

# 木垛火导致高压输电线路跳闸的模拟实验研究

尤飞<sup>1</sup>, 陈海翔<sup>1</sup>, 张林鹤<sup>1</sup>, 张云<sup>2</sup>, 周建军<sup>1</sup>, 朱霁平<sup>1</sup>

- (1. 火灾科学国家重点实验室(中国科学技术大学), 安徽省 合肥市 230026;
2. 中国南方电网超高压输电公司梧州局, 广西壮族自治区 梧州市 543002)

## Experimental Study on Flashover of High-voltage Transmission Lines Induced by Wood Crib Fire

YOU Fei<sup>1</sup>, CHEN Haixiang<sup>1</sup>, ZHANG Linhe<sup>1</sup>, ZHANG Yun<sup>2</sup>, ZHOU Jianjun<sup>1</sup>, ZHU Jiping<sup>1</sup>

- (1. State Key Laboratory of Fire Science (University of Science and Technology of China), Hefei 230026, Anhui Province, China;
2. Extra High Voltage Power Transmission Company Wuzhou Branch, Wuzhou 543002, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China)

**ABSTRACT:** In order to determine the influences of forest fire on the flashover property and mechanism of air gap under high voltage transmission lines, the flashover characteristics of simulative AC high-voltage transmission lines (single-bundle conductor, double-bundle conductor and four-bundle conductor) under the effect of wood crib fire were investigated and compared with the gap breakdown characteristics in air. Results show the average breakdown field strengths of transmission lines are remarkably decreased by wood crib flame. The measured ratio values of the average breakdown field strengths of gap in stable flame and in extinguishing flame to those in air (27.3%~33.5% and 39.4%~48.4%, respectively) are found to be lower than the calculated ratio values (37.4% and 49.8%, respectively), which are obtained by the proposed formulas that calculate the breakdown field strength under the high temperature field of wood crib fire. These results indicate that high flame temperature is the primary factor while flame ionization is secondary contributing to the reduction of breakdown field strength.

**KEY WORDS:** flashover; air gap; high-voltage transmission lines; wood crib fire; average breakdown field strength

**摘要:** 为确定山火作用下高压输电线路间空气间隙的击穿特性及机制, 利用模拟实验研究了工频高压作用下单股、双分裂和四分裂模拟导线与地之间间隙在木垛火作用下的击穿

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金; 国家自然科学基金(50906039); 中国南方电网超高压输电公司委托项目“山火引发线路跳闸的研究”。

Supported by Chinese Universities Scientific Fund (CUSF); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50906039); Authorized Project from Extra High Voltage Power Transmission Company of China South Grid.

特性, 并与空气间隙的击穿特性进行了比较。实验结果表明木垛火焰可显著降低高压导线的平均击穿场强。高压导线在木垛火稳定燃烧期火焰作用下和在熄灭阶段火羽流作用下的平均击穿场强与空气中相应值的比值分别为 27.3%~33.5%和 39.4%~48.4%(实验值), 均分别低于根据木垛火高温影响平均击穿场强公式计算所得稳定火焰中和熄灭火焰中的相应比值, 即 37.4%和 49.8%(计算值)。这表明木垛火击穿实验中火焰的高温效应是降低平均击穿场强的主要原因, 而火焰的电离作用相对次要。

**关键词:** 跳闸; 空气间隙; 高压输电线路; 木垛火; 平均击穿场强

## 0 引言

输电线路是电网的基本组成部分, 线路跳闸故障轻则影响线路的安全运行, 重则造成大面积停电事故和严重的经济损失。据统计, 导致 66~500 kV 线路故障的原因<sup>[1-4]</sup>主要为: 雷击、外力破坏、鸟害、覆冰舞动、风偏(包括沙尘暴)、污闪、带电作业、金具断裂及树木异物干扰等, 引起绝缘子闪络、跳闸、断线、倒塔、导线舞动和通信中断等事故<sup>[3-4]</sup>。近年来, 经过山区的高压输电线路频频发生由于森林火灾导致的跳闸事故<sup>[5-8]</sup>。一般情况下, 空气具有良好的绝缘性能, 高压线路往往距离地面足够高度, 不同相导线也保持足够距离, 可以满足输电线路的电气安全要求。然而, 森林火灾发生时, 由于植被燃烧产生的火焰及烟气使空气间隙的绝缘性能下降, 直至被击穿而发生高压线路跳闸事故<sup>[9]</sup>。

