

# Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>弥散强化铜电极失效分析

韩强<sup>1</sup>, 孙昭琦<sup>2</sup>, 单玉友<sup>3</sup>, 王涛<sup>3</sup>, 张博君<sup>1</sup>

1. 内蒙古科技大学材料科学与工程学院 内蒙古包头 014010

2. 山东钢铁集团日照有限公司冷轧厂 山东日照 276800

3. 陕西省军工(集团)陕铜有限责任公司 陕西宝鸡 722000

**摘要:** 某厂生产的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>弥散强化铜电极在焊接点数约10000次后失效。通过扫描电镜及能谱对该失效电极进行表面形貌观察、截面组织观察及截面能谱分析。结果显示:失效电极表面存在撕裂状组织,电极端部存在厚度为15μm的失效区,组织呈颗粒状,且有黑色块状组织聚集。通过电极截面能谱分析发现,黑色块状组织为Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>聚集物。其失效原因为连续点焊情况下,高温使基体铜损耗,造成Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>在电极表面聚集,进而电极电阻增加,焊接温度升高,电极逐渐失效。通过打磨电极失效层延长电极使用寿命,或在原有电极基础上引入稀土元素来提高电极的使用寿命。

**关键词:** 弥散强化铜; 电极; 失效分析

## Failure analysis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dispersion strengthened copper electrode

HAN Qiang<sup>1</sup>, SUN Zhaoqi<sup>2</sup>, SHAN Yuyou<sup>3</sup>, WANG Tao<sup>3</sup>, ZHANG Bojun<sup>1</sup>

1. School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China

2. Shandong Iron and Steel Group Rizhao Co., Ltd., Cold Rolling Plant, Rizhao 276800, Shandong, China

3. Shaanxi Military Industry (Group) Shaanxi Copper Co., Ltd., Baoji 722000, Shaanxi, China

**Abstract:** The Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dispersion-strengthened copper electrode produced by a factory failed after about 10000 welding points. The surface morphology, cross section structure and cross section energy spectrum of the failed electrode were observed by SEM and EDS. It is found that there is a torn tissue on the surface of the failed electrode, and there is a failure zone with a thickness of 15μm at the electrical extremity. The results of electrode cross-section analysis showed that the black mass was Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aggregate. The reason for its failure is that in the case of continuous spot welding, high temperature causes the loss of matrix copper, resulting in the accumulation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the electrode surface, and then the electrode resistance increases, the welding temperature increases, and the electrode gradually fails. Extend the service life of the electrode by polishing the failed layer of the electrode, or introduce rare earth elements on the basis of the original electrode to improve the service life of the electrode.

**Keywords:** dispersion strengthened copper; electrode; failure analysis

### 1 序言

近年来,国产新能源汽车产业蓬勃发展,据国

家相关部门发布的信息显示,2024年新能源汽车保有量达到2472万辆,且市场销售量占比达到40%。

基金项目:内蒙古自治区应用技术与开发资金项目(2021GG0022)。

电池作为新能源汽车的核心部件，引起社会广泛关注。汽车电池通常使用电阻焊进行焊接<sup>[1, 2]</sup>。电阻焊具有质量稳定、生产效率高、容易实现自动化等优点。电极作为电阻焊的关键耗材，需具有良好的导电性以及一定的机械强度。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 弥散强化铜作为广泛使用的电极材料，由于铜基体弥散分布着大量的纳米氧化铝颗粒，对晶界和位错起到钉扎作用，阻碍了铜基体的回复再结晶，使其能够在高温下保持较高的强度<sup>[3, 4]</sup>，大幅提高了电极的使用寿命。目前， $\text{Al}_2\text{O}_3$ 弥散强化铜电极已开始被大型汽车厂认可并广泛应用，但是 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 弥散强化铜电极的失效问题仍然值得深入研究。

## 2 研究方法

以某厂生产的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 弥散强化铜电极为研究对象，在生产工位进行焊接点数约10000次服役后，通过扫描电镜（TESCAN CLARA，捷克）及能谱分析 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 弥散强化铜电极失效问题。将失效电极与新电极用环氧树脂密封，通过砂纸逐级打磨，抛光机进行抛光，用特定的腐蚀液进行腐蚀。在扫描电镜下观察显微组织，通过扫描电镜自带的能谱进行分析。

