2017年3月 March 2017

DOI: 10.19476/j.ysxb.1004.0609.2017.03.008



# 高致密细晶 W-25Cu 触头材料的电接触性能

万成<sup>1</sup>,李继文<sup>1,3</sup>,王展<sup>1</sup>,马窦琴<sup>1</sup>,魏世忠<sup>2</sup>,张国赏<sup>1,3</sup>,徐流杰<sup>2</sup>

(1. 河南科技大学 材料科学与工程学院,洛阳 471023;
 2. 河南省耐磨材料工程技术研究中心,洛阳 471003;
 3. 河南省有色金属共性技术协同创新中心,洛阳 471023)

**摘 要:**由水热-共还原法制备出的原位共生 W-25Cu 复合粉末,经冷等静压、真空热压联合包套挤压工艺获得 相对密度大于 98%,导电率为 42.7%IACS,硬度为 246HB 的高致密细晶 W-25Cu 电触头材料。材料显微组织中 W 相和 Cu 相分布均匀,颗粒细小(1~3 μm)。在 JF04C 型电接触试验机上进行电接触实验,研究其在直流、阻性 负载条件下的电接触性能。结果表明:提高钨铜合金致密度、细化晶粒可以减小并稳定接触电阻;燃弧时间和燃 弧能量均随电压的增大而增大,分断过程燃弧能量和燃弧时间均小于闭合过程燃弧时间和能量。W-25Cu 电触头 材料经电侵蚀后,材料表面主要由 Cu、W 和 WO<sub>3</sub> 三相组成。电接触过程中发生的材料转移以熔桥转移、电弧转 移和喷溅蒸发等形式为主;随着电压的增大,发生材料转移方向的转变,即由阴极转移变为阳极转移。 关键词:高致密;细晶;接触电阻;电弧侵蚀;材料转移

文章编号: 1004-0609(2017)-03-0504-10 中图分类号: TG146.41 文献标志码: A

电触头是断路器、开关柜、隔离开关、接地开关 的重要部件,担负着接通和分断电流的任务,对开关 电器的安全运行起着决定性作用,其性能的好坏直接 影响着开关电器的开断容量、使用寿命以及运行可靠 性<sup>[1]</sup>。

理想的电触头材料必须满足热导率高、热稳定性 好、蒸汽压低; 耐电弧烧蚀、接触电阻低且稳定; 强 韧性好、硬度高且具备良好的加工性能等<sup>[2-3]</sup>。在传统 的电接触材料中,银由于导热性导电性以及加工性好, 接触电阻稳定,因此银基金属氧化物如 Ag/CdO 和 AgSnO2 等电接触材料发展迅速<sup>[4-7]</sup>。但随着各类产品 向高精度和微型化发展,对电接触元件的性能提出了 更高的要求:小而稳定的接触电阻、高的化学稳定性、 耐磨性和抗电弧烧蚀能力等。由于银基触头材料接触 电阻较大, 且银基电接触材料中含有 Cd 等毒性元素, 使得银基电接触材料的应用受到限制<sup>[8-9]</sup>。而 W-Cu 电 接触材料则兼具 W 的抗电蚀性、抗熔焊性和 Cu 的高 电导率、热导率等优点得以迅速发展[10-11]。但是由于 W、Cu之间的润湿角极小,通过传统的溶渗粉末冶金 法难以制备出高致密度的的 W-Cu 电接触材料,因此 通过制备超细或者纳米粉体来制备高致密 W-Cu 复合 材料成为人们研究的重点。如张会杰等<sup>[12]</sup>用水热法制 备出了纳米级 W-Cu 复合粉末,陈文革等<sup>[13]</sup>用机械化 合金法制备出致密度为 99.5%的纳米晶钨铜电接触材 料,LI 等<sup>[14]</sup>通过粉末包套热挤压工艺成功制备出 W-40Cu 复合材料。热挤压工艺在较低的温度就可以 获得高致密 W-Cu 触头材料,同时能够抑制晶粒长大, 因此,本文作者采用水热-共还原法制备了原位共生 纳米 W-25Cu 复合粉末,经冷压成块、真空烧结预成 型结合包套挤压终致密化工艺制备出了高致密、细晶 W-25Cu 电接触材料,并对电接触材料进行电接触性 能测试,研究了电压、试验次数等因素对电接触材料 侵蚀性能的影响,分析了电接触性能测试过程中接触 电阻、燃弧能量和时间的变化规律以及电侵蚀后物相 变化和材料转移方式等,为原位法制备钨铜电接触材 料的应用提供理论基础。

