

引用格式:金玉静,王大庆,陆皓. GTAW自激发超声工艺对AISI316不锈钢堆焊层的有效性分析[J]. 热加工工艺, 2024, 53(12):133-138+144.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20232762  
<http://www.rjggy.net> [rjggy@vip.163.com](mailto:rjggy@vip.163.com)

# GTAW 自激发超声工艺对 AISI 316 不锈钢堆焊层的有效性分析

金玉静<sup>1</sup>, 王大庆<sup>2</sup>, 陆皓<sup>2</sup>

(1. 苏州工业职业技术学院 精密制造工程系, 江苏 苏州 215104; 2. 上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200240)

**摘要:**通过自行搭建 GTAW 自激发超声波焊接试验平台,研究了电弧自激发超声工艺对 AISI316 不锈钢堆焊层的有效性。结果表明,电弧图像和声压两方面的测试均反映出所搭建平台的工作性能和自激发超声波工艺的有效性,可在无需添加额外设备的情况下实现焊缝的晶粒细化。当超声频率为 60 kHz, 振幅电流为 10 A 时, 焊缝熔深可增深 59.67%, 熔宽可缩小 30.14%。对于 AISI 316 不锈钢堆焊层工件熔池系统而言, 40~60 kHz 接近其固有频率, 更有利于通过抑制枝晶生长获得细化的晶粒。

**关键词:**GTAW; 超声工艺; 自激发; AISI316 不锈钢; 微观组织

中图分类号: TG455

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2024)12-0133-06

## Validity Analysis of GTAW with Self-induced Ultrasound Process on AISI 316 Stainless Steel Weld Overlay

JIN Yujing<sup>1</sup>, WANG Daqing<sup>2</sup>, LU Hao<sup>2</sup>

(1. Department of Precision Manufacturing Engineering, Suzhou Vocational Institute of Industrial Technology, Suzhou 215104, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The validity of arc self-induced ultrasonic welding process on AISI316 stainless steel weld overlay was investigated by building a GTAW self-induced ultrasonic welding experimental platform. The results show that the testing of arc images and sound pressure reflects the working performance of the built platform and the validity of self-induced ultrasonic technology, which can achieve grain refinement of the weld seam without additional equipment. When the ultrasonic frequency is 60 kHz and the amplitude current is 10 A, the weld penetration depth can be increased by 59.67%, and the fusion width can be reduced by 30.14%. For the AISI 316 stainless steel weld overlay workpiece melt pool system, 40-60 kHz is close to its natural frequency, which is more conducive to obtain refined grains by inhibiting dendrite growth.

**Key words:** GTAW; ultrasonic process; self-induced; AISI316 stainless steel; microstructure

近年来,利用超声波细化晶粒<sup>[1]</sup>实现对液态金属或熔渣的加工已经被成熟地应用于铸造等<sup>[2]</sup>行业。为了不断提高电弧焊接工艺生产率,改善焊接接头组织性能,诸多学者对如何将超声波能量引入到电

弧焊接中进行了深入的研究<sup>[3]</sup>,尤其是对于焊接困难的金属材料<sup>[4-10]</sup>。与传统电弧焊接工艺相比,机械超声辅助焊接工艺能有效改善焊缝微观组织,但由于在焊接系统中安装超声换能器时存在尺寸和大小不一、与焊枪相连装配困难、同时换能器无法接近高温电弧、成本高昂等原因应用受到限制<sup>[11]</sup>。就整体而言,超声波辅助加工技术在电弧焊接行业中尚未得到大规模应用,仅处于初步探索与推广阶段。

为了克服机械超声辅助焊接技术的缺陷,通过调制高频脉冲电流(频率 >20 kHz)电弧直接激发超声波的新技术应运而生。本文直接将电弧等离子体与熔池作为超声波的发射源,设计了一组 GTAW 电弧超声试验平台,通过电弧自激发超声技术引入超

收稿日期:2023-11-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFA0702900);国家自然科学基金项目(52275354);江苏省高校“青蓝工程”资助项目(苏教师函[2023]27号);江苏省高职院校青年教师企业实践资助项目(2023QYSJ107);苏州工业职业技术学院自然与社科培育项目(2022kypy11);苏州工业职业技术学院科研启动经费(2017kyqd009)

作者简介:金玉静(1986-),女,河北邢台人,讲师,博士,主要研究方向:金属增材制造成形工艺;E-mail:00730@siit.edu.cn

声能量来调控 316 不锈钢堆焊层的微观组织结构。使用超声辅助焊接工艺更加灵活可控,设备易于安装,成本更低,在工业应用上具有较大前景。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验采用的保护气体是高纯氩气。使用的焊丝为 ER316L、直径为 1.2mm,供货状态下的化学成分见表 1。所用的基板材料为 316L 不锈钢,尺寸为 200mm×150mm,供货状态下的化学成分见表 2。

