

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.05.022

植被燃烧烟雾对导线—板间隙交流击穿特性的影响研究

周仿荣¹, 文刚¹, 黄道春², 李慧鹏², 王华清², 马仪¹,
王国芳¹, 潘浩¹

(1. 南方电网公司云南电网电力科学研究院电力遥感技术联合实验室, 昆明 650217; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072)

摘要: 架空输电线路下方山火产生的火焰和烟雾会导致间隙绝缘强度下降, 可能造成线路跳闸、停运事故。为研究植被燃烧烟雾对间隙击穿电压的影响, 文中搭建了间隙击穿模拟试验平台, 开展了不同湿度潮湿杉木燃烧烟雾的交流击穿试验, 拟合得到了植被湿度与间隙平均击穿电压梯度的关系式。研究表明: 潮湿植被燃烧不充分时会产生大量灰白色或黑灰色烟雾, 且湿度越大火焰高度越小, 最高可下降约40%; 燃烧初期冷烟全桥接时间隙的平均击穿电压梯度为163 kV/m, 约为空气的60.8%; 正常生长态的杉木火焰/烟雾间隙平均击穿电压梯度最低为56.5 kV/m, 仅为纯空气间隙的20%左右。研究成果可为山火条件下输电线路跳闸预测预警提供参考。

关键词: 输电线路; 山火; 烟雾; 交流击穿特性; 导线—板间隙

Study on Influence of Vegetation Combustion Smoke on the AC Breakdown Characteristics of the Conductor-plane Air Gap

ZHOU Fangrong¹, WEN Gang¹, HUANG Daochun², LI Huipeng², WANG Huaqing², MA Yi¹,
WANG Guofang¹, PAN Hao¹

(1. Joint Laboratory of Power Remote Sensing Technology, Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., China Southern Power Grid, Kunming 650217, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The flames and smoke generated by the wildfires beneath the overhead transmission line can reduce the insulation strength of the air gap, potentially leading to line trip and outage. To investigate the influence of smoke from burning vegetation on the breakdown voltage of the air gap, a simulated gap breakdown platform is set up in this study. AC breakdown tests are carried out using smoke from burning wet China fir at different humidity levels, and a relationship between the vegetation moisture content and the average breakdown voltage gradient of the air gap is obtained through fitting. The study results show that in case of incomplete combustion of the wet vegetation, a large amount of ash-white or dark-grey smoke can be generated, and the higher the humidity, the smaller the flame height, with a maximum reduction of about 40%. The average breakdown voltage gradient of the air gap bridged by cold smoke at the beginning of burning is 163 kV/m, approximately 60.8% of air. The lowest average breakdown voltage gradient of the gap in the flame/smoke of China fir at normal growth state is 56.5 kV/m, which is only about 20% of that of the air gap. The study results can provide a reference for predicting and warning of line tripping under wildfire conditions.

Key words: transmission line; wildfire; smoke; AC breakdown characteristics; conductor-plane air gap

收稿日期:2025-11-26; 修回日期:2026-01-08

基金项目:云南省重大科技专项(202202AD080010)。

Project Supported by Major Scientific and Technological Projects of Yunnan Province(202202AD080010).

0 引言

中国能源中心和负荷中心呈逆向分布,大容量、远距离输电是保障电力供应的必然选择^[1-7],架空输电线路是电能传输的重要通道,截止到2021年底,中国110 kV及以上交直流输电线路回路长度达到162.2万 km^[8],线路不可避免地途经大量森林、草地、山地等山火频发区域,山火会导致输电线路间隙绝缘水平下降,造成输电线路跳闸,影响电网的安全稳定运行^[9-10]。2012—2021年全国共发生森林火灾2.63万起^[11],2015—2020年南方电网辖区内110 kV及以上电压等级交直流输电线路共发生377次因山火导致的跳闸事故,且重合闸成功率不到50%^[12],山火已经成为威胁输电线路运行安全的重要原因之一。

为研究山火条件下输电线路的跳闸机理,目前中国已开展了部分因素对间隙击穿特性的影响研究。山火发生时的高温、大量灰烬颗粒、高电导率等特点是间隙绝缘特性降低的主要原因^[13];黄道春等人分析了山火引发输电线路间隙放电的机理,研究了海拔^[14]、植被种类^[15]、火焰高度^[16]、灰烬颗粒^[17-20]、带电粒子^[21-22]、坡度、风速^[23]、植被燃烧特征量^[24]等因素对间隙击穿特性的影响,将火焰间隙分为火焰连续区、火焰不连续区和烟雾区^[25],并建立了火焰条件下间隙放电模型^[26];杨宇航等^[27-28]分析了烟雾对22 cm空气间隙击穿特性的影响,相对于火焰和温度的影响,烟雾对线路绝缘的影响较小。

目前对干木垛火焰桥接条件下的间隙击穿特性研究较为充分,但烟雾对击穿电压的影响研究仍不够深入:①现有研究中灰烬颗粒尺度多在mm级及以上,而实际山火烟雾是典型的大气气溶胶,包含尺度在nm、mm级别的固体和液体颗粒(液滴、细颗粒物、黑碳、有机碳等)^[29-30],颗粒还会经过成核、扩散、冷凝、沉降及凝并等过程形成凝团^[31-32];②烟雾的扩散受羽流动力学控制,并被限制在羽流内部^[32-33],弥漫在输电线路周围,火焰和烟雾可能单独或混合桥接输电线路对地或相间间隙,见图1;③生长态植被燃烧初期产生大量水蒸气,温度较低,且烟羽流到达高空后温度也会降低,现有试验条件主要为高温、干燥木垛火焰;④缺少较大尺度的烟雾击穿试验。

