

引用格式: 郑元翮, 彭司弋, 王协彬, 等. 钛合金栅格薄壁结构电弧熔丝增材制造路径规划与应力控制[J]. 航空材料学报, 2026, 46(1): 41-50.
ZHENG Yuanxuan, PENG Siyi, WANG Xiebin, et al. Deposition path planning and stress control for gridding thin-walled titanium alloy parts fabricated by wire-arc additive manufacturing[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2026, 46(1): 41-50.

钛合金栅格薄壁结构电弧熔丝增材制造 路径规划与应力控制

郑元翮¹, 彭司弋^{1,2}, 王协彬^{3,4}, 郭跃岭^{1*}, 吕忠利⁴, 刘长猛¹

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 蓝箭航天科技股份有限公司 动力工程部, 北京 100176; 3. 山东大学 材料科学与工程学院, 济南 250061; 4. 山东创瑞激光科技有限公司, 山东 烟台 265503)

摘要: 电弧熔丝增材制造(wire-arc additive manufacturing, WAAM)以金属丝材为填充材料、电弧为热源, 在大型复杂构件制造中具有显著优势, 但存在制备周期长, 路径规划复杂及残余应力显著等问题。针对电弧熔丝增材制造制备复杂结构件时, 不合理制备路径导致的残余应力集中与应变缺陷, 使用有限元仿真软件优化沉积路径, 并基于优化路径制备成形质量良好的栅格构件单元体。结果表明: 未优化路径冷却后, 薄壁处等效残余应力为 361 MPa, 节点处高达 666 MPa; 而优化路径冷却后薄壁处等效残余应力将至 206 MPa, 两节点处分别为 260、427 MPa。相较于未优化路径, 优化路径节点残余应力最大降幅 61%, 薄壁应力降幅 43%, 且节点与薄壁的应力差异显著降小, 残余应力诱发的形变与缺陷明显降低。采用优化路径制备的栅格构件单元体熔道结合紧密、成形质量好, 无明显残余应力变形, 验证了此优化路径在电弧熔丝增材制造栅格构件残余应力控制中的可行性。

关键词: 电弧熔丝增材制造; 钛合金构件; 有限元分析; 路径规划

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000172

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2025.000172

中图分类号: V252; TG44

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2026)01-0041-10

Deposition path planning and stress control for gridding thin-walled titanium alloy parts fabricated by wire-arc additive manufacturing

ZHENG Yuanxuan¹, PENG Siyi^{1,2}, WANG Xiebin^{3,4}, GUO Yueling^{1*}, LYU Zhongli⁴, LIU Changmeng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Power Engineering Department, Land Space Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China; 3. School of Materials Science & Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 4. Shan Dong Charm Ray Laser Technology Co., Ltd., Yantai 265503, Shandong, China)

Abstract: Wire-arc additive manufacturing (WAMM) is an emerging manufacturing technology that employs metal wire as the raw material and arc as the heat source. It offers advantages in fabricating large and complex parts. Nevertheless, it still faces challenges, including prolonged fabrication cycles, intricate path planning, and substantial residual stress. In this study, we explore the optimization of the manufacturing path for wire-arc additive manufacturing when fabricating complex structural components, aiming to mitigate the significant residual stress and strain induced by suboptimal manufacturing paths. Finite element software is utilized to optimize the manufacturing path, and a unit body of a grid component with excellent forming quality has been successfully produced using the optimized path. Through finite element analysis, it can be revealed that for the unoptimized path, the equivalent residual stress at the thin-wall after cooling reaches 361 MPa, while that at the nodes after cooling is 666 MPa. In contrast, for the optimized path, the equivalent residual stress at the thin-wall after cooling is 206 MPa, and the equivalent residual stresses at two nodes after cooling are 260 MPa and 427 MPa, respectively. Compared to the unoptimized path, the optimized path leads to a 61% reduction in

residual stress at the nodes and a 43% decrease in stress at the thin-wall. Moreover, the difference in residual stress between the nodes and the thin-wall is smaller than that of the unoptimized path, resulting in less deformation and fewer defects caused by residual stress. The grid component unit body fabricated using the optimized path exhibits well-combined melt tracks and superior forming quality, with no discernible residual stress deformation. This effectively validates the feasibility of the optimized path in controlling residual stress during the wire-arc additive manufacturing of grid components.

Key words: wire arc additive manufacturing; titanium alloy part; finite element analysis; path planning

钛合金凭借高强度、优异的耐腐蚀性和耐高温特性^[1-2],能够承受各种环境载荷,并在受到冲击或突然外力作用下避免脆性断裂,保障服役过程结构完整性^[3]。其中,TA15 是近 α 型钛合金,具有高强度、良好热稳定性及焊接性能^[4-5],广泛应用于航空航天领域。传统制造技术(切削、铸造、锻造等)制备复杂钛合金构件时,存在加工周期长^[6]、加工过程复杂、材料利用率低^[7]等问题。增材制造技术(additive manufacturing, AM)凭借高灵活性和高材料利用率^[8]成为航空航天^[9]、汽车工业^[10]和海工装备^[11]等领域复杂结构件高效制造的理想方案。电弧熔丝增材制造(wire-arc additive manufacturing, WAAM)作为增材制造技术的重要分支,具有低成本、可连续成形等优势,已成功应用于镁合金^[12]、铝铜合金^[13]、钛合金^[14]等大尺寸构件制造。

然而,WAAM 制造大尺寸钛合金复杂结构件时,热源长时间作用于已沉积层与基板,热输入引发的热应力及冷却后的残余应力易导致构件形变甚至开裂^[15-16],影响构件成形质量。尤其当构件含多个交叉节点时,热源多次作用于交叉节点会造成节点处应力升高,此处应力远高于其他区域的残余应力,诱发节点处变形。因此,需通过合理的路径规划^[17-18],避免同一堆积层中单个节点短时间内反复承受热输入。现有路径规划模拟研究已取得一些进展:Liu 等^[19]通过 ANSYS 软件模拟 TC4 钛合金增材制造路径,发现往复双向扫描路径较单向扫描路径能有效减少热积累变形;Amal 等^[20]使用有限元软件模拟二段栅格式、锯齿状与螺旋形式、栅格式、锯齿式和螺旋式 5 种增材路径的残余应力与变形情况,单层构件采用螺旋式路径和栅格式路径时,温度变化最小,残余应力和总变形最优;Kelly 等^[21]研究 5183 铝合金 WAAM 增材制造的转点路径规划问题,发现较直接 90°偏转和 70°偏转,连续 2 次 45°偏转,偏移量为 1 个熔道宽可最小化孔隙率,零件成形质量最佳。

栅格结构是航空航天领域的重要结构形式^[22],广泛用于飞机机身、机翼与火箭壳体^[23]。大尺寸

栅格状构件含大量直角转点,路径合理性直接决定成形质量。本工作以 TA15 钛合金大尺寸栅格构件 WAAM 制备为切入点,通过校准后的有限元仿真,提出适用于栅格构件单元体的 WAAM 路径,减少节点热输入次数与应力集中与变形;结合实验制备验证路径可行性,揭示其成形机理。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

采用电弧熔丝增材制造制备 TA15 钛合金栅格构件,选用直径 1.2 mm 的 TA15 钛合金焊丝,其化学成分如表 1 所示;基板尺寸为 250 mm×250 mm×15 mm。定义工件坐标系:原点为路径起始点,Z 轴垂直于基板向上,XOY 平面与基板重合,X、Y、Z 轴满足笛卡尔坐标系,且机床坐标系与工件坐标系一致。

表 1 TA15 焊丝的实际化学成分(质量分数/%)
Table 1 Chemical composition of TA15 welding wire
(mass fraction/%)

Ti	Al	Zr	V	Mo	Ta	Nb
Bal.	6.69	2.14	2.11	1.65	<0.01	<0.01

1.2 实验方法

1.2.1 制造方法与设备

采用北京理工大学自主研发的多丝共熔增材制造设备(图 1)制备试样,设备由三轴数控机床、钨极氩弧焊系统、多送丝装置、热丝电源、控制系统、氩气保护系统及高温电弧追踪相机组成,搭载 4 台送丝机和 4 台热丝电源,可实现单丝至四丝协同沉积。三轴数控机床由立式龙门数控加工中心改造(运动主轴 Z 轴更换为钨极氩弧焊枪),重复定位精度±0.01 mm,具有 X、Y、Z 三轴自由度,最大成形尺寸(长×宽×高)1800 mm×1500 mm×2000 mm,通过 G 代码控制焊枪按预设路径逐层沉积。

热源系统包括焊机与热丝机。焊机是 WSME-500 逆变式多功能弧焊电源,输入电源为三相 380 V/

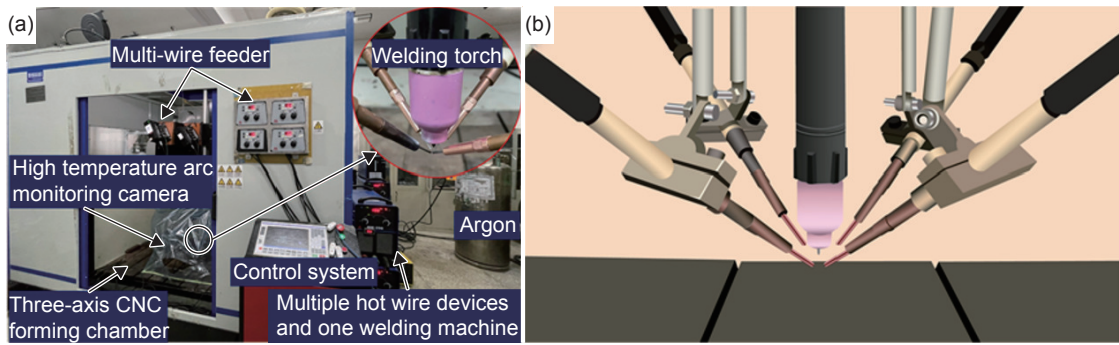


图 1 多丝电弧增材制造设备 (a)实物图;(b)多丝成形装置示意图

Fig. 1 Multi-wire WAAM process device (a) image of the device; (b) schematic diagram of multi-wire fabricated

50 Hz 交流电,最大输出电流为 500 A,电源工作程序如图 2(a)所示。起弧时电流经爬升阶段至焊接电流,结束时电流先衰减,熄弧完成沉积过程。焊接电流为脉冲直流式,存在基值和峰值,基值电流熔化丝材,峰值电流使熔池均匀成形。热丝电源设备是奥太 HW-200 逆变式多功能热丝电源,输入三相 380 V/50 Hz 交流电,最大热丝电流 400 A。实验设备搭载 4 组热丝电源,其正极分别连接送丝机构,负极共同连接基板,丝材尖端接触沉积层或基板时形成电流回路,电流通过焦耳热加热丝材,热丝电源工作原理见图 2(b)。

TA15 钛合金高温易氧化,实验在 99% 纯度氩气保护下进行,确保沉积过程全程处于惰性氛围。栅格构件制备仅启用 1 组送丝机构。

1.2.2 数值模拟方法

钛合金薄壁复杂结构件制备存在多种路径,不同路径热源经过某固定点次数存在差异,造成构件残余应力分布不均匀,需在制备栅格样件之前,对路径的成形效果和热积累、应力及应变特点进行路径测试实验和仿真研究。实验时使用校准后的红外测温仪对沉积点进行测温,用得到的温度曲线校准有限元(finite element simulation, FEM)模型,以

确保仿真模拟的准确性。

采用 Ansys 有限元模拟软件模拟电弧增材制造“井”字形构件热力耦合,具体细节如下。模型构建:基板 250 mm×250 mm×15 mm,沉积层 8 mm,共 10 层,设计未优化和优化两种路径(图 3),未优化路径为非连续性路径,热源先沿着 Y 轴沉积薄壁,再沿 X 轴沉积;优化路径为两道连续性路径,此路径沿着节点 1 经过的对角线将零件二等分,优化路径为连续的“8”字形路径,热源先后沿着两个连续的“8”字路径移动。沉积层和基板均采用 TA15 钛合金,基于表 1 成分,通过 Ansys 材料库拟合不同温度下的热物性参数(表 2)。网格划分:基板采用 10 mm 网格,沉积层采用 2 mm 的网格;模拟涵盖沉积及冷却阶段,冷却时间 1600 s,并且将低温氩气强制对流换热和基板-机床热传导导入到该模型。热源模型:目前已知模拟热源模型有 Rosenthal 解析、平面高斯热源和 Goldak 双椭球热源模型^[24-25]。Rosenthal 解析模型不能准确反映熔池及热影响区温度分布,平面高斯热源在三维空间具有局限性,选择与实际电弧热源形貌最为接近的 Goldak 双椭球热源模型^[14];该热源由前后两个不同的四分之一椭球组成,如图 4 所示。双椭球热源

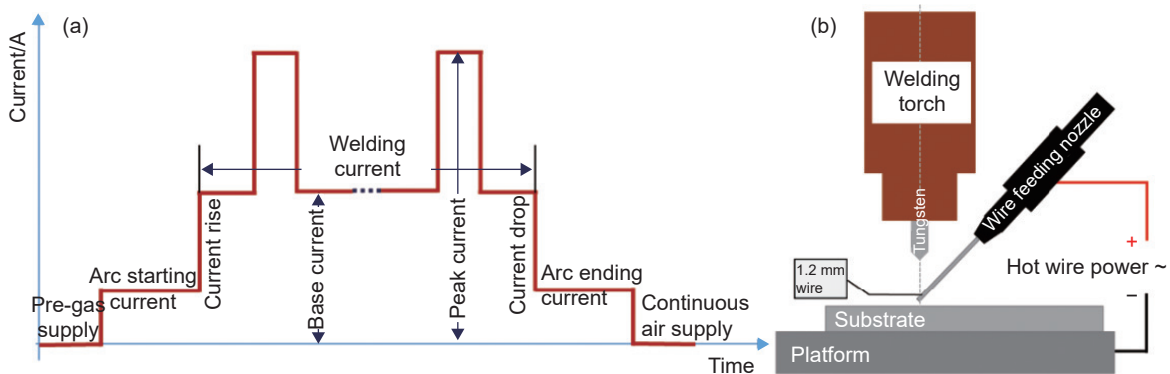


图 2 焊机脉冲电流工作程序(a)和热丝电流工作原理图(b)

Fig. 2 Procedure of welding machine pulse current (a) and schematic diagram of hot wire current operation (b)

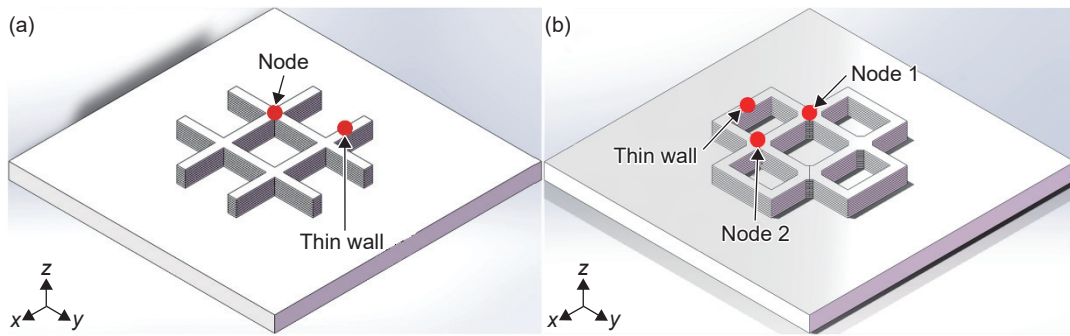


图3 有限元模拟建模 (a)未优化路径;(b)优化路径

Fig. 3 Modeling of finite element simulation (a) unoptimized process path; (b) optimized process path

表2 TA15 钛合金模拟材料参数

Table 2 Material parameters of TA15 alloy in FEM simulation

Type	Value
Melting point/°C	1600
Density/(kg · m ⁻³)	4405(20 °C), 3850(1800 °C), 3700(2500 °C)
Coefficient of thermal expansion/°C ⁻¹	8.5×10 ⁻⁶ (20 °C)-1.2×10 ⁻⁵ (2500 °C)
Young's modulus/GPa	110(20 °C)-0.9(2000 °C and above)
Poisson's ratio	0.32(20 °C)-0.42(2000 °C and above)
Yield strength/MPa	1000(20 °C)-20(2000 °C and above)
Thermal conductivity of X&Y/(W · m ⁻¹ · °C ⁻¹)	8.0(20 °C), 10.0(800 °C), 35.0(2000 °C and above)
Thermal conductivity of Z/(W · m ⁻¹ · °C ⁻¹)	7.0(20 °C), 15.5(800 °C), 33.0(2000 °C and above)
Specific heat capacity/(J · kg ⁻¹ · °C ⁻¹)	580(20 °C)-830(2500 °C)

