

# 平板触头分离过程直流真空电弧形态与电压特性

刘路辉, 庄劲武

(海军工程大学, 湖北省 武汉市 430033)

## Modes of Drawn DC Vacuum Arcs and Characteristics of Arc Voltage Between Butt Contacts

LIU Luhui, ZHUANG Jinwu

(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** Hybrid DC vacuum circuit breaker (HDCVCB) based on forced commutation principle is effective for DC current interruption. And its parameter design as well as interrupting capacity is closely related to the variations of arc modes. A demountable vacuum chamber was used to study the variation principle and the voltage characteristics of arcs, on a diameter of 45 mm CuCr50 butt contacts, under condition of approximate dc currents up to 8 kA. Experiment results show that the arcs stayed on the rupture point after the contact separation, before they gradually spread outward with the increasing of gap. When the current was under 5 kA, the arc appeared as diffused and the noise of arc voltage was low; when the current exceeded 5 kA, the arc also could cover the whole surface of the contact, but the arc ignition points mostly developed into anode bright spot, whereby after the arcing time 1.5 ms, the voltage noise increased sharply. The experiment results provide some guidance for hybrid DC vacuum circuit breaker design.

**KEY WORDS:** butt contact; vacuum arc; DC; arc mode; arc voltage

**摘要:** 基于强迫换流原理的混合型直流真空断路器是直流开断技术的有效方式之一,其参数设计及开断能力与电弧形态演化密切相关。利用可拆卸真空灭弧室,对直径为45 mm的CuCr50平板触头,在1~8 kA的近似恒定直流条件下分离过程中真空电弧的形态演化规律和电弧电压特性进行了研究。实验结果表明:触头分离初期,电弧集聚在电弧引燃处;随着开距的增加,电弧逐渐扩散。当电流小于5 kA时,电弧始终呈扩散型,电弧电压噪声较小;当电流大于5 kA,电弧能扩散到整个触头表面,但电弧初始引燃处多发展成阳极亮斑,且燃弧时间大于1.5 ms后,电弧电压噪声分量急剧增加。实验结果可以用于指导混合型直流真空负荷开关的设计。

**关键词:** 平板触头; 真空电弧; 直流; 电弧形态; 电弧电压

## 0 引言

直流电力系统主要应用于舰船直流电力系统、电信设备配电系统、地铁等轨道交通牵引配电系统、远距离直流高压输电系统和可再生能源构成的直流微电网等,具有显著的优势。直流断路器是直流电网安全运行和保护的关键设备,对系统保护策略的制定和工程实现有着重大的意义。直流断路器的缺乏成为制约直流电力系统广泛应用的一个主要因素<sup>[1-4]</sup>。基于强迫换流法的混合型直流真空断路器是目前直流开断技术的重要发展方向之一<sup>[5-11]</sup>。

开关电器中的电弧总是由触头分离产生,触头分离过程中电弧形态的演化规律,及由此引起的电、热过程的变化及其相互作用,将对电流过零后能否顺利承受恢复电压有很大影响。真空断路器的开断能力与触头间隙中的电弧形态和介质恢复强度综合效应有关,在高密度电弧状态及阳极斑点状态下均不利于分断。与交流电流具有自然过零点不同,直流电弧电流强迫过零,电流下降率数十乃至百倍于同幅值的交流电流,下降时间极短(一般仅几十 $\mu\text{s}$ ),这极大地压缩了电弧形态转变和触头局部热点的冷却时间,要求分断后介质恢复能力具有极高的可靠性,分断能力极大地依赖换流前电弧形态及触头状态,某种程度上也决定了混合型直流真空断路器换流参数的设计。在传统交流商用灭弧室中,如果开断电流在6 kA以下,多采用简单的无磁对接式平板触头<sup>[12]</sup>。这类触头结构的电弧形态转变不必用磁场来控制,可应用于混合型直流真空负荷开关的开发。因此,有必要深入研究一定时间内,平板触头分断恒定直流过程中电弧形态演化规律。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51207166, 51307179)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51207166, 51307179).

