

2195 铝锂合金超声 TIG 焊的组织与性能分析

张玉岐, 杨春利, 林三宝, 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: 采用了普通 TIG 焊和超声复合 TIG 焊对 2 mm 厚度的 2195 铝锂合金进行了平板对接焊, 并对两种焊接接头的显微组织和力学性能进行了研究。结果表明, 由于超声的作用效果, 超声 TIG 焊的焊缝具有更加致密的组织, 熔合区附近的等轴细晶区区域较宽; 拉伸性能测试表明, 超声 TIG 焊接头具有较高的拉伸性能, 接头强度系数比普通 TIG 焊提高 6.7%, 断后伸长率提高 1.36%, 拉伸接头均断裂在热影响区硬脆的晶界相内, 显微硬度测试表明超声 TIG 焊接头受热影响软化区域较窄。

关键词: 2195 铝锂合金; 超声 TIG 焊; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG 457.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)10-0053-04

0 序 言

2195 铝锂合金由于具有低密度、高比强度、良好的塑韧性以及耐腐蚀性等优点, 在航空航天领域具有广阔的应用前景^[1,2]。但其制造与加工工艺上的困难, 特别是该轻合金的焊接问题, 如气孔、热裂纹和接头软化问题相比于其它铝合金更为严重^[3]。焊接铝锂合金的方法主要有熔化极氩弧焊、钨极氩弧焊、变极性等离子弧焊、搅拌摩擦焊和激光焊等, 其中, 氩弧焊具有成本低、通用性好等特点, 广泛应用于铝锂合金的焊接。而近年来由哈尔滨工业大学杨春利等人^[4,5]发明的超声复合 TIG 焊方法应用于铝合金的焊接具有细化晶粒、熔深增加和接头强度较高等优点。文中采用普通的 TIG 焊和超声 TIG 焊两种方法对 2195 铝锂合金进行焊接, 对两种接头的显微组织和力学性能进行研究。

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, 沉淀强化相主要有 δ' -Al₃Li, T₁-Al₂CuLi 相, S'-Al₂CuMg 相, θ' -Al₂Cu 相和 β' -Al₃Zr 等, 同时, Zr, Ag 等元素的加入形成高熔点的金属间化合物弥散相, 抑制再结晶和控制晶粒尺寸, 提高了合金强度。焊接时不开坡口对接焊, 焊接方向垂直母材轧制方向, 所用填充金属为直径

1.6 mm 的 ER2325 焊丝, 母材和焊丝的化学成分如表 1 所示。

表 1 母材和焊丝的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of base metal and welding wire

元素	Cu	Li	Ag	Zr	Fe	Mg	Ti	Al
母材	3.98	0.96	0.28	0.1	0.16	0.36	0.068	余量
ER2325	6.3	—	—	0.20	0.3	0.02	0.13	余量

自主研发的试验装置如图 1 所示, 主要有三部分组成: 传统 TIG 焊电源、超声波电源和复合焊枪。超声复合焊枪内含有换能器和变幅杆的超声振动系统, 试验原理为 50 Hz 交流电经过超声电源转化为相应的脉冲电信号, 由换能器转化为机械振动, 并经过变幅杆的放大作用, 最终由变幅杆辐射端面将超声振动作用于焊接电弧, 并影响到焊接熔池, 实现复

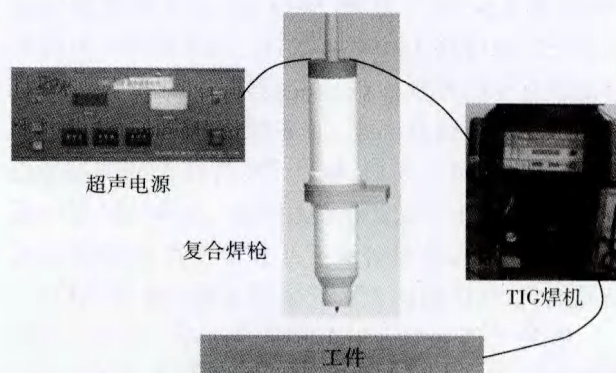


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental device

合焊接过程.

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. 超声电源功率为 130 W, 振动频率为 28.9 kHz. 变幅杆辐射端面距母材表面的距离为

25 mm, 此时的超声振动效果最强烈. 保护气体为纯氩气, 气体流量为 25 L/min. 焊接电流采用交流正弦波, 交流频率保持为 60 Hz. 焊接速度均保持 1.67 mm/s, 其它具体焊接参数如表 2 所示.

