



## 添加 LaB<sub>6</sub> 的 CuW70 触头材料的 电弧侵蚀行为

陈娟, 王献辉, 成军, 杨晓红, 邹军涛

(西安理工大学 材料科学与工程学院, 西安 710048)

**摘要:** 采用粉末冶金和熔渗法制备不同 LaB<sub>6</sub> 添加量的 CuW70 合金, 研究 LaB<sub>6</sub> 含量对 CuW70 合金组织、致密度、硬度、导电率及真空击穿性能的影响。结果表明: 随着 LaB<sub>6</sub> 含量的增加, CuW70 合金的硬度先急剧增大后缓慢减小, 当 LaB<sub>6</sub> 含量为 2%(质量分数)时, CuW70 合金的硬度最大, 为 212 HB。CuW70 合金的电导率先增大后缓慢减小, 但降幅不大。真空电击穿实验表明: 随着 LaB<sub>6</sub> 含量的增加, CuW70 合金的耐电压强度先急剧上升, 当 LaB<sub>6</sub> 含量大于 2%后, 耐电压强度呈下降趋势; 截流值先下降后缓慢上升; 电弧寿命则呈上升趋势。在本实验范围内, 当 LaB<sub>6</sub> 添加量为 2%时, CuW70 合金具有最佳的耐电弧侵蚀性能, 耐电压强度、截流值和电弧寿命分别为  $1.25 \times 10^8$  V/m、2.62 A 和 15.67 ms。

**关键词:** CuW70 合金; 触头材料; LaB<sub>6</sub>; 电击穿; 电弧烧蚀

**中图分类号:** TG146.1

**文献标志码:** A

## Arc erosion behaviors of CuW70 electrical contact materials adding LaB<sub>6</sub>

CHEN Juan, WANG Xian-hui, CHENG Jun, YANG Xiao-hong, ZOU Jun-tao

(School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** CuW70 alloys with different contents of LaB<sub>6</sub> addition were prepared by powder metallurgy and infiltrating method, and the effects of LaB<sub>6</sub> content on microstructure, densification, hardness, electrical conductivity and electrical breakdown properties were investigated. The results show that with increase of LaB<sub>6</sub> addition, the hardness increases sharply and then decreases slowly, the CuW70 alloy with 2%LaB<sub>6</sub> (mass fraction) has the maximum hardness value of 212 HB, while the electrical conductivity increases and then decreases slightly. The vacuum electrical breakdown experimental results show that, with the increase of LaB<sub>6</sub> addition, the breakdown strength increases sharply and then decreases when the LaB<sub>6</sub> content is above 2%. The chopping current decreases and then increases slowly, whereas, the arc life presents an increasing trend. In the range of the experiments, CuW70 alloy with 2% LaB<sub>6</sub> has an optimal arc erosion resistance, and the breakdown strength, chopping current and arc life are  $1.25 \times 10^8$  V/m, 2.62 A and 15.67 ms, respectively.

**Key words:** CuW70 alloy; contact material; LaB<sub>6</sub>; electrical breakdown; arc erosion

由于钨具有高的熔点和强度以及低的热膨胀系数, 铜具有良好的导热导电性, 且两者互不固溶, 也不形成中间化合物<sup>[1-3]</sup>, 所以, 铜钨合金具有钨与铜的优点, 呈现出优良的耐高温、耐烧蚀、高强度、高硬

度等性能, 被广泛应用于油断路器、真空接触器、负荷开关和变压器转换开关<sup>[4-8]</sup>。随着长距离大容量超高压电网的实施运行, 苛刻的服役环境和大容量对触头材料提出了愈来愈高的要求, 要求触头材料具有大的

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51201132, 51274163); 陕西省重点实验室科技计划项目(13JS076); 陕西省电工材料与熔渗技术重点科技创新团队(2012KCT-25); 陕西省重点学科项目专项资金资助项目(2011HBSZS009)

**收稿日期:** 2014-04-19; **修订日期:** 2015-09-13

**通信作者:** 王献辉, 教授, 博士; 电话: 029-82312185; E-mail: xhwang693@xaut.edu.cn

分断电流能力、高的耐电压强度、可靠的抗熔焊性能、高的导电率和导热率、低的电弧烧损率、低的截流值和超长使用寿命。表面侵蚀和开断过程中的机械磨损引起触头材料失效。常规的 CuW 触头材料在开断过程中, 由于铜的逸出功低且熔点较低, 在高温电弧作用下, 铜相将产生熔化和喷溅, 造成触头材料表面凹凸不平, 严重影响输电线路运行的稳定性和可靠性, 因此, 如何提高触头材料的耐电弧侵蚀性能成为触头材料研究的关键问题。

