

# 集磁器结构对磁脉冲辅助半固态钎焊接头组织和性能的影响

邓凌波<sup>1</sup>, 黄尚宇<sup>1,2</sup>, 杨梅<sup>3</sup>, 钱东升<sup>1,2</sup>, 冯珂<sup>1</sup>, 欧冰<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学, 武汉, 430070; 2. 湖北省材料绿色精密成形工程技术研究中心, 武汉, 430070;  
3. 上海市高级技工学校, 上海, 200437)

**摘要:**采用电磁-结构-流场耦合的多物理场耦合模拟方法, 对比分析了等内径和带锥角两种集磁器条件下 Cu/Al 管的磁脉冲辅助半固态钎焊过程, 考察了外管的变形行为和半固态钎料的剪切流变行为。结果表明, 采用等内径集磁器时, 钎料所受的剪切应力和相应的剪切流变速率在端部最高, 底部次之, 中部最弱, 导致搭接区域内去膜效果存在差异, 甚至影响界面冶金结合; 而带锥角集磁器能更为合理地满足无钎剂钎焊对外管变形与钎料剪切流变的协调性需求, 有效改善钎料流变行为, 使剪切应力、剪切流变速率及去膜效果在整个搭接区域相对均匀, 有利于提高界面连接质量。基于分析结果设计制造了改进的集磁器, 进行了钎焊试验及相关测试分析。结果表明, 相较于等内径集磁器, 带锥角集磁器能有效改善 Cu/Al 接头的界面连接质量, 细化搭接区域中部钎缝组织, 并最终提高钎焊接头的抗剪强度。

**创新点:** (1) 结合磁脉冲焊和半固态钎焊的特点优势, 探索一种铜铝异种金属无钎剂钎焊的新工艺。

(2) 改变集磁器结构以改善管件变形行为和钎料剪切流动情况, 有利于改善去膜效果以及细化晶粒, 从而提高钎焊接头连接性能。

**关键词:** 电磁成形; 半固态钎焊; 集磁器; Cu/Al 管接头

中图分类号: TG 454 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20210513001

## 0 序言

Cu 及其合金由于具有良好的导电性和导热性, 被广泛用于制冷管道及设备中<sup>[1]</sup>。但 Cu 的密度大、价格高, 而 Al 及其合金耐蚀性十分优异, 并且具有密度小、强度高、价格低等优势<sup>[2]</sup>。在不影响使用性能的前提下, 采用 Cu/Al 复合结构是实现轻量化和降低经济成本的十分具有前景的方法之一<sup>[3]</sup>。由于 Cu/Al 在物理性能上的差异, 传统熔化焊的方法难以实现高质量连接。尤其是在高温下, Cu, Al 之间易形成脆性金属间化合物, 严重降低接头的性能<sup>[4]</sup>。因此, 通常采用固相焊或钎焊的方法来获得 Cu/Al 焊接接头。

搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 是基

于摩擦焊技术的一种固相焊<sup>[5]</sup>。焊接过程中热输入量低, 可避免形成较厚的金属间化合物层, 有利于提高接头的强度。Lee 等人<sup>[6]</sup>采用 FSW 获得了 Cu/Al 接头, 在接头中金属间化合物层较少。然而, 搅拌摩擦焊通常适用于平板类工件的焊接, 难以用于管件焊接。磁脉冲焊接 (magnetic pulse welding, MPW) 也属于固相焊的一种, 并适用于管件的焊接<sup>[7]</sup>。在 MPW 过程中, 能产生金属射流以去除基体表面的氧化膜, 从而实现冶金结合<sup>[8]</sup>。Raoelison 等人<sup>[9]</sup>采用 MPW 对 Cu/Al 进行焊接, 结果表明, 在合适的工艺参数下可以有效焊接 Cu/Al。Xu 等人<sup>[10]</sup>采用热-力耦合欧拉模型分析了 MPW 的界面特性和界面温度变化。Pourabbas 等人<sup>[11]</sup>采用 MPW 连接不同的铝合金, 在合适的碰撞角度和放电能量下可获得高质量的接头。然而, 由于磁脉冲焊接过程中 Cu/Al 仍为直接相连的方式, 无法避免脆性金属间化合物层的形成<sup>[12]</sup>。此外, MPW 接头存在孔洞和微裂纹等缺陷。

钎焊因具有生产效率高、工艺适应性好和成本低等优点被广泛应用于异种材料的焊接<sup>[13]</sup>.但 Cu/Al 钎焊时需采用钎剂去除铝表面致密的氧化膜<sup>[14]</sup>, 容易导致接头产生气孔和电化学腐蚀.因此, Cu/Al 无钎剂钎焊已成为研究热点. Xiao 等人<sup>[15]</sup>采用超声波辅助钎焊 Cu/Al 接头, 发现在超声振动的辅助下, 接头具有良好的冶金结合. Wei 等人<sup>[16]</sup>采用瞬态液相结合工艺焊接 Cu/Al 接头, 结果发现 Mg 的加入可以与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  反应从而分解去除氧化膜. Shi 等人<sup>[17]</sup>采用半固态 Zn-Al 钎料钎焊铝合金及其复合材料, 研究了铝表面氧化膜的去除机理和半固态钎料的变形行为.

