

火灾现场导线熔痕金相组织判断方法与系列金相相对图谱

金相分析鉴定法在火灾物证鉴定中已得到广泛应用，通过对火灾中铜导线熔痕的金相分析来确定电气线路是一次短路还是二次短路，直接关系到火灾原因的认定。目前常见的金相鉴定法均为定性分析。

电气火灾种类繁多，原因复杂，其中最突出的是电线火灾。如何鉴定由电线短路引起火灾，已成为当前十分关注的一个重要问题。国外一些新的鉴定方法。我国在这方面虽然起步较晚，但近年来也相继研究出一些重大疑难电气火灾的起因。因此鉴别火灾现场中的导线熔痕对分析火灾原因具有重要意义。

常用的导线是铜线和铝线，铜的熔点为 1083℃，铝的熔点为 660℃。无论是火烧还是短路，都有可能使现场中的铜，铝导线熔化并留下熔痕，但一般的火灾温度常常超过铝的熔点，这使铝导线短路形成的熔化痕迹不晚保留。故我们对应用金相分析法鉴别铜导线短路熔痕进行论述。

铜导线是采用 99.95% 以上的纯铜经过冷拔得到的。由于强烈的塑性变形，铜的晶粒被拉长，铜导线的金相组织呈现明显的方向性。这种方向性在正常使用状态下铜导线中仍可以保留下来。因为导线在正常使用状态下本身的温度在 70℃ 以下，而纯铜的再结晶温度是 200℃（工业纯，经强烈冷变形，经 1h 退火后完全再结晶），也就是说，铜导线的这种加工方向性，只有在 200℃ 的温度下经过一定时间才能消失。所以，这可以作为判定处于正常使用状态下铜导线的组织特征。

一、火场中的导线的熔珠

火灾现场上遗留的导线熔珠可分为两大类：即火烧熔珠熔化而凝聚在线端上的珠状熔痕，短路熔珠是指短路瞬间导线熔断后留在熔断导线端上的近似圆珠状遗留物。从宏观的检验上，一般不难区别这两种熔痕，但火烧熔珠与短路熔珠有时在外观上也很相似。为了进一步证实外观的判断，可以对熔珠形成的环境条件不一样，它们在金相显微组织上就存在着差异。

①火烧熔珠的特征是：一，显微组织由粗大的等轴粒组成。二，金相磨面较光滑，组织内几乎没有孔洞（气孔）存在。因为火烧熔珠是在火灾条件中形成，所以它的冷却速度比较缓慢，熔珠形成时，从液态到固态的转变晶核有一个形成与长大的阶段。因此，它的显微组织是由粗大的等轴晶粒组成。同时，火烧熔珠除了充分地吸收周围的氧气而起氧化还原反应外。大部分的气体都被逸出体外。又因火灾现场的温度较高，冷却速度相对缓慢，凝固过程较长，气体的熔解时间较充分，所以熔珠的金相组织除了是粗大的等轴晶粒外，金相磨面是光滑的，组织内几乎没有孔洞（气孔）存在。

②短路熔珠的特征是：一，显微组织以细小的柱状晶或状晶为主。二，金相组织内部有较多的孔洞（气孔）存在。因为在短路时，短路点处熔化成一个小熔池，然后结晶成铸态组织，这种铸态组织是瞬间在相当大的过冷度和相当大的冷却速度下形成的。在这种冷却条件下，短路熔珠生成以胞状晶或柱状晶为主的细小组织。同时，因短路熔珠在 2000℃ 以上高温下形成，在形成时冷却速度快，过冷度大，凝固过程极短，所以金属在熔化时所吸收的氧气还没有来得及与金属充分反应和逸出时，就被截留在内部组织中。故短路熔珠金相组织除了呈密细的柱状晶外，金相组织内部有较多的孔洞（气孔）存在。

