

电气火灾一次短路熔痕物证鉴定案例分析*

莫善军, 马 荣, 黄立明, 田文龙

(1. 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: 电气火灾物证检测过程中判定一次短路熔痕性质鉴定意见关乎火灾调查工作进行, 必须做到科学、客观。当前电气火灾原因技术鉴定方法宏观法和金相法国标只有比较笼统的定性判据, 缺乏参考图谱和详细说明, 而实际火灾案例中一次短路送检物证特征又鲜有总结分析。本文对民宅、仓库和车间三类场所典型一次短路火因的实际火灾案例中熔痕迹物证痕物证外观和金相特征进行分析和总结, 并与国标特征描述和模拟实验样品熔痕特征进行对比分析, 总结分析一次短路熔痕一般特征和发生环境的相关性, 给出鉴定应用与实践应注意的要点, 为电气火灾一次短路熔痕物证判定提供参考判据。

关键词: 一次短路, 熔痕, 电气火灾, 物证鉴定

中图分类号: X928.7 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2015)01-0057-07

The Analysis of Primary Short Circuit Melted Mark Evidence Identification in Electricity Fire Case

MO Shanjun, MA Rong, HUANG Liming, TIAN Wenlong

(1. School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The primary short circuited melted mark identification must be scientific and objective for physical evidence of the electricity fire during detecting, and the conclusions are related to the fire survey process. Currently, identification method of electricity fire, including macroscopic method and metallographic method, is very general and lacking of standard reference map and detailed description. The character of first short circuited melted mark is short of summary as well as analysis in actual fire cases. The macroscopic and metallographic character of melted mark from three class typical actual fire cases caused by first short circuited are analyzed. These cases include house, warehouse and workshop. Compared with character of melted mark from national standard, the simulated experiment is discussed. The relationship is summarized between the first short circuited melted mark and the surroundings. At the last, it is proposed that the attention points of using the first short circuited can provide for judgment and reference criterion of it.

Key words: primary short circuited; melted mark; electricity fire; material evidence identification

电气火灾是火灾案例的重要类别, 近年来重特大电气火灾频繁发生, 造成严重不良社会影响。其中电气一次短路是在火灾之前发生, 通常是引发火灾的直接原因, 对一次短路物证的鉴别必须做到科

学、客观、公正^[1-3]。

国外对于一次短路物证鉴定主要采用的方法有: 宏观分析法、熔痕孔洞分析法、炭化物残留分析法、表面分析法等等^[5-9]。这些分析方法都只停

* 收稿日期: 2014-04-22

基金项目: 公安部消防局科技计划资助项目(2013XFCX13), 广东省自然科学基金资助项目(S013010013225)

作者简介: 莫善军(1978年生), 男; 研究方向: 电气火灾调查和物证鉴定技术; E-mail: moshjun@live.cn

留在定性分析,没有相应的量化标准,面对错综复杂的火场情况只能依靠鉴定人员的经验判断,难以做到公正客观。

我国在电气火灾痕迹鉴定领域制订了相关标准,即《电气火灾原因技术鉴定方法》(GB/T 16840),该标准包括六部分:《第1部分:宏观法》(GB/T 16840.1-2008)、《第2部分:剩磁法》(GB 16840.2-1997)、《第3部分:成分分析法》(GB 16840.3-1997)、《第4部分:金相法》(GB 16840.4-1997)、《第5部分:电气火灾物证识别和提取方法》(GB/T 16840.5-2012)和《第6部分:SEM微观形貌分析法》(GB/T 16840.6-2012),其中第1部分宏观法和第4部分金相法是判定一次短路物证的主要方法,近些年应用和实践最为广泛,但是这两种方法对于一次短路熔痕鉴定判据只做了定性的描述,比较宽泛,且没有相关参考图谱供,目前鉴定工作主要依据个人的经验开展^[10-11]。另外,火灾熔痕技术鉴定工作属于交叉小众学科,一直由公安消防内部机构承担,行业间交流不够充分,当前越来越多社会第三方司法机构参与此项服务,实际电气火灾案例一次短路熔痕特征急需总结和分析,并给出相应的对照图谱^[12]。一些学者也尝试通过模拟火场环境短路实验,从而构建短路熔痕的金相图谱库。但是实验室的单一条件的模拟实验未能很好的将火场中的复杂环境条件完全模拟,模拟实验的样品与火场真实环境熔痕仍存在一些差别(表1)。

