

电极材料对密闭腔体故障燃弧压力上升和能量平衡的影响

杨景刚¹, 袁栋², 杨骥¹, 李美³, 李林³

(1. 国家电网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 210000, 南京; 2. 国家电网江苏省电力有限公司, 210000, 南京; 3. 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 710048, 西安)

摘要: 针对开关柜内部短路故障燃弧问题, 基于实验研究了电极材料对密闭腔体中故障燃弧压力上升和能量平衡的影响。采用光电倍增管和热电偶相耦合的方法测量燃弧过程中故障电弧发射的辐射能量, 基于建立的能量平衡关系定量估测了电弧焦耳热、光辐射、电极熔化和蒸发需要的能量、电极氧化反应产生的化学能和气体内能。研究表明: 电极材料和电弧电流严重影响故障电弧内部的能量平衡过程, 能量平衡的改变与压力上升特性密切相关; 小电流(5 kA 以下)情况下, 电极烧蚀微弱, 铜、铝和铁电极引起的压力上升差异较小; 大电流(15 kA 以上)情况下, 铝蒸气与空气氧化反应释放大量化学能导致铝电极情况下的压力上升最高, 而铁电极引起的最高电弧辐射使得其压力上升最低; 随着电弧电流和电弧能量的增加, 能量平衡的改变导致铜和铁电极情况下热传递系数 k_p 减小, 而铝电极对应的 k_p 则趋于增大。

关键词: 故障燃弧; 压力上升; 能量平衡; 开关柜

中图分类号: TM591 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtubxb202004012 **文章编号:** 0253-987X(2020)04-0093-08



OSID 码

Influences of Electrode Materials on Pressure Rise and Energy Balance Due to Fault Arcing in a Closed Tank

YANG Jinggang¹, YUAN Dong², YANG Kun¹, LI Mei³, LI Lin³

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co. Ltd. Research Institute, Nanjing 210000, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co. Ltd., Nanjing 210000, China; 3. State Key Laboratory of Eco-Hydraulic in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Influences of electrode materials on pressure rise and energy balance due to fault arcing in a closed tank is experimentally investigated to solve the problem of fault arcing due to internal short-circuit in switchgears. The radiation energy emitted by fault arc during ignition process is measured by the method coupling a photomultiplier and a thermopile. Based on an established energy balance relationship, the energy needed for arc Joule heat, optical radiation, electrode melting and vaporization, as well as the chemical energy and gas internal energy generated by electrode oxidation reaction, is quantitatively estimated. Results show that electrode material and arc current seriously affect the energy balance process of fault arcing, and the change of energy balance is closely related to pressure rise characteristic. In the case of small current, the electrode erosion is weak and the difference of pressure rises caused by Cu, Fe and Al electrodes is rather

收稿日期: 2019-09-26。 作者简介: 杨景刚(1984—), 男, 硕士, 高级工程师; 李美(通信作者), 女, 博士, 讲师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904700); 国家自然科学基金资助项目(51807162); 陕西省教育厅科研计划资助项目(18JK0566)。

网络出版时间: 2019-12-05

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20191205.1313.008.html>

small. In the case of high current, a large amount of chemical energy from the reaction between Al vapour and air is released, resulting in the biggest pressure rise for the case of Al electrodes, while the highest arc radiation caused by Fe electrodes results in the lowest pressure rise. As the current and electrical energy increase, the changes in the energy balance due to fault arcing lead to decrease of the thermal transfer coefficient k_p in the cases of Cu and Fe electrodes but somewhat lead to increase of k_p for Al electrode.

Keywords: fault arcing; pressure rise; energy balance; switchgear

密闭型电力开关设备广泛应用于电力系统的输配电网中。当由于短路原因在密闭型电力开关设备内发生燃弧故障时,大量的电弧能量被注入,周围气体被加热,引起设备内部压力急剧上升。故障电弧发生时,时间短、能量大,破坏力极强^[1]。强烈的温度、热和压力效应可能引起设备的机械和电气部件发生破损、爆裂,这不会仅损坏各种零部件,而且威胁操作人员的安全,甚至危害电能供应的可靠性,因此,国际电工委员会(IEC)^[2]明确规定了燃弧故障测试方法来评估开关设备内部故障燃弧产生的压力效应。

故障电弧发生时,电弧电流非常大且燃弧持续时间长,电弧和作为导体的电极之间会发生强烈的相互作用,这些金属电极一般为铜、铝或铁材料,因此,电极上会不可避免地发生金属熔化、蒸发和喷溅等现象。电极蒸发产生的金属蒸气注入电弧弧柱中,不仅会改变电弧等离子体的物理化学性质,而且会潜在地增强故障电弧的光辐射。此外,金属蒸气与周围气体之间会发生化学反应,产生的能量也会注入电弧系统,进而影响故障电弧的热传递。故障燃弧引起的压力上升主要由加热周围气体的能量即气体内能决定^[3],而气体内能又受到故障电弧能量输运过程的影响,因此,故障电弧的热传递过程及能量平衡与压力上升特性密切相关。

