

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2025.01.010

聚酰亚胺防护材料对气体电弧辐射温度场的影响特性研究

琚泽立¹, 张一博², 汤牧涵³, 侯喆¹, 滕森¹, 廖敏夫³, 段雄英³

(1. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 西安 710054; 2. 国网陕西省电力有限公司, 西安 710032;

3. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 在城市电网中, 电弧导致的电气灼烧伤害愈发频繁。聚酰亚胺作为电弧防护材料具有耐高温、高阻热性, 是保护带电作业人员生命的有效装备, 但目前对于聚酰亚胺电弧防护材料的阻热实际效果研究相对较少。文中建立了有聚酰亚胺材料影响下的气体电弧温度场仿真模型, 得到了燃弧过程中聚酰亚胺对电弧辐射温度场分布的影响。在实验室搭建了气体电弧发生装置, 改变电弧电流大小、电弧电极间距、铜量热计测量点距电弧中心点距离, 通过铜量热计测量温升得到聚酰亚胺防护材料对气体电弧辐射温度场的变化规律。仿真和试验结果表明, 聚酰亚胺对气体电弧的辐射温度场具有明显的阻隔作用, 其在不同的电弧辐射条件下均可以展现出良好的隔热性, 证明了聚酰亚胺材料在带电作业环境中对气体电弧辐射具有优异的防护性能。

关键词: 电弧; 温度场; 有限元仿真; 聚酰亚胺; 防电弧织物; 热防护性能

Study on Influence Characteristics of Polyimide Protective Material on Gas Arc Radiation Temperature Field

JU Zeli¹, ZHANG Yibo², TANG Muhan³, HOU Zhe¹, TENG Sen¹, LIAO Minfu³, DUAN Xiongying³

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China; 2. State Grid Shaanxi Electric Power Company,

Xi'an 710032, China; 3. Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China)

Abstract: Electrical ignition injuries from arcing are becoming more frequent in urban power grid. Polyimide, as an arc protection material, has high temperature resistance and high heat resistance, and is an effective facility to protect the safety of live workers. However, at present the study on the actual heat resistance effect of polyimide arc protection materials is relatively less. In this paper, a simulation model of gas arc temperature field under the influence of the polyimide is set up and the influence of polyimide on the arc radiation temperature field distribution during the arcing process is obtained. A gas arc generating device is set up in the laboratory, the variation of the polyimide protection material to the gas arc radiation temperature field is obtained by way of changing the magnitude of arc current, the distance between the arc electrodes and the distance from the measurement point of the copper calorimeter to the center of the arc as well as of temperature rise measurement by copper calorimeter. The simulation and test results show that the polyimide has obvious blocking effect on the radiation temperature field of gas arc, and shows perfect heat insulation under different arc radiation conditions, proving that the polyimide material has excellent protection performance against gas arc radiation in the live working environment.

Key words: arc; temperature field; finite element simulation; polyimide; arc-preventive fabric; thermal-preventive performance

收稿日期: 2024-09-08; 修回日期: 2024-11-17

基金项目: 国网陕西省电力公司科技项目(5226KY22000A)。

Project Supported by the Science and Technology Project of State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd.(5226KY22000A).

0 引言

随着城市建设的高速发展,电力生产的稳定运行愈发重要。一旦发生电气故障,导致运行中断,就可能造成巨大的经济损失^[1-7]。根据统计,近半数的电气故障由电力网络中的电弧燃爆引发,故障电弧产生的过程通过辐射释放出高温,极易对带电作业的工作人员、周边电气设备和线路造成伤害^[8-12]。

在电气防护领域,电弧防护服是效果明显的电弧防护装备。采用的防护材料普遍具备耐高温、高阻热性、化学性稳定等优点^[13],对保护电气领域人身安全具有重要作用,主流的电弧防护材料包括聚酰亚胺、芳纶、腈氯纶等^[14]。很多研究者对空气电弧的辐射温度特性进行了理论和实验研究,得到了很多有益的结果。如于然、付周兴等人使用MATLAB构建电弧的数学模型^[15],这种模型可以反映电弧的实际特性,但是MATLAB无法将电弧形态视图化显示。西安交通大学的吴翊等人使用Fluent软件建立三维电弧模型,描述气体电弧运动的相关特性并初步探讨了电弧辐射温度特性^[16]。付光晶等人使用Comsol软件对交流电弧的特性进行研究^[17],但因仿真无法完成起弧的局限性,选择了特定数值的电流,结果有一定局限性。因此,气体电弧辐射温度场建模及理论仿真还需要进一步优化。