目前, 对熔渗 CuW 触头材料耐电弧烧蚀行为的研究主要集中在制备工艺的改进<sup>[9-11]</sup>和第三组元的添加<sup>[12-19]</sup>。大量研究表明: TiC、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 WC 可以有效地提高合金的硬度, 电击穿发生在相界面上, 而熔点高、逸出功低的稀土氧化物(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CeO<sub>2</sub>、La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)的添加可使击穿相从铜相转移到 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CeO<sub>2</sub> 和 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒上, 改善了电弧烧蚀性能及电弧稳定性。由于 LaB<sub>6</sub> 具有良好的热稳定性和化学稳定性、高熔点、高温下蒸发率低、逸出功低、发射电流密度大以及抗离子轰击溅射能力强等优点<sup>[20-22]</sup>, 因此 LaB<sub>6</sub> 的添加可望在高压真空击穿过程中, 改善电弧运动特性, 使电弧优先 LaB<sub>6</sub> 相上产生, 实现主动引弧, 避免高温电弧在铜相上的反复燃烧和熄灭, 从而改善 CuW70 触头材料的耐电弧侵蚀性能, 延长 CuW70 合金的使用寿命, 提高电气系统的可靠性和稳定性。本文作者采用粉末冶金-熔渗法制备了不同 LaB<sub>6</sub> 含量的 CuW70 合金, 系统研究 LaB<sub>6</sub> 含量对 CuW70 触头材料组织、硬度、电导率、耐电压强度、截流值和电弧寿命等性能的影响, 并探讨 LaB<sub>6</sub> 改善电弧侵蚀机理, 且研究结果可对超高压触头材料的设计和制备提供指导。

## 1 实验

原材料采用粒度为 4~7 μm 的钨粉(纯度大于 99.8%, 质量分数)和粒度为 5~9 μm 的 LaB<sub>6</sub> 粉(纯度大于 99.99%)。首先将含量为 70% 的钨粉(质量分数)和含量为 0、1%、2% 和 3% 的 LaB<sub>6</sub> 粉分别在 V 型混料机内混料 4 h, 然后将混合的粉末在 WE-600 型压力机上压制直径 21 mm、高度 15 mm 的钨骨架, 压力为 340 MPa, 保压 30 s。最后将熔渗金属铜块和钨压坯叠置在温度为 1100~1400 °C 的 H<sub>2</sub> 气氛烧结炉内烧结熔渗 4 h。采用排水法、HB-3000 型布氏硬度计和 7501 型涡流电导仪分别测试材料的致密度、硬度和导电率。真空击穿实验在改造的 TDR40A 型单晶炉真空灭弧室进行, 实验电路图如图 1 所示。

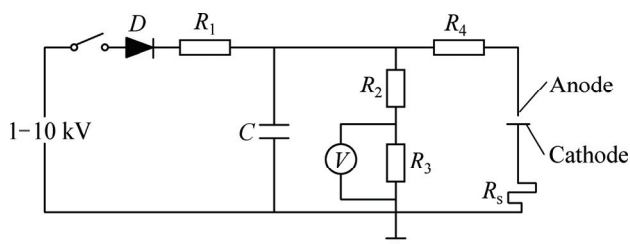


图 1 真空电弧侵蚀实验电路图

Fig. 1 Circuit diagram of vacuum breakdown

将制备好的试样抛光后装入真空室内作为阴极, 直径为 3 mm 的针尖状纯 W 棒为阳极, 当真空度为  $5.0 \times 10^{-3}$  Pa 时进行电击穿实验。用自耦变压器在两极间加上电压为 8 kV 的直流电, 同时阴极以 0.2 mm/min 的速度接近阳极, 直至电击穿在阴阳极间发生。采集击穿瞬间的击穿电压除以击穿距离计算材料的耐电压强度, 并用 Tektronix TDS-2014 击穿电压型示波器记录击穿电流, 截流值等数据。重复上述过程, 测量 50 个数据。利用 Image Pro Plus 6.0 软件和激光扫描显微镜分别测量了击穿区域的面积和蚀坑深度, 采用 OXFORD JSM-6700 型扫描电镜和能谱仪对侵蚀烧蚀形貌和成分进行表征分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 LaB<sub>6</sub> 的添加对 CuW70 合金组织的影响

图 2(a)~(d) 所示分别是添加 0、1%、2% 和 3% LaB<sub>6</sub> 的 CuW70 合金的显微组织, 其中灰白色区域为 W 骨架, 黑色区域为熔渗 Cu 相, 而黑色球形小颗粒为 LaB<sub>6</sub>。

为了更清楚地说明添加 LaB<sub>6</sub> 的 CuW70 合金元素的分布, 对 LaB<sub>6</sub> 含量为 1% 的 CuW70 合金进行了面扫描分析, 其结果如图 3 所示。图 3(a) 所示为 LaB<sub>6</sub> 含量为 1% 的 CuW70 合金的显微组织, 图 3(b)~(d) 分别为 La、Cu 和 W 在 CuW70 合金中的分布图。可以清楚地看出, 图 3(a) 中灰白色区域为 W 相, 黑色区域为熔渗 Cu 相, 黑色球形小颗粒为 LaB<sub>6</sub> 相。

以上结果表明, 细小的 LaB<sub>6</sub> 颗粒主要分布在 W 骨架的边界和 Cu 相中。且随着 LaB<sub>6</sub> 含量的增加, W 颗粒尺寸变小, Cu 相的分布更加均匀。

