

# 铜-钢高频感应钎焊工艺及其对接头组织和导电性的影响

石 玦,高海铭,李 广,李 想

(兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室,兰州 730050)

**摘要** 以解决铜电解永久型阴极板导电杆铜-钢异种金属焊接问题为目标,采用 Sn-Cu 系钎料在不同钎焊工艺下对 T2 紫铜和 316 不锈钢进行铜-钢异种金属高频感应钎焊试验。利用光学显微镜、扫描电镜、能谱仪、X 射线衍射仪分析研究了不同工艺参数下形成钎焊接头的微观组织、物相种类及元素分布,同时采用智能金属导体电阻率仪对铜钢焊接试样的导电性进行了检测。结果表明,不同工艺下形成的焊缝界面清晰且无明显的焊接缺陷。钎焊接头主要由铜侧扩散反应层、焊缝中心层、钢侧扩散反应层三部分组成;铜侧扩散反应层呈连续的“锯齿”状分布,主要由金属间化合物  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  组成,中心层主要由锡单质、锡的氧化物和少量铜锡金属间化合物  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  组成,钢侧扩散反应层生成了少量的铁锡金属间化合物  $\text{Fe}_{1.3}\text{Sn}$ 。试样导电率与中心层金属间化合物  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  的生成量和焊接温度均成反比。通过获得的最佳工艺参数能够得到焊缝成形美观、连接强度优良、导电性能良好的铜-钢钎焊接头。

**关键词** 铜钢异种金属 高频感应钎焊 导电性 组织

中图分类号: TG401 文献标识码: A DOI:10.11896/j.issn.1005-023X.2018.06.011

## High Frequency Induction Brazing Process of Copper-Steel and Its Effects on Microstructure and Electrical Conductivity of Weld Joint

SHI Yu, GAO Haiming, LI Guang, LI Xiang

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

**Abstract** Aiming at solving copper-steel dissimilar metal welding problems which happened in the permanent cathode plate conducting rod production, the high-frequency induction brazing experiments of T2 copper and 316 stainless steel were conducted with Sn-Cu solder and they were tested in different processes. Optical microscope, SEM, EDS and X-ray diffraction were used to analyze the microstructure, phase morphology and elemental species of the joints. Meanwhile, intelligent metal conductor resistivity meter was also used to test conductivity of different samples. The results show that the cross-sections formed by different processes are obviously divided into copper diffusion reaction layer, central weld layer, steel diffusion reaction layer and no serious welding defects appear. The copper diffusion reaction layer presents continuous “zigzag”, which is composed of  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ . Central weld layer mainly contains tin, tin oxides and  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ . A few  $\text{Fe}_{1.3}\text{Sn}$  are generated in the steel diffusion reaction layer. The conductivity of the samples are inversely proportional to the formation of the  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  and the welding temperature. The parameters can be used to control the welding quality, the connection strength and conductivity of the copper-steel welding joint.

**Key words** copper-steel dissimilar metal, high frequency induction brazing, conductivity, structure

## 0 引言

铜是在国民经济建设中占有重要角色的有色金属,在金属材料消费中仅次于铝和钢,被广泛应用于电子、电器、造船、建筑、汽车工业、国防工业等<sup>[1]</sup>。1869年,英国威尔士建立起首座铜电解精炼厂,标志着铜电解精炼工艺正式投用于工业生产并取得了广泛应用<sup>[2]</sup>。经过一个半世纪的发展,铜电解精炼的基本原理并没有发生重大改变,但其工艺的改进却取得了巨大进步,主要体现在生产规模的扩大、生产设备的改进、电解铜质量的提高以及能耗降低等方面。特别是在电解所用阴极材料的优化改进上取得了重大突破,使得铜电解精炼工艺在全球得到了应用和发展<sup>[3]</sup>。目前铜电解精炼工艺主要分为传统铜电解法和永久型阴极板铜电解法。

永久型阴极板铜电解法因其产量高、能耗少、产品质量好,成为目前铜电解精炼工艺的先进方法和主要趋势。

永久型阴极板设计制造的核心技术是阴极板导电杆的生产制造。与传统焊接结构以承受复杂力学为主要目的不同,作为电解铜电极的导电杆因其主要承受静载,其力学性能较容易满足,但电流密度及均匀性在铜电解过程中要求较为严苛。所以,在铜电解工艺中,对导电杆导电性能的要求比力学性能更高,也更难满足。由于考虑到导电杆导电性能和铜电解工艺的需要,永久型阴极板导电杆一般采用钢铜包覆结构。近年来,导电杆钢铜包覆结构的设计制造引起了国内外许多高校和企业的广泛关注<sup>[4-8]</sup>。传统工艺如冷挤压、过盈配合等制造永久型阴极板导电杆的方法已逐渐被淘汰,这主要是由于传统工艺中制备导电杆的铜与不锈钢面板结

