

# 超声功率对 7075 铝合金 CMT 焊接接头的组织与性能的影响

李锐峰, 陈芙蓉

(内蒙古工业大学 材料科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

**摘要:**为了解决铝合金接头的气孔多、晶粒粗大、力学性能差等问题,使用冷金属熔滴过渡(CMT)焊接方法完成对7075铝合金薄板的焊接,在焊接过程中引入超声波。通过金相、EBSD、力学性能等测试考察了不同超声功率对焊接接头气孔、微观结构和力学性能的影响。结果表明,超声振动可以显著地减小气孔数量、增加熔宽,并且其焊接热影响区(HAZ)的宽度随超声功率的增加而减小;超声功率为1200 W时焊接接头显微硬度较无超声提高87.514 MPa,抗拉强度提高85 MPa,断后伸长率提高1.4%。由EBSD结果分析可知,当超声功率为1200 W时焊缝平均晶粒尺寸36.89  $\mu\text{m}$ ,比未施加超声时减小了9.99  $\mu\text{m}$ ,焊缝晶粒得到了明显细化;随着超声功率的增加提高了晶粒的大角度晶界的比例,焊接接头的塑性有所增加。

**关键词:** 超声功率; 微观结构; 力学性能; 7075 铝合金; CMT

**中图分类号:** TG456.7; TG146.21

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2023)01-0274-09

7系铝合金具有密度小、强度高、断裂韧性优良、焊接性能好等优点,广泛地应用于航空、航天、交通运输和其他军工及民用行业,是主要的结构材料之一<sup>[1-2]</sup>。熔化极气体保护焊和钨极氩弧焊均为常用的铝合金薄板焊接方法<sup>[3]</sup>。熔化极气体保护焊在焊接时存在热输入较大而使焊接接头晶粒粗大的问题;钨极氩弧焊由于钨极头承载电流较少,热输入相对较低,其焊接效率较低。随着焊接技术的发展,在短路过渡的基础上开发出的冷金属熔滴过渡(CMT)焊接成为薄板焊接的主要技术<sup>[4]</sup>。但是CMT焊接铝合金薄板时,容易产生气孔和造成应力集中,降低焊接接头的力学性能,去除铝合金焊缝中的气孔对提高质量至关重要。目前去除焊接气孔的方法包括冶金措施和工艺措施,其中超声辅助方法是一种清洁环保且相对便捷的工艺措施<sup>[5-6]</sup>。

超声波<sup>[7-8]</sup>作为一种频率高于20 kHz的机械振动,其传播具有稳定的方向性,且能量密度高。超声波可以在介质的传播过程中沿特定的方向进行传播,并且可以实现声力的辐射。超声波在焊接熔池传播过程中还可以产生空化效应、声流效应、除气效应、机械效应和热效应等<sup>[9]</sup>。如果将超声振动作用于熔池中时,其引发的声空化效应能够使焊缝金属在结晶过程中形

成的粗大柱状晶的枝晶破裂,在声流效应的作用下,流动到熔池中,从而形成更多的细小晶粒,这些细小晶粒成为新的形核质点,进而起到了细化晶粒的作用<sup>[10-11]</sup>。将超声波引入到电弧焊中可以显著改善母材的熔化和熔池金属的凝固结晶行为,很大程度上使焊缝组织得到细化,焊接接头各种性能得到提高<sup>[12]</sup>。

想要将超声波应用到焊接过程中,需要通过媒介将超声引入到焊接熔池中去。而引入熔池的方法不同,其作用也会受到影响。目前接触式的引入超声方式主要是通过母材将超声引入熔池<sup>[13]</sup>、通过焊丝将超声引入熔池<sup>[14]</sup>、利用超声直接冲击焊缝<sup>[15]</sup>和直接将超声作用于熔池<sup>[16]</sup>4种方法,按超声传播效率而言,通过母材将超声波引入熔池的方法传递效率较高且操作方便。将超声施加在母材上时,焊缝晶粒得到细化,抑制热裂纹的生成,促使焊缝的元素分布均匀。俞伟元等<sup>[17]</sup>采用超声辅助电阻钎焊方法连接Zn-2Al钎料与6063铝合金,其研究结果显示钎焊过程中施加超声振动能够有效促进钎料与母材的有效连接,形成良好冶金性结合的钎焊接头,且微观组织更加均匀细小。王潭等<sup>[18]</sup>采用超声辅助和热处理的方法对IN718高温合金进行激光焊接,结果表明施加超声振动后微观组织得到了细化,显微硬度和抗拉强度得到提高,并且经

收稿日期: 2022-01-12

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金(2020MS05066)

作者简介: 李锐峰,男,1996年生,硕士,内蒙古工业大学材料科学与工程学院,内蒙古 呼和浩特 010051, E-mail: 20191100203@imut.edu.cn

热处理后, 柱状枝晶组织转变为等轴状再结晶组织。Dai<sup>[19]</sup>采用母材正面传入式将超声振动施加在 GTAW 焊接过程中, 与没有施加超声振动的常规 GTAW 相比, 焊接接头的晶粒得到了明显细化, 与此同时, 焊缝的熔深也得到了提高。陈琪昊等<sup>[20]</sup>利用超声工具头将超声施加在焊接的母材上, 超声波通过固态母材传入熔池内, 使铝合金焊接接头的焊缝成形和力学性能得以改善。

本研究中, 采用不同输出功率的超声波, 分析它对 7075 铝合金 CMT 焊接接头的气孔率、微观形貌、抗拉强度和显微硬度的影响, 并探讨了熔池中超声波振动的机理。

