

# 等离子弧增材低碳贝氏体钢组织与性能分析

周凡<sup>1</sup>, 顾介仁<sup>1,2</sup>, 王克鸿<sup>1</sup>, 柴权赢<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学, 受控电弧智能增材技术工信部重点实验室, 南京, 210094; 2. 北京北方车辆集团有限公司, 北京, 100072)

**摘要:** 采用等离子弧增材工艺制备了成形良好的贝氏体钢构件, 研究了其力学性能和微观组织. 结果表明, 增材构件的微观组织主要由板条状贝氏体、粒状贝氏体和少量奥氏体组成. 增材构件组织和力学性能存在局部差异: 顶部组织晶粒比较粗大, 主要由板条状贝氏体和奥氏体组成, 显微硬度平均值约为 365 HV; 底部区域组织晶粒比较细小, 多为粒状贝氏体, 显微硬度平均值约为 384 HV; 构件整体平均冲击韧性为 145 J/cm<sup>2</sup>, 平均拉伸强度和断后伸长率分别可以达到 955 MPa 和 11.7%, 其中  $x$  方向的拉伸强度为 945 MPa, 略小于  $y$  方向的抗拉强度 (963 MPa) 和  $z$  方向的抗拉强度 (958 MPa), 说明构件抗拉强度不存在明显的各向异性, 断口为韧性断裂.

**创新点:** (1) 利用贝氏体钢药芯焊丝等离子弧增材复杂结构件.  
(2) 分析十字交叉路径下的构件微观组织和力学性能.  
(3) 阐明等离子弧增材贝氏体钢相较于其它电弧增材优缺点.

**关键词:** 低碳贝氏体钢; 等离子弧增材; 板条状贝氏体; 组织性能

**中图分类号:** TG 457.11

**文献标识码:** A

**doi:** 10.12073/j.hjxb.20220622003

## 0 序言

低碳贝氏体钢是一种高强度、高韧性、多用途的新型钢种, 由于其力学性能优秀、成本低, 广泛应用于国内各类工程机械、煤矿液压支架、舟桥, 桥梁、海洋平台等焊接结构钢领域<sup>[1-4]</sup>.

近年来, 随着各领域对金属材料性能要求和复杂结构需求的提高, 利用增材制造技术直接成形性能优良的金属复杂构件成为当下最为前沿和最具应用前景的研究方向之一<sup>[5-7]</sup>. Jiang 等人<sup>[8]</sup> 采用了激光沉积技术制备了无碳化物贝氏体钢构件, 对构件进行了微观组织观察和性能分析. 结果表明, 未热处理状态下主要组织为珠光体和奥氏体, 抗拉强度和断后伸长率分别能达到 1 051 MPa 和 13.03%. 符友恒等人<sup>[9]</sup> 采用熔化极电弧增材出贝氏体钢样件, 并进行热处理. 结果表明, 未热处理增材样件晶粒粗大, 塑性和韧性均差, 存在各向异性, 热处理后晶粒细小, 塑、韧性均有提升. Xie 等人<sup>[10]</sup> 对低碳贝氏体钢进行了激光-MAG 复合焊接. 结果表明, 焊

缝区域微观结构主要是板条贝氏体 (LB)、少量粒状贝氏体 (GB) 和马氏体-奥氏体 (M-A) 组元成分. Kumar 等人<sup>[11]</sup> 研究出焊接热输入对贝氏体钢组织生成的影响. 结果表明, 在较高的热输入下, 组织则由粒状贝氏体和贝氏体铁素体组成.

目前贝氏体钢增材以熔化极电弧和激光增材为主, 而对等离子增材低碳贝氏体钢的研究较少. 文中拟采用等离子方式增材贝氏体构件, 并对等离子增材贝氏体钢件的微观组织和力学性能特征展开深入研究, 发展复杂贝氏体构件的增材制造成形技术具有重要意义.

