

低频机械振动对电弧增材制造低碳钢组织和力学性能的影响

鲍鹏飞, 尹博, 石学智

(浙江海洋大学海洋工程装备学院, 浙江舟山 316022)

摘要: 电弧增材制造由于其沉积效率高、生产成本低, 在制造大尺寸金属零件方面受到广泛的关注。探究了低频机械振动对电弧增材制造制备的低碳钢薄壁零件微观组织和力学性能的影响。研究发现, 在0~20 Hz频率和0~0.7 mm振幅范围内的机械振动可以细化电弧增材制造低碳钢晶粒尺寸, 提升其拉伸强度。随着频率从0增加到20 Hz, 平均晶粒尺寸由7.60 μm 降至6.67 μm , 降低了12%, 抗拉强度和屈服强度分别提升至497.5 MPa和385 MPa; 随着振幅从0增加到0.7 mm, 平均晶粒尺寸由7.60 μm 降至6.35 μm , 降低了16%, 抗拉强度和屈服强度分别提升至500 MPa和385 MPa。利用低成本的机械振动辅助电弧增材制造可以优化低碳钢的组织性能, 这为高性能增材制造提供了参考。

关键词: 机械振动; 电弧增材制造; 低碳钢; 组织; 力学性能

作者简介:

鲍鹏飞(1996-), 男, 硕士生, 主要研究方向为增材制造技术。电话: 18757564532, E-mail: 1039913244@qq.com

通讯作者:

石学智, 男, 硕士生导师, 博士。电话: 18368064840, E-mail: shixuezhi@zjou.edu.cn

中图分类号: TH164;

TG142.31

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

03-0250-07

基金项目:

浙江海洋大学省属高校基本科研业务费(2021J010)。

收稿日期:

2022-05-20 收到初稿,

2022-07-08 收到修订稿。

增材制造, 俗称3D打印, 是根据模型轮廓逐点、逐面使打印材料层层堆积、固化、成形, 将数字化模型制造为实体零件的一种快速制造技术^[1]。电弧增材制造技术以电弧作为热源, 用金属焊丝作为填充材料, 成形尺寸不受限制, 设备和原材料成本低, 成形效率高^[2-5], 尤其适用于中等复杂程度大尺寸构件的快速“近净成形”, 在航空航天等领域独具优势, 已在增材制造领域获得了越来越广泛的关注^[6-9]。然而, 电弧熔池的低冷却速度以及熔池固-液界面前沿陡峭的温度梯度, 使凝固组织易形成外延生长的粗大柱状晶粒, 从而导致力学性能的降低^[10]。目前, 主要有添加活性剂、后处理、机械振动和超声辅助等^[11]方法来调控组织和性能。Lu等^[12]在焊接过程中给焊件施加激振力, 使焊件振动, 改变了晶粒的生长状况, 使枝晶破碎, 实现了晶粒细化。Ren等^[13]采用焊接结合机械振动, 发现机械振动使组织内产生更多的等轴晶, 提高了合金硬度; 且随着频率增加, 焊缝的抗拉强度和伸长率有一定提升。Ou等^[14]采用焊接和机械振动技术, 发现振动显著抑制合金组织内柱状晶的生长, 减少了碳化物的形成, 细化了其微观结构。而近年来, 也有相关研究人员将机械振动应用到增材制造过程中。Ma等^[15]利用机械振动辅助电弧增材制造低碳钢样件, 发现振动细化了晶粒, 提升了抗拉强度、屈服强度和平均硬度。Zhang等^[16]给工件施加振动实现铝合金的增材制造, 发现振动能显著细化晶粒, 使其平均晶粒尺寸从28.50 μm 减小到22.10 μm , 下降了22%, 同时提高了铝合金的抗拉强度且使其超过了锻件合金水平。

在不增加额外的处理工序和制造零件成本的情况下, 机械振动是较合适的选择。在调控金属组织和性能的同时, 机械振动甚至能够使金属的力学性能超过其锻件水平。因此, 本研究以电弧增材制造为基础, 以低碳钢为试验材料, 探讨不同频率和不同振幅下机械振动对电弧增材制造低碳钢组织和力学性能的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试验设备

