

集成 GTAW 与 GMAW 的电弧增材制造 实验平台构建及应用

李永存, 刘泽国, 张家宝, 王 勇

(东北石油大学 机械科学与工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘 要: 该文构建了集成 GTAW (钨极惰性气体保护焊) 与 GMAW (熔化极惰性气体保护焊) 的电弧增材制造实验平台, 平台采用动梁式龙门三轴结构, 以 Arduino 为核心集成控制与双路保护气系统。通过碳钢材料单道增材实验, 分析了扫描速度与送丝速度对成形尺寸的影响, 确定最优工艺参数为扫描速度 0.36 m/min、送丝速度 6 m/min。在此参数下, 样品成形良好, 熔宽与余高适中, 稀释率处于 5%~15% 的合理范围, 微观组织以铁素体和珠光体为主。平台在保证性能的同时降低了成本, 适用于高校及科研机构的工艺验证与教学演示。

关键词: 电弧增材制造; 钨极惰性气体保护焊; 熔化极气体保护焊; 实验平台; Arduino

中图分类号: TG434 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-4956(2026)05-0169-07

增材制造技术正引领传统制造业的变革, 以电弧为热源的丝材增材制造技术, 即电弧增材制造, 在制造中等及大尺寸的金属构件方面展现出巨大的潜力和独特的优势。首先, 电弧增材制造的沉积效率极高, 可达每小时数千克, 远高于激光同轴送粉技术 (每小时几百克), 使其适合大型金属构件原型的快速制造与小批量生产; 其次, 电弧增材制造的丝材利用率接近 100%, 且原材料成本远低于专用金属粉末, 具有显著的经济性; 最后, 电弧增材制造系统可基于成熟的弧焊设备改造, 设备投入和维护成本相对较低, 技术门槛不高, 更易于被广大高校、研究所及中小企业所接受。近年来, 随着机器人技术、传感技术和控制算法的发展, 电弧增材制造技术在成形精度、组织性能控制和应力变形抑制等方面取得了进步^[1], 其应用领域已从最初的快速原型制造, 扩展到航空航天大型框架结构、船舶舰艇耐压舱体、重型机械关键部件等高端装备的直接制造与修复再制造^[3]。

商用电弧增材制造设备系统功能完善, 但其封闭的架构和高昂的成本限制了其在科研教学和中小企业中的普及应用。与此同时, 基于开源硬件的低成本平台多用于单一工艺参数的初步验证, 在运动控制精度、成形稳定性及系统扩展性方面存在不足^[2]。特别是在

工艺基础研究层面, 电弧增材制造过程中的热-力耦合机制复杂, 工艺参数与成形质量间的映射关系尚不明确, 制约了制造高性能构件的可靠性^[4]。现有实验平台难以兼顾成本与性能的平衡。

自建电弧增材制造实验平台面临三个层面的挑战。从系统架构来看, 自建开源平台在运动控制精度、热管理能力和成形稳定性方面仍有不足^[5]。在工艺实现层面, 电弧增材制造过程中的热-力耦合效应显著, 熔池动态行为复杂, 但多数实验平台难以精准调控热输入和熔池行为, 导致成形精度控制困难, 易出现驼峰、咬边等缺陷^[6]。在系统扩展性方面, 传统平台架构固定, 模块化程度低, 难以支持多工艺对比研究或功能升级, 这不仅限制了工艺研究的深度, 也影响了平台在实验教学和前沿研究中的应用。

基于当前电弧增材制造技术对低成本、高灵活性研究平台的需求, 以及钨极惰性气体保护焊 (GTAW) 与熔化极惰性气体保护焊 (GMAW) 工艺集成化研究的需求, 本文构建了一套基于开源架构的双工艺集成电弧增材制造实验平台, 并开展系统的工艺可行性验证, 解决平台构建中多系统协同控制、工艺适应性拓展与成形精度基础保障等关键问题。

收稿日期: 2025-11-28

修改日期: 2026-01-21

基金项目: 黑龙江省教学改革项目 (SJGY2024173, SJGZY2024084); 黑龙江省教育科学规划重点课题 (GJB1425340)

作者简介: 李永存 (1988—), 男, 辽宁铁岭, 博士, 副教授, 主要研究方向为金属材料电弧增材制造, yc_lee1988@163.com。

通信作者: 王勇 (1979—), 男, 山西运城, 博士, 教授, 主要研究方向为低温电池, wangyongsl@163.com。

引文格式: 李永存, 刘泽国, 张家宝, 等. 集成 GTAW 与 GMAW 的电弧增材制造实验平台构建及应用[J]. 实验技术与管理, 2026, 43(5): 169-175.

