

# Microstructure of Rehandled Layer on the Surface of Nano-CuCr Alloy

Jia Cheng, Heng Zhang, Zhi-mao Yang, Bing-jun Ding

School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China

Email: zmyang@mail.xjtu.edu.cn

**Abstract:** Nano-CuCr25 and nano-CuCr50 alloys are prepared by vacuum hot pressing using powders activated by high energy ball-milling. The surface of the alloys after arc erosion and the rehandled layer are studied. The depth of the rehandled layer on nano-CuCr50 is found to be 3~6 micrometers at low current and the microstructure is refined. At high-current, the rehandled layer of nano-CuCr25 is found to be about 3~4 micrometers. Compared with normal CuCr25 alloy, nano-CuCr25 is more stable as cathode. Anode spots which can destroy the contact occur at high-current. Arc energy of nano-CuCr25 is lower than that of normal CuCr25 alloy.

**Keywords:** nano-CuCr alloys; rehandled layer; microstructure; vacuum arc energy

## 电弧作用后纳米晶 CuCr 触头熔化层组织分析

成佳, 张珩, 杨志懋, 丁秉钧

西安交通大学理学院, 西安, 中国, 710049

Email: zmyang@mail.xjtu.edu.cn

**摘要:** 利用高能球磨后真空热压的方法制备了纳米晶 CuCr25 及 CuCr50 合金材料, 研究了它们在真空电弧作用中的烧蚀情况和表面熔化层的显微组织及成分变化等。在小电流电弧作用后, CuCr50 表面熔化层的厚度在  $3\sim 6\ \mu\text{m}$  左右, 熔化层组织对比原始组织更为均匀细化, 不会因为电弧作用丢失其纳米结构。在大电流电弧作用下, 纳米 CuCr25 触头阴极熔化层厚度在  $3\sim 4\ \mu\text{m}$  左右, 烧蚀情况优于常规合金; 电弧作用中出现阳极斑点, 纳米材料失效。纳米 CuCr25 合金电弧能量低于常规合金。

**关键词:** 纳米晶 CuCr 合金; 熔化层; 显微组织; 真空电弧能量

### 1 引言

CuCr 合金以其优良的综合性能成为现在使用最广泛的真空触头材料。随着真空开关向高耐压, 大容量, 小型化等方向发展, 组织细化成为进一步提高 CuCr 触头材料综合性能的有效途径。对纳米晶 CuCr 触头材料的研究发现纳米晶 CuCr 触头有诸多优点, 如纳米晶 CuCr 触头截流值显著低于粗晶材料, 同时不稳定电流也明显小于同成分粗晶合金等[1]。然而真空开关在实际运用中, 由于开断过程中电弧的作用, 触头表层组织会有一定变化, 从而不同于触头材料的原始组织。由于与电弧直接作用的是触头表面的熔化层, 认识触头表面熔化层的组织和成分变化对于纳米晶 CuCr 触头材料显得尤为重要。

Rieder W. F 等人的研究结果表明触头材料晶粒细化后, 可使真空灭弧室绝缘强度升高, 最大截流值降

低, 综合性能有显著提高[2]。王亚平等采用高能球磨 Cu-Cr 粉并在真空中缓慢热压的方法制备出了晶粒尺寸为几十纳米 CuCr 触头材料[3]。研究发现, 纳米晶 CuCr 合金电击穿时阴极斑点的运动与原有的常规 CuCr 材料中的随机运动不同, 阴极斑点运动表现出了半定向运动的显著特征[4]。另一方面, 对于粗晶 CuCr 合金材料, Peter Fery 等人的研究表明 CuCr25 触头经开关大电流电弧作用后, 其表面熔化层的厚度约为  $50\ \mu\text{m}$  左右, 加入少量的 W, 可使表层结晶组织进一步细化, 改善其耐压性能[5]。修士新等的研究结果显示对于粉末冶金法制得的 CuCr 触头材料电弧重熔后孔隙率降低, 耐电弧烧蚀强度提高, 冷却条件对于材料重熔后的组织情况有很大影响[6]。

为了研究真空电弧对纳米晶 CuCr 触头材料表面熔化层的影响, 本文采用高能球磨及真空热压的方法制备纳米晶 CuCr25 及 CuCr50 合金材料, 研究其在不同电流下电弧作用的烧蚀情况, 并对电弧作用后表面熔

本文受到国家自然科学基金重点项目(50834003)的资助。

化层的组织及成分进行分析。

## 2 试验

### 2.1 纳米晶 CuCr 触头材料的制备

试验选用粒径小于 $48\ \mu\text{m}$ 的Cu粉和小于 $75\ \mu\text{m}$ 的Cr粉按照质量比75:25和50:50的比例装入氩气保护气氛的高能球磨机中进行球磨，球料比为20:1，转速为1000rpm，球磨时间为20h。将制备的CuCr25和CuCr50合金粉末装入真空热压设备中进行热压，温度为 $850\ ^\circ\text{C}$ ，压力为800MPa，保温时间为2h。该工艺下制备的纳米CuCr合金可以达到理论密度的95%以上。

