

[文章编号] 1004-0609(2001)S1-0098-04

爆炸烧结 CuCr 触头材料的性能^①

李金平¹, 罗守靖¹, 纪松², 胡伟晔², 龚朝晖²

(1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 浙江省宁波市科技委员会, 宁波 315041)

[摘 要] 采用机械合金化工艺由 Cu, Cr 元素粉按质量比各半合成 CuCr 预合金粉, 然后采用爆炸烧结工艺制备真空断路器用电触头材料 CuCr 合金, 着重研究了工艺参数对 CuCr 触头材料性能的影响。结果表明: 采用该工艺能制备高密度(超过 7.398 g/cm^3)、高硬度(超过 HB144)和低电导率(低于 106 kS/m)的 CuCr 触头材料; 球磨时间对 CuCr 合金性能影响较大, 随着球磨时间的增加, CuCr 合金密度和硬度逐渐升高, 而电导率则减小; 装药密度对 CuCr 合金的性能影响较小; 药粉比或药粉筒比选择得太高或太低都会引起 CuCr 合金性能的降低。

[关键词] 机械合金化; CuCr 合金; 爆炸烧结

[中图分类号] TG146.1⁺1

[文献标识码] A

CuCr 合金是目前被广泛采用的、在世界上占主导地位的真空断路器触头材料^[1]。国内外许多研究表明, CuCr 触头材料的显微组织细化、成分均匀化能大幅度提高其耐电压强度^[2]; Cr 粒子细化可提高其击穿电压, 降低最大截流值^[3]。因此, 研究晶粒更细的 CuCr 触点材料具有重要的理论意义和工程应用前景。

爆炸烧结技术^[4]是利用冲击波对粉末绝热压缩瞬间所产生的高压、高温使粉末材料致密并烧结的工艺方法。该工艺最显著特点是^[5]: 由于爆炸烧结在极短的时间(微秒量级)内完成的, 因此复合界面几乎没有扩散或仅有程度很小(100 nm 量级)的扩散。所以对机械合金化工艺制备的 CuCr 合金粉爆炸烧结, 不仅可以克服 CuCr 两相偏析, 而且由于在极短时间内爆炸合成, 晶粒来不及长大, 可以保留机械合金化制得的纳米晶的初始特征^[6], 这样就可望得到性能较好的 CuCr 触点材料。本文采用机械合金化工艺制备 CuCr 预合金粉, 随后爆炸烧结合成 CuCr 合金。重点研究了工艺参数对最终 CuCr 合金性能的影响。

1 实验方法

将工业纯 Cu 粉($< 0.18 \mu\text{m}$, 98%)和自制 Cr 粉($< 0.18 \mu\text{m}$, 98%)按质量比各半与直径 8 mm 的淬火钢球一起装入搅拌式高能球磨机内球磨, 氩气

保护, 水冷循环。球磨条件为: 球料比 10: 1、球磨速度 400 r/min。经过不同球磨时间后取少量粉进行 X 射线衍射分析和扫描电镜分析。用理学 X 射线衍射仪分析粉末结构, 采用 Cu K_{α} 辐射, 扫描速度为 $100 \sim 150 (^{\circ})/\text{min}$ 。利用 S360 型扫描电镜对 CuCr 机械合金化粉的微观形貌进行观察和测量。

将经过不同球磨时间的 CuCr 机械合金化粉放入 20# 钢套中, 上下用 20# 钢堵头封住, 堵头外均匀装上一层硝酸胍炸药, 如图 1 所示。雷管起爆, 利用炸药爆炸时产生的内聚冲击波把粉末压实。

