重点关注
IMPORTANT ISSUES

DOI：10.7512/j.issn.1001-2303.2026.07.01

铝合金框类构件UFP-TIG电弧熔丝工艺成形控制策略

孙雪君[1]，闫慧星[1]，李文硕[1]，姜自昊[2]，从保强[2]，姜　坤[1]，杨　凯[1,3*]

1. 北京卫星制造厂有限公司，北京 100094
2. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191
3. 哈尔滨工业大学 金属精密热加工国家级重点实验室，黑龙江 哈尔滨 150001

摘　要：铝合金框类构件在航空航天领域应用广泛，但电弧熔丝增材制造过程中，熄弧、弯折和交叉等位置特征易产生缩颈、堆高、下塌等成形缺陷，严重制约构件的尺寸精度与制造效率。本文基于UFP-TIG电弧熔丝制造系统，分析了框类构件三类典型位置特征缺陷的形成机制，提出了多参数协同成形控制方法。针对熄弧位置，提出电流-送丝-运动协同衰减策略，熄弧位置与中部高度差由20%降至0.54%；针对弯折位置，依据角度特征分别采用圆弧过渡、角点转动和端部搭接方法，150°、90°、30°构件弯折位置高度偏差分别由1.2%、4.7%、18.6%降至0.19%、0.45%、0.9%；针对交叉位置，利用TIG工艺传热与传质过程可独立调控的优势，提出“跨越”控制方法，交叉位置与周围平均高度差由14.96%降至8.56%。在此基础上开展了典型框类构件工艺验证试验，试制构件沉积效率达500 cm^3/h以上，不同位置最大相对高度差控制在6%以内。

关键词：铝合金框类结构；电弧熔丝增材制造；超音频脉冲TIG；多参数协同调控；成形精度

中图分类号：TG457.14　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-2303(2026)07-0001-09

Control Strategies for UFP-TIG Wire-Arc Additive Manufacturing Process of Aluminum Alloy Frame Components

SUN Xuejun[1], YAN Huixing[1], LI Wenshuo[1], JIANG Zihao[2], CONG Baoqiang[2], JIANG Kun[1], YANG Kai[1,3*]

1. Beijing Satellite Manufacturing Co., Ltd., Beijing 100094, China
2. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China
3. National Key Laboratory for Precision Hot Processing of Metals, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

Abstract: Aluminum alloy frame components are widely used in the aerospace field. However, during wire-arc additive manufacturing, characteristic positions such as arc termination, bending, and crossing are prone to forming defects including necking, local bulging, and collapse, which seriously constrain the dimensional accuracy and manufacturing efficiency. Based on the UFP-TIG wire-arc additive manