

# 山火对空气间隙绝缘击穿特性影响试验研究

刘磊<sup>1</sup>, 杨宇航<sup>2</sup>, 徐会凯<sup>1</sup>, 张星海<sup>3</sup>, 吴驰<sup>3</sup>, 陈天翔<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059; 2. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 3. 国网四川省电力公司力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:**近年来,山火频发给电网安全稳定运行带来了巨大威胁。山火会导致架空输电线路间隙绝缘强度显著下降,从而引发线路跳闸,造成线路出现停运等严重事故。文中设计了“棒-棒”电极空气间隙放电模型,开展了“棒-棒”模型的空气间隙绝缘击穿试验,研究了火焰、温度、烟雾对间隙绝缘的影响。试验研究表明,火焰高度和温度对间隙击穿特性影响较大,温度是影响间隙击穿特性的决定性因素。所研究数据可为输电线路预防山火跳闸事故提供参考。

**关键词:**山火; 输电线路; 空气间隙; 击穿特性; 试验研究

**中图分类号:** TM 832 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)01-0016-05

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20220104

## Experimental Research on Influence of Mountain Fire on Insulation Breakdown Characteristics of Air Gap

LIU Lei<sup>1</sup>, YANG Yuhang<sup>2</sup>, XU Huikai<sup>1</sup>, ZHANG Xinghai<sup>3</sup>, WU Chi<sup>3</sup>, CHEN Tianxiang<sup>1</sup>

(1. College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** In recent years, the frequently happening of mountain fire has brought a great threat to the safe and stable operation of power grid. Mountain fire will cause the insulation strength of overhead transmission line gap to decrease significantly, resulting in line tripping, line shutdown and other serious accidents. So a "rod-rod" electrode air gap discharge model is designed, the air gap insulation breakdown test of the "rod-rod" model is carried out, and the influence of flame, temperature and smoke on gap insulation is studied. The results show that the flame height and temperature have a great influence on the gap breakdown characteristics, and the temperature is the decisive factor affecting the gap breakdown characteristics. The research results can provide a reference for the prevention of mountain fire tripping accidents in transmission lines.

**Key words:** mountain fire; transmission line; air gap; breakdown characteristics; experimental research

## 0 引言

线路走廊紧张是中国输电网发展过程中的突出问题<sup>[1-4]</sup>,长距离输电线路不可避免经过植被茂密的山林火灾易发生区<sup>[5]</sup>。山火发生时,植被猛烈燃烧,剧烈的氧化还原反应导致周围众多环境因素发

生翻天覆地的变化。火焰的高温燃烧会产生众多的带电粒子和烟尘颗粒等,这些因素容易导致输电线路绝缘强度迅速下降,从而引发线路跳闸事故<sup>[6-8]</sup>。

已有不少文献针对火焰条件下间隙的击穿特性开展了相关试验研究<sup>[9-12]</sup>,但由于山火引发输电线路故障过程复杂多变,所搭建的模拟试验平台考虑的影响因素较少,也缺少对流注起始到先导击穿这一整个放电过程的监测,同时忽略了变化的火焰状态对间隙绝缘能力的影响<sup>[9-10]</sup>。为了更精确地分析

森林火灾引发输电线路故障机理,下面通过建立模拟试验平台,探究比较了烟雾、温度、火焰对间隙绝缘强度的影响,为山火引发输电线路跳闸事故的研究提供参考。

## 1 试验平台搭建

### 1.1 试验布置

山火发生时,浓烟、高温、火焰、火焰高度等都是导致线路对地或相间绝缘能力降低的主要原因<sup>[7,10-12]</sup>,为了进一步探究和比较这些因素对绝缘性能的影响程度,设计了“棒-棒”电极间隙放电模型,研究了火焰、温度和烟雾对间隙绝缘特性影响程度,试验平台如图 1 所示。

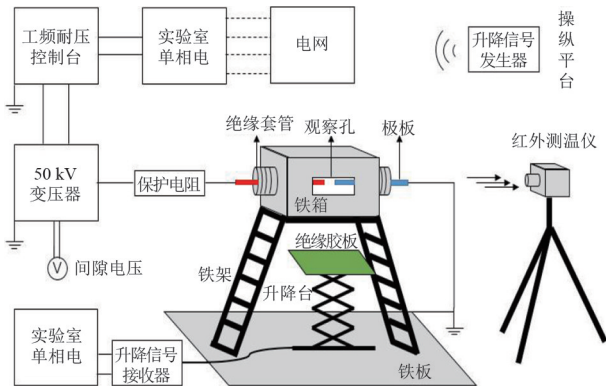


图 1 “棒-棒”电极间隙放电模拟试验平台

试验设备主要由 50 kV/15 kVA 工频试验变压器、保护电阻、无线控制升降台、红外测温仪以及“棒-棒”电极组成。其中“棒-棒”电极放电模型构成部分包括一个多面打孔铁箱、一对高压穿墙套管、一对电极板,如图 2 所示。穿墙套管为椭圆柱形,镶嵌固定于铁箱两侧。两极板穿过两穿墙套管,在套管内进行固定,构成间隙距离为 3 cm 的“棒-棒”间隙模型。3 cm 距离为 35 kV 输电线路树线放电的临界距离。3 cm “棒-棒”间隙可以在一定程度上模拟输电线路树线不均匀电场。

为了研究温度和空气对流扩散对间隙击穿电压的影响,铁箱底面设置成开合结构,可控制铁箱为半密闭或密闭状态。铁箱前侧设有小型观察孔,主要用于观测间隙击穿现象和安装烟雾传感器。

### 1.2 试验方法与步骤

间隙条件下模拟试验分为:间隙条件下模拟预实验、果炭升温试验、间隙烟雾试验、酒精火焰桥接试验。



图 2 “棒-棒”电极间隙放电模型箱

1) 搭建试验平台,进行试验设备的调试和连接,并准备好相应燃烧物品。将铁箱内“棒-棒”电极间隙距离固定在 3 cm,测量实验室内温度、湿度、气压后,进行预实验。

2) 引燃已经堆叠好的无烟果炭,放置在铁箱下部,将铁箱内部空气温度升至最高温度 200 ℃。试验期间没有烟雾、火焰的干扰,通过控制升降台改变果炭与箱体底部之间距离来改变箱体内气隙温度,从而得到空气间隙温度这一单一因素变化时不同温度对应的间隙击穿电压。

3) 待铁箱冷却至室温后,进行间隙烟雾试验。试验烟雾由枯木树叶不完全燃烧产生,试验过程中,应确保枯木树叶处于不完全燃烧状态,禁止火焰桥接间隙。试验进行时,通过观察孔上安装的烟雾传感器测量烟雾浓度,同时测量特定烟雾浓度范围内不同气隙温度对应的击穿电压。

4) 进行酒精火焰击穿电压试验,测量间隙与酒精火焰在未桥接、临界桥接和完全桥接等火焰高度宽度不一样的情况下,不同温度所对应的击穿电压。每组试验都通过红外测温仪测量并记录“棒-棒”电极间隙的平均温度。

试验结束后,整理所记录的数据,按照步骤 1 至步骤 4 重复 3 次试验,并记录数据。

## 2 试验及结果分析

### 2.1 温度对间隙击穿电压影响

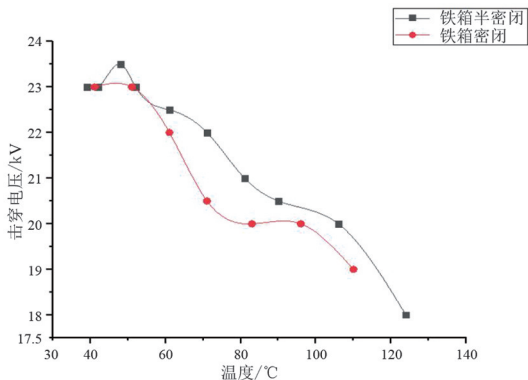
为减小空气对流扩散对试验的影响,控制参数单一变化,需将铁箱设置成密闭或半密闭状态。在密闭状态下,铁箱底部关闭,火焰喷枪从观察孔对箱体加热,使箱体成密闭状态。在半密闭状态下,铁箱底部打开,火焰喷枪从箱体底部加热。由于观察孔