试验的设备包括机械振动平台和电弧增材制造系统。机械振动平台是上海毅硕

实验仪器厂的YSZD-F电磁耦合式振动台。电弧增材制造系统包括四轴机器人、焊接电源等。焊接机器人是深圳越疆科技有限公司的DOBOT SR4-2四轴机器人。焊接电源是佛山焊高焊接设备有限公司的Plus MIG-350II焊机。在试验过程中，基板固定在振动平台上并随平台做机械振动。图1为该试验装置的示意图。

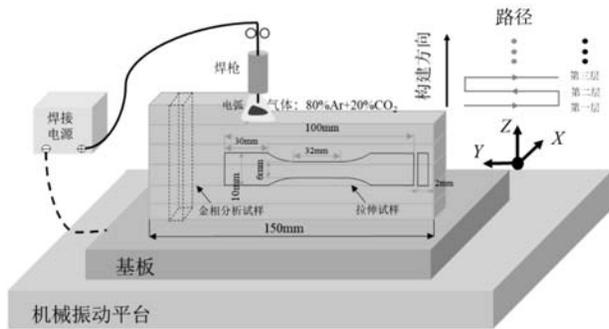


图1 机械振动辅助电弧增材制造和测试样品的示意图
Fig. 1 Schematic of the WAAM assisted the mechanical vibration and the test samples

1.2 材料与步骤

试验采用直径1.0 mm的ER50-6低碳钢焊丝，具体成分见表1。基板采用尺寸为200 mm × 200 mm × 5 mm的Q235低碳钢，具体成分见表1。试验前用机械打磨的方法去除基板表面氧化膜，再用无水乙醇擦拭干净备用。试验前焊枪导电嘴末端至基板的距离控制在10 mm，焊丝伸出长度9 mm。当振动平台稳定工作后，WAAM过程再开始进行。试验中保护气采用80%Ar+20%CO₂的混合气。薄壁件沉积层数为10层，长度为150 mm。振动参数为振动频率0~20 Hz和振幅0~0.7 mm，再利用振动信号采集设备进行校准确定。频率为10 Hz，振幅为0.4 mm的校准振动曲线（垂直方向）如图2所示。具体试验方案见表2。

1.3 测试方法

使用Origin软件对成形试样的截面轮廓进行提取和计算，分析振动对成形试样尺寸精度的影响。薄壁试样第一层中心设定为原点，构建方向设定为X轴，垂

表1 试验材料的化学成分

Table 1 Chemical compositions of the experiment materials

材料	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Cu	Fe	w _B /%
焊丝	0.007	1.54	0.92	0.011	0.011	0.006	0.023	0.126	其余	
基板	≤0.2	≤1.4	≤0.35	≤0.045	≤0.045	≤0.3	≤0.3	≤0.3	其余	

表2 试样编号和工艺参数

Table 2 Sample numbers and process parameters

编号	频率 /Hz	振幅 /mm	扫描速度 / (mm · s ⁻¹)	电流/A	电压/V	层间等待时间/s
1	0	0	8	160	24	50
2	10	0.4	8	160	24	50
3	15	0.1	8	160	24	50
4	15	0.4	8	160	24	50
5	15	0.7	8	160	24	50
6	20	0.4	8	160	24	50

直构建方向设定为Y轴，如此可以得到轮廓上不同位置的二维坐标。利用曲线的样本方差S²（式1）来表示试样的表面粗糙度^[17]。本试验采用Y轴的正数（试样左轮廓）和负数（试样右轮廓）同时进行计算分析，取方差数值大的作为试样表面粗糙度。