短路又分为两种，一是因导线绝缘不良或其它故障发生短路（一次短路）引起火灾。二是由火灾中火焰破坏导线绝缘而造成短路（二次短路）。两种短路熔珠，本质是相同的，所以在外观形态上没有明显差别。但产生它们的外界环境条件的不同，因此它们各自形成的短路熔珠上便留下可以鉴别的微观特征。①一次短路熔珠内部气孔较少，较小，缩孔也少，其显微组织是由细小的柱状晶或胞状晶组成，在偏光下观察，孔洞周围的（Cu+Cu₂O）共晶体较少，不太明显。在珠与杆的衔接处（即过渡区）有较明显的界限，如在火场中继续受高温的作用，其显微组织中虽然细小的柱状晶相互吞并并聚焦长大，但在大晶界内仍存在着柱状晶的痕迹，过渡区的界限依然比较明显。②二次短路熔珠内部存在着多而大的气孔和较多的缩孔。其显微组织被很多气孔分割，可以观察到一些大晶界，在多数情况下，以同样的浸蚀条件，看不到与一次短路熔珠相同的细小柱状晶组织，在偏光下观察，孔洞周围的（Cu+Cu₂O）共晶体较明显，如在珠与杆的衔接处（即过渡区）其界限不太明显，如果在火场中继续受高温作用，那么在大晶界内的原始柱状晶已模糊不清，过渡区的界限更加紊乱。

③短路熔珠形成过程的分析

我们认为，二次短路熔球形成的冷却速度比一次短路熔珠慢得多，即它的过冷度比一次短路熔珠小的多，在这种条件下，它一般不完全形成细小的状晶，而会形成粗大的柱状晶及极小部分的等轴晶的组织，这些组织在二次短路熔珠形成后的继续加热中不断长大，在大量孔洞存在的情况下，呈现出如图所示的组织。①一次短路熔珠是在正常环境下形成的，因外界温度低，过冷度大，冷却速度快，凝固时间短，所以气孔周围的氧气与铜充分反应成氧化铜，故在气孔周围重生成（Cu+Cu₂O）共晶体很少。②二次短路熔珠是在火灾条件中形成的，因外界温度很高，过冷度小，冷却速度慢，凝固时间长，再加上空气中水蒸汽的浓度较高，

所以氧与铜反应时间相应的增长，又因气孔周围的晶格缺陷较多，则气孔中的氧得以沿着晶界深入，故生成(Cu+Cu₂O)共晶体的量也相应增多。

因此，二次短路的熔珠孔周围的共晶体比一次短路熔珠孔洞周围的共晶体更为明显。二次短路熔珠孔洞周围的共晶体更为明显。二次短路熔珠内部的气孔多而大都是因为火灾中存在着大量灰尘，杂质和燃烧产物等之故。一次短路熔珠形成时，因环境温度较低，整个铜导线的金相组织处在加工时的状，在瞬时短路时，除短路点处于高温(2000-3000℃左右)状态外，而整个导线的温度并不高(接近于正常状态下的温度70℃左右)，金相组织仍呈方向性，所以，过渡区的界限比较明显。如果继续在火场的火焰中不断加热，过渡区加工状态的金相组织虽然随温度的升高而再结晶为粗大的等轴晶粒，以及在短路熔珠内的细小柱状晶也发生了晶粒长大，但过渡区的界限依然比较清晰。而二次短路熔珠在形成之前，因在火灾环境中，导线在某一局部范围内受火灾热作用，使导线局部加工状态的组织晶粒长大或过热局部熔化。因此除在短路点处处于高温(2000-3000℃左右)状态外，在短路点附近的温度也比较高。所以过渡区的界限比较模糊，如果在火灾中继续不断加热，则在短路熔珠内比较粗大的柱状晶和过渡区内比较粗大的等轴晶都将继续长大，从而使过渡区界限与柱状晶裂痕之间，更加参差不齐，模糊不清，这对鉴别一次短路与二次短路的很有价值的。

④导线过电流，线路过热，导致火灾而形成的熔珠。

除了短路外，导线过电流也会引起短路过热而导致火灾。这种熔痕在瞬间高温大电流的情况下形成，其外观特征似于火烧熔痕，但显微组织确有明显的差别。过电流引起导线显微组织的变化，是根据过电流的大小，过电流时间长短而不同，它的组织从开始的加工状态经过再结晶变成等轴晶粒，随着过电流的继续晶粒不断长大，这种变化的实质是由于过电流的增加以及时间的持续，使导线的自身温度升高，瞬间大电流还会使导线局部过热而熔断，并使整条导线的晶粒均匀长大。过载电流熔痕的金相组织特征是：显微组织呈晶界粗大的胞状晶，且在晶界处(Cu+Cu₂O)共晶组织，近似于延时瞬间短路时形成的熔痕组织，由于过电流，延时瞬时短路，二次短路等的发生，能使导线表面上出现小结疤，其显微组织成密细的胞状晶，近似于短路熔痕的金相组织(延时短路，一次短路，二次短路)。另外，在较大的火灾现场中，由于外火焚烧的作用，导线上也可以形成类似于小结疤的熔痕，但其金相组织为粗大的等轴晶，也有的在模糊的晶界内有(Cu+Cu₂O)的共晶体组织或过烧痕迹。这些组织特征对火灾原因的鉴定有一定的参考价值。

