

# 随焊超声搅拌对电弧增材制造铝合金组织及性能的影响

彭力真<sup>1,2</sup>, 游国强<sup>1,3</sup>, 王磊<sup>1</sup>, 李琪<sup>1</sup>, 曾升<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045)

(2. 重庆长安汽车股份有限公司, 重庆 400020)

(3. 国家镁合金材料工程技术研究中心, 重庆 400044)

**摘要:** 在 5356 铝合金电弧增材制造时, 采用随电弧同步移动的搅拌针在熔池内施加不同频率 (30、40、50 kHz) 超声搅拌, 结果表明: 增材层组织与未施加超声搅拌时相比, 晶粒细化, 柱状晶数目减少, 等轴晶数目增加; 且随着超声频率增加, 晶粒细化更加明显; 增材层孔隙率随超声搅拌频率增加呈降低趋势, 在 30、40、50 kHz 时分别为 0.73%、0.64%、0.59%, 但均高于未加超声搅拌的试样 (0.2%); 随着超声搅拌频率增加, 增材层强度与塑性均有所提升: 增材层的抗拉强度在 0、30、40、50 kHz 时分别为 266.57、278、282、299 MPa, 伸长率分别为 30.67%、31.54%、35.53%、41.86%。

**关键词:** 铝合金; 超声搅拌; 增材制造; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)05-1800-09

铝合金成型的常用方法包括铸造和塑性变形<sup>[1]</sup>。近年来, 增材制造 (AM) 由于其制造零件的自由度大、几乎不受形状限制等特点, 在制造工业领域有很强的应用潜力<sup>[2]</sup>。电弧增材制造 (WAAM) 作为 AM 的一个重要分支, 一般使用熔化极氩弧 (gas metal arc, GMA)、钨极氩弧 (gas tungsten arc, GTA) 或等离子弧 (plasma arc, PA) 作为热源, 熔化焊丝, 以逐层累积的方式制造零件, 具有更高的生产效率, 更好的材料利用率, 更短的制造周期和更低的成本, 更适合小批量中大型复杂金属零件制造<sup>[3-4]</sup>。

但 WAAM 与电弧堆焊类似, 具有局部快速熔化、非平衡凝固和多层多道累积特点, 容易出现增材层凝固组织疏松、粗大柱状晶、气孔和夹杂等缺陷, 影响力学性能。如 Bai 等<sup>[5]</sup>用冷金属过渡 WAAM 方法制造了 2319 铝合金, 结果显示在原始沉积层和热处理后的沉积层中均发现有气孔存在, 而且热处理后气孔数量明显增加、气孔尺寸稍有增加, 且新增气孔主要出现在层间熔合线附近。目前有研究通过控制热输入或引入双脉冲系统<sup>[6]</sup>、加入冷却介质<sup>[7]</sup>和焊后热处理<sup>[8]</sup>等工艺来改善增材层的微观组织及力学性能, 但尚未发现将超声波运用于 WAAM 的研究报道, 而超声波在熔焊领域已有成功运用<sup>[9-10]</sup>。如: Yuan<sup>[11]</sup>采用超声-TIG 复合焊接工艺对不同

牌号铝合金进行了焊接, 发现施加超声后, 焊缝熔深明显增加, 而且降低了焊缝中的气孔缺陷, 细化了焊缝微观组织, 提高了焊缝综合力学性能。Zhu<sup>[12]</sup>用超声波辅助 TIG 焊方法焊接 MGH956 合金, 结果表明: 超声能量增加时接头气孔减少, 晶粒细化, 抗拉强度提高。

因此, 本研究尝试在铝合金 WAAM 时, 采用随电弧同步移动的搅拌针在熔池内施加超声搅拌, 旨在探索超声辅助 WAAM 的可行性。

## 1 实验

使用 5052 铝合金作为基板, ER5356 铝合金焊丝为增材材料。5052 铝合金基板尺寸为 200 mm×50 mm×8 mm。ER5356 焊丝直径为 1.6 mm。基板和焊丝的化学成分如表 1 所示。

实验采用逆变式脉冲熔化极气体保护焊机进行 WAAM, 超声发生器为日本 UHT 超声搅拌枪。

图 1 为随焊超声搅拌 WAAM 示意图。将焊枪固定在小车上, 实验时通过启动小车来保证运弧稳定, 并施加超声搅拌作用于熔池。超声搅拌的振幅固定为 0.3 mm, 搅拌针频率为 30、40、50 kHz。

WAAM 过程的具体工艺参数如表 2 所示, 共堆积了 4 层增材层。

收稿日期: 2022-08-24

基金项目: 广东省重点研发项目 (2020B010186002); 重庆市重点研发项目 (cstc2019jscx-fxydx0003); 大型仪器设备开放基金 (202103150177)

作者简介: 彭力真, 男, 1997 年生, 硕士生, 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400045, E-mail: plz@cqu.edu.cn

表 1 基板和焊丝的化学成分

Table 1 Chemical composition of substrates (5052 alloy) and welding wires ER5356 alloy ( $\omega/\%$ )

Alloy	Mg	Mn	Cr	Ti	Al
ER5356	4.5	0.60	0.09	0.11	Bal.
5052	2.7	0.09	0.16	0	Bal.

