

文章编号: 1004-0609(2003)05-1067-04

CuCr25 触头材料的喷射成形制备及其组织分析^①

张永安¹, 熊柏青¹, 刘红伟¹, 朱宝宏¹, 石力开¹, 张济山², 夏德栗²

(1. 北京有色金属研究总院, 北京 100088; 2. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100085)

摘 要: 研究了 CuCr25 合金的快速凝固喷射成形制备工艺, 考察了喷射成形过程中各工艺参数对沉积坯件成形性的影响, 观察和对比了喷射成形、真空熔铸和真空浸渗 3 种不同工艺制备的触头材料的显微组织。结果表明: 喷射成形制备的材料具有典型的快速凝固组织, 合金化状况良好, 微观组织均匀, Cr 析出相细小并弥散地分布在 Cu 基体中, Cr 颗粒尺寸大约为 3~10 μm。这将大幅度提高材料的耐电压、抗电击穿等电学性能。

关键词: 喷射成形; CuCr25 合金; 触头材料

中图分类号: TG 172

文献标识码: A

高 Cr 含量(25%~50%, 质量分数)的 CuCr 合金具有分断电流能力大、耐电压强度高、电弧烧损率低等优点, 一直被认为是理想的触头材料, 但直至 20 世纪 70 年代, 利用粉末冶金工艺制备的 CuCr 合金触头材料才被应用于断路开关中, 并于 20 世纪 90 年代替代了第 1 代真空触头材料 CuBi 合金, 大规模地应用于大功率真空断路开关中^[1~3]。

高质量的 CuCr 合金触头必须同时满足 3 个基本要求: 1) 第二相 Cr 颗粒尺寸尽可能细小且在触头表面均匀分布; 2) 具有尽可能低的气体含量; 3) 具有尽可能高的致密度。由于 CuCr 合金属于偏晶系合金, 采用传统铸造工艺基本无法制备。目前, 国际上 CuCr 合金主要有 3 种制备方法: 1) 混粉法, 将主要成分的 Cr 粉和一定比例的 Cu 粉均匀混合, 经冷压和热压烧结成形, 制备成块体触头材料; 2) 熔渗法, 将适量的 Cu 粉和全部 Cr 粉制成预制骨架, 然后利用重力在真空下向骨架中熔渗 Cu; 3) 自耗电极法, 将一定比例的 Cu 粉和 Cr 粉压制成自耗电极棒坯, 然后制备具有快速凝固组织的触头材料。前两种方法由于受原材料中尺寸较大的 Cr 颗粒的限制, 难以获得高质量的触头材料, 同时成品率较低; 而自耗电极法制备工艺复杂, 成本高^[4~7]。

基于以上认识, 本文作者利用喷射成形技术的快速凝固和近终成形特点, 制备具有快速凝固组织的 CuCr25 合金棒坯, 分析材料的显微组织, 以期形成一种全新的快速凝固 CuCr25 合金触头材料的制备技术。

1 实验

实验用合金成分为 Cu75Cr25, 原料选用无氧 Cu 和热解 Cr。喷射成形实验在北京有色金属研究总院和锦州市冶金技术研究所联合研制的高真空高温喷射成形设备上完成, 采用双层非限制式气流雾化喷嘴, 雾化气体为高纯 Ar, 雾化喷嘴与沉积坯件接收系统配合方式为直喷斜拉, 斜拉角度为 30°, 偏心距为 30 mm, 接收距离为 500~700 mm, 熔体质量流率为 6~8 kg/min, 雾化压力为 0.6~0.8 MPa。

显微组织分别在 NEOPHOT-2 型光学显微镜和 CAMBRIDGE-2 型扫描电镜上观察。

2 结果与讨论

2.1 喷射成形制备工艺

针对 CuCr25 合金熔点高达 1 600 °C 的物理特性, 开发制造了三感应加热高温高真空气雾化设备, 如图 1 所示。熔炼室采用双感应加热, 即合金熔炼炉和中间包采用感应加热, 为了使高温熔融合金熔体顺利导流, 并在实验过程中保持稳定, 导流管采用高频感应加热系统, 使导流管在 7 min 内加热至 2 000 °C 以上。

