

# 电弧增材制造 GH3039 组织和性能研究

方前<sup>1,2</sup>, 赵琳<sup>2</sup>, 张大越<sup>3</sup>, 陈翠欣<sup>1</sup>, 田志凌<sup>2</sup>, 殷福星<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学, 天津 300130)

(2. 钢铁研究总院, 北京 100081)

(3. 鞍钢集团北京研究院, 北京 102209)

**摘要:** 采用基于熔化极气体保护焊的电弧增材制造 (GMAW-WAAM) 技术制备了 GH3039 薄壁件。利用光学显微镜 (OM)、显微硬度仪和拉伸试验分析了薄壁构件的组织和性能。结果表明, 采用 GMAW-WAAM 制备的 GH3039 构件组织致密、无气孔或裂纹等缺陷。合金的显微组织主要由高度方向生长的粗大柱状晶和层间细小晶粒构成。沉积态合金具有较好的室温和高温性能: 室温抗拉强度为 519~540 MPa, 断后延伸率为 35.9%~39.6%; 800 °C 抗拉强度为 189 MPa, 断后延伸率为 35.4%。本研究验证了采用 GMAW-WAAM 技术制备 GH3039 部件的可行性。

**关键词:** 镍基合金; 电弧增材制造; 力学性能; 微观组织

中图分类号: TG146.1+5

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)03-1141-04

镍基高温合金 GH3039 广泛地应用于航空发动机燃烧室和燃气轮机零部件<sup>[1,2]</sup>。但是, 其面临着材料利用率低和机加工性能较差等问题<sup>[3,4]</sup>。直接能量沉积 (direct energy deposition, DED) 以电弧等为热源, 以丝材或粉体为原材料直接制备构件, 制备周期短, 材料利用率高, 可以解决上述问题<sup>[5,6]</sup>。电弧增材制造 (wire arc additive manufacturing, WAAM) 技术沉积效率高 (>3 kg/h), 设备成本低, 适用于制备中大型金属构件<sup>[7]</sup>。有研究报道了激光熔丝沉积<sup>[8,9]</sup>制备 GH3039 的工艺和组织。目前还没有已公开有关电弧增材制造 GH3039 的报道。本研究采用 WAAM 制备了 GH3039 薄壁件, 研究了薄壁件的组织和性能, 验证了使用 WAAM 技术制备 GH3039 构件的可行性。

## 1 实验

使用基于熔化极气体保护焊 (gas metal arc welding, GMAW) 的电弧增材制造系统 (GMAW-WAAM) (图 1a), 按照图 1b 所示的沉积策略, 制备 GH3039 薄壁构件 (图 1c)。电弧增材制造系统的热源为 CMT Advanced (Fronius)。基板为 590 MPa 级低合金高强度钢, 尺寸为 400 mm×80 mm×30 mm, 其成分和性能见文献<sup>[10]</sup>。丝材为 GH3039 焊丝, 焊丝直径为 1.2 mm, 其成分见文献<sup>[8]</sup>。沉积策略如图 1b 所示, 完成一层沉积后沉积起止方向互换以补偿起弧、熄弧端高度的差异, 层间等待

100 s。采用焊机的 CMT 模式, 送丝速度为 6 m/min, 对应平均电流为 144 A, 平均电压为 17.2 V, 扫描速度为 5 mm/s, 保护气为 2.5%CO<sub>2</sub>+Ar, 流量 20 L/min。

制备 GH3039 薄壁试样的尺寸为 280 mm×70 mm×6 mm。沿沉积方向(X)和增材方向(Z)取拉伸试样, 如图 1c 所示。其中, H1、H2 和 V1、V2 试样进行室温拉伸 (GB/T 228.1), H3、H4 试样进行 800 °C 高温拉伸 (GB/T 228.2)。垂直扫描方向取金相和显微硬度测量试样。金相试样经磨抛后在 5% 硫酸水溶液 (体积分数) 电解腐蚀后观察。试样经磨抛和电解腐蚀后进行显微硬度测量, 载荷 200 g, 负载时间 10 s。