针对电弧形态演化的研究成果主要对象为工频交流真空电弧。文献[13]研究了平板触头分断1~16 kA系列交流电流过程中电弧形态的变化,并总结了分离时电流对桥柱型电弧持续时间的影响,讨论了弧柱压力与电弧形态演变的关系。文献[14]中有部分内容对平板触头无磁条件下大电流电弧形态进行了实验研究,与本文关注的电流范围交叉内容较少。文献[15]研究了平板触头与两种不同结构的纵磁触头在1 kA左右分离,电流上升到不超过4 kA,燃弧小于4 ms条件下,电弧引燃后形态发展变化,发现平板触头中电弧扩散最快;文中还对人工过零电弧熄灭过程进行了对比,平板触头在实验条件下表现出了良好的熄弧特性。

基于以上研究,本文首先介绍了基于可拆卸灭弧室的真空电弧研究平台,利用该平台研究了在不同幅值的近似恒定直流条件下,平板触头分离过程中真空电弧形态演化和电弧电压特性,并就实验结果进行了讨论。

## 1 实验系统

真空电弧研究平台主要由电气回路、真空系统、摄像系统、测控装置四部分组成,如图1所示。

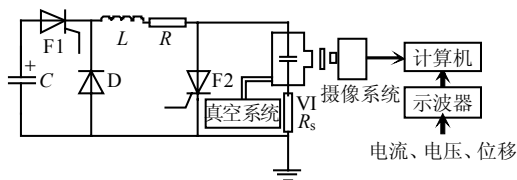


图1 实验平台

Fig. 1 Schematic of experimental arrangement

直接获得一系列不同幅值的直流试验电流很难,为此采用C-L组成的振荡回路,在电流变化率很小的峰值附近可以等效为近似恒定直流。实验采用的电容器C容量为100 mF,最高充电电压为1 kV,电感L为205  $\mu$ H,电阻R为5.6 m $\Omega$ ,通过改变电容器C的充电电压 $U_0$ ,产生符合要求的电流幅值。F1为电流导通开关,二极管D为续流支路,起到维持电流的作用;晶闸管F2为旁路开关,燃弧一定时间后通过导通F2,使流过灭弧室的电流转移至F2支路,电弧因电流过零而熄灭。采用晶闸管等电力电子开关可以实现各阶段的精确控制。

可拆卸灭弧室VI由不锈钢做成,设计有玻璃窗便于观察真空电弧形态。不锈钢筒与电极绝缘,处于悬浮电位,兼做屏蔽罩;静触头经陶瓷过渡,

通过刀口法兰与钢筒连接;动触头经波纹管引出,使用时通过高速斥力机构驱动<sup>[16]</sup>,触头速度近似为线性运动。为了达到要求的真空度,采用机械泵和分子泵组成真空系统。实验过程前,将真空度抽至 $10^{-4}$  Pa,实验时关闭阀门,进行保压实验。采用无感分流器 $R_s$ 和电压探头测量电弧电流、电压、屏蔽筒电压等电气参数,利用线性位移传感器测量动触头运动特性,各参数输入数字示波器进行存储;高速摄像机及附属光学系统由主控制器控制,保证同步采集真空电弧的图像。所有数据均传入计算机进行存储和分析处理。

采用平板对接式触头结构,触头直径为45 mm,触头材料CuCr50。采用Photron SA4相机拍摄电弧图像,相机的拍摄速度为50 000 fps,拍摄分辨率为 $384 \times 128$ ,曝光时间为1  $\mu$ s。考虑该系列实验产生的真空电弧可能主要是阴极斑点起作用,拍摄时通过调整适当的角度,可以观察到整个阴极表面。待开发的直流负荷开关主要应用中低压领域,满足开距的要求下,燃弧时间控制在4 ms以内。斥力机构驱动信号为0时刻,0.5 ms左右机构分离起弧、建立弧压,触头平均速度约2.5 m/s,触头最大开距为8 mm(系列实验中,触头运动特性基本一致)。

