

热传导模式对电弧增材制造 800 MPa 级船用高强钢组织与性能的影响

郑文健^{1,3}, 李正阳¹, 王杏华², 宫旭辉², 闫德俊³, 赖少波³, 杨建国¹

(1. 浙江工业大学, 机械工程学院, 杭州, 310023; 2. 中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 洛阳, 471023; 3. 中船黄埔文冲船舶有限公司, 广东省舰船先进焊接技术企业重点实验室, 广州, 510715)

摘要: 为了研究热传导模式对 800 MPa 级船用高强钢增材构件组织与性能的影响, 采用电弧增材制造技术在不同工艺下沉积了 800 MPa 级船用高强钢构件, 并对其进行微观组织表征和力学性能测试. 沿高度方向沉积时, 构件底部主要为针状铁素体和马氏体组织, 中部和顶部为块状和针状铁素体 + 粒状贝氏体组织, 水平和垂直方向的屈服强度分别为 708 MPa 和 652 MPa, 抗拉强度分别为 895 MPa 和 831 MPa, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击吸收能量分别为 66 J 和 86 J; 沿横向沉积时, 构件的显微组织为细小的针状铁素体和板条状马氏体, 屈服强度和抗拉强度分别达到 929 MPa 和 1020 MPa, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击吸收能量为 92 J, 结果表明, 800 MPa 级船用高强钢增材构件的力学性能对热传导模式的敏感性较高, 优化热传导模式可以明显提升其综合力学性能.

创新点: (1) 采用电弧增材制造技术实现了综合力学性能良好的 800 MPa 级船用高强钢结构的制造.

(2) 揭示了 800 MPa 级船用高强钢增材制造过程的热传导模式对微观组织与力学性能的影响规律.

关键词: 电弧增材制造; 船用高强钢; 微观组织特征; 力学性能

中图分类号: TG 442 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20230605004

Effect of heat conduction mode on microstructure and properties of 800 MPa class marine high strength steel fabricated by wire arc additive manufacturing

ZHENG Wenjian^{1,3}, LI Zhengyang¹, WANG Xinghua², GONG Xuhui², YAN Dejun³,
LAI Shaobo³, YANG Jianguo¹

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310023, China; 2. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang, 471023, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology for Ships, CSSC Huangpu Wenchong Shipbuilding Company Limited, Guangzhou, 510715, China)

Abstract: In order to study the effect of heat conduction mode on the microstructure and properties of 800 MPa class marine high strength steel additive components, 800 MPa class marine high strength steel components were deposited by wire arc additive manufacturing (WAAM) technology under different processes, and microstructure characterization and mechanical properties testing of components were carried out. When deposited along the height direction, the bottom microstructure of the component is mainly acicular ferrite and martensite, the middle and top microstructures are massive and acicular ferrite + granular bainite. The yield strengths in the horizontal and vertical directions are 708 MPa and 652 MPa, the tensile strength are 895 MPa and 831 MPa, and the impact absorbed energy at $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ is 66 J and 86 J, respectively. When deposited along the transverse direction, the microstructure of the component is fine acicular ferrite and lath martensite, the yield strength and tensile strength reach 929 MPa and 1020 MPa respectively, and the impact absorbed energy at $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ is 92 J. The results indicate that the mechanical properties of the

800 MPa class marine high strength steel WAAM component are highly sensitive to the heat conduction mode, and optimizing heat conduction process can significantly improve its comprehensive mechanical properties.

Highlights: (1) The manufacture of 800 MPa class marine high strength steel structure with good comprehensive mechanical properties is realized by using wire arc additive manufacturing technology.

(2) The effect of heat conduction mode on microstructure and mechanical properties of 800 MPa marine high strength steel in additive manufacturing process was revealed.

Key words: wire arc additive manufacturing; marine high strength steel; microstructure characteristic; mechanical property

0 序言

船舶的工作环境恶劣,船体不仅会受到海水的腐蚀,而且要承受较大的风浪冲击与交变载荷,世界各国对船用钢的要求十分严格,船体高强钢因其具有较高的强度、良好的韧性、焊接性及耐海水腐蚀性,在舰船建造领域广泛应用^[1-5]。

对于船舶中一些大尺寸复杂结构,采用传统的加工手段进行一体成形的难度大、制造流程复杂,作为一种金属零部件快速成形技术,电弧增材制造(wire arc additive manufacturing, WAAM)技术以电弧为热源,通过逐层堆积熔融态金属丝材的方式制造出满足形状和尺寸要求的三维实体构件,具有生产成本低、成形效率高、灵活性好以及适合制造大尺寸金属结构件等优势^[6-8],在大型复杂船舶结构件的制造方面具有很大的应用前景^[9]。郭纯等人^[10]对电弧增材制造 10CrNi3MoV 船用高强钢薄壁墙构件进行组织及力学性能研究,结果表明,WAAM 构件以粒状贝氏体、块状铁素体和针状铁素体组织为主,横向与纵向抗拉强度分别为 676 MPa 和 648 MPa, -40 °C 下横向与纵向冲击吸收能量分别为 127 J 和 109 J; Rodrigues 等人^[11]采用 ER110S-G 船用低合金高强钢焊丝进行 WAAM 工艺研究,发现 511 J/mm 和 221 J/mm 两种热输入下的 WAAM 构件抗拉强度在 700 ~ 795 MPa,断后伸长率在 17.1% ~ 25.6%,显微组织中铁素体的存在提高了材料的变形能力,贝氏体的形成提高了材料的抗拉强度;侯旭儒等人^[12]采用 WAAM 技术在不同热输