$$S^2 = \frac{\sum (X - \mu)^2}{N} \quad (1)$$

式中：X是Y轴的坐标值，μ是Y坐标的平均值，N是样本数量即所取点数个数。

使用BM-12A正置金相显微镜进行金相组织观察，

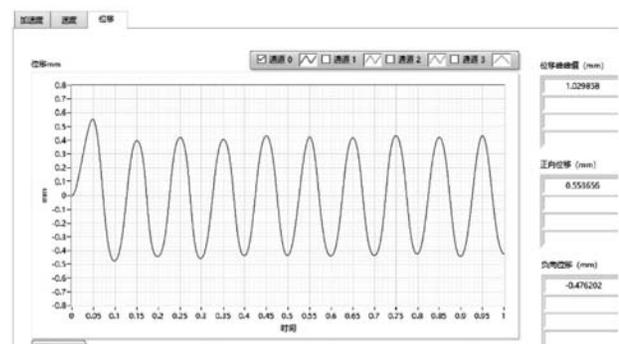


图2 基板振动曲线：振动频率为10 Hz，振幅为0.4 mm
Fig. 2 Vibration curve of the substrate with the vibration frequency of 10 Hz and the amplitude of 0.4 mm

用于组织观察的样件均取自于薄壁试样的左端，图1中虚线部分所示。试样腐蚀剂为硝酸酒精溶液（比例HNO₃：酒精=1：24），腐蚀时间约12 s。使用软件Image-Pro-Plus测量晶粒尺寸，如图3所示。

按照ASTM E8（E8M）-11标准进行拉伸试验，拉伸样件具体尺寸如图1中所示，并且记录极限抗拉强度（UTS）、屈服强度（YS）和断后伸长率。拉伸数据是两个样件在5 mm/min的加载速度下测得的平均值。

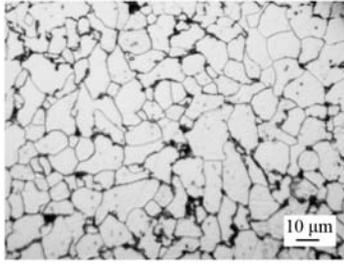


图3 利用Image-Pro-Plus绘制的晶界图
Fig. 3 Grain boundary map drawn by Image-Pro-Plus

2 结果与分析

2.1 振动对形貌的影响

图4为六组试样的宏观形貌。从图中可以看出，所有薄壁试样的外观形貌均良好，表面较平整，并无任何塌陷现象。进一步对试样截面轮廓进行分析计算，如图5所示，未振动试样的样本方差 S^2 为0.071，试样3（频率为15 Hz，振幅为0.1 mm）的样本方差 S^2 为0.05，略小于未振动试样，这可能和试样3的振幅较小有关；其他4组振动试验试样的样本方差均大于0.071，说明振幅较大时，振动在一定程度上使得试样的表面粗糙度增加。综上所述，在本试验的振动范围内，振动一定

程度上影响了成形试样的表面粗糙度，但均在可接受的范围。

2.2 振动对微观组织的影响

图6为振幅为0.4 mm时，不同振动频率下样件的金相组织。图7为相对应的晶粒尺寸统计图。从图6中可以看出，试样内部组织由细小的等轴晶粒组成，同时随机分布少量粗大的柱状晶。同时，由图6可以看出，随着频率从0增加到20 Hz，组织内细小晶粒（7 μm以下）也相应增加。根据图7a可得，未施加振动时，试样内部组织中5~6 μm的晶粒所占比例最高，为12.71%，7 μm以下的晶粒比例为48.31%。当振动频率为10 Hz，15 Hz和20 Hz时，试样内部组织中5~6 μm的晶粒所占比例分别占比为12.75%，13.98%和15.15%；且7 μm以下的晶粒所占比例分别为59.56%，55.37%和62.42%，细小晶粒相比未振动均有所提高。从图7b可以看出，随着频率从0增加到20 Hz，平均晶粒尺寸从7.60 μm减小到6.67 μm，下降了12%。由此可知，频率在0~20 Hz范围内，振动可细化晶粒。

