

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.04.001

双碳背景下先进电工材料研究及应用

CuCr55 电极触头真空电弧燃弧与烧蚀特性

薄祥来¹, 刘思远¹, 谢洪涛², 王小军³, 冯卫刚², 李鹏³, 刘志远¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049; 2. 陕西宝光真空电器股份有限公司, 陕西 宝鸡 721006;

3. 陕西斯瑞新材料股份有限公司, 西安 710000)

摘要: 铜铬合金材料作为电接触领域最重要的触头材料之一,在真空灭弧室中得到了广泛的应用。采用电弧熔炼方法制备了 CuCr55 触头材料,对比了熔铸 CuCr25、熔渗 CuCr50 和电弧熔炼 CuCr55 材料的微观结构,并着重分析了电弧熔炼 CuCr55 触头的真空电弧燃弧与烧蚀特性。利用高速摄影机拍摄短路电流燃弧特性,得到了产生阳极斑点的临界电流。利用电子显微镜观察烧蚀过后的触头表面微观形貌,触头表面未出现材料断裂、细微裂痕或显著隆起。研究表明,电弧熔炼 CuCr55 触头具有铬颗粒细小均匀、显微组织球化弥散分布的微观结构,以及良好的均匀烧蚀特性。

关键词: 真空灭弧室; 触头材料; 真空电弧; 材料烧蚀

Vacuum Arc Ignition and Ablation Characteristics of CuCr55 Electrode Contacts

BO Xianglai¹, LIU Siyuan¹, XIE Hongtao², WANG Xiaojun³, FENG Weigang²,

LI Peng³, LIU Zhiyuan¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Shaanxi Baoguang Vacuum Electric Device Co., Ltd., Shaanxi Baoji 721006, China; 3. Shaanxi Sirui Advanced Materials Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: Copper-chromium alloy materials, as one of the most important contact materials in the field of electrical contacts, have been widely used in vacuum interrupter. CuCr55 contact materials are prepared by arc melting method and the micro-structures of fusion casting CuCr25, fusion infiltration CuCr50 and arc melting CuCr55 materials are compared and the vacuum arc ignition and ablation characteristics of arc melting CuCr55 contacts are particularly analyzed. A high-speed camera is used to photograph the arcing characteristic of short circuit current and the critical current for generating anode spots is obtained. The electron microscope is used to observe the micro-morphology of the contact surface after ablation, the material fracture, fine cracks or significant bulging are not happened on the contact surface. The research results show that the arc melting CuCr55 contacts have a micro structure with fine and uniform chromium particles, diffuse distribution of micro structure spheroidization, and good uniform ablation characteristics.

Key words: vacuum interrupter; contact material; vacuum arc; material ablation

0 引言

在“双碳”目标下,发展环境友好型真空断路器以替代 SF₆ 断路器已成为国内外高压开关领域的研究热点。真空断路器具有开断能力强、弧后介质恢

复迅速、寿命期内免维护以及环境友好等优势^[1-5],真空灭弧室作为真空断路器的核心部件,用真空作为电力开关的绝缘和熄弧介质,实现电力系统电流的关合、开断或通流^[6-7]。真空灭弧室的开断能力与触头材料的加工工艺和物理特性密切相关。触头

收稿日期:2024-01-04; 修回日期:2024-03-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB2403702);国家自然科学基金联合基金项目(U22B20121)。

Project Supported by National Key Research and Development Program(2022YFB2403702), the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China(U22B20121).

材料的加工工艺关系到真空灭弧室电极触头的机械寿命和电寿命,决定电力开关设备能否长期稳定可靠运行^[8]。使用单一金属制作的电极触头难以兼顾材料硬度、电导率、抗熔焊性能和短路电流开断能力,综合性能不佳,因此需要两种或多种金属制作的合金来满足真空灭弧室电极触头的要求^[9-10]。

为增强触头的抗熔焊性能或机械强度,并降低截流水平,学者们对于诸如铜—铋(Cu—Bi)、铜—钨(Cu—W)和铜—铬(Cu—Cr)等铜基合金进行了大量的研究^[11-13]。铜—铋(Cu—Bi)合金可以实现非常低的截流水平,但铋元素导致触头机械强度下降严重^[14]。铜—钨(Cu—W)合金截流水平低、抗熔焊和烧蚀性能优良^[15],但缺点是没有大电流开断的能力^[16-17]。铜—铬(Cu—Cr)合金制造的触头因为具有优良的综合性能,目前在大电流真空灭弧室中得到了广泛的应用。余砾^[18-19]通过向CuCr25中加入0.1%~0.4%的Te元素降低CuCr25触头材料的拉伸强度来改善其冲击熔焊特性,并且研究了纳晶CuCr25触头材料的大电流真空电弧现象。修士新^[20]通过研究Cu—Cr触头材料的含气量、显微结构、致密度等因素,分析了Cu—Cr触头材料的微观特性对于宏观性能的影响。对于开断能力最佳的Cr含量,张在秦^[21]认为当Cu—Cr触头的Cr含量大于50%时,继续提高Cr含量会降低开断能力,Li Wangpei^[22]认为最佳的Cr含量与触头加工工艺、微观结构等因素密切相关。对于Cu—Cr合金中Cr元素含量对于材料性能的影响,研究认为,随着Cr元素含量的提高,触头硬度和耐电磨损能力会得到显著提升^[23-24]。对于Cr颗粒分布情况对于触头材料电弧侵蚀特性的影响,学者分别对粗晶和细晶CuCr50触头材料的电弧运动行为及其烧蚀特性进行研究,认为Cr颗粒的细化及均匀分布有利于分散电弧,且烧蚀更为均匀^[25-26]。对于不同Cr含量的Cu—Cr触头在真空开关特殊开合工况下的性能,学者研究了电弧熔炼CuCr40和熔渗CuCr50触头在40.5 kV真空灭弧室容性关合下的预击穿特性^[27],证明触头材料和制备工艺对容性关合操作中预击穿间隙的分布有显著影响。

