

# 超声辅助电阻钎焊 6063 铝合金接头显微组织的演变

俞伟元, 吴炜杰, 孙学敏

(兰州理工大学 甘肃省有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 采用超声辅助电阻钎焊方法实现 Zn-2Al 钎料与 6063 铝合金的连接, 研究了声场及电场对接头微观组织演变的影响。结果表明, 钎焊过程中施加超声振动能够有效促进钎料与母材形成有效连接, 减少缺陷从而形成良好冶金性结合的钎焊接头, 且钎缝层微观组织更加均匀细小。另外, 超声功率和电流强度均对钎焊过程的溶解有显著影响, 随着超声功率增加, 母材的溶解加剧, 钎缝中 Al 含量增加, 共析  $\alpha$ -Al 相增多; 而随着电流的增大, 初晶  $\alpha$ -Al 相增多。

**关键词:** 6063 铝合金; 超声辅助电阻钎焊; 超声功率; 电场强度

**中图分类号:** TG454; TG146.21

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2019)12-4081-07

在材料制备、焊接成型等工艺过程中通过施加电场<sup>[1-3]</sup>、声场<sup>[4,5]</sup>、磁场<sup>[6-8]</sup>以及它们之间复合作用的组合场, 利用外加物理场的作用, 获得所需组织结构和性能, 是近来学术研究热点。研究表明<sup>[9-12]</sup>, 在电阻钎焊过程中施加超声波, 由超声波产生的空化效应和声流作用可加速钎料的流动、去除氧化膜, 改善液态钎料的润湿性。同时可以避免钎剂的使用, 提高接头的综合力学性能。Xiao 等人<sup>[13]</sup>采用超声辅助电阻钎焊方法, 探究温度对于接头焊合率和微观结构的影响, 结果表明在 440 和 470 °C 进行超声波辅助钎焊, 铝基体表面的氧化膜能够通过超声诱导产生的空化效应进行破除, 接头能获得良好焊合率和优异的力学性能。Xu 等人<sup>[14]</sup>用 Zn-Al 合金对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒增强 6061 铝基复合材料在空气中进行超声液相钎焊研究, 发现铝母材表面的氧化膜可以被超声振动产生的空化效应所破除, 从而获得良好冶金结合的接头。而薛松柏等人<sup>[15]</sup>研究了 TiNi 形状记忆合金的电阻钎焊技术配合 CuNi 薄带钎料和改进型钎剂。研究表明, 焊接时输入的热量对焊接接头的力学性能有明显的影响, 且电阻钎焊技术能实现 TiNi 形状记忆合金的可靠连接。然而以往的研究<sup>[16-21]</sup>主要侧重于声场与电场对界面润湿行为、破膜行为及接头力学性能的影响, 对于声场及电场作用对钎焊接头的形成及微观组织演变的研究却很少。

基于以上研究背景, 本工作以 6063 铝合金为研究对象, 采用超声辅助电阻钎焊方法, 研究声场与电场对钎焊接头形成及微观组织形貌演变的影响, 明晰声

场和电场作用对接头微观组织结构的影响规律, 进一步促进超声辅助电阻钎焊方法的应用和发展。

## 1 实验

实验所用母材与钎料分别为 6063 铝合金和 Zn-2Al 钎料, 超声辅助电阻钎焊原理如图 1 所示。焊前将 8 cm 厚的铝合金板加工成尺寸为 20 mm×10 mm×8 mm (长×宽×高) 的钎焊试样, 为研究超声振动对钎焊焊缝成型的影响, 选择凹槽型钎焊接头进行超声辅助电阻钎焊, 凹槽的存在使得更多的熔融钎料保留在钎缝中。其中一块试样加工一个 8 mm×6 mm×0.15 mm (长×宽×深) 的凹槽, 其中放置用砂纸打磨过后 0.5 mm 厚的箔片状 Zn-2Al 钎料 0.1 g。用 240#砂纸打磨工件接触面去除表面致密连续的氧化膜和杂质, 随后用丙酮擦拭去除油污, 再用无水乙醇清洗; 将加工好的试样放置到如图所示的上下电极上, 施加 80 N 的恒定压力。钎焊时采用两步直流电阻钎焊方法<sup>[22]</sup>, 在钎焊第 1 阶段, 通以 3.5 kA 的小电流持续 500 ms, 空隙时间为 500 ms, 不施加超声振动; 在钎焊第 2 阶段通以 7.5 kA 大电流持续 2 s, 同时施加 28 kHz 的超声振动 2 s, 功率为 700 W, 随后空冷至室温。钎焊结束后, 焊缝沿纵向切开, 用金相砂纸逐级打磨并抛光, 腐蚀后采用广视场万能金相 MEF3 显微镜观察试样的焊缝形貌, 使用 QUANA-FEG450 型场发射扫描电镜观察界面微观组织形貌, 并分析其组织演变。同时使用能谱分析仪 (EDS) 对钎焊接头微区进行元素分析, 分析焊缝及界面物相的组成。