图8为频率为15 Hz，不同振幅下的金相组织。图9为相对应的晶粒尺寸统计图。从图8中可以看出，试样内部组织由细小的等轴晶粒组成，同时随机分布少

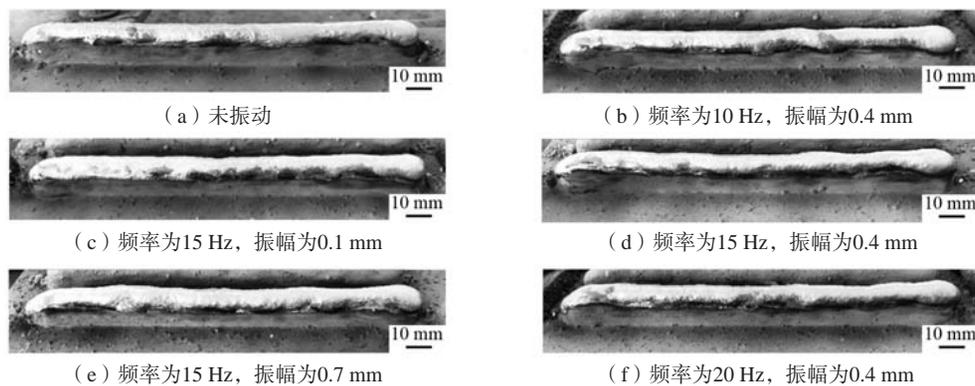


图4 试样宏观形貌

Fig. 4 The macroscopic morphologies of the samples

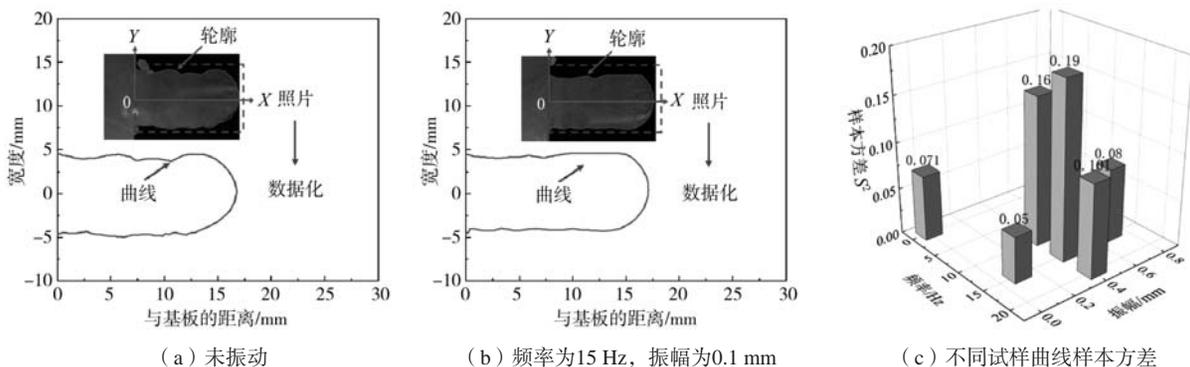


图5 薄壁试样表面形貌分析

Fig. 5 The surface morphology analysis of the thin-walled sample

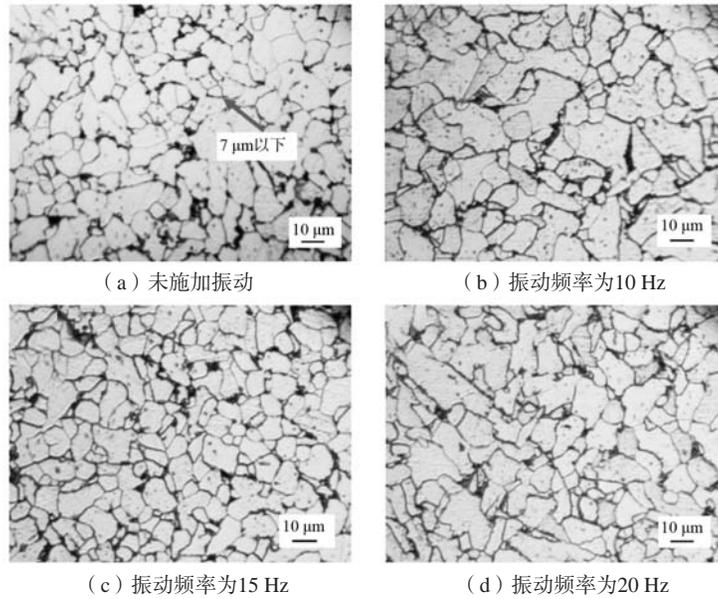


图6 不同振动频率下样件的金相组织

Fig. 6 Metallographic microstructures of the samples under different vibration frequencies