入下进行 590 MPa 级船用高强钢构件的制备,发现热输入为 5.6 kJ/cm 时,WAAM 构件的屈服强度为 613 MPa,随着热输入的增加,构件的硬度和抗拉强度有所降低,此外热输入的增加促使针状铁素体的形成和 M-A 组元数量的减少,从而导致了构件低温冲击韧性的提高。综上所述,目前 WAAM 技术在船舶建造领域研究的材料主要为中低强度钢,对于屈服强度超过 800 MPa 的船用高强钢 WAAM 的研究还比较少见,并且该强度级别钢种的 WAAM 工艺适应性仍然未知。

文中采用 800 MPa 级船用高强钢焊丝为原材料进行电弧增材试验,研究不同热传导模式下 WAAM 构件微观组织和力学性能的变化规律,探索热传导模式对成形件微观组织和力学性能的影响规律,为 WAAM 800 MPa 级船用高强钢的实际应用提供一定的理论指导。

1 试验方法

试验所使用的丝材为 800 MPa 级船用高强钢 10Ni5CrMoV,焊丝 JS80,配套实心气保焊丝焊丝直径为 1.2 mm,其化学成分见表 1,800 MPa 级船用高强钢接头的力学性能要求见表 2,试验基板为碳钢板,其尺寸为 300 mm × 250 mm × 10 mm。试验前使用角磨机对基板表面进行打磨处理,去除表面的铁锈和氧化皮,然后用蘸有少量丙酮的棉花团擦去基板表面的油污,确保表面干净无污染,最后使用专用夹具固定预处理后的基板,采用 Ar + 5%CO₂ 作为电弧增材试验的保护气体。

表 1 焊丝的化学成分(质量分数, %)
Table 1 Chemical composition of welding wire

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al	Ti	Fe
0.05	0.35	1.75	0.008	0.007	2.51	0.58	0.66	0.08	0.04	0.035	余量

表 2 800 MPa 级船用高强钢接头的力学性能要求
Table 2 Mechanical properties requirements of 800 MPa class marine high strength steel joint

屈服强度 R_{el}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A(\%)$	20 °C 冲击 吸收能量 $A_{KV, 20\text{ °C}}/\text{J}$	-50 °C 冲击 吸收能量 $A_{KV, -50\text{ °C}}/\text{J}$
≥ 785	945	≥ 15	≥ 83	≥ 47

WAAM 系统主要由 MOTOWELD-RD350S 焊接电源、YRC1000 控制柜、AR1440 安川六轴机器人和保护气装置组成。根据单道熔敷金属的成形质量确定了最佳 WAAM 工艺参数见表 3。为了获得平坦的沉积表面并提高 WAAM 构件的成形精度,采用单条焊道宽度的 0.66 倍作为同层相邻焊道间中心距^[13]。沉积时焊枪垂直于基板,每完成一层沉积后,将焊枪提升一定高度,移动距离为上一层沉积的高度,并调节焊丝长度,确保焊丝端部距沉积表面约 3 mm,采用交错式堆积方式,以此来避免起弧处凸起而熄弧处凹陷的现象发生,确保构件的

外观形貌良好。在不同的热传导状态下进行 WAAM, 高强钢 WAAM 构件宏观形貌如图 1 所示,沿高度方向沉积(即熔覆金属填充方向与增材制造沉积方向一致)制造了双道 35 层墙体构件,见图 1(a),构件尺寸约为 280 mm × 120 mm × 22 mm,控制层间温度为 150 °C;沿横向沉积(即熔覆金属填充方向与增材制造沉积方向不一致)制造了 5 道 5 层块状构件,见图 1(b),构件尺寸约为 200 mm × 40 mm × 20 mm,控制层间温度为 50 °C,并采用空冷和水冷两种冷却方式,采用水冷方式进行横向沉积的过程中,将基板置于盛水的不锈钢容器中(冷却水并不浸没整个基板,基板上表面始终保持干燥状态),以此达到吸收热量和降低热输入的目的。

为了避免沉积构件的组织 and 性能受到碳钢基板稀释作用的影响,使用电火花线切割机从距离沉积构件根部向上约 8 mm 处开始切取金相试样、拉伸试样和冲击试样。金相试样经过 180 ~ 2 000 目

表 3 WAAM 工艺参数
Table 3 Process parameters of WAAM

焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 $v/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$	送丝速度 $v_s/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	伸出长度 l/mm	保护气流量 $Q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$
220	20	20	6.7	13	15

