

模拟火灾环境下铜导线微观组织演变特征研究

柏鑫坛¹, 赵丹丹¹, 冯培忠^{1,2}, 张保敬¹, 王晓虹¹

(1. 中国矿业大学材料与物理学院, 江苏 徐州 221116; 2. 江苏省碳资源清洁利用重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为准确认定火灾起因并预防类似事故, 对火灾后纯铜导线微观组织进行特征分析是物证鉴定的有效方法之一。本研究通过模拟火灾环境下的温度、时间和气氛条件, 并施加过电流故障, 研究火灾中铜导线的外表面形貌、横截面晶粒形态和尺寸等特征演变规律。结果表明: 随着温度的升高和时间的延长, 铜导线的氧化程度加剧, 铜导线中晶粒不断长大且多呈现等轴晶形态, 其中400 °C时晶粒尺寸为7~11 μm, 600 °C时增至8~14 μm, 800 °C时为13~17 μm, 晶粒在生长过程中由于低层错能而出现大量孪晶。铜导线的平均晶粒尺寸与退火温度、时间呈正相关, 其中温度效应更为显著。线性拟合结果表明, 晶粒长大过程中晶界迁移的激活能为0.68 kJ/mol。在实际过电流故障下, 失效铜导线的熔断处形成熔珠和树枝晶, 表明电流过大引发导线出现过热现象导致熔断, 熔断区附近晶粒异常长大。

关键词: 火灾; 铜导线; 微观组织; 晶粒尺寸

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.01.005

中图分类号: TG146.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)01-0048-11

纯铜导线具有良好的导电性、导热性、耐腐蚀性, 以及高的弹性极限和疲劳极限等优点, 因此电缆线多使用工业纯铜(Cu含量不低于99.5%)制造^[1-5]。电气火灾一般指由电气线路、用电设备^[6-7]、器具以及供电设备^[8]出现故障性释放热能^[9](如高温、电弧、电火花)或非故障性释放热能^[10](如电热器具的炽热表面), 在具备燃烧条件下引燃本体或其他可燃物而造成的火灾^[11-12]。以火灾残留物确定火灾的起因是从源头预防类似火灾的重要方法之一^[13-16]。迄今为止, 大部分研究都聚焦于火灾案例中铜导线熔珠、熔痕等痕迹的显微组织特征分析^[17-21]。然而, 火灾现场环境参数多, 影响因素复杂, 给认定火灾起因带来诸多困难。铜导线微观组织分析在火灾调查中具有重要作用, 通过分析晶粒变化、烧蚀迹象等, 可帮助确定火灾的起因、火源强度及传播路径。尤其在复杂火灾现场, 微观分析可快速准确识别电气故障、过热损伤或人为破坏。此外, 该鉴定技术高效、操作简便, 可在混乱现场有效追溯火灾源头, 对火灾调查具有重要的辅助作用。因此, 本研究主要对铜导线熔点以下的复杂火场情况进行模拟研究。对于铜导线而言, 着火温度、着火时间、环境

气氛、绝缘皮等都会对其微观组织特征产生较大影响^[21-25]。因此, 需从科学角度对环境参数进行细分, 找出不同参数下铜导线微观结构变化的一般规律。

本研究通过模拟火灾环境下的温度、时间、氧化程度, 并对比了有无绝缘皮时铜导线组织的差异, 分析了纯铜导线的金相组织和微观结构, 结合实际通电流后纯铜导线的微观组织, 得出火灾环境下纯铜导线的微观组织变化规律。通过研究晶粒尺寸, 可以反推火灾的燃烧行为, 为准确识别导线过电流故障, 提高电气火灾调查的准确性提供了依据。

1 实 验

以商用的横截面积为2.5, 4和6 mm²的铜导线为原材料, 使用马弗炉模拟乏氧环境, 使用连续通入氧气的管式炉模拟富氧环境。为了探究温度、时间和氧化环境对铜导线微观组织的影响, 分别选择400, 600和800 °C的模拟火灾着火温度及30, 60, 120 min的保温时间, 并设置乏氧和富氧两种气氛环境。样品经砂纸研磨、金刚石浆料抛光后, 用氯化铁溶液(无水FeCl₃ 5 g+HCl 50 mL+H₂O 100 mL)腐蚀。采用倒置显微镜观察样品的蚀刻表面形貌, 用

收稿日期: 2025-02-24; 修订日期: 2026-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(52004284)资助

作者简介: 柏鑫坛(2000—), 男, 山西临汾人, 硕士研究生, 研究方向: 清洁能源技术, E-mail: bxtys@163.com; 通信作者: 王晓虹, 副教授, E-mail: wxhcumt@cumt.edu.cn

Image J软件测量晶粒的尺寸,通过SEM分析样品的微观组织和微区成分。

在实际电路中,铜导线外部包裹着聚氯乙烯(PVC)绝缘层[PVC热容为 $0.9 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,玻璃化转变温度为 87°C ,熔点为 212°C ,密度为 $1.38 \text{ g}/\text{cm}^3$],当电路中的实际电流大于或者等于额定电流的3倍时,会出现电流过载现象,引发纯铜导线产生放热行为,当纯铜导线的过热时间充足,且周围存在一定量的可燃物时,就会引发火灾。在火灾条件下,绝缘层使得导线外表面的微观形貌发生变化。为对比火灾中纯铜导线有无绝缘层的区别,以无绝缘层铜导线

及PVC绝缘铜导线为原材料分别进行实验,以完善相关数据。

图1为过电流实验的纯铜导线左视图和俯视图。本实验选用商用 2.5 mm^2 PVC绝缘单芯纯铜导线(载流容量 I_e 为 22.5 A),截取长度为 50 cm ,两端各剥去 3 cm 的绝缘层后,将导线两端缠绕并接入电路中,以减小接口处的接触电阻。电路由交流电源(ACS)、控制开关、样品导线组成。实验条件设定为电流 140 A 、电压 220 V 。通过监测加热过程,分析研究在过电流故障下纯铜导线的氧化过热过程、宏观形貌、成分和微观组织。

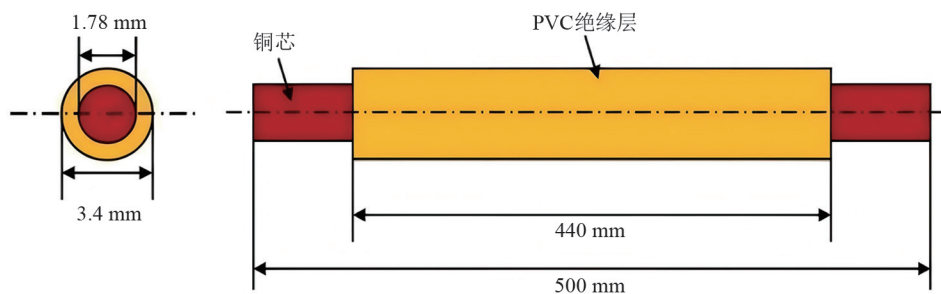


图1 铜导线的左视图和俯视图

Fig. 1 Left view and top view of copper wire

2 结果与讨论

2.1 无绝缘层铜导线表面宏观特征

图2为无绝缘层铜导线在乏氧气氛下经不同温度处理的宏观形貌。图中铜导线的外表面整体光滑,但是颜色随温度升高呈规律性变化。

如图2(a)所示,剥去绝缘层的原始纯铜导线宏观形貌呈鲜亮橙黄色。当温度升至 400°C 保温 30 min 后,纯铜导线外表面呈暗紫色[图2(b)];延长保温时间至 120 min ,导线的外表面生成一层易碎的黑色氧化皮,且氧化皮碎裂后,露出橙红色的导线内层表面[图2(c)]。当铜导线在 600°C 下保温 30 min 后,其外表面的黑色氧化皮剥落,内层表面恢复橙红色[图2(d)];升温至 800°C ,黑色氧化皮内部导线的表面呈现黑色与橙黄色交织的混合色[图2(e)]。由于铜导线的表面宏观特征受温度和时间的影响较大,因此导线宏观形貌亦可作为推断火灾现场情况及火势分布等的依据之一。

2.2 无绝缘层铜导线金相组织特征

图3为无绝缘层保护的 4 mm^2 铜导线在乏氧

气氛中以不同温度保温 60 min 后的金相组织和晶粒直径分布图,不同温度处理后晶粒的尺寸存在差异。图3(a)为铜导线的原始金相组织,晶粒形态为等轴晶,直径 $5\sim 7 \mu\text{m}$ 晶粒所占比例最大[图3(e)],约占总数的 48% 。当温度为 400°C 时,铜导线晶粒、晶界清晰可见,由图3(b)可知,横截面的金相组织晶粒形态多呈等轴晶分布,直径 $7\sim 11 \mu\text{m}$ 晶粒所占比例最大[图3(f)],约占总数的 55% ,最小直径为 $0.23 \mu\text{m}$,最大直径为 $32.47 \mu\text{m}$ 。温度升高至 600°C 时,等轴晶直径明显增加,同时出现少量孪晶[图3(c)],直径 $8\sim 14 \mu\text{m}$ 晶粒所占比例最大[图3(g)],约占总数的 52% 。当温度为 800°C 时,等轴晶直径上升,孪晶晶粒也不断长大,这时晶粒形态以等轴晶和柱状晶为主[图3(d)],以及少量长大的孪晶,直径 $13\sim 17 \mu\text{m}$ 晶粒所占比例最大[图3(h)],占总数的 46% 。

温度对铜导线晶粒尺寸和晶粒形态的影响非常显著。随着温度的上升,晶粒直径逐渐增加。 400°C 时约 55% 的晶粒直径为 $7\sim 11 \mu\text{m}$, 600°C 时长大至 $8\sim 14 \mu\text{m}$ 的晶粒约占 52% , 800°C 时约 46% 的晶粒直径达到 $13\sim 17 \mu\text{m}$ 。不仅如此,温度升高时,

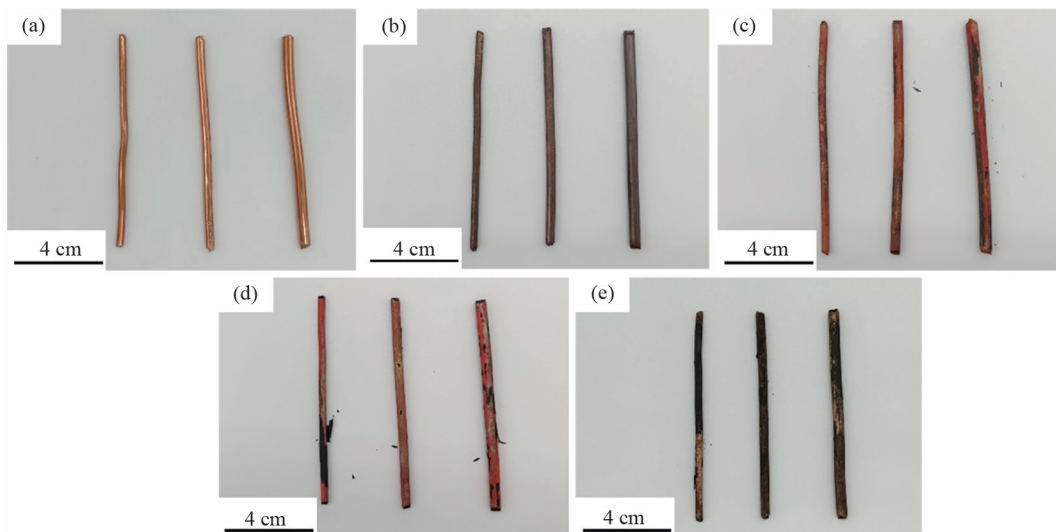


图2 截面积分别为2.5, 4, 6 mm²的无绝缘层铜导线在乏氧气氛下经过不同温度处理后的宏观形貌图像: (a)原始纯铜; (b)400 °C保温 30 min; (c)400 °C保温 120 min; (d)600 °C保温 30 min; (e)800 °C保温 30 min

Fig. 2 Macroscopic morphology images of copper wires with cross-sectional areas of 2.5, 4, 6 mm² under different heat treatment processes in anoxic atmosphere: (a) Original sample; (b) 400 °C-30 min; (c) 400 °C-120 min; (d) 600 °C-30 min; (e) 800 °C-30 min

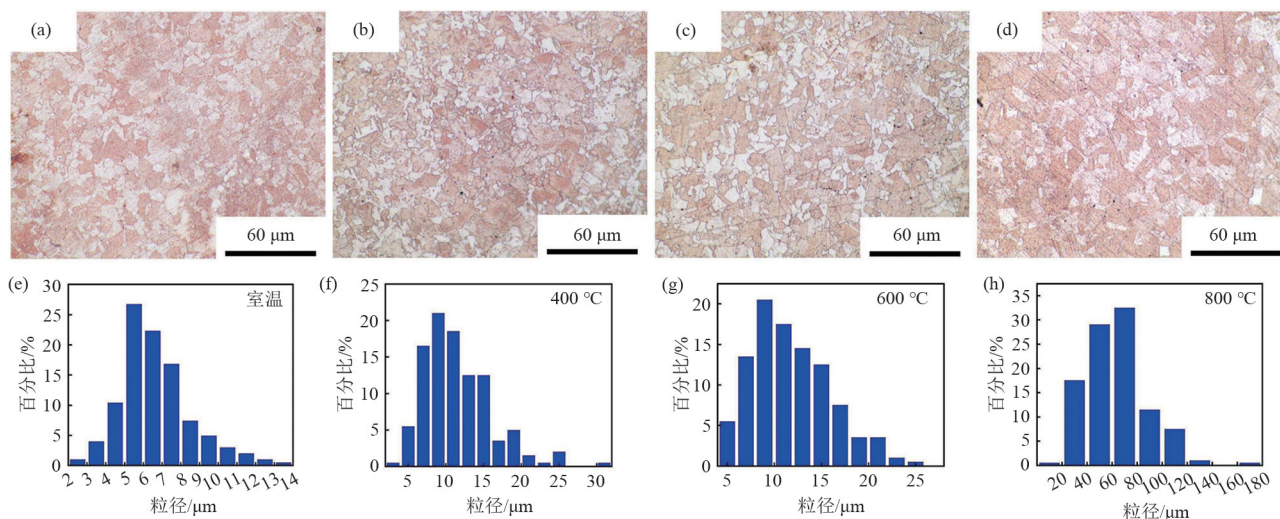


图3 截面积为4 mm²的无绝缘层铜导线在乏氧气氛中以不同温度保温 60 min后的金相组织和晶粒直径分布: (a, e)原始状态; (b, f)400 °C; (c, g)600 °C; (d, h)800 °C

Fig. 3 Microstructure and grain diameter distribution of copper wires with a cross-sectional area of 4 mm² without insulation layer held at different temperatures for 60 min in anoxic atmosphere: (a, e) Original state; (b, f) 400 °C; (c, g) 600 °C; (d, h) 800 °C