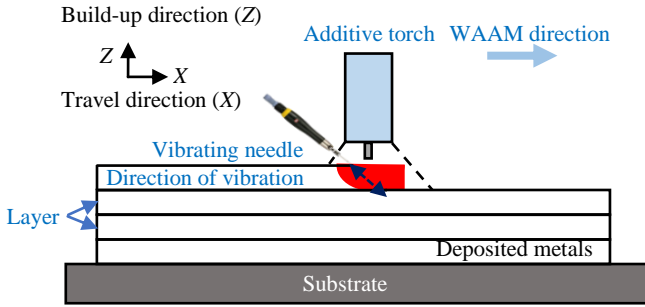


图 1 超声搅拌 WAAM 示意图

Fig.1 Schematic of ultrasonic vibration acting on the molten pool

表 2 超声辅助 WAAM 工艺参数

Table 2 Ultrasonic-assisted WAAM process parameters

Welding current/ A	Welding voltage/ V	Welding speed/mm s <sup>-1</sup>	Protecting air flow /L min <sup>-1</sup>
100	20.0	8.0	15

使用光学显微镜 (Carl Zeiss Axivoert 40) 和扫描电子显微镜 (SEM, JEOL JSM-7800 F Prime) 观察增材层试样组织。通过电子背散射衍射 (EBSD) 对试样进行进一步分析。通过三维微型计算机断层扫描 ( $\mu$ -CT) 检测增材层样品的孔隙分布和尺寸, 并计算孔隙率 (孔隙体积/试样体积)。采用维氏显微硬度计检测增材层各微区的显微硬度: 从基体向上每 300  $\mu$ m 测量一个点, 共测量 15 个点, 每个样品测量 3 次以获得平均值。拉伸试样的位置和尺寸如图 2, 图 3 所示。拉伸试验在 20  $^{\circ}$ C 下进行, 位移速率为 1 mm/min。每个拉伸试样进行 3 次拉伸试验。用 SEM 观察试样断口形貌。

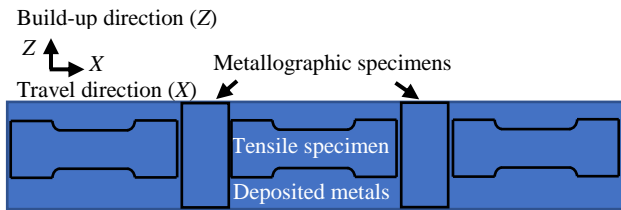


图 2 金相试样和拉伸试样选取位置

Fig.2 Selected location of metallographic specimens and tensile specimens

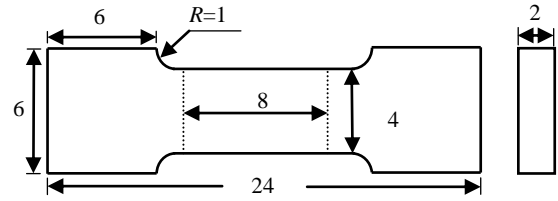


图 3 拉伸试样尺寸

Fig.3 Dimensional drawing of tensile specimen

## 2 结果与讨论

### 2.1 组织

图 4 为超声搅拌作用于熔池 WAAM 后增材层的宏观形貌。未加入超声搅拌的增材层表面焊后鱼鳞纹致密, 余高平整, 而加入超声搅拌后增材层高度增加, 表面平整度降低, 未观察到宏观缺陷。

超声辅助 WAAM 试样的  $\mu$ -CT 扫描图如图 5 所示。在未加超声搅拌时, 试样中的孔隙很小且均匀分布。施加超声搅拌的试样, 大的孔隙位于其顶部, 在内部也观察到一些孔隙。随着超声搅拌频率的增加, 试样内部的孔隙数量和尺寸均呈降低趋势。这可能是在 WAAM 过程中, 搅拌针的振动有利于熔池中气孔合并提高上浮速度, 因而减少了大气孔数目。

图 6 为超声搅拌 WAAM 后增材层中气孔尺寸分布图以及不同超声频率下增材层的孔隙率。未加入超声搅拌的增材层气孔体积主要集中在  $9.04 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$  左右, 只有较少气孔尺寸超过  $0.01 \text{ mm}^3$ 。加入超声搅拌作用于熔池后增材层中气孔尺寸主要分布在  $0.004 \text{ mm}^3$  左右。从图 6b 可看出, 加入超声搅拌后, 增材层中孔隙率有所增加, 但是随着超声搅拌频率的增加增材层中的孔隙率逐



图 4 超声搅拌 WAAM 增材层宏观形貌

Fig.4 Macroscopic morphologies of the additive layer in the molten pool under different ultrasonic vibration frequencies: (a) 0 kHz, (b) 30 kHz, (c) 40 kHz, and (d) 50 kHz

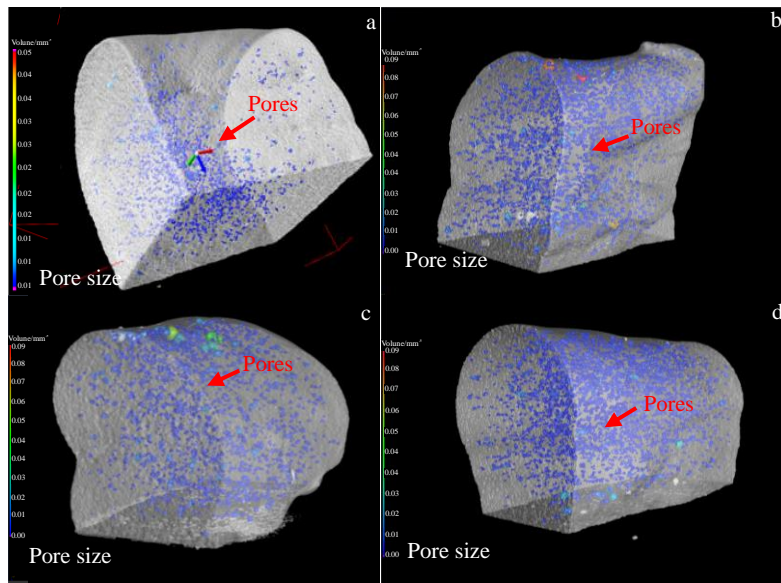


图 5 超声 WAAM 试样三维  $\mu$ -CT 扫描的孔径大小和分布结果

Fig.5 Pore size and distribution results of three dimensional  $\mu$ -CT scanning for WAAM specimens under different ultrasonic vibration frequencies: (a) 0 kHz, (b) 30 kHz, (c) 40 kHz, and (d) 50 kHz

