

# 大型薄壁多层编织铜超声焊接接头组织与性能

贺晓斌,郎宗灵,刘子扬,江琛,刘双宝,罗小依,雷霆

(上海航天设备制造总厂有限公司,上海 200245)

**摘要:** 利用超声波焊接技术实现大平面超薄铜箔与多股双层镀银编织铜的焊接,该技术服役于将来的中国空间站。分析了不同参数对连接力学性能的影响,利用扫描电子显微镜对典型接头界面处的微观组织特征进行了分析,并采用有限元仿真的方式对连接行为进行了仿真。结果表明:采用超声波焊接实现了薄壁铜层与镀银编织铜的焊接,焊点连接面处组织致密,无明显缺陷;焊点连接处由 Ag 和 Cu 元素组成,焊接温度远未达到熔点,为低温连接行为,其连接机理为扩散连接;在焊接能量为 120 J、0.276 MPa 参数下,母材拉脱力可达到 90 N。

**关键词:** 超声波焊接; 镀银编织铜; 薄壁; 微观组织

中图分类号: TG 456.9

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.03.013

## Microstructure and Mechanical Properties of Ultrasonic Welding Joint of Large Multilayer Silver-Plated Thin-Walled Woven Copper in a Large Scale

HE Xiaobin, LANG Zongling, LIU Ziyang, JIANG Chen,

LIU Shuangbao, LUO Xiaoyi, LEI Ting

(Shanghai Aerospace Equipments Manufacture Co., Ltd., Shanghai 200245, China)

**Abstract:** The ultrasonic welding technology is adopted to weld large plane ultra-thin copper foil with multi-ply double-layer silver-plated woven copper for the future Chinese space station. The effects of different parameters on the mechanical properties of the joint are analyzed, the microstructure characteristics of the typical joint interface are analyzed by scanning electron microscope, and the finite element simulation is used to simulate the welding behavior. The results show that the welding of thin-walled copper foil and silver-plated woven copper is realized by the ultrasonic welding. The structure of the solder joint is dense, and there is no obvious defect. The solder joint is composed of Ag and Cu elements. The welding temperature is far from the melting point, and it is a low temperature welding behavior, the mechanism of which is diffusion. The experimental results show that when the welding energy is 120 J and the welding pressure is 0.276 MPa, the tensile force of the base material can reach 90 N.

**Key words:** ultrasonic welding; silver plated woven copper; thin wall; microstructure

## 0 引言

随着我国空间站工程即将进入服役,大面积柔性太阳翼是其进行能源供应的生命线,其汇流条焊点能否长寿命,高可靠焊接是整翼装焊的关键工艺技术,进而决定了大型航天器的供电来源。

传统的手工钎焊方法长时间服役,容易因焊料蠕变、晶粒粗化等缺陷导致焊点的最终失效<sup>[1]</sup>。由于锡铅焊料金属间化合物的生长,最终焊点力学性能将发生缺陷<sup>[2-3]</sup>,无法满足新时代航天器长寿

命、高可靠的质量要求。

空间站大面积柔性太阳翼为国内首次使用,完全伸展长度达 20 m 以上,属大型薄壁结构,焊点部位铜焊盘厚度为 70  $\mu\text{m}$ ,汇流条形式为多达 200 股的镀银编织铜,属大型薄壁结构的焊接形式,需要在轨服役 15 a 以上,承受(-100~100) $^{\circ}\text{C}$ 背日与对日循环 8 万余次。

超声波焊接是一种高效低能耗的焊接方法<sup>[4-5]</sup>,其原理是焊头以超声频率的往复振动,使材料之间

收稿日期:2020-01-05; 修回日期:2020-03-21

作者简介:贺晓斌(1987—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为固相连接、微连接技术。

发生热塑性变形<sup>[6]</sup>,进而在焊接界面形成机械锁合与冶金连接<sup>[7-8]</sup>。在超声波焊接异质材料时,产生的金属间化合物远少于传统钎焊方法<sup>[9-10]</sup>。

本文针对大型薄壁超薄铜层与多股镀银编织铜,采用超声波焊接的方式进行焊接,通过调整焊接工艺参数分析其对焊点力学性能的影响、典型焊点的微观组织结构特征,并对超声波焊点接头采用有限元的方法<sup>[11-12]</sup>进行焊接过程仿真,对过程中的热量分布进行模拟,对过程机理进行分析。研究结果将为深刻理解超声波焊接过程提供支持,并为该项技术的工程应用提供理论和技术依据。