铜导线的横截面形成孪晶形态的金相组织。当温度为400 °C时,铜导线横截面的金相组织只有等轴晶,600 °C时金相组织中另外生成少量的孪晶,温度达到800 °C时,金相组织则为大量长大的等轴晶、柱状晶以及少量长大的孪晶。当温度为400 °C时,体系接收的能量少,晶粒生长慢,尺寸相对较小。而600 °C时铜导线金相组织的晶粒直径与400 °C时的粒径相差较小的原因可能是纯铜发生了再结晶行

为。温度升高至800 °C时,体系获得的热量多,冷却时间也延长,晶粒持续长大。

图4为无绝缘层保护的4 mm²铜导线在乏氧气氛中以800 °C处理不同时间后的金相组织和晶粒直径分布图。随着保温时间的延长,晶粒直径发生明显改变。如图4(a)所示,当保温时间为30 min时,其金相组织多呈等轴晶分布,伴有少量的孪晶晶粒,粒径在11~14 μm范围内的晶粒所占比例最大,

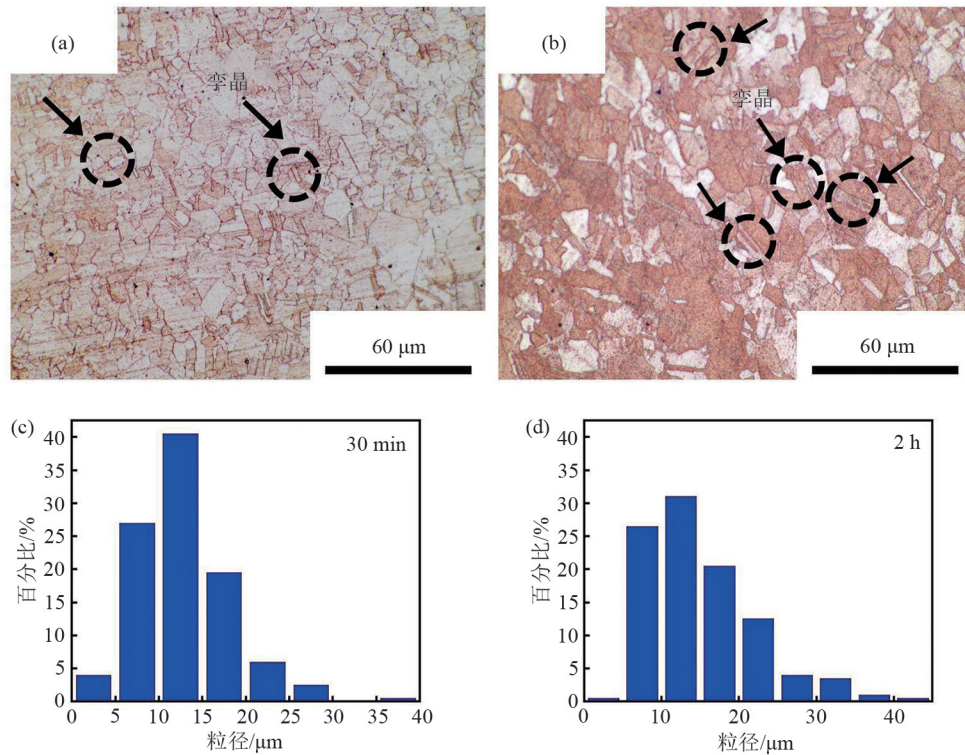


图4 截面积为4 mm²的无绝缘层铜导线在乏氧气氛中经800 °C等温处理后保温不同时间的金相组织和晶粒直径分布
Fig. 4 Metallographic structure and grain diameter distribution of copper wires with a cross-sectional area of 4 mm² without insulation layer under isothermal treatment at 800 °C in anoxic atmosphere for different time: (a, c) 30 min; (b, d) 120 min

约为总数的42%[图4(c)], 最小直径为0.92 μm, 最大直径为39.1 μm。保温时间延长至120 min时, 如图4(b)所示, 等轴晶直径明显增大, 大量孪晶零散分布在不同区域, 直径在12~18 μm范围内的晶粒所占比例最大, 占总数55%[图4(d)]。当保温时间延长至120 min时, 铜导线横截面依然为等轴晶和孪晶, 但晶粒整体长大, 相较于30 min时晶粒尺寸更加均匀, 直径大于30 μm的晶粒比例显著增加至5%左右。

图5为铜导线横截面平均晶粒直径随温度和时间变化的趋势。由图可见, 平均晶粒直径与温度和时间均呈正相关性, 与黄昊等人的研究结果一致^[26]。无绝缘层保护的4 mm²铜导线在乏氧气氛中以400 °C保温60 min后的平均粒径约为11.53 μm, 600 °C时升高为11.83 μm, 粒径增加值较小的原因是铜发生了再结晶过程, 800 °C时粒径达到14.28 μm, 此时粒径增加值高达2.45 μm。800 °C条

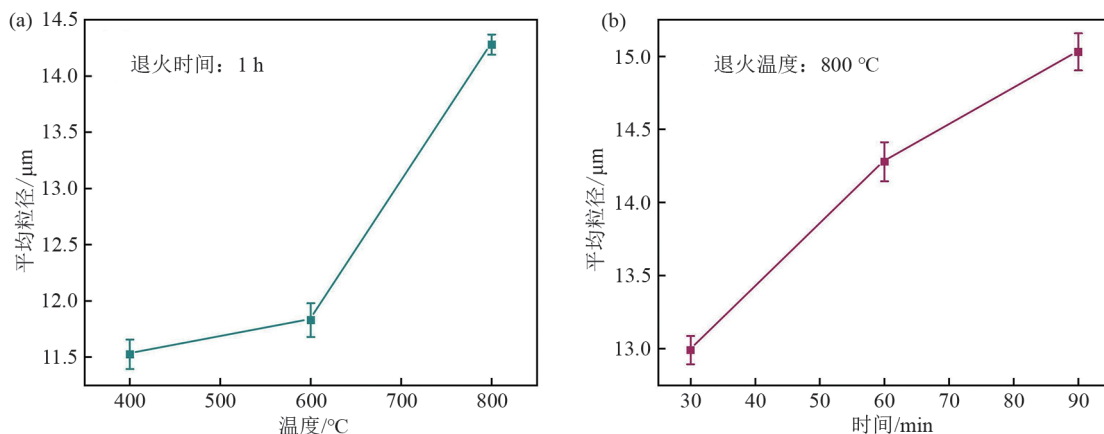


图5 铜导线横截面的金相组织的平均晶粒直径随(a)温度和(b)时间的变化趋势

Fig. 5 Trend of average grain diameter of metallographic organization of copper wire cross section with (a) temperature and (b) time

件下保温时间由 30 min 延长至 60, 120 min 时, 平均粒径由 12.99 μm 升高至 14.28, 15.03 μm , 粒径增加值分别为 1.29, 0.75 μm 。由此可知, 与保温时间相比, 温度对铜导线横截面金相组织的影响更大。由于温度的升高和保温时间的延长, 再结晶后的晶粒会继续长大, 当温度升高至 800 $^{\circ}\text{C}$ 时, 原子的扩散速度加快, 晶界的迁移速率增大, 此时晶粒快速长大, 保温时间延长至 120 min 时, 平均晶粒直径约为 15.03 μm 。