### 1.2 试验方法

使用自行设计的 GTAW 自激发超声波焊接试

表 1 填充焊丝 ER316L 的化学成分(质量分数,%)  
Tab.1 Chemical composition of filler wire ER316L (wt%)

Fe	Cr	Mo	Ni	Mn	Si
64	19	2	12	2	1

表 2 316 L 不锈钢基板的化学成分(质量分数,%)  
Tab.2 Chemical composition of 316 L stainless steel substrate (wt%)

Mn	P	Cu	C	Si	Cr	Al	S	Ti	Ni	Fe
2.01	0.028	0.134	0.026	1	18.78	0.017	<0.002	0.006	13	65

验平台,如图 1 所示。部分设备如图 2 所示,分别为数据采集卡、功率放大器、高速摄像机和超声声场压力传感器。该平台为大电流高频率任意波形电弧耦合超声能场激励装置,由超声波产生系统、监测系统

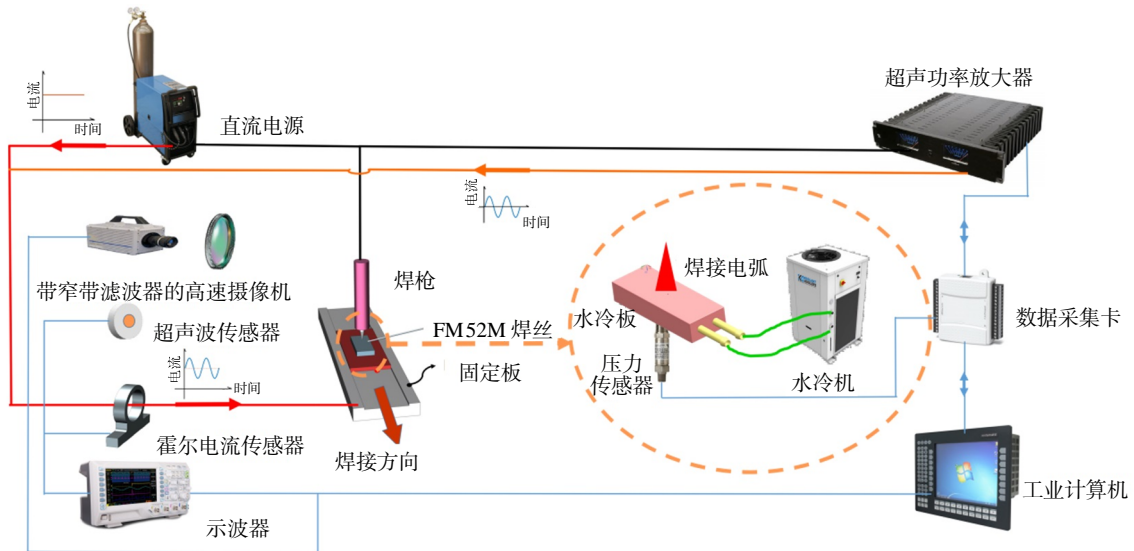


图 1 GTAW 自激发超声试验平台示意图

Fig.1 Schematic of GTAW experimental platform with self-induced ultrasound



图 2 GTAW 自激发超声试验平台中部分的设备实物照片

Fig.2 Physical photos of partial equipment in the experimental platform for GTAW with self-induced ultrasound

和数据分析系统组成。与现有技术相比,本平台具有能够输出大电流高频率交变电流、输出电流稳定性好以及当外部电流超载时安全性好等优点。

首先,在工业计算机上通过 Labview 设定超声激励频率、激励电流振幅和任意波形特征,通过 USB 连接数据采集卡用于产生高频小振幅谐波信号。然后,功率放大电路接收并放大小信号超声波形,实时输出波形、频率相同,输出功率放大的大功率超声激励电流,并通过高频线缆耦合到直流电源(140A)产生的稳定焊接电弧上。接着,分别通过霍尔电流传感器和超声波传感器对电弧等离子体产生的超声波电流信号和超声波声压进行监测。同时,使用包含窄带滤波器的高速摄像机来观察和记录电弧形态,并将电弧形态数据图像保存;将高频声场压力传感器固定于 GTAW 焊接电弧周围来测量电弧传

播到保护气或空气区域的声学参量,并将声波数据保存;水冷铜板以径向 0.5 m/min 的速度移动,当电弧稳定时,钨极中心与铜盘中心对准,借助电弧压力传感器收集电弧冲击水冷铜板处的电弧压力。

采用本平台制备 5 组堆焊层样品,超声激励频率分别为 0、20、40、60、80 kHz,具体工艺参数见表 3。堆焊时,首先采用手持式磨光机分别打磨 316L 不锈钢基板和可编程直线行走机构的铜极板表面,去除污染物后无水乙醇擦拭干净,再不锈钢基板放置于铜极板之上。接下来,设置工艺参数并启动试验平台。当不锈钢基板移动至收弧位置时,关闭试验平台完成一道 GTAW 填丝堆焊。重复上述操作得到尺寸为 200 mm×150 mm×10 mm 的堆焊层。不同超声激励频率下的堆焊层制备方法同上。

