



W-30Cu 电接触材料直流电接触行为

万 成¹, 李继文^{1,3}, 王 展¹, 马宾琴¹, 张会杰¹, 魏世忠², 张国赏^{1,3}, 徐流杰²

(1. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 洛阳 471023;

2. 河南科技大学 河南省耐磨材料工程技术研究中心, 洛阳 471003;

3. 河南科技大学 河南省有色金属共性技术协同创新中心, 洛阳 471023)

摘 要: 采用水热-共还原法制备 W-30Cu(质量分数, %)纳米复合粉末, 并通过冷压制坯、真空烧结和包覆热挤压的工艺制备出纳米 W-30Cu 电接触材料, 经挤压后致密度达到 98.82%, 硬度和导电率分别为 224HB 和 44%IACS。利用 JF04C 型电接触试验机对其进行不同操作次数的电接触性能测试实验, 利用扫描电镜(SEM)、能谱(EDS)等方法分析电弧侵蚀后触头表面微观形貌和元素分布, 探讨材料在直流电弧下的转移机理。结果表明: 直流电弧引起阳极材料转移, Cu 相向阴极转移并在阴极沉积; 材料转移引起富 Cu 区和富 W 区的存在, 同时产生孔洞、裂纹、珊瑚状结构等多种电弧侵蚀形貌。接触电阻介于 0.60~0.73 mΩ, W-30Cu 电接触材料表现出良好的综合电性能。

关键词: 水热法; W-Cu 电接触材料; 直流电弧; 电弧侵蚀

中图分类号: TG146.41

文献标志码: A

电路开关、电器开关等是开关电器中直接承担接通和分段电路的元件, 其材料性能的好坏对开关寿命有决定性影响。理想的电触头材料需满足电阻率低、热导率高、熔点和沸点高、融化热和升华热高、热稳定性好、热容量大、蒸汽压低、起弧最低电流和电压高等要求, 以达到耐电弧烧蚀的目的。同时, 其力学性能还要保证高的室温及高温强韧性, 有利于加工^[1-4]。传统的电接触材料多采用银金属氧化物(AgMeO)^[5]。有研究发现^[6-7], 虽然 AgMeO 电接触材料有良好的耐电弧侵蚀性和抗熔焊性, 但是有毒的 Cd 元素使得其应用得到限制; 而 AgSnO₂ 电接触材料则由于其较大的接触电阻而影响其使用性能。W-Cu 电接触材料则兼具 W 的抗电蚀性、抗熔焊性和 Cu 的高导电率等优点得以迅速发展, 同时 Cu 在高温电弧下蒸发时可吸收大量的电弧能量, 可有效地降低电弧温度, 起到降低电弧侵蚀作用^[8-11]。但是由于 W、Cu 之间润湿角极小, 通过传统的熔渗粉末冶金方法难以制备出符合要求的 W-Cu 电接触材料^[12-14]。

GERMAN^[15]的研究表明, 电接触材料的电接触性能特别是材料的抗电弧烧蚀性能与材料的致密度和材料成分分布的均匀性有很大关系。MORDIKE 等^[16]和

陈文革等^[17]的研究也表明, 纳米 W-Cu 复合粉末制备出的 W-Cu 电接触材料具有良好的抗烧蚀性能。而采用水热法可以制备出超细及纳米级的 W-Cu 复合粉末, 有利于制备出高致密的电接触材料, 改善电接触材料的力学性能和电接触性能。本文作者采用水热-共还原法制备出纳米 W-30Cu 复合粉末, 经冷压、真空烧结联合包套热挤压工艺制备出高致密的 W-30Cu 电接触材料, 在直流条件下进行不同操作次数的电接触实验, 探讨 W-30Cu 电接触材料在直流条件下的材料转移机制以及电弧形貌特征。

1 实验

1.1 钨铜复合粉末的制备

以工业钨酸钠和硝酸铜为原料, 按 W 和 Cu 质量比 7:3 计算配料并分别配成溶液, 将一定量的氨水加入硝酸铜溶液中, 再将上述溶液混合并调节 pH 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 °C 下反应 90 min 即可获得 W-Cu 复合粉末。还原介质为 H_2/N_2 。

1.2 包套挤压工艺

将水热-共还原法制备的 W-30Cu 复合粉末在 280 MPa 压力下冷等静压, 保压 30 min 获得冷压坯; (1050 °C, 1.5 h) 保温真空烧结预致密化; 预致密化压坯包 45 号钢套进行热挤压, 钢套内径 35 mm, 壁厚 5.5 mm, 孔隙部分用刚玉粉填充, 加热温度 1050 °C, 保温 30 min, 挤压速率 10 mm/s, 挤压比为 7.72。

1.3 性能与组织表征

采用阿基米德原理测定合金密度; 采用 FD101 型数字便携式涡流电导率仪测试电导率; 布氏硬度采用 THB-3000E 型电子布氏硬度计测量。

在 JF04C 型触电试验机上进行特定直流、阻性负载燃弧测试。电源电压 48 V, 电流 20 A, 触电间距 1 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, 接触次数: 500 次、1000 次、2000 次、5000 次。

采用 D8 ADVANCE 型 XRD 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电弧侵蚀后显微组织进行表征。

2 分析与讨论

2.1 纳米 W-30Cu 复合粉末及电接触材料性能

图 1 所示为水热共还原法制备的 W-30Cu 复合粉体 XRD 谱。图 1 中仅有 W、Cu 的衍射峰, 无其他杂

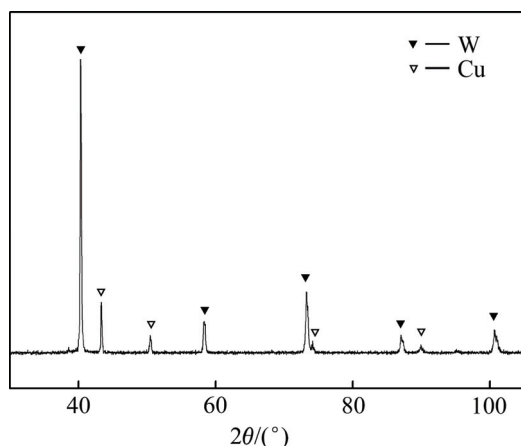


图 1 W-30Cu 复合粉末的 XRD 谱

Fig. 1 XRD pattern of W-Cu composite powders

峰, 表明在 H_2/N_2 混合气体气氛中, 在 (800 °C, 60 min) 条件下, 所有过程产物已全部还原为 W 和 Cu。

图 2 所示为水热-共还原法制备的 W-30Cu 复合粉末的 SEM 像。由图 2 可知, 水热-共还原法制备的复合粉体粒度细小、均匀。由 EDS 分析可知, 颗粒较小的圆球状结构多为铜, 较大的多边形结构多为钨。