结合磁脉冲焊接和半固态钎焊的特点, 提出了一种电磁成形、半固态成形与钎焊复合的无钎剂钎焊新工艺——磁脉冲辅助半固态钎焊<sup>[18]</sup>. 利用电磁力驱动外管高速冲击半固态钎料, 通过钎料中固相颗粒的挤压和剪切作用, 使基体氧化膜破碎并清除. 但前期研究发现<sup>[19]</sup>, 在接头搭接区域中部, 会出现界面连接缺陷. 受 Fan 等人<sup>[20]</sup>采用随形集磁器电磁成形制备 Cu/Al 双层金属管的启发, 分析导致界面连接缺陷可能的原因是等内径集磁器的电磁力分布使搭接区域的管件变形与钎料剪切流动不协调, 从而影响去膜效果及界面连接质量的均匀性. 鉴于此, 文中将通过改变集磁器结构, 分析其钎焊过程中管件的变形行为及钎料的剪切流变行为, 考察集磁器结构对接头界面连接质量、微观组织及性能的影响.

## 1 试验及模拟方法

### 1.1 磁脉冲辅助半固态钎焊工艺原理

图 1 为磁脉冲辅助半固态钎焊工艺原理, 分为装夹成形和钎焊成形两步工序. 首先, 电磁力驱动外管缩径变形并与内管贴合, 如图 1a 所示. 由于碰撞速度以及碰撞角度均未达到磁脉冲焊接所需的条件, 此过程仅仅是将内、外管进行机械连接, 防止后续加热时半固态钎料从底部流出. 然后, 将管件待焊接区域移动至集磁器工作区域, 如图 1b 所示. 对脉冲电容再次充电, 同时通过感应加热线圈对内管进行加热. 钎料达到所需的半固态温度后, 脉冲电容再次放电进行钎焊成形. 外管在电磁力的作用下高速冲击半固态钎料, 使其高速剪切流动, 管壁氧化膜受到钎料内部固相颗粒的挤压剪切作用从而破碎清除, 如图 2 所示.

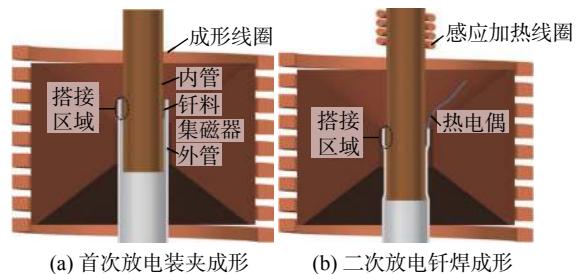


图 1 磁脉冲辅助半固态钎焊工艺原理

Fig. 1 Schematic of magnetic pulse assisted semi-solid brazing process. (a) clamping forming for the first discharge process; (b) brazing forming for the secondary discharge process

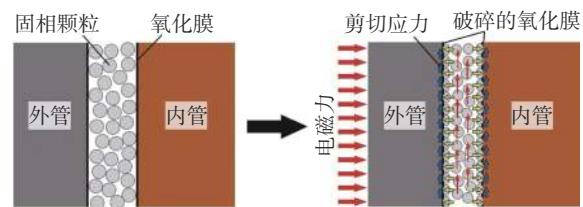


图 2 基体氧化膜去除机理

Fig. 2 Removal mechanism of matrix oxide film

### 1.2 试验方法及集磁器形状设计

有关研究结果表明<sup>[20]</sup>, 随形集磁器的电磁力分布能使外管与内管产生渐进式地碰撞, 将其借鉴到磁脉冲辅助半固态钎焊时, 可使外管对钎料的挤压由搭接区域底部至端部依次进行, 使钎料剪切流动更充分, 去膜效果更均匀, 有利于提高整个搭接区域的界面连接质量. 为了便于加工, 将集磁器简化为图 3 所示的形状, 轮廓与装夹成形后外管的外形基本相似.