为研究不同植被火灾导致高压输电线路的跳

闸机制，国外开展了一些实验和理论研究。Fonseca<sup>[10]</sup>发现 3 m 间距导线-平面布局的空气间隙在 15 °C 空气中的平均击穿场强为 250 kV/m(有效值)，在 120 °C 空气中降到 170 kV/m，在甘蔗叶火中进一步降到 50 kV/m；此外平均击穿场强在空气间隙中火焰和颗粒同时存在时，比只有清洁火焰存在时下降 50%，原因是火灾中大量漂浮颗粒形成流动带电质点促进了流注通道的导通。Sadurski 在利用实验研究火灾中高压端和接地端间空气间隙的击穿特性时发现，0.1~1.2 m 空气间隙在火焰及火焰和漂浮颗粒存在时的平均击穿场强分别为 70~90 kV/m 和 4 kV/m<sup>[9-11]</sup>。Robledo-Martinez<sup>[12]</sup>用 68 kV 三相 AC 线路测试了空气在不同类型可燃物(园艺垃圾、甘蔗渣、甘蔗叶、木材及相关物、丁烷气)燃烧时线路对地面的绝缘特性，发现火焰使线路击穿电压降低一半，原因可能是高温、火焰电离和固体颗粒(灰烬)流动所致。West<sup>[13]</sup>研究了线路下方木材燃烧时两相试验线路的空气间隙击穿强度，发现导线-导线间隙和导线-杆塔间隙下平均击穿强度分别为 65 kV/m 和 49.3 kV/m。Wang 等<sup>[14]</sup>通过理论分析认为火焰高温和烟颗粒能显著降低空气的击穿电压，然而 Sukhnandan<sup>[15]</sup>认为跳闸并不明显依赖于烟尘，而是具有高浓度离子和电子的火焰的导电性所致。

综上所述，火灾时输电线路空气间隙绝缘强度会明显下降，原因可能是燃烧产生的高温、电离和烟尘。然而，不同研究者得到的绝缘强度下降程度不同，这与可燃物种类、燃烧火焰特征和火灾烟气特征等因素不同有关。已有研究也很少给出火焰燃烧特征的详细描述，在研究火灾影响下的线路击穿规律时，必须综合考虑火源的特征才有指导意义。为此，本文使用可重复实现的木垛火源，对其燃烧规律及其作用下的模拟高压输电线路间空气间隙的击穿特性进行探索，研究结果对中国输电线路的设计和运行维护具有重要意义。

## 1 火源特性和模拟高压线路放电特性的实验

### 1.1 木垛火燃烧实验

为研究火焰导致高压线路跳闸的规律，首先必须明确木垛火源的燃烧特征。

实验木垛由杉木条按规律排列制造而成，每根杉木条的截面尺寸为 2 cm×3 cm，长度为 45 cm。8

根木条以 3 cm 间隔平铺在一个水平面形成一层，共 6 层，相邻 2 层排成正交状态并用铁钉连接固定。2 个或多个木垛可以叠放，以提高燃料载量，增加燃烧强度和火焰高度。图 1 为木垛火燃烧特征的实体场景。图中，木垛燃烧产生的火焰温度由位于火焰中心线的 14 个热电偶进行测量，热电偶阵列自下而上编号为 TC0 至 TC13，距离隔热板的高度依次为 55.1、70.5、85.2、99.0、114.5、129.0、144.3、162.1、175.1、191.1、204.1、216.1、230.1 和 246.1 cm。火焰高度可以通过比对各热电偶的位置来测量。燃烧过程中木垛质量损失通过称重传感器测量，实验测试了单个木垛、2 个木垛叠放和 3 个木垛叠放时的燃烧参数，并对木垛燃烧过程进行摄像。