铜铬合金的制备工艺直接决定了触头机械强度、Cr颗粒的直径、Cu与Cr单质分散的致密性与均匀性,因此对于触头的性能起着至关重要的作用。由于铜与铬单质即便是液态条件下也不能相溶,因此不能采用传统的冶炼技术。触头材料的冶炼技术目前普遍采用的方法是混粉烧结法、熔铸法、熔渗法和电弧熔炼法^[28]。混粉烧结法是将一定比例的Cu粉和Cr粉在保护气体下充分混合压制后烧结的

技术,由于靠压力与摩擦相结合,致密化和韧性要求难以满足,目前几乎不在电极触头的生产中使用^[29]。熔铸法是先将Cu熔化后,在Cu溶液中加入Cr粉末并混合均匀,根据所需形状在真空环境中铸造,冷却成型,这一方法可以制得Cr质量分数为30%~70%的Cu—Cr合金^[30]。熔渗法是将液态的Cu溶液注入事先烧结好的多孔Cr骨架中,由于Cr易氧化,本过程需要在真空环境中完成,这一方法制得的Cu—Cr合金,一般Cr的质量分数难以超过50%^[31]。电弧熔炼法是在真空或惰性气体的保护下,于自耗电炉内进行的,电极是Cu—Cr混合粉末经200 MPa等静压在950 ℃真空下烧结而成。此电极在电弧的高温作用下熔化成液态,并在铜模中凝固成为铸锭。这一方法可以获得质地均匀的合金晶粒,在力学和电学性能上较前3种方法制得的触头都有较大的提升^[32]。

为实现更高电压水平和更大开断容量的SF₆断路器替代,现有铜铬合金触头材料难以满足高电压等级252 kV单断口真空灭弧室对铜铬触头材料高耐压、高绝缘和耐烧蚀的综合电性能要求,亟需对Cr质量分数高于50%的新型Cu—Cr合金触头的性能开展研究。CuCr25与CuCr50材料是目前在真空灭弧室中广泛应用的触头材料。为获得更好的触头综合性能,在不同Cr质量分数的范围内,Cu—Cr合金触头往往采用不同的制备工艺。因此文中选择了熔铸CuCr25、熔渗CuCr50触头材料的微观结构与电弧熔炼CuCr55新型触头材料进行对比,并着重分析了电弧熔炼CuCr55触头的真空电弧燃弧与烧蚀特性。

1 实验设置

为探究CuCr55触头在真空电弧作用下的燃弧特性与烧蚀特性,搭建了产生交流短路电流的试验回路,并结合相关仪器进行电弧图像与电压、电流数据的记录。实验在带有观察窗的可拆卸真空腔体中进行,以便实验过程中电弧图像的拍摄。实验使用可拆卸的电极触头,方便实验后取下,进行微观组织结构的观察。

1.1 实验试品

实验使用的触头片是直径58 mm、厚度3.5 mm的6开槽触头片,材料为CuCr55,采用电弧熔炼技术铸造而成,尺寸参数见图1(a)。将触头片焊接到6杯指触头杯座上,即可构成一个杯状纵磁触头。单个电极的整体高度为90 mm,配合可拆卸真空灭弧室腔体,将动、静电极导电杆与腔体内动、静端导电杆

通过导电夹进行固定,并将动静电极的开距设置为20 mm。电极的外观模型见图1(b),导电杆与触头杯座的材料均为无氧铜。

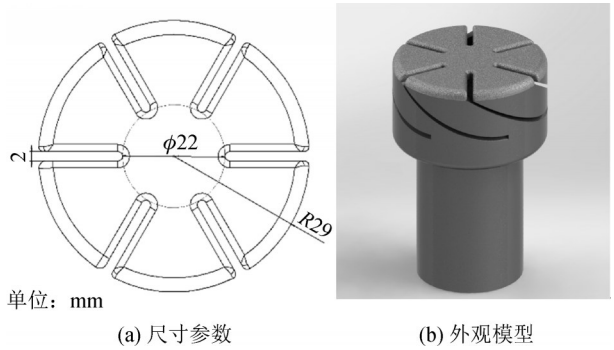


图1 实验用触头片的尺寸与电极外观

Fig. 1 Dimensions of experimental contact and electrode appearance

1.2 实验回路及设备

实验在LC振荡回路进行,见图2。通过电容器组 C_1 与电抗器 L_1 串联,产生接近工频的实验电流。在实验开始前,主合闸开关MS断开,试品触头在真空腔体内保持合闸状态,待腔体真空度稳定且满足实验要求后开始实验。待电容器组 C_1 充电完毕后,主合闸开关MS闭合,试品触头在永磁操动机构的控制下完成分闸,在此过程中动静触头间产生真空电弧。试验回路的相关参数见表1。

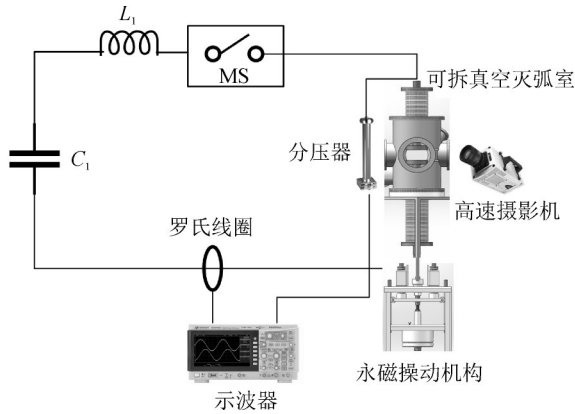


图2 实验回路示意图

Fig. 2 Experimental circuit diagram

表1 实验回路参数

Table 1 Parameters of the experimental circuit

参数名称	数值
$C_1/\mu\text{F}$	55 760
$L_1/\mu\text{H}$	187.5
频率/Hz	49.2
腔体真空度/Pa	7×10^{-4}