表 3 GTAW 自激发超声工艺参数  
Tab.3 GTAW self-induced ultrasound process parameters

恒定电流 / A	140
焊接电压 / V	10.5
焊接速度 / (mm·s <sup>-1</sup> )	13
送丝速度 / (mm·s <sup>-1</sup> )	12.5
保护气流量 / (L·min <sup>-1</sup> )	20
电流波形	谐波
超声激励频率范围 / kHz	20~80
超声激励电流幅值 / A	10

用 SiC 水磨砂纸和金刚石抛光膏对线切割堆焊层的样品表面进行机械抛光后,使用电解液 (20% HClO<sub>4</sub>+80% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O) 进行电解抛光,抛光电压为 DC 12 V。制备完成后的 EBSD 试样放入 SEM (NOVA230) 观察,使用带有 LeicaLAS 软件的 Leica Z16 APO microscope 观察熔池轮廓形貌,并使用尼康 LV150N 显微镜分析微观结构特征。熔池轮廓的焊缝熔深特征和晶粒的枝晶宽度用 Image Pro Plus 6.0 测量。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 电弧形态视觉测试结果

启动 GTAW 自激发超声试验平台,分别将 DC 弧焊电源的输出电流设定为直流 140 A (316L 不锈钢 GTAW 焊接常用电流),开启“Arc Striking”开关引燃电弧,待电弧稳定后,设置超声激励频率,然后开启“Ultrasonic amplifier start”开关引入超声激励电流,即在电弧等离子体与熔池中激发超声波,最后开启高速摄像机进行电弧拍摄。

采用 Pseudo Colour 将高速摄像机拍摄到的灰度电弧图像如图 3 所示(彩图见电子版,下同)。在指定的超声激励频率下 (0、20 kHz),使用编号来分别表示电弧明亮区域面积最小和电弧明亮区域面积最大时刻的两张图片 (当超声激励频率为 0 kHz 时,表示为 (a1) 与 (b1);当超声激励频率为 20 kHz 时,表示为 (a2) 与 (b2)),并将电弧明亮区域所占的面积比例  $A_w$  数值绘制成曲线。

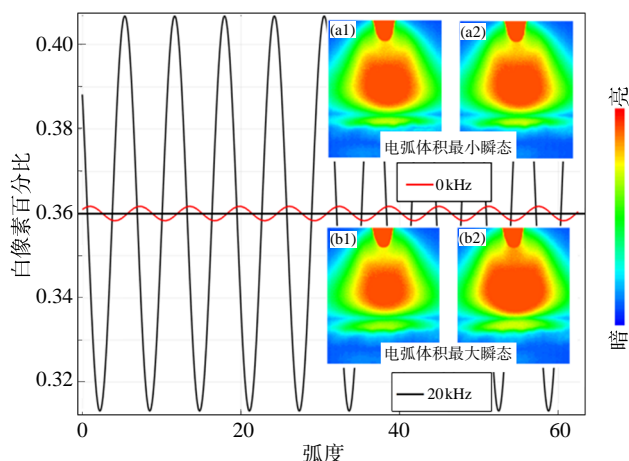


图 3 GTAW 焊接电弧在频率为 0、20 kHz 自激发超声能场条件下电弧明亮区域所占面积比随时间的变化曲线与电弧明亮区域瞬态图像

Fig.3 Curves with change of percentage of white pixel and transient images under conditions of ultrasonic frequency 0 kHz and 20 kHz of GTAW welding

经过对比图 3(a1)和图 3(a2)可看出,当超声激励频率为 0 kHz,焊接电弧明亮区域体积几乎没有变化,由系统不稳定性造成的  $A_w$  曲线波动幅值很小,可忽略不记,说明当超声激励频率为 0 kHz 未产生超声激励电流时,电弧等离子体未发生周期性的膨胀与收缩,即没有产生自激发超声波;当超声激励频率为 20 kHz 时,焊接电弧明亮区域体积发生了变化, $A_w$  曲线呈现与超声激励频率相同的周期性波动,说明当超声激励频率为 20 kHz 产生超声激励电流时,电弧等离子体发生了周期性的膨胀与收缩,即产生了自激发超声波。

### 2.2 声学参量测试结果

根据经典声学理论,声波包括压力、密度、速度、温度多种变量的小幅扰动,GTAW 焊接电弧发生周期性的膨胀与收缩,产生超声波,是密度与温度扰动的体现。因此,本文使用声学仪器直接测量电弧自激发超声波的声压。

将高频声场压力传感器(图 2(d))放置在电弧

附近, 设置传感器与电弧中心横向距离分别为 20、40、60、80、100、120、140、160、180 mm, 采样时间设定为 20s。使用工业计算机记录保存声音数据, 借助 LabView 2015 系列软件(NICo., Deakin, MI, USA) 对高于 20kHz 频率的杂波进行滤波。启动并设定 GTAW 自激发超声试验平台, 其中, 超声激励频率分别设置为 0、20、30 和 40kHz。

当超声激励频率为 0kHz, 即 GTAW 焊接电弧未启动超声激励电流时, 声压值几乎为 0, GTAW 不存在自激发超声波。而当超声激励频率为 20~40 kHz 时(图 4(a)~(c)), 能检测到 GTAW 焊接电弧中存在自激发超声波, 此时, 电弧自激发超声波在监测点的声压幅值均约为 30Pa。这说明在电弧中开启超声激励电流后, 在电弧等离子体中激发出超声波。为了准确检测不同超声激励频率下的声场压力, 将采集到的声压波形观察时间区间缩短至 1ms, 发现超声波声压波形与超声激励频率相对应。

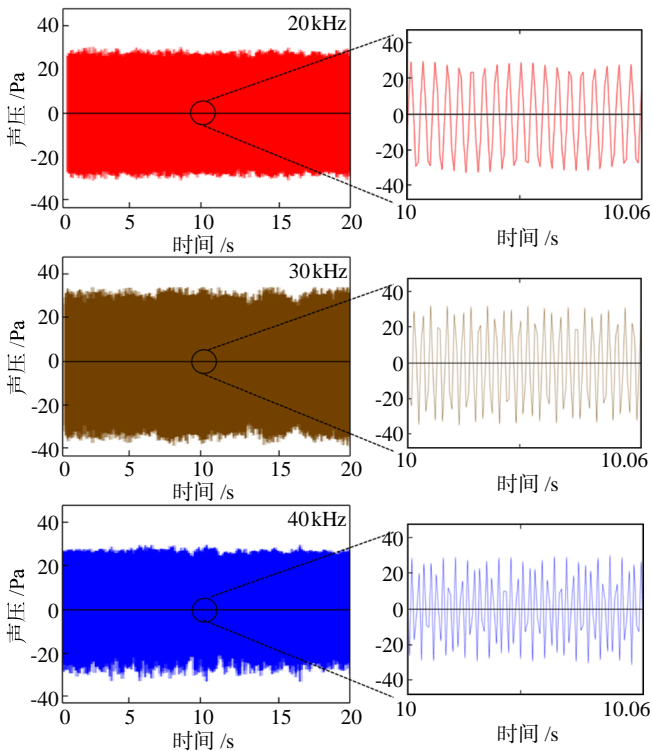


图 4 超声频率分别为 20、30 和 40 kHz 时电弧自激发超声波的声压时域信号  
Fig.4 Acoustic pressure of arc induced ultrasonic waves with frequency of 20 kHz, 30 kHz and 40 kHz

经过数字处理, 分析超声激励频率为 20kHz 时距离电弧不同位置 (20、40、60、80、100、120、140、160、180 mm) 滤波前后声压的数据如图 5 所示。声压峰值在电弧附近区域较高, 下降速度很快, 距离电弧中

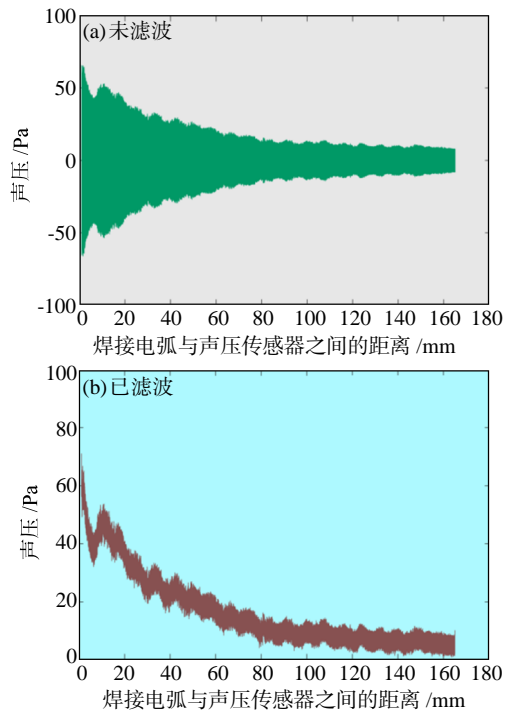


图 5 超声激励频率为 20 kHz 时距离电弧不同位置声压测试结果

Fig.5 Measurement of acoustic pressure with different distance from welding arc at ultrasonic waves with frequency of 20 kHz

心 20~40 mm 处声压幅值在 40~20 Pa, 而在远离电弧区域下降速度逐渐趋于平稳, 声压幅值不足 10 Pa。

可见, 声学量测试验证了在电弧等离子体中自激发超声波的存在, 超声波频率与超声激励电流频率相同验证了电弧自激发超声工艺的有效性。

### 2.3 超声激励频率对熔池形貌的影响

如图 6 所示, 开始加载超声电流后焊缝横断面的下轮廓线由较浅的“双抛物线”变较深的“单抛物线”

