

# 焊接温度对 Cu/Al 真空扩散焊接接头组织与性能的影响

邵文杰<sup>1,2</sup>, 丁云龙<sup>1,2</sup>, 刘冰洋<sup>1,2</sup>, 庄志国<sup>1,2</sup>, 韩冰<sup>1,2</sup>

(1. 辽宁科技大学机械能与自动化学院, 辽宁鞍山 114051; 2. 辽宁省复杂工件表面特种加工重点实验室, 辽宁鞍山 114051)

**摘要:** 采用真空扩散焊接技术对铜/铝异种材料进行焊接, 利用扫描电镜(SEM)、能谱分析仪(EDS)、万能力学试验机、电阻率测试仪等对焊接接头界面的显微组织、物相成分和物理性能进行研究。结果表明: Cu/Al 焊接接头界面金属间化合物的种类和厚度与焊接温度有关, 界面处生成的物相有  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu、 $\eta$ -AlCu、 $\delta$ -Al<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub> 和  $\gamma$ -Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub>; 接头的抗剪切强度随焊接温度的升高呈先升高后降低的趋势, 当焊接温度为 530 °C 时, 抗剪切强度最大, 为 16.5 MPa; 接头断裂主要发生在  $\theta$  相附近, 部分发生于  $\gamma$  相和  $\eta$  相; 接头的电阻率与界面金属间化合物层的物相、厚度和均匀性密切相关, 且随焊接温度的升高而降低, 当焊接温度为 550 °C 时, 接头的最低电阻率, 为  $2.4 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

**关键词:** 铜/铝异种焊接; 真空扩散焊; 显微组织; 物相成分; 电阻率

**中图分类号:** TG453 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6264(2025)04-0218-08

## Effect of welding temperature on microstructure and properties of Cu/Al vacuum diffusion welded joints

SHAO Wen-jie<sup>1,2</sup>, DING Yun-long<sup>1,2</sup>, LIU Bing-yang<sup>1,2</sup>, ZHUANG Zhi-guo<sup>1,2</sup>, HAN Bing<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China; 2. Liaoning Key Laboratory of Special Machining for Complex Workpiece Surface, Anshan 114051, China)

**Abstract:** Vacuum diffusion welding technology was used to weld copper/aluminum dissimilar materials. Microstructure, phase composition and physical properties of the welded joint interface were studied by means of scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), universal mechanical testing machine and resistivity tester. The results show that the type and thickness of intermetallic compounds at the Cu/Al welding joint interface are related to the welding temperature, and the phases generated at the interface include  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu,  $\eta$ -AlCu,  $\delta$ -Al<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub>. The shear strength of the joints shows a trend of first increasing and then decreasing with the increase of welding temperature, and when the welding temperature is 530 °C, the shear strength is the maximum, which is 16.5 MPa. The fracture of the welded joints mainly occurs near the  $\theta$  phase, with some occurring in the  $\gamma$  and  $\eta$  phases. The resistivity of the joint is closely related to the phase, thickness and uniformity of the intermetallic compound layer at the interface, and decreases with the increase of welding temperature. When the welding temperature is 550 °C, the resistivity of the joint is the lowest, which is  $2.4 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ .

**Keywords:** Cu/Al dissimilar welding; vacuum diffusion welding; microstructure; phase composition; resistivity

铜因其优异的电导性、热导性、延展性和良好的力学性能,而被广泛应用于电缆、电器、新能源和电子等领域<sup>[1-4]</sup>。然而,随着我国工业产业的迅速

发展,对铜的大量消耗促使铜价快速上升,且铜资源在我国属于严重短缺的9种矿产之一,十分依赖海外进口<sup>[5-6]</sup>。为了降低生产成本,寻找其他金属

收稿日期: 2024-05-16 修订日期: 2024-06-27

基金项目: 国家自然科学基金(51775258);辽宁省科技厅博士启动经费(2021-BS-241)

作者简介: 邵文杰(2001—),男,硕士研究生,主要从事异种金属真空扩散焊技术研究, E-mail: 2872709207@qq.com。

通信作者: 丁云龙(1988—),男,副教授,博士,主要从事异种金属焊接技术研究, E-mail: dylustl@163.com。

引用格式: 邵文杰, 丁云龙, 刘冰洋, 等. 焊接温度对 Cu/Al 真空扩散焊接接头组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2025, 46(4): 218-225.  
SHAO Wen-jie, DING Yun-long, LIU Bing-yang, et al. Effect of welding temperature on microstructure and properties of Cu/Al vacuum diffusion welded joints[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2025, 46(4): 218-225.

代替铜成当今的研究热点。Al 作为地壳中含量最多的金属元素,由于其成本和密度较低,并具有与铜相似的导电性和导热性,故铝是铜的最佳代替品之一<sup>[7]</sup>。因此,以 Al 代 Cu 不仅对经济化和轻量化的发展具有重要意义,还为产品设计和制造提供了更多的选择<sup>[8-9]</sup>。但在实际的生产应用中,因为铜铝两种金属的熔点、融化潜热和线膨胀系数等物理性能差异较大,实现铜与铝的可靠连接仍存在诸多问题<sup>[10-12]</sup>。特别是铜和铝合金具有很强的负混合焓,容易形成脆性 Cu-Al 金属间化合物(IMCs)<sup>[13-15]</sup>。这些金属间化合物具有非金属共价键,易碎且电阻高,严重影响接头的质量,故形成良好的界面结合是评价 Cu/Al 异种材料接头质量的重要指标<sup>[16]</sup>。

