

# 电气火灾中的电弧熔痕特征与外热关系\*

王莉, 方仕童, 余圣辉, 梁栋

(中山大学工学院//广东省消防科学技术重点实验室, 广东 广州 510006)

**摘要:** 为建立电气火灾物证鉴定关于一次短路熔痕和二次短路熔痕的量化分析, 研究外热条件对短路熔痕的影响, 借助 X 射线衍射仪和扫描电镜及能谱仪, 分析短路熔痕的微观结构和成份信息。实验结果显示: 在特定的热处理时间变化趋势下, 一次短路熔痕晶粒大小的发展趋势与热处理时间趋势一致, 二次短路熔痕晶粒大小的发展方向与热处理时间的变化趋势相反, 而且, 一次短路熔痕织构系数的平均值随外热温度的上升, 先增大后减小, 二次短路熔痕织构系数的平均值只在较小数值范围内波动。进一步分析短路熔痕不同区域的化学成份发现, 一次短路熔痕和二次短路熔痕主要含有 C、O 和 Cu 三种元素, 在熔痕的沉积层, 一次短路熔痕的氧含量约为 6%, 二次短路熔痕的氧含量约为 3%, 但在熔痕基体区, 一次短路熔痕和二次短路熔痕的氧含量基本无变化, 均在 3% 左右, 不随外热温度和热处理时间变化。从研究结果可知, 在 600 °C 内的电气火灾中, 短路熔痕随外热温度和热处理时间变化的相关数据可以成为短路熔痕量化分析的基础。

**关键词:** 火灾; 短路; 熔痕

中图分类号: TG115.213; X928.7 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2015)02-0001-07

## The Relationship Between the Melted Mark of Short Circuited Arc and External Heat in Electrical Fire

WANG Li<sup>1</sup>, FANG Shitong<sup>1</sup>, YU Shenghui<sup>1</sup>, LIANG Dong<sup>1</sup>

(School of Engineering//Guangdong Provincial Key Laboratory of Fire Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** With the help of the powder X-ray diffraction, scanning electron microscope and energy dispersive spectroscopy, the PSM and SSM were studied to develop the quantitative analyses and demonstrate the relationship between the phase transition of copper melted mark the external heat condition in electrical fire. It is found that it is different for the trend of the grain size with the heat treatment time between PSM and SSM, and the curves of the texture coefficient with the heat treatment temperature between PSM and SSM shows the respective trend obviously. The chemical composition, included mainly carbon, oxygen and copper. The ratios of oxygen for the PSM is about 6%, and the ratio of oxygen for the SSM is about 3% in deposition layer. The atomic ratio of oxygen has not changed very much basically in the melted mark substrate, and it is at around 3% both PSM and SSM. The external heat has a different influence on phase transition of PSM and SSM, and the microstructure could reveal clearly, therefore, it is possible to set up the quantitative analyses for short circuit melted mark.

**Key words:** fire; melted mark; short circuit

\* 收稿日期: 2014-06-13

基金项目: 广东省科技计划资助项目(2010A060801010); 广东省消防科学技术重点实验室开放基金资助项目(2010A10)

作者简介: 王莉(1985年生), 女; 研究方向: 电气火灾物证鉴定; 通讯作者: 梁栋; E-mail: 745877130@qq.com

在电气火灾中, 短路熔痕主要形成于不同电流和火场环境, 电气火灾熔痕的物证鉴定对火灾事故调查、火灾损失评估和失效分析都至关重要, 主要原因有三点: 第一, 重大火灾突然发生时, 发达的信息网传递引发不可避免的大众舆论, 造成较大社会影响, 其关注核心是火灾发生的原因, 因此调查火灾原因成为最紧急的事情, 火灾物证鉴定是火灾调查的重要技术手段和主要组成部分, 为火灾调查提供最有效的调查信息。第二, 随着我国民主法律体系的发展和完善, 公民的法律意识随之提高, 关于火灾损失的民事诉讼将增加, 物证鉴定作为一种解决问题的有效办法, 进一步发展的火灾物证鉴定技术将为火灾调查提供可靠信息, 以便司法部门实施科学执法。最后, 火灾物证鉴定可以为火灾调查提供有用的信息, 为将来类似火灾的预防和控制提供基础, 以便保证人民的生命财产安全。因此, 发展火灾物证鉴定技术研究对人民生命财产安全和社会和谐有重要意义。

