

# 一起 500 kV 架空线路地线金具发热分析与研究

吕品雷<sup>1</sup>,赵福平<sup>1</sup>,郭利瑞<sup>2</sup>,卢金奎<sup>2</sup>,陈俊<sup>2</sup>,邱中华<sup>3</sup>,张宗喜<sup>1</sup>,朱轲<sup>1</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 3. 国网四川省电力公司超高压分公司, 四川 成都 610041)

**摘要:**近年来,时有地线挂点金具发热、烧融导致地线断线进而危害线路稳定运行的事故发生。针对四川 500 kV 架空输电线路地线金具发热问题,通过理论分析与仿真研究发热原因,提出预防措施以保障线路安全。首先,通过 EMTP 仿真建模,获得了线路稳定运行状态下地线的感应电压与电流随负荷的变化规律;随后,搭建三维有限元仿真模型,计算了接触电阻、感应电流、风速等参数对金具发热的影响规律;最后,结合仿真结果分析发现其异常发热的主要原因为耐张段上出现两个及以上接地点后构成异常感应回路,使接触电阻处持续流过较大电流,导致金具异常发热。针对这一类型问题提出了可行的解决方案及预防控制措施,为架空输电线路的安全运行提供保障。

**关键词:**架空地线;发热;感应电势;接触电阻

**中图分类号:**TM 726.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2025)01-0105-06

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20250115

## Analysis and Research on Heating of Fittings of Ground Wire of 500 kV Overhead Transmission Line

LYU Pinlei<sup>1</sup>, ZHAO Fuping<sup>1</sup>, GUO Lirui<sup>2</sup>, LU Jinkui<sup>2</sup>, CHEN Jun<sup>2</sup>, QIU Zhonghua<sup>3</sup>, ZHANG Zongxi<sup>1</sup>, ZHU Ke<sup>1</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. State

Grid Sichuan Extra High Voltage Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Heating and melting incidents of ground wire fitting are a frequent occurrence in recent years, leading to wire breaks and endangering line stability. Aiming at the heating issue of a 500 kV overhead transmission line in Sichuan, through theoretical analysis and simulation, the preventive measures are proposed for line safety. Firstly, through EMTP simulation modeling, the law of induced voltage and current change with load is obtained. And then, a 3D finite element model is established to calculate the impacts of contact resistance, induced current and wind speed on fitting heating. Finally, the analysis reveals abnormal heating due to an abnormal induced circuit formed by multiple grounding points on the tension section, causing large currents and heating. It offers the solutions and preventive measures for such typical heating issues, and will ensure the safe operation of overhead transmission lines.

**Key words:** overhead ground wire; heating; induced potential; contact resistance

## 0 引言

500 kV 输电线路是电力系统的重要组成部分,而架空地线具有保障电网的安全稳定运行、最大程度地减小雷电对架空线路影响的作用<sup>[1-3]</sup>。目前,架空地线主要采用逐塔接地和分段绝缘单点接地两种接地方式<sup>[4]</sup>,架空地线会通过接地引下线与杆

塔、地网相连,正常情况下流过金具的电流不会引起架空地线的连接金具发热<sup>[5]</sup>。但是在日常运维及无人机红外飞巡过程中,有时会遇到架空地线金具异常发热的情况。若金具长期在大电流及高温下运行,可能会导致挂点金具被烧红甚至烧熔,进而引发架空地线断线并造成严重后果<sup>[6-8]</sup>。因此,为确保输电线路的安全稳定运行,有必要深入分析研究架空地线金具异常发热的原因,并针对问题找出切实可行的解决方案和预防控制措施。

目前国内专家已对架空地线金具异常发热的原

**基金项目:**国网四川省电力公司科技项目“瓷绝缘子机电联合老化机理及劣化绝缘子检测方法研究”(521997240008)

因进行了定性分析并提出了相应的措施。如文献[9]结合现场金具发热情况,推导某 500 kV 线路的地线挂点金具发热原因为金具磨损、锈蚀氧化产生不导电产物使接触电阻值增大,进而在电流作用下产生焦耳热。文献[10]结合架空地线接地方式,分析某 500 kV 架空地线金具发热异常原因为电流回路及接触电阻的共同作用。这些研究多通过定性的理论推导对异常原因进行分析,而基于仿真建模方法对地线金具发热原因的定量分析较少。