开口较小,试验过程中对铁箱内气隙温度变化影响较小,铁箱可视为密闭或半密闭状态,如图 3 所示。测量记录不同温度对应的击穿电压。

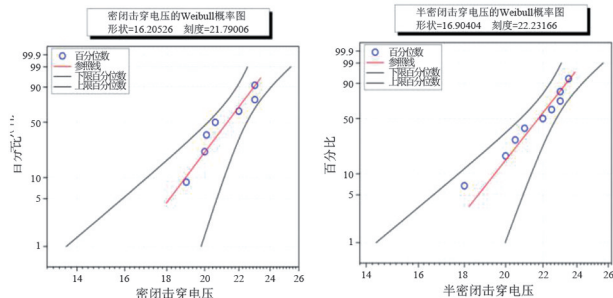


图 3 密闭和半密闭状态下加热试验

将密闭状态和半密闭状态下击穿电压随温度变化的试验数据绘制成曲线,如图 4 所示。在密闭状态下的间隙击穿电压比同温度半密闭状态下的间隙击穿电压低。这是由于密闭环境中,上一次间隙击穿所产生的带电电荷不容易扩散,导致下一次击穿更容易发生,使击穿电压下降。由于密闭空间内空气间隙更易击穿,为了排除这一因素对试验的影响,在之后的试验中应选择半密闭状态进行试验。



(a) 击穿电压对比



(b) 威布尔概率

图 4 密闭和半密闭条件下击穿电压随温度变化

## 2.2 烟雾对间隙击穿电压影响

间隙烟雾试验如图 5 所示。在箱体下部放上枯

木树叶和少量果碳,试验过程中枯木树叶处于不完全燃烧状态,箱体内部气隙温度可通过控制升降台改变枯木和果碳与箱体底部之间的距离来改变。



图 5 间隙烟雾试验

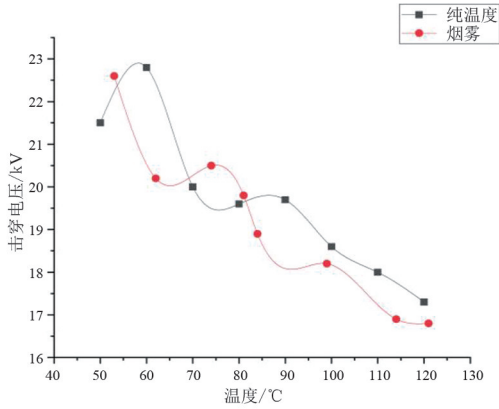
将烟雾浓度设置在 9.999% 以上,将不同温度对应的击穿电压绘制成曲线,并与通过果碳升温试验获得的单纯温度因素影响下的击穿电压数据进行比较,如图 6 所示。从图中可以看出,在 50~120 °C 范围内,最小击穿电压与最大击穿电压相比:单纯温度因素影响下,击穿电压下降 24.1%;烟雾因素影响下,击穿电压下降 25.7%。与单纯温度因素影响相比,枯木树叶产生的烟雾没有使击穿电压有明显降低,说明此种烟雾条件下对降低间隙绝缘能力有一定的影响但远不及温度明显。

## 2.3 火焰对间隙击穿电压影响

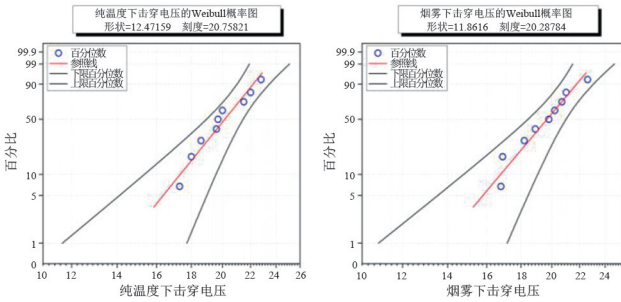
将 12 个酒精块堆叠在锡纸盘内引燃使火焰桥接间隙。整个燃烧过程中,酒精块燃烧稳定性较好,且不产生烟雾,适合用于研究火焰对击穿电压的影响。调节锡纸盘内酒精火焰高度变化,间隙与酒精火焰在未桥接、临界桥接和完全桥接的状态如图 7 所示。在铁箱半密闭状态下,只采用酒精火焰对铁箱升温速度较慢,因此先采用火焰喷枪将铁箱内气隙温度加热到试验所需温度,再加入酒精火焰。

将酒精火焰桥接间隙条件下测量的击穿电压与对应温度的数据绘制成曲线,并与单纯温度因素影响下击穿电压曲线进行比较分析,如图 8 所示。当酒精火焰未桥接间隙时,相同温度下,酒精火焰与单纯温度因素影响下击穿电压随温度变化基本一致,说明在该阶段温度是主要影响因素;当酒精火焰和间隙临界桥接时,相同温度下,酒精火焰曲线的击穿电压会陡然下降,说明酒精火焰桥接间隙时,酒精火焰对击穿电压有着重要影响;当酒精火焰完全桥接间隙时,随着温度的升高,酒精火焰条件下击穿电压