一直以来,开关柜内故障电弧引起的压力特性受到广泛关注。Miyagi 等基于计算流体动力学(CFD)方法分析了带压力释放阀的腔体内部故障电弧的压力扩散现象^[4]。Uzelac 等在假设间隔内压力均匀分布的条件下,基于简化的数值模型计算了不同气体介质下开关设备内部短路燃弧引起的压力上升^[5]。Anantavanich 基于理想气体方程和热力学定律,提出了标准算法(SCM)计算压力特性^[6]。黎鹏等利用 CFD 方法分析了密闭容器内部短路爆炸产生故障电弧后的压力波传播规律^[7-8];瑞士 ABB 公司针对 SF₆ 和空气绝缘金属封闭中压开关柜,通过实验研究了空气和 SF₆ 对故障电弧压力特

性和爆破片打开时间的影响^[9]。黎鹏等测试了封闭容器内铜电极之间发生短路故障电弧的燃烧特性和压力上升的变化规律^[10]。上海西门子公司的熊泰昌利用爆炸原理研究了故障电弧向周围空气推进的速度,测试了开关柜各部分的结构强度^[11]。西安交通大学蔡彬等人研究了电弧电流、压力释放孔大小及导体绝缘层等因素对空气和 SF₆ 绝缘开关柜故障电弧压力上升的影响^[12]。张俊鹏等通过实验测量了充气压对密闭腔体内 CO₂ 和 N₂ 故障电弧压力上升和电弧能量的影响^[13]。Iwata 等利用已有的自由燃烧电弧的经验数据粗略地评估了电弧电流对密闭空气腔体压力上升的影响^[14]。Tanaka 等通过假设一恒定的辐射能测量了密闭空气柜内故障燃弧引起的压力变化^[15]。如前所述,故障电弧引起的压力上升主要由气体内能决定,而气体内能与能量输运过程密切相关。然而,目前关于故障电弧能量输运过程的基础研究还相对较少,并且电极材料对能量传递的影响也鲜有报道。

本文针对密闭腔体内部短路故障燃弧问题,通过实验研究了铜、铝和铁电极对空气故障电弧热效应的影响。采用光电倍增管和热电偶相耦合的方法测量了燃弧过程电弧光辐射能量的变化,建立了故障电弧内部的简化能量平衡关系。基于能量平衡分析,研究了铜、铝、铁电极材料对压力上升和热传递系数的影响。研究成果可为实际开关设备内部短路燃弧压力上升的实验与仿真研究提供参考。

1 实验系统

1.1 实验平台

基于 252 kV 气体绝缘开关设备设计了简化的故障电弧发生装置,如图 1 所示。上下电极棒对称分布于腔体中,并通过母排与上下绝缘盆电气连接,以实现外部电源回路的进出连接。短路回路提供 2 kV DC、22.5 MVA 的电源,实验测试电压为 1.5 kV。电极棒直径为 20 mm,电极材料分别为纯铜、铁和铝,电极固定在电极棒上,电极间距为 30 mm。

腔体壁上设计有石英玻璃观察窗,用于观察辐射能量。燃弧位置为腔体中心,通过电弧弧柱的电流为 1~20 kA 的直流电,燃弧时间为 0.1 s。容器内充气气体为空气,充气压力为 0.1 MPa。

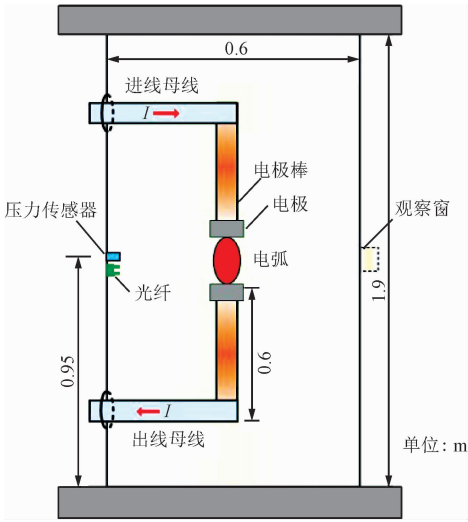


图 1 故障电弧发生装置示意图

图 2 给出了实验接线原理图。实验前,电极间通过直径 0.2 mm 的铜丝实现电气连接,回路中的断路器和隔离开关都处于打开状态。实验时,隔离开关和断路器闭合,回路导通,铜丝被点燃,产生故障电弧。约 85 ms 时,断路器断开,回路电流开始下降。由于系统中电感的存在,回路电流不能立即下降到 0,而是在 100 ms 左右下降到 0,因此,燃弧过程持续时间由断路器控制。

