

# 模拟火灾作用对紫铜焊接接头组织和性能的影响

刘政军<sup>1</sup>, 于丽丽<sup>1,2</sup>, 张 明<sup>2</sup>

(1. 沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110870

2. 沈阳消防研究所 火灾现场勘验与物证鉴定公安部重点实验室, 沈阳 110034)

**摘 要:** 为了得到实际火灾现场中火焰和辐射热对电线及连接部位的电气损伤, 模拟了不同温度对 4 mm 厚的 T3 紫铜板焊接接头的作用. 通过对焊接接头力学性能、电学性能和显微组织的分析, 并将金属结晶及热处理理论与火灾作用机理相比拟, 得出温度对紫铜焊接接头组织和性能的影响规律. 结果表明, 当火灾温度较低时, 硬度会因退火强化而略有升高, 不会造成影响; 当温度高于 650 °C 时, 硬度明显降低, 火灾温度会对其造成严重性破坏; 电阻率随温度变化影响不大; 焊缝组织为粗大的  $\alpha$ -Cu 晶粒, 内部有胞状晶亚结构生成, 随温度升高, 晶粒长大, 亚结构数量逐渐减少且分布弥散.

**关键词:** 温度; 紫铜; 显微组织; 力学性能; 钨级氩弧焊

**中图分类号:** TG457.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2011)02-0041-04



刘政军

## 0 序 言

纯铜具有优良的传热导电性能和理想的力学性能, 易于加工或者铸造成型, 在电力电子行业得到广泛应用<sup>[1,2]</sup>. 在电力输送中需要大量的铜电线及电缆, 而一些动力电缆的接头, 通常采用焊接技术以达到电缆接头牢固、抗压电阻小、不发热的技术要求<sup>[3]</sup>. 火灾是发生最频繁极具破坏性的灾害之一, 近几年国内电气火灾发生的起数和造成的损失呈逐年上升的趋势. 国内外的统计资料也表明电气火灾是一类重大的火灾<sup>[4]</sup>. 由于火灾现场的复杂和多变性, 火场中不同温度会对电线电缆造成一定的影响. 文中采用模拟试验研究火灾中不同温度对铜焊接接头的组织和性能影响, 结合铸态组织的形成原理进行分析与讨论, 从而为火灾物证鉴定工作提供更多的依据.

## 1 试验方法

选用 4 mm 厚的 T3 紫铜板作为母材进行焊接. 焊丝为 S201 紫铜焊丝, 直径为 3.0 mm. 采用 NSA-500-1 型电焊机, 焊接过程为半自动焊接, 采用手动送丝, 焊接工艺参数见表 1. 试样先刨成 V

型坡口, 预热, 采用双面焊工艺.

表 1 焊接工艺参数  
Table 1 Welding Parameters

焊接电流 I/A	氩气流量 $q_v/(L \cdot \text{min}^{-1})$	钨极距工件 高度 h/mm	钨极直径 d/mm
160	15	1.5~3	2

模拟试验采用箱式电阻炉将样品分别加热到 200 350 500 650 800 °C 后随炉温自然冷却. 采用显微硬度计测量焊缝、热影响区、母材的硬度. 因紫铜热导率很大, 在焊接过程中采用能量较为集中的氩弧焊, 使得焊接热影响区较小, 很难区分其中的正火区、过热区、不完全重结晶区等. 用微电阻测试仪器测量试样的电阻采用 OLYMPUS 金相显微镜对显微组织进行显微分析.

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 加热温度对紫铜焊接接头硬度的影响

对不同温度下的试验样品在显微硬度计上测试接头处各区的维氏硬度值, 载荷 100 N, 加载时间 8 s, 每个区域测物点并取其平均值, 图 1 为试样随炉体自然冷却下的硬度曲线.

从图 1 中可以看出, 对同一个焊接接头, 热影响区硬度最低, 焊缝金属的硬度基本与母材相当. 这是因为热影响区在结晶过程中同时受到温度及金属

收稿日期: 2009-09-28

基金项目: 国家科技支撑计划基金资助项目(2006BAK06B04); 公安部应用创新基金资助项目(2010YYCXSYXJ38)