### 1 实验

以工业钨酸钠和硝酸铜为原料,按 W-25Cu 计算 配料并分别配成溶液,将适量的氨水加入硝酸铜溶液

基金项目:河南省重点科技攻关项目(111100910500);河南省教育厅自然科学研究项目(2010A430004)

收稿日期: 2015-08-25; 修订日期: 2016-12-19

通信作者: 李继文, 教授, 博士; 电话: 13525983980; E-mail: ljwzq@163.com

中,再将其与钨酸钠溶液混合并调节 pH 值为 5.5,放 进高压反应釜进行水热反应。反应时间为 25 h,反应 温度为 180 ℃。将前驱粉体经抽滤、洗涤和干燥后, 500 ℃焙烧 2 h 除去水分及杂质元素,然后在推杆式 还原炉中于 800 ℃下反应 90 min 即可获得 W-25Cu 复 合粉末。还原介质为 H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>。

将W-25Cu复合粉末在280 MPa压力下冷等静压, 保压 30 min 获得冷压坯;将冷压坯(1050 ℃,1.5 h) 保温真空烧结预致密化;然后将坯料包 45 号钢套进行 热挤压,钢套内径 35 mm,壁厚 5.5 mm,孔隙部分用 石墨粉填充,加热温度 1050 ℃,保温 30 min,挤压 速率 10 mm/s,挤压比为 7.72。

在 JF04C 型触电试验机上进行特定直流、阻性负载燃弧实验,电接触所用触头尺寸为 d4 mm×1.5 mm。试验具体参数: 电源电压 18~48 V,电源电流 20 A,触电间距 1.0 mm,闭合压力 0.6 N,接触频率为 60次/min;操作方式为分断-闭合,操作次数为 5000次。

采用 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射分析仪进行物 相分析;利用钨灯丝扫描电镜(TESCAN, VEGA 3 SBH) 和高分辨透射电子显微镜(HRTEM, JEM-2100)对粉末 形貌以及材料显微组织进行表征。触头在测试前后在 分析天平(0.1 mg)上称取质量。

### 2 结果与讨论

#### 2.1 超细 W-25Cu 复合粉末形貌特征

图1所示为水热-共还原法制备的W-25Cu复合粉末的SEM像。由图1(a)可知,复合粉末粒度细小、均匀。由图1(b)可知,W相(亮色)和Cu相(暗色)分布均匀,W颗粒尺寸介于400~600 nm,较大的W颗粒则由小颗粒团聚而成,同时可以看出W颗粒多呈现多边形形貌,而Cu相大都为球状,表面光滑。

### 2.2 高致密细晶 W-25Cu 触头材料的显微组织及其 相关性能

图 2 所示为制备的高致密细晶 W-25Cu 触头材料 显微组织及断口形貌。由图 2 可知,W-25Cu 触头材 料组织呈现全致密化特征,细小的 W 颗粒(白色)几乎 完全被 Cu 相(灰色)包围,W、Cu 两相分布均匀,W 晶粒细小,介于 1~3 μm 之间,没有出现熔渗法所特 有的偏析现象。断口呈现典型的韧窝断口形貌。Cu 相形成连续网状骨架包围 W 颗粒,断裂过程中形成许 多细密、弯曲的撕裂棱,断口韧窝细小、稠密。



图 1 W-Cu 复合粉末的 SEM 像

**Fig. 1** SEM images of W-Cu composite powders: (a) SE; (b) BSE



**图 2** 热挤压所获得 W-25Cu 电触头材料的显微组织及断口 形貌

**Fig. 2** Microstructure (a) and fracture morphology (b) of W-25Cu contact material

研究表明<sup>[15-16]</sup>,具有 Cu 网络结构的 W-25Cu 电接触材料为理想的电接触材料,既发挥了 W 颗粒的细晶强化和弥散强化作用,又很好的利用了 Cu 的高导电性,使得制备的 W-25Cu 电接触材料具有高硬度、良好的抗机械和电磨损性能的同时又具有良好的导电性。JOHNSON 等<sup>[17]</sup>研究也发现,材料的显微组织对其导电性有很大影响,晶粒的细化可以极大地提高其综合性能。表 1 所示为所得到的 W-25Cu 电接触材料的物理性能:致密度 98.8%,硬度 246HB,导电率42.7%IACS。上述性能不仅优于罗昊等<sup>[18]</sup>用熔渗法制备 W-25Cu 电触头材料,同样优于同类国标 W-Cu 触头材料的性能<sup>[19]</sup>,表现出良好的综合使用性能。