在喷射成形过程中可控工艺参数主要包括雾化气体压力、接收距离等, 而沉积坯件的评价参数主

① 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G20000672)

作者简介: 张永安(1971-), 男, 博士, 高级工程师。

通讯联系人: 张永安, 博士, 高级工程师; 电话: 010-62014488-2323; E-mail: 973project@mail.grinm.com.cn

收稿日期: 2002-11-04; 修订日期: 2003-01-14

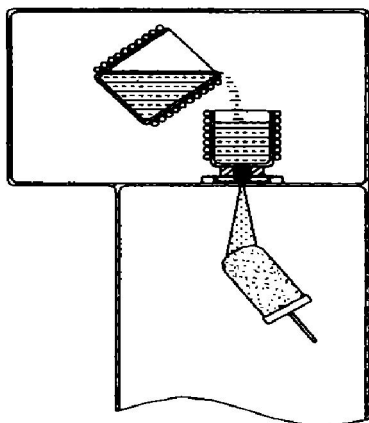


图 1 喷射成形制备装置示意图

Fig. 1 Sketch diagram of high-temperature spray forming equipment

要包括晶粒尺寸、显微组织均匀性、致密度等。表 1 所列是喷射成形工艺参数对沉积坯件成形性、组织、致密度的影响。当雾化压力为 0.5 MPa 时，雾化粒滴到达接收基板时液相含量偏高，容易造成沉积坯件中存在尺寸较大的疏松，致密度低；而当雾化压力高或接收距离大时，雾化粒滴到达沉积基板

时固相含量偏高，造成显微组织细小但沉积坯件中存在大量的细小疏松，致密度低。同时，由于沉积过程中粘附系数减小，造成收得率下降。经试验选定，0.6 MPa 雾化压力和 500 mm 接收距离为适宜的工艺参数。

2.2 沉积坯件显微组织分析

图 2 所示是喷射成形沉积坯件中心和边缘部分的显微组织，(a) 和 (b) 所示是低放大倍数显微组织，(c) 和 (d) 所示是放大 3000 倍时的显微组织。从整体来看，第二相 Cr 颗粒细小、尺寸均匀、弥散地分布在 Cu 基体上，中心区域的 Cr 颗粒尺寸大约在 3~10 μm 左右，而边缘部分的第二相 Cr 颗粒尺寸大约为 3~5 μm ，平均比中心部分细一倍左右。在雾化喷射沉积成形过程中，沉积坯件的传热主要是靠雾化气体的对流传热来完成，而边缘部分冷却速度远比中心部分的大，从而形成二者组织上的差别。这主要是由于采用固定喷嘴方式制备圆锭时，热焓的输入比较集中，尽管靠近沉积层的固液共存体的凝固状态比较均匀，但在随后沉积层表面剩余

