

# 随焊超声施加方法对铝合金 TIG 焊缝成形影响

陈琪昊, 林三宝, 杨春利, 范成磊

(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)

**摘要:** 在铝合金 TIG 焊接的过程中, 超声能量处理熔池可以改善焊缝成形、组织与接头力学性能。文中研究了随焊超声施加方法对铝合金 TIG 焊缝成形的影响, 结果表明, 连续施加超声会导致熔池熔体飞溅, 焊缝成形不佳; 间断施加超声可以有效避免熔体飞溅, 焊缝成形良好。随焊超声冲击及随焊滚动超声技术均可实现间断施加超声, 结果表明, 尽管随焊超声冲击使熔宽变小, 但是低频冲击作用对 TIG 焊缝成形具有副作用, 会减小熔深。而采用随焊滚动超声技术, 可以有效避免低频机械冲击的不利影响, 焊缝熔宽变小的同时熔深也增大。

**关键词:** 超声; TIG 焊; 焊缝成形; 熔池

中图分类号: TG 457.14 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2016)11-0067-04

## 0 序言

铝合金由于密度低强度高等特性在航空航天领域具有广泛应用<sup>[1]</sup>。在铝合金焊接工艺中, TIG 焊接技术应用广泛。然而铝合金 TIG 接头常常由于晶粒粗大、气孔多等问题导致接头强度明显下降, 影响铝合金工件的正常使用<sup>[2]</sup>。超声能量在熔池中传播时, 由于超声声压对熔池熔体本身的拉伸及压缩作用, 产生声空化等一些非线性声学现象。此外由于超声波在熔体内传播时能量会衰减, 在熔池内产生声压差, 从而产生声流<sup>[3]</sup>。声空化及声流动会影响熔池的流动及凝固, 从而影响焊缝的组织与力学性能<sup>[4]</sup>。近些年, 超声辅助电弧焊技术已得到了广泛的研究, 许多超声复合方法被提出。归纳起来, 主要有两种超声施加方式, 一种为超声通过电弧空间传入熔池<sup>[5,6]</sup>, 另一种为超声直接通过固体母材传入熔池<sup>[7]</sup>。然而由于超声能量在电弧空间传播时, 超声能量有较大的衰减, 因此超声能量利用率会大大降低。与在电弧中传播相比, 固体母材的声阻抗较小, 超声在固体母材中传播时, 声能量衰减较小。因此, 为了提高超声能量的利用率, 超声波通过固体母材传入熔池的施加方式具有明显的优点。基于此, 文中从超声波通过固体母材传入熔池的角度出发, 研究了不同的随焊超声施加方法对铝合金 TIG 焊缝成形的影响, 为随焊超声辅助焊接技术的实际生产应用奠定基础。

## 1 试验方法

试验采用 2 mm 厚的 2195 铝锂合金板材, 所用母材为 Al-Li-Cu-Mg 合金系列。焊接时不开坡口直接在母材表面进行堆焊, 焊接方向垂直母材轧制方向, 母材化学成分如表 1 所示。

表 1 母材化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of base metal

元素	Cu	Li	Ag	Zr	Ti	Fe	Si	Al
母材	4.02	1.00	0.40	0.11	0.068	0.16	0.03	余量

试验设备为自主研发的随焊超声辅助焊接设备, 试验装置如图 1 所示, 主要由 3 部分组成: 传统 TIG 焊接系统、超声波电源和超声工具头。随焊超声辅助 TIG 焊原理如下: 超声工具头与被焊工件接触, 超声波通过固体母材传入熔池内, 影响熔池的流动与凝固, 最终影响焊缝成形、组织与力学性能。