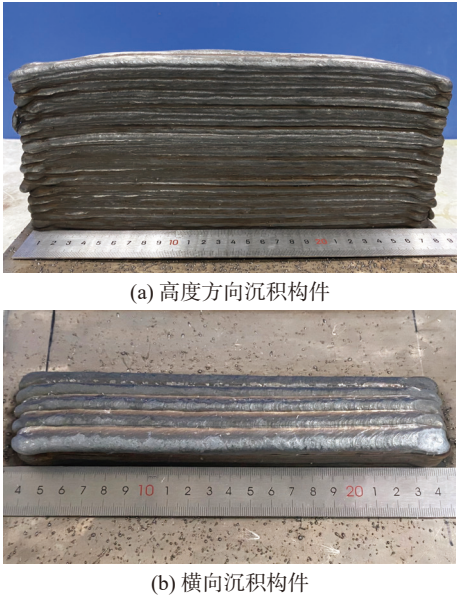


图 1 800 MPa 级船用高强钢 WAAM 构件宏观形貌
Fig. 1 Macroscopic morphology of 800 MPa class marine high strength steel components fabricated by WAAM. (a) component deposited along the height direction; (b) component deposited along the transverse direction

砂纸打磨和 0.25 μm 的二氧化硅抛光液抛光后,使用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀 3 ~ 5 s. 通过金相显微镜(optical microscope, OM) 和 FEI Quanta 200F 型扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM) 表征增材构件的微观组织。

使用 MHVS-1000Z 型数显自动转塔显微维氏硬度计, 根据国家标准 GB/T 4340.1—2009 《金属材料 维氏硬度试验 第 1 部分: 试验方法》进行显微硬度从下至上的等距测量,对于高度方向沉积构件每间隔 2 mm 测量一个数据点,对于横向沉积构件每间隔 0.5 mm 测量一个数据点,加载载荷为 4.9 N,保荷时间为 10 s. 依据 ASTM E8/E8M-13a, 拉伸试样总长 104 mm, 标距部分长 25 mm, 宽度 10 mm, 厚度 3 mm. 拉伸试验在 SDS100 电液伺服万能试验机上按照国家标准 GB/T 228.1—2010 《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》进行,拉伸时采用位移控制,设置位移速率为 0.5

mm/min. 按照国家标准 GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》,采用夏比 V 形缺口试样进行冲击试验,试样尺寸为 55 mm × 10 mm × 10 mm,试验温度分别为 20 °C 和 -60 °C,通过 SEM 观察拉伸和冲击试样的断口形貌。

2 试验结果

2.1 微观组织特征

沿高度方向沉积制造的构件不同区域显微组织如图 2 所示。构件底部靠近基板处为针状铁素体,并出现板条状马氏体组织,随着沉积高度的增

加,组织中出现许多孤岛状 M-A 组元,其形成原因是当钢中奥氏体冷至稍高于上贝氏体形成温度时,由于铁素体中碳的固溶度较低,部分碳原子会从铁素体迁移到尚未转变的奥氏体内,致使奥氏体中富聚碳,部分富碳奥氏体在之后的冷却过程中转变为马氏体,另一部分未发生转变成为残余奥氏体,两相混合物即为 M-A 组元,呈小岛状分布在大块状或条状铁素体基体上^[14],从而形成粒状贝氏体组织,故构件中部组织以针状和块状铁素体 + 粒状贝氏体为主,构件顶部组织以块状铁素体和粒状贝氏体为主。

两种冷却方式下沿横向沉积制造的构件微观组织如图 3 所示。由图 3(a) 和图 3(b) 可知,构件的组织主要为细小的针状铁素体和马氏体,未发现气孔和裂纹等缺陷,表明构件内部质量良好。为了进一步观察横向沉积构件的微观组织特征,对其进行 SEM 分析,如图 3(c) 和图 3(d) 可知,构件内碳化物颗粒很少,可观察到特征明显的板条状马氏体,当冷却方式为水冷时,马氏体板条束尺寸增大,尺寸范围由 2 ~ 5 μm 增加到 5 ~ 10 μm。

2.2 力学性能

图 4 为不同增材工艺下成形件的显微硬度分布。成形件底部至顶部的显微硬度存在一定波动,随着沉积高度的增加,显微硬度呈现下降趋势,高度方向沉积构件的平均显微硬度约为 300 HV,空冷条件下横向沉积构件的平均显微硬度约为 363 HV,水冷条件下横向沉积构件的平均显微硬度约为 367 HV。电弧增材试验开始前没有对基板进行预热处理,在第一层熔敷金属沉积过程中,焊接能量快速传递到基板,熔敷金属冷却速率较快,淬硬组织含量高,因此初始阶段的沉积层硬度值明显高于其他位置,但仍满足 800 MPa 级船用高强钢焊接接头硬度 ≤ 450 HV 的技术要求^[15]。

拉伸和冲击试样在不同 WAAM 构件中的取样位置如图 5 所示,高度方向沉积构件的力学性能见表 4。由表可知,构件在水平和竖直方向的平均屈服强度分别为 708 MPa 和 652 MPa,平均抗拉强度分别为 895 MPa 和 831 MPa,平均断后伸长率分别为 21% 和 23%,水平方向的强度高于竖直方向,塑性略低于竖直方向。除构件底部靠近基板处的屈服强度达到 817 MPa 外,构件其他位置的屈服强度无