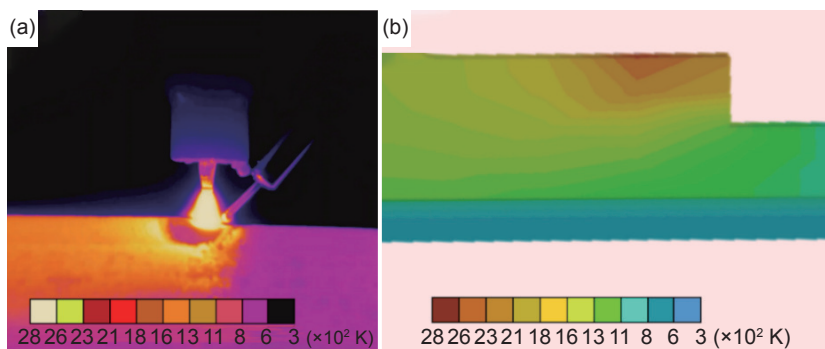


图4 Goldak 双椭球热源模型 (a)红外测温仪温度云图;(b)有限元热源模型温度分布

Fig. 4 Goldak double-ellipsoid heat source model (a) temperature distribution of infrared thermometer; (b) temperature distribution of the heat source of finite element simulation

模型的前后两部分椭球有着不同的表达式,沿焊枪移动方向的前四分之一椭球内热源分布采用式(1)表示,后四分之一椭球热源分布采用式(2)表示:

$$q_f = \frac{6\sqrt{3}q_f f_f}{\pi a_f b c \sqrt{\pi}} \exp\left(-3\left[\frac{x^2}{a_f^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right]\right) \quad (1)$$

$$q_r = \frac{6\sqrt{3}q_r f_r}{\pi a_r b c \sqrt{\pi}} \exp\left(-3\left[\frac{x^2}{a_r^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right]\right) \quad (2)$$

式中: q_f 、 q_r 分别为前后半椭球的热流密度; q 为总热流密度; f_f 、 f_r 分别为前后椭球能量分配系数且满足 $f_f + f_r = 2$ ^[26], 本次仿真采用能量分配系数 $f_f = 0.6$, $f_r = 1.4$ ^[27]; a_f 、 a_r 为前后椭球半轴长度; b 、 c 为前后椭球宽度和深度, 两椭球宽度深度一样, 取相同值; x 、 y 、 z 为椭球对应坐标系中 x 、 y 、 z 轴坐标位置参数。

为保证仿真准确性, 采用 GThermalIR1.2.1.0 红外测温仪校准有限元模型(图5), 由图5可知: 校

准后红外云图与有限元热源温度分布和数值基本一致, 热源正下方的熔池温度在 2800 K 左右, 热源附近热影响区温度在 1800~2600 K 之间, 热影响区外侧沉积区域在 300~1300 K 之间, 验证了模型可靠性。

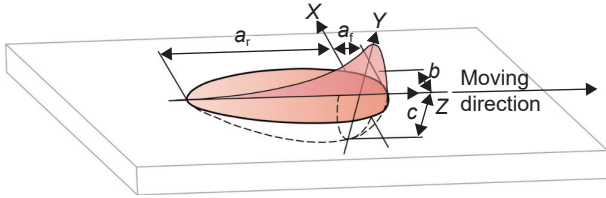


图 5 红外测温仪校准
Fig. 5 Calibration by infrared thermometer

2 栅格薄壁结构件路径规划与数值模拟结果

2.1 栅格构件路径规划

栅格结构可拆分为多个“井”字形单元体(图 6), 每个单元体含 4 个交叉点。电弧熔丝增材制造时, 直接采用交叉路径, 热源多次作用于交叉点, 丝材在此重复熔融, 会导致成形质量差、残余应

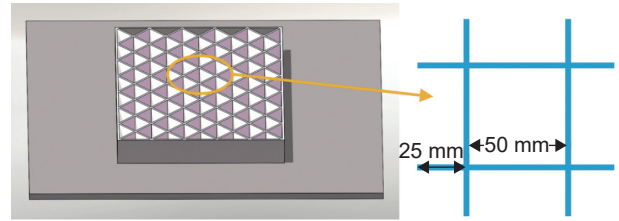


图 6 “井”字形构件尺寸
Fig. 6 Dimensions of the “#” shape component

力高。为保证成形质量, 降低残余应力和应变, 设计两种沉积路径, 即未优化交叉路径和优化路径(图 7)。图 7(a)为未优化路径示意图, 非连续路径, 实线为沉积路径, 虚线为机床空走路径, 数字代表沉积顺序, 空走路径不起弧、不送丝, 每层起弧 4 次, 节点处直接搭接, 该路径在节点处作用 2 次, 该处高度增加; 图 7(b)为优化路径示意图, 实线为沉积路径, 虚线为空走路径, 圆点为起弧和熄弧点, 交错搭接路径, 奇数层和偶数层路径方向互补; 每层起弧 2 次, 搭接处沿 135°方向偏移 $h\sqrt{2}$ (h 为熔道宽度), 避免节点处材料冗余与热积累, 减少未熔合、坍塌等缺陷。

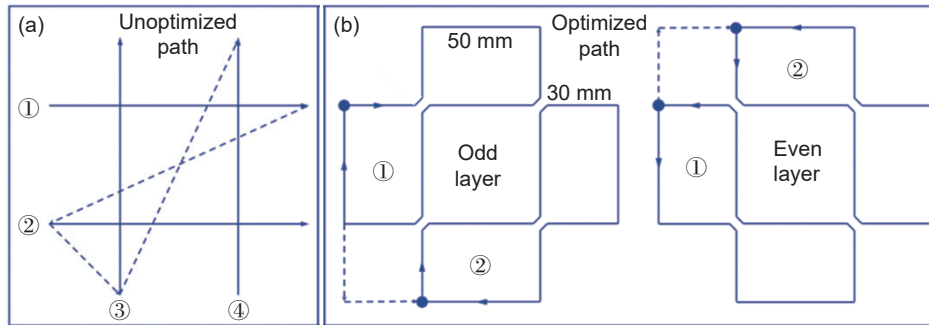


图 7 未优化路径(a)和优化路径(b)
Fig. 7 Unoptimized path (a) and optimized path (b)