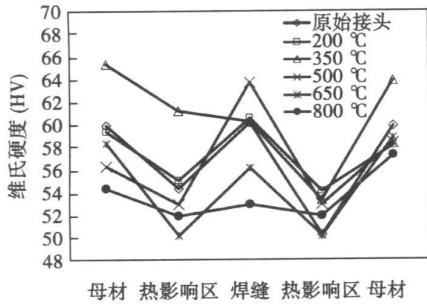


图 1 紫铜焊接接头在不同温度下各部位硬度值

Fig. 1 Hardness of copper welded joint at different temperature

凝固时的收缩作用的影响, 形成粗大的柱状晶. 而焊缝和母材晶粒相对均匀, 且材料为轧态 (Y), 即进行了强化处理. 随温度升高, 在低温段, 焊缝的硬度值基本变化不大, 在铜发生再结晶后, 性能基本恢复与母材性能相当. 这是因为试样经退火后, 消除内应力, 起到一定的强化作用. 铜在受到温度作用后, 尤其是温度高于再结晶温度后, 发生明显的位错等晶格缺陷而引起晶格畸变, 使位错阻力加大, 因此略有强化作用. 当温度达 500 °C 时, 硬度显著提高, 这可能与铜或焊丝中的杂质 (如氧) 在晶界处析出第二相有关. 随着温度的进一步升高到 650 °C 后, 接头硬度又有下降的趋势. 因为随退火温度升高引起晶粒长大, 亚结构数量减少, 且分布不均匀.

## 2.2 加热温度对电阻率的影响

由于纯铜是一种良导体材料, 且温度对电阻率的影响很小, 因此选择的测量仪器精度要高. 试验选择测量电阻的仪器为数字直流微电阻测量仪, 测量精度为  $10^{-6} \Omega$ . 所有试样测量的环境温度为 27 °C. 图 2 为焊缝区域电阻率随温度变化关系. 可以看出, 随温度变化电阻率值变化不大. 在低温段, 电

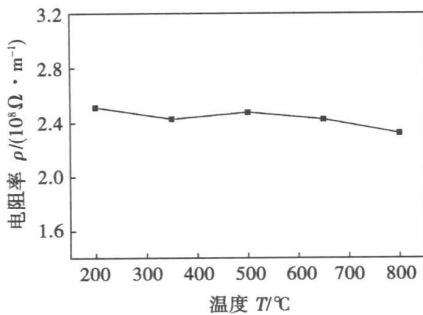


图 2 不同温度与电阻率之间的关系

Fig. 2 Relationship between electrical resistivity and temperature

阻率呈现明显下降趋势, 当温度达到 500 °C 时, 略有升高, 而后随温度继续升高, 电阻率呈平稳下降趋势.

在理想晶体中, 晶体点阵是周期排列的, 传导电子可以在晶体中自由运动. 当晶体点阵的周期性遭到破坏时会产生晶格畸变, 遭受破坏的晶体点阵就成为传导电子的散射源, 从而产生电子运动的阻力, 这就是电阻产生的本质<sup>[5]</sup>. 因此, 电阻率从某种意义上讲也是描述晶体点阵畸变程度的一种方式. 1960 年, Matthiessen<sup>[6]</sup> 提出一个重要的定律, 其一般表达式为

$$\rho = \rho_t + \rho_c + \rho_p \quad (1)$$

式中:  $\rho_t$  为晶格热振动引起的电阻率,  $\rho_p$  为晶格物理缺陷引起的电阻率,  $\rho_c$  为金属化学成分不纯引起的电阻率. 其中  $\rho_t$  与温度有关,  $\rho_c$  与纯度有关. 因此, 影响铜的电阻率的主要因素是温度和纯度. 一方面晶界数目减少, 对电阻的散射几率减弱, 导致电阻率下降. 另一方面, 纯铜中的铅, 铋, 硫等低熔点杂质, 使晶格畸变增强, 电子散射几率增大, 电阻率增强. 这两个对导电性起相反作用的因素同时存在.

随着退火温度的升高, 导体材料因为内部位错和晶格畸变渐渐消失, 晶体重新排列而使电流通过更加顺畅, 所以相应的电阻率减小. 随温度继续升高, 在 500 °C 时, 铜中很可能由于存在并析出第二相, 而使电阻值略有增大, 此后, 随着第二相颗粒已经开始长大. 破坏了析出相和铜基体的共格结构, 直接导致了电导率下降.

## 2.3 加热温度对焊缝显微组织的影响

图 3 为不同温度的紫铜焊接接头在随炉体自然冷却条件下焊缝的金相组织. 从图 3 中可以看出, 焊缝的组织为粗大的  $\alpha$ -Cu 晶粒, 并在晶界上析出 (Cu<sub>2</sub>O) 共晶, 内部有胞状晶亚结构生成, 且胞状晶均匀地分布在晶粒内部. 随温度升高, 在 350 °C 和 500 °C 晶界变得明显. 这很可能是铜板及焊丝中杂质元素在晶界析出, 从而提高力学性能及电导率. 而后随温度继续升高,  $\alpha$ -Cu 晶粒不断长大, 胞状晶数量逐渐减少, 且分布弥散. 影响焊接接头的力学性能. 随晶界数目减少, 电阻率下降.