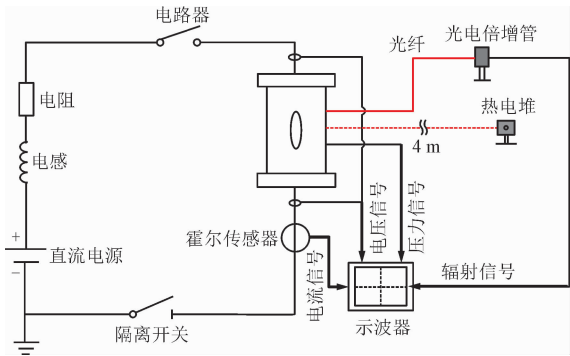


图 2 实验接线原理图

在腔体内壁安装美国 PCB 公司的 102B16 型压电传感器(灵敏度 7.25 mV/kPa,分辨率 0.007 kPa,非线性度小于 1%),以测量内部压力上升。电弧辐射通过一束光纤收集并传给光电倍增管来获得随时间变化的相对辐射功率。在腔体外距离电弧 4 m 处放置 Ophir 公司的 12 A 型热电堆探头(光谱范围 190~20 000 nm,接收孔径 16 mm),通过腔体壁

上的石英玻璃观察窗测量电弧发射的绝对辐射能量,它配备有 Nova II 功率计来显示测量结果。电弧电压采用高压探头(Tektronix-P6015A)进行测量,电弧电流采用 CS20000HC 霍尔电流传感器进行采集测量。电弧电流、电压、压力和辐射信号均可与燃弧过程同步接入示波器(Tektronix DPO4032)进行波形的采集记录。

1.2 能量平衡估测方法

故障电弧燃烧时会向周围空间释放巨大的能量,这些能量通过不同的能量交互机理传递到周围,其内部能量平衡图如图 3 所示,因此,在密闭开关柜内存在能量输入和能量消耗之间的平衡。假设实验腔体是一个绝热系统,则系统输入的能量包括注入的电弧焦耳热能 W_{arc} 、电极烧蚀的金属蒸气与空气之间氧化反应释放的能量 W_{chem} 。系统消耗的能量包括电极熔化和蒸发需要的能量 W_{mv} 、电弧向外发射的光辐射能量 W_{rad} 、引起压力上升的气体吸收的内能 Q 、气体向外传导的能量 W_{cond} 和向外对流的能量 W_{conv} ^[13]。输入能量和耗散能量之间的能量平衡关系为

$$W_{arc} + W_{chem} = W_{rad} + W_{mv} + Q + W_{cond} + W_{conv}$$

(1)

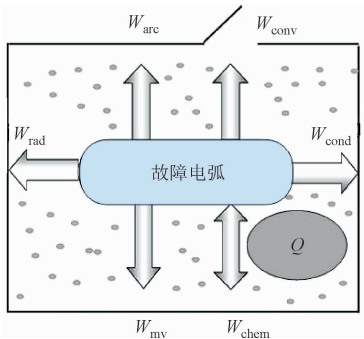


图 3 故障电弧内部能量平衡图

对于本文设计的密闭腔体,没有压力释放口,因此,能量平衡中不包含对外的能量传导 W_{cond} 和对流能量 W_{conv} 。为了研究故障电弧内部不同的能量传递过程,需要对式(1)中的各能量项进行估测。

1.2.1 电弧焦耳热 W_{arc} 电弧焦耳热通过实验测量的电弧电压和电流对时间的积分获得

$$W_{arc} = \int I_{arc} U_{arc} dt$$

(2)

式中: I_{arc} 是电弧电流; U_{arc} 是电弧电压; t 是燃弧时间。

1.2.2 电极氧化反应产生的能量 W_{chem} 故障电弧在燃烧时,弧心温度高达 10 000 K 以上,使得电极

材料熔化蒸发产生金属蒸气,金属蒸气会与腔体内空气中的氧气发生化学反应,并释放一定的化学能。为了确定不同电极下金属蒸气所参与的化学反应,采用X射线衍射仪对电极喷溅出的固体颗粒进行物相分析。图4给出了铜电极情况下测量的典型衍射图谱。经过与粉末衍射卡片集对比分析得出其花样图谱由Cu、CuO、Cu₂O构成,进而可以确定铜蒸汽参与的化学反应,如式(3)、式(4)所示。类似地,铁和铝电极对应的化学反应也一并给出,如式(5)~(7)所示。假设电极被蒸发的蒸气全部参与化学反应,则化学反应产生的能量为单位摩尔的标准化学能和参与反应的金属蒸气摩尔数的乘积。

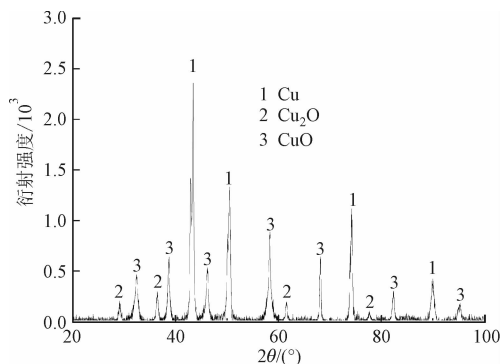
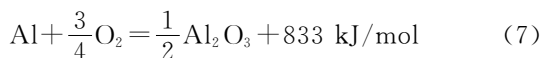
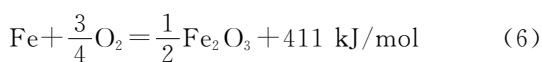
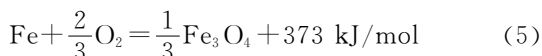
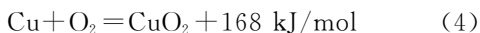