### 1 实验

本实验所采用的材料为 3 mm 厚的 7075 铝合金, 填充材料为直径 1.2 mm 的 ER5356 焊丝, 其化学成分如表 1 所示。

试验设备为自主设计的随焊超声辅助自动焊接设备, 主要由三维滑台、奥地利 Fronius TPA2700-CMT 焊机和超声振幅杆构成, 如图 1 所示。

将 7075 铝合金加工成 180 mm×10 mm×3 mm 的板材, 焊前用钢刷把待焊面打磨掉氧化层, 并用丙酮和乙醇清除表面污渍。用奥地利福尼斯 Fronius TPA2700-CMT 焊机将处理好的铝板进行对接焊接, 同时施加超声, 其超声振幅杆的超声频率为 20 kHz、振幅为 40 μm, 并与被焊工件接触, 工件固定不动, 奥地利 Fronius TPA2700-CMT 焊枪和超声振幅杆匀速行走, 如图 2 所示。

采用未施加超声和超声功率分别为 600、900、1200 W 4 种不同参数进行试验。当超声波通过母材传入到熔池内, 产生热效应和空化效应等, 进而影响焊缝的宏观形貌、微观组织和力学性能。

表 1 7075 铝合金和 ER5356 焊丝化学成分

Table 1 Chemical composition of 7075 aluminum alloy and ER5356 welding wire (ω/%)

Material	7075 aluminum alloy	ER5356
Zn	5.1-6.1	0.1
Mg	2.1-2.9	4.5-5.5
Cu	1.2-2.0	0.1
Fe	≤0.5	0.4
Si	≤0.4	0.25
Mn	≤0.3	0.05-0.2
Cr	0.18-0.28	0.18-0.28
Ti	≤0.20	0.06-0.20
Al	Bal.	Bal.

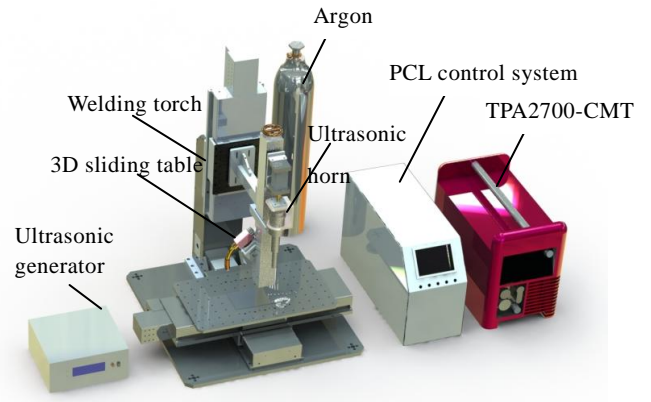


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the test device

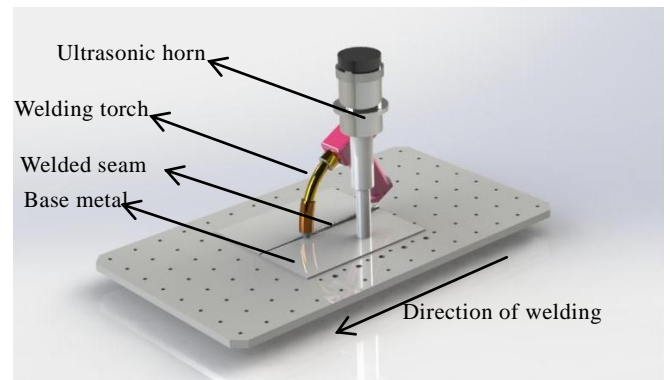


图 2 超声辅助焊接示意图

Fig.2 Schematic diagram of ultrasonic-assisted welding

使用纯氩气 (99.99%) 作为保护气, 进行正面保护, 焊接工艺参数如表 2 所示。将焊好的试件利用线切割设备, 垂直焊缝中心切出 20 mm×10 mm 的金相试件, 然后用金相砂纸打磨、P-1 型金相试样抛光机抛光后制作金相试样。用 Keller 试剂 (95 mL H<sub>2</sub>O+1 mL HCl+1.5 mL HF+2.5 mL HNO<sub>3</sub>) 进行金相腐蚀, 腐蚀时间为 10~15 s, 使用光学显微镜 (OM) 和电子背散射衍射 (EBSD) 观察其微观结构。拉伸试样及尺寸如图 3 所示。用 HXD-1000TM 型维氏显微硬度计对焊接接头的硬度进行测量, 加载载荷为 100 g, 加载时间为 10 s。

表 2 CMT 焊接参数

Table 2 CMT welding parameters

Welding current/ A	Welding speed/ mm s <sup>-1</sup>	Shield gas flux/ L min <sup>-1</sup>
125	8	20

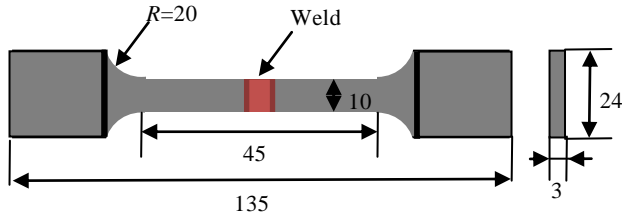


图 3 拉伸试样尺寸

Fig.3 Tensile specimen size (mm)

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同超声功率对 7075 铝合金 CMT 焊接接头宏观形貌的影响

图 4a~4d 所示为不同超声功率处理下 7075 铝合金 CMT 焊接接头的宏观形貌。与未施加超声（图 4a）相比，随着超声功率的增加焊缝区的气孔数量和焊缝的熔宽发生了显著的改善。