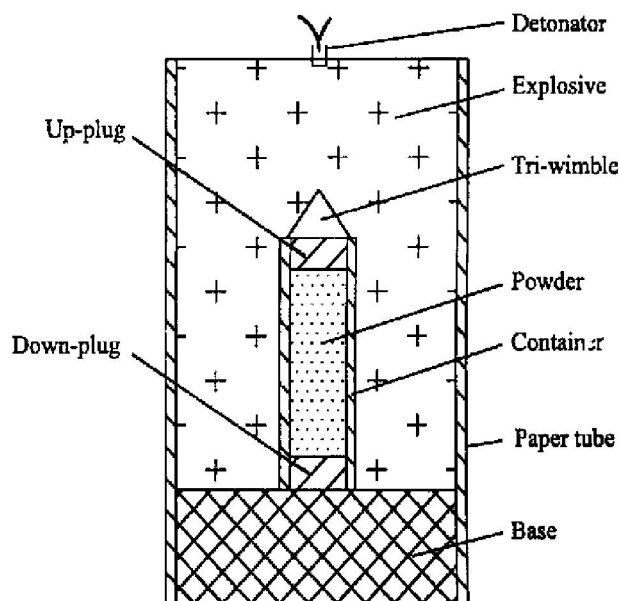


图 1 爆炸压实装置

Fig. 1 Diagram of explosive sintering set

① [基金项目] 宁波市科委青年基金资助项目(9711004)

[收稿日期] 2001-02-10; [修订日期] 2000-09-26

[作者简介] 李金平(1970-), 男, 博士研究生。

将爆炸成型坯在 500 ℃、真空度 $< 10^{-1}$ Pa 的条件下真空退火 5 h, 随后用车床车去包套截取试样。用排水法测试样的密度; 布氏硬度的测量在 HB-300 型布氏硬度计上进行, 测定条件为 1837.5 N 载荷, 直径 2.5 mm 的压头; 电导率的测定在 7501 型涡流电导仪上进行。

2 实验结果

图 2 所示为 CuCr 粉在球料比为 10: 1、球磨速度为 400 r/min 情况下分别经过 3, 5, 7 和 10 h 机械合金化后的 X 射线衍射图。从图 2 可以看出, 随球磨时间延长, 衍射峰不断宽化, 衍射强度逐渐降低, 说明晶粒逐渐变细。图 2 中除了 Cu 和 Cr 相衍射峰外, 没有发现其它相的衍射峰。图 3 所示为 CuCr 机械合金化粉扫描电镜分析示意图。从图 3 可见, 随球磨时间延长, 粉末颗粒逐渐细化, 颗粒大小逐步变得均匀和规则^[7]。