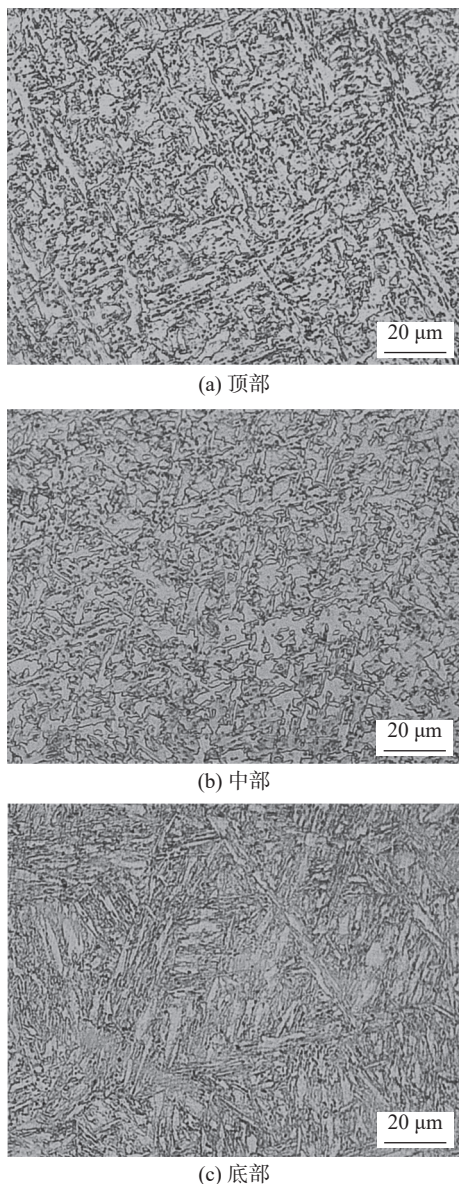


图 2 高度方向沉积构件不同区域的显微组织

Fig. 2 Microstructures of different regions of the component deposited along the height direction. (a) top region; (b) middle region; (c) bottom region

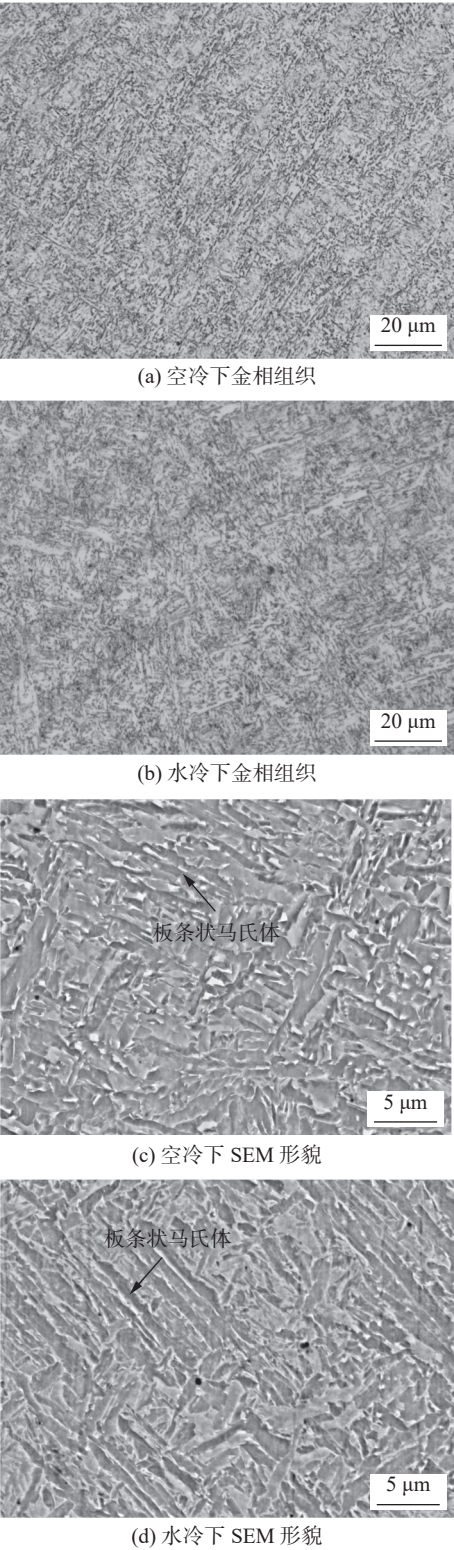


图 3 两种冷却方式下横向沉积构件的微观组织

Fig. 3 Microstructures of components deposited along the transverse direction under two cooling modes. (a) metallographic structure under air cooling; (b) metallographic structure under water cooling; (c) SEM morphology under air cooling; (d) SEM morphology under water cooling