基金项目:国家自然科学基金(51675256)

石玦:男,1973年生,博士,教授,博士研究生导师,研究方向为先进焊接方法及控制 Tel:0931-2972765 E-mail:shiyu@lut.cn

高海铭:男,1989年生,硕士研究生,研究方向为异种金属焊接 E-mail:15101223313@163.com

合不够紧密,导致不同铜钢结合处的导电率相差很大,电流密度分布呈现陡降的特性使得在实际电解生产过程中的电流效率降低,槽电压升高,并且经长时间使用,结合界面容易分离失效,未接触部分容易被电解酸雾氧化和腐蚀,大大降低了其使用寿命。对于铜-钢异种金属连接,文献[9-11]报道了电子束焊、激光焊和摩擦焊等试验研究,但是由于永久型阴极板导电杆采用钢铜包覆结构,在此结构中焊缝处于内部,结合界面具有不可见性,加之铜钢物理性能相差很大,在焊接过程中结合界面容易产生变形和内应力,同时铜元素扩散到钢侧容易引起渗透裂纹,因此利用传统的焊接工艺很难适应此种特殊结构的焊接<sup>[12-14]</sup>。

铜-钢钎焊由于焊接温度较低,热源可控性和可达性较好,钎料中合金元素的加入,所以便于铜-钢包覆焊接,并能在焊接过程中有效避免结合界面的变形、内应力和渗透裂纹的产生。故本研究提出采用高频感应钎焊方法来实现永久型阴极板导电杆铜-钢包覆焊接<sup>[15-19]</sup>。

表 2 316 不锈钢的化学成分(质量分数/%)

Table 2 Chemical composition (mass fraction/%) of 316 stainless steel

Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	C	Fe
16.0—18.5	10.0—14.0	2.0—3.0	≤2.00	≤1.00	≤0.035	≤0.03	≤0.08	The remaining

见图 1,成分见表 2。在试验过程中利用氩气作为保护气体。

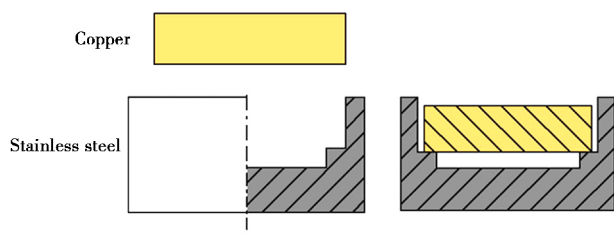


图 1 试验工件及装配图

Fig.1 Test parts and assembly drawing

本研究选用 Sn-Cu 系二元共晶钎料,并含有少量 Ni,熔点为 227 °C,电阻率为 10~15 μΩ·cm。Sn-Cu 系无铅钎料因为具有熔点低、价格低廉、环保、力学性能优良等特点,已经成为铜-钢焊接无铅焊料领域研究的热点。

将试验所用钢块和铜块化学除油,再用表 3 所示酸洗方法分别对不锈钢和紫铜进行酸洗,最后再进行砂纸打磨和丙酮清洗,以保证施焊表面清洁无氧化物和油污。

表 3 铜、钢酸洗方法

Table 3 Pickling methods of copper and steel

	Solution ratio/(mL/L)	Pickling time/s
Cu	38% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +4% HNO <sub>3</sub> +0.4% HCl	5—15
Steel	10% HCl+10% HNO <sub>3</sub> +5% HF	20—30

将加热的液态钎料均匀地预敷于钢筒底部键槽内,预涂层厚度大约为 2.5 mm,略高于筒内键槽台阶,待钎料冷却凝固后与铜块进行装配、焊接。将铜块和钢块在耐高温石英管内装配好后放入高频感应线圈中进行试验,以防工件在升降过程中接触到带有高压电的高频感应线圈。试验时工件和耐高温石英管从线圈底部由升降工作台抬升于线圈中心部

## 1 实验

由于永久型阴极板导电杆的体积较大,实际生产装置复杂,为简化试验过程,本试验在使用与实际导电杆相同材料的条件下采用模拟试样及装置对实际工艺过程及模拟试样的焊接成品的性能进行研究。

试验选用母材为圆形的 T2 紫铜块,几何尺寸为外径 D=30 mm,高度 H=8 mm,成分见表 1。不锈钢外筒的牌号为 316,几何尺寸为外径 D=35 mm,内径 d=32 mm,高度 H=15 mm,铜钢装配间隙为 2 mm,工件加工形状及装配图