同时目前针对电弧防护服的聚酰亚胺防护材料影响气体电弧辐射温度场特性的探究还比较少,这实际制约了电弧防护服的参数优化和性能提高。文中创新性地将聚酰亚胺材料与电弧模型进行联合仿真,在得到不同条件下气体电弧辐射温度场特性基础上,针对聚酰亚胺防护材料的阻热效果,进行气体电弧辐射温度场仿真和试验分析,为聚酰亚胺电弧防护材料在电弧灼伤防护领域的优化应用提供理论和数据支撑。

1 气体电弧辐射温度场仿真

1.1 仿真几何模型

电网电弧故障可能产生于相间短路或接地短路,短路发生时会在导线间产生气体电弧。为了模拟气体电弧的发生及辐射温度场分布过程,文中构建了包含电弧产生装置的二维轴对称仿真几何模型见图1。设置双铜柱作为触发电极,在划定的空气域中进行反应。

图1中:计算的区域为长40 mm、宽20 mm的矩形;1为尖端2 mm、半径5 mm的铜电极;2为半径3 mm

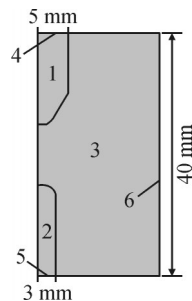


图1 二维轴对称仿真几何模型

Fig. 1 Two-dimensional axisymmetric geometry model for simulation

的铜电极;3为除去两个铜电极外的空气域;4、5为铜电极用于连接外电源的边界;6为人为设定的空气域的绝缘边界。

为了得到有聚酰亚胺材料时对电弧辐射温度场的影响特性,在电弧发生装置一侧放置聚酰亚胺材料,构建仿真几何模型见图2。

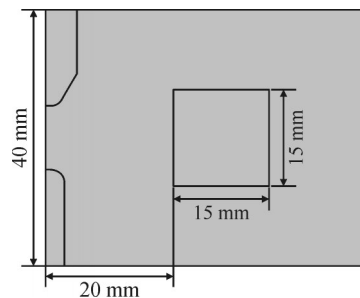


图2 有聚酰亚胺材料的几何仿真模型

Fig. 2 Geometry model for simulation with polyimide

在电弧燃弧过程中,能量主要以热辐射的形式进行热传播,接触聚酰亚胺材料后,材料会发生热变形和热膨胀现象。其中涉及到表面对表面的辐射、固体传热、固体力学等物理量之间的耦合。根据聚酰亚胺材料的性质,改变仿真中材料的热膨胀系数、杨氏模量等参数,模拟材料对气体电弧辐射温度场的影响。

1.2 仿真数学模型

气体电弧的产生过程非常复杂,涉及磁场、流场、电场和热辐射等物理场的耦合^[18-20],电弧产生过程中各物理场的相互作用及能量过程见图3。环境温度和压力是电弧等离子体的电导率的决定性因素,电导率对电弧的电流密度分布产生影响,电流密度会改变电弧周围的磁场,电弧电流会以热辐射、热对流、热传导等传热形式释放焦耳热^[21]。电弧等离子体在磁场和高温的作用下分子运动加剧,能量转移更快,这些变化反过来又会影响环境温度、压力等参数^[22-23]。

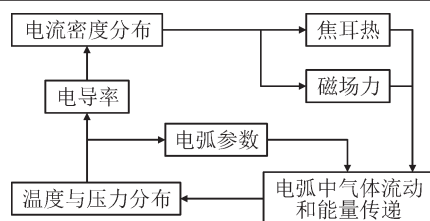


图3 电弧模型各物理量之间的关系

Fig. 3 The relationship between the physical quantities of the arc model

文中采取在两电极间预设初始热源的方式替代电弧的引弧过程,为保证气体电弧在空气域内运算收敛更快,进行以下几点假设:

1)仿真中的电弧等离子体处于局部热力学平衡(local thermal equilibrium, LTE)状态,即认为电弧等离子体为平衡等离子体;

2)忽略电弧对近极区鞘层的影响和对电极触头的烧蚀;

3)电弧等离子体为稳定的、无旋的、不可压缩的理想流体;

4)电弧等离子体的密度、导热系数、动力粘度系数、电导率和恒压热容等函数假设仅为以温度为变量。

1.3 仿真结果及分析

电弧燃弧过程中释放的热辐射主要与电弧电流大小、电极间距有关,仿真中改变电极间距、电弧电流,得出不同电流下的气体电弧辐射的温度场分布情况。

1.3.1 不同电极间距下气体电弧辐射温度场

设置输出源为6 kA、频率50 Hz的电流源,在电极间距为2、6、10 mm下进行气体电弧辐射温度场仿真。仿真结果见图4,为在改变电极间距条件下,无聚酰亚胺材料和有聚酰亚胺材料时的温度场分布情况对照。

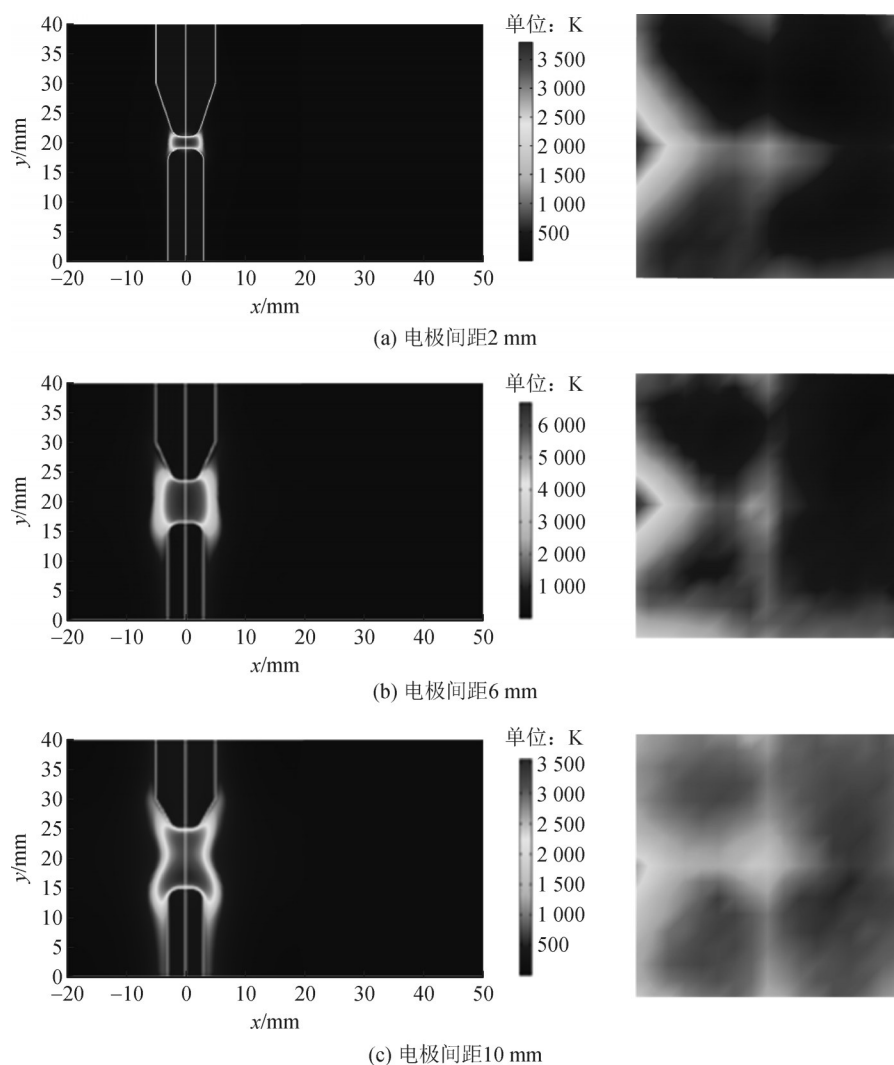


图4 不同电极间距下气体电弧辐射温度分布图

Fig. 4 Arc temperature distribution diagram under different electrode spacings