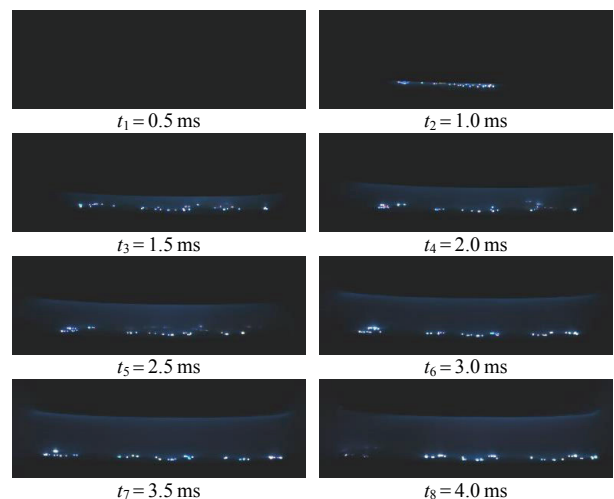
## 2 实验结果与讨论

### 2.1 不同幅值直流电弧形态与电弧电压

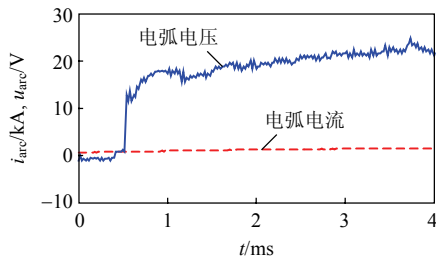
#### 2.1.1 电流为1 kA

电流为1 kA时,所拍摄的电弧图像及电气参数特性如图2所示,图2中图像下侧为阴极,上侧为阳极,下文相同。

由图2(a)可知,当 $t_1=0.5$  ms时,触头部分与背景颜色一致,未观察到电弧亮光。 $t_2=1.0$  ms时,



(a) 真空电弧形态



(b) 真空电弧电流与电压

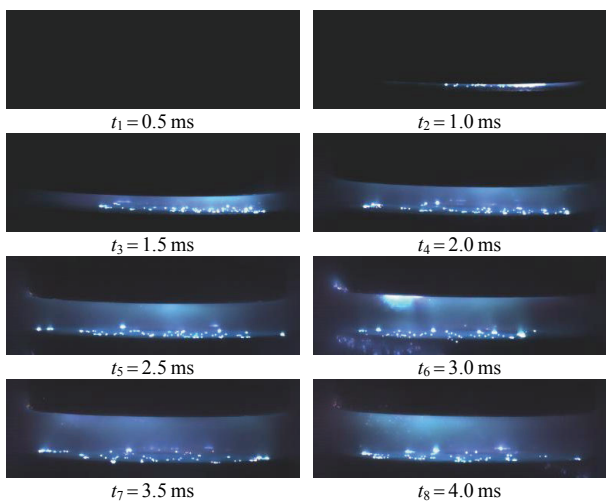
图2 平板触头分离直流 1 kA 过程真空电弧形态及电压  
Fig. 2 Vacuum arc modes and arc voltage of butt contacts under 1 kA DC current

在触头间隙观察到电弧亮光，集中在径向分布约占触头直径 1/3 的区域。 $t_3=1.5$  ms 时，随着开距的增加，电弧扩散接近触头边缘。此后，因为电流较小，整个燃弧过程电弧形态均保持为扩散型，阴极斑点均匀地分布在触头面上，阳极表面附有一比弧柱亮度稍强的光层，开距变化对电弧形态基本上没有影响。图 2(b)为电弧电流和电弧电压波形图，波形显示电弧电压无明显噪声，电弧电压不超过 25 V。通过数据核对，电弧电压建立时刻与首次观察到触头间产生亮光的时间基本对应。

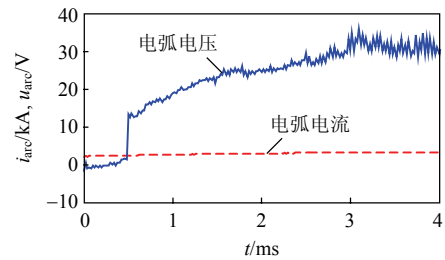
2.1.2 电流为 3 kA

电流为 3 kA 时，所拍摄的电弧图像及电气参数特性如图 3 所示。

由图 3(a)可知， $t_2=1.0$  ms 时，在触头间隙观察到产生的电弧弧柱亮度存在径向梯度，较亮的部分尺寸约为 10 mm。 $t_4=2.0$  ms 时，阴极斑点基本扩散到整个触头表面，电弧整体亮度高于电弧电流 1 kA 时的电弧亮度。 $t_6=3.0$  ms 时，阴极斑点依旧分布在整个触头表面，但阳极出现一较亮的斑点，直径约为 6 mm，轴向高度约为 2.5 mm，此时触头开距 6.5 mm。 $t_7=3.5$  ms 时，阳极亮斑消失，只存在阴极



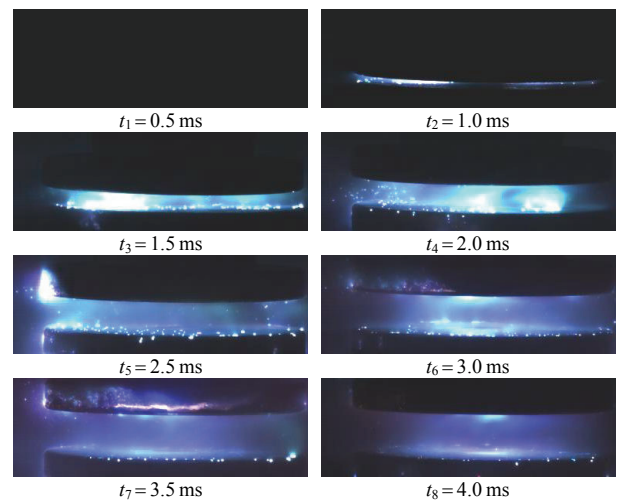
(a) 真空电弧形态



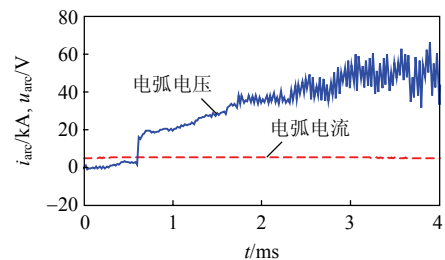
(b) 真空电弧电流与电压

图3 平板触头分离直流 3 kA 过程真空电弧形态及电压  
Fig. 3 Vacuum arc modes and arc voltage of butt contacts under 3 kA DC current