表 1 T2 紫铜的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition (mass fraction/%) of T2 copper

Sb	Fe	Pb	S	Cu
0.002	0.005	0.005	0.005	The remaining

位,然后通电进行焊接。实验平台示意图如图 2 所示。

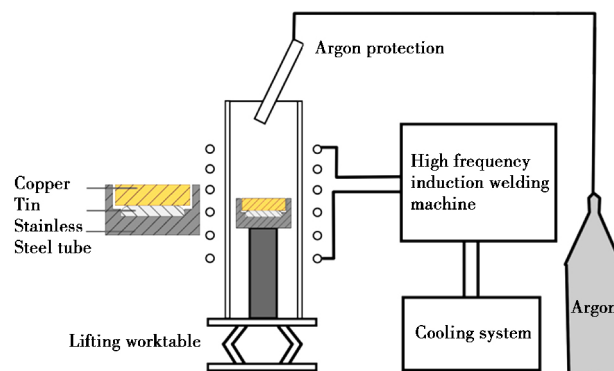


图 2 铜钢装配及实验平台示意图

Fig.2 Copper-steel assembly and experimental platform diagram

在高频感应焊机焊接电压(550 V)和振荡频率(10 000 Hz)固定的情况下,通过对模拟试样进行一系列的试验可得,热输入过大会造成铜层过度熔化,热输入过小会导致铜钢连接强度降低,通过试验研究确定,输入电流值在 15~28 A 范围内能使铜钢达到良好的冶金结合。因此,本研究在焊接电流(20 A)、电压(550 V)和振荡频率(10 000 Hz)确定的情况下,分析焊接过程中热输入对铜-钢高频感应钎焊的影响,具体试验参数如表 4 所示。每一组试验的焊接过程不是连续加热的过程,而是加热、冷却、再加热交替进行的,以使在焊接温度持续上升的过程中钎料熔化而母材不熔化,从而有效避免了因为持续加热所生成的有害组织。表 4 中加热时长为焊机对焊件进行加热工作的时间,中停时长为焊机停止加热工件冷却的时间。钎焊试验结束后对试样进行切割、打磨、宏观分析、制样等,为分析检测做准备。利用光学显微镜、扫描电镜(SEM)、能谱仪(EDS)、X 射线衍射仪(XRD)和

智能金属导体电阻率仪对钎焊接头过渡区的形貌、组织、元素分布、物相种类和铜-钢焊件导电性进行分析研究,并提出了实现铜与钢高频感应钎焊的合理工艺参数。

表 4 焊接试验参数

Table 4 Welding experiments parameters

Number	Heating time/s	Heating times	Stop time/s	Stop times
1	20	5	20	4
2	20	5	30	4
3	30	5	30	4

## 2 结果分析

### 2.1 铜-钢焊缝的形貌

图 3 为三组试验中各取一件试样在金相显微镜下的接头形貌图。试样 1、2、3 分别由第一、二、三组试验获得,由图 3 可以看出,三个试样焊接接头无明显缺陷,焊接质量较好且锡钎料分别与钢和铜形成了良好的冶金结合,尤其如图 3(c)和图 3(d)所示,中间层与铜层形成了锯齿状的界面物相,钢层与中间层形成的界面有连续的针状物相且方向朝向钢侧。图 3 反映出三种钎焊工艺下焊缝均出现不同数量的气孔(图中气孔均显示为黑色),由图 3 可见随着加热时间和中停时间的延长,试样 2、3 中气孔数量增多。气孔影响焊缝的致密