对照不同电极间距条件下的仿真,图4左侧为气体电弧的仿真结果,右侧为聚酰亚胺材料受电弧热辐射的仿真结果,可以发现在保持电弧电流一定时,电弧辐射温度随电极间距的增大下降,且下降的幅度逐渐减小。仿真结果表明,电弧温度主要集中在聚酰亚胺材料边缘处,仅有少部分温度通过材料的孔隙或者材料的漫反射表现出来,随着电极间

距的增大,聚酰亚胺对辐射温度场分布的阻隔影响越明显。

1.3.2 不同电弧电流下气体电弧辐射温度场

设置铜电极触头间距固定2 mm,保持其他条件不变,在电弧电流分别为2、6、10 kA下进行气体电弧辐射温度场仿真,得到的无聚酰亚胺材料和有聚酰亚胺材料时的电弧辐射温度场分布变化对照见图5。

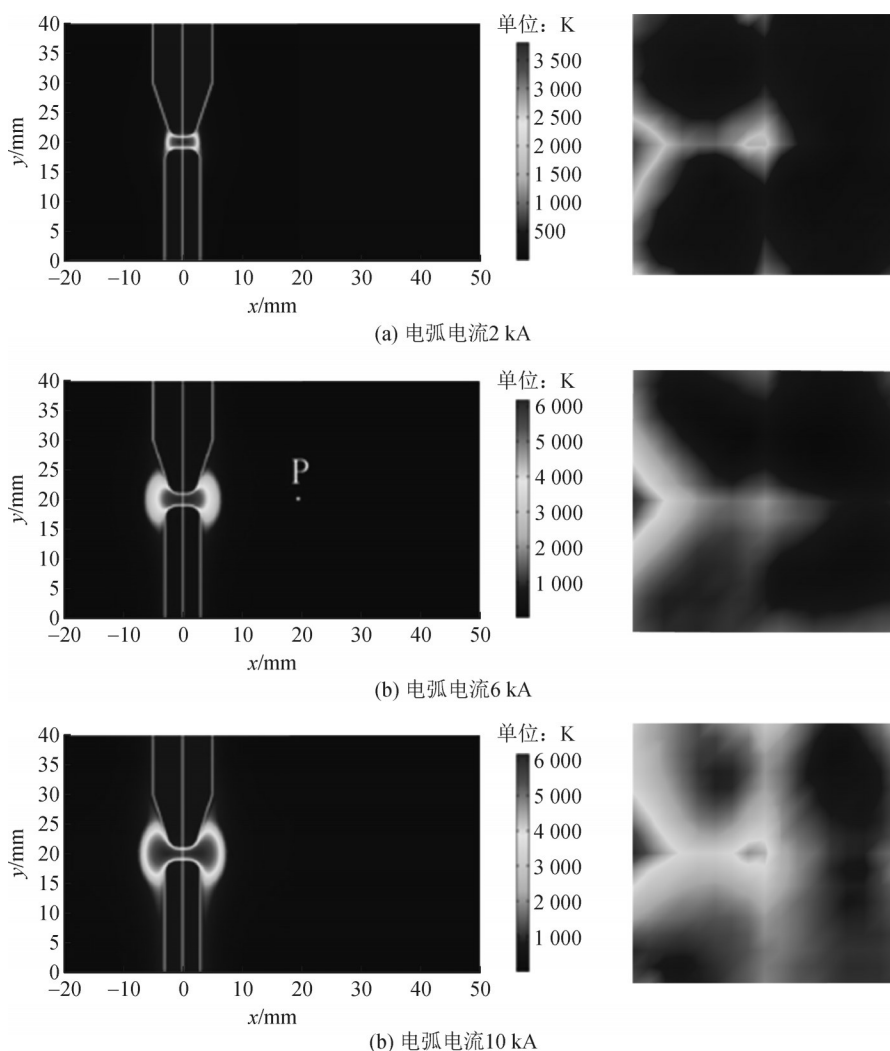


图5 不同电弧电流条件下电弧温度分布图

Fig. 5 Arc temperature distribution diagram under different arc currents

由图5可见,在保持电极间距不变的情况下,随着电弧电流的增大,气体电弧的热辐射量会增大,在10 kA时达到最大值,仿真结果表明聚酰亚胺材料对电弧辐射温度场分布影响明显,电弧温度大部分被材料阻隔,少数温度辐射扩散入材料内部。