收稿日期: 2018-12-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51465032)

作者简介: 俞伟元, 男, 1973 年生, 博士, 教授, 兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050, E-mail: weiyuanyu2018@163.com

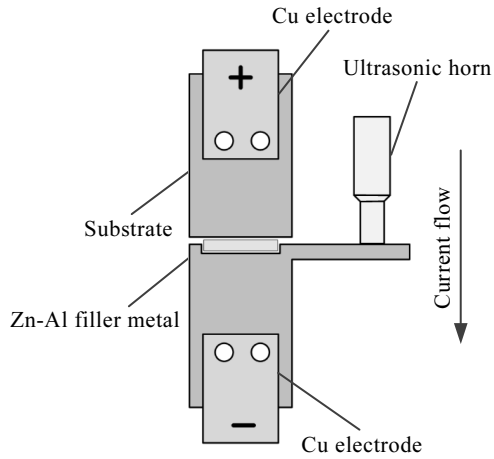


图 1 超声辅助电阻钎焊原理图

Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic-assisted electrical resistance brazing

## 2 结果与讨论

### 2.1 电场及声场作用下的接头微观组织

分别采用炉中钎焊、电阻钎焊以及超声波辅助电阻钎焊制得钎焊试样，用扫描电镜对其形貌进行了观察，结合 EDS 能谱对微观组织成分进行了分析，对比研究了不同物理场作用下接头微观组织的差异。图 2 是在不同钎焊方式下获得的钎焊接头扫描电镜照片，表 1 是图中标示点的微区成分能谱分析结果。图 2a 是在不同钎焊方式下获得的钎焊接头扫描电镜照片，表 1 是图中标示点的微区成分能谱分析结果。图 2a<sub>1</sub> 是炉中钎焊（钎焊温度为 450 °C，保温 10 min）接头微观组织照片。其中图 2a<sub>1</sub> 为宏观形貌照片，从图中可以看出钎焊界面平整，界面上生成的柱状枝晶向钎缝内部生长，钎缝内部生成了大量黑色枝晶，同时观察到在界面处存在贯穿钎缝的长裂纹及夹杂，这些缺陷会降低接头的可靠性，恶化接头的力学性能。图 2a<sub>2</sub> 是其内部组织放大照片，结合能谱分析可知，这些黑

