特性的描述以及模拟树冠火导线-板电极间隙直流击穿试验, 认为树冠火导致的间隙击穿往往出现在树冠火的快速上升阶段、最大火势阶段以及火势维持阶段。选取树冠火对应阶段间隙击穿图片进行分析, 如图 7 所示。

树冠火上升阶段, 树冠枝叶水分快速蒸发, 吸收较多热量, 树冠枝叶燃烧不充分, 间隙之中充斥有因树冠燃烧不充分而产生的导电颗粒, 但间隙温升并不高, 此阶段平均击穿电压梯度为三阶段中最



图 7 树冠火不同燃烧阶段 5m 导线-板电极间隙击穿图
Fig. 7 5 m conductor-plane gap breakdown processes at different burning phases of crown fire

高；火势最大阶段，火焰及热流致使间隙中空气温度处于高位，烟雾颗粒受热流影响充斥在间隙之间，为间隙击穿、电弧发展创造较好条件，电弧明亮且粗壮；树冠火维持阶段，树冠不同部位接续燃烧，热释放速率较最大火势阶段下降明显，间隙温度低于最大火势时温度。

由图 7 可以看出，树冠火条件下，导线-板电极间隙发生击穿时，间隙竖直方向上的烟雾颗粒浓度差异对电弧发展路径有较大影响，电弧通过火焰体顶端，经过间隙中烟雾颗粒浓度较高的区域，发出明亮弧光，最终到达导线，完成整个击穿过程。

松木木垛火燃烧持续时间长，最大火势前后，火焰燃烧形态变化不甚明显，火焰高度基本维持在 3.5~4.1 m 之间，木垛火间隙直流击穿图片如图 8 所示。

5 m 导线-板电极间隙下，松木木垛火最大火势阶段，火焰无法桥接整个间隙，但由于火焰高度较高，伴随火焰燃烧产生的热流对整个间隙有所影响，相较于树冠火，木垛火较长的燃烧时间对间隙绝缘强度有更持续的影响，更高与粗壮的火焰以及火焰高温对火焰区高电导率的维持以及间隙绝缘性能的降低有更显著的作用；木垛火燃烧产生的灰黑色烟雾颗粒部分进入间隙，显著提升间隙非火焰区域的烟雾颗粒数量。间隙击穿发生时，放电电弧贯

穿整个间隙，其路径也具有明显选择性，均通过明亮火焰体部位，并经过灰黑烟雾区。

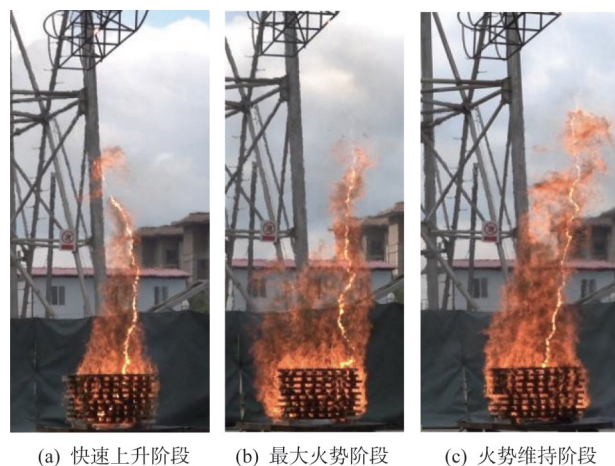


图 8 松木木垛火 5m 导线-板电极间隙击穿图
Fig. 8 5 m conductor-plane gap breakdown processes at different burning phases of pine crib fire

3.2 不同火焰类型下松木间隙直流击穿电压分析

松木树冠火不同燃烧阶段的火焰燃烧特性有较大区别，因此其对间隙绝缘特性影响程度不尽相同，提取树冠火不同燃烧阶段平均击穿电压梯度进行对比，并与木垛火最大火势条件以及同海拔下纯空气间隙的平均击穿电压梯度进行对比，结果如表 1 所示。

表 1 不同火焰类型下导线-板电极平均击穿电压梯度
Tab. 1 Average breakdown voltage gradient of the conductor-plane gap at different flame types

