

CuCrFe 真空触头材料组织和性能研究^①

周武平 吕大铭

(冶金部钢铁研究总院, 北京 100081)

摘 要

对不同 Fe 含量下 CuCrFe 真空触头材料的机械、物理、电气性能及显微组织的变化规律进行了探讨。结果表明, 随 Fe 含量增大, CuCrFe 触头材料的耐压强度明显提高, 对开断性能影响不大, 传导性能和截流值均有所下降, 强度和硬度升高。

关键词: 触头材料 Cu-Cr 合金

触头材料是真空开关的关键材料。以前大多采用 WCu、CuBi 系两类触头材料, 其开断性能受到很大局限。钨具有极强的电子发射能力, WCu 材料只适用于电流小于 10 kA 的真空开关^[1]; CuBi 系材料耐压强度低, 抗电蚀性差, 且机械脆性大, 应用范围及寿命受到限制^[2]。国内 CuBi 材料的开断能力只达 20 kA、350 MVA。七十年代 CuCr 合金的研制成功使大容量真空开关触头材料有所突破。近年来, 研究过多组元 CuCr 系触头材料。文献[3]就添加组元 Fe、Co、Ni 对 CuCr 两相合金工艺性能的影响作了研究。发现第三组元的加入能促进材料的致密化过程, 并在相应程度上有利于脱除气体。本文就 Fe 对 CuCrFe 触头材料的组织、性能进行了全面研究, 发现 Fe 的作用机理及不同 Fe 含量对 CuCrFe 触头材料性能的影响是有差异的。

1 实验方法

实验合金采用混粉烧结法制取。为保证材料致密化, 采用了后续热等静压(HIP)处理。所有合金的相对密度均达到 99.90% 以上。

试验合金的化学成份列于表 1。

表 1 试验合金的化学成份(wt.-%)

组元	样 号					
	90-00	90-03	90-05	90-07	90-09	90-12
Cu	50	48.5	47.5	46.5	45.5	44
Cr	50	48.5	47.5	46.5	45.5	44
Fe	0	3	5	7	9	12

测定了试验合金的密度、拉伸强度、冲击韧性、硬度、电导率及热性能等机械物理性能。用扫描电镜、配合能谱观察分析了合金的组织及相成分变化。用 d 50 mm 的试验合金加工成视在接触面直径为 d 35 mm 的真空触头, 装配成小型化真空灭弧室, 进行了高压开断试验, 并对耐压强度, 开断短路电流能力以及截流性能、电真空性能进行了分析研究。

2 实验结果及讨论

2.1 显微组织

相图分析表明, CuCr 合金为两相合金, Cr 与 Cu 的互溶能力均极小, 1080 °C 时约有 1.28 wt.-%Cr 溶于 Cu。Fe 在 Cu 中的溶解度也不大, 1080 °C 时约为 4.3 wt.-%, 600 °C 以下几乎不溶解。Fe 与 Cr 形成连续固溶体。图 1 为 Fe 在合金中分布状态的线扫描图谱。含 Fe 量较少时, Fe 主要分布在 Cr 颗粒的表层, 而没

① 收稿日期: 1993 年 6 月 19 日

有完全扩散进 Cr 相内部。造成这种现象的直接原因与扩散热力学相关。扩散热力学认为, 扩散驱动力是化学位梯度 $\partial\mu/\partial x$, 而不是浓度梯度 $\partial c/\partial x$ 。分析表明, Cr 与 Fe 均为体心立方晶体结构, 点阵常数分别为 2.884 Å、2.886 Å, 极为接近, 两者晶体结构几乎完全一致, 少量 Fe 的加入形成代位固溶体, 造成化学位的变化并不明显, 不足以产生较大的驱动力使 Fe 进一步向 Cr 中扩散, 因此, Fe 富集在界面处的 Cr 相中。随 Fe 含量的增高, 界面处 Cr 相中 Fe 的富集较多, 促使 Fe 在 Cr 中均匀化, 形成图 1(b) 所示的 Fe 在 Cr 相中的均匀分布。

图 2 是不同 Fe 含量时 CuCrFe 合金的显微组织照片。照片表明: Fe 的加入对 Cr 颗粒有一定的细化、球化作用。Fe 含量增大, 细化、球化显著。CuCrFe 合金采用了液相烧结。Fe 的存在促进了液相烧结的溶解析出、颗粒重排过程。其影响主要有两个方面: 1. Fe 与 Cr 的互溶, 增强了 Cu、Cr 间的浸润性, 同时, 增大了液相烧结时的液相量, 促进液相烧结过程。2. Fe 的存在, 促进了 Cr 在 Cu 中的溶解与扩散,

增强了借助液相进行物质迁移的过程, 液相烧结结束时, Fe、Cr 以固溶体形式聚集、析出, 这样就加大了溶解—析出程度、导致颗粒的球化。

2.2 传导性能

图 3 是合金传导性能(热扩散系数 α 、热导率 k 、电导率 σ) 随 Fe 含量变化的关系。由图可见, 随 Fe 含量的增大, α 、 k 、 σ 减小。Fe 含量继续增大时, 下降幅度减小。

