

# 超声作用阶段及形式对熔池晶粒结晶的影响

陈琪昊<sup>1,2</sup>, 林三宝<sup>1</sup>, 杨春利<sup>1</sup>, 范成磊<sup>1</sup>, 闫久春<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学, 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨, 150001; 2. 江苏科技大学, 镇江, 212003)

**摘要:** 理解不同超声作用下的熔池晶粒结晶特点对超声辅助 TIG 焊接工艺的优化具有重要意义. 以铝锂合金为研究对象, 改变超声作用阶段及施加形式, 分析焊缝晶粒分布特征. 结果表明, 电弧熄灭后超声作用下, 焊缝边缘为断裂的柱状晶, 焊缝中心为等轴晶; 熄弧前及熄弧后均有超声作用时, 焊缝内部全部为等轴晶. 持续超声形式和瞬态超声形式对熔池晶粒结晶具有不同的作用, 持续超声主要促进熔池内晶粒的异质形核而促使等轴晶形成, 瞬态超声主要通过破碎枝晶细化晶粒. 超声细化铝锂合金 TIG 焊缝晶粒机制与超声作用阶段及形式具有直接联系.

**关键词:** 熔池; 超声作用; 晶粒细化; 铝锂合金

**中图分类号:** TG 444 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20190826001

## 0 序言

细晶结构有助于改善焊接接头的力学性能, 因此, 焊缝晶粒细化引起了众多学者的研究兴趣. 在非熔化极氩弧焊 (TIG) 的焊缝晶粒细化方法中, 作为简单有效的物理方法, 多种超声-电弧复合焊接方法被先后提出. 如超声作用于母材<sup>[1-2]</sup>、超声作用于焊丝<sup>[3]</sup>、超声作用于电弧<sup>[4]</sup>、超声作用于熔池<sup>[5]</sup>及超声-电弧同轴复合<sup>[6-7]</sup>. 超声辅助晶粒细化机制主要包括超声辅助晶粒形核及超声辅助枝晶破碎<sup>[8-12]</sup>. 之前研究已表明超声能促进 2195Al-Li 合金 TIG 焊接熔池晶粒的异质形核<sup>[13]</sup>, 并且能够破碎枝晶<sup>[5, 14]</sup>.

超声作用于熔池, 作用阶段可分为两个阶段, 第一阶段为电弧作用下的高温熔体区, 第二阶段为电弧逐渐远离时的降温区. 不同超声作用阶段对熔池晶粒形核及破碎具有不同的影响. 超声施加形式可分为连续超声及瞬态超声. 不同超声施加形式对熔池晶粒细化影响不同.

主要研究内容如下: ① 电弧熄弧后超声作用于熔池时, 焊缝晶粒特征; ② 电弧熄弧前及熄弧后超声均作用于熔池时, 焊缝晶粒特征; ③ 焊接过程中, 超声持续作用于焊接熔池时, 焊缝晶粒特征; ④ 焊接过程中, 施加周期超声, 研究超声施加瞬间作用对焊缝晶粒结晶影响.

## 1 试验方法

试验母材为 150 mm × 50 mm × 2 mm 的 2195 铝锂合金, 保护气为氩气, 焊接方式为无填充焊丝的平板堆焊. 滚动式超声工具头与母材紧密接触, 通过母材将超声波传入熔池内, 焊接过程中超声输入位置与熔池中心之间的距离固定为 11 cm, 具体试验装置及某些固定的焊接参数见文献 [13].

为了分析超声作用阶段对熔池晶粒结晶的影响, 进行定点焊接试验. 超声作用阶段具体可分为电弧熄灭之前 (用符号 UB 表示)、电弧熄灭之后 (用符号 UA 表示) 及全程作用 (电弧熄灭之前 + 电弧熄灭之后) (用符号 UAII 表示), 示意图如图 1 所示. 具体试验参数如表 1 所示.