爆炸烧结的实验结果如表 1 所示。

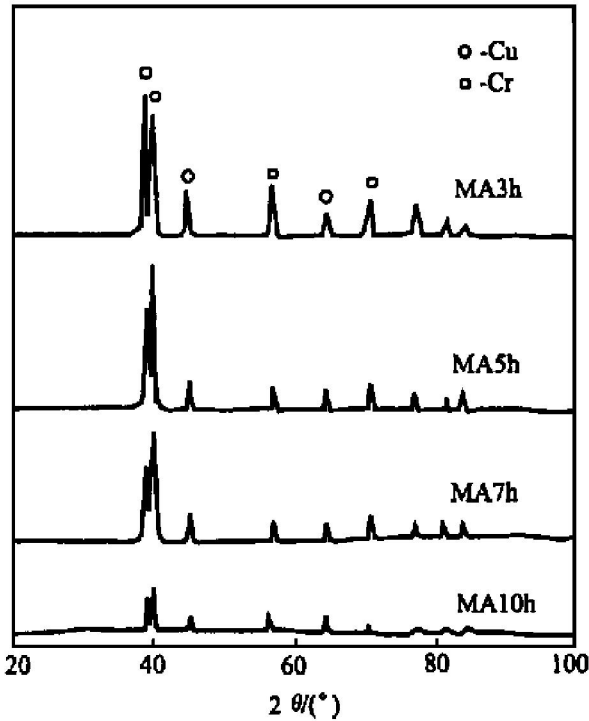


图 2 不同球磨时间后粉末的 XRD 图
Fig. 2 XRD patterns of powders with different grinding time

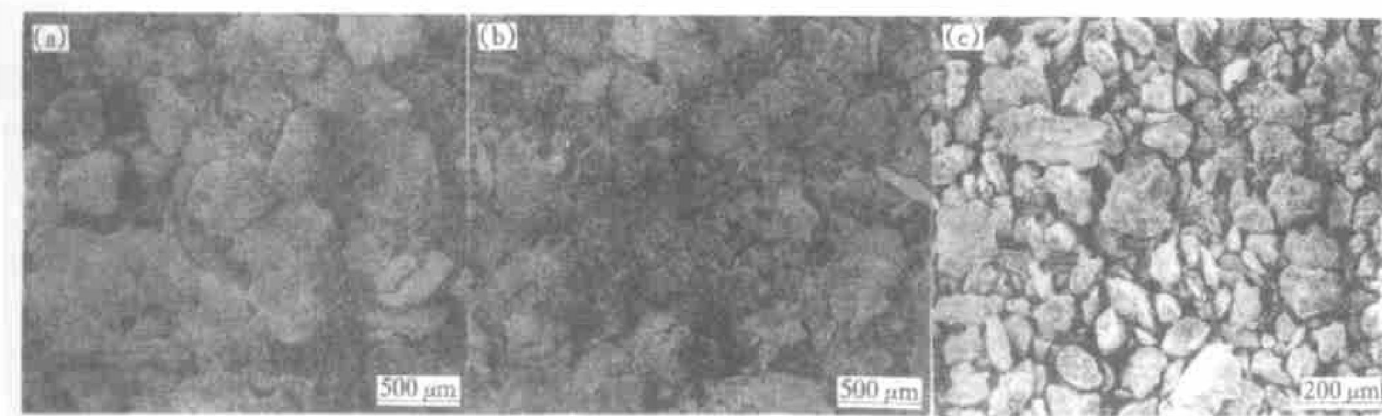


图 3 不同球磨时间后粉末的 SEM 图
Fig. 3 SEM images of powders with different grinding time
(a) —Grinding 5h; (b) —Grinding 10h; (c) —Grinding 15h

表 1 不同工艺参数下爆炸烧结 CuCr 合金的性能

Table 1 Characteristics of CuCr alloys by explosive sintering with different technology parameters							
Sample	Grinding time /h	Explosive density / (g•cm ⁻³)	Ratio of explosive to powder	Ratio of explosive to powder and tube	Density / (g•cm ⁻³)	HB	Conductance / (kS•m ⁻¹)
01	05	0.944	4.587	1.661	7.799	177	106
02		0.941	4.565	1.659	7.791	173	99
03		0.940	4.533	1.652	7.795	168	98
04		1.024	5.313	1.883	7.398	144	50
05	10	1.095	2.549	1.181	7.412	150	56
06		0.950	4.269	1.519	7.801	185	94
07		0.944	3.776	1.541	7.851	179	87
08		0.948	3.768	1.544	7.837	183	92
09	15	0.950	3.930	1.537	7.844	180	92

3 讨论

3.1 工艺参数对爆炸坯密度的影响

爆炸烧结是利用冲击波对粉末绝热压缩瞬间所产生的高压、高温使粉末材料致密并烧结的工艺方法。爆炸时粉末所受到的爆炸压力,由下面等式^[8]可以计算出:

$$p = 0.25 \rho_e v_D^2$$

式中 p 是爆炸压力, ρ_e 是装药密度, v_D 是爆速。由该式可以看到,随装药密度的增加,爆炸压力单调增加,有利于粉末的爆炸压实。但是,过高的装药密度导致高压,当很强的冲击波通过粉末时,将产生多余的能量。它们在压坯中心会合产生马赫反射^[9],使中心材料熔化喷出。而反射的压力波在圆柱试样的外表面被重新反射,并作为稀疏波返回到试样中心,因而在中心产生裂纹和孔洞。所以,随着装药密度的增加,爆炸坯密度先升高,后减小,有一个最大值。在本实验条件下,当 $\rho_e = 0.944 \text{ g/mm}^3$ 时,爆炸坯密度最高,达到 CuCr 合金理论密度的 98.63%。

