

# 碳钢旁路热丝 PAW 增材制造成形及组织和性能调控

苗玉刚<sup>1</sup>, 李春旺<sup>1</sup>, 邵丹丹<sup>2</sup>, 赵羽扬<sup>1</sup>, 魏超<sup>1</sup>, 张本顺<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工程大学, 水下机器人技术国家级重点实验室, 哈尔滨, 150001; 2. 中船黄埔文冲船舶有限公司, 广州, 511462;  
3. 江苏自动化研究所, 连云港, 222006)

**摘要:** 为了解决电弧增材制造过程中电弧热输入过大导致成形较差、晶粒粗大等问题, 以 H08Mn2Si 碳钢为增材材料, 进行了旁路热丝等离子弧 (PAW) 增材制造成形及组织优化。首先在单层单道沉积试验中, 研究了主/旁路电流比对熔敷成形和热输入的影响; 然后进行多层单道沉积试验, 分析了不同层间温度下碳钢的成形、微观组织以及硬度; 最后对成形良好的增材样件进行了拉伸性能测试。结果表明, 当主/旁路电流比较小时, 可以获得表面均匀光滑的熔覆层、母材稀释率可减小至 10%; 当控制层间温度为较低的温度 100 °C 时, 增材成形表面质量较好, 试样中间稳定区域处的微观组织晶粒尺寸细小, 珠光体占比增加, 平均硬度最高可达到 294 HV; 拉伸试验表明其强度性能以及塑性性能在各方向上均匀一致, 断裂形式为韧性断裂。

**创新点:** (1) 通过调节主/旁路电流比可以调控单层的熔敷成形和对母材的热输入。

(2) 控制较低的层间温度可以获得具有细小晶粒尺寸、珠光体含量更多的微观组织。

(3) 旁路热丝 PAW 增材制造工艺获得的碳钢试样的强度和塑性性能各方向均匀一致。

**关键词:** 旁路热丝; 等离子弧焊; 增材制造; 热输入; 显微组织

**中图分类号:** TG 456.2      **文献标识码:** A      **doi:** 10.12073/j.hjxb.20220109001

## 0 序言

与传统的“减法”制造相比, 增材制造技术是一种通过逐层累加来实现成形的制造技术, 具有生产周期短、成本低、能够制造复杂零件等优点<sup>[1]</sup>。根据成形热源的不同, 增材制造可以分为 3 类: 激光增材制造、电子束增材制造和电弧增材制造<sup>[2-4]</sup>。与激光和电子束相比, 以电弧为热源的电弧增材制造技术在大型金属试样的制造方面因其较高的沉积率、材料使用率以及较低的成本而吸引了国内外广泛研究学者的关注<sup>[5-6]</sup>。但在电弧增材制造过程中由于电弧加热范围过大, 热积累效应随着零件堆积而不断累积, 使其几何精度、力学性能和微观结构演变难以得到控制<sup>[7-9]</sup>。

为了减小电弧增材制造的热积累效应, 改善成形质量, 一些研究学者开展了大量的研究工作。Wu 等人<sup>[10]</sup>采用二氧化碳强制冷却的方式控制层

间温度和热循环, 使得增材制造的 Ti-6Al-4V 具有更加精细的微观结构和改进的机械性能; Xu 等人<sup>[11]</sup>在等离子弧焊 (plasma arc welding, PAW) 电弧增材制造技术的基础上, 采用层间冷轧以在 INCONEL 718 镍基合金沉积过程中进行热机械加工, 结果表明采用冷轧工艺后, IN718 的晶粒得到细化、强度得到提高, 材料各向异性消失; 柏久阳<sup>[12]</sup>利用钨极惰性气体保护焊 (gas tungsten arc welding, GTAW) 增材制造技术堆积成形 2219 铝合金, 通过层间温度控制和递减热输入策略, 有效控制了热积累效应。这些方法通过不同的方式在一定程度上解决了电弧热输入过大导致晶粒粗大的问题, 但部分设备成本高、操作复杂, 使得电弧增材制造技术难以广泛推广。