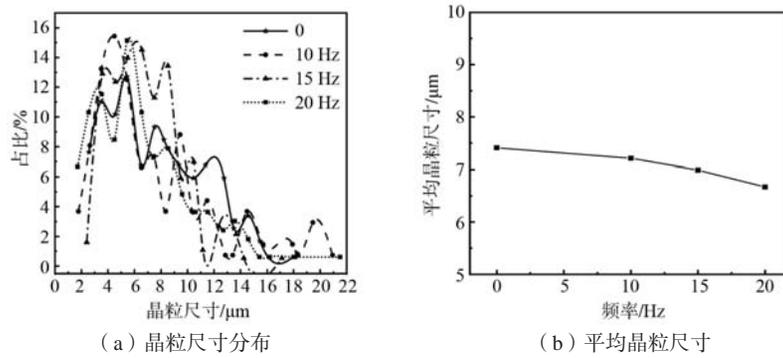


图7 不同振动频率下晶粒尺寸统计

Fig. 7 Grain size statistics s under different vibration frequencies

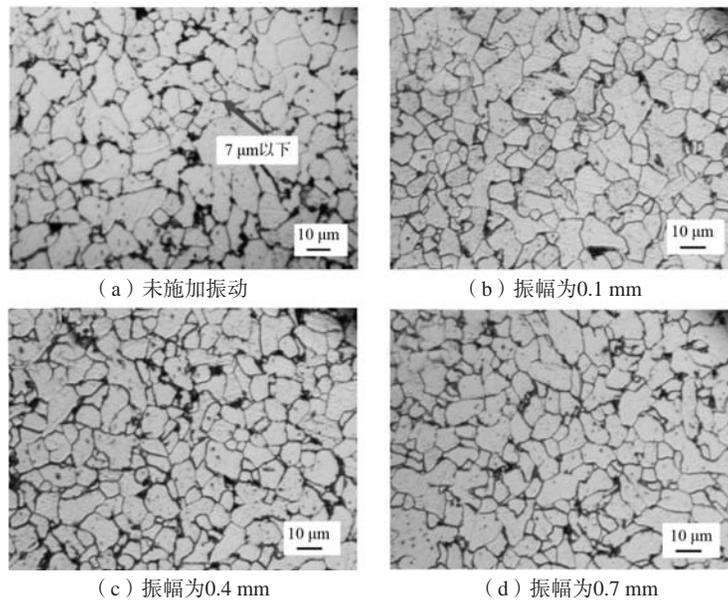


图8 不同振幅下样件的金相组织

Fig. 8 Metallographic microstructures of the samples under different amplitudes

量较大的柱状晶粒。同时,由图8可以看出,随着振幅从0增加到0.7 mm,组织内细小晶粒(7 μm以下)也相应增加。根据图9a可得,未施加振动时,试样内部组织中4~5 μm的晶粒所占比例为10.17%,7 μm以下的晶粒比例为48.31%。当振幅为0.1 mm,0.4 mm和0.7 mm时,试样内部组织中4~5 μm的晶粒所占比例分别为14.20%,12.37%和15.05%;且7 μm以下的晶粒所占比例分别为55.56%,55.37%和60.68%,细小晶粒相比无振动均有所提高。从图9b可以看出,随着振幅从0增加到0.7 mm,平均晶粒尺寸从7.60 μm减小到6.35 μm,下降了16%。

电弧增材制造过程中,熔池的凝固是杂质颗粒或熔池内壁作为非均质核的枝晶外延生长过程^[18]。Murty等^[19]和Kou等^[20]人的研究表明,晶粒细化是产生更多的晶核。试样内部组织的平均晶粒尺寸随着振动频率和振幅的增加而减小,同时细小晶粒所占比例增大。其机理可能是振动促进熔池内部搅拌,正在生长的枝晶在高温高压下破碎,并被随机分散至熔池内部形成新的成核点,从而增大形核率,细化了晶粒。

