

周期超声对铝合金 TIG 焊缝成形影响机制分析

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: 超声可以影响铝合金 TIG 熔池结晶与焊缝成形, 文中对超声场下铝锂合金 TIG 焊缝成形的机制进行了分析。文中分析了超声作用下焊缝宏观形貌及熔池上表面振动的变化, 并通过有限元分析了超声对熔池流动的影响。周期超声使焊缝出现周期性的凸起, 焊缝熔宽有变小趋势。超声使熔池上表面振动幅度增大, 周期超声使熔池上表面产生周期性的振动。对焊缝周期性凸起产生的机制进行分析。结果表明, 声流使熔池流动速度增大, 熔池边缘熔体流动状态变化, 熔池凝固后在熔池边缘产生凸起。周期超声周期性地影响熔池的流动及凝固, 因此熔池边缘产生周期性凸起。

关键词: 铝合金; 超声; TIG 焊; 焊缝成形

中图分类号: TG 457.14

文献标识码: A

文章编号: 0253-360X(2017)03-0009-04

0 序 言

铝锂合金具有低密度、高比强度、以及耐腐蚀性等优点, 在航空航天领域具有广阔的应用^[1,2]。对于铝锂合金的焊接, TIG 焊是一种常用的焊接方法, 然而常规 TIG 焊接头晶粒粗大, 气孔及其它缺陷较多, 限制了铝锂合金的进一步应用^[3]。近些年超声电弧复合焊接技术得到了广泛的关注, 利用超声空化及声流作用影响熔池的流动及凝固, 从而改善焊接接头的微观组织与力学性能^[4-8]。哈尔滨工业大学杨春利等人分析表明, 向熔池内引入间断性的超声能量, 可以提高铝合金 TIG 焊接头力学性能, 同时改善焊缝成形^[9]。文中对周期性超声场下铝锂合金 TIG 焊缝成形的机制进行了深入分析, 为超声振动辅助 TIG 焊接技术的进一步发展奠定基础。

1 试验方法

文中所使用的超声振动辅助 TIG 焊接装置示意图如图 1 所示, 工作原理如下: 在 TIG 焊过程中, 超声工具头在熔池后方周期性冲击母材表面, 从而将周期性的超声能量传入熔池内部, 影响熔池的流动与凝固。

为了观察超声能量对铝锂合金 TIG 焊缝宏观成形的影响, 进行填丝对接焊试验。试验采用 2 mm 厚

2195 铝锂合金板材, 焊接方向垂直母材轧制方向, 填充金属为直径 1.6 mm 的 ER2325 焊丝, 焊接电流采用变极性方波电流, 焊接速度为 162 mm/min, 保护气体流量为 15 L/min, 送丝速度为 1 040 mm/min, 其它焊接工艺参数如表 1 所示。

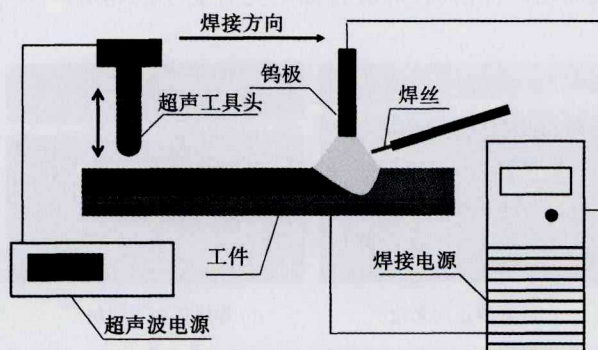


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental device

表 1 焊接工艺参数

Table 1 Welding process parameters

负半波幅值 I_{EN}/A	正半波幅值 I_{EP}/A	占空比 $\delta_{DC}(\%)$	交流频率 f/Hz
100	53	75	100

焊接过程中超声工具头在熔池后方对母材表面进行超声冲击, 超声工具头位置同熔池之间的距离为 11 cm。超声冲击参数如下: 超声工具头输出振幅 7.5 μm , 超声频率为 20 kHz, 超声工具头下降时间

为 t_1 ; 超声工具头与固体母材接触时间为 t_2 ; 超声工具头上升时间为 t_3 ; 超声工具头滞空时间为 t_4 . 试验中 t_1 与 t_2 的总和为 0.2 s, t_3 与 t_4 的总和为 0.2 s.