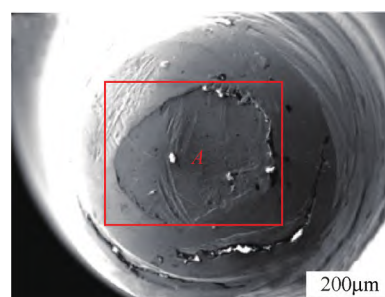
## 3 结果与讨论

### 3.1 表面形貌观察

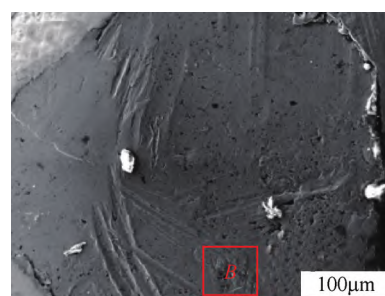
失效电极头部微观组织形貌如图1所示。失效电极表面有明显的损失，呈层状脱落，将电极表面局部（A部）放大（见图1b）。可以看出电极边缘存在明显的撕裂状痕迹，中心部位表面不平整，存在坑状和棱状痕迹。对电极缺失部分（B部）进一步放大观察（见图1c），可看到存在明显的孔状缺失，微观表面存在挤压痕迹。这是由于电阻焊是通过电极在被焊组件间传递较大的焊接压力和较高的瞬时电流，利用焊件接触区产生的电阻热发生金属结合。因此，在焊接过程中，电极头部产生瞬间的高温，会导致电极熔化而与焊件发生黏连，与焊件分离时发生撕裂，使电极表面缺失。同时，因受压力影响产生塑性变形而出现蘑菇头状<sup>[5]</sup>。

### 3.2 电极截面组织分析

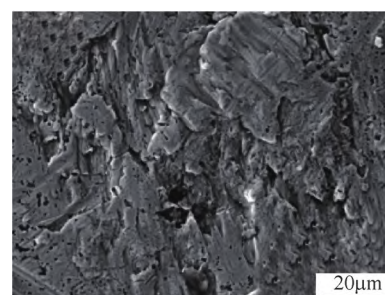
图2所示为新电极沿轴向截面经打磨、抛光、侵蚀后的微观组织。如图2可看出，其微观组织整体呈纤维状，且能看到细小均匀的颗粒组织。由于铜电



a) 头部



b) A部放大



c) B部放大

图1 失效电极头部微观组织形貌

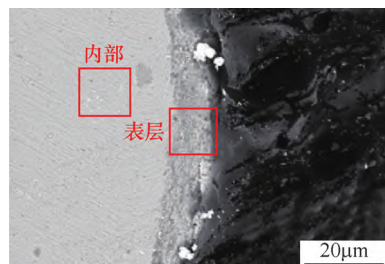


图2 新电极截面微观组织

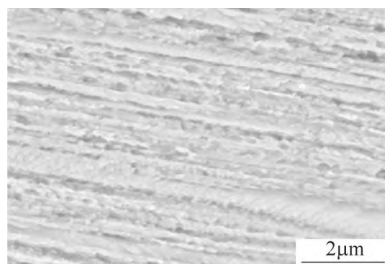
极在生产过程中经挤压、拉伸成形，因此纤维状组织为典型的变形组织。该组织中铜晶粒极其细小，可充分发挥细晶强化作用，使铜电极有更高的强度；氧化铝颗粒均匀地分布在铜基体上，起到弥散强化作用，能够进一步提高铜电极强度，保证在焊接过程中不易发生塑性变形。纤维状的铜晶粒又保证了铜电极的导电性，该组织相比于传统电极材料具有更好的导电性、强度及熔点。