采用旁路热丝等离子弧增材制造方法, 用以减小电弧热输入改善增材质量。其由焊接中的旁路分流技术发展而来, 基本原理是通过旁路焊丝分流部分流向母材的电流, 不仅能起到减小母材热输入的作用, 还能提高焊丝的熔化效率。因此文中以 Q235 低碳钢为基板, 采用 H08Mn2Si 焊丝进行旁路热丝等离子弧增材试验, 探究旁路分流变化对单层单道焊缝成形的影响, 同时探究了层间温度对单

道多层薄壁结构成形、组织以及力学性能的影响。

1 试验方法

试验材料选用 200 mm × 40 mm × 5 mm 的 Q235 低碳钢作为母材, 填充金属选用直径为 1.2 mm 的 H08Mn2Si 焊丝, 母材和焊丝的化学成分见表 1。试验采用 Thermal Arc WC-100B 等离子弧焊机、Transmig 550i 电源、绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 控制系统等设备进行 H08Mn2Si 碳钢增材制造。图 1 为旁路热丝等离子弧焊原理图。在试验过程中, 等离子弧焊接电源流出的焊接总电流  $I$  分为两部分,

一部分电流  $I_m$  流经等离子焊枪流向母材构成主路, 一部分电流  $I_p$  流经旁路焊丝流回等离子弧焊接电源构成旁路。IGBT 控制系统通过调节电阻值改变旁路电流大小, 实现主旁路电流可调, 在减小母材热输入的同时利用旁路电流对焊丝进行预热, 增加焊丝熔化效率, 提高焊缝的熔覆率, 进而增加增材的效率, 同时焊接参数可独立调节, 通过调节主/旁路电流降低母材的熔合比, 实现高熔丝效率和理想熔滴过渡模式, 焊缝成形精度高, 可控性好。由于旁路等离子流的存在, 作用在熔滴及熔池上的热输入与力场发生改变, 从而使增材过程稳定, 减少缺陷的产生几率, 保证焊缝成形质量, 并提高增材质量。

表 1 母材和焊丝的化学成分 (质量分数, %)  
Table 1 Chemical composition of base material and wire

材料	C	Si	S	Mn	P	Cr	Ni	Cu	Fe
Q235	0.18	0.21	0.030	0.61	0.002	—	—	—	余量
H08Mn2Si	0.11	0.65	0.035	1.7	0.035	0.20	0.30	0.20	余量

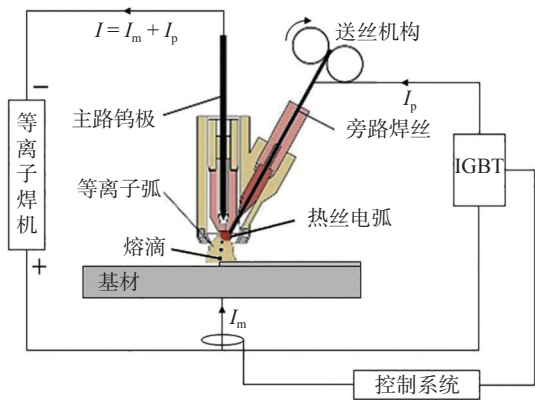


图 1 旁路热丝等离子弧焊原理  
Fig. 1 Schematic diagrams of bypass hot wire plasma process

单层单道熔覆成形的好坏决定电弧增材制造试样最终的成形精度和质量, 为此在增材试验前有

必要进行单层单道熔覆试验, 分析不同工艺参数对成形的影响规律, 以获得成形良好、性能优良的工艺参数, 并分析了旁路电流对熔敷成形的影响。试验优化后的工艺参数如表 2 所示。在 Q235 低碳钢基板上进行不同层间温度的单道多层薄壁试件增材试验, 分析了沉积碳钢的微观结构、硬度和力学性能。

金相试样按照标准程序进行安装、研磨和抛光, 然后在 4% 的硝酸酒精溶液中进行蚀刻。试样的宏观结构和微观结构分别用深场立体显微镜 (OLYPUS-SZX12) 和光学显微镜 (OM, VHX-1000E) 观察。利用 HXD-1000TM 型硬度计来测量维氏硬度, 加载载荷为 0.98 N, 加载时间为 15 s。拉伸试验是使用 Zwick/Roell Z010 型试验机, 在室温下以 0.5 mm/min 的恒定十字头位移速率进行。