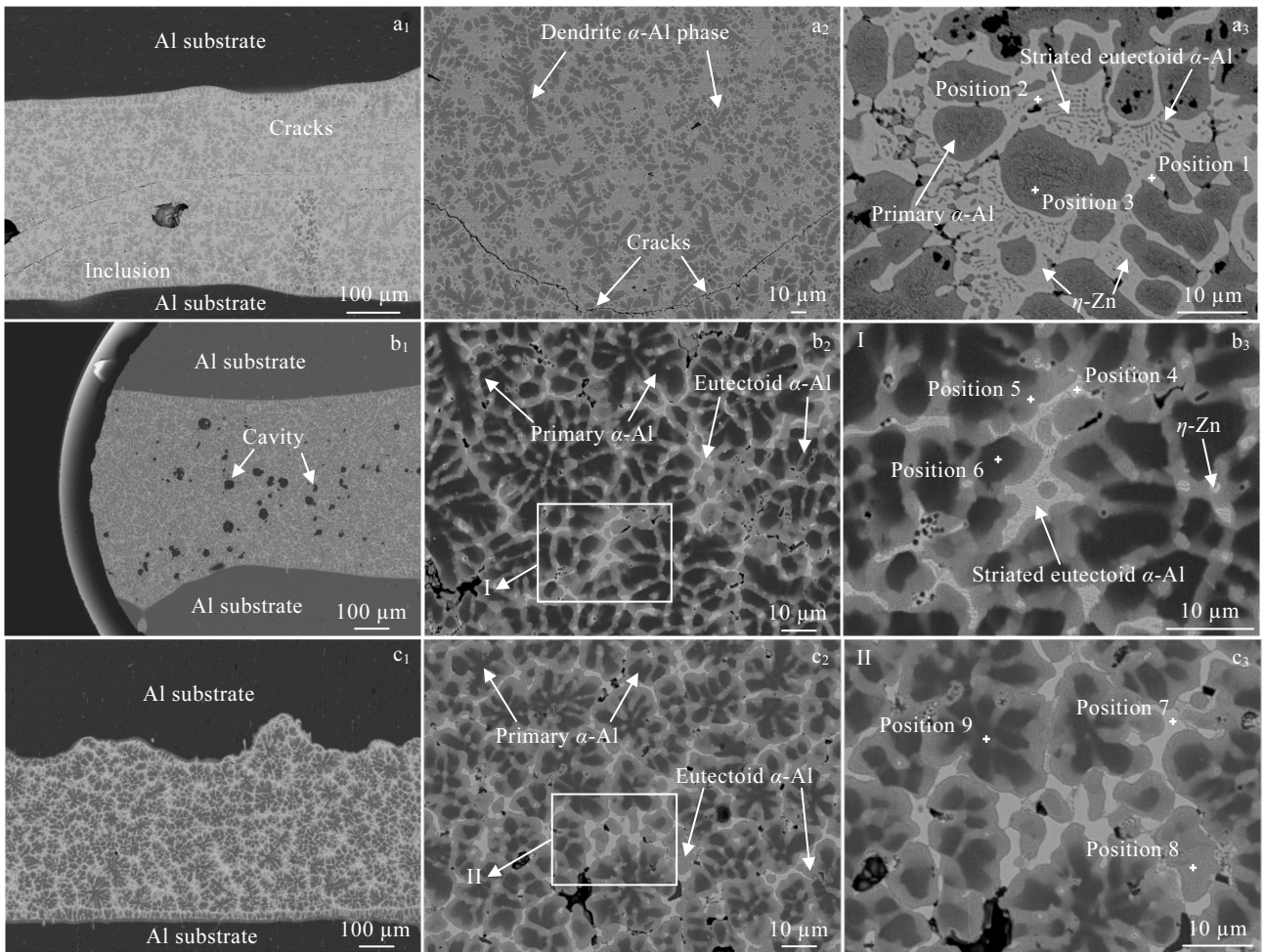


图 2 炉中钎焊、电阻钎焊及超声波辅助电阻钎焊接头 SEM 图像

Fig.2 SEM images of the joints brazed at 450 °C (a), the resistance brazed joints (b), and the ultrasonic-assisted electrical resistance brazed joints (c)

表 1 图 2 中所示各点的 EDS 成分分析结果  
Table 1 EDS analyses of each point in Fig.2 (wt%)

Position No.	Al	Zn	
Fig.2a <sub>3</sub>	1	3.68	96.32
	2	20.55	79.45
	3	38.87	61.13
Fig.2b <sub>3</sub>	4	2.93	97.07
	5	27.18	72.82
	6	43.09	56.91
Fig.2c <sub>3</sub>	7	2.74	97.26
	8	22.72	77.28
	9	53.58	46.42

色枝晶为初晶  $\alpha$ -Al 相。进一步将钎焊接头内部组织放大到 2500 倍, 如图 2a<sub>3</sub> 所示。可以看到除了初晶  $\alpha$ -Al 相外, 还存在条纹状组织以及枝晶间的灰白色组织, 结合相图及能谱分析可知, 条纹状组织为共析  $\alpha$ -Al 相, 条纹状共晶组织为共析  $\alpha$ -Al 相+ $\eta$ -Zn 相组成的共晶组织, 钎缝中游离的灰白色组织是随钎料进入钎缝的  $\eta$ -Zn 相。

如图 2b 为电阻钎焊接头, 可以看到接头界面主要由界面两侧不等宽的固溶体层和共晶相组成, 其中黑色相呈粗糙的不均匀树枝状结构, 结合能谱分析可知, 其由初晶  $\alpha$ -Al 相构成, 呈灰色条块状的共析  $\alpha$ -Al 相分布在树枝状晶的周围, 其间分布着灰白色的  $\eta$ -Zn 组织。其中条纹状共晶组织由条纹状的共析  $\alpha$ -Al 相和细小块状白色  $\eta$ -Zn 相组成, 这种条纹状的共析  $\alpha$ -Al 相生长在  $\eta$ -Zn 相内, 如图 2b<sub>2</sub> 和 2b<sub>3</sub> 所示。相比于炉中钎焊, 钎焊接头中的上、下铝母材均能与钎缝层形成良好的连接, 贯穿性的长裂纹和夹杂也基本消失, 但是接头界面处仍存在大量孔洞, 孔洞等缺陷仍然会恶化接头的性能。