图4 铜电极的衍射图谱



1.2.3 光辐射能 W_{rad} 在高温高压电弧中,热辐射是电弧等离子体中非常重要的热交换方式。电弧发射从远紫外区到远红外区的辐射光谱。电弧发射的辐射不会完全贡献于内部压力上升,只有被周围气体吸收的那部分辐射才会导致压力增加,不被气体吸收的辐射能量将作用在器壁和电极上,不会贡献给压力上升。因此,辐射作为故障电弧内部能量平衡的主导能量输运机理,对故障电弧的特性有着不可忽视的影响。

本文采用热电堆和光电倍增管相结合的方法测量故障电弧发射的光辐射,利用热电堆对不同光谱波长具有相同响应度这一特点,实现电弧绝对辐射能量的测量。然而,热电堆法测出的是燃弧时间段

内累积的总绝对辐射能量,不具有时间分辨特性。为了获得故障电弧辐射的暂态变化,采用超快速响应(ns级)的光电倍增管来实现。光电倍增管测量时虽然无法获知各个波长对总光辐射强度的响应度,但可测量故障电弧相对辐射的暂态变化。之后,通过热电堆测得的总绝对辐射能校准光电倍增管获得的相对辐射,便可以计算故障电弧发射的绝对辐射能量在燃弧过程的变化。

如前所述,热电堆探头被放置在距离电弧4 m处,这样长的距离是为了将电弧作为一个点光源来看待^[16]。电弧向周围空间呈球状发射辐射光强,则热堆探头接收到的电弧辐射能是距离电弧4 m远处的球面上的一个小接收面积(接收口径为 $\Phi 16$ mm)的能量。由此一来,电弧实际发射的辐射能量 W_{rad} 和探头所测的能量 W_{ther} 之间有如下对应关系

$$\frac{4 \times 3.14 \times 4^2}{3.14 \times (0.016/2)^2} = \frac{W_{\text{rad}}}{W_{\text{ther}}} \quad (8)$$

根据式(8)和功率计所显示的数据,可以计算获得一次实验后电弧实际发射的绝对辐射能量。通过绝对辐射能量可以校准光电倍增管测得的相对辐射功率,便可以计算电弧发射的绝对辐射能的暂态变化过程。

1.2.4 电极熔化和蒸发需要的能量 W_{mv} 对于电极熔化蒸发的能量,本文假设其包含以下3部分^[15]。

(1)熔化后未喷溅、依旧焊接在电极表面的这部分金属熔化所需要的能量。测试表明:电极烧蚀后的整个表面有一层熔化痕迹。经过计算,这部分能量相对很小,熔化体积估计的误差对整个能量平衡影响较小^[15],因此本文采用电极表面1 mm厚的金属熔化层来估测这部分能量。

(2)熔化后喷溅出来的金属液滴在熔化过程中所需要的能量,其对应的质量为从电极喷溅出的残余固体颗粒质量 M_{rem} 。实验中采用网眼直径为0.2 mm的网筛,以尽可能多地收集每次实验完成后以液滴形式喷溅出来的固体颗粒,这样保证了仅仅相对大的固体颗粒可以被收集和称重,这部分质量即为 M_{rem} 。因此,该部分能量为单位质量金属熔化所需要的能量和 M_{rem} 的乘积。

(3)电极烧蚀产生的金属蒸气在蒸发过程中所需要的能量,其对应的质量为金属蒸气质量 M_v 。蒸发部分的质量 M_v 为从一次实验结束后两个电极总质量损失中减去收集的残余固体颗粒质量 M_{rem} 。因此,该部分能量为单位质量金属蒸发所需要的能量和 M_v 的乘积。

1.2.5 气体吸收的内能 Q 气体吸收的能量将直接影响气体压力上升的大小。实验中无法直接测量气体吸收的能量,根据能量平衡,在求得 W_{arc} 、 W_{chem} 、 W_{mv} 、 W_{rad} 后,由式(1)可知,气体内能

$$Q = W_{arc} + W_{chem} - W_{rad} - W_{mv} \tag{9}$$

2 结果与讨论

图 5 是电弧电流 10 kA 时铜电极典型的实验电压、电流、压力上升和电弧辐射曲线图。在初始阶段,电弧电流快速上升;约 2 ms 时,引弧铜丝快速熔化和蒸发,电弧电压出现一个很高的点燃峰值,同时,电弧开始向外发射明亮的弧光,光电倍增管内产生光电流,电弧相对辐射功率增大;之后,电弧电压平稳光滑,电弧趋于稳定燃烧;15 ms 时,电流上升至峰值。随着电弧能量不断地被累积注入,电弧快速向周围空间膨胀,高温区域覆盖得也越来越多。一方面,电弧中心等离子体的密度非常低,电弧膨胀导致中心气体被推送到周围区域;另一方面,注入的电弧能量通过传导、对流和辐射从电弧中心向周围空间传递,加热周围气体,引起气体内能增加,进而导致内部压力快速增加。随着电弧的持续燃烧,电弧辐射发射增强,辐射功率趋于上升,并在一定范围