图6为无绝缘层保护的4 mm²铜导线在乏氧和富氧两种气氛中以 800 $^{\circ}\text{C}$ 保温 60 min 后的金相组织和晶粒直径分布图。随着氧含量的增加, 晶粒直径的变化程度较为剧烈。如图6(a)所示: 在乏氧气氛下, 铜导线金相形态为大量等轴晶中分散着少量孪晶[图6(c)], 直径在 13~17 μm 范围内的晶粒所占比例最大, 占总数的 46%, 晶粒的最大直径和最小直径相差约 23 μm , 在 10~20 μm 的范围内各粒径所占比例的差值不大(1%~8%), 表明氧化较为均匀; 而在富氧气氛下, 等轴晶直径减小, 孪晶数量上升[图6(b)], 粒径在 8~13 μm 范围内的晶粒所占比例最大, 占总

数的 58% [图6(d)], 晶粒的最大直径和最小直径相差约 50 μm 。由此可见, 升高氧气含量, 铜导线出现了氧化不均匀的现象, 横截面的金相组织晶粒的最大直径和最小直径相差数值升高。综上可知, 氧气含量对铜导线金相组织的尺寸均匀化影响较大。

图7为晶界激活能的拟合曲线。随着保温温度的升高, 大晶粒吞并小晶粒, 晶界向外扩展, 晶粒长大。如式(1)所示, 根据基本定义^[27], 晶界的迁移速率 $V(\text{m}^2/\text{s})$ 是由单位驱动力下的界面迁移速率 $B(\text{m}^2/\text{s})$ 和界面迁移的驱动力 $F(\text{N})$ 决定的^[28-29]。

$$V = BF \quad \text{式(1)}$$

界面迁移的驱动力如式(2)所示。大量实验表明, 晶界迁移是一个热激活过程, 晶界迁移率随温度的升高而增大, 二者的关系满足 Arrhenius 方程[式(3)]^[30-31], 由此可以得到晶界的迁移速率与晶粒平均粒径的关系[式(4)]。

$$F = k\Delta P = 4 \frac{\sigma k}{D} \quad \text{式(2)}$$

$$B = A \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad \text{式(3)}$$

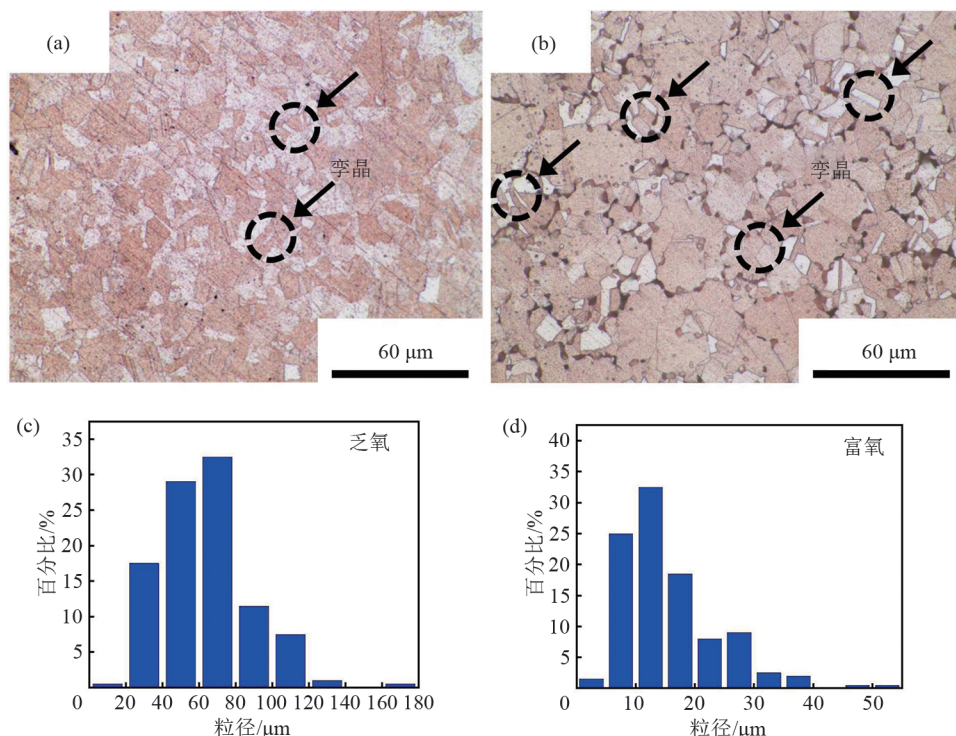


图6 截面积为4 mm²的无绝缘层铜导线在不同气氛中以 800 $^{\circ}\text{C}$ 保温 60 min 后的金相组织和晶粒直径分布:
(a) 和 (c) 为乏氧; (b) 和 (d) 为富氧

Fig. 6 Microstructure and grain diameter distribution of copper wires with a cross-sectional area of 4 mm² without insulation layer held at 800 $^{\circ}\text{C}$ for 60 min in different atmospheres: (a, c) Oxygen deficiency; (b, d) Oxygen enrichment

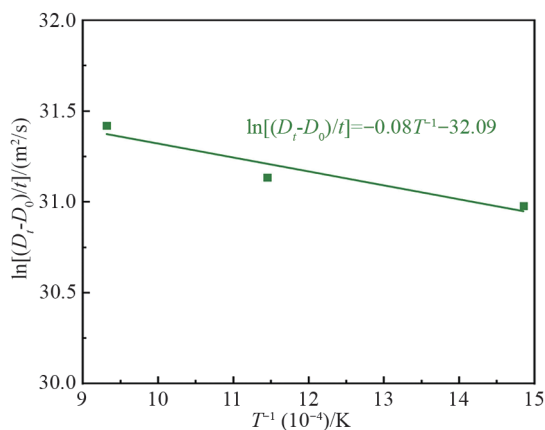


图7 晶界激活能的拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve for grain boundary activation energy

$$V = 4B \frac{\sigma k}{D} = \frac{K}{D} \quad \text{式(4)}$$

式中, $D(\text{m})$ 为晶粒的平均直径, $Q(\text{kJ/mol})$ 为晶界迁移的激活能, K (温度) 一定时, k , σ 和 A 是由材料决定的常数, ΔP 为界面化学位差, $T(\text{K})$ 为晶粒的退火温度, R 是气体常数 $[\text{J}(\text{mol} \cdot \text{K})]$ 。

在一定温度下退火时, 可以得到晶粒的平均粒径与时间的关系 [式(5)]:

$$V = \frac{dD}{dt} \quad \text{式(5)}$$

将式(4)代入式(5)通过计算得到式(6):

$$\ln \left[\frac{D_t^2 - D_0^2}{t} \right] = \ln A' - \frac{Q}{RT} \quad \text{式(6)}$$

据平均晶粒直径的测量结果, 通过线性拟合后得出晶界迁移的激活能为 0.68 kJ/mol 。影响晶界迁移的因素除了温度和时间外, 还有微量的杂质原子和晶粒间取向差。在纯金属中, 原子扩散主要通过空位和间隙机制进行。

2.3 过电流条件下铜导线微观组织分析

2.3.1 过电流下PVC铜导线燃烧行为

当电路通电时, 过电流状态下纯铜导线会依次出现冒烟、发红、燃烧、熔断四个阶段。如图8(a)所示, 图中线芯为纯铜导线, 黄色为导线的PVC绝缘层。刚开始时导线发热, 所产生的热量传导至绝缘层并点燃绝缘层, 同时产生气体, 在空气中可以闻到刺激性气味, 绝缘层逐渐熔化并首先从导线的中间位置脱落, 而导线两端依然在发泡冒烟 [图8