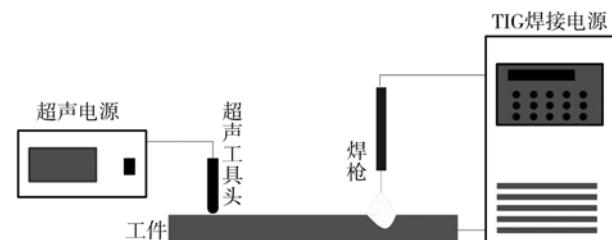
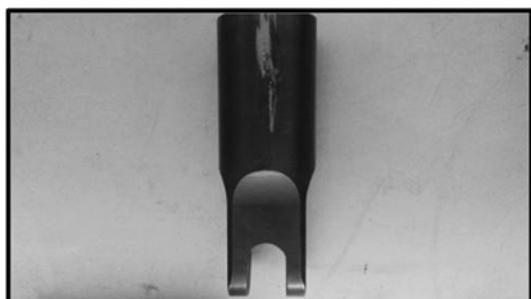


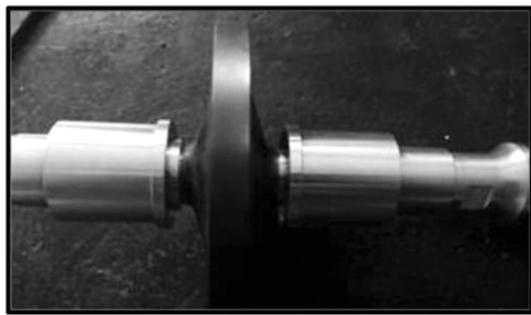
图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental device

为了满足研究需要,设计了两种不同的超声工具头,如图2所示。工具头1可以在焊接工件表面进行机械冲击,同时还可以在工件表面进行滑动,从而将超声波振动通过固体母材传入焊接熔池内。当用工具头1对被焊工件进行机械冲击时,熔池中可以获得间断超声;当工具头1在被焊工件表面滑动时,熔池内可以获得连续超声。工具头2是一种滚动式超声工具头,超声工具头在被焊件表面滚动,工具头可以间断性发射超声波,超声波通过固体母材传输进入熔池内,从而影响熔池的流动及凝固。



(a) 工具头1



(b) 工具头2

图2 超声工具头

Fig. 2 Ultrasonic horn

焊接前严格清理母材表面的氧化膜和油污等,露出光亮干净的金属表面并在短时间内完成焊接,以避免再次污染。焊接电流采用变极性方波电流,焊接速度为163 mm/min,保护气流量15 L/min,电弧长度3 mm,其它焊接参数如表2所示。为了保证对比的精确性,每组试验的焊缝的前一段是原始TIG焊缝,后一段是加超声或者机械振动辅助焊接而得到的焊缝,同一条焊缝使用的焊接参数相同。使用激光测振仪(OVF-505/500)对熔池熔体的振动进行测量。

表2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters

负半波幅值 $I_N/A$	正半波幅值 $I_P/A$	占空比 $\delta(\%)$	交流频率 $F/Hz$
100	53	75	100

## 2 试验结果与分析

### 2.1 连续超声及间断超声对焊缝成形影响

为了在TIG焊接的过程中向熔池内引入连续的超声能量,在焊接过程中超声工具头1与焊接工件始终接触,工具头在焊件的上表面滑动,超声输入位置与钨极之间距离保持不变。图3表明了连续超声对焊缝成形的影响,结果表明,连续施加超声使焊缝成形较差。在焊接的过程中可以发现,熔池熔体会发生飞溅,这将导致焊缝表面凹凸不平,进而也会影响焊接接头的力学性能。从图3中还可以看到,虽然连续超声使焊缝表面不光滑,但是熔深增大。无超声情况下,工件未焊透,施加超声后,熔深变大。这是由于超声对熔池的搅拌作用促进了熔池内温度的向下传输,进而使熔深增大。