#### 表1 W-25Cu 电触头材料的性能

Table 1	Properties	of W-25Cu	contacts	material
	1.00001000	01 11 2004	••••••••	

Preparation technique	Relative density/%	Hardness, HB	Conductivity (IACS)/%
Hot extrusion	98.8	246	42.7
Infiltration process <sup>[18]</sup>	96.4	138	38
National standard <sup>[19]</sup>	96.8	195	38

采用本工艺得到性能优良的 W-25Cu 电接触材 料,与水热法制备的原位共生超细 W-25Cu 复合粉体 密不可分。由水热法制备的 W-25Cu 复合粉末粒度细 小,W、Cu 两相分布均匀。粉末细小,挤压过程粉 末之间的接触面积大,表面活性大,挤压驱动力大, 挤压温度低,致密化过程快,制备的材料致密度高, 综合性能好。经过冷等静压和真空热压烧结预成型的 挤压坯致密度已达到 85%左右,在热挤压过程中软融 的 Cu 相可以很好地填补 W、Cu 两相之间的孔隙,使 得 W-25Cu 电接触材料致密度高。同时,较低的挤压 温度(1050℃)又可以很好地抑制 W 颗粒的长大,使得 材料晶粒细小。图 3 所示为 W-Cu 电接触材料的 TEM 图片,可看出,细小 W 颗粒均匀分布在 Cu 基体中, 极大地增强了材料的硬度、抗磨损等性能,同时组织 内含有的大量位错也提高了材料的强度。

#### 2.3 电弧侵蚀过程接触电阻变化

图4所示为操作电流20A/5000次操作条件下接触 电阻随电压的变化曲线。由图可以看出,高致密细晶 W-25Cu 触头材料接触电阻很小,介于 0.5~0.61 mΩ; 同时还可发现,电压的变化对接触电阻的影响不大。 电压小于 36 V 时接触电阻几乎不变,保持在 0.4995 mΩ 左右;而当电压增加至 48V 时,接触电阻仅增加 了 0.1054 mΩ。由此表明,提高 W-25Cu 触头材料致 密度、细化晶粒可以降低并稳定接触电阻,避免接触 温度的大幅度升高,减小触头熔焊现象的发生,在工 作过程中显示出稳定的电接触性能。

研究表明<sup>[20]</sup>,影响材料电阻的因素很多,如材料 组分、颗粒尺寸及分布、孔隙率、合金化程度等。粉 末粒度细小,烧结性能越好,孔隙率越小,对降低复 合材料的接触电阻越有利;颗粒呈球形,桥接越小, 孔隙率也最小;粉末组分元素分布越均匀,材料的接 触电阻越低。用水热法-共还原法制备的W-25Cu复合 粉末,粒度细小,W、Cu两相分布均匀,经后续工艺 制备出的电接触材料成分均匀、致密度高、孔隙率低, 形成特殊的Cu网络状结构,这都极大地降低了材料的 接触电阻。同时,W-25Cu复合粉末大都成近球形,也 使得制备的电接触材料孔隙率低,接触电阻低。



图 3 W-25Cu 电触头材料的 TEM 像

Fig. 3 TEM image of W-25Cu contact material



图 4 接触电阻与电压的关系



#### 2.4 侵蚀过程燃弧能量及时间变化

图 5 所示为实验过程中 W-25Cu 触头材料在 20 A/5000 次操作条件下分断、闭合过程的燃弧能量变化 曲线。由图 5 可知,无论是分断还是闭合过程,随着 电压的增大,燃弧能量随之增大,分断过程能量均远 小于闭合过程能量。在电压小于 36 V 时,分断过程能 量值变化比较稳定,闭合过程能量值在工作次数达到 一定值时燃弧能量发生突变,且增大突变节点由 18 V 的 3500 次变为 24 V 的 1000 次。而当电压大于 36 V 时,随着工作次数的增加分断过程能量值出现突变, 能量值减小,且突变节点由 36 V 的 4000 次降到 48 V 的 2500 次,而闭合过程的能量值则减小。

