

铜质或铜覆钢材料的放热焊研究

聂京凯¹, 孔晓峰², 陈新¹, 韩钰¹

(1.中国电力科学研究院 电工与新材料研究所, 北京 100192; 2.金华电业局, 浙江 金华 321001)

摘要:针对铜质或铜覆钢接地材料的放热焊连接,研究了焊接材料粒径、成分对焊剂燃烧速度、焊缝金属熔点温度及其夹杂、气孔等缺陷的影响。随着焊剂粒径的增加,焊剂颗粒的比表面积减小,反应剧烈程度逐渐下降,依此可以调节燃烧速度以及母材的熔化半径。在焊剂中氧化剂、辅料比例固定的前提下,随着还原剂比例的增加,焊缝金属中 Al_2O_3 夹杂的比例逐渐上升,接头焊缝金属熔点呈现下降趋势。此外,焊前清理、预热和焊后保温也利于提高接头性能。

关键词:接地网;放热焊;燃烧速度;熔点;夹杂

中图分类号: TG451⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2012)11-0136-04

Research on Exothermic Welding of Copper and Copper Clad Steel

NIE Jingkai, KONG Xiaofeng, CHEN Xin, HAN Yu

(1.Electrical Engineering & New Material Department, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. Jinhua Electricity Bureau, Jinhua 321001, China)

Abstract: Focusing on the copper/copper clad steel exothermic welding of grounding system. The influence of welding material and process were investigated. The effects of particle diameters and component to the reaction speed/inclusion/melting point/gas hole were studied. The reaction speed falls down with the particle diameter and specific area increasing. The reaction speed and base metal melting point can be controlled by adjusting the particle diameter. On the premise of the firm oxidant and accessories rate, Al_2O_3 rate increases with the reductant addition. The melt point of the weld metal falls down. The base metal preheating and cleaning are good for the joint's properties.

Key words: grounding grid; exothermic welding; reaction speed; melting point; inclusions

接地设施是为保证电气设备正常工作和人身安全而采取的一种用电安全措施。接地装置可将电气设备和生产设备上可能产生的漏电流、静电荷以及雷电电流等引入地下,从而避免人身触电和可能发生的火灾、爆炸等事故^[1]。

我国普遍使用的接地材料有镀锌钢、纯铜、铜覆钢等,其中镀锌钢使用范围达到90%以上^[2]。这是由于我国铜资源不丰富和沿用前苏联技术体系造成的,而欧美等西方国家则普遍使用铜质接地网或铜覆钢接地网^[3]。随着技术进步及对电网服役可靠性要求提高,我国目前一些重点或大型项目也逐步开始采用铜质或铜覆钢接地材料铺设接地网。

铜质或铜覆钢接地材料的连接普遍采用的方法是放热焊(即热剂焊,在电力行业内沿用直译为放热焊)。放热焊是通过引燃剂(或电火花)引燃焊剂,焊剂发生氧化还原反应放出大量热量并同时还原出填

充金属的焊接方式,填充金属最终在模腔里冷却形成接头,属于自蔓延高温合成技术的一种^[4]。放热焊焊接速度快、操作简便、设备简单,是野外施工高效、简便的连接方式。电气连接用放热焊技术在国内系统研究较少,目前高端产品均为引进国外品牌,如 Erico、Gamma 等。

针对服役环境,放热接头应满足以下性能要求:①接头焊缝金属具有与母材相当的熔点温度,铜材的熔点温度在 1083°C ,铜覆钢材料中的铜层也具有同样的短板熔点温度,故放热焊接头焊缝金属应具有与铜材相当的熔点温度,即接头焊缝金属熔点达到或超过 1083°C ;②低电阻率,形成的接头与母材形成的导体,其电阻应小于同等长度母材导体的 1.1 倍^[5];③良好的外观,接头表面不应有大量的夹杂,导致表面缺陷,同样接头剖面也不应出现气孔等缺陷;④足够的焊接热量,焊剂发生的氧化还原反应须满足母材熔化需要,焊接母材其熔化半径应达到大于母材直径 50% 以上。为满足上述要求,需要从焊剂原料的成分、粒径以及工艺等多因素进行控制。

1 试验方法

放热焊的氧化剂种类众多,电气连接用放热焊,

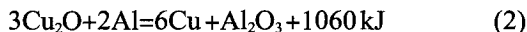
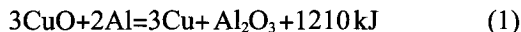
收稿日期:2012-01-04