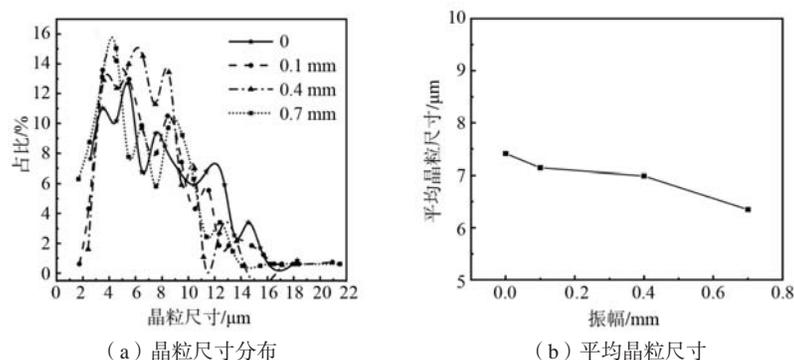
2.3 振动对力学性能的影响

图10为不同振动频率下振动对电弧增材制造试样的抗拉强度、屈服强度以及断后伸长率的影响。抗拉

强度随着频率的增加而增大。当频率为20 Hz时,试样的拉伸强度最大,抗拉强度和屈服强度分别为497.5 MPa和385 MPa,与未施加振动试样相比,抗拉强度增加了7.5 MPa,屈服强度增加了20 MPa。然而随着频率从0增加到20 Hz,伸长率先增大后减小。未施加振动试样(频率为0)的伸长率为29.87%;频率为10 Hz和15 Hz时,伸长率增加并达到最大,均为31.25%;但频率为20 Hz时,其伸长率细微下降29.12%,这可能和试样内部组织形态有关,铁素体和珠光体的含量有所改变,导致抗拉强度和屈服强度最大,但是断后伸长率有所下降。

图11为不同振幅下振动对电弧增材制造试样的抗拉强度、屈服强度以及断后伸长率的影响。抗拉强度随着振幅的增加先减小后增大,屈服强度随着振幅的增加而增大。未施加振动(振幅为0)时,抗拉强度和屈服强度分别为490 MPa和365 MPa;当振幅为0.7 mm时,最大抗拉强度和屈服强度达到峰值,分别为500 MPa和385 MPa。伸长率随着振幅的增加先增大后减小。当振幅为0.7 mm时,其伸长率为29.69%,较未振动试样有所下降,这可能由于更剧烈的振动,熔池更快的冷却形成较硬的相,导致其伸长率降低^[21]。