焊接接头首先经打磨和剖光, 用 Keller 试剂

表 2 焊接工艺参数
Table 2 Welding process parameters

试验	峰值电流 I_p/A	基值电流 I/A	峰值时间 t_p/ms	基值时间 t/ms	电弧长度 D/mm	送丝速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$
TIG 焊	120	45	233	100	4	7.5
超声 TIG 焊	110	45	233	100	4	7.5

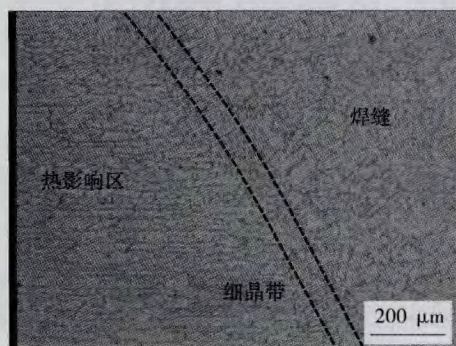
(1 mL HF + 1.5 mL HCL + 2.5 mL HNO₃ + 95 mL H₂O) 腐蚀后, 采用 OLYMPUS-PMG3 金相显微镜进行接头宏观形貌和金相组织的观察; 使用扫描电子显微镜 Helios Nanolab600i 观察接头组织; 使用 INSTRON-5569 电子万能材料试验机对焊接接头进行拉伸性能测试(拉伸速率为 2 mm/min); 采用 HVS-1000 数字显微硬度仪对焊接接头进行维氏硬度测试.

2 试验结果与分析

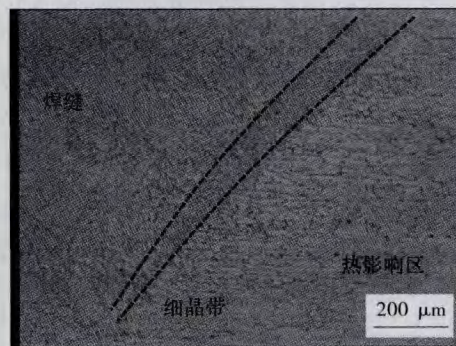
2.1 显微组织分析

接头熔合区附近的金相组织如图 2 所示. 焊缝为铸态组织, 紧靠熔合区附近的焊缝内有几个晶粒厚度的等轴细晶带, 这是 Al-Li 合金熔焊时的特有现象. 产生细晶区的原因有以下几点^[6,7]: (1) Li, Zr 和 Ti 元素的加入, 以 Al₃Li, Al₃Zr 和 TiAl₃ 作为质点促进非均匀形核, 产生等轴细晶区; (2) Li 作为表面活性元素, 可以降低液体的表面张力, 提高了异质形核率和形核速率, 并且在铝中的分配系数小于 1, 易富集在固液界面前沿的液相中使溶质浓度增加, 导致成分过冷度的增大, 促进新相成核; (3) Kostivas 和 Lippold^[8] 发现 Al-Li-Cu 合金焊缝等轴晶区的形成温度约为 630 ~ 640 °C, 而超过 640 °C 时就会出现常见的外延生长, 所以异质晶核只能在较冷的熔池边界处留存下来, 而不能在较热的熔池中保留存在. 对比可以发现, 超声 TIG 焊接头的细晶带更宽一些, 这是由于超声的作用效果, 超声波经过电弧传入焊接熔池, 改变熔池液态金属流动, 使焊缝金属结晶细化; 热影响区为沿着轧制方向的粗大晶粒.

两种工艺的焊缝 SEM 如图 3 所示. 图 3 中黑色基底为 α -Al, 白色组织主要为 α -Al 与 θ -Al₂Cu 的共晶组织. 在普通 TIG 焊缝中可以观察到含有较多的缩孔, 这是由于液态金属流动性较差凝固收缩不能