生长态植被燃烧初期产生的烟雾湿度大、温度低、尺寸小,是气液固多相体介质,对间隙击穿特性的影响主要体现在:①大量高电导率颗粒分布在间隙中,降低了间隙的绝缘性能;②颗粒端部空间电场畸变,有利于放电的发展;③液滴吸附周围的电



图1 典型输电线路山火烟雾

Fig. 1 Mountain fire smoke of typical transmission line

子,阻碍放电(电离和流注)的发展^[34-37];④颗粒物触发放电,电弧短接形成颗粒小桥,桥接部分间隙;⑤颗粒荷电,增强电场畸变范围,促进放电的发展^[13,17-20]。烟雾对间隙击穿特性的影响与颗粒类型、形状、湿度、粒径、浓度、温度、是否荷电等因素的综合作用有关。现有研究无法支撑山火发生时烟雾条件下架空输电线路间隙绝缘强度的评估。

综合上述分析,烟雾对山火条件下输电线路间隙绝缘失效风险评估具有重要影响。文中搭建了间隙击穿模拟试验平台,开展了潮湿杉木燃烧烟雾条件下2.6~4 m间隙的交流击穿试验,将潮湿杉木的燃烧过程分为烘干阶段、烟火阶段、最大火势阶段、衰退阶段,分析了不同阶段的烟雾特征和间隙击穿特性,并研究得到了冷烟全桥接间隙时的击穿特性和湿度对间隙击穿特性的影响。研究成果可为建立山火条件下间隙放电风险评估模型、输电线路跳闸预测预警提供参考。

1 试验平台及方法

1.1 试验平台

为研究烟雾对植被火条件下导线—板间隙交流击穿特性的影响,搭建模拟试验平台,见图2,试验地点海拔为2 013 m。

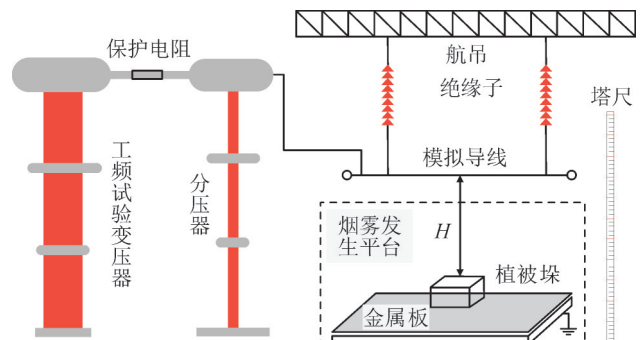


图2 试验平台示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental platform

试验采用导线—板间隙模拟实际输电线路相—地间隙,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,通过绝缘子吊装在板电极正上方,间隙距离通过控制吊装高度可精确调节,方形植被垛放置在可靠接地的板电极中心,位于模拟导线中心下方;试验过程通过两台水平布置的摄像机全程记录,无死角地记录整体火焰形态。试验中的火焰或烟雾高度利用相机拍摄得到的图像、垂直布置的标尺、间隙距离等按照一定比例换算得到;试验电源采用工频试验变压器,电压通过分压器采集。

试验所采用的变压器和分压器见图3,变压器为YDTCW-4500 kVA/3×750 kV型试验变压器,高压侧电压可达到2 250 kV,额定电流为2 A,分压器测量比为1 000:1,电压测量误差小于3%。



图3 工频试验变压器(右)及分压器(左)

Fig. 3 Test transformer(right) and voltage divider(left)

模拟导线参考LGJ-400/50型导线,采用钢管焊接为四分裂导线,为减小模拟导线端部电场的畸变,导线两端部分上翘并焊接有均压环,导线长度为5 m;板电极采用厚度为5 mm的钢板,模拟导线与板电极的实物图见图4。



图4 模拟导线与板电极

Fig. 4 Simulated conductor-plane electrode

试验使用的植被为杉木,为使试验火源可控且可重复,将植被树干处理成尺寸相同的木条,并摆放成植被垛,植被垛每层14根、共20层,尺寸约为1 m×1 m×0.6 m,见图5。

1.2 试验方法

为了研究烟雾对间隙击穿特性的影响,试验采



图5 植被垛摆放方式示意图

Fig. 5 Schematic diagram of vegetation stacking arrangement

用一定湿度的植被作为烟雾源。试验分为对照试验组和烟雾试验组,对照试验分为纯空气间隙击穿试验、干燥植被火焰全桥接击穿试验,为了方便对比分析,烟雾试验组包括不同湿度植被击穿试验、干湿植被混合木垛击穿试验。木垛的处理方式如下。

1)不同湿度的植被。使用探针式木材湿度仪对植被的含水率进行抽样测量,并称量木材总重量,根据植被的绝干重量和含水重量,即可获得植被的湿度为

$$M_{w1} = \frac{m}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: M_{w1} 为植被的绝对含水率; M 为植被的绝干重量,kg; m 为水分的重量,kg。