### 2.2 LaB<sub>6</sub> 含量对 CuW70 合金致密度、导电率和硬度的影响

表 1 所列为不同 LaB<sub>6</sub> 含量 CuW70 合金的密



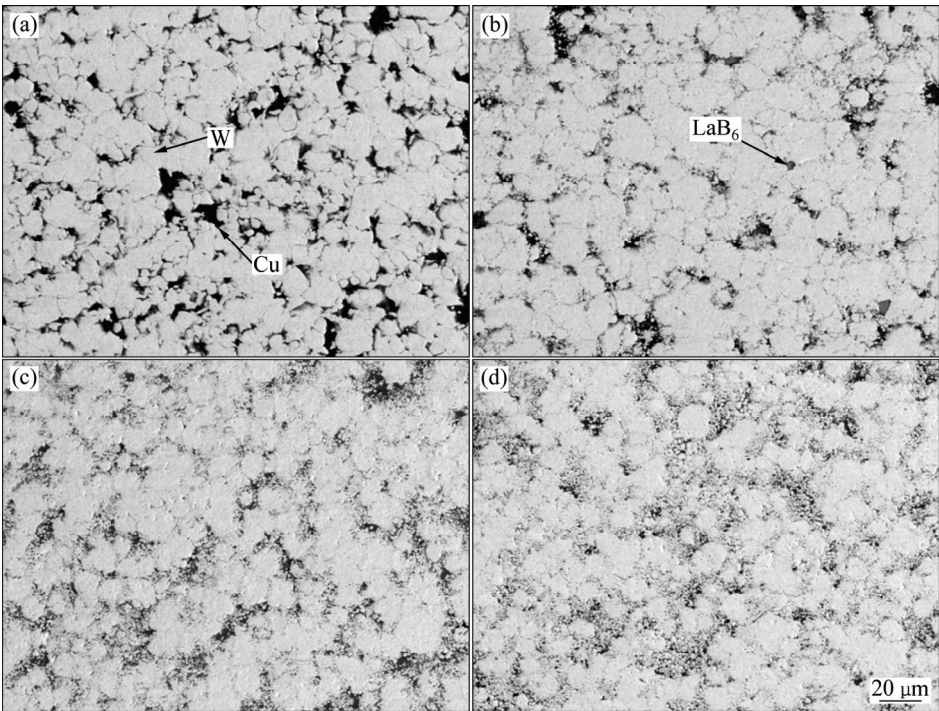


图 2 添加不同 LaB<sub>6</sub> 含量的 CuW70 合金显微组织

**Fig. 2** Microstructures of CuW70 alloys with different LaB<sub>6</sub> contents: (a) 0; (b) 1%; (c) 2%; (d) 3%

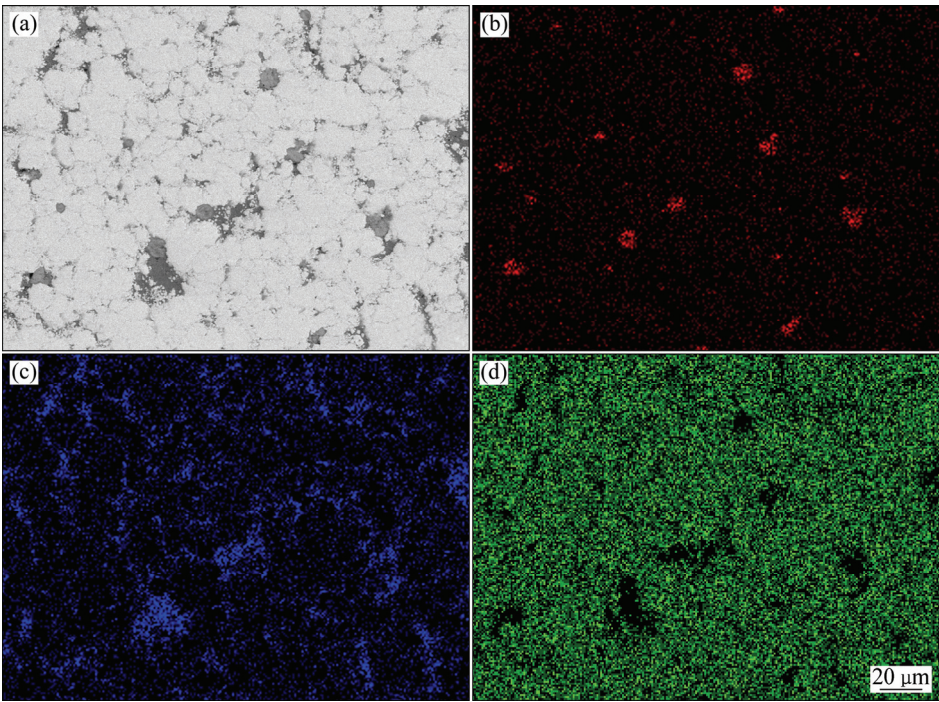


图 3 LaB<sub>6</sub> 含量为 1% 的 CuW70 合金的显微组织和面扫描像

**Fig. 3** Microstructure and SEM mapping of CuW70 alloy with 1% LaB<sub>6</sub>: (a) Microstructure of CuW70 alloy with 1% LaB<sub>6</sub>; (b) La; (c) Cu; (d) W