综上所述，当我们在火灾现场中拾到导线熔痕，采用金相分析时，可以得到：

- ①根据导线短路熔珠在金相组织上的特征，我们可以鉴别导线上的熔珠是否短路所致，从而可以进一步判断线路在失火期间是否处于带电状态。
- ②如果导线上遗留的是短路熔珠，可以根据熔珠的金相组织差异来鉴别一次短路和二次短路。
- ③根据熔珠的金相组织特征，变可鉴别导线发生过瞬间大电流或延时瞬间短路。
- ④取火场线路上没有被火烧的同根导线进行金相分析，如果导线已经再结晶可以判断线路曾经过电流。

对于火灾现场痕迹物证的技术鉴定，是正确认定火灾原因的重要前提与依据

火灾现场铝导线熔痕显微组织分析

火灾调查人员在火灾现场中，经常发现铝导线留下的熔化痕迹。这些熔化痕迹可以是在火灾中受热熔化形成的火烧熔痕；也可以是在火灾前或火灾中形成的短路熔痕。因此，准确的鉴别这些熔化痕迹的熔化性质，往往就成为电气火灾原因认定中的关键。我们通过多年的研究，发现了火灾现场中铝导线上熔化痕迹的形成机理，并建立了相应的技术鉴定方法，现对铝导线熔化痕迹的形成机理及技术鉴定方法进行论述。

1 正常使用状态下的铝导线

电气线路中使用的铝导线，一般都是由纯铝经冷拔处理制成的。由于经过强烈的塑性变形，其显微组织沿变形方向被拉长，呈纤维状，具有明显的方向性。铝导线在正常的通电使用状态下，线内流过的电流不超过额定电流，线芯温度在70℃以下，而纯铝的再结晶温度为100℃，所以，在正常通电使用状态下铝导线的组织，仍保持着上述的方向性，如图2所示。

2 铝导线火烧熔痕

火烧熔痕是指铝导线在火灾中受火焰或高温作用被熔化后残留的痕迹，其金相组织由粗大的等轴晶组成。火烧熔痕是在火灾气氛中形成的，晶粒有一个形核长大的过程。在从液相到固相转变的这一过程中，除了充分地吸收周围氧气发生氧化还原反应外，大部分气体都被逸出；又因为在火灾现场温度较高，冷却速度相对缓慢。凝固过程较长，气体的溶解时间较充分，所以熔化痕迹的金相组织除了粗大的等轴晶外，组织内几乎没有空洞（气孔）存在，如图 3 所示