目前连接铜/铝的方法有熔化焊<sup>[17]</sup>、钎焊<sup>[18]</sup>、电阻焊<sup>[19]</sup>、超声焊<sup>[20]</sup>、扩散焊<sup>[21]</sup>和摩擦焊<sup>[22-23]</sup>等。铜铝融化焊时,由于两者的熔点相差较大(相差约

423 ℃),往往铝融化了而铜还处于固态,易形成未融合和夹杂;铜铝钎焊时需要配合钎剂使用,这些钎剂往往具有较强的腐蚀性,导致接头质量下降;铜铝电阻焊的生产效率高,但设备复杂,功率大;超声波焊接的金属件不能太厚、焊点位不能太大、需要施加较大的压力;摩擦焊靠工件旋转摩擦实现,易实现机械化和自动化,且操作简单,但其对非圆截面的工件焊接较困难。针对以上问题,真空扩散焊是实现铜铝可靠连接的有效方法。在真空环境和某一温度下,通过一定的保温时间使母材的原子相互扩散,实现铜铝异种的可靠连接。本文研究了不同焊接温度对 Cu/Al 真空扩散焊接接头的组织和性能的影响。

## 1 试验材料与方法

试验所用材料为 T2 紫铜与 Al1060 铝板,两者尺寸均为 90 mm×20 mm×3 mm,化学成分见表 1。

表 1 T2 紫铜和 Al1060 铝合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of T2 copper and 1060 aluminum alloy (mass fraction, %)

	Cu	Al	Zn	S	Mg	Mn	O	Fe	As	Pb	Si	Zn	Ni
T2 Cu	Bal.	-	0.005	0.005	-	-	0.060	0.005	0.002	0.005	-	0.005	-
Al1060	-	Bal.	0.002	-	0.050	0.100	0.060	-	-	-	0.012	0.250	0.002

焊前采用不同粒度的 SiC 砂纸(P400、P800、P1200)对焊接面进行打磨抛光,以去除母材表面的附着物和氧化膜。焊接前,将抛光后的试样放入丙醇中进行超声波清洗并风干。将处理后的试样在夹具中固定后装入 GF14Q-III 型箱式气氛炉中进行扩散连接,其工艺曲线如图 1。

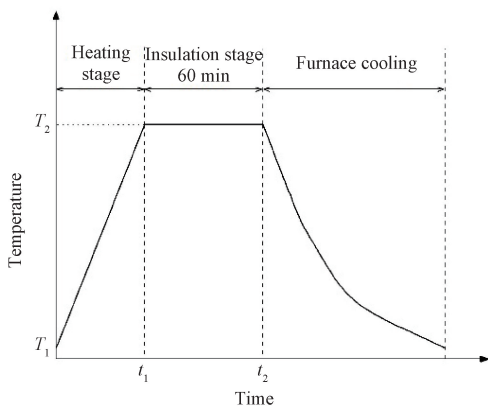


图 1 焊接工艺曲线

Fig. 1 Welding process curve

室温下( $T_1 = 25\text{ }^\circ\text{C}$ )经过一段时间( $t_1$ )的升温,炉内温度达到预设温度  $T_2$ ,为探讨焊接温度对接头

性能的影响,选择 5 个不同的温度 T2(510、520、530、540 和 550 ℃),炉内真空度为  $1 \times 10^{-2}$  Pa,升温速率为  $12\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ,保温结束后随炉冷却。根据文献[24-25]和前期尝试性实验发现,保温时间过短会导致铜铝原子相互扩散不充分,接头组织均匀性较差;保温时间过长会导致接头组织晶粒长大且脆性金属间化合物层厚度增加。因此,综合考虑焊接质量和效率,保温时间选定为 60 min。

扩散焊接完成后使用线切割机床对试样加工并镶样。利用扫描电镜(SEM)和能谱分析仪(EDS)研究接头的显微组织成分及反应层金属间化合物的物相种类;根据焊接接头拉伸试验方法(GB/T 2651—2008)标准<sup>[26]</sup>,使用万能力学试验机对接头进行拉伸试验,加载速率为  $0.5\text{ mm}/\text{min}$ ;采用 ST2263 型四探针导体/半导体电阻率测试仪对接头的电阻率进行检测。

## 2 结果及分析

### 2.1 反应层显微组织

根据 Cu-Al 二元相图<sup>[27]</sup>(图 2)可知,在真空扩散焊过程中可能会生成以下几种金属间化合物: $\theta$ -

$\text{Al}_2\text{Cu}$ 、 $\eta\text{-AlCu}$ 、 $\zeta\text{-Al}_3\text{Cu}_4$ 、 $\delta\text{-Al}_2\text{Cu}_3$ 、 $\gamma\text{-Al}_4\text{Cu}_9$ 。