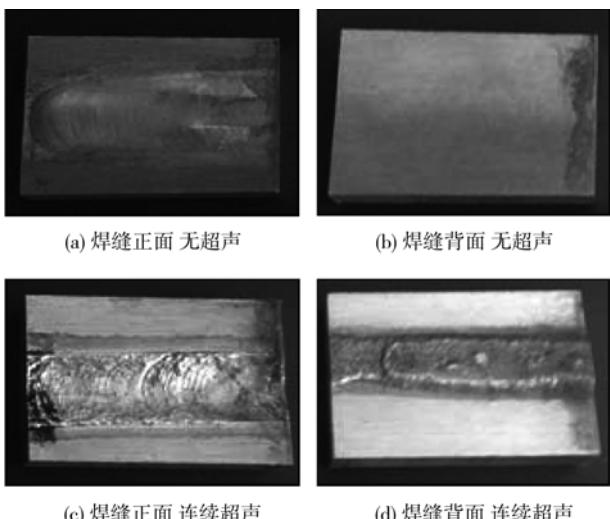


图3 连续超声对焊缝成形影响

Fig. 3 Effect of continuous ultrasonic on appearance of weld

为了避免熔池中熔体飞溅,改善焊缝成形,需向熔池内部引入不连续的超声能量。为此将超声工具头1对被焊工件表面进行低频的机械冲击,当超声工具头与工件接触时,熔池中获得超声能量,当超声工具头与工件分离时,由于空气和固体铝合金板材声阻抗相差较大,超声在铝板上表面发生了全反射,超声不能传入铝板及熔池内,利用这种方式向熔池内输入间断的超声能量。间断超声对焊缝成形影响如图4所示,焊缝成形良好,上表面出现了类似“鱼鳞纹”的特征,在焊接的过程中发现熔池中熔体不再发生飞溅。可以发现同一组焊接参数所获得的原始

TIG 焊缝成形不同, 这可能是由于焊机稳定性差所造成的, 但是这不影响超声对焊缝成形影响的研究.

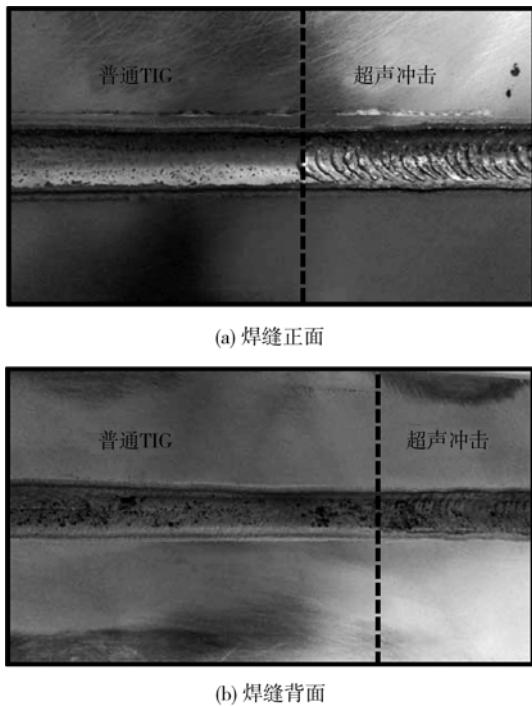


图 4 间断超声对焊缝成形影响

Fig. 4 Effect of discontinuous ultrasound on appearance of weld

在焊接过程中连续施加超声会导致熔池中熔体飞溅, 这是由于在焊接的过程中, 超声工具头与焊件一直接触, 并且同钨极距离始终保持不变, 连续超声会导致超声输入位置处振幅叠加, 振幅变大, 从而导致熔池内的超声能量逐渐增大, 过大的超声能量使熔池熔体飞溅.

## 2.2 低频机械冲击对焊缝成形影响

在上一小节的研究中, 可以发现利用超声冲击方法可以解决熔池飞溅问题, 获得较好的焊缝成形. 然而在焊接过程中, 利用超声工具头对焊件表面进行机械冲击, 不仅向固体母材中传入了超声振动, 而且也引入了低频的机械冲击作用, 低频机械冲击对焊缝成形的影响如何, 目前还不清楚, 因此本部分对低频机械冲击对焊缝成形的影响进行了研究.