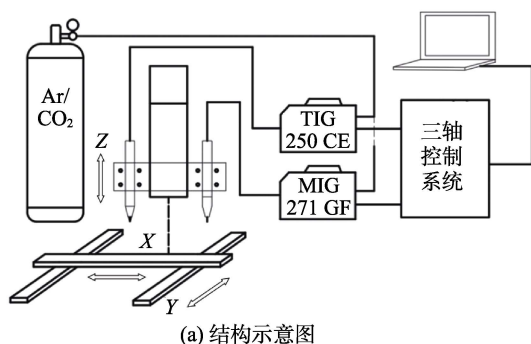
Cite this article: LI Y C, LIU Z G, ZHANG J B, et al. Development and application of arc additive manufacturing experimental platform integrating GTAW and GMAW[J]. Experimental Technology and Management, 2026, 43(5): 169-175. (in Chinese)

1 电弧增材制造实验平台的搭建

1.1 实验平台的组成

电弧增材制造平台由电弧系统、惰性气体保护系统、三轴控制系统等组成,如图1所示。电弧系统设计为动梁式龙门三轴机械结构,配备 GTAW/ GMAW 双焊枪,可根据工艺需求灵活切换增材方式,实现多种材料与工艺路径的适应性加工。惰性气体保

护系统提供高纯度保护气体(如氩气或适用于碳钢的 Ar/CO₂ 混合气等),其主要作用包括:隔绝空气,防止熔池氧化;作为电弧的电离介质,保障电弧稳定燃烧和冶金过程可控。三轴控制系统以计算机为上位机,以 Arduino 为下位机控制器,实现对运动轴、焊机启停及气体供应的协同控制,确保加工过程按预设参数精确、稳定执行。



(a) 结构示意图



(b) 实物图

图 1 双工艺集成电弧增材制造实验平台

1.2 实验平台设计

1.2.1 机械结构

电弧系统的动梁式龙门三轴机械结构可从 X、Y、Z 三个方向驱动焊枪,将 GMAW 与 GTAW 焊枪固定在 Z 轴,保证增材的扫描路径一致。三轴执行元件均采用 86BYGH80 步进电机,该选型主要基于以下三方面考量:首先,该电机保持转矩约 4.5 N·m,能够满足龙门结构对驱动单元负载能力与刚度的要求;其次,配合高分辨驱动器可有效提高系统分辨率,保障机械部分的理论定位精度;另外,在实现同等功能需求条件下,其总体成本低于伺服驱动方案,展现出较高的工程应用性价比。

在保证电弧系统整体刚性的前提下,为了减轻平台总体重量、缩短设计制造周期、方便后期维护升级等,滑轨采用铝合金装配,并采用丝杠传动以保证较高传动效率与传动精度^[7]。X 轴与 Y 轴为开放式滚珠丝杠直线模组,而 Z 轴模组为封闭式结构,用水平连接板连接 Y 轴上的滑块座与 X 轴,用竖直接板连接 Z 轴与 X 轴滑块座。为了规整四台步进电机控制线,分别在右侧 Y 轴与 X 轴外端安装拖链,使电机控制线按路径移动。在两 Y 轴的后端安装一根承载应力的横梁,用 H 型支撑架规整焊机电缆线。用两个焊枪夹具将两根焊枪垂直于平台方向安装在 Z 轴两侧。

1.2.2 三轴控制系统

控制系统的主要硬件有 Arduino 主板、步进电机驱动器、中间继电器、三轴限位传感器。步进电机可以精确控制电机输出角度,且低速运转时可以输出更

高扭矩。步进电动机工作电流保持在 6.0 A,工作电压为 48 V^[8]。中间继电器为 Arduino 配套的 5 V DC 继电器模块,限位开关为 1 常开 1 常闭型微动开关。三轴控制系统接线如图 2 所示。

在三轴控制系统中,Arduino uno 是下位机的核心控制元件,将开源固件 Grbl 烧录至 uno,uno 作为驱动控制板读取 G 代码控制三轴驱动器,利用其中断功能实现三轴的限位功能以及焊机的启停。Arduino 使用了 Atmel AVR 单片机,编程语言是开放源代码,适合预算有限、编程初学者进行项目设计与开发^[9]。Arduino uno 通过 USB 端口与计算机连接,实时将 G 代码翻译为单片机可识别的代码,进而控制其他硬件^[10],控制方案如图 3 所示。为防止焊枪在工作过程中撞到 Y 轴滑轨以及钢板,在三轴的两侧各安装了 2 个限位开关,确保焊枪在移动到位处时停止工作,从而保障工作人员安全与平台精度。