## 1 试验方法

试验采用的材料为 70  $\mu\text{m}$  厚度的高纯紫铜,200 余股镀银编织铜编制的汇流条,单股汇流条材料为紫铜表面镀银,如图 1 所示。

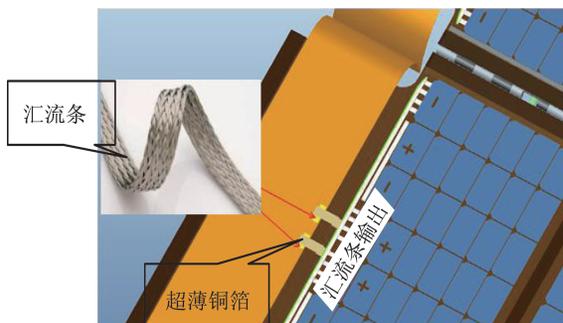


图 1 试验材料

Fig.1 Experimental material

试验所用的焊接设备为必能信公司的超声波焊接设备,具有能量模式与时间模式,超声振动频率为 40 kHz,最大功率 800 W,本文采用的能量为 90~180 J,压力为 0.242~0.276 MPa。通过 Z 轴的气动方式对箔片形成固定,并通过超声变幅杆将超声能量传输于试样上,最后将超声能量作用于焊缝,实现材料的互联。超声波焊接设备和工作原理如图 2 所示。

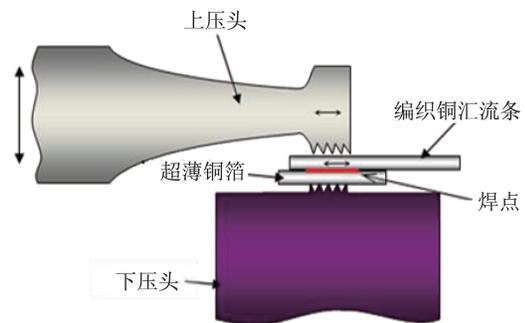
采用微型拉伸试验机对焊接接头进行力学性能测试,采用 HITACHI S-3400N 型扫描电子显微镜对接头进行组织分析和能谱分析,采用 Abaqus 进行有限元仿真分析。



(a) 超声焊接设备



(b) 超声焊接设备焊头放大图



(c) 焊接过程图

图 2 超声波焊接过程

Fig.2 Schematic diagram of the ultrasonic welding process

## 2 试验结果与分析

### 2.1 焊点显微组织分析

焊接能量 120 J、0.276 MPa 的接头横截面宏观形貌如图 3 所示,焊点连接面处形貌如图 4 所示。从图 3 和图 4 中可以看出,从整体形貌图中发现焊接接头由 Ag 层、Cu 基体构成,焊接接头中 Ag 层均匀呈网状分布,说明在超声波焊接中 Ag 层发生了流动,通过镀银编织铜 Ag-Ag 的结合实现了接头强度,铜丝发生了变形,说明超声波焊接实现了能量传递。

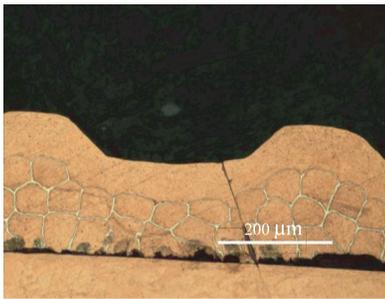


图 3 接头横截面宏观形貌

Fig.3 Macroscopical morphology of the joint cross section

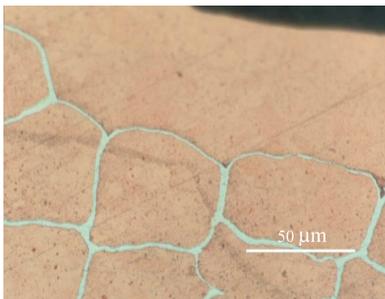


图 4 焊点连接面处形貌

Fig.4 Morphology of the solder joint surface

整个焊点并未发现明显空洞及裂纹缺陷,进行线扫描能谱分析如图 5 所示,红色显示为镀银编织铜 Ag 层,绿色为 Cu 元素,通过能谱分析图中发现界面处成分为 Cu 与 Ag 进行相互扩散。扩散焊接理论中,在超声波焊接过程中,Cu 与 Ag 同族元素在超声波能量的驱动下,发生晶粒级别相互扩散,最终呈现连接行为。