2 气体电弧辐射温度特性试验装置

2.1 电弧发生试验装置

根据美国材料试验协会颁布的电弧测试标准 ASTM F1959M-14《服装材料电弧热性能值的标准

测试方法》^[24],采用大电流熔断熔丝的方式起弧,设计的试验电路见图6。

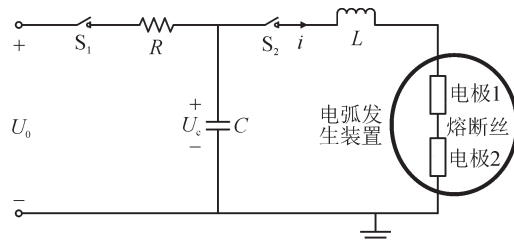


图6 电弧发生试验电路

Fig. 6 Arc experiment circuit

该试验电路主要由工作电源 U_0 、充电电阻 R 、充

电电容 C 、开关 S_1 和 S_2 、放电电感 L 和电弧发生装置组成。工作电源 U_0 可通过闭合 S_1 对电容 C 预充好电后断开 S_1 。试验时控制开关 S_2 闭合, 电容 C 对电弧发生装置的电极1和电极2之间的熔断丝放电, 熔断丝在大的放电电流下熔断并产生电弧。设计的电弧发生装置见图7, 主体由两个铜电极柱和电极间的熔断丝组成。

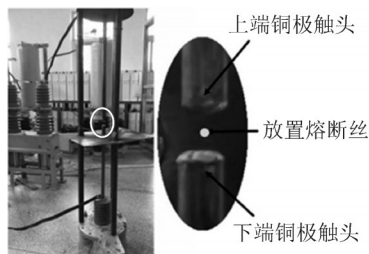
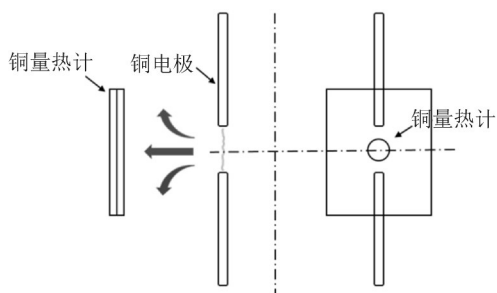


图7 电弧发生装置

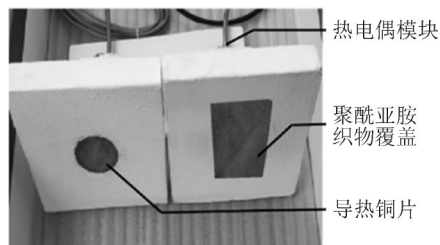
Fig. 7 Arc generator

2.2 电弧辐射温度场测量装置

由于电弧辐射的周围温度过高不易直接测量, 文中设计了如图8(a)所示的铜量热计, 测量聚酰亚胺防护材料对气体电弧辐射温度场影响时, 将聚酰亚胺织物覆盖在铜量热计表面, 见图8(b)。电弧辐射使铜量热计的铜片产生温升, 通过铜片所连热电偶测量其温升, 用温升的变化来反映不同电弧条件对电弧辐射温度场分布的影响。



(a) 测量温升示意图



(b) 铜量热计实物图

图8 铜量热计测量装置

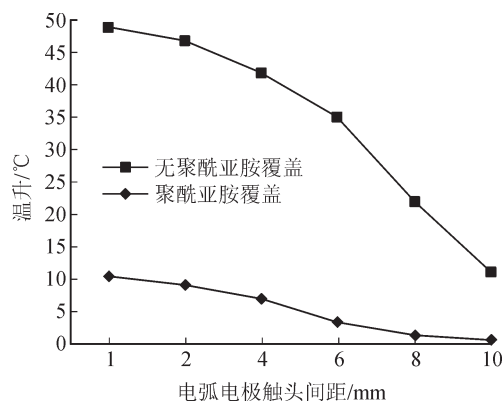
Fig. 8 Copper calorimeter measuring device