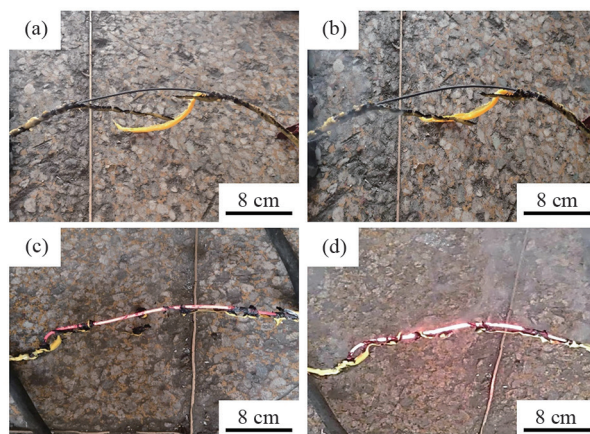


图8 带有PVC绝缘层的纯铜导线过电流故障的演化过程: (a)初始状态; (b)冒烟; (c)发红; (d)燃烧

Fig. 8 Evolution of overcurrent failure in a pure copper wire with PVC insulation; (a) Initial state; (b) Smoking; (c) Red-hot; (d) Burning

(b)]; 随着温度越来越高, 线芯逐渐发亮变红, 导线两端的绝缘层出现发泡现象 [图8(c)]; 随后导线剧烈燃烧并产生大量灰黑色烟雾 [图8(d)], 绝缘层被炭化, 导线被熔断。

图9(a)为过电流故障后的整根导线形貌, 图9(b)为图9(a)中熔断位置的放大图。将导线中间被熔融的熔珠命名为2#样品 [位置2, 见图9(b)], 距离导线断口处大约 1 mm 的左端部分命名为1#样品 (位置1), 距离导线断口处大约 1 mm 的右端部分命名为3#样品 (位置3), 三个样品的微观形貌和组织都存在差异。接下来将对过电流故障后断口处的1#样品、2#样品、3#样品分别进行分析。

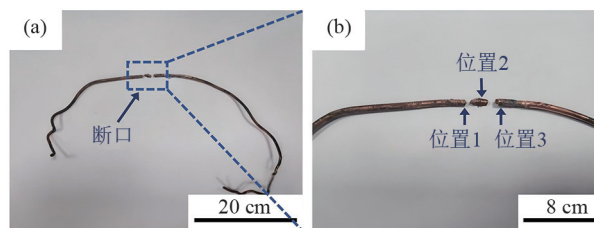


图9 过电流故障后熔断的纯铜导线整根导线(a)和断口处导线(b)放大图

Fig. 9 Pure copper wire blown after an overcurrent fault: (a) Entire wire; (b) Enlarged view of the wire at the fracture

2.3.2 过电流下PVC铜导线微观组织

采用SEM进一步对样品表面的微观形貌进行分析。图10为1#样品的SEM图及元素分布。由图

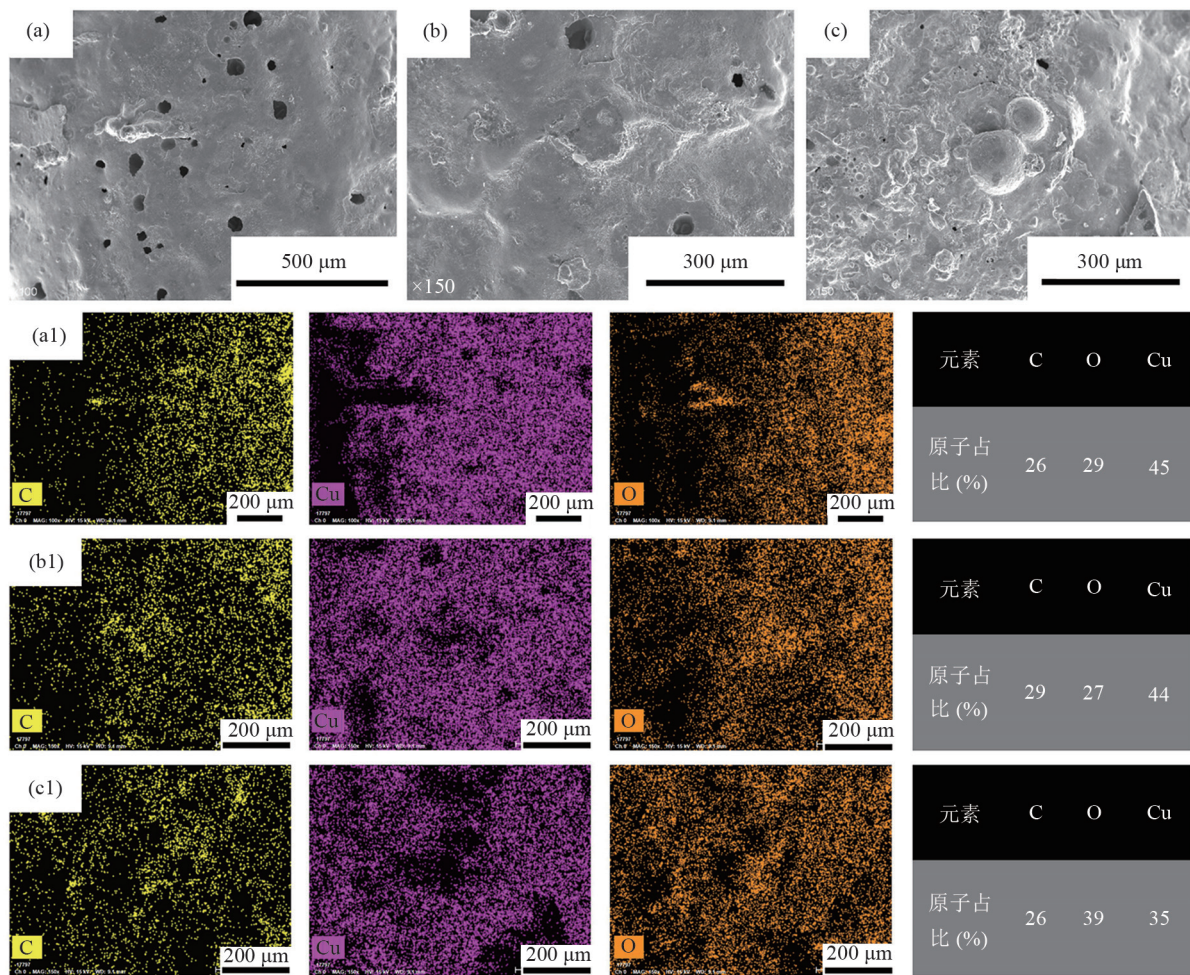


图 10 1#样品的SEM(a~c)和面扫图(a1~c1)

Fig. 10 (a~c) SEM and (a1~c1) surface sweep of 1# sample

可见,与无绝缘层保护的纯铜导线相比,PVC铜导线表面比较粗糙,且存在大小不一的不规则孔洞,孔洞大多呈圆形,没有方向性,此外还有一些深浅不一的凹坑和气泡。通过元素分析发现表面除CuO以外,还存在Cu₂O。过电流故障引发铜导线的燃烧行为,且燃烧反应剧烈,卷吸周围大量的空气和夹杂物,因此会在表面形成多个不同大小的孔洞、气泡和附着物,且样品在凝固过程中由于火焰慢慢熄灭,燃烧时间较长,凝固速率较慢,在表面形成的孔洞稍大。由于生长时间充足,导线表面的一些不规则小颗粒会长大,因此表面的附着物大小、形状各不相同。