表 1 所列为热挤压获得 W-30Cu 电接触材料与传统熔渗法获得的 W-30Cu 电接触材料相关性能的对比。由表 1 可知, 水热-共还原法制备的 W-Cu 复合粉末经冷压制坯、真空烧结和热挤压后获得的 W-30Cu 电接触材料各项综合性能都得到极大提高, 挤压法获得的 W-30Cu 电接触材料的致密度达到 98.82%, 硬度达到 224HB, 导电率提高到 44% IACS。

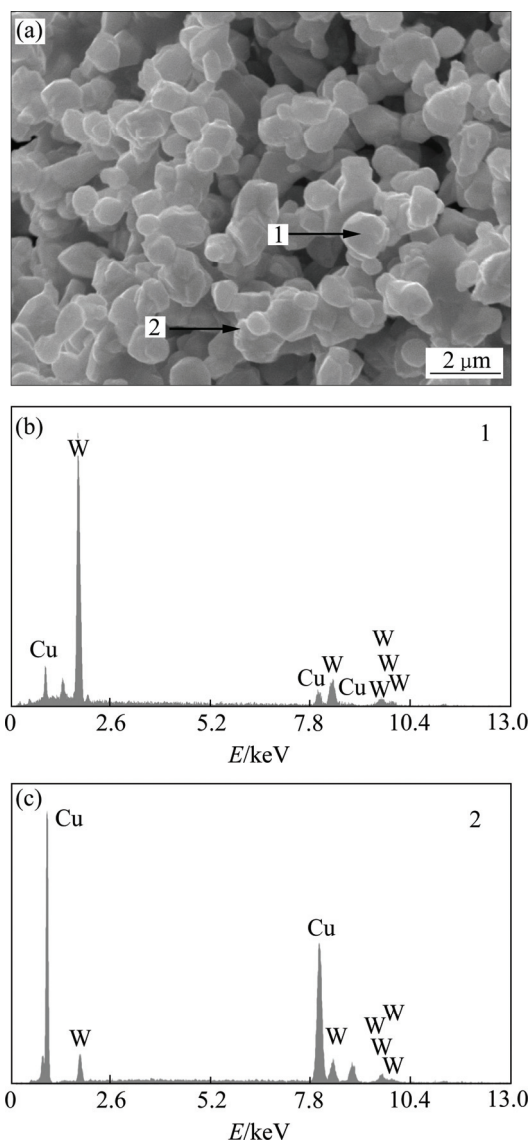


图 2 W-Cu 复合粉末的 SEM 像及 EDS 分析

Fig. 2 SEM image(a) and EDS analysis((b), (c)) of W-Cu composite powder

表 1 热挤压与溶渗工艺制备的 W-30Cu 触头材料的性能

Table 1 Properties of W-30Cu electrical contact material by hot extrusion and infiltration process

Preparation method	Density/ (g·cm ⁻³)	Hardness, HB	Conductivity/ %(IACS)
Infiltration process ^[18]	13.80	175	42
Hot extrusion	14.18	224	44

图 3 所示为利用热挤压工艺制备的高致密 W-30Cu 合金显微组织。由图 3 可以看到, 坯料组织细密, 没有明显的孔洞, W、Cu 两相分布均匀, W 颗粒均匀分布在 Cu 基体中。RYU 等^[19]的研究表明, 互不相溶体系内, 不同颗粒组分(如 W-Cu 颗粒)之间的结合界面对材料的性能影响很大, 粉体压坯的致密化不仅取决于粉末本身的粒度, 还取决于粉末混合的均匀程度。由于水热共还原法制得的 W-30Cu 复合粉末颗粒细小, 达到了纳米级别, 粉末活性大, 大大增强了 W 颗粒重排的驱动力(表面张力和毛细管力)进而缩短重排距离^[20]。同时, 在热挤压保温过程中, 挤压温度在 Cu 的熔点附近, 铜相处于熔融软化或近液态, 流动性良好的 Cu 相能迅速填充到 W-W 颗粒之间的孔隙, 形成完整的 Cu 网络, 从而有效提高致密化程度和烧结体组织均匀性。

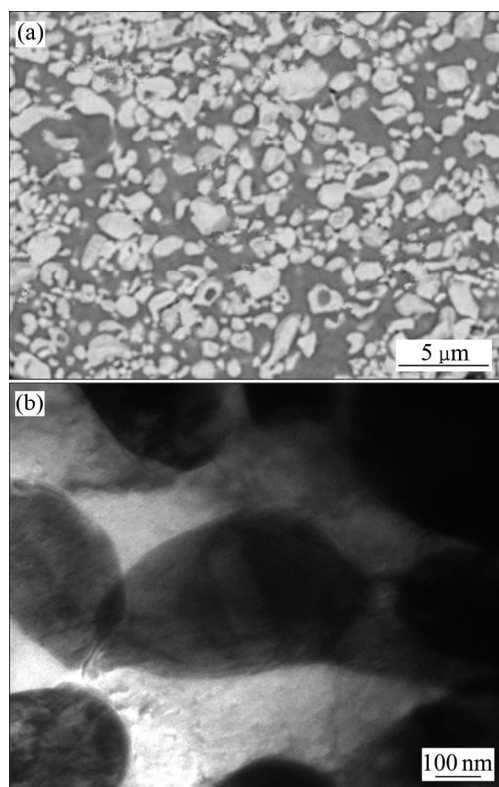


图 3 热挤压所获得 W-30Cu 触头材料的 SEM 和 TEM 像

Fig. 3 SEM(a) and TEM(b) images of W-30Cu contact material

2.2 W-30Cu 电接触材料的电接触行为

2.2.1 W-30Cu 电接触材料的质量转移机制

触头材料损耗程度用多次操作后的质量改变(Δm)来衡量。图 4 所示为 W-30Cu 阴、阳两极触头在不同工作次数下的质量变化图。由图 4 可知, 在 48 V、20 A 工作条件下, 触头质量随操作次数变化的规律是阳极质量损失, 阴极质量增加, 操作次数的变化未引起材料转移方向的变化, 材料转移方向均是从阳极转向阴极, 即触头侵蚀是典型的阳极型电弧侵蚀。同时还可发现, 随着工作次数的增加, 材料转移量越来越大, 阳极材料质量损失越大, 阴极材料质量增加越大, 但质量损失速率逐渐减小, 整体质量呈现逐渐减少趋势。