3 聚酰亚胺对气体电弧辐射温度场影响试验

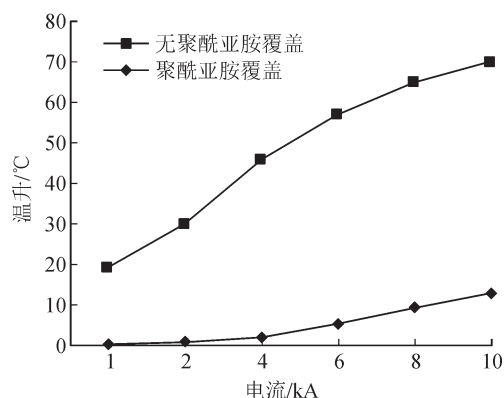
3.1 聚酰亚胺影响电弧辐射温度场试验结果

为了验证仿真部分的研究结果, 分别改变电弧

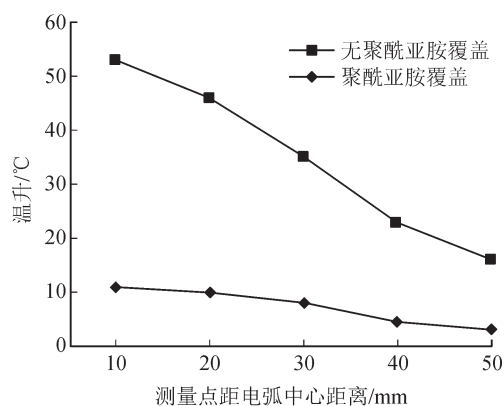
电极触头间距、电弧电流大小以及铜量热计与电弧中心点间的距离3个电弧条件设计电弧试验。每组试验改变一个电弧条件, 重复5次, 记录10 s内铜量热计的温升平均值, 分别统计无聚酰亚胺防护材料和有聚酰亚胺覆盖时3组电弧试验的结果, 记录铜量热计的温升变化情况进行比较, 从而得到的关于聚酰亚胺材料影响电弧辐射温度场的3组对照曲线见图9。



(a) 改变电弧电极间距



(b) 改变电弧电流大小



(c) 改变铜量热计测量点与电弧中心点间的距离

图9 不同条件下有无聚酰亚胺覆盖时量热计温升曲线

Fig. 9 Diagram of temperature rise in different arc conditions when PI covered or not

3.2 试验结果分析

通过分析图9(a)、(b)、(c) 3条曲线可知:

1)1.3.2小节中图5(b)上的域点P,对应电流6 kA、电极间距2 mm的试验条件,该点的电弧温升仿真结果计算后得出温升为46.3 ℃,与图9(a)中横坐标为20 mm处的试验结果相符,同样在图9(b)、(c)中也能找到曲线上的对应点,对应数据相符。说明电弧辐射温度场的仿真较为精确,能够指导试验中电弧温度场的理论计算和分析。

2)改变铜量热计测量点距电弧中心距离时,根据图9(c)的数据计算,相较于无覆盖情况,在有聚酰亚胺材料覆盖时,量热计的温升最大下降79.42%,出现在图9(c)中铜量热计测量点距电弧中心距离为10 mm处。说明聚酰亚胺材料的电弧阻热能力突出,对于不同测量距离的气体电弧热辐射都有较好的阻热能力。

3)电弧电流越高,电极间距离越小,铜量热计位置距离电弧越近,气体电弧辐射的温度越高,造成电弧灼烧的风险越大。在3种影响因素中,改变电弧电流大小时,对温升幅度影响最大,电弧电流每增加1 kA,铜热量计的温升平均增长36.84%,见图9(b)。说明几种影响因素中,电弧电流对电弧热辐射影响最为显著。