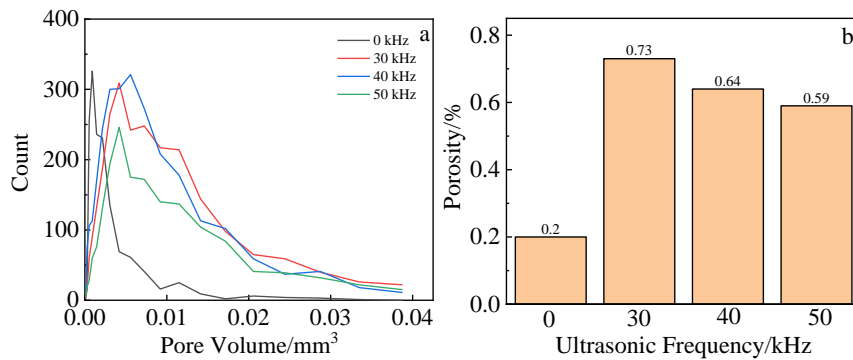


图 6 超声 WAAM 试样的孔隙分布

Fig.6 Pores size distribution (a) and porosity (b) of the WAAM specimens under different ultrasonic frequencies

渐降低。当超声搅拌频率为 50 kHz 时，孔隙率为 0.59%，与超声频率 30 kHz 增材层相比降低了 19.17%。由此可见超声搅拌 WAAM 会增加增材层中的孔隙率，但是随着超声搅拌频率的增加，增材层中孔隙率逐渐下降。

表 3 为加热提取热导法测氢结果，增材层氢含量高于焊丝和母材，说明 WAAM 时铝合金熔池有吸氢现象。加入超声搅拌后增材层氢含量比无超声试样减少，但孔隙率增加（如图 6 所示）。其机理应该是：超声搅拌促进溶于铝熔池中的氢原子析出成为氢气泡<sup>[13]</sup>，导致孔隙率增加；同时，超声搅拌有利于氢气泡上浮逸出<sup>[14]</sup>，因此增材层总体氢含量减少。

图 7 为不同超声搅拌 WAAM 后试样内部的孔隙/空洞形貌。未加超声搅拌时，孔隙为较规则的圆球形，内壁光滑，符合氢气孔的形貌特征。加入超声搅拌后，孔隙形貌有规则球形和不规则形状，前者应该是氢气孔；

表 3 H 含量测试结果

Table 3 Test results of hydrogen content

Material	H Content, $\omega$ /%
ER5356 (welding wire)	0.000 012
5020 (substrate)	0.000 019
Blank specimen	0.003 7
50 kHz ultrasonic stirring of specimen	0.001 3

后者不符合氢气孔的形貌特征，可能是超声波产生的未愈合真空孔，其机理为：当熔池中的超声波声压大于空化阈值时，发生了空化现象，在熔池中形成大量瞬时真空孔，在熔池快速凝固过程中，部分真空孔没有及时完全愈合，成为不规则形状的孔洞。因此，增材层中的孔隙包括规则氢气孔和不规则真空孔洞。