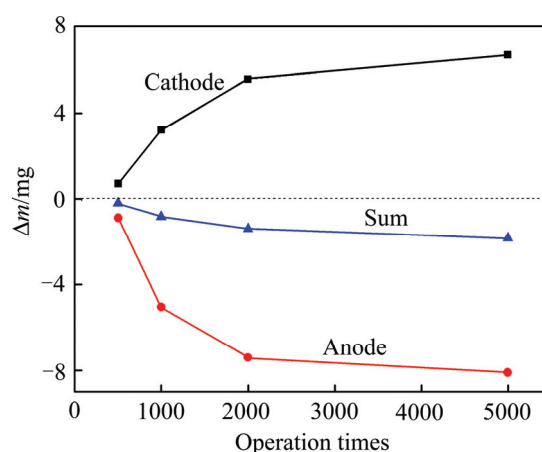


图 4 W-30Cu 触头材料阴阳两极质量变化

Fig. 4 Mass change of W-30Cu contact material

图 5 所示为 W-30Cu 合金触头在不同操作次数下电侵蚀后触头表面的三维形貌。由图 5 可知, 经电侵蚀后阳极表面均出现凹坑, 阴极表面出现凸起; 且随着操作次数的增加, 触头表面不平整度增加, 阳极表面凹坑增大增多, 而阴极表面凸起同样增多增大。由三维形貌图同样可以看出, 在 48 V、20 A 条件下, 触头材料的转移方向是由阳极转向阴极。

图 6 所示分别为电侵蚀前后触头表面的 XRD 谱, 由图 6 可看出, 经电侵蚀后, 触头表面成分主要由 Cu、W 和 WO_3 组成。与侵蚀前相比, Cu 的衍射峰强度明显增强, 表明电弧侵蚀后触头表面铜含量增多。同时发现阴极 Cu 的衍射峰强度增强远远大于阳极的, 对侵蚀后的触头表面进行能谱分析也表明(见图 7), 阳极表面 Cu 含量要远远小于阴极表面 Cu 含量, 表明在侵蚀过程中主要是 Cu 相由阳极转移到阴极从而引起阳极质量损失, 阴极质量增加。这与韩波等^[21]的研究相一致。

分析认为, 在电接触开始阶段由于电极表面的微

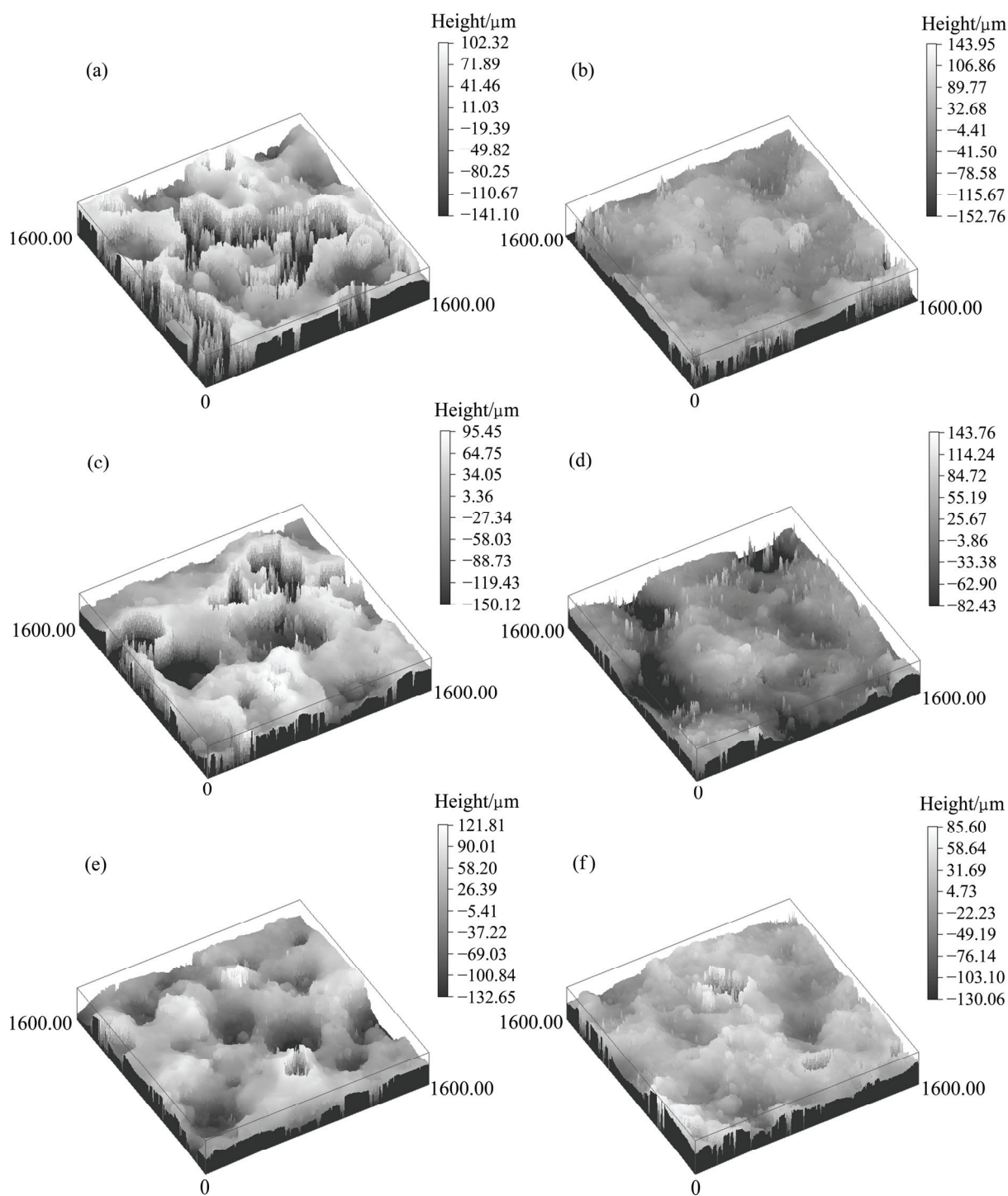


图 5 W-30Cu 触头在不同操作次数下材料侵蚀后三维形貌图

Fig. 5 Three dimensional topographies of W-30Cu alloy contact material: (a) Anode, operation times of 1000; (b) Cathode, operation times of 1000; (c) Anode, operation times of 2000; (d) Cathode, operation times of 2000; (e) Anode, operation times of 5000; (f) Cathode, operation times of 5000

小棱刺和氧化物脏污受到强烈的电子和离子轰击而快速除去, 使得开始阶段质量损失较快, 同时低熔点的 Cu 相先融化并形成熔池, 增强相 W 颗粒尚未溶解到熔池中使得 Cu 相喷溅损失较多。随着操作次数的增

加, W 颗粒逐渐溶解在熔池中并形成限制 Cu 相流动的骨架, 成为新的接触面, 由于 W 的高熔点和高抗侵蚀性, 减少了材料的质量损失, 使得材料的耐蚀性增强。

2.2.2 W-30Cu 触头电弧侵蚀后的表面形貌及形成机制

图 7 及表 2 所示为 W-30Cu 触头材料 5000 次操作下电弧侵蚀后阳极和阴极不同放大倍数的 SEM 形貌及 EDS 分析。由图 7 可以看出, 阳极表面出现多个凹坑(见图 7(a)), 而阴极表面相应部分则有些微小凸起(见图 7(c)), 颜色较暗区域为 Cu 相。产生这种现象是因为触头接触过程中阳极因电弧热作用形成熔池, Cu 相通过汽化或喷溅脱离本体而形成凹坑; 而脱离阳极