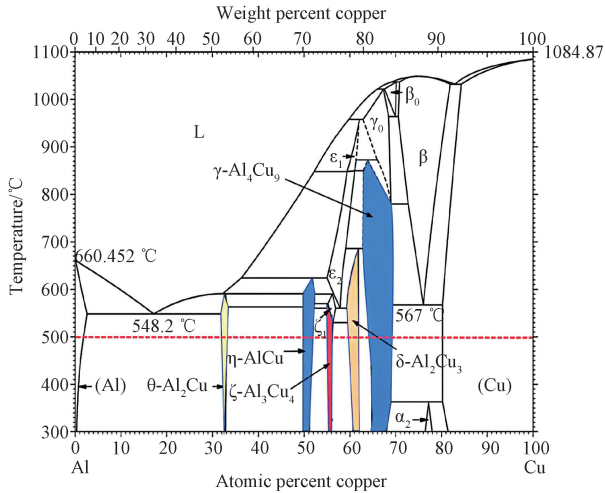


图2 Al-Cu 二元相图<sup>[27]</sup>

Fig. 2 Al-Cu binary phase diagram<sup>[27]</sup>

图3为在不同焊接温度下的Cu/Al扩散焊接接头界面的SEM形貌。从图3可以明显看出接头界面形成了Cu-Al金属间化合物层,为了明确接头界面组织物相成分,对图3中不同点进行EDS点扫描分析,扫描结果见表2。当焊接温度为510 °C时,Cu/Al扩散焊接接头中焊缝界面区显微组织如图3(a)所示。从图3(a)中可以看出,接头焊缝中的界面反应层有三层且呈孤岛状地分布在界面上,厚度约为17.5 μm。根据EDS分析结果(表2),A、B、C 3点所处的界面金属化合物层的物相分别是 $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$ 、

$\eta\text{-AlCu}$ 、 $\gamma\text{-Al}_4\text{Cu}_9$ 。该温度下的金属间化合物层之所以呈孤岛状分布而不连续均匀分布,是由于焊接温度较低,扩散系数较低,导致原子间扩散不充分,也有铜铝母材表面不平整使得接触充分的区域存在先生成新相的可能性。另外,可以观测到接头界面存在少量的微孔洞,这些微孔洞的形成主要是由于母材元素的不平衡扩散,且界面中的杂质也是造成孔洞形成的原因<sup>[28]</sup>。当焊接温度上升至520 °C时,界面处岛状结构的金属间化合物演变成了均匀分布的三层结构的金属间化合物层,厚度约为20.4 μm。随着焊接温度的升高,扩散系数增加,界面原子扩散能力增强,反应层厚度进一步增加。当焊接温度为540 °C时,反应层中有一条较窄的新相析出,由三层结构演变为四层,且基体和各反应层之间的界面都呈现出轻微的锯齿状。结合图3(d)各点的EDS分析(表2)结果,D、E、G 3点与A、B、C 3点处铜铝原子分数比相近,其点位处的金属间化合物的物相相同,而处在E点和G点中间的F点(Cu 62.13 at%, Al 37.87 at%)处的化合物为新形成的相,其物相为 $\delta\text{-Al}_2\text{Cu}_3$ 。当焊接温度达到550 °C时,靠近铝侧界面的组织形貌发生巨大变化,出现大量呈现出黑色、浅灰色大块组织或条状组织,根据图3(e)中H、I点的EDS分析(表2)结果,黑色组织和浅灰色大块组织是 $\alpha\text{-Al}+\text{Al}_2\text{Cu}$ 共晶相。根据Cu-Al二元合金相图可知,该现象的产生是由于焊接温度达到了Cu-Al共晶温度,界面产生部分液相,凝固时Al侧界面同时析出 $\alpha\text{-Al}$ 固溶体+ $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$ 共晶相。

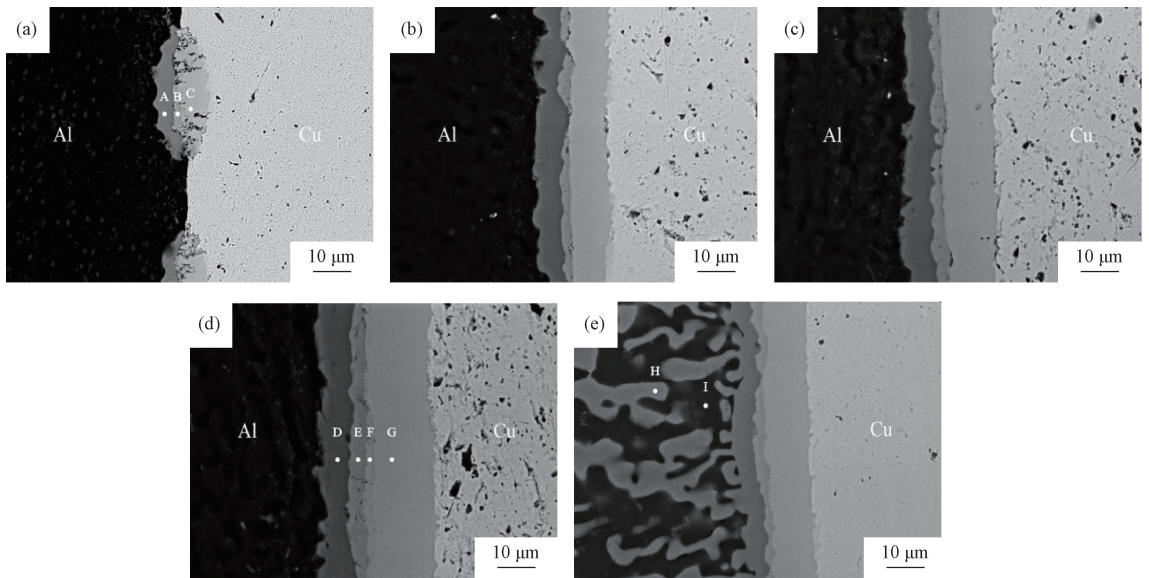


图3 不同焊接温度下Cu/Al扩散焊接接头界面的SEM形貌 (a) 510 °C; (b) 520 °C; (c) 530 °C; (d) 540 °C; (e) 550 °C