图 4a 为未施加超声的常规 CMT 焊接接头的宏观形貌，可以发现焊缝中分布很多靠近焊缝边缘的气孔，这是由于受到焊接热量作用，水分等进入到焊接熔池，冷却时没有排出而形成气孔。图 4b、4c 分别为超声功率 600 和 900 W 的焊接接头，发现其焊接接头中也存在气孔，比未施加超声明显减小。其气孔分布在焊缝上部和熔合线附近，由于焊接时空化气泡没有完全从焊缝熔池中逃逸出去，冷却时停留在焊缝中。图 4d

为超声功率 1200 W 的焊接接头，此时焊接接头基本无明显的气孔。这是由于超声波具有良好的除气效应，与熔池中产生的空化效应有关，当熔池的负压大于液体分子间的结合力时，分子间会被拉断而形成空腔，即产生空化气泡。使熔池内产生空化效应所需要的最低声压或声强称为空化阈值，铝合金熔体空化阈值表达式如下<sup>[3]</sup>：

$$P_B = P_0 - P_v + \frac{2}{3\sqrt{3}} \left[ \frac{\left(\frac{2\sigma}{R_0}\right)}{P_0 - P_v + \frac{2\sigma}{R_0}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

查阅相关参数可知，气泡内蒸气压 ( $P_v$ ) 为 6800 Pa，表面张力系数 ( $\sigma$ ) 为 0.910 N/m，液体的静压力 ( $P_0$ ) 为 0.101 MPa，假设空化核的初始半径 ( $R_0$ ) 为 10  $\mu\text{m}$ 。由式 (1) 的参数可以得出铝合金的空化阈值为 0.15 MPa，当达到空化阈值时，空化气泡内部的气压明显下降，导致加快气泡之间的结合和长大，所以随着超声功率的增加，焊接接头的除气效果越好。

同时，还可以发现，随着超声功率的增加，焊根宽度也在增加，分别为 3.02、4.79、5.48、6.03 mm，如图 4 所示。当超声波在母材中传播时，一部分能量被熔池吸收，产生空化气泡。当其破碎时，内部气压大于外部气压，导致内部对外部做功，相当于放热的过程，进而提高焊接接头的热输入，增加焊接接头的熔宽。超声振动在金属熔体中的热效应公式为<sup>[21-22]</sup>：

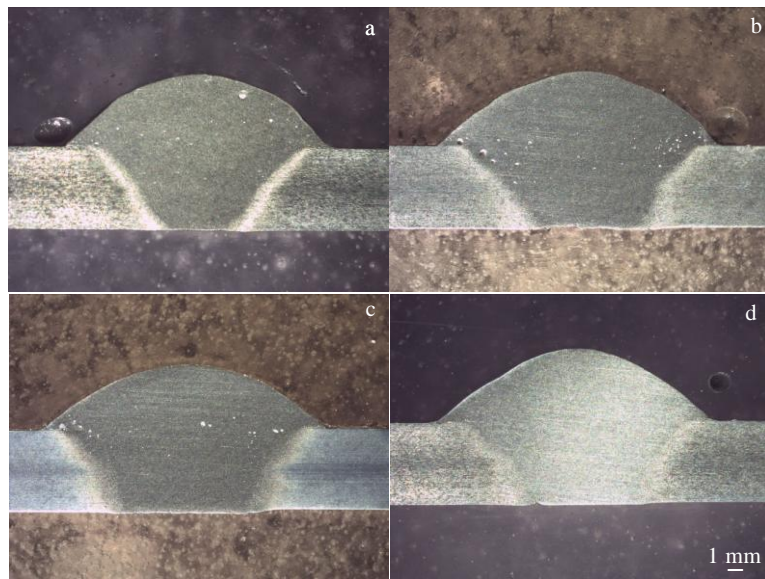


图 4 不同超声功率处理后焊接接头宏观形貌

Fig.4 Macro-appearances of welding joints with the different ultrasonic power treatments: (a) 0 W, (b) 600 W, (c) 900 W, and (d) 1200 W

$$Q = 2\alpha It \tag{2}$$

式中,  $Q$  为超声振动对熔体所产生的热量 ( $J/cm^3$ );  $\alpha$  为介质的声压系数;  $I$  为超声振动的强度;  $t$  为超声振动作用的时间。其中, 超声振动的强度与超声功率相关, 随着超声振动的强度增大, 熔池中吸收的能量增加。故当超声功率为 1200 W 时, 焊缝的熔宽最大, 在此功率下熔池吸收的能量最多, 其热效应也最大, 因此随着超声功率的增加焊缝的熔宽也增加。

### 2.2 不同超声功率对 7075 铝合金 CMT 焊接接头显微组织的影响

图 5a~5d 所示为不同超声功率处理下 7075 铝合金 CMT 焊接接头显微组织, 图 5 中 BM 代表母材, HAZ 代表热影响区, WM 代表焊缝, 从图中可以发现随着超声功率的增加, 热影响区的宽度随之减小, 分别为 237.24、206.74、146.44、128.08  $\mu m$ 。超声振动会加速熔池的流动, 降低熔池高温停留的时间, 并且振动会破碎柱状晶的枝晶, 被破碎的枝晶在超声的搅拌作用下, 会流动到熔池中, 在焊缝中形成新的形核点, 有利于等轴晶的生长, 抑制柱状晶的生长, 因此超声辅助减小了焊接接头热影响区的面积。