为了分析低频机械冲击对焊缝成形的影响, 将超声信号关闭, 只是利用超声工具头对被焊工件表面进行低频机械冲击. 低频机械冲击对焊缝成形的影响结果如图 5 所示, 仅施加机械冲击后, 焊缝正面成形不再产生周期性的“鱼鳞纹”, 宏观形貌和普通 TIG 焊缝正面无明显差别. 但是焊缝背面却出现了明显的不同, 机械冲击后, 熔深变浅, 可见低频机械

冲击对焊缝成形产生了不利影响. 因此对于超声冲击技术, 虽然向熔池内引入了间断的超声能量, 但是低频机械冲击的作用对焊缝成形产生了不利的影响.

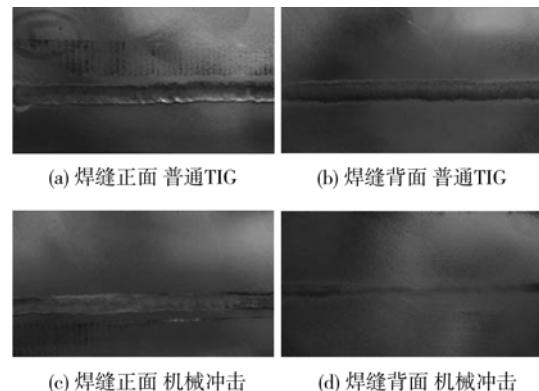


图 5 机械冲击对焊缝成形影响

Fig. 5 Effect of mechanical impact on appearance of weld

低频机械冲击之所以使焊缝的熔深变浅, 是因为在焊接的过程中, 对工件进行机械冲击, 此时在熔池内会存在一个向上的反弹力, 此向上的反弹力抑制了熔体向下流动, 从而抑制了热量向下传输, 致使焊接接头的熔深变浅.

## 2.3 随焊滚动超声辅助 TIG 焊接

基于 2.1 节和 2.2 节的研究, 可以总结出, 为了获得较好的超声辅助焊接焊缝成形, 在相同的焊接参数下, 增大熔深, 必须向熔池内引入间断的超声波, 同时还要去除低频机械冲击的作用. 为此提出随焊滚动超声辅助 TIG 焊接方法, 即在焊接的过程中, 滚动式超声工具头 2 与工件表面接触, 在工件表面滚动, 超声电源发射不连续的超声波, 从而向熔池内传入间断式的超声波. 超声输入位置与钨极距离保持不变.

采用滚动式超声输入方式向熔池内传入超声, 这种超声输入方式理论上与前几种超声输入方式相比可以获得较好的焊缝成形, 因此直接进行填丝焊接试验. 利用 2325 焊丝进行填丝焊接, 滚动超声输入方式对焊缝成形影响如图 6 所示, 从图 6 中可以看到, 采用滚动超声输入方式向熔池内传输超声波, 焊缝熔宽变窄, 熔深增大, 排除了机械冲击对焊缝成形的不良影响. 从图 6 中也可以发现, 施加超声之后焊缝上面出现了具有一定周期性的“鱼鳞纹”的特征, 这和利用随焊超声冲击焊接方法所得到的焊缝形貌特征相同, 这可能是由于熔池内间断性超声的存在, 周期性影响熔池的凝固所造成的.

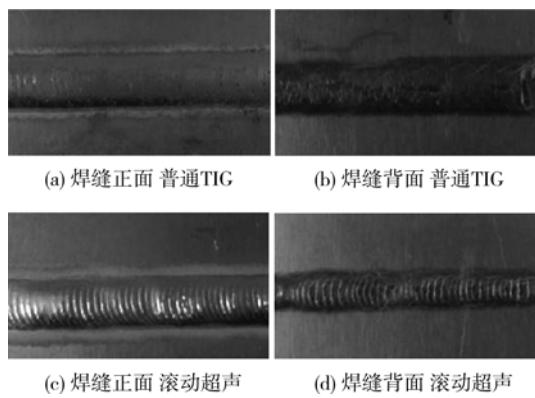


图6 随焊滚动超声对焊缝成形影响

Fig. 6 Effect of ultrasonic input with a rolling style on appearance of weld

值得注意的是,焊接工件的装夹方式对随焊滚动超声辅助TIG焊接的效果具有较大的影响,这主要是与夹具与被焊件接触界面声波的透射和反射有关。被焊件与夹具的接触松紧程度对声波在此接触面的反射和透射有明显的影响,夹具与被焊件接触越紧,更多的超声能量透过接触面传入夹具,致使熔池处的超声能量下降,使超声改善焊缝成形的效果减弱。相反,夹具与被焊件接触越松,更多的超声能量在界面发生反射,传回熔池处,致使熔池处的超声能量较大,使超声改善焊缝成形的效果增强。