在实验中,罗氏线圈用于测量电弧电流,分压器用于测量电弧电压,示波器DS1074Z用于记录电流与电压的波形。高速摄影仪PhantomV611用于对

燃弧过程进行拍摄,拍摄速率为30 000 帧/s,曝光时间为 $1\ \mu\text{s}$,光圈值为2.8,整个实验中保持不变。

2 CuCr55触头的燃弧特性分析

真空电弧的燃弧现象对于真空开关开断短路电流至关重要,同时导致触头表面的电弧烧蚀,影响触头的性能。阳极斑点出现的区域往往是电弧烧蚀最为严重的区域,因此阳极斑点临界电流一定程度上反映了触头材料的耐烧蚀能力。对CuCr55触头进行燃弧特性分析,目的是探究随着短路电流水平的提高,触头材料的阳极斑点临界电流,并观察燃弧过程的变化。

2.1 燃弧时间与阳极斑点临界电流

在实验中,电流有效值自10 kA开始,逐渐增加到20 kA。每次燃弧实验后,利用红外测温枪检测到试品触头表面温度恢复到接近室温后,再进行下一次实验。共计进行了16组实验,由于分闸相位具有一定的分散性,在首个电流半波,即自触头分离到电流首个过零点熄弧的燃弧时间在6.1 ms至9.2 ms之间。根据实验结果,当电流有效值小于等于14 kA时,电弧在电流的首个过零点即可成功熄灭;当电流有效值为15 kA时,随着实验次数的增加,在燃弧期间阳极表面陆续出现阳极斑点现象;当电流有效值超过15 kA时,在燃弧期间阳极表面均出现了阳极斑点现象。各组实验的详细数据记录见表2。

表2 不同实验电流下的燃弧时间和阳极斑点现象

Table 2 Arc ignition time and anode spotting phenomena at different experimental currents

序号	电流有效值/kA	首个半波 燃弧时间/ms	阳极斑点 现象
1	10	8.7	无
2	10	8.7	无
3	10	7.8	无
4	13	8.4	无
5	14	7.2	无
6	14	8.2	无
7	14	8.0	无
8	15	8.6	无
9	15	7.2	无
10	15	8.6	无
11	15	7.8	有
12	15	7.2	有
13	17	6.1	有
14	17	8.4	有
15	17	8.5	有
16	20	9.2	有

在相同的实验条件下,对相同规格的 CuCr25 触头和 CuCr50 触头的阳极斑点临界电流进行了研究,实验结果见表3,CuCr25 触头的阳极斑点临界电流有效值为 10 kA,CuCr50 触头的阳极斑点临界电流有效值为 12 kA。实验结果表明,在本实验的条件下,CuCr55 触头的阳极斑点临界电流高于另外两种材料,具备优良的耐烧蚀能力。

2.2 燃弧特性

2.2.1 电弧电流有效值 10 kA

电弧电流有效值为 10 kA 的情况下,高速摄影机拍摄的电弧运动图像与电弧电压、电流的对应关系见图3。

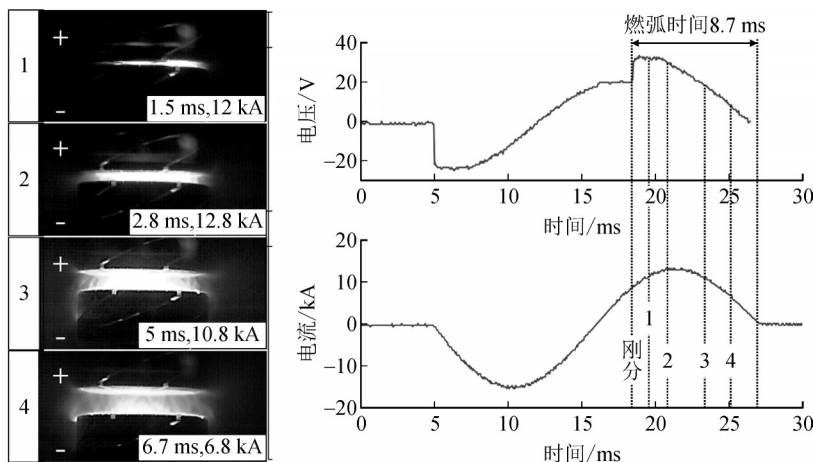


图3 电弧电流 10 kA 有效值情况下电弧运动的演变

Fig. 3 Evolution of arc motion for arc current of 10 kA(rms)

电弧图像中 1.5 ms 与 2.8 ms 对应强电弧模式,由于此时触头刚刚分开,开距较小,因此弧柱区域亮度较高。在 2.8 ms 之后,电弧逐渐向扩散态转变,并维持该状态直至电弧熄灭。5 ms 与 6.7 ms 时刻的电弧均为扩散态,触头间隙的等离子体射流呈均匀扩散分布,可

表3 不同材料触头的阳极斑点临界电流

Table 3 Anode spot critical current for contacts of different materials

材料名称	阳极斑点临界电流有效值/kA
CuCr25	10
CuCr50	12
CuCr55	15

系见图3。自触头刚分时刻起计算,燃弧时间为 8.7 ms,在电流过零后电弧成功熄灭。在整个燃弧过程中,电弧电压不超过 40 V 且电压波形相对平滑,电弧电流为回路电流。