### 2.3 不同超声功率对 7075 铝合金 CMT 焊接接头拉伸性能的影响

图 6 为不同超声功率处理下 7075 铝合金 CMT 焊接接头的拉伸性能。从图中可以发现, 施加超声辅助的焊接接头的拉伸性能都高于未施加超声的焊接接头, 只是超声功率的不同对焊接接头性能的影响有所不同, 其抗拉强度分别为 305、320、330、

390 MPa, 断后伸长率分别为 1.3%、1.4%、1.5%、2.7%。

图 6 中不同超声功率处理下的焊接接头的抗拉强度和断后伸长率, 都随着超声功率增加而增加。这是由于超声振动作用下, 焊缝中心处长出许多等轴晶, 等轴晶的数量增加, 晶界变长, 从而使超声振动焊缝的抗拉强度较无超声振动时都有提高。超声功率为 1200 W 时的焊接接头的抗拉强度相较于未施加超声从 305 MPa 增加到 390 MPa, 提高了 85 MPa, 断后伸长率从 1.3% 增加到 2.7%, 提高了 1.4%, 此参数下试件有较高的力学性能。

### 2.4 不同超声功率对 7075 铝合金 CMT 焊接接头显微硬度的影响

图 7 为不同超声功率下 7075 铝合金 CMT 焊接接头显微硬度分布, 其曲线都呈现“中间低两边高”的特征。焊缝显微硬度较低, 在熔合线达到最低值, 随后快速升高至母材的硬度水平。

从图 7 中可以看出, 试验采用的 7075 铝合金母材的显微硬度值 (HV) 在 1470~1568 MPa, 不同的超声功率获得的焊缝的显微硬度值 (HV) 在 882~980 MPa。其中, 未施加超声时焊缝显微硬度 (HV) 最低, 其平均值为 905.324 MPa; 当超声功率为 600 和 900 W 时焊缝显微硬度 (HV) 变化不大, 但相较于未施加超声有所提高, 其平均值分别为 910.126、926.002 MPa; 当超声功率为 1200 W 时, 焊缝显微硬度最大, 其平均值 (HV) 为 992.838 MPa, 相较于未施加超声分别提高了 87.514 MPa, HV 的变化趋势与抗拉强度, 断后伸长率的变化趋势一

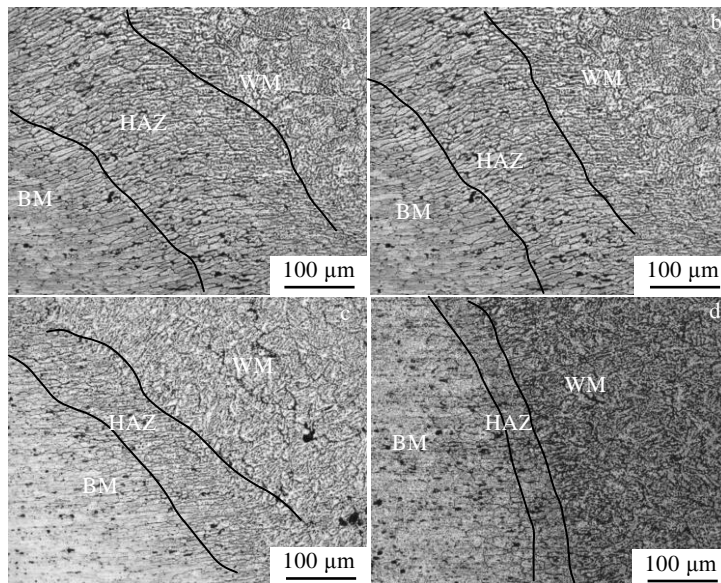


图 5 不同超声功率处理后焊接接头微观组织

Fig.5 Microstructures of welding joints with different ultrasonic power treatments: (a) 0 W, (b) 600 W, (c) 900 W, and (d) 1200 W



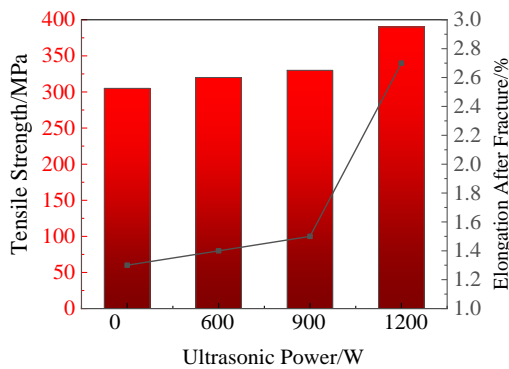


图 6 不同超声功率处理后焊接接头抗拉强度和断后伸长率

Fig.6 Tensile strength and elongation after fracture of welded joints with different ultrasonic power treatments

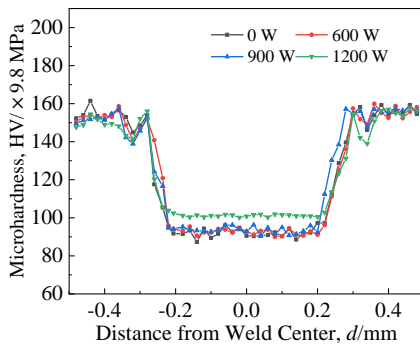


图 7 不同超声功率处理后焊接接头显微硬度

Fig.7 Microhardness of welding joints with different ultrasonic power treatments

致。由于熔池在超声的作用下，产生的空化效应和机械效应搅拌熔池，抑制柱状晶的长大，促进等轴晶的长大，增加了晶界的长度，材料的形变阻力增大，因此提高了焊接接头的显微硬度。