弥补国标和模拟实验二者存在一定的缺陷,对电气火灾实际案例的总结是必要的。本文将从火灾物证鉴定还原到火灾现场环境中进行分析,对发生在民宅、仓库和车间三类常见代表性场所的典型一次短路火因的熔痕物证外观和金相特征进行研究总结,并与国家标准以及实验熔痕进行对比分析,总结出更具实用意义的一次短路熔痕特征,给出一次短路的判定标准和相关图谱。并作为对国标进行补充和完善,为电气火灾一次短路的认定提供更精准的鉴定参考依据。

1 物证鉴定技术

电气火灾物证技术鉴定是专业鉴定机构利用专门的技术方法和仪器设备对取自起火点的火灾物证进行检测,并经过综合判定给出鉴定结论,找出引发火灾的引火源和引火物,从而得出科学、准确的火灾起因认定结论。一次短路熔痕是指电气线路在着火前发生短路故障而残留的熔化痕迹,包含三层含义:一是熔痕产生时处于非火灾环境,即自然环境;二是该熔痕的产生表示电气线路发生火前短路故障,但是并没有考察短路形成的原因;三是熔痕产生的过程是指导线短路释放热能使导线本身从熔化到凝固的过程。在勘查现场过程中,若技术鉴定做出的一次短路熔痕的结论,再结合火场的环境,熔痕提取的位置来自于火场的着火点,则此火灾为该线路发生一次短路后引燃造成的^[13](表1)。

表1 国标中一次短路熔痕特征描述

Table 1 The description of the primary short circuited melted mark in the national standard

项目	一次短路的特征
宏观特征 (依据 GB/T 16840.1-2008)	<ul style="list-style-type: none"> ① 铜导线上的短路熔珠直径通常是线径的1~3倍,短路熔珠位于导线的端部或者歪在一侧,铜导线短路熔珠表面有光泽; ② 短路熔珠内部孔洞数量少,分布在熔珠中部; ③ 短路熔痕与导线基体交接处有明显的熔化和未熔化的分界线; ④ 在两根导线相对应的地方出现凹痕,凹痕内表面有光泽但不平滑,有堆积状熔化金属和毛刺,有扎手感; ⑤ 在铜质多股软线的线端部形成熔痕时,熔痕与导线连接处无熔化粘结痕迹,其多股细丝仍能够逐根分离;有的细丝端部出现微小熔珠。
金相特征 (依据 GB 16840.4-1997)	<ul style="list-style-type: none"> ① 金相组织呈细小的胞状晶或柱状晶; ② 熔珠金相磨面内部气孔小而较少并较整齐; ③ 熔珠与导线衔接处的过渡区界限明显; ④ 熔珠晶界较细空洞周围的铜和氧化亚铜共晶体较少不太明显; ⑤ 在偏光下观察时一次短路熔珠空洞周围及洞壁的颜色不明显。

一次短路熔痕是指在正常的情况下，电气线路因为本身的故障而造成短接引发大电流发热，在导线上留下的融化痕迹。一次短路发生之后会留下不规则的熔痕或者圆润的熔珠。一次短路发生在火灾之前，属于瞬间电弧高温熔化，具有融化范围小，冷却速度快的特点。不同的环境条件下短路熔痕形成的全过程，因此他们也就自然的形成了各自的特征^[10-11]。

2 电气火灾案例分析

2.1 住宅楼电气火灾

2010年，XX市某住宅楼一楼发生火灾，从火灾现场地面提取带有熔痕多股铜导线进行物证鉴定，导线属于住宅内用电敷设线路。从检材中提取了3个样品进行分析，外观和金相图谱如图1所示。