Cu 相部分在阴极沉积产生微小凸起, 对触头表面进行能谱分析也表明阴极 Cu 含量明显大于阳极的。

阳极电弧侵蚀后能谱分析发现(见表 2), 电侵蚀后阳极触头分布着以区域 2 和 3 为代表的富 W 区, 区域 1 为代表的富 Cu 区以及以区域 4 为代表的金属氧化物混合区域组成。其中富 W 区分布着少许孔洞或气孔, 间或存在一些裂纹, 而富 Cu 区面积则较小。而对阴极电弧侵蚀后能谱分析则可以看出(见表 2), 由于阳极触头表面蒸发和喷溅后的材料大部分沉积在阴极触头

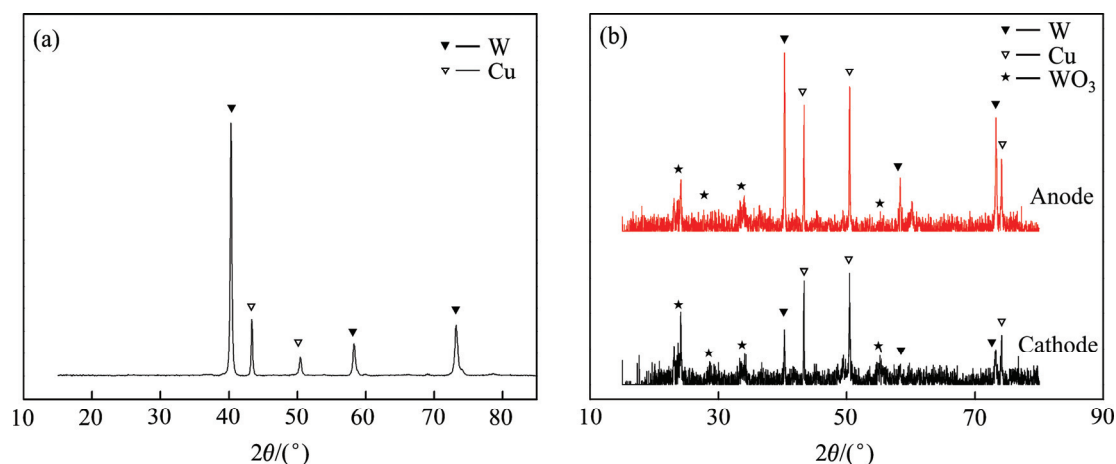


图 6 W-30Cu 触头材料电弧侵蚀前后表面 XRD 谱

Fig. 6 XRD patterns of W-30Cu contact material before(a) and after(b) arc erosion

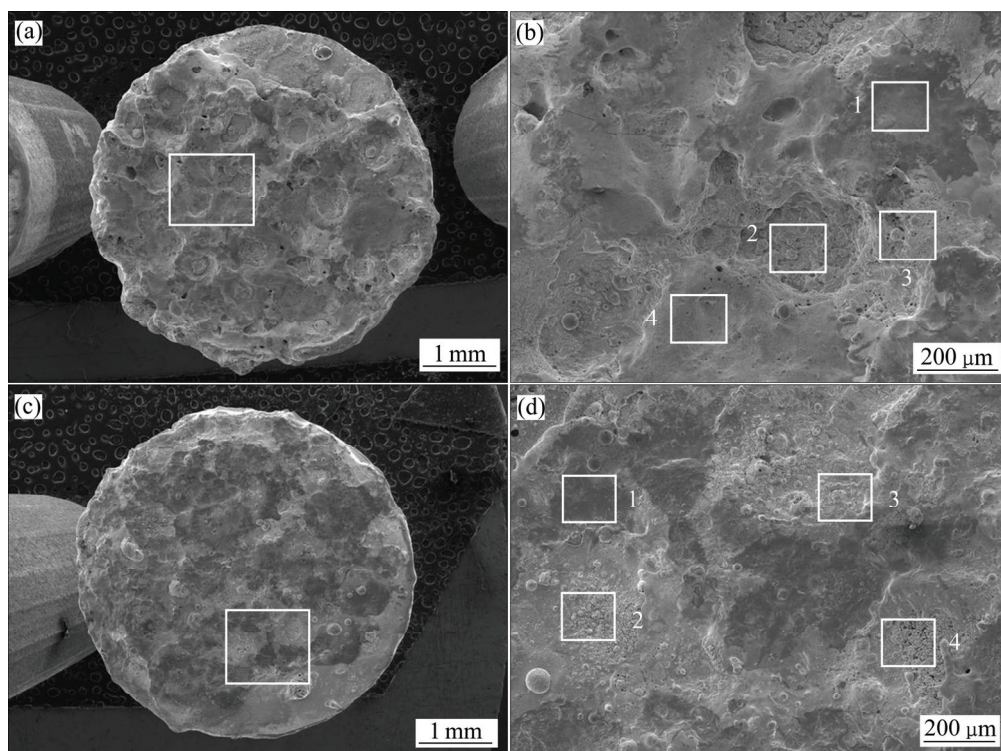


图 7 W-30Cu 触头材料不同放大倍数下的侵蚀形貌

Fig. 7 Arc erosion morphologies of W-30Cu contact material: (a) Anode, low magnification; (b) Detailed analysis of signed area of Fig. 7(a); (c) Cathode, low magnification; (d) Detailed analysis of signed area of Fig. 7(c)

表 2 能谱分析数据

Table 2 EDS analysis of W-30Cu contact material

Sample	Area No.	Mass fraction/%			Mole fraction/%		
		Cu	W	O	Cu	W	O
Anode	1	74.40	15.73	9.87	62.50	4.57	32.93
	2	14.39	71.91	13.70	15.36	26.54	58.10
	3	9.60	82.99	7.41	14.17	42.35	43.48
	4	22.58	56.28	21.14	17.92	15.44	66.64
Cathode	1	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00
	2	15.08	70.38	14.54	15.52	25.04	59.44
	3	26.79	51.24	21.96	20.34	13.44	66.22
	4	8.50	83.31	8.18	12.18	41.25	46.56

表面上,使得阴极触头表面形成大量以区域 1 为代表性的富 Cu 区以及以区域 2 和 4 为代表性的富 W 区。与阳极触头表面形貌相比,阴极表面富铜区面积显著增大,Cu 含量高,富 W 区明显减小。这是因为 Cu 的熔点低,液化汽化速度更快,更容易转移到阴极触点表面。