### 2.5 超声功率强化机理分析

由以上结论可知，超声功率为 1200 W 的焊接接头性能最优，具体表现为焊缝处气孔数量少、焊缝熔深大、热影响区窄及优异的力学性能，所以选取此超声功率与未施加超声的试件进行对比分析，通过超声辅助的空化效应、超声辅助下焊缝晶粒尺寸、超声辅助下焊缝晶粒取向分布及超声辅助下焊缝取向差分布四方面来揭示超声功率强化机理。

#### 2.5.1 超声辅助的空化效应

当达到空化阈值时会产生大量的空化气泡，在持续超声的作用下，空化气泡生长并发生破裂，如

图 8 所示。图 8 中  $P$  为超声场中任何一点的声压， $P_m$  为声压振幅， $\omega$  为圆频率， $t$  为振动的某一时刻， $H$  为氢原子。空化气泡在负压区气泡尺寸加大，使内部压力降低，正压区迅速闭合，交替正负压强下受到压缩和拉伸。当压力降低到低于液体体积强度时，使气泡破碎并产生冲击力，并在局部区域产生巨大的压强。

当空化气泡破裂时会产生强大的冲击力，打碎了形成柱状晶的枝晶，破碎的枝晶均匀的分布在熔池内并且成为了新的形核点，有利于增加凝固过程中晶核数量，起到细化晶粒的作用，如图 9 所示，图 9 中  $L$  为液态， $S$  为  $Al_2CuMg$  相。在空化气泡的闭合的瞬间，在距离气泡  $x$  的单位面积上产生的压力假定为  $F(x)^{[23]}$ ：

$$F(x) = \frac{1}{12Q} - \frac{R_m^4}{3x^4} \left( \frac{1}{16Q} + \frac{3}{4} \right) \quad (3)$$

令空化气泡内的压强 ( $Q$ ) 为 1013 Pa，气泡半径 ( $R_m$ ) 在 1~4 nm 之间，在传播距离小于 1 nm 内，得到冲击力、气泡半径和传播距离的关系，其中冲击力的数值为  $6.4 \times 10^6 \sim 7.5 \times 10^6$  N。故在超声辅助的作用下，能够促进形核，提高形核率，抑制柱状晶长大，促进等轴晶的生长，有效地细化晶粒。

#### 2.5.2 超声辅助下晶粒生长及数量变化

图 10a 为未施加超声处理 7075 铝合金 CMT 焊接接头显微形貌，图 10b 为超声功率 1200 W 时 7075 铝合金 CMT 焊接接头显微形貌。从图中可以看出，超声作用对 7075 铝合金焊接接头的显微组织产生了明显的影响。未施加超声时，熔合线附近为粗大的柱状晶，生长方向指向焊缝中心，焊缝内为等轴晶，并且还大量的气孔。当施加超声，熔合线附近的晶粒

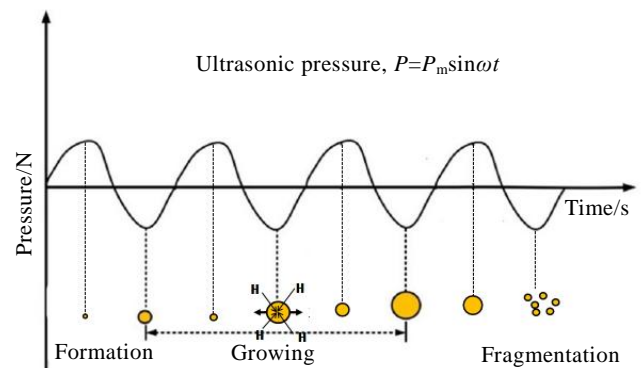


图 8 空化气泡从形成到长大直至破碎过程

Fig.8 Process of vacuolation from formation to growth to fragmentation

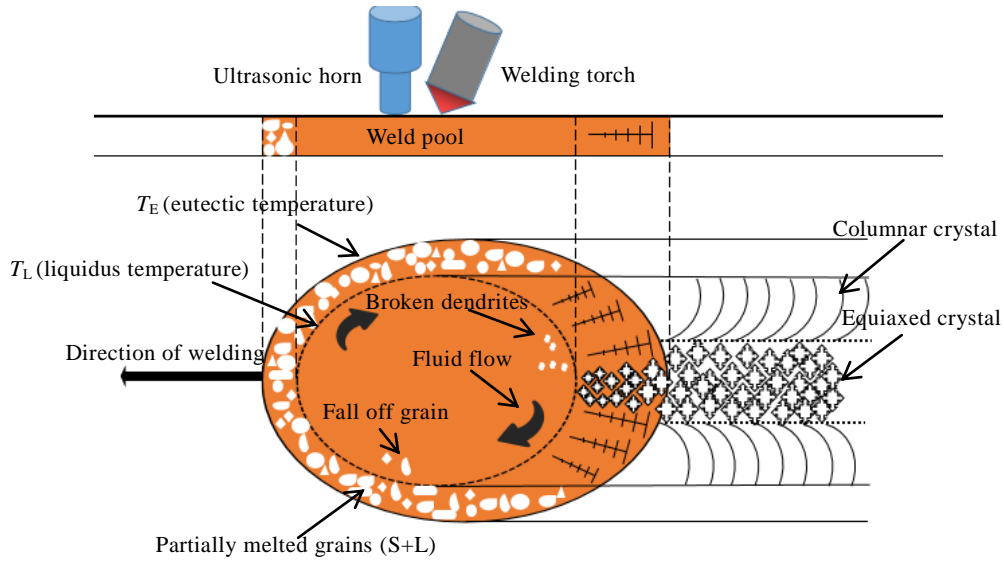


图 9 晶粒细化机制示意图

Fig.9 Schematic diagram of grain refinement mechanisms

由粗大的柱状晶变为细小的等轴晶，焊缝内的等轴晶相较于未施加超声尺寸减小。这是由于焊缝边缘熔池的流动性较低，超声振动的空化效应、机械效应提高了熔池的流动性，同时，熔池边缘的流动性也会加快，熔池边缘处于液固状态之间，超声振动会使柱状晶枝晶破碎，被打碎枝晶随熔池流动被裹挟进熔池，在熔池中心，成为新的形核质点，因此施加超声振动可以抑制柱状晶，促进等轴晶的生长。