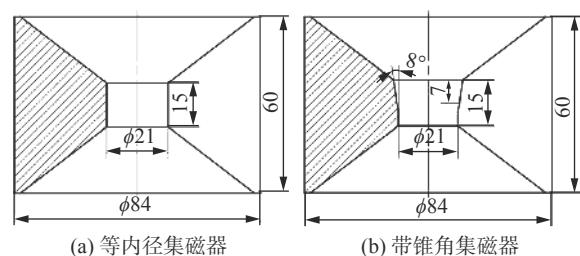


图 3 集磁器几何尺寸 (mm)

Fig. 3 Geometric dimensions of field shapers. (a) constant diameter field shaper; (b) cone angle field shaper

磁脉冲辅助半固态钎焊的试验装置如图 4 所示, 主要包括电磁成形机、成形线圈、集磁器、加热线圈、工件以及各种夹具. 装夹成形的放电电压为 7 kV, 钎焊成形的放电电压为 4 kV. 钎焊试验中外管、内管以及钎料所采用的材料分别为 1060 Al, T2 Cu 和 Zn-15Al 合金, 各材料的化学成分如表 1

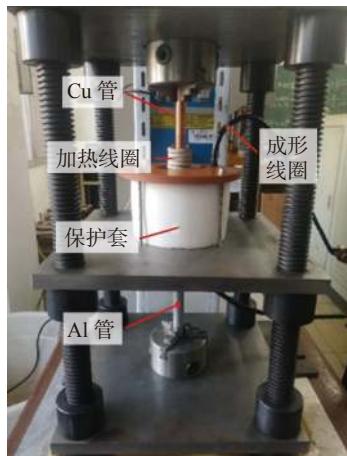


图 4 钎焊试验工装

Fig. 4 Experimental device of brazing

所示。Al 管外径 19 mm, 壁厚 1 mm; Cu 管外径 15 mm, 壁厚 1.5 mm; 钎料厚度为 400  $\mu\text{m}$ 。根据课题组前期研究结果<sup>[21]</sup>, 将钎焊温度设为 410  $^{\circ}\text{C}$ 。钎焊前, 用 SiC 砂纸将材料表面打磨干净, 并使用无水乙醇进行超声清洗 5 min。

钎焊完成后, 对 Cu/Al 接头沿纵向进行剖分, 通过 JXA-8230 型电子探针显微分析仪 (electron probe microanalyzer, EPMA) 进行显微组织分析。对搭接区域沿轴向截取 3 个环状试样, 通过万能试验机进行抗剪强度测试, 以 3 个试样的平均抗剪强度作为 Cu/Al 钎焊接头的抗剪强度。

表 1 铜管、铝管及钎料化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of Cu tube, Al tube and solder

| 材料      | Al    | Zn      | Cu    | Fe      | Ag    | Si    | Mg   | Mn   | Ni      | P       | Pb      |
|---------|-------|---------|-------|---------|-------|-------|------|------|---------|---------|---------|
| T2 Cu   | —     | 0.003 7 | 余量    | 0.004 2 | 0.051 | —     | —    | —    | 0.003 8 | 0.003 9 | 0.003 2 |
| 1060 Al | 余量    | 0.25    | 0.15  | 0.7     | —     | 0.4   | 0.8  | 0.15 | —       | —       | —       |
| Zn-15Al | 14.95 | 余量      | 0.521 | 0.012   | —     | 0.031 | 0.01 | —    | —       | —       | 0.002   |

### 1.3 数值模拟方法

通过有限元仿真软件 LS-DYNA 对磁脉冲辅助半固态钎焊过程中涉及的电磁场-结构场-流场耦合进行模拟分析。电磁场与结构场通过顺序耦合的方式进行求解, 同时, 通过罚刚度法对结构场及流场进行耦合, 从而实现电磁场-结构场-流场的耦合。

由于外管在 410  $^{\circ}\text{C}$  下进行高速变形, 因此采用 Johnson-Cook 本构模型以考虑应变速率敏感性、应变硬化以及温度软化效应。

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \varepsilon^*)(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为流动应力;  $\varepsilon_p$  为等效塑性应变;  $\varepsilon^* = \varepsilon_p^*/\varepsilon_0^*$ , 其中  $\varepsilon^*$  为无量纲应变率,  $\varepsilon_p^*$  为应变率,  $\varepsilon_0^*$  为参考应变率;  $T^* = (T - T_r)/(T_{melt} - T_r)$  为同系温度,  $T_{melt}$  为材料熔点,  $T_r$  为参考温度;  $A, B, n, C$  和  $m$  为试验所需确定的参数, 如表 2 所示。线圈、集磁器视为刚体(几乎不变形), 采用刚体材料模型; 钎料及空气视为流体, 采用 Null 材料模型, Null 材料模型为

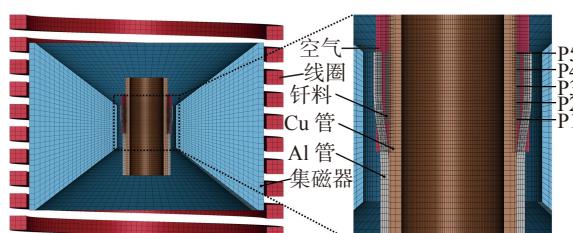
表 2 1060 Al 的 Johnson-Cook 本构模型参数

Table 2 Johnson-Cook constitutive model parameters of 1060 Al

| 屈服强度<br>$A/\text{MPa}$ | 应变硬化模量<br>$B/\text{MPa}$ | 应变硬化<br>指数 $n$ | 应变率硬化<br>系数 $C$ | 热软化<br>指数 $m$ |
|------------------------|--------------------------|----------------|-----------------|---------------|
| 120                    | 200                      | 0.3            | 0.01            | 1             |