对阴、阳两极的富 Cu 区和富 W 区进一步分析,还可发现富 Cu 区和富 W 区各有不同的形貌特征。富 Cu 区形貌一般表现形式为 Cu 液滴、Cu 液铺展层和骨架状(见图 8)。阳极触头侵蚀后的形貌多以凹坑内形成的骨架(见图 8(a)和(b))为主。这是因为在较大电流作用下,阳极触头材料表面发生熔化、蒸发以及液态金属的喷溅侵蚀,使触头材料表面形成凹坑。凹坑底部的放大图像,可以看到形成了骨架状联通结构。分析认为,大量铜的熔化致使部分钨相与铜相脱粘、脱落,

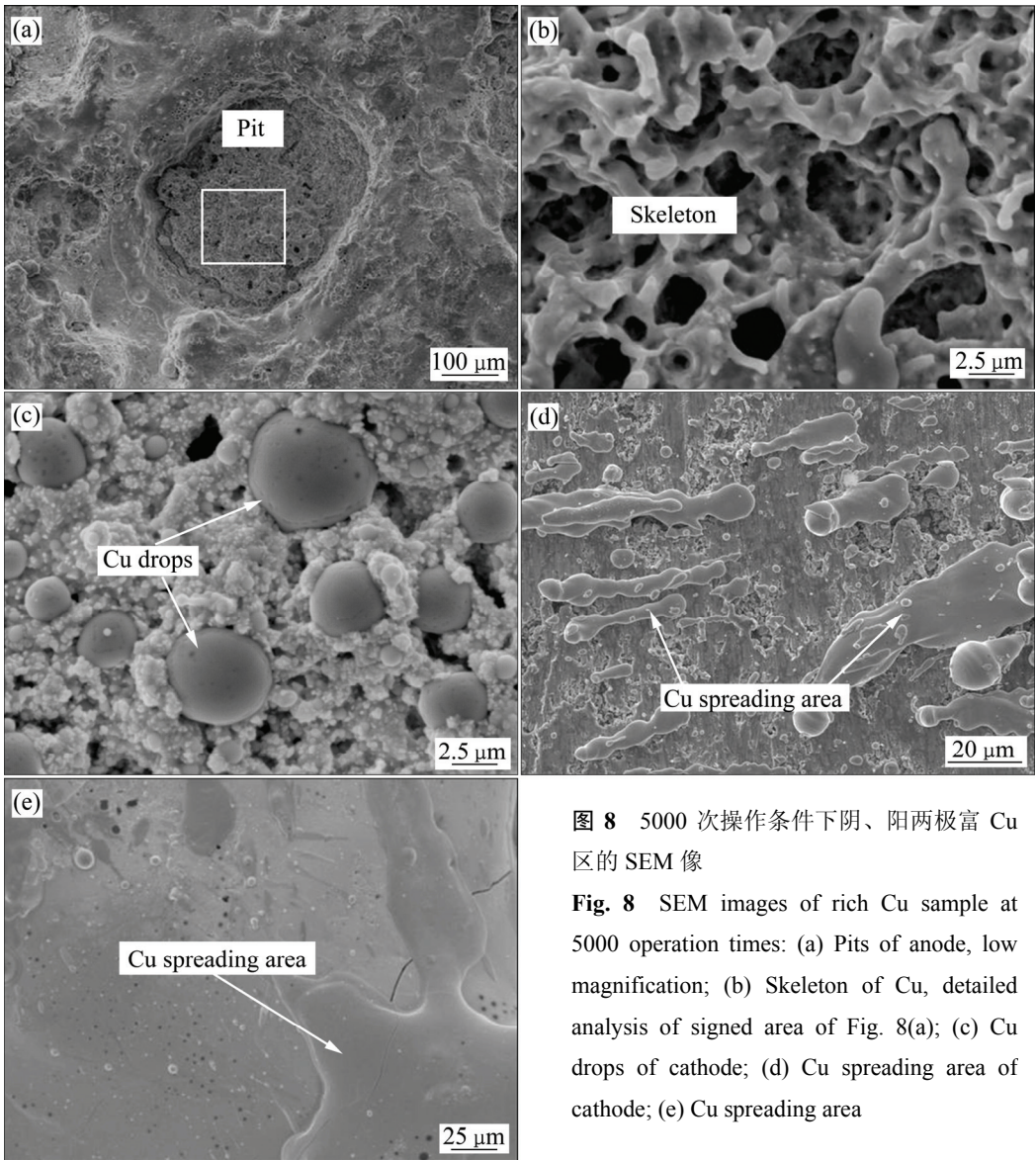


图 8 5000 次操作条件下阴、阳两极富 Cu 区的 SEM 像

Fig. 8 SEM images of rich Cu sample at 5000 operation times: (a) Pits of anode, low magnification; (b) Skeleton of Cu, detailed analysis of signed area of Fig. 8(a); (c) Cu drops of cathode; (d) Cu spreading area of cathode; (e) Cu spreading area

形成一个个近球形的孔洞；而阳极熔融的未喷溅铜冷却后形成疏松的连通骨架。而阴极富 Cu 区形貌主要表现为 Cu 液滴和因喷溅形成的 Cu 液铺展层。在触点分断闭合过程中，由于电弧的热作用，造成 Cu 相的融化，进而发生喷溅。融化的 Cu 相在毛细力的作用下聚集在一起，形成球状(见图 8(c))，而飞溅的 Cu 液滴则在触头表面形成铺展层，甚至有些地方因多次喷溅而形成多层 Cu 溶液铺展层(见图 8(d))。同时，在触头某些边缘部位，Cu 相由于受热较少，只软化熔融聚集在触头表面而并未发生喷溅，形成大片 Cu 相铺展区域(见图 8(e))。

富 W 区的表现形式则多为骨架、块状以及螺旋状(见图 9)，其中骨架状结构是材料表面 Cu 相融化飞溅蒸发，导致 W 颗粒聚集在一起并渗入少量 Cu 液而形成(见图 9(a)和(d))。块状富 W 区(见图 9(c)和(d))，由 EDS 分析知为 W 的氧化物，这是因表面铜相损耗之

后，钨相融化并被氧化重新结晶所致。螺旋状凸起(见图 9(e))，这是由于阴、阳两极触头在分开过程中液态钨的对触头的粘着力所造成的。

在富 Cu 区和富 W 区形成过程中，由于各种应力的综合作用，同样会形成其他一些特殊形貌，如图 10 所示的孔洞、裂纹和珊瑚状形貌等。

孔洞的出现是因为在电弧热作用下，融化的熔融金属从外界吸收大量的气体所致。电弧燃弧时间极短，触头表面层弧根处金属快速融化而溶解大量空气；但是触头周围温度较低，引起融化层急剧冷却，熔池中吸收的空气来不及全部排出，在熔池结晶时，气体溶解度减小，气体从熔池内部以气泡的形式快速上浮，由于表面张力作用气泡浮到液体表面就破裂，从而在触头表面形成气孔^[22]。在某些条件下，特别是电弧能量很大时，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，同时高的蒸汽流从弧根处喷出，