基金项目:国家电网公司科技项目(CL71-09-001)

作者简介:聂京凯(1981-),男,北京人,工程师,硕士,主要从事电网新材料及连接技术研究;电话:13466748320;

Email:niejingkai@epri.sgcc.com.cn

要求被还原出金属应具有良好的导电率,故而采用氧化铜作为氧化剂。由于氧化铜在制备过程中难以完全氧化而得到 100%的氧化铜,往往含有部分氧化亚铜,故在反应中主要发生以下反应^[9]:



除铜的氧化物和金属铝粉外,反应中的其它原料依据用途不同还包括萤石粉、硅钙粉、锡粉、铜粉(或丝)、氧化钙等。将上述原料运用三维混粉机依据适当比例进行充分机械混合,制备出用于铜质或铜覆钢接地材料连接用的放热焊剂。本文通过改变焊剂中原料的粒径、原料成分、工艺等因素,研究上述各因素对接头性能的影响。

2 试验结果与分析

2.1 原料粒径影响

焊剂原料采用相同的成分配比,运用分级筛筛取 6 种粒径的原料粉末,具体粒径如表 1 所示。随后将原料粉末混合均匀制成放热焊剂,对 $\phi 12\text{ mm}$ 的铜覆钢棒(铜层厚度为 0.8 mm)进行放热焊焊接。对每种试验方案从焊接的燃烧剧烈程度、反应速度、飞溅情况等方面进行评价,不同粒径的焊剂焊接特性如表 2 所示。其中反应时间采用电子秒表计量;粉末粒径采用 Malvern Micro-plus 型激光粒径仪进行测定;燃烧速度为标准石墨模具中模腔内焊剂从一端引燃,燃烧至另一端的速度,即模腔长度与燃烧结束时间比值。

表 1 试验用粉末粒径及颗粒尺寸
Tab.1 The test particle diameters and dimension

试样编号	粒径范围/ μm	平均粒径 $d/\mu\text{m}$
1 [#]	-200~+300	64.5
2 [#]	-100~+200	113.0
3 [#]	-100~+150	129.0
4 [#]	-80~+120	151.3
5 [#]	-60~+80	216.8
6 [#]	-30~+40	512.6

表 2 焊接性能
Tab.2 The welding performance

试样编号	剧烈程度	反应时间/s	反应速度/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	飞溅情况	安全性
1 [#]	爆燃	<0.2s	>300	剧烈	低
2 [#]	剧烈	<0.2s	>300	大量	低
3 [#]	较快	0.5	120	少量	较低
4 [#]	正常	2.0	30	极少	较高
5 [#]	缓慢	3.0	20	无	高
6 [#]	引燃困难	-	-	无	高

由表 2 可知,随着焊剂原料粉末粒径的增加,粉末的燃烧反应速度迅速减小,平均粒径为 64.5 μm

时燃烧速度>300 mm/s,而当平均粒径为 216.8 μm 时燃烧速度仅为 20 mm/s。

在实际的焊剂燃烧反应过程中,燃烧速度的大小主要受反应物间的界面化学反应控制。而界面化学反应的速度由于与反应物接触面积直接相关,因而其受反应物粒径大小影响。假设反应物粉末为近似相等的球形颗粒,则反应物粒径大小对反应速度的影响存在以下关系^[4]:

$$-\frac{dn_s}{dt}=aA(1-X^{2/3})C^i \quad (3)$$

式中: n_s 为未反应的粉末颗粒的物质的量; a 为速率常数; A 为反应物颗粒的比表面积; X 为反应物的转化率; C 为反应浓度。

反应物比表面积与粒径倒数成正比,反应物粒径减小,其比表面积增大(即比表面能增大),因而引起反应速度加快,造成单位时间内反应放出更多的热量,燃烧速度增大。这与实际测试结果具有较好的吻合。此外,粒径大小直接影响反应速度,从而调控单位时间内放出的热量,即间接影响反应的最高温度,从而影响母材熔化(钢芯熔化半径)。因此粒径是影响反应速度、保证焊接安全和钢芯熔化半径的关键因素。