Fig. 3 SEM morphology of the Cu/Al diffusion welded joint interface at different welding temperatures

(a) 510 °C; (b) 520 °C; (c) 530 °C; (d) 540 °C; (e) 550 °C

表2 图3中 Cu/Al 扩散层各点的 EDS 分析结果  
Table 2 EDS analysis results of various points in the Cu/Al diffusion layer in Fig. 3

Point	Al	Cu	Possible phase
A	68.00	32.00	$\text{Al}_2\text{Cu}$
B	50.10	49.90	$\text{AlCu}$
C	31.65	68.35	$\text{Al}_4\text{Cu}_9$
D	63.80	36.20	$\text{Al}_2\text{Cu}$
E	46.02	53.98	$\text{AlCu}$
F	37.87	62.13	$\text{Al}_2\text{Cu}_3$
G	33.61	66.39	$\text{Al}_4\text{Cu}_9$
H	64.96	35.04	$\text{Al}_2\text{Cu}$
I	90.86	9.14	$\alpha\text{-Al}$

图4为 Cu/Al 真空扩散反应层的演变过程示意图。高温作用赋予铜铝原子足够的激活能,在原子浓

度差异的驱动下原子开始自发向焊接界面扩散。随着原子扩散不断进行并达到固溶度极限,率先达到某物相原子分数成分点的相在界面中首先生成。故 Al 侧界面率先生成  $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$ , Cu 侧界面率先生成  $\gamma\text{-Al}_4\text{Cu}_9$ 。这是因为在 Al 侧界面 Al 原子的浓度高;铜侧铜原子浓度高。随着铜铝原子不断相互扩散,在  $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$  相和  $\gamma\text{-Al}_4\text{Cu}_9$  相之间生成  $\eta\text{-AlCu}$  相。随着原子扩散的进一步进行,紧靠着  $\gamma\text{-Al}_4\text{Cu}_9$  相生成了  $\delta\text{-Al}_2\text{Cu}_3$  相。从图3可知铜侧金属间化合物层较厚,这是由于铜原子在向 Al 侧界面扩散时具有较小的激活能,铜原子向 Al 侧界面扩散比 Al 原子向铜侧界面扩散要容易得多<sup>[29]</sup>。

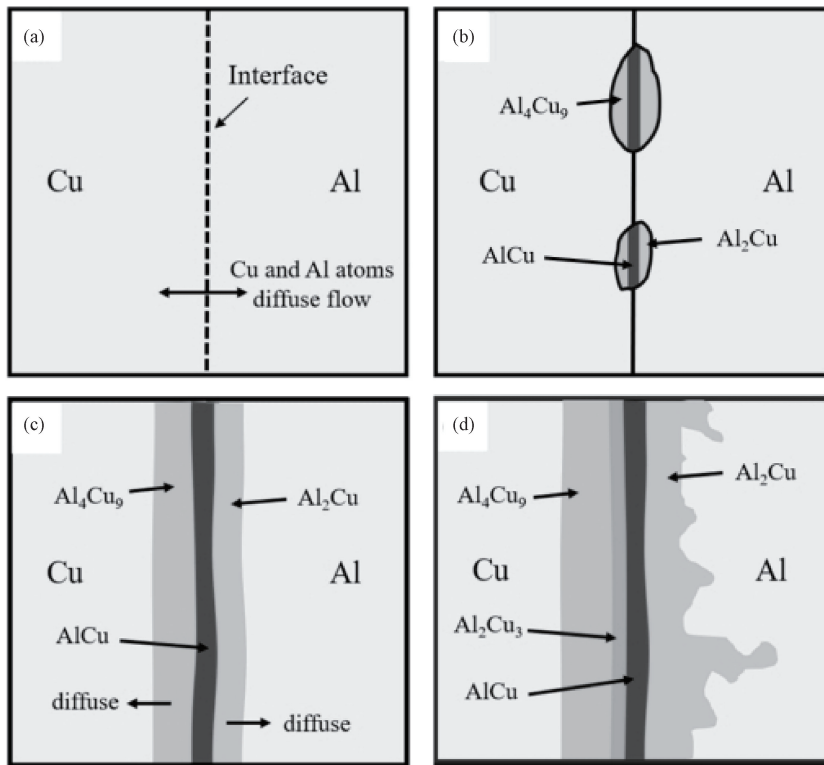


图4 接头反应层的演变过程示意图 (a) 扩散反应开始前; (b) 510 °C×60 min; (c) 530 °C×60 min; (d) 550 °C×60 min

Fig. 4 Schematic diagram of the evolution process of the joint reaction layer

(a) before the diffusion reaction begins; (b) 510 °C×60 min; (c) 530 °C×60 min; (d) 550 °C×60 min

## 2.2 接头力学性能

图5和图6分别为 Cu/Al 扩散焊接接头在不同焊接温度下的切应力-应变曲线图以及最大剪切强度变化图。

由图6可知,当焊接温度为 510~530 °C 时, Cu/Al 扩散焊接接头的最大剪切强度随焊接温度的升高而升高,最大剪切强度为 16.5 MPa。因为扩散过程是热激活过程,在一定的保温时间内随着焊接温