对失效电极的截面进行微观组织观察, 电极截面组织如图3a所示。从图3a可看出, 电极截面外层与内部组织存在明显差异。表层区域厚度约为 $15\mu\text{m}$ 。对电极内部放大观察(见图3b), 内部组织呈纤维状, 该组织与全新电极的截面组织相比, 无明显差异。由此可知,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 铜电极在焊接过程中电极内部虽有大电流通过, 但由于自身电阻较小, 期间产生电阻热较小, 不会由于温度过高而使电极内部组织发生明显的转变。对电极截面头部失效区放大观察, 表层区组织(见表3c)呈颗粒状且有黑色块状组织聚集。由于焊接时电极头部需承受高温, 瞬间的高温会导致电极熔化, 焊接在瞬间完成, 电极表面的基体铜组织会在表面张力的作用下, 凝固为颗粒状组织。而黑色块状物质成分的判断需借助能谱分析。

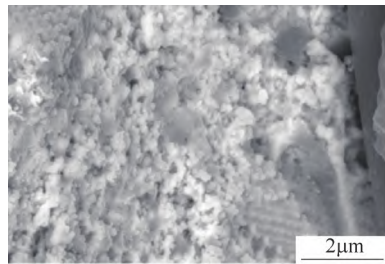
对失效电极截面进行能谱分析, 如图4所示。从图4b可看出, Al元素在铜电极内部呈弥散分布, 在电极失效区内有明显的聚集, 且与扫描图中黑色块



a) 截面组织



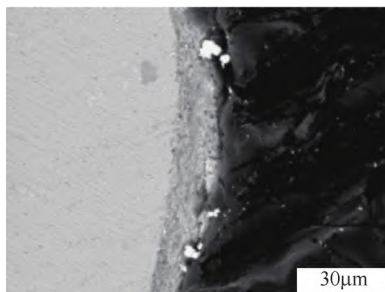
b) 内部组织



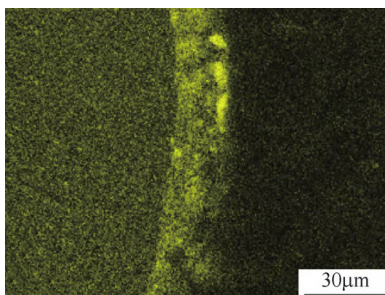
c) 表层组织

图3 失效电极截面微观组织

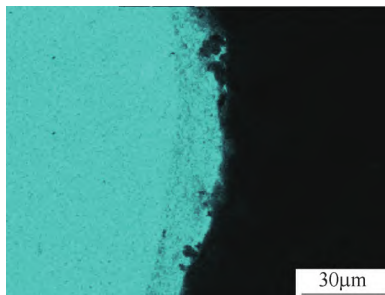
状物质相对应, 黑色物质为 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 聚集。因为在连续点焊情况下, 铜电极温度过高, 电极表面铜基体会由于高温液化发生黏连、挥发等而产生损耗, 在基体中弥散分布的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒会逐渐聚集。



a) 原始组织 (2000×)



b) Al元素能谱图 (2000×)



c) Cu元素能谱图 (2000×)

图4 失效电极截面能谱图

#### 4 分析与讨论

在连续点焊情况下, 在电极表面铜基体会由于高温液化, 挥发而造成损耗。而氧化铝颗粒熔点较高, 不会挥发损耗, 在液相的表面张力作用下, 氧化铝颗粒在表面的熔化层中聚集。完成一次焊接后, 电极表面的铜迅速凝固。经过多次循环后, 氧化铝在表面的聚集现象加剧, 从而形成电极表面的失效层。失效层中由于氧化铝聚集, 因此导电性变差, 导致接触电阻增大, 会造成电极表面过热。表面的球状颗粒的间隙非常微小, 会使电极表面的过热进一步恶化。而由于电极与工件间产生的电阻热

增大且在外加焊接头压力作用下,电极端面加速增大,从而造成电极失效<sup>[6, 7]</sup>。

从失效原因分析,由于电极长时间点焊,表层存在氧化铝的聚集,导致因工作温度过高而造成失效,且通过对电极内部组织的对比观察分析,失效电极内组织与新电极内部组织及性能无明显差异。在电极长度满足使用要求的前提下,可以在焊接点数达到一定数量后,通过打磨去掉电极端部表层极薄的失效层,并重新修正电极头的形状。通过多次现场生产实践的检验,按照该思路进行的电极修正,能够有效地保证焊接接头的焊接质量。某厂使用的焊接电极通常使用寿命为7000次,按照电极焊接周期1500次以后,将该电极进行磨削修整,累计焊接寿命可提高到10000次以上。