超声波辅助电阻钎焊钎缝的微观组织如图 2c 所示。此时界面中的组织产生了变化, 随着超声振动的加入, 接头界面的组织更加均匀细小, 不再出现孔洞和裂纹等缺陷, 这是由于超声波在液相钎料中传播时会形成空化气泡, 当气泡尺寸达到临界值而振荡崩溃时, 由此产生的热效应和微射流将冲击基体表面, 破除基体表面致密连续的氧化膜, 破碎的氧化膜在超声搅拌作用下排出钎缝, 氧化膜的破除有效地促进了钎料与母材之间的冶金性反应的形成, 消除了孔洞和裂纹, 提高了接头的可靠性。用能谱分析仪分析钎缝界面中标记点的化学成分, 各点成分分析结果如表 1 所示。根据 Zn-Al 二元相图, 图 2c<sub>3</sub> 中 9 号标记点对应的组织为初晶  $\alpha$ -Al 相。从图 2c<sub>2</sub> 可以看出, 对比电阻钎焊接头, 此时白色  $\eta$ -Zn 相也发生了转变, 条纹状的共晶组织基本消失, 仅在晶粒边界处少量存在。这是

由于超声振动作用后, 大量的 Al 元素从母材迅速溶解扩散进入钎缝, Al 元素在达到了液相钎料的极限溶解度后以初晶  $\alpha$ -Al 相的形式析出, Zn 元素则被排出至晶界中, 失去了条纹状的共晶相的生长条件, 最终条纹状共晶组织发生了离异反应<sup>[23]</sup>而转变成块状共析  $\alpha$ -Al 相和  $\eta$ -Zn 相, 失去了改变了共晶相的形成条件, 使得钎缝中的相间生长的条纹状共晶组织发生了演变, 使得条纹状共晶组织减少。

## 2.2 不同场作用下接头微观组织演变分析

为进一步探究不同物理场对接头微观组织演变的影响, 使用图像分析软件对不同接头各相成分进行了分析。表 2 分别为热场、电场和复合场作用下各相含量的占比, 结合图 2a 可以看到炉中钎焊接头中初晶  $\alpha$ -Al 相的含量达到了 36.9%, 同时仍有大量  $\eta$ -Zn 相存在钎缝界面中, 其占比达到了 50.12%, 这说明温度场作用下, 母材溶解进入钎缝层中, 但溶解量不多。

而使用电流单独作用时, 由于电阻焊<sup>[24]</sup>具有快速加热, 热量集中等优点, 电流产生的焦耳热对钎缝中母材与钎料之间的扩散有加速作用, 且液相中 Zn 和 Al 之间的极大固溶度, 使得大量的 Al 元素从母材迅速溶解扩散进入至钎缝, 达到了 Al 在 Zn 中的极限溶解度, 待到焊后的凝固过程中 Al 元素作为初晶相析出。通过表 2 可以看出, 随着电场的施加, 液相钎料对铝母材的溶解加剧, 初晶  $\alpha$ -Al 相和共析  $\alpha$ -Al 相的含量均有一定程度增加,  $\eta$ -Zn 相的含量呈现出明显的下降, 表明随着电场的加入, 更多的铝母材溶解到了钎缝层中, 促进了 Zn 元素与 Al 元素之间的固溶。此外, 电阻钎焊接头中初晶  $\alpha$ -Al 相晶粒大小为 37.60  $\mu\text{m}$ , 如表 3 所示, 小于炉中钎焊接头中初晶  $\alpha$ -Al 相晶粒的大小, 表明电场的施加能够促进铝母材的溶解, 但不会由于能量的加入而使接头微观组织粗化, 这结果与上文中通过扫描电镜获得的试验结果相一致。如图 3b 和 3c 所示, 条纹状的共析  $\alpha$ -Al 相生长在  $\eta$ -Zn 相内构成了条纹状共晶组织, 使用图像分析软件测得钎缝中条纹状共晶相占比为 7.07%, 如表 3 所示。

由上文可知, 施加超声振动后接头界面出现了不同的形貌, 超声作用使得初晶  $\alpha$ -Al 相由原来的不均匀

表 2 不同物理场作用下接头各相含量对比

Table 2 Comparison of phase content of joints under different physical fields (%)

Method	Primary $\alpha$ -Al	Eutectoid $\alpha$ -Al	$\eta$ -Zn phase
Furnace brazing	36.90	12.98	50.12
Resistance brazing	53.29	42.06	4.65
Ultrasonic-assisted electrical resistance brazing	30.31	62.34	7.35

表 3 不同物理场作用下初晶  $\alpha$ -Al 相尺寸及条纹状共晶含量  
Table 3 Size of primary  $\alpha$ -Al phase and content of striated eutectoid under different physical fields