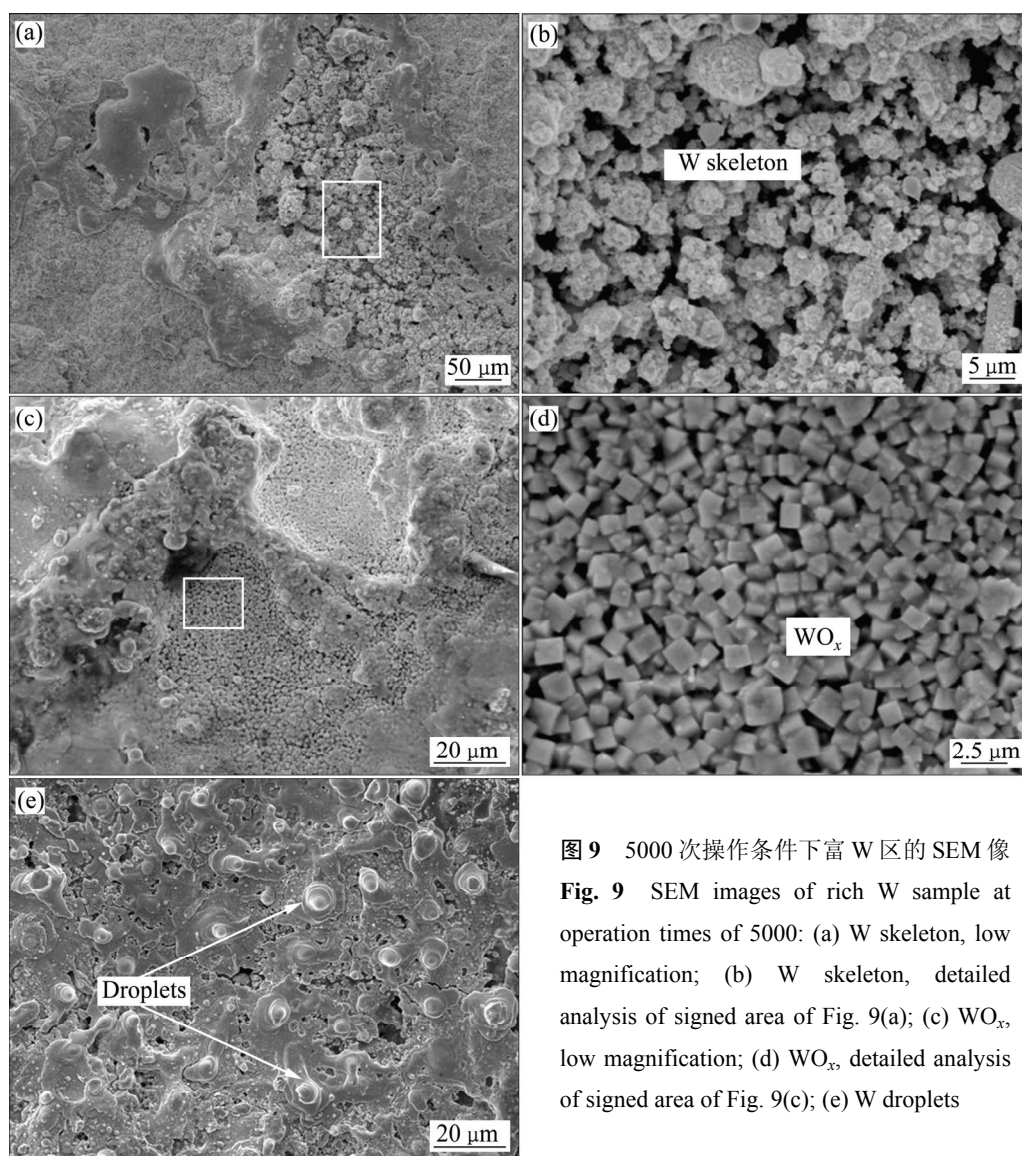


图 9 5000 次操作条件下富 W 区的 SEM 像
Fig. 9 SEM images of rich W sample at operation times of 5000: (a) W skeleton, low magnification; (b) W skeleton, detailed analysis of signed area of Fig. 9(a); (c) WO_x , low magnification; (d) WO_x , detailed analysis of signed area of Fig. 9(c); (e) W droplets

发出所谓“喷流”现象^[23]。喷流过程中常伴随着较大的液滴飞溅, 发生喷流的触头表面将留下火山口式的较大的侵蚀凹坑(见图 10(a))。还有一种孔洞为击穿型孔洞(见图 10(b)), 这种孔洞常发生在 Cu 溶液铺展层表面。由图 10(b)可看出, 产生击穿孔洞的地方大部分为双层, 在电弧热作用下 Cu 先发生软化, 在触头表面形成一层薄 Cu 软化层, 当电压高于 Cu 的击穿电压时, 此时会出现击穿型孔洞。裂纹的形成主要分为两种, 空穴裂纹以及热应力裂纹(Thermal stress crack, TSC)。空穴裂纹的产生是因为熔池中的气泡在脱离熔池的时候在熔池表面形成孔洞, 经过多次操作循环后, 这些由气泡破裂形成的材料空穴最终发展成裂缝, 如图 10(a)中裂纹即为典型的空穴裂纹。空穴裂纹主要产生在阳极。热应力裂纹是触头材料反复受到热胀冷缩的作用下形成的。当较大电弧能量作用于触头表面时, 材料由于受热膨胀, 产生自电弧弧根指向周围扩散的力; 当电弧熄灭时, 触头材料由于冷却紧缩又产生从周围指向弧根部位的收缩力。这种剧烈和重复的扩张与收缩反复进行容易引起触头材料的热疲劳, 如果这种扩张或者收缩力超过材料本身的内聚力, 就会产生热应力裂纹^[23]。热应力裂纹可以产生在晶界或相界, 也可以产生在触头材料固有缺陷或孔洞聚集部位, 如图 10(b)中裂纹即为典型的热应力裂纹。由图 10(b)可

以看到, 几条裂纹产生于几个击穿型孔洞之间, 孔洞周围存在明显的融化和汽化痕迹。在被击穿过程中弧根周围受热, 电弧熄灭后急剧冷却, 在弧跟处反复受到热胀冷缩作用从而产生热应力裂纹。

珊瑚状结构(见图 10(d))是一类细小颗粒的聚集体, 主要产生在阳极表面。珊瑚状结构的颗粒中的 W、O 含量都比较高, Cu 含量较低。珊瑚状形貌产生的原因是在电弧作用下, 阳极触头表面材料融化后, 随着温度升高, W 颗粒也逐渐融化, 同样会以蒸发形式脱离阳极, 在快速冷却时形成小颗粒又重新沉积在阳极, 经过多次电弧作用, 颗粒逐渐堆积而形成珊瑚状形貌。