## 1 试验方法

试验采用等离子弧焊机作为热源, 成形设备为日本安川 (YASKAWA) 机器人、米加尼克等离子焊机, 使用尺寸为 400 mm × 250 mm × 18 mm 的贝氏体钢作为增材制造基板, 用直径为 1.2 mm 的 ER80YM 贝氏体钢焊丝作为丝材. 研究所采用丝材和基板材料成分见表 1.

增材系统包括等离子弧焊接机器人、机器人控制柜、焊接电源、水冷箱以及送气装置等. 具体工艺参数设置见表 2. 增材试验前, 用打磨机打磨贝

表 1 丝材与基板化学元素组成 (质量分数, %)  
Table 1 Chemical components of wire and substrate

材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Co	Mo	V	N	Fe
基板	0.3	1.5	1.5	—	—	1.5	0.5	—	0.5	—	—	余量
丝材	0.037	0.605	1.853	0.015	0.010	—	2.1	0.405	0.496	0.01	—	余量

表 2 等离子弧增材工艺参数  
Table 2 Parameters of plasma arc additive manufacturing

保护气体流量 $Q/(L \cdot \min^{-1})$	离子气体流量 $q/(L \cdot \min^{-1})$	保护气 (离子气)	喷嘴至工件距离 $d/\text{mm}$	冷却温度 $T/^\circ\text{C}$	电流 $I/\text{A}$	移动速度 $v/(\text{cm} \cdot \min^{-1})$	送丝速度 $v_f/(\text{m} \cdot \min^{-1})$
19	0.8	Ar	9	< 200	170	12	1.46

氏体钢基板表面并用酒精擦拭, 去除基板表面氧化层和油污. 采用十字交叉的堆积路径, 增材构件尺寸为  $140\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ .

采用电火花线切割机在增材构件截取拉伸试样、金相试样和冲击试样. 分别采用 240, 600, 800, 1 200 和 1 500 W 砂纸打磨金相试样表面, 待表面无明显划痕后, 用金相抛磨机进行抛光处理. 抛光后将试样置于体积分数 2% 硝酸酒精中腐蚀, 采用 OLYMPUS-GX41 金相显微镜观察微观组织, 用 FEI Quanta 250F 场发射环境扫描电镜进行观察断口, 用 XRD 分析晶面衍射峰判断含有哪些物相.

试验使用 HVS-1000Z 自动数显维氏硬度计进行硬度测量, 试验力为 5 N, 停留时间为 10 s. 从增材构件的底部和顶部各取尺寸为 10 mm 的金相样, 并以 0.5 mm 的间距对金相样进行硬度测量. 采用 CSS-44100 万能试验机, 依据国家标准 GB/T 228—2002 在室温下对增材构件的拉伸强度进行测试, 取样位置如图 1 所示. 其中, 拉伸件分为  $x, y, z$  三个方向,  $z$  方向取样取到基板向下 8 mm, 每个方向有 3 个拉伸件. 采用 JBS-300B 摆锤冲击试验机测试增材构件的冲击韧性, 试样尺寸依据国家标准 GB-T229—2007 进行截取, 取样位置如图 1 所示, 其中, 冲击件分为  $x, y$  两个方向, 每个方向有 3 个冲击件.