以看到由阴极斑点产生的若干等离子体射流。

2.2.2 电弧电流有效值 13 kA

电弧电流有效值为 13 kA 的情况下,高速摄影机拍摄的电弧运动图像与电弧电压、电流的对应关系见图4。

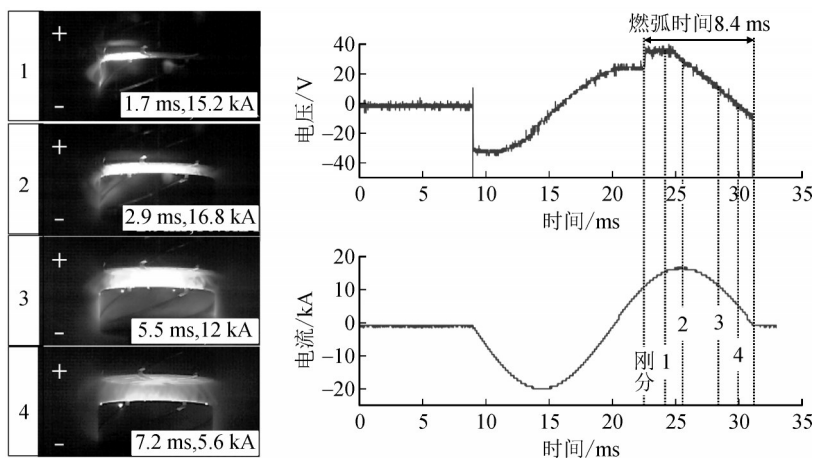


图4 电弧电流 13 kA 有效值情况下电弧运动的演变

Fig. 4 Evolution of arc motion for arc current of 13 kA(rms)

自触头刚分时刻起计算,燃弧时间为 8.4 ms,在电流过零后电弧成功熄灭。在整个燃弧过程中,电弧

电压不超过 40 V 且电压波形相对平滑,噪声分量相较于 10 kA 的情况有所上升,电弧电流为回路电流。

电弧图像中 1.7 ms 与 2.9 ms 对应强电弧模式, 触头刚分时, 电弧在触头左侧起弧, 随着开距增加, 电弧等离子体逐渐充满间隙。在 2.9 ms 之后, 电弧逐渐向扩散态转变, 维持该状态直至电弧熄灭。5.5 ms 与 7.2 ms 时刻的电弧均为扩散态, 触头间隙的等离子体射流呈均匀扩散分布, 分布规律与 10 kA 情况类似, 但电弧亮度更高, 且可见触头边缘的部分阴极斑点。

2.2.3 电弧电流有效值 17 kA

电弧电流有效值为 17 kA 的情况下, 高速摄影机拍摄的电弧运动图像与电弧电压、电流的对应关系见图 5。自触头刚分时刻起计算, 首个电流半波的燃弧时间为 8.5 ms, 在电流过零后电弧未能熄灭,

当电流极性反转后电弧重燃。在触头刚分后的首个电流半波燃弧过程中, 电弧电压不超过 50 V 且电压波形相对平滑, 但是在电流过零后, 电弧电压出现很大的跃变, 最高可达 150 V, 且噪声分量较大。

电弧图像中 2.46 ms 与 7.7 ms 对应的首个电流半波, 电弧呈现由刚分时刻的强电弧模式向扩散态电弧模式过渡的发展趋势, 与 10 kA 和 13 kA 的情况相同。但在重燃后, 电弧状态较不稳定, 以位于电流峰值附近的 17.3 ms 时刻为例, 出现了形态扭曲的电弧, 在阳极区域形成的较为集中的亮斑为阳极斑点。随着电流的下降, 电弧形态趋于稳定, 如 19 ms 所示, 呈现均匀的扩散态电弧, 且阴极斑点均匀分布, 清晰可见。

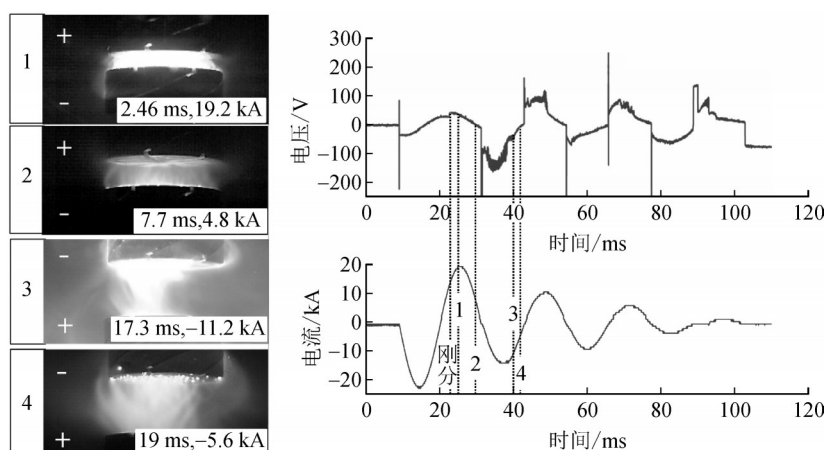


图 5 电弧电流 17 kA 有效值情况下电弧运动的演变

Fig. 5 Evolution of arc motion for arc current of 17 kA(rms)

2.2.4 电弧电流有效值 20 kA

电弧电流有效值为 20 kA 的情况下, 高速摄影

机拍摄的电弧运动图像与电弧电压、电流的对应关系见图 6。

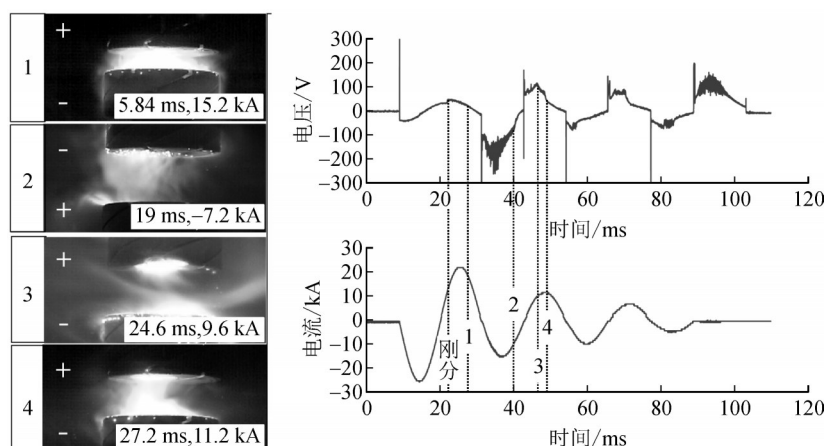


图 6 电弧电流 20 kA 有效值情况下电弧运动的演变

Fig. 6 Evolution of arc motion for arc current of 20 kA(rms)