1.2.3 保护气系统

在电弧增材制造中,常采用局部气体保护装置^[11],该装置通过焊枪直接向电弧熔池附近区域输送高纯度氩气,形成局部保护气幕,隔绝熔池与空气接触,保护气系统工作原理如图 4 所示。这种保护方式的气体消耗量和设备成本均低于封闭气室。然而,其保护范围仅限于熔池邻近区域,若保护效果不佳(如气流不当),则易导致熔池氧化^[12]。为提高局部保护装置的效果,实验平台在原有焊枪头部输送氩气的基础上,于基板底部加设微孔送气管道,形成上下双气路协同保护,进一步增强保护效果。

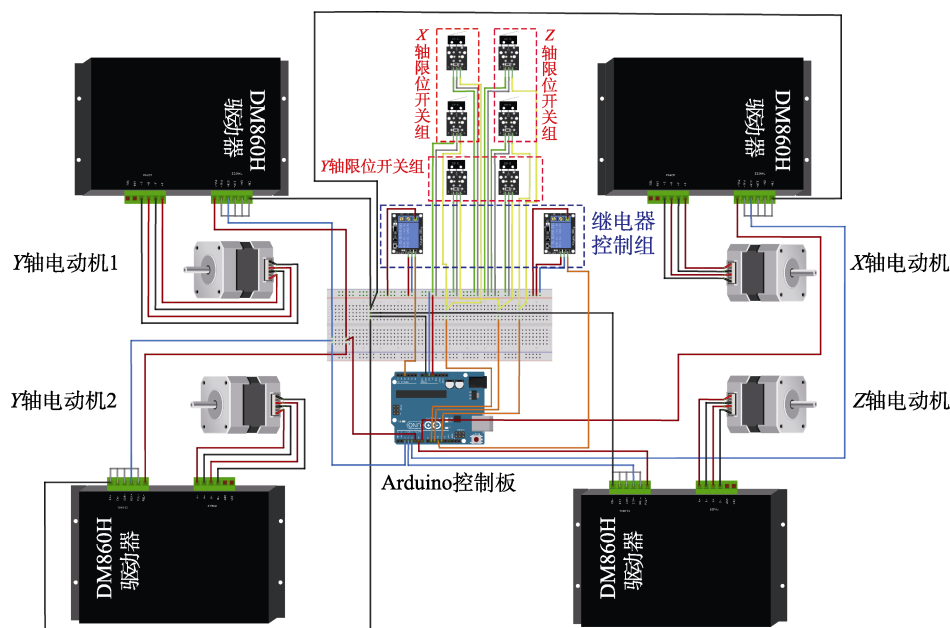


图2 数控系统接线图

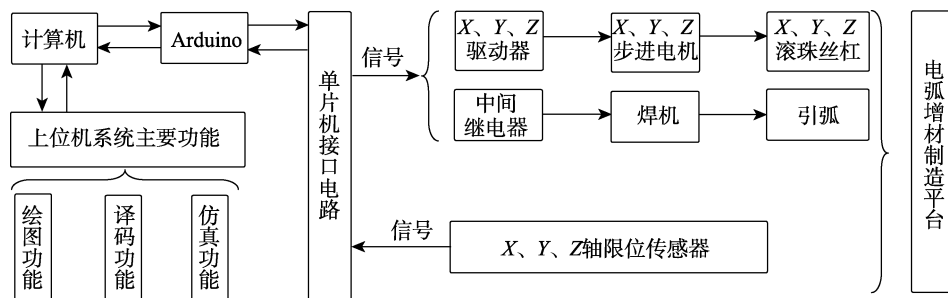


图3 电弧增材制造平台上下位机控制流程及控制方案

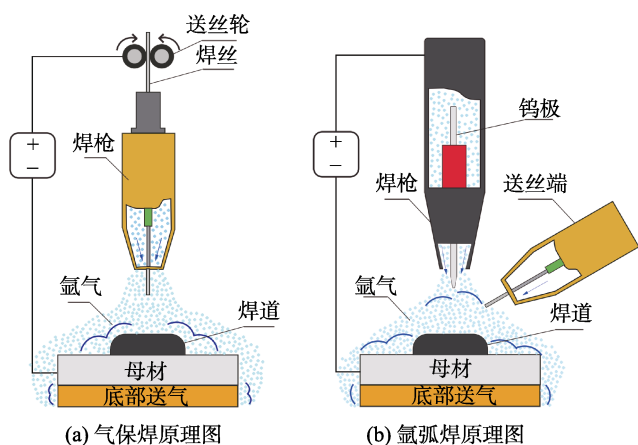


图4 保护气系统原理图

1.3 实验平台增材工艺流程

首先利用 AutoCAD 绘制预设图形（以“NEPU”字样为例）并保存为“.dxf”格式，随后通过 ArtCAM 软件进行加工原点与路径设置，输出“.cnc”格式文件后，由 G-code sender 软件读取并生成控制焊枪运动的数控 G 代码^[13]。在数控系统原有的控制基础上，增加对焊机的起弧和熄弧控制，指令分别为“M8”和“M9”。