法满足 800 MPa 级船用高强钢的技术要求, 不能确保性能的稳定性, 强度的不均匀性会影响构件的后

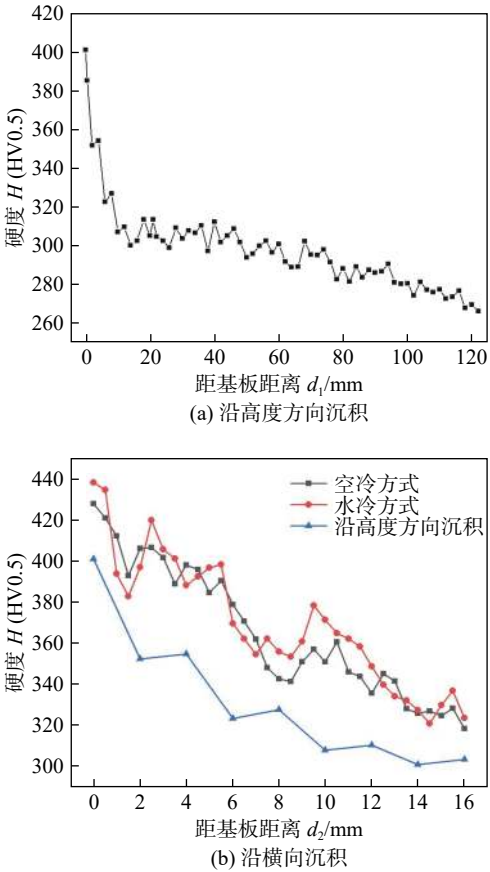


图 4 不同增材工艺下成形件的显微硬度分布

Fig. 4 Microhardness distribution of formed parts under different additive processes. (a) deposition along the height direction; (b) deposition along the transverse direction

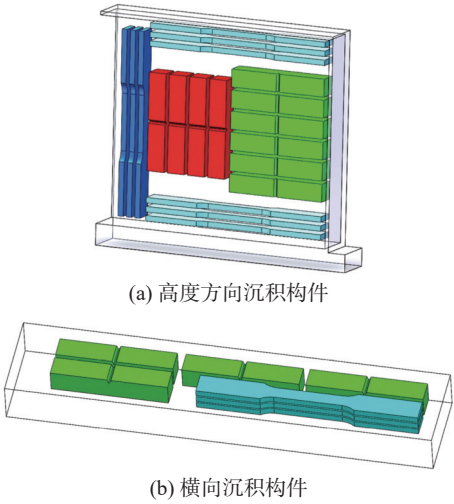


图 5 不同 WAAM 构件中拉伸和冲击试样提取位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of extraction positions of tensile and impact specimens in different WAAM components. (a) component deposited along the height direction; (b) component deposited along the transverse direction

续使用性能, 因此无法在实际生产中应用. 高度方向沉积构件拉伸断口的 SEM 形貌如图 6 所示, 断

表 4 高度方向沉积构件的力学性能
Table 4 Mechanical properties of the component deposited along the height direction

试样取向	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A(\%)$	20 °C 冲击吸收能量 $A_{KV, 20\text{ }^{\circ}\text{C}}/\text{J}$	-60 °C 冲击吸收能量 $A_{KV, -60\text{ }^{\circ}\text{C}}/\text{J}$
水平	708	895	21	123	66
竖直	652	831	23	171	86

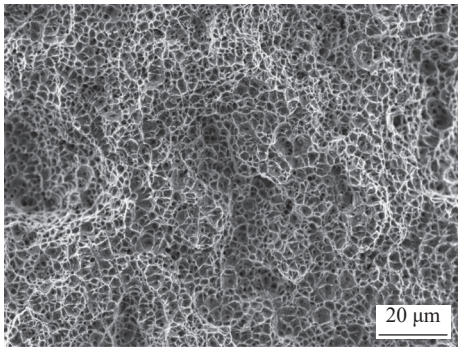


图 6 高度方向沉积构件拉伸断口 SEM 形貌
Fig. 6 SEM morphology of tensile fracture of the component deposited along the height direction

口上存在很多均匀分布的等轴韧窝, 拉伸断裂形式为韧性断裂, 说明构件塑性良好. 高度方向沉积构件水平和竖直方向 20 °C 下的平均冲击吸收能量分别为 123 J 和 171 J, -60 °C 下的平均冲击吸收能量分别为 66 J 和 86 J. 与水平方向相比, 竖直方向的室温和低温冲击吸收能量更高, 但两个方向的冲击韧性均满足 800 MPa 级船用高强钢焊接接头室温冲击吸收能量 $\geq 83\text{ J}^{[15]}$ 和 -50 °C 冲击吸收能量 $\geq$

47 J^[16] 的技术指标. 由于沉积层内及层间微观组织的不均匀性导致构件的力学性能在水平和竖直方向存在明显的各向异性.

两种冷却方式下横向沉积构件的力学性能见表 5. 结果表明, 空冷和水冷下横向沉积构件的平均屈服强度分别为 929 MPa 和 1 013 MPa, 平均抗拉强度分别为 1 020 MPa 和 1 091 MPa, 平均断后伸长率分别为 16% 和 12%. 随着冷却速度的增加, 构件的屈服强度提高了 9% 左右, 抗拉强度提高了 7% 左右, 但塑性有所下降. 两种冷却方式下横向沉积构件试样的屈服强度均远远超出 800 MPa 级船用高强钢的强度指标 (屈服强度 $\geq 785\text{ MPa}$), 与水冷相比, 空冷下构件的塑性满足该高强钢的实际使用要求^[17]. 两种冷却方式下横向沉积构件的室温冲击吸收能量差异不大, 水冷下构件 -60 °C 冲击吸收能量为 86 J, 相比于空冷下降了约 6.5%, 但均能满足 800 MPa 级船用高强钢冲击性能的使用要求, 综上, 沿横向沉积有利于构件力学性能的稳定性.