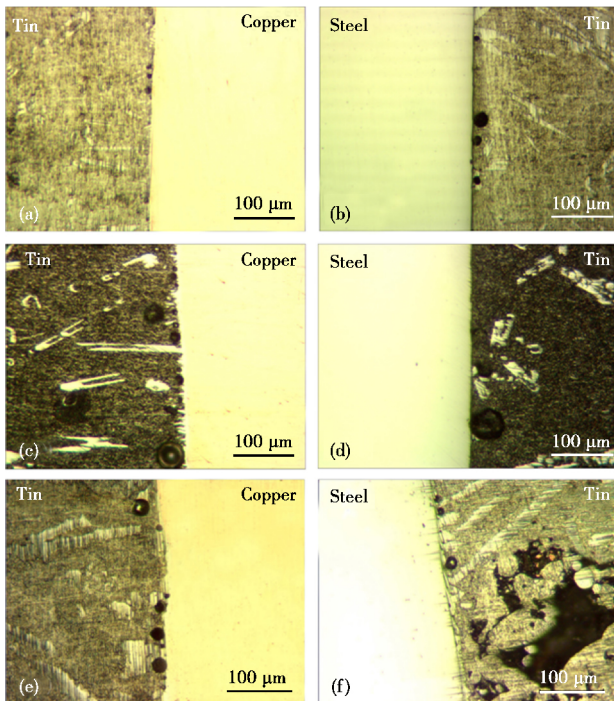


图 3 不同工艺下界面钎焊接头形貌:(a)试样 1 铜-锡界面;(b)试样 1 钢-锡界面;(c)试样 2 铜-锡界面;(d)试样 2 钢-锡界面;(e)试样 3 铜-锡界面;(f)试样 3 钢-锡界面  
Fig.3 Morphology of brazing joints obtained under different processes: (a) sample 1 Cu-Sn interface; (b) sample 1 steel-Sn interface; (c) sample 2 Cu-Sn interface; (d) sample 2 steel-Sn interface; (e) sample 3 Cu-Sn interface; (f) sample 3 steel-Sn interface

性和连续性,导致试样导电性能降低。一般来说,钎焊焊缝中常见的气孔主要为氢气孔、氮气孔、一氧化碳气孔和水气孔等,气孔的成因较为复杂。根据文献[8,19-20]中对不同种类气孔的分析判断以及本试验所用钎料成分、加热温度、试验条件、接头气孔形貌和分布特征的分析,该试样接头中沿壁侧生成的气孔主要为氮气孔和水气孔。氮气孔主要是由于保护气体不纯以及预敷钎料和工件表面吸附的空气所致。水气孔主要是由于预敷钎料和工件表面所吸附的水分以及氩气中所含的水分在钎焊加热过程中被蒸发为水蒸气所致。由于本试验中焊缝在工件内部,增加了钎焊过程中气体从钎缝中逸出的难度,所以这些气体来不及逸出就会在钎缝处形成气孔。随着中停时间和加热时间的延长,焊缝中的微小气孔逐渐合并长大,发展为宏观可见的大气孔,并且随着温度的持续升高,大气孔聚集发展为体积更大的孔洞,如图 3(c)~(f)所示,随着中停时间的延长,靠近锡-铜和锡-钢界面附近出现了明显的气孔,当加热时间延长至 30 s 后,中间层两壁侧出现了较大的气孔。第一组试验中,由于加热时间较短、中停时间较短、加热温度较低,导致钎缝中气孔较少,焊缝致密性较好。

通过对不同工艺下铜-钢钎焊接头形貌的观察,可以看出三种钎焊工艺条件下铜-钢钎焊接头均没有出现裂纹、夹杂和未熔合等严重缺陷。这些缺陷也是影响其导电性能的重要原因。

### 2.2 铜-钢焊缝的微观组织

为了进一步从微观尺度对焊接界面的连接形貌、界面物相形态及微观结构进行分析,采用 SEM 对三组不同工艺下的铜-钢焊接试样接头进行分析。结果表明,三种工艺参数均可使中间锡钎料与钢和铜达到了良好的冶金结合且焊缝界面平整。

图 4 试样 2 的母材与铜、钢两侧扩散反应层及焊缝中心层的 SEM 图。从图 4(a)可以看出,焊缝中心层组织分布均匀,无明显焊接缺陷,在中心层和铜侧形成的铜侧扩散反应层呈明显的“锯齿”状,且“锯齿”方向朝向中心。从图 4(b)可以得出,钢侧有溶解的现象,使得界面呈现不平整状态,焊缝中心层的分布与图 4(a)基本相似。

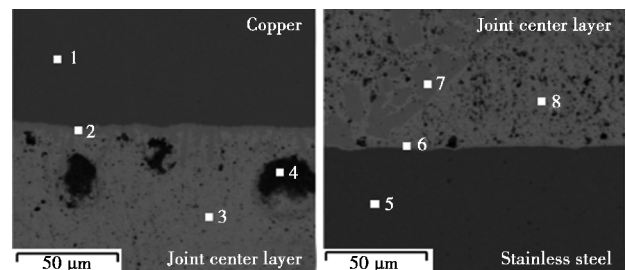


图 4 界面微观组织 SEM 图:(a)铜-锡界面;(b)钢-锡界面  
Fig.4 SEM images of joints interface microstructures: (a)Cu-Sn interface; (b)steel-Sn interface

每组试样焊缝中心层的物相形态及微观结构基本相似。第一组试样的铜锡界面无明显的“锯齿”状物相,钢锡界面形貌与试样 2 基本相同。第三组试样由于加热时间的延长、热输入增大,铜侧扩散反应层形成了双层“锯齿”,锯齿形态较