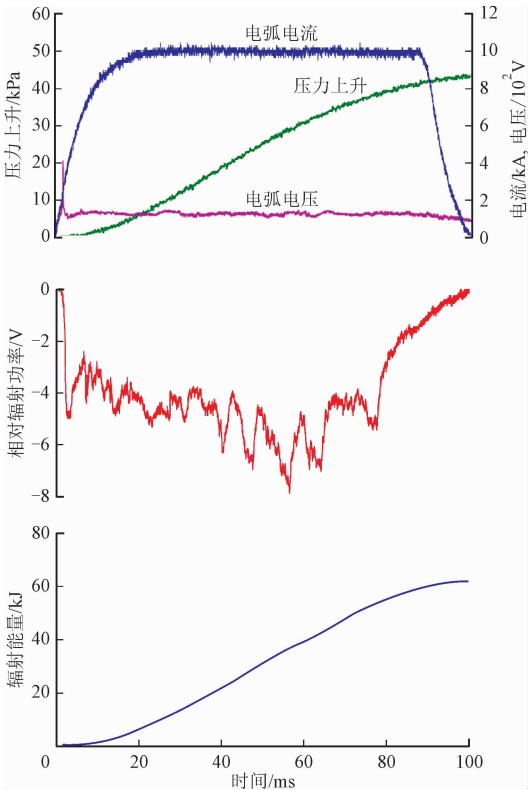


图 5 铜电极电流 10 kA 时典型的实验电压、电流、压力上升和电弧辐射曲线图

内发生连续波动,而辐射功率在燃弧时间内累积的辐射能量则几乎趋于线性增长。当电流在 100 ms 过零时,电弧熄灭,辐射功率降低为 0,最大压力上升出现。

图 6 给出了电弧电流 15 kA 时不同电极材料的电弧电压。3 种电极材料情况下电弧电压的变化都比较稳定平滑,说明在整个燃弧过程中故障电弧燃烧得都很稳定;铁电极情况下电弧电压相对最小,而铜电极的电弧电压则最高,这是因为电极烧蚀产生铁蒸气与空气等离子体混合物的电导率在大部分电弧区域(温度 15 000 K 以下)高于铜和铝蒸气;铜、铝和铁电极情况下的平均电弧电压分别为 139、121 和 112 V。图 7 给出了 3 种电极材料的平均电弧电压随电弧电流的变化,其中点表示整个燃弧过程中电弧电压的平均值,误差条代表多次测量结果的最大和最小值所处的范围。可以看到,平均电弧电压几乎都和电流呈线性增长关系;相同电流下,3 种材料的电弧电压差别很小,但从总体趋势来看,铜的电压相对最高,而铁的电压最低。

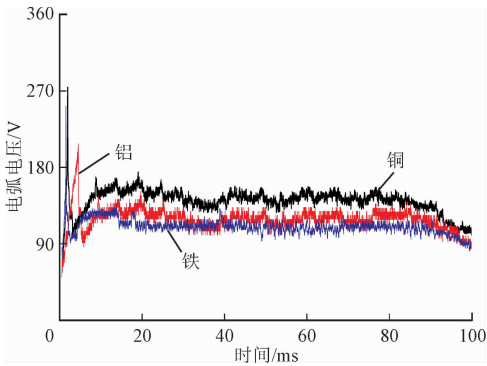


图 6 电流 15 kA 时不同电极的电弧电压

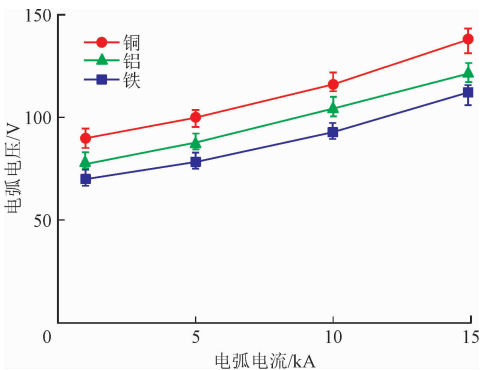


图 7 平均电弧电压随电弧电流的变化

图 8 给出了不同电极材料下压力峰值随电弧能量的变化关系。压力峰值与电弧电流密切相关,这是因为电弧电流决定了总的焦耳热输入。电弧电流越大,电弧能量越高,气体内能增加越多,压力上升