对于现有的电气火灾物证鉴定技术, 一些简单的火灾物证熔痕, 比如火烧熔痕、简单一次短路熔痕和二次短路熔痕等, 可以给出较准确的鉴定结论<sup>[1-2]</sup>, 但经过火烧后的一、二次短路熔痕的准确鉴定就难以实现, 从而形成了一次短路和二次短路之间一个无法明确区分的“灰色地带”<sup>[3-4]</sup>。与发达国家相比, 我国的火灾物证鉴定是火灾科学的一个薄弱环节<sup>[5-6]</sup>, 由于起步晚, 发展相对缓慢和滞后, 大多数技术和结果均处于经验和半经验水平, 一些鉴定技术仍缺少基础理论和相关数据, 未形成完整的科学体系<sup>[7]</sup>。随着人们逐渐认识到科学火灾调查的重要性及火灾物证鉴定在火灾调查中作用, 电气火灾物证鉴定技术迫切需要发展, 如今已吸引一些科研工作者致力于这个领域, 相关的方法和理论主要有形态学法、扫描电镜法和晶枝距离分析<sup>[8]</sup>、二次离子质谱法和碳结构分析法和俄歇电子能谱深度刻蚀法等<sup>[9-10]</sup>。

基于短路熔痕形成环境和过程的复杂性, 本文将短路熔痕的形成过程简化为金属铜淬火和退火等物理过程, 搭建实验装置模拟一般电气火灾现场条件, 制备复杂一次短路熔痕和二次短路熔痕, 测试短路熔痕的沉积层和基体部分, 分析短路熔痕经不同外热条件后, 相变的微观组织结构随外热条件的变化, 为缩小一次短路和二次短路的“灰色地带”提供可靠数据, 并讨论短路熔痕的形成机理。

## 1 实验

### 1.1 实验准备

搭建可重复的实验装置, 为证明实验装置的稳定性和可靠性, 用相同数目的木棒在实验装置中燃烧, 用 k 型热电偶和安捷伦数据采集仪测试固定点的温度随时间的变化, 其温度与时间的变化曲线如图 1 所示, 从 4 次木棒燃烧的温度时间关系曲线看出, 4 次木棒燃烧的最高温度、升温速率和降温速率均较吻合, 说明实验装置是可靠的。

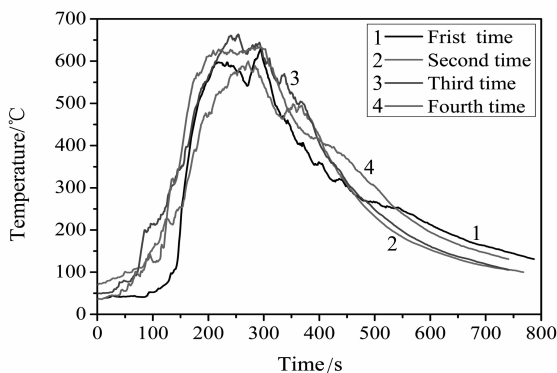


图 1 木棒燃烧温度和时间关系曲线

Fig. 1 The temperature-time curves

### 1.2 样品制作

在标准火灾实验室中搭建如图 2 所示的实验装置, 在实验装置中, 用 k 型热电偶和安捷伦数据采集仪 (Agilent 34901A) 进行木棒燃烧温度数据的采集, 热电偶与两根导线短路点间保持 1 cm 的距离。一次短路熔痕样品在 200 A 和不同根木棒的条件下制备, 其实验条件如表 1 所示, 在进行实验时, 一次短路的过程是: 两根导线在通电下触碰短路, 再点燃木棒进行燃烧, 等木棒在空气中自由燃烧结束, 取出一一次短路熔痕。二次短路熔痕的制备

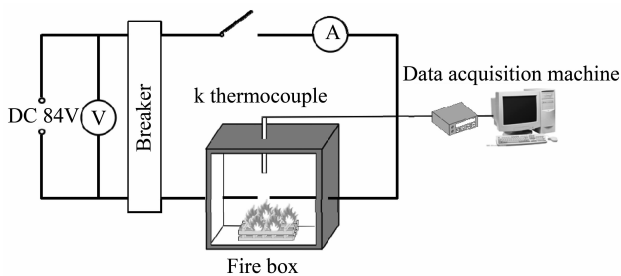


图 2 实验装置图

Fig. 2 The Schematic diagram of experimental set-up

条件如表 2 所示，其过程是：先点燃木棒开始燃烧，当固定点温度达到 350 °C 时，再进行两根导线触碰短路，最后木棒在空气中燃烧结束，取出二次短路熔痕。在整个实验中，电流由 84 V 的直流电源提供，所用短路导线是面积为 2.5 mm<sup>2</sup> 的 BVV 铜线，同时，为了扩展温度范围，用 5 mL 和 10 mL 酒精和木棒一起混合燃烧来提高温度，实验所