试样 2 粗大, 并且与第一、二组相比, 第三组试样的钢侧扩散反应层明显且宽厚。

### 2.3 铜-钢焊缝微观组织的物相

为了进一步明确焊缝中心及两侧扩散反应层的物相种类, 采用 EDS 及 XRD 对不同物相区域的元素成分进行分析。试样 2 的 EDS 分析区域如图 4 所示, 元素分析结果见表 5, 物相分析结果如图 5 所示。结果表明, 在铜扩散反应层上生成的连续的“锯齿”物相为  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ , 在焊缝中心层中主要分布锡单质、锡的氧化物和少量的锡铜化合物  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ 。图 4(a) 中点 3、点 4 区域和图 4(b) 中点 8 区域均为锡的氧化物。在钢扩散反应层呈现溶解形态的物相为  $\text{Fe}_{1.3}\text{Sn}$ 。

表 5 不同点区域的元素成分(原子分数/%)

Table 5 Element composition (atom fraction/%) of different point regions

Element Number	Cu	Fe	Sn	Ni	Cr
1	62.70				
2	34.80		27.40		
3			16.90		
4			26.50		
5		60.07			
6		45.10	31.69	2.60	4.14
7	32.70		25.60		
8			15.50		

第一组试样由于加热时间短、中停时间短在铜扩散反应层上只生成了相对较薄的一层连续的铜锡金属间化合物  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ , 在钢锡界面生成了更为少量的  $\text{Fe}_{1.3}\text{Sn}$ , 焊缝中心层物相与试样 2 基本一致。第三组试样生成的双层“锯齿”状物相中靠近铜侧的单层“锯齿”状物相为  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ , 另一层“锯

齿”状物相为  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ , 其余所生成的物相与试样 2 完全相同。

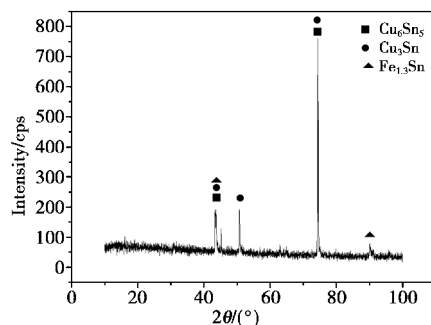


图 5 XRD 分析结果

Fig.5 Analytic result of XRD

### 2.4 铜-钢焊缝的元素分布

通过 EDS 点分析及 XRD 扫描分析得出焊缝中心层主要由 Sn 单质、金属化合物  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ 、 $\text{Cu}_3\text{Sn}$  及 Sn 的氧化物组合而成。为了进一步研究分析中心层的形成机理, 基于 EDS 分析对试样 1、试样 2、试样 3 的焊缝的中心层与两侧的扩散反应层进行横向方向元素分析。分析结果表明, Cu、Sn、Fe 等主要元素在各组试验试样焊缝处分布情况基本一致。图 6 是以试样 2 为例的分析区域与结果。

与文献[5]的铜钢扩散情况相似, 如图 6 所示, Cu 在中心层的分布出现了一个成分含量相对稳定的平台, 在中心层与钢基体的界面处 Cu 含量急剧下降直至为零; Fe 在钢-锡界面处含量急剧下降并且在中心层的分布量要小于 Cu。图 6 的分析结果表明, Cu 在中心层实现了长程扩散。由于添加的钎料熔化后对铜在高温下形成了溶解, 使得 Cu 在液态钎料中实现了长程扩散。同时, 不锈钢表面也会出现一定的溶解, 但钢的熔点远高于铜, 所以 Fe 在中心层中的溶解量也相对较低。

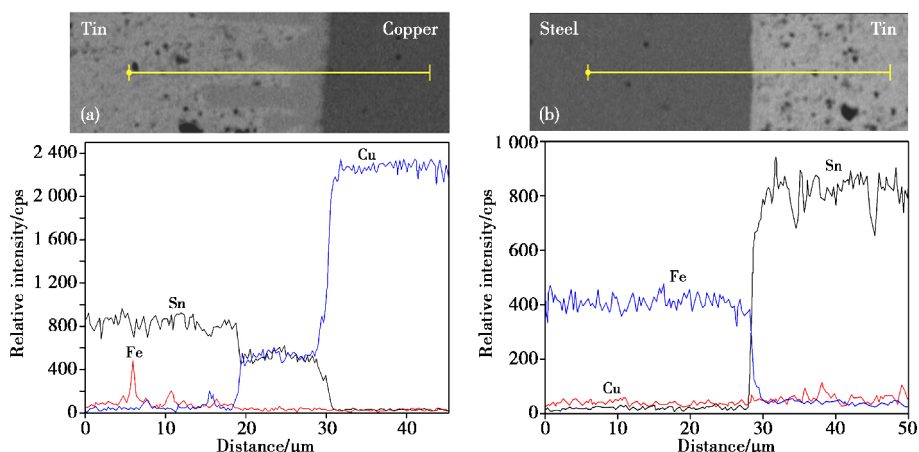


图 6 不同焊接界面元素线分析:(a) 焊缝中心层与铜侧焊接界面;(b) 焊缝中心层与钢侧焊接界面(电子版为彩图)