度、电导率和硬度的测试结果。由表 1 可以看出, 随着 LaB<sub>6</sub> 含量的增大, CuW70 合金的导电率和致密度呈下降的趋势, 而硬度则先上升后缓慢减小, 当 LaB<sub>6</sub>

含量为 2% 时, CuW70 合金硬度最大, 212 HB。

由图 2 可知, 随着 LaB<sub>6</sub> 含量的增加, W 颗粒明显细化, 单位面积内晶粒数增多、晶界数目增加, 从

表 1 不同 LaB<sub>6</sub> 含量的 CuW70 合金的致密度、导电率和硬度

Table 1 Relative density, hardness and electrical conductivity of CuW70 alloys with different LaB<sub>6</sub> contents

| LaB <sub>6</sub> content/% | Relative density/% | Hardness, HB | Electrical conductivity (IACS)/% |
|----------------------------|--------------------|--------------|----------------------------------|
| 0                          | 98.7               | 179          | 46.3                             |
| 1                          | 97.0               | 197          | 46.2                             |
| 2                          | 96.2               | 212          | 44.2                             |
| 3                          | 93.5               | 198          | 41.1                             |

而增大了位错移动的阻力、提高了 CuW70 合金的硬度。但过多的 LaB<sub>6</sub> 添加降低了 CuW70 合金致密度和硬度。因此, 随着 LaB<sub>6</sub> 添加量的增大, CuW70 合金硬度呈先上升后下降的趋势。

随着 LaB<sub>6</sub> 含量的增加, CuW70 合金的导电率呈先上升后下降的趋势。一方面, 在压制混合粉末时, LaB<sub>6</sub> 颗粒弥散分布在 W 生坯中, 减少了 W 颗粒之间接触的几率和面积, 在随后烧结过程中, 阻碍了 W 原子的迁移, 降低了 W 颗粒的聚集长大, 使 W 骨架空间架构更加合理, 从而保证了铜液能够连续渗入, 提高了 CuW70 合金的导电性。另一方面, LaB<sub>6</sub> 含量的增大, 阻碍了材料致密化的过程, 而且 LaB<sub>6</sub> 含量的增加, 几何界面增多, 对自由电子的散射加剧, 导电能力下降。但由于 LaB<sub>6</sub> 颗粒具有良好的导电性, 这些因素的综合作用导致 CuW70 合金的导电率降幅不大。

2.3 LaB<sub>6</sub> 含量对 CuW70 合金耐电击穿性能的影响

表 2 所列为不同 LaB<sub>6</sub> 含量的 CuW70 合金击穿 50 次后电性能平均值。从表 2 可以看出, 随着 LaB<sub>6</sub> 含量的增加, CuW70 合金耐电压强度和电弧寿命先升高后下降。当 LaB<sub>6</sub> 含量为 2% 时, 耐电压强度和电弧寿命达最大值, 分别为  $1.25 \times 10^8$  V/m 和 15.67 ms, 而截流值则持续下降。与未添加 LaB<sub>6</sub> 的 CuW70 合金相比, 添加 2% LaB<sub>6</sub> 的 CuW70 合金的耐电压强度和电弧寿

表 2 不同 LaB<sub>6</sub> 含量的 CuW70 合金电击穿实验结果

Table 2 Electrical breakdown results of CuW70 alloys with different LaB<sub>6</sub> contents

| LaB <sub>6</sub> content/% | Breakdown strength/( $10^8$ V·m <sup>-1</sup> ) | Chopping current/A | Arc duration/ms |
|----------------------------|-------------------------------------------------|--------------------|-----------------|
| 0                          | 0.72                                            | 3.31               | 13.37           |
| 1                          | 0.95                                            | 2.82               | 14.66           |
| 2                          | 1.52                                            | 2.62               | 15.67           |
| 3                          | 1.08                                            | 2.54               | 15.48           |

命分别增加了 73.9% 和 15.8%。

耐电压强度主要取决于金属材料自身的性能, 如金属材料功函数、电子发射、电导率、导热性、硬度、表面状态、气体含量等。由复合材料导热理论<sup>[23]</sup>可知

$$K_c = K_m(1 - V_i) + K_i V_i \tag{1}$$

式中:  $K_c$  为复合材料的导热系数;  $K_m$  为基体金属的导热系数( $K_{CuW}$  为 175 W/m·K);  $K_i$  为第二相颗粒的导热系数( $K_{LaB_6}$  为 4.7 W/m·K);  $V_i$  为颗粒的体积分数。由式(1)可计算出不同 LaB<sub>6</sub> 含量的 CuW70 合金的导热系数, 其结果如表 3 所列。

表 3 不同 LaB<sub>6</sub> 含量的 CuW70 合金的理论导热系数

Table 3 Theoretical coefficient of thermal conductivity of CuW70 alloys with different LaB<sub>6</sub> contents

| LaB <sub>6</sub> content/% | Coefficient of thermal conductivity/(W·cm <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 0                          | 175.0                                                                      |
| 1                          | 170.8                                                                      |
| 2                          | 166.8                                                                      |
| 3                          | 162.9                                                                      |