熔池内存在超声时, 超声对熔池上表面的振动产生影响, 利用激光测振仪分析了超声能量对熔池振动的影响, 同时分析了超声冲击频率与熔池上表面振动状态之间的联系.

利用有限元模拟方法定性分析了超声对熔池流动性的影响. 超声作用于熔池内, 存在声流动现象, 将声流驱动力 $F = -\nabla \langle E \rangle$ 作为体积力施加到 N-S 方程内, E 为超声能量密度. 最后利用高速摄像技术对焊接时的熔池上表面状态进行观察以验证模拟正确性.

2 试验结果与分析

2.1 周期超声对焊缝成型的影响

采用 2 mm 厚的 2195 铝锂合金进行对接焊接试验, 焊丝选用直径为 1.6 mm 的 ER2325 焊丝, 焊后所得到的焊缝宏观形貌如图 2 所示. 从图 2 中可以看到, 在 TIG 焊过程中施加超声冲击后, 铝锂合金 TIG 焊缝正面出现周期性凸起, 而原始 TIG 焊缝正面比较光滑, 无周期性凸起产生, 同时可以观察到, 施加超声冲击后, 焊缝背面熔宽有变小的趋势.

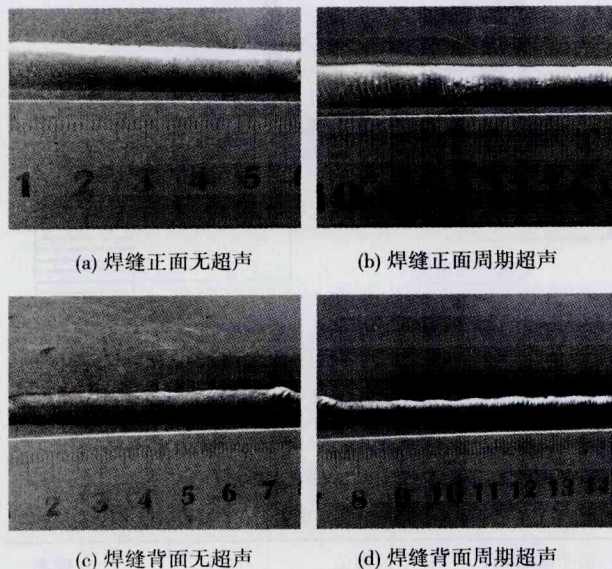


图 2 周期超声对铝锂合金 TIG 焊缝成型影响

Fig. 2 Effect of periodical ultrasound on appearance of TIG weld of Al-Li alloy

2.2 焊缝周期性凸起同超声冲击频率之间的关系

根据 2.1 节的分析可知, 在 TIG 焊过程中施加超声冲击后, 焊缝正面出现明显的周期性凸起, 文中

对凸起出现周期同超声冲击周期之间的联系进行分析. 焊缝正面凸起部分的长度记为 W_1 , 相邻凹下部分的长度记为 W_2 , 如图 3 所示. W_1 和 W_2 的确定原则是: 焊缝上表面凸起最高点为 W_1 和 W_2 的分界点, 沿着焊接方向, 从此分界点到邻近的上表面最低点的水平距离为 W_2 ; 沿着焊接的反方向, 从此分界点到邻近的上表面最低点的水平距离为 W_1 . 若这种周期性凸起是由于周期性超声能量引起的, 那么根据焊接速度可以算得 W_1 及 W_2 的理论长度. W_1 持续时间理论上应等同于超声工具头与母材接触时间, 即 t_2 ; 而 W_2 持续时间理论上应等同于 t_1, t_3 与 t_4 的总和, 即超声工具头与固体母材非接触的时间. 焊接速度为 162 mm/min, 由于 t_2 的具体时间未知, 只知道 t_1 与 t_2 的总和为 0.2 s, 则 W_1 应小于 0.54 mm. 同理只知道 t_3 与 t_4 的总和为 0.2 s, 则 W_2 应大于 0.54 mm. 然而 W_1 与 W_2 的总和却可以得到精确值为 1.08 mm, 利用光学放大镜对焊缝上表面的 W_1 和 W_2 的长度进行实际测量, 由于目测焊缝上表面的最高点及最低点存在一定的误差, 于是对 W_1 和 W_2 分别测量 3 次, 然后取平均值, 以减小 W_1 和 W_2 的测量误差. 经测量, W_1 的平均值为 0.473 mm, W_2 的平均值为 0.619 mm. 符合理论预测的情况, 即 W_1 小于 0.54 mm, 而 W_2 大于 0.54 mm. 而 W_1 与 W_2 的总长度为 1.092 mm, 与理论值 1.08 mm 相比, 误差仅为 1.11%, 实测值与理论值非常接近, 因此可以证明, 这种周期性凸起是由于熔池内的周期性超声能量引起的.