闭合过程的能量均大于分断过程的能量,是因为 在触头间距逐渐缩小过程中,接触初期只发生几个凸 起的少数尖峰上。当电流由金属导体流经这些实际接 触点时,就会使得电流密度突然增大,产生较大的冲 击电流,使得瞬时功率急剧升高,产生的能量也比较 大。在触头分断过程中,随着触头间距的增大,接触 力减小,接触面积也减小,接触电阻相应增大,在接 触最后分离前的一瞬间,能量集中在最后离开的几个 微小区域上,使其周围的温度迅速升高至金属的沸点 而引起汽化并引起电弧。同时发生触头材料的熔融、 汽化和喷溅,使得触头在分断过程中产生的能量大部 分以热能和动能的形式散失,造成分断过程的能量值 远小于闭合过程的能量值。 图 6 所示为 W-25Cu 触头材料在 20 A/5000 次操 作条件下分断、闭合过程中燃弧时间随电压的变化曲 线。与燃弧能量的变化规律一样,燃弧时间也是随着 电压的增大而增大,闭合过程的燃弧时间大于分断过 程的燃弧时间。在电压大于 36 V 时,分断过程燃弧时 间变化较小,闭合过程燃弧时间对着操作次数的增加 出现突变而增大,并且随着电压的增大,突变节点由 18 V 的 3500 次降为 24 V 的 1000 次。当电压大于 36 V 时,分断过程随着操作次数的增加燃弧时间发生突变 而减小,突变节点由 36V 的 4000 次变为 48V 的 2500 次。闭合过程燃弧时间随着操作次数的增加变化较小。

根据电弧能量公式可知,*i*ar增加,*W*ar增加,电压 不变或变化很小,则在灭弧能力保持不变的情况下, 要熄灭较大能量的电弧,必须增加灭弧时间。因此燃 弧时间与燃弧能量的变化规律一致。

$$W_{\rm ar} = \int_{0}^{t_{\rm ar}} U_{\rm ar} \mid i_{\rm ar} \mid dt = f(U_{\rm ar}, i_{\rm ar}, t_{\rm ar})$$
(1)

式中: $W_{ar}$ 为燃弧能量,J; $t_{ar}$ 为燃弧时间,ms; $U_{ar}$ 为触头间电压,V; $i_{ar}$ 为触头间电流,A。

### 2.5 W-25Cu 电触头材料侵蚀后的物相变化及材料 转移

图 7 所示为 W-25Cu 触头材料电弧侵蚀前后触头 材料阳极和阴极表面物相变化的 XRD 谱。可以看



图 5 触头分断、闭合条件下燃弧能量与电压的关系

Fig. 5 Relationship between arc energy and voltage during break and make operation: (a) Break operation; (b) Make operation



图 6 触头分断、闭合条件下燃弧时间与电压的关系

Fig. 6 Relationship between arc duration and voltage during break and make operation: (a) Break operation; (b) Make operation



图 7 W-25Cu 触头材料电弧侵蚀前后表面 XRD 谱

Fig. 7 XRD patterns of W-25Cu contactor before and after arc erosion: (a) Before arc erosion; (b) After arc erosion

出,经电弧侵蚀后,触头表面物相构成除了 Cu、W 两 相外,又生成了新相 WO<sub>3</sub>,表明 W 相经电弧侵蚀后 被氧化,而 Cu 则没有被氧化。由 XRD 谱深入分析发 现,电弧侵蚀后 Cu 的衍射峰强度增强,表明电弧侵 蚀后触头表面铜含量增多。图 8 及表 2 所示为电弧侵 蚀后阴阳极触头表面的 SEM 形貌及 EDS 分析,由图 可知阴极灰色 Cu 相区域多于阳极灰色 Cu 相区域,由 此可知,经电弧侵蚀后阴极表面铜含量增加较多。

