第 52 卷 第 4 期：1848-1857 高电压技术 Vol.52, No.4: 1848-1857
2026 年 4 月 30 日 High Voltage Engineering April 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250303

生长态树冠火条件下导线-板长空气间隙直流击穿特性

毕吉禹[1,2]，黄道春[1,2]，周硕伦[1,2]，罗瑞杰[1,2]，彭添浩[1,2]，孙 勇[3]
（1. 武汉大学电气与自动化学院，武汉 430072；2. 武汉大学新型电力系统与国际标准研究院，武汉 430072；
3. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司电力科研院，广州 510663）

摘 要：为给山火条件下直流架空输电线路空气间隙击穿风险差异化防控提供支撑，搭建了不同火焰类型下导线-板电极长空气间隙击穿特性试验平台，对比树种、火焰类型、间隙距离对间隙直流击穿特性影响。结果表明：生长态树冠火可导致空气间隙绝缘强度明显下降，最大火势阶段，5 m 间隙下松树树冠火与柏树树冠火平均击穿电压梯度分别为 84.7 kV/m 与 43.2 kV/m，分别为同海拔纯空气间隙平均击穿电压梯度的 31.6%与 16.1%，树种差异对击穿特性影响主要表现在火焰区燃烧参数与非火焰区燃烧颗粒尺寸；间隙长度不同，树冠火火焰桥接平均比例若接近，平均击穿电压梯度也接近；9 m 间隙下木垛火火焰桥接比例低于 5 m 间隙，前者间隙绝缘强度也低于后者，原因在于 9 m 间隙下非火焰段温升与烟雾颗粒浓度皆高于 5 m 间隙；生长态树冠火对间隙绝缘强度的影响较木垛火大，火焰类型差异对击穿特性的影响由烟雾区主导，间隙长度增加，树冠火和木垛火条件下空气间隙直流击穿特性差异减小。

关键词：输电线路；植被火；树冠火；导线-板长间隙；直流击穿特性

DC Breakdown Characteristics of Conductor-plane Long Air Gap Under Living State Crown Fire Condition

BI Jiyu[1,2], HUANG Daochun[1,2], ZHOU Shuolun[1,2], LUO Ruijie[1,2], PENG Tianhao[1,2], SUN Yong[3]
(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Institute of Next Generation Power Systems and International Standards, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
3. Electric Power Research Institute, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China)

Abstract: In order to provide support for the differentiated prevention and control of air gap breakdown risks in DC overhead transmission lines under wildfire conditions, this paper establishes a conductor-plane long air gap breakdown test platform for transmission lines under crown fire and crib fire conditions, and compares the effects of tree species, fire types, gap distance and other factors on the DC breakdown characteristics of conductor-plane air gap. The results show that the living state crown fire leads to a significant decrease in the insulation strength of the air gap. At the maximum burning phase, the average breakdown voltage gradient of pine crown fire and cypress crown fire at a 5 m air gap are 84.7 kV/m and 43.2 kV/m, respectively, which is 31.6% and 16.1% of the average breakdown voltage gradient of a pure air gap at the same altitude. The influence of tree species difference on the breakdown characteristics is mainly reflected in the combustion parameters in the flame zone and the combustion particle size in the non-flame zone. Regardless of gap length, the average proportion of crown fire flame bridging is close, and the average breakdown voltage gradient is also close. However, for wood crib fires, the flame bridging proportion under a 9 m gap is lower than that under a 5 m gap, while the insulation strength of the former is also lower. The reason is that the temperature rise and smoke particle concentration of non-flame section under the 9 m gap are higher than those of the 5 m gap. The influence of the living state crown fire on gap insulation strength is greater than that of crib fire. The influence of fire type difference on breakdown characteristics is mainly dominated by smoke zone. With the increase of the length of air gap, the difference of air gap DC breakdown characteristics between crown fire and crib fire decreases.

Key words: power transmission line; vegetation fire; crown fire; conductor-plane long air gap; DC breakdown characteristic

基金资助项目：国家重点研发计划(2023YFF0611300)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2023YFF0611300).

0 引言

我国已建成世界上电压等级最高的交直流混联大电网[1-2]。截至 2024 年 12 月，我国 220 kV 及以上输电线路达 94.64 万 km[3]。受人民生产生活用火习俗以及极端天气影响，输电线路走廊途经的森林、山地、草原等复杂环境为山火易发区域[4]。近年来，我国出现较多因山火导致的线路短路事故[5]。山火持续时间长、扑灭难度大，火焰的高温、高电导率、烟雾等因素交互，严重降低输电线路空气间隙绝缘水平，引发输电线路运行电压下间隙击穿放电事故，造成巨大经济损失与社会危害[6]。架空输电线路空气间隙击穿风险评估和广域电网安全防御面临着巨大挑战[7]。