水杉的枝条含水率为98.1%,树叶含水率为176.8%,水杉枝干含水率随季节存在明显变化,且和地理位置、气候条件等因素有关^[38-39],文中取90%含水率近似作为水杉的正常生长湿度;将木条在通风处完全干燥,测量其湿度;根据试验湿度可换算出干燥后的植被垛需要吸收水分的重量,在水箱中加入1.1倍重量的需吸收水分,将干燥后的植被放入水中进行浸泡,充分吸收,试验前重新称重换算湿度。

试验地海拔为2 013 m,气候干燥、紫外线强,经过测量,干燥木条的湿度为15%,3种吸水处理后的杉木垛湿度分别为25%、57%、81%。

2)干湿植被混合配置。植被垛为每层14根、共20层,为了产生烟雾且易于引燃,下方植被为干木材,上方植被为湿木材,布置方式分别为干木材10层+湿木材10层、干木材3层+湿木材17层。

文中采用上述潮湿木垛近似研究正常生长湿度杉木燃烧对间隙击穿特性的影响。

1.3 试验步骤

植被火条件下烟雾对导线—板间隙交流击穿特性的影响试验步骤如下所示:

1)按照图2所示搭建试验平台,将导线布置在板电极中心正上方。

2)调整摄像机拍摄位置,调低光圈大小,摄像机选用高帧率模式。

3)调节模拟导线—板间隙距离,植被垛放置于板电极中心,导线与板电极平行且位于植被垛正上方。

4)对植被垛泼洒汽油并引燃,汽油首先燃烧,并将植被垛引燃,打开摄像机拍摄间隙的试验现象。

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

6)更换植被垛,重复试验。

生长态的植被仅靠汽油难以引燃,需在植被垛缝隙中加入少量干燥的灌木或木屑等软材类引燃物^[40-43];为了使试验结果有可对比性,植被垛湿度等条件保证一致,引燃所采用的汽油量和喷洒方式完全相同。

2 植被燃烧特性及烟雾对放电路径的影响

为便于定量分析杉木等潮湿植被和烟雾对间隙击穿特性的影响,首先需开展空气与干态植被的对照试验,并明确对照试验组的燃烧和间隙击穿特性^[44-46]。

2.1 纯空气与干态植被火间隙放电试验

纯空气间隙击穿试验中导线与板电极间隙的距离为1 m,升压至间隙发生击穿,其3次击穿电压均在268 kV左右。

调整导线与板电极间隙的距离为3 m,采用干燥植被开展燃烧试验,结果表明干态植被几乎不会产生明显的烟雾;在木垛火焰形态基本稳定、最大火焰高度不发生明显变化的时刻开始加压,获得典型击穿电压结果,见表1,发生击穿时的火焰和电弧形态见图6。从图6可看出,击穿时植被燃烧充分,火焰为形态聚集粗壮的黄色火焰,且全桥接间隙,电弧明亮可见。

表1 干态植被火焰下间隙击穿试验结果

Table 1 Results of gap breakdown test under dry vegetation flame

火焰高度/m	击穿电压/kV	平均击穿电压/kV
3.8	189	179
3.0	183	
3.6	176	
2.9	168	

为了方便表述,采用“平均击穿电压梯度”表示间隙击穿电压与间隙距离的比值,用于衡量间隙的绝缘强度。木垛燃烧碳化后认为木垛与大地等电位,考虑到间隙距离为3 m、木垛高度为0.6 m,实际放电间隙距离为2.4 m,因此间隙的平均击穿电压梯度为74.6 kV/m,火焰对间隙的击穿电压影响显著,

可降低至纯空气间隙的30%以下。



图6 干燥植被燃烧火焰间隙放电图像

Fig. 6 Flame gap discharge image in dry vegetation

2.2 潮湿植被的燃烧特性

植被的主要易燃成分包括纤维素、半纤维素、木质素等,潮湿植被燃烧时,随温度升高依次经过脱水(预热)、热解、氧化等过程。湿度或含水率是影响可燃物燃烧性的重要指标,燃烧过程中水蒸气的产生会消耗大量热量,同时还会降低周围的氧气浓度,直接影响植被达到燃点的速度,不利于植被的燃烧。植被含水率对间隙击穿特性的影响主要体现在:①植被含水率越高,燃烧越不充分,燃烧会产生大量烟雾,最大火焰高度降低,火焰体内电导率和颗粒物含量发生改变;②间隙烟雾区长度增加,烟雾浓度上升,火焰高度降低。

按照试验步骤开展烟雾试验,间隙距离设置为3 m和4 m,潮湿植被的燃烧和生长态植被的燃烧过程相似,针对干燥木垛,引燃10 s后就有明显的火焰产生,25%、57%、81%湿度的植被垛引燃后没有明显的火焰,主要经历了以下几个阶段:烘干阶段、烟火阶段、最大火势阶段、衰退阶段。各阶段的持续时间见表2,其中15%湿度为干燥植被的湿度,可见随着植被湿度的升高,植被的总体燃烧时间变长,烘干阶段和烟火阶段的时间也逐渐增长,产生烟雾较多的烘干阶段及烟火阶段占总燃烧时间的80%左右。

表2 不同湿度杉木燃烧各阶段持续时间

Table 2 Duration of each stage of China fir burning at different humidity

木垛湿度/%	烘干阶段/s	烟火阶段/s	最大火势阶段/s	衰退阶段/s
15	—	—	540	140
25	150	165	330	120
57	557	194	137	30
81	845	315	115	55