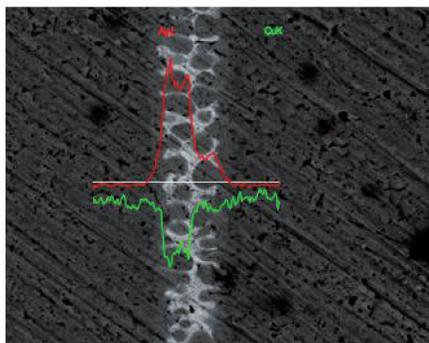


图 5 焊接接头 EDS 线扫描

Fig.5 EDS line scan of the welded joint

在超声波焊接过程中,焊接断面发生塑性变形的区域明显增大,在高温和塑性变形的共同作用下,局部发生了动态再结晶,形成了大量新的晶粒,从而使对应区域产生有效的连接。

## 2.2 接头力学性能分析

采用微型拉伸试验机对焊接接头进行力学性能测试,不同参数下拉脱力数值如图 6 所示。

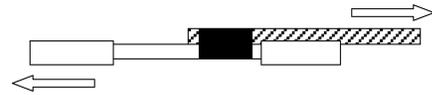


图 6 焊接接头拉伸

Fig.6 Stretch diagram of the welded joint

拉伸测试过程中,两板在局部有效连接区域发生相互“拉扯”导致对应区域出现塑性变形,形成了“撕裂棱”,其焊接断面出现了大量的韧窝,焊接接头达到可靠连接。

拉脱力都满足指标要求(如图 7 所示),说明焊接接头良好。可看出各接头拉伸强度在 61~90 N 之间,从力学强度分析镀银编织铜-铜箔采用超声焊接工艺稳定,焊接后拉断强度与超声波参数关联性较小。从图中发现,有些拉力值较小,这是因为焊接时没有对准导致焊接面积减少,所以采用超声焊接的参数可调范围较大。

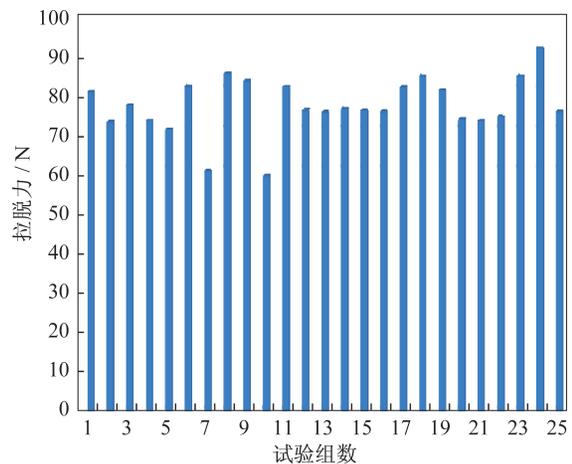


图 7 焊接接头拉脱力性能测试结果

Fig.7 Test results of the tensile property of the welded joint

## 3 有限元仿真

### 3.1 超声波焊接接头模型设计

利用 Abaqus 有限元软件,建立考虑金属塑性流动和强化、完全热力耦合的差厚铜板超声波焊接模型。模型采用中心插分的显示算法,可以解决焊接过程中由于多界面接触造成的计算收敛问题。

### 3.1.1 有限元模型建立

超声波焊接中金属板界面高速摩擦,产生大量的热量。模拟超声波焊接过程如图 8 所示,可以合理地将其分为 4 个阶段:第 1 个阶段是施加预压力夹紧的阶段。此阶段焊头下降,施加一定力于铜板上表面,并保持一段时间。这个阶段包括焊头和铜板的接触和接触压力从零到最大的过程。第 2 个阶段是最重要的焊接过程,期间焊头以超声波频率

(20 kHz)振动,并带动铜板一起振动,在铜板之间的界面产生摩擦生热和材料的塑性流动,并最终形成焊接接头。这个过程在有限元计算中采用完全热力耦合的方法,边界条件设置尽可能与试验条件一致。第 3 个阶段是保压阶段,期间焊头不再振动但保持施加的压力不变。第 4 个阶段为卸载阶段,期间焊头上移,与铜板脱离。