Method	Size of primary	Striated eutectoid content/%
	$\alpha$ -Al/ $\mu\text{m}$	
Furnace brazing	40.34	12.91
Resistance brazing	37.60	7.07
Ultrasonic-assisted electrical resistance brazing	17.77	0.81

的粗糙树枝状晶转变为呈均匀的花瓣状晶，结合表 2 可知，随着超声振动的施加，超声波辅助电阻钎焊接头中的共析  $\alpha$ -Al 相达到了最高的 62.34%，这是由于声场和电场耦合作用后，电场提供热源而声场促进溶解，钎焊接头中 Al 含量大幅增加，其浓度达到共析点附近，随后的凝固过程中发生共析反应使得共析  $\alpha$ -Al 相明显增大；而仅有电流作用时，由于钎焊接头中 Al 含量浓度偏离共析点使得凝固过程中共析反应的量较少，多数 Al 元素以固溶体的形式生成，这说明声场的加入有利于共析相的生成。此外，声场的加入还能明显细化晶粒，如表 3 所示，超声波辅助电阻钎焊接头中初晶  $\alpha$ -Al 相的晶粒大小仅为 17.77  $\mu\text{m}$ ，相比与其余 2 种钎焊接头，接头组织有了明显的细化。表明超声振动能够有效地细化晶粒，组织的细化不仅能提高强度、塑性，而且能改善组织均匀性，提高力学性能。同样使用图像分析软件测试钎缝中条纹状共晶相含

量，测得超声辅助电阻钎焊接头中条纹状共晶相的含量下降到了 0.81%。Liu 等人<sup>[25]</sup>研究发现，钎料合金中形成的共晶组织会降低接头的耐腐蚀性能和强韧性，且钎缝中的共晶相是一种硬脆组织<sup>[24]</sup>，会恶化钎焊接头的力学性能，因此若能将这些共晶组织从钎缝组织中消除，将有利于接头力学性能的提升。超声辅助电阻钎焊接头中缺陷的消除和共晶组织的减少有效提高了接头的力学性能。

### 2.3 超声功率和电流大小对接头显微组织的影响

从以上研究发现，电场和声场对钎焊接头微观组织都产生了显著的影响，为获得影响规律，研究了不同电流强度及超声波功率下钎焊接头微观组织的变化。图 3a~3c 分别是超声功率为 300、500、700 W 时获得的钎焊接头钎料层中高放大倍率 SEM 图像，超声时间均为 2 s。如图 3a 所示，可以看到在超声功率为 300 W 时，所获得的钎焊接头微观结构不均匀，各相呈弥散分布。界面由不均匀的初晶  $\alpha$ -Al 相（平均晶粒大小为 27.99  $\mu\text{m}$ ）、块状的共析  $\alpha$ -Al 相以及  $\eta$ -Zn 相所组成；而超声功率为 500 W 时获得的钎焊接头中，不均匀初晶  $\alpha$ -Al 相转变为均匀的花瓣状结构（平均晶粒大小为 18.88  $\mu\text{m}$ ），而均匀共析  $\alpha$ -Al 相附着在初晶相旁边，如图 3b 所示；当超声功率进一步增加到 700 W，初晶  $\alpha$ -Al 相的平均晶粒大小下降为 17.77  $\mu\text{m}$ 。如图 4 所示，随着超声波功率的增加，初晶  $\alpha$ -Al 相的晶粒大