国内外学者开展了较多模拟山火条件下的架空线路间隙击穿特性试验。美国、巴西、加拿大等国学者分别开展了不同间隙长度、不同植被类型、不同电压类型的农作物火、山火模拟空气间隙击穿特性研究[8]。国内学者开展了多种植被种类[9-10]、不同海拔高度[11]、多种间隙长度[12]等空气间隙击穿特性与机理分析，通过对火焰热释放特性观测、间隙击穿特征量分析以及多物理场仿真对山火引起间隙绝缘强度下降原因进行分析，认为火焰温度[13]、烟雾颗粒[14-15]以及高电导率[16]是引起间隙绝缘强度下降的主要原因。黄道春等综合考虑植被种类、植被密度等 7 类因素，系统开展了 1.2~9 m 间隙山火条件下长间隙交流击穿特性影响研究[17-18]。王彤等分析了高海拔下 4 m 间隙导线-板电极直流击穿特性，研究植被种类、烟雾桥接比例以及坡度对击穿特性影响[19]。前期研究表明，植被火对交流与直流间隙的绝缘性能影响存在差异：同条件下正极性直流的击穿电压要高于工频条件下的间隙击穿电压，直流条件下火焰间隙的起弧和击穿具有明显的极性效应，正极性条件下的起弧电压要低于负极性条件下的起弧电压，正极性电压下间隙击穿电压相较负极性电压下要低[16-18]。现有模拟山火条件下直流间隙击穿特性研究多基于中短空气间隙的小尺度击穿试验，直流条件下的输电线路长间隙击穿特性仍有待进一步研究。

树冠火为森林山火发生与蔓延主要形态之一，其蔓延速度快，扑救难度大，燃烧特性与木垛、茅草、秸秆等可燃物差异较大，是潜在林火行为的主要影响因素[20]。已有树冠火研究多集中于燃烧行为、火灾风险控制，树冠火条件下空气间隙击穿特性研究不足。树种、含水率以及树高等特征差异对树冠火能量释放、火焰高度以及火焰蔓延速率等燃烧特性有明显影响[21]；不同树种燃烧组分以及可燃物表面积对空间树冠火连续性有显著影响[22-23]。李文荣等研究了两种火焰类型下的 5 m 导线-板间隙直流击穿特性，认为树冠火燃烧特性与发展特点与木垛火有明显差异，两种火焰类型不同燃烧阶段的燃烧特性导致对应间隙直流击穿特性存在差异[24]。

综上所述，国内外对不同火焰类型下长间隙、较大尺度条件下直流间隙击穿特性研究不足，山火条件下架空输电线路间隙直流击穿风险差异化防护亟需进一步研究。本文探讨了考虑火焰类型的导线-板电极长间隙直流击穿特性，搭建模拟山火燃烧的长间隙击穿特性试验平台，进一步考虑工程实际，以松木垛、生长态松树树冠、生长态柏木树冠以及 5 m、9 m 间隙击穿为研究对象，分析树种、间隙长度、火焰类型等影响因素对间隙直流击穿特性的影响。研究结果可为直流架空输电线路山火短路击穿风险评估模型构建提供参考，为不同类型下输电线路山火击穿风险差异化防控提供指导。

1 试验平台及布置

1.1 电源与试验场地

在海拔 2 013 m 的特高压试验研究基地开展试验，图 1 为两种火焰类型下输电线路长间隙导线-板放电试验平台示意图。空气间隙采用导线-板电极间隙模拟实际架空输电线路中极-地间隙，导线对地间隙距离通过塔尺比对确定。模拟山火布置于金属板电极中心，模拟导线中心下方。板电极通过耐火绝缘材料与地面隔开并保证可靠接地。选用模拟 LGJ-400/50 型导线作为模拟架空输电导线，基于前期研究得到的导线分裂数对间隙击穿电压影响有限的结论[18]，并为更符合工程实际，5 m 间隙长度下使用四分裂导线，9 m 间隙长度下采用六分裂导线，分裂间距均为 45 cm，模拟导线两端均焊接有均压环以均匀电场。

试验过程由 SONY DSC-RX10M4 可见光摄像机与 FLIR T1050sc 红外热像仪全程记录：调节可见光摄像机光圈、帧率与摆放位置并设置白平衡为自动，记录不同阶段燃烧特性与间隙击穿过程；使用红外热像仪同步记录试验平台及间隙温度，红外热像仪可实现 30 帧/s 高清红外图像记录，试验过程