另外,从新产品开发角度考虑,在原有电极基础上引入稀土元素,制备新型复合材料,使铜电极中的强化相为稀土与铝的复合氧化物。稀土在铜及铜合金中可起到净化组织、细化晶粒、改善夹杂等作用,且形成稀土氧化物颗粒稳定性高、熔点高、硬度高<sup>[8, 9]</sup>。在 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 弥散强化铜电极材料中, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 为尖晶石结构,无法与铜基体形成共格的相界面。在弥散强化铜的两种机制中,位错切割机制带来的强化效果要强于位错绕过机制。而稀土元素的加入,能够改性 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的晶体结构,由尖晶石结构转变为萤石结构,可与铜基体形成共格界面,从而获得更为显著的强化效果<sup>[10, 11]</sup>。ZHANG等<sup>[12]</sup>研究表明,在 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 弥散强化铜材料中添加微量稀土元素La,使基体中的复合氧化物更加均匀,且强化相与基体之间存在半相关关系,并使材料的界面能降低,且提高了材料的伸长率、强度,降低了电阻率。

## 5 结束语

1) 由于多次焊接压力和较高的瞬时电流,会导致电极熔化并与焊件发生黏连,与焊件分离时会发生撕裂,使电极表面缺失,存在撕裂痕迹。

2) 失效电极表层组织与正常电极纤维状组织不同,为颗粒状,表明在焊接过程中,电极表面曾出现过液相并发生挥发损耗,后由于液相的表面张力作用而导致氧化铝颗粒聚集为黑色团块状。

3) 电极表面有氧化铝颗粒聚集,电极电阻会因此增大,工作温度随之升高,从而加速 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 弥散强

化铜电极失效。

## 参考文献:

- [1] 张冬平, 钟万良, 陈峰, 等. 镀锌板焊接电极失效原因分析及改进[J]. 工程技术研究, 2017 (7): 5-6.
- [2] 陈燕飞, 朱政强, 宋晓村. 氧化铝弥散强化铜电极在电阻点焊镀锌高强钢过程中的磨损分析[J]. 热加工工艺, 2015, 44 (9): 19-22, 26.
- [3] 赵旭男. 电阻焊电极用 $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合强化铜组织和性能研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2020.
- [4] 康永彪.  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料的内氧化法制备及性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2007.
- [5] 柯建刚. 高性能弥散强化铜合金的制备及性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
- [6] 陈健, 吉祥, 王璇, 等.  $\text{CuNiCoBe}$ 与 $\text{CuCrZr}$ 合金电极的点焊性能比较及其失效分析[J]. 焊接学报, 2016, 37 (12): 101-106, 133-134.
- [7] 余亚东. 5083铝合金电阻点焊接头成形及电极失效研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2019.
- [8] HUANG F, WANG H, YANG B, et al. Uniformly dispersed  $\text{Y}_2\text{O}_3$  nanoparticles in nanocrystalline copper matrix via multi-step ball milling and reduction process[J]. Materials Letters, 2019, 242: 119-122.
- [9] 岳灿甫, 陈会东, 刘国元, 等.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 弥散强化铜显微组织及性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41 (S2): 510-513.
- [10] 卓海鸥, 唐建成, 叶楠. 液相原位反应法制备 $\text{Cu-Y}_2\text{O}_3$ 复合材料[J]. 金属学报, 2012, 48 (12): 1474-1478.
- [11] ZHAO X, GUO L C, ZHANG L, et al. Influence of nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -reinforced oxide-dispersion-strengthened Cu on the mechanical and tribological properties of Cu-based composites[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2016, 23:1444-1451.
- [12] ZHANG Y, JI Z, JIA C, et al. Influence of lanthanum on enhancement of mechanical and electrical properties of  $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$  composites[J]. Journal of Rare Earths, 2019, 37 (5): 534-540.

(收稿日期: 20250109)