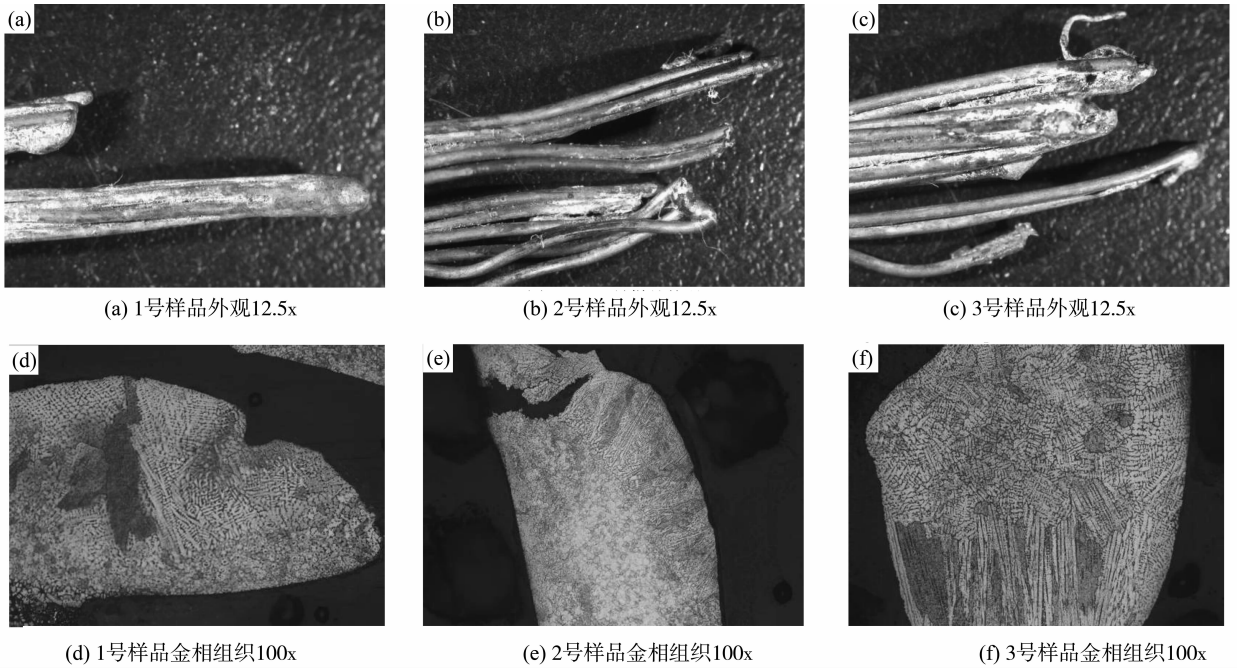


图1 1-3号样品外观 12.5x 和样品金相组织 100x

Fig. 1 The No. 1-3 sample appearance 12.5x and shape of melted mark 100x

1号样品熔珠圆润，光泽度强，呈金黄色，与熔痕相连的多股铜线完全熔化粘连，熔珠的金相组织为树枝晶，内部没有孔洞。2号样品为点状熔珠，光泽度强，呈金黄色，多股线分散，熔珠颗粒小，熔珠的金相组织为细条树枝晶和等轴晶，没有孔洞。3号样品熔珠光泽度强，连接的多股铜线熔化粘连，附着有碳迹。熔珠金相组织为树枝晶和细条柱状晶。3个样品都为多股铜导线熔痕，导线相互粘连，熔珠有光泽，比较圆润，金相组织都为树枝晶，无孔洞。

一般住宅电源都是使用220V的单相交流电，导线一般为 1.5 mm^2 铜芯线。当使用的电器过多或接入的电器额定电压不符合，都会引起导线过负荷，使绝缘皮老化、漏电或短路引起火灾^[14]。由于住宅内发生短路时的电流都比较低，低于电度表容量，所以导线会产生长时间发热，使得导线容易粘连线材周围的导线，烧毁绝缘皮。导线熔断后，

住宅火场的温度较低，熔痕受火场加热影响甚小，保留树枝晶的状态。一次短路熔痕宏观上出现了导线粘连现象与国标所描述的判据不相一致，而金相组织是树枝晶，并没有出现胞状晶和细小柱状晶。