自触头刚分时刻起计算, 首个电流半波的燃弧时间为 9.2 ms, 在电流过零后电弧未能熄灭, 当电流极性反转后电弧重燃, 整个燃弧过程持续 81.3 ms。

在触头刚分后的首个电流半波燃弧过程中, 电弧电压不超过 50 V 且电压波形相对平滑。在电流过零后发生电弧重燃的阶段, 与 17 kA 情况类似, 电弧电

压跃变,最高可达 250 V,且噪声分量相较于 17 kA 的情况更大。

电弧图像中 5.84 ms 对应的首个电流半波,电弧呈现由刚分时刻的强电弧模式向扩散态电弧模式过渡的发展趋势。在重燃后,以 19 ms 时刻为例,电弧呈现不均匀的扩散态,阴极斑点仅分布于触头表面的部分区域。而在燃弧的第 3 个电流半波中,24.6 ms 与 27.2 ms 对应的电弧图像在阳极区域均出现了呈块状的明亮的阳极斑点。

3 CuCr55 触头烧蚀后的微观形貌分析

CuCr55 作为一种新型触头材料,一方面需要对比与以往触头材料微观形貌的差异性,另一方面需要对比在电弧烧蚀前后触头微观形貌的变化,可以获得 Cu 基体与 Cr 颗粒在真空电弧烧蚀作用下的微观结构演变趋势,并分析得出微观形貌对于触头性能的影响。

3.1 不同 Cu-Cr 合金的微观形貌对比

使用 VE-9800S 型号的电子显微镜分别观察了熔铸 CuCr25、熔渗 CuCr50、电弧熔炼 CuCr55 材料的

原始微观形貌作对比。3 种材料在电子显微镜下的图像见图 7。

图 7 中深色区域为 Cr 颗粒富集区域,浅色区域为 Cu 富集区域。对于图 7(a)所示的熔铸 CuCr25 材料,由于是在 Cu 溶液中均匀加入 Cr 粉末凝固制成,因此 Cu 基体均匀填充在 Cr 颗粒的间隙当中,在 200 倍放大观察下,Cr 颗粒的直径在 25 μm 左右,且边缘清晰。对于图 7(b)所示的熔渗 CuCr50 材料,Cr 骨架是事先烧结好的,且 Cr 颗粒的直径并不均匀,从 50 μm 到 150 μm 不等,Cu 基体均匀地填充在 Cr 骨架的间隙当中。图 7(c)所示的电弧熔炼 CuCr55 材料是 Cu-Cr 混合粉末在电弧高温下熔化又凝固后铸造而成的,因此不同于前两种材料使用的液态 Cu 基体与固态 Cr 颗粒混合的铸造工艺。在电子显微镜的图像下可见,CuCr55 材料晶粒分布更为均匀,整体细小、呈弥散球状分布,Cr 没有出现前两种材料中颗粒直径不一、边界分明的微观样貌,而是均匀弥散分布于 Cu 基体当中。由此可见,电弧熔炼技术对于合金中 Cu 与 Cr 晶粒的均匀分布能够起到较好的改良作用。

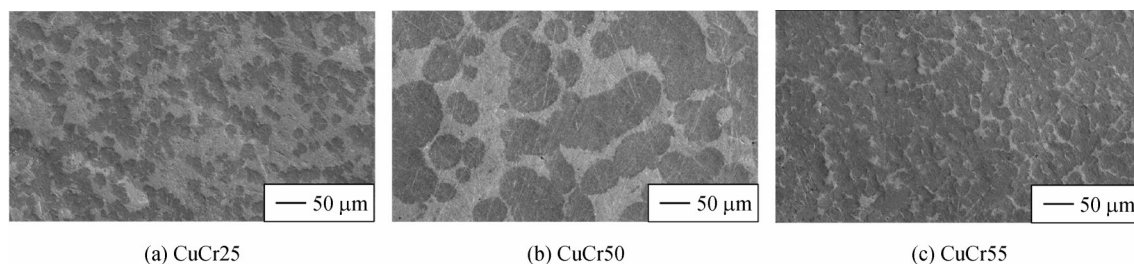


图 7 3 种 Cu-Cr 合金在电子显微镜下的微观形貌对比

Fig. 7 The microstructure comparison of three kinds of Cu-Cr alloys under electron microscope

3.2 CuCr55 触头在真空电弧烧蚀后的微观形貌

在实验完成后,取下动静电极触头,可以看到明显的电弧烧蚀痕迹,见图 8。对于传统 Cu-Cr 合金触头而言,真空电弧的烧蚀往往会在触头表面形成不规则凸起和不均匀的水波纹状液态金属凝固痕迹。列举了一对 CuCr25 触头在进行 10 次电弧烧蚀后的样貌见图 9^[33],经对比可以得出,CuCr55 触头在实验后外观的劣化趋势不明显,耐烧蚀性能良好。CuCr55 动静触头未出现较大的熔坑、凸起或开裂,真空电弧的烧蚀区域较为均匀,触头表面未出现局部区域的严重劣化。对于静触头,表面出现了树枝状放电痕迹,集中分布在图 8(a)中所标示的 J₁ 与 J₂ 区域;对于动触头,表面出现了树枝状放电痕迹 D₂ 以及触头材料熔化又凝固后形成的斑状微凸起 D₁。电子显微镜的观察区域将着重选取 J₁、J₂、D₁、D₂ 4 个区域。