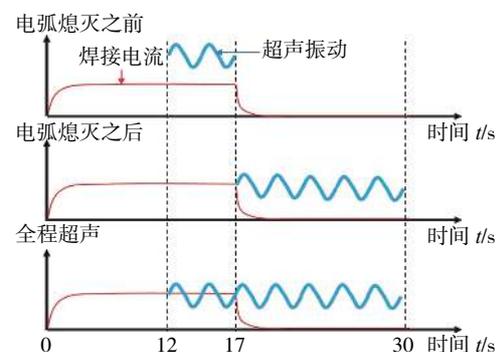


图 1 超声作用阶段示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the ultrasonic action stage

为了分析超声促进形核与超声破碎枝晶之间的相互作用, 进行如下两组试验: ① 在定点焊及移

表 1 焊接工艺参数  
Table 1 Welding parameters

序号	焊接电流 $I/A$	超声输入振幅 $A/\mu\text{m}$
UB-1,UA-1,UAlI-1	55	10.1
UB-2,UA-2, UAlI-2	60	10.1
UB-3,UA-3, UAlI-3	65	10.1
UB-4,UA-4, UAlI-4	70	10.1
UB-5,UA-5, UAlI-5	60	3.4
UB-6,UA-6, UAlI-6	60	7.1
UB-7,UA-7, UAlI-7	60	13

动焊接过程中向熔池内施加周期性超声, 超声作用时间为 0.3 s, 超声停歇时间为 0.3 s, 焊接电流为 70 A, 焊接速度为 162 mm/min, 超声输入振幅为 10.1  $\mu\text{m}$ . ② 通过改变电弧熄灭之前超声作用时间, 分析超声能量的累积对晶粒形核的影响.

焊后切取焊缝截面进行粗磨、抛光及腐蚀, 通过 OLYMPAS 光学显微镜对晶粒特征进行表征, 利用 Quanta 200FEG 场发射扫描电镜对焊缝截面晶粒进行 EBSD 分析, 分析不同试验参数下的焊缝平均晶粒尺寸.

## 2 试验结果

### 2.1 不同超声作用阶段下焊缝截面晶粒特征

文献 [13] 已揭示电弧熄灭之前超声对焊缝截面晶粒特征的影响. 为对比分析不同超声作用阶段下焊缝截面晶粒特征, 在新的参数下重新进行电弧熄灭之前超声作用、电弧熄灭之后超声作用及全程超声作用焊接试验.

电弧熄灭之后超声作用及全程超声作用后, 焊缝截面晶粒特征分别如图 2 及图 3 所示. 电弧熄灭后超声作用下, 在熔合区附近晶粒为具有随机指向的断裂的柱状晶; 焊缝中心为等轴晶. 全程超声作用下, 焊缝内部晶粒全部为等轴晶.

目前存在的问题是焊缝内等轴晶是来源于超声辅助晶粒形核还是超声辅助枝晶破碎. 针对焊缝内等轴晶来源, 对比分析了电弧熄灭前施加超声、电弧熄灭后施加超声及全程超声作用下铝锂合金 TIG 焊缝内等轴晶平均尺寸变化, 并与纯铝焊接结

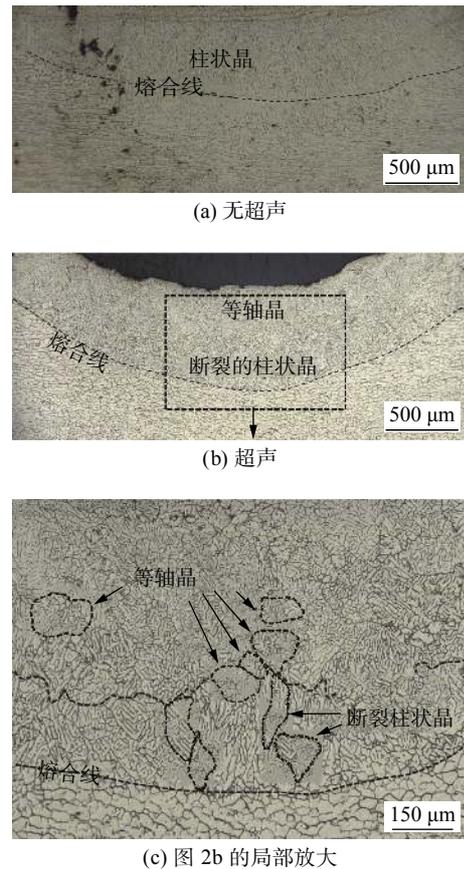


图 2 电弧熄灭后超声作用下焊缝截面晶粒特征

Fig. 2 Effect of ultrasonic action after arc quenching on weld grain structure; (a) without ultrasonic vibration; (b) with ultrasonic vibration; (c) enlarged Fig. 2b