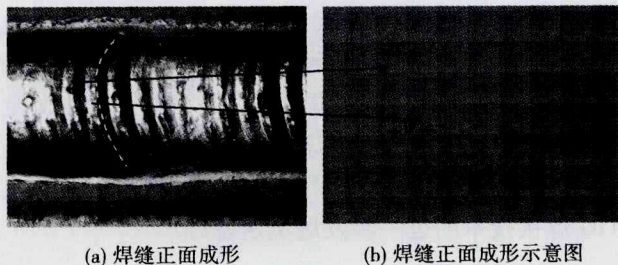


图 3 超声场下铝锂合金 TIG 焊缝正面成形及示意图

Fig. 3 Appearance and schematic of topside of TIG weld of Al-Li alloy with ultrasonid

为了确认熔池内周期性超声能量的存在, 利用激光测振仪对熔池上表面的振动进行测量, 测量结果如图 4 所示. 从图 4 中可以看到, 施加超声冲击后, 熔池上表面的振动幅度明显增大, 但是振动的周期性却不明显, 这可能是由于超声作用时间和间隔时间非常接近, 不容易分辨所致. 为了使熔池振动周期性更加明显, 改变超声冲击参数, 将超声间隔时间增大到 1.8 s, 超声作用时间仍为 0.2 s, 测试结果

如图 4c 所示,从图 4c 中可以清晰的看出熔池上表面振动的周期性,此结果证明熔池内的确存在周期性超声能量.