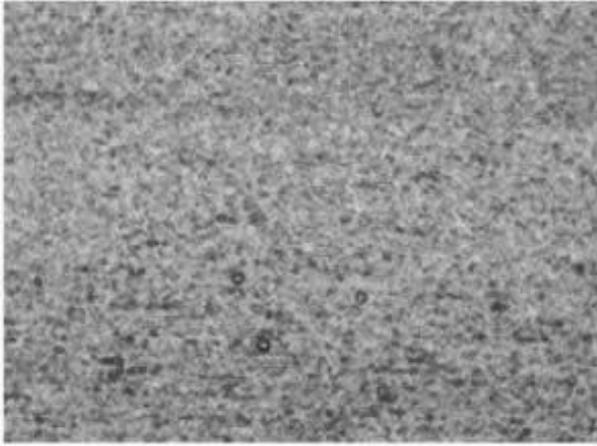


图 2 铝导线正常使用状态下的金相组织 100×

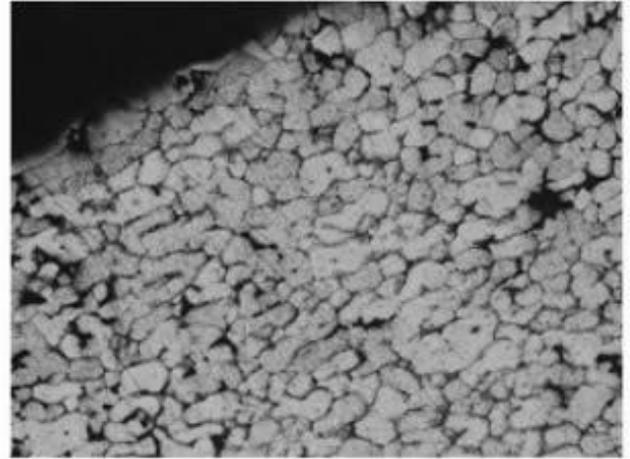


图 3 铝导线火烧熔痕的金相组织 50×

铝导线短路熔痕

短路熔痕的形成是在瞬间完成的，只有距短路点 1cm 左右的导线会达到比导线其他部位相对较高的温度。所以，在熔化区和未熔化区之间会形成过渡区。当发生短路时，短路点的瞬间温度可达到 2000~3000℃，在短路点形成一个小熔池，然后结晶成铸态组织，这种铸态组织是在瞬间相当大的过冷度下形成的，所以短路熔痕的金相组织以胞状晶或柱状晶为主。同时，在熔化时所吸收的空气还未释放出去，就被截留在内部组织中，故短路熔痕金相组织的内部呈现有较多的空洞。

由于熔珠与熔痕的形成过程是相同的，只是在外观的形态上有所差别，故在这里不作具体的论述。

火烧熔痕与短路熔痕的鉴别

从外观特征看：火烧熔痕形成的熔珠较大，通常是线径的 1-3 倍，有的凝结在线的端上，也有的出现在导线的中部，表面光滑，具有金属光泽；线与熔珠之间有变细的温度过渡迹象；在整根导线上有若干部位因熔化而变细，有若干部位因熔化增殖而变粗，无固定形状的熔化痕迹。短路熔痕形成的熔珠较小，一般出现在导线的端部，有的也在导线的中部形成凹坑状熔痕；铝导线短路形成的熔化痕迹表面无光泽，比较粗糙；只在短路点处形成明显的熔化痕迹，在整根导线的其他部位没有熔化现象。

从金相组织特征看：火烧熔痕一般呈现粗大的等轴晶，无明显的空洞（或气孔）；而短路熔痕在短路瞬间温度很高，熔化区的显微组织呈现为铸态组织，熔化区与短路点两侧的未熔化区形成明显的过渡区。因此，熔化区与未熔化区有无明显的界限是区别火烧熔痕和短路熔痕的主要特征之一，同时也是鉴别铝导线是否带电的主要判据之一。

一次短路熔痕与二次短路熔痕的鉴别

当鉴别出铝导线是否带电后，对短路是发生在火灾前还是发生在火灾之后的进一步判断，往往成为认定电气火灾原因的关键。如果短路发生在火灾之前，那么在起火部位所提取的铝导线短路熔痕就有引起火灾的可能；如果短路发生在火灾之后，那么说明铝导线的短路熔痕是在火灾火焰或高温的作用下，将铝导线绝缘损坏后而发生的短路。

从外观特征上看：一次短路熔痕（短路发生在火灾以前）与二次短路熔痕（短路发生在火灾之中）没有明显的区别；而在金相组织特征上有明显的区别。

铝导线一次短路熔痕的金相组织呈现铸态组织的特征，具有细小的柱状晶或胞状晶，磨面上的孔洞小而少，熔化区与未熔化的基体间有明显的分界线。因为，当一次短路熔痕形成时，因环境温度较低，整根铝导线处在正常使用时的状态，短路瞬间除短路点处于高温状态下，整根导线的温度并不高，所以一次短路熔痕的金相组织仍呈方向性，过渡区的界限比较明显。如果在火灾现场的火焰中继续加热，过渡区加工状态的金相组织虽然随着温度的升高而再结晶变为粗大的等轴晶，在短路熔化区内的细小柱状晶也发生了晶粒长大，但过渡区的界限仍然比较清晰（见照片3）。

铝导线二次短路熔痕的金相组织呈现粗大柱状晶的组织特征，磨面上的孔洞大得多，熔化区与未熔化的基体间没有明显的分界线。因为，在二次短路熔痕形成之前，因受火焰的高温作用，使铝导线在某一局部范围内受高热作用导线局部晶粒长大，由于处在短路点附近的温度也比较高，所以过渡区的界限比较模糊。如果在火焰中继续不断加热，则在短路熔化区内比较粗大的柱状晶和在过渡区内比较粗大的等轴晶都将继续长大，从而使过渡区的界限更加模糊不清和紊乱（见照片4）。