图 8 为 WAAM 增材层的 XRD 结果。在无超声搅拌

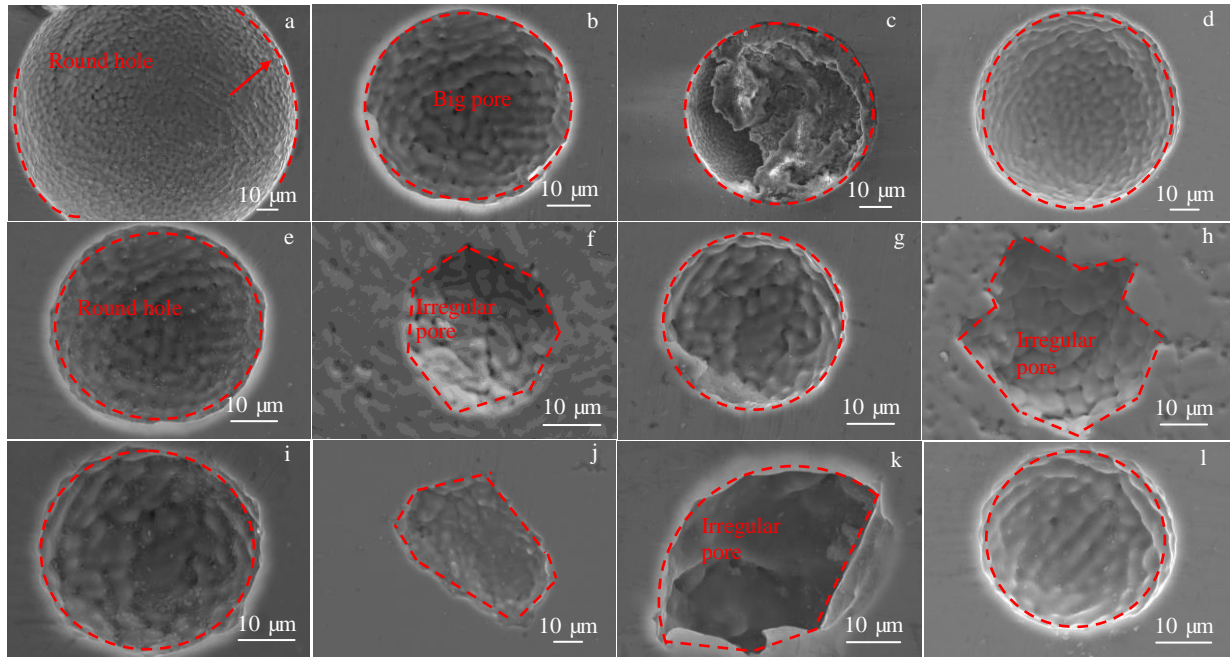


图 7 超声搅拌作用于熔池下 WAAM 试样的孔隙形态的 SEM 照片

Fig.7 SEM images of the pore morphology of WAAM specimens under different ultrasonic vibration frequencies: (a, e, i) 0 kHz; (b, f, j) 30 kHz; (c, g, k) 40 kHz; (d, h, l) 50 kHz

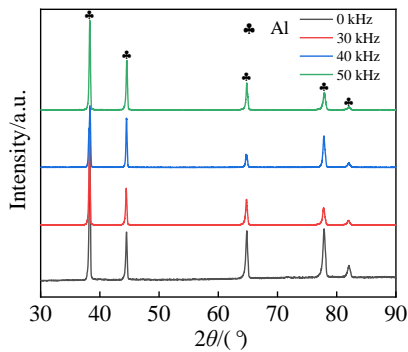


图 8 超声搅拌 WAAM 增材层的 XRD 图谱

Fig.8 XRD patterns of the WAAM additive layer under different ultrasonic vibrations frequencies

和施加不同频率超声搅拌的增材层均主要由  $\alpha$ -Al 组成，没有明显的 Al-Mg 金属间化合物相的衍射峰。本研究所用焊丝的 Mg 质量分数为 4.5%，从 Al-Mg 二元相图可知，平衡凝固组织中应有少量  $\beta$ -Al<sub>2</sub>Mg<sub>3</sub> 相析出，但 XRD 未发现该相，这应该是由于 WAAM 为非平衡快速凝固，导致 Al<sub>2</sub>Mg<sub>3</sub> 相来不及析出或仅少量析出，大部分 Mg 过饱和固溶于 Al 基体中。

图 9 和 10 为超声搅拌 WAAM 试样的 OM 偏光组织。如图 9 所示，未加入超声搅拌时，增材层顶部主要由等轴晶粒和少量孔隙组成，晶粒直径为 100~150  $\mu$ m。在熔

合线附近柱状晶粒为长条状，在晶界有孔隙。当超声搅拌频率为 30 kHz 作用于熔池时，增材层的上表面未观察到小气孔，与没有超声搅拌时相比，等轴晶尺寸明显变小。熔合线上方的柱状晶特征明显，呈现密致的长条状。这可能是超声搅拌通过搅拌针直接作用于熔池，因而对熔池液相中晶粒细化更明显，而对在熔合线附近形成的柱状晶生长没有明显抑制作用。

当超声频率为 40 kHz 时，增材层的顶部主要由尺寸较小的等轴晶粒组成，且有部分气孔存在，增材层熔合线附近的柱状晶粒特征明显。同时在柱状晶上方观察到等轴晶粒，晶粒直径约为 50  $\mu$ m。当超声搅拌频率为 50 kHz 时，增材层顶部的等轴晶发生明显的细晶强化，晶粒尺寸相较于 30 kHz 变得更细小，同时也抑制了增材层内部部分柱状晶的生长，也有可能是超声搅拌搅拌针在增材制造过程中直接作用于熔池形成的高频振动使正常生长的枝晶破碎，从而在熔池中形成异质再结晶。

图 11 为超声搅拌作用于熔池 WAAM 增材层熔合区域的 EBSD 图。未加超声搅拌时，增材层熔合线附近柱状晶区域明显，柱状晶区域长度约为 200  $\mu$ m。加入超声搅拌后，柱状晶区域减小，柱状晶形貌变粗短，晶粒尺寸更细小且均匀。同时观察到加入超声搅拌熔合线区域出现了超细小晶粒，且随着超声频率的增加，超细小晶粒数目增加。从图 11d 可以看出，当超声搅拌频率为