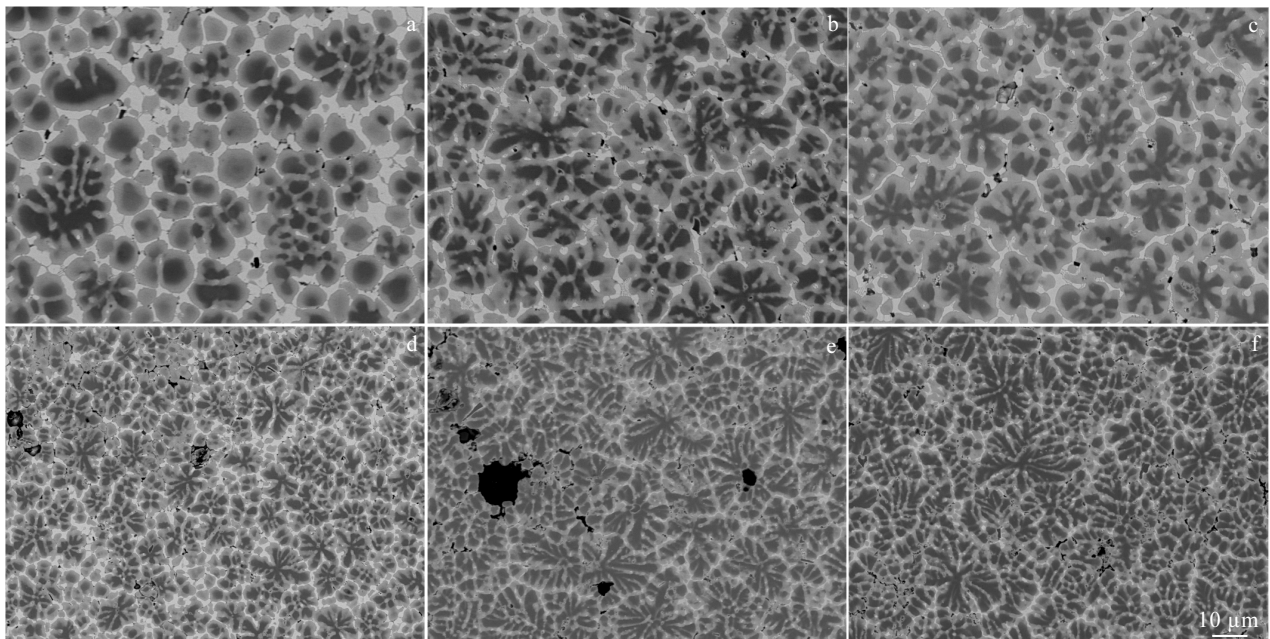


图 3 不同超声功率和电流下接头的高倍 SEM 图像

Fig.3 SEM images of the joints brazed with different ultrasonic powers: (a) 300 W, (b) 500 W, and (c) 700 W; SEM images of the joints brazed with different electric currents: (d) 6.5 kA, (e) 7.0 kA, and (f) 7.5 kA

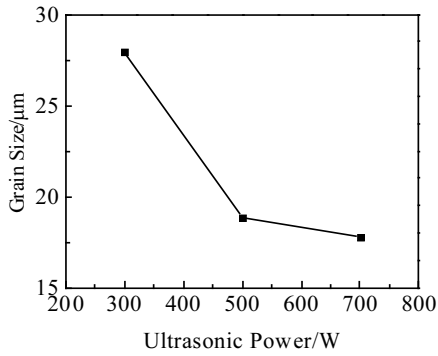


图 4 晶粒大小与超声功率的关系

Fig 4 Relationship between grain size and ultrasonic power

小出现了明显的下降，这表明超声波功率的增加能够细化晶粒，提高组织的均匀性。最终，在超声波功率为 700 W 钎焊的接头中获得了细小均匀的微观结构。

此外，钎缝中的相组成也发生了转变，使用图像分析软件对钎缝中各相占比作进一步研究，随着超声功率的增加，钎缝中初晶  $\alpha$ -Al 相的含量由超声功率为 300 W 时的 34.47% 下降到了超声功率 700 W 时的 30.31%，初晶相含量变化不大；然而共析  $\alpha$ -Al 相的含量却由超声功率为 300 W 时的 48.01% 升高到了超声功率 700 W 时的 62.34%，进一步说明了超声波的加入能够促进共析  $\alpha$ -Al 相的生成。初晶  $\alpha$ -Al 相含量减少， $\eta$ -Zn 相也减小，而共析  $\alpha$ -Al 相随之增大，根据 Zn-Al 二元相图可知，当凝固过程中 Al 含量处于共析转变范围时，随着 Al 含量的增大，析出的共析相越多，而初晶  $\alpha$ -Al 相和  $\eta$ -Zn 相则相应减小，接头各相组织含量和超声功率的关系如图 5 所示，可以看出随着超声功率的增大，钎缝中 Al 含量也随之增加，正是由于超声作用对元素扩散的促进作用，随着超声波功率的增大，

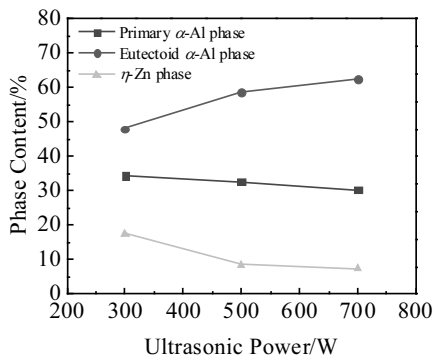


图 5 各相含量与超声功率的关系

Fig.5 Content of each phase vs ultrasonic power

元素之间的扩散速率进一步加快，钎焊过程中母材溶解随之加剧，更多的 Al 元素从母材溶解扩散进入钎缝，增大了钎缝中 Al 元素的含量，钎焊接头中 Al 元素浓度达到共析点附近而发生共析反应，使得共析反应析出的共析  $\alpha$ -Al 相增加。显然，超声辅助电阻钎焊过程中声场能改变接头显微组织，而电场对接头的显微组织和成分组成同样有显著影响。