图11为2#样品的SEM及元素分布。由图可见,样品表面凹凸不平,分布着许多较小的孔洞和凹坑,还有一些导线熔融后凝固形成堆叠层。这可能是由于燃烧温度达到样品熔点时,样品由固态转变

为液态并向下滴落,与地面瓷砖接触后样品从液态变为固态。当样品凝固时,外表面首先凝固,空气不参与内部反应,表面不会生成大的气孔通道,但是内部的液态金属流动性较大,在凝固时形成排气通道,气体从内向外溢出,生成大量小孔洞。表面除了CuO以外,也存在Cu₂O。

图12为3#样品的SEM及元素分布。需要注意的是,图12(a)中的晶粒由于快速冷却发生长大,形成明显的等轴晶,表面上附着部分燃烧产物颗粒。图12(b)中的孔洞较大、形状不规则,且表面存在较深的“沟”状凹坑。图12(c)中出现较多的小颗粒和微量圆形孔洞,图12(e)中可见深而多的凹坑及气孔。样品表面形貌和物相成分与1#样品相似。

2.3.3 过电流下PVC铜导线金相组织

图13为1#,2#和3#样品的金相组织图,晶粒

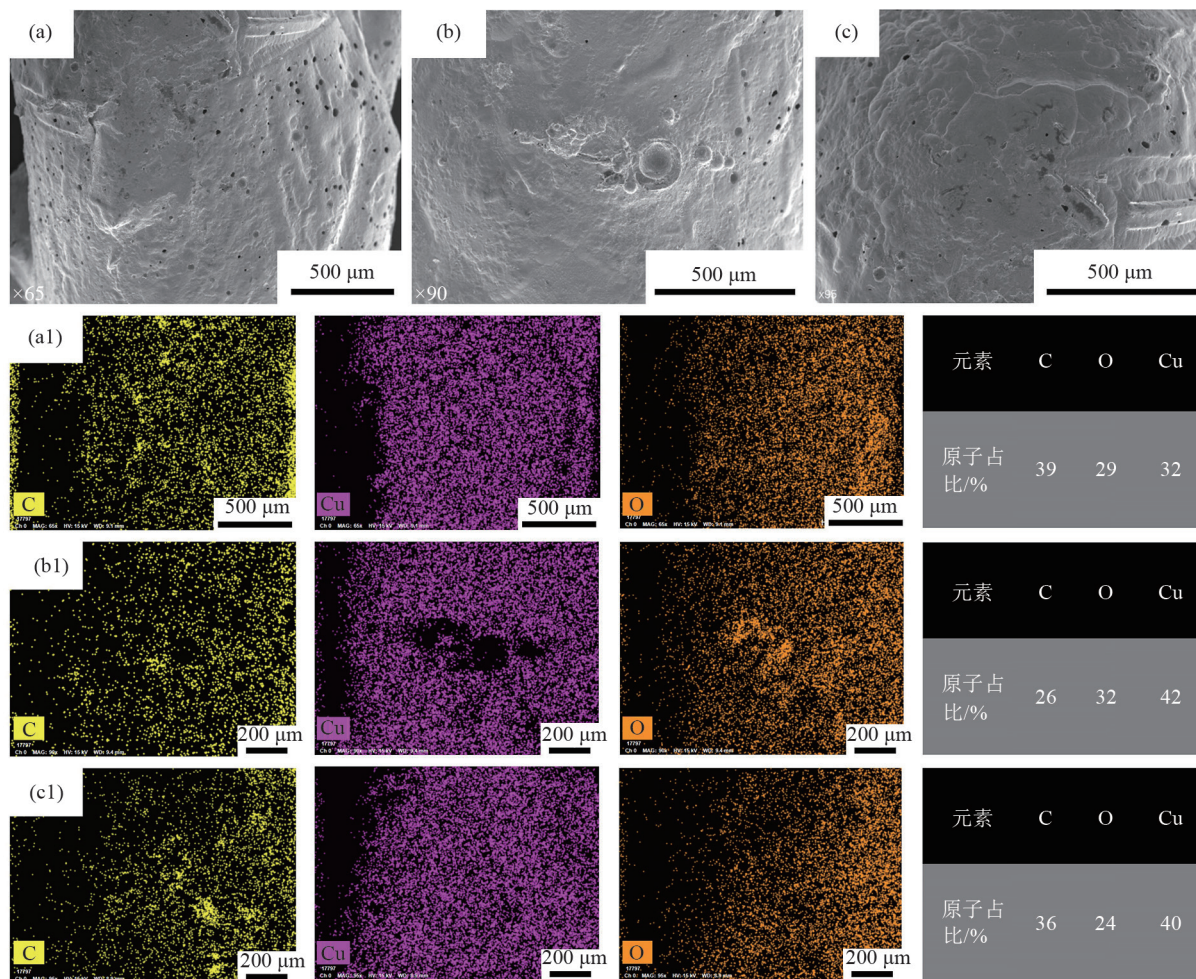


图11 2#样品的SEM(a~c)和面扫图(a1~c1)

Fig. 11 (a~c) SEM and (a1~c1) surface sweep of 2# sample

皆清晰可见。孪晶形态用蓝色箭头指出，柱状晶用橙色箭头指出。如图13(a~d)所示，1#样品横截面金相组织呈现三种晶粒形态：图13(a, b)中可见大量长大的柱状晶以及发生异常长大的等轴晶；图13(c, d)中有明显长大的孪晶晶粒。由于样品燃烧的时间较长，晶粒有充分的时间长大。图13(e~h)为2#样品的金相组织图，存在大量孪晶晶粒、树枝晶和尺寸相差较大的等轴晶和柱状晶，直径在5~10 μm 范围内的晶粒所占比例最大，占总数的40%(图14)，最小直径为3.26 μm ，最大直径为71.04 μm ，与2.3.2节所述经过热处理工艺的纯铜导线相比，最大粒径与最小粒径的差值过大(约68 μm)，同1#样品一样出现晶粒异常长大现象，这是因为少数晶粒边界被钉扎，部分晶界在长大过程中受到约束，不易发生迁移，因此长大后的晶粒尺寸相差较大。3#样品[图13(i~l)]

的金相组织存在少量细小的等轴晶和柱状晶，大部分等轴晶尺寸较为均匀，亦出现少量尺寸较大的孪晶。与距熔断点1 mm位置处的导线(2#样品和3#样品)相比，熔断点(1#样品)横截面的金相组织除了存在晶粒异常长大现象，亦呈现金属凝固时的典型特征(树枝晶)，说明导线在此处发生熔断，这可能是由于此位置的横截面积相对较小，过电流故障时导线的电阻变大、生成的热量最高导致熔融。

综合分析，过电流故障下的PVC绝缘纯铜导线与无绝缘层的纯铜导线相比，其横截面的金相组织也呈现等轴晶、柱状晶和孪晶三种形态，亦存在树枝晶和晶粒异常长大现象。此外，由于绝缘层的存在及与空气、杂质原子的接触，导致导线的表面分布着大量圆形气孔气泡、深浅不一的凹坑和形状不规则的表面附着物。