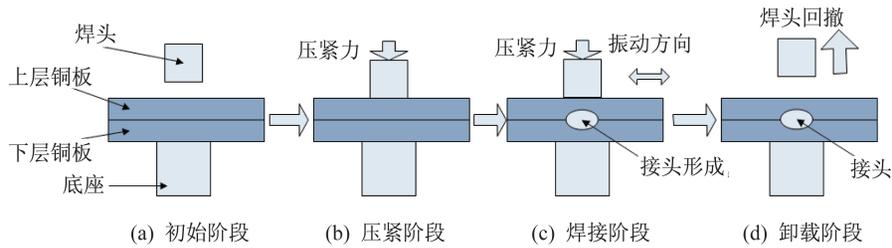


图 8 超声波焊接过程

Fig.8 Ultrasonic welding process

采用库伦摩擦(Coulomb friction)模型表征金属接触面之间的相互摩擦作用,Abaqus 模型和网格如图 9 所示。

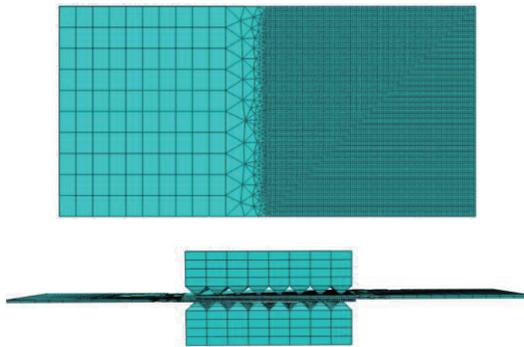


图 9 焊接结构总体网格

Fig.9 General grids of the welding structure

### 3.1.2 热力耦合算法与边界条件

建立考虑材料塑性流动和强化的有限元模型。超声波焊接中金属有较高温度和 high 应变率,其弹塑性本构模型中必须将应力、应变率和温度联系起来。因此,建立 Johnson-Cook 强化模型以反映材料的应变硬化、应变率硬化和温度软化,如下式:

$$\sigma^0 = \left[ A + B \left( \bar{\epsilon}^{pl} \right)^n \right] \left[ 1 + C \ln \left( 1 + \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left( 1 - \hat{\theta}^m \right) \quad (1)$$

式中: $A$ 、 $B$ 、 $n$ 、 $C$ 、 $m$  为材料参数,通过试验确定; $\sigma^0$  为 von Mises 流动应力(flow stress); $\bar{\epsilon}^{pl}$  为等效塑性应

变; $\dot{\epsilon}$  为应变率; $\dot{\epsilon}_0$  为参考应变率;当  $\dot{\epsilon}_0 = 1$  时, $A$  即为材料的静态屈服应力; $\hat{\theta}$  为无量纲化的温度,

$$\hat{\theta} = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_m - \theta_r} \quad (2)$$

式中: $\theta_r$  为室温; $\theta_m$  为材料的熔点。

Johnson-Cook 本构模型中塑性流动沿着屈服面的法线方向,并采用 Mises 屈服面。材料高应变率的变形过程中塑性功转化为热流  $q_d$ :

$$q_d = \alpha \sigma \dot{\epsilon} \quad (3)$$

## 3.2 仿真结果

### 3.2.1 温度场分析

超声波焊接过程中,焊头带动上层金属板运动,在金属板界面之间形成摩擦,并产生大量的热量。同时,焊接过程也是金属材料在大应变率下的变形过程,期间由于塑性变形也会有热量的生成。热量生成导致材料温度升高,并进一步影响材料的力学行为和焊接过程,所以需要超声波焊接过程中的温度场进行分析。

焊接完成后的温度场分布如图 10 所示,其最高温度为  $72.2^\circ\text{C}$ ,远低于铜的熔点温度,所以超声波焊接属于固相连接。其中,图 10(a)为结构整体的温度场分布,可以看出温度较高的区域集中在焊接区域,远离焊接区域的焊头、焊座和铜板温度

较低,且上下两层铜板非焊接区域的温度基本对称。图 10(b)和图 10(c)分别为上层和下层铜板的温度分布,可以看出两层铜板在焊接区域温度分布并不均匀,高温区域偏向于超声波振动开始的方向,且在部分位置较为集中。这是因为焊接结构属于搭接的形式,其几何形式和边界条件关于中心区域并不对称,有一定的偏离。超声波振动开始后,这种偏离会由于焊头振动的不对称性而加剧,并最终导致部分位置的温度、应力、应变等变量的集中现象。