各个阶段的火焰和烟雾形态见图7。与图6所示的干燥植被的燃烧图像对比可以发现,潮湿植被在烘干阶段和烟火阶段前期会产生大量的烟雾,烟雾呈灰白色或黑灰色,烟雾的主要成分为未完全燃

烧的炭黑等颗粒,最大火势和衰退阶段,烟雾逐渐减少,温度逐渐升高,但火焰颜色较为暗淡,火焰体呈现细长状态,干燥植被垛最大火焰高度可达5 m,但80.7%含水率的植被垛最大火焰高度仅为3 m,且上半部分火焰十分暗淡。

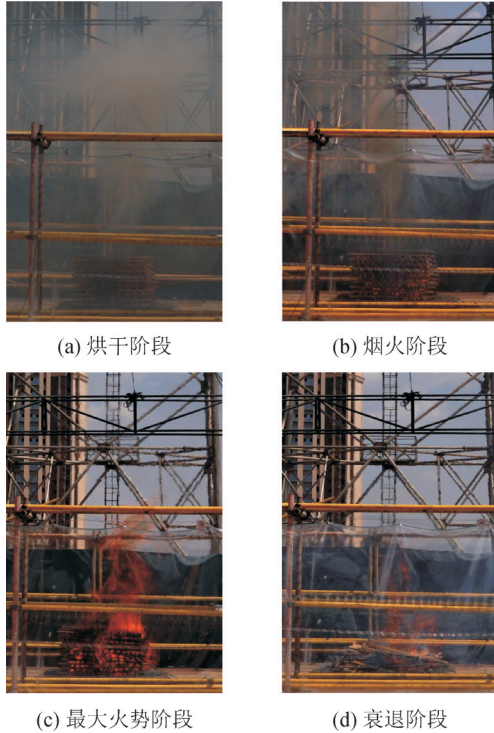


图7 潮湿杉木燃烧不同阶段

Fig. 7 Wet China fir burning in different stages

同样地,针对干湿植被混合配置的烟雾试验,间隙设置为2.6 m,木垛的燃烧过程与一定湿度木垛的燃烧类似。

潮湿植被无法充分燃烧,会产生大量的烟雾,这与某些实际发生的山火情况相似,植被燃烧产生火焰,而火焰体上方弥漫着大量的烟雾,烟雾桥接了火焰和导线之间的间隙,需进一步研究烟雾条件下间隙的击穿特性。

2.3 烟雾对放电路径的影响

烟雾的产生会对间隙的击穿特性产生影响,而间隙的击穿特性与击穿路径密切相关。在火焰桥接情况下,放电电弧沿火焰主体发展,但在全烟雾或烟雾与火焰共存时,其放电路径存在差异,2.6 m 间隙干湿植被混合燃烧时的不同情况下放电路径见图8。

当植被垛火焰较小时,环境风使得烟雾倾斜,电弧沿烟雾通道发展,烟雾颗粒对流注和电电路径有明显的吸引作用^[13],见图8(a)、(b);当植被垛部分燃烧产生火焰时,电弧往往穿过火焰附近;当烟雾柱竖直时,电弧路径从烟雾柱中穿过且点燃路径附近的烟雾颗粒,形成亮黄色的电弧通道,见图8(c);

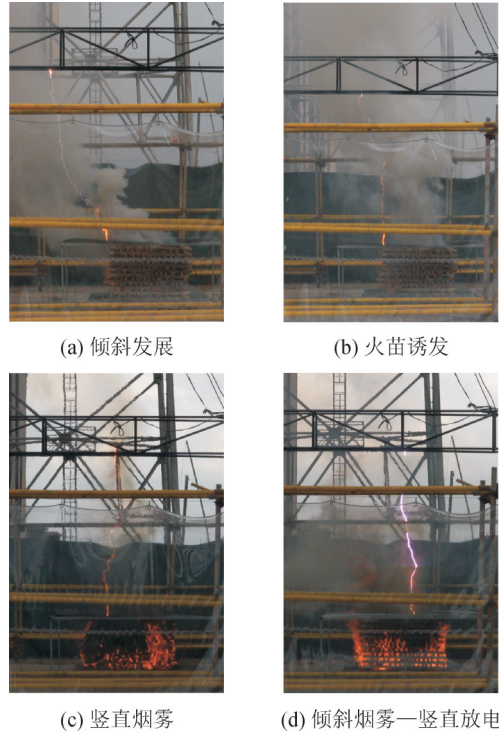


图8 潮湿杉木燃烧不同放电路径

Fig. 8 Different discharge paths of wet China fir burning 在植被垛火焰明显,且烟雾为倾斜状态时,电弧击穿路径则主要在火焰上方的热空气通道,见图8(d),说明在火势较大时,火焰、温度、气流等因素的影响要大于烟雾颗粒的影响。

3 烟雾对间隙击穿特性的影响分析

3.1 不同燃烧阶段的间隙击穿特性

潮湿植被燃烧可分为烘干阶段、烟火阶段、最大火势阶段,随着阶段发展烟雾量逐渐减少,火焰高度逐渐升高,间隙温度逐渐升高。不同湿度杉木燃烧烟雾间隙平均击穿电压梯度随顺序击穿次数的变化见图9,顺序击穿次数代表不同的燃烧阶段。