也越高;当输入的电弧能量相对较小(低于 20 kJ)时,3 种电极材料对应的压力峰值差异很小;随着电弧能量的增加,3 种电极对应的压力峰值的差增大。可以看到,在相同的电弧能量条件下,铁电极的压力峰值最小,而铝电极则最高,这主要是由故障电弧内部能量平衡的变化以及主导能量项贡献的不同引起的。如图 9 所示,小电流(5 kA)情况下,金属电极的烧蚀很微弱,因此,3 种电极情况下电极熔化蒸发能和金属蒸气氧化反应能都非常小,输入的电弧能量主要被辐射和气体内能增加所平衡。3 种电极情况对应的气体内能差异也比较小,这使得它们彼此间的压力上升差异也很小,如图 8 所示。

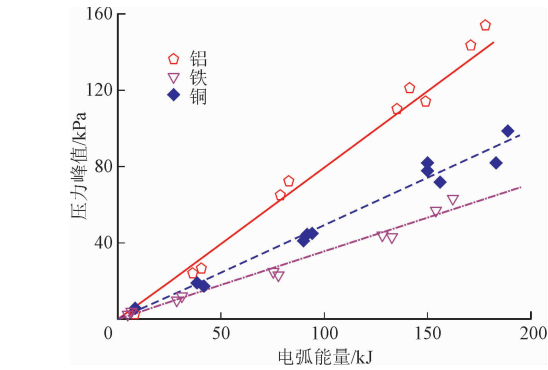


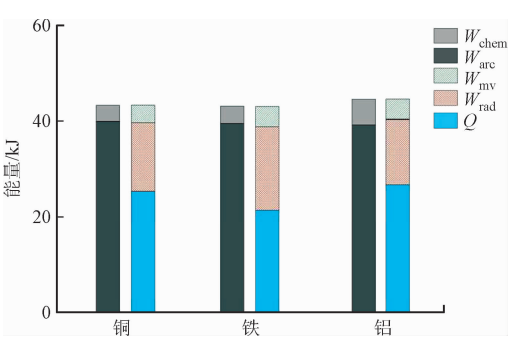
图 8 压力峰值随电弧能量的变化

表 1 给出了电流 5 kA 时不同电极材料情况下故障电弧能量平衡的相关测试结果。大电流(15 kA)情况下,电极烧蚀加剧,电极熔化蒸发能和金属蒸气氧化反应能都发生一定程度的增加。3 种电极的电弧能量差异较小,这主要是因为它们彼此相近的电弧电压(见图 7)造成的。对于铁电极,电弧辐射在能量消耗中的比例显著高于铜和铝,因此,电弧辐射的主导作用导致贡献给压力上升的气体内能较小。对于铝,电极烧蚀最严重,产生的金属蒸气量最多,而铝蒸气和空气的氧化反应会释放巨大的能量,在能量耗散中占据更主导的作用。因此,铝情况下,气体内能大幅增加,压力上升也远高于铜和铁电极,如图 8 所示。

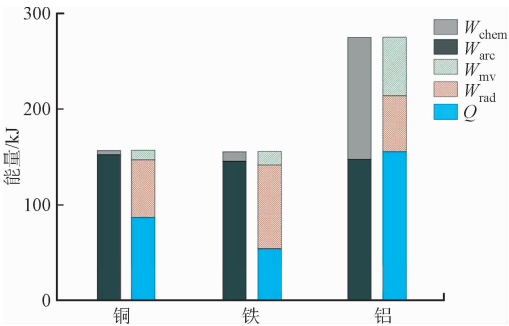
根据实验测量的压力上升,基于标准计算法获得表征压力上升特性的热传递系数 k_p 。热传递系数代表导致气体压力上升的气体内能和输入的电弧能量之间的比例^[17-20],计算公式为

$$k_p = \frac{Q}{W_{arc}} = \frac{\Delta P V M C_V}{R Q_{arc}} \tag{10}$$

式中: ΔP 为腔体内压力上升; V 为腔体体积; M 为气体摩尔质量; C_V 为气体介质定容热容; R 为气体常数; Q_{arc} 为燃弧周期内累积的电弧能量。



(a) 5 kA



(b) 15 kA

图 9 不同电流下的能量平衡图

表 1 电流 5 kA 时不同电极故障电弧能量平衡的相关测试结果

参数	数值		
	铜电极	铝电极	铁电极
电弧能量/kJ	39.7	37.2	38.8
辐射能量/kJ	13.0	17.6	12.7
电极质量损失/g	1.91	1.88	2.20
残余固体颗粒质量/g	1.21	0.63	1.34
电极蒸发质量/g	0.7	1.25	0.86