在学习总结已有研究的基础上,下面对四川电网某 500 kV 架空地线金具异常发热进行了具体分析,通过电磁暂态程序( electromagnetic transient program, EMTP)和有限元仿真软件建模的单一变量定量研究方法,研究了线路负荷、接触电阻、风速等参数对感应电流及金具发热温度的影响。最后,通过详细的变量分析论证了金具异常发热及烧蚀的主要原因,并针对性地提出了改进建议。

# 1 发热缺陷详情

## 1.1 异常发热点位情况

2023 年 6 月 30 日,对某 500 kV 线路开展无人机红外测温时,发现该 500 kV 线路 103 号铁塔左挂点金具串(右侧为光缆)异常发热,金具串最高温度为 202.5 ℃,最低温度为 34.3 ℃,温差达到 168.2 ℃,判定为危急缺陷。通过精细化飞巡照片可以发现,左联挂点金具串的放电间隙出现肉眼可见的短接状态,右联挂点金具串无异常。现场照片如图 1、图 2 所示。

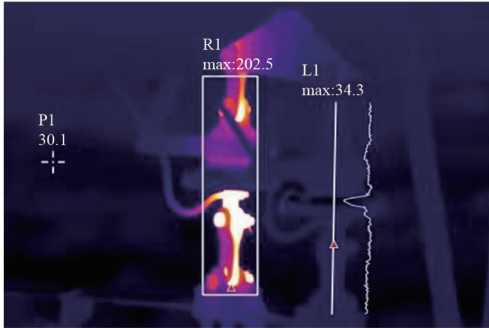


图 1 103 号铁塔左侧地线测温照片

通过对精细化飞巡照片(图 3)进行对比发现,103 号地线悬垂金具串有明显电腐蚀痕迹,且平行挂板与联板接口有烧灼痕迹,烧灼痕迹较新。下部金具中存在大量焊渣,说明地线与金具连接处可能存在电弧放电,地线可能出现熔断事故。



图 2 103 号铁塔左侧地线飞巡照片



图 3 103 号铁塔左侧地线联板照片

## 1.2 线路接地情况

该 500 kV 线路右侧架空地线为光纤复合架空地线,采用逐基接地的方式;左侧架空地线为钢绞线,采用分段绝缘单点接地的方式,如图 4 所示。按设计手册,左侧地线分为不同耐张段,每段的接地点均在大号侧。发热点位 103 号塔位于 102 号—110 号耐张段区间内,102 号(耐张塔)大号侧安装有放电间隙且无并沟线夹进行接地,110 号(耐张塔)为双联悬垂且直接接地,耐张段内其余杆塔处均安装有放电间隙。

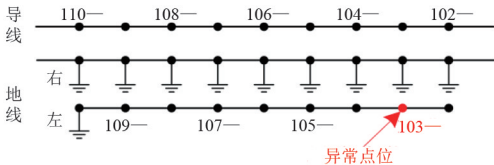


图 4 故障塔位

在天气晴朗的条件下对该 500 kV 线路 103 号铁塔所在耐张段 103 号—110 号铁塔接地电阻进行测量,结果如表 1 所示,接地电阻值均在设计值范围内。