图 1 木垛火燃烧特征的实验现场图片

Fig. 1 Experimental photo of measuring the characteristics of wood crib fire

### 1.2 模拟高压线路下空气间隙击穿的实验

利用武汉大学高压试验厅产生的工频高压，实验测试了模拟单股导线、双分裂导线和四分裂导线在木垛火中的放电特征。单股导线为空心钢管，外径 3.8 cm，长 311.6 cm，两端为均压环；双分裂导线和四分裂导线的基本材料为外径 2.3 cm、长 600 cm 的不锈钢管，钢管两端各焊接一直径 12 cm 的钢球作为均压部件。双分裂导线由 2 根钢管平行组成，相距 43.4 cm，用 5 根短钢管相连；四分裂导线由 4 根钢管平行组成，横截面形成边长为 24 cm 的正方形，相邻钢管均用 5 根短钢管相连。

实验前，高压线布置在接地钢板正上方一定高度处，通过铜导线连接工频高压发生设备。接地钢板上堆放木垛。一连接钢板的铁丝从木垛中心伸出 1~2 cm，充当接地电极，确保击穿距离较为明确。

实验时,测试没有火焰情况下高压线在空气中的击穿电压,作为基准;点燃木垛,待燃烧稳定后逐步升高导线的工频电压直至放电。按照木垛燃烧规律调整叠放木垛个数,相同条件下仅改变高压线和接地电极的距离,进行2~4次测试。图2为模拟四分裂导线在三木垛燃烧火焰和火羽流中的放电场景。



图2 四分裂导线在三木垛火焰中和火羽流中的击穿电弧  
Fig. 2 Breakdown arc of four-bundle conductor in stable flame and fire plume of 3-crib fire

## 2 模拟火源燃烧特性及其作用下的高压导线放电特性

### 2.1 木垛燃烧规律

木垛燃烧时存在较为稳定的阶段。从实验录像可知,单木垛火、双木垛火和三木垛火在点燃开始后分别有历时420、420和460s的稳定燃烧阶段。木垛火的质量损失曲线可以反映稳定燃烧段的特征。从图3的单木垛火质量损失曲线可以看到,在燃烧稳定阶段,木垛质量基本呈线性减少,通过拟合直线(线性相关系数为0.99944)的斜率可以得到质量损失速率 $\dot{m}$ 为7.99839g/s。同样,对于双木垛和三木垛火,质量损失速率分别为15.4705和17.23485g/s。一般用火源功率 $Q$ (即热释放速率)作为重要参数来标定火源特征。火源功率的计算公式

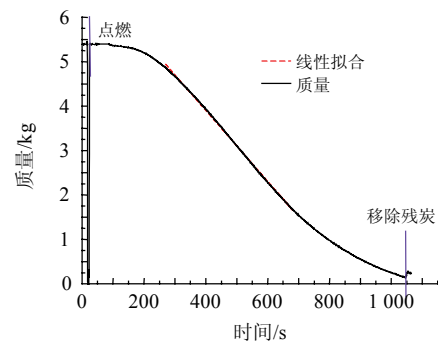


图3 单木垛火的质量损失曲线及稳定段拟合直线

Fig. 3 Mass loss curve and fitting curve in stable burning period of single wood crib

为 $Q = \dot{m}\Delta H_c$ ,其中 $\Delta H_c$ 为杉木的有效燃烧热,取值为18983J/g。由此可得单木垛、双木垛和三木垛火源的火源功率分别为151.8、293.7和327.2kW。

图4为木垛火在稳定期的平均温度分布曲线,横坐标为测点离木垛上表面的距离。可知,木垛火温度随该距离的增加而急剧降低,衰减趋势相似。以单木垛火为例,在稳定燃烧期,热电偶TC0和TC1测得的平均温度最高分别为753和623℃,至TC4(距离木垛上表面86cm)已降为242℃,从TC5起,火焰上方烟气温度大幅度降低,温度分布比较集中,表明此时热电偶未被火焰包围或短暂包围,但被上升热气流包围;由实验录像可以发现,TC0—TC3基本上处于稳定火焰区内,而TC4间歇性处于火焰区。因此可根据热电偶阵列测定的数据给出单木垛、双木垛和三木垛火焰的高度分别为1.25、1.45和2.05m。

在高压击穿实验中,需要尽可能增大击穿距离,因此高压导线通常位于火焰间歇区,因此区域的温度较低。依据图4的实验结果,下文中取火焰底部温度 $T_0=750^\circ\text{C}$ ,火焰间隙区温度 $T_1=300^\circ\text{C}$ ,