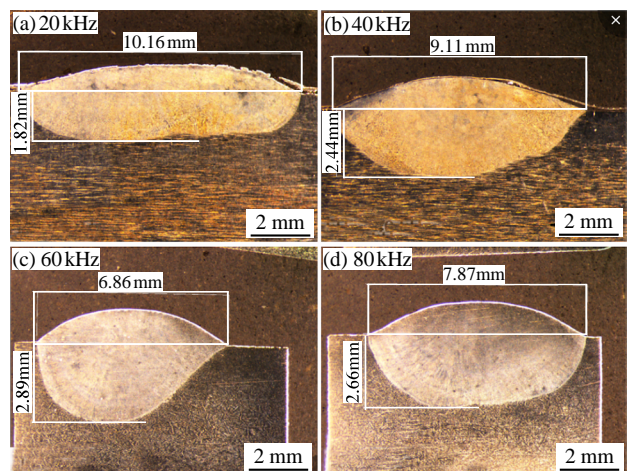


图 6 超声频率对熔池形貌特征的影响  
Fig.6 Influence of ultrasonic wave frequency on the molten pool profile

线”,而图 6(c)焊缝形貌非对称的特点有待后续进一步研究。就整体来看,随着超声频率增加,焊接熔池形貌呈现焊缝熔深先增加后略微减小,熔宽呈现先减小后略微增加的趋势。当超声频率为 60kHz 时,焊缝熔深最大,熔宽最窄。从超声激励频率对熔池形貌演变的影响可看出取超声频率在 60kHz 时能够获得最大的深宽比,焊缝熔深可增深 59.67%,熔宽可缩小 30.14%,最大增幅为 230%。焊缝熔深增加的主要原因是脉冲电流在熔池中激发了液电效应<sup>[12]</sup>,液电效应产生高能超声波,超声波被液态金属吸收形成声流效应加速了熔池流动与传热,高温液态金属不断冲击熔池的底部从而增加熔深。

不同的超声激励频率对焊缝不同区域晶粒组织

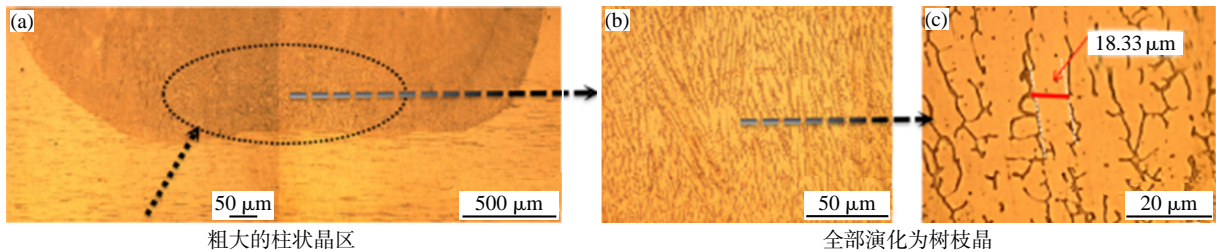


图 7 不同放大倍数下传统 GTAW 焊缝组织形貌

Fig.7 Microstructure and morphology of traditional GTAW weld under different magnification

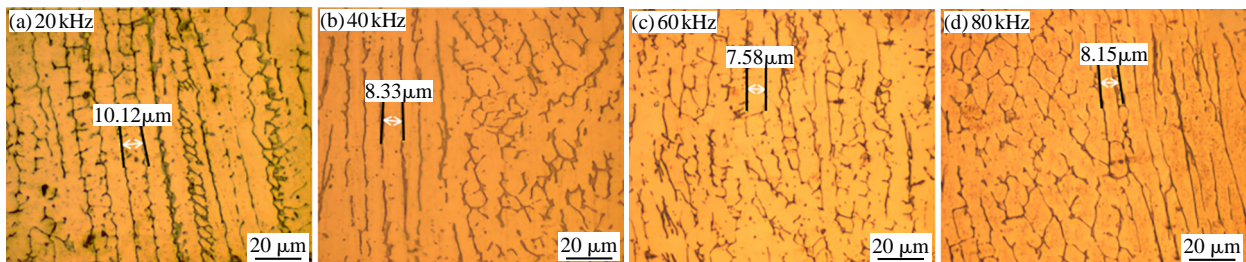


图 8 超声频率对焊缝柱状晶区组织形貌的影响

Fig.8 Influence of ultrasound frequency on the column grain near the fusion line

和晶粒尺寸的影响情况如图 9 所示,可见焊缝微观组织形貌与超声激励频率也呈现非线性关系,在一定范围内提高超声激励频率,会加强超声细化晶粒

也具有显著的影响,选取典型的焊缝熔合线附近柱状晶区形貌特征进行分析对比,如图 7、8 所示。可看出,一次枝晶间距在超声激励频率为 20kHz 时从 18.33 μm 降为 10.12 μm,在 60kHz 时降到最低,为 7.58 μm,然后随着频率上升到 80kHz 而重新增加到 8.15 μm。另外,传统 GTAW 焊的焊缝区柱状晶非常粗大,沿着焊缝熔合线向焊缝中心生长;而 GTAW 自激发超声焊的柱状晶一般只存在焊缝熔合线附近,晶粒较为细小,晶界较窄,并在不同柱状晶之间存在着径向肢解的等轴树枝晶。随着超声频率进一步提高到 60kHz 时,等轴树枝晶明显增多,柱状晶也明显细化。当超声频率为 80kHz 后,细化程度略微减弱。