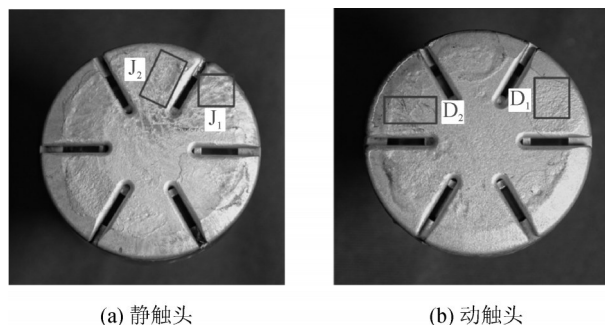


图 8 CuCr55 触头电弧烧蚀实验后的触头样貌

Fig. 8 Contact appearance of CuCr55 contact after arc ablation test

在对静触头进行观察的过程中,拍摄了具有代表性的触头电弧烧蚀微观样貌见图 10。相较烧蚀前,Cu 与 Cr 的分布变得不均匀,且出现了诸多直径 50 μm 到 75 μm 之间的烧蚀坑,图 10(b)为图 10(a)中一个典型烧蚀坑的局部放大图。烧蚀坑主体为 Cu

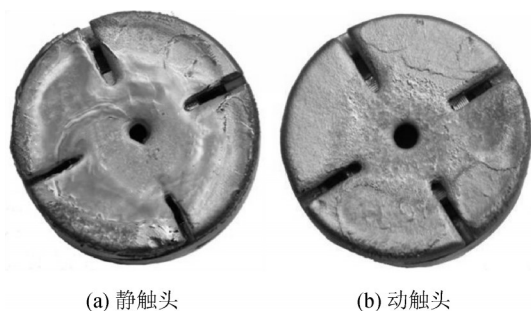
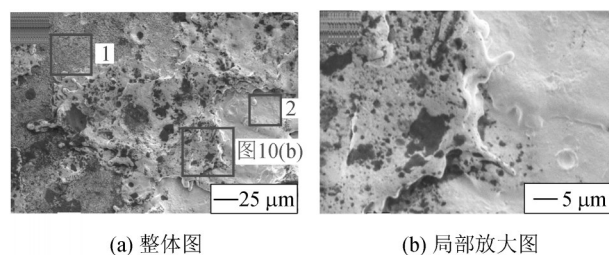


图9 一对 CuCr25 触头电弧烧蚀实验后的触头样貌

Fig. 9 Contact appearance of a pair of CuCr25 contacts after arc ablation test

基体熔化后又凝固形成的液滴状痕迹,表明该区域的电弧烧蚀相对剧烈,在触头熔化区域的熔池当中产生了液滴喷溅。在烧蚀坑内部,零散分布着直径大小不一的 Cr 颗粒,从 $1\ \mu\text{m}$ 到 $25\ \mu\text{m}$ 不等,形状不规则,大直径 Cr 颗粒呈团聚分布,小直径 Cr 颗粒呈分散分布。在烧蚀坑边缘及外部,出现了两种微观样貌:一种情况为无烧蚀坑的粗糙表面,在图 10(a)中表示为区域 1;另一种情况为被 Cu 基体熔化后完全包覆的表面,无法观察到 Cr 颗粒,在图 10(a)中表示为区域 2。



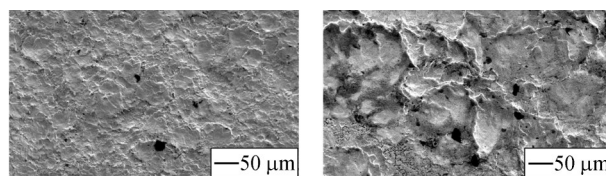
(a) 整体图 (b) 局部放大图

图10 静触头在电弧烧蚀后的微观样貌

Fig. 10 Microstructure of static contacts after arc erosion

在对动触头进行观察的过程中,由于选择的两个观察区的宏观样貌具有显著差异,因此微观样貌也分别取样观察并分析。首先观察动触头区域一(即 D_1 区)电弧烧蚀微观样貌,见图 11(a)。这一区域烧蚀坑紧密叠加,分布均匀,几乎布满整个观察区域,但是 Cr 颗粒几乎不可见,电子显微镜视野范围内仅可观察到部分零星分布的 Cr 颗粒,直径小于 $20\ \mu\text{m}$ 。动触头区域二(即 D_2 区)电弧烧蚀微观样貌与静触头类似,见图 11(b)。烧蚀坑簇状分布,直径 $25\ \mu\text{m}$ 到 $75\ \mu\text{m}$ 不等,在烧蚀坑内部分布有大小不一的 Cr 颗粒,最大直径可达到 $25\ \mu\text{m}$,烧蚀坑外 Cr 颗粒的分布不明显,且表面粗糙。

由上述选取的电弧烧蚀后触头区域的微观样貌可以得知,触头表面整体粗糙度有上升,但未出现材料断裂、细微裂痕以及显著隆起。Cr 颗粒在触头表面的分布密度较烧蚀前下降,Cu 基体的液滴喷溅集中出现在电弧烧蚀较为严重的区域,表现为凝



(a) 区域一 (b) 区域二

图11 动触头在电弧烧蚀后的微观样貌

Fig. 11 Microstructure of dynamic contacts after arc erosion

固后形成的烧蚀坑。结合燃弧特性分析,在触头表面出现阳极斑点时,阳极斑点对应的区域温度极高,会引起材料的熔化甚至汽化。由于 Cr 颗粒熔点和沸点高于 Cu 基体,因此在燃弧过程中,Cr 含量的提升会减少触头材料的熔化和液滴喷溅现象。电弧熔炼 CuCr55 触头相较于传统 Cu-Cr 合金触头而言,Cr 含量更高,Cu 与 Cr 分布更为致密均匀,从而在电弧烧蚀过程中均匀分散了来自电弧的能量注入,避免了局部区域的显著劣化,有良好的耐烧蚀性能。