得一次短路熔痕和二次短路熔痕经研磨、抛光和腐蚀等预处理<sup>[11]</sup>，以便于 X 射线衍射仪（XRD，Japan, D-MAX 2200 VCP）和扫描电镜（SEM，JSM-6010LA）及能谱仪（EDS，Thermal field emission Environmental SEM-EDS-EBSDFEL/OXFORD/HKL，Quanta 400F）进行测试。

表 1 一次短路熔痕制备的实验条件

Table 1 The experiment detail condition of the primary short circuited melted marks

样品编号	0-1	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7
最大温度/°C	21	443	462	575	631	659	720	760
热处理时间/s	0	316	445	541	615	1 062	863	657
木棒的根数/bar	0	10	15	25	35	45	25 + 5 mL	20 + 10 mL

表 2 二次短路熔痕制备的实验条件

Table 2 The experiment condition of the secondary short circuited melted marks

样品编号	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8
最高温度/°C	344	498	522	629	638	649	699	740
热处理时间/s	297	578	901	458	523	498	1 135	1 770
木棒数目/bar	10	15	20	25	30	35	45	25 + 5 mL

## 2 实验结果

### 2.1 XRD 分析

图 3 中分别示出一次短路熔痕和二次短路熔痕的 XRD 数据，其数据是 X 射线衍射仪在 25° 到 95° 的 2 倍角范围内以 7°/min 的速率扫描一次短路熔痕和二次短路熔痕所得，图 3 (a) 对应于一次短路熔痕样品，图 3 (b) 对应于二次短路熔痕样品，一次短路熔痕和二次短路熔痕的 2 倍角大约在 43.316°、50.448°、74.124° 和 89.935° 处，经分析发现，此四个特征峰均属于面心立方结构的铜（JCPDS，85 - 1326），分别对应铜的（111）、（200）、（220）和（311）晶面，未发现氧化铜或是氧化亚铜的特征峰，说明在 X 射线衍射仪的测试精度内，不存在铜的氧化物。相比较与铜线的四个特征峰，熔痕的大多数 2 倍角向高角度方向偏移，说明一、二次短路熔痕的铜晶格结构已形成，由于氧原子半径为 0.074 nm，小于铜原子半径 0.127 nm，易进入铜晶格结构中，使熔痕的铜晶格结构变形，致使 2 倍角向高角度方向偏移。

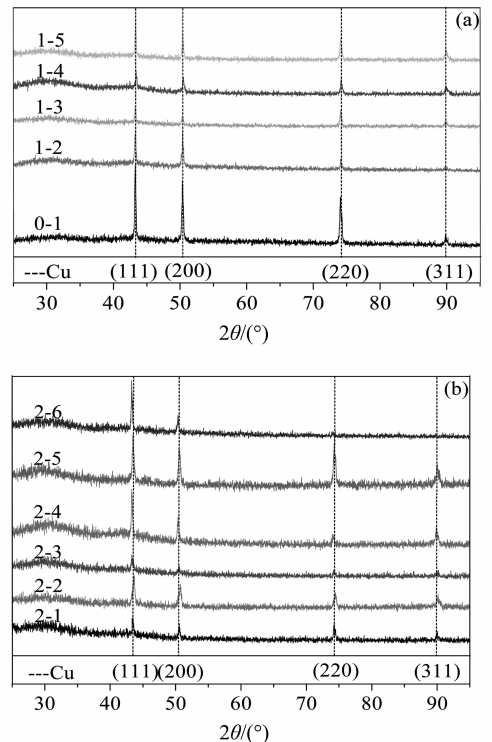


图 3 短路熔痕的 XRD 数据

Fig. 3 XRD patterns of the short circuited melted mark  
(a) 一次短路熔痕的 XRD; (b) 二次短路熔痕的 XRD 曲线