## 2 结果与讨论

### 2.1 组织

薄壁件外形规则 (图 1c), 内部致密, 无气孔、裂纹等缺陷 (图 2a)。试样顶部, 末道沉积的边缘部分为细小等轴晶 (图 2b)。这是由于表面的冷速较低导致的。自上而下, 组织由等轴晶, 经由枝晶, 最终演变为柱状晶 (图 2a~2c)。合金组织主要由粗大的柱状晶构成 (图 2a、2c)。柱状晶存在择优取向, [001] 方向 (近似) 平行高度方向, 沿温度梯度自底部向顶部生长<sup>[11]</sup>。在两层沉积之间, 存在跨层生长的柱状晶 (图 2d)。同时, 熔合线附近先沉积一侧存在不规则的细小晶粒 (图 2e、2f)。这可能是上一层表面的等轴晶

收稿日期: 2021-03-17

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB1103703); 河北工业大学联合培养博士研究生项目 (2018GN003)

作者简介: 方前, 男, 1987 年生, 博士生, 河北工业大学, 天津 300130, 电话: 022-60202145, E-mail: 201711801003@stu.hebut.edu.cn

经历下一道次的热循环后形成的。

## 2.2 性能

沉积态电弧增材制造 GH3039 薄壁件的室温和高温拉伸性能见表 1。可以看到，其室温抗拉强度(UTS)为 519~540 MPa，断后延伸率(EI)为 35.9%~39.6%。抗拉强度明显低于供货态 GH3039 冷轧板 (UTS $\geq$ 735 MPa)，延伸率与其相当 (EI $\geq$ 40%)。轧板制造过程中的晶粒细化和轧后热处理的共同作用使得其强度更高<sup>[12]</sup>。同时，发现室温拉伸力学性能存在各向异性：高度方向的抗拉强度、屈服强度和断后延伸率分别为 540 MPa、285MPa、39.6%，比水平方向高 4.0%、6.7% 和 10.3%。这是因为，显微组织为高度方向[001]取向分布的柱状晶。相对于其他取向，[001]取向具有良好的力学性能<sup>[13]</sup>。水平方向高温拉伸性能与冷轧板(UTS $\geq$ 245 MPa，EI $\geq$ 40%)有一定的差异。高温试样的断后延伸率较室温基本没有变化。800 °C 抗拉强度为 189 MPa，断后延伸率为 35.4%。

电弧增材制造 GH3039 薄壁件力学性能的改善可以从以下几个方面进行：适当调整合金成分，适应增材制造工艺；优化沉积工艺，严格控制层温和热输入，控制晶粒尺寸；采用同步微锻等工艺，细化组织；采

用合适的沉积后热处理工艺。

图 3 为电弧增材制造 GH3039 高度方向的硬度分布。整体呈现自下而上递减的趋势，平均值为 2010 MPa。在距基板 0~27 mm 范围内，试样硬度整体高于 2000 MPa，在 16 mm 高处出现最大值 2290 MPa；在 27~50 mm 范围内，硬度值在 2000 MPa 附近波动；在 50 mm 以上范围，大多值低于 2000 MPa，最小值为 1730 MPa。这是由于，制造过程中薄壁件的散热条件和初始沉积条件随着沉积过程的进行变化。

图 4 为室温拉伸试样和断口的形貌。可以看到，水平方向和高度方向试样拉伸后试样平行段的宏观形貌差异很大 (图 4a、4b)。水平方向的试样拉伸后标距段的宽度呈波浪形变化，并且，在试样表面看到与长轴 (近似) 垂直的条纹 (图 4a)。拉伸断口与长轴成 45° 角 (图 4c)，表面分布平行于 Z 向的条纹，这些条纹由韧窝和滑移带组成 (图 4d)。高度方向的试样拉伸后，自过渡圆弧至断口，试样宽度连续变窄，在试验表面分布与长轴 (近似) 平行的线条 (图 4b)。高度方向试样断后为杯-锥断口形貌 (图 4e)，主要由较深的大韧窝构成 (图 4f)。断口形貌的差异性与高度方向[001]择优取向的柱状晶对应。