# 2 发热缺陷分析

## 2.1 等效电路

为了说明地线感应电压和地线金具连接处接触电阻对架空地线挂点金具发热的影响,结合异常点

表 1 103 号—110 号铁塔接地电阻 单位:Ω

| 杆塔号   | 检测时间       | 天气情况 | A 腿检测值 | B 腿检测值 | C 腿检测值 | D 腿检测值 |
|-------|------------|------|--------|--------|--------|--------|
| 103 号 | 2023-07-04 | 晴    | 1.39   | 1.23   | 1.31   | 0.95   |
| 104 号 | 2023-07-04 | 晴    | 0.97   | 1.79   | 1.76   | 1.66   |
| 105 号 | 2023-07-04 | 晴    | 1.91   | 0.79   | 0.97   | 1.17   |
| 106 号 | 2023-07-05 | 晴    | 2.27   | 2.17   | 2.06   | 2.51   |
| 107 号 | 2023-07-04 | 晴    | 4.39   | 3.58   | 4.71   | 5.77   |
| 108 号 | 2023-07-04 | 晴    | 2.96   | 2.93   | 2.97   | 2.99   |
| 109 号 | 2023-07-04 | 晴    | 1.14   | 1.15   | 1.27   | 1.17   |
| 110 号 | 2023-07-04 | 晴    | 0.62   | 0.56   | 0.63   | 0.64   |

位耐张区段的详情,建立了简单的等效回路模型,如图 5 所示。图中  $R_1$  为各金具接触电阻之和; $R_2$  为 103、110 号两基塔的接地电阻之和; $R_3$  为 103 号—110 号范围内的架空地线等效电阻,可近似忽略。即在感应电压的作用下,感应电流流过接触电阻与接地电阻;在电流作用下,接触电阻发热,进而出现图 1 所示异常现象。下面采用仿真分析的方法,对感应电压电流及接触电阻发热进行分析研究。

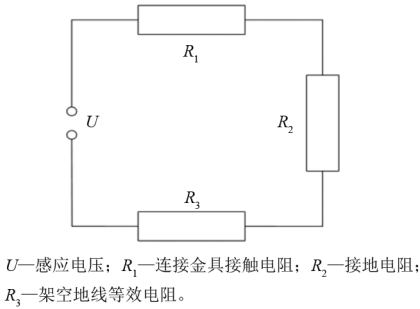


图 5 等效回路模型

2.2 回路感应电流仿真分析

2.2.1 仿真模型

根据该 500 kV 线路塔位明细,简化线路输电模型:所有杆塔均统一采用与 103 号杆塔相同的 ZVM1 塔型及绝缘子/金具结构;将整条线路分为包括故障点耐张段及前后耐张段在内的 5 段,5 段线路分别长 49.92 km、0.71 km、2.74 km(故障点位段)、1.03 km、9.50 km;忽略地线电阻、杆塔电阻等电阻,直接简化为故障点接触电阻、103 号杆塔接地电阻(平均值 1.22 Ω)、110 号杆塔接地电阻(平均值 0.62 Ω)3 个电阻的和。

采用 ATP-EMTP 仿真软件搭建仿真模型如图 6 所示。5 段输电线路(LCC)分别表示简化后的 5 段耐张段,每段的地线单点接地;故障点的一根地线两端均接地,模拟该耐张段地线在 103 号和 110 号两基杆塔处均接地的情况。

2.2.2 仿真结果

使用电压源和电流源模拟系统负荷,采用发现异常当日的平均负荷电流 159.9 A 作为仿真基本参数,采用单一变量方法,计算 103 号—110 号耐张段地线在不同回路电阻、负荷电流、相角情况下的感应电压与电流,得到不同参数的影响规律。

1) 相角和回路电阻的影响

当接触点断开时,断点处的电压即为悬浮电压,可以看作感应回路的最大电压。设置负荷电流 159.9 A,负荷相角从 0°~90°单调增大,计算获得悬浮电压随相角的变化如图 7 所示。随着相角的增大,悬浮电压逐渐减小并趋于稳定。

由第 2.1 节可知,回路电阻为接触电阻与接地电阻之和。虽然当日测得 103 号杆塔接地电阻平均值为 1.22 Ω、110 号杆塔接地电阻平均值为 0.61 Ω,但因受天气和降水影响<sup>[11]</sup>,计算回路电阻影响时,扩大了回路电阻范围,得到回路电阻与相角的影响如图 8 和图 9 所示。随着相角的增大,感应电流与回路电阻消耗的功率均逐渐减小。而随着回路电阻的逐渐增大,感应电流逐渐减小,而回路电阻消耗的功率先增大后减小,在回路电阻为 4 Ω 时达到最大值。