根据谢乐公式计算 (111)、(200)、(220) 和 (311) 四个衍射方向的晶粒尺寸<sup>[12-13]</sup>, 基于铜晶格的立方结构, 对每个衍射峰计算的晶粒尺寸平均, 作为最后的晶粒尺寸列于表 3 中, 大多数的一次短路熔痕和二次短路熔痕的晶粒尺寸均小于铜线的晶粒尺寸 64.2 nm, 同时, 一次短路熔痕晶粒尺寸大于二次短路熔痕的晶粒尺寸, 这是由于一次短路的铜导线被短路焦耳热熔化后, 在室温自由冷却结晶后, 被外热环境再次加热, 类似于对熔痕进行了退火处理, 熔痕晶粒进一步生长。在短路后金属在室温中自由冷却, 温度从 1 083 °C 到 25 °C 存在较大过冷度, 易于晶粒形核生长, 后续 600 °C 左右的退火, 使晶粒进一步生长。对于同样实验条件的二次短路熔痕, 其情况是铜线短路后液态金属铜从 1 083 °C 到 600 °C 左右的冷却, 温度梯度小于一次

短路熔痕, 接着熔痕继续在 600 °C 以内降温, 不存在退火和熔痕晶粒进一步生长的过程。基于金属的相变理论, 临界成核半径关系:  $r^* = 2\gamma\tau_0 / (L_v\Delta\tau - \tau_0 E_v)$  和相变驱动力与过冷度的关系:  $\Delta G \approx L_v\Delta\tau / T_c$ , 其中,  $L_v$ ,  $\gamma$  和  $E_v$  分别为相变潜热、单位面积表面能和弹性应变能,  $\Delta T = T_0 - T$  是过冷度, 从以上理论公式看出, 材料一定的情况下, 过冷度是金属凝固相变的主要决定因素, 过冷度越大, 其临界形核半径越小, 越易形成可以进一步生长的晶核, 晶核生长时, 过冷度越大, 其相变驱动力越大, 越易于促进相变和晶粒长大。虽然, 在整个形成中, 某种程度上来说两种短路熔痕的总热量相同, 但是每个过程的发生顺序不同, 导致其最后的不同结果, 这正是区别复杂一次短路熔痕和二次短路熔痕的核心。

表 3 一次短路熔痕和二次短路熔痕的晶粒平均值

Table 3 The average grain size for the PSM and SSM at the similar condition

样品编号	0-1	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7
晶粒大小/nm	45.4	--	38.2	54.7	43.9	61.1	43.5	32.5
样品编号	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8
晶粒大小/nm	38.9	39.2	34.7	43.1	44.9	36.1	48.6	46.2

进一步研究短路熔痕晶粒平均大小和外热处理时间的关系, 由于样品 1-1 未测试出数据, 且排除铜导线样品的参考样品 0-1 的数据, 剩余 6 个数据分析结果如图 4 所示, 横坐标是样品编号, 由于编号是与热处理温度是一一对应, 也就是编号越靠后, 热处理温度就越高, 所以这样图就将热处理温度、热处理时间和晶粒大小集合于一个图中分析, 图 4 说明一次短路熔痕的平均晶粒大小与外热处理时间的发展方向一致, 同时, 类似于一次短路熔痕的实验条件, 在二次短路熔痕中选取 6 个样

品, 分析结果如图 5 所示, 其平均晶粒大小与外热处理时间的趋势相反, 当外热处理时间增加时, 熔痕的晶粒尺寸却减小, 但当热处理时间降低时, 二次短路熔痕的平均晶粒大小却增大, 这点与一次短路熔痕的结果不同, 而且, 当样品编号越大, 也就是二次短路熔痕温度越大, 其晶粒大小也有一个增大趋势, 这说明外热温度和热处理时间对熔痕晶粒生长的影响不同, 在 600 °C 以内, 外热温度在熔痕的结晶过程是主导因素, 也就是过冷度的影响为主, 热处理时间小幅度调节。

