

文章编号:1004-5309(2008)-0044-05

铜导线短路熔痕微观形貌特征分析与研究

王 芸¹, 安晓利¹, 魏 星¹, 李端杰²

(1. 中国人民武装警察部队学院, 廊坊 065000; 2. 陕西省延安消防支队)

摘要:采用模拟实验的方法制备了铜导线一次短路熔痕和二次短路熔痕, 利用 KYKY-2800B 型扫描电子显微镜 (SEM) 对铜导线一次短路熔痕和二次短路熔痕的微观形貌进行了观察, 并对内部气孔的数量、大小、分布等进行了统计分析, 发现了一次短路气孔的数量、分布与二次短路之间的差别与长期采用的鉴定依据不同。

关键词:短路熔痕; 扫描电子显微镜; 微观形貌; 气孔

中图分类号: O766.1 **文献标识码:** A

0 引言

在通过电气线路的建筑中发生火灾, 有时会在带电部分的铜质线路上找到铜线熔痕。根据通电导线熔痕形成的原因, 一般将其分为一次短路熔痕和二次短路熔痕。一次短路熔痕的形成原因是不同相或不同电位的导线因自身发生故障而引发电弧形成的熔化痕迹; 二次短路熔痕是导线绝缘受到外界火焰或高温作用下, 不同相或不同电位的裸露导线之间引发电弧而形成的熔化痕迹^[1]。在认定火灾原因过程中, 一次短路可能是火灾的原因; 而二次短路是火灾作用的结果。因此分析这些导线残留物熔痕的表面形态和其内部的组织结构可能作为认定火灾原因的重要证据。

目前国内使用扫描电子显微镜 (SEM) 对铜导线短路熔痕进行了研究, 取得了阶段性成果。如: 一次短路的孔洞均匀、细密, 有明显的树枝晶、柱状晶和共析组织, 熔珠断面和基体 (杆) 断面呈抛物线型卵形花样等; 二次短路的单股铜导线熔珠断面呈蜂窝状花样, 断面的孔洞不均匀, 有较大的气孔存在, 在高倍像中, 洞底部有平行的条状花纹, 内壁有小的孔缩, 卵石状颗粒和灰尘等。^[2]

国外许多国家在铜导线熔痕认定方面也形成了自己的特点: 日本对一次短路熔痕和二次短路熔痕进行了外观形貌特征、金相组织、微观形貌等进行了特征比较观察, 得出了一系列有价值的结论^[3]; 台湾 CHEN 等人利用离子质谱仪 SIMS 对一次短路熔痕和二次短路熔痕不同深度表面的碳、铜、氧、氯进行测定, 得出了在不同深度表面上, 一次短路熔痕和二次短路熔痕氯的含量有明显不同, 并且认定以此可作为判定的依据^[4]。日本学者 Eui-Pyeong Lee 等人采用扫描电子显微镜、X-射线散射分析仪进行了形貌观察和表面的成分分析, 并利用拉曼光谱对熔痕碳化残留物结构进行测定, 得出一次短路的导线熔痕内部含有石墨化碳和不定型碳, 而二次短路的导线熔痕内部仅含有不定型碳。^[5]

本文利用 SEM 对铜导线一次短路熔痕 (PMM) 和二次短路熔痕 (SMM) 的微观形貌从理论上做了进一步分析, 总结出了有别于前人研究成果的特征规律, 为进一步区别 PMM 和 SMM 做了一些工作。