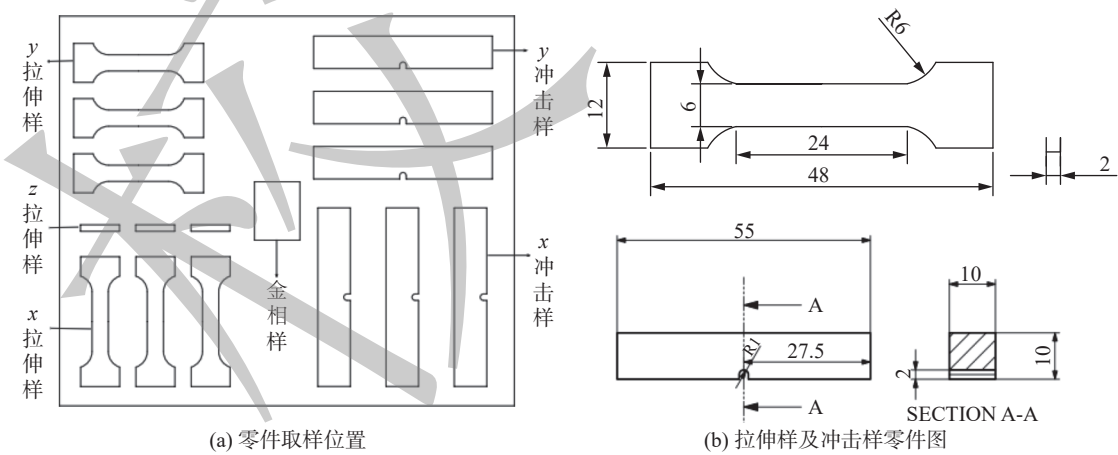


图 1 取样位置及尺寸示意图 (mm)

Fig. 1 Schematic diagram of sampling location and size. (a) part sampling location; (b) drawing of tensile sample and impact sample parts

2 试验结果与分析

2.1 构件宏观形貌和尺寸

图 2 为等离子增材贝氏体钢成形构件外观. 本

构件增材路径为十字交叉型, 即层与层之间成  $90^\circ$  旋转增材, 以此路径结构在基板表面增材出  $140\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 40\text{ mm}$  的结构样件. 整体来看构件未出现明显的熔池流淌、开裂等成形问题, 表面也未出现肉眼可见的气孔、夹渣等缺陷, 成形良好.



图 2 贝氏体钢构件结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of bainitic steel member structure

## 2.2 微观组织分析

图 3 为等离子增材试样的微观组织图。从图 3

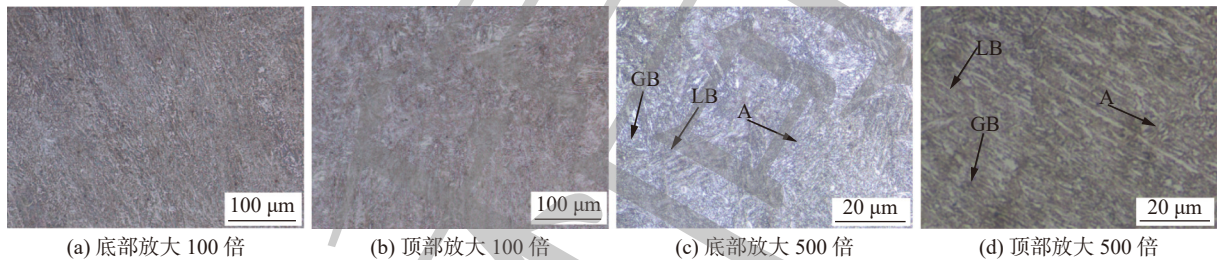


图 3 贝氏体钢增材不同位置显微组织

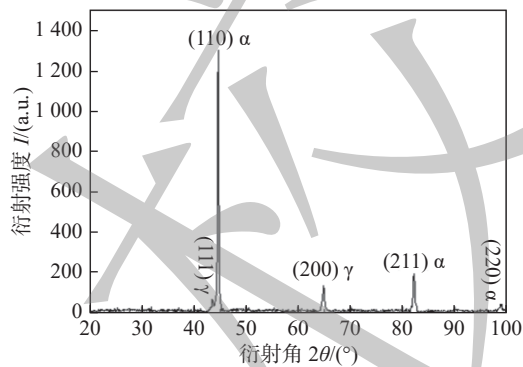
Fig. 3 Microstructure of bainitic steel additive at different positions. (a) At the bottom  $\times 100$ ; (b) At the top  $\times 100$ ; (c) At the bottom  $\times 500$ ; (d) At the top  $\times 500$ 