除冶金缺陷外,晶粒尺寸、沉淀强化相、高密度位错等微观结构也会阻碍位错运动和晶面滑移,这是

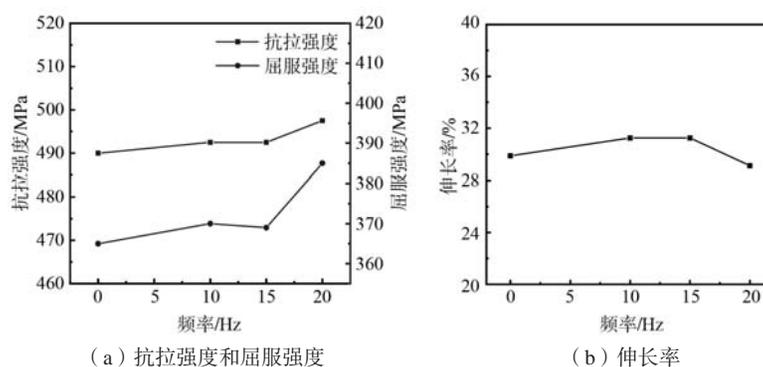


(a) 晶粒尺寸分布

(b) 平均晶粒尺寸

图9 不同振幅下晶粒尺寸统计

Fig. 9 Grain size statistics under different amplitudes



(a) 抗拉强度和屈服强度

(b) 伸长率

图10 不同振动频率下试样的拉伸性能

Fig. 10 Tensile properties of the specimens under different frequencies

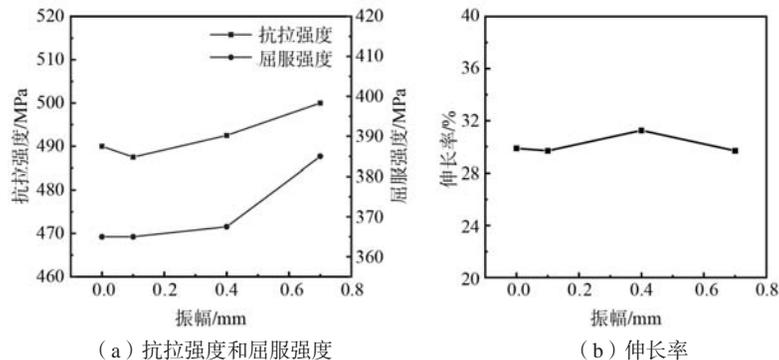


图11 不同振幅下试样的拉伸性能

Fig. 11 Tensile properties of the samples under different amplitudes

提高金属力学性能的决定性因素^[16]。对微观组织的观察分析表明,施加机械振动后微观结构变化最明显的是晶粒尺寸变小,细小晶粒的比例增大。拉伸强度的增加主要归因于这个因素。

3 结论

(1) 机械振动细化了电弧增材制造低碳钢组织晶粒。与未施加振动试样相比,随着频率从0增加到20 Hz,平均晶粒尺寸从7.60 μm 降至6.67 μm ,下降了12%;随着振幅从0增加到0.7 mm,平均晶粒尺寸从7.60 μm 减小到6.35 μm ,下降了16%。

(2) 机械振动引起熔池搅动,使正在生长的枝晶破碎,增大了形核率,使得细小晶粒的比例增加。当振动频率为0 Hz, 10 Hz, 15 Hz和20 Hz时,试样内部组织5~6 μm 的晶粒所占比例分别占比为12.71%, 12.75%, 13.98%和15.15%;且7 μm 以下的晶粒所占比

例分别为48.31%, 59.56%, 55.37%和62.42%。当振幅为0, 0.1 mm, 0.4 mm和0.7 mm时,试样内部组织4~5 μm 的晶粒所占比例分别为10.17%, 14.20%, 12.37%和15.05%;7 μm 以下的晶粒所占比例分别为48.31%, 55.56%, 55.37%和60.68%。

(3) 通过施加合适的机械振动,可以使得电弧增材制造低碳钢的力学性能得到提升。未施加振动时,试样抗拉强度和屈服强度分别为490 MPa和365 MPa,断后伸长率为29.87%;当施加的振动频率为15 Hz,振幅为0.4 mm时,试样抗拉强度、屈服强度和断后伸长率均有提高,分别为492.5 MPa、367.5 MPa和31.25%;当振动频率为15 Hz,振幅为0.7 mm时,试样拉伸强度最高,抗拉强度和屈服强度分别达到了500 MPa和385 MPa;当振动频率为10 Hz和15 Hz,振幅为0.4 mm时,试样断后伸长率最高,为31.25%。

参考文献:

- [1] TANG S Y, YANG L, FAN Z Y, et al. A review of additive manufacturing technology and its application to foundry in China [J]. China Foundry, 2021, 18 (4): 249-264.
- [2] SHEN C, PAN Z X, CUIURI D, et al. Fabrication of Fe-FeAl functionally graded material using the wire-arc additive manufacturing process [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, Process Metallurgy and Materials Processing Science, 2015, 47 (1): 763-772.
- [3] FANG X W, ZHANG L J, LI H, et al. Microstructure evolution and mechanical behavior of 2219 aluminum alloys additively fabricated by the cold metal transfer process [J]. Materials, 2018, 11 (5): 812.
- [4] DONOGHUE J, ANTONYSAMY A A, MARTINA F, et al. The effectiveness of combining rolling deformation with wire-arc additive manufacture on β -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V [J]. Materials Characterization, 2016, 114: 103-114.
- [5] 薛松海, 李重阳, 李雪辰, 等. 热处理工艺对铸造/激光增材制造复合制备Ti-6Al-4V合金组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2021, 70 (7): 800-805.
- [6] DEREKAR K S. A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium [J]. Materials Science and Technology, 2018, 34 (8): 895-916.
- [7] 左春林, 董选普, 林少凯. 基于增材制造工艺的机械臂三轴座V法成形 [J]. 铸造, 2020, 69 (2): 191-195.
- [8] 刘金城. 金属增材制造——创新的3D制造 [J]. 铸造, 2020, 69 (4): 437-438.
- [9] 方学伟, 白浩, 姚云飞, 等. 冷金属过渡电弧增材制造多道搭接工艺研究 [J]. 机械工程学报, 2020, 56 (1): 141-147.
- [10] 陈伟, 陈玉华, 温涛涛, 等. 超声振动对电弧增材制造铝青铜合金组织和拉伸性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2020, 30 (10):

2280–2294.

