

异径厚壁铜导电杆高频感应钎焊工艺研究

杨永侃，李腾，陈带军，李永，邓逸洋
西安西电高压开关有限责任公司，陕西 西安 710018

摘要：针对异径厚壁铜导电杆钎焊结构，采用传统火焰钎焊焊接，存在两端同轴度差、一次钎焊合格率低等问题。本文研究了铜导电杆高频感应钎焊的工艺和方法，通过对焊接接头、材料、工艺参数等的设计与选择，通过实验验证，实现了对铜导电杆焊接性能的优化。

关键词：高频感应钎焊；钎料；钎焊保温时间；温升试验

Study on High Frequency Induction Brazing Technology of Reducing Thick Wall Copper Conductive Rod

Yang Yongkan, Li Teng, Chen Daijun, Li Yong, Deng Yiyang
Xi'an XD High Voltage Apparatus Co., Ltd. Xi'an, Shaanxi 710018

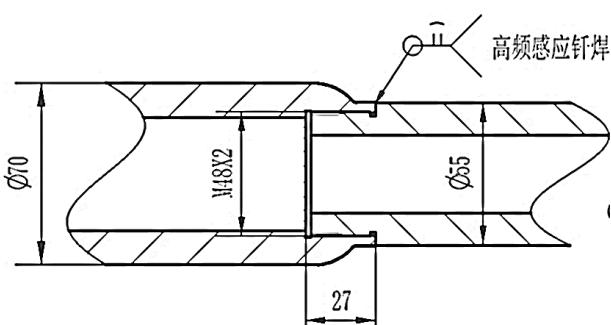
Abstract : Aiming at the brazing structure of thick-wall copper conductor rod with reduced diameter, the traditional flame brazing has some problems, such as poor coaxiality at both ends and low qualification rate of single brazing. In this paper, the technology and method of high frequency induction brazing of copper conductive rod are studied. Through the design and selection of welding joints, materials and process parameters, the optimization of welding performance of copper conductive rod is realized through experimental verification.

Keywords : high frequency induction brazing; brazing filler metal; brazing holding time; temperature rise test

铜导电杆作为一种重要的导电部件，在电力传输领域具有广泛的应用，其具有良好的导电性能和稳定的机械性能，是保证电力系统稳定运行的重要条件。目前公司产品选用传统的火焰钎焊工艺方法，受工艺特点限制，火焰钎焊过程中人为影响因素大，焊接变形大且无规律，焊后存在管接头形位公差大、焊缝易存在气孔等问题。为了提高产品质量，考虑对铜导电杆采用高频感应钎焊进行焊接。高频感应钎焊是一种基于电磁感应原理的焊接方法，通过高频磁场的作用，在金属表面产生强烈的涡流，从而使金属加热至钎焊温度，利用钎料润湿母材，填充母材接头间隙并与母材相互扩散，以实现焊接。高频感应钎焊具有许多优点。首先，其加热速度快，可以减少热损失和热变形。其次，高频感应钎焊的热影响区小，因为焊速高，焊件自冷作用强，故高频焊的热影响区窄小且不易发生氧化，可获得具有良好组织与性能的焊缝。此外，高频感应钎焊的接头性能好，能够实现牢固的连接^[1]。

一、材料及结构

某异径厚壁铜导电杆各管路均为长直厚壁结构，由两种管材 55X12.5 铜管 T2-Y 和 70X12.5 铜管 T2-Y 焊接而成，属于典型大管径厚壁管，铜导电杆长度为 1562mm，焊接后不进行组合加工，直接保证两端接头的同轴度不大于 1mm 的形位要求^[2]。为了提高钎焊结构的直线度，此导电杆为静态装配，不受拉力或剪切力，接头结构采用 M48*2 螺纹结构，图 1 给出了异径厚壁铜导电杆的钎焊结构。



> 图 1 异径厚壁铜导电杆钎焊结构

二、高频感应钎焊材料的选择

(一) 钎料的选用

在铜导电杆高频感应钎焊中，适宜的钎焊材料是保证焊接质

量的关键因素之一。铜导电杆钎焊材料的选择应考虑以下两个方面：1) 良好的润湿性：钎焊材料应能够在短时间内充分润湿铜导电杆的表面，确保焊接部位的可靠连接。2) 良好的导电性：钎焊材料应具有较好的导电性能，以保证焊接后的导电性能^[3]。铜导电

作者简介：杨永侃，(1979.06-)，男，汉族，陕西凤翔，本科，中级工程师，研究方向：高压电气工艺。

杆作为高压开关产品的一种重要导电材料，从电性能方面考虑，优先选用片状银基 BAg40CuZnCd 钎料（厚度 0.2mm），具有优良的工艺性能，低熔点、良好的润湿性和填满间隙的能力，并且强度高、塑性好，导电性和耐蚀性优良，可钎焊铜、铜合金、钢等材料。BAg40CuZnCd 钎料化学成分见表 1^[4]。