### 2.2 试验条件及显微结构分析

本文小电流电击穿试验在模拟真空灭弧室内进行，放电时纳米晶CuCr合金作为阴极，阳极则使用钨针；试验所用电路如图1所示，试验中选取的放电电压为8kV。

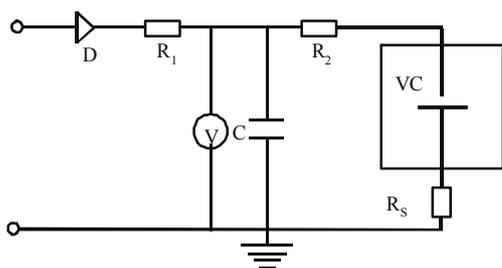


Fig 1 Experimental circuit diagram with capacitor  $C=0.5\ \mu\text{F}$  and resistors  $R_1=1500\ \Omega$ ,  $R_2=800\text{k}\ \Omega$

图1 小电流试验电路示意图， $C=0.5\ \mu\text{F}$ ， $R_1=1800\ \Omega$ ， $R_2=80\text{k}\ \Omega$

大电流试验则是将制备的纳米CuCr合金加工成直径12mm的平板触头后，制备成真空灭弧室试管来完成，具体试验电路如图2所示。灭弧室试管的分闸通过与动触头相连的永磁操动机构控制，使用高速摄影机记录分闸时的电弧形态，示波器则被用来记录电弧电压及电流波形。

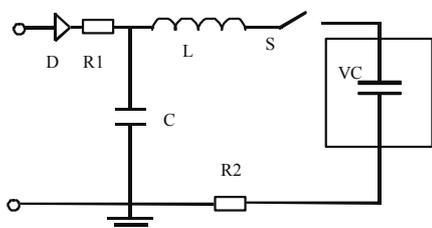


Fig 2 Experimental circuit diagram in which C stands for capacitor bank and L is a varactor

图2 大电流试验电路示意图，C为电容器组，L为电抗器

电击穿后使用JSM7000型扫描电镜对样品电弧烧蚀后表面进行观察，然后对实验样品进行解剖，通过扫描电镜及其附带的能谱对其表面熔化层进行显微分析。

## 3 结果与讨论

### 3.1 纳米 CuCr 合金的显微组织

图3所示为制备得到纳米晶CuCr50合金的SEM照片。与粗晶CuCr合金材料中Cr颗粒的大小在几十微米到上百微米之间不同，高能球磨制备的纳米晶CuCr合金中富Cu相和富Cr相均匀分布，而其中又弥散分布着另一相的粒子，大小在几十到几百纳米之间。

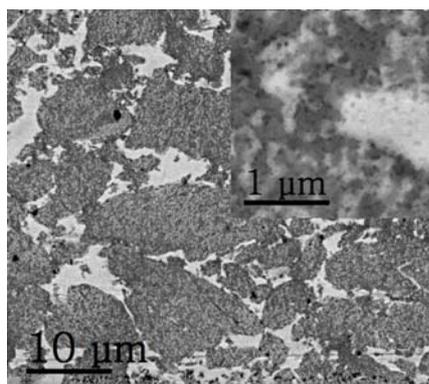


图3 纳米晶 CuCr50 合金显微组织  
Fig 3 Microstructure of nano-CuCr50 alloy

### 3.2 纳米晶 CuCr 合金电弧作用后阴极宏观形貌

小电流电弧作用后CuCr50样品表面的宏观照片（图4（a））表明，纳米CuCr合金表面电弧作用后烧蚀表面连成一片，没有像粗晶CuCr触头一样出现散布在Cr颗粒上的分散蚀坑[7]。对比图4（b）与图4（c），大电流作用后粗晶CuCr25合金表面出现树枝状攀爬斑点，散射状分布在触头周围，烧蚀严重；而纳米晶CuCr25触头的阴极表面则未出现飞溅现象，表面熔化层平整度较高，优于粗晶CuCr合金。

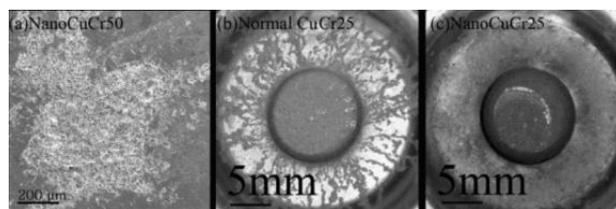


Fig 4 Macrocosm appearance of CuCr alloys after arc erosion  
图4 电弧烧蚀后阴极 CuCr 合金表面宏观形貌