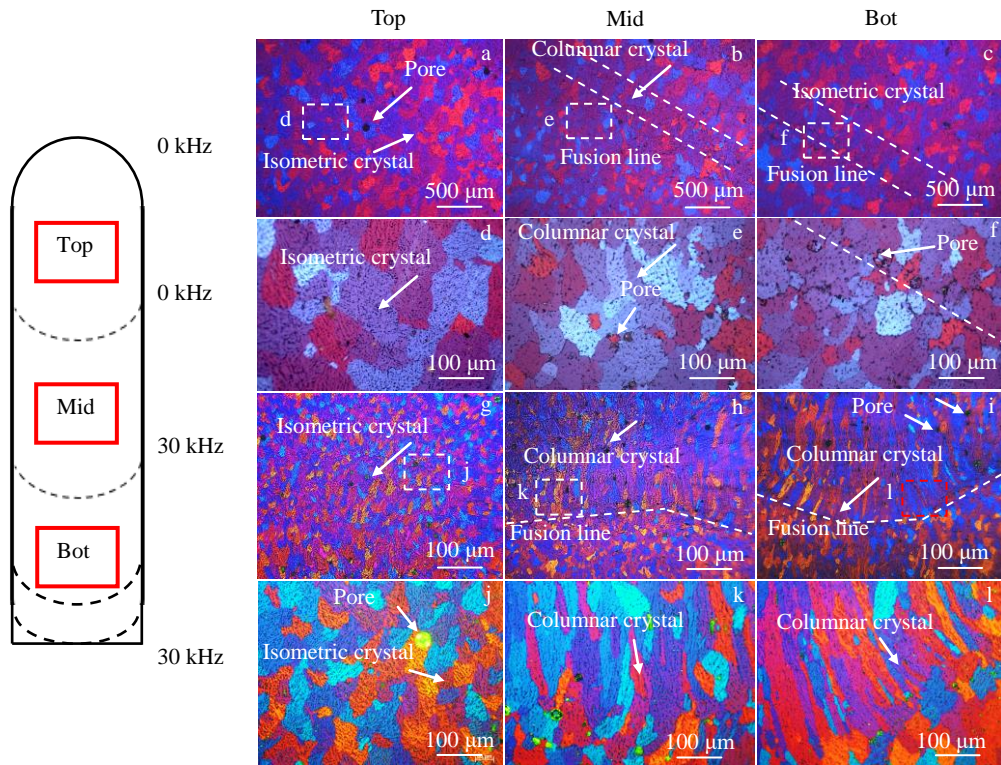


图 9 无超声及超声频率 30 kHz 作用于熔池 WAAM 试样的偏光组织

Fig.9 Micrographs of the WAAM specimens without and with ultrasonic vibration at frequency of 30 kHz

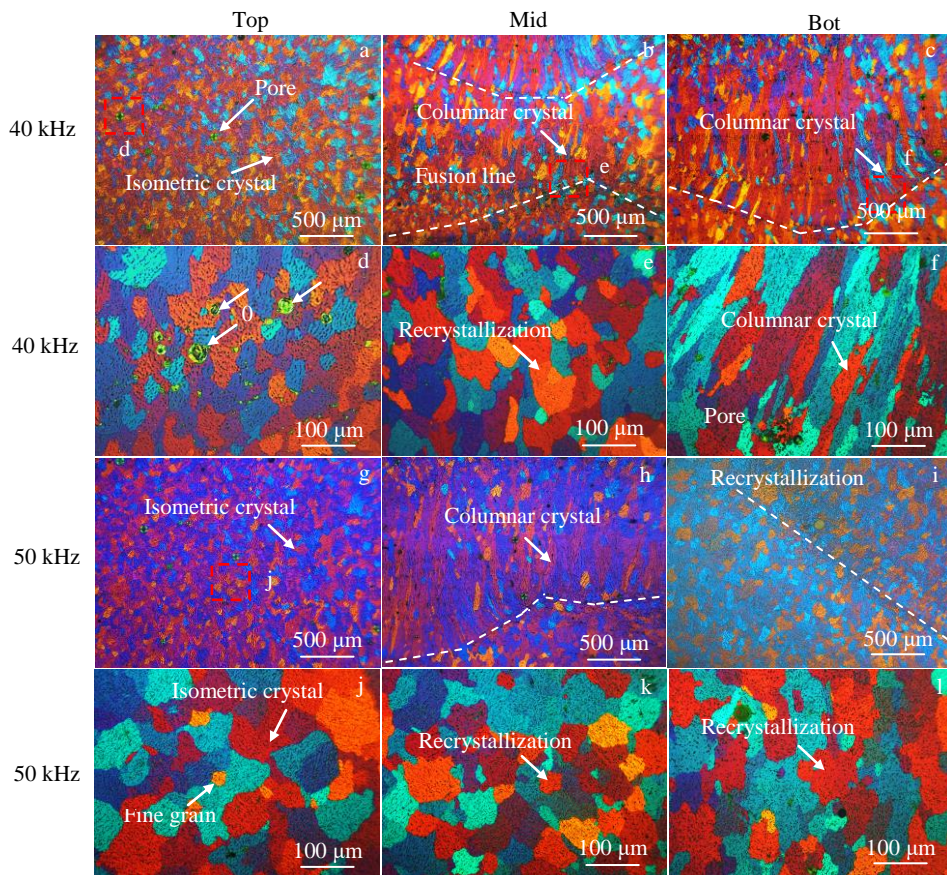


图 10 超声频率 40、50 kHz 作用于熔池 WAAM 试样的偏光组织

Fig.10 Micrographs of the WAAM specimens with ultrasonic frequency of 40 and 50 kHz