表 5 两种冷却方式下横向沉积构件的力学性能
Table 5 Mechanical properties of components deposited along transverse direction under two cooling modes

冷却方式	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A(\%)$	20 °C 冲击吸收能量 $A_{KV, 20\text{ }^{\circ}\text{C}}/\text{J}$	-60 °C 冲击吸收能量 $A_{KV, -60\text{ }^{\circ}\text{C}}/\text{J}$
空冷	929	1 020	16	141	92
水冷	1 013	1 091	12	139	86

不同增材工艺下构件低温冲击断口形貌, 如图 7 所示, 由图 7(a) 和图 7(b) 可知, 空冷和水冷下横向沉积构件冲击断口表面呈暗灰色且凹凸不平, 断口边缘存在明显的剪切唇, 属于韧性断口; 断口表面均分布着大量韧窝, 断裂形式为微孔聚集型延性断裂. 空冷下构件冲击断口表面的韧窝更大更深, 表明其在断裂前产生的塑性变形更大, 因此具有更高的冲击吸收能量; 由图 7(c) 可知, 高度方向沉积构件低温冲击断口表面的韧窝明显更浅, 表明

横向沉积构件的低温韧性优于高度方向沉积构件. 综合对比高度方向沉积构件和横向沉积构件的各项力学性能指标可以发现, 强度的提升一定程度上降低材料的塑性, 但是在冲击性能上, 强度的提升并未明显减小冲击功, 尤其是低温 -60 °C 时, 横向沉积构件的冲击功甚至要优于高度方向沉积构件, 这表明改变热传导模式引起的微观组织的细化和相结构的变化能够实现同时提升强度和韧性的效果.

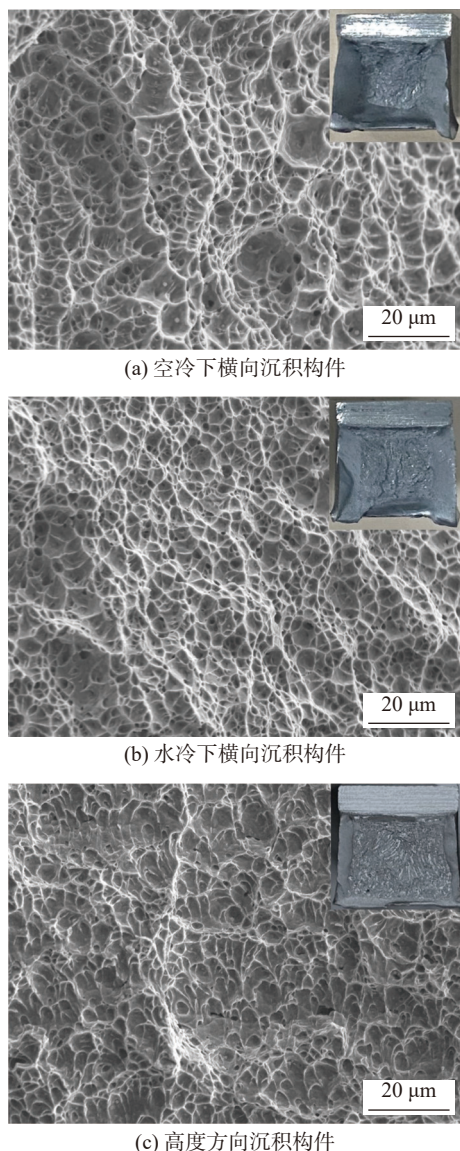


图 7 不同增材工艺下构件低温冲击断口宏观和 SEM 形貌
Fig. 7 Macroscopic and SEM morphology of low temperature impact fracture of components under different additive processes. (a) component deposited along the transverse direction under air cooling; (b) component deposited along the transverse direction under water cooling; (c) component deposited along the height direction

3 分析和讨论

沿高度方向沉积时, 由于焊前未对基板进行预热, 构件底部靠近基板处熔敷金属的热传导模式为多维导热, 冷却速度较快, 在较低温度下奥氏体发生相变形成板条状马氏体组织, 导致该区域的强度和硬度较高. 随着沉积层数的增加, 构件中部和顶部熔敷金属的热传导模式转变为近一维导热, 同时会受到先前焊道热累积的影响, 冷却较为缓慢, 因

此不存在急冷马氏体组织, 而是形成针状和块状铁素体 + 粒状贝氏体组织, 淬硬组织的减少促使材料的塑性和韧性提高而硬度下降^[18]. 此外, 沿高度方向沉积时, 沿熔池底部熔合线诱发联生结晶, 枝晶沿着高度方向竞争生长并偏转向熔池移动方向, 熔覆金属沉积过程的热传导模式导致熔池内的枝晶基本都是这一种生长模式, 从而导致构件力学性能存在各向异性. 因而, 当熔覆金属填充方向与增材制造沉积方向一致时, 即文中的沿高度方向沉积, 电弧能量传递方式及热传导特征会随着增材构件的尺寸变化呈现出显著的改变, 热传导效率越来越慢, 熔敷金属的冷却时间 (如 $t_{8/3}$, $t_{8/5}$ 等) 显著增大, 引起微观组织的连续变化, 继而影响以高强性能为重要指标的船体高强钢构件的力学性能.