LS-DYNA 中一种常用的流体材料模型。

图 5 为有限元模型。线圈、集磁器、外管定义为导体, 计算得到感应电流的趋肤深度为 0.94 mm, 小于外管壁厚, 因此将钎料和内管视为绝缘体。所有部件均采用六面体单元进行网格划分, 为了提高计算精度, 变形区域采用较高的网格密度。

图 5 有限元仿真模型  
Fig. 5 Finite element simulation model

## 2 结果分析及讨论

### 2.1 模拟结果

图 6 为采用等内径集磁器和带锥角集磁器时外管电流密度分布。采用等内径集磁器时, 外管的电流密度分布如图 6a 所示。由于集磁器的端部效应, 外管端部电流密度最大。而采用带锥角集磁器时, 外管的电流密度集中在搭接区域底部, 并且沿

底部至端部呈梯度分布, 如图 6b 所示。这是由于外管端部与带锥角集磁器之间的距离增加所导致。

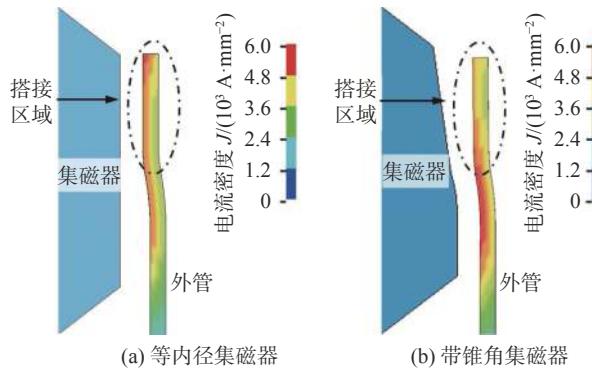


图 6 外管电流密度云图

Fig. 6 Current density diagram of outer tube. (a) constant diameter field shaper; (b) cone angle field shaper

图 7 为采用等内径集磁器和带锥角集磁器时外管洛伦兹力的分布情况。采用等内径集磁器情况下, 由于外管端部具有最大的电流密度, 因此洛伦兹力最大, 如图 7a 所示。对于带锥角集磁器, 最大洛伦兹力出现在搭接区域的底部附近, 如图 7b 所示。

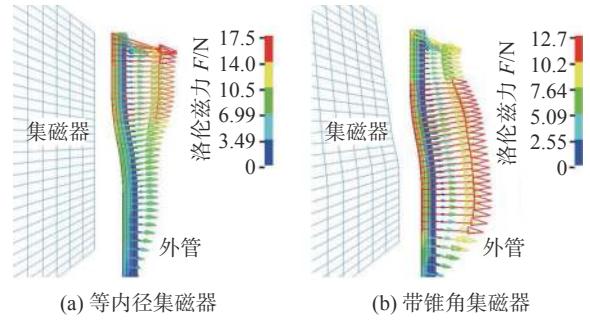


图 7 外管洛伦兹力矢量图

Fig. 7 Lorentz force vector diagram of outer tube. (a) constant diameter field shaper; (b) cone angle field shaper

外管在洛伦兹力的作用下以高应变速率缩径变形并与半固态钎料发生碰撞, 在这种冲击作用下, 钎料产生高速剪切流动。图 8 和图 9 分别为采用等内径集磁器和带锥角集磁器时钎料不同时刻的流动速度分布。在等内径集磁器情况下, 由于外管底部与钎料距离最近, 最先发生碰撞; 另一方面, 又由于外管端部洛伦兹力最大, 首先发生变形并与钎料碰撞, 因此钎料的剪切流动最先出现在端部及