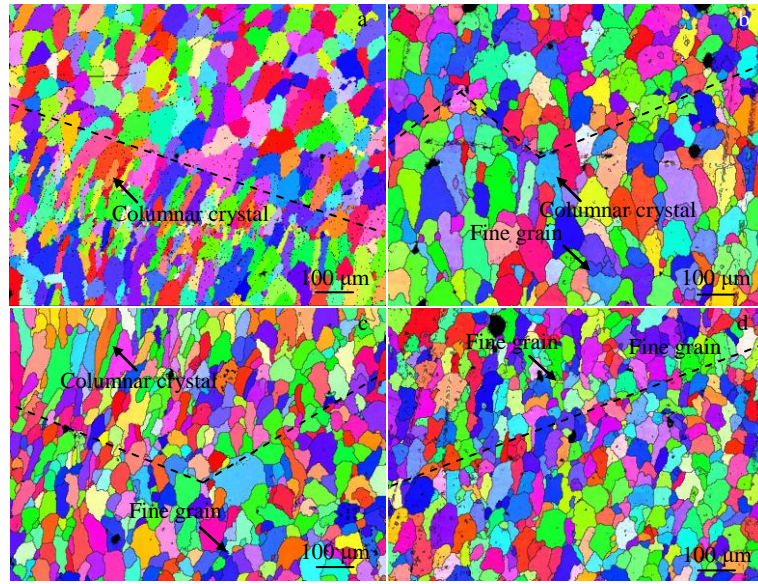


图 11 不同超声波功率作用于熔池 WAAM 试样的 EBSD 图

Fig.11 EBSD diagram of WAAM additive layer specimens under different ultrasonic vibration frequencies: (a) 0 kHz, (b) 30 kHz, (c) 40 kHz, and (d) 50 kHz

50 kHz 作用于熔池增材层内晶粒主要为等轴晶粒，且晶界处有细小晶粒，直径为 5~15 μm。而当超声搅拌频率为 30 和 40 kHz 时，熔合线区域仍观察得到柱状晶粒和较大粗晶，同时也有部分晶粒发生细化，存在于柱状晶和粗晶之间。

图 12 是 EBSD 的晶粒尺寸统计图。图中统计的是超声搅拌 WAAM 后增材层熔合线区域平均晶粒尺寸图。随着超声频率增加，增材层熔合线区域晶粒的平均尺寸减小，当超声频率为 50 kHz 时达到最小值 150.44 μm<sup>2</sup>，比未加超声搅拌的试样减小了 32.79%。

图 13 为随焊超声搅拌 WAAM 晶粒细化的机理图。在随焊超声搅拌辅助 WAAM 过程中，超声搅拌传递到熔合区正在生长的枝晶，使枝晶破碎，减少了粗大柱状晶，并促进了细小等轴晶的形成。

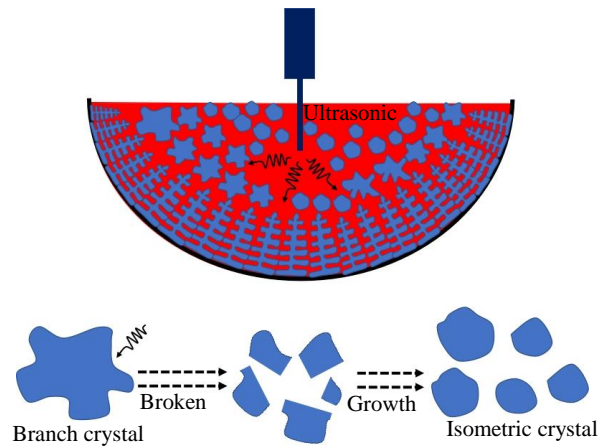


图 13 超声作用于熔池 WAAM 增材层晶粒细化机理图

Fig.13 Ultrasound-assisted grain refinement mechanism of WAAM

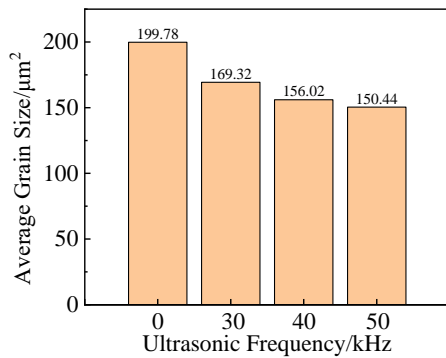


图 12 超声搅拌 WAAM 试样 EBSD 平均晶粒尺寸

Fig.12 Average grain size of WAAM specimens assisted by ultrasonic vibration obtained by EBSD

### 2.2 力学性能

图 14 是不同超声频率下超声搅拌作用于熔池 WAAM 的拉伸试验结果。加入超声搅拌作用于熔池后，增材层抗拉强度有所提高且随着超声搅拌频率的增加，增材层抗拉强度也逐渐增加。在 50 kHz 超声波频率下，增材层的平均拉伸强度为 298.85 MPa，比未加入超声搅拌提高了 12.11%。随着超声搅拌频率的增加，增材层试样平均伸长率也逐渐增加。当超声频率为 50 kHz 时，增材层试样伸长率达到最大为 41.86%，比未加入超声搅拌的试样提高了 36.48%。由此可见，加入超声搅拌作用于熔池后，对增材层最大抗拉强度和伸长率都是有所提高的。且随着超声搅拌频率的增加，两者都逐渐增加。

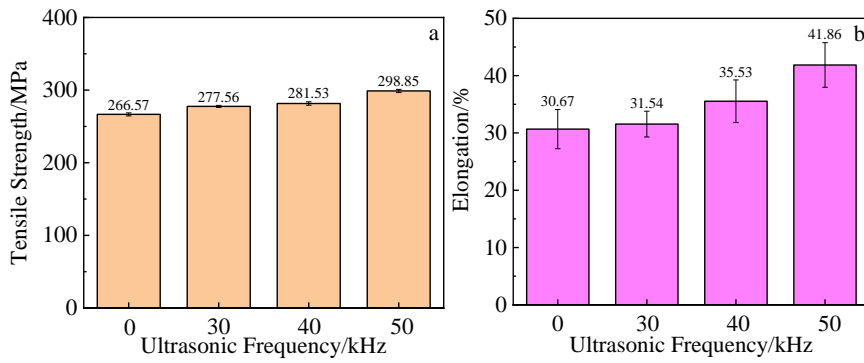


图 14 不同超声频率下超声搅拌作用于熔池 WAAM 试样的拉伸试验结果

Fig.14 Tensile test results of the specimens under different ultrasonic vibrations frequencies: (a) tensile strength and (b) elongation