击穿工况	温度 /℃	相对湿度 /%	平均击穿电压梯度 /(kV·m ⁻¹)	百分比
纯空气间隙	25.7	55.3	268.3	100
树冠火快速上升阶段			120.4	44.9
树冠火最大火势阶段	26.0	44.4	84.7	31.6
树冠火火势维持阶段			102.0	38.0
木垛火最大火势阶段	25.0	41.2	104.5	38.9

松木树冠火与木垛火都会显著降低间隙绝缘强度，但对间隙绝缘强度降低程度不同。对比树冠火不同燃烧阶段间隙平均击穿电压梯度：最大火势阶段分别是快速上升阶段与火势维持阶段的 70 % 与

83 %。最大火势阶段的火焰高度高, 火焰对于间隙的桥接比例较其他阶段更高, 因而火焰高温对间隙绝缘强度的影响较其他阶段更为显著。

对比松木树冠火快速上升阶段与火势维持阶段的间隙平均击穿电压梯度, 后者的间隙绝缘强度为前者的 87 %。树冠火快速上升阶段, 新鲜枝叶中的水汽快速蒸发, 虽然快速上升阶段间隙烟雾颗粒浓度要大于火势维持阶段浓度, 对间隙的电场畸变作用更加明显, 但枝叶燃烧烈度较低, 火焰高度、温度不及火势维持阶段, 导致前者放电的先导条件较后者更难满足, 因此树冠火快速上升阶段的绝缘强度高于火焰维持阶段, 认为火焰燃烧烈度决定的间隙温度为影响树冠火不同燃烧阶段间隙绝缘强度的主要因素。

3.3 不同火焰类型下间隙击穿特性对比分析

松木木垛火最大火势阶段的平均击穿电压梯度与松木树冠火火势维持阶段相近, 但高于树冠火火势最大阶段。对于树冠火与木垛火, 火焰高度都无法桥接整个间隙, 因而可将间隙分为烟雾区与火焰区, 如图 9 所示。树冠火最大火势时的火焰高度与温度皆低于木垛火最大火势时的对应参数; 相应地, 树冠火的烟雾区要长于木垛火的烟雾区。间隙平均击穿电压梯度由烟雾区与火焰区分别决定, 两部分区域的平均击穿电压梯度影响因素不同。在本试验中, 木垛火最大火势阶段的平均击穿电压梯度高于树冠火最大火势阶段, 可分别分析影响火焰区与烟雾区的绝缘强度因素以解释此现象。

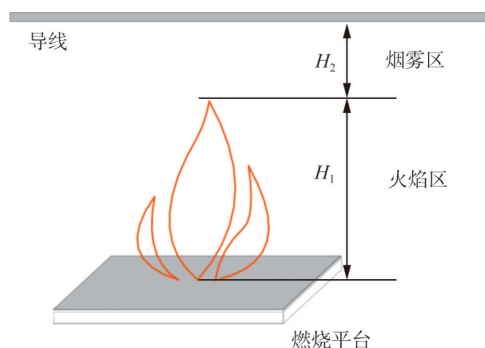


图 9 导线-板电极间隙火焰、烟雾分区示意图

Fig. 9 Diagram of divisions of flame and smoke of conductor-plane gap

火焰区内电导率高, 这是火焰段带电粒子激增的宏观表现, 而火焰的热释放速率对火焰段热电离与碰撞电离有主导作用, 更高的火焰温度促进电

离, 更高的火焰可短接更大比例的间隙, 对间隙绝缘强度的影响更为显著。木垛火更高的热释放速率导致木垛火火焰段绝缘强度下降程度较树冠火火焰区更明显, 平均击穿电压梯度更低。

烟雾区包含因木本植物燃烧产生的烟雾颗粒, 烟雾颗粒荷电受电场力以及热浮力影响, 会向上靠近带电导线, 畸变电场触发放电; 同时烟雾区的高温促进粒子热电离与碰撞游离, 产生大量电子、粒子与荷电颗粒, 共同影响烟雾区绝缘强度。松木树冠与木垛的可燃物成分有区别, 导致燃烧特性存在差异: 树冠火最大火势时产生的烟雾颗粒较木垛火最大火势时的更多, 树冠火接续燃烧特性导致烟雾区的灰烬颗粒大小分布差异明显, 树冠火燃烧的灰烬颗粒显著大于木垛火的颗粒。因此, 对烟雾区电场畸变以及整体绝缘强度影响更为显著。