表 2 旁路热丝等离子弧增材制造工艺参数  
Table 2 Processing parameters for BC-PAW process

主路电流 $I_m/A$	旁路电流 $I_p/A$	送丝速度 $v_1/(m \cdot min^{-1})$	行走速度 $v_2/(m \cdot min^{-1})$	等离子气流量 $q_1/(L \cdot min^{-1})$	等离子焊枪保护气流 $q_2/(L \cdot min^{-1})$	喷嘴到工件距离 $h/mm$	钨极内缩量 $s/mm$
107	100	3	0.36	0.5	15	6	2.36

2 试验结果

2.1 主/旁路电流比对熔敷成形及热输入的影响

保证总电流为 207 A 不变, 改变主旁路电流比探究其对熔敷成形的影响, 图 2 为不同主旁路电流

比时典型的熔敷表面成形及横截面形貌。从图 2 可以看出, 随着主/旁路电流比的增加, 焊缝的外观从均匀光滑的表面转变为间距较大的波纹表面, 并且母材的稀释率逐渐增加。众所周知, 熔敷成形与熔滴过渡过程密切相关, 而通过改变主/旁路电流比可

以改变熔滴过渡过程. 旁路电流可以提高焊丝熔化的效率, 减少了熔滴表面张力的阻碍, 使熔滴容易处于等离子弧的中心, 并且适当的等离子弧电流可以产生一定强度的等离子流力, 使熔滴过渡频率加快. 当主旁路电流比为 1.07, 旁路电流很大为 100 A 时, 熔滴过渡频率很快, 刚与基板接触便立即铺展形成了桥接过渡, 从截面形貌中母材较低的稀释率可以看出此时对母材热输入很小. 旁路电流 80 A 是液滴转移方式从桥接过渡到滴状自由过渡的转折点, 熔滴过渡频率逐渐减慢, 熔覆层由光滑表面转向鱼鳞纹表面, 并随着旁路电流的减小, 熔覆层表面的波纹间距也不断增大, 母材稀释率不断增加.

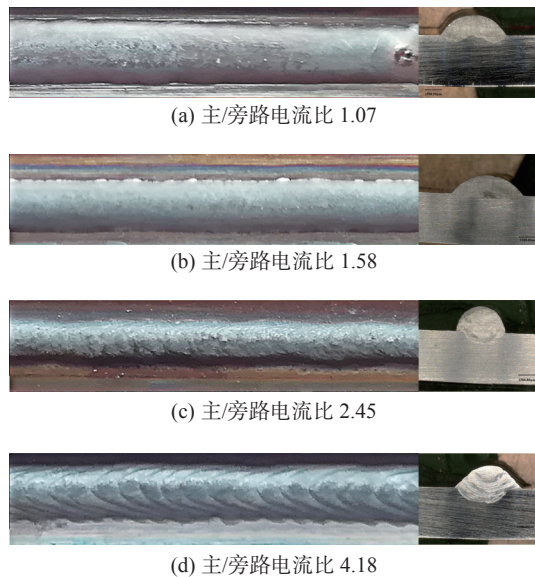


图2 主/旁路电流比变化时熔敷成形及横截面形貌  
Fig. 2 Bead appearance and section at different main/bypass current ratio. (a) main/bypass current ratio 1.07; (b) main/bypass current ratio 1.58; (c) main/bypass current ratio 2.45; (d) main/bypass current ratio 4.18

为了定量描述主/旁路电流比对母材热输入的影响, 计算了总电流不变、旁路电流由 10 A 逐渐增加到 100 A, 步增量为 10 A 时, 横截面积中母材熔化量以及焊丝熔化量所占的比例, 如图 3 所示. 随着主/旁路电流比的增加, 焊丝熔化比率逐渐下降, 而母材的熔化比率逐渐增加, 最后焊丝和母材的熔化比率逐渐趋于平稳. 由此可见, 当主/旁路电流比较小时, 有助于减小对母材的热输入, 对母材的稀释率最低可达到 10%. 通过调控主/旁路电流比, 可以实现对熔敷层表面成形和母材热输入的精确控制.