2) 负荷电流的影响

经查询获知 6 月 25 日—7 月 5 日期间,该条线路的负荷电流最大值为 1196 A。在相角为 0 的情况下,进一步分析不同负荷电流的影响,得到结果如图 10 和图 11 所示。随着线路负荷电流的增大,悬浮电压和相同回路电阻下的感应电流均近似线性的单调增大。由  $P=I^2R$ ,随着线路负荷电流的增大,回路电阻消耗的功率成平方倍增大。

2.3 接触电阻发热仿真分析

2.3.1 仿真模型

为了方便仿真计算,对图 1 所示的金具接触电

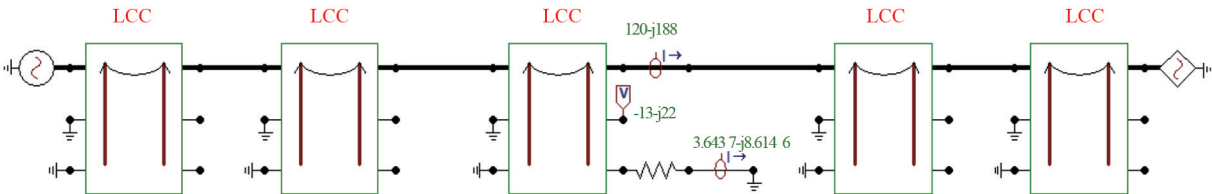


图 6 ATP-EMTP 仿真模型

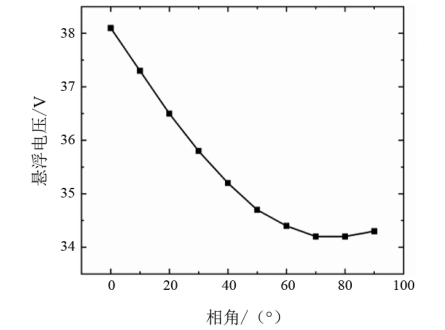


图 7 相角对悬浮电压的影响

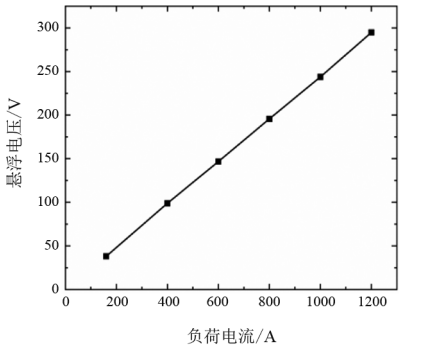


图 10 负荷电流对悬浮电压的影响

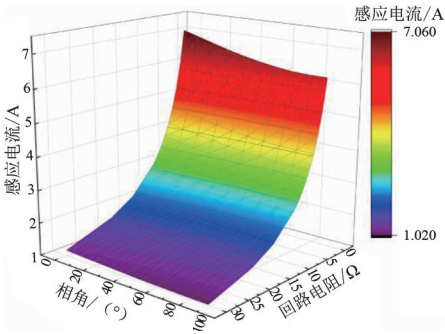


图 8 相角和电阻对感应电流的影响

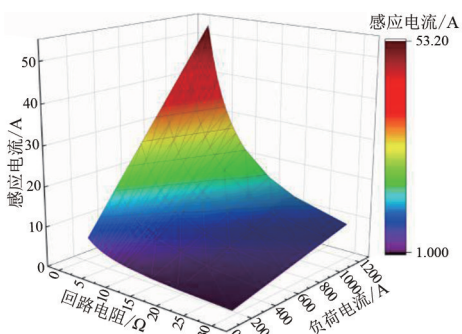


图 11 负荷电流对感应电流的影响

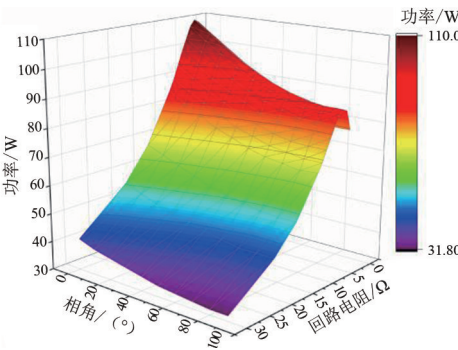


图 9 相角和电阻对功率的影响

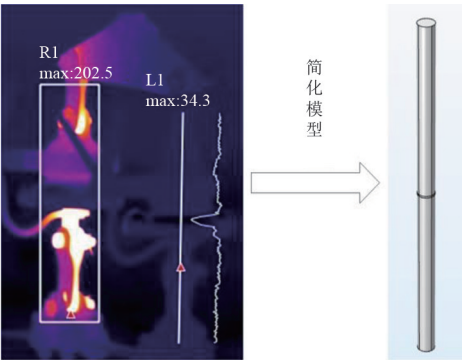


图 12 发热模型简化

阻发热结构进行简化:首先,将几何结构简化为三段发热金属棒模型,中间一段模拟接触电阻,通过调整电导率获得不同的接触电阻;其次,简化散热模型,仅考虑对流热通量对温度的影响,计算在不同风速条件下接触电阻的发热情况。采用有限元仿真软件,构建了简化后的发热模型(如图 12 所示),耦合电流场与热场,模拟分析接触电阻在不同情况下的发热状态。

2.3.2 仿真结果