Fig.6 Linear scanning image of different interfaces of same joint: (a) the interface between the middle layer and the copper layer; (b) the interface between the middle layer and the steel layer

为了明确焊缝中心层与两侧的扩散反应层中各元素的面分布规律, 采用 EDS 对该区域进行元素面扫描分析, 分析结果如图 7 和图 8 所示。从图 7 和图 8 的分布结果可知, Cu 和 Fe 在中心层的分布较为均匀, 少数部分区域有 Cu 和 Fe 的富集和偏析, 富集和偏析区域随机分布。

### 2.5 铜-钢焊缝的界面机理

通过对高频感应铜-钢钎焊试样进行接头截面的微观组织、物相种类、元素分布的分析可推断: 在高频加热条件下, 钎料熔化实现了对钢和铜接触面的溶解; 溶解进入钎料中的 Cu 和 Fe 元素在焊缝中心层实现了不同程度的扩散, 并生成

$\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ 、 $\text{Cu}_3\text{Sn}$  等物相。

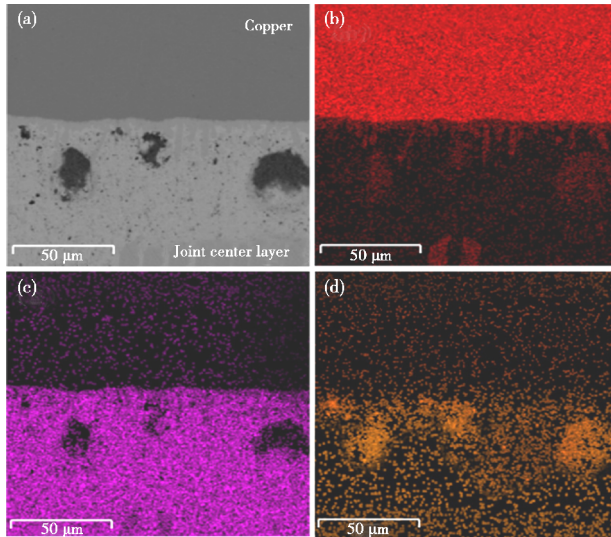


图7 铜侧与焊缝中心层界面区域的元素分布:(a)面扫区域;(b)Cu元素;(c)Sn元素;(d)Fe元素(电子版为彩图)  
Fig.7 Surface scanning image of the interface between the middle layer and the copper layer; (a) surface scanning area; (b) Cu element; (c) Sn element; (d) Fe element

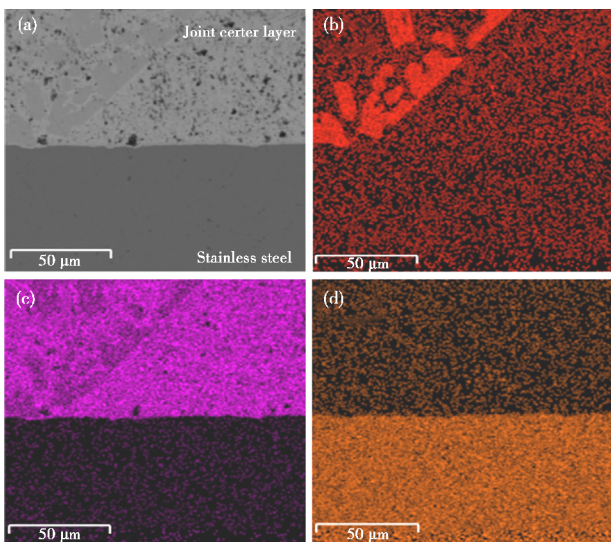


图8 焊缝中心层与钢侧界面区域的元素分布:(a)面扫区域;(b)Cu元素;(c)Sn元素;(d)Fe元素(电子版为彩图)  
Fig.8 Surface scanning image of the interface between the middle layer and the copper layer; (a) surface scanning area; (b) Cu element; (c) Sn element; (d) Fe element

该工艺方法借鉴了钎焊思想,其焊接界面的成形主要包含了四个阶段:钎料熔化、母材表面的溶解、元素扩散及物相生成、界面冶金结合。这四个阶段中,第三阶段是整个焊接过程的重要环节,对整个中心层的物相形态、种类、生成量及最终的界面结合形态都有重要影响。