1 实验部分

1.1 实验设备与材料

实验设备: KYKY-2800B 型扫描电子显微镜,

收稿日期: 2007-09-02; 修改日期: 2007-12-24

作者简介: 王 芸 (1975—), 女, 本科, 讲师, 廊坊武警学院消防工程系, 主要从事火灾调查和火灾物证技术鉴定的的教学工作。

主要性能指标是:二次电子像分辨率为 40~45 埃;放大倍数 15~25000×(W. D 12mm²);加速电压 0kV~30kV。

实验材料:北京市云达电线电缆厂 2.5mm² 单芯聚氯乙烯铜导线。

1.2 实验样品的制备

一次短路熔珠样品和二次短路熔珠样品是在实验室模拟火场条件下制备的,采用导线直接短接法。选取其中 9 个一次短路熔痕样品和 7 个二次熔痕样品作为待测样品。

1.3 样品的 SEM 的分析

将样品用导电胶固定在样品杯上,送至样品室内;当样品室内真空度达到 2×10^{-5} 托(1 托 = 133.329 Pa)时,接通探测器高压及灯丝加热电源;选择加速电压、束流、光栏及观察倍数,分别对熔珠断面及导线本体熔痕进行微观形貌的观察、拍照和分析。

2 实验结果与分析

2.1 短路熔痕根部的微观形貌

由于一次短路只存在短路电弧的热作用,短路电弧瞬间的发生,导致熔痕形成过程中冷却速度快,凝固时间短而形成的小面积的金属熔化区域,如图

1(a)。

当短路电弧能量足够大时,铜线被爆发的高能量迅速液化、气化,形成喷溅,在短路点附近易形成细小颗粒状熔珠,如图 1(b)。

铜导线发生一次短路的过冷度和冷却速度较大,在短路放弧过程中,部分被熔化的液体金属尚未来得及完全熔化脱离本体,就已凝固,形成的圆锥状熔痕与本体相连,如图 1(c)。

在短路电弧和火灾热的共同作用下,铜导线形成二次短路熔痕,熔痕形成过程中的冷却速度和过冷度明显小于一次短路,因此凝固时间长,这样就会在铜导线二次短路熔痕周围形成熔化面积大且流淌状金属熔化痕迹,如图 2(a)。

在发生二次短路的过程中,不仅铜线之间发生了短路,而且导线上形成的炭化物也将参与短路放电,且这种短路电弧比低阻抗短路电弧能量大得多,其温度更高^[6,7],特别是导线绞缠在一起时,容易形成多点短路,同时在火灾作用下,熔痕周围的金属凝固时间更长,与另一端形成了更大区域的热量中心,熔化的铜线将溶解更多的环境中的气态物质,从而在熔化区域内可见重叠的孔洞,较大孔洞内存在小孔洞;有时可见巨大缩孔,如图 2(b)、图 2(c)。