图 4 试样 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns of the samples

## 2.3 力学性能分析

图 5 是贝氏体钢底部和顶部截面显微硬度折线分布图。从图 5 中可以看出, 等离子增材贝氏体钢的显微硬度为 360 ~ 390 HV。增材构件在底部区域靠近基板, 形成的急冷组织晶粒比较细小, 而且基板部分元素向增材部分渗透, 铁素体含量增加, 硬度较高; 上层贝氏体钢板条组织长大, 硬度下降, 熔合区域的位置因为晶粒进行再次结晶, 所以贝氏

可知, 增材构件组织主要由板条状贝氏体、粒状贝氏体和少量的奥氏体组成。图 4 为试样的 XRD 图谱, 从衍射峰可知, 所有试样衍射峰均由  $\alpha$  峰和  $\gamma$  峰组成, 即试样的微观组织均由贝氏体和残余奥氏体组成, 无碳化物析出。构件的不同区域的组织存在局部差异: 顶部组织中奥氏体镶嵌在贝氏体铁素体基体上; 底部区域组织形貌较为细小, 有较多的粒状贝氏体。增材构件顶部区域与底部区域组织差异与增材过程中热循环有关。其中构件顶部区域冷却速率慢, 没有后续层的再加热直接凝固成组织, 所以贝氏体组织比较粗大, 贝氏体铁素体板条间的白色组织增多; 而底部组织接近基板部分, 冷却速率快, 且后续进行了多次再加热, 导致部分原子 (Ni, Mo, Si 等元素) 聚集, 晶粒比较细小。

体组织比较细小, 铁素体聚集, 因而硬度有所上升。整体分析, 等离子增材贝氏体钢的硬度平均能达到 370 HV 以上, 达到贝氏体钢基板硬度的 85%。

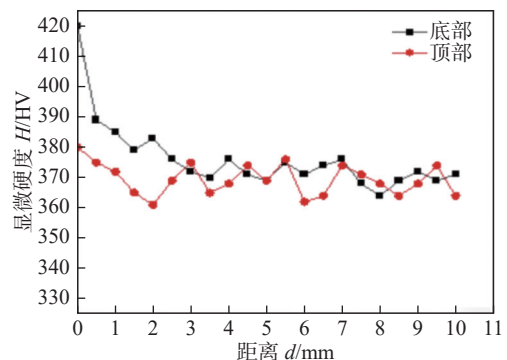


图 5 增材构件维氏硬度

Fig. 5 Vickers hardness of additive member

图 6 为等离子增材构件沿  $x, y$  两个方向的冲击功数值, 构件整体平均冲击韧性为  $145 \text{ J/cm}^2$ 。其中  $x$  方向上的平均冲击韧性为  $157 \text{ J/cm}^2$ ,  $y$  方向上的平均冲击韧性为  $134.6 \text{ J/cm}^2$ , 略小于  $x$  方向上的