表面均匀分布的阴极斑点，电弧亮度无论径向还是轴向分布都较均匀。 $t_8=4.0$  ms 时，原产生阳极亮斑的地方产生相对弧柱亮度稍亮的光，对应的阴极表面有阴极斑点向光亮下集中的迹象。图 3(b)电弧电压波形显示 3.0 ms 后电弧电压噪声有所增加，平均值超过 30 V，振幅小于 5 V。



(a) 真空电弧形态



(b) 真空电弧电流与电压

图4 平板触头分离直流 5 kA 过程真空电弧形态及电压  
Fig. 4 Vacuum arc modes and arc voltage of butt contacts under 5 kA DC current

2.1.3 电流为 5 kA

电流为 5 kA 时，所拍摄的电弧图像及电气参数特性如图 4 所示。

由图 4(a)可知， $t_2=1.0$  ms 时，在触头间隙观察两个并联的电弧区域，其中左侧电弧区较亮。

$t_3=1.5\text{ ms}$  时，随着开距的增加，燃弧时间的增长，两个弧柱均向外扩散，并融合到一起，左侧区域亮度仍高于右侧。 $t_4=2.0\text{ ms}$  时，弧柱亮度分布发生了变化，右侧区域亮度高于左侧。左侧原燃弧区域触头间隙间可以观察到明显的微粒亮点，部分微粒向间隙外喷溅，其光亮的照射已可见明晰的触头边界。 $t_5=2.5\text{ ms}$  时，阳极触头左侧侧面形成明亮的斑点，对应阴极面有集聚到一起的阴极斑点群，此时触头开距  $5.8\text{ mm}$ ，阳极触头发光处持续到  $3.5\text{ ms}$ 。 $t_7=3.5\text{ ms}$  时，阳极侧面正对观察窗的位置发生了类似闪电的发光带，阴极触头阴极斑点数目减小，但可以分辨出整个触头面上有一处相对较亮区域。电弧电压波形显示触发  $2.0\text{ ms}$  后，电弧电压逐渐增加，平均幅值达  $50\text{ V}$ ，噪声分量也同步增大，振幅约  $15\text{ V}$ 。阳极亮斑出现的原因，可能是对于实验触头尺寸、触头开距及燃弧时间， $5\text{ kA}$  的燃弧电流达到了电弧形态发生变化的边界值。

2.1.4 电流为  $7\text{ kA}$

电流  $7\text{ kA}$  时，所拍摄的电弧图像及电气参数特性如图 5 所示。

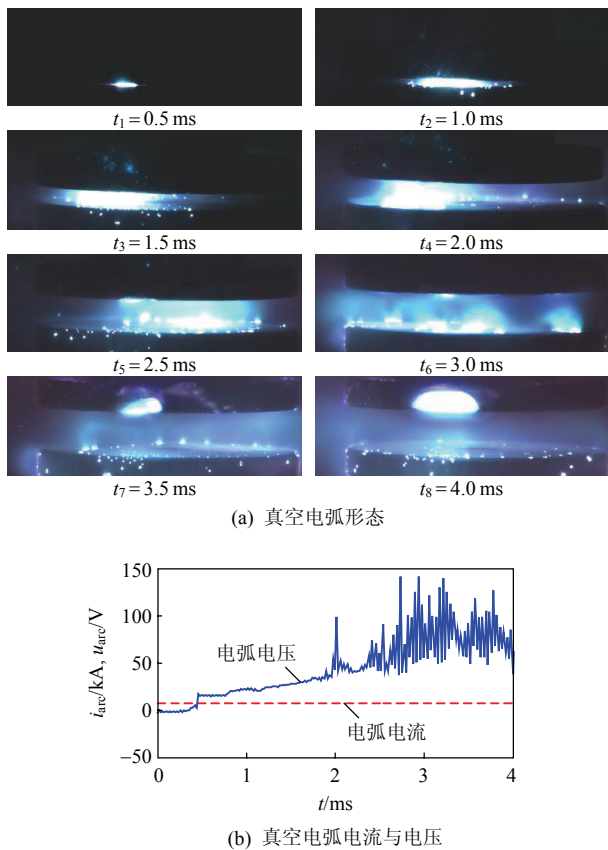


图 5 平板触头分离直流  $7\text{ kA}$  过程真空电弧形态及电压  
Fig. 5 Vacuum arc modes and arc voltage of butt contacts under  $7\text{ kA}$  DC current