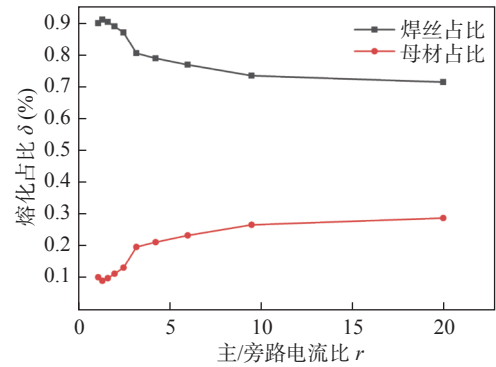


图3 主/旁路电流比对焊丝和母材熔化效率的影响规律  
Fig. 3 Effect of main/bypass current ratio on welding efficiency of welding wire and base metal

## 2.2 层间温度对多层单道增材组织成形影响

在碳钢旁路热丝等离子弧多层单道增材过程中, 层间温度的变化会影响增材成形质量, 图 4 为不同层间温度增材成形的宏观形貌. 层间温度会影响熔池的冷却速度进而影响熔池的形态. 当采用主路电流 107 A、旁路电流 100 A 时, 随着层间温度的升高, 熔池冷却速度变慢, 从而导致熔池铺展性增加, 平均层宽由 4.54 mm 增加到 5.30 mm, 平均层高由 1.37 mm 减小到 1.15 mm. 层间温度 100 和 150 °C 时, 熔池稳定性较好, 增材过程稳定、成形良好, 无坍塌现象, 共堆积 24 层; 层间温度为 200 和 250 °C 时, 熔池稳定性变差出现熔池坍塌现象, 成形较差, 共堆积 12 层.

## 2.3 显微组织特征对比分析

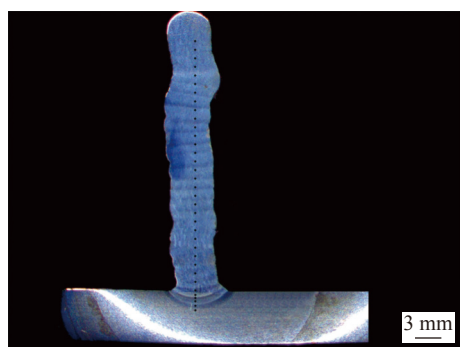
由于每个墙壁结构中上、中、下部位的组织结构不尽相同, 为了便于分析层间温度对其显微组织的影响规律, 4 组的显微组织图片均是从试样组织稳定区域的中间位置拍摄, 图 5 为不同层间温度下试样的显微组织. 从图 5 可以看出, 4 组试样的显微组织均由呈白色的块状铁素体和呈暗灰色的珠光体组成, 珠光体呈带状分布在铁素体晶界上. 不同的是, 层间温度由 250 °C 降低到 100 °C 的过程中, 铁素体晶粒尺寸有明显减小的趋势, 并且珠光体含量占比不断增加.

根据以往的研究, 增材制造试样的微观组织结构往往由熔池的冷却速率决定<sup>[13]</sup>. 随着层间冷却温度的减小, 熔池的冷却速度得以增加, 过冷度也变大, 铁素体晶体的形核率和长大速度因此也随着增加. 但此时晶体形核率增加大于成长率, 因此晶体尺寸会变得细小. 同时随着冷却速度的增加, 意味