冲击韧性,  $x$  方向上由于重熔区部分的贝氏体晶粒尺寸比较细小, 冲击韧性比较好。

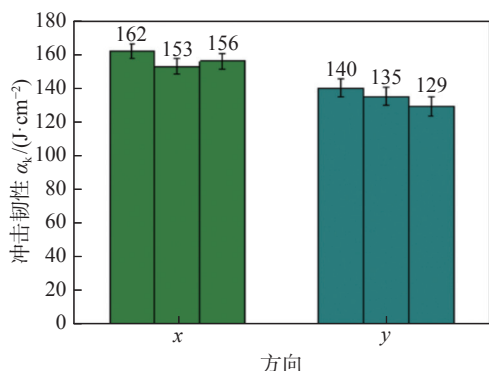


图 6 增材构件冲击韧性

Fig. 6 Impact toughness of additive member

图 7 为等离子增材构件材料沿  $x, y, z$  三个方向的拉伸力学性能数值。结果表明等离子增材构件没有存在明显的各向异性。其中  $x$  方向的拉伸强度均值为 945 MPa, 断后伸长率为 10.8%;  $y$  方向的拉伸强度均值为 963 MPa, 断后伸长率为 13%,  $z$  方向的拉伸强度均值为 958 MPa, 断后伸长率为 11.4%。其中  $x$  方向上的抗拉强度和断后伸长率略小于  $y$  方向和  $z$  方向上的抗拉强度和断后伸长率, 这是因为等离子增材贝氏体钢进行搭接时, 重熔区部分的贝氏体晶粒尺寸比较细小, 其强度和断后伸长率都有所提升。整体而言, 等离子增材贝氏体钢的强度和断后伸长率平均可以达到 955 MPa 和 11.7%, 表明组织成形良好, 无明显各向异性, 这有利于后续的热处理进一步提高其性能。

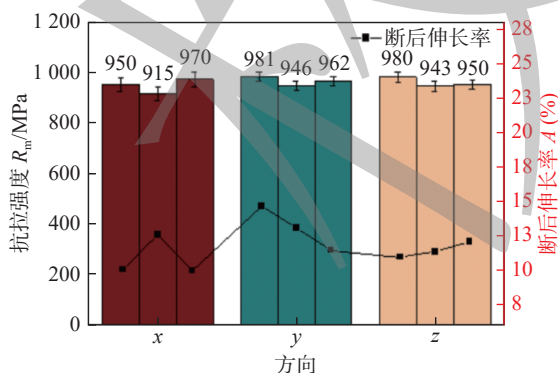
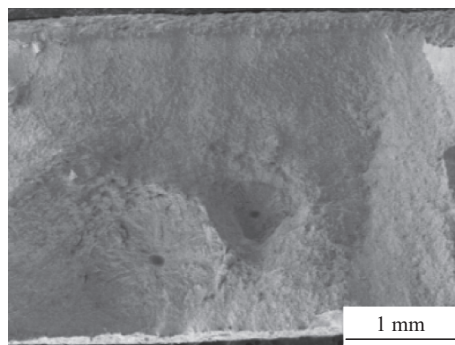


图 7 增材构件的拉伸强度及断后伸长率

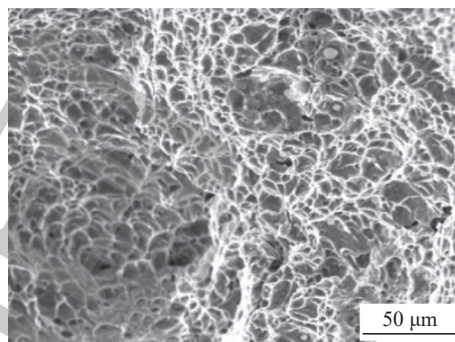
Fig. 7 Tensile strength and elongation of additive member

图 8 为拉伸断口形貌, 从图 8 可知, 宏观形貌下, 断口呈暗灰色, 明显纤维状, 且断裂边缘处出现倾斜断面形貌, 角度约为 45°; 微观形貌下, 断口表面分布大量韧窝, 韧窝内有大量的第二相粒子, 经

EDS 检测后得知为 Ni, Co 等元素的聚集物, 进一步阻碍了裂纹的扩展, 提高了结构件的韧性。故是典型的韧性断裂。



(a) 宏观形貌



(b) 微观形貌

图 8 拉伸试样断口形貌

Fig. 8 Fracture morphology of tensile specimen. (a) macroscopic morphology; (b) microcosmic morphology

### 3 结论

(1) 采用等离子弧增材工艺可以增材出成形良好的贝氏体钢构件, 构件整体未出现明显的熔池流淌、开裂等成形问题, 表面无明显缺陷。

(2) 等离子增材工艺获得的构件组织存在不均匀性。顶部组织中晶粒比较粗大, 板条状贝氏体铁素体间有较多白色组织; 底部区域组织形貌较为细小, 有较多的粒状贝氏体。