### 2.5.3 超声辅助下焊缝晶粒尺寸

图 11a 为未施加超声的焊缝晶粒尺寸，图 11b 为超声功率 1200 W 的焊缝晶粒尺寸。由图 11a 可见，未施加超声辅助的焊缝晶粒平均尺寸为 46.88  $\mu\text{m}$ ，其晶粒尺寸主要集中在 50~120  $\mu\text{m}$ ，约占 79%，最大晶粒尺寸为 230  $\mu\text{m}$ ；由 11b 可见，超声功率为 1200 W 的焊缝平均晶粒尺寸为 36.89  $\mu\text{m}$ ，相较于未施加超声减小了 9.99  $\mu\text{m}$ ，晶粒尺寸主要集中在 40~80  $\mu\text{m}$ ，约占 75%，其最大晶粒尺寸为 115  $\mu\text{m}$ 。未施加超声的焊接晶粒尺寸超过 115  $\mu\text{m}$  的大晶粒约占 30%，而在超声功率为 1200 W 时焊缝晶粒得到了明显的细化，并且大尺寸的晶粒完全被细化。当施加超声辅助时，焊缝的冷却速率得到改善，并且熔池在高温下的停留时间比未施加超声辅助的 CMT 焊接大大缩短。因此，超声辅助焊接后得到了尺寸较小的晶粒。

### 2.5.4 超声辅助下焊缝晶粒取向分布

由金属学可知，单个晶胞中不同晶面和晶向上的原子排列方式和密度是不同的，对应的能量和化学键合力都表现出各向异性，晶粒取向对材料物理及化学性能均有重要影响。因此，为了使焊接接头的性能更加优良，需对焊接接头熔合区两侧和焊缝中心晶粒取向特征进行深入研究。

采用 EBSD 技术对焊接接头熔合线两侧和焊缝中心的晶粒进行了表征，如图 12 所示。图中不同的颜色代表不同的晶体取向，每种颜色表示晶体和相邻晶粒之间  $2^\circ\sim 15^\circ$  的取向错位，可以直观地看出焊接接头上各区域晶粒的大小形态。图 12a 和 12b 分别为未施加超声和 1200 W 超声功率焊接接头熔合线两侧晶粒

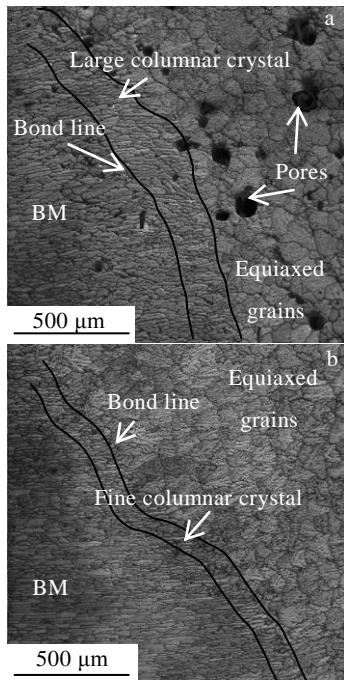


图 10 7075 铝合金焊接接头热影响区微观组织

Fig.10 Microstructures of 7075 aluminum alloy welded joint heat affected zone: (a) 0 W and (b) 1200 W