2.2 车间电气火灾

2010年，XX市某工厂车间发生火灾，从火灾现场地面提取喷溅熔珠进行物证鉴定。从检材中提取了3个样品进行分析，外观和金相图谱如图2所示。

1号样品熔珠呈水滴状，大小两颗连在一起，熔珠表面光滑，有金属光泽，表面分布深棕色的斑纹，熔珠的金相结构是胞状晶体，熔珠边缘的晶粒直径较小。2号熔珠呈珠状，表面光滑，有光泽。熔珠内部金相结构是胞状晶，有孔洞。3号熔珠直径最小，表面光滑有光泽。熔珠内部金相结构是胞状晶，边缘有较多孔洞。样品都为喷溅熔珠，表面光滑，有金属光泽，但颜色较灰暗。金相组织都为胞状晶，有孔洞分布在熔痕边缘。

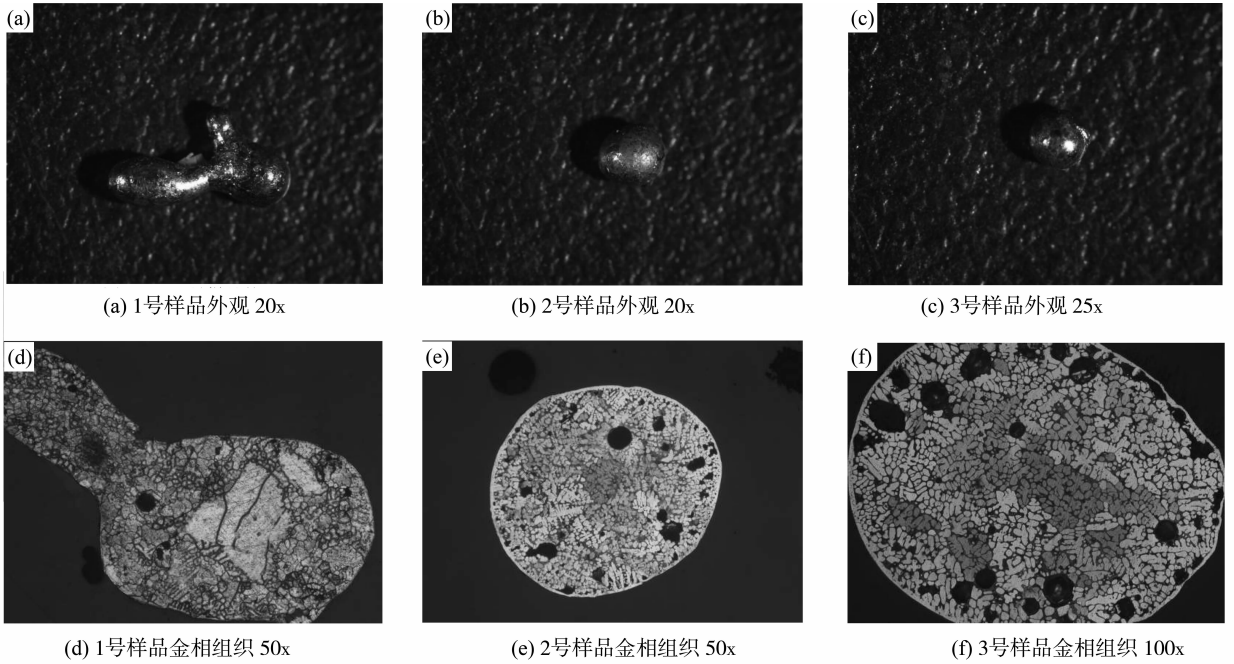


图 2 1-3 号样品外观和 1-3 样品金相组织

Fig. 2 The No. 1-3 sample appearance and shape of melted mark

车间厂房电力配电一般采用放射式, 绝缘电缆和导线的额定电压一般不低于 500 V, 电缆配线一般在 2.5 mm^2 及以上^[15]。车间用电状况较复杂, 为了易于临时拉线用电, 线路采用明敷设方式, 多为悬挂式。并且车间一般都会有消防灭火系统, 多为洒水系统。一旦发生火灾, 可燃物复杂, 消防洒水系统的喷淋作用, 容易使短路熔痕受到环境的烟气水滴掺混, 使得熔珠表面的颜色灰暗, 但仍具有