(3) 构件整体平均硬度为 370 HV 以上; 平均冲击韧性为 145 J/cm<sup>2</sup>; 拉伸试验结果显示, 等离子增材贝氏体钢的平均强度和断后伸长率都可以达到 955 MPa 和 11.7%, 无明显各向异性, 断口为韧性断裂。

### 参考文献

[1] 吕中宾, 刘泽辉, 叶中飞, 等. 回火保温时间对电力金具用低合

- 金铬钼贝氏体钢组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(10): 138 – 140.
- Lyu Zhongbin, Liu Zehui, Ye Zhongfei, *et al.* Effect of tempering and holding time on microstructure and mechanical properties of low alloy chromium-molybdenum bainite steel used in power fittings[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(10): 138 – 140.
- [2] Long, X Y, Branco R, Zhang F C, *et al.* Influence of Mn addition on cyclic deformation behaviour of bainitic rail steels[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 132(C). <http://doi.org/10.1016/j.ij-fatigue.2019.105362>.
- [3] 洪波, 张明华, 尹付成. 高强韧轨道交通用钢药芯焊丝的力学性能及组织分析[J]. 焊接学报, 2017, 38(4): 67 – 71, 132.
- Hong Bo, Zhang Minghua, Yin Fucheng. Mechanical properties and microstructure analysis of high strength and toughness steel flux-cored wire for rail transit[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(4): 67 – 71, 132.
- [4] 毕宗岳, 杨军, 牛辉, 等. X90 管线钢埋弧焊缝组织与性能分析[J]. 焊接学报, 2018, 39(10): 35 – 40.
- Bi Zongyue, Yang Jun, Niu Hui, *et al.* Analysis on microstructure and properties of submerged arc welding joints of X90 pipeline steel pipe[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(10): 35 – 40.
- [5] Evans Sian I, Wang Jie, Qin Jian, *et al.* A review of WAAM for steel construction-manufacturing, material and geometric properties, design, and future directions[J]. Structures, 2022, 44: 1506 – 1522.
- [6] Sahoo A, Tripathy S. Development in plasma arc welding process: A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 41: 363 – 368.
- [7] 张新, 林小辉, 高选乔, 等. 增材制造难熔金属材料及其应用研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(3): 18 – 22.
- Zhang Xin, Lin Xiaohui, Gao Xuanqiao, *et al.* Research progress in additive manufacturing refractory metal materials and its application[J]. Powder Metallurgy Industry, 2022, 32(3): 18 – 22.
- [8] Jiang Y L, Fang J X, Ma G Z, *et al.* Microstructure and properties of an as-deposited and post treated high strength carbide-free bainite steel fabricated via laser powder deposition[J]. Materials Science & Engineering A, 2021, 824: 141791.
- [9] 符友恒, 王桂兰, 殷爽, 等. 热处理对增材制造贝氏体钢组织及性能的影响[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(6): 1301 – 1307.
- Fu Youheng, Wang Guilan, Yin Shuang, *et al.* Effect of heat treatment on microstructure and properties of additive bainitic steel[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(6): 1301 – 1307.
- [10] Xie Jia, Cai Chuang, Liang Ying, *et al.* Microstructure and mechanical properties of heat affected zone of laser-MAG hybrid welded low carbon bainitic steel joints[J]. Optics and Laser Technology, 2022, 148: 107729.
- [11] Kumar Sanjeev, Kasyap Pradeep, Pandey Chandan, *et al.* Role of heat inputs on microstructure and mechanical properties in coarse-grained heat-affected zone of bainitic steel[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2021, 35: 724 – 734.

第一作者: 周凡, 硕士, 南京理工大学; 主要研究方向为电弧增材制造; Email: zhoulanzf@njust.edu.cn.

通信作者: 顾介仁, 1990 年出生, 博士, 副教授; 主要从事焊接/电弧增材方面的研究工作; Email: gujieren@njust.edu.cn.

(编辑: 王娇)