### 3.3 纳米晶 CuCr 合金表面熔化层组织显微分析

将样品解剖后使用扫描电镜对样品熔化层组织进行观察,图 5(a)为小电流电弧作用后纳米晶 CuCr50 合金表面熔化层组织的扫描电镜照片。熔化层的厚度(正对钨针的中心区域)在 3~6 μm 左右,析出的球状 Cr 颗粒粒径保持在 1 μm 以下。熔化层中 Cr 颗粒的分布存在一定的梯度,熔化层与原始组织分界附近的 Cr 颗粒更为细小,可能是因为熔化层接近基体组织的部分散热较好,形核过程中快速凝固造成的。熔化层组织对比原始组织更为均匀,原始组织中存在的富 Cu 区及富 Cr 区消失。大电流作用后纳米晶 CuCr25 合金表面熔化层(图 5(b))厚度为 3~4 μm 左右,析出的球状 Cr 颗粒小于 1 μm。

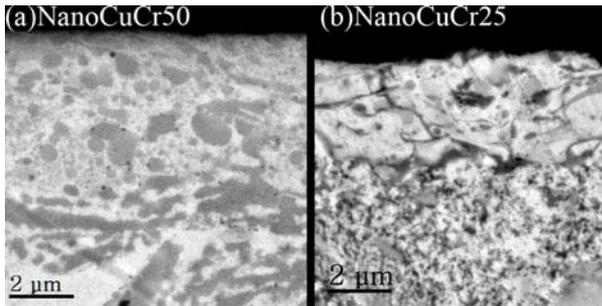


图 5 阴极纳米晶 CuCr 合金表面熔化层显微组织  
Fig 5 Microstructure of rehandled layer on the surface of nano-CuCr alloy

对比纳米晶 CuCr 合金表面熔化层组织与原始组织可以看出,熔化层组织并没有因为电弧重熔作用而变得粗大。相比于原始组织,熔化层组织细小均匀,从而保证了纳米晶触头材料在使用过程中不会丢失其作为纳米材料的优良性能。

### 3.4 大电流下纳米 CuCr 合金电弧能量及阳极斑点

在大电流试验中使用高速摄影机记录了试验过程中的电弧形态,图 6(a)为峰值电流 2.49kA 时分闸过程中的电弧形态,从图中可以看出阳极出现亮度很高的阳极斑点,同时对阳极烧蚀后的宏观形貌(图 6(b))可以看出,在出现阳极斑点的中心区域材料表面烧蚀严重,出现明显的沟壑。解剖后显微组织观察(图 6(c))及扫描电镜自带能谱分析显示烧蚀区域 Cu 成分几乎完全损失,中心区域只有熔化后重新长大的 Cr 颗粒聚集,对比原始组织 Cr 颗粒长大

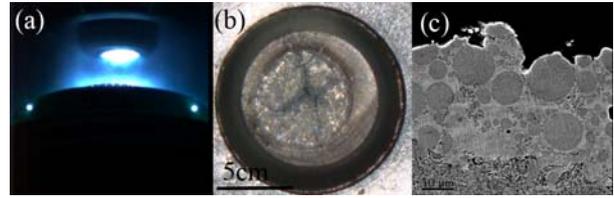


图 6 (a) Nano-CuCr25 2.49kA 电弧形态, (b) 阳极 Nano-CuCr25 烧蚀形貌, (c) 阳极解剖显微组织  
Fig 6 (a) Arc shape of Nano-CuCr25 at 2.49kA, (b) Ablation morphology of anode Nano-CuCr25, (c) Microstructure after dissection

明显,部分 Cr 颗粒直径在 10 μm 以上,丢失纳米晶 CuCr25 合金原始成分及组织,造成触头失效。

通过示波器采集到电弧作用中的电流波形及电压波形,从而可以计算得到击穿过程中的电弧能量。图 7(a)为电弧电流半波 1ms~10ms 时纳米 CuCr25 触头(峰值电流 2.49kA)与常规 CuCr25 触头(峰值电流 2.58kA)的电压波形,根据公式  $Q = \int_0^{10} i(t)U(t)dt$ ,采用离散数值计算的方法可求出电弧能量。图 7(b)为常规及纳米 CuCr25 合金真空灭弧室电弧能量曲线图,纳米 CuCr25 触头的电弧能量明显小于常规 CuCr25 合金。