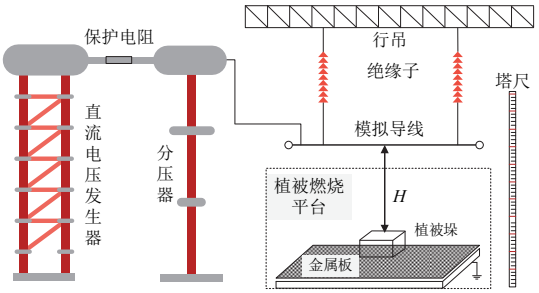


图 1 试验平台示意图

Fig.1 Schematic diagram of experiment platform

任意点位温度可由软件提取，量程 0~2 000 ℃，热灵敏度<20 mK。火焰高度、烟雾长度通过关键帧图像与标尺比对得到。

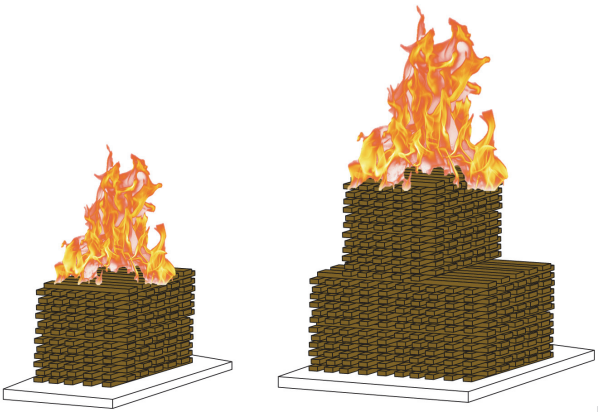
直流试验电源额定电压±1 600 kV，额定电流 50 mA。分压器分压比为 1 000:1，电压测量误差<3%。板电极采用厚度为 5 mm 的钢板并与槽钢焊接。

1.2 模拟山火试验布置

云南松与柏树为南方电网地区山火跳闸高风险植被[5]，研究两种植被树冠火、木垛火空气间隙直流击穿特性。

木垛火模拟试验装置具有结构简单、重复性好以及利于空气流通的特点。将松木树干加工得到 0.02 m×0.03 m×1 m 的木条，摆放为长方体形式。木垛火的燃烧特性与火焰热释放速率以及可燃物量有关，为减少木垛火的火焰燃烧特性对击穿特性研究影响，面向导线-板电极不同间隙长度，在试验场地开展预试验，并确定了不同植被垛的摆放方式。5 m 间隙长度下，木垛每层均匀放置 8 根木条，共摆放 18 层，整体尺寸为 1 m×1 m×0.6 m；9 m 间隙长度下，采用 3 组木垛叠放形式，每组木垛每层摆放 14 根木条，每组木垛共 20 层，整体尺寸为 1 m×2 m×1.5 m，如图 2 所示。松树与柏树树冠火试验平台布置图如图 3 所示。

从安全性与试验可重复性出发，开展无/微风、无坡度条件下的单树树冠火燃烧与击穿试验。搭建的生长态树冠模拟试验装置主要从以下 3 方面尽量还原真实单树树冠火燃烧工况：(1)树冠结构形态，选取当日截取的生长态树冠枝条，堆叠固定于同树种的木质框架之中，每次搭建保持树冠结构、体积、形态与对应树种真实树冠形态接近；(2)引燃过程，考虑树冠火主要由针叶幼树群、枯立木等可燃物发生地表火时水平或者竖直方向扩散蔓延而来，本文



5 m 间隙：每层 8 根，共 18 层　　9 m 间隙：每层 14 根，共 20 层

图 2 木垛火模拟试验布置

Fig.2 Crib fire experimental setup



(a) 松树树冠火模拟试验平台(5 m)　(b) 柏树树冠火模拟试验平台　(c) 松树树冠火模拟试验平台(9 m)

图 3 松树与柏树树冠火试验平台布置图

Fig.3 Experimental platform setup for pine and cypress crown fire

在底部均铺设有同树种引燃木条，模拟树冠火由底部向上传播过程，所使用平均木条含水率为 15.9%，与试验温度下枯死可燃物含水率接近[25]；(3)燃烧特性，从火焰高度与冠高比值的角度比较本文搭建的模拟树冠火与文献[21]的真实单树树冠火，考虑环境空气流通速度与可燃物燃烧体积，本文的模拟火行为与真实火行为接近。5 m 间隙下，模拟树冠部分整体尺寸约为 1 m×1 m×2 m，引燃物选用同树种木条稀疏布置于树冠火模拟装置底部，木条单层 3 根间隔 20 cm 水平摆放，铺叠 3 层；9 m 间隙下，模拟树冠部分整体尺寸约为 1 m×1 m× 3 m。不同间隙长度下，差异设置模拟树冠火燃烧装置尺寸，以保证装置未燃烧时树冠顶端对地高度与间隙长度比例、稳定燃烧状态下火焰桥接比例在不同间隙长度下互相接近。

1.3 试验方法

树冠火与木垛火对输电线路间隙击穿特性影响试验步骤可参考文献[24]。

松树、柏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，其燃烧阶段变化较快且不同燃烧阶段燃烧特性存在明显差异；木垛火火势最大阶段燃烧特性相对稳定。基于预试验并综合考虑间隙击穿电压分散性，采用直接升压法开展试验[12]，选取两种火焰类型下火焰发展典型阶段研究击穿特性。为减小火焰不同阶段的燃烧特性差异对试验结果造成的影响，同组试验保持植被垛或树冠的可燃物体积、水分以及摆放方式并重复试验。木垛火工况，均选择植被火最大火势阶段进行加压；树冠火工况，选择快速上升阶段、最大火势阶段与火势维持阶段进行加压。每组试验参数下，选取不少于 4 个分散性不超过 8%的击穿电压试验数据，取平均值作为该试验条件下的击穿电压值，并保持风速等其他影响因素尽量相近，基于上述前提进行试验分析。