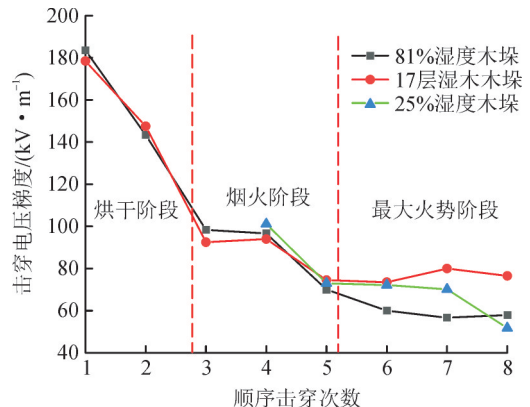


图9 不同燃烧阶段间隙击穿特性的变化

Fig. 9 Variation of gap breakdown characteristics at different combustion stages

试验结果表明,含有水分的生长态植被燃烧时

间越长, 间隙绝缘强度越弱。燃烧前期的烘干阶段, 间隙的绝缘强度最强, 平均击穿电压梯度在 160 kV/m 左右, 仅为纯空气间隙的 60%, 可见烟雾对间隙的绝缘强度存在明显的削减作用; 烟火阶段开始出现火焰, 温度逐渐上升, 平均击穿电压梯度降至 90 kV/m 左右; 最大火势阶段火焰高度和温度继续升高, 但烟雾量明显减少, 间隙平均击穿电压梯度下降至 80 kV/m 以下, 最低可达到 60 kV/m 左右。可见生长态植被在起火后会导导致导线—地间隙的绝缘性随着燃烧过程逐渐降低, 甚至会低于干态植被火焰全桥接间隙的平均击穿电压梯度 74.6 kV/m。

最大火势阶段 81% 湿度木垛试验和干湿植被混合木垛试验的绝缘强度存在 10 kV/m 的差距, 通过对比植被燃烧和击穿时刻火焰、烟雾情况发现, 81% 湿度木垛试验在最大火势阶段整体燃烧程度低于干湿植被混合木垛试验, 前者火焰和烟雾混合桥接间隙, 后者虽燃烧旺盛、火势较大, 但烟雾量明显更低, 因此火焰和烟雾混合桥接可能会导致间隙的绝缘强度进一步降低。

在烟火和最大火势阶段偶尔会出现持续放电现象, 电弧可持续数秒。这主要是由于火焰和烟雾混合桥接间隙提供了烟雾颗粒、炭黑等颗粒物, 而放电电弧点燃颗粒物使得间隙绝缘下降产生放电, 颗粒物短暂燃烧后移动又使得间隙绝缘强度恢复, 颗粒物的动态变化导致间隙持续放电的现象。

3.2 冷烟全桥接间隙击穿特性

文中将植被尚未充分燃烧时产生的温度较低的烟雾称为“冷烟”。为了研究冷烟状态下烟雾对间隙击穿特性的影响, 首先对烟雾全桥接间隙时的击穿电压进行分析, 2.6、3 m 间隙烟雾全桥接时的击穿现象见图 10。

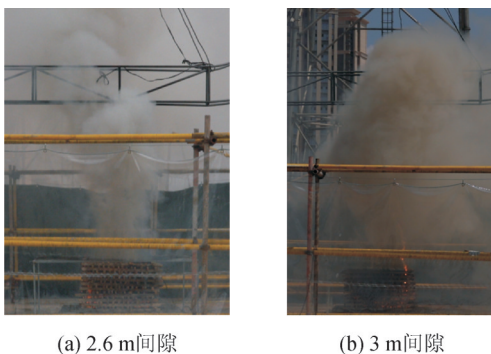


图 10 烟雾全桥接示意图

Fig. 10 Diagram of smoke full bridging

不同间隙距离对应的具体击穿电压见表 3。其中间隙距离为 2.6 m 时, 考虑到干木垛未充分燃烧, 在木垛上方放置了接地铁网, 实际间隙击穿距离为

2 m, 间隙距离为 3 m 的试验, 植被均已湿润, 视作接地, 实际间隙击穿距离为 2.4 m, 结果均选自烟雾聚集竖直向上、放电沿烟雾竖直发展、木垛未大范围燃烧、温度较低时的击穿数据。由于 25% 湿度植被含水量较低, 烟雾不足以全桥接间隙, 因此未开展此湿度下的烟雾全桥接击穿试验。

表 3 烟雾全桥接时的间隙击穿电压

Table 3 Gap breakdown voltage at smoke full bridging

间隙距离/m	湿木层数/湿度	击穿电压/kV	平均击穿电压/kV	平均击穿电压梯度/(kV·m ⁻¹)
2.6	10	484	414	207
		344		
	17	357	326	163
		295		
3.0	57%	590	502	209
		500		
	81%	416	394	164
		443		
		344		

可以发现, 随着植被湿度的增大, 烟雾的击穿电压逐渐降低, 同时得到以下结论: ①植被湿度较低或湿木层数较少时, 间隙的交流击穿电压较高, 平均击穿电压梯度在 208 kV/m 左右, 湿度较高或湿木层数较少时, 间隙的交流击穿电压较低, 平均击穿电压梯度在 163 kV/m 左右, 仅为纯空气间隙的 61%; ②将不同湿度或湿木层数视作低湿度、高湿度, 通过不同间隙距离击穿电压的横向对比可以发现, 烟雾的平均击穿电压梯度几乎不随间隙距离变化; ③植被湿度越大, 产生的水蒸气量越大, 燃烧越不充分, 可能产生更多的炭黑, 烟雾浓度更高, 可能导致间隙的绝缘水平下降, 击穿电压降低。