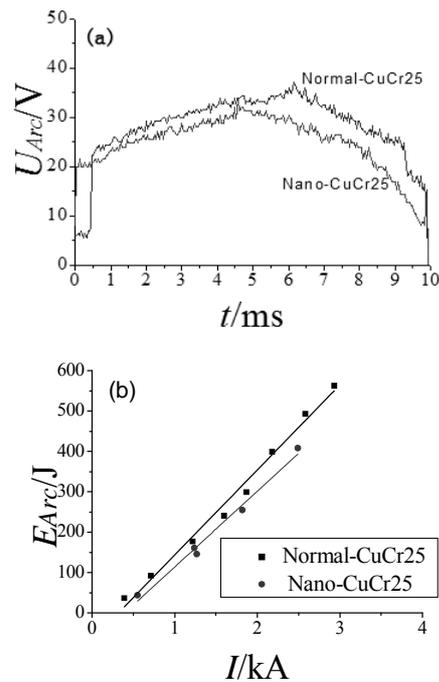


图 7 (a) UArc-t waveform of CuCr25 contact, (b) EArc-I graph of CuCr25 contact  
图 7 (a)CuCr25 触头 UArc-t 波形图, (b)CuCr25 触头 EArc-I 曲线图

## 4 结论

(1) 小电流下纳米晶 CuCr50 合金经电弧作用后阴极表面熔化层厚度在 3~6 $\mu\text{m}$  左右, 由小于 1 $\mu\text{m}$  的球状 Cr 颗粒均匀散布在 Cu 基体上构成。熔化层组织对比原始组织均匀细化, 电弧作用后表面较为平整, 未出现明显的分散蚀坑。

(2) 大电流作用后纳米晶 CuCr25 合金表面熔化层组织较原始组织更为均匀, 熔化层厚度在 3~4  $\mu\text{m}$  左右。对比常规 CuCr25 合金, 电弧作用后纳米晶 CuCr25 合金烧蚀轻微, 未出现常规合金的喷溅现象, 熔化层表面平整度较高。

(3) 大电流下纳米晶 CuCr25 合金电弧能量明显低于常规 CuCr25 合金, 但是纳米晶 CuCr25 触头在峰值电流 2.49kA 时出现明亮的阳极斑点, 阳极触头材料严重烧蚀。熔化层组织 Cu 成分接近完全损失, Cr 颗粒长大到 10  $\mu\text{m}$  以上, 纳米触头表面失效。

(4) 纳米晶 CuCr 合金作为阴极材料电弧分散性好, 耐电弧烧蚀性能优于常规合金, 但是在小电流下易产生阳极斑点而失效, 因此, 纳米晶 CuCr 合金有望在小电流开关电器触头领域获得广泛应用。

## References (参考文献)

- [1] Yu Feng, Chengyu Zhang et al. Effects of nanocrystallization of CuCr contact materials on characteristics of vacuum discharge [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2005, 28(5): 9-12(Ch).  
冯宇, 张程昱, 等. CuCr 触头材料纳米晶化对真空放电性能的影响[J]. 兵器科学材料与工程, 2005, 28(5): 9-12.
- [2] Rieder W.F, Schusseck M, Glatzle W, Kyn E. Influence of composition and Cr particle size of CuCr contact on chopping current, contact resistance, and breakdown voltage in vacuum interrupters[J]. IEEE Trans on CPMT, 1989, 12(2): 273
- [3] Yaping Wang, Feng Zhao, Bingjun Ding, Jingen Zhou. Preparation and properties of CuCr contact materials with nanometer grains [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1998, 21(3): 9-12(Ch).  
王亚平, 赵峰, 丁秉钧, 周敬恩. 纳米晶 CuCr 触头材料的制备及性能[J]. 兵器科学与工程材料, 1998, 21(3): 9-12.
- [4] Zhimao Yang, Qiuli Zhang, Chengyu Zhang, Yue Sun, Bingjun Ding. Influence of microstructure of CuCr25 cathode on the motion of vacuum arc spots[J]. Physics Letter A, 2006, 35(3): 98-100.
- [5] Fery F, Klink N, Michal R, Saeger K E. Metallurgical aspects of contact materials for vacuum switch devices[J]. IEEE Trans plas Sci, 1989, 17(5): 734~740.
- [6] Shixin Xiu, Jimei Wang, Junjia He, Jiyan Zou. Arc remelting experimental results and analysis on CuCr contact material[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(2): 26-28[Ch].  
修士新, 王季梅, 等. CuCr 触头材料电弧重熔实验结果及分析[J]. 高压电器, 2002, 38(2): 26-28.
- [7] Wenxin Duan, Conghui Guo, Zhimao Yang, Bingjun Ding. Cathode Spots and Chopping Current in Vacuum and at Low Current for CuCr Contact Materials [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(6): 998~1001[Ch].  
段文新, 郭聪慧, 等. CuCr 触头材料小电流下阴极斑点与截流值研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(6): 998~1001.

[1] Yu Feng, Chengyu Zhang et al. Effects of nanocrystallization of CuCr contact materials on characteristics of vacuum discharge