由表 3 可以看出, 随着 LaB<sub>6</sub> 含量的增加, CuW70 合金的导热系数降低。另外, 由表 1 结果可知, 当 LaB<sub>6</sub> 的含量超过 2% 时, CuW70 合金的致密度降低, 致密度的减小进一步降低了 CuW70 合金的导热性。因此, 高温电弧产生的热量不能及时快速地传递出去, 导致击穿区域热量的聚集, 加剧了金属液蒸发, 从而延长了燃弧时间。由于 LaB<sub>6</sub> 的逸出功较低, 在相同的击穿条件下, 极易在阴极表面造成材料的蒸发, 提高了阴极区的金属蒸汽压, 从而降低了截流值。

图 4(a)~(d) 所示分别为 LaB<sub>6</sub> 含量为 0、1%、2% 和 3% 的 CuW70 合金击穿 50 次后的烧蚀总体形貌, 图 4(a')~(d') 所示分别为相应试样的烧蚀中心区域形貌。从图 4 可知, 未添加 LaB<sub>6</sub> 的 CuW70 合金 50 次击穿后, 击穿坑较为集中, 烧蚀为点烧蚀, 击穿坑较深, 说明电弧分散性较差, 如图 4(a) 和 (a') 所示。随着 LaB<sub>6</sub> 含量的增大, CuW70 合金的击穿面积显著增大, 击穿坑变浅, 击穿表面越来越平坦, 如图 4(b)~(d) 所示。表 4 所列是分别采用 Image Pro Plus 6.0 软件和激光扫描显微镜对 CuW70 合金击穿区域的面积和蚀坑深度的测量结果。与未添加 LaB<sub>6</sub> 的 CuW70 合金相比, 添加 2% LaB<sub>6</sub> 的 CuW70 合金蚀坑深度减少了 37.6%; 但