非全桥接情况下, 烟雾区的平均击穿电压梯度要显著高于火焰区^[11], 即烟雾区绝缘强度的变化对整体间隙的绝缘强度影响要大于火焰区绝缘强度变化对间隙绝缘特性的影响。本例中, 最大火势阶段, 虽然木垛火火焰区的平均击穿电压梯度较树冠火火焰区更低, 但整体间隙平均击穿电压梯度仍高于树冠火平均击穿电压梯度, 这是由于最大火势阶段, 树冠火烟雾区绝缘强度下降程度较木垛火烟雾区的更多, 对整体间隙绝缘强度的影响更大。因此可以得出以下结论: 不同火焰形态因火焰区的温度与高度导致的火焰特性差异对于间隙绝缘强度的影响弱于烟雾区中烟雾颗粒特性差异对间隙绝缘强度的影响。

火焰高度与火焰热释放速率正相关, 不同的火焰高度显著影响导线-板电极间隙绝缘强度。分析松木树冠火与木垛火火焰高度与平均击穿电压梯度之间的关系, 提取树冠火上升阶段与最大火势阶段火焰竖直上升时击穿值, 与木垛火最大火势阶段前后击穿值, 得到火焰高度与间隙平均击穿电压梯度关系如图 10 所示。

在研究参数范围内, 松木树冠火与树冠火在特定阶段的间隙平均击穿电压梯度与火焰高度有较好的线性相关性。松木木垛火与松木树冠火的拟合关系式分别如式(1)~(2)所示。

$$y = -27.82x + 203.5 \quad (1)$$

$$y = -21.42x + 153.8 \quad (2)$$

式中: x 为火焰高度, m ; y 为平均击穿电压梯度,

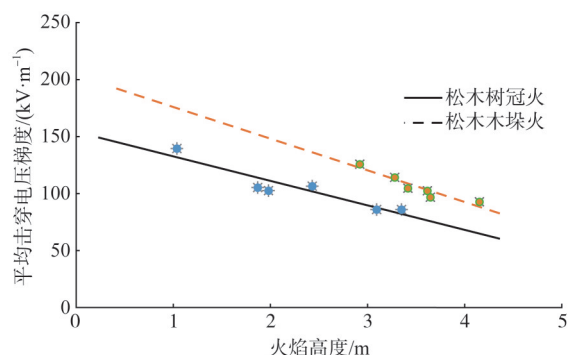


图 10 松木树冠火、木垛火间隙平均击穿电压梯度与火焰高度拟合关系

Fig. 10 Relationship of average breakdown voltage gradient and different flame height of pine crown fire and crib fire

$\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

根据拟合曲线,松木木垛火拟合直线斜率相较于树冠火拟合直线对应斜率值更大,这表明松木木垛在火焰区较树冠火对间隙绝缘强度的影响程度更大。拟合曲线的截距,反映火焰高度为0时间隙击穿电压拟合值,即间隙全烟雾条件下的间隙击穿电压值,木垛火的截距为 $203.5 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$,大于树冠火截距,可与前文分析结论相互印证。

4 结论

为研究树冠火条件下的导线-板电极空气间隙直流击穿特性,本文搭建了松树木垛火与树冠火条件下5 m导线-板电极空气间隙击穿放电试验平台,研究两种火焰形态不同燃烧阶段的燃烧特性与间隙直流击穿特性,研究成果如下。

1)树冠火燃烧不同阶段,火焰温度、火焰高度、烟雾颗粒产生等方面有明显区别:最大火势阶段,间隙中火焰温度与高度最大,树冠火快速上升阶段会产生大量灰白色与黑色烟雾。

2)松树树冠针叶分布稀疏导致树冠部分位置与树冠主体处在不同的燃烧发展阶段,松木树冠火平均击穿电压梯度值随燃烧发展先减小后增加,火势最大时,松木树冠火平均击穿电压梯度为 84.7 kV/m ,为同海拔松树木垛火的间隙平均击穿电压梯度的81.1%,烟雾区烟雾颗粒特性对两种火焰形态平均击穿电压梯度的差别有主导作用。