2.2 残余应力数值模拟

通过 Ansys 软件得到两种路径温度场、应力场和变形场(图 8)。图 8(a-1)、(a-2)为未优化和优化路径温度场, 由图可知: 1600 s 冷却后, 两种路径温度场均呈轴对称分布, 沉积层温度降至 130 °C 左右; 冷氩气强制对流使沉积层温度较基板低 50 °C 左右, 传热路径为沉积层→基板→机床。图 8(b-1)、(b-2)为未优化和优化路径应力场, 由图可知: 未优化路径节点处应力显著高于熔道末端; 优化路径应力分布更均匀。图 8(c-1)、(c-2)为未优化和优化路径变形场, 由图可知: 未优化路径每一道路径结束处位移较大, 最大变形(约 0.3 mm)出现在基板与第一层熔道连接处; 优化路径因熔道连

贯, 变形大致均匀分布于整个构件。

按图 3 标注的位置, 测温度及等效应力随着时间的变化。图 9(a-1)为未优化路径温度变化曲线, 可以看出沉积过程薄壁和节点处最高温度分别为 $T_{W, \max} = 2689 \text{ K}$, $T_{N, \max} = 2674 \text{ K}$, 高于 TA15 熔点 $T_{\text{melt}}(1878 \text{ K})$ 。图 9(a-2)为未优化路径等效应力变化曲线, 可以看出沉积过程薄壁处最大等效应力 $\sigma_{W, \max} = 803 \text{ MPa}$, 冷却后等效残余应力 $\sigma_{W, \max} = 361 \text{ MPa}$; 节点最大等效应力 $\sigma_{N, \max} = 1100 \text{ MPa}$, 冷却后等效残余应力 $\sigma_{N, \text{end}} = 666 \text{ MPa}$, 节点应力显著高于薄壁。图 9(b-1)为优化路径温度变化曲线, 可以看出薄壁最高温度 $T_{W, \max} = 2650 \text{ K}$, 节点 1、2 最高温度分别为 $T_{N1, \max} =$

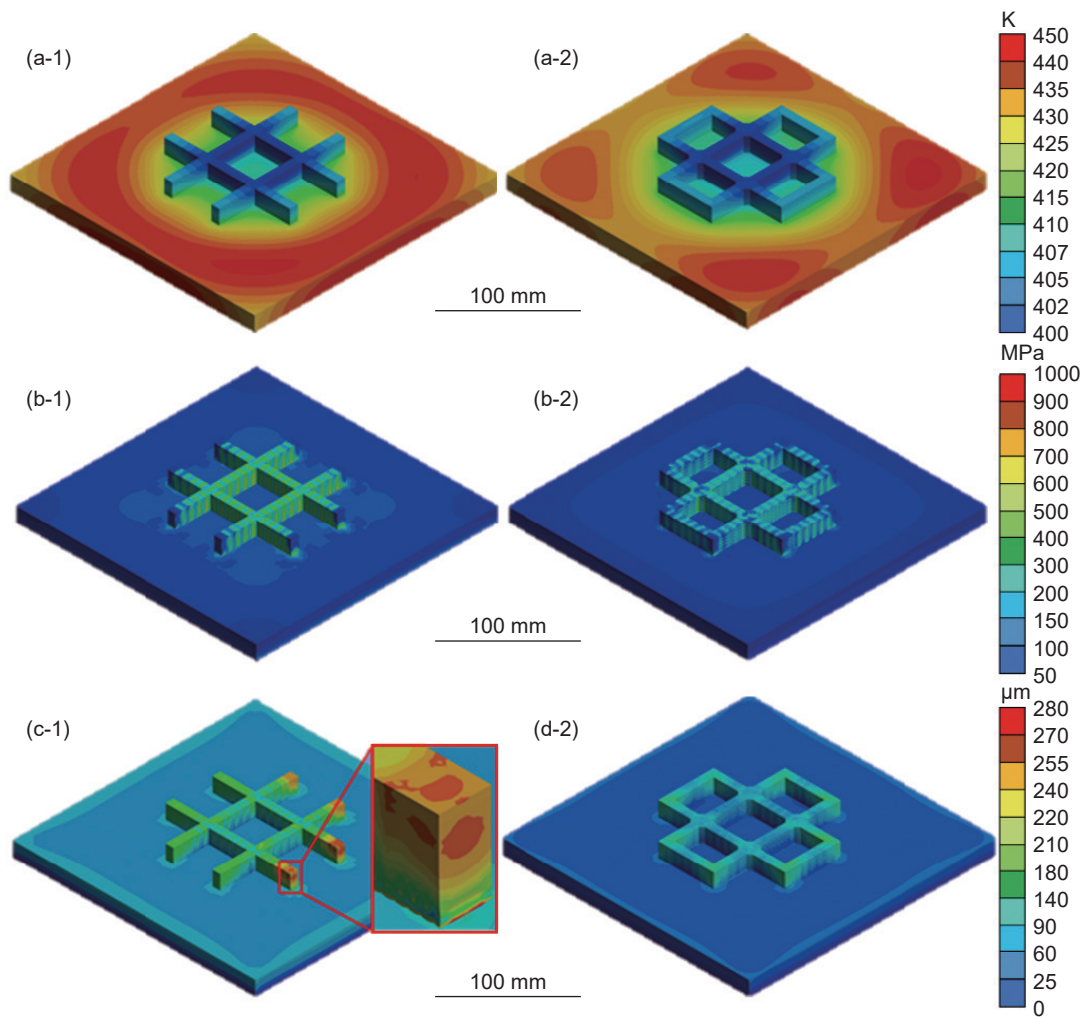


图8 有限元模拟云图 (a)温度场;(b)应力场;(c)变形场;(1)未优化路径;(2)优化路径

Fig. 8 Distribution maps of finite element simulation (a) temperature distribution; (b) stress distribution; (c) distortion distribution; (1) unoptimized path; (2) optimized path