金属光泽。熔珠也因为烟气水滴的包裹, 削弱散热, 晶粒得以生长, 形成了柱状晶。与国标相比, 金相组织中的孔洞多在熔痕边缘, 中心出现较大的柱状晶, 见图 3。

2.3 仓库电气火灾

2011 年, XX 市某物流仓库发生火灾, 在火灾现场地面提取熔珠进行物证鉴定, 熔珠在照明设施附近发现, 见图 3。

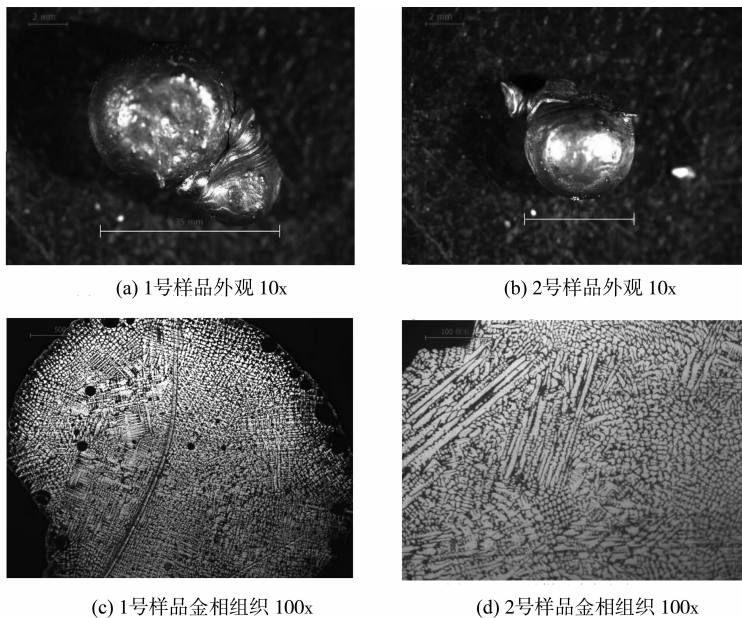


图 3 1-2 号样品外观和样品金相组织

Fig. 3 The No. 1-2 sample appearance and shape of melted mark

1 号样品为喷溅熔珠，熔珠颗粒粗大，表层圆润光滑，光泽度强，熔珠的金相组织为树枝晶。2 号样品为喷溅熔珠，表层圆润光滑，光泽度强。金相组织为树枝晶。样品都为喷溅熔珠，表面光滑，有金属光泽，颜色偏红。金相组织都为树枝晶，晶粒较大。

厂房仓库的电气线路比较简单，大多数电力用于照明，但是电气线路设备比较隐蔽。仓库是物资集中储存的场所，发生火灾时熔痕容易处于引燃聚热状态，一旦空气流通就会使火势迅速蔓延，火场温度较高^[16]。当导线发生短路熔化，金属液滴由于表面张力的缘故形成熔珠，表面较圆润光滑，光泽度强。当熔珠受到火场加热之后，熔珠表面受热，形成共晶体，颜色偏红。熔珠内会出现再结晶的过程，原本形成的树枝晶会进行生长，可以发现金相组织有点类似树枝晶，但树枝部分晶粒较大，是晶粒再结晶的结果。与国标相比，金相组织是树枝晶，却并没有出现胞状晶和细小柱状晶。

3 模拟实验

3.1 实验条件与过程

本实验通过控制铜导线的线径大小以及短路电流这两个变量来比较不同实验条件下所得熔痕的差异。铜导线选取 1.5 mm^2 和 2.5 mm^2 单芯聚氯乙烯绝缘电线，短路电流为 200 A 以及 400 A。模拟实验时截取同一线径的 30 cm 长的两段导线，将两端同时去掉 5 cm 的绝缘皮，连接在直流电源，通