反映装药质量多少的有两个参数,即药粉比和药粉筒比^[10]。药粉比是指所装炸药的质量和所装粉末的质量的比值,药粉筒比是指所装炸药的质量除以所装粉末量和装粉套筒质量的和。药粉比只考虑炸药与粉末之间的关系,忽略了装粉套筒的影响。实际上,爆炸能总有一部分能量被套筒吸收转变为变形能(包括弹性变形和塑性变形)和热能。药粉筒比能比较客观地反映爆炸过程,但药粉筒比没有考虑到爆炸功分配在粉末吸收和套筒吸收能量的多少,只考虑粉末和套筒总的吸收能。因此药粉比和药粉筒比都只能近似反映对爆炸坯密度的影响,不能反映很直接的影响关系。总的来说,两者数量的增加,反映了炸药量的增加,对爆炸成型有利,但炸药量过多会引起中心孔洞和裂纹,导致密度下降。从表 1 的结果可以看出,当药粉比为 4 左右,或药粉筒比为 1.6 左右时,爆炸烧结坯的密度较高;如果两者选得过大或过小,都会使爆炸烧结 CuCr 合金密度下降。

由上面分析可知,随球磨时间的延长,粉末逐渐变细和均匀化,Cu 和 Cr 两相均匀混合对爆炸烧结有利。但是,粉末太细使整个总的比表面积加大,相同质量下粉末颗粒数目变多,相同爆炸能的情况下每个细颗粒分配的爆炸能减小,同时,球磨时间长粉末畸变增加,颗粒硬化明显,使粉末爆炸

烧结不利。因此球磨时间的影响变得较为复杂,但由于本研究采用的球磨时间比较短,有利的影响占主导,所以随球磨时间的延长,爆炸烧结坯的密度单调增加。

3.2 工艺参数对爆炸坯硬度的影响

在所选择的工艺参数条件下,爆炸烧结坯的布氏硬度比传统烧结的 CuCr 合金都要高,跟热挤压^[11]的硬度相似。本研究所用 CuCr 合金是由机械合金化后经爆炸烧结而成,机械合金化粉在球磨的作用下畸变能增加,粉末硬化明显;爆炸烧结不仅产生高的空位密度和位错密度,而且使部分已熔化的原始粉末表面产生快速凝固,所有这些因素都可能导致高硬度^[12]。

粉末冶金件的硬度随着密度的提高而提高。从表 1 可以看出,随着球磨时间的延长,CuCr 合金的布氏硬度逐步增加。但是,球磨 10 h 的试样有两个硬度较低,这是因为一个药粉筒比太大、另一个又太小,这两者均导致试样密度较低。

3.3 工艺参数对爆炸坯电导率的影响

电导率是衡量金属或合金导电能力的重要指标,电导率越高,金属导电能力越强。金属的导电能力不是一成不变的,它要受温度、杂质、变形以及热处理等的影响^[13];粉末冶金件的电导率还受密度、粉末初态、硬度等的影响。由于机械合金化导致粉末颗粒硬化及畸变能增加,并且爆炸成型引起晶格畸变,使晶体中出现空位、置换原子和位错,引起晶面弯曲等现象,造成电子波散射、电导率降低,因此本工艺制备的 CuCr 合金的电导率比其它工艺制备的 CuCr 合金的电导率相对要低。

从表 1 的结果可以看出,随球磨时间的延长,CuCr 合金坯的电导率总的趋势是逐渐降低。只是球磨 10 h 的 2 个试样例外,这可能是因为 CuCr 合金坯的密度较低,导致了电导率的下降。

4 结论

- 1) 本工艺能制备密度和布氏硬度较高、电导率较低的 CuCr 合金;
- 2) 球磨时间对爆炸 CuCr 合金坯性能影响较大,随球磨时间的延长,其密度、硬度增加而电导率下降;
- 3) 装药密度影响较小,这可能是因为本文选用的装药密度都比较适当;

4) 药粉比和药粉筒比也对 CuCr 合金的性能也有影响, 两者选得太大或太小, 都会引起密度、硬度和电导率的降低。

[REFERENCES]