用无聚酰亚胺时铜量热计的10 s温升与有聚酰亚胺时的温升做差值,差值结果与无聚酰亚胺温升相除,可以得到聚酰亚胺影响电弧热辐射的温度变化比。这样,改变电弧电流大小时,计算得到该变化比为72.85%,略低于改变电极间距情况下的温度变化比77.55%和改变铜量热计距电弧距离情况下的温度变化比79.42%。

4 结论

1)建立了有无聚酰亚胺材料的气体电弧辐射温度场仿真模型,搭建了改变电弧电极间距、电弧电流大小、铜量热计与电弧中心间的距离3种电弧条件下的有无聚酰亚胺材料对气体电弧辐射温度场影响试验装置,仿真和试验得到气体电弧的辐射的温度场特性以及聚酰亚胺材料对气体电弧辐射温度场的影响规律。发现当电弧电流越高,电极触头间距离越近,铜量热计位置距离电弧越近,气体电弧辐射的温度越高,造成电弧灼烧的风险越大。其中电弧电流对电弧热辐射影响最为显著,电弧电流每增加1 kA,铜热量计的温升平均增长36.84%。

2)当在铜量热计上覆盖聚酰亚胺材料时,仿真和试验结果表明,聚酰亚胺材料对电弧辐射温度场分布影响明显,电弧温度辐射大部分被材料阻隔,少数温度辐射扩散入材料内部。相较于无聚酰亚

胺时,有聚酰亚胺材料状态下,铜量热计的温升可下降超过70%,说明聚酰亚胺材料对气体电弧辐射温度场的扩散具有明显的阻隔性,可作为非常有前景的防电弧服防护材料应用于多种条件的带电作业中。

参考文献:

- [1] 王启龙,王博文,管红立,等. 低压交流串联故障电弧模型及实验[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(2): 26-29.
WANG Qilong, WANG Bowen, GUAN Hongli, et al. Model and experiment of low-voltage AC series fault arc[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2018, 30(2): 26-29.
- [2] HUANG Xinyan, NAKAMURA Y. A review of fundamental combustion phenomena in wire fires[J]. Fire Technology, 2020, 56(1): 315-360.
- [3] ZHU Gaojia, LIU Xiaoming, LI Longnü, et al. Coupled electromagnetic-thermal-fluidic analysis of permanent magnet synchronous machines with a modified model[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2019, 3(2): 204-209.
- [4] 程学珍,庄学山,孟璐莎. 基于加权模糊的时序约束Petri网电网故障诊断方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(11): 83-90.
CHENG Xuezhen, ZHUANG Xueshan, MENG Lusha. Fault diagnosis method of power grid based on weighted fuzzy temporal constraint Petri net[J]. Smart Power, 2023, 51(11): 83-90.
- [5] 翁东雷,王露民,莫建国,等. 基于云计算关联分析的电力设备故障识别模型[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(10): 38-44.
WENG Donglei, WANG Lumin, MO Jianguo, et al. A power equipment fault identification model based on cloud computing association analysis[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(10): 38-44.
- [6] 冯寅,贾宏涛,杨震强,等. 基于CNN-LSTM的输电线路故障诊断方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(11): 59-65.
FENG Yin, JIA Hongtao, YANG Zhenqiang, et al. A study on the transmission line fault diagnosis method based on CNN-LSTM[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(11): 59-65.
- [7] 武剑,薛玉石,山春风,等. 基于改进人工鱼群优化算法的配网故障定位研究[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(2): 40-47.
WU Jian, XUE Yushi, SHAN Chunfeng, et al. A location approach for distribution network faults based on the enhanced artificial fish swarm optimization[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2): 40-47.
- [8] SPYKER R, SCHWEICKART D L, HORWATH J C, et al. An evaluation of diagnostic techniques relevant to arcing