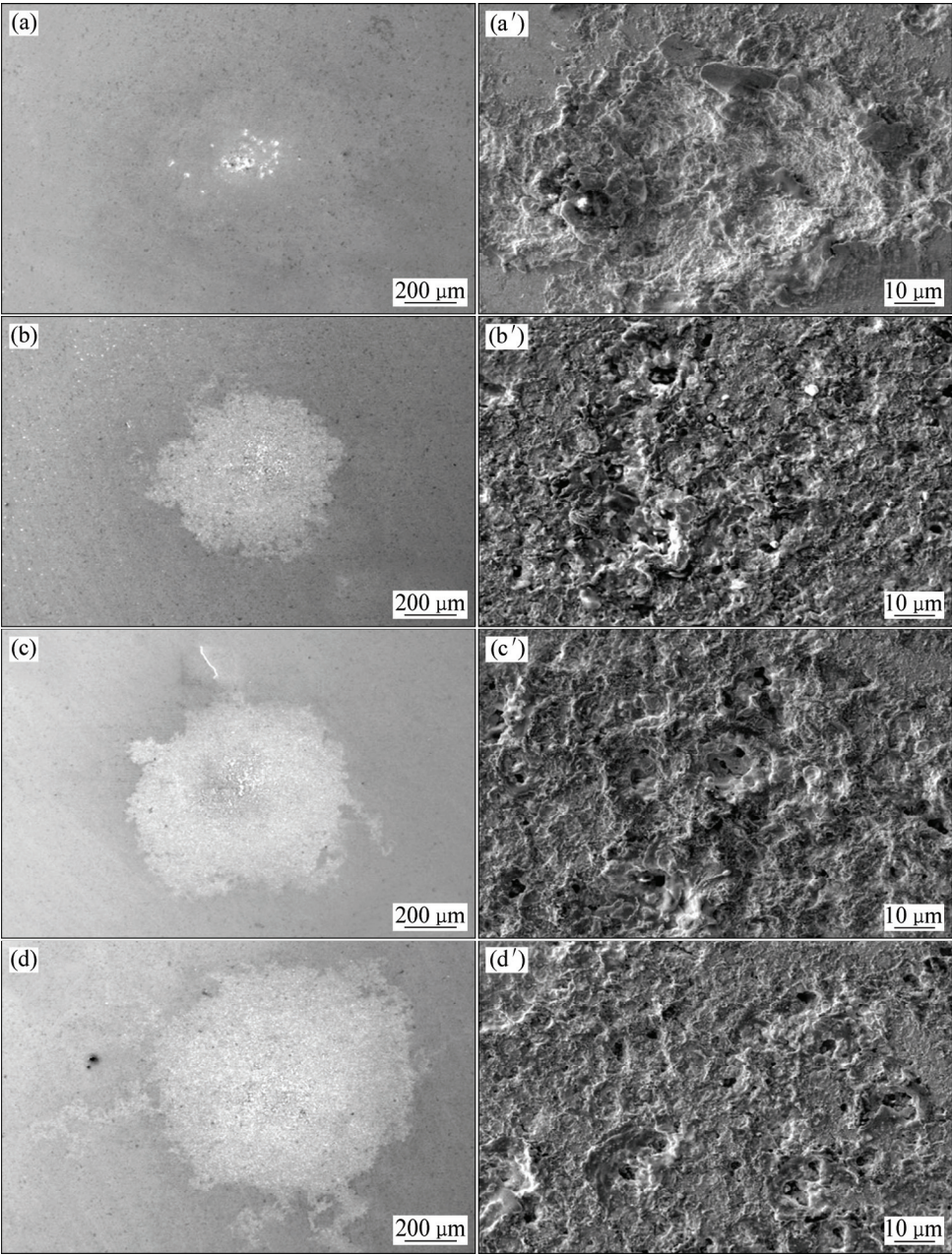


图 4 不同 LaB<sub>6</sub> 含量的 CuW70 合金 50 次击穿后的 SEM 像

**Fig. 4** Low magnification ((a)–(d)) and high magnification ((a')–(d')) SEM images of CuW70 alloy with different LaB<sub>6</sub> contents after vacuum breakdown 50 times: (a), (a') Without LaB<sub>6</sub>; (b), (b') 1% LaB<sub>6</sub>; (c), (c') 2% LaB<sub>6</sub>; (d), (d') 3% LaB<sub>6</sub>

表 4 不同 LaB<sub>6</sub> 含量的 CuW70 合金在击穿 50 次后烧蚀面积和蚀坑深度

| Table 4 Erosion area and pit depth of CuW70 alloys with different LaB <sub>6</sub> contents after vacuum breakdown 50 times |                              |              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------|
| LaB <sub>6</sub> content/%                                                                                                  | Erosion area/mm <sup>2</sup> | Pit depth/μm |
| 0                                                                                                                           | 4.41                         | 21.21        |
| 1                                                                                                                           | 6.52                         | 17.04        |
| 2                                                                                                                           | 10.04                        | 13.21        |
| 3                                                                                                                           | 15.38                        | 14.44        |

当 LaB<sub>6</sub> 添加量大于 2% 时, 蚀坑深度增大, 击穿面积由 4.41 mm<sup>2</sup> 增加到 15.38 mm<sup>2</sup>, 增幅达 249%。以上结果表明, 适量 LaB<sub>6</sub> 的添加可明显改变 CuW70 合金电弧移动特性和分散性。

由于 LaB<sub>6</sub> 颗粒弥散分布在钨骨架中, 且击穿分布在 LaB<sub>6</sub> 颗粒上, 高的 LaB<sub>6</sub> 含量减小了粒子间距, 减小了各个优先击穿微区间距, 从而增强了电弧移动速率, 减小了材料表面的集中烧蚀, 使击穿表面较为光滑。另外, LaB<sub>6</sub> 的熔点(2700 ℃)远高于铜的熔点



(1083 °C), 当铜相熔化时  $\text{LaB}_6$  依然为固态, 因此  $\text{LaB}_6$  的添加增加了铜液的黏度, 从而减少铜液的喷溅。但是, 当  $\text{LaB}_6$  含量过多时, 粒子间距过小, 各个击穿微区产生的电弧很容易汇聚成大电弧, 大电弧能量较高, 电弧运动所需要移动能量较大, 运动性较差, 易造成集中烧蚀。因此, 当  $\text{LaB}_6$  含量大于 2% 时, CuW70 合金蚀坑深度增大。

根据场致发射特点, 在击穿条件相同时, 合金击穿的发生与逸出功的大小密切相关。未添加  $\text{LaB}_6$  的 CuW70 合金的首击穿发生在 Cu 相上, 在高温电弧作用下, 电弧优先在阴极表面的 Cu 相上反复生成和熄灭, 因此多次重复击穿的结果是在 Cu 相上形成严重的烧蚀坑, 如图 4(a') 所示。与 Cu 逸出功(4.36 eV)和 W 逸出功(4.55 eV)相比,  $\text{LaB}_6$  逸出功较低, 仅为 2.26 eV, 因此, 在相同击穿条件下,  $\text{LaB}_6$  更容易克服表面势垒逸出合金表面, 在真空中发生放电并产生电弧, 使真空间隙被击穿, 实现主动引弧, 减少在铜相上的击穿, 从而大幅度减少铜相的熔化和飞溅, 导致击穿表面愈来愈平坦。为了证实电弧优先在  $\text{LaB}_6$  相上击穿, 对  $\text{LaB}_6$  含量分别为 1% 和 2% 的 CuW70 合金进行

一次电击穿实验, 击穿形貌及能谱分析结果如图 5 所示。由图 5 可以看出, 在未击穿的区域 La 的含量较少, 但是在击穿坑周围 La 的含量明显上升, 说明添加  $\text{LaB}_6$  的 CuW70 合金电击穿优先在  $\text{LaB}_6$  相发生。

### 3 结论

1) 随着  $\text{LaB}_6$  含量的增大, CuW70 合金的致密度下降, 硬度呈先急剧增大后缓慢减小, 电导率先上升后缓慢下降。

2)  $\text{LaB}_6$  的添加抑制了钨颗粒聚集长大, 导致富铜区域变得更加分散。

3) 与未添加  $\text{LaB}_6$  的 CuW70 合金相比, 添加  $\text{LaB}_6$  的 CuW70 合金击穿由 Cu 相向  $\text{LaB}_6$  相转移。适量  $\text{LaB}_6$  的添加可改善 CuW70 合金的耐电弧侵蚀, 击穿面积增大, 蚀坑变浅。