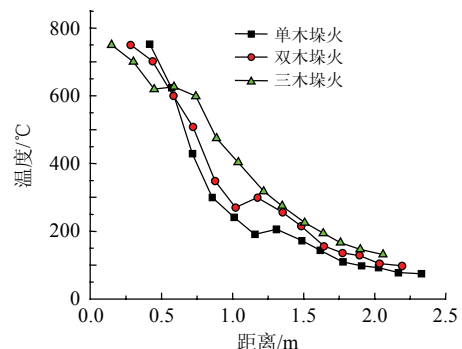


图4 木垛火稳定期火场平均温度分布曲线  
Fig. 4 Average temperature profile of wood crib fire during stable combustion period

而 2 倍火焰高度处热气流的温度为  $T_2=100\text{ }^\circ\text{C}$ ，并且认为在火焰区和羽流区的温度分布近似为分段线性变化规律。

### 2.2 空气中高压导线击穿实验结果

由于空气间隙的平均击穿场强与空气湿度、温度等参数有关，而且高压击穿实验存在一定误差，因此不同实验条件下得到的数据可能不同。为比较木垛火对空气间隙击穿电压的影响，首先测量纯空气间隙的击穿特性。实验时空气温度为  $T_a=17\text{ }^\circ\text{C}$ ，相对湿度为 40%。实验数据如表 1 所示。表中单股导线和四分裂导线的平均击穿场强基本相同，约为 345 kV/m，明显高于 Fonseca<sup>[10]</sup>得到的 250 kV/m 数值，但与文献[12]中空气间隙的击穿场强 370 kV/m 接近。双分裂导线的平均击穿场强较小，为 283 kV/m，稍大于 250 kV/m。

表 1 空气中不同电压模拟导线的击穿特性参数

Tab. 1 Breakdown parameters for various simulative transmission lines in pure air

模拟导线	击穿距离/cm	击穿电压/kV	平均击穿场强/(kV/m)
单股	21.0	72.0	342.9
双分裂	46.0	130.3	283.3
四分裂	56.0	194.6	347.5

### 2.3 木垛火中高压导线击穿的实验结果

在木垛火稳定燃烧阶段，多次实验测量求取击穿电压平均值。在木垛火熄灭阶段，由于火焰动态减小，只能测量一次击穿的实验数据。实验结果如表 2 所示，击穿场景如图 2。图 5 为不同条件下平均击穿场强的分布图。

由表 2 和图 5 可知，火焰和火羽流存在时可明

表 2 各模拟导线在火焰中和火焰熄灭阶段击穿特性参数

Tab. 2 Breakdown parameters for various simulative transmission lines in stable flames and extinguishing flames

模拟导线	火源	击穿时导线被火焰包围 (木垛火稳定燃烧阶段)			击穿时导线在火焰下方 (木垛火熄灭阶段)		
		击穿距离/cm	击穿电压/kV	平均击穿场强/(kV/m)	击穿距离/cm	击穿电压/kV	平均击穿场强/(kV/m)
单股	单木垛	63.5	59.4	93.5	63.5	*105.3	165.8
双分裂	双木垛	89.0	84.4	94.8	89.0	*99.3	111.6
		141.0	163.4	115.9	141.0	**214.4	152.1
四分裂	三木垛	162.0	190.7	117.7	162.0	*214.2	132.2
		183.0	207.5	113.4	183.0	*268.5	146.7

注：\*代表火焰高度约为击穿距离 1/2 时的击穿电压；\*\*代表火焰高度约为击穿距离 1/3 时的击穿电压。

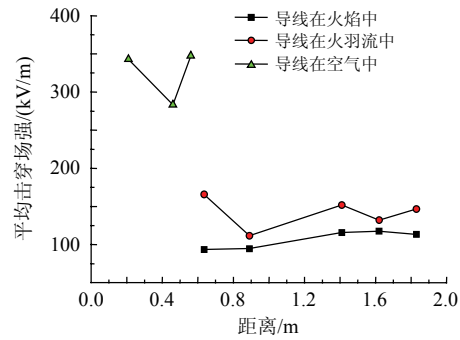


图 5 各模拟导线在空气中、火焰中和火羽流中的平均击穿场强

Fig. 5 Average breakdown field strengths of various simulative transmission lines in pure air, stable flame and extinguishing flame