4 结论

文中对电弧熔炼 CuCr55 电极触头进行了燃弧试验研究和微观组织结构的观察,分析了 CuCr55 电极触头大电流真空电弧的燃弧特性,得到了阳极斑点临界电流,观察了不同工艺 Cu-Cr 合金微观样貌的差异性,研究了真空电弧烧蚀前后电弧熔炼 CuCr55 触头微观样貌的变化规律,并分析得出微观样貌对于触头性能的影响。主要结论如下:

1) 电弧熔炼 CuCr55 触头材料相较于熔铸 CuCr25 材料和熔渗 CuCr50 材料,微观结构中的 Cu 与 Cr 晶粒分布更为均匀,整体细小、呈弥散球状分布。

2) 用电弧熔炼 CuCr55 材料制成的 58 mm 杯状纵磁触头,在开距 20 mm 情况下开展燃弧实验,阳极斑点临界电流高于 15 kA。

3) 电弧熔炼 CuCr55 触头烧蚀均匀,未出现材料断裂、细微裂痕以及显著隆起,出现微凸起的烧蚀圆斑和树枝状电弧灼烧放电痕迹。Cr 颗粒在触头表面的分布密度较烧蚀前有所下降,触头表面出现由于金属液滴喷溅形成的烧蚀坑,直径在 $25\ \mu\text{m}$ 到 $75\ \mu\text{m}$ 之间。

4) 相较于传统 Cu-Cr 合金触头而言,电弧熔炼 CuCr55 触头因其更高的 Cr 含量、更为均匀细小弥散球状分布的微观结构,使真空电弧的能量注入在触头表面分布更为均匀,避免了触头局部区域的明显劣化,耐烧蚀性能良好。

参考文献:

- [1] 王季梅. 真空开关技术与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
WANG Jimei. Vacuum switching technology and application[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [2] 张晓鹏,朱苛娄. 基于电磁驱动的40.5 kV快速真空断路器研究[J]. 电测与仪表,2023,60(5):79-84.
ZHANG Xiaopeng, ZHU Kelou. Research on 40.5 kV fast vacuum circuit breaker based on electromagnetic drive[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 79-84.
- [3] 辛妍丽,周文婷,余泽远,等. 40.5 kV真空断路器分闸并联电抗器重燃过电压及抑制方法[J]. 电力工程技术,2023,42(4):231-240.
XIN Yanli, ZHOU Wenting, YU Zeyuan, et al. Reignition overvoltages caused by 40.5 kV vacuum circuit breaker switching - off shunt reactors and suppression methods[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 231-240.
- [4] 杨东文,曾次玲,谷丰强,等. 配永磁机构真空断路器操动时间分散性的预测模型与影响因素研究[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(5):180-187.
YANG Dongwen, ZENG Ciling, GU Fengqiang, et al. Influencing factor and forecasting model for the time dispersion of the operating mechanism of a vacuum circuit breaker with permanent magnetic actuator[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 180-187.
- [5] 孙 华,王 宾. 基于分合闸电气量的真空断路器灭弧能力在线检测研究[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(2):102-109.
SUN Hua, WANG Bin. Arc-quenching ability detection of a high voltage vacuum circuit breaker based on switching and closing current[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 102-109.
- [6] 王季梅,苑 舜. 大容量真空开关理论及其产品开发[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.
WANG Jimei, YUAN Shun. Theory of large - capacity vacuum switches and product development[M]. Xi ' an : Xi ' an Jiaotong University Press, 2001.
- [7] 王军龙,杨欢红,张劲松,等. 基于低能量直流的真空断路器短路开断能力评估[J]. 智慧电力,2022,50(7):23-28.
WANG Junlong, YANG Huanhong, ZHANG Jinsong, et al. Short - circuit breaking capacity evaluation of vacuum circuit breaker based on low-energy DC[J]. Smart Power, 2022, 50(7): 23-28.
- [8] SMEETS R. SC A3: The impact of the application of vacuum switchgear at transmission voltages[R]. Auckland, New-zealand: CIGRE, 2013.
- [9] SMEETS R. Switching in electrical transmission and distribution systems[M]. Hoboken: Wiley, 2014.
- [10] SLADE P G. The vacuum interrupter, theory, design and application[M]. Carabas: CRC Press, 2008.
- [11] CHEN M, YAMADA Y, ZEN S, et al. ON - state contact resistance and arc-less commutation characteristics of Cu - W clad contact materials in a hybrid DC switch[J]. IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology, 2020, 10(7): 1138-1147.
- [12] 罗晓阳,唐兴昌,匡 川,等. 高强高导 Cu-Cr 合金的研究现状及进展[J]. 中国冶金,2023,33(7):10-20.
LUO Xiaoyang, TANG Xingchang, KUANG Chuan, et al. Research status and progress of Cu - Cr alloys with high strength and high conductivity[J]. China Metallurgy, 2023, 33(7): 10-20.
- [13] SCHNEIDER A V, YAKOLEV E V, POPOV S A, et al. Investigation of CuCr electrodes microstructure after effect of a high current vacuum arc[C]//2018 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Greifswald: IEEE, 2018: 235-238.
- [14] SLADE P G. Advances in material development for high power, vacuum interrupter contacts[J]. IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology, 1994, 17(1): 96-106.
- [15] ZOU J T, SONG D Z, SHI H, et al. Effects of grading Tungsten powders on properties of CuW alloy[J]. Materials Research Express, 2020, 7(2): 026528.
- [16] 丁 一,祝志祥,陈 新,等. 石墨烯增强铜钨电触头材料研究进展[J]. 热加工工艺,2022,51(14):14-17.
DING Yi, ZHU Zhixiang, CHEN Xin, et al. Research progress of graphene reinforced Copper Tungsten electrical contact materials[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(14): 14-17.
- [17] 周 芳,曹伟产,陈伟博,等. 铜钨触头电烧蚀机理探讨[J]. 电工材料,2018(5):3-4.
ZHOU Fang, CAO Weichan, CHEN Weibo, et al. Discussion on arc erosion mechanism of Cu - W contact[J]. Electrical Engineering Materials, 2018(5): 3-4.
- [18] YU Li, GENG Yingsan, LI Qian, et al. Improvement of percussion welding characteristics of CuCr25 contact material by decreasing tensile strength[C]//2009 Proceedings of the 55th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Vancouver: IEEE, 2009: 197-201.
- [19] YU Li, WANG Jianhua, GENG Yingsan, et al. High current vacuum arc phenomena of nanocrystalline CuCr25 contact material[C]//24th ISDEIV 2010. Braunschweig: IEEE, 2010: 229-232.
- [20] 修士新,邹积岩,何俊佳. CuCr 触头材料微观特性对其宏观性能的影响[J]. 高压电器,2000,36(3):40-42.
XIU Shixin, ZOU Jiyang, HE Junjia. Effect of micro-features