2 火焰条件下间隙直流击穿试验

2.1 5 m 间隙松木、柏木树冠火条件下间隙击穿特性

云南松的树叶为针叶，单片针叶约 5~8 cm 长，叶片成簇分布，树叶簇内部分布密集，不同簇之间密集度低而表现出一定稀疏特点。柏树树叶同为针叶，单片针叶较云南松针叶更短，约 1~2 cm，柏树针叶在树枝上分布整体更均匀，针叶密度较云南松更大。松木树冠枝条与柏木树冠枝条湿度接近，分别为 57.0%与 66.0%，仪器选择德力西木材水分检测仪，测量范围为 5%~70%，分辨率为 0.1%，可自动补偿环境温度。

基于树冠火燃烧特性变化特征与间隙击穿影响因素，将树冠火发展过程分为以下若干个阶段：快速上升阶段、最大火势阶段、火势维持阶段以及衰退熄灭阶段。选取树冠火燃烧特定阶段间隙平均击穿电压梯度列于表 1 进行分析，图 4 与图 5 是对应阶段间隙击穿时刻图。因柏木燃烧速度过快未录得其快速上升阶段击穿特性。

由直流间隙击穿图可知：在烟雾区中，两个树种的树冠火电弧具有较明显的路径选择性，电弧路径通过烟雾区域并形成黄色电弧通道，竖直方向上烟雾颗粒浓度对电弧发展路径有较大影响；在火焰区中，电弧呈橙黄色，且电弧明亮程度与火焰热释放速率有关，随燃烧阶段发展，火焰区域电弧明亮度先增加后下降，相同规律也适用于火焰粗壮程度变化过程。

表 1 树冠火条件下间隙击穿电压梯度

Table 1 Average breakdown voltage gradient of air gap under pine and cypress crown fire

击穿工况	平均击穿电压梯度/(kV·m^{-1})		百分比/%	
	松木	柏木	松木	柏木
树冠火快速上升阶段	120.4	—	44.9	—
树冠火最大火势阶段	84.7	43.2	31.6	16.1
树冠火火势维持阶段	102.0	50.3	38.0	18.7

注：纯空气间隙平均击穿电压梯度为 268.3 kV/m；“百分比”为试验电压与同海拔高度纯空气间隙电压的比值。



(a) 快速上升阶段 (b) 最大火势阶段 (c) 火势维持阶段

图 4 松木树冠火间隙击穿时刻图

Fig.4 5 m air gap breakdown images of pine crown fire



(a)最大火势阶段 (b)火势维持阶段 1 (c)火势维持阶段 2

图 5 柏木树冠火击穿时刻图

Fig.5 Air gap breakdown images of cypress crown fire

对比两个树种最大火势时平均击穿电压梯度，柏木树冠火平均击穿电压梯度为 43.2 kV/m，是同海拔高度下导线-板电极纯空气间隙平均击穿电压梯度的 16.1%，是松树树冠火最大火势时的平均电压击穿梯度的 51%，说明相同树高的柏木较松木对间隙绝缘特性影响更大。柏树树冠火燃烧的最高温度为 545.6 ℃，明显高于松树树冠火最高燃烧温度 364 ℃。在 2.25 m、2.625 m 与 3 m 高度取温，柏树树冠火在对应位置分别是松树树冠火的 2.53、1.21、1.25 倍。柏木树种枝叶较松木枝叶更致密，单位体积内热量在竖直方向上传递效率较松木更高，火焰上升流更强，燃烧烈度更大，致使更强的热电离与碰撞电离，增加火焰区域电荷数量，促进流注放电发展更加迅速，放电起始电压更低。

综合两种树种的树冠火发展阶段，分析树冠火不同燃烧阶段特性对间隙击穿特性影响。树冠火快速上升阶段，间隙之中充斥有因燃烧不充分而产生的水分、油滴以及导电颗粒；火势最大阶段，火焰颜色明亮，较高的燃烧烈度使间隙中温度较高，热流驱动作用下产生的烟雾微粒呈弥散态分布于间隙区域，由此形成的空间分布特征为介质击穿及电弧通道扩展提供了有利环境；在维持阶段，由于热量持续传导，树冠各层级呈现序列化燃烧现象，此时热释放速率相较于最大火焰阶段呈下降趋势，间隙温度低于最大火势时温度，同时较少的燃烧部位导致间隙内烟雾颗粒绝对数量少于最大火势阶段，间隙中蒸发水分更少；树冠火衰退阶段，树冠火燃烧烈度最低，间隙充斥火焰熄灭后的烟雾颗粒。

对比柏树、松树不同的燃烧特性，分析树冠火击穿特性差异原因：

1）松木树冠火平均燃烧时间为 12 min，柏树树冠火平均燃烧时间为 4 min，柏木发展速度与燃烧烈度皆显著高于松树树冠火，在快速发展阶段、最大火势阶段以及衰减阶段，5 m 间隙下柏木树冠燃烧时间分别为松木树冠火的 15%、11.8%与 50%，松木叶片呈现簇状离散分布特征，其燃烧过程中由于冠层结构影响，存在显著的热流各向异性现象，致使冠层结构各区域呈现燃烧阶段不同步的现象，树冠边缘部位燃烧阶段滞后于中心部位，而柏木枝叶致密，含油量高，树冠主体不同位置燃烧阶段保持同步，温度分布均匀，导线-板间隙之间温度上升更快，树冠内部火焰发展速度快于松树树冠，远离树冠中心部位燃烧发展速度也快；