2.2 原料成分影响

原料的成分主要决定着焊缝金属的组成,也决定了其基本的理化性能、力学性能,如强度、韧性、电阻率、外观、熔合深度、焊缝金属熔点等。

试验中选取市售化学纯原料,包括铝颗粒、紫铜颗粒、其它辅料等,所选颗粒粒径统一,均采用分级筛进行筛选。氧化剂为氧化铜颗粒,为市售工业级氧化铜。其中含有一定比例氧化亚铜,经测定,氧化铜含量约为 41.7%,氧化亚铜含量约为 58.3%。将称量好的氧化剂、还原剂、铜颗粒和辅料充分混合,具体试验方案见表 3 所示。

表 3 原料配比方案
Tab.3 Experiment component samples

方案编号	氧化剂(份)	还原剂(份)	铜颗粒(份)	备注
1	1	0.30	0.5	还原剂不足
2	1	0.42	0.3	适量
3	1	0.42	0.5	适量
4	1	0.42	0.6	铜颗粒过量
5	1	0.50	0.5	还原剂过量
6	1	0.60	0.5	还原剂过量

上述原料中,为方便计算及对比,以氧化剂质量 $m_{\text{氧化剂}}$ 为单位(1 份),其它原料的质量 $m_{\text{原料}}$ 以氧化剂质量计量($m_{\text{原料}}/m_{\text{氧化剂}}$);除上述原料外,各份焊剂还分别添加 0.15 份辅料,该辅料中各成分配比质量固

定;上述每个方案均制备相同配比的平行试样3份,以保证试验结果的重复性。

分别采用以上方案对 $\phi 12\text{mm}$ 的铜覆钢棒施焊,焊接接头外观见图1。方案1由于还原剂不足,即氧化剂(CuO 、 Cu_2O)过量,所以在反应中还原剂反应完毕后,有余量未反应氧化铜剩余,氧化铜熔点为 1326°C ,在反应中熔化/溶解于接头表面形成青黑色斑块,见图1(a)。方案2氧化剂与还原剂剂量匹配适量,故接头颜色接近紫铜色泽,通过能谱分析,其主要成分为 Cu 、 Al 、 Sn 和 Fe 等,见图1(b)。方案3具有类似宏观形貌,见图1(c),但由于方案2中紫铜颗粒较少,故反应较方案3剧烈,喷溅较严重,冒口较小。方案4的氧化剂、还原剂量与方案2、3相同,仅紫铜颗粒较方案3增加20%,故铜颗粒熔化消耗了较多反应热量,导致氧化铝(熔点 2038°C)未能浮至熔池顶端冒口位置,过早凝固,在接头表面形成夹杂,见图1(d)。如继续增加紫铜颗粒,夹杂会继续增多。方案5、6中氧化剂与铜颗粒质量与方案3相同,仅还原剂量依次递增,图1(e)、(f)可见其颜色较为暗哑。由相图可知其组织主要为 α (铜在铝中的固溶体)相^[7]和 β (CuAl -IMC)相。随着还原剂过量增多,接头焊缝中 Al 含量增加,其中金属间化合物的量也逐渐增大。