过触碰造成短路，室温冷却后，收集短路后产生的熔痕和熔珠。

3.2 熔痕外观特征

不同实验条件下得到的熔痕的外观图如图 4 所示。由外观图可知，不同实验条件下的一次短路熔痕多为导线线端熔痕，包括线端珠状熔痕以及线端不规则熔痕，熔痕大小因线径大小而有差异， 1.5 mm^2 导线产生的熔痕大小为线径的 1 - 1.5 倍，而 2.5 mm^2 导线产生的熔痕多为线径的 0.5 倍。短路熔痕与导线基体交界处有明显的熔化和未熔化的分界线，熔痕表面有金属光泽，覆盖物较少。比较同一线径下短路电流为 200 A/400 A 的熔痕发现，200 A 短路电流熔痕由于短路电流相对较小而较完整，短路熔珠多分布在导线的端部；而 400 A 短路电流熔痕由于较高的短路电流，形成熔痕时喷溅强烈，致使短路熔珠分散且歪在导线一侧。

将模拟实验结果与电气火灾案例对比分析，发现模拟实验所得一次短路熔痕形态相似，差异性小，熔痕部分具有明亮的金黄色金属光泽且表面覆盖物极少；而案例中的熔痕形态各异，差异性大，熔痕部分金属光泽较暗且表面有部分覆盖物。造成模拟实验以及电气火灾案例熔痕外观差异的主要原因是实验时的环境条件单一，故实验所得熔痕相似；同时，由于模拟实验难以完全重现实际火场中的烟气环境以及温度变化等复杂情况，烟气量较实际火场少，故熔痕金属光泽较强。

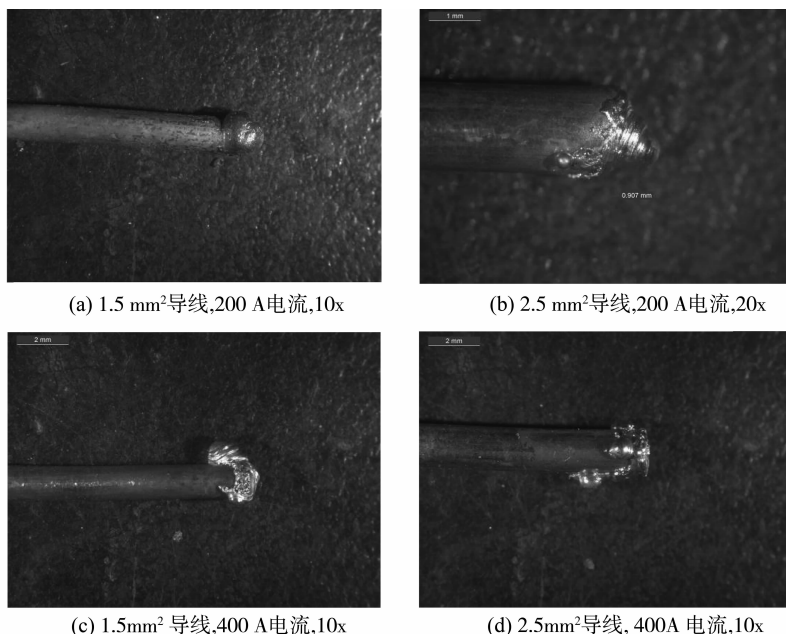


图 4 不同线径和电流下的短路熔痕外观

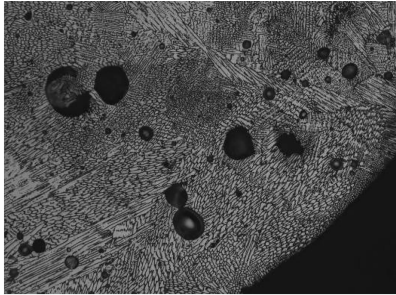
Fig. 4 The appearance in different current intensity or diameter of wire