显降低空气间隙的平均击穿场强。在火焰作用下，单股导线、双分裂导线和四分裂导线的平均击穿场强分别约减小为空气中相应值的 27.3%、33.5%和 33.3%。实验中木垛数逐渐增加是为了使火焰高度增加，保证击穿距离能够增大从而击穿电压能够增加。三木垛火时的平均击穿场强相比单木垛火和双木垛火时数值偏大，是因为击穿距离大而导致导线位置处的火焰温度较低。Robledo-Martinez<sup>[12]</sup>实验发现火焰燃烧使线路的击穿电压降低一半，下降程度高于本实验结果。

在火焰熄灭过程中，火焰高度减小，火场温度逐渐降低，导致平均击穿场强大于稳定火焰期的相应值。相对空气中的平均击穿场强，火羽流中导线的平均击穿场强分别降低为空气中相应值的 48.4%(单股导线)、39.4%(双分裂导线)及 41.3%(四分裂导线)。

### 2.4 木垛火降低平均击穿场强的原因分析

根据实验录像，木垛火燃烧过程中烟尘产量较少(对可视度基本无影响)，可以不予考虑。木垛火对平均击穿场强的影响主要为火焰高温和火焰电离导致的电导率。

依据木垛火实验测量结果，可以假设火焰中和火羽流中的温度均呈线性变化，火焰底部的温度为  $T_0=750\text{ }^\circ\text{C}$ ，火焰间隙区的温度为  $T_1=300\text{ }^\circ\text{C}$ ，而 2 倍火焰高度处火羽流温度为  $T_2=100\text{ }^\circ\text{C}$ ，空气温度为  $T_a=17\text{ }^\circ\text{C}$ 。火焰高度的处平均击穿场强  $E$  与空气气氛下的平均击穿场强  $E_a$  的比值为(见附录式(A7))

$$\frac{E}{E_a} = \frac{T_a}{T_0 - T_1} \ln \frac{T_0}{T_1} = 37.4\%$$



实验结果表明,在火焰作用下,单股导线、双分裂导线和四分裂导线平均击穿场强约分别减小为空气中相应值的27.3%、33.5%和33.3%,均小于计算值37.4%,所占计算值权重分别为73%、89%和89%。这表明火焰高温是平均击穿场强下降的主要影响因素,而火焰电离也会导致平均击穿场强下降,但影响程度较小。

火焰电离也会导致平均击穿场强下降是因为火焰燃烧会产生离子而具有一定的导电性。离子产生途径包括化学电离和热电离<sup>[16]</sup>。在热电离过程中,火焰高温使一些元素电离,形成离子和电子。电离能较低(4.34 eV)的钾元素最容易被热电离。因此,增加燃烧物钾含量可使火焰的导电性增强而降低平均击穿场强。为定性研究火焰电导率对平均击穿场强的影响,给木垛均匀撒上约1%木垛质量的KCl粉末(48 g),然后进行单股导线在单木垛火下的击穿实验(间隙63.0 cm),结果显示击穿电压为44.0 kV,平均击穿场强为69.8 kV/m,约为空气气氛下相应值的20.4%,且低于不加KCl的木垛火焰中的平均击穿场强,降低幅度27.3%。因此,KCl热电离产生的离子使火焰具有更高导电性而导致平均击穿场强急剧下降。如何定量衡量火焰电导率与平均击穿场强之间的关系,需要更为详细的研究。

对木垛火熄灭阶段处于火羽流中的高压导线击穿实验而言,2倍火焰高度处的平均击穿场强 $E'$ 与空气气氛下平均击穿场强 $E_a$ 的比值为(见附录式(A9))

$$\frac{E'}{E_a} = \left( \frac{T_a}{T_0 - T_1} \ln \frac{T_0}{T_1} V + \frac{T_a}{T_1 - T_2} \ln \frac{T_1}{T_2} \right) / 2 = 49.8\%$$

实验测定的比值为48.4%(单股导线)、39.4%(双分裂导线)及41.3%(四分裂导线),稍小于计算值49.8%,所占计算值权重分别为97%、79%和83%。这也表明高温占主导作用而火焰电离作用相对较小。