2）柏树树冠火火焰颜色较松树树冠火更明亮，呈明红色，燃烧过程带有明显的噼啪声响，表明柏树树冠火燃烧烈度更强，热释放速率更高，利于热电离与碰撞电离，柏树树冠火火焰脉动次数为 1.5 次/s，松木树冠火由于火焰热释放速率有限，未有明显脉动；

3）快速发展阶段与最大火势阶段时，柏树燃烧产生黄色烟雾，松木燃烧烟雾为灰白色，柏木燃烬尺寸普遍大于松木燃烬，柏木部分燃烬受剧烈燃烧引起的高速热流而四处飞散，白色燃烬尺寸分布有一定分散性，使用软件提取击穿时刻前后关键帧，以间隙中动态燃烬为分析对象，将燃烬与卡尺等典型长度物品进行像素比对，分析尺寸差异。柏木燃烬直径一般约为 0.2~1 cm，长度一般在 1~9 cm，体积大的燃烬漂浮下沉，体积较小的燃烬受热流影响更大，部分会运动到间隙之间，与蒸发的水滴、油滴等颗粒共同充斥于非火焰段空气间隙，颗粒浓度因在竖直方向存在差异，这种类“小桥”的介质颗粒链易荷电畸变电场并短接间隙，致使间隙绝缘强度显著降低；

4）最大火势阶段，柏树树冠火火焰高度可达 5.10 m，可以桥接整个导线-板间隙，松木树冠火最大火焰高度为 3.35 m，无法桥接间隙，柏木火焰脉动较松木更快，柏木击穿后变压器保护动作，此时重新升压柏木树冠火间隙更易击穿，平均击穿电压梯度范围可达 10~30 kV/m，表现出高海拔地区显著的二次建弧现象[11]。松木、柏树树冠火燃烧典型特征如图 6、7 所示，截取柏木最大火势阶段典型时刻红外温度分布云图，可直观展示出间隙火焰区与非火焰区温度分布以及烟雾颗粒温度及分布。此时刻，树冠整体温度分布处于高位，最高温度为 540.4 ℃，燃烧形成的热流上行至导线附近，加热间隙，降低空气密度，增强非火焰段的热电离和碰撞电离；同时持续燃烧形成的燃烬在间隙非火焰部分不规则分布，燃烬大小有所差异，且温度与间隙热流温度接近，高于周围未被加热的空气。火焰高温以及热流将颗粒送入线路附近强电场区域是导致山火中颗粒触发能力增强的重要原因，柏木燃烬体积较大，在强电场下荷电且温度较高，畸变电场范围更大，易于触发放电且维持放电条件，显著降低非火焰段间隙绝缘强度。

2.2 不同间隙长度下间隙直流击穿试验

2.2.1 木垛火条件

按照试验步骤搭建木垛火模拟试验平台，开展5 m、9 m间隙下的击穿试验，选取最大火势阶段的击穿过程进行分析，间隙直流击穿图如图8、9所示。

5 m间隙下木垛火火焰桥接比例为65%~74%，火焰无法桥接整个间隙。9 m间隙下木垛火火焰桥接比例为50%~60%。9 m间隙下火焰脉动较5 m间隙下更快，9 m间隙下上部木垛受猛烈燃烧影响出现显著碳化现象，燃烧产生的炭黑颗粒随热流上升至间隙非火焰段，5 m间隙下木垛燃烧也伴有炭黑颗粒上升，但烟雾颗粒数量和竖直方向上浓度较9 m间隙下更低。9 m间隙下木垛火燃烧平均持续时间为22 min，短于5 m间隙下的燃烧平均持续时间。

5 m间隙下，电弧亮度不甚明显，电弧颜色与火焰颜色接近；在9 m间隙下，电弧颜色呈蓝紫色，弧柱较粗，电弧能量较大。提取最大火势阶段间隙平均击穿电压梯度，如表2所示，并与该海拔纯空气间隙平均击穿电压梯度作比，列于表格最右侧，后文表格做同样处理，不再赘述。