## 3 金属凝固理论与火灾作用机理

火灾物证鉴定中金属导线熔化痕迹可分为由电的热作用形成和由火灾热作用形成, 而电的热作用又可分为一次短路 (火前短路) 和二次短路 (火后短路). 一次短路熔痕和二次短路熔痕同属于瞬间电弧高温熔化, 具有冷却速度快, 熔化范围小的特点, 但不同的是前者短路发生在正常环境气氛中, 后者

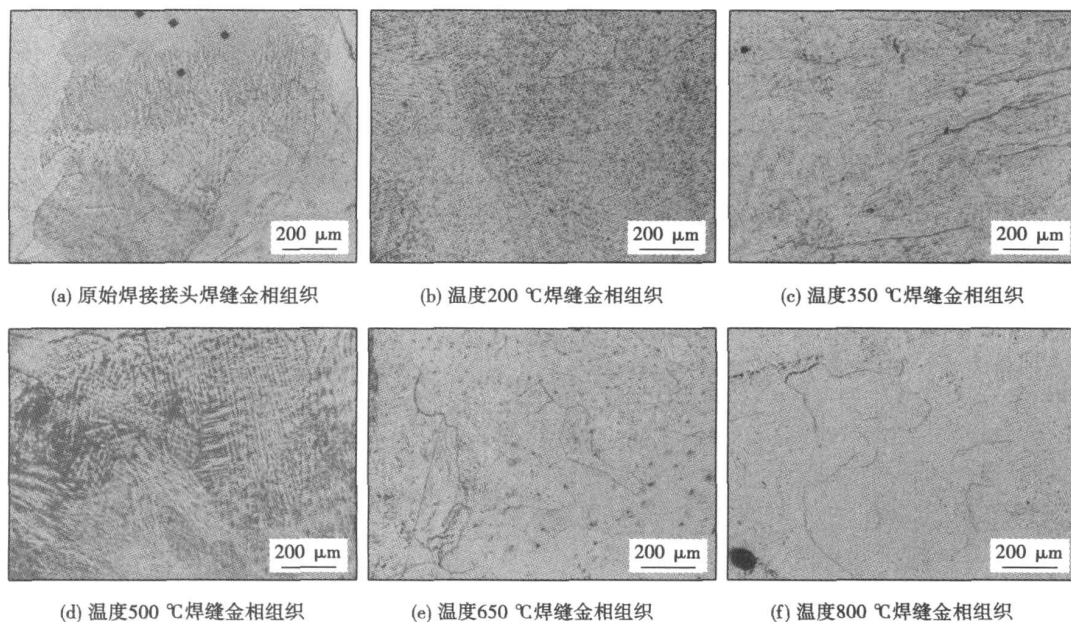


图 3 不同温度下紫铜焊缝金相组织

FIG 3 Microstructure of copper welds at different temperature

短路发生在烟火与温度的气氛中. 通常火灾热作用熔化的痕迹具有温度持续时间长, 火烧范围大, 熔化温度低于短路电弧温度. 虽然都属于熔化, 但由于凝固过程中所处的环境温度及气氛不同, 从而保留了熔痕形成时的一些特征. 当导线发生短路时, 由于电流突然增大, 短路点将处于  $2\ 000\ ^\circ\text{C} \sim 3\ 000\ ^\circ\text{C}$  的高温状态, 同时强烈的电弧高温作用使金属迅速熔化、汽化, 汽化的金属体积膨胀, 发生迸溅; 迸溅出的液态金属由于脱离电弧高温作用, 其开始迅速冷却成固态金属. 而后随着火灾环境温度及气氛冷却, 形成具有一定特征的金属熔化痕迹.

根据金属结晶经典理论, 在液态金属冷却到理论凝固温度时, 并不凝固, 只有冷却到低于理论凝固温度的某一温度后才开始凝固. 随后, 因为凝固放出的结晶潜热超过了向环境散失的热量, 温度回升, 直至放出的热量与散出的热量相等时, 凝固开始在恒温下进行, 一直到金属凝固温度结束, 温度才继续下降. 金属的实际开始凝固温度与理论凝固温度之间的差值称为过冷度. 过冷度是金属凝固的必要条件. 当金属熔液过冷到熔点以下时, 熔液中出现晶坯, 此时体系的体自由能降低. 由于熔液中出现新相后, 在固、液相之间出现了界面, 从而增加了界面能. 所以形成一个晶核, 而后是晶核不断形成和不断长大的过程. 金属结晶后影响晶粒大小及形状的主要因素有过冷度、结晶速度、保温时间以及氧化程度等. 金属由液态向固态转变时过冷度愈大, 从液