分析认为,由于W的熔点远远高于Cu的熔点,

电弧热产生的高温使得触头表面的 Cu 相率先融化并 铺展在触头表面,使得触头表面的 Cu 含量明显高于 W 含量。同时,随着接触次数的增加,阳极热量逐步 增加,使得阳极表面融化并形成熔池,熔池中的金属 Cu 在热场、电子轰击力和电场力共同作用下发生气化 和喷溅,产生大量的 Cu 液滴和蒸汽。韩波等<sup>[21]</sup>认为, Cu 在发生汽化和喷溅时脱离本体的速度方向具有分 散性,一部分沉积在阴极;而进入阴阳极之间的 Cu 液滴在高温作用下很快会被气化成原子态的高温蒸



#### 图 8 W-25Cu 电触头材料侵蚀形貌

Fig. 8 Arc erosion morphology of W-25Cu contact material: (a) Cathode; (b) Anode

#### 表2 能谱分析数据

Table 2	EDS analysis of	W-25Cu	contact material
---------	-----------------	--------	------------------

Sample -		С	u	V	V	(	C
		w/%	<i>x</i> /%	w/%	<i>x</i> /%	w/%	<i>x</i> /%
Cathode	Area 1	61.52	64.21	32.69	11.79	5.79	24.00
	Area 2	29.40	32.47	60.47	23.08	10.15	44.86
Anode	Area 1	54.32	50.80	35.52	11.48	10.15	37.71
	Area 2	24.52	26.81	64.22	24.28	11.26	48.91

汽,蒸汽在电弧中电子的碰撞下部分蒸汽会电离成离子,在电场力的作用下向阴极移动,使得阴极表面的 Cu含量明显多于阳极。

图 8 中触头表面形貌较为平整,没有明显的裂纹 及孔洞,也没有明显的大块凸起或者凹坑,说明本实 验制备的高致密度细晶 W-25Cu 电接触材料有良好的 抗侵蚀性能。W-25Cu 电接触材料中的 W、Cu 两相的 原子比接近于 1:1,使材料具有很好的导热性,在电弧 高温下材料表面降温较快,熔融部分可以较快凝固, 同时弥散 W 颗粒发挥增强相作用,减少了材料的飞 溅。而 Cu 网络的存在使得材料具有良好的导电性, 避免产生较多的焦耳热,同样降低了材料的因喷溅和 蒸发而造成的损失。

图 9 所示为 W-25Cu 触头材料电接触过程中的质量损耗变化曲线。由图 9 可知,触头的侵蚀量随着电压的变化随之变化,当电压小于 36 V 时,此时为阴极转移,即阴极质量减小,阳极质量增加,且随着电压的增大转移量减小。当电压大于 36 V 时,触头材料发生转移方向的转变,由阴极转移变为阳极转移,即阳极失重阴极质量增加,并且材料转移量急剧增大。而总质量变化平缓。由此前燃弧能量变化曲线分析可知,材料转移方向的变化与燃弧能量的变化有着密切关系。



图 9 触头阳极、阴极及总质量变化与电压的关系 Fig. 9 Relationships between voltage and mass of anode, cathode and sum total

引起材料转移的主要原因有熔桥转移和电弧侵 蚀<sup>[22-23]</sup>。触头在分断过程中,由于接触力较小,承载 电流的接触斑点减小到一个或几个,使得因电流收缩 造成的欧姆热急剧增大,引起收缩点附近的电极材料 融化,从而形成一个个液态熔桥,随着分离过程的进 行,熔桥的直径减小,长度增大,从而引起熔桥断裂。



如果熔桥断裂前完全对称受热,则熔桥就在其几何中 心断裂;由于熔桥受热一般都偏离中心,其断裂位置 偏向某一电极,从而引起材料转移。图 10(a)所示为在 分段瞬间形成的熔层表面凹凸不平以及由于熔桥断裂 而形成的螺旋状凝固物。而局部地区由于温度下降较 快,在触头分断过程中由于粘连而出现凹坑,如图 10(b) 所示。