2578 K 和 $T_{N2, \max} = 2409$ K, 均高于 TA15 的熔点 $T_{\text{melt}} = 1878$ K。图 9(b-2)为优化路径等效应力变化曲线, 可以看出沉积过程薄壁处最大等效应力 $\sigma_{W, \max} = 436$ MPa, 冷却后等效残余应力 $\sigma_{W, \text{end}} = 206$ MPa; 节点 1、2 最大等效应力分别为 $\sigma_{N1, \max} = 499$ MPa、 $\sigma_{N2, \max} = 594$ MPa, 冷却后等效残余应力分别为 $\sigma_{N1, \text{end}} = 260$ MPa、 $\sigma_{N2, \text{end}} = 427$ MPa, 节点应力仍高于薄壁, 但整体应力水平显著低于未优化路径。对比可知, 优化路径通过减少节点热积累, 可有效降低应力与应力集中, 验证了路径优化的有效性。

3 钛合金栅格构件工艺制造验证与成形机理

3.1 栅格构件工艺验证

基于仿真优化路径, 采用如下工艺参数制备

TA15 钛合金“井”字形构件: 电弧热输入参数(峰值电流 260 A, 基值电流 40 A, 占空比 30%, 脉冲频率 1.8 Hz), 热丝电流(120 A、频率 200 Hz), 送丝速度 0.8~1.3 m/min, 扫描速度 200 mm/min, 层高 1.5 mm。制备的“井”字形构件总高 74 mm, 宽 130 mm, 熔道宽度 6~8 mm, 宏观形貌如图 10 所示: 轮廓线条流畅, 节点处过渡平滑自然, 拐角处熔道结合紧密, 无隆起或未搭接现象; 层间纹路清晰, 高度方向尺寸均匀, 无明显裂纹及形变; 侧面熔覆道形貌显示层间结合紧密, 无明显宏观缺陷, 合金整体成形质量良好, 验证了优化路径的合理性。

3.2 栅格构件优化路径成形改善机理

有限元分析结果显示 TA15 钛合金栅格单元体构件在 WAAM 制备过程中熔池温度均维持在 2700 K 左右, 路径的选择对热源温度不产生影响^[28]。从图 9 可以看出, 热源经过节点时节点温度为 2700 K, 说明短时间内热源移动方向的变换不会

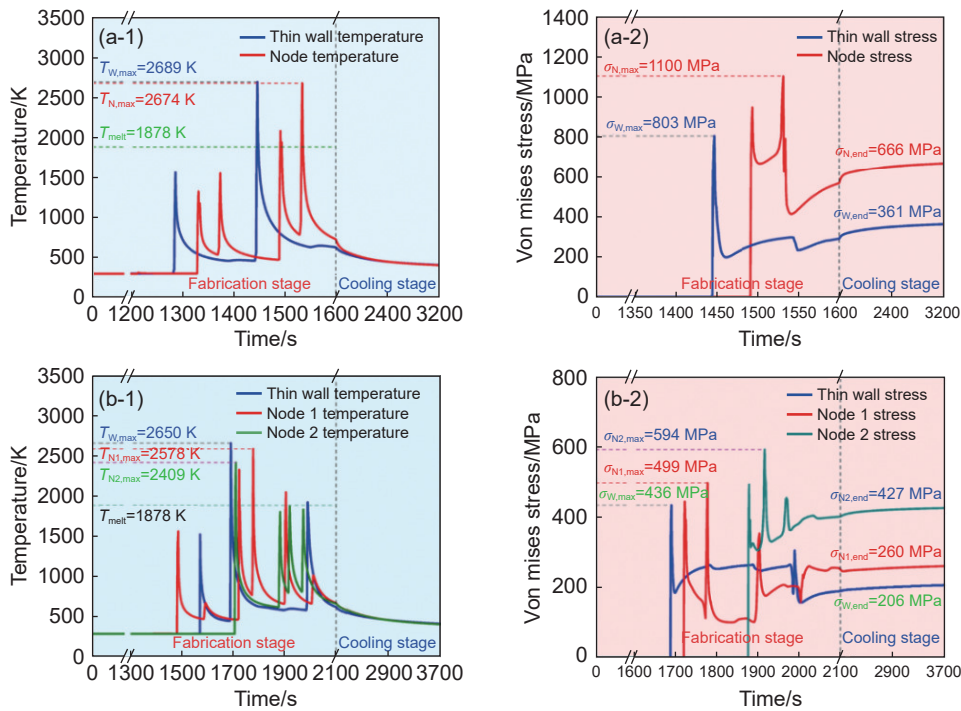


图 9 薄壁和节点处的温度曲线(1)以及应力曲线(2) (a)未优化路径;(b)优化路径

Fig. 9 Temperature curves (1) and stress curves (2) of thin-walls and nodes (a) unoptimized path; (b) optimized path

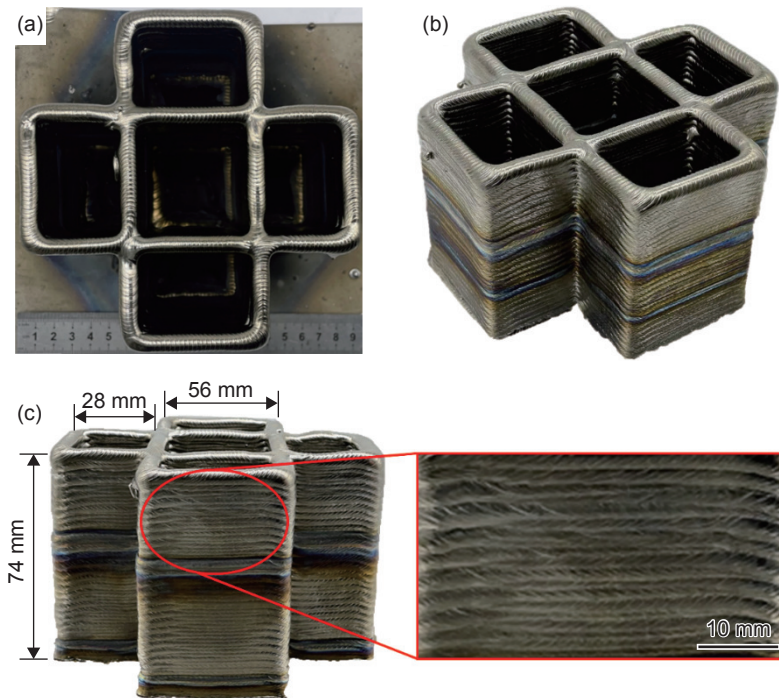


图 10 TA15 钛合金“井”字形构件宏观形貌 (a)俯视图;(b)轴视图;(c)侧面熔覆道形貌

Fig. 10 Macro morphology of the “#” shape TA15 component (a) top view; (b) axial view; (c) side morphology of the welding bead