由图 5(a)可知， $t_2=1.0\text{ ms}$  时，在触头间隙处观察明亮的斑点，说明此时已形成电弧。 $t_4=2.0\text{ ms}$  时，有部分阴极斑点扩散到明亮的弧柱以外，并运动到触头边界，但等离子体的主体部分仍旧被约束在触头分离形成的弧柱区域。时间为  $2.5\sim 4.0\text{ ms}$  时，随着弧柱直径变大，开距的增加，弧柱亮度相对变暗。 $t_6=3.0\text{ ms}$  时贯通触头间隙的弧柱消失，取而代之的是阴极上的多个斑点群和阳极上触头分离位置处形成的亮斑。随着燃弧时间的增长，阴极斑点群逐渐扩散，一定数量的阴极斑点运动到了触头侧面，但阳极亮斑位置未发生变化，且尺寸和亮度逐渐增加， $t_8=4.0\text{ ms}$  时，已发展成块状阳极斑点。由图 5(b)可知， $2.0\text{ ms}$  时电弧电压产生突跳，幅值发展到平均达  $80\text{ V}$ ，噪声分量振幅高达  $60\text{ V}$ 。阳极亮斑的出现且位置不变，会造成阳极局部温度升高，熔融体积增加，使得电流过零后弧隙间粒子密度增加，且阳极热点继续向间隙提供金属蒸气，不利于介质恢复。

2.1.5 电流为  $8\text{ kA}$

电流为  $8\text{ kA}$  时，所拍摄的电弧图像及电气参数特性如图 6 所示。

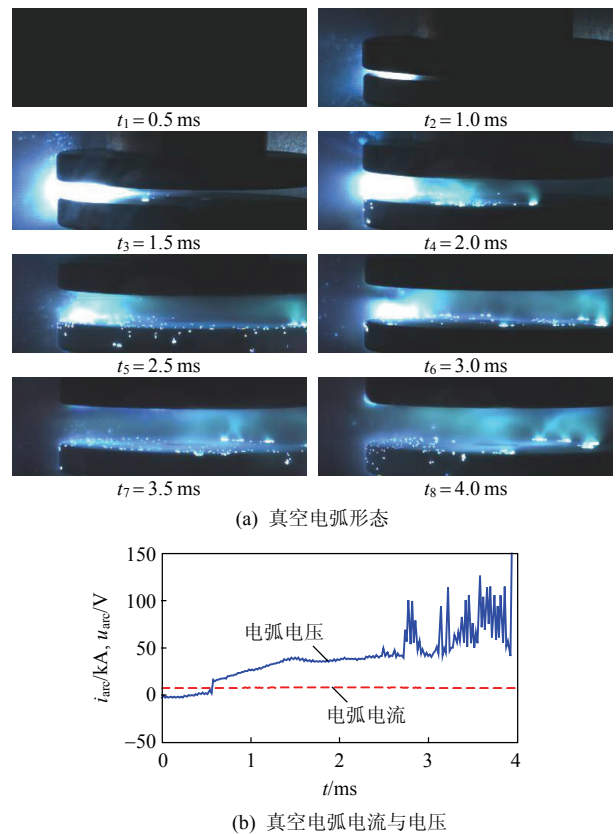


图 6 平板触头分离直流  $8\text{ kA}$  过程真空电弧形态及电压  
Fig. 6 Vacuum arc modes and arc voltage of butt contacts under  $8\text{ kA}$  DC current

由图 6(a)可知,  $t_2=1.0\text{ ms}$  时, 由于燃弧电流较大, 在触头间隙处观察特别明亮的斑点, 光亮的强度可以清晰地看到整个触头的形状, 经数据检验部分亮度值已达到摄像机的饱和值(实验时未加衰减片, 光圈已调到最小)。其演化过程与 7 kA 电流电弧演变类似, 高亮弧柱维持在分离后引燃处较长时间, 同时该处形成了阳极亮斑, 4.0 ms 时依旧清晰可见。2.5~3.0 ms 等离子区向触头间隙外空间有明显的喷溅过程。电弧电压在燃弧后期同样存在振幅高达 60 V 左右的噪声分量。