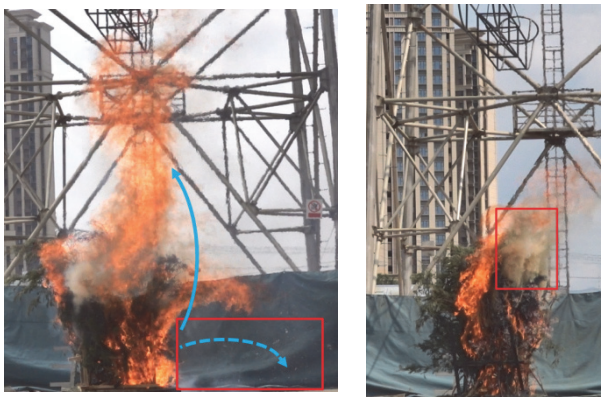
从火焰段与非火焰段的绝缘特性出发，分析木垛火不同间隙长度下平均击穿电压梯度差异：9 m间隙下木垛可燃物体积增加导致火焰平均高度增加，但对应火焰桥接整个间隙比例却低于5 m间隙；同时9 m间隙下的木垛火平均击穿电压梯度低于5 m间隙下对应值，前者为后者的87.8%。不同间隙长度下，间隙平均击穿电压梯度正相关于火焰桥接比例，原因在于非火焰段的绝缘特性差异，植被垛密度增加对火焰段绝缘强度影响有限[18]，而对非火焰段有较大影响：最大火势阶段，单位体积热释放速率较高，热流与辐射致使非火焰段距导线不同位置温度始终维持高位，9 m间隙下木垛火热释放速率高于5 m间隙，非火焰段温升有显著增加，致使该区段空气密度下降且电离程度增加，促进流注放电，降低非火焰段绝缘强度；除此以外，9 m间隙下木垛燃烧产生的炭黑颗粒绝对数量和浓度皆高于5 m间隙，导致非火焰区段烟雾颗粒与浓度增加，也会导致平均击穿电压梯度显著下降。以上分析表明：更长的间隙距离下，非火焰段温度与烟雾颗粒所主导的绝缘特性对整个间隙绝缘特性影响较火焰段的火焰参数更大。



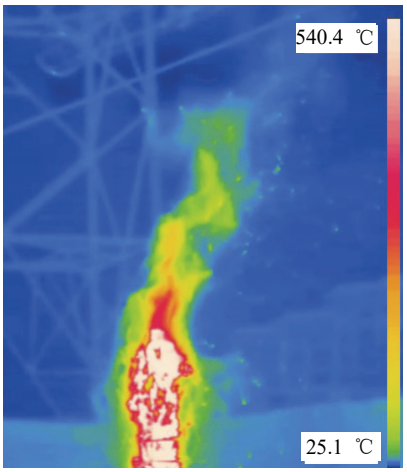
(a) 快速上升阶段 (b) 最大火势阶段

图6 松树树冠火典型发展阶段

Fig.6 Typical burning stages of pine crown fire



(a) 柏树树冠火可桥接整个间隙并产生大量白色漂浮燃烬 (b) 柏树树冠火快速上升阶段产生黄白色烟雾



(c) 柏树树冠火产生的烟雾颗粒随热流进入间隙，颗粒温度约100 ℃

图7 柏树树冠火燃烧显著特征

Fig.7 Significant characteristic of cypress crown fire

2.2.2 树冠火条件

利用试验平台开展9 m间隙下的树冠火空气间隙击穿试验，选取最大火势阶段的击穿过程进行分析，此阶段，主要燃烧部位包括树冠和部分底部木垛，认为该阶段燃烧特性可以模拟实际山火中地

表 2 木垛火条件下 5 m、9 m 间隙击穿特性对比

Table 2 Breakdown characteristics comparison of the 5 m and 9 m conductor-plane air gap under pine crib fire

间隙长度/m	火焰桥接比例/%	平均击穿电压梯度/(kV·m^{-1})	百分比/%
5	68.3	104.5	38.9
9	56.2	89.5	33.4



图 8 松木木垛火 9 m 间隙击穿时刻图

Fig.8 9 m-air-gap breakdown images of pine crib fire

表火向树冠火垂直方向阶梯传递过程中的火焰特性[26]，并与前文 5 m 间隙下燃烧与击穿特性对比，9 m 间隙直流击穿瞬间如图 10 所示。

9 m 间隙下树冠火燃烧特性发展过程与 5 m 间隙下一致，主体研究对象为树冠。系列试验中树冠燃烧结束状态判定参考森林损失调查中烧毁木定义，即树冠全部烧焦，树干严重被烧，采伐后不能作为用材的林木[27]。因此后续纯木垛燃烧不计入间隙击穿特性研究过程。基于上述前提分析，发现 9 m 间隙下树冠火各个燃烧阶段时间较 5 m 间隙下燃烧时间更短，整体燃烧时间较 5 m 间隙下降约 22.7%，在快速发展阶段、最大火势阶段以及衰减阶段，9 m 间隙下松木树冠火的燃烧时间分别为 5 m 松木树冠火的 80.1%、96%与 97%。而 9 m 间隙下树冠可燃物体积大于 5 m 间隙对应值，认为在 9 m 间隙下热量传递在各个方向上效率显著高于 5 m 间隙。

树冠火条件下，5 m、9 m 间隙下的平均击穿电压梯度接近，分别为 84.7 kV/m 和 84.6 kV/m，如表 3 所示。9 m 间隙下火焰高度范围为 3.04~4.54 m，5 m 间隙下火焰高度范围为 1.74~3.35 m，两种间隙长度下，火焰桥接比例相接近，树冠火平均击穿电压梯度接近。



图 9 松木木垛火 5 m 间隙击穿时刻图

Fig.9 5 m-air-gap breakdown images of pine crib fire



图 10 松木树冠火 9 m 间隙击穿时刻图

Fig.10 9 m-air-gap breakdown images of pine crown fire

表 3 树冠火条件下 5 m、9 m 间隙击穿特性对比

Table 3 Breakdown characteristics comparison of the 5 m and 9 m conductor-plane air gap of pine crown fire