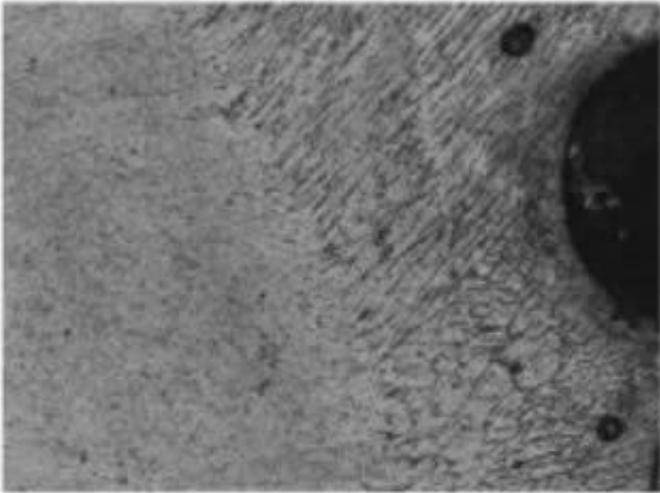
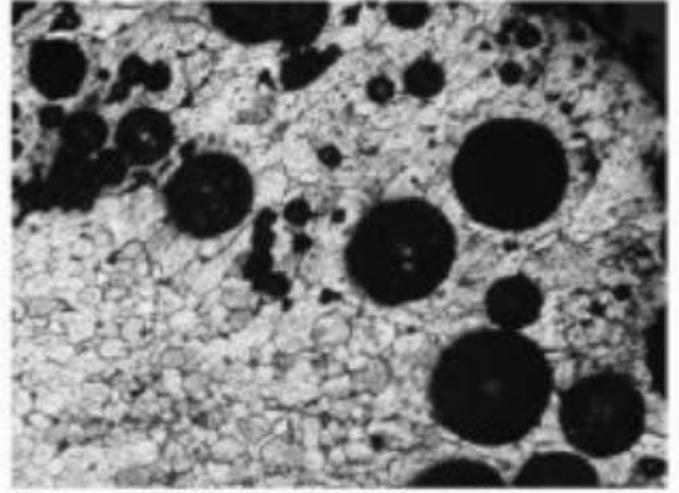


图 4 铝导线一次短路熔痕的金相组织 100×



照片 4 铝导线二次短路熔痕的金相组织 50×

图 5

火灾现场铜导线熔痕显微组织分析

火灾中铜导线短路熔痕形成的瞬间，由于电弧的高温作用使导线熔化，周围的环境气氛在导线熔化的瞬间必然会进入熔化的金属中，从而在导线熔痕中会保留有短路时环境气氛的某些信息。经 EDS 成分分析，证明铜导线正常环境气氛中短路熔痕的成分与火灾环境气氛中短路熔痕的成分有着明显的差别(表 1)。正常环境气氛中和火灾环境气氛中形成的短路熔痕的 SEM 微观形貌和 EDS 谱线见图 1 ~ 图 4。

表 1 铜导线短路熔痕 EDS 检测结果

元素成份 (wt. %)	正常环境气氛 中短路熔痕	火灾环境气氛 中短路熔痕
Cu	60.57	36.86
C	14.76	31.24
O	19.60	23.87
Al	1.74	2.98
Si	1.46	0.35
Cl	0.19	2.41
Fe	0.40	0.19
S	0.71	0.21
Ca	0.28	1.16

对于正常环境气氛中的短路熔痕,凹痕处含氧量较高,表明短路时的熔化和凝固的过程中,凹痕处的氧气分压较高致使该处的铜严重氧化,也因此出现大量孔洞;含碳量较高,是塑料绝缘燃烧后积存在该处的结果;熔痕内外表面的铜含量高于其它部位,表明在短路的瞬间熔化过程中,熔痕表面最先冷凝,降温最快,因而氧化程度最小。对于火灾环境气氛中的短路熔痕,Cu 元素含量所占比例明显下降,C、