3)树冠火火焰区在不同燃烧阶段的特性差异对整体间隙击穿特性影响更显著,树冠火烟雾区内竖直方向上烟雾颗粒浓度差异会影响电弧发展路径;

相同燃烧阶段,木垛火与树冠火的击穿特性差异来源于火焰区热释放速率与烟雾区的烟雾颗粒特性,松木树冠火、木垛火间隙平均击穿电压梯度与火焰高度之间有良好的线性关系。

参考文献

- [1] SHU Yinbiao, CHEN Weijiang. Research and application of UHV power transmission in China[J]. High Voltage, 2018, 3(1): 1-13.
- [2] 冯俊杰, 辛清明, 赵晓斌, 等. 大规模新能源超远距离送出的柔性直流系统集成设计方案[J]. 南方电网技术, 2024, 18(3): 34-44.
FENG Junjie, XIN Qingming, ZHAO Xiaobin, et al. Integrated design scheme of VSC-HVDC system for large-scale renewable energy ultra-long-distance transmission[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(3): 34-44.
- [3] 张野, 李凌, 杨子千, 等. 大规模光伏经柔性直流送出系统交流侧故障穿越特性分析及参数优化[J]. 南方电网技术, 2024, 18(3): 14-25, 92.
ZHANG Ye, LI Ling, YANG Ziqian, et al. AC fault ride-through characteristics analysis and parameters optimization of large-scale photovoltaic power transmission system via VSC-HVDC[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(3): 14-25, 92.
- [4] 黄道春, 范建斌, 王平, 等. 极端环境条件下输变电设备空气间隙绝缘特性研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 1892-1906.
HUANG Daochun, FAN Jianbin, WANG Ping, et al. Current status and future prospects of transmission and transformation equipment air gap insulation characteristics under extreme natural environmental conditions[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1892-1906.
- [5] 吕鹏飞. 交直流混联电网下直流输电系统运行面临的挑战及对策[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 503-510.
LÜ Pengfei. Research on HVDC operation characteristics under influence of hybrid AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 503-510.
- [6] 邓颖, 蒋兴良, 张志劲, 等. 基于DEM分析的输电线路覆冰微地形分类识别及验证方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(11): 4971-4980.
DENG Ying, JIANG Xingliang, ZHANG Zhijin, et al. Icing micro-terrain identification and verification method of transmission line based on DEM analysis[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 4971-4980.
- [7] 许剑川, 杨定光, 喻澍霖, 等. 考虑极端自然灾害影响下的输电线路风险评估方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(11): 84-90.
XU Jianchuan, YANG Dingguang, YU Shulin, et al. Risk assessment method for transmission lines considering the influence of extreme natural disasters[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(11): 84-90.
- [8] 周恩泽, 龚博, 刘淑琴, 等. 南方电网架空线路因山火跳闸故障统计分析[J]. 广东电力, 2022, 35(4): 80-86.
ZHOU Enze, GONG Bo, LIU Shuqin, et al. Statistics and analysis on tripping fault of overhead transmission lines caused by mountain fires in China Southern Power Grids[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(4): 80-86.