电流的强度变化会影响焊接过程中的热输入量，进而影响钎焊过程的进行。如图 3d~3f 分别为凹槽型钎焊接头在第 2 阶段电流为 6.5、7.0、7.5 kA 时的钎焊接头微观组织，从图中可以看出钎缝层中存在许多孔洞，这些孔洞是残留在钎缝中的氧化膜引起的，由于氧化膜与熔融钎料之间的极差润湿性，在钎缝中形成了孔洞和裂纹。通过对比不同强度电流作用下的微观组织形貌，发现随着电流强度的增大，晶粒尺寸出现了明显的增大。在第 2 阶段电流为 6.5 kA 时，钎缝层中初晶  $\alpha$ -Al 相晶粒的大小为 26.85  $\mu\text{m}$ ；而在第 2 阶段电流为 7.0 kA 时，钎缝层中初晶  $\alpha$ -Al 相晶粒的大小为 33.22  $\mu\text{m}$ ；在第 2 阶段电流为 7.5 kA 时，钎缝层中初晶  $\alpha$ -Al 相晶粒的大小为 37.60  $\mu\text{m}$ ，钎缝中晶粒大小与电流强度的关系如图 6 所示。结果表明，电流强度的增大能够促使钎焊过程中晶粒粗化。由焦耳定律  $Q=I^2Rt$  可知，随着焊接电流的增加，输入能量增高，钎焊过程中的界面温度升高，另外，随着电流增大，输入能量升高，原子拥有的激活能越大，Al 和 Zn 之间的扩散越剧烈，钎料对母材的溶解速率也进一步增加。随着母材溶解的加剧，钎缝中的微观组织也发生了变化。使用图像分析软件对钎缝中各相占比进行分析，如图 7 所示，可以看出随着电流强度的增大，初晶  $\alpha$ -Al 相的含量从 6.5 kA 时的 40.15% 升高到了 7.5 kA 时的 49.71%；而共析  $\alpha$ -Al 相和  $\eta$ -Zn 相的含量均不同程度的下降，这表明仅有电场作用时，电流强度

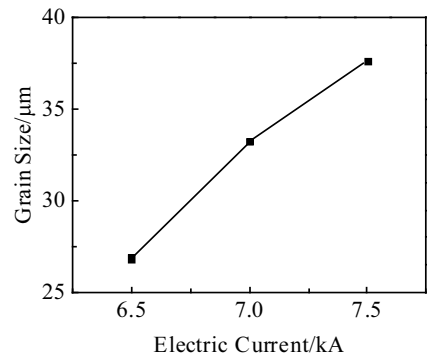


图 6 晶粒大小与电流强度的关系

Fig.6 Relationship between grain size and current intensity

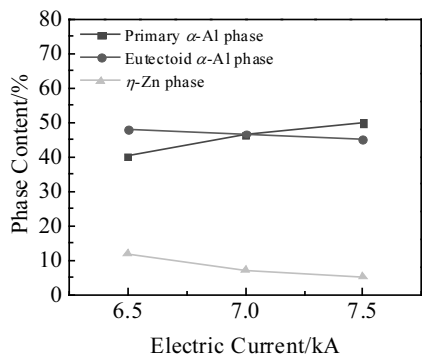


图 7 钎缝中各相含量与电流大小的关系

Fig.7 Content of each phase vs current intensity

的增加促进了初晶  $\alpha$ -Al 相的析出。

### 3 结 论

1) 声场和电场均能改变接头的微观组织, 促进铝母材的溶解, 超声辅助电阻钎焊方法能够有效破除钎缝中的氧化膜, 消除孔洞和夹杂等缺陷, 钎焊接头能获得较高的结合率。

2) 超声振动能促进 Al 元素在钎缝中的溶解, 随着超声功率的增加, 液相钎料对母材的溶解加剧, 随着超声振动的作用, 钎缝的微观组织发生转变, 大量 Al 元素溶解进入钎缝发生离异共晶反应, 使得条纹状共晶组织转化为共析  $\alpha$ -Al 相和  $\eta$ -Zn 相, 进而消耗液相, 使得条纹状共晶组织的含量大大降低, 从而获得具有良好力学性能的钎焊接头。