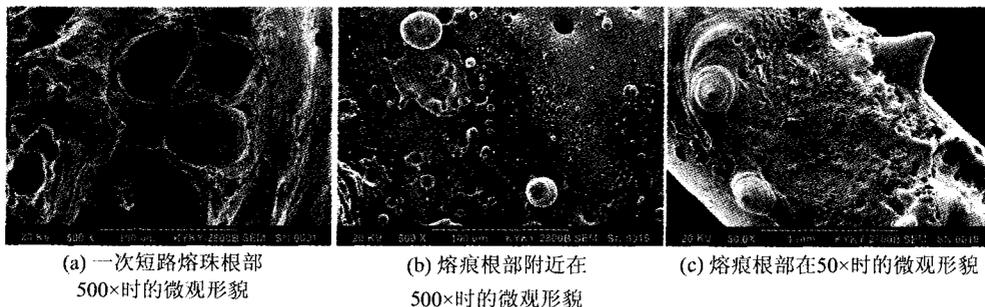


图 1 一次短路熔痕根部微观形貌

Fig. 1 primary molten marks micro-morphology bases of copper wire

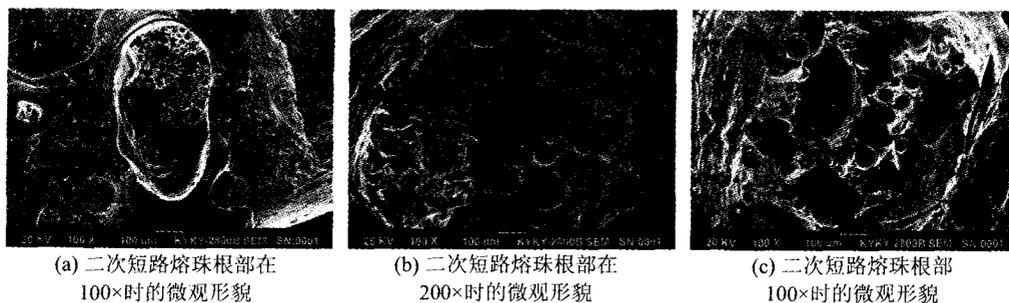


图 2 铜导线二次短路熔痕根部微观形貌

Fig. 2 secondary molten marks bases micro-morphology of copper wire

2.2 短路熔珠内部气孔及杂质微观形貌

2.2.1 一次短路熔珠内部气孔及杂质微观形貌

在液态铜的结晶过程中,如果冷却速度足够慢,大部分溶解的气体会排出体外;如果冷却速度很快,过冷度大,凝固时间短,则有较多的气体滞留在内部组织中而导致气孔的形成。相对与二次短路熔珠来讲,一次短路熔珠的冷却速度更快,过冷度更大,凝固时间更短。但由于其产生环境中燃烧产物,水蒸汽等物质的含量均比较少,熔珠纯度高,使得一次短路熔珠内部气孔形成时受杂质的影响小,包含的气体物质并不多,所以得到的气孔均匀细密、比较规则,一次短路熔痕气孔洞壁光滑,粗糙纹迹甚少,气孔底部有裂纹,且有的气孔内壁上形成颗粒状晶体,如图 3(a),如图 3(b)。

一次短路熔珠形成后,如果继续加热,对一次短路熔珠气孔形状并没有造成明显的影响,依然具有

均匀、细密的气孔,洞底仍有裂纹花样,如图 3(c),如图 3(d)。

2.2.2 二次短路熔珠内部气孔及杂质微观形貌

由于二次短路熔痕形成的环境空气中氧气浓度较低,一般为 14%~21%^[8],而 CO、H₂ 含量较高。含氧铜在还原性气氛中(如 CO、H₂ 等)退火时,因氢和其他气体渗透到铜内部,与铜中氧作用,形成水蒸气或 CO₂,所以在铜中形成很大的压力^[9]。因此,二次短路熔痕内部的气孔很大,且不规则,如图 4(a)。

由于其产生环境中燃烧产物,水蒸汽等物质的含量均比较多,使得二次短路熔珠内部气孔形成时受杂质的影响较大,包含的气体物质多,气孔内壁凝固时,析出了溶解的杂质,因此可见气孔底部斑点状痕迹和平行花纹,如图 4(b)。

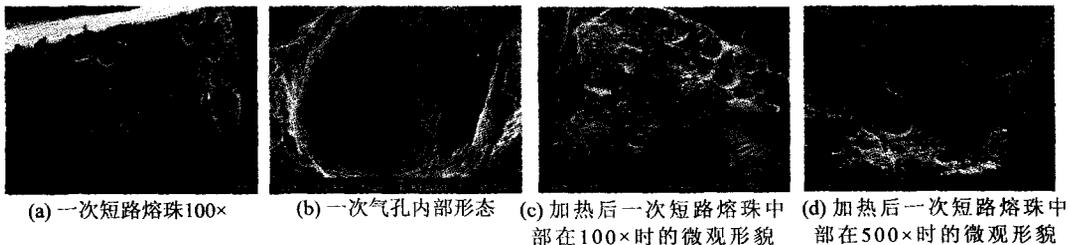


图 3 一次短路熔气孔分布与内部形态
Fig. 3 Micro-morphology of pore's spatial distribution inside primary molten marks