间隙距离/m	火焰桥接比例/%	平均击穿电压梯度/(kV·m^{-1})	百分比/%
5	45.9	84.7	31.6
9	42.8	84.6	31.5

对比 5 m、9 m 间隙下的电弧形状进行分析，如图 4 与图 10 所示。发现电弧本体不同位置的粗壮程度不同，明亮程度也存在差异，尤其是非火焰段，9 m 间隙下松木击穿产生电弧明亮度、电弧宽度显著高于 5 m 间隙，表征更强的电弧能量。在同一击穿时刻，非火焰段电弧不同段明亮程度即电弧能量存在差别，如图 10 所示。树冠火燃烧产生大量炭黑颗粒，且松木含有大量含有 K、Na 等碱金属和碱土

金属盐类，其中，炭黑与 K 金属盐类的电离能很低。在间隙部分位置出现烟雾颗粒浓度较高的部位电弧明亮程度更高，认为这些部位的碱金属盐在间隙高温作用下热电离与碰撞电离的剧烈程度较浓度低部位更加显著，电离产生的大量电子和离子大大加快了流注放电向电弧放电的发展速度。在电场作用下，微粒荷电形成空间电荷畸变局部电场，同时大量颗粒集聚形成颗粒链，短接间隙进一步降低间隙非火焰段绝缘强度。

树冠火作为实际山火过程中典型的火焰类型之一，常与地表火同时存在，9 m 间隙下树冠火系列试验能够模拟了真实地表火引燃梯状可燃物向树冠火发展的过程。同时与 5 m 间隙下模拟树冠火进行对比，发现非火焰段对间隙击穿特性影响程度较大，后续应开展更多生长态树冠火条件下非火焰段绝缘特性量化试验。

2.3 火焰类型差异对间隙击穿特性的影响分析

树冠火和木垛火两种火焰类型都会显著降低间隙的绝缘强度，但在不同间隙长度下影响程度有所差别，以松木为研究对象，选取不同间隙长度下两种火焰类型最大火势阶段的击穿特性进行分析，如表 4 所示，并使用火焰桥接比例辅以分析。

松木树冠火和木垛火都无法桥接整个间隙，非全桥接情况下，相较于火焰区，烟雾区绝缘强度变化对间隙整体绝缘影响更大。以 5 m 间隙为例，木垛火的火焰桥接比例为树冠火的 149%，而树冠火整体间隙平均击穿电压梯度为木垛火的 81.2%，树冠火更低的火焰桥接比例对间隙带来更大的绝缘强度下降，表明树冠火烟雾区对整体间隙绝缘强度劣化能力强于木垛火。相同的规律对 9 m 间隙下依旧适用，木垛火火焰桥接比例为树冠火的 132%，而树冠火整体间隙平均击穿电压梯度为木垛火的 94.6%。9 m 间隙下树冠火和木垛火间隙平均击穿电压梯度差距小于 5 m 间隙，主要原因为间隙长度增加导致非火焰区绝缘特性差异减小，9 m 间隙木垛火较 5 m 间隙下的温升与高电导率烟雾颗粒浓度更高，非火焰区绝缘强度下降更大，流注放电转为持续放电的持续条件更易满足。

表 4 不同火焰类型下 5 m、9 m 间隙导线-板电极击穿特性对比

Table 4 Breakdown characteristics of the 5 m and 9 m conductor-plane air gap under different fire types

火焰类型	间隙长度/m	火焰桥接比例/%	平均击穿电压梯度/(kV·m^{-1})	百分比/%
树冠火	5	45.9	84.7	31.6
木垛火	5	68.3	104.5	38.9
树冠火	9	42.8	84.6	31.5
木垛火	9	56.2	89.5	33.4

3 结论

1）5 m 间隙下，柏木树冠火对间隙绝缘强度影响大于松木树冠火，最大火势阶段，松木树冠火平均击穿电压梯度分别为 84.7 kV/m 和 43.2 kV/m，后者为前者的 51%，火焰段较高热释放速率和非火焰段较大的烟雾颗粒为击穿特性存有差异的主要原因。

2）长间隙条件下，非火焰段对间隙整体绝缘强度影响较火焰段更大，5 m 间隙松木木垛火火焰平均桥接比例比 9 m 间隙高 15.4%，而平均击穿电压梯度却高 12.2%，火焰桥接比例与平均击穿电压梯度呈正相关的原因在于 9 m 间隙下非火焰段温升以及颗粒浓度皆高于 5 m 间隙；树冠火桥接比例接近的情况下，平均击穿电压梯度接近。

3）生长态树冠火对间隙绝缘强度影响较木垛火更大，火焰类型差异对导线-板电极空气间隙直流击穿特性影响在于烟雾区，生长态树冠火烟雾区下降程度较木垛火烟雾区更多，对整体间隙绝缘强度影响更大，间隙长度增加，生长态树冠火与木垛火条件下间隙直流击穿特性差异减小。

参考文献 References

[1] SHU Y B, CHEN W J. Research and application of UHV power transmission in China[J]. High Voltage, 2018, 3(1): 1-13.