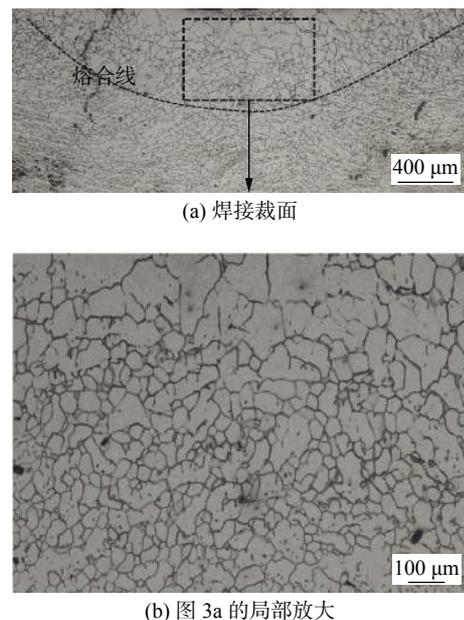


图 3 全程超声作用下焊缝截面晶粒特征

Fig. 3 Effect of ultrasonic action during whole welding process on weld grain structure; (a) cross section of weld; (b) enlarged Fig. 3a

果<sup>[14]</sup>进行了对比,从图 4 中可以看出,相同焊接电流下,电弧熄灭后施加超声及全程超声作用下,铝锂合金 TIG 焊缝内等轴晶晶粒尺寸变化趋势同电弧熄灭之前超声作用下铝锂合金焊缝晶粒尺寸变化趋势及电弧熄灭后超声作用下纯铝焊缝晶粒尺寸变化趋势相近;相同超声振幅不同焊接电流条件下,电弧熄灭后施加超声及全程超声作用下铝锂合金 TIG 焊缝内等轴晶晶粒尺寸变化趋势同电弧熄灭之前超声作用下铝锂合金焊缝晶粒尺寸变化趋势相近,但截不同于电弧熄灭后超声作用下纯铝 TIG 焊缝晶粒尺寸的变化。

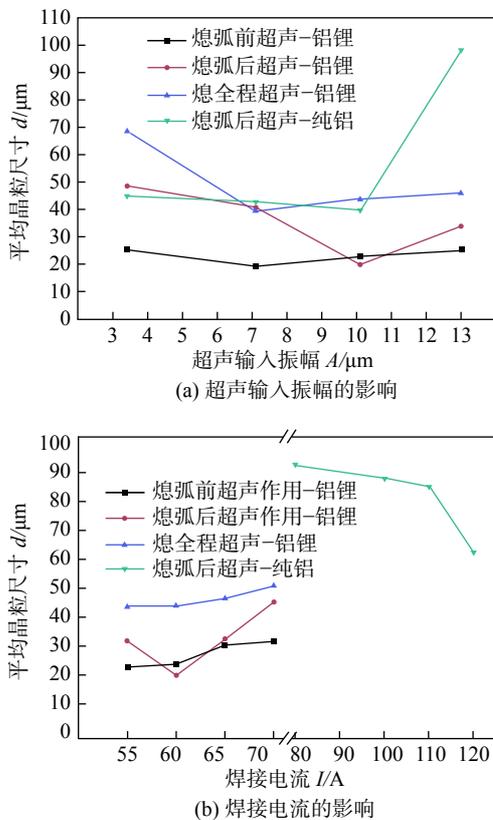


图 4 不同超声作用阶段下焊缝等轴晶平均晶粒尺寸  
Fig. 4 Average grain size of equiaxed grain with different ultrasonic action stages. (a) effect of ultrasonic input amplitude; (b) effect of welding current

以上结果表明,电弧熄灭后超声作用下及全程超声作用下铝锂合金 TIG 焊缝内等轴晶主要归功于超声作用下晶粒异质形核率的增大。

对电弧熄灭之后施加超声及全程超声作用下焊缝截面晶粒特征的形成进行分析,对于电弧熄灭之后施加超声,超声施加时刻即为电弧熄灭时刻,熔池边缘开始凝固,从熔池边缘到熔池中心,超声作用时间逐渐增大.熔池边缘受到短时超声作用,