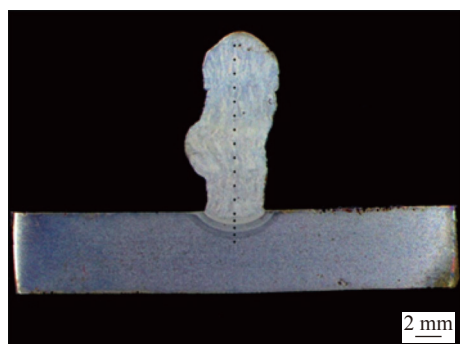




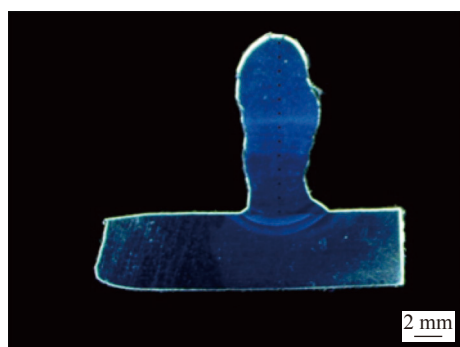
(a) 层间温度 100 °C



(b) 层间温度 150 °C



(c) 层间温度 200 °C

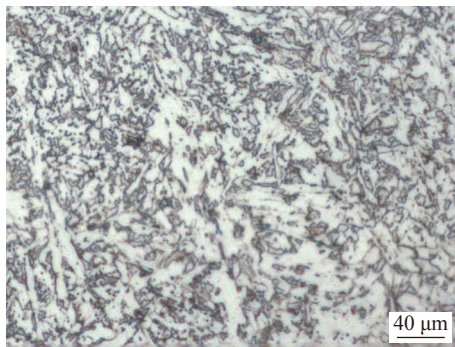


(d) 层间温度 250 °C

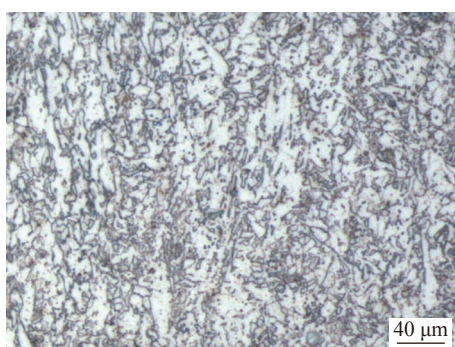
图 4 不同层间温度增材成形宏观截面形貌

Fig. 4 Additive forming macroscopic section morphology of different interlayer temperatures. (a) interlayer temperature 100 °C; (b) interlayer temperature 150 °C; (c) interlayer temperature 200 °C; (d) interlayer temperature 250 °C

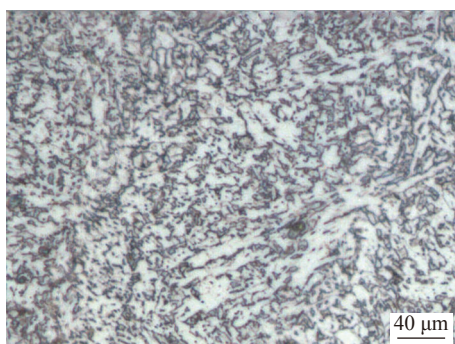
着熔池在高温保持时间减小,使得奥氏体的均匀化程度也随着降低,这为珠光体的形核和长大提供了



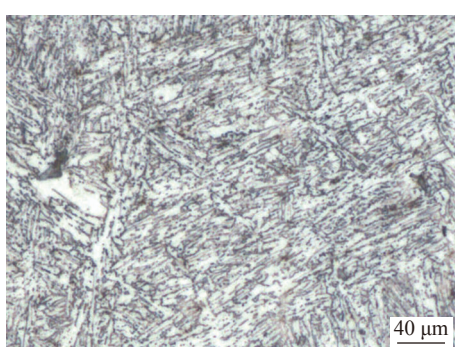
(a) 层间温度 250 °C



(b) 层间温度 200 °C



(c) 层间温度 150 °C



(d) 层间温度 100 °C

图 5 不同层间温度下熔覆层的显微组织

Fig. 5 Microstructure of cladding layer at different interlayer temperatures. (a) interlayer temperature 250 °C; (b) interlayer temperature 200 °C; (c) interlayer temperature 150 °C; (d) interlayer temperature 100 °C

有利的条件,随着冷却过程的推进,奥氏体转变成珠光体的含量不断增多。

## 2.4 层间温度对硬度的影响

与显微组织观测相同,在增材组织稳定区域的中间部位选取了若干的硬度测试点,图6为不同层间温度下试样中间段平均硬度变化趋势。可以看出熔覆层平均硬度随着层间温度增加而减小,这是由晶粒尺寸和珠光体含量所决定的。由不同层间温度的显微组织的对比分析中可知,当层间温度较小时,其具有较小的晶粒尺寸,并且珠光体含量较高,而细小的晶粒尺寸具有较大的对位错运动的阻碍力,同时珠光体又是强韧性相,两者均能够提高材料的硬度等力学性能。因此控制层间温度 100 °C,可以保证增材成形精度的同时,提高硬度等力学性能。