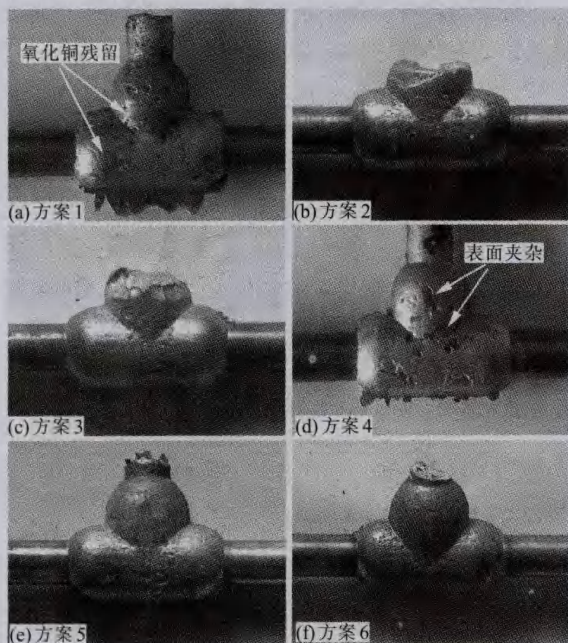


图1 各方案接头外观

Fig.1 The feature of each sample

将上述接头径向在接头中间位置用金相切割机切开,观察其剖面宏观形貌。在还原剂不足情况下(方案1),接头宏观剖面除冒口位置有气孔存在外,

并无其他缺陷,氧化铜残余在反应中熔化,与接头金属铜熔合;方案2、3接头剖面,由于氧化剂还原剂适量匹配,接头剖面均匀细密,无明显肉眼可见缺陷;在氧化剂、还原剂配比适量,而焊剂中主要起减缓反应速度的紫铜颗粒过量时(方案4),出现了反应热量不足的现象,不但钢芯熔化面积变小,且出现了剖面处的气孔、夹杂。这是由于熔化金属冷却过快,气体来不及排除,以及氧化铝迅速凝固造成的;而当还原剂过量情况下,反应热量充足,仅过多的还原剂在反应中氧化,并在高温下气化,最终形成较多气孔,随还原剂量增多,气孔量增大,且由于形成较多 Cu-Al 金属间化合物,导致接头脆性增加。

各方案接头钢芯与焊缝金属界面微观形貌见图2。当还原剂不足情况下,从图2(a)可见,焊缝金属一侧基本无夹杂出现,仅有极少量的 Al_2O_3 夹杂,可见 Al_2O_3 夹杂难以完全消除;而还原剂适量情况下,有少量 Al_2O_3 夹杂,见图2(b);当作为减缓反应速度的铜颗粒过量时,由于消耗了较多热量,故在焊缝中产生大量直径较大的 Al_2O_3 夹杂,见图2(c);而当还原剂过量时,由于反应热量充分, Al_2O_3 难以聚集长大,故在焊缝金属中形成大量的小而密集的小直径 Al_2O_3 夹杂,见图2(d)。

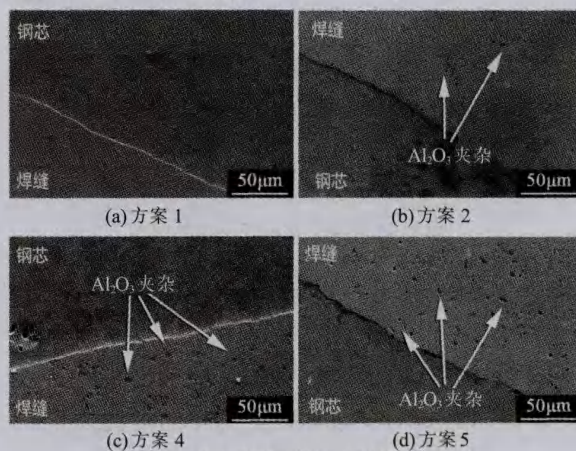


图2 各方案接头微观形貌 SEM

Fig.2 SEM microstructure of joints

对上述各方案中的焊缝形貌采用 Olycia M3 进行夹杂物分析,各方案中 Al_2O_3 夹杂比例及熔点检测结果见表4。可见,焊剂的成分直接影响着接头焊缝金属中夹杂物的比例,从而影响着接头熔点与导电率。由于导电率(即电阻测量值)要求为含接头导体不超过等长度母材导体的1.1倍,而接头焊缝金属直径一般为母材直径的1.2倍以上,故接头导电率均满足要求。因此,在放热焊中,接头导电率可作

表 4 各方案焊缝金属 Al_2O_3 夹杂百分比与熔点温度
Tab.4 The proportion of Al_2O_3 inclusions and melting point of each samples weld metal

方案	1	2	3	4	5	6
Al_2O_3 体积比(%)	0.20	0.70	0.90	5.12	5.04	5.33
焊缝金属熔点/℃	1125	1100	1087	930	914	870

为次要考核指标。但材料熔点直接关系到接地体的热稳定系数,接头焊缝金属熔点温度需达到服役要求。通过对比表 4 中数据可知,除焊缝金属中合金元素成分外,影响熔点的主要因素为 Al_2O_3 夹杂。由于在反应完毕后,通过化学成分分析,各方案金属铜比例差距不大,均处于 85%~91%之间。故可推断,焊缝金属熔点主要取决于夹杂的比例。

一般认为,金属的熔化是由表面开始的^[9],随着温度上升,固-液界面向晶体内部扩展。由于反应是在较短时间内完成的,除作为还原产物的金属铜外,其余所有添加铜颗粒迅速熔化,基本无缓慢溶解的过程,且由于 Cu/Al 能生成高熔点的 IMC,故其熔化过程还伴随着 Cu/Al-IMC 的形成,随后全部迅速熔化到液态金属铜中^[9],因此,作为还原剂的铝主要以三种途径被消耗,大部分作为还原剂与氧化剂(氧化铜、氧化亚铜)反应生成金属铜并放出大量热量;部分铝粉末在反应过程中氧化,生成气态或液态的氧化铝,气态氧化铝部分通过模具排除,部分凝固在液态铜中,如不能排除,即生成氧化铝夹杂;还有部分铝随着固液界面的推进,迅速生成 Cu/Al-IMC,并最终熔化于熔池中。而在差热分析中,由于有 Al_2O_3 不规则夹杂的存在,导致了金属铜内部表面能的增加,促进了晶格失稳和自发热缺陷,从而加速了体熔化,因此随着夹杂比例的上升,可以看到,焊缝金属的熔点逐步降低。