通过测量和统计获得的频率对焊缝熔深、熔宽

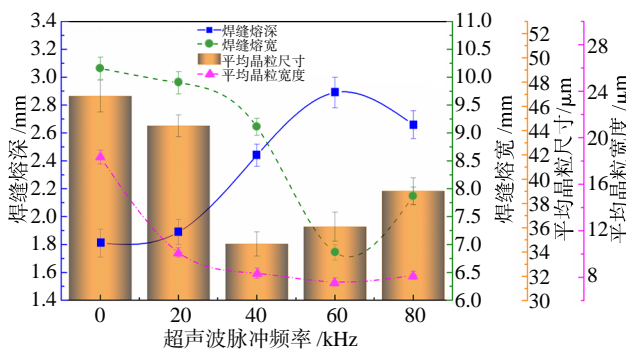


图 9 超声激励频率对焊缝熔深、熔宽和晶粒尺寸的影响

Fig.9 Influence of ultrasonic pulse frequency on melting depth, width and grain size of weld

的程度,但当超声激励频率超过材料谐振频率的阈值后,超声振动与细化程度会受到一定限制。综合对比两种工艺,加载超声电流后的焊缝柱状晶的宽度至少细化了 58.6%。

## 2.4 超声激励频率对熔池微观组织的影响

图 10 对比了不同超声频率下焊缝区、热影响区及母材的 EBSD 图像,选定 IPF 方向为 Y0 的 RD 轧制方向。通过传统 GTAW 焊缝区 IPF 图可看出,大部分柱状晶的晶体取向与 <001>//Y 取向较为接近,等轴晶的取向与 <001>//Y 取向相差稍稍较大,而靠近熔合线晶粒的取向差异较大,更趋向于热影响区与母材的取向。超声 GTAW 焊缝区的取向不均匀程度明显高于传统 GTAW 焊,且基本上为等轴树枝晶。

用 EBSD 软件自带的平均晶粒尺寸功能分析焊

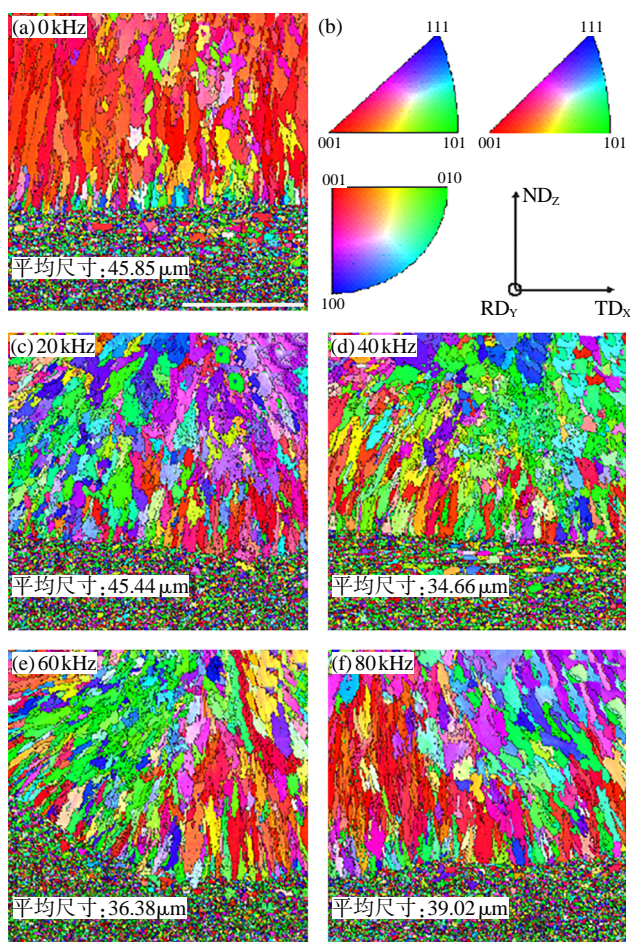


图 10 不同超声频率下焊缝区(WZ)、热影响区(HFZ)及母材(BM)的EBSD图像图

Fig.10 EBSD images of WZ, HFZ and BM at different ultrasonic frequencies

缝区,传统 GTAW 焊缝平均晶粒尺寸为  $45.85\ \mu\text{m}$ ,大多为柱状树枝晶,而超声 GTAW 焊缝的晶粒尺寸均有所减小,且随着频率的升高,呈现平均晶粒尺寸先降低后增加的趋势。在  $40\ \text{kHz}$  时平均晶粒尺寸降低到  $34.66\ \mu\text{m}$ ,约减小了  $24.4\%$ 。同时,焊缝基本都是等轴树枝晶,平均直径小于  $30\ \mu\text{m}$  等轴晶的占比明显较高。随着频率上升到  $60\ \text{kHz}$ ,平均晶粒尺寸微增到  $36.38\ \mu\text{m}$ 。