(a) TIG 焊



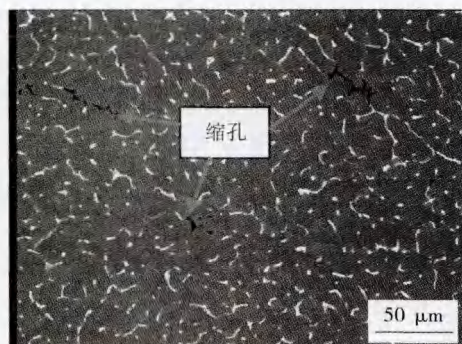
(b) 超声 TIG 焊

图 2 熔合区附近的接头金相组织

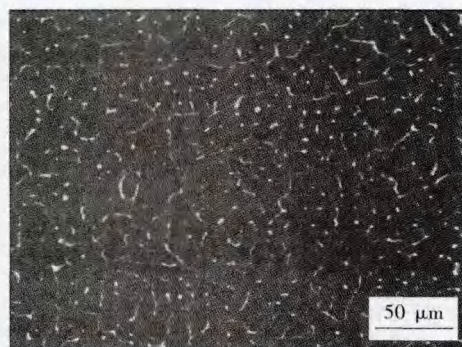
Fig. 2 Microstructure of joints near fusion zone

补缩而造成的, 在焊缝中这些缩孔的存在使接头的力学性能降低. 而超声 TIG 焊缝中, 产生的缩孔较少, 这是由于超声振动传入熔池内, 由于熔池液体的粘性, 超声波在熔池内传播时声压会衰减, 产生了声压梯度, 声压梯度产生了促进熔池流体流动的驱动力, 此驱动力即为声流驱动力, 声流的产生对熔池有搅拌作用, 同时由于超声波在熔池内传播时是纵波, 使熔体产生膨胀收缩的现象, 因此对熔池熔体也有振动的作用, 超声波对熔池的振动搅拌作用, 促进了熔池液态金属的流动, 克服了普通 TIG 焊熔池液态金属流动性差而凝固收缩不能补缩的缺点, 因此加

入超声之后,得到了更加致密的焊缝组织,焊缝中未见明显的缩孔缺陷.缩孔缺陷的减少有利于焊缝力学性能的提高.



(a) TIG 焊



(b) 超声TIG焊

图 3 焊缝区组织

Fig. 3 Microstructure of weld zone

两种方法焊接接头热影响区的显微组织如图 4 所示,焊接过程是一个不平衡的热过程,在焊接的过程中,热影响区受到的温度低于母材的熔点温度,尚未融化,靠近熔合区温度较高,远离熔合区处温度渐渐降低,焊接热作用于热影响区后会对热影响区进行热处理作用,热影响区受到焊接热的作用后,在较高温度下,一些低熔点的组织发生重熔,重新固溶到 α -Al 中,在随后的降温冷却过程中又发生再结晶现象,在某一温度范围形成 α -Al 与 Al-Li 共晶组织和 α -Al 与 Al_2Cu 的共晶组织,所以室温下晶界的网状组织为含有三元相的共晶组织.

2.2 力学性能分析

2.2.1 拉伸性能分析

以焊缝为中心,垂直于焊缝方向进行切割制取标准拉伸试样,每种焊缝制取 3 个试件,取三个试件的拉伸数据平均值,如图 5 所示.从图 5 中可以看出 TIG 焊的接头强度系数为 59.5%,而超声 TIG 焊接头的平均强度系数达到母材的 66.2%,最高可达母材的 67.4%,接头强度系数提高明显.并且,超声



(a) TIG 焊



(b) 超声TIG焊

图 4 热影响区组织

Fig. 4 Microstructure of heat affected zone

的加入还使得接头的断后伸长率增加显著,由无超声作用的 2.71% 增加到 4.07%.这是因为超声的作用效果,焊接接头具有良好的组织特征,焊缝组织更加致密,热影响区受焊接热影响较小,晶粒细化等特点而对应其接头强度比无超声作用时的强度及断后伸长率提高.

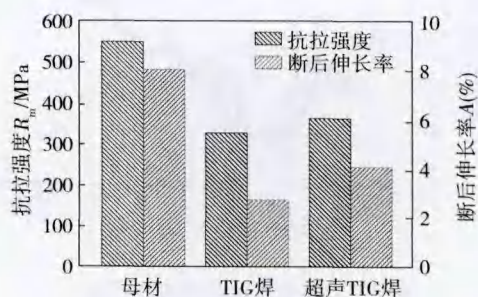


图 5 拉伸性能

Fig. 5 Tensile properties

两种方法的焊接接头均断裂在靠近熔合线处的热影响区内,拉伸时热影响区内初生的裂纹如图 6 所示,可以看出裂纹起裂于白色的共晶相,此外在晶界处还有杂质相等,这些晶界相割裂晶粒之间的联系,并作为裂纹源,在合金受力时容易萌生裂纹导致断裂.在外界继续施加的拉力作用下,裂纹向外扩