3.3 湿度对间隙击穿特性的影响

潮湿植被燃烧时, 最大火势阶段火焰和烟雾混合桥接间隙, 会导致间隙的绝缘强度低于干态植被燃烧时纯火焰桥接的间隙, 15%、25%、57%、81% 木垛在最大火势阶段间隙平均击穿电压梯度(取多次击穿时的平均值)的变化见图 11。

可以发现, 在研究参数范围内, 最大火势阶段间隙平均击穿电压梯度随着湿度的增加呈现下降趋势, 间隙平均击穿电压梯度与木垛湿度存在较好的线性相关性, 拟合关系式为

$$U = -24.5h + 78.53 \quad (2)$$

式(2)中: U 为间隙平均击穿电压梯度, kV/m; h 为植被湿度。

杉木的正常生长湿度为 90%, 基于式(2)可得在正常生长湿度时, 杉木燃烧可导致间隙平均击穿电

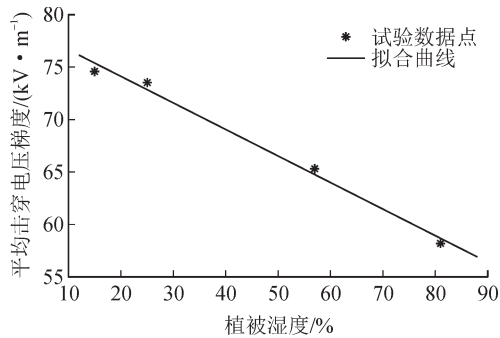


图11 平均击穿电压梯度随湿度的变化

Fig. 11 Variation of average breakdown voltage gradient versus humidity

压梯度最低降至56.5 kV/m,仅为纯空气间隙的20%左右。

4 结论

文中搭建了植被火条件下的导线—板间隙模拟试验平台,采用不同湿度的植被作为烟雾源,开展了最大4 m间隙的烟雾发生和放电试验,分析了潮湿植被的燃烧特性、烟雾对放电路径以及间隙交流击穿特性的影响,主要结论如下:

1)采用不同含水率植被进行放电试验,能够一定程度上模拟生长态植被燃烧产生的烟雾及击穿特性。潮湿植被在燃烧过程中会经历烘干阶段、烟火阶段、最大火势阶段、衰退阶段,其中烘干阶段和烟火阶段会产生大量的烟雾,呈灰白色或黑灰色,其主要成分为未完全燃烧的炭黑等颗粒,且持续时间可达总燃烧时间的80%左右;最大火势和衰退阶段,烟雾逐渐减少,但火焰颜色较为暗淡,火焰体呈现细长状态,80.7%含水率的植被最大火焰高度相比干燥植被降低了40%。

2)生长态植被燃烧过程中间隙绝缘强度存在明显的递降特征,烘干阶段间隙平均击穿电压梯度在160 kV/m左右,烟火阶段降至90 kV/m左右,最大火势阶段间隙平均击穿电压梯度最低可达到60 kV/m左右,生长态植被燃烧时火焰和烟雾混合桥接间隙,会导致间隙的绝缘强度低于干态植被燃烧火焰桥接的间隙。

3)冷烟全桥接间隙时,间隙的绝缘强度明显降低,纯烟雾间隙的平均击穿电压梯度最低可达163 kV/m,其随间隙距离的变化幅度较小;植被燃烧火焰/烟雾间隙平均击穿电压梯度与木垛湿度存在较好的线性相关性;正常生长湿度的杉木燃烧可导致间隙平均击穿电压梯度最低降至56.5 kV/m,仅为纯空气间隙的20%左右。

文中研究结果可为分析山火条件下烟雾对输

电线路跳闸的影响提供直接参考,对输电线路跳闸预测预警、输电走廊植被清理距离计算具有重要意义,可继续开展不同电源类型、不同湿度、不同间隙距离时烟雾对间隙击穿特性影响方面的研究。

参考文献:

- [1] 吴珊,边晓燕,张菁娟,等.面向新型电力系统灵活性提升的国内外辅助服务市场研究综述[J].电工技术学报,2023,38(6):1662-1677.
WU Shan, BIAN Xiaoyan, ZHANG Jingxian, et al. A review of domestic and foreign ancillary services market for improving flexibility of new power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1662-1677.
- [2] 华昊辰,张洲赫,邹奕群,等.新型电力系统需求侧灵活性资源低碳协同优化研究综述[J].电力建设,2025,46(6):60-75.
HUA Haochen, ZHANG Zhouhe, ZOU Yiqun, et al. Review of low-carbon co-optimization research on demand-side flexibility resources for new power systems[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(6): 60-75.
- [3] 翁兴航,苏盛.新型电力系统电网侧电化学储能电站消防安全管理研究综述[J].电力科学与技术学报,2025,40(5):155-172.
WENG Xinghang, SU Sheng. Research review on fire safety management of grid-side electrochemical energy storage power stations in new power systems[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(5): 155-172.
- [4] 王珍意,刘广一,汤亚宸,等.新型电力系统“六要素”的协同优化[J].供用电,2025,42(7):3-11.
WANG Zhenyi, LIU Guangyi, TANG Yachen, et al. Collaborative optimization of “six elements” in modern power systems[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(7): 3-11.
- [5] 黄奕俊,肖健,彭依明,等.基于边缘计算的新型电力系统分布式状态估计[J].电力科学与技术学报,2025,40(1):77-84.
HUANG Yijun, XIAO Jian, PENG Yiming, et al. Distributed state estimation of new power system based on edge computing[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 77-84.
- [6] 鞠立伟,吕硕硕,李鹏.新型电力系统需求侧灵活性资源时空协同优化与动态均衡机制研究综述[J].电力建设,2024,45(9):142-163.
JU Liwei, LYU Shuoshuo, LI Peng. Review of novel demand-side flexibility resource spatio-temporal co-optimization and dynamic equilibrium mechanism of power systems[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(9): 142-163.
- [7] 翟苏巍,刘广一,汤亚宸,等.新型电力系统惯性系数时空分布在线评估[J].供用电,2025,42(7):42-51.
ZHAI Suwei, LIU Guangyi, TANG Yachen, et al. Online evaluation of spatiotemporal distribution of inertia coefficient of new type power systems[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(7): 42-51.
- [8] 中国电力企业联合会.中国电力统计年鉴—2022[M].北京:中国统计出版社,2022.
China Electricity Council. China electric power statistical yearbook-2022[M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.
- [9] 曾华荣,毛先胤,杨旗,等.架空输电线路走廊树木临近导线放电机理及试验研究[J].高压电器,2023,59(1):64-69.