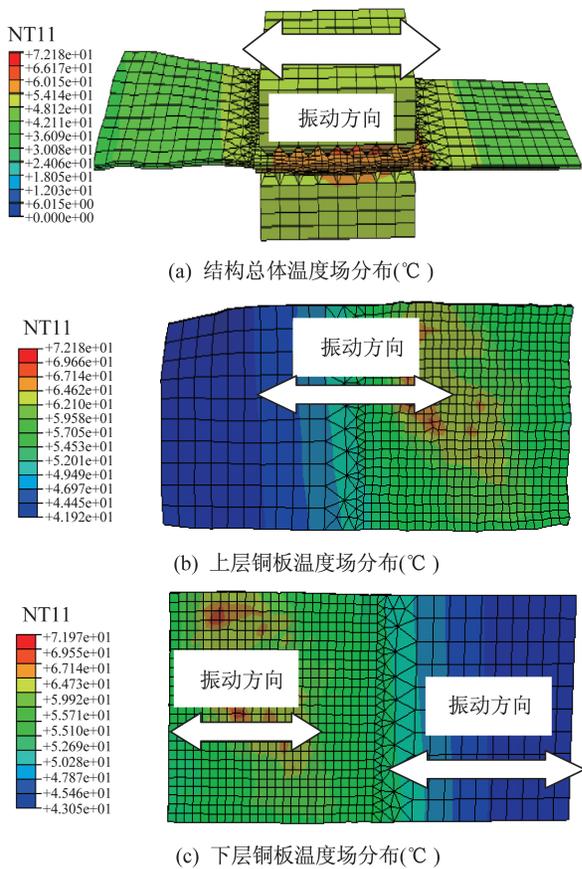


图 10 超声波焊接温度场分布

Fig.10 Temperature field distributions of the ultrasonic welding

### 3.2.2 应力场分析

超声波焊接所使用的焊头并不是平整的表面,其与金属板接触的部分是纵横交错的梯形状的凸起阵列。在施加压力后,金属板表面不同部位受力并不均匀,焊齿下区域受力较大。

焊接完成后上、下铜板的应力云图如图 11 所示。可以看出,上层铜板与焊头的焊齿接触的部位

所受压力较大,在振动的过程中由于摩擦产生的剪应力也较大,并产生较大的塑性应变和流动,即为超声波焊接接头形成的主要原因。下层铜板由于远离焊齿,其表面应力分布相对均匀,且应力和变形相对较小。

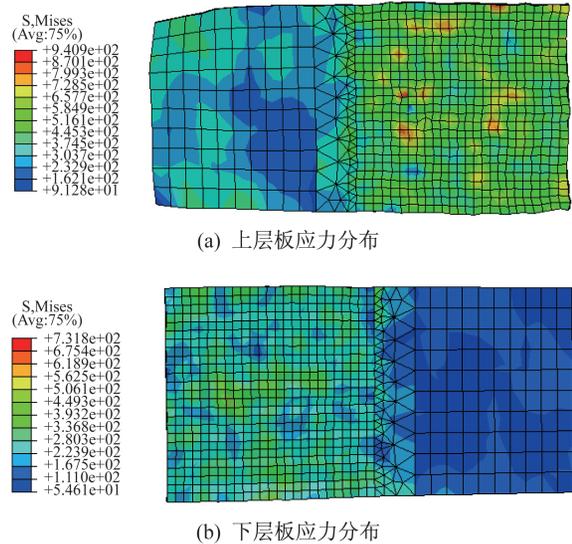


图 11 超声波焊接应力分布

Fig.11 Stress distributions of the ultrasonic welding

### 3.2.3 接触面分析

超声波焊接的接头在金属板之间的接触界面形成,接触面积的大小和接触压强分布直接关系到最终形成的接头强度。有限元计算得到的铜板接触面的接触压强分布如图 12 所示(因为接触力为相互作用力,大小相等方向相反,所以仅取一个表面进行分析)。可以看出,超声波焊接完成后,金属板的重合区域并没有形成全部的接触,而只是形成了较为分散的接触区域,集中在焊齿下部位。形成接触的区域压强分布偏差较大,最大压强达到了 331 MPa,表明形成了良好的接触,而有些区域接触压强较小,表明并没有形成良好的接触。

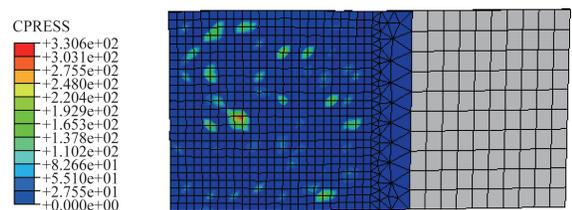


图 12 铜板接触表面接触压强分布

Fig.12 Contact pressure distribution on the contact surface of the copper plate

为进一步分析接触面情况,对结构沿垂直于超声波振动方向进行剖开,剖开后的断面如图 13 所示。在图 13 中绿色的方形框内金属板之间接触良好,形成了良好的焊接接头;而蓝色的椭圆形区域内金属板之间则有较大的间隙,并没有形成接触,而是产生了大量的空穴;其余区域金属板之间虽然