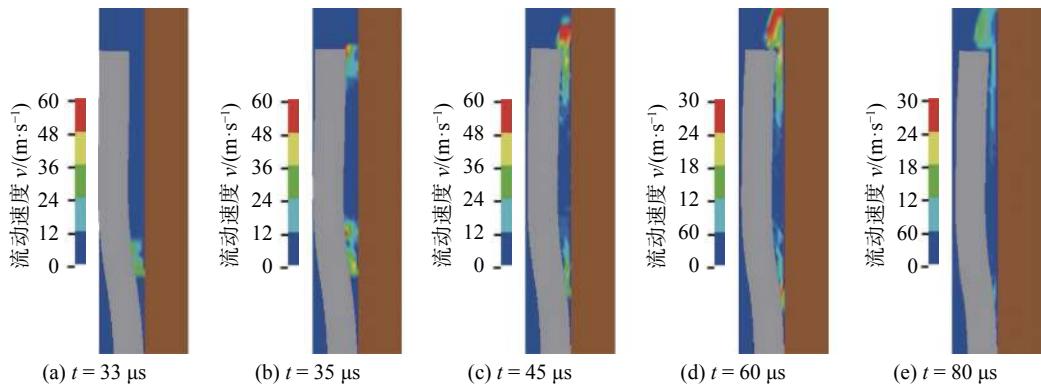


图 8 采用等内径集磁器时钎料剪切流动速度

Fig. 8 Shear flow velocity of solder with constant diameter field shaper. (a)  $t = 33 \mu\text{s}$ ; (b)  $t = 35 \mu\text{s}$ ; (c)  $t = 45 \mu\text{s}$ ; (d)  $t = 60 \mu\text{s}$ ; (e)  $t = 80 \mu\text{s}$

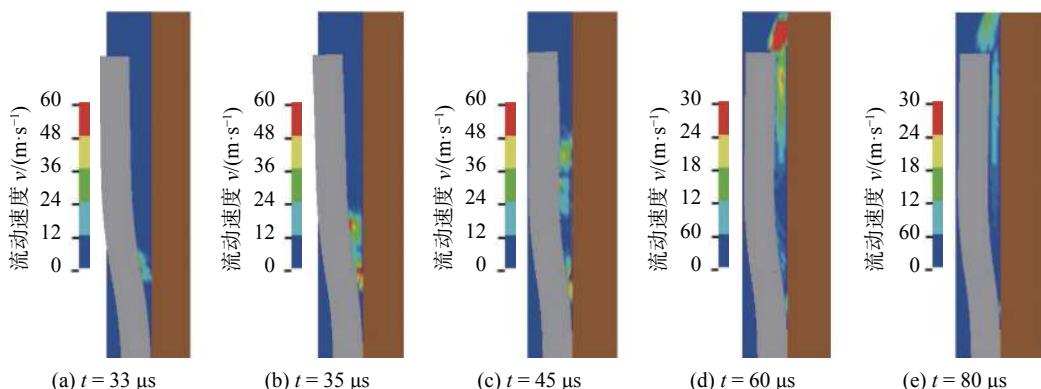


图 9 采用带锥角集磁器时钎料剪切流动速度

Fig. 9 Shear flow velocity of solder with cone angle field shaper. (a)  $t = 33 \mu\text{s}$ ; (b)  $t = 35 \mu\text{s}$ ; (c)  $t = 45 \mu\text{s}$ ; (d)  $t = 60 \mu\text{s}$ ; (e)  $t = 80 \mu\text{s}$

底部区域。而端部及底部的钎料沿轴向向两侧流动, 阻碍了中部钎料的剪切流动, 因此流速最低。可以发现, 这种外管的变形模式对搭接区域内钎料的均匀剪切流动是不利的。采用带锥角集磁器时, 外管由底部至端部依次与半固态钎料进行碰撞, 因此钎料也从底部至端部依次产生剪切流动。

钎料剪切应力的大小决定了基体氧化膜能否有效去除, 图 10 为不同位置处钎料的最大剪切应力。由图 10 可知, 采用带锥角集磁器后, 搭接区域中部钎料所受剪切应力幅值相对提高, 分布更趋均匀, 有利于去除该区域的氧化膜, 保证界面有效结合。

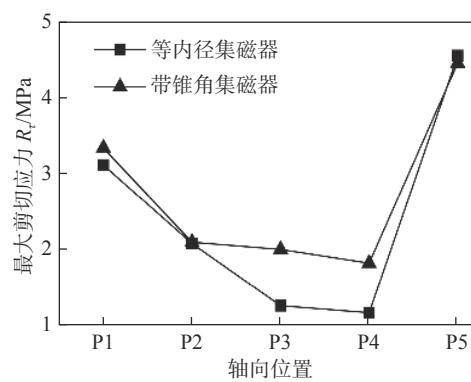


图 10 钎料剪切应力分布曲线  
Fig. 10 Shear stress curves of solder

## 2.2 试验验证

分别采用等内径集磁器和带锥角集磁器对 Cu/Al 管进行了磁脉冲辅助半固态钎焊试验。Cu/Al 钎焊接头如图 11 所示, 在外管的冲击作用下, 部分半固态钎料被挤出。