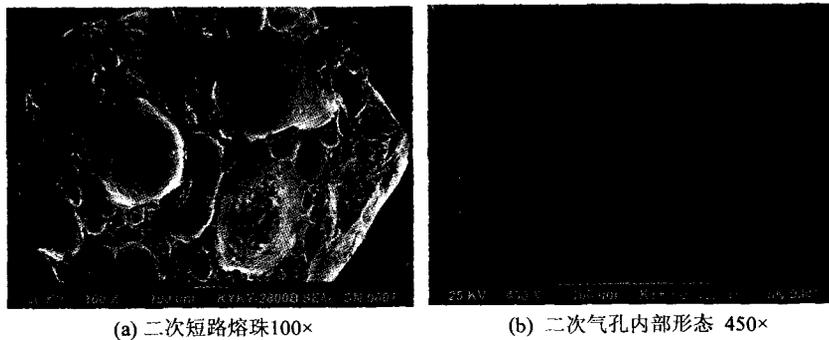


图 4 二次短路熔气孔分布与内部形态
Fig. 4 Micro-morphology of pore's spatial distribution in secondary molten marks

2.3 短路熔珠内部缩孔

无论是一次短路,还是二次短路熔痕,铜导线熔痕的形成过程中的过冷度和冷却速度都较大,铜熔液在凝固前后将发生体积变化,其体积收缩率为 3~5 倍,因电弧中断后铜熔液内部尚未完全凝固时,其外壳就已迅速凝固,因此较易形成缩孔。如图 3(a)、4(a)。

由于火灾环境温度高,在二次短路熔痕形成过程中,铜熔液的凝固体积更大,内部液体凝固时,部分收缩而又得不到及时补充,它用不了外壳留给它那么大的体积,从而导致熔珠内部的缩孔更大,所以形成的熔珠经常出现中空现象(类似于铜泡样)。

2.4 一次短路与二次短路熔珠气孔直径的比较

利用 Photoshop 7.0 软件对一次、二次短路样

品照片内的气孔、缩孔进行染色,并用照片自带的标尺对气孔直径进行度量,然后采用 SPSS12.0,分别对选择了自然冷却条件下、喷水冷却条件下各 5 个熔珠样品,对每一个熔珠样品各选择 9 个最大的气孔,分别得到 45 个气孔样本,然后进行统计计算。

2.4.1 一次短路样品熔珠气孔直径

一次短路形成的气孔数量较多,且大多数为小气孔。直径为 $2\mu\text{m}\sim 6\mu\text{m}$ 的气孔所占的比例约为 52%;直径在 $20\mu\text{m}$ 以上的气孔所占的比例约为 8%,它们在所有气孔中所占的面积在 50% 以上。最大直径为 $180\mu\text{m}$ 和 $108\mu\text{m}$,并无较大缩孔,气孔形状规则,多呈圆形。

在实验过程中又分别对一次短路熔珠进行自然冷却和继续加热 10min,得到的样品气孔直径如表 1。

表 1 一次短路不同冷却条件下的气孔直径

Table 1 Pore's diameters under the different cooling conditions inside primary molten marks

	n	气孔平均直径	标准差	样品直径区间 (置信度 95%)
自然冷却	45	30.75	10.48	30.75 ± 1.19
继续加热 10min	45	31.29	10.52	31.29 ± 1.21

由此可见,加热后的气孔直径与自然冷却条件下形成的气孔直径无明显差别。

2.4.2 二次短路熔珠气孔直径

二次短路形成的气孔数量较一次短路少。直径一般为 $30\mu\text{m}\sim 130\mu\text{m}$ 的气孔分布较多;直径在 $55\mu\text{m}$ 以上的气孔所占的比例约为 51.11%,它们在所有气孔中所占的面积在 50.7% 以上。有时出现的气孔相当大,可达 $369\mu\text{m}$ 和 $259\mu\text{m}$,有较大缩孔,存在较多的不规则大气孔。分别对二次短路熔珠进行自然冷却和喷水冷却,得到的样品气孔直径如表 2。

表 2 二次短路不同冷却条件下的气孔直径

Table 2 Pore's diameters under the different cooling conditions inside secondary molten marks

	n	气孔平均直径	标准差	样品直径区间 (置信度 95%)
自然冷却	45	62.14	26.71	62.14 ± 5.6
喷水冷却	45	61.42	26.91	61.42 ± 8.57