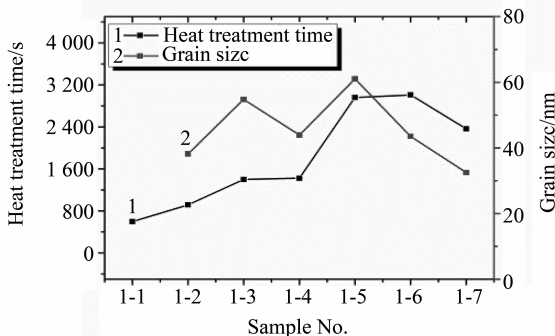


图 4 一次短路熔痕晶粒大小与外热处理时间的关系曲线

Fig. 4 The relationship between the grain sizes of PSM and heat treatment time

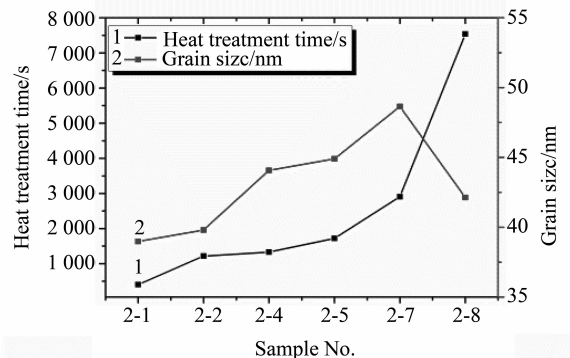


图 5 二次短路熔痕晶粒大小与外热处理时间的关系曲线

Fig. 5 The relationship between the grain sizes of SSM and heat treatment time

为了半定量分析铜晶粒的结构取向，本文采用织构系数反应晶格结构的择优取向特性<sup>[14-16]</sup>，在织构系数的定义式  $TC = \frac{I_i(hk \cdot l)/I_0(hk \cdot l)}{\frac{1}{n} \sum_1^n [I_i(hk \cdot l)/I_0(hk \cdot l)]}$

中， $I_i(hk \cdot l)$  指短路熔痕晶面  $(hk \cdot l)$  的衍射强度， $I_c(hk \cdot l)$  指标准样品晶面  $(hk \cdot l)$  的衍射强度，可从标准卡片中查得，当 TC 值接近于 1 时，说明样品的结晶无择优取向，当样品的 TC 值大于 1，值越大说明样品的择优取向越明显。将熔痕样品的 XRD 数据进行计算，结果如图 6 和图 7 所示，图 6 中绘出一次短路熔痕的 TC 值，图 6 (a) 是四个衍射峰的 TC 值两两平均的结果，其晶面 (111) 和 (200) 的 TC 平均值随着外热温度的上升是先上升后下降的变化趋势，(220) 和 (311) 晶面的 TC 平均值与 (111) 和 (200) 晶面的 TC 平均值变化趋势相反，说明结晶过程中晶面 (111) 和 (200) 优先生长，随着外热温度升高，其生长的优势降低，而 (220) 和 (311) 的生长优势升高。在图 6 (b) 中，晶面 (111) 和 (200) 的 TC 值曲线说明这两个晶面的生长是同步一致的。对于二次短路熔痕，如图 7 所示，晶面 (111) 和 (200) 的 TC 平均值基本保持稳定，晶面 (220) 和 (311) 也有类似趋势，但晶面 (111) 和 (200) 还是优先于其余两个晶面生长，同时从图 7 (b) 看出，相对于晶面 (111)，晶面 (200) 体现出择优生长趋势，这一点在一次短路熔痕中也有体现，如图 6 (b) 中灰色色线所示。这说明在一次短路熔痕和二次短路熔痕的结晶过程中，由于各个晶面的生长与热流方向的不同关系，晶面 (200) 会优先生长，再是 (111) 晶面，其次是 (220) 和 (311) 晶面，这与现有文献一致<sup>[17]</sup>，对于一次短路熔痕的 (111) 和 (200) 晶面是一个不断生长完善的结晶过程，这是由于外热环境的特殊性所决定的，而二次短路熔痕由于其结晶过程中的外热环境变化复杂，且无一次短路熔痕类似的退火过程，晶粒的生长比较短促和不完善，未体现出其本质趋势。

### 2.2 熔痕形貌和成份分析

用扫描电镜及能谱仪观察熔痕的表面沉积层形貌和获取熔痕不同区域的成份数据，结果如表 4、5 和 6 所示，短路熔痕的沉积层主要含有氧、碳和铜这三种元素，其中，一次短路熔痕沉积层的氧含量高于二次短路熔痕沉积层的氧含量，一次短路熔痕的氧含量约为 6%，二次短路熔痕约为 3%，越靠近熔痕表面，氧含量越高，在对熔痕表面的 EDS