图 10 和图 11 分别给出了热传递系数 k_p 随电弧电流和电弧能量的变化关系。可以看出,随着电弧电流和电弧能量的增加,铜和铁电极情况下的 k_p

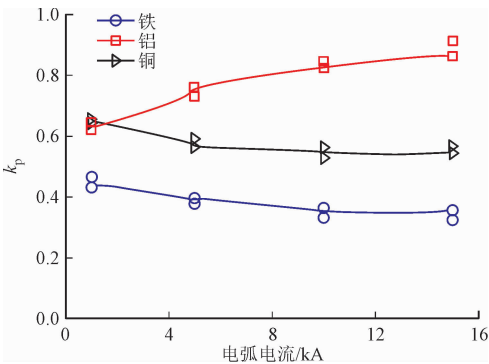
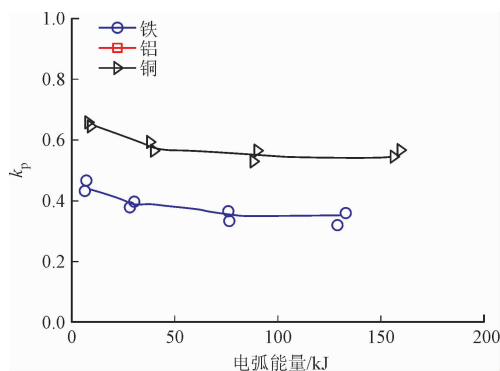


图 10 k_p 随电弧电流的变化

图 11 k_p 随电弧能量的变化

发生一定程度的减小,而铝对应的 k_p 则趋于增大,这主要是由于电流的变化引起故障电弧能量平衡的改变(如图 9 所示);对于铜和铁,电流增加使得电极熔化蒸发能量的消耗速度超过了金属蒸气氧化反应释放能量的速度,因此 k_p 变小,而对于铝电极,电流增加使得铝蒸气氧化反应能量的增加速度高于电极熔化蒸发能量的消耗速度,因此 k_p 反而呈现增大的趋势;此外,铜和铝情况下的 k_p 始终高于铁,这是因为铁的电弧辐射在能量消耗中占据的比例相对较高,远大于铜和铝。

3 结 论

通过构建电弧焦耳热、电弧辐射、电极熔化蒸发能、金属蒸气化学反应能和气体内能之间的能量平衡,研究了铜、铝和铁电极材料对密闭腔体内故障电弧引起的压力上升、能量传递和热传递系数的影响。主要结论如下。

(1)通过对密闭腔体内故障电弧能量平衡各能量项的定量估测,发现能量平衡的改变与压力上升特性密切相关。此外,电极材料和电弧电流严重影响故障电弧内部的能量平衡过程和压力上升。

(2)小电流情况下,由于电极烧蚀微弱,因此,输入的电弧能量主要以气体内能增加的方式耗散,3种电极材料情况下密闭腔体内故障电弧引起的最大压力上升差异相对较小;大电流情况下,铝电极由于铝蒸气与空气氧化反应释放大量化学能导致其压力上升最高,而铁电极情况下最大的电弧辐射使得其压力上升最低。

(3)随着电弧电流和电弧能量的增加,铜和铁电极情况下的热传递系数 k_p 发生一定程度的减小,而铝对应的 k_p 则趋于增大,这主要是由于电流变化引起故障电弧能量平衡的改变造成的。

参考文献:

- [1] 阮江军,黎鹏,黄道春,等. 中压开关柜内部短路燃弧热-力效应研究综述 [J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3340-3351.
RUAN Jiangjun, LI Peng, HUANG Daochun, et al. Review on thermal-mechanical effects research of mv switchgear due to internal short circuit arcing [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3340-3351.
- [2] Working Group B3. 37. Mitigating the effects of arcs in M. V. switchgear [R]. Paris, France: CIGRE, 2017.
- [3] 袁端磊,王海燕,杨芳,等. 电极烧蚀对密闭容器内空气故障电弧的影响 [J]. 高压电器, 2018, 54(9): 44-48.
YUAN Duanlei, WANG Haiyan, YANG Fang, et al. Influence of electrode erosion on air fault arc in a closed container [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(9): 44-48.
- [4] MIYAGI T, TANAKA S I, IWATA M, et al. Pressure rise and propagation phenomena due to fault arc in container with opened pipe [J]. Electrical Engineering in Japan, 2015, 190(3): 30-36.
- [5] UZELAC N, DULLNI E, KRIEGER M, et al. Application of simplified model for the calculation of the pressure rise in MV switchgear due to internal arc fault [C]//22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Stevenage, England, UK: Institute of Engineering and Technology, 2013: 10-13.
- [6] ANANTAVANICH K. Calculation of pressure rise in electrical installations due to internal arcs considering SF₆-air mixtures and arc energy absorbers [D]. Aachen, Germany: RWTH Aachen University, 2010.
- [7] LI P, RUAN J J, HUANG D C, et al. Analysis of pressure rise in a closed container due to internal arcing [J]. Energies, 2017, 10(3): 294-310.
- [8] 黎鹏,阮江军,黄道春,等. 封闭容器内部短路爆炸压力效应计算 [J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(6): 1065-1071.
LI Peng, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Pressure effect calculation of internal short-circuit arcing explosion in a closed container [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(6): 1065-1071.
- [9] BJØRTUFT T R, GRANHAUG O, HAGEN S T, et al. Internal arc fault testing of gas insulated metal enclosed MV switchgear [C]//18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Stevenage, England, UK: Institute of Engineering and Technology, 2005: 1-5.