传导性能随 Fe 的加入有所下降的原因有二: (1) Fe 的加入, 增大了 Cr 和 CrFe 固溶体的弥散度; (2) 增大了 Cr 在 Cu 中的固溶度, Fe 也少量固溶于 Cu 中, 从而使合金的传导性能降低。

Fe 对合金传导性能虽有些降低, 但当 Fe 加到 12 wt.-% 时 σ 仍有 $8.3 \times 10^8 (\Omega \cdot m)^{-1}$, 大于文献[4]报导的 $5 \times 10^8 (\Omega \cdot m)^{-1}$ 的要求, 不影响使用性能, 电气性能实验也说明了这点。如果仅用 Fe 取代 Cr 而不取代 Cu, 则合金的传导性能会得到改善。如 Cu48.5 Cr48.5 Fe3 的电导为 $11.830 \times 10^8 (\Omega \cdot m)^{-1}$, 而 Cu50 Cr47

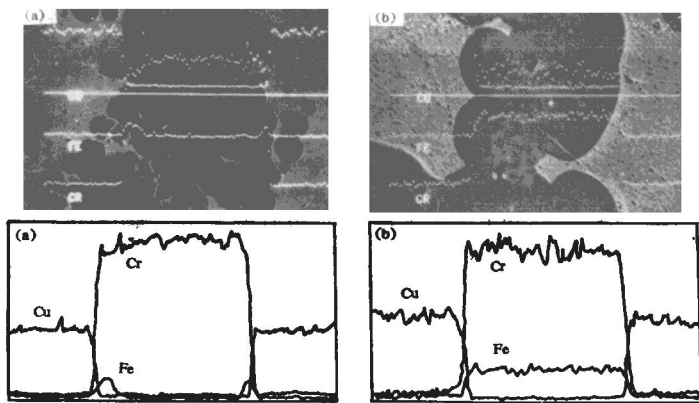


图 1 Fe 在合金中分布状态线扫描图

(a)—5 wt.-% Fe 合金; (b)—12 wt.-% Fe 合金

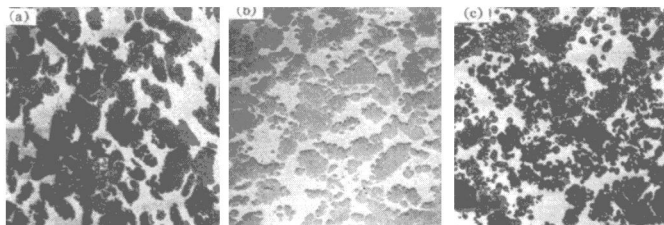


图 2 CuCrFe 合金显微组织照片(×100)
(a)—0 wt.-%Fe; (b)—5 wt.-%Fe; (c)—12 wt.-%

表 2 合金机械性能试验结果

项 目	样 号					
	90-00	90-03	90-05	90-07	90-09	90-12
HB _{2.5/62.5/30}	105.3	146.0	156.3	167.3	172.3	183.0
σ_b /MPa	303	317	340	365	400	468
δ_5 (%)	2.5	1.2	1.5	1.0	1.7	1.0
ψ (%)	3.8	3.5	3.3	3.3	2.7	3.2
α_k /J·cm ⁻²	4.2	4.2	5.0	4.6	4.6	5.0

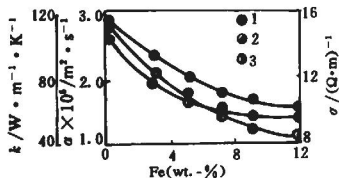


图 3 k 、 σ 、 δ 随 Fe 含量的变化关系

Fe3 的电导为 $12.890 \times 10^6 (\Omega \cdot m)^{-1}$ 。若再调整烧结工艺, 进行适当的热处理, 进一步减少 Cu 中固溶的 Cr、Fe 量, 也将提高传导性能。

2.3 机械性能

合金材料机械性能的变化是其组织结构变化的反应。成分分析及显微组织分析表明, Fe 的存在增大了 Cr 颗粒在 Cu 基体中的弥散度; 提高了 Cr 在 Cu 相中的固溶度, 增强了 Cu、Cr 颗粒界面的结合强度; Fe 固溶于 Cr 中, 也强化了 Cr 晶体, 使固溶强化、弥散强化、沉淀强化增强效果, 从而使合金的硬度(HB)和拉伸强度(σ_b)明显提高。Fe 的加入对合金断面收缩率 ψ 和延伸率(δ_5)等塑性指标有下降趋势。冲击韧性呈增加的趋势。表 2 为合金机械性能的试验结果。

2.4 电气性能

表 3 为 CuCrFe 触头材料电气性能的试验结果。其硬度和强度的提高使耐压强度(U_b)