## 2.6 铜-钢试样的导电率

图9为智能金属导体电阻率仪对三组钎焊工艺下铜-钢焊接试样导电率的检测结果图,各组试样的导电率不同,存在较大差异,组内各试样的导电率也略有差异。

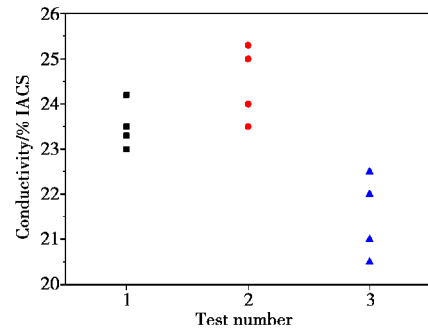


图9 三组试样导电率检测结果

Fig.9 Test results of conductivity of three groups of samples

根据 Sn-Cu 相图分析,在 450 °C 以下,Sn 与 Cu 反应会生成两种金属间化合物,分别是  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  和  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ 。其中  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  是 Sn 基焊料和 Cu 基板液态反应的产物,而  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  则是由  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  与 Cu 固态反应生成,而且  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  的生成温度高于  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  的生成温度<sup>[21]</sup>。钎焊过程中加热时长和中停时长会均对试样的焊接温度产生影响,即焊接过程中加热时间长、中停时间短较加热时间短、中停时间长的焊接温度高,综合试验分析及文献参考<sup>[21]</sup>,在本试验钎焊温度范围内,焊接温度越高,中心层  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  的生成量则越多。

$\text{Cu}_3\text{Sn}$  晶胞体积为 906.7 nm<sup>3</sup>,约是  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  晶胞体积的 1.16 倍,也是 Sn 晶胞体积的 18 倍多,在钎焊过程中生成晶胞体积较大的金属间化合物  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  会对周围晶粒产生挤压导致晶格畸变,且由于添加合金元素同样会引起晶格畸变,因此在铜-钢钎焊过程中过渡中心层的晶格畸变程度主要与金属间化合物  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  产生量成正比。本试验生成的铜-钢钎焊试样及普通金属和其合金的导电类型均属于电子导电,载流子为自由电子。影响此类材料导电率的因素有:参与导电载流子的体积密度,载流子的定向移动速度和载流子携带的电荷量。而晶格畸变率变大则会对导电过程中载流子的定向移动速度产生阻碍,也会影响到实际参与导电的载流子的体积密度,继而使导电率降低。所以,对于各组之间的导电率而言,正如图 9 所示,随着加热时长的延长,焊接温度升高,由于  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  生成量的增加,第三组试样的导电率均低于第一、二组试样。对于组内各试样的导电率而言,因为焊缝缺陷会造成试样的不连续性,所以试样本身的气孔等缺陷会对导电率产生不良影响。对比每组组内试样的宏观缺陷发现,每组导电率最低的试样均比组内其余试样存在较多的宏观缺陷。

## 3 结论

(1)采用在不锈钢施焊表面预涂敷 Sn-Cu 系钎料后与铜进行高频感应钎焊的方法实现铜-钢异种金属包覆连接是可行的。Sn 作为连接铜钢的中间介质,起到了过渡金属的作用,形成了导电性能优良、连接强度良好的过渡层和良好的结合界面。

(2)铜-钢钎焊焊缝可以分为三个区域:钢侧反应扩散层,焊缝中心中间层及铜侧反应扩散层。铜侧反应扩散层主要生成了呈连续层状分布的  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ,钢侧反应扩散层生成了少量的铁锡金属间化合物  $\text{Fe}_{13}\text{Sn}_6$ 。

(3)综合焊缝的宏观缺陷和微观生成物相,发现铜-钢试样导电率与焊缝气孔等缺陷和中心层金属间化合物  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  的生成量有关。在本试验铜-钢钎焊温度范围内,试样导电率会随着焊接温度的升高而降低,反之导电率升高。

(4)采用高频感应钎焊和 Sn-Cu 系钎料,在焊接电压(550 V)、输入电流(20 A)和振荡频率(10 000 Hz)恒定的情况下,综合考虑焊缝致密性和试样导电性,在此模拟试验中加热时长为 20 s,加热次数为 5 次,中停时长为 20 s,中停次数为 4 次为最佳的焊接工艺参数,可形成导电性能优异、成形良好的铜-钢钎焊接头。