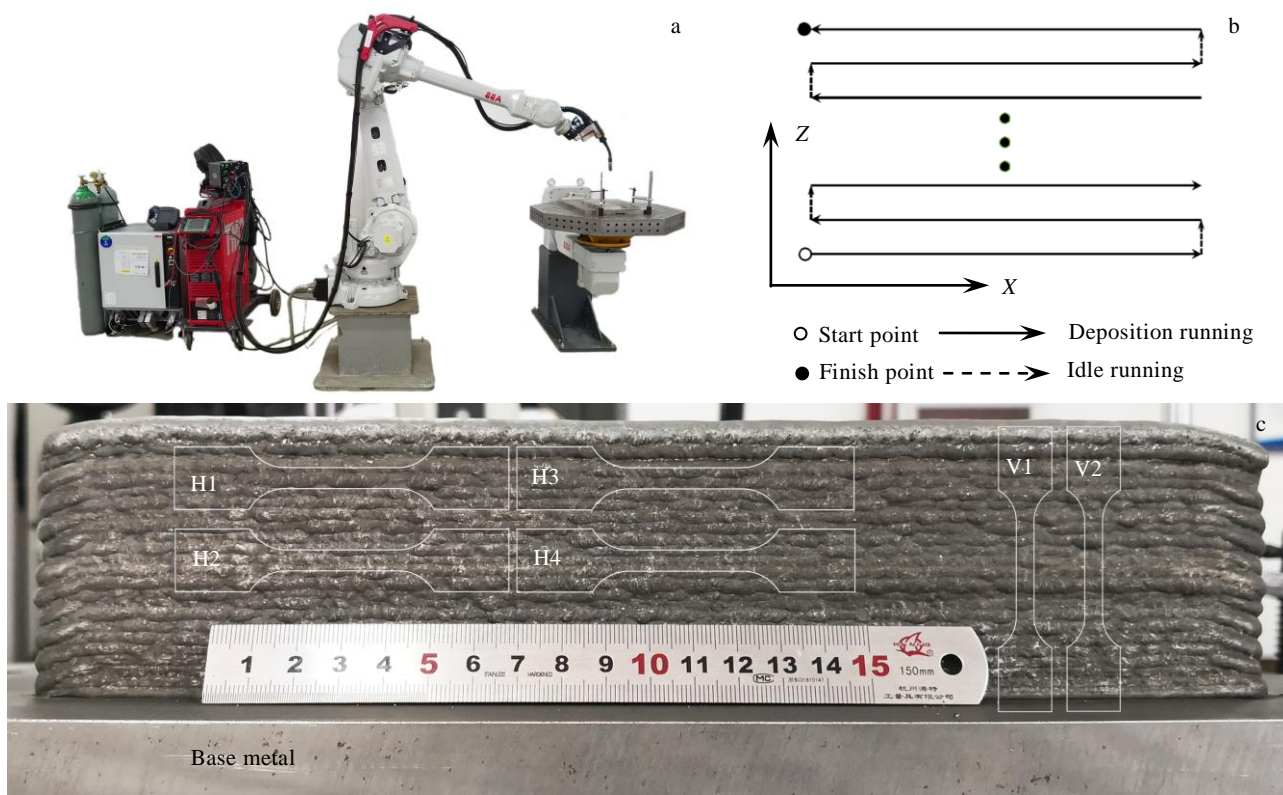


图 1 GH3039 薄壁件的制备和表征

Fig.1 Preparation and characterization of GH3039 component: (a) WAAM system, (b) deposition strategy, and (c) sampling locations