有较大的提高。由 CuCr50 的 38.1 kV 提高到 CuCrFe7 的 63.5 kV(触头间距为 0.75 mm)。这与文献[5]报道的规律相一致。真空开关的开断性能, 受电弧下触头所提供的混合金属蒸气中占大多数的质量最大的元素控制^[5]。CuCrFe 合金中, Cu、Cr、Fe 原子质量相差不大, 其中 Cu 的质量最大为 63.5 g/mol, 所以, Cu 是控制其开断性能的主要因素。由于铁的加入量不大, 因而对开断性能影响不大。表 3 中 10 kV 下开断试验说明了这点。不同 Fe 含量 CuCrFe 合金的开断能力(I_p)都保持在 22~23 kA 的水平, 其极限分断电流密度(J_m)均在 $1.6 \times 10^7 \sim 1.7 \times 10^7$ A/m² 水平, 这比其他文献^[7]报道的线圈型纵磁场下 CuCr50 的 1.2×10^7 A/m² 水平高得多。真空触头材料的载流值(I_{av})取决于真空电弧下触头提供金属蒸气的难易程度, 即取决于材料的蒸气压和热传导性能。蒸气压高、热导低的材料, 载流值低。Fe 的加入, 使热传导有所下降, 从而使平均载流值降低。

CuCrFe 触头材料较 CuCr 材料显著地提高

了耐压性能, 保证开断性能不受影响, 这对于 35kV、50kV、63kV、110kV 级高压、大容量真空断路器的开发有着重要意义。Fe 的加入使 CuCr 合金的截流值下降、CuCrFe7 的平均截流值较 CuCr50 降低 22%, 这对减小过电压, 防止电气设备被过电压破坏有重要意义。

表 3 触头材料电气性能试验结果

项目	样 号			
	90-00	90-03	90-05	90-07
U_b /kV	38.1	45.6	53.9	63.5
I_p /kA	22.4	22.8	23.4	22.3
I_{ch} /A	4.92	4.74	4.58	3.84
J_m /10 ⁷ Am ⁻²	1.61	1.64	1.68	1.61

注: 电极直径: 外圆 d 50 mm; 接触面直径 d 35 mm;
 I_p : 10 kV 下测试;
 I_{ch} : 测试参数 $I=12$ A; $U=220$ V;
 l_0 : 触头间隙 0.75 mm

2.5 电真空性能

CuCrFe 材料的一个显著特点是在其电弧作用下具有极强的吸气能力。在电弧作用下, 合金中的 Cu、Cr、Fe 均匀蒸发, 同时放出材料中所含气体杂质; 在介质恢复过程中, Cr 具有强烈的吸气能力。触头材料中的 Cr, 蒸散中的 Cr 蒸气以及凝结在屏蔽罩上的金属膜, 均具有极强的吸气能力, 使燃弧过程中的吸气量大于放气量, 可保持甚至提高真空灭弧室的真空度。Fe 的少量加入对其电真空性能没有影响。表 4 所示是试验前后灭弧室真空度的变化情

表 4 真空灭弧室真空度(×10⁻²Pa)

内 容	样 号			
	90-00	90-03	90-05	90-07
试验前	4.6	5.0	4.8	5.0
试验后	1.5	1.0	2.0	1.3

况。表中数据表明, 真空度均有所提高, 这与

其它材料经燃弧后真空度下降^[8]明显不同。Cu-CrFe 材料这种优异的真空性能对保持真空寿命, 提高介质恢复强度有着重要意义。同时对触头材料含气量的要求有所降低。

3 结 论

- (1) 混粉烧结、HIP 致密化工艺制得含~12 wt.-%Fe 的 CuCrFe 触头材料, 具有优良的综合性能。随 Fe 含量的增加, 材料耐压强度明显提高, 截流值有所降低, 对开断性能没有影响, 经电气性能试验后, 真空灭弧室的真空度均有所提高。
- (2) CuCrFe 触头合金, 随 Fe 含量的增加, 其硬度和强度明显提高, 韧性变化不大, 塑性指标有所下降, 一定程度地降低了合金传导性能, 但可通过一定途径予以改善。
- (3) Fe 在 CuCrFe 合金中主要分布于 Cr 晶粒中, 含量少时分布于其表层; 含量较多时, 呈均匀分布。随 Fe 含量增大, Cr-Fe 固溶体颗粒细化、球化增强、弥散度增大。

参考文献

1 王季梅. 见: 真空开关理论及应用, 西安: 西安交通大学出版社, 1986, 4.
2 Yoshiyuki Kashiwagi *et al.* U. S. Patent 4554425, 1985.
3 凌贤野等. 钢铁研究总院学报, 1986, 6, (1): 7.
4 Mitsubishi Denki *et al.* G. B. patent 1597997, 1981.
5 高压真空开关译文集编写组, 高压真空开关译文集, 西安高压电器研究所, 1971, 22.
6 陈美娟. 博士学位论文 西安交通大学, 1989.
7 丁秉钧. 博士学位论文 西安交通大学, 1990.
8 吴维忠. 高压电器, 1977, (6): 29.