当触头逐渐闭合时,触头间的气体被电离成气体 离子,产生气相电弧。气体阳离子在轰击阴极表面时 造成阴极表面金属熔融并发生飞溅,部分沉积在阳极 表面,此时发生阴极材料向阳极转移。由于发生气相 电弧的时间短,因此气相引起质量的迁移比较小。随 着电压的增大,电流密度增大,产生的热量增加,促 进电极表面材料的融化和蒸发,较多的金属蒸汽进入 触头间隙,金属原子被电离成离子并在电场的作用下 向阴极移动并沉积在阴极,而自由电子在电场力的作 用下轰击阳极表面,产生金属原子并把能量传递给金 属原子。当能量足够大时,金属原子运动到阴极表面 并在阴极表面沉积。因此在金属蒸汽阶段,材料的转 移方向是从阳极转向阴极。随着操作次数增加,触头 表面发生 Cu 相融化并经液化、气化后脱离阳极表面, 在到达阴极表面过程中吸收大量空气并快速冷却凝固 而形成珊瑚状形貌,如图 10(c)所示。在触头将要闭合 时,触头速度较大,猛烈撞击熔池内部会造成熔池内 金属溶液的飞溅,如图 10(d)所示。金属溶液溶解很多 空气, 熔池内的气泡会急剧膨胀并在电弧消失后从熔 池内爆炸式逸出,这样触头表面会留下火山口式的较 大的喷发凹坑,如图 10(e)所示。因此在触头分断闭合 过程中,材料的转移形式主要以熔桥转移、电弧转移 和喷溅蒸发为主,其中熔桥转移和粘连凹坑主要发生 在触头分断过程,而电弧转移主要发生在触头闭合过 程中,而又以金属蒸汽电弧和飞溅蒸发形式为主。

### 3 结论

 W-25Cu 复合粉末经冷等静压、真空烧结预成型和热挤压终致密化工艺后,可得到高致密、细晶、 电接触性能良好的 W-25Cu 电触头材料。其相对密度为98.8%,导电率为42.7%IACS,硬度为246HB。

2) W-25Cu 电触头材料接触电阻小且稳定,提高 铜合金致密度、细化晶粒可以降低并稳定接触电阻。 燃弧时间和燃弧能量都随着电压的增大而增大,分断 过程燃弧能量和燃弧时间均远小于闭合过程燃弧能量 和时间。

3) W-25Cu 触头材料电侵蚀后主要由 Cu、W 和WO<sub>3</sub>三相组成。电接触过程中表现出良好的抗侵蚀性能,随着电压的增大发生材料转移方向的转变即由阴极转移变为阳极转移。材料转移以熔桥转移、电弧转移和喷溅蒸发等形式为主。融桥转移和喷溅蒸发形式主要发生在触头分断过程,电弧转移主要发生在触头闭合过程中。

#### REFERENCES

- 陶麒鹦,周晓龙,周允红,张浩. AgCuO 电接触材料的电接 触性能[J].中国有色金属学报, 2015, 25(5): 1244-1249.
   TAO Qi-ying, ZHOU Xiao-long, ZHOU Yun-hong, ZHANG Hao. Electrical contact properties of AgCuO electrical contact materials[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(5): 1244-1249.
- [2] 陶麒鹦,周晓龙,周允红,张 浩. AgCuO 电触头材料的接触 电阻及电弧侵蚀形貌分析[J].稀有金属材料与工程,2015, 44(5):1219-1223.

TAO Qi-ying, ZHOU Xiao-long, ZHOU Yun-hong ZHAN Hao. Contact resistance and arc erosion morphology of AgCuO electrical contact material[J]. Rare Metal and Materials and Engineering, 2015, 44(5): 1219–1223.

- [3] WANG Song, ZHENG Ting-ting, XIE Ming, WANG Ya-xiong, ZHANG Ji-ming. Internal oxidation thermodynamics and isothermal oxidation behavior of AgSnO<sub>2</sub> electrical contact materials[J]. Rare Metal and Materials and Engineering, 2014, 43(4): 796–798.
- [4] ZHU Yan-cai, WANG Jing-qin, AN Li-qiang, WANG Hai-tao. Preparation and study of nano-Ag/SnO<sub>2</sub> electrical contact material doped with titanium element[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(7): 11–14.
- [5] 刘方方,陈敬超,郭迎春,耿永红,管伟明.反应合成

AgSnO<sub>2</sub> 电接触材料的电接触性能研究[J]. 稀有金属, 2007, 31(4): 486-490.