采用第 2.1 节中的等效电路,在第 2.2 节中当日平均负荷电流为 159.9 A 情况下的感应电流与回路电阻的关系的基础上,由回路电阻减去两基杆塔的接地电阻,获得接触电阻值与感应电流的关系。采用单一变量方法,仿真获得感应电流、风速等对接触电阻发热情况的影响规律。

1) 固定风速下接触电阻的发热规律

设置风速为 5 m/s,代入不同接触电阻与感应电流,计算不同接触电阻的发热情况,获得最高温度随电阻的变化规律如图 13 所示。随着接触电阻的增大,电阻的最高温度先增大后减小,当风速为 5 m/s、接触电阻为 4.16 Ω(回路电阻 6 Ω)时,温度分布如图 14 所示,最高温度为 509.40 K(236.25 ℃)。

2) 不同风速下接触电阻的发热规律

接触电阻为 4.16 Ω(回路电阻 6 Ω)时,计算得到不同风速下的发热最高温度,如图 11 所示。随着风速的增大,对流散热效果逐渐增强,温度最大值逐渐降低。

2.4 异常原因总结

该 500 kV 输电线路的左侧架空地线采用分段

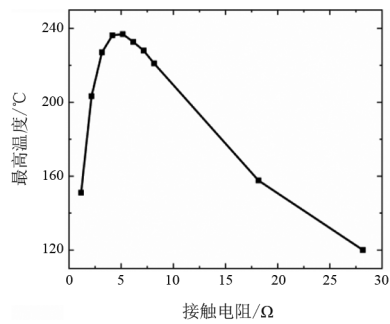


图 13 不同接触电阻的最高温度

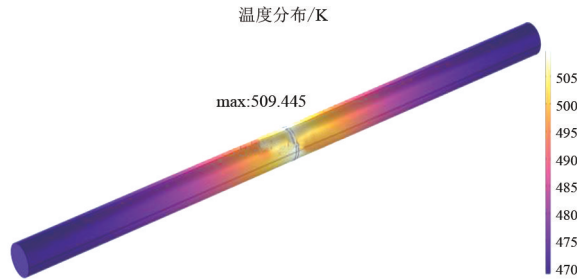


图 14 5 m/s 风速条件下模型的温度分布

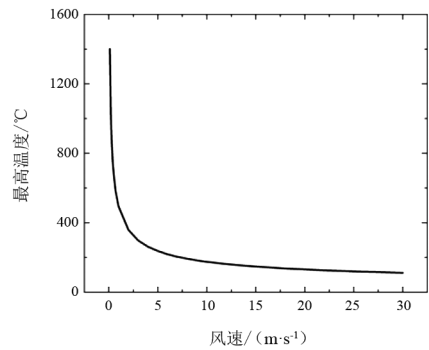


图 15 不同风速条件下模型的最高温度

绝缘单点接地的方式。当输电线正常运行情况下,导线周围会产生电磁场,地线与导线之间会产生电磁和静电场耦合,产生感应电压。当一个耐张段上出现两个及以上接地点后,架空地线将通过接地点与大地形成回路,进而产生感应电流,结合第 2.2 节中的仿真结果可知,悬浮电压可达数十伏,感应电流可达数十安培。而架空地线与杆塔直接连接,地线上的这些感应电流全部通过接地挂点金具泄入大地。