在软件端设置相关文件后便可在硬件端给平台供

电，拨动焊机开关并选择合适的电压、送丝速度，确保氩气压强维持稳定以及焊丝的伸出量，然后进行复位操作以及路径仿真。以上程序无误后设置扫描速度并引弧，当程序结束后观察增材成形状态。操作路线如图 5 所示。

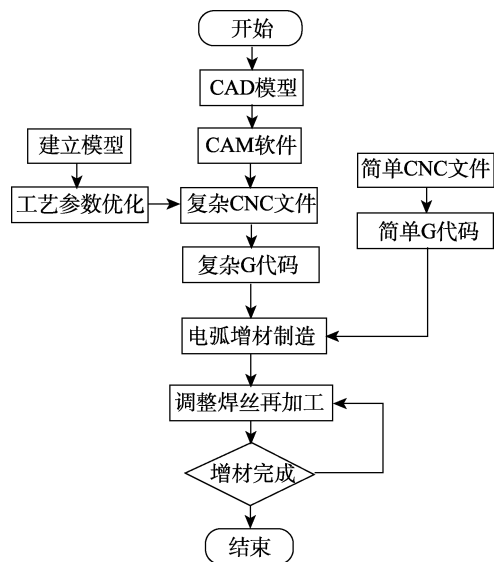


图5 增材工艺流程

2 应用实例

单层单道是电弧增材成型的基础，增材工艺参数直接影响熔宽、余高以及表面粗糙度等成形零件尺寸特性。本文以电弧增材 ER50-6 单层单道样品为例，在实验平台开展应用效果验证。为简化研究，在实验中采用单一变量的控制方法，初始工艺参数见表 1。

表 1 电弧增材 ER50-6 工艺参数

参数名称	参数选择
基板	Q345B
基板厚度/mm	8
增材扫描速度 ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	0.48
送丝速度 ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	5
焊丝伸长量/mm	10
保护气成分	98%Ar、2%CO ₂
保护气流量/($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	15
焊枪角度/(°)	90
焊丝直径/mm	1.0
增材方法	GMAW

2.1 电弧增材制造方案

2.1.1 实验设计

基材选用 Q345 钢，尺寸为 100 mm×80 mm×8 mm，匹配的焊丝型号为 ER50-6，焊丝直径为 1.0 mm，母材与焊丝的化学成分见表 2。实验前用角磨机打磨母材，去除表面氧化膜和杂质，并用丙酮溶液清洗表面。通过线切割获得单道单层的中心位置试样，超声清洗去除截面的油污与碎屑，依次选用 180#~2000#砂纸打磨至均匀同向划痕后，经抛光至镜面后进行金相腐蚀观察截面情况。用游标卡尺配合体式显微镜测量各截面尺寸，以焊道熔宽、余高等评价焊道成形质量。

表 2 母材和焊丝化学成分（质量分数，%）

	元素							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
母材	0.160	1.380	0.230	<0.015	<0.003	0.210	0.023	0.210
焊丝	0.090	1.620	0.860	<0.012	<0.015	0.026	0.015	0.120

在单层单道工艺参数的探索中，扫描速度与送丝速度是影响单道增材的重要因素，两者会改变增材过程中热输入量的大小，进而影响材料组织与性能。实验预设扫描速度从 0.48 m/min 开始，以 0.06 m/min 的差值依次递减，直到 0.24 m/min，选择送丝速度为 5 m/min、6 m/min、7 m/min。

2.1.2 实验结果

图 6 为不同工艺参数下的增材样品照片，当增材

扫描速度过小时，焊道塌陷程度随着送丝速度的增加而加剧。在增材扫描速度为 0.36 m/min 与 0.42 m/min 时，焊道成形基本良好，增材扫描速度和送丝速度过大则易引起蛇形焊道，甚至造成焊道不连续。