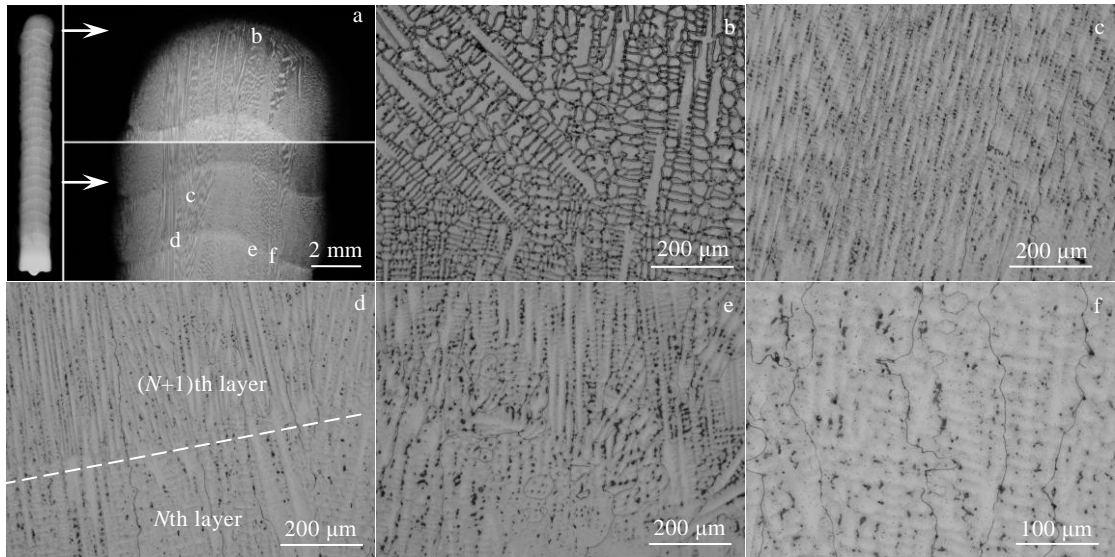


图 2 电弧增材制造 GH3039 的显微组织

Fig.2 Microstructures of GH3039 fabricated by WAAM: (a) macrostructure of the deposit, (b) equiaxed grain, (c) coarse column grain, (d) column grain across layers, and (e, f) interlayer fine grain

表 1 沉积态电弧增材制造 GH3039 薄壁件的室温和高温拉伸性能

Table 1 Tensile properties of GH3039 fabricated by WAAM at room temperature and high temperature

Sample direction	UTS/MPa	YS/MPa	El/%	Temperature/°C
Z	540	285	39.6	25
X	519	267	35.9	25
X	189	35.4	800	

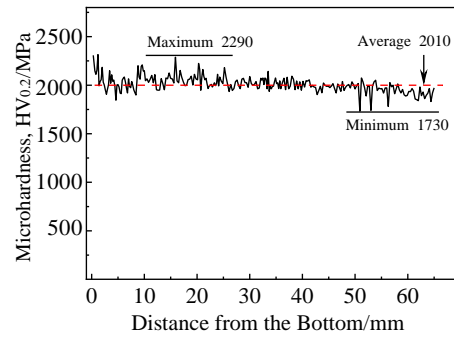


图 3 显微硬度沿增材方向的分布

Fig.3 Hardness evolution along the vertical direction

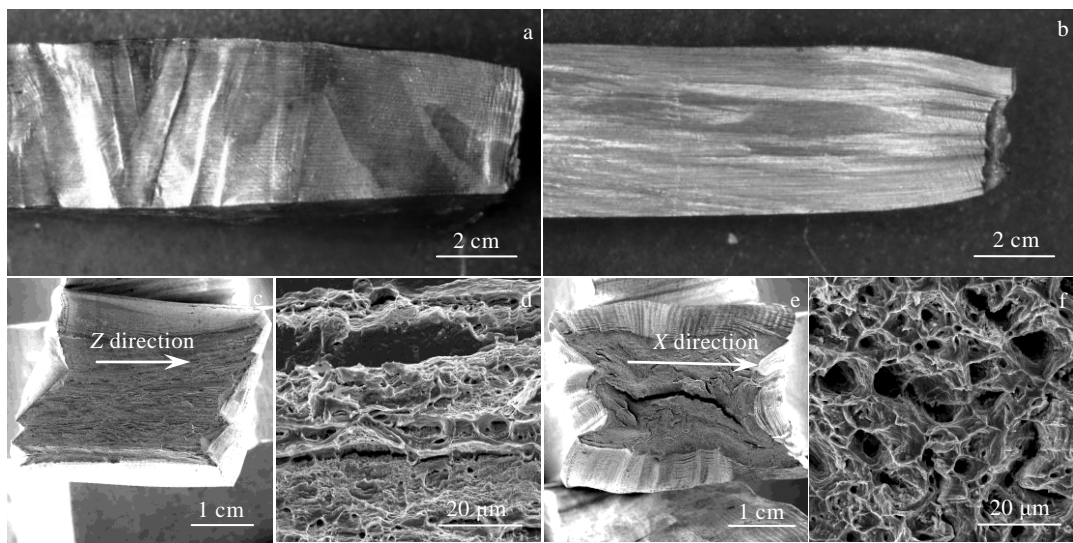


图 4 室温拉伸试样及其断口形貌

Fig.4 Fracture morphologies (d, f) of tensile samples at room temperature along X (a) and Z (b) direction; (c, d) H1 sample; (e, f) V1 sample