- [10] 黎鹏, 阮江军, 黄道春, 等. 封闭容器内部短路燃弧特性及压力升试验分析 [J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 940-949.
- LI PENG, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Experimental analysis of arcing characteristic and pressure rise due to internal short-circuit in a closed container [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 940-949.
- [11] 熊泰昌. 高压开关柜防护内部电弧故障的结构强度计算与试验研究 [J]. 上海电器技术, 2002, 3(3): 3-8.
- XIONG Taichang. Strength calculation and test research of high-voltage switchgear against internal arc faults [J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2002, 3(3): 3-8.
- [12] 蔡彬, 陈德桂, 吴伟光, 等. 开关柜耐受最大冲击载荷的冲击动力学研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 124-130.
- CAI Bin, CHEN Degui, WU Weiguang, et al. Research of shock dynamics on withstanding the maximal shock load in switchgear assemblies [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 124-130.
- [13] 张俊鹏, 袁端磊, 李美, 等. 不同绝缘气体对内部故障电弧压力效应的影响 [J]. 高压电器, 2017, 53(8): 100-104.
- ZHANG Junpeng, YUAN Duanlei, LI Mei, et al. Experimental analysis of arcing characteristic and pressure rise due to internal short-circuit in a closed container [J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8): 100-104.
- [14] IWATA M, ANANTAVANICH K, PIETSCH G J. Influence of arc current on fraction Kp of electric arc energy leading to pressure rise in a closed container [C]//17th International Conference on Gas Discharges and Their Applications. New York, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008: 189-192.
- [15] TANAKA S I, MIYAGI T, OHTAKA T, et al. Influence of electrode material on pressure-rise due to arc in a closed chamber [J]. Electrical Engineering in Japan, 2011, 174(4): 9-18.
- [16] YOKOMIZU Y, MATSUMURA T. Radiation power of SF₆ arc in current range from 500 to 20 000 A at pressures of 0.1 and 0.4 MPa [J]. Journal of Physics:

- D Applied Physics, 2008, 41(12): 125203.
- [17] FRIBERG G, PIETSCH G J. Calculation of pressure rise due to arcing faults [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2): 365-370.
- [18] ZHANG J, GOCKENBACH E. Calculation of pressure and temperature in medium-voltage electrical installations due to fault arcs [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2008, 41(10): 105206.
- [19] LUTZ F, PIETSCH G J. The calculation of overpressure in metal closed switchgear due to internal arcing [J]. IEEE Trans Power Appar & Syst, 1982, 101(11): 4320-4235.
- [20] KUWAHARA H, YOSHINAGA K, SAKUMA S, T, et al. Fundamental investigation on internal arcs in SF₆ gas-filled enclosure [J]. IEEE Trans Power Appar & Syst, 1982, 101(10): 3977-3987.

[本刊相关文献链接]

- 李乃一, 彭宗仁. 气固绝缘系统电场模型的建立与求解方法. 2019, 53(6): 151-160, 168. [doi:10.7652/xjtuxb201906020]
- 庞培川, 孙泽明, 张芊, 等. 直流电压作用下极不均匀电场中 SF₆/N₂ 合气体局部放电起始特性研究. 2019, 53(4): 44-50. [doi:10.7652/xjtuxb201904007]
- 李丽, 郭泽, 邹庄磊, 等. SF₆ 替代气体的饱和蒸气压特性研究. 2019, 53(3): 157-163. [doi:10.7652/xjtuxb201903022]
- 孙晋茹, 姚学玲, 田向渝, 陈景亮, 吴翊. 碳纤维增强型复合材料在非破坏雷电流脉冲下的动态导电特性. 2019, 53(2): 80-87. [doi:10.7652/xjtuxb201902011]
- 刘小军, 熊庆, 汲胜昌, 等. 针对串联直流电弧的电容电流时频检测方法. 2018, 52(12): 152-158, 166. [doi:10.7652/xjtuxb201812022]
- 姬军鹏, 陈文洁, 马志鹏, 等. 36 kV 电子束轰击炉高压直流开关电源设计. 2017, 51(8): 102-109. [doi:10.7652/xjtuxb201708017]
- 李文栋, 刘哲, 有晓宇, 等. 叠层式介电功能梯度绝缘子的介电常数分布优化. 2016, 50(10): 19-26. [doi:10.7652/xjtuxb201610004]
- 季良, 刘颖异, 周翔, 等. 利用开断模型分析引弧板对低压断路器电弧运动的影响. 2016, 50(10): 27-35. [doi:10.7652/xjtuxb201610005]

(编辑 亢列梅)