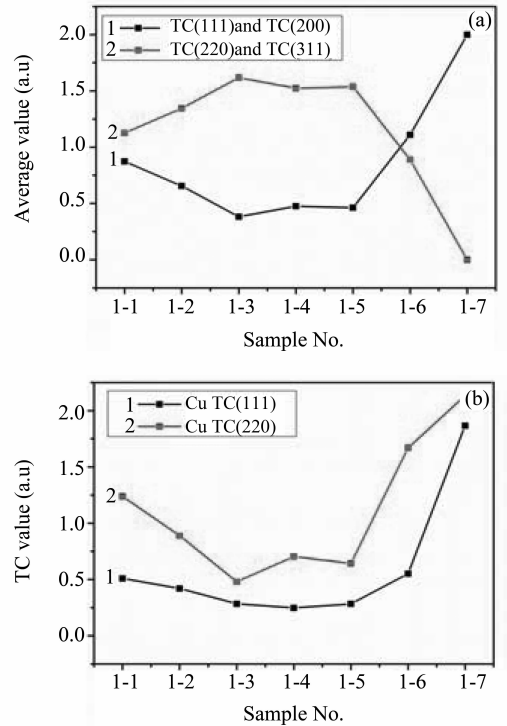


图 6 一次短路熔痕的织构系数与外热处理温度的关系  
Fig. 6 The relationship between TC value of PSM and external heat temperature

- (a) 两两晶面的平均值织构系数图；
- (b) 晶面 (111) 和 (200) 的织构系数

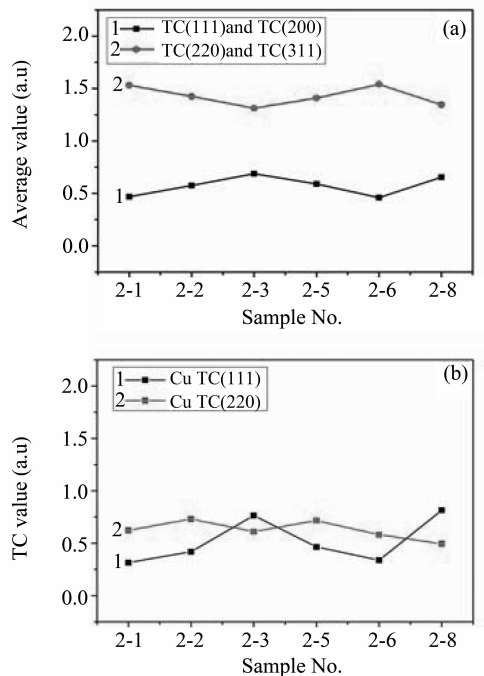


图 7 二次短路熔痕的织构系数与外热处理温度的关系  
Fig. 7 The relationship between TC value of SSM and external heat temperature

- (a) 两两晶面的平均值织构系数图；
- (b) 晶面 (111) 和 (200) 的织构系数

测试中发现, 一次短路熔痕的氧含量大约为 16.23%, 二次短路熔痕的氧含量约为 8.87%, 与沉积层类似, 一次短路熔痕和二次短路熔痕间存在较大差异。在熔痕的基体部分, 一次短路熔痕和二次短路熔痕的氧含量均为 3%, 同时, 分析表面和沉积层的氧铜含量比发现, 无论是一次短路熔痕还是二次短路熔痕, 其表面的氧铜含量比均接近于 1, 高于只短路形成的熔痕表面氧铜比 0.41, 说明熔痕表面以 CuO 为主, 而一次短路熔痕沉积层的氧铜含量的比均小于 0.5, 二次短路熔痕沉积层的氧铜比小于一次短路熔痕, 一次短路熔痕沉积层的氧铜含量比在 0.1 到 0.5 之间, 二次短路熔痕沉积层的氧铜比小于 0.1, 对于一、二次短路熔痕的基体区而言, 氧铜比基本无差异, 在 0.07 左右, 说明短路熔痕基体区域几乎没被氧化, 这主要是由于 200 A 下短路持续时间短, 大约在 30 ms, 氧气溶

入因短路熔化的金属溶液中的量少而导致, 基于现有的数据可知, 氧化物主要存在于短路熔痕的表面及沉积层中, 且短路熔痕在外热环境中时间延长或温度升高, 氧和铜的反应几率增大, 越易行成氧化物。因此, 在 600 °C 的外热中, 短路熔痕存在铜的氧化物, 分布在熔痕表面和沉积层中, 且含量较少。同时, 一次短路熔痕和二次短路熔痕的沉积层形貌如图 8 和图 9 所示, 从 SEM 照片可以看出, 一次短路熔痕和二次短路熔痕均存在一层结构不同于基体部分的沉积层, 其结构松散, 厚度不等, 对所有熔痕样品的沉积层进行观察和测量, 发现沉积层厚度随外热温度上升或是热处理时间的延长粗略的体现出上升趋势, 从几个微米增加到几十个微米, 而且从外观上来看, 沉积层的结构随着外热温度的上升和热处理时间的延长趋于致密性。