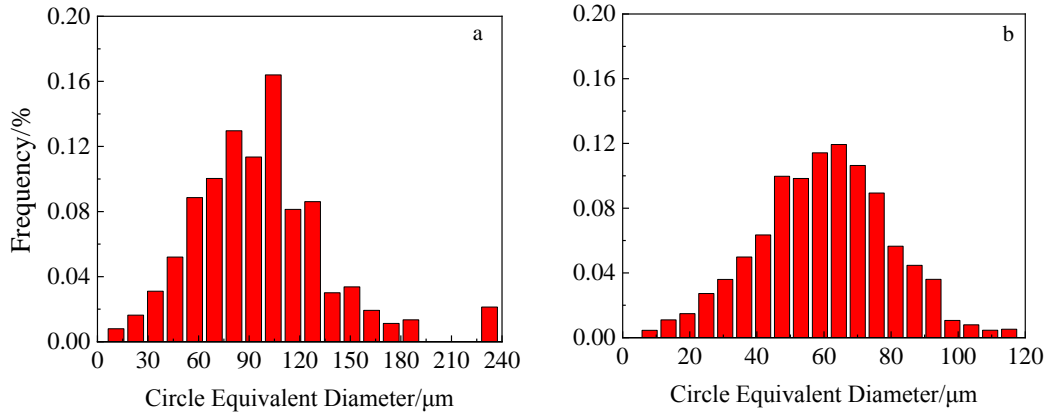


图 11 焊缝晶粒尺寸分布

Fig.11 Grain size distribution of weld joints: (a) 0 W and (b) 1200 W

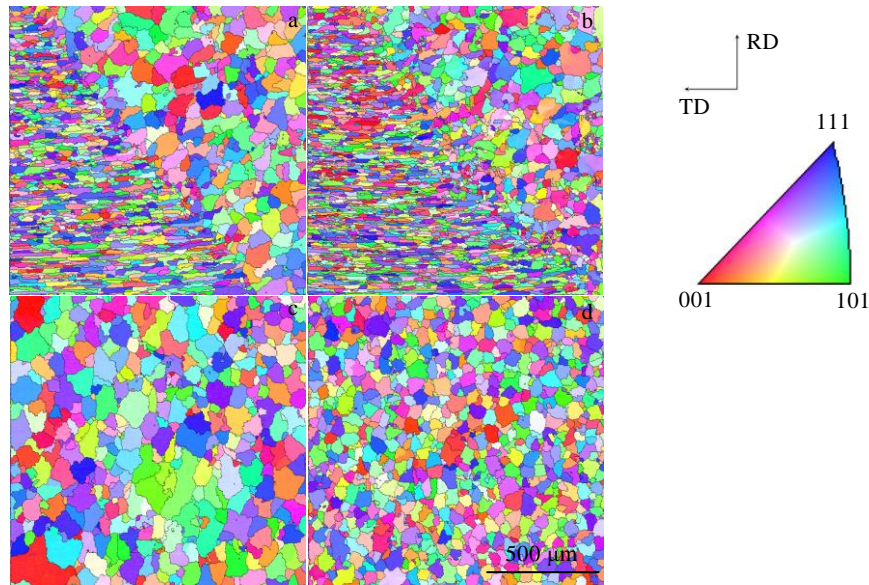


图 12 未施加超声和 1200 W 超声功率时焊接接头的熔合线两侧和焊缝中心的焊缝晶粒的 IPF 着色图

Fig.12 Weld grain IPF coloring of both sides of the fuse welded joints (a, b) and weld center (c, d) with 0 W (a, c) and 1200 W (b, d) ultrasonic assistance

IPF 着色图。因为焊缝的晶粒是通过凝固和固态转变过程形成的，其晶体结构和微观结构与母材有很大的不同，特别是随着超声功率的增加，靠近焊接接头的熔合线一侧的柱状晶完全消失，转变成细小的等轴晶。图 12c 和 12d 分别为未施加和 1200 W 超声功率焊缝中心的晶粒 IPF 着色图，由图可知等轴晶粒的直径随超声的增大而减小。当超声功率为 1200 W 时，可以明显看出焊缝晶粒由粗大的等轴晶，变为细小的等轴晶，并且晶粒尺寸相对均匀。根据晶粒着色图中不同颜色代表不同晶体取向，还可以得出超声波的施加并不影响焊缝晶粒的生长方向。

### 2.5.5 超声辅助下焊缝取向差分布

图 13a 为未施加超声的 7075 铝合金 CMT 焊接接头的取向差分布，图 13b 为 1200 W 超声功率时 7075 铝合金 CMT 焊接接头的取向差分布。小角度晶界取向差小于等于 15°，大角度晶界取向差大于 15°。根据图 13a 和 13b 可见都为小角度晶界（小于等于 15°）占主导地位，分别约为 71%、61%，而大角度晶界分别约为 29%、39%。大角度晶界的比例较高可以在一定程度上提高焊接接头的塑性和冲击韧性<sup>[22]</sup>。在断裂过程中，当裂纹生长与大角度晶界相遇时，大角度晶界会扭曲，裂纹扩展路径会改变。大角度晶界越多，



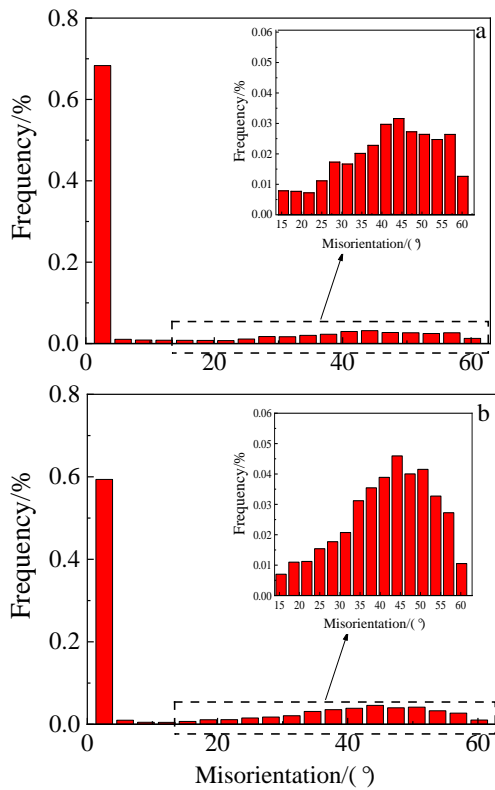


图 13 取向差角分布

Fig. 13 Misorientation angle distribution: (a) 0 W and (b) 1200 W

裂纹生长过程中消耗的能量就越高, 而小角度晶界对裂纹扭曲效果和韧性的改善并不明显。随着超声辅助的加入, 提高了焊接接头中大角度晶界的比例, 提升了约 10%, 使焊接接头的塑性有所增加, 抗拉强度也随之增加, 这与图 6 展示的抗拉强度提高、断后伸长率增加结果一致。