- [11] 张骥俊, 邢彦锋, 曹菊勇. 超声振动对CMT电弧增材制造铝合金组织与性能的影响 [J]. 金属热处理, 2022, 47 (4): 159–164.
- [12] LU Q H, CHEN L G, NI C Z. Effect of vibratory weld conditioning on welded valve properties [J]. *Mechanics of Materials*, 2008, 40 (7): 565–574.
- [13] REN X H, LU Q H, ZHANG P L, et al. Effect of vibration frequency on laser filler wire welded joints [J]. *Steel research international*, 2020, 91 (4): 1900550.
- [14] OU Y L, LU Q H, LI C G, et al. Effect of vibration frequency on microstructure and properties of laser-welded inconel 718 nickel-base superalloy [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, 30 (4): 2399–2407.
- [15] MA C, LI C L, YAN Y H, et al. Investigation of in situ vibration during wire and arc additive manufacturing [J]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2021.
- [16] ZHANG C, GAO M, ZENG X Y. Workpiece vibration augmented wire arc additive manufacturing of high strength aluminum alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 271: 85–92.
- [17] TEWARI S P. Influence of longitudinal oscillation on tensile properties of medium carbon steel welds of different thickness [J]. *Thammasat International Journal of Science and Technology*, 2009, 14 (4): 17–27.
- [18] 肖文甲, 许宇翔, 宋立军. 面向增材制造的熔池凝固组织演变的相场研究 [J]. 力学学报, 2021, 53 (12): 3252–3262.
- [19] MURTY B S, KORI S A, CHAKRABORTY M. Grain refinement of aluminium and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying [J]. *International Materials Reviews*, 2002, 47 (1): 3–29.
- [20] SINDO K. *Welding Metallurgy* [M]. Wiley, 2002.
- [21] HUAN P C, WANG X N, ZHANG Q Y, et al. Study on droplet transition behavior, bead geometric characteristics and formability of wire + arc additively manufactured Inconel 718 alloy by using CMT MIX+ synchropulse process [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 17: 1831–1841.

Effect of Low Frequency Mechanical Vibration on Microstructure and Mechanical Properties of Mild Steel Produced by Wire Arc Additive Manufacturing

BAO Peng-fei, YI Bo, SHI Xue-zhi

(College of Marine Engineering Equipment, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, Zhejiang, China)

Abstract:

Due to its high deposition efficiency and low production cost, wire arc additive manufacturing (WAAM) has received extensive attention in the fabrication of large-scale metal parts. The effects of low-frequency mechanical vibration on the microstructure and mechanical properties of low-carbon steel thin-walled parts fabricated by WAAM were studied. The results showed that the mechanical vibration in the frequency range of 0–20 Hz and amplitude of 0–0.7 mm refined the grain size and improved the tensile strength of the low-carbon steel fabricated by WAAM. As the frequency increased from 0 to 20 Hz, the average grain size decreased from 7.60 μm to 6.67 μm , which decreased by 12%, and its tensile strength and yield strength increased to 497.5 MPa and 385 MPa, respectively; as the amplitude increased from 0 to 0.7 mm, the average grain size decreased from 7.60 μm to 6.35 μm , which decreased by 16%, and its tensile strength and yield strength increased to 500 MPa and 385 MPa, respectively. Using low-cost mechanical vibration-assisted WAAM can optimize the microstructure and properties of the low-carbon steel, which provides a reference for high-performance additive manufacturing.

Key words:

mechanical vibration; wire arc additive manufacturing; mild steel; microstructure; mechanical properties