2.2.3 W-30Cu 触头电弧侵蚀过程中接触电阻变化

图 11 所示为 W-30Cu 触头材料电弧侵蚀过程中平均接触电阻随操作次数的变化规律。由图 11 可知, 由本方法制备出的 W-30Cu 触头材料的接触电阻很小, 介于 0.60~0.73 mΩ 之间, 这是因为在挤压过程中形成了很好的 Cu 网络结构, 使得电阻较低。随着操作次数的增加, 接触电阻增大, 这是因为 W-30Cu 触头材料在电弧热的作用下表面易形成 W 和 Cu 的氧化物, 使得触头材料导电率降低, 接触电阻变大, 由表 2 能谱分析可知触头表明存在 W 和 Cu 的氧化物。文献[21]研究也表明 W-Cu 触头表明经电侵蚀后表面存在氧化钨和钨酸铜表面膜, 因为表面膜一般为绝缘体或者半

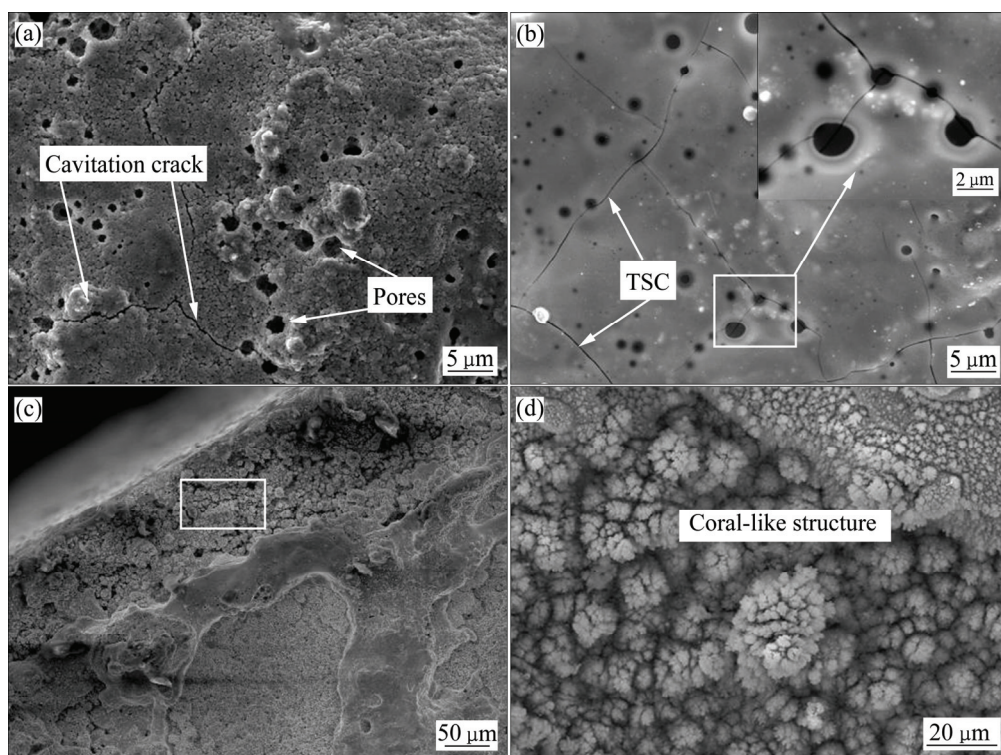


图 10 W-30Cu 触头的电侵蚀特征形貌

Fig. 10 Erosion characteristic morphologies of W-30Cu contact: (a) Pores and cavitation cracks; (b) Pores and TSC; (c) Coral-like structure; (d) Coral-like structure, detailed analysis of signed area of Fig. 10(c)

导体,当触头表明存在表面膜时,使得接触电阻降低。同时,触头表面由于Cu相的喷溅蒸发形成富W区,以及生成的裂纹及孔洞等都会造成触头接触电阻增大,从而影响触头使用寿命。

有研究表明^[24-25],稀土及稀土氧化物能够降低W-Cu触头材料中O等杂质和晶界偏析,改善合金内Cu相分布,使其分布细小均匀,避免局部Cu相损失严重,同时能够增加Cu相和W相的边界以及Cu的晶界以达到分散电弧的目的。杨晓红等^[26]制备出掺杂Y₂O₃的W-Cu触头材料,一方面能够有效地细化晶粒,起到良好的细晶强化作用,同时弥散分布的Y₂O₃颗粒起到弥散强化作用,可以有效地增加W-Cu之间的结合能力;另一方面能有降低Cu相的富集现象。在电弧侵蚀过程中细小弥散分布的W颗粒和Y₂O₃颗粒可以有效地增加熔池的黏着力,从而降低Cu相的飞溅,延长触头材料的使用寿命。因此本课题组通过水热法制备出纳米La₂O₃掺杂W-Cu复合粉末^[27],并通过真空烧结和热挤压制备出高致密度、抗电弧侵蚀能力强的La₂O₃掺杂W-Cu合金,以期望提高其抗电弧侵蚀能力,具体电弧侵蚀机理还在进一步研究中。

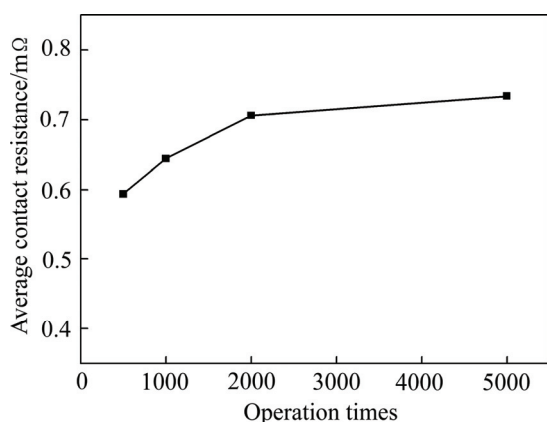


图11 平均接触电阻随操作次数的变化

Fig. 11 Average contact resistance under different test numbers

3 结论

1) 纳米W-30Cu复合粉末经冷压成型、真空烧结和包覆挤压的工艺可得到致密度达98.82%的W-30Cu电触头材料,其导电率为44%IACS,硬度为224HB。

2) 在48 V、20 A条件下,W-30Cu电接触材料为典型的阳极侵蚀型材料,即随着操作次数的增加直流电弧引起阳极Cu相向阴极转移并在阴极沉积触头,使得阳极质量损失,阴极质量增加。