主要产生枝晶破碎现象;而熔池中心受长时超声作用,异质形核率逐渐增大,进而形成等轴晶.对于全程超声作用,因为电弧熄灭之前已有超声作用,熔池经受超声作用时间较长,因此熔池凝固时晶粒的异质形核率较大,促进等轴晶的形成。

## 2.2 超声作用下熔池内晶粒形核和枝晶破碎之间的关系

通过施加周期性超声对超声作用下熔池内晶粒形核和枝晶破碎之间的关系进行研究.如图 5 所示,周期性超声作用下晶粒特征变化明显.对于定点焊接,瞬态的超声作用将柱状晶打碎,形成一断裂的柱状晶分布区.随着超声继续作用,积累的超声能量促进了晶粒的异质形核,形成等轴晶.当超声作用消失时,晶粒重新以柱状晶形态进行结晶,如图 5a 所示.对于移动焊接,结果如图 5b 所示,超声作用区内晶粒全部变为等轴晶.但在超声作用区内,超声作用初始时刻对应的区域和其他区域内的晶粒尺寸存在差异。

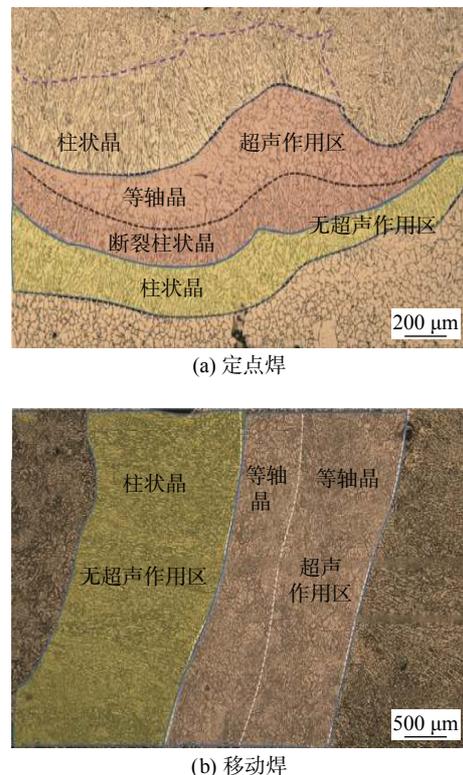


图 5 周期超声作用下焊缝晶粒特征  
Fig. 5 Grain characteristic with periodical ultrasonic action stages. (a) fixed position welding; (b) mobile welding

以上结果暗示晶粒形核与超声作用时间有关,为了明确超声作用时间与晶粒异质形核之间的关系,改变电弧熄灭之前超声作用时间,作用时间分

别为 1 s 和 3 s, 结果如图 6 所示. 当超声作用时间为 1 s 时, 焊缝边缘为等轴晶, 焊缝中心为柱状晶. 当超声作用时间为 3 s 时, 焊缝内部全部变为等轴晶. 结果表明, 超声作用下晶粒的形核率随超声作用时间的增大而增大.

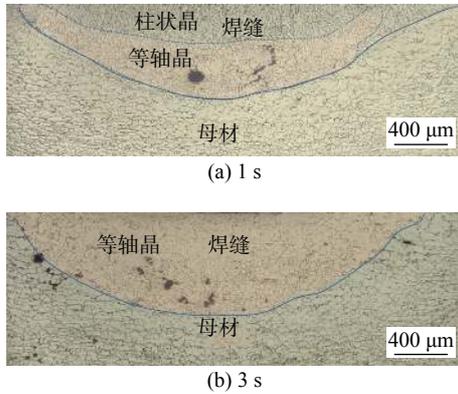


图 6 不同超声作用时间下焊缝晶粒特征

Fig. 6 Grain characteristic with different ultrasonic action time. (a) 1 s; (b) 3 s

超声作用下晶粒形核与晶粒破碎之间的关系如图 7 所示, 超声施加瞬间, 超声同时作用于糊状区及熔体区, 瞬态超声作用将柱状晶晶粒破碎, 而瞬态的超声作用对晶粒的形核几乎无影响, 因此在施加超声初期, 超声作用以破碎晶粒为主. 随超声持续时间的增大, 熔池晶粒的异质形核率逐渐增大, 导致等轴晶的形成, 限制了各方向枝晶的生长, 进而限制了超声对枝晶的破碎作用.