由以上观测的电弧形态及电弧电压波形可以看出, 真空灭弧室触头带电分离电弧引燃后, 初始时均集中在一定的区域——触头最后分离的地方。因分断电流大小不同, 亮度不同, 电流越大则亮度越高。随着燃弧时间的增强, 开距的增加, 电弧逐渐向外扩散。文献[14]中将这一阶段的电弧称作桥柱型电弧, 并对其持续时间与分断电流幅值的关系进行了描述。通过数据比对, 本文实验观察得到的数据与文献中的数据基本一致。本文中的 1~8 kA 直流电流系列实验中电弧最终都能扩散到整个触头表面。其中电流在 5 kA 时, 燃弧时间大于 2 ms, 相应的开距大于 5 mm 后, 阳极开始出现亮斑, 但位置并不固定, 持续时间较短; 电流大于 7 kA 后, 触头引燃处电弧持续燃烧整个过程, 阳极触头相应部位形成了不同程度的阳极斑点。

实验后触头照片如图 7 所示, 可见阴、阳极对应的左侧边缘区域有一直径约 10 mm 左右烧蚀形成的熔斑; 阴极其他区域烧蚀较轻, 典型的阴极斑点痕迹; 阳极一侧边缘烧蚀较为严重, 侧面有明显的熔融金属向外喷出的迹象。

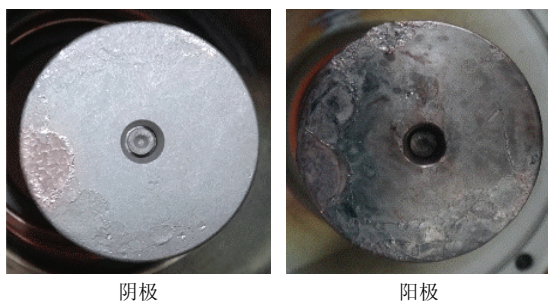


图 7 触头照片

Fig. 7 Photo of contacts

将 8 kA 电流电弧熄灭后, 拍摄得到的第一张间隙状态的典型图片进行均衡化处理, 发现电流过零后阳极亮斑有很明显的残余效应, 而这是开断所不期望的, 如图 8 所示。



图 8 阳极斑点的影响

Fig. 8 Effect of anode spot

## 2.2 不同幅值电流电弧电压比较

为研究电弧电压与电流幅值、燃弧时间的规律, 将不同幅值电流的电弧电压进行对比分析。将上述各图中的电弧电压波形以图 9 所示形式给出。

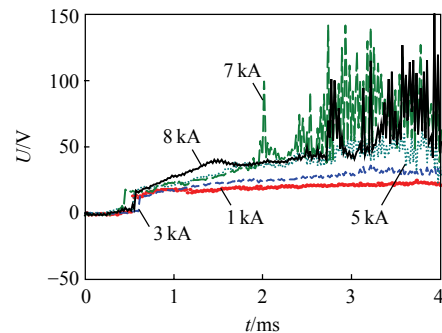


图 9 不同电流下电弧电压波形

Fig. 9 Waveforms of arc voltage under different currents

对比图 9 中各电弧电压曲线可见, 从斥力机构的触发信号到电弧电压建立的延时时间在 0.5 ms 左右, 有一定的分散性。这一段时间包含了机构的固有机件延迟和电弧形成过程。触头分离时金属桥的熔化、蒸发、断裂是电弧形成的必要前提。触头闭合时接触情况的不同, 是该时间差异的来源。

从电流幅值角度分析, 电弧电压随着电流的增加平均值逐渐增大, 这符合真空电弧电压正特性的特点。同时可以发现电弧电压对电流增长的斜率也随电流幅值逐渐变大。这是由于特定的触头尺寸、间隙条件下, 电流密度随电弧电流增大, 弧柱蒸汽密度上升, 造成弧柱内压力增加, 等离子体中粒子的碰撞更加频繁, 等离子体电阻率变大, 弧柱压降不断提升的缘故。对于实验所采用的 45 mm 触头, 弧柱压降大幅增加的临界值在 3~5 kA 之间。

从燃弧过程的角度看, 当燃弧时间小于 1.5 ms (起弧后), 对应触头间隙小于 4 mm, 各幅值电流电弧电压虽然随开距增加而不断增大, 电弧电压的高频分量振幅很小, 电压噪声较低; 当时间大于 1.5 ms 后, 电流小于 5 kA 时, 电弧电压逐渐增大到不超过 40 V, 存在的高频分量幅度很小, 不超过 5 V, 为典型的扩散型电弧电压, 摄像得到的电弧形态呈扩散型。电流大于(包含)5 kA 时, 电压开始变的不稳