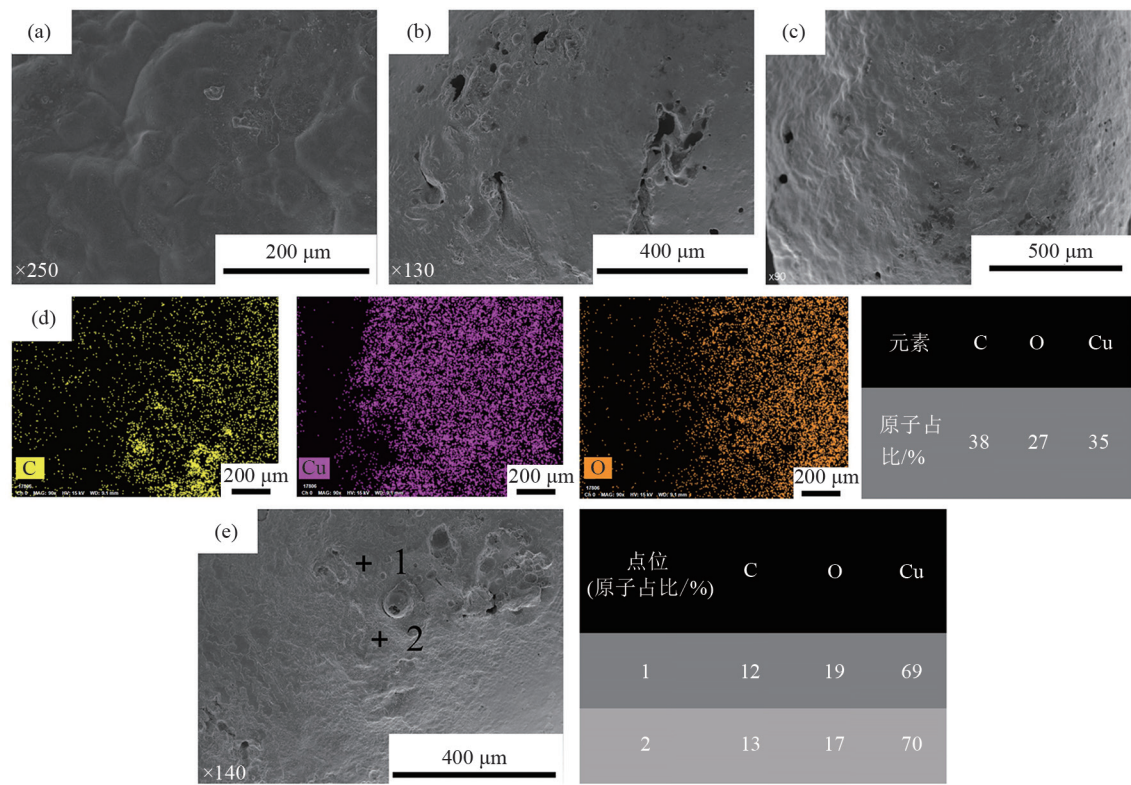


图 12 3#样品的SEM(a~c)、面扫图(d)和打点图(e)

Fig. 12 (a~c) SEM, (d) surface sweep and (e) dot pattern image of 3# sample

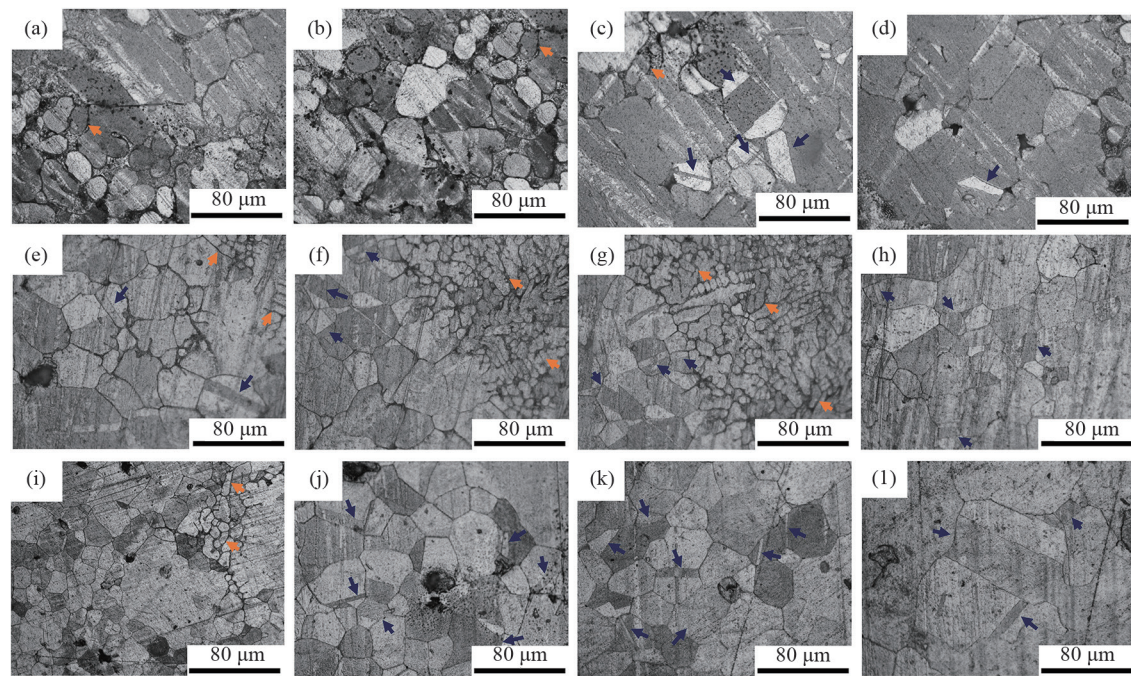


图 13 过电流的铜导线横截面的金相组织图: (a~d) 1#样品; (e~h) 2#样品; (i~l) 3#样品

Fig. 13 Metallographic structure of cross-section of copper wire after overcurrent fault: (a~d) 1# sample; (e~h) 2# sample; (i~l) 3# sample

3 结 论

1) 以纯铜导线为原材料, 研究其在模拟火灾环

56

境中不同温度、时间和氧气气氛条件下的变化。结果表明, 随着温度的升高和时间的延长, 铜导线的氧化程度加剧, 外表面颜色由暗紫色变为黑色, 并

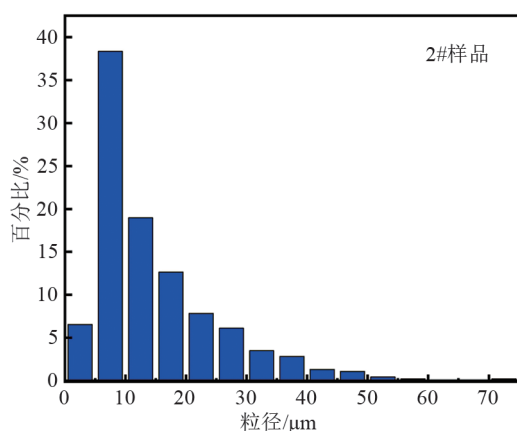


图14 过电流的铜导线2#样品横截面金相组织的晶粒直径分布图

Fig. 14 Grain diameter distribution of the cross section metallographic structure of overcurrent copper wire 2# sample

形成一层脆性氧化皮层。

2)铜导线横截面的晶粒不断长大,形态多为等轴晶,400℃时晶粒尺寸为7~11 μm,600℃时升高至8~14 μm,800℃时可达13~17 μm,晶粒在生长过程中由于低层错能而出现孪晶晶粒。铜导线的平均晶粒尺寸与退火温度和时间都呈正相关性。与时间相比,温度对铜导线横截面金相组织的影响更大。

3)线性拟合结果表明,晶粒长大过程中晶界迁移的激活能为0.68 kJ/mol。在实际过电流故障下,失效铜导线的熔断处形成熔珠和树枝晶。树枝晶是金属熔融凝固后的典型特征,表明失效原因是电路中电流过大引发导线出现过热现象,最终熔断,熔断区附近存在晶粒异常长大现象。

参考文献:

[1] 黄达运.家庭电气火灾成因及预防之法[J].消防界(电子版),2021,7(19):39-41.
 [2] 周靖博.我国电气火灾监控系统的发展现状及趋势[C]//中国消防协会学术工作委员会消防科技论文集(2022).北京:中国石化出版社,2022:419-420.
 [3] VIEGAS D X F C, RAPOSO J R N, RIBEIRO C F M, et al. On the non-monotonic behaviour of fire spread[J]. International Journal of Wildland Fire, 2021, 30(9): 702-719.
 [4] MORENO M V, CHUVIECO E. Characterising fire regimes in Spain from fire statistics[J]. International Journal of Wildland Fire, 2013, 22(3): 296-305.
 [5] 李伟强,刘海涛,王梦娜,等.微量碱土金属Sr对纯铜导

电率和热稳定性的影响[J].铜业工程,2025(3):33-43.