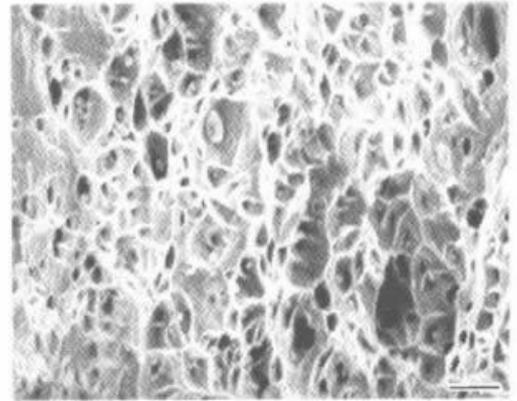


图 1 正常环境气氛中短路熔痕的形貌。Bar = 10μm

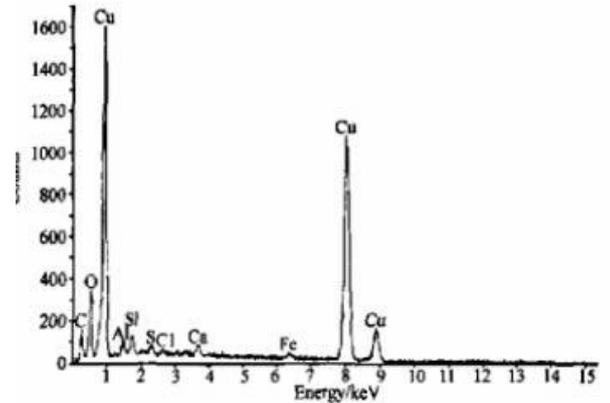


图 2 正常环境气氛中短路熔痕表面 EDS 谱线。

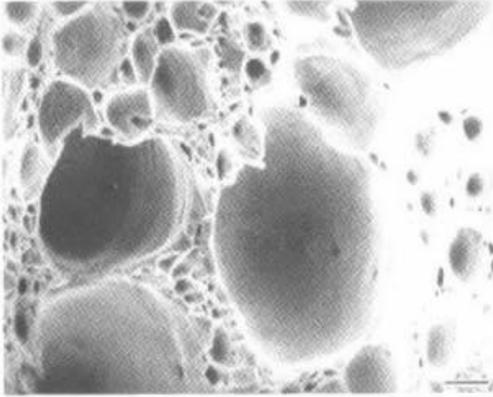


图3 火灾环境气氛中短路熔痕的形貌。Bar = 10 μ m

O、Cl 元素含量明显升高,其表面成分特征是随着环境气氛和温度的变化而变化的。铜导线正常环境气氛中短路熔痕的铜含量变化不大,而火灾气氛中短路熔痕的铜含量变化较大,一定程度上反映了铜导线短路熔化瞬间环境中烟气和温度对短路熔痕形成

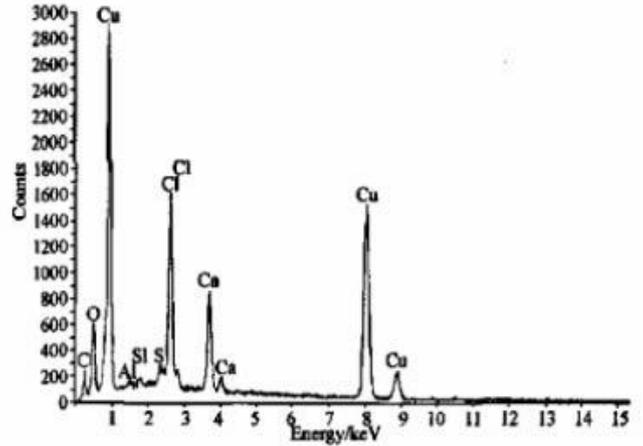


图4 火灾环境气氛中短路熔痕表面 EDS 谱线。

过程中氧化和溶解吸附的作用。铜导线火灾环境气氛中短路熔痕的氧化现象较为严重,含碳量明显高

于铜导线正常气氛中短路熔痕,这是由于在短路发生之前,铜导线受高温烘烤以及周围的环境因素作用,甚至在外火作用下使绝缘皮发生热分解,致使铜导线氧化严重,绝缘外皮炭化后的产物附着在熔痕中的结果。

因此,铜导线短路熔痕的成分带有熔痕形成时环境气氛的信息,反映了熔痕形成时环境气氛的特征;不同环境气氛中形成的短路熔痕其成分明显不同,如 Cu、C 和 O,这些差异可以与形成熔痕时环境气氛的特点联系起来;根据熔痕成分中 Cu、C 和 O 的含量,可以判断熔痕形成时的环境气氛,鉴别熔痕形成于火灾发生前还是火灾发生后,为确定火灾原因提供科学依据。