### 3 结论

本文实验研究了工频高压导线间空气间隙在木垛火作用下的击穿特性,并分析了火焰高温和电离对击穿特性的影响规律,主要结论如下:

1) 在木垛火稳定燃烧期的火焰作用下,单股导线、双分裂导线和四分裂导线平均击穿场强约分别减小为空气中相应值的27.3%、33.5%和33.3%。

2) 在木垛火熄灭阶段的火羽流作用下,单股导线、双分裂导线和四分裂导线平均击穿场强约分别减小为空气中相应值的48.4%、39.4%和41.3%。

3) 依据木垛火温度的分布结果和假设,发展了木垛火产生的高温对平均击穿场强影响程度的计算公式。计算结果显示火焰高度处(稳定火焰中)平均击穿场强及2倍火焰高度处(熄灭火焰中)平均击穿场强与空气气氛下相应值的比值分别为37.4%和49.8%,均大于上述相应实验值。分析表明木垛火击穿实验中火焰高温是降低平均击穿场强的主要因素,火焰电离作用相对次要。

### 致谢

本文中实验方案的制定和实验数据的测量记录工作是在武汉国网电力科学研究院胡毅副院长、刘凯主任、吴田博士以及武汉大学高压研究室王建国主任等人员的大力支持下完成的,在此向他(她)们表示衷心感谢。

### 参考文献

- [1] 胡毅. 输电线路运行故障的分析与防治[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 1-8.  
Hu Yi. Analysis on operation faults of transmission line and countermeasures[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 1-8(in Chinese).
- [2] 候鹏, 张建华. 关于几起输电线路风偏跳闸的原因分析[J]. 新疆电力技术, 2010(2): 20-21.  
Hou Peng, Zhang Jianhua. Reason analysis of outage accidents of transmission lines caused by windage yaw[J]. Xinjiang Electric Power, 2010(2): 20-21(in Chinese).
- [3] 晏致涛, 李正良. 重冰区输电塔-线体系导线断线分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 92-97.  
Yan Zhitao, Li Zhengliang. Analysis of the transmission tower-line system in heavy ice regions subjected to cable rupture[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 92-97(in Chinese).
- [4] 张恒旭, 刘玉田, 张鹏飞. 极端冰雪灾害下电网安全评估需求分析与框架设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 8-14.  
Zhang Hengxu, Liu Yutian, Zhang Pengfei. Requirements analysis and framework design for power system security assessment considering extreme ice disasters[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 8-14(in Chinese).
- [5] 王浩东. 输电线路山火跳闸原因分析及对策[J]. 广西电力, 2009(4): 43-45.  
Wang Haodong. Reason analysis and treatment of

- transmission line trip because of mountain fire [J]. Guangxi Electric Power, 2009(4): 43-45(in Chinese).
- [6] 袁正, 田志刚. 输电线路防止山火的探讨[J]. 湖南电力, 2005, 25(3): 61-62.
- Yuan Zheng, Tian Zhigang. Discussion on preventing mountain fire on transmission line[J]. Hunan Electric Power, 2005, 25(3): 61-62(in Chinese).
- [7] 丁振宇. 输电线路山火问题的思考[C]//华东六省一市电机工程学会输配电技术研讨会论文集. 江苏, 徐州: 上海市电机工程学会, 2006: 30-31.
- Ding Zhenyu. Thoughts over wildland fires affecting transmission lines[C]//Proceedings of Electrical Transmission and Distribution Technology of Chinese Society of Electrical Engineering for Six Provinces and One City in Eastern China. Xuzhou, Jiangsu: Shanghai Society for Electric Engineering, 2006: 30-31(in Chinese).
- [8] 胡湘, 陆佳政, 曾祥君, 等. 输电线路山火跳闸原因分析及其防治措施探讨[J]. 电力科学与技术学报, 2010, 25(2): 73-78.
- Hu Xiang, Lu Jiazheng, Zeng Xiangjun, et al. Analysis on transmission line trip caused by mountain fire and discussion on tripping preventing measures[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2010, 25(2): 73-78(in Chinese).
- [9] Vosloo H F. The need for and contents of a life cycle management plan for Eskom transmission line servitudes [M]. West Cape of South Africa: Rand Afrikaans University, 2004: 141-158.
- [10] Fonseca J R, Silva R P, Tan A L, et al. Effects of agricultural fires on the performance of overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2): 687-694.
- [11] Sadurski K J. Effects of bush, grass and cane fires below transmission lines[R]. South Africa: Eskom, 1977.
- [12] Robledomartinez A, Guzman E, Hernandez J L. Dielectric characteristics of a model transmission-line in the presence of fire[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1991, 26(4): 776-782.
- [13] West H J. Fire induced flashover of EHV transmission lines[C]//IEEE-PAS Winter Meeting. New York of USA: IEEE, 1987: paper A 73047.
- [14] Wang Liming, Guan Zhicheng, Hu Qihao, et al. Air breakdown during fires[J]. Tsinghua Science and Technology, 2001, 6(5): 497-499.
- [15] Sukhmandan A, Hoch D A. Fire induced flashovers of transmission lines[C]//Proceedings of 6th Africon Conference on theoretical models. George of Africa: IEEE Africon, 2002: 617-622.
- [16] Mphale K, Heron M. Wildfire plume electrical