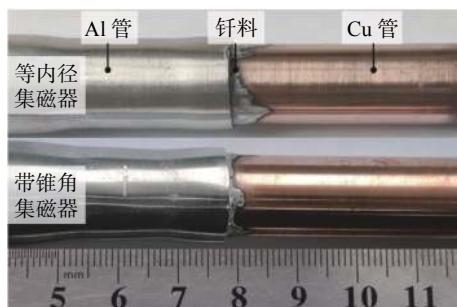


图 11 Cu/Al 钎焊接头  
Fig. 11 Cu/Al brazing joint

图 12 为采用两种集磁器时钎焊接头中部区域的显微组织。从图 12 可以看到, 最明显的变化是钎缝区的晶粒形状、尺寸和 Cu 侧界面的形貌。钎缝区主要由深灰色颗粒和颗粒周围的亮白色相组成。在等内径集磁器情况下, 晶粒呈玫瑰状且较为粗大。对于带锥角集磁器, 晶粒更加细小并且接近球形; 晶粒尺寸由 38.12 μm 减小到 22.18 μm, 形状因子由 0.67 增大到 0.87。这是由于在带锥角集磁器

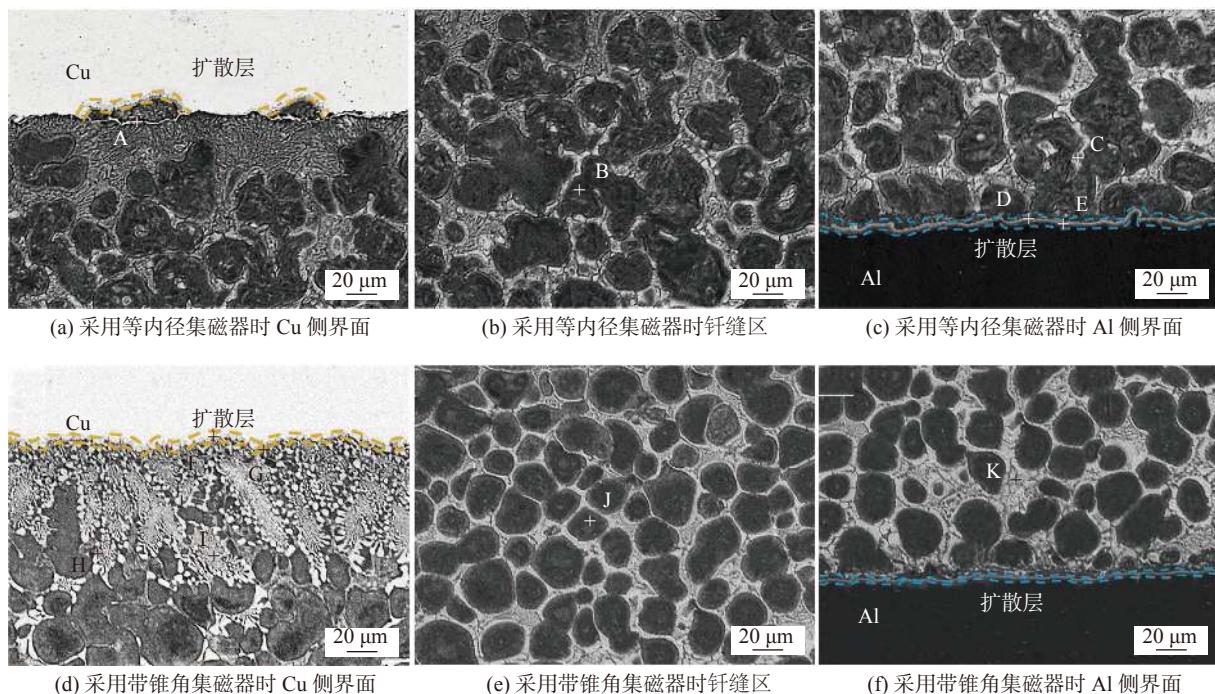


图 12 Cu/Al 钎焊接头显微组织

Fig. 12 Microstructure of Cu/Al brazing joint. (a) interface of Cu side with constant diameter field shaper; (b) brazed seam with constant diameter field shaper; (c) interface of Al side with constant diameter field shaper; (d) interface of Cu side with cone angle field shaper; (e) brazed seam with cone angle field shaper; (f) interface of Al side with cone angle field shaper

条件下,钎料所受的剪切应力更大,剪切流变速率更高,钎料的剪切流动更充分、更均匀,从而使晶粒得到更为充分、更均匀地剪切细化。由表3可知,图中深灰色颗粒为 $\alpha$ -Al,亮白色相为Zn-Al共晶相。

表3 图12中所标记点的EDS结果  
Table 3 EDS results of points marked in Fig. 12

| 位置 | Al    | Cu    | Zn    | O     | 可能的相                   |
|----|-------|-------|-------|-------|------------------------|
| A  | 31.99 | 19.56 | 25.84 | 22.61 | 氧化物                    |
| B  | 82.28 | —     | 17.72 | —     | $\alpha$ -Al           |
| C  | 15.58 | 6.44  | 77.98 | —     | $\alpha$ -Al + Zn-Al共晶 |
| D  | 83.28 | 0.78  | 15.94 | —     | $\alpha$ -Al           |
| E  | 79.16 | 0.44  | 20.40 | —     | $\alpha$ -Al           |
| F  | 19.20 | 46.93 | 33.87 | —     | 扩散层                    |
| G  | 18.59 | 35.33 | 46.08 | —     | 扩散层                    |
| H  | 51.88 | 19.62 | 28.50 | —     | $\alpha$ -Al + Zn-Al共晶 |
| I  | 3.92  | 22.79 | 73.29 | —     | CuZn <sub>5</sub>      |
| J  | 77.80 | 1.67  | 20.54 | —     | $\alpha$ -Al           |
| K  | 26.92 | 5.49  | 67.59 | —     | $\alpha$ -Al + Zn-Al共晶 |