### 3 结 论

1) 采用电弧增材制造技术 (GMAW-WAAM) 制备了 GH3039 薄壁件。构件成型良好, 组织致密, 没有气孔和裂纹等缺陷。组织以 (跨层生长) 粗大柱状晶为主, 在层间存在一些细小晶粒。

2) 高度方向的抗拉强度、屈服强度和断后延伸率分别为 540 MPa、285 MPa 和 39.6%, 稍高于水平方向。整体性能与锻件 (UTS>735 MPa, EI≥40%) 有一定的差距。

3) 后续研究可以从丝材成分设计、沉积工艺优化和沉积后热处理等方面来改善电弧增材制造 GH3039 构件的力学性能。

#### 参考文献 References

- [1] Dhinakaran V, Ajith J, Fahmidha A F Y *et al. Materials Today: Proceedings*[J], 2020, 21: 920
- [2] Wang Hui(王 辉), Chen Minghe(陈明和), Zhang Chengxiang(张成祥) *et al. Journal of Aeronautical Materials*(航空学报)[J], 2016, 36(5): 77
- [3] Liu Y B, Zhao C. *Advanced Materials Research*[J], 2013, 764: 3
- [4] Wang X H, Zhao C, Guo Y Y *et al. Materials Science Forum*[J], 2014, 800-801: 119
- [5] Williams S W, Martina F, Addison A C *et al. Materials Science and Technology*[J], 2016, 32(7): 641
- [6] Lockett H, Ding J L, Williams S *et al. Journal of Engineering Design*[J], 2017, 28(7-9): 568
- [7] Ding D H, Pan Z X, Cuiuri D *et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2015, 81: 465
- [8] Li Q Q, Chen J, Wang X D *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2021, 877, 160 330
- [9] Li Q Q, Zhang Y, Chen J *et al. Journal of Materials Science and Technology*[J], 2021, 70: 185
- [10] Liu Zheng(刘 政), Wei Jinshan(魏金山), Cui Bing(崔 冰) *et al. Materials Science and Technology*(材料科学与工程)[J], 2016, 24(5): 34
- [11] Cong B Q, Qi Z W, Qi B J *et al. Applied Sciences*[J], 2017, 7(3): 275
- [12] Kong Yonghua(孔永华), Liu Ruiyi(刘瑞毅), Chen Guosheng(陈国胜) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(S2): 616
- [13] Zhang Xiaoli(张小丽), Feng Li(冯 丽), Yang Yanhong(杨彦红) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2020, 56(7): 969

## Microstructure and Mechanical Properties of GH3039 Fabricated by Wire Arc Additive Manufacturing

Fang Qian<sup>1,2</sup>, Zhao Lin<sup>2</sup>, Zhang Dayue<sup>3</sup>, Chen Cuixin<sup>1</sup>, Tian Zhiling<sup>2</sup>, Yin Fuxing<sup>1</sup>

(1. Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

(2. Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

(3. Ansteel Beijing Research Institute, Beijing 102209, China)

**Abstract:** GH3039 thin wall part was fabricated by wire arc additive manufacturing based on gas metal arc welding (GMAW-WAAM). Microstructure and mechanical properties of the part were investigated by OM, microhardness indentation, and tensile test. Results show that the defect-free dense part is mainly composed of interlayer fine grains and coarse column grains, which grows vertically. The ambient temperature ultimate tensile strength (UTS) and fracture elongation (El) of the as deposited part are 519~540 MPa and 35.9%~39.6%, respectively. The elevated temperature (800 °C) UTS and El along the deposition direction are 189 MPa and 35.4%, respectively. This study verifies the feasibility of manufacturing GH3039 part by GMAW-WAAM.

**Key words:** nickel based superalloy; WAAM; mechanical properties; microstructure

Corresponding author: Yin Fuxing, Ph. D., Professor, Research Institute for Energy Equipment Materials, Tianjin Key Laboratory of Materials Laminating Fabrication and Interfacial Controlling Technology, School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, P. R. China, Tel: 0086-22-60202145, E-mail: yinfuxing@hebut.edu.cn