度的升高,原子的激活能和扩散系数越大,原子相互扩散越充分,界面组织更加均匀,因此接头的剪切强度越高。所以随着焊接温度的升高,铜铝原子获得更多的能量进行跃迁,更多的原子发生相互扩散且扩散距离增加,使接头反应层厚度增大和连接界面成分均匀化,从而改善 Cu/Al 接头的力学性能。但当焊接温度超过 530 °C 时,接头的最大剪切强度随温度的升高而减小。这主要是由于焊接温度的升高,使得脆性金

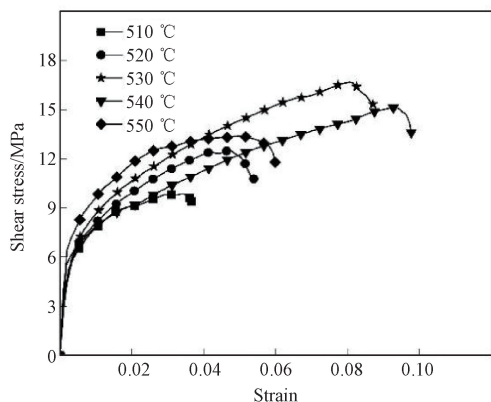


图5 不同焊接温度下 Cu/Al 真空扩散焊接接头的切应力-应变曲线

Fig. 5 Shear stress-strain curves of the Cu/Al vacuum diffusion welded joints at different welding temperatures

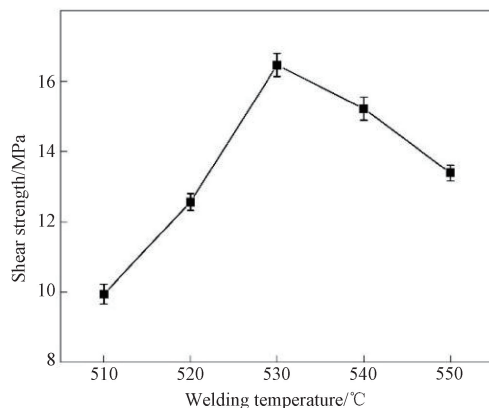


图6 不同焊接温度下 Cu/Al 真空扩散焊接接头的最大剪切强度变化

Fig. 6 Maximum shear strength of the Cu/Al vacuum diffusion welded joints at different welding temperatures

属间化合物过量生长,界面晶粒变得粗大,从而使接头的最大剪切强度下降。

### 2.3 扩散反应层断面形貌

图7为焊接温度为510、530和550 °C时获得的Cu/Al扩散焊接接头的剪切断面形貌。由图7(a)和7(d)可知,焊接温度510 °C的Al侧断面和Cu侧断面有较多光滑曲面的突起和明显的撕裂脊,部分区域

分布微小凹坑,呈现准解理断裂特征。图7(b)和7(e)为焊接温度达到530 °C时的Al侧和Cu侧断面形貌,断面宏观较为光滑,存在明显的解理台阶,表现出解理断裂特征。如图7(c)和7(f)所示,当焊接温度上升到550 °C时,在高温作用下母材晶粒粗化严重,断面表面形貌剧变,大量凹坑和小而光滑的台阶面交错分布,表现为沿晶断裂特征。

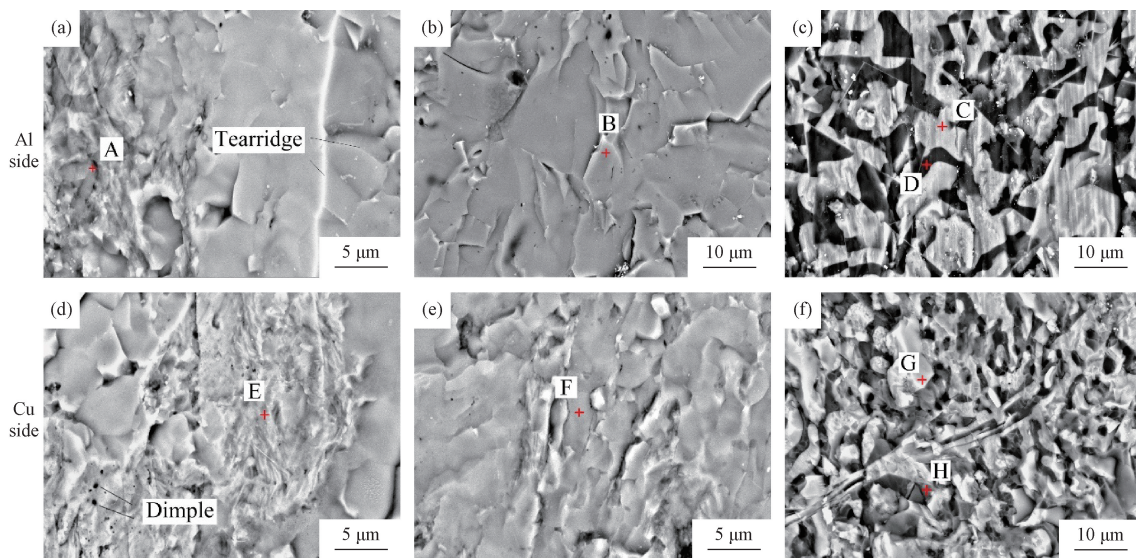


图7 不同焊接温度下接头的剪切断面形貌 (a,d) 510 °C; (b,e) 530 °C; (c,f) 550 °C

Fig. 7 Shear fracture surface morphology of the joints at different welding temperatures