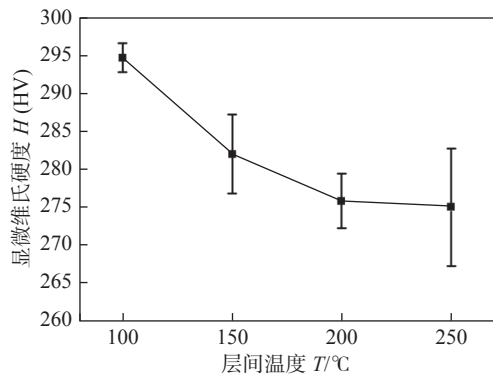


图6 不同层间温度下中间段的显微硬度

Fig. 6 Microhardness of the intermediate section at different interlayer temperatures

## 2.5 增材制造试样的拉伸性能

为了进一步评定新工艺增材制造的力学性能,针对控制层间温度为 100 °C 的试样进行拉伸性能测试。在增材制造试样上横向和纵向各取 3 个拉伸试样,测其平均抗拉强度、断面收缩率以及断后延伸率,如表3所示。从表3可以看出,试样的抗拉强度及断后伸长率各方向上基本一致,由此可以认为材料强度以及塑韧性在各方向上均匀一致,无各向异性。

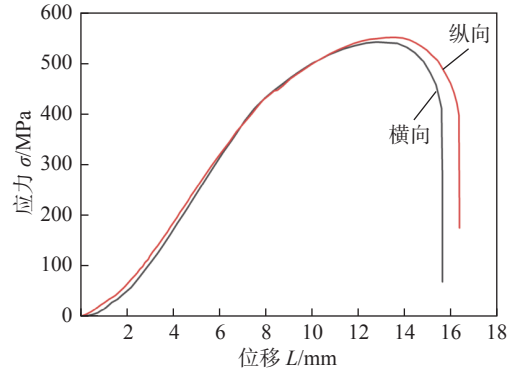
表3 力学性能计算结果

Table 3 Mechanical property calculation result

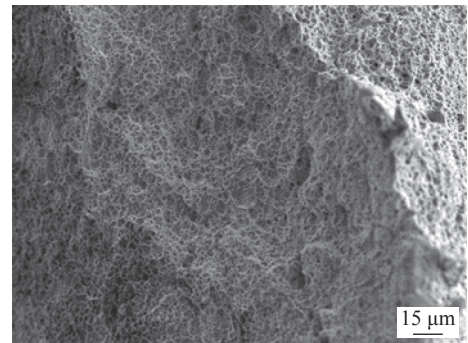
位置	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	断面收缩率 $Z(\%)$	断后伸长率 $A(\%)$
纵向	528.67±14	41.3±2.4	14.6±1.8
横向	522.43±17	38.5±2.1	13.5±2.5

图7为层间温度 100 °C 时试样的拉伸曲线和断口形貌。从图7可以看出,试样的横向和纵向的断口形貌较为相似,一些大小基本相同的等轴韧窝

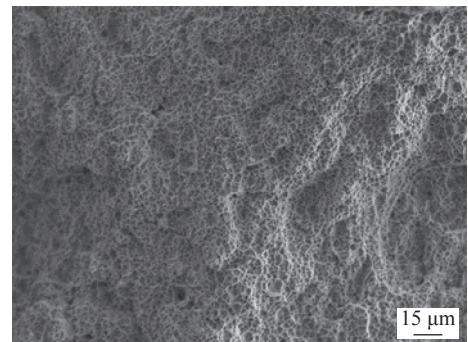
呈均匀分布,这表明增材制造试样的塑性均匀。断裂是由于在外力的作用下第二相质点与基体的脱开,由最初形成的孔隙不断相互连接,导致试件的最最终断裂。



(a) 拉伸应力-位移曲线



(b) 纵向试样



(c) 横向试样

图7 拉伸试验结果

Fig. 7 Tensile experiment results. (a) stretch stress-displacement curve; (b) longitudinal specimen; (c) transverse specimen

## 3 结论

(1) 在旁路热丝等离子弧进行碳钢单道单层熔敷试验中,通过调节主/旁路电流比可以调控单层的熔敷成形和对母材的热输入。当主/旁路电流比较小,旁路电流为 100 A 时,可以获得均匀光滑的熔敷表面,并且能够降低对母材热输入,有助于改善