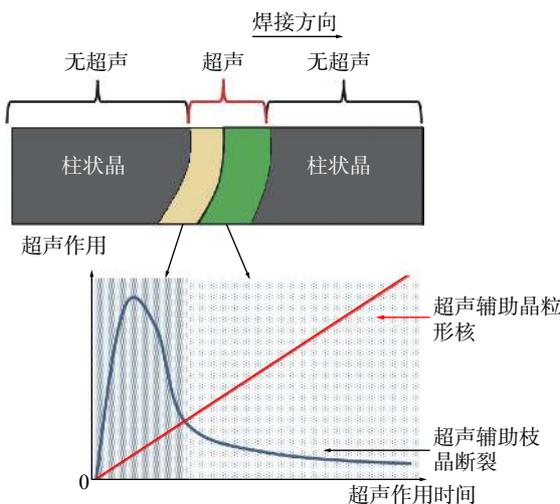


图 7 超声作用下晶粒形核和枝晶破碎之间关系示意图

Fig. 7 Influence diagram of the relationship between the ultrasonic assisted grain nucleation and the ultrasonic assisted dendrite fragmentation

2.3 超声细化晶粒机制与超声作用阶段关系分析  
对超声细化晶粒机制与超声作用阶段之间的

关系进行分析. 在序言介绍的超声作用阶段的划分基础上可将焊接过程中超声作用阶段划分为 3 个阶段: ① 超声连续作用于熔池凝固之前; ② 超声瞬时作用于糊状区; ③ 超声连续作用于整个焊接过程. 当超声连续作用于熔池凝固之前时, 超声通过促进晶粒异质形核的方式细化焊缝晶粒; 当超声瞬时作用于糊状区时, 超声主要通过破碎枝晶的方式细化焊缝晶粒. 当超声连续作用于整个焊接过程时, 超声主要通过促进晶粒异质形核的方式细化焊缝晶粒.

3 结论

(1) 电弧熄灭后超声作用下铝锂合金 TIG 焊缝边缘为断裂的柱状晶, 焊缝中心为等轴晶; 全程超声作用下铝锂合金 TIG 焊缝内全部为等轴晶. 焊缝内部等轴晶来源于积累的超声能量促进了晶粒的异质形核.

(2) 瞬态的超声作用可以破碎枝晶, 连续的超声作用可以促进晶粒的异质形核, 晶粒的异质形核率与超声作用时间有关. 超声作用下铝锂合金 TIG 焊缝晶粒细化机制与超声作用阶段有关.

参考文献

[1] Dai W L. Effects of high-intensity ultrasonic-wave emission on the weldability of aluminum alloy 7075-T6[J]. *Materials Letters*, 2003, 57(16-17): 2447 – 2454.

[2] Chen Q H, Lin S B, Yang C L, *et al.* Effect of ultrasonic impact on the microstructure of welded joint of 2195 Al-Li alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica-English Letters*, 2016, 29(4): 367 – 372.

[3] Watanabe T, Shiroki M, Yanagisawa A, *et al.* Improvement of mechanical properties of ferritic stainless steel weld metal by ultrasonic vibration[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(12): 1646 – 1651.

[4] He L B, Li L M, Hao H W, *et al.* Grain refinement and high performance of titanium alloy joint using arc-ultrasonic gas tungsten arc welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2006, 11(1): 72 – 74.

[5] 袁涛, 陈树君, 罗震, 等. 基于超声搅拌的铝合金焊缝晶粒细化方法 [J]. *焊接学报*, 2018, 39(5): 21 – 24.  
Yuan Tao, Chen Shujun, Luo Zhen, *et al.* A grain refining method of Al alloy welds with ultrasonic stirring[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(5): 21 – 24.

[6] Sun Q J, Lin S B, Yang C L, *et al.* The arc characteristic of ultrasonic assisted TIG welding[J]. *China Welding*, 2008, 17(4): 52 – 57.