由表可知,喷水冷却气孔直径与自然冷却条件下形成的气孔直径无明显差别。

3 结论

(1) 在短路点附近,导线本体的熔痕周围存在金属熔化痕迹。

在铜导线一次短路熔痕附近只存在小面积的金屬熔化痕迹。

在铜导线二次短路熔痕附近存在大面积的流滴状金属熔化痕迹。

(2) 在铜导线一次短路熔痕附近可见细小的圆珠状金属喷溅痕迹,有时可见圆锥状金属喷溅痕迹,并伴有细小的孔洞。

铜导线二次短路熔痕区域内可见重叠的孔洞,大孔洞与小孔洞相互交错重叠,多呈大小不一的密集孔洞。

(3) 一次短路熔痕气孔洞壁光滑,粗糙纹迹甚少,气孔底部有裂纹,且有的气孔内壁上形成颗粒状晶体;

二次短路气孔内壁不光滑,有斑点状痕迹和平行花纹。

(4) 铜导线一次短路熔痕和二次短路熔痕内部气孔的数量、大小、分布、形状、排列方式有明显不同。

一次短路熔珠内部大小圆形气孔排列不紧密且规则;有数量较多的小气孔和缩孔。

二次短路熔珠内部气孔排列紧密,形状不规则;有明显个数的大气孔和缩孔,有的大气孔占熔珠剖开截面的 1/2 左右。

(5) 一次短路和二次短路熔痕内部,熔珠内部有缩孔。

二次短路熔痕内部的缩孔有时比一次短路的缩孔大,所以二次短路熔痕形成的熔珠内部经常出现中空现象(类似于铜泡样)。

参考文献

- [1] 胡建国. 火灾物证分析[M]. 北京: 警官教育出版社, 1999. 415.
- [2] 邸曼, 王希庆, 刘振刚, 等. 火场中金属熔痕微观形貌鉴别方法的研究. 消防科学与技术[J]. 1999(1): 36.
- [3] Y. Ishibashi, J. Kishida Research on First and Second Fused Mark Discrimination of Electric Wires, Summary of 1990 Annual Meeting of JAFSE.
- [4] C. Y. Chen, Y. C. Ling, J. T. Wang, H. Y. Chen. SIMS depth profiling analysis of electrical arc residues in fire investigation. Applied Surface Science, 2003(203): 779~784.
- [5] Eui Pyeong Lee, Hideo Ohtani, Yoshiyuki Matsubara, Tsutomuseki, Hi-ro Hasegawa, Shuji Imada, Isao Yashiro. Study on discrimination between primary and secondary molten marks using carbonized residue[J]. First Safety Journal. 2002(11): 353~368.
- [6] Daniell. Churchward, Ryan. M. Cox, David Reiter. Arc surveys as a means to determine fire origin in residential structures[J]. First Safety Journal, 1979, 24(6): 23~26.
- [7] A. Basfar. Flame retardancy of radiation cross-linked poly(vinyl chloride)(PVC) used as an insulating material for wire and cable. Polymer Degradation and Stability [J]. 2002, 28(9): 221~226.
- [8] 胡德林. 金属学及热处理[M]. 西北工业大学出版社. 1995: 379.
- [9] 石霖. 合金热力学[M]. 机械工业出版社. 1995: 13.

Microstructure Study on Primary and Secondary Molten Marks of Copper Wires by SEM

WANG Yun¹, AN Xiao-li¹, WEI Xing¹, LI Rui-jie²

(1. Chinese People's Armed Police Force Academy, Langfang 065000, China; 2. Yanan Fire Protection Bureau, Shanxi, China)

Abstract: According to copper conducting wires' melting marks forming rules, the samples were prepared by simulating actual fire scenes and the micro characteristics were observed by SEM. And that the pore size distribution were quantitatively studied by use of statistic analysis methods. The results show that the distinctness of pore's quantities, pore size and spatial distribution between primary and secondary molten marks of copper wires are not same as the formerly checkup gist.

Key words: the copper molten marks; SEM; microstructure; pore