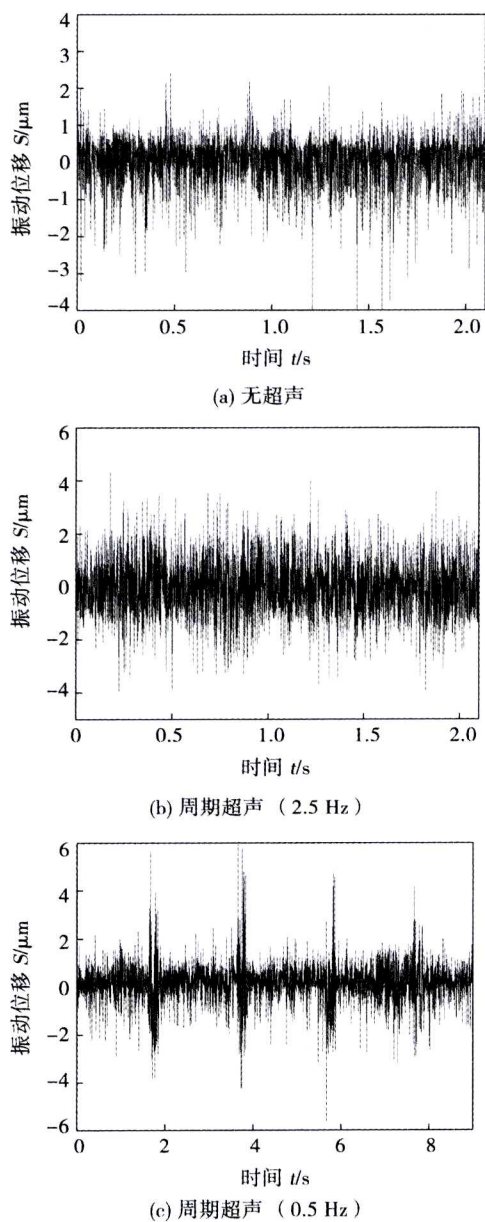


图4 铝锂合金 TIG 焊熔池上表面振动

Fig. 4 Vibration of surface for TIG weld pool of Al-Li alloy

2.3 超声场下焊缝周期性凸起产生原因

在 TIG 焊过程中施加超声冲击,铝锂合金焊缝正面出现周期性的凸起. 根据 2.2 节的分析可知,这种周期性的凸起是由于熔池内部周期性超声能量的存在产生的. 然而超声场下焊缝正面产生凸起的原因却还不清楚. 文中具体分析了超声场下焊缝正面凸起产生的原因.