- fault current interrupters for direct current power systems in future aircraft[C]//Proceedings Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo.China: IEEE, 2005: 146-150.
- [9] LEE H E, MESSERLE H K, STOKES A D. New method for solving the energy - balance equation for moving - boundary ac arcs[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1975, 122(2): 227-231.
- [10] 何志鹏, 李伟林, 邓云坤, 等. 低压交流串联故障电弧辨识方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(10): 2806-2817.
HE Zhipeng, LI Weilin, DENG Yunkun, et al. The detection of series AC arc fault in low - voltage distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(10): 2806-2817.
- [11] 王 尧, 马桐桐, 赵宇初, 等. 基于电磁辐射时延估计的串联光伏直流电弧故障定位方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(8): 2233-2243.
WANG Yao, MA Tongtong, ZHAO Yuchu, et al. Series DC arc - fault location method based on electromagnetic radiation delay estimation for photovoltaic systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(8): 2233-2243.
- [12] 刁晓虹, 董 昊, 侯 磊, 等. 基于CEEMDAN-HT和SAE的直流故障电弧诊断方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(10): 1-8.
DIAO Xiaohong, DONG Hao, HOU Lei, et al. Research on the DC fault arc detection method based on CEEMDAN-HT and SAE[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(9): 1-8.
- [13] 朱 雯, 唐 虹, 张成蛟, 等. 电弧伤害机理及其防护服装测评技术研究现状[J]. 棉纺织技术, 2020, 48(7): 75-78.
ZHU Wen, TANG Hong, ZHANG Chengjiao, et al. Research status of arc damage mechanism and protective clothing evaluation technology[J]. Cotton Textile Technology, 2020, 48(7): 75-78.
- [14] 李 侠, 唐 虹, 张成蛟. 电弧防护用纺织品的研究现状及发展趋势[J]. 棉纺织技术, 2020, 48(6): 22-26.
LI Xia, TANG Hong, ZHANG Chengjiao. Research status and development trend of arc protective textiles[J]. Cotton Textile Technology, 2020, 48(6): 22-26.
- [15] 于 然, 付周兴, 王清亮, 等. 基于MATLAB的电弧建模仿真及故障分析[J]. 高压电器, 2011, 47(9): 95-99.
YU Ran, FU Zhouxing, WANG Qingliang, et al. Modeling simulation and fault analysis of arc based on MATLAB[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(9): 95-99.
- [16] 吴 翊, 荣命哲, 杨 茜, 等. 低压空气电弧动态特性仿真及分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 143-148.
WU Yi, RONG Mingzhe, YANG Qian, et al. Simulation on dynamic characteristics of arc in low voltage circuit breaker modelling[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 143-148.
- [17] 付光晶. 基于COMSOL的故障电弧仿真研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
FU Guangjing. Research of AC fault arc simulation based on COMSOL multiphase[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [18] ACHLERKAR P D, NOUGAIN V, KETAN PANIGRAHI B. Backstepping technique - based customer - end voltage control strategy of DC distribution network[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(1): 666-676.
- [19] CHEN Xian, DUAN Xionggan, LIAO Minfu, et al. The voltage distribution characteristics of a hybrid circuit breaker during high current interruption[J]. Plasma Science and Technology, 2013, 15(08): 800-806.
- [20] 戴 栋, 宁文军, 邵 涛. 大气压低温等离子体的研究现状与发展趋势[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 1-9.
DAI Dong, NING Wenjun, SHAO Tao. A review on the state of art and future trends of atmospheric pressure low temperature plasmas[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 1-9.
- [21] LIU Zixi, XIU Shixin, WANG Xiao, et al. The characteristics of vacuum arc in the process of transition to diffuse mode under transverse magnetic field[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(8): 3554-3562.
- [22] XIU Shixin, LIU Zixi, LI Rui, et al. The influence of TMF and AMF components on arc movement characteristics in spiral - slot contacts[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(4): 1440-1447.
- [23] MENG X, BRADLEY J, YAVUZ B, et al. MLlib: Machine learning in apache spark[J]. Journal of Machine Learning Research, 2016, 17(34): 1-7.
- [24] Standard test method for determining the arc thermal performance value of materials for clothing: ASTM F1959M-14 [S]. 2014.

琚泽立(1983—), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为配电及电缆设备的运维检修、带电检测、状态诊断及评价、电气设备的安全防护技术等(E-mail: 1678038@qq.com)。

段雄英(1974—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能开关电器理论及应用、电力设备火灾检测与防护、电力设备在线检测与绝缘诊断等(通信作者)(E-mail: xyduan@dlut.edu.cn)。