超声搅拌对增材层力学性能有所提高应该是增材层内部孔隙率增加和熔合线附近晶粒细化共同作用的结果。虽然超声搅拌增加了增材层孔隙率，对其力学性能存在不利影响，但同时超声搅拌使熔池中正在生长的柱状晶破碎，形成多个细小晶粒，产生的细晶强化，以及

减少了增材层粗大的柱状晶数目。

图 15 为拉伸试样的 SEM 断口形貌。拉伸试样的宏观横截面均呈 45° 倾斜。从断口的宏观形貌来看，断口截面均有气孔存在，且随着超声频率的增加，断口截面气孔数量明显减少，且大部分气孔尺寸较小。增材层均

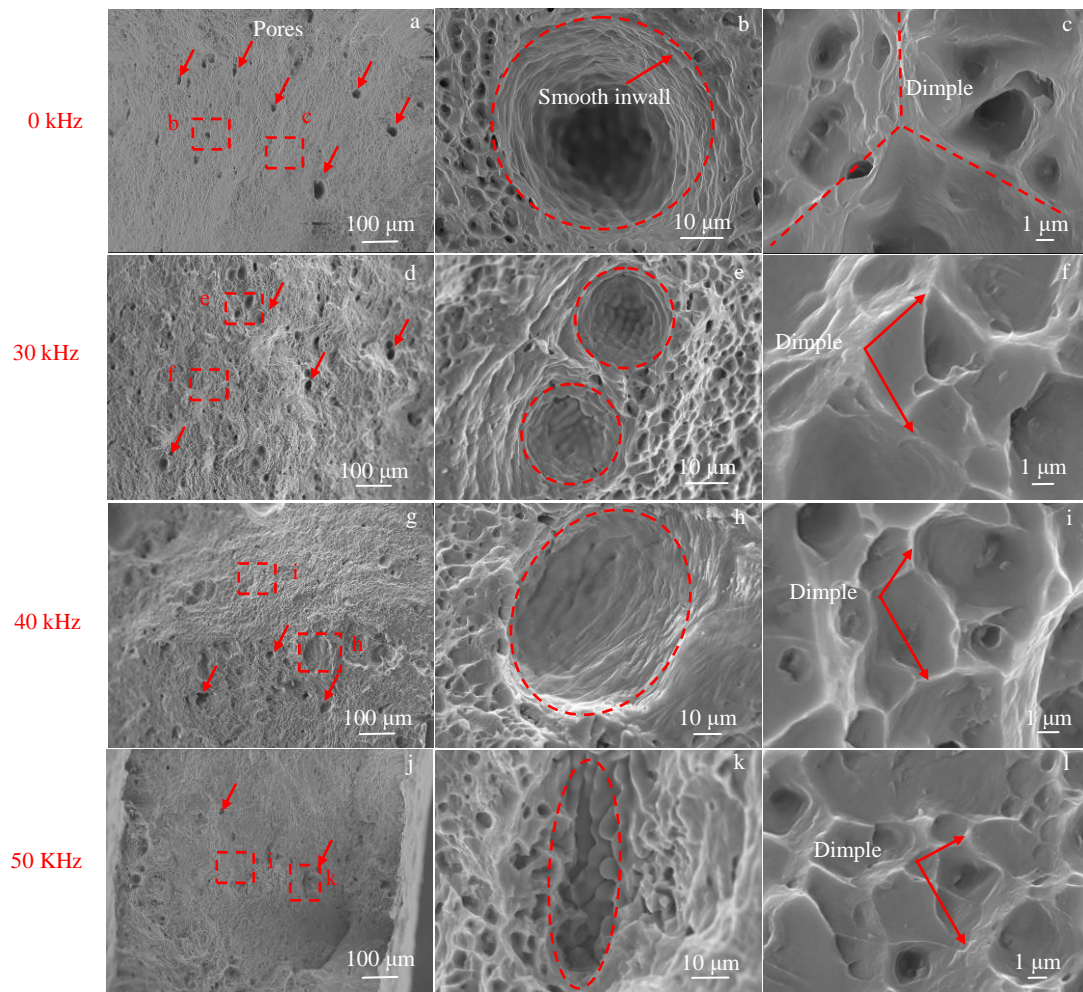


图 15 超声搅拌作用于熔池 WAAM 试样的断口形态

Fig.15 Fracture morphologies of the WAAM specimens under different ultrasonic vibration frequencies

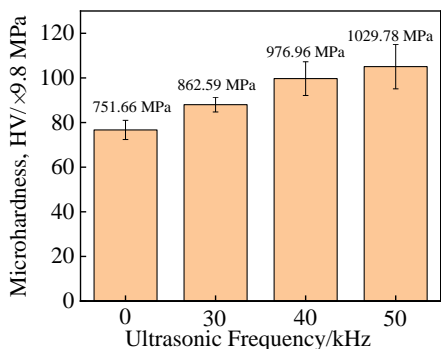


图 16 超声搅拌作用于熔池 WAAM 试样的显微硬度分布

Fig.16 Microhardness distribution of WAAM specimens under different ultrasonic vibration frequencies