- [9] 周恩泽, 黄勇, 向淳, 等. 基于物元可拓的输电线路山火风险评估模型[J]. 南方电网技术, 2022, 16(1): 145 - 154.
ZHOU Enze, HUANG Yong, XIANG Zhun, et al. Evaluation model of wildfire risk in transmission lines based on matter-element extension [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(1): 145 - 154.
- [10] 周恩泽, 黄勇, 龚博, 等. 基于朴素贝叶斯网络的输电走廊山火风险评估模型[J]. 南方电网技术, 2021, 15(8): 120 - 129.
ZHOU Enze, HUANG Yong, GONG Bo, et al. Wildfire risk assessment model of power transmission line corridors based on naive Bayes network [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(8): 120 - 129.
- [11] 刘晖, 向淳, 周恩泽, 等. 基于动态贝叶斯网络的输电走廊山火风险时空评估[J]. 南方电网技术, 2023, 17(11): 148 - 158.
LIU Hui, XIANG Zhun, ZHOU Enze, et al. Temporal and spatial assessment of wildfire risk in transmission line corridors based on dynamic Bayesian networks [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(11): 148 - 158.
- [12] 黄道春, 黎鹏, 阮江军, 等. 山火引发输电线路间隙放电机理与击穿特性综述[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 622 - 632.
HUANG Daochun, LI Peng, RUAN Jiangjun, et al. Review on discharge mechanism and breakdown characteristics of transmission line gap under forest fire condition [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 622 - 632.
- [13] 黄道春, 陈鑫, 周恩泽, 等. 考虑火焰分区的植被火条件下导线-板间隙击穿电压研究[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3467 - 3474.
HUANG Daochun, CHEN Xin, ZHOU Enze, et al. Breakdown voltage of conductor-plane gap under vegetation fire condition considering division of flames [J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3467 - 3474.
- [14] 周恩泽, 饶章权, 刘琦, 等. 典型高风险植被火条件下导线-板间隙击穿特性[J]. 高压电器, 2024, 60(3): 179 - 185.
ZHOU Enze, RAO Zhangquan, LIU Qi, et al. Breakdown characteristics of conductor-plane air gap under typical high risk vegetation fire condition [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 179 - 185.
- [15] 龙明洋, 黄道春, 黎鹏, 等. 典型植被灰烬颗粒对导线-板间隙放电特性的影响[J]. 电工技术学报, 2018, 33(3): 627 - 633.
LONG Mingyang, HUANG Daochun, LI Peng, et al. Influence of the typical vegetation Ashes/Particles on the discharge characteristics of conductor-plane air gap [J]. Transactions Of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 627 - 633.
- [16] 普子恒, 史星涛, 周晨曲, 等. 直流电压下植被燃烧颗粒在火焰间隙中的运动分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(2): 68 - 74.
PU Ziheng, SHI Xingtao, ZHOU Chenqu, et al. Motion analysis of vegetation combustion particles in flame gap under DC voltage [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2020, 42(2): 68 - 74.
- [17] LI Peng, HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, et al. Influence of forest fire particles on the breakdown characteristics of air gap [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(4): 1974 - 1984.
- [18] 黄道春, 卢威, 阮江军, 等. 典型植被燃烧灰烬对导线-板间隙直流击穿特性的影响[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1668 - 1674.
HUANG Daochun, LU Wei, RUAN Jiangjun, et al. Influence of typical vegetation ashes on DC breakdown characteristics of conductor-plane air gap [J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1668 - 1674.
- [19] 周恩泽, 樊灵孟, 黄道春, 等. 2 013 m 海拔高度植被火条件下导线-板间隙击穿特性[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4316 - 4322.
ZHOU Enze, FAN Lingmeng, HUANG Daochun, et al. Breakdown characteristics of conductor-plane gap under vegetation fire at the altitude of 2 013 m [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4316 - 4322.
- [20] 赵凤君, 王明玉, 舒立福, 等. 森林火灾中的树冠火研究[J]. 世界林业研究, 2010, 23(1): 39 - 43.
ZHAO Fengjun, WANG Mingyu, SHU Lifu, et al. A review of crown fire research [J]. World Forestry Research, 2010, 23(1): 39 - 43.
- [21] 牟春杰. 单树树冠火发展及火行为特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [22] 刘冠宏. 北京地区典型林分地表火及向树冠火蔓延机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. ± 800 kV 直流架空输电线路设计规范: GB 50790—2013 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.

收稿日期: 2024-02-29; 网络首发日期: 2024-07-29

作者简介:

李文荣(1985), 男, 高级工程师, 硕士, 从事输电线路外绝缘研究;

杨跃光(1987), 男, 工程师, 硕士, 从事输电线路防污减灾工作;

黄道春(1976), 男, 通信作者, 教授, 博士, 研究方向为特殊环境条件下高压输变电设备绝缘失效机理与风险评估、高压输变电设备状态智能感知与智能运维, huangdc99@163.com。