conductivity[J]. Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology, 2007, 59(4): 766-772.

#### 附录 A

火焰导致的高温使空气密度减小, 从而会降低空气的绝缘性能。对同一空气间隙而言, 闪络电压依赖于温度和空气湿度(在火焰中可以不考虑湿度影响)<sup>[5]</sup>:

$$U_i = U_a \frac{\rho T_a}{T \rho_a} \quad (\text{A1})$$

式中:  $U_a$  为标准条件下的闪络电压;  $U_i$  为实际情形时的闪络电压。在木垛火实验过程中压力变化不大, 因此:

$$U_i = U_a T_a / T \quad (\text{A2})$$

换算成场强, 式(A2)变为

$$E_i = E_a T_a / T \quad (\text{A3})$$

依据木垛火轴线温度场测量结果, 假设火焰中温度呈线性变化:

$$T = T_0 - \frac{T_0 - T_1}{H_f} z \quad (\text{A4})$$

火焰底部温度  $T_0=750\text{ }^\circ\text{C}$ , 火焰间隙区温度  $T_1=300\text{ }^\circ\text{C}$ 。 $H_f$  为火焰高度。那么高度  $H_f$  处对火焰底部物体的击穿电压为

$$U = \int_0^{H_f} E_a \frac{T_a}{T} dz = E_a \frac{T_a}{T_0 - T_1} \ln \frac{T_0}{T_1} H_f \quad (\text{A5})$$

平均击穿场强为

$$E = E_a \frac{T_a}{T_0 - T_1} \ln \frac{T_0}{T_1} \quad (\text{A6})$$

此平均击穿场强与空气气氛下平均击穿场强的比值为

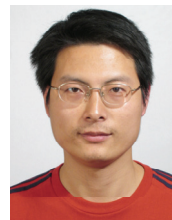
$$\frac{E}{E_a} = \frac{T_a}{T_0 - T_1} \ln \frac{T_0}{T_1} \quad (\text{A7})$$

同理可以计算在 2 倍火焰高度的火羽流中, 导线对火焰底部的击穿电压为

$$U' = E_a \frac{T_a}{T_0 - T_1} \ln \frac{T_0}{T_1} H_f + E_a \frac{T_a}{T_1 - T_2} \ln \frac{T_1}{T_2} H_f \quad (\text{A8})$$

平均击穿场强与空气气氛下平均击穿场强比值为

$$\frac{E'}{E_a} = \left( \frac{T_a}{T_0 - T_1} \ln \frac{T_0}{T_1} + \frac{T_a}{T_1 - T_2} \ln \frac{T_1}{T_2} \right) / 2 \quad (\text{A9})$$



尤飞

收稿日期: 2011-07-24.

作者简介:

尤飞(1976), 男, 工学博士, 副教授, 主要从事特殊条件下火灾演变机制及关键防治技术方面的研究工作, yfei@njut.edu.cn;

陈海翔(1978), 副研究员, 研究方向为火灾及其次生灾害的机制与防控, 本文通讯作者, hxchen@ustc.edu.cn.

(编辑 胡琳琳)