定, 出现了较大的噪声尖峰, 其中 7~8 kA 电弧电压平均值上升到 60~80 V, 振幅较大, 接近 60 V。

从拍摄的电弧图像来看, 电弧电压噪声阶段电弧形态多以阴极斑点群的形式存在, 或伴随阳极表面出现明显的发光区域等现象, 即阳极亮斑。文献[14]对桥柱型电弧持续存在的时间统计为 1.5 ms, 本文实验中的电弧电压噪声大小的分界时刻也在 1.5 ms 左右。分析原因在于: 1.5 ms 前, 电弧多为桥柱型, 电弧压力较大, 电弧电压相对稳定、噪声较小。文献[17]的研究表明, 如果阳极射流能够到达阴极或与阴极射流接触, 则电弧电压噪声相对较小, 这一结论与上述试验现象是相同的。燃弧 1.5 ms 后, 触头间隙超过 4 mm, 电弧也已经从桥柱型电弧扩散开来, 电弧扩散到电极边缘, 甚至大量斑点运动到电极侧面并逐渐消失。这样的结果是极间等离子体大量地向间隙外扩散, 等离子体损耗增加, 电弧电压随电弧形态的这些变化产生振荡, 成为电弧形态变化的表征。

文献[18-19]中提到电弧电压的不稳定来源于阳极鞘层上压降的变化, 而阳极鞘层的不稳定现象却是点熔斑点形成的机理。阳极鞘层压降的高低与阳极表面电流密度和电子饱和电流密度有关。当阳极表面电流密度足够大到因热运动碰撞阳极的电子全部吸收仍不能满足时, 鞘层中将出现电子不足的现象, 鞘层电压降将增高, 以便吸收更多的电子进入阳极。这种情况下, 整个电弧电压上升。阳极鞘层电压在阳极表面形成很强的电场, 电子在电场作用下加速轰击阳极表面。阳极上凸起的毛刺、锋锐的边缘和附着不牢的粒子因导热性差而不能是热能尽快地散失, 很容易升温气化。这些局部点气化后产生的金属蒸气在阳极区受到高能电子的轰击而电离, 可以改变电子密度, 使鞘层电压有所降低。这个过程反复循环, 使二次电子发射点不断地在新位置出现和局部气化, 从外观上看形成快速运动的点状斑点。实验中 5 kA 的电弧形态验证了上述分析。电流增加到 7 kA, 电流密度进一步增加, 且电弧引燃处持续燃弧被加热, 可以想象电极表面温度上升到足够高, 将发生熔化和蒸发, 蒸发的粒子对弧柱产生强烈的作用, 逐渐发展成阳极斑点。对应实验触头尺寸, 7 kA 电流的电弧形态反映了这一变化。

### 2.3 实验结果对直流负荷开关设计的启发

根据上述实验结果及分析, 可知直流负荷开关

设计时, 必须考虑如下几个方面:

1) 换流电流的投入时刻必须在电弧从桥柱型电弧扩散后;

2) 分断电流小于 5 kA 时, 燃弧过程中不会出现恶劣的阳极现象, 可以参照扩散型电弧分断能力进行参数设计, 预期分断能力较高;

3) 分断电流大于 5 kA 时, 燃弧过程中会形成阳极斑点, 将对分断产生一定的影响。

课题组后续将针对不同电弧形态对直流分断能力的影响进行研究。

## 3 结论

本文针对平板触头分离过程中近似恒定直流电弧形态及电弧电压特性进行了系列实验, 得到了以下结论:

1) 电流小于 5 kA 时, 电弧形成后迅速扩散, 整个燃弧近 4 ms 时间, 8 mm 开距电弧呈现扩散状态, 未出现稳定的阳极现象, 电弧电压平均值不超过 60 V, 噪声分量不超过 15 V;

2) 电流大于 5 kA 时, 电弧也从引燃处向外扩散, 但引燃处会持续燃弧, 并发展成阳极斑点, 电弧电压平均值约 80 V, 噪声分离也高达数十 V;

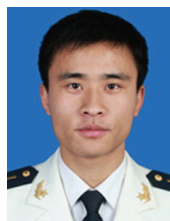
3) 电流大于 5 kA 时, 燃弧 1.5 ms 左右为一分界时刻, 1.5 ms 前, 电弧处于桥柱型电弧阶段, 电弧电压噪声较小; 1.5 ms 后, 电弧形态开始发生明显的变化, 电弧电压有较高振幅的噪声分量。