3) 随着电流强度增大, 母材中 Al 元素大量溶解进入钎缝同时晶粒也随之长大, 同时电流强度增大, 使得共析  $\alpha$ -Al 相和  $\eta$ -Zn 相的含量下降, 而促进了初晶  $\alpha$ -Al 相的析出。

#### 参考文献 References

[1] Lv Xiang, Wu Jiagang, Xiao Dingquan *et al. Acta Materialia* [J], 2017, 140: 79  
 [2] Ohno H, Chiba D, Matsukura F *et al. Nature*[J], 2000, 408: 944  
 [3] Yoshida H, Sasaki Y. *Scripta Materialia*[J], 2018, 146: 173  
 [4] Shin H, Kim J. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2016, 26(3): 1

[5] Shin H S, Nisay A, de Leon M B *et al. IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2015, 25(3): 1  
 [6] Musiienko D, Straka L, Klimša L *et al. Scripta Materialia*[J], 2018, 150: 173  
 [7] Li Guirong, Wang Fangfang, Wang Hongming *et al. Materials Science Forum*[J], 2017, 898: 345  
 [8] Ji H M, Luo T J, Yang Y S. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*[J], 2017, 27(3): 468  
 [9] Patel B, Chaudhari G P, Bhingole P P. *Materials Letters*[J], 2012, 66(1): 335  
 [10] Suslick K S. *Scientific American*[J], 1989, 260(2): 80  
 [11] Chinnam R K, Fauteux C, Neuenschwander J *et al. Acta Materialia*[J], 2011, 59(4): 1474  
 [12] Cui Wei, Wang Changwen, Yan Jiuchun *et al. Ultrasonics Sonochemistry*[J], 2012, 20(1): 196  
 [13] Xiao Yong, Ji Hongjun, Li Mingyu *et al. Materials & Design* [J], 2013, 47(9): 717  
 [14] Xu Zhiwu, Yan Jiuchun, Wu Gaohui *et al. Scripta Materialia* [J], 2005, 53(7): 835  
 [15] Xue Songbai(薛松柏), Lv Xiaochun(吕晓春), Zhang Huiwen(张汇文). *Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)*[J], 2004, 25(1): 1  
 [16] Pereira A M, Ferreira J M, Loureiro A *et al. Materials & Design*[J], 2010, 31(5): 2454  
 [17] Podrżaj P, Jerman B, Simončič S. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2016, 230: 21  
 [18] Li Yuanxing, Leng Xuesong, Cheng Sheng *et al. Materials & Design*[J], 2012, 40: 427  
 [19] Haddadi F, Strong D, Prangnell P B. *JOM*[J], 2012, 64(3): 407  
 [20] Haddadi F. *Materials & Design*[J], 2015, 66: 459  
 [21] Panteli A, Robson J D, Brough I *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2012, 556: 31  
 [22] Tanaka Y, Yamaguchi T, Takeshita K. *Welding International* [J], 2013, 27(11): 857  
 [23] Li Yuanxing, Zhao Weiwei, Leng Xuesong *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2011, 21(9): 1937  
 [24] Watanabe T, Suzuki Y, Yanagisawa A *et al. Quarterly Journal of The Japan Welding Society*[J], 2010, 27(3): 202  
 [25] Yan Xinqi, Liu Shengxin, Long Weimin *et al. Materials & Design*[J], 2013, 45: 440

## Microstructure Evolution of Ultrasonic-Assisted Electrical Resistance Brazing Joints of 6063 Aluminum Alloys

Yu Weiyuan, Wu Weijie, Sun Xuemin

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling on Non-Ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** A Zn-Al alloy was used as filler metal to braze 6063 aluminum alloy using ultrasonic-assisted electrical resistance-brazing technology. The effects of ultrasonic field and electric field on the microstructure evolution of the joints were studied, and its mechanism was also analyzed. The results show that applying ultrasonic vibration to substrate during brazing process could effectively promote the effective connection between the filler metal and base metal, reduce the defects, and improve homogeneity; thus the joints with good metallurgical bonding are obtained. In addition, both ultrasonic power and electrical current intensity have significant effect on the dissolution during the brazing process. With the increment of ultrasonic power, the dissolution of the base metal is intensified, the Al content in the brazing seam increases, and the eutectoid  $\alpha$ -Al phase increases. As the electrical current increases, the primary  $\alpha$ -Al phase increases.

**Key words:** 6063 aluminium alloy; ultrasonic-assisted electrical resistance brazing; ultrasonic power; current intensity

---

Corresponding author: Yu Weiyuan, Ph. D., Professor, State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling on Non-Ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, E-mail: weiyuanyu2018@163.com