图 1 为一次短路的铜导线显微组织。由于一次短路熔痕结晶时的环境温度为正常气温，结晶时一次短路熔痕比二次短路熔痕的冷却速度要大，过冷度也就大些，显微组织都是由细小的柱状晶组成。由于其是在燃烧产物、水蒸汽等环境中形成的，而且冷却速度快，凝固过程短，所以，一次短路熔痕内部气孔少而小。由于一次短路熔痕是在正常环境下形成的，凝固时间短及空气中的水蒸汽少，故氧气的溶解量少，且还没来得及与铜充分反应产生 Cu_2O 时，就被析出组织之外，所以一次短路熔痕气孔周围的 $(\text{Cu} + \text{Cu}_2\text{O})$ 共晶体较少，不明显。一次短路熔珠过渡区(熔珠与导线衔接处)有较明显的界限。

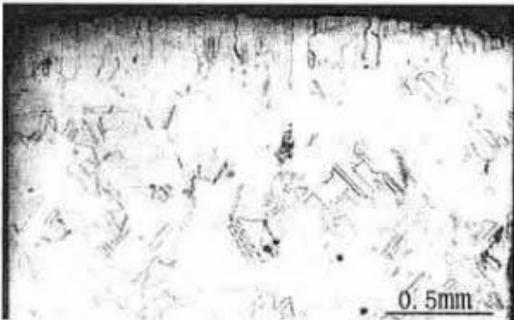


图 1 一次短路的铜导线显微组织

图 3 为过载荷的铜导线显微组织。导线外围晶粒发生了较均匀的再结晶长大，导线的有效面积减少，表明该段导线存在过负荷现象。

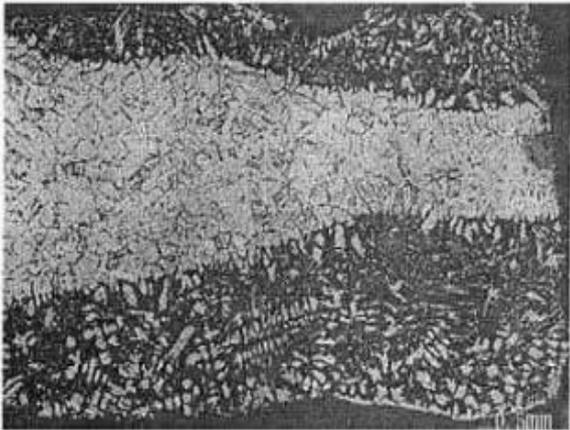


图 3 过载荷的铜导线显微组织

图 2 为二次短路的铜导线显微组织。二次短路熔痕的显微组织由等轴晶组成，且被很多气孔分割出现较多粗大晶界，在多数情况下，看不到与一次短路熔痕相同的细小柱状晶结构。二次短路熔痕结晶时的环境温度为火灾温度，因火场温度高，冷却速度慢，凝固过程长，虽被析出的气体多，但由于火灾环境中存在着大量的灰尘、杂质和各种燃烧产物，再加上空气中的水蒸汽多，氧与铜的反应增加，又因气孔周围的晶体缺陷较多，氧得以沿晶深入，因此，二次短路熔痕内部气孔多而大，周围 $(\text{Cu} + \text{Cu}_2\text{O})$ 共晶体较明显。二次短路熔珠过度区界限不明显。

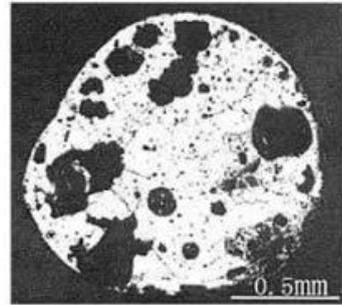


图 2 二次短路的铜导线显微组织

图 4 为火烧的铜导线显微组织。导线熔化后再凝固，可以看到粗大的树枝晶。

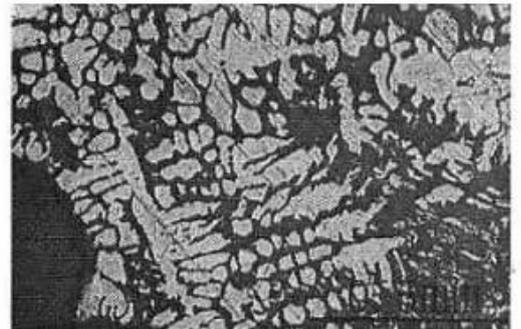


图 4 火烧的铜导线显微组织