### 3 结论

1) 随着超声功率的增加, 气孔数量逐渐降低并且焊缝的熔宽逐渐增大。气孔数量降低主要是由于空化效应, 当超声功率为 600 和 900 W 时, 空化产生的大量气泡无法脱离熔体, 停留在焊缝中, 导致气孔明显减小。当超声功率为 1200 W 时, 此时焊接接头基本无明显的气孔。

2) 焊缝的平均显微硬度变化趋势与焊接接头的抗拉强度、断后伸长率的变化趋势一致。当超声功率为 1200 W 时, 焊缝的平均显微硬度、焊接接头的抗拉强度和断后伸长率, 相较于未施加超声分别提高了 87.514 MPa、85 MPa、1.4%, 这是由于超声波的施加使焊缝的微观结构发生了变化。

3) 未施加超声的焊缝晶粒平均尺寸为 46.88  $\mu\text{m}$ , 超声功率 1200 W 的焊缝中心晶粒尺寸为 36.89  $\mu\text{m}$ , 相较于未施加超声减小了 9.99  $\mu\text{m}$ 。超声辅助使焊缝晶粒得到了明显的细化, 并且大尺寸的晶粒完全被细化。

4) 由于施加超声和未施加超声的焊缝结构中, 存在焊接后晶粒结构的重新排列, 导致其晶粒形态各不相同。在未施加超声和 1200 W 超声功率时小角度边界 (小于等于 15°) 占主导地位, 分别约为 71%、61%。随着超声辅助的加入, 提高了大角度晶界的比例, 提升了约 10%, 使焊接接头的塑性有所增加, 抗拉强度也随之增加。

### 参考文献 References

- [1] Sun Zhenbang, Han Yongquan, Du Maohua *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2020, 49(8): 2674
- [2] Zhang Yin, Song Xiping, Chang Liyan *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2017, 46(9): 2411
- [3] Kang J W, Zhang X P, Wang S *et al.* *Ultrasonics*[J], 2015, 57: 11
- [4] Guo Yunqiang(郭云强). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017
- [5] Cong Baoqiang, Ouyang Ruijie, Qi Bojin *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2016, 45(3): 606
- [6] Tarasov S Y, Vorontsov A V, Fortuna S V *et al.* *Welding in the World*[J], 2019, 63(3): 875
- [7] Wang Yingbiao(王应彪), Liu Chuanshao(刘传绍), Zhao Bo(赵波). *Mechanical Research & Application*(机械研究与应用)[J], 2006(4): 41
- [8] Chen Sizhong(陈思忠). *Technical Acoustics*(声学技术)[J], 2002(Z1): 46
- [9] Duan Ping'an(段平安). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017
- [10] Chai Pengtao(柴鹏涛), Liu Xue(刘学), Li Jinfeng(李晋锋) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(12): 4177
- [11] Gao Tiejun(高铁军), Liu Xiaojun(刘小军), Yu Kun(于鲲) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(1): 286
- [12] Szłapa P, Marczak W. *Ultrasonics*[J], 2020, 108: 106 220
- [13] Wen T, Liu S Y, Chen S *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2015, 25(2): 397
- [14] Chen Chao, Fan Chenglei, Cai Xiaoyu *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2019, 46: 241
- [15] Chen Q H, Ge H L, Yang C L *et al.* *Metals-Open Access Metallurgy Journal*[J], 2017, 7(2): 53



- [16] Xue Hansong, Chen Yangyang, Huang Jie *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2019, 48(7): 2049
- [17] Yu Weiyuan(俞伟元), Wu Weijie(吴炜杰), Sun Xuemin(孙学敏). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(12): 4081
- [18] Wang Tan(王潭), Zhang Anfeng(张安峰), Liang Shaoduan(梁少端) *et al.* *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2016, 43(11): 104
- [19] Dai W L. *Materials Letters*[J], 2003, 57(16-17): 2447
- [20] Chen Qihao(陈琪昊), Lin Sanbao(林三宝), Yang Chunli(杨春利) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2016, 26(10): 35
- [21] Liu Jiaqi(刘佳奇). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2019
- [22] Wang Pengbo(王鹏博). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019
- [23] Liu B, Eisenlohr P, Roters F *et al.* *Acta Materialia*[J], 2012, 60(13-14): 5380

## Effect of Ultrasonic Power on the Microstructure and Properties of 7075 Aluminum Alloy CMT Welding Joint

Li Ruifeng, Chen Furong

(School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of many pores, coarse grain and poor mechanical properties of the aluminum alloy joints, the welding of the 7075 aluminum alloy thin sheet was completed using the CMT welding method, and the ultrasonic wave was introduced in the welding process. The influence of different ultrasonic power on welded joint stomata, microstructure and mechanical properties were investigated by metallography, EBSD, and mechanical properties test. The results show that ultrasonic vibration can significantly reduce the number of pores and increase the melting width, and the width of heat affect zone (HAZ) decreases with the increase of ultrasonic power. When the ultrasonic power is 1200 W, the microhardness of the welding joint is higher than that without ultrasound, the tensile strength is 85 MPa higher, and elongation after fracture is 1.4% higher. According to EBSD results, the average grain size of the weld is 36.89  $\mu\text{m}$  when the ultrasonic power is 1200 W, 9.99  $\mu\text{m}$  less than that without ultrasound. The weld grain is refined obviously. With the increase of ultrasonic power, the proportion of large angle grain boundaries increases, and the plasticity of welding joints increases.

**Key words:** ultrasonic power; microstructure; mechanical properties; 7075 aluminum alloy; CMT

---

Corresponding author: Li Ruifeng, Master, School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, P. R. China, E-mail: 20191100203@imut.edu.cn