表 1 BAg40CuZnCd 钎料化学成分 (GB/T 10046)

型号	化学成分 (质量分数) /%				熔化温度范围 (参考值) /°C	
	Ag	Cu	Zn	其他	固相线	液相线
BAg40	39.0	18.0	19		595	630
CuZnCd	~41.0	~20.0	~23.0			

(二) 助焊剂的选用

助焊剂的作用是改善焊接性能、增强焊接牢固度。助焊剂能够去除金属表面的氧化物并防止其继续氧化，增强焊料与金属表面的活性从而增加浸润能力和附着力。高频焊接与火焰焊接不同，没有火焰焊接的助流作用，需依赖助剂进行流动^[5]。铜导电杆钎焊助焊剂选用糊状 FB102 银钎焊溶剂，其熔化温度为 550–850°C，可作紫铜及黄铜合金气焊或钎焊助熔剂，是高温焊接中理想的焊接溶剂，能有效地溶解各种金属表面氧化物，助长钎料漫流，不易吸潮，不结块，焊后残渣易清除。

三、高频感应钎焊工艺

(一) 高频感应钎焊工艺参数的选择

高频感应钎焊是通过高频感应产生热能，将金属接头加热至钎料熔化，实现可靠的连接。在实施高频感应钎焊时，正确的参数选择对于焊接质量和效率具有至关重要的影响。钎焊过程的主要参数是钎焊温度和保温时间^[6]。

1. 钎焊温度的选择

钎焊加热温度是钎焊工艺规程的重要参数之一，它的高低直接决定了钎焊接头的质量。钎焊加热温度是在熔化钎料并使其流动的同时，使基材表面产生足够的润湿，从而在钎料与基材之间形成牢固的结合^[7]。依据 GB/T 11363《钎焊接头强度试验方法》，钎焊温度为高于钎料液相线温度 30–50°C，特殊情况可放宽上限温度。BAg40CuZnCd 钎料液相线温度为 630°C，考虑到导电杆为厚壁，将钎焊温度定为 650–700°C。

2. 钎焊保温时间

钎焊保温时间视工件大小，钎料与母材相互作用的剧烈程度而定。大件保温时间应长些，以保证加热均匀。钎料与母材作用强烈的，保温时间要短。一般来说，一定的保温时间是促使钎料与母材相互扩散，形成牢固结合所必须的，但过长的保温时间将导致溶蚀等缺陷的发生^[8]。依据 GB/T 11363《钎焊接头强度试验方法》，推荐保温时间为 10 ~ 40s，对比相似产品焊接经验，选定铜导电杆保温时间为 20 ~ 25s。

(二) 异径厚壁铜导电杆高频感应钎焊

1. 接头表面清理

使用百洁布、毛刷和酒精对铜导电杆接头以及接头周围 10mm 区域内表面进行彻底清洗，以去除杂质和氧化物，保证焊

接部位的清洁度^[9]。

2. 高频感应钎焊

焊接前预先将钎料安置在接头上，并将糊状 FB102B 银钎焊溶剂均匀涂抹于接头上。将感应加热线圈套至铜触头焊接位置，通过高频感应加热使钎料熔化，同时依靠工装对导电杆进行拧紧，保证钎料通过毛细作用填充间隙，保温 20–25s 后立即停止加热，避免焊料过度流出，导致焊缝缺陷。钎焊结束后，应使焊件自然冷却，冷却后清除接头处的残渣及氧化物，焊接效果见图 2。



> 图 2 高频感应钎焊效果



> 图 3 着色探伤

四、高频感应钎焊焊后检测

(一) 焊缝着色渗透探伤检验

着色渗透探伤是一种表面检测方法，主要用来探测诸如肉眼无法识别的裂纹之类的表面损伤。对焊缝处进行粗车漏出接头处焊缝，并进行着色渗透探伤，焊缝表面及焊缝边缘没有裂纹、气孔、凹陷等缺陷，见图 3。

(二) 拉伸试验

依据 ASME QB-153《焊接和钎焊评定标准》，评定拉伸试验合格标准是试样的抗拉强度不小于退火状态母材所规定的最小抗拉强度^[10]。GB/T 1527《铜及铜合金拉制管》中 T2-Y 铜管软态退火态的最小抗拉强度为 200MPa，见表 3，试件抗拉强度检测结果，见表 4，检测值均大于 200MPa，试验结果满足标准要求。