- ZENG Huarong, MAO Xianyin, YANG Qi, et al. Study on discharge mechanism and test of tree adjacent conductor in overhead transmission line corridor[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(1): 64-69.
- [10] 胡凉平, 丛伟, 徐安馨, 等. 基于深度稀疏自编码网络和场景分类器的电网气象故障预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 68-78.
- HU Liangping, CONG Wei, XU Anxin, et al. Early warning method for a power grid fault caused by meteorology based on a deep sparse auto-encoder network and scene classifier[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 68-78.
- [11] 闫鹏, 赵彦飞, 马玉春. 中国森林防灭火的发展历程与成效[J]. 亚热带资源与环境学报, 2023, 18(1): 71-78.
- YAN Peng, ZHAO Yanfei, MA Yuchun. Development process and achievements of forest fire prevention and suppression in China[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2023, 18(1): 71-78.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 周恩泽, 樊灵孟, 黄道春, 等. 2013 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 2013 m[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4316-4322.
- [15] 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 gap under typical high risk vegetation fire condition[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 179-185.
- [16] 陈孝明, 魏晗, 阮玲, 等. 火焰高度对输电线路间隙击穿特性的影响[J]. 中国电力, 2015, 48(7): 134-138.
- CHEN Xiaoming, WEI Han, RUAN Ling, et al. Study on the influence of flame height on gap breakdown characteristics of transmission lines[J]. Electric Power, 2015, 48(7): 134-138.
- [17] 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.
- [18] 普子恒, 阮江军, 吴田, 等. 火焰中颗粒对间隙放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 103-110.
- PU Ziheng, RUAN Jiangjun, WU Tian, et al. Influence of particles in flame on the characteristics of gap discharge[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 103-110.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 陈孝明, 黎鹏, 阮玲, 等. 输电线路走廊典型植被火焰绝缘特性测量与分析[J]. 电测与仪表, 2015, 52(20): 89-95.
- CHEN Xiaoming, LI Peng, RUAN Ling, et al. Insulation characteristics measurement and analysis of the typical vegetation in the corridor of the transmission lines[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(20): 89-95.
- [22] PU Ziheng, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Study on the breakdown characteristics of the transmission line gap under forest fire conditions[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2014, 25(11): 2731-2744.
- [23] 黎鹏, 阮江军, 黄道春, 等. 模拟山火条件下导线—板间隙击穿特性影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 195-201.
- LI Peng, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Influence factors analysis of the conductor-plane gap breakdown characteristic under simulation forest fire condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 195-201.
- [24] 黎鹏, 黄道春, 阮江军, 等. 全火焰条件下植被燃烧特征量对导线—板间隙击穿特性的影响[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3250-3257.
- LI Peng, HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, et al. Influence of vegetation combustion features on breakdown characteristics of conductor-plane gap under full flame condition[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3250-3257.
- [25] 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): 3467-3473.
- 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): 3467-3473.
- [26] 黎鹏, 阮江军, 黄道春, 等. 典型植被火焰下导线—板间隙击穿特性及放电模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 4001-4011.
- LI Peng, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Study on breakdown characteristic and discharge model of conductor-plane gap under typical vegetation flame[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 4001-4011.
- [27] 李唯佳, 杨宇航, 杨佳才, 等. 山火条件下 35 kV 输电线路故障信号特征试验研究[J]. 四川电力技术, 2022, 45(1): 10-15.
- LI Weijia, YANG Yuhang, YANG Jiakai, et al. Experimental research on fault signal characteristics of 35 kV transmission line under mountain fire[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2022, 45(1): 10-15.
- [28] 刘磊, 杨宇航, 徐会凯, 等. 山火对空气间隙绝缘击穿特性影响试验研究[J]. 四川电力技术, 2022, 45(1): 16-20.
- LIU Lei, YANG Yuhang, XU Huikai, et al. Experimental research on influence of mountain fire on insulation breakdown