为了直接的证明熔池内间断性超声能量的存在,利用激光测振仪对熔池中熔体的振动进行测量。测量结果如图7所示,当向熔池内以0.5 Hz的频率周期性的加入超声波振动后,熔池的振动强度也明显出现了周期性的变化,熔池振动强度变化的频率和超声施加频率几乎一致,这说明超声的确进入了

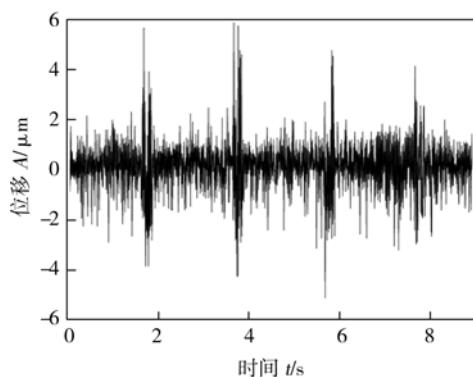


图7 周期超声对熔池振动的影响

Fig. 7 Effect of periodical ultrasound on vibration of weld pool

熔池,影响了熔池的凝固状态,使焊缝产生了周期性“鱼鳞纹”。

### 3 结 论

(1) 连续施加超声会使熔池熔体产生飞溅,不利于铝合金TIG焊缝成形;间断施加超声会避免熔池熔体飞溅,有利于焊缝成形。

(2) 低频机械冲击使熔深变浅,不利于TIG焊接。

(3) 随焊滚动超声辅助TIG焊可以去除低频机械冲击的不利影响,使熔深增大,熔宽变小。

### 参考文献:

- [1] Grimes R, Cornish A J, Miller W S, et al. Aluminium-lithium based alloys for aerospace applications[J]. Metals and materials, 1985, 1(6): 357–363.
- [2] 李占明, 朱有利, 王侃, 等. 2A12铝合金焊接接头超声冲击强化机理分析[J]. 焊接学报, 2008, 29(9): 55–58.  
Li Zhanming, Zhu Youli, Wang Kan, et al. Analysis of strengthening mechanism of ultrasonic impact treatment of 2A12 aluminum alloy weld joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(9): 55–58.
- [3] Dehnavi M R, Niroumand B, Ashrafizadeh F, et al. Effects of continuous and discontinuous ultrasonic treatments on mechanical properties and microstructural characteristics of cast Al413-SiC np nanocomposite[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 617: 73–83.
- [4] Cui Y, Xu C, Han Q. Microstructure improvement in weld metal using ultrasonic vibrations[J]. Advanced Engineering Materials, 2007, 9(3): 161–163.
- [5] Wu M S, Wang Z X, Li L M, et al. Study of the mechanism for arc-excited ultrasonic[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition), 1999, 12(1): 1–3.
- [6] 孙清洁, 林三宝, 杨春利, 等. 超声-TIG复合焊接装置的研制与应用[J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 79–82.  
Sun Qingjie, Lin Sanbao, Yang Chunli, et al. Investigation and application of ultrasonic-TIG hybrid welding equipment[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(2): 79–82.
- [7] Cui Y, Xu C, Han Q. Effect of ultrasonic vibration on unmixed zone formation[J]. Scripta materialia, 2006, 55 (11): 975–978.

**作者简介:**陈琪昊,男,1988年出生,博士研究生。主要从事铝合金的电弧焊研究工作。发表论文1篇。Email: 737500886@qq.com

**通讯作者:**杨春利,男,教授。Email: yangel9@hit.edu.cn