增材制造成形精度。

(2) 采用旁路热丝等离子弧进行单道多层增材制造过程中, 层间温度对增材试样的成形、微观组织以及硬度有很大影响。当层间温度为 100 °C 时, 增材成形过程稳定, 无熔池塌陷现象, 增材试样中间稳定区域处的微观组织晶粒尺寸更加细小, 并且珠光体含量更多, 导致其硬度也随之增加, 平均硬度最高可达到 294 HV。

(3) 拉伸试验表明, 层间温度为 100 °C 时试样的抗拉强度、断后伸长率等在纵向和横向上相近, 无明显的各向异性, 证明新工艺制造的试样的强度以及塑韧性在各方向上均匀一致。

## 参考文献

- [1] 卢秉恒. 增材制造技术——现状与未来 [J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 19–23.  
Lu Bingheng. Additive manufacturing—Current situation and future [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(1): 19–23.
- [2] Leung C L A, Marussi S, Towrie M, *et al.* The effect of powder oxidation on defect formation in laser additive manufacturing [J]. Acta Materialia, 2019, 166: 294–305.
- [3] Osipovich K S, Astafurova E G, Chumaevskii A V, *et al.* Gradient transition zone structure in “steel–copper” sample produced by double wire-feed electron beam additive manufacturing [J]. Journal of Materials Science, 2020, 55(22): 9258–9272.
- [4] Rodrigues T A, Duarte V, Miranda R M, *et al.* Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM) [J]. Materials, 2019, 12(7): 1121.
- [5] Liu J, Xu Y, Ge Y, *et al.* Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 111(1-2): 1–50.
- [6] 耿海滨, 熊江涛, 黄丹, 等. 丝材电弧增材制造技术研究现状与趋势 [J]. 焊接, 2015(11): 17–21.  
Geng Haibin, Xiong Jiangtao, Huang Dan, *et al.* Research status and trends of wire and arc additive manufacturing technology [J]. Welding Joining, 2015(11): 17–21.
- [7] Rodrigues T A, Duarte V, Avila J A, *et al.* Wire and arc additive manufacturing of HSLA steel: Effect of thermal cycles on microstructure and mechanical properties [J]. Additive Manufacturing, 2019, 27: 440–450.
- [8] 冯曰海, 汤荣华, 刘思余, 等. 308L 不锈钢热丝等离子弧增材构件组织和性能 [J]. 焊接学报, 2021, 42(5): 77–83.  
Feng Yuehai, Tang Ronghua, Liu Siyu, *et al.* Microstructures and mechanical properties of stainless steel component deposited with 308L wire by hot wire plasma arc additive manufacturing process [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(5): 77–83.
- [9] Zhao Pengkang, Fang Kui, Tang Cheng, *et al.* Effect of interlayer cooling time on the temperature field of 5356-TIG wire arc additive manufacturing [J]. China Welding, 2021, 30(2): 17–24.
- [10] Wu B, Pan Z, Ding D, *et al.* The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 258: 97–105.
- [11] Xu X, Gangul S, Ding J, *et al.* Enhancing mechanical properties of wire + arc additively manufactured INCONEL 718 superalloy through in-process thermomechanical processing [J]. Materials & Design, 2018, 160: 1042–1051.
- [12] 柏久阳. 2219 铝合金 GTA 增材制造及其热处理过程的组织演变 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.  
Bo Jiuyang. Microstructure evolution of 2219-Al during GTA based additive manufacturing and heat treatment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [13] 苗玉刚, 李春旺, 张鹏, 等. 不锈钢旁路热丝等离子弧增材制造接头特性分析 [J]. 焊接学报, 2018, 39(6): 35–38.  
Miao Yugang, Li Chunwang, Zhang Peng, *et al.* Joint characteristics of stainless steel bypass-current wireheating PAW on additive manufacturing [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(6): 35–38.

第一作者: 苗玉刚, 博士, 副教授, 博士研究生导师; 主要从事特种焊接技术与增材制造方面的教学与科研工作; Email: miaoyg@hrbeu.edu.cn.

(编辑: 郑红)