由上述分析可知,以上方案中,氧化剂的质量一定,还原剂的质量依次递增,从还原剂不足→还原剂适量→还原剂过量,依次变化,随着还原剂质量的增加,接头焊缝金属微观组织中 Al_2O_3 夹杂的比例逐渐增加,而熔点也表现为随着夹杂递增依次递减的关系,由此可知,在氧化剂及其它辅料成分、比例确定的情况下,还原剂的添加比例决定着接头焊缝金属的熔点。此外,作为延缓反应速度的紫铜颗粒,同样影响着 Al_2O_3 夹杂的比例,对比 3 和 4 方案,在氧化剂、还原剂比例相同情况下,由于铜颗粒的过量,导致热量损耗加大,其最终结果是焊缝金属中 Al_2O_3 夹杂量的增加。可见,金属 Al 和添加 Cu 颗粒均直接影响着氧化物在焊缝金属中形成的比例,从而间接

影响焊缝金属的熔点。此外,成分配比的不协调,除影响熔点外,还会造成气孔的产生。

2.3 工艺影响

除原料成分和粒径外,工艺因素也对接头性能有着直接影响。焊前对母材、模具烘干、预热、清洁,可以减少或消除在焊接过程中产生气孔和夹杂(或夹渣)。焊后延长保温时间可进一步降低接头开裂可能,并降低接头电阻率。

3 结论

(1) 可以通过控制焊剂原料的粒径来调整焊剂的比表面积,从而控制氧化还原反应速度,继而控制焊接安全性和接头中钢芯熔化半径。粒径减小,反应速度迅速增大,喷溅严重。在放热焊中,焊剂粒径根据需要在-60~150 目为宜。

(2) 焊剂原料的成分是决定接头性能的决定性因素,它不但决定焊缝金属的合金成分,还决定着接头的外观以及焊缝金属中夹杂、气孔等缺陷。在辅料及氧化剂比例固定前提下,随着还原剂铝比例的增加,接头焊缝金属中 Al_2O_3 夹杂的比例逐渐上升,随着夹杂比例上升,焊缝金属熔点呈现了下降趋势,气孔率也呈现上升趋势。此外,在氧化剂、还原剂比例固定前提下,增加铜颗粒比例,同样会增加焊缝金属中 Al_2O_3 夹杂的比例。

(3) 母材和模具的焊前清理及烘干有利于降低焊接产生的夹杂和气孔;焊后保温有利于降低接头开裂的倾向,并提高接头金属的导电率。

参考文献:

- [1] 郝峰,于治深. 谈接地网设计及施工的重要性[J]. 黑龙江科技信息,2011,(2):261-263.
- [2] 冯新龙. 新型接地材料在城区配电网中的应用[J]. 电力技术,2010,19(17-18):110-113.
- [3] 王国栋,孟岩. 火力发电厂接地材料选用综述[J]. 科技致富向导,2010,211(29):274-275.
- [4] 刘吉延,黄鑫,邱骥,等. 无电焊接材料的燃烧速度和燃烧温度研究[J]. 装甲兵工程学院学报,2009,23(3):81-83.
- [5] EJT887-1994. 核电厂接地用永久性连接器的质量鉴定[S].
- [6] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册,第一卷:焊接方法及设备[M]. 北京:机械工业出版社,2008. 784-785.
- [7] 赵鸿金,王达,秦镜,等. 铜/铝层状复合材料结合机理与界面反应研究进展[J]. 热加工工艺,2011,40(10):84-87.
- [8] 王海龙,王秀喜,梁海弋. 金属 Cu 体熔化与表面熔化行为的分子动力学模拟与分析[J]. 金属学报 2005,6(41):568-572.
- [9] 曾大新,苏俊义,陈勉己. 固体金属在液态金属中的熔化和溶解[J]. 铸造技术,2000,33(1):33-36. [1]