表 4 熔痕表面的元素成份数据

Table 4 The EDS data on the surface of melted marks

样品编号	0-1	1-2	1-3	1-4	1-6	2-1	2-2	2-5	2-8
O (atomic %)	24.59	41.05	41.95	39.69	40.24	36.86	36.65	37.5	43.93
Cu (atomic %)	60.09	41.29	41.27	38.29	43.61	41.52	47.66	47.81	41.67
O;Cu (atomic %)	0.41	0.99	1.02	1.04	0.92	0.89	0.77	0.78	1.05

表 5 熔痕沉积层的元素成份数据

Table 5 The EDS data in deposit layer of melted marks

样品编号	0-1	1-2	1-3	1-4	1-6	2-1	2-2	2-5	2-8
C (atomic %)	37.55	40.08	59.1	53.8	53.01	55.7	57.76	41.43	55.73
O (atomic %)	6.03	6.41	6.37	16.23	6.27	3.49	3.9	38.87	2.91
Cu (atomic %)	54.34	52.51	34.52	29.9	40.72	40.81	38.31	48.21	41.35
O;Cu (atomic %)	0.11	0.12	0.18	0.54	0.15	0.08	0.10	0.08	0.07

表 6 熔痕基体部分的元素成份数据

Table 6 The EDS data on the substrate of melted marks

样品编号	0-1	1-2	1-3	1-4	1-6	2-1	2-2	2-5	2-8
O (atomic %)	2.49	2.64	3.04	2.66	2.87	3.45	3.77	3.49	3.09
Cu (atomic %)	67.31	66.37	41.1	42.07	42.07	43.45	43.51	56.61	43.95
O;Cu (atomic %)	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.08	0.09	0.06	0.07

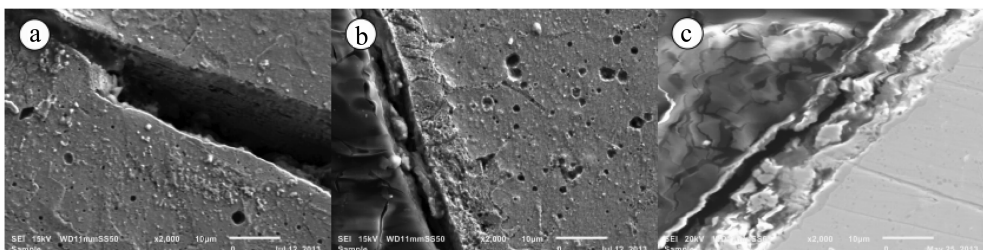


图 8 一次短路熔痕沉积层的 SEM 照片

Fig. 8 Typical SEM of PSM for the deposit thickness

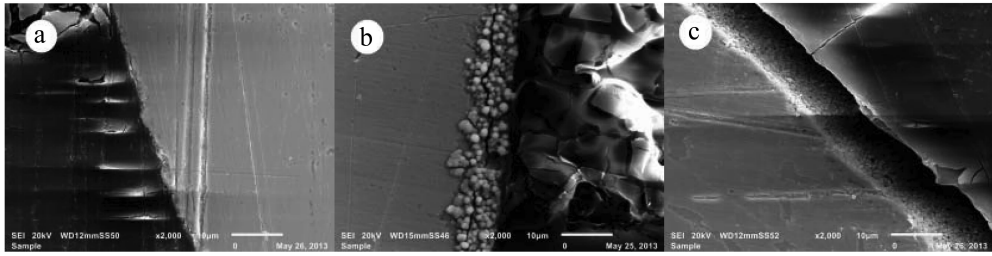


图 9 二次短路熔痕沉积层的 SEM 照片

Fig. 9 Typical SEM of SSM for the deposit thickness

### 3 结 论

1) 在 600 °C 以内, 一次短路熔痕和二次短路熔痕的晶粒大小均随温度升高而增大, 但随着热处理时间的变化, 二次短路熔痕晶粒大小与热处理时间的关系不同于一次短路熔痕, 同时, 在熔痕的织构系数中, 晶面 (111) 和 (200) 的织构系数随热处理温度的变化, 其之间的关系也体现出一次短路熔痕和二次短路熔痕之间的不同, 并发现晶面 (200) 优先生长, 这一点在一次短路熔痕和二次短路熔痕的数据中均有体现。