对于Cu侧界面,在等内径集磁器条件下,发现了不连续的扩散层,缺陷处(点A)的EDS结果显示,O元素原子分数为22.61%,表明界面处仍存在氧化物,氧化膜去除不充分,从而影响了界面的冶金结合。而在带锥角集磁器条件下,Cu侧界面扩散层连续,对应的EDS结果(点F,G)显示,界面处不存在氧化物,表明氧化膜去除充分,实现了良好的冶金结合。此外,网状的CuZn<sub>5</sub>相附着在扩散层上,并向钎缝区生长。Ji等人<sup>[22]</sup>的研究表明,这种结构有利于提高界面连接的可靠性。对于Al侧界面,在等内径集磁器和带锥角集磁器情况下均形成了连续扩散层,对应的EDS结果(点D,E)显示,氧化膜去除充分,实现了良好冶金结合。

出现上述界面连接结果的原因:内管(Cu管)没有径向变形,其表面氧化膜的去除完全靠钎料的冲刷作用,当钎料剪切应力幅值不够大时,氧化膜不能充分去除,从而导致界面存在连接缺陷;而外管(Al管)在钎焊过程中会径向高速挤压钎料,氧化膜的去除不仅依靠钎料的轴向冲刷,其与钎料的径向高速撞击也会发挥作用,故即使在等内径集磁器条件下,径向撞击及轴向剪切的综合作用已能完全去除外管表面的氧化膜,因此,两种集磁器条件下,Al侧界面均能实现良好的冶金结合。

剪切试验结果表明,在其它焊接工艺参数相同的条件下,采用等内径集磁器所获得的钎焊接头抗剪强度为46 MPa,而采用带锥角集磁器时,抗剪强度为58 MPa,提高了26%。这是因为在带锥角集磁器条件下,钎料与基体界面的冶金结合得到了改善,钎缝组织进一步细化。此外,近球状晶粒可以降低应力集中<sup>[23]</sup>。在这些因素的综合作用下,钎焊接头的抗剪强度得到了提高。

文中仅针对两种特定的集磁器(等内径和带锥角),讨论其磁脉冲辅助半固态钎焊过程中管件的变形行为和钎料的剪切流变行为,阐明了集磁器结构变化对界面连接质量、焊缝组织及接头性能产生影响的原因。后续研究中,需系统考察集磁器结构参数对接头连接质量、组织性能的影响规律,并以界面连接质量和接头性能为目标,对集磁器结构参数进行优化,并最终为该新工艺的推广应用提供集磁器优化设计的依据与方法。

### 3 结论

(1) 对管件磁脉冲辅助半固态钎焊工艺,等内径集磁器由于其电磁力分布不能满足无钎剂钎焊对管件变形与钎料剪切流变的协调性需求,导致搭接区域内去膜效果存在差异,在去膜不充分的局部区域,易产生界面连接缺陷。

(2) 简化的随形集磁器结构(带锥角集磁器)能够更好地满足磁脉冲辅助半固态钎焊对管件变形与钎料剪切流变的协调性需求,钎料剪切流变速率及去膜效果相对更为均匀,避免界面连接缺陷并细化搭接区域中部的钎缝组织,有效地提高界面连接质量并改善钎焊接头组织性能。

### 参考文献

- [1] 周相龙. 铝/铜异种金属连接工艺及性能研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.  
Zhou Xianglong. Study on process and properties of joining Al/Cu dissimilar metals[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
- [2] Su H, Huang L, Li J, et al. Two-step electromagnetic forming: A new forming approach to local features of large-size sheet metal parts[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2017, 124: 99 – 116.
- [3] Zhang W, Shen Y, Yan Y, et al. Dissimilar friction stir welding of