(a, d) 510 °C; (b, e) 530 °C; (c, f) 550 °C

为了明确断口的具体位置,结合EDS点扫描结果进行分析,如表3所示。当焊接温度为510 °C时,根据A点和E点的扫描结果(见表3),推测断裂发生在AlCu层和Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub>层之间。当焊接温度为

530 °C时,根据扫描结果推测断裂发生在靠近铝基体一侧的Al<sub>2</sub>Cu和AlCu金属间化合物层。当焊接温度上升到550 °C时,根据图7(c)和7(f)中各点的元素含量(见表3)可知,断裂发生在铝侧固溶体区域

表3 图7中各点的EDS元素成分分析结果(原子分数,%)

Table 3 EDS elemental composition analysis results for each point in Fig. 7 (at%)

Point	Al	Cu	Possible phase
A	51.30	48.70	AlCu
B	64.30	35.70	Al <sub>2</sub> Cu
C	72.80	27.20	Al <sub>2</sub> Cu
D	95.70	4.30	α-Al
E	37.30	62.70	Al <sub>4</sub> Cu <sub>9</sub>
F	48.70	51.30	AlCu
G	73.30	26.70	Al <sub>2</sub> Cu
H	95.60	4.40	α-Al

(Al<sub>2</sub>Cu 共晶组织+α-Al 固溶体)。经研究分析,焊接温度的升高会促进 Al<sub>2</sub>Cu 脆性相快速生长,厚度变大,因此断裂位置主要处于 Al<sub>2</sub>Cu 相附近,部分发生于 Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub> 相和 AlCu 相。综合上述分析,接头抗剪切强度和断口位置分布均与金属间化合物的成分与分布有关,因此选择合适的焊接温度,能有效提高接头的力学性能。

## 2.4 接头导电性

如图8所示为不同焊接温度下铜/铝接头的电阻率;表4为 Cu/Al 基体及相关金属间化合物的电阻率<sup>[30]</sup>。从图8可知,当焊接温度为 510 °C 时,铜铝扩散焊接接头有最大电阻率,为  $2.8 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ;当焊

接温度为 520 ~ 540 °C 时,接头电阻率基本一致,为  $2.6 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ;当焊接温度为 550 °C 时,接头电阻率下降至  $2.4 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 。随着焊接温度的升高,铜铝扩散焊接接头电阻率整体呈现出下降的趋势。这是由于焊接温度较低时,接头界面并未完全连接,存在部分间隙、空洞和裂纹,这极大影响了接头的导电性,导致电阻率较大。随着焊接温度的提升,铜铝原子扩散更加充分,形成连续的金属间化合物层,均匀致密的组织有利于提高接头导电性,从而降低铜铝扩散焊接接头的电阻率。

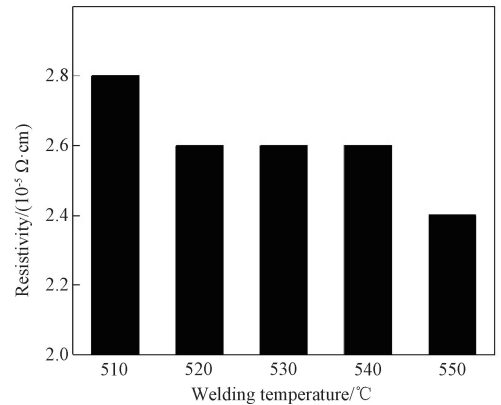


图8 不同焊接温度下接头的电阻率

Fig. 8 Resistivity of the joints at different welding temperatures

表4 Cu/Al 基体及相关金属间化合物的电阻率<sup>[30]</sup>Table 4 Resistivity of Cu and Al matrix and related intermetallic compounds<sup>[30]</sup>

Material/Compounds	T2	Al1060	Al <sub>2</sub> Cu	AlCu	Al <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub>	Al <sub>4</sub> Cu <sub>9</sub>
Resistivity/(Ω·cm)	$1.72 \times 10^{-6}$	$2.82 \times 10^{-6}$	$8 \times 10^{-6}$	$1.14 \times 10^{-5}$	$1.34 \times 10^{-5}$	$1.43 \times 10^{-5}$

## 3 结论

1) 采用真空扩散焊工艺成功连接 T2 紫铜/Al1060,在界面处生成由 Al<sub>2</sub>Cu、AlCu、Al<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>、Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub> 组成的扩散反应层,当焊接温度为 550 °C 时接头的电阻率最小,其值为  $2.4 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ;

2) 焊接温度对扩散反应层的物相种类和厚度有重要影响,焊接温度为 510 ~ 530 °C 时,界面为三层结

构,分别是 Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub> 层、AlCu 层、Al<sub>2</sub>Cu 层,当焊接温度为 540 °C 时,界面产生 Al<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub> 层,成为四层结构,反应层厚度随焊接温度的升高而逐渐增加;

3) 接头的抗剪切强度随焊接温度的升高呈现先上升后下降的趋势,在焊接温度 530 °C 时接头的抗剪切强度达到最大,为 16.5 MPa,接头断口形貌主要呈现为解理脆性断裂特征,断裂主要发生在脆性 Al<sub>2</sub>Cu 层,部分发生于 Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub> 层和 AlCu 层。

## 参 考 文 献

- [1] 彭胜,初铭强,张书彦,等. 铝铜接头的扩散焊连接研究现状[J]. 金属世界,2020(2):4-7.  
PENG Sheng, REN Ming-qiang, ZHANG Shu-yan, et al. Research status of diffusion welding in Al-Cu joints[J]. Metal World, 2020(2):4-7.
- [2] 李晗嫣,陈文革,刘洁. 热处理对 Cu-Al 复合界面显微组织结构与性能的影响[J]. 材料热处理学报,2017,38(7):63-70.  
LI Han-yan, CHEN Wen-ge, LIU Jie. Effect of heat treatment on microstructure and properties of Cu-Al composite interface[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2017, 38(7):63-70.