与高度方向沉积构件相比, 空冷下横向沉积构件组织晶粒更加细小, 这是由于层间温度下降时, 层间冷却时间增长, 沉积层内热累积减少, 同时沿横向沉积能增大沉积层和基板的直接接触面积, 加快散热, 提高热传导效率. 并且横向沉积时, 在熔池底部边界和侧边界均开始产生联生结晶现象, 枝晶分别沿着高度方向和横向进行竞争生长, 随着熔池的凝固同时向焊接方向发生偏转, 联生结晶的区域明显增加, 形核率提高, 热传导效率的提高导致枝晶间距进一步减小, 晶粒得到细化, 细晶强化作用促使 WAAM 构件的硬度和强度显著提升^[19]. 同时空冷下横向沉积构件中出现的针状铁素体作为 WAAM 高强钢中的一种理想组织, 能使构件具有较高的强韧性^[20]. 此外, 相比于沿高度方向沉积, 由于热传导方向的差异, 横向沉积过程中枝晶生长呈现出熔池底部熔合线上枝晶沿高度方向生长而熔池侧壁熔合线上枝晶沿横向生长的特征, 从而降低了沉积构件力学性能各向异性的倾向. 采用水冷方式沿横向沉积制造构件时, 由于冷却速度的提高, 较高相变温度停留时间缩短, 低温相变组织增加^[21], 即板条马氏体尺寸及含量增加. 淬硬组织的增加导致水冷下横向沉积构件的强度和硬度高于空冷下横向沉积构件, 而塑韧性有所下降. 因而, 当熔覆金属填充方向与增材制造沉积方向不一致时, 即文中的沿横向增材沉积, 传热方式改变为大尺寸边界传递, 效率较高, 能量累积程度不明显, 并且热传导效率不会随着增材构件尺寸变化而发生明显恶化, 从而优化增材制造构件的相变组织和晶粒度等微观组织特征, 保证构件的强度.

综上,采用 WAAM 技术制造的 800 MPa 级船用高强钢构件具有良好的工艺适应性,但是结构强度受热传导模式的影响较大,微观组织演变及力学性能敏感性较强,因此,为保证高强钢构件的综合力学性能,需根据目标构件的具体尺寸及结构特征,合理设计 WAAM 工艺,包括沉积方向、冷却方式以及其他具体工艺参数。

4 结论

(1) 通过对比多种热传导模式下的 800 MPa 级船用高强钢增材构件的力学性能发现,空冷方式下沿横向沉积制造的构件综合力学性能最好,平均硬度约为 363 HV,屈服强度和抗拉强度分别为 929 MPa 和 1 020 MPa,断后伸长率为 16%, -60°C 冲击吸收能量为 92 J,均满足 800 MPa 级船用高强钢的性能指标。

(2) 热传导模式对增材构件的微观组织影响明显,当沉积方向从沿高度方向改变为沿横向时,增材金属的热传导维度从近一维转变为多维,热传导效率提升,促进枝晶生长方向和微观组织发生改变,组织变为针状铁素体和板条状马氏体,且晶粒更加细小。当冷却方式从空冷转变为水冷时,由于冷却速度的提高,板条状马氏体尺寸及含量增大。

(3) 空冷下横向沉积构件以细小的针状铁素体组织为主,导致构件具有较高的强韧性,而水冷下横向沉积构件中淬硬组织的增多导致构件的塑性和韧性有一定程度的下降。

(4) 在 800 MPa 级船用高强钢 WAAM 过程中,通过优化沉积方向并降低层间温度的工艺改进方法能够达到增加散热速度、提升热传导效率的目的,从而显著改善 WAAM 构件的力学性能。

参考文献

- [1] 郝文魁,刘智勇,王显宗,等.舰艇用高强钢强度及其耐蚀性现状及发展趋势[J].装备环境工程,2014,11(1): 54-62.
Hao Wenkui, Liu Zhiyong, Wang Xianzhong, *et al.* Present situation and prospect of studies on high strength steel and corrosion resistance in naval ship and submarine[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 54-62.
- [2] Layus P, Kah P, Khlusova E, *et al.* Study of the sensitivity of high-strength cold-resistant shipbuilding steels to thermal cycle of arc welding[J]. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 2018, 13(1): 1-9.
- [3] 王顺,李晨晓,汪骥,等.考虑挠度的船用高强度钢曲板线加热成形数值计算研究[J].中国造船,2021,62(4): 230-243.
Wang Shun, Li Chenxiao, Wang Ji, *et al.* Numerical calculation of line heating forming of marine high strength steel bending plate considering deflection[J]. Shipbuilding of China, 2021, 62(4): 230-243.
- [4] 邵军.舰船用钢研究现状与发展[J].鞍钢技术,2013(4): 1-4.
Shao Jun. Present status on researching shipbuilding steel and its development[J]. Angang Technology, 2013(4): 1-4.
- [5] 雷冰,胡胜楠,卢云飞,等.海水环境中 B10 合金与高强钢的电偶腐蚀行为与电绝缘防护技术[J].腐蚀与防护,2019,40(7): 497-501,518.
Lei Bing, Hu Shengnan, Lu Yunfei, *et al.* Galvanic corrosion behavior and electric insulation between B10 and a high strength steel in seawater environment for warship[J]. Corrosion & Protection, 2019, 40(7): 497-501,518.
- [6] Greer C, Nycz A, Noakes M, *et al.* Introduction to the design rules for metal big area additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2019, 27: 159-166.
- [7] Buchanan C, Gardner L. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges[J]. Engineering Structures, 2019, 180: 332-348.
- [8] Ding Donghong, Shen Chen, Pan Zengxi, *et al.* Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from CAD to finished part[J]. Computer-Aided Design, 2016, 73: 66-75.
- [9] Song Xueping, Huang Jiankang, Fan Ding. Review of functionally graded materials processed by additive manufacturing[J]. China Welding, 2023, 32(3): 41-50.
- [10] 郭纯,马明亮,胡瑞章,等.电弧增材制造舰船用高强钢 10CrNi₃MoV 的组织及性能[J].材料导报,2019,33(S2): 455-459.
Guo Chun, Ma Mingliang, Hu Ruizhang, *et al.* Microstructure and properties of 10CrNi₃MoV high strength steel for naval ship made by wire and arc additive manufacturing[J]. Materials Reports, 2019, 33(S2): 455-459.
- [11] 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.
- [12] 侯旭儒,赵琳,任淑彬,等.热输入对电弧增材制造船用高强钢组织与力学性能的影响[J/OL].金属学报: 1-19[2023-05-10].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1139.tg.20230314.1749.092.html>.
Hou Xuru, Zhao Lin, Ren Shubin, *et al.* Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of marine high strength steel fabricated by wire arc additive manufacturing[J/OL]. Acta Metallurgica Sinica: 1-19[2023-05-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1139.tg.20230314.1749.092.html>.