2) 短路熔痕的沉积层主要含有氧、碳和铜元素, 一次短路熔痕的沉积层氧含量约为 6%, 而二次短路熔痕的沉积层氧含量约为 3%, 两种熔痕的基体区氧含量均为 3%, 同时, 一次短路熔痕沉积层的 O: Cu 约在 0.1 ~ 0.5 之间, 而二次短路熔痕的 O: Cu 小于 0.1, 基体部分的 O: Cu 均在 0.07 左右。

3) 基于此研究, 构建一个短路熔痕模型: 共 4 层, 第一层为外表面, 主要以碳和氧为主, 是由于熔痕表面的吸附作用形成; 第二层为沉积层, 以铜的氧化物为主, 是空气和高温铜反应形成, 厚度从几个微米到十几个微米不等; 第三层为铜和氧化物的混合区, 主要是铜和氧化物的混合或共晶, 主要是铜和氧的失配区, 未能完全形成类似沉积层的结构; 第四层是熔痕基体部, 主要是铜和少量的氧, 是铜导线短路熔化后重凝固形成。

#### 参考文献:

[1] 刘东旗, 刘艳芹. 电气火灾的分析和预防[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(7): 179-182.  
 [2] 武巍, 胡双启. 电气火灾残留物的 SEM 分析方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(4): 15-19.  
 [3] 莫善军, 彭文敬, 梁栋, 等. 电气火灾一次短路熔痕金相组织特征参数定量分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(1): 63-70.  
 [4] 蒋勇, 邱榕, 钟茂华, 等. 火灾调查理论框架建立探讨

[J]. 中国安全生产科学技术, 2005, 1(4): 8-12.  
 [5] LIAO G X, ZONG R W. The important branch of fire science-fire investigation [C] // China Association for Science and Technology Academic Conference Proceedings of 24 at the Venue, 2005: 388-391.  
 [6] 蒋玲. 国外火灾探测及疏散技术发展现状概述[J]. 消防技术与产品信息, 2011, 5: 19-21.  
 [7] GAO A, ZHAO C Z, DI M. Microscopic investigation of a copper molten mark by optical microscopy (OM) and atomic force microscopy (AFM) [J]. Procedia Engineering, 2011(11): 100-106.  
 [8] LEE E P, OHTANI H, MATSUBARA Y. Study on discrimination between primary and Secondary molten marks using carbonized residue [J]. Fire Safety Journal, 2002, 37(4): 353-368.  
 [9] CHEN C Y, LING Y C, WANG J T. SIM depth profiling analysis of electrical arc residues in fire investigation [J]. Applied Surface Science, 2003, 203: 779-784.  
 [10] 林宝玉, 王庆. 应用俄歇分析法鉴别铜导线短路火灾的研究[J]. 消防科学与技术, 1989(1): 25-27.  
 [11] 居志兰, 朱永伟, 王建彬, 等. 抛光介质对固结磨料化学机械抛光水晶的影响[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 955-962.  
 [12] 戴冬梅, 鲁冰, 刘园园, 等. N, Cd-TiO<sub>2</sub> 光催化活性的实验与理论研究 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2011, 50(4): 74-78.  
 [13] 杨俊松, 张晖, 王腾, 等. 水热体系下二氧化钛与氧化石墨烯复合纳米晶的合成 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2013, 52(1): 74-82.  
 [14] ZHANG B P, WAKATSUKI K, BINH N T. Effects of growth temperature on the characteristics of ZnO epitaxial films deposited by metalorganic chemical vapor deposition [J]. Thin Solid Films, 2004, 449: 12-19.  
 [15] 魏松丽, 吴丁财, 符若文. 制备方法对 Pt/CA 催化剂电化学性能的影响 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2010, 49(5): 72-76.  
 [16] 苑少强, 张晓娟, 郝斌. 弛豫过程中的纳米析出及贝氏体组织的细化 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(8): 1995-1999.  
 [17] 许振明, 李丽, 李建国. 连续铸造铜单晶的晶体取向与竞争生长 [J]. 人工晶体学报, 1999, 28(2): 189-195.