3) W-30Cu触头经过电接触实验后,触头阳极表面出现凹坑,阴极表面则出现凸起,触头表面出现富W区、富Cu区以及孔洞、裂纹等多种特征电侵蚀形貌。

REFERENCES

- [1] ZHU Yan-cai, WANG Jing-qin, AN Li-qiang, WANG Hai-tao. Preparation and study of nano-Ag/SnO₂ electrical contact material doped with titanium element[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(7): 11-14.
- [2] 许灿灿, 易丹青, 曹适意, 刘会群, 吴春萍, 孙顺平, 刘润勇. Ag-SnO₂ 复合材料的热压缩变形行为[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(9): 2092-2098.
XU Can-can, YI Dan-qing, CAO Shi-yi, LIU Hui-qun, WU Chun-ping, SUN Shun-ping, LIU Run-yong. Hot compression behavior of Ag-SnO₂ composite material[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(9): 2092-2098.
- [3] 王清周, 路东梅, 崔春翔, 徐萌. Cu基电触头用掺杂SnO₂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-mei, CUI Chun-xiang, XU Meng. Fabrication of doped SnO₂ powder used for Cu matrix electrical contact[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(8): 1979-1982.
- [4] 陶麒麟, 周晓龙, 周允红, 樊勇军, 张浩. AgCuO电接触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, FAN Yong-jun, ZHANG Hao. Study of nanocomposite silver-based contact materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(5): 1219-1223.
- [5] 陶麒麟, 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.
- [6] 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.
- [7] SWINGLER J, SUMPTION A. Arc erosion of AgSnO₂ electrical contacts at different stages of a break operation[J]. Rare Metals, 2010, 29(3): 248-254.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 万 成, 李继文, 马寰琴, 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.
- [11] TEPPER J, SEEGER M, VOTTELER T, BEHRENS V, HONING T. Investigation on erosion of Cu/W contacts in high-voltage circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2006, 29(3): 658-665.
- [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] 刘 涛, 范景莲, 成会朝, 田家敏. 溶胶-喷雾干燥 W-Cu 前驱体粉末煅烧过程中的相变[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(12): 2202-2206.
- LIU Tao, FAN Jing-lian, CHENG Hui-chao, TIAN Jia-min. Phase transformation of sol-spray dried W-Cu precursor powder during calcining[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(12): 2202-2206.
- [14] 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.
- [15] GERMAN R M. A model for the thermal properties of liquid-phase sintered composites[J]. Metallurgical Transactions A, 1993, 24(8): 1745-1752.
- [16] MORDIKE B L, KACZMAR J, KIELBINSKI M. Effect of tungsten content on the properties and structure of cold extruded Cu-W composite materials[J]. Powder Metallurgy International, 1991, 23(2): 91-95.
- [17] 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.
- [18] GB 8230—1987. 铜钨及银钨电触头技术条件[S].
- GB 8230—1987. Technical specification for copper-tungsten and silver-tungsten electrical contacts[S].
- [19] RYU S S, KIM Y D, MOON I H. Dilatometric analysis on the sintering behavior of nanocrystalline W-Cu prepared by mechanical alloying[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2002, 335(1/2): 233-240.
- [20] 凌云汉, 周张健, 李江涛, 杨大正, 葛昌纯. 超高压梯度烧结法制备 W/Cu 梯度功能材料[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(4): 576-581.
- LING Yun-han, ZHOU Zhang-jian, LI Jiang-tao, YANG Da-zheng, GE Chang-chun. Fabrication of W/Cu functionally gradient material by graded sintering under ultra-high pressure[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(4): 576-581.
- [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] 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.
- [23] DOUBLET L, JEMAA N B, HAUNER F, JEANNOT D. Electrical arc phenomena and its interaction on contact material at 42 volts DC for automotive applications[C]// Electrical Contacts, Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts, 2004: 8-14.
- [24] 陈 勇, 吴玉程, 于福文, 陈俊凌. La₂O₃ 弥散强化钨合金的组织性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(5): 822-824.
- CHEN Yong, WU Yu-cheng, YU Fu-wen, CHEN Jun-ling. Study on structure and property of tungsten alloy strengthened with dispersed La₂O₃[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(5): 822-824.
- [25] 陈文革, 陈勉之, 邢力谦, 李金山, 洪 峰. 掺杂 WCu 电触头材料电弧特性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(11): 2029-2037.

- CHEN Wen-ge, CHEN Mian-zhi, XING Li-qian, LI Jin-shan, HONG Feng. Effect of doping on electrical arc characteristic of WCu electrical contact materials[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(11): 2029–2037.
- [26] 杨晓红, 范志康, 梁淑华, 肖 鹏. 添加 Y_2O_3 对 CuW 触头材料性能的影响[J]. 材料研究学报, 2007, 21(4): 415–420.
- YANG Xiao-hong, FAN Zhi-kang, LIANG Shu-hua, XIAO Peng. Effects of Y_2O_3 on properties of Cu-W electrical contact materials[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2007, 21(4): 415–420.
- [27] 王 展, 李继文, 魏世忠, 潘昆明, 万 成, 张会杰. 水热共还原法制备 La_2O_3 掺杂 W-Cu 复合粉末工艺研究[J]. 中国稀土学报, 2015, 33(4): 461–468.
- WANG Zhan, LI Ji-wen, WEI Shi-zhong, PAN Kun-ming, WAN Cheng, ZHANG Hui-jie. La_2O_3 doped W-Cu composite powder prepared by hydrothermal-coreduction method[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2015, 33(4): 461–468.

Electrical contact behavior of W-30Cu contact material under direct current condition

WAN Cheng¹, LI Ji-wen^{1,3}, WANG Zhan¹, MA Dou-qin¹, ZHANG Hui-jie¹,
WEI Shi-zhong², ZHANG Guo-shang^{1,3}, XU Liu-jie²

(1. School of Material Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;

2. Henan Engineering Research Center for Wear of Materials,

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

3. Henan Province Nonferrous Metal Commonness Technology of Collaborative Innovation Center,
Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: The W-30Cu electrical contact material was fabricated by cold isostatic pressing process, vacuum sintering and hot extrusion with W-30Cu nanocomposite powder that was prepared by hydrothermal-coreduction method. The relative density can reach 98.82%, the hardness is up to 224HB and conductivity is 44%IACS. In order to search the transformation mechanism of W-30Cu electrical contact material, some contact tests were carried out through JF04C electrical material testing system. Scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS) were employed to observe the microstructure and element distribution in contact surface after arc erosion. The results show that the direct current (DC) arc causes the transferring of anode material and depositing on the cathode surface; the transfer of materials leads to the existing of rich W region and rich Cu region, as well as the generating of the special morphology of pores, cracks and coral-like structure. The W-30Cu electrical contact material has small contact resistance in the range of 0.60–0.73 mΩ, which shows better performance under DC condition.

Key words: hydrothermal method; W-30Cu electrical contact material; direct current arc; arc erosion

Foundation item: Project(111100910500) supported by the Key Scientific and Technological Project of Henan Province, China; Project(2010A430004) supported by the Education Department of Henan Province Natural science Research Project, China

Received data: 2015-06-09; **Accepted data:** 2015-11-20

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

(编辑 王 超)