- on macro - properties of CuCr contact material[J]. High Voltage Apparatus, 2000, 36(3): 40-42.
- [21] 张在秦, 王 闯, 陈 驰, 等. 大电流真空电弧中阳极烧蚀过程的研究进展[J]. 真空电子技术, 2023(5): 25-34.
ZHANG Zaiqin, WANG Chuang, CHEN Chi, et al. Research on anode erosion in high current vacuum arcs: A review[J]. Vacuum Electronics, 2023(5): 25-34.
- [22] LI Wangpei, THOMAS R L, SMITH R K. Effects of Cr content on the interruption ability of CuCr contact materials [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2001, 29(5): 744-748.
- [23] 修士新, 王季梅. Cr含量对CuCr触头材料性能的影响[J]. 真空电子技术, 1998(1): 24.
XIU Shixin, WANG Jimei. Effect of Cr content on the properties of CuCr contact materials[J]. Vacuum Electronics, 1998(1): 24.
- [24] 周文元, 吕大铭, 周武平. 不同铬含量的CuCr, CuCrFe真空触头材料性能研究[J]. 粉末冶金技术, 1999(1): 41-47.
ZHOU Wenyuan, LYU Daming, ZHOU Wuping. Study on the properties of CuCr and CuCrFe vacuum contact materials with different Chromium contents[J]. Powder Metallurgy Technology, 1999(1): 41-47.
- [25] 赵来军, 李震彪, 王 珂, 等. 纳米CuCr50触头材料电弧侵蚀特性[J]. 高压电器, 2012, 48(5): 15-19.
ZHAO Laijun, LI Zhenbiao, WANG Ke, et al. Arc erosion characteristics of nanocrystalline CuCr50 contact material [J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(5): 15-19.
- [26] MAEDE Y S, SATO M, KANEKO E, et al. Influence of the microstructure of Cu-Cr alloy electrode on vacuum arc[C]// 2023 30th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Okinawa: IEEE, 2023: 390-393.
- [27] WANG Haoqing, GENG Yingsan, LIU Zhiyuan, et al. Pre-strike characteristics of arc-melted CuCr40 and infiltration CuCr50 contact materials in 40.5 kV vacuum interrupters under capacitive making operations[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(6): 3357-3366.
- [28] 刘 凯, 王小军, 张石松, 等. 真空灭弧室用CuCr触头材料制备方法及其应用[J]. 真空电子技术, 2019(5): 33-37.
LIU Kai, WANG Xiaojun, ZHANG Shisong, et al. The application and preparation methods of CuCr contact material in vacuum interrupters[J]. Vacuum Electronics, 2019(5): 33-37.
- [29] 朱建娟, 田保红, 刘 平. Cu-Cr合金触头材料制备技术的研究进展[J]. 铸造, 2006, 55(11): 1110-1113.
ZHU Jianjuan, TIAN Baohong, LIU Ping. Development of manufacture technology for Cu - Cr contact materials[J]. Foundry, 2006, 55(11): 1110-1113.
- [30] 张剑平, 陈敬超, 周晓龙. 影响CuCr系触头材料性能的因素[J]. 电工材料, 2003(1): 3-8.
ZHANG Jianping, CHEN Jingchao, ZHOU Xiaolong. Effects on performance of CuCr contact materials[J]. Electrical Engineering Materials, 2003(1): 3-8.
- [31] 马凤仓, 倪 锋, 杨涤心. 铜铬合金制备方法研究现状[J]. 材料开发与应用, 2002, 17(3): 35-38.
MA Fengcang, NI Feng, YANG Dixin. The present situation of preparation methods of CuCr alloy materials[J]. Development and Application of Materials, 2002, 17(3): 35-38.
- [32] 梁淑华, 范志康, 胡 锐. 电弧熔炼法制造CuCr系触头材料的组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2000(4): 25-26.
LIANG Shuhua, FAN Zhikang, HU Rui. Microstructure and properties of CuCr series pseudobinary alloy by arc melting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2000(4): 25-26.
- [33] 马 慧. 不同磁场条件下真空电弧阳极表面电流密度分布及电弧特性的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2017.
MA Hui. Research on the anode current density distribution and the arcing behavior in vacuum Arcs under magnetic fields[D]. Xi' an: Xi' an Jiaotong University, 2017.

薄祥来(2000—), 男, 学士, 硕士研究生, 主要从事真空开关和真空电弧理论研究。

刘思远(1990—), 男, 博士, 助理教授, 主要从事真空电弧理论、高压直流开断等领域研究(E-mail: siyuanliu@mail. xjtu. edu. cn)。

谢洪涛(1967—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事真空灭弧室设计和工艺工作。