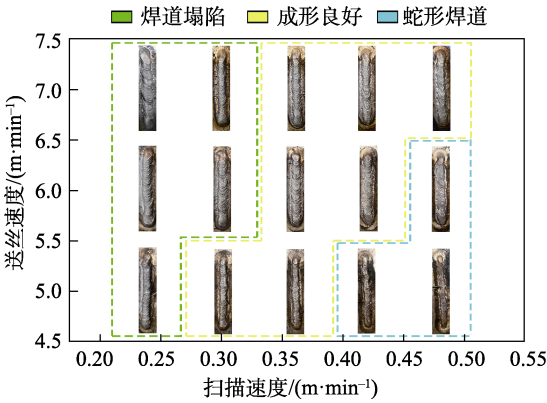


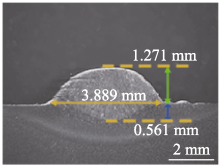
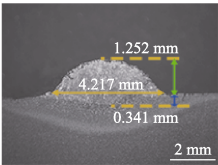
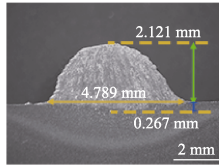
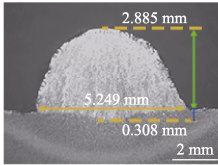
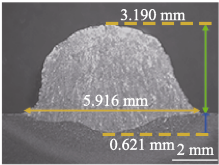
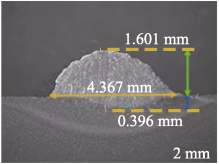
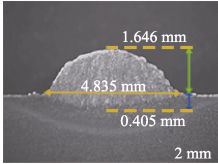
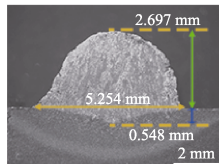
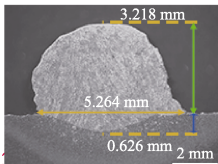
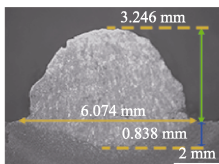
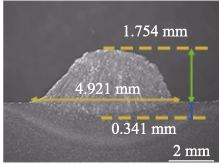
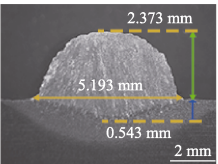
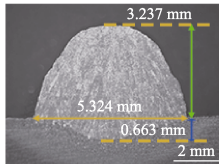
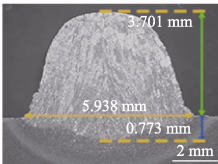
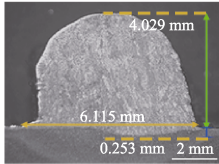
图 6 不同工艺参数增材样品宏观照片

电弧增材制造通过单一焊道逐一累加成形金属零件，零件的成形精度与单道焊的成形状态有着密切关系。为了方便研究单道单层的形貌特性，将截面形貌参数量化为熔宽和余高。熔宽影响单道单层焊的条数，进而影响增材的效率。而余高决定单层单道焊的厚度，进而影响增材的整体的高度。不同送丝速度、增材扫描速度的单道单层焊道截面见表 3，各组参数下的焊道成形均匀，未见气孔、裂纹等宏观缺陷，且熔合线清晰，表明在此工艺窗口内电弧增材过程稳定，冶金结合良好。

整理表 3 数据发现，送丝速度与增材扫描速度对熔宽和余高的影响呈线性关系，如图 7 所示。当增材扫描速度恒定时，送丝速度从 5.0 m/min 提升至 7.0 m/min，熔宽由 3.889 mm 增至 6.115 mm，余高由 1.252 mm 增至 4.029 mm，这主要是单位时间内熔敷金属量增加所致。当送丝速度为 7.0 m/min 时，样品边缘出现咬边缺陷，且飞溅现象更为显著，表明工艺稳定性有所下降。

增材扫描速度对样品成形的作用规律存在差异。增材扫描速度从 0.24 m/min 提升至 0.48 m/min 时，熔宽与余高的尺寸变化与送丝速度的变化相反，这是因为单位长度热输入减少导致熔池体积收缩^[14]。参数相关性分析显示，增材扫描速度与熔宽的相关性强于余高，推测余高受表面张力、熔池重力等附加力作用更为明显^[15]。在单道单层增材中，经计算筛选稀释率，其中成形良好以及稀释率在 5%~15%的参数组合为：增材扫描速度 0.36 m/min、送丝速度 6 m/min。该参数组合下获得了良好的成形质量，表明热输入与送丝速度达到了较佳的平衡，有效避免了过度堆积、塌陷、润湿不足等缺陷。

表 3 不同工艺参数焊道截面特征

送丝速度/(m·min ⁻¹)	扫描速度/(m·min ⁻¹)				
	0.48	0.42	0.36	0.30	0.24
0.5					
0.6					
0.7					

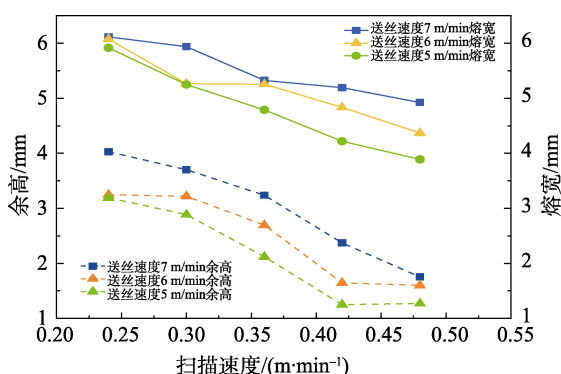


图 7 送丝速度、增材扫描速度对单层单道焊成形参数的影响规律

2.2 工艺验证

路径规划是电弧增材制造工艺研究中的关键工艺。尽管为实现特定成形目标而衍生出多种复杂的路径方案,但其基本形式通常可归纳为单道多层、多道单层以及针对特定几何形状的定制路径。