[6] 俞则丰.电气设备防火与防爆问题的探讨[J].中国设备工程,2022(21):125-127.
 [7] 刘明月.家用电热器具火灾成因及勘验要点[C]//中国消防协会学术工作委员会消防科技论文集(2022).北京:中国石化出版社,2022:281-283.
 [8] 石王方.住宅建筑电气火灾原因的调查及预防策略分析[J].中国设备工程,2022(18):172-174.
 [9] 周景东,王庆礼.北京某生活超市电气火灾安全隐患分析及解决方案[J].玻璃,2022,49(10):43-46.
 [10] 张志伟,雷心怡,王一名,等.着床后引燃对电弧迸溅熔珠组织特征的影响[J].中国安全生产科学技术,2022,18(8):202-209.
 [11] WRIGHT S A, LOUD J D, BLANCHARD R A. Globules and beads: what do they indicate about small-diameter copper conductors that have been through a fire? [J]. Fire Technology, 2015, 51(5): 1051-1070.
 [12] HE H, ZHANG Q X, WANG X W, et al. The influence of currents on the ignition and correlative smoke productions for PVC-insulated electrical wires[J]. Fire Technology, 2017, 53(3): 1275-1289.
 [13] 何定礼.电气火灾成因分析及预防措施研究[C]//2024智慧施工与规划设计学术交流会议论文集.重庆:中国智慧工程研究会,2024:219-221.
 [14] 吉纪伟,陈久彬.探讨建筑电气线路火灾事故的成因与预防[J].今日消防,2021,6(11):97-99.
 [15] MENG H, XIAO L, ZHANG C W, et al. A systematic review and bibliometric analysis of electrical fires from 1993 to 2022[J]. Fire Technology, 2024, 60: 3347-3377.
 [16] THAI H D, LE N B V, LEE D, et al. A survey of electrical fire causes assessment technology[J]. IEEE Access, 2024, 12: 145378-145392.
 [17] 门腾腾,刘树帅,刘海旭,等.铜导线火灾熔痕的背散射电子衍射分析方法[J].理化检验(物理分册),2024,60(6):10-14.
 [18] XU N, DING N, LIU L, et al. Microscopic characteristics of copper wires with short-circuit molten marks in electrical fire[J]. Materials Testing, 2023, 65(6): 844-854.
 [19] 孙卓尔,周洋,李阳.铜导线一次短路熔痕受热过程中的理化反应[J].消防科学与技术,2021,40(8):1259-1262.
 [20] DENG J, LI Y, LV H F, et al. Metallurgical analysis of the 'cause' arc beads pattern characteristics under different short-circuit currents[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020, 68: 104339.
 [21] LV H F, DENG J, LI Y, et al. Influence of thermal

- environment on metallographic structure characteristics of the electric arc bead pattern [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2021, 70: 104426.
- [22] 周楠, 蒋敬, 樊武龙, 等. 火烧环境中铜缆线燃烧痕迹宏观特征 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(5): 2211-2218.
- [23] SONG H Q, SHEN H X, ZHANG G W, et al. Microstructure evolution of melt-extracted copper alloy wires [J]. Materials Letters, 2024, 358: 135820.
- [24] ZACHARAKIS I, TSIHRINTZIS V A. Integrated wildfire danger models and factors: a review [J]. Science of the Total Environment, 2023, 899: 165704.
- [25] 姬坤海, 张辉, 杨帆, 等. 二次热处理对Ti35合金管材显微组织与力学性能的影响 [J]. 铜业工程, 2025(4): 81-87.
- [26] 黄昊, 胡小勇, 包任烈, 等. 火灾温度及燃烧时间对铜导线的影响研究 [C]//2013中国消防协会科学技术年会论文集. 北京: 中国石化出版社, 2013: 321-325.
- [27] 李海勇, 李赛毅. 纯Al<111>对称倾斜晶界迁移行为温度相关性的分子动力学研究 [J]. 金属学报, 2022, 58(2): 250-256.
- [28] RAWAT N K, JAIN N, MISHRA A K, et al. Atomistic-scale simulations on grain boundary migration mechanisms involved in metals and alloys: a critical review [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2025, 32: 1931-1968.
- [29] 王海丰, 蒲振新, 张建宝. 非平衡界面动力学理论 [J]. 金属学报, 2025, 61(1): 29-42.
- [30] WINNING M, ROLLETT A D, GOTTSTEIN G, et al. Mobility of low-angle grain boundaries in pure metals [J]. Philosophical Magazine, 2010, 90(22): 3107-3128.
- [31] WINNING M, GOTTSTEIN G, SHVINDLERMAN L S. Stress induced grain boundary motion [J]. Acta Materialia, 2001, 49(2): 211-219.

Microscopic Characteristics of Copper Conductors in Fire Scenarios

BAI Xintan¹, ZHAO Dandan¹, FENG Peizhong^{1,2}, ZHANG Baojing¹, WANG Xiaohong¹

(1. School of Materials Science and Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Jiangsu Key Laboratory for Clean Utilization of Carbon Resources, Xuzhou 221116, China)

Abstract: To prevent fire incidents, investigating fire traces and identifying the cause of the fire is a primary task in fire forensic evidence identification. Analysis of microscopic characteristics of copper conductors after a fire is an effective method for this purpose. This study simulated the temperature, time, and atmospheric conditions of a fire environment, generating fires caused by overcurrent faults, to investigate surface morphology, cross-sectional grain shape, and size of copper conductors after a fire. As the temperature increased and duration extended, oxidation degree of the copper conductor deepened, and grains continuously grew, exhibiting an axial shape. At 400 °C, the grain size was 7~11 μm. At 600 °C, it increased to 8~14 μm. At 800 °C, it reached 13~17 μm. During the grain growth process, a large number of twins appeared due to low stacking fault energy. Average grain size of copper conductors was directly proportional to both annealing temperature and time, with temperature having a more significant impact. Linear fitting results showed that activation energy for grain boundary migration during grain growth was 0.68 kJ/mol. Under actual overcurrent fault conditions, the failure copper conductor formed molten beads and dendrites at the fracture site, indicating that an excessive current in the circuit caused the conductor to overheat, ultimately leading to fracture, with abnormal grain growth occurring near fracture zone.

Key words: fire; copper conductor; microstructure; grain size

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.01.005

引文格式: 柏鑫坛, 赵丹丹, 冯培忠, 张保敬, 王晓虹. 模拟火灾环境下铜导线微观组织演变特征研究 [J]. 铜业工程, 2026(1): 48-58.

BAI Xintan, ZHAO Dandan, FENG Peizhong, ZHANG Baojing, WANG Xiaohong. Microscopic characteristics of copper conductors in fire scenarios [J]. Copper Engineering, 2026(1): 48-58.