(a) 击穿电压对比

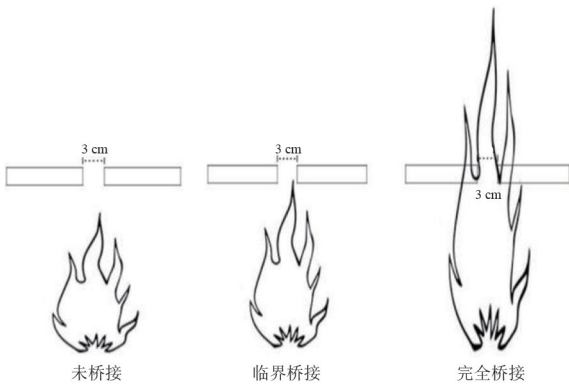


(b) 威布尔概率

图 6 烟雾与温度条件下击穿电压随温度变化



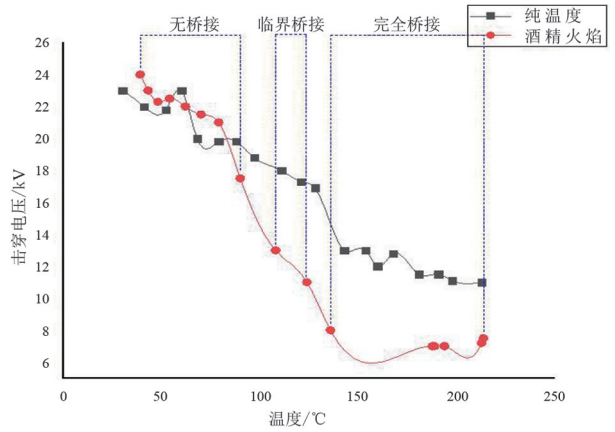
(a) 酒精火焰高度



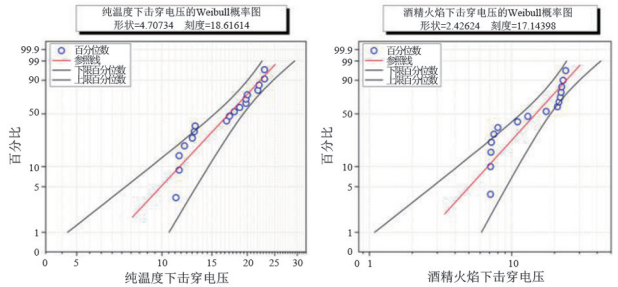
(b) 酒精火焰未桥接、临界桥接和完全桥接

图 7 酒精火焰与间隙桥接状态

下降梯度和单纯温度因素影响下击穿电压下降梯度基本一致,约为  $1.9 \times 10^{-2}$  kV/°C。在完全桥接阶段,当气隙温度稳定时,击穿电压随酒精火焰高度的变化幅度较小,这说明在酒精火焰完全桥接间隙时,温度仍为影响间隙击穿特性的决定性因素,而酒精火焰对击穿电压的影响较小。从图 8 中也可以看出,当酒精火焰完全桥接间隙且气隙温度稳定时,击穿电压的变化幅度较小,此时的击穿电压可视为最低击穿电压。



(a) 击穿电压对比



(b) 威布尔概率

图 8 酒精火焰与纯温度条件下击穿电压随温度变化

在同一条件下重复 3 次试验,获得的试验结果基本一致,证明了所模拟试验结果的一致性。

### 3 结 论

上面设计了“棒-棒”电极间隙放电模型,开展了“棒-棒”模型的空气间隙绝缘击穿试验,研究了火焰、温度、烟雾对间隙绝缘的影响程度,得到了以下结论:

1) 在单纯温度因素影响下,击穿电压的大小随温度的升高显著下降,温度对间隙绝缘能力的影响明显。

2) 在一定温度条件下,枯木树叶产生的烟雾

浓度对击穿电压的影响较小。当烟雾浓度达到 9.999% 以上水平时,与单纯温度因素影响相比,枯木树叶产生的烟雾使击穿电压有所降低但不明显,说明枯木树叶产生的烟雾对击穿电压影响较小,远低于温度的影响。