2.2.1 实验设计

在实验平台上开展典型的单道多层、多道单层增材实验,以及“NEPU”字母、圆柱件增材实验,增材扫描速度为 0.36 m/min、送丝速度为 6 m/min、电压为 22 V。设定焊枪逐层抬高,每道偏移距离不变,层间冷却时间设置为 2 min,以控制热输入并促进显微组织细化,从而获得成形良好、结构致密的增材构件。

2.2.2 实验结果

成形实验过程按照 1.3 所述,成形零件分别为单道多层件、单道多层件、NEPU 字母件、圆柱件,样

品照片见图 8,四种工艺成形件表面质量均良好。单道多层试样焊道平整、层间界限清晰;多道单层试样搭接紧密、表面均匀;NEPU 字母结构成形准确、轮廓清晰;圆柱件弧度平滑、层次均匀。切割后发现所有样品均不存在气孔、裂纹等缺陷,表明该工艺参数组合具有良好的成形能力与可靠性。

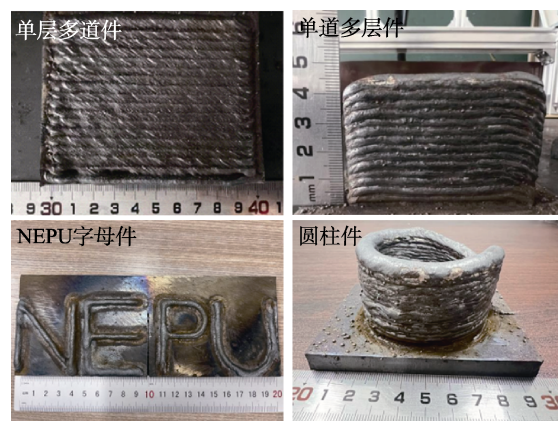


图 8 成形零件宏观照片

2.2.3 微观结构研究

利用光学显微镜对成形最好的单道单层样品截面微观形貌进行分析,如图 9 所示,样品未观察到微裂纹、孔隙等微观缺陷。样品显微组织为先共析铁素体、针状铁素体、贝氏体以及珠光体混合组织。由于样品成分与母材接近且碳含量很低,保护气氛中的 CO₂ 属于氧化性气氛,促进样品中非金属复合氧化物形成,诱发针状铁素体形成^[16]。

对比样品截面顶部、中部、底部的金相组织,其特点主要受各区域特定的热循环与成分偏析共同控制。样品截面底部区域紧邻基板,尽管峰值温度最高导致原奥氏体晶粒粗大,但由于基板的强淬冷效应使其经历了最快的冷却过程,一方面在高温阶段促使粗大奥氏体晶界优先析出先共析铁素体,另一方面极高的冷却速度又将剩余奥氏体过冷至中温区间,从而形成了以先共析铁素体为骨架、晶内分布针状铁素体乃至贝氏体的混合组织。样品截面中部区域则受益于适

中的冷却速度与相对均匀的化学成分,热动力学条件最为适宜,奥氏体有充分时间在晶内大量弥散分布的夹杂物表面形核,生长为相互交错的针状铁素体。样品截面顶部区域作为熔池最终凝固部位,遵循选分结晶规律,碳及杂质元素在此严重富集,导致局部碳当量显著升高,这种成分变化提高了该区域的珠光体转变倾向,即便其冷却速度较快,组织仍以从晶界向内生长的侧板条铁素体和晶间的珠光体为主,凸显了宏观偏析对组织类型的决定性影响。