此外,在微风作用下,架空地线带着挂点金具作无规律变化,导致金具接触面在无规律变化,进而接触电阻的大小也在不断变化(该接触点可能出现短路和断开两种状态,即接触电阻可能在零到无穷大的范围内变化)。当感应电压一直存在,接触电阻不停变化时,金具的发热状态也不停变化。此外,挂点金具在长期运行下产生锈蚀,如图 3 所示:一方面

将增大金具接触电阻,导致金具严重发热;另一方面也将改变接触处的电场分布。当架空地线带着挂点金具作无规律变化的某个瞬间,金具的某个接触点出现分离,将在金具接触处(磨损处)产生电弧,造成金具局部烧蚀,而金具连接处的电弧放电将加速金具和地线的磨损,进一步威胁金具与地线的机械稳定性。

2.5 改进建议

该 500 kV 线路 103 号杆塔出现的金具串异常发热问题是输电线路中常见的典型问题。电流长期通过金具,在感应电压电流、微风的共同作用下,电弧、发热风险长期存在,导致地线存在断线的风险。结合上述原因分析,建议采取以下改进措施:

- 1) 严格按照设计要求,加强输电线路地线状态的运行维护,对于设计中非接地点的杆塔,严格确保标准中线间隙的设计要求,结合日常运维工作重点排查间隙的状态;
- 2) 在大负荷运行期间加强对直接接地的架空地线挂点金具的运行情况监测,充分发挥无人机的机动灵活和快速高效的特性,利用红外测温仪定期进行测温,并使用高清无人机摄像头对金具进行拍照检查;
- 3) 加强停电消缺,结合运维发现金具、线夹等过热缺陷,统筹安排线路停电计划,将缺陷应消尽消,及时更换烧蚀、磨损的金具串,防止线路故障。

3 结 论

架空地线金具发热在运行中较为常见,且存在着异常发热导致地线断线的可能性,一旦地线掉落将导致导线单相或多相故障,进而造成线路严重事故。上面对一起 500 kV 架空线路地线挂点金具异常发热现象进行了分析。通过仿真分析,定量地获得了各种参数对地线金具发热的影响规律,论证了地线感应电压/电流及金具连接处的接触电阻对金具发热的显著影响;此外,当金具在风力的作用下使接触点不停振动,当接触点断开时,过大的感应电压可能导致金具出现电弧烧蚀。但是所做模型简化较多,且线路负荷、接触电阻均随时间不停变化,导致实际情况比仿真分析结果更加复杂。后续将进一步结合现场实际工况,对异常发热现象进行深入研究。

参考文献

[1] 汪立锋,陈庆吟,蔡新华,等. $\pm 800$  kV 架空地线断股分析研究[J].浙江电力,2017,36(1):11-13.

[2] 陈桂阳.关于深圳电网 500 kV 鹏深甲线多处地线金具发热的原因分析及控制措施探讨[J].电子测试,2014(7):102-103.

[3] 麦俊佳.一起 220 kV 架空线路地线金具发热分析及对策探讨[J].广东电力,2018,31(7):135-139.

[4] 李燕军,孟令增,王东育,等.750 kV 双回输电线路架空地线接地方式分析研究[J].电气技术,2015(5):82-84.

[5] 肖明伟.一起 220 kV 线路避雷线金具发热的原因分析及处理[J].华电技术,2017,39(7):52-53.

[6] 汪立锋,谈佳栋,陈庆吟,等.220 kV 地线连接金具断裂事故分析[J].浙江电力,2019,38(6):101-105.

[7] 应函霖,黄旭骏,方琪.架空地线连接金具熔断掉落事故的预防[J].浙江电力,2013,32(9):16-18.

[8] 叶建锋,周学明,沈祎依.某输电线路地线金具断裂分析[J].湖北电力,2021,45(3):43-48.