为韧性断裂, 断口截面韧窝特征明显。因为韧窝细小且致密, 所以试样均有良好的伸长率。另一方面, 孔隙的分布、数量和大小影响着样品的拉伸强度。随着超声搅拌频率的增加, 增材层试样断口截面处气孔数目逐渐减少。因此当超声频率为 50 kHz 时, 增材层抗拉强度最好。

图 16 为超声搅拌 WAAM 试样的显微硬度分布。随着振动作用于熔池的超声频率增加, 增材层的显微硬度逐渐增加。当超声搅拌频率为 50 kHz 时, 增材层平均显微硬度达到最大值, 为 1029.78 MPa, 比未加入超声搅拌的显微硬度提高了 37.00%。由此可见在增材层熔池中直接加入超声搅拌对增材层显微硬度具有明显提升。这可能由于超声搅拌产生的空化效应以及搅拌针在熔池中高频振动引起的机械搅拌作用, 从而使增材层内部晶粒细化。

### 3 结 论

1) 施加超声搅拌后, 增材层中的孔隙率有所增加, 但是随着超声搅拌频率的增加, 增材层的孔隙率逐渐减少。这应该是因为: 一方面、超声搅拌促进了熔池中 H 元素析出形成氢气孔, 同时空化效应导致形成了未愈合真空孔; 另一方面, 超声搅拌有利于气孔上浮, 减少孔隙率, 这两种机制相互竞争、共同作用导致了上述现象。

2) 超声搅拌使增材层组织细化。且随着超声搅拌频率增加, 增材层熔合线附近的粗大柱状晶明显减少, 形成细小的等轴晶。

3) 增材层的抗拉强度与显微硬度均有提升。且随着超声搅拌频率的增加, 增材层抗拉强度与显微硬度也逐渐提高。超声搅拌频率为 50 kHz 时, 增材层力学性能最好, 平均抗拉强度达到了 298.85 MPa, 比未加入超声搅拌提高了 12.11%, 平均显微硬度为 1029.78 MPa, 比未加入超声搅拌提高了 37.00%。这应该与超声搅拌后增材层晶粒细化、气孔尺寸与数目减少有关。

### 参考文献 References

- [1] Sames W J, List F A, Pannala S *et al. Int Mater Rev*[J], 2016, 61(5): 315
- [2] Li Dichen(李涤尘), Tian Xiaoyong(田小永), Wang Yongxin(王永信) *et al. Electromachining & Mould*(电加工与模具)[J], 2012(s1): 20
- [3] DebRoy T, Wei H L, Zuback J S *et al. Progress in Materials Science*[J], 2018, 92: 112
- [4] Srinivas M, Sridhar B B. *Materials Today-Proceedings*[J], 2017, 4: 9049
- [5] Bai J, Ding H L, Gu J L *et al. IOP Conference Series-Materials Science and Engineering*[J], 2017, 167: 1
- [6] Wang Leilei(王磊磊), Zhang Zhanhui(张占辉), Xu Dewei(徐得伟) *et al. Transactions of The China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2019, 40(4): 137
- [7] Luo Jingchuan, You Guoqiang, Lu Dashi *et al. Steel Research International*[J], 2021, 92(4): 2 000 523
- [8] Zhang Jingang(张锦刚), Chao Lining(晁利宁), Wang Qiang(汪强) *et al. Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2022, 47(2): 236
- [9] Gu Xiaoyan(谷晓燕), Meng Zhengyu(孟政宇), Liu Jing(刘婧) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(6): 2139
- [10] Yu Weiyuan(俞伟元), Zhang Tao(张涛), Wang Youliang(王有良) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(1): 241
- [11] Yuan H R, Lin S B. *China Welding*[J], 2011, 20(1): 39
- [12] Zhu Q, Lei Y C, Wang Y *et al. Fusion Engineering & Design*[J], 2014, 89(12): 2964
- [13] Tian Yinbao, Shen Junqi, Hu Shengsun *et al. Journal of Materials Processing Tech*[J], 2017, 11: 193
- [14] Liu Jia, Zhu Hongyin, Li Zhong *et al. Optics and Laser Technology*[J], 2019, 119: 105 619



## Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Alloy Prepared by WAAM Assisted with Ultrasonic Stirring

Peng Lizhen<sup>1,2</sup>, You Guoqiang<sup>1,3</sup>, Wang Lei<sup>1</sup>, Li Qi<sup>1</sup>, Zeng Sheng<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

(2. Chongqing Chang'an Automobile Co., Ltd, Chongqing 400020, China)

(3. National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** In the arc additive manufacturing (WAAM) of aluminum alloy, different frequencies (30, 40, 50 kHz) of ultrasonic stirring were applied in the molten pool using a stirring needle moving synchronously with the arc. Results show that the grains of the additive layer are refined, the number of columnar crystals decreases, and the number of equiaxed crystals increases compared with that without ultrasonic stirring, and the grain refinement becomes more obvious as the ultrasonic frequency increases. The porosity of the additive layer decreases with increasing ultrasonic frequency, which is 0.73%, 0.64%, and 0.59% at 30, 40, 50 kHz, respectively, but no more than 0.2% of the specimen without ultrasonic stirring. When ultrasonic frequency is 0, 30, 40, 50 kHz, the tensile strength of the additive layer is 266.57, 278, 282, and 299 MPa, and the elongation is 30.67%, 31.54%, 35.53%, 41.86%, respectively. With the increase in ultrasonic stirring frequency, the strength and plasticity of the reinforced layer increase.

**Key words:** aluminum alloy; ultrasonic stirring; WAAM; microstructure; mechanical property

---

Corresponding author: You Guoqiang, Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China, E-mail: ygq@cqu.edu.cn