态金属中出现的晶核以及以各晶核为中心的小晶体就愈多, 晶粒就细. 焊接是金属熔化后形成焊接接头的过程. 随热源离开, 经过化学冶金反应的熔池金属就开始凝固结晶, 金属原子由近程有序排列转变为远程有序, 既由液态转变为固态. 铜导体在焊接时, 瞬间产生的电弧温度高达  $2\ 000\ ^\circ\text{C}$  以上, 此温度足以达到火灾中的短路接触点温度.

当铜形成焊接接头结晶完成后继续受热, 焊缝内部原子能量升高, 晶界处原子扩散能力加强, 会使晶界迁移, 出现大晶粒吞并小晶粒的情况<sup>[7]</sup>, 此过程在金属热力学中称为二次再结晶, 也是一个自发过程. 由于试样体积相对较小, 散热慢, 因而在受热温度达到一定高温时, 部分晶粒才开始长大. 试验结果显示, 温度越高, 晶粒的长大速度越快, 这是因为晶界的平均迁移率与原子单位时间跳跃次数  $\bar{\nu} \propto e^{Q_m/RT}$  成正比<sup>[8]</sup> ( $Q_m$  为晶界迁移的激活能,  $R$  为常数,  $T$  为温度). 受热时间相同情况下, 随着温度的升高, 晶粒长大越快.

通过运用金属结晶的基本规律来鉴定电气火灾现场起火点及其附近残留的金属导线熔化痕迹, 从而为直接认定或者排除电气火灾原因提供客观、科学的依据.

## 4 结 论

(1) 当火灾温度较低情况下, 紫铜焊接接头的

硬度会因退火而略显强化作用. 当高于 650 °C 时, 硬度显著下降, 火灾温度对其影响较大, 可造成严重性危害.

(2) 紫铜焊接接头的电阻率随温度变化影响不大, 略显下降趋势.

(3) 紫铜焊缝组织为粗大的  $\alpha$ -Cu 晶粒, 内部有胞状晶亚结构生成. 随温度升高, 亚结构数量逐渐减少且分布弥散.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 编写组. 重有色金属材料加工手册 (第一分册) [ M ]. 北京: 冶金工业出版社, 1979.
- [ 2 ] 陆文华, 李隆盛, 黄良余. 铸造合金及其熔炼 [ M ]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [ 3 ] 薛福连. 紫铜电缆接头 TIG 焊工艺 [ J ]. 热加工工艺, 2006 35( 11): 84—85.  
Xue Fulian. Copper cable joints TIG welding process [ J ]. Heat

Processing Technology 2006 35( 11): 84—85.

- [ 4 ] Numj. Electrical fire risks [ M ]. TUKES Publication 2001.
- [ 5 ] 陈建, 严文, 范新会, 等. 铜导线中晶界对导电性影响研究 [ J ]. 西安工业学院学报, 2002 22( 4): 348—352.  
Chen Jian, Yan Wen, Fan Xinhui, et al. Effect of grain boundaries on the electrical property of copper wire [ J ]. Journal of XI'AN Institute of Technology 2002 22( 4): 348—352.
- [ 6 ] Dugdie JSD. 金属及合金的电学性质 [ M ]. 朱道康, 吕世骥译. 北京: 高等教育出版社, 1988.
- [ 7 ] 司怀吉, 崔占忠. 铜导线连续退火过程冷却规律的研究 [ J ]. 电线电缆, 2003 10( 5): 28—32.  
Si Hua ji, Cui Zhanzhong. Study on the cooling law of copper conductors during the continuous annealing process [ J ]. Electric Wire & Cable 2003 10( 5): 28—32.
- [ 8 ] 竺海量. 金属材料基础 [ M ]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2001.

**作者简介:** 刘政军, 男, 1962 年出生, 教授, 博士生导师. 主要从事焊接冶金及表面强化技术. 发表论文 90 余篇. Email: su\_yunha@yahoo.com.cn; liuzhengjun1962@163.com

age value of welding speed is obtained. The experiment results of 90 degree fillet welding seam tracking indicate that the method can improve welding quality at the peak of fillet weld seam effectively.