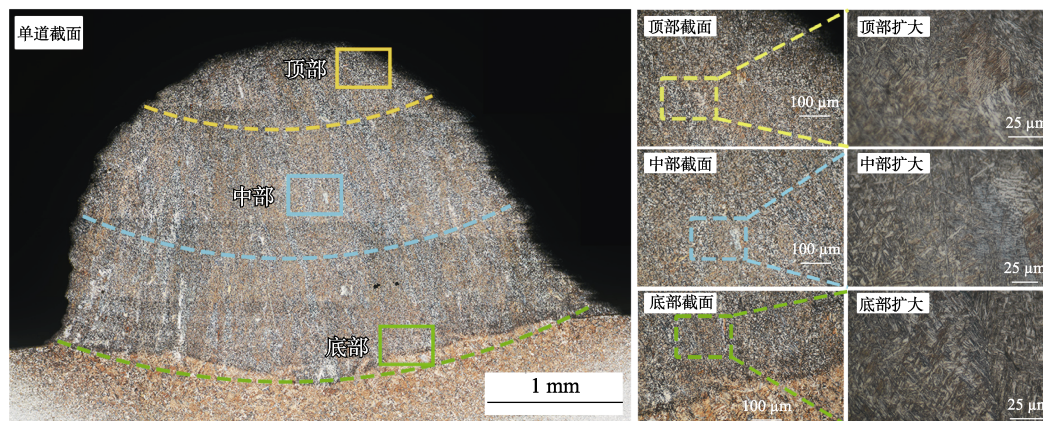


图9 单道单层不同区域微观组织图

3 结语

本文构建的电弧增材制造实验平台具有良好的可定制性与可扩展性,能够针对特定工艺需求灵活适配。在确保构件稳定性的前提下降低了设备成本,具备桌面化、易操作及便于教学等特性,适用于高校实验室和初创研发团队。实验平台不仅可作为实践教学与科学研究的创新平台,还为先进增材制造技术的推广提供关键支持。

参考文献 (References)

- [1] 李岩, 苏辰, 张冀翔. 电弧熔丝增材制造综述: 物理过程、研究现状、应用情况及发展趋势[J]. 焊接, 2020(9): 31-37.
LI Y, SU C, ZHANG J X. A review of wire arc additive manufacturing from aspects of physical process, research status, application situation and development trend[J]. Welding & Joining, 2020(9): 31-37. (in Chinese)
- [2] 陈勇强, 赵征, 庞博文, 等. 基于数字孪生的教研一体化电弧增材制造实验平台设计[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(10): 60-64.
CHEN Y Q, ZHAO Z, PANG B W, et al. Construction of teaching-research integrated wire arc additive manufacturing experimental platform based on digital twin[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2024, 43(10): 60-64. (in Chinese)
- [3] 余盈燕, 邓和平, 黎燕, 等. 航空航天用电弧熔丝增材制造研究综述[J]. 大型铸锻件, 2022(6): 7-14, 34.
YU Y Y, DENG H P, LI Y, et al. Review on wire and arc additive manufacturing for aerospace[J]. Heavy Casting and Forging, 2022(6): 7-14, 34. (in Chinese)
- [4] 韩智, 陈瑞, 王宇, 等. 电弧熔丝增材制造技术研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(11): 1381-1386.
HAN Z, CHEN R, WANG Y, et al. Research progress in wire and arc additive manufacturing[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(11): 1381-1386. (in Chinese)
- [5] NAVARRO M, MATAR A, DILTEMIZ S F, et al. Development of a low-cost wire arc additive manufacturing system[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2021, 6(1): 3.
- [6] KHAUDAIR H J, UGLA A A, ALMUSAWI A R J. Design, integrating and controlling of Mig-based shaped metal deposition system with externally cold wire feed in additive layered manufacturing technology[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46(3): 2677-2690.
- [7] ARTHUR N J R S, LIU L, OLIVEIRA J P. Design and development of open-source, multi-purpose wire arc additive manufacturing machine[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 138(9-10): 4337-4356.
- [8] 胡天林, 李继芳, 罗锦才, 等. 基于 Arduino 的机器人实训平台设计[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(12): 108-111, 117.
HU T L, LI J F, LUO J C, et al. Design of practical training platform of mobile robot based on Arduino[J]. Experimental Technology and Management, 2020, 37(12): 108-111, 117. (in Chinese)
- [9] 刘子奇, 赵俊鹏, 柳祥, 等. 基于 Arduino 的激光雕刻机研究[J]. 山东化工, 2021, 50(13): 137-139.
LIU Z Q, ZHAO J P, LIU X, et al. Research on laser engraving machine based on Arduino[J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(13): 137-139. (in Chinese)
- [10] 李钰斌, 何伟锋, 黄敏桩, 等. 基于 Arduino Mega2560 单片机的智能物料运输车设计[J]. 机电工程技术, 2024, 53(2): 146-150.