展,并沿着热影响区晶界处呈网状分布的硬脆共晶相断裂。

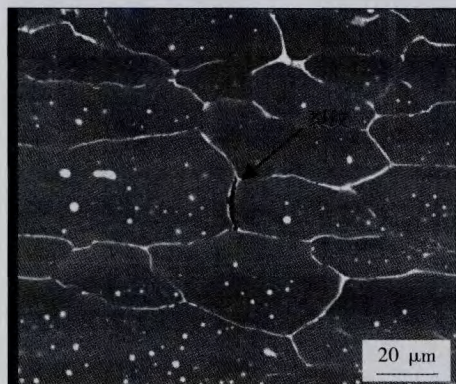


图6 热影响区内初生裂纹
Fig. 6 Primary crack in HAZ

2.2.2 显微硬度分析

显微硬度测试的加载力为 1.96 N, 加载时间 10 s, 普通 TIG 焊和超声 TIG 焊的焊接接头显微硬度测试结果如图 7 所示。可以看出, 2195 合金母材的显微硬度可以达到 1 600 HV 以上, 而焊缝和热影响区受焊接热影响软化, 显微硬度下降明显。其中, 焊缝区的显微硬度在整个接头中最低。对比两种接头可以发现, 超声 TIG 焊由于较小的热输入, 热影响区受热影响宽度较小, 硬度降低区域较窄, 有利于提高接头的力学性能。

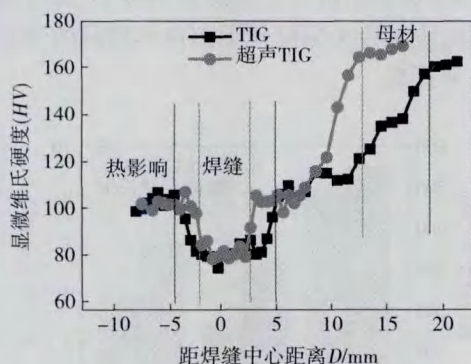


图7 焊接接头的显微维氏硬度
Fig. 7 Hardness value of welded joints

3 结 论

(1) 2195 铝锂合金的焊接接头熔合区附近有

几个晶粒厚度的等轴细晶区存在, 而超声复合 TIG 焊接头由于超声的作用效果, 等轴细晶区较宽; 超声 TIG 焊中超声对焊接熔池有振动搅拌作用而形成比普通 TIG 焊更加致密的焊缝组织。

(2) 超声 TIG 焊的接头具有更高的抗拉强度和断后伸长率; 拉伸接头均断裂在靠近熔合线处的热影响区内, 起裂于硬脆的晶界共晶相, 并沿着热影响区内的网状组织断裂; 超声 TIG 焊接头的热影响区受热影响宽度较小, 硬度降低区域较窄, 有利于提高接头的力学性能。

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] Lavernia E J, Grant N J. Aluminium-lithium alloys[J]. *Journal of Materials Science*, 1987, 22(5): 1521-1529.
- [4] 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(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(2): 79-82.
- [5] Yuan Heran, Lin Sanbao, Yang Chunli, *et al.* Microstructure and porosity analysis in ultrasonic assisted TIG welding of 2014 aluminium alloy[J]. *China Welding*, 2011, 20(1): 39-43.
- [6] 李小飞. 2195 铝锂合金焊接热裂纹敏感性和焊接材料研究[D]. 北京: 北京航空材料研究院, 2007.
- [7] 于尔靖, 郝传勇, 应慧筠, 等. 铝锂合金焊缝凝固组织特征[J]. *焊接学报*, 1996, 17(1): 1-6.
Yu Erjing, Hao Chuanyong, Ying Huijun, *et al.* Peculiarities of solidification structure of aluminum-lithium alloy welds[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 1996, 17(1): 1-6.
- [8] Kostrivas A, Lippold J C. A method for studying weld fusion boundary microstructure evolution in aluminum alloys[J]. *Welding Journal-New York*, 2000, 79(1): 1s-8s.

作者简介: 张玉岐, 男, 1991 年出生, 硕士研究生。主要从事铝合金的电弧焊研究工作。发表论文 5 篇。Email: zyxzyq@163.com

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