- [1] WANG Yaoping(王亚平), ZHANG Lina(王丽娜), YANG Zhima(扬志懋), et al. 细晶-超细晶 CuCr 触头材料的研究进展[J]. High Voltage Apparatus (高压电器), 1997, 33(2): 34– 39.
- [2] ZHOU Wuping(周武平). 关于 CuCr 触头材料几个问题的探讨[J]. High Voltage Apparatus(高压电器), 1997, 32(5): 22– 26.
- [3] YAN Qun(严群). 真空触头材料显微组织对饱和蒸汽压及截流值的影响[J]. High Voltage Apparatus (高压电器), 1995, 31(6): 28– 31.
- [4] DONG Ming(董明). 粉末材料的爆炸烧结[J]. Development and Application of Materials (材料开发与应用), 1995, 10(3): 29– 33.
- [5] YANG Yang(杨扬), ZHANG Xinming(张新明), LI Zhenghua(李正华), et al. 爆炸复合的研究现状和发展趋势[J]. Materials Review (材料导报), 1995 (1): 72– 76.
- [6] Huang S, Mashimo T. Preparation of FeW system metastable alloy bulk body by mechanical alloying and shock compression [J]. J Mater Process Tech, 1999, 85: 135– 137.
- [7] LI Jinping(李金平), LUO Shoujing(罗守靖), GONG Zhao-hui(龚朝晖), et al. CuCr 机械合金化工艺的研究[J]. Ordnance Material Science and Engineering (兵器材料科学与工程), 2000(6): 37– 42.
- [8] Hoening C L, Yust C S. Explosive compaction of AlN, amorphous Si₃N₄, boron, and Al₂O₃ ceramics [J]. Ceram Bull, 1981, 60(11): 1175– 1224.
- [9] Peng T C, Sastry S M L, O' Neal J E, et al. Explosive consolidation of rapidified aluminum alloy powders [J]. Metall Tran A, 1985, 16(8): 1445– 1455.
- [10] Mamalis A G, Gioftsidis G N. Fracture patterns in explosively compacted copper/ graphite powders rods [J]. J Mech Work Tech, 1989, 19: 239– 249.
- [11] Morris D G, Morris M A. Rapid solidification and mechanical alloying techniques applied to CuCr alloys [J]. Mater Sci Eng, 1988, A104: 201– 213.
- [12] Prümmer R. Explosive compaction of powders, principle and prospects [J]. Mat wiss u Werkstofftech, 1989, 20: 410– 415.
- [13] CHEN Xianwen(陈宪文), WENG Shiyao(翁世耀), CHENG Yushu(程玉书). Electrical Engineering Materials (电工器材)[M]. Beijing: China Railway Press, 1983. 101– 106.

Characteristics of CuCr contact materials made by explosive sintering

LI Jin-ping¹, LUO Shou-jing¹, JI Song², HU Wei-ye², GONG Zhao-hui²

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology,

Harbin 150001, P. R. China;

2. Sci-Tech Committee of Ningbo, Ningbo 315041, P. R. China)

[Abstract] The CuCr alloy powders (the mass ratio was 1: 1) were made by mechanical alloying, then CuCr alloys for the vacuum breaker were prepared by explosive sintering. The effect of the technology parameters on the characteristics of the CuCr contact materials was studied. The results show that CuCr contact materials with higher density ($> 7.398 \text{ g/mm}^3$), higher rigidity ($> \text{HB144}$) and lower conductance (106 kS/m) can be made by the process; grinding time has important effect on the characteristics of CuCr alloy, the longer the grinding time is, the higher the density and the rigidity of the CuCr alloy is, and the lower the conductance of the CuCr alloy is. The effect of the explosive density on the characteristics of CuCr alloys is not obvious; when the ratio of explosive to powder or the ratio of explosive to powder and tube is too large or too low, the characteristics of the CuCr alloys are deteriorated.

[Key words] mechanical alloying; CuCr alloys; explosive sintering

(编辑 何学锋)