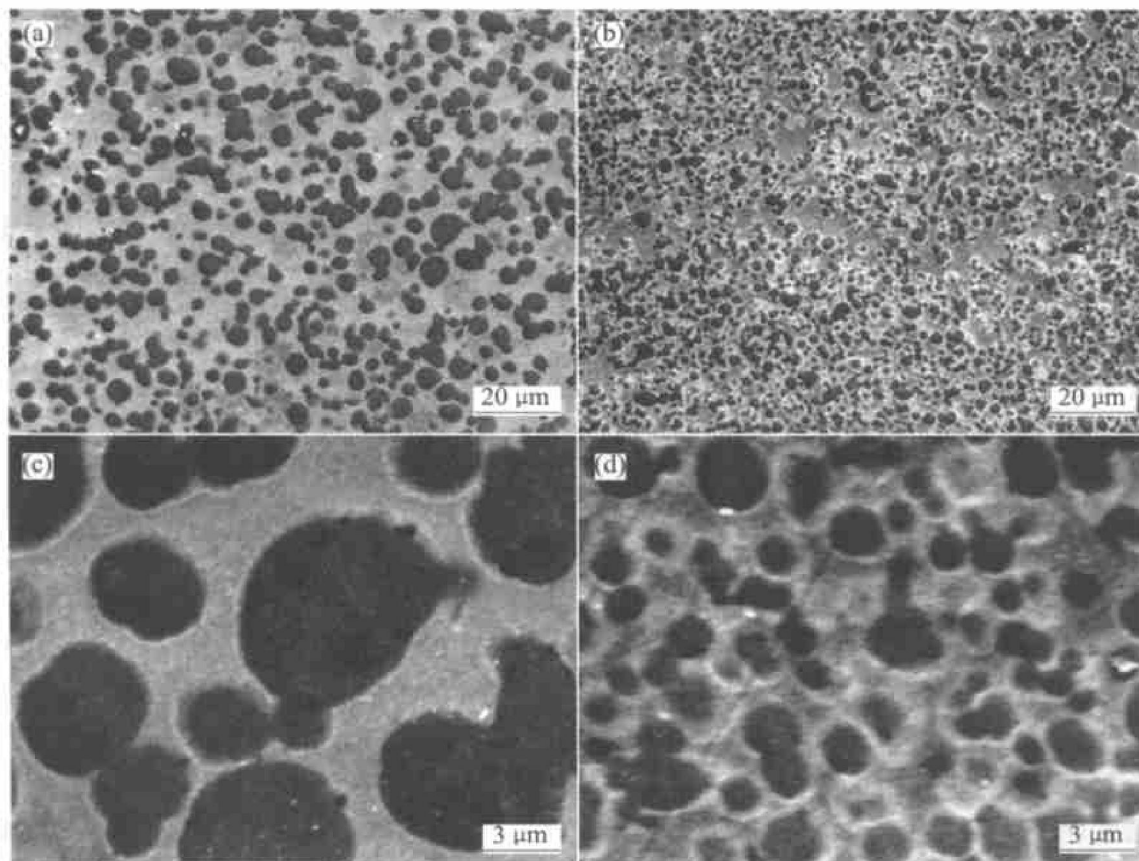


图 2 喷射成形沉积坯件中心和边缘显微组织

Fig. 2 Microstructures of center and edge of CuCr performs

- (a) —Center, low magnification; (b) —Edge, low magnification;
(c) —Center, high magnification; (d) —Edge, high magnification

表 1 工艺参数对沉积坯件的成形性、组织和致密度的影响

Table 1 Effects of technical parameter on formability, microstructure, relative density of CuCr perform

Technical parameter		Property		
Gas pressure/ MPa	Flight distance/ mm	Formability	Grain size/ μm	Relative density/ %
0.5	500	Coarse surface	5~ 15	94
0.5	700	Coarse surface	5~ 15	93
0.6	500	Good	3~ 10	96
0.6	600	Excellent	3~ 8	96
0.6	700	Good	3~ 8	93
0.8	500	Good	3~ 6	94

的固液共存体的凝固速度比较缓慢并随沉积坯件的半径变化, 这种凝固方式导致沉积坯件沿直径方向的微观和宏观组织发生变化, 在沉积坯件的中心区域会出现较大的晶粒和析出物, 而在沉积坯件的外表面晶粒和析出物细小, 孔隙率却增加。随着 G/M (雾化气体质量流率与金属质量流率比) 比值的增大, 雾化液滴到达沉积坯件表面时的固相含量逐渐增大, 沉积坯件的微观组织也发生相应的变化, 同时沉积坯件的收得率逐渐降低。如果采用喷嘴扫描的方式进行喷射成形沉积坯件时, 可有效提高雾化锥热焓输入的均匀性, 减小沉积坯件中心和周边部位散热速度上的差别, 因此通过选择适当的 G/M 比值便可获得整体致密的沉积坯件。

图 3 所示是利用常规工艺制备的 CuCr 合金触头材料显微组织, (a) 所示是真空熔铸 CuCr25 合金的, Cr 相以枝晶形态存在, (b) 所示是真空浸渗 CuCr50 合金的, Cr 相呈颗粒状, 尺寸在 25~ 75 μm 。而利用喷射成形工艺制备的 CuCr 合金触头材料中第二相呈球形均匀分布, 且 Cr 颗粒尺寸大多在 3~ 10 μm 之间, 这将大幅度地提高材料的耐电压性能、抗电击穿性能等电学性能。