- [ 3 ] 张满. 铝/铜异种材料焊接的研究现状[J]. 热加工工艺, 2009, 38(9): 116-119.  
ZHANG Man. Present status of research on welding technique for Al/Cu dissimilar materials[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(9): 116-119.
- [ 4 ] 刘兰胜, 王龙凤. 铜铝异种金属焊接研究现状及展望[J]. 金属世界, 2023(1): 12-15.  
LIU Lan-sheng, WANG Long-feng. Research status and prospect of copper aluminum dissimilar metal welding[J]. Metal World, 2023(1): 12-15.
- [ 5 ] 杨玲. 我国九种矿产资源严重短缺[J]. 化工矿产地质, 2008(2): 102.  
YANG Ling. Nine of our country's mineral resources are seriously lacking[J]. Geology of Chemical Minerals, 2008(2): 102.
- [ 6 ] 黄伟军, 龚先政, 高峰, 等. 中国铜产品环境足迹评价和供应风险综合评估[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(5): 1541-1553.  
HUANG Wei-jun, GONG Xian-zheng, GAO Feng, et al. Copper products environmental footprint assessment and comprehensive supply risk evaluation for China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(5): 1541-1553.
- [ 7 ] Huang M L, Kang N, Zhou Q, et al. Effect of Ni content on mechanical properties and corrosion behavior of Al/Sn-9Zn-xNi/Cu joints[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2012, 28(9): 844-852.
- [ 8 ] Tang J X, Shi L, Wu C S, et al. Microstructure and mechanical properties of dissimilar double-side friction stir welds between medium-thick 6061-T6 aluminum and pure copper plates[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2022, 35(12): 2027-2046.
- [ 9 ] Zuo Y Y, Gong P, Ji S D, et al. Ultrasound-assisted friction stir transient liquid phase spot welded dissimilar copper-aluminum joint [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 62: 58-66.
- [ 10 ] Wang C, Ma L N, Ma X G, et al. Effect of annealing temperature on microstructure and tensile properties of copper/aluminum composite thin strip[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(3): 701-713.
- [ 11 ] 徐文虎, 杨瑾, 肖明, 等. 铝/铜异种金属熔钎焊研究现状[J]. 上海工程技术大学学报, 2021, 35(3): 215-228.  
XU Wen-hu, YANG Jin, XIAO Ming, et al. Research status of dissimilar welding-brazing of aluminum to copper[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2021, 35(3): 215-228.
- [ 12 ] 胡建岗. T2 紫铜 A060 铝激光焊组织和性能研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2022.  
HU Jian-gang. Study on microstructure and properties of T2 copper/1060 aluminum laser welding[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2022.
- [ 13 ] Kim H J, Lee J Y, Paik K W, et al. Effects of Cu/Al intermetallic compound (IMC) on copper wire and aluminum pad bondability [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2003, 26(2): 367-374.
- [ 14 ] 薛松柏, 董健, 吕晓春, 等. Al/Cu 管异种材料火焰钎焊连接[J]. 焊接, 2003(12): 23-25.  
XUE Song-bai, DONG Jian, LÜ Xiao-chun, et al. Flame brazing for dissimilar materials of Al/Cu tube[J]. Welding & Joining, 2003(12): 23-25.
- [ 15 ] Xiao Y, Ji H J, Li M Y, et al. Ultrasound-assisted brazing of Cu/Al dissimilar metals using a Zn-3Al filler metal[J]. Materials & Design, 2013, 52: 740-747.
- [ 16 ] Xia C Z, Li Y J, Puchkov U A, et al. Crack analysis near vacuum brazing interface of Cu/Al dissimilar materials using Al-Si brazing alloy[J]. Materials Science and Technology, 2009, 25(3): 383-387.
- [ 17 ] 李福山, 徐荣正, 王鹏飞, 等. Al-Cu 异种金属的电子束搭接焊接研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(5): 556-560.  
LI Fu-shan, XU Rong-zheng, WANG Peng-fei, et al. Research on electron beam lap welding of Al/Cu dissimilar Metals[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(5): 556-560.
- [ 18 ] 南水平, 黄继华, 陈树海, 等. Al-Si-Cu 合金粉末扩散钎焊 Al/Cu 接头组织及性能[J]. 焊接学报, 2014, 35(1): 79-82.  
NAN Shui-ping, HUANG Ji-hua, CHEN Shu-hai, et al. Microstructure and properties of diffusion brazed aluminum/copper joint with Al-Si-Cu alloy powder[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(1): 79-82.
- [ 19 ] 佟得吉, 刘杰, 高雪云, 等. Cu-Al 电阻焊结合层的 SEM 和 HREM 研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(17): 214-216.  
TONG De-ji, LIU Jie, GAO Xue-yun, et al. Study on SEM and HREM of bonding layer in Cu-Al resistance welding[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(17): 214-216.
- [ 20 ] 李欢, 周亢, 张锦洲, 等. 工艺参数对 Cu/Al 大功率超声波焊接微观组织和力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2020, 41(4): 20-25.