[9] 王祥祥,谭永殿,龙振海,等.500 kV 输电线路架空地线直接接地挂点金具发热磨损原因分析[J].红水河,

(上接第 76 页)

[21] 李云浩,沈金波.我国电线电缆防火封堵现状[J].消防技术与产品信息,2011(5):51-53.

[22] 夏超.变配电所内电缆防火阻燃设计要点[J].一重技术,2022(2):69-72.

[23] 潘志城,邓军,张良,等.换流变压器阀厅防火墙孔洞封堵结构材料耐火极限研究[J].粘接,2022,49(11):72-77.

[24] 钟波,张佳庆,刘晓圣,等.特高压换流站阀厅防火封堵系统防火与抗爆性能分析[J].安全与环境学报,2022,22(1):161-166.

[25] 应急管理部天津消防研究所.建筑防火封堵应用技术标准:GB/T 51410—2020[S].北京:中国计划出版社,2020.

[26] 陈金平,何潇,夏水英,等.浅析变电站封堵存在的问题及优化措施[J].中国新技术新产品,2014(24):181.

[27] 朱俊.综述高层建筑缆线的电气防火封堵[J].科技与企业,2014(13):281.

[28] 杨佳庆.有机防火封堵材料使用寿命研究[J].消防科学与技术,2013,32(7):774-777.

[29] 张俊,祁祺.硅酮防火封堵材料对电缆载流量的影响分析[J].工程建设与设计,2017(6):57-58.

[30] 李文雄,汪秀丽,赵海波,等.层状双氢氧化物对有机硅泡沫高温陶瓷化演变的影响研究[J].高分子学

2020,39(6):86-90.

[10] 黄巍,程泳,董建新,等.500 kV 架空地线金具发热的分析与对策[J].浙江电力,2013,32(11):36-39.

[11] 王孝波,曾昌军,邓春林,等.接地电阻随季节及天气过程变化规律分析[J].气象科学,2013,33(6):648-652.

作者简介:

吕品雷(1993),男,博士,工程师,从事输电线路方面工作;

赵福平(1993),男,硕士,工程师,从事输电线路方面工作;

郭利瑞(1980),男,硕士,高级工程师,从事输电线路方面工作;

卢金奎(1981),男,硕士,高级工程师,从事输电线路方面工作;

陈俊(1973),男,硕士,高级工程师,从事输电线路方面工作;

邱中华(1986),男,硕士,高级工程师,从事输电线路运检方面工作;

张宗喜(1984),男,硕士,高级工程师,从事输电线路方面工作;

朱轲(1978),男,硕士,高级工程师,从事输电线路方面工作。

(收稿日期:2024-04-19)

报,2023,54(3):381-389.

[31] 闫照健,胡海涛,高立堂.某新型电缆井防火封堵材料的试验研究[J].工程建设,2013,45(6):15-18.

[32] 袁炜,邵江,段佳巍,等.硅橡胶防火封堵材料在核电领域的应用[J].有机硅材料,2020,34(1):59-63.

[33] 付明星,克磊,于海燕,等.中广核“华龙一号”核岛电气防火封堵有机硅材料应用要求[J].有机硅材料,2022,36(4):37-42.

[34] 王猛,谭明甜,王彪.一种用于变电站的新型高分子防火封堵材料的研制[J].电工技术,2020(8):128-129.

[35] 刘晓圣,姬军,张彩有,等.换流变阀侧套管封堵结构耐火极限研究[J].消防科学与技术,2020,39(10):1415-1417.

[36] 余立平,车晓涛,白云,等.金属及软性阻燃硅橡胶材料在电力电缆孔洞防火、防水封堵中的应用[J].低碳世界,2017,(18):84-85.

作者简介:

曾晓亮(1991),男,博士,高级工程师,主要从事六氟化硫气体分析检测和电网消防检测工作;

兰新生(1979),男,硕士,教授级高级工程师,从事电网环境保护和化学专业技术及管理工作;

李文雄(1994),男,博士研究生,主要研究方向为高性能防火封堵新材料的研制及机理分析。

(收稿日期:2024-03-27)