- 6061 Al to T2 pure Cu adopting tooth-shaped joint configuration: microstructure and mechanical properties[J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 690: 355 – 364.
- [4] Xia C, Li Y, Puchkov U, et al. Crack analysis near vacuum brazing interface of Cu/Al dissimilar materials using Al-Si brazing alloy[J]. Mater Science Journal, 2009, 25(3): 383 – 387.
- [5] 武凯, 贾贺鹏, 孙宇, 等. 搅拌摩擦焊技术的研究进展 [J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(6): 1 – 9.  
Wu Kai, Jia Hepeng, Sun Yu, et al. Research progress of friction stir welding technology[J]. Machine Building & Automation, 2020, 49(6): 1 – 9.
- [6] Lee W B, Bang K S, Jung S B. Effects of intermetallic compound on the electrical and mechanical properties of friction welded Cu/Al bimetallic joints during annealing[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2005, 390(1): 212 – 219.
- [7] Lueg-Althoff J, Bellmann J, Hahn M, et al. Joining dissimilar thin-walled tubes by magnetic pulse welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 279: 116562.
- [8] Meng Z, Gong M, Guo W, et al. Numerical simulation of the joining interface of dissimilar metals in vaporizing foil actuator welding: Forming mechanism and factors[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 60: 654 – 665.
- [9] Raoelson R N, Sapanathan T, Buiron N, et al. Magnetic pulse welding of Al/Al and Al/Cu metal pairs: Consequences of the dissimilar combination on the interfacial behavior during the welding process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2015, 20: 112 – 127.
- [10] Xu W, Sun X. Numerical investigation of electromagnetic pulse welded interfaces between dissimilar metals[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2016, 21(7): 592 – 599.
- [11] Pourabbas M, Abdollah-Zadeh A, Sarvari M, et al. Investigation of structural and mechanical properties of magnetic pulse welded dissimilar aluminum alloys[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 37: 292 – 304.
- [12] Wu X, Shang J. An investigation of magnetic pulse welding of Al/Cu and interface characterization[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014, 136(5): 051002.
- [13] Niu Z, Ye Z, Huang J, et al. Interfacial structure and properties of Cu/Al joints brazed with Zn-Al filler metals[J]. Materials Characterization, 2018, 138: 78 – 88.
- [14] Ji F, Xue S B, Dai W. Reliability studies of Cu/Al joints brazed with Zn-Al-Ce filler metals[J]. Materials and Design, 2012, 42: 156–163.
- [15] Xiao Y, Ji H, Li M, et al. Ultrasound-assisted brazing of Cu/Al dissimilar metals using a Zn-3Al filler metal[J]. Materials & Design, 2013, 52(24): 740 – 747.
- [16] Wei Y, Sun F, Tan S, et al. Study on microstructure and performance of transient liquid phase bonding of Cu/Al with Al-based interlayers[J]. Vacuum, 2018, 154: 18 – 24.
- [17] Shi L, Yan J, Han Y, et al. Behaviors of oxide layer at interface between semi-solid filler metal and aluminum matrix composites during vibration[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2011, 27(8): 746 – 752.
- [18] 黄尚宇, 黄海川, 雷雨, 等. 一种半固态无钎剂辅助的异种金属钎焊装置及方法: 中国, 201811132724. 6[P]. 2018-09-27.  
Huang Shangyu, Huang Haichuan, Lei Yu, et al. A semi-solid dissimilar metal brazing device and method without flux assistance: China Patent, 201811132724. 6[P]. 2018-09-27.
- [19] 黄海川, 黄尚宇, 李清宁, 等. 放电电压对 Cu/Al 管磁脉冲-半固态复合辅助钎焊质量的影响 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27(2): 60 – 67.  
Huang Haichuan, Huang Shangyu, Li Qingning, et al. Effect of discharge voltage on quality of Cu/Al tube magnetic pulse-semisolid hybrid assisted brazing[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(2): 60 – 67.
- [20] Fan Z S, Yu H P, Li C F. Plastic deformation behavior of bi-metallic tubes during magnetic pulse cladding: FE analysis and experiments[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229: 230 – 243.
- [21] 王振东, 黄尚宇, 李佳琪, 等. Zn-Al 钎料固相率及组分对 Cu/Al 管磁脉冲-半固态复合辅助钎焊接头质量的影响初探 [J]. 材料科学与工艺, 2020, 28(4): 1–7.  
Wang Zhendong, Huang Shangyu, Li Jiaqi, et al. Preliminary study on the influence of Zn-Al solder solid phase rate and composition on the quality of magnetic pulse-semisolid hybrid assisted soldering of Cu/Al tubes[J]. Materials Science and Technology, 2020, 28(4): 1–7.
- [22] Ji H, Chen H, Li M. Overwhelming reaction enhanced by ultrasonics during brazing of alumina to copper in air by Zn-14Al hypereutectic filler[J]. Ultrason Sonochem, 2017, 35: 61 – 71.
- [23] Alhawari K S, Omar M Z, Ghazali M J, et al. Microstructural evolution during semisolid processing of Al-Si-Cu alloy with different Mg contents[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27: 1483 – 1497.

**第一作者:** 邓凌波, 硕士研究生; 主要研究方向为材料成形新技术; Email: lbdeng@whut.edu.cn.

**通信作者:** 杨梅, 博士, 副教授; Email: gaolym@163.com.

(编辑: 杨婉春)