**Key words:** rotating arc sensor; mobile welding robot; fillet weld seam tracking; welding parameter adjustment on line

**Influence of low frequency magnetic field on microstructure and wear resistance of submerged arc welding cladding**  
CHANG Yunpeng, LI Jingya, YANG Dianchen, JIN Wei (Liaoning Province Advanced Welding Technology and Automation Key Laboratory, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China), P 37—40

**Abstract:** The effect of low frequency longitudinal magnetic field on microstructure and mechanical properties of deposited metal of submerged arc hard facing was studied by analysing the weld formation, hardness, wear resisting property and microstructure of the deposited metal. The action mechanism of low frequency magnetic field to improve the microstructure of the deposited metal and the wear resisting property of hard facing layer was discussed. The experiments show that low frequency longitudinal magnetic field makes the welding pool width increase, welding penetration slightly reduce, the crystal grain be refined from  $25.6 \mu\text{m}$  to  $10.6 \mu\text{m}$ , the hardness increase from 50.5 HRC to 55.0 HRC and the wear rate decrease from 0.035 g to 0.015 g. So the low frequency longitudinal magnetic field can refine the crystal grain effectively and improve hardness and wear resisting property of hard facing layer.

**Key words:** low frequency longitudinal magnetic field; submerged arc hard facing; grain refinement; wear resistance

**Effect of simulated fire on microstructures and properties of copper welded joint**  
LIU Zhengjun<sup>1</sup>, YU Lili<sup>2</sup>, ZHANG Ming (1 School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110178, China; 2 Key Laboratory of Fire Scene Investigation and Evidence Identification of MPS, Shenyang Fire Research Institute, Shenyang 110034, China), P 41—44

**Abstract:** In order to obtain the effect and electrical injury of the flames and radiant heat on the wires and connecting parts in actual fire scene, a T3 copper plate 4 mm thick was welded by TIG at different temperatures. Through the mechanical and electronic properties and microstructure analysis of welded joints and a comparison of the crystallization and heat treatment theory of metal with fire mechanism, the effects of temperature on the microstructures and properties of copper welded joints were investigated. The results show that the hardness will be slightly higher due to enhanced annealing when the fire temperature is low, which does not affect by fire. But when the temperature is above 650 °C, the hardness significantly declines, which causes the seriousness damage. Electrical resistivity has little changes. The microstructures of welded joint is coarse grains of  $\alpha$ -Cu and crystal with the celluliform metastable structure generated. With increasing temperature, the grain growth and the number of sub-structure decrease and diffuse.

**Key words:** temperature; copper; microstructures; properties; TIG

**Microstructure and Performances of multi-pass single layer weld-based remanufacturing component**  
ZHAO Huihui, ZHANG Guangjun, FAN Qing, SHANGGUAN Yunjian, WU Lin (1 State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2 Lishen Pump Company Machining Plant, Daqing Equipment Manufacturing Business, Daqing 163000, China), P 45—48

**Abstract:** The micrographs of cross section of multi-pass single layer weld-based remanufacturing component are analyzed, especially the microstructure of filler pass in middle position. The microhardness of multi-pass single layer remanufacturing component at the whole cross section and the inter-pass position is tested, and tensile testes in different directions are carried out. Research results show that every pass of cladding except for the last pass contains the remelting region, half-melting region, complete phase transformation region and segmental phase transformation region. On the across section, the microhardness of remanufacturing cladding at two sides is larger than that in the middle position. The allowed tensile loads of test piece along depositing direction are larger than those along vertical depositing direction, and the fracture types of tensile pieces at two situations are both plastic fracture.

**Key words:** weld-based remanufacturing; multi-pass single layer cladding; microstructure and performances; microhardness

**Open architecture master-slave robot remote welding control system**  
CHEN Hongtang, LI Haidao, GAO Hongming, WU Lin (National Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China), P 49—52

**Abstract:** Manual control using the master-slave robot remote welding system can not meet the requirements of remote welding, and so an open architecture master-slave robot remote welding system is developed. Motom HP3 J robot is the master robot, the end effector of the Motom HP3 J robot is 6 degrees of free space Navigator spaceball, the control platform of the master robot is RTLinux operating system, and V01 robot is the slave robot, which the control system consists of the Windows 2000 Operating System and PMAC (programmable multi-axis controller) motion control card. The communication between the master robot and slave robot is LAN (local area network) TCP/IP communication protocol based on the Socket. The slave robot can be real time controlled by the master robot. The experimental results show that the open architecture master-slave robot remote welding system runs stably and reliably.

**Key words:** remote welding; open architecture; master-slave control; tracking accuracy

**Forming rule and mechanism of Al/Mg diffusion layer**  
SONG Yuqiang, LI Shichun, GENG Xiangying (Liberation Ar