图 4 所示是沉积坯件的显微组织, 可以发现 Cr 颗粒与 Cu 基体之间存在一定厚度的过渡层, 沿 Cr 颗粒的直径方向进行 Cu 和 Cr 含量线扫描(如图 4 (b) 所示), 发现大约有 500 nm 的过渡区域, 这说明在制备过程和后续的冷却过程中, Cu 和 Cr 原子发生了迁移。而由于喷射成形是一种快速凝固制备技术, 冷却速度通常可达 $10^3\text{ }^\circ\text{C/s}^{[8]}$, 因此 Cu 基体中 Cr 元素的固溶量也远远大于平衡固溶量, 通过后续热处理, 可以有效地消除过渡层, 同时 Cu 基体中的 Cr 元素将会聚集析出, 从而提高触头材料的电导率。

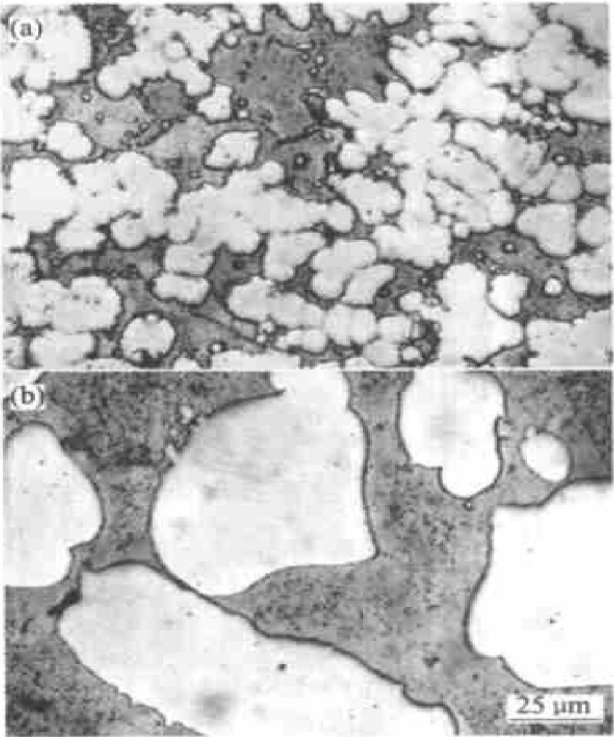


图 3 真空熔铸法(a)和浸渗法(b)制备的 CuCr 合金的显微组织

Fig. 3 Microstructures of CuCr alloy prepared by vacuum casting(a) and infiltration technology(b)

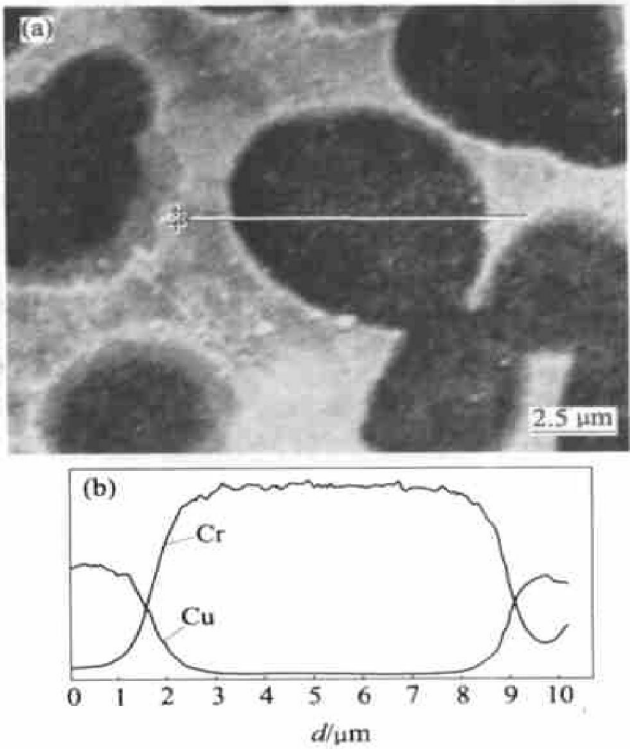


图 4 沉积坯件 Cr 颗粒过渡层形貌(a)及 Cu-Cr 元素线扫描图(b)