LIU Fang-fang, CHEN Jing-chao, GUO Ying-chun, GENG Yong-hong, GUAN Wei-ming. Performances of AgSnO<sub>2</sub> electrical contact materials fabricated by reactive synthesis[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2007, 31(4): 486–490.

[6] 王清周,路东梅,崔春翔,徐 萌. Cu 基电触头用掺杂 SnO<sub>2</sub> 纳米粉体的制备[J].稀有金属材料与工程,2014,43(8): 1979-1982.

WANG Qing-zhou, LU Dong-mai, CUI Chun-xiang, XU Meng. Fabrication of doped SnO<sub>2</sub> powder used for Cu matrix electrical contact[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(8): 1979–1982.

[7] 张昆华,管伟明,郭俊梅,宋修庆.大变形 Ag/Ni20 纤维复合 电接触材料电弧侵蚀及形貌特征[J].稀有金属材料与工程, 2011,40(5):853-857.

ZHANG Kun-hua, GUAN Wei-ming, GUO Jun-mei, SONG Xiu-qing. Arc erosion and morphological characters of Ag/Ni20 fiber electrical composites by severe plastic deformation[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(5): 853–857.

- [8] SWINGLER J, SUMPTION A. Arc erosion of AgSnO<sub>2</sub> electrical contacts at different stages of a break operation[J]. Rare Metals, 2010, 29(3): 248–254.
- [9] PONS F, CHERKAOUI M, ILALI I, DOMINIAK S. Evolution of the AgCdO contact material surface microstructure with the number of arcs[J]. Journal of Electronic Materials, 2010, 39(4): 456–463.
- [10] 范景莲,朱 松,刘 涛,田家敏. 超细/纳米 W-20Cu 复合 粉末的液相烧结机制[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(7): 1587-1593.

FAN Jing-lian, ZHU Song, LIU Tao, TIAN Jia-min. Mechanism of ultrafine/nano W-20Cu composite powder during liquid sintering[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(7): 1587–1593.

- [11] 朱 松, 范景莲, 刘 涛, 田家敏. 细晶 W-Cu 材料的导电性 能[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(7): 1360-1364.
  ZHU Song, FAN Jing-lian, LIU Tao, TIAN Jia-min. Electric conductivities of ultrafine W-Cu materials[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(7): 1360-1364.
- [12] 张会杰,李继文,魏世忠,徐流杰,马小冲.水热共还原法制
   备W包Cu纳米粉体的工艺研究及表征[J].稀有金属,2015, 39(5):442-449.

ZHANG Hui-jie, LI Ji-wen, WEI Shi-zhong XU Liu-jie, MA Xiao-chong. Process research and characterization of W coated Cu nanopowder prepared by hydrothermal Co-reduction technology[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2015, 39(5): 442–449.

- [13] 陈文革,丁秉钧,张 晖. 机械合金化制备的纳米晶 W-Cu 电触头材料[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(6): 1224-1228.
  CHEN Wen-ge, DING Bing-jun, ZHANG Hui. Nanocrystal W-Cu electrical contact material by mechanical alloying and hot pressed sintering[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(6): 1224-1228.
- [14] LI D R, LIU Z Y, YU Y, WANG E D. The influence of mechanical milling on the properties of W-40wt.%Cu composite produced by hot extrusion[J]. Journal of Alloys and Compounds 2008, 462(12): 94–98.
- [15] 池永恒,张瑞杰,方 伟,杨诗棣,曲选辉. W-Cu 液相烧结体 系致密化行为的模拟[J].中国有色金属学报,2014,24(2): 416-423.

CHI Yong-heng, ZHANG Rui-jie, FANG Wei, YANG Shi-di, QU Xuan-hui. Simulation of densification process of W-Cu system during liquid-phase sintering[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(2): 416–423.

- [16] 万 成,李继文,马窦琴,王 展,张会杰.水热合成
  W-25Cu 复合粉末的热力学分析[J].稀有金属与硬质合金,2015,43(5):16-22.
  WAN Cheng, LI Ji-wen, MA Dou-qin, WANG Zhan, ZHANG Hui-jie. Thermodynamic analysis for hydrothermal synthesis of W-25Cu composite powders[J]. Rare Metal and Cemented Carbides, 2015, 43(5): 16-22.
- [17] JOHNSON J L, BREZOVSKY J J, GERMAN R M. Effects of tungsten particle size and copper content on densification of liquid-phase-sintered W-Cu[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005, 36(10): 2810–2814.
- [18] 罗 吴,从善海,程在望,金佳斌.不同配比电触头铜钨合金的组织及性能[J].有色金属工程,2014,4(2):29-31.