- LI Huan, ZHOU Kang, ZHANG Jin-zhou, et al. Influence of process parameters on microstructure and mechanical properties in high power ultrasonic welding of Cu/Al[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(4): 20-25.
- [21] 邹军涛, 高磊, 谢庭芳, 等. 扩散连接制备 Cu/Al 双金属及其界面组织与剪切强度(英文)[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(12): 4121-4128.
- ZOU Jun-tao, GAO Lei, XIE Ting-fang, et al. Interfacial microstructure and shear strength of Cu/Al bimetal fabricated by diffusion welding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(12): 4121-4128.
- [22] 傅成聪, 郑钰, 郭怡, 等. 超细晶 Cu/Al 异种材料搅拌摩擦焊组织与性能研究[J]. 铜业工程, 2023(3): 32-39.
- FU Cheng-cong, ZHENG Yu, GUO Yi, et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir welding interface of ultrafine grained copper/aluminum dissimilar materials[J]. Copper Engineering, 2023(3): 32-39.
- [23] 刘铁, 张文金, 陈启健. Cu-Al 的搅拌摩擦焊工艺和性能研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(1): 224-225.
- LIU Tie, ZHANG Wen-jin, CHEN Qi-jian. Study on welding process and property of Cu-Al friction stir welded joint[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(1): 224-225.
- [24] Bamidele O E, Ojo O A. Numerical simulation study of temperature gradient transient liquid phase bonding with concentration-dependent diffusivity[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2021, 52: 2261-2273.
- [25] 李亚江, 吴会强, 陈茂爱, 等. Cu/Al 真空扩散焊接接头显微组织分析[J]. 中国有色金属学报, 2001(3): 424-427.
- LI Ya-jiang, WU Hui-qiang, CHEN Mao-ai, et al. Microstructure analyses in vacuum diffusion welded joint of copper and aluminum[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001(3): 424-427.
- [26] 全国焊接标准化技术委员会. 焊接接头拉伸试验方法: GB/T 2651—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [27] Xiao Y, Besharatloo H, Gan B, et al. Combinatorial investigation of Al-Cu intermetallics using small-scale mechanical testing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 822: 153536.
- [28] Chen J, Yang J, Zhang Y, et al. Effect of substrates on the formation of Kirkendall voids in Sn/Cu joints[J]. Welding in the World, 2019, 63: 751-757.
- [29] Bedjaoui W, Boumerzoug Z, Delaunoy F. Solid-state diffusion welding of commercial aluminum alloy with pure copper: welding of aluminum alloy to copper[J]. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, 2022, 19(2): 9734-9746.
- [30] 王艳艳, 王聪兴, 刘平, 等. Cu/Al 复合材料热电性能的研究[J]. 功能材料, 2018, 49(1): 1151-1155.
- WANG Yan-yan, WANG Cong-xing, LIU Ping, et al. Study on the thermoelectric properties of copper/aluminum composite[J]. Journal of Functional Materials, 2018, 49(1): 1151-1155.

(上接第 217 页)

- [21] 张坤, 王楠楠, 王增强, 等. 铌中间层对钛与 Q235 低碳钢电阻点焊接头组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(1): 191-198.
- ZHANG Kun, WANG Nan-nan, WANG Zeng-qiang, et al. Effect of niobium intermediate layer on microstructure and properties of resistance spot welding joint of titanium and Q235 low carbon steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(1): 191-198.
- [22] 赵培峰, 顾伟文, 王楠楠, 等. 基于镁质铆钉的铝合金/镁合金电阻单元焊接接头的组织与性能[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(9): 195-204.
- ZHAO Pei-feng, GU Wei-wen, WANG Nan-nan, et al. Microstructure and properties of resistance element welded joints aluminum alloy/magnesium alloy welding with a magnesium rivet[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(9): 195-204.
- [23] 赵培峰, 张清扬, 顾伟文, 等. 铝合金与镁合金的夹锡电阻点焊[J]. 热加工工艺, 2023, 52(11): 33-38.
- ZHAO Pei-feng, ZHANG Qing-yang, GU Wei-wen, et al. Resistance spot welding between Al alloy and Mg alloy with an insert of Tin[J]. Hot Working Technology, 2023, 52(11): 33-38.
- [24] 孟洋, 王峰, 董伟, 等. 镍夹层对镁/钢异种金属点焊接头力学性能与显微组织的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(17): 46-49.
- MENG Yang, WANG Feng, DONG Wei, et al. Effect of nickel interlayer on mechanical properties and microstructures of magnesium alloy/steel dissimilar metals spot welding joints[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(17): 46-49.
- [25] 王峰. 夹层焊和胶焊对镁/钢异种金属点焊接头的组织和性能影响研究[D]. 辽宁: 辽宁工程大学, 2015.
- WANG Feng. Effect of mezzanine and adhesive welding on the microstructure and properties of magnesium/steel dissimilar metal spot welding joints[D]. Liaoning: Liaoning University of Engineering, 2015.