3) 当酒精火焰高度升高但未桥接间隙时,击穿电压降低,与同阶段单纯温度因素影响下的变化幅度基本一致;当酒精火焰和间隙临界桥接时,击穿电压持续下降且下降明显;当酒精火焰完全桥接间隙时,击穿电压变化幅度与同阶段单纯温度因素影响下的变化幅度基本一致。当气隙温度稳定时,击穿电压随酒精火焰高度的变化幅度较小,说明在酒精火焰完全桥接间隙时,温度为影响间隙击穿特性的决定性因素。同时,当酒精火焰完全桥接间隙且气隙温度稳定时,击穿电压的变化幅度较小,所获得的击穿电压可视为最低击穿电压。

#### 参考文献

- [1] 张文亮,陆家榆,鞠勇,等.±800 kV 直流输电线路的导线选型研究[J].中国电机工程学报,2007,27(27):1-6.
- [2] 张文亮,于永清,李光范,等.特高压直流技术研究[J].中国电机工程学报,2007,27(22):1-7.
- [3] 舒印彪.中国直流输电的现状与展望[J].高电压技术,2004,30(11):1-2.
- [7] 蒋文权.山火对输电线路流注放电的影响机理[D].长沙:湖南大学,2019.
- [8] 张雷.华北电网输电线路受山火影响特征分析[J].山东电力技术,2019,46(9):18-22.
- [9] 何诚,舒立福,刘柯珍,等.广西地区山火引起高压线路跳闸环境特征研究[J].消防科学与技术,2020,39(12):1626-1629.
- [10] 邵尤国,李辉,赵洁,等.山火条件下的特高压输电线路击穿概率模型研究与分析[J].电测与仪表,2018,55(21):31-35.
- [11] 王强.超特高压输电线路防火管理分析与研究[J].中国战略新兴产业,2020(10):15.
- [12] 刘士嘉,段泽龙.高压输电线路山火跳闸原因分析及对策[J].消防界(电子版),2019,5(8):51.
- [13] 周志宇.山火灾害下电网输电线路跳闸风险评估研究[D].北京:华北电力大学,2019.
- [14] 刘丛洋.超高压架空输电线路的山火灾害防控探究[J].科技与创新,2016(4):103-104.
- [15] 王振华.模拟山火条件下典型高压输电线路闪络和受

- [4] 舒印彪,张文亮.特高压输电若干关键技术研究[J].中国电机工程学报,2007,27(31):1-6.
- [5] 刘振亚.特高压电网[M].北京:中国经济出版社,2005.
- [6] 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.
- [7] 陈孝明,魏晗,阮羚,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.
- [8] 叶立平,陈锡阳,何子兰,等.山火预警技术在输电线路的应用现状[J].电力系统保护与控制,2014,42(6):145-153.
- [9] 祝贺,刘程.山火导致输电线路间隙击穿特性的研究现状[J].电瓷避雷器,2018(4):150-159.
- [10] 吴田,胡毅,阮江军,等.交流输电线路模型在山火条件下的击穿机理[J].高电压技术,2011,37(5):1115-1122.
- [11] 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.
- [12] 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.

#### 作者简介:

刘 磊(1996),男,硕士研究生,主要研究方向为高电压试验技术。

(收稿日期:2021-10-28)

(上接第 9 页)

- 损特性及机理分析[D].南京:南京工业大学,2016.
- [16] 李斌,杜卫,朱海波,等.山区地带发生的山火对超高压输电线路的影响[J].工程技术(全文版),2016:210.
- [17] 万能,庄严,马超.高压输电线路山火跳闸机理分析及防范措施探讨[J].安徽电气工程职业技术学院学报,2016,21(1):70-72.
- [18] 刘程,孔祥美.山火条件下±800 kV 输电线路合成电场仿真研究[J].黑龙江电力,2020,42(5):416-420.
- [19] 于晓翔.一起全密封 35 kV 变压器故障分析[J].电气技术,2020,21(6):91-94.
- [20] 电力设备预防性试验规程:DL/T 596—1996[S].北京:中国电力出版社,1997.
- [21] 电力安全工作规程 高压试验室部分:GB 26861—2011[S].北京:中国电力出版社,2012.

#### 作者简介:

杨弄潮(1999),男,在读硕士研究生,研究方向为高压电试验技术。

(收稿日期:2021-10-29)