### 参考文献

- Magnabosco I, Ferro P, Bonollo F, et al. An investigation of fusion zone microstructures in electron beam welding of copper-stainless steel[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 424(1-2): 163.
- Zhou Linl. Research of a new energy-saving technology of electrolytic copper[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013(in Chinese).  
周玲丽. 电解铜节能新工艺的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
- Xue Fangqing. Studies and application of stainless steel cathode in copper electrolytic refining[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2003(in Chinese).  
薛方勤. 铜电解精炼不锈钢阴极材料的研究与应用[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2003.
- Mumin Sahin. Joining of stainless steel and copper materials with friction welding[J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2009, 616: 71.
- Chen Shuhai, Huang Jihua, Xia Jun, et al. Microstructural characteristics of a stainless steel-copper dissimilar joint made by laser welding[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2013, 448: 33.
- Wang Kehong, Xu Yuelan, Kong Jianshou, et al. Copper-steel  $\text{CO}_2$  welding with steel electrode[J]. *Welding Journal*, 1996(4): 258(in Chinese).  
王克鸿, 徐越兰, 孔建寿, 等. 铜-钢接头的钢焊丝熔化极  $\text{CO}_2$  焊[J]. *焊接学报*, 1996(4): 258.
- 杨卫鹏, 李双吉, 朱笑睿, 等. 铜-钢异种金属 CMT 熔钎焊工艺研究[J]. *焊接*, 2015(4): 41.
- Fu Jun. Laser welding for copper-steel joint[D]. Shanghai: Shanghai jiaotong university, 2009(in Chinese).  
付俊. 铜钢异种材料激光焊接研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- Wang Xiangbin, Zhao Xiaohong, Zhou Shiquan, et al. Welding T2-copper to 10-steel by electron beam[J]. *Electric Welding Machine*, 2005, 26(1): 42(in Chinese).  
王向斌, 赵晓红, 周石泉, 等. T2 紫铜与 10# 钢异种金属电子束焊接工艺研究[J]. *电焊机*, 2005, 26(1): 42.
- Song Yonglun, OliveriaSantos J F. Laser cladding of thin copper layer on stainless steel[J]. *Welding Journal*, 1998, 19(2): 88(in Chinese).  
宋永伦, OliveriaSantos J F. 不锈钢表面超薄铜层的激光熔覆[J]. *焊接学报*, 1998, 19(2): 88.
- Shen Jie. Study on friction welding of copper and low carbon steel[J]. *Welding Technology*, 1995(4): 17(in Chinese).  
申捷. 铜与低碳钢摩擦焊特性研究[J]. *焊接技术*, 1995(4): 17.
- Gao Lu, Li Zhuoxin, Li Guodong, et al. Research status and development of copper-steel welding[J]. *Welding & Joining*, 2006(12): 16(in Chinese).  
高禄, 栗卓新, 李国栋, 等. 铜-钢异种金属焊接的研究现状和进展[J]. *焊接*, 2006(12): 16.
- Wang Houqin, Cao Jian, Zhang Lixia, et al. Research status of joining between copper alloy and steel[J]. *Welding Technology*, 2009(3): 6(in Chinese).  
王厚勤, 曹健, 张丽霞, 等. 铜合金与钢连接技术研究进展[J]. *焊接技术*, 2009(3): 6.
- Nazar K A, Shabestari S G. Effect of micro alloying elements on the interfacial reactions between molten aluminum alloy and tool steel[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 478(1): 523.
- Zhang Riheng. Welding procedure of copper-steel different materials[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2003(9): 24(in Chinese).  
张日恒. 铜-钢异种金属材料的焊接工艺[J]. *压力容器*, 2003(9): 24.
- Qin Youqiong. Effects of brazing parameters on microstructure and mechanical properties of copper and steel brazed joint[J]. *Hot Working Technology*, 2010(19): 145(in Chinese).  
秦优琼. 钎焊工艺参数对铜-钢钎焊接头组织及性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2010(19): 145.
- Lin Maoguang. Study on vacuum brazing of austenitic stainless steel and copper[D]. Zhenjiang: Jiangsu University Of Science And Technology, 2013(in Chinese).  
林茂广. 奥氏体不锈钢与纯铜的真空钎焊工艺研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2013.
- Zhao Xufeng. Temperature field analysis of high-frequency induction brazing and experimental verification[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007(in Chinese).  
赵旭枫. 高频感应钎焊温度场分析与试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- Littlton J, Lammas J, Jordan M F. Nitrogen porosity in gas shielded arc welding of copper[J]. *Welding Journal*, 1974, 53(12): 561.
- Kuwana, Takeshi, Kokawa. Effects of nitrogen and titanium on mechanical properties and annealed structure of the copper weld metal by Ar- $\text{N}_2$  gas metal Arc welding[J]. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 1986, 4(4): 753.
- Zhao Ning. The liquid structure of Sn-Cu lead-free solders[J]. *Metallurgica Sinica*, 2008, 44(4): 467.

(责任编辑 谢 欢)