Fig. 4 SEM image of Cr particle transition layer of preforms(a) and line scanning diagram(b)

3 结论

1) 利用喷射成形技术制备了雾化温度在 2 000 °C 以上的偏晶系 CuCr25 合金触头材料, 且制备的沉积坯件致密度在 95% 以上。

2) 利用喷射成形技术制备的 CuCr25 合金触头材料具有典型的快速凝固组织, 第二相 Cr 颗粒细小、尺寸均匀、弥散地分布在 Cu 基体上, Cr 颗粒尺寸大约为 3~10 μm。

3) 与传统的混粉法和真空熔铸法制备的触头材料相比, 喷射成形工艺制备的 CuCr 合金的组织更为细小、均匀, 这将会大幅度地提高材料的耐电压性能、抗电击穿性能等电学性能。

REFERENCES

- [1] Slade P G. Advances in materials development for high power vacuum interrupter contacts[J]. IEEF Trans on CPMT, 1994, 17(1): 96-106.
- [2] Werner F R, Michael S, Glatzle W, et al. The influence of composition and Cr particle size of CuCr contacts on chopping, contact resistance and breakdown voltage in vacuum interrupters[J]. IEEF Trans on CHMT, 1989, 12(2): 273-283.
- [3] Morris M A, Morris D G. Microstructures and mechanical properties of rapidly solidified Cu-Cr alloys[J]. Acta Metall, 1987, 35(10): 2511-2522.
- [4] 洗爱平. 大功率真空开关铜铬合金触头材料[J]. 中国

有色金属学报, 2001, 11(5): 731-740.

XIAN Ai-ping. CuCr contact materials for high power vacuum interrupters[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(5): 731-740.

- [5] 张永安, 熊柏青, 刘红伟, 等. CuCr50 合金粉末的制备及微观组织分析[J]. 稀有金属, 2002, 26(4): 245-248.

ZHANG Yong-an, XIONG Bai-qing, LIU Hong-wei, et al. Production and microstructure of CuCr50 alloy power [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2002, 26(4): 245-248.

- [6] 王亚平, 崔建国, 丁秉均, 等. 微晶 CuCr 材料的制备及电击穿性能的研究[J]. 西安交通大学学报, 1997, 31(3): 76-91.

WANG Ya-ping, CUI Jian-guo, DING Bing-jun. Production of microcrystal CuCr alloy and its electricity property[J]. J Xi'an Jiaotong University, 1997, 31(3): 76-91.

- [7] 丁秉钧. 真空断路器触头材料的组织结构控制及其对电性能影响规律[D]. 西安: 西安交通大学, 1990.

DING Bing-jun. Influence of microstructure on dielectric strength of CuCr contact material in vacuum[D]. Xi'an Jiaotong University, 1990.

- [8] 张永安, 熊柏青, 石力开, 等. 喷射成型过程中雾化粒滴的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(S1): 78-83.

ZHANG Yong-an, XIONG Bai-qing, SHI Li-kai, et al. Computer simulation of droplets in flight stage during spray forming process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(S1): 78-83.

Spray forming process and microstructure of CuCr25 contactor material

ZHANG Yong-an¹, XIONG Bai-qing¹, LIU Hong-wei¹,

ZHU Bao-hong¹, SHI Li-kai¹, ZHANG Ji-shan², XIA Xu-li²

(1. Beijing General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China;

2. School of Materials Science and Engineering,

University of Technology and Science Beijing, Beijing 100085, China)

Abstract: The spray forming process of CuCr25 contactor material was researched, the effect of technical parameters upon properties of performs was studied, and the microstructures produced from spray forming process, vacuum casting and vacuum seeping process were compared. The results show that by spray forming, Cr phase is fine and disperse, the microstructure of performs is fine and uniform. The Cr particle size is about 3-10 μm. All of these result in improving the electrical properties of contact materials.

Key words: spray forming; CuCr25 alloy; contact material

(编辑 杨 兵)