造成节点处最大温度升高, 制备过程中热应力与单位时间内输入总热能量有关^[29]。“井”字单元体构件的制备工艺参数保持不变, 单位时间内输入热能相同, 只有历经热源输入能量次数不同, 因而节点处的热应力与残余应力集中只与单节点历经热

源输入热量次数有关。在同一种制备路径中, 节点处残余应力均大于薄壁处, 未优化路径节点处残余应力比薄壁处高 305 MPa, 优化路径两处节点残余应力比薄壁处分别高 54、221 MPa, 优于未优化路径, 制备的构件应力集中降低。未优化路径薄壁处

残余应力 361 MPa, 比优化路径的高 155 MPa, 导致未优化路径制备的栅格构件薄壁更易发生形变^[30], 其较大节点与薄壁残余应力的差异导致节点处应力集中与形变严重^[31-32]。

路径规划带来的温升点分离与偏移是减小变形的重要原因^[33]。两种制备路径同一堆积层中同一节点历经热输入的次数均为两次(图7)。未优化路径制备过程中, 热源沿着水平和垂直方向移动时, 同一堆积层的同一节点热源途径点完全重合, 导致节点温升次数是薄壁处的两倍, 且温升位置完全重合。完全重合的多次温升升高了节点处热输入, 加重了热应力^[34], 大应力导致大变形。优化路径制备过程中, 同一节点处温升次数也是薄壁的两倍, 但是温升位置点不重合, 两个温升点间距离为 $h/\sqrt{2}$ (h 为 TA15 电弧熔丝的熔道宽度)。不完全重合的温升位置带来小的热应力, 应力小形变也小, 成形质量更好^[35-36]。

4 结论

(1) 未优化路径“井”字形构件温度场呈轴对称分布, 沉积过程中薄壁和节点最高温度分别为 2689、2674 K; 冷却后薄壁处等效残余应力 361 MPa, 节点处 666 MPa, 节点处比薄壁处高 305 MPa, 存在显著应力集中和变形风险。

(2) 优化路径温度场同样呈轴对称分布薄壁处最高温度为 2650 K, 节点 1、2 最高温度分别为 2578、2409 K; 冷却后薄壁等效残余应力 206 MPa, 节点 1、2 处分别为 260、427 MPa, 节点与薄壁应力差值缩小至 54~221 MPa, 应力分布更为均匀。

(3) 有限元仿真与实验验证表明, 优化路径使节点残余应力最大降幅 61%, 薄壁应力降幅 43%, 残余应力诱发的形变和缺陷显著减少; 基于优化路径制备的 TA15 钛合金“井”字形构件熔道结合紧密, 无明显宏观缺陷, 成形质量良好。

参考文献:

- [1] LIANG Y J, TIAN X J, ZHU Y Y, et al. Compositional variation and microstructural evolution in laser additive manufactured Ti/Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V graded structural material[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 599: 242-246.
- [2] ZHANG F M, DU M L, FAN K W, et al. Fabrication and mechanical properties of network structured titanium alloy matrix composites reinforced with Ti₂AlC particles[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 776: 139065.
- [3] YANG Y Y, YAN S Y, QU S S, et al. Microstructure of titanium alloy in additive/subtractive hybrid manufacturing: a review[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1014: 178769.
- [4] NESTERENKOV V, AKHONIN S, KLOCHKOV I, et al. High cyclic fatigue behavior of 3D-printed titanium alloy TA15[J]. *Welding in the World*, 2025, 69(3): 717-725.
- [5] MOSALLANEJAD M H, ABDI A, KARPASAND F, et al. Additive manufacturing of titanium alloys: processability, properties, and applications[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2023, 25(24): 2301122.
- [6] WANG C, YANG Z Y, WANG Y W, et al. Effect of annealing treatment on the phase transformation and mechanical properties of TA15 alloy fabricated by WAAM[J]. *Intermetallics*, 2025, 177: 108590.
- [7] KOU F, HUANG X Q. Current research situation and prospect of wire and arc additive manufacturing of titanium alloy[J]. *Journal of Engineering System*, 2024, 2(2): 39-46.
- [8] JIANG J C. A survey of machine learning in additive manufacturing technologies[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2023, 36(9): 1258-1280.
- [9] BLAKEY-MILNER B, GRADL P, SNEDDEN G, et al. Metal additive manufacturing in aerospace: a review[J]. *Materials & Design*, 2021, 209: 110008.
- [10] BÖCKIN D, TILLMAN A M. Environmental assessment of additive manufacturing in the automotive industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 226: 977-987.
- [11] DABABNEH F, TAHERI H. Investigation of the influence of process interruption on mechanical properties of metal additive manufacturing parts[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2022, 38: 706-716.
- [12] 韩启飞, 狄兴隆, 郭跃岭, 等. 电弧熔丝增材制造 Mg/Mg 双金属的组织与力学性能[J]. *金属学报*, 2025, 61(2): 211-225.
- [13] 闫杨予, 胡锦龙, 韩启飞, 等. 热丝辅助电弧增材 Al-Cu-Mg-Ag 耐热铝合金组织与性能研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(11): 242-252.

YAN Y Y, HU J L, HAN Q F, et al. Microstructure and mechanical properties of Al-Cu-Mg-Ag alloy fabricated by hot-wire arc additive manufacturing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(11): 242-252.