表 3 材料力学性能

项目	状态	抗拉强度 /MPa	参考标准
标准值	Y (硬态)	295	GB/T 1527 《铜及铜合金拉制管》
标准值	O60 (软态退火态)	200	
导电杆材料	Y (硬态)	295	

表 4 试件抗拉强度检测

抗拉强度标准值 /MPa	试件 1	试件 2	试件 3
200	209	222	318

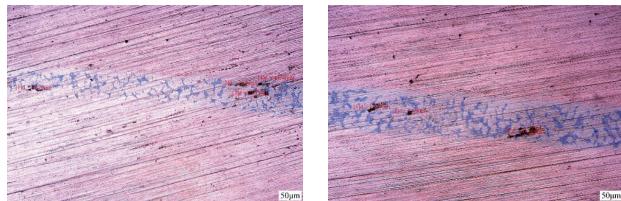


> 图 4 抗拉强度检测



(三) 金相检测

金相检验法是将钎焊接头切开、研磨、抛光后用显微镜来观察其界面，是发现钎焊接头内部夹杂、疏松、气孔及微裂纹的有效方法。经对钎焊接头进行金相检测，见图4，GB/T 33219《硬钎焊接头缺陷对接头缺陷限度的建议》，严格级（B级）要求气孔的总面积不大于投影面积的20%，导电杆钎焊接头气孔尺寸均在0.023mm ~ 0.053mm之间，且数量较少，无连贯性气孔，满足要求。接头处不存在夹杂、裂纹等缺陷。

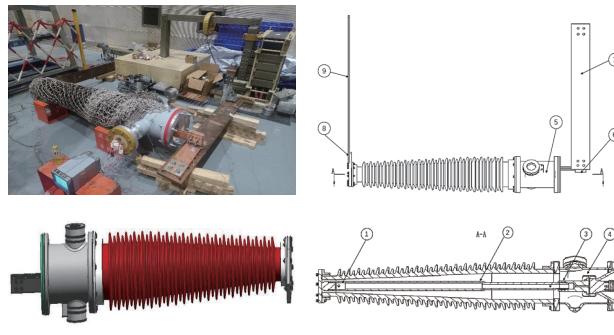


>图4 焊缝金相检测

(四) 温升试验

温升试验是高压电气产品安全性能的重要试验之一，用来评价电气产品的质量和电气安全特性。电气产品在正常使用时，由于一些通过大电流元件的发热，导致自身的温升过高，长时间这种状态下工作，可能降低绝缘材料性能，从而导致设备电击、烫伤或着火危险。温升试验就是用来检测和规避这些危险的重要

方式。IEEE C37.100.1规定了在正常操作下，可触及部件温度不能超过50℃，不可触及部件温度不能超过70℃。试验电流：1.1X3150A；表压（20℃表压）：0.5MPa，试验结果合格。



>图6 温升试验

表5 温升试验值检测值

五、结论

通过将异径厚壁铜导电杆气焊焊接改为高频感应钎焊工艺研究表明，制定合适的焊接接头，选择合适的焊料并制定合适的焊接工艺后，可显著提高异径厚壁铜导电杆的焊接质量和生产效率。

参考文献

- [1] 贾志华,王轶,李银娥,等.不锈钢导管的氩气保护感应钎焊工艺研究[J].广州化工,2019,47(23):77~79.
- [2] 赵丽辉,国忠齐,陈建敏.钢管钎焊工艺评定及工程应用[J].金属加工(热加工),2015,(10):36~37.
- [3] 王娜,李海庆,徐方涛,等.双组元液体火箭发动机推力室材料研究进展[J].宇航材料工艺,2019,49(03):1~8.
- [4] 张丽霞.陶瓷及陶瓷基复合材料连接的研究进展[J].焊接,2017,(04):1~9+16+85.
- [5] 宋鹏哲.CBN磨头高频感应钎焊温度场仿真与试验研究[D].沈阳航空航天大学,2022.
- [6] 马炳輝.硬质合金与钢高频感应钎焊工艺研究[D].上海工程技术大学,2021.
- [7] 王杰,熊清莲,熊宴邻,等.瞬间液相(TLP)扩散连接GH4169/TC4接头的微观结构及力学性能[J].稀有金属材料与工程,2019,48(04):1275~1280.
- [8] 张成聪,余丽玲,王玉华,等.焊缝高熔化研究现状与展望[J].焊接学报,2022,43(04):7~15+113.
- [9] 冯吉才.异种材料连接研究进展综述[J].航空学报,2022,43(02):6~42+457.
- [10] 刘昌国,陈锐达,刘舜,等.小推力空间液体火箭发动机夹气启动特性[J].火箭推进,2021,47(03):8~15.