利用有限元软件对 2 mm 厚 2195 铝锂合金 TIG 焊熔池流动进行模拟,定性分析了超声对熔池流动

影响. 模拟结果如图 5 及图 6 所示. 图中箭头指向

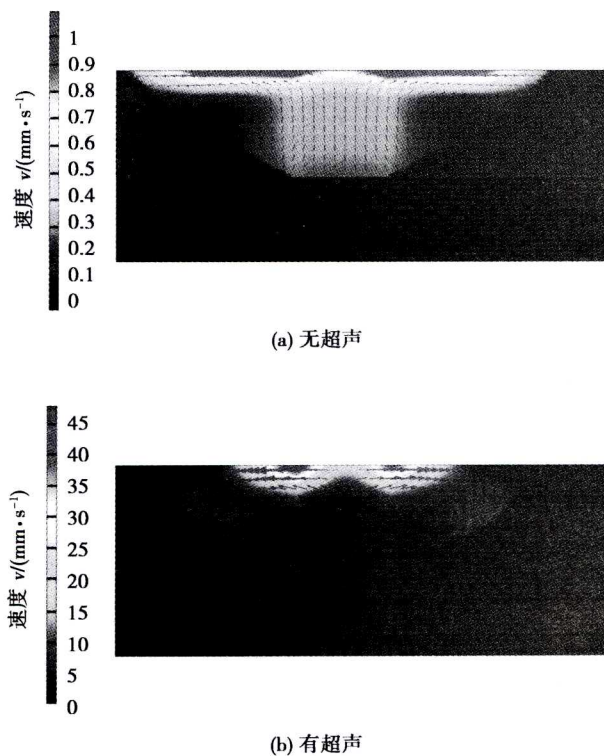


图5 熔池横截面流场

Fig. 5 Fluidity of cross section of TIG weld pool

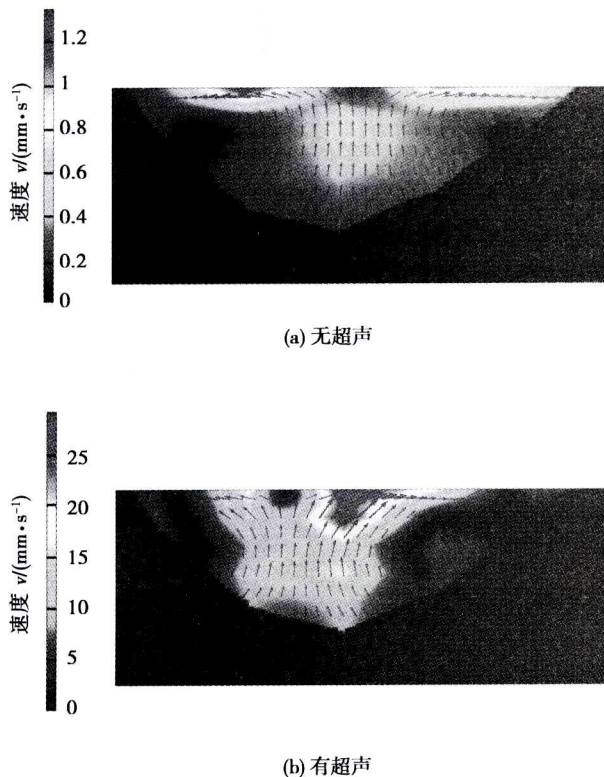


图6 熔池纵截面流场

Fig. 6 Fluidity of longitudinal section of TIG weld pool

代表熔池流动方向. 图 5 为熔池横截面流动模拟结果, 从图 5 中可以看到, 超声施加之后, 熔池流动速度明显增强, 最大流动速度所在位置改变, 熔池边缘流动方向改变. 原始 TIG 焊熔池内, 熔池边缘流动方向由熔池上表面流向熔池内部; 施加超声之后, 熔池边缘流体首先由内部流向熔池上表面然后再流向熔池内部, 因此导致熔池边缘处熔体凸出, 熔池凝固后, 焊缝边缘便产生凸起现象. 周期超声对熔池流动的影响也是周期性起的, 因此这种凸起就会周期性的产生. 图 6 为熔池纵截面流动结果, 可以发现施加超声之后, 熔池流动速度明显增强, 最大流动速度所在位置改变.

为了验证熔池流动模拟结果的正确性, 利用高速摄影对熔池形貌进行拍摄, 如图 7 所示. 无超声情况下普通 TIG 焊熔池边缘无凸起, 施加超声之后, 熔池边缘熔体出现了凸起, 这和理论预测结果完全一致.

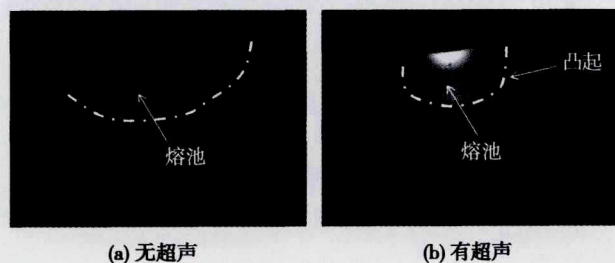


图 7 TIG 焊熔池形貌
Fig. 7 Appearance of TIG weld pool

施加合理的超声能量, 熔池内声空化及声流动会在一定程度内细化焊缝晶粒, 同时减少焊缝内的气孔, 改善焊接接头的力学性能. 已有的研究表明, 随焊超声冲击可以提高铝合金 TIG 焊接头的力学性能^[8].

3 结 论

(1) 在 TIG 焊过程中向熔池内周期性传入超声, 改变了铝锂合金 TIG 焊缝成形, 焊缝正面出现周

期性凸起.

(2) 熔池内超声的存在, 使熔池上表面振动增强, 振动幅度增大. 熔池内周期性超声存在使熔池产生周期性的振动.

(3) 超声使熔池内熔体流动速度增大, 最大流动速度的位置发生改变. 超声使熔池边缘流动状态发生变化, 熔池边缘聚集更多的熔体, 熔池凝固后焊缝正面出现凸起.

参考文献:

- [1] Gupta R K, Nayan N, Nagasireesha G, *et al.* Development and characterization of Al-Li alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 420(1): 228 - 234.
- [2] 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.
- [3] Hassan K A A, Norman A F, Price D A, *et al.* Stability of nugget zone grain structures in high strength Al-alloy friction stir welds during solution treatment [J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(7): 1923 - 1936.
- [4] Wu Minsheng, Wang Zhengxian, Li Luming, *et al.* Study of the mechanism for arc-excited ultrasonic[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering(English Edition)*, 1999, 12(1): 1 - 3.
- [5] Cui Y, Xu C, Han Q. Effect of ultrasonic vibration on unmixed zone formation [J]. *Scripta Materialia*, 2006, 55(11): 975 - 978.
- [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] Fan Yangyang, Fan Chenglei, Yang Chunli, *et al.* Development and preliminary study on the ultrasonic assisted GMAW method [J]. *China Welding*, 2010, 19(4): 1 - 5.
- [8] 曲洪韬. 随焊超声冲击设备的研制及超声冲击作用机理研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

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 2 篇. Email: changqh2126@foxmail.com

通讯作者: 杨春利, 男, 教授. Email: yangcl9@hit.edu.cn