3.3 熔痕金相组织特征

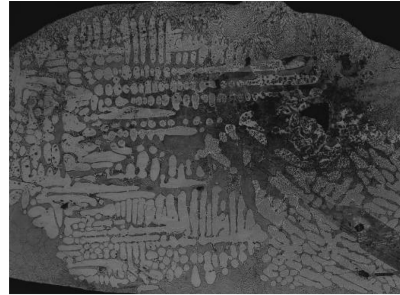
不同实验条件下得到的熔痕的金相图如图 5 所示。由金相图可知,不同短路电流下一次短路熔痕的金相组织多为胞状晶、细小柱状晶以及树枝晶,由于冷却速度从熔痕表面到熔痕内部逐渐变小,故晶体呈现熔痕边缘晶体较小且密集,熔痕内部晶体较大的特点。 1.5 mm^2 线径的导线内部冷却速度比 2.5 mm^2 线径的导线快,故在相同短路电流下, 1.5 mm^2 线径的一次短路熔痕晶体相对较小且分布

密集,而 2.5 mm^2 线径的一次短路熔痕晶体相对较大且疏散。线径部分的金相组织为等轴晶,熔痕金相组织与线径部分金相组织分解明显。由于实验环境的多变性和差异性,部分熔痕金相组织会出现少量细小的点状孔洞。

将模拟实验结果与电气火灾案例对比分析,发现实验结果与案例的金相组织基本相符,两者的金相组织为细小树枝晶或胞状晶,个别熔痕还可能有细小的点状孔洞。



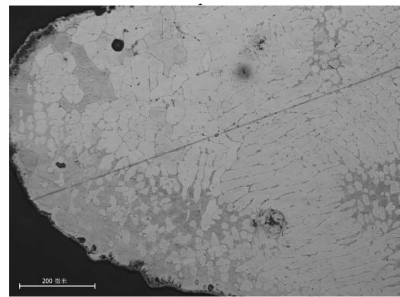
(a) 1.5 mm^2 导线, 100 A 电流, 200x



(b) 2.5 mm^2 导线, 100 A 电流, 100x



(c) 1.5 mm^2 导线, 200 A 电流, 100x



(d) 2.5 mm^2 导线, 200 A 电流, 100x

图 5 不同线径和电流下短路熔痕的金相组织

Fig. 5 The melted mark in different current intensity or diameter of wire

4 结 论

在电气火灾物证鉴定案例中,一次短路熔痕都呈珠状,比较圆润光滑,金相组织为树枝晶和胞状晶。国标里对金相组织的描述为胞状晶和细小柱状晶,并未提及树枝晶,而孔洞集中在熔痕中部,实际案例的孔洞主要分布在边缘。而模拟实验的宏观形貌较单一,皆为线端珠状熔痕,色泽上比较光亮,金相组织为树枝晶和胞状晶,没有出现国标中的细小柱状晶,没有出现再结晶现象。通过对比实际案例,国家标准以及模拟实验,火灾一次短路熔痕特征与其形成环境有很大的关联,在实际鉴定案例应注意以下 3 点:

1) 当火灾现场线路电流较小,火场可燃物种类和数量较少时,容易产生导线粘连现象,但不容

易产生喷溅熔珠,熔痕保留了导线原本的金属光泽,熔痕并没有发生明显的再结晶现象,熔痕金相组织主要以树枝晶为主。

2) 当火灾现场的电气线路功率大,可燃物复杂时,容易产生喷溅熔珠。熔痕表面较为灰暗,但仍较为平滑,有金属光泽。内部金相组织形成胞状晶为主,少数还会形成柱状晶。

3) 当火灾现场的可燃物较多,火场温度较高时,熔珠容易形成共晶析出,熔珠表面光泽偏红。熔珠内部由于受热作用而发生再结晶,熔珠内部保留有树枝晶的形状,晶粒较大,并有向胞状晶发展的趋向。

参考文献:

[1] 王希庆,韩宝玉. 电气火灾现场勘查与鉴定技术指南

- [M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1997.
- [2] 赵长征. 电气火灾原因认定和痕迹鉴定[J]. 消防技术与产品信息, 2003(12): 3-5.
- [3] 邸曼, 张明. 电气火灾成因分析[J]. 电气工程应用, 2006(4): 3-12.
- [4] Fire Investigation Section of Tokyo Fire Department. Study on discrimination between PMMs and SMMs of electrical cords (part 1). Summary for Annual Meeting of Journal of Japan Association of Fire Science and Engineering, 1990. p. 83-6 (in Japanese).
- [5] Fire Investigation Section of Tokyo Fire Department. Study on discrimination between PMMs and SMMs of electrical cords. J Jpn Assoc Fire Sci Eng 1992; 42(2(197)): 15-20 (in Japanese).
- [6] MASAYOSHI M. Possibility of carbon inclusion in the molten mark of polyvinyl chloride insulated cords due to a fire, T. IEE Japan 1992; 112-A(1): 78-9 (in Japanese).
- [7] ROBERT N. Surface analysis of electrical arc residues in fire investigation. J Forensic Sci 1989; 34(3): 633-7.
- [8] KASUHIRO S. Secondary ion mass spectroscopy (SIMS) and auger electron spectroscopy (AES) applied to fire investigation due to shortcircuits[C] // Summary for Annual Meeting of Journal of Japan Association of Fire Science and Engineering, 1996; 282-285 (in Japanese).
- [9] KASUHIRO S. Verification SIMS applied to fire investigation due to short-circuits[C] // Summary for Annual Meeting of Journal of Japan Association of Fire Science and Engineering, 1998; 336-339 (in Japanese).
- [10] 公安部沈阳消防科学研究所. GB/T 16840.1-2008 电气火灾痕迹物证技术鉴定方法 第1部分: 宏观法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [11] 公安部沈阳消防科学研究所. GB 16840.4-1997 电气火灾原因技术鉴定方法 第4部分: 金相法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [12] 莫善军, 彭文敬, 梁栋. 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.
- [13] 朱明华. 火灾原因调查方法及应用[J]. 武警学院学报. 2007, 4(23): 67-69.
- [14] 陶树英. 住宅电气火灾的防范探讨[J]. 企业科技与发展. 2014(1): 41-42.
- [15] 郭鹏, 杜元恺. 浅析工厂车间电气设计[J]. 硅谷, 2011(14): 91-110.
- [16] 余华, 何学秋. 仓库火灾特点、原因及防范对策探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2005, 10(1): 85-87.

(上接第 56 页)

- [16] BAE J, HWANG W Y. Minimum-error discrimination of qubit states: Methods, solutions, and properties [J]. Phys Rev A, 2013, 87(1): 012334.
- [17] PERES A, TERNO D. Optimal distinction between non-orthogonal quantum states [J]. J Phys A, 1998, 31(34): 7105.
- [18] CHEFLES A. Unambiguous discrimination between linearly independent quantum states [J]. Phys Lett A, 1998, 239(6): 339-347.
- [19] SUN Y, HILLERY M, BERGOU J A. Optimum unambiguous discrimination between linearly independent non-orthogonal quantum states and its optical realization [J]. Phys Rev A, 2001, 64(2): 022311.
- [20] JAFARIZADEH M A, REZAEI M, KARIMI N, et al. Optimal unambiguous discrimination of quantum states [J]. Phys Rev A, 2008, 77(4): 042314.
- [21] SAMSONOV B F. Optimal positive-operator-valued measures for unambiguous state discrimination [J]. Phys Rev A, 2009, 79(4): 042312.
- [22] BERGOU J A, FUTSCHI U K, FELDMAN E. Optimal unambiguous discrimination of pure quantum states [J]. Phys Rev Lett, 2012, 108(25): 250502.
- [23] BAGAN E, MUÑOZ-T R, OLIVARES-R G A, et al. Optimal discrimination of quantum states with a fixed rate of inconclusive outcomes [J]. Phys Rev A, 2012, 86(4): 040303 (R).
- [24] ZHOU X F, LIN Q, ZHANG Y S, et al. Physical accessible transformations on a finite number of quantum states [J]. Phys Rev A, 2007, 75(1): 012321.
- [25] ZHO X F, ZHANG Y S, GUO G C. Unambiguous discrimination of mixed states: A description based on system-ancilla coupling [J]. Phys Rev A, 2007, 75(5): 052314.
- [26] BERGOU J A. Discrimination of quantum states [J]. Journal of Modern Optics, 2010, 57(3): 160.