- LI Y C, HE W F, HUANG M Z, et al. Design of intelligent material transport vehicle based on Arduino Mega2560 microcontroller [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2024, 53(2): 146–150. (in Chinese)
- [11] 马驰, 刘永红, 纪仁杰, 等. 电弧增材制造综述: 技术流派与展望[J]. *电加工与模具*, 2020(4): 1–11.
- MA C, LIU Y H, JI R J, et al. Review of wire and arc additive manufacturing: Technology genre and prospect[J]. *Electromachining & Mould*, 2020(4): 1–11. (in Chinese)
- [12] LIU G F, ZHOU S H, LIN P Y, et al. Analysis of microstructure, mechanical properties, and wear performance of NiTi alloy fabricated by cold metal transfer based wire arc additive manufacturing[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 20: 246–259.
- [13] 林甲宁, 李振, 吴震宇, 等. 数控三轴运动控制实验平台设计[J]. *装备制造技术*, 2021(10): 124–127.
- LIN J N, LI Z, WU Z Y, et al. CNC triaxial motion control experimental platform[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2021(10): 124–127. (in Chinese)
- [14] MADESH R, KUMAR K G. Multi-layer additive manufacturing on nickel-based superalloy by optimization of pulsed mode process parameters of single-layer bead geometry[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 37: 107463.
- [15] 张金田, 王杏华, 王涛, 等. 电弧增材制造单道单层工艺特性研究[J]. *材料导报*, 2020, 34(24): 24132–24137.
- ZHANG J T, WANG X H, WANG T, et al. Study on the processing characteristics of single-bead and single-layer in the WAAM[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(24): 24132–24137. (in Chinese)
- [16] 王亮, 付娟, 赵勇, 等. 不同焊丝对低合金钢焊接接头组织及性能的影响[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 38(3): 30–34.
- WANG L, FU J, ZHAO Y, et al. Effect of different welding wires on microstructure and properties of low-alloy steel welding joints [J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 38(3): 30–34. (in Chinese)

Development and application of arc additive manufacturing experimental platform integrating GTAW and GMAW

LI Yongcun, LIU Zeguo, ZHANG Jiabao, WANG Yong

(School of Mechanical Science and Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: [Objective] Wire arc additive manufacturing (WAAM) is a pivotal technology within the “Made in China 2025” strategy. Compared with laser/electron beam-based additive manufacturing methods, WAAM is characterized by superior deposition efficiency and material utilization. Despite its industrial potential in manufacturing medium-to-large metal components, widespread adoption in academic research and small-to-medium enterprises is currently constrained by the prohibitive costs and closed-source architectures of commercial systems. Conversely, existing low-cost open-source platforms often fail to meet necessary standards for motion control precision, forming stability, and system extensibility, particularly regarding the integration of multiple welding processes. To bridge this gap and provide a robust tool for process validation and engineering education, this study employed an open-source control architecture to design and construct a cost-effective, desktop-level experimental platform integrating gas tungsten arc welding (GTAW) and gas metal arc welding (GMAW) processes. [Methods] The experimental platform was developed using a modular, open-source architecture featuring a moving gantry three-axis mechanical structure. Thereafter, GTAW and GMAW torches were integrated onto the Z-axis to optimize cost and spatial efficiency. High-torque 86×80 stepper motors ($4.5 \text{ N} \cdot \text{m}$) powered by high-subdivision drivers and ball screw transmission were selected to ensure positioning precision and structural rigidity. The control system adopts a master-slave configuration, where a personal computer generates G-code trajectories and an Arduino Uno running Grbl firmware executes real-time motion control, thereby synchronizing arc ignition/extinction (M8/M9 commands) and gas supply via relay modules. To mitigate oxidation during local shielding, a novel dual-path gas system integrating standard torch delivery with a micropore supply embedded within the base fixture was designed. Single-bead deposition experiments using Q345B steel substrates and an ER50-6 wire were conducted to systematically investigate the effects of travel speed (0.24–0.48 m/min) and wire feed speed (5.0–7.0 m/min) on bead geometry and forming quality. [Results] Experimental analysis revealed a distinct linear correlation between the process parameters and bead geometry. Specifically, increasing the wire feed speed from 5.0 to 7.0 m/min significantly expanded the bead from 3.889 to 6.115 mm and increased reinforcement from 1.252 to 4.029 mm, driven by the enhanced deposition rate. However, excessive wire feed speed (7.0 m/min) compromised stability, causing severe spatter and undercutting, while excessive travel speed induced snake-like defects and discontinuity. Travel and wire feed speeds of 0.36 and 6.0 m/min, respectively, were identified as the optimal parameter combinations. This setting achieved a dilution rate of 5%–15%, facilitating the fabrication of complex structures such as single-bead multilayer walls without macroscopic defects. Microstructural analysis confirmed the presence of a matrix of proeutectoid ferrite, acicular ferrite, bainite, and pearlite. Notably, regional variations were also observed: the bottom zone featured coarse grains due to substrate quenching, the middle zone formed interlaced acicular ferrite under moderate cooling, and the top zone contained side-plate ferrite and pearlite induced by solute enrichment. [Conclusions] The developed platform successfully integrated GTAW and GMAW processes within a low-cost, open-source framework, achieving a balance between cost-effectiveness and control precision. By enabling the fabrication of well-formed metal components with excellent microstructures, the platform demonstrated its viability as a versatile and economical solution for WAAM process exploration, educational demonstrations, and fundamental research in universities and research institutions.

Key words: wire arc additive manufacturing; gas tungsten arc welding; gas metal arc welding; experimental platform; Arduino

(编辑: 孙浩)