4) 含 2%  $\text{LaB}_6$  的 CuW70 合金具有最佳的耐电弧侵蚀性能, 耐电压强度、截流值和电弧寿命分别为  $1.25 \times 10^8 \text{ V/m}$ 、2.62 A 和 15.67 ms。

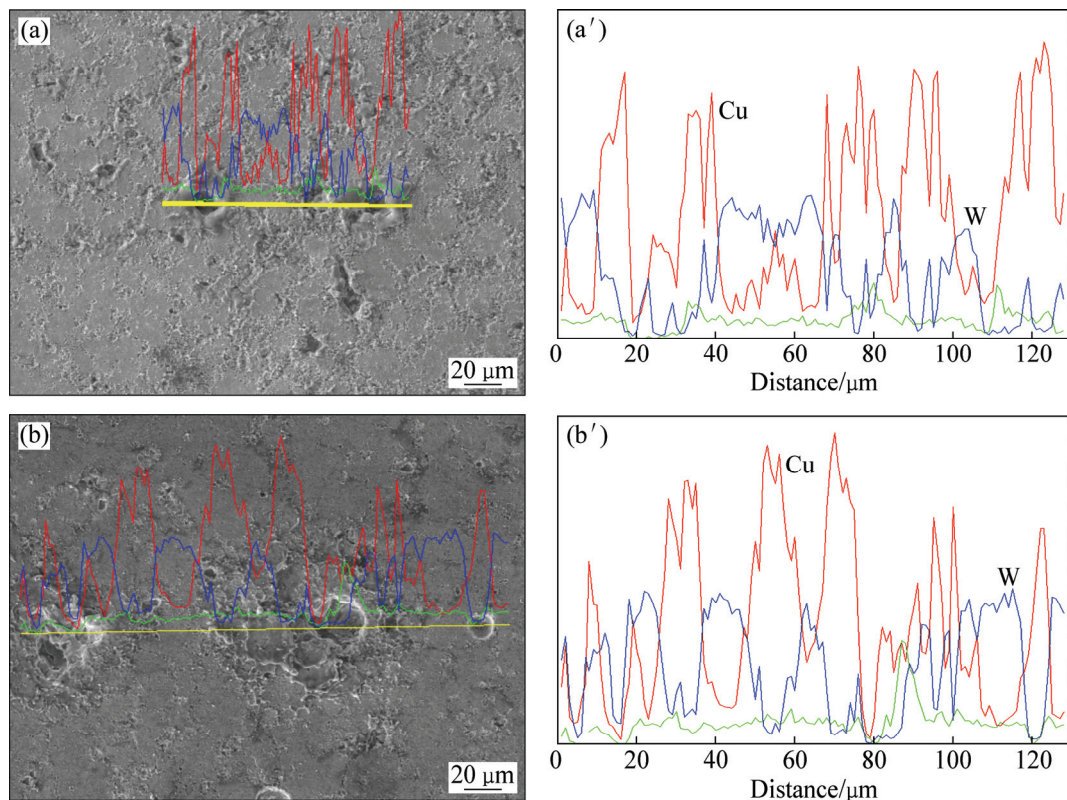


图 5 不同  $\text{LaB}_6$  添加量 CuW70 合金一次电击穿形貌及能谱分析

**Fig. 5** Erosion morphology ((a), (b)) and EDS pattern ((a'), (b')) of CuW70 alloys with different  $\text{LaB}_6$  contents after first vacuum breakdown: (a), (a') 1%  $\text{LaB}_6$ ; (b), (b') 2%  $\text{LaB}_6$