GTAW 自激发超声焊接工艺柱状晶数量尺寸的减少,一方面因为空化射流不断熔化与冲击已形成的柱状晶枝臂<sup>[12]</sup>,造成枝晶破碎形成脱离的柱状晶残臂和初步形核的晶胚,带来更多的形核质点,然后被熔池内流动的熔体携至远离熔合线的区域,在适宜条件下重新长大容易形成更多的等轴晶;另一方面,加速的热对流循环改变了熔池内部原有温度梯度分布,使得熔池热对流与散热方向发生紊乱,提高了温度与浓度均匀性,降低温度梯度与成分过

冷,从而抑制柱状晶形核与长大。

另外,可看出当激励频率为  $20\ \text{kHz}$  时的细晶区域范围较小,主要在熔池中心,而随着频率上升, $40\sim 60\ \text{kHz}$  时细晶区域范围最大,这进一步说明了微观尺度超声空化效应与介观尺度液电-声流作用的内在联系,即较强的微观尺度超声空化作用带来的射流也会加强介观尺度的金属熔体流动,能够将破碎的枝晶输运到范围更远的熔池区域。超声空化作用的强弱不仅与超声能场强度有关,也与本身的固有频率属性有关。想获得更强烈的超声空化效果,需使超声激励频率接近工件熔池系统的固有频率,实现微观尺度上的共振,从而获得强度更大的自激发超声场。这解释了激励频率上升到  $80\ \text{kHz}$  后,由于偏离工件-熔池系统的固有频率,反而对晶粒的细化效果下降,熔深减小。不同材质、不同工艺下工件熔池系统的固有频率往往并不相同,通过上述对比  $20\sim 80\ \text{kHz}$  的细晶区特点可知,对于本文研究的工件熔池系统, $40\sim 60\ \text{kHz}$  间的频率更接近其固有频率。

### 3 结论

(1) 通过观测电弧图像和声压两方面测试了所搭建的 GTAW 自激发超声波焊接试验平台的工作性能,测试结果证实自激发超声波工艺的有效性。

(2) 电弧自激发超声工艺引入超声能量能够在无需添加额外设备的情况下对整个加工过程实现实时超声辅助加工,达到超声晶粒细化,对枝晶生长产生抑制并容易产生较深的熔深。目前试验条件下,晶粒细化可达  $24\%$ ;在一定超声频率范围内,焊缝熔深随超声频率的增加而增加,熔宽随频率的增加而减小。当超声频率为  $60\ \text{kHz}$ 、振幅电流为  $10\ \text{A}$  时,焊缝熔深可加深  $59.67\%$ ,熔宽可缩小  $30.14\%$ 。

(3) 对本文研究的 AISI316 不锈钢堆焊层工件熔池系统而言, $40\sim 60\ \text{kHz}$  间的频率更接近其固有频率,更易因共振效应获得强度更大的自激发超声场,有效抑制枝晶生长,获得晶粒细化的效果。

### 参考文献:

- [1] Li J, Momono T, Tayu Y, et al. Application of ultrasonic treating to degassing of metal ingots [J]. Materials Letters, 2008,62(25):4152-4154.
- [2] Kang J, Zhang X, Wang S, et al. The comparison of ultrasonic effects in different metal melts[J]. Ultrasonics,2015,57: 11-17.

(下转第 144 页)

参考文献:

- [1] 杨永辉,叶书亮,王志博,等. 3D打印树脂砂型在大型弯管铸件中的应用[J]. 金属加工:热加工,2022(4):79-80.
- [2] Saxena P, Pagone E, Saloni K, et al. Sustainability metrics for rapid manufacturing of the sand casting moulds: a multi-criteria decision-making algorithm-based approach [J]. Journal of Cleaner Production,2021,311:127506.1-127506.12.
- [3] Lynch P, Hasbrouck C, Wilck J, et al. Challenges and opportunities to integrate the oldest and newest manufacturing processes:metal casting and additive manufacturing [J]. Rapid Prototyping Journal,2020,26(6):1145-1154.
- [4] Temeyer F, Lechner P, Hofmann T, et al. Digital sand core physics:predicting physical properties of sand cores by simulations on digital microstructures [J]. International Journal of Solids and Structures,2019,188/189:155-168.
- [5] 张小艳,李竹青,王耀. 砂型 3D 打印技术的发展前景分析[J]. 现代国企研究,2015(4):67-68.
- [6] 马涛,李哲,程勤,等. 3D 打印技术在砂型铸造领域的应用前景浅析[J]. 现代铸铁,2019,39(2):38-40,50-51.
- [7] 海舟,李文仲,林兆富. 3D 打印技术在铸造砂型(芯)量产上的发展与应用[C]//2016 重庆市铸造年会论文集. 2016:438-443.
- [8] 杨伟东,贾鹏飞,马媛媛,等. 3D 打印工艺中粘结剂渗透建模与仿真[J]. 纳米技术与精密工程,2017,15(4):146-253.
- [9] Fortini A, Merlin M, Raminella G. A comparative analysis on organic and inorganic core binders for a gravity diecasting Al alloy component [J]. International Journal of Metalcasting, 2022,16(2):674-688.
- [10] Vykoukal M, Burian A, Perovská G M. The innovated environment friendly inorganic binder system [J]. Archives of Foundry Engineering,2019,19(1):109-116.
- [11] Prabhushankar N, Balaji N. Various alternative sources for silica sand, binders and additives in sand casting and their properties-a review [J]. IOP Conference Series:Materials Science and Engineering,2022,993(1):1245-1252.
- [12] Holtzer M, Danko R, Kmita A. Influence of a reclaimed sand addition to moulding sand with furan resin on its impact on the environment [J]. Water Air & Soil Pollution,2016,227(1):16-27.
- [13] Oguntuyi S D, Johnson O T, Shongwe M B. Spark plasma sintering of ceramic matrix composite of ZrB<sub>2</sub> and TiB<sub>2</sub>:microstructure, densification, and mechanical properties-a review [J]. Metals and Materials International,2021,27(7):2146-2159.
- [14] Daňko R, Holtzer M, Daňko J. Reclamation of alkaline spent moulding sands of organic and inorganic type and their mixtures [J]. Archives of Foundry Engineering,2011,11(4):25-30.
- [15] Li Y, Liu J, Huang W, et al. Microstructure related analysis of tensile and fatigue properties for sand casting aluminum alloy cylinder head [J]. Engineering Failure Analysis,2022,136:106210-106222.
- [16] Tekin U, Kalle J, Juhani O, et al. Sand casting implementation of two-dimensional digital code direct-part-marking using additively manufactured tags[J]. International Journal of Metalcasting,2022,16(3):1140-1151.
- [17] 李建强,唐盛来,陈立,等. 改性甲阶酚醛树脂在砂型 3D 打印铸造生产中的应用[J]. 铸造设备与工艺,2023(4):41-45.
- [18] 陈金伟,周菊元. 压差铸造设备及其在铝合金铸造上的应用[J]. 铸造设备与工艺,1995(4):1-3.
- [19] 董选普,黄乃瑜,吴树森,等. 薄壁铝合金铸件真空差压铸造工艺的研究[J]. 特种铸造及有色合金,2001(4):21-23. [H]
- (上接第 138 页)
- [3] Kumar S, Wu C S, Padhy G K, et al. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing;a status review [J]. Journal of Manufacturing Processes,2017,26:295-322.
- [4] Kotadia H R, Das A. Modification of solidification microstructure in hypo-and hyper-eutectic Al-Si alloys under high-intensity ultrasonic irradiation [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015,620:1-4.
- [5] Xie W, Huang T, Yang C, et al. Comparison of microstructure,mechanical properties,and corrosion behavior of gas metal arc (GMA) and ultrasonic-wave-assisted GMA(U-GMA) welded joints of Al-Zn-Mg alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology,2019,277(17/18):116470.
- [6] Yang F, Zhou J, Ding R. Ultrasonic vibration assisted tungsten inert gas welding of dissimilar magnesium alloys[J]. Journal of Materials Science and Technology,2018,34:2240-2245.
- [7] Chen C, Fan C, Cai X, et al. Investigation of formation and microstructure of Ti-6Al-4V weld bead during pulse ultrasound assisted TIG welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019,46:241-247.
- [8] Hua C, Lu H, Yu C, et al. Reduction of laves phase in nickel-alloy welding process under ultrasonic ampère's force [J]. Journal of Materials Processing Technology,2018,252:389-397.
- [9] Hua C, Lu H, Yu C, et al. Probing laves phase formation in ni-alloy during ultrasonic arc-welding with atomistic modelling [J]. Science and Technology of Welding and Joining,2019,24(4):1-8.
- [10] Thavamani R, Balusamy V, Nampoothiri J, et al. Mitigation of hot cracking in inconel 718 superalloy by ultrasonic vibration during gas tungsten arc welding [J]. Journal of Alloys and Compounds:An Interdisciplinary Journal of Materials Science and Solid-state Chemistry and Physics,2018,740:870-878.
- [11] Wang Y, Yu C, Lu H, et al. Research status and future perspectives on ultrasonic arc welding technique [J]. Journal of Manufacturing Processes,2020,58:936-954.
- [12] Wu M G, Liu Y, Lin F C, et al. Characteristics analysis of electrohydraulic shockwave [J]. High Power Laser and Particle Beams,2020,32:045002. [H]