形成了接触,但由于接触力较小,并不足以形成良好的接头。焊头高低不平的几何形状导致金属板接触界面形成复杂的正应力和剪应力,在高频的超声波振动作用下,接触界面金属的塑性流动呈现出不规律性。

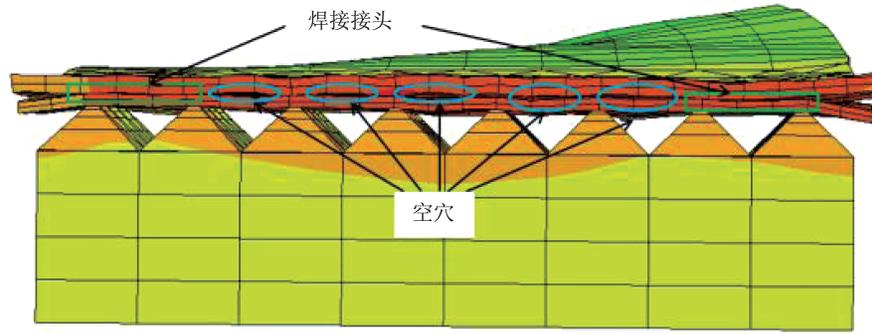


图 13 垂直振动方向截面变形图

Fig.13 Section deformation diagram in the direction of vertical vibration

### 3.2.4 有限元结果结论

铜板超声波焊接过程中最高温度为  $72\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,远低于铜的熔点,所以超声波焊接为固相连接;由于焊头特殊的几何形貌,焊齿下的铜板接触面产生一定的应力集中;铜板之间接触面的接触压强和接触面积会直接影响接头强度,接触面在压力和剪应力作用下发生复杂的塑性流动。

## 4 结束语

1) 采用超声波焊接实现了薄壁铜层与镀银编织铜的焊接,焊点连接面处组织致密,无明显缺陷。

2) 试验结果和仿真结果得出焊点连接处由 Ag 和 Cu 元素组成,焊接温度远未达到母材熔点,为低温连接行为,其连接机理为塑性变形实现扩散连接。

3) 试验结果表明,焊接能量  $120\text{ J}$ 、 $0.276\text{ MPa}$  参数下,母材拉脱力可达到  $90\text{ N}$ 。

### 参考文献

[ 1 ] FENG J C, HE P. High frequency induction contact reactive brazing of aluminum to stainless steel [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2010, 14(2): 20-22.  
[ 2 ] 柳建,杨景卫,曹彪等.铜/铜超声波焊接的相对运动及断面微观演变[J].焊接学报,2018,39(9): 41-44.  
[ 3 ] 马成勇,韩玉民,敖三三.铝/铜异种金属超声波焊接工

艺优化[J].焊接技术,2018,47(5): 46-50.

- [ 4 ] 蒋召平,冯梦楠,罗震,等.铝/铜异质金属超声波焊接工艺研究[J].焊接技术,2018,47(4): 82-87.  
[ 5 ] 刘晓兵,李鹏,夏慧.金属超声波焊接技术及其应用[J].热加工工艺,2015(15): 14-18.  
[ 6 ] 李东,赵杨洋,张延松.焊接能量对铝/铜超声波焊接接头显微组织的影响[J].焊接学报,2014,35(2): 47-51.  
[ 7 ] MIRZA F A, MACWAN A, BHOLE S D, et al. Effect of welding energy on microstructure and strength of ultrasonic spot welded dissimilar joints of aluminum to steel sheets [J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 668: 73-85.  
[ 8 ] 周晶,江新,徐东建.新型太阳能电池板超声波焊接设计[J].工艺装备,2013,52(596): 65-66.  
[ 9 ] KUMAR S, WU C S, PADHY G K, et al. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: a status review [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 26: 295-322.  
[ 10 ] 李连杰,戴乐.超声波焊接的特点及其在异种金属焊接中的应用[J].电焊机,2014,41(6): 13-17.  
[ 11 ] MAI T A, SPOWAGE A C. Characterization of dissimilar joints in laser welding of steel-kovar, copper-steel and copper-aluminum [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 374(1/2): 224-233.  
[ 12 ] 申杰,金先龙,郭毅之.超声波焊接振动问题的数值仿真方法[J].焊接学报,2006,27(3): 13-17.