[2] 李更丰，孙少华，别朝红，等. 面向新型电力系统弹性提升的储能优化配置与灵活调度研究综述[J]. 高电压技术，2023，49(10)：4084-4095.
LI Gengfeng, SUN Shaohua, BIE Zhaohong, et al. Review on optimal configuration and flexible scheduling research of energy storage for resilience improvement of new power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4084-4095.

[3] 中国电力企业联合会. 中电联发布 2024—2025 年度全国电力供需形势分析预测报告[EB/OL]. 北京：中国电力企业联合会，2025[2025-03-01]. https://cec.org.cn/detail/index. html?3-341403.
China Electricity Council. Analysis and forecast report on national power supply and demand situation in 2024—2025[EB/OL]. Beijing: China Electricity Council, 2025[2025-03-01]. https://cec.org.cn/detail/index.html?3-341403.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 舒胜文，唐世杰，肖　楠，等. 基于 YOLOv5s-EBWS 的多背景干扰下输电线路走廊火焰和烟雾检测方法[J]. 高电压技术，2025，51(5)：2374-2383.
SHU Shengwen, TANG Shijie, XIAO Nan, et al. Flame and smoke detection method based on YOLOv5s-EBWS in transmission line corridors under multiple background interferences[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2374-2383.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 尤　飞，陈海翔，张林鹤，等. 木垛火导致高压输电线路跳闸的模拟实验研究[J]. 中国电机工程学报，2011，31(34)：192-197.
YOU Fei, CHEN Haixiang, ZHANG Linhe, et al. Experimental study on flashover of high-voltage transmission lines induced by wood crib fire[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 192-197.

[14] 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.

[15] 普子恒，张　隆，叶　宽，等. 考虑化学反应强耦合的植被火焰条件下直流间隙多物理场耦合模型[J]. 高电压技术，2023，49(2)：536-545.
PU Ziheng, ZHANG Long, YE Kuan, et al. Multi-physical-field coupling model of DC gap under vegetation flame condition considering strong coupling of chemical reaction[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 536-545.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 黄道春，周硕伦，王华清，等. 植被火条件下架空线路相-地长空气间隙交流击穿特性[J]. 中国电机工程学报，2025，45(15)：6129-6139.
HUANG Daochun, ZHOU Shuolun, WANG Huaqing, et al. AC breakdown characteristics of overhead transmission line phase-ground long air gap under vegetation fire conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(15): 6129-6139.

[19] 王　彤，周恩泽，黄道春，等. 高海拔植被火条件下导线-板间隙直流击穿特性影响因素分析[J]. 广东电力，2024，37(8)：70-76.
WANG Tong, ZHOU Enze, HUANG Daochun, et al. Influence factor analysis of conductor-plane gap breakdown characteristic under vegetation fire at high altitude condition[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(8): 70-76.

[20] 赵凤君，王明玉，舒立福. 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. 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.
MOU Chunjie. Study on the development of crown fire and the characteristics of fire behavior[D]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University, 2021.

[22] 潘　登. 南亚热带典型人工林可燃物空间分布及潜在火行为研究[D]. 长沙：中南林业科技大学，2017.
PAN Deng. Distribution of fuel and potential fire behavior of typical plantations in southern China[D]. Changsha, China: Central South University of Forestry and Technology, 2017.

[23] 王　叁. 川西南地区主要针叶林可燃物空间分布及潜在火行为[D]. 北京：北京林业大学，2016.
WANG San. Fuel spatial distribution and potential fire behavior of major coniferous forests in southwest Sichuan, China[D]. Beijing, China: Beijing Forestry University, 2016.

[24] 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.

[25] 詹　航，牛树奎，王　博. 北京地区 8 种树种枯死可燃物含水率预测模型及变化规律[J]. 北京林业大学学报，2020，42(6)：80-90.
ZHAN Hang, NIU Shukui, WANG Bo. Prediction models and changing rules of dead fuel moisture content of 8 forest species in Beijing area[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(6): 80-90.

[26] 张运生，舒立福，翟春婕，等. 滇中地区主要树种单一燃烧性能研究[J]. 消防科学与技术，2022，41(10)：1460-1463.
ZHANG Yunsheng, SHU Lifu, ZHAI Chunjie, et al. Study on the single combustibility of main tree species in central Yunnan[J]. Fire Science and Technology, 2022, 41(10): 1460-1463.

[27] 国家林业局. 森林火灾成因和森林资源损失调查方法：LY/T 1846—2009[S]. 北京：中国标准出版社，2009.
National Forestry and Administration. Survey method for the causes of forest fire and the damage of forest resources: LY/T 1846—2009[S]. Beijing, China: Standard Press of China, 2009.



毕吉禹
2000—，男，硕士生
研究方向为高电压与绝缘技术
E-mail: 1311266247@qq.com

BI Jiyu



黄道春(通信作者)
1976—，男，博士，教授，博导
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等
E-mail: huangdc99@163.com

HUANG Daochun
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2025-03-07　在线出版日期　2025-04-27　　编辑　曹昭君