## REFERENCES

- [1] MANHANI Y, RADZALI O, ZUHAILAWATI H. Mechanical alloying and sintering of nano-structures tungsten carbide reinforced copper composite and its characterization[J]. Materials and Design, 2011, 32(6): 3293–3298.
- [2] TELU S, PATRA A, SANKARANARAYA M, MITRA R, PABI S K. Microstructure and cyclic oxidation behavior of W-Cr alloys prepared by sintering of mechanically alloyed nanocrystalline powders[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2013, 36: 191–203.
- [3] 刘勇, 孙永伟, 田保红, 赵瑞龙, 张毅. 钨含量对 W-Cu 复合材料高温变形行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(9): 2553–2558.  
LIU Yong, SUN Yong-wei, TIAN Bao-hong, ZHAO Rui-long, ZHANG Yi. Effect of W content on hot deformation behavior of W-Cu composite at elevated temperature[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(9): 2553–2558.
- [4] HO P W, LI Q F, FUH J Y H. Evaluation of W-Cu metal matrix composites produced by powder injection molding and liquid infiltration[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 485(1): 657–663.
- [5] 范景莲, 严德剑, 黄伯云. 国内外铜钨复合材料的研究现状[J]. 粉末冶金工业, 2003, 13(2): 9–14.  
FAN Jing-lian, YAN De-jian, HUANG Bai-yun. Current status of R&D of W-Cu composite materials in China and abroad[J]. Powder Metallurgy Industry, 2003, 13(2): 9–14.
- [6] 周丽春, 陈国华. 导电复合材料电击穿行为研究进展[J]. 华侨大学学报, 2008, 29(3): 321–326.  
ZHOU Li-chun, CHEN Guo-hua. Review on electrical breakdown behavior in conducting composites[J]. Journal of Huaqiao University, 2008, 29(3): 321–326.
- [7] 李权, 丁敏, 吴爱萍, 邹贵生, 宋伟, 李剑. 铜基电磁开关触头材料的抗熔焊性能[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(8): 2213–2220.  
LI Quan, DING Min, WU Ai-ping, ZOU Gui-sheng, SONG Wei, LI Jian. Anti-welding performance of copper-based electrical contacts in solenoid switch[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(8): 2213–2220.
- [8] IBRAHIM A, ADBALLAH M, MOSTAFA S F, ABOUSREEHEGAZY A. An experimental investigation on the W-Cu composites[J]. Materials & Design, 2009, 30(4): 1398–1403.
- [9] 王新刚, 张怀龙, 李文静, 刘丽丽, 时斌, 杨志懋. 制备工艺对 WCu30 合金的显微组织及抗电弧烧蚀性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(1): 140–145.  
WANG Xin-gang, ZHANG Huai-long, LI Wen-jing, LIU Li-li, SHI Bin, YANG Zhi-mao. Effect of preparation process on microstructure and arc-erosion resistance of WCu30 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(1): 140–145.
- [10] LIANG S H, XIAO P, WANG X H, WANG L L, CAO W C, FAN Z K. Fabrication of CuW pseudo alloy by W-CuO nanopowders[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 516: 161–166.
- [11] CAO W C, LIANG S H, GAO Z F, WANG X H, YANG X H. Vacuum arc characteristics of CuW70 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering (English Edition), 2011, 40(4): 571–574.
- [12] 陈文革, 陈勉之, 邢力谦, 李金山, 洪峰. 掺杂对 W-Cu 电触头材料电弧特性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(11): 2029–2036.  
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): 2029–2036.
- [13] CHEN Y, WU Y C, YU F W, CHEN J L. Microstructure and mechanical properties of tungsten composites co-strengthened by dispersed TiC and La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2008, 26: 525–529.
- [14] 陈勇, 吴玉程, 于福丈. La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 弥散强化钨合金的组织性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(5): 822–824.  
CHEN Yong, WU Yu-cheng, YU Fu-zhang. Study on structure and property of tungsten alloy strengthened with dispersed La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(5): 822–824.
- [15] 杨晓红, 范志康, 梁淑华, 肖鹏. Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对 CuW 触头材料显微组织与性能的影响[J]. 材料研究学报, 2007, 21(4): 414–420.  
YANG Xiao-hong, FAN Zhi-kang, LIANG Shu-hua, XIAO Peng. Effects of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on microstructure properties of CuW electrical contact materials[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2007, 21(4): 414–420.
- [16] YANG X H, ZOU J T, XIAO P, WANG X H. Effects of Zr addition on properties and vacuum arc characteristics of Cu-W alloy[J]. Vacuum, 2014, 106: 16–20.
- [17] 杨晓红, 范志康, 梁淑华, 肖鹏. TiC 对 CuW 触头材料组织与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(5): 817–821.  
YANG Xiao-hong, FAN Zhi-kang, LIANG Shu-hua, XIAO Peng. Effects of TiC on microstructures and properties of CuW electrical contact materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(5): 817–821.
- [18] 王玲玲, 梁淑华, 肖鹏, 范志康. 掺杂 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 CuW 电触头的组织及电性能[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(12): 1358–1361.

- WANG Ling-ling, LIANG Shu-hua, XIAO Peng, FAN Zhi-kang. Effect of  $\text{La}_2\text{O}_3$  on the microstructure and properties of CuW electrical contact materials[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(12): 1358–1361.
- [19] QIAN K, LIANG S H, XIAO P, WANG X H. In situ synthesis and electrical properties of CuW- $\text{La}_2\text{O}_3$  composites[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2012, 31: 147–151.
- [20] WANG X J, JIANG Y D, LIN Z L, QI K H. Fabrication and field emission characteristics of  $\text{LaB}_6$  field-emitter arrays[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(2): 304–308.
- [21] 韩建德, 王衍章, 郑树起, 王维侗. 电子束焊机六硼化镧阴极发射性能研究[J]. 山东工业大学学报, 2001, 31(4): 313–318.
- HAN Jian-de, WANG Yan-zhang, ZHENG Shu-qi, WANG Wei-chou. Study of the emitting properties of  $\text{LaB}_6$  in electron beam welder[J]. Journal of Shandong University of Technology, 2001, 31(4): 313–318.
- [22] LI P T, TIAN W J, WANG D, LIU X F. Grain refining potency of  $\text{LaB}_6$  on aluminum alloy[J]. Journal of Rare Earths, 2012, 30(11): 1172–1176.
- [23] 王 俊, 陈 锋, 孙宝德. 微细颗粒对复合材料熔体表观粘度的影响[J]. 复合材料学报, 2001, 18(1): 58–61.
- WANG Jun, CHEN Feng, SUN Bao-de. Effect of particulate on the apparent viscosity of composite melt[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2001, 18(1): 58–61.
- (编辑 王 超)