LUO Hao, CONG Shan-hai, CHENG Zai-wang, JIN Jia-bin. The organization and performance of copper tungsten alloy electrical contact in different ratio[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2014, 4(2): 29–31.

- [19] GB/T 8320—2003. 铜钨及银钨电触头[S]. GB/T 8320—2003. Copper-Tungsten and silver-Tungsten electrical contacts[S].
- [20] 李震彪,陈青松. 电触头复合材料电导率的理论研究[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(3): 185-189.
  LI Zhen-biao, CHEN Qing-song. A theoretical research on electrical resistivity of composite contact materials[J]. Chinese Society for Electrical Engineering, 1996, 16(3): 185-189.
- [21] 韩 波,史庆南,谢 明,陈亮伟,王效琪,起华荣,孟庆猛. 直流条件下 W-15wt%Cu 电接触材料燃弧特性研究[J]. 稀有 金属材料与工程, 2012, 41(6): 994-997.
  HAN Bo, SHI Qin-nan, XIE Ming, CHEN Liang-wei, WANG Xiao-qi, QI Hua-rong, MENG Qing-meng. Arc erosion characteristics of W-15wt%Cu electric contact materials under DC condition[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(6): 994-997.
- [22] ISHIDA H, TANIGUCHI M, SONE H, INOUE H, TAKAGI T. Relationship between length and diameter of contact bridge formed under thermal equilibrium condition[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2005, 88: 1566–1572.
- [23] 郭迎春, 耿永红, 陈 松, 张昆华, 管伟明. 电触点直流电侵 蚀研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(3): 264-268.
  GUO Ying-chun, GENG Yong-hong, CHEN Song, ZHANG Kun-hua, GUAN Wei-ming. DC electric erosion of electric contacts[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(3): 264-268.

## Performances of high-density fine-grain W-25Cu electrical contact materials

WAN Cheng<sup>1</sup>, LI Ji-wen<sup>1, 3</sup>, WANG Zhan<sup>1</sup>, MA Dou-qin<sup>1</sup>, WEI Shi-zhong<sup>2</sup>, ZHANG Guo-shang<sup>1, 3</sup>, XU Liu-jie<sup>2</sup>

School of Material Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;
 Henan Engineering Research Center for Wear of Materials,

Henan University of Science & Technology, Luoyang 471003, China;

3. Henan province nonferrous metal Commonness Technology of

Collaborative Innovation Center, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** The W-25Cu electrical contact material was fabricated by cold isostatic pressing process, presintering in vacuum and hot extrusion of W-Cu nanocomposite powders that was made by hydrothermal synthesis combined with co-reduction method. The relative density of W-25Cu electrical contact materiel is above 98%, the conductivity reaches 42.7%IACS, and the hardness is 246HB. The distribution of W phase and Cu phase are uniform and the particle size of W phase is fine  $(1-3 \mu m)$ . The arc tests were carried out under DC and resistance load conditions through JF04C electrical material testing system. The results show that increasing the density and decreasing the grain size of tungsten copper alloy can reduce and stabilize the contact resistance. Arc time and energy increase along with the increasing of voltage, and the arc time and energy of break operation are less than that of make operation. The surface material mainly compose of Cu, W and WO<sub>3</sub> phases of W-25Cu electrical contact materials after being eroded. Melting bridge transfer, arc transfer and spray evaporation are mainly transfer forms, and the material transfer direction changes with the increasing of voltage, namely, the mass loss transfers from cathode to anode.

Key words: high density; fine grain; contact resistance; arc erosion; materials transfer

Foundation item: Project (111100910500) supported by the Key Scientific and Technological Project of Henan Province, China; Project (2010A43000) supported by the Natural Science Research Project of Education Department of Henan Province, China

**Received date:** 2015-08-25; Accepted date: 2016-12-19

Corresponding author: LI Ji-wen; Tel: +86-13525983980; E-mail: ljwzq@163.com

(编辑 何学锋)