- [14] 郑元翮, 韩启飞, 陈斌凌, 等. 镁合金倾斜薄壁电弧熔丝增材制造工艺与力学性能研究[J]. 材料工程, 2024, 52(7): 57-70.
ZHENG Y X, HAN Q F, CHEN B L, et al. Deposition process and mechanical properties of magnesium alloy inclined thin-walls fabricated by wire-arc additive manufacturing[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(7): 57-70.
- [15] MOHANRAJ J, SAHU J. Numerical prediction of residual stress and distortion for laser powder bed fusion (LPBF) AM process of Ti-6Al-4V[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2025, 140: 103094.
- [16] LI X, ZHAO Z W, CHENG X Y, et al. Residual stress and distortion in arc-directed energy deposition: formation mechanisms, analysis techniques, and mitigation strategies[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, 141: 17-35.
- [17] ZHAO H H, ZHANG G J, YIN Z Q, et al. Three-dimensional finite element analysis of thermal stress in single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(1): 276-285.
- [18] FAN X W, ZHAO Z W, CHEN H, et al. Thermal behavior, residual stress, and deformation of thin-walled parts in double electrode arc-directed energy deposition[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2025, 148: 11-23.
- [19] LIU H Y, PENG Z G, NING W, et al. Numerical simulation study of different scanning paths of Ti-6Al-4V by electron beam additive manufacturing[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2483(1): 012003.
- [20] AMAL M S, PANICKER C T J, SENTHILKUMAR V. Simulation of wire arc additive manufacturing to find out the optimal path planning strategy[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 66: 2405-2410.
- [21] KELLY K, THIEN A, SALEEBY D K, et al. A novel approach to path planning related to the intersections of aluminum WAAM[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, 137(5): 2579-2593.
- [22] 邓辉, 崔建昆. 带网格内腔的铝合金零件滚弯成型结构优化[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(7): 114-117.
DENG H, CUI J K. Roll-bend molding structure optimization of aluminium alloy parts with mesh inner cavity[J]. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2022, 60(7): 114-117.
- [23] 崔建昆, 吕嗣孝, 邹华英. 带网格内腔的铝合金零件滚弯工艺[J]. 金属加工(冷加工), 2022(8): 75-77.
CUI J K, LYU S X, WU H Y. Roll bending process of aluminum alloy parts with grid inner cavity[J]. *Metal Working (Metal Cutting)*, 2022(8): 75-77.
- [24] JAFARZADEGAN M, TAGHIABADI R, MOFID M A. Using double ellipsoid heat source model for prediction of HAZ grain growth in GTAW of stainless steel 304[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 31: 103411.
- [25] GUO K, JI Y P, LI Y M, et al. Numerical simulation of temperature field and melt pool characteristics of CP-Ti manufactured by laser powder bed fusion[J]. *Metals*, 2023, 13(1): 11.
- [26] 耿汝伟, 程延海, 杜军, 等. 2319 铝合金电弧增材制造温度场与应力演变研究[J]. 材料导报, 2023, 37(23): 169-176.
GENG R W, CHENG Y H, DU J, et al. Research on temperature field and stress evolution of 2319 aluminum alloy in wire and arc additive manufacturing[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(23): 169-176.
- [27] DENG D A, MURAKAWA H. Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements[J]. *Computational Materials Science*, 2006, 37(3): 269-277.
- [28] 马振书, 陈广森, 吴倩茹, 等. 脉冲频率和热输入对电弧增材制造 TC4 钛合金形貌和组织的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(7): 2144-2150.
MA Z S, CHEN G S, WU Q R, et al. Influence of pulse frequency and heat input on macrostructure and microstructure of TC4 titanium alloy by arc additive manufacturing[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47(7): 2144-2150.
- [29] DOREDILA N, SENTHIL KUMAR N. Determination of heat input impact on residual stress, microstructure and mechanical characteristics of welded ferrite-pearlite (α -P) steel joints by using Taguchi optimization approach[J]. *Journal of Advanced Joining Processes*, 2025, 11: 100278.
- [30] YANG J C, WADEE M A, GARDNER L. Residual stresses in steel I-section beams strengthened by wire arc additive manufacturing[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2025, 232: 109606.
- [31] ZHAO X F, PANZER H, ZAPATA A, et al. Deposition sequence optimization for minimizing substrate plate distortion using the simplified WAAM simulation[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2025, 81: 103-116.
- [32] SEGOVIA RAMÍREZ I, GARCÍA MÁRQUEZ F P, PAPAELIAS M. Review on additive manufacturing and non-destructive testing[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2023, 66: 260-286.
- [33] SIDERIS I, PETRIK J, BAMBACH M. Too hot to print, too slow to handle; finding optimal path characteristics for WAAM[J]. *Manufacturing Letters*, 2024, 41: 879-890.

- [34] JUNG D I, LEE K K, AHN D G. Investigation of effects of repair sequence on residual stress distribution and post-deformation to repair metallic parts using a directed energy deposition process[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2025, 39(7): 3587-3598.
- [35] HE Y, YANG Z D, YANG D D, et al. Numerical simulation of local cooling on residual stress and deformation of welded joints of unequal thickness plates[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 36: 8410-8420.
- [36] WIBOWO H, ILMAN M N, ISWANTO P T, et al. Reducing distortion and residual stress using dynamically controlled low stress no distortion and its influence on

fatigue crack growth properties of steel welded joints[J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2019, 72(1): 143-153.

收稿日期: 2025-09-08; 录用日期: 2025-11-03

基金项目: 国家重点研发计划科技型中小企业项目 (2024YFB4610300)

通讯作者: 郭跃岭(1990—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为金属熔丝增材制造技术与智能装备, 联系地址: 北京市海淀区紫竹院街道北京理工大学机械与车辆学院(100081), E-mail: y.guo@bit.edu.cn

(本文责编: 王俊丽)