- [13] 方学伟, 蒋笑, 王喆, 等. ER120S-G 高强钢电弧增材制造的工艺优化 [J]. 中国机械工程, 2023, 34(2): 218 – 225.
Fang Xuewei, Jiang Xiao, Wang Zhe, *et al.* Forming process optimization of wire and arc additive manufactured high-strength steel ER120S-G[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(2): 218 – 225.
- [14] Li Xueda, Fan Yuran, Ma Xiaoping, *et al.* Influence of Martensite-Austenite constituents formed at different intercritical temperatures on toughness[J]. Materials & Design, 2015, 67: 457 – 463.
- [15] 李大用, 杨东青, 王苹, 等. 高铬镍奥氏体焊丝焊接 10Ni5CrMoV 钢接头组织性能分析 [J]. 焊接学报, 2017, 38(5): 87 – 91.
Li Dayong, Yang Dongqing, Wang Ping, *et al.* Analysis on microstructure and properties of under-matching weld joint of high strength steel 10Ni5CrMoV[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(5): 87 – 91.
- [16] 刘露, 王加友, 李大用, 等. 10Ni5CrMoV 钢错位同步双面双弧焊接接头抗低温脆断性能 [J]. 焊接学报, 2016, 37(8): 109 – 113.
Liu Lu, Wang Jiayou, Li Dayong, *et al.* Low temperature brittle fracture resistance of asymmetrical synchronous double-sided arc welded joint of 10Ni5CrMoV steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(8): 109 – 113.
- [17] 撒世勇. 10CrNi5MoV 钢厚板窄间隙熔接极气保焊研究 [J]. 材料开发与应用, 2010, 25(1): 13 – 15.
Sa Shiyong. Narrow gap metal arc gas welding of 10CrNi5MoV steel thick plate[J]. Development and Application of Materials, 2010, 25(1): 13 – 15.
- [18] 陆万全, 乔及森, 王磊, 等. 960 高强钢脉冲 TIG 电弧增材制造热过程与组织性能研究 [J/OL]. 材料导报, 2023, 37(14): 1-14[2023-05-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20220526.1958.020.html>.
- [19] Fang Qian, Zhao Lin, Chen Cuixin, *et al.* Effect of heat input on microstructural and mechanical properties of high strength low alloy steel block parts fabricated by wire arc additive manufacturing[J]. Materials Today Communications, 2023, 34: 105146.
- [20] 余圣甫, 禹润臻, 何天英, 等. 电弧增材制造技术及其应用的研究进展 [J]. 中国材料进展, 2021, 40(3): 198 – 209.
Yu Shengfu, Yu Runzhen, He Tianying, *et al.* Wire arc additive manufacturing and its application: Research progress[J]. Materials China, 2021, 40(3): 198 – 209.
- [21] 安同邦, 郑庆, 张永林, 等. 1300 MPa 级低合金高强钢 SH-CCT 曲线及冷裂敏感性分析 [J]. 焊接学报, 2022, 43(9): 75 – 81.
An Tongbang, Zheng Qing, Zhang Yonglin, *et al.* SH-CCT diagram and cold cracking sensitivity of a 1300 MPa grade high strength low alloy steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(9): 75 – 81.

第一作者: 郑文健, 博士, 副研究员; 主要从事先进焊接与连接技术、焊接结构可靠性及完整性、材料加工过程虚拟仿真、承压设备材料焊接接头微观分析与表征等方面的科研和教学工作; Email: zwj0322@zjut.edu.cn.

通信作者: 杨建国, 博士, 教授; Email: yangjg@zjut.edu.cn.

(编辑: 刘启明)