- characteristics of air gap[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2022, 45(1): 16-20.
- [29] 赵然然. 典型生物质燃烧有机气溶胶的吸光特性及分子组成研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
ZHAO Ranran. Study of the light absorption properties and molecular compositions of typical biomass burning organic aerosol [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022.
- [30] 王 锋. 生物质燃烧烟雾颗粒的光学性质及粒径特征研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
WANG Feng. Optical and size distribution characteristics of smoke particles from biomass burning[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [31] 孙也涵. 烟雾气溶胶光学特性遥感仿真实验观测研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
SUN Yehan. The optic properties of smoke aerosol by remote sensing simulation experimental observation[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [32] 马绥华. 火灾烟雾颗粒粒径分布的测量与计算模拟[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.
MA Suihua. Fire smoke particle size distribution measurement and evolution simulation[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006.
- [33] 王文佳. 基于多源卫星遥感的中国西南地区森林火灾排放特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
WANG Wenjia. Study on the forest fire emissions characteristics in southwest China based on multi-source remote sensing[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022.
- [34] 刘 洋. 雾霾的模拟及其对棒—板空气间隙放电特性影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
LIU Yang. Research on simulation of fog-haze and the influence of fog-haze on discharge characteristics of rod-plane short air gaps[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [35] 康 钧, 李 佩, 王生富, 等. 盐雾对“棒—板”间隙交直流击穿电压的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1989-1994.
KANG Jun, LI Pei, WANG Shengfu, et al. Influence of salt spray on AC/DC breakdown voltage of rod - plane gap[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1989-1994.
- [36] 胡长猛, 谢从珍, 袁 超, 等. 雾霾对输变电设备外绝缘特性影响机理综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 147-154.
HU Changmeng, XIE Congzhen, YUAN Chao, et al. A review on influence mechanism of haze on external insulation characteristics of transmission and transformation equipment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 147-154.
- [37] 刘云鹏, 钟 正, 李利芬, 等. 盐雾对棒—板短空气间隙雷电冲击特性影响研究[J]. 高压电器, 2018, 54(9): 1-5.
LIU Yunpeng, ZHONG Zheng, LI Lifan, et al. Influence of salt spray on the breakdown voltage of rod - plate short air gap under lightning impulses[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(9): 1-5.
- [38] 许晓利, 苏 维, 祝必琴, 等. 昌北地区主要树种燃烧性研究 [J]. 河南林业科技, 2007, 27(1): 11-14.
XU Xiaoli, SU Wei, ZHU Biqin, et al. Study on the flammability of main tree species in Changbei area[J]. Journal of Henan Forestry Science and Technology, 2007, 27(1): 11-14.
- [39] 张婉婷. 季节变化对活立木树枝力学特性的影响研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
ZHANG Wanting. Study on the influence by seasonal changes to mechanical properties of standing tree branches[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.
- [40] 谢从珍, 周晓静, 余 松, 等. 基于先验知识与孪生网络监督的输电线路山火跳闸预测模型[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(21): 72-83.
XIE Congzhen, ZHOU Xiaojing, YU Song, et al. Wildfire-induced transmission line trip prediction model based on prior knowledge and siamese network supervision[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(21): 72-83.
- [41] 罗汶雯, 王孟夏, 张 强, 等. 山火环境下架空导线热—力学状态模拟[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(22): 89-99.
LUO Wenwen, WANG Mengxia, ZHANG Qiang, et al. Thermal-mechanical state simulation of overhead conductors under wildfire conditions[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(22): 89-99.
- [42] 李文荣, 杨跃光, 毕吉禹, 等. 模拟树冠火条件下导线—板空气间隙直流击穿特性[J]. 南方电网技术, 2025, 19(10): 141-149.
LI Wenrong, YANG Yueguang, BI Jiyu, et al. DC breakdown characteristics of conductor - plane air gap under simulated crown fire condition[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(10): 141-149.
- [43] 曾 毅, 王 政, 杨皓涵, 等. 植被火焰全桥接线—板间隙击穿机理[J]. 电力工程技术, 2025, 44(6): 193-201.
ZENG Yi, WANG Zheng, YANG Haohan, et al. Breakdown mechanism of a line-to-plate gap fully bridged by vegetation flames[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(6): 193-201.
- [44] 欧阳帆, 余笑龙, 徐 彪, 等. 基于多指标综合评价的配电网接地故障山火风险等级划分[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 10-19.
OUYANG Fan, SHE Xiaolong, XU Biao, et al. A method for dividing the forest fire risk levels caused by a ground fault risk levels on distribution lines based on multiple index comprehensive evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 10-19.
- [45] 苏 俊, 李天友, 陈石川, 等. 中压配电树线矛盾林火故障的导线痕迹图像特征及其识别方法研究[J]. 供用电, 2024, 41(11): 20-30.
SU Jun, LI Tianyou, CHEN Shichuan, et al. Research on image characteristics and identification methods of conductor trace caused by forest fires of tree - line conflicts in MV distribution overhead lines[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(11): 20-30.
- [46] 王 孟, 曾 毅, 杨龙山, 等. 中压架空线路单相触火、触树故障特性研究[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(3): 77-84.
WANG Meng, ZENG Yi, YANG Longshan, et al. Characteristics of single-phase fire-contact and tree-contact faults in medium-voltage overhead lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(3): 77-84.
- 周仿荣(1982—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事输变电设备防灾减灾及设备故障诊断方面研究。
- 文 刚(1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事输变电设备防灾减灾方面研究。
- 黄道春(1976—), 男, 博士, 教授, 主要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(通信作者)(E-mail: huangdc99@163.com)。