4) 混合型直流真空负荷开关设计时, 换流电流投入时延应大于桥柱形电弧的持续时间, 一般应超过 1.5 ms。

## 参考文献

- [1] 陈亚昕, 李亚旭. 舰船综合电力系统发展研究[J]. 船电技术, 2012, 32(1): 60-64.  
Chen Yaxin, Li Yaxu. Study on development of marine integrated power system[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2012, 32(1): 60-64(in Chinese).
- [2] Kraus R, Trivette M. Direct current(DC)power systems for applications requiring best in class energy efficiency and total cost of ownership[R]. Plainville: Validus DC systems & GE, 2009.
- [3] Liu B, Wu J, Zhu L, et al. Vacuum arc characters research on DC forcing interruption[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology. Xi'an: ICEPE-ST, 2011: 82-85.
- [4] 庄劲武, 张晓锋, 杨锋, 等. 船舶直流电网短路限流装

- 置的设计与分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 26-30.
- Zhuang Jinwu, Zhang Xiaofeng, Yang Feng, et al. Analysis and design of fault current limiter for ship DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 26-30(in Chinese).
- [5] 荣命哲, 杨飞, 吴翊, 等. 综述: 直流断路器电弧研究的新进展[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 35-43.
- Rong Mingzhe, Yang Fei, Wu Yi, et al. Review: new developments in switching arc research in DC circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 35-43(in Chinese).
- [6] Anderson J, Carroll J. Applicability of a vacuum interrupter as the basic switch element in HVDC breakers[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, 97(5): 1893-1900.
- [7] Premerlani W. Force commutation performance of vacuum switches for HVDC breaker application[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(8): 2721-2727.
- [8] 董恩源, 丛吉远, 邹积岩, 等. 1500 V 船用新型直流断路器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 153-156.
- Dong Enyuan, Cong Jiyuan, Zou Jiyuan, et al. Study of 1500 V new type DC circuit breaker used in ship[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 153-156(in Chinese).
- [9] Alferov D, Budovsky A, Evsin D, et al. DC vacuum circuit-breaker[C]//Proceedings of the 23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Bucharest: IEEE-DEIS, 2008: 173-176.
- [10] Niwa Y, Yokokura K, Matsuzaki J. Fundamental investigation and application of high speed VCB for DC power system of railway[C]//Proceedings of the 24th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Braunschweig: IEEE-DEIS, 2010: 125-128.
- [11] 江壮贤, 庄劲武, 王晨, 等. 新型强迫换流型限流断路器真空介质强度的恢复特性[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 152-158.
- Jiang Zhuangxian, Zhuang Jinwu, Wang Chen, et al. Vacuum dielectric recovery characteristics of a novel current limiting circuit breaker base on artificial current zero[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 152-158(in Chinese).
- [12] Slade P. The vacuum interrupter theory, design, and application[M]. New York: CRC Press, 2008: 202-205.
- [13] Schulman M, Slade P. Sequential modes of drawn vacuum arc between butt contacts for currents in the range 1 kA to 16 kA[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 1995, 18(2): 417-422.
- [14] Schulman M, Slade P, Heberlein J. Effect of an axial magnetic field upon the development of the vacuum arc between opening electric contacts[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1993, 16(2): 180-189.
- [15] Song X, Shi Z, Liu Ch, et al. Experimental investigation on the characteristics of vacuum arc in the process of DC interruption based on artificial current zero[C]//Proceedings of the 24th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Braunschweig: IEEE-DEIS, 2010: 293-296.
- [16] 江壮贤, 庄劲武, 王晨, 等. 基于电磁斥力原理的高速触头机构仿真分析与设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 172-177.
- Jiang Zhuangxian, Zhuang Jinwu, Wang Chen, et al. Simulation analysis and design of a high speed contact mechanism based on electro-magnetic repulsion mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(8): 172-177(in Chinese).
- [17] 史宗谦, 贾申利, 王立军, 等. 真空电弧电压与电弧形态关系的实验研究[J]. 高压电器, 2004, 4(40): 250-252.
- Shi Zongqian, Jia Shenli, Wang Lijun, et al. Experimental investigation of relation between vacuum arc voltage and arc appearance[J]. High voltage apparatus, 2004, 4(40): 250-252(in Chinese).
- [18] Miller H. Anode phenomena in vacuum arcs[J]. Proceedings of the 10th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Columbia, 1982.
- [19] 王季梅. 论大电流真空电弧收缩现象和阳极斑点形成的理论分析[J]. 华通技术, 2002, 1: 13-18.
- Wang Jimei. Study on shrinking phenomena in high current vacuum arc and theoretical analysis of anode spot formation[J]. Huatong Technology, 2002, 1: 13-18(in Chinese).



刘路辉

收稿日期: 2013-09-12。

作者简介:

刘路辉(1986), 男, 博士生, 主要从事真空电弧理论与混合型直流断路器关键技术的研究工作, liuluhui86@gmail.com;

庄劲武(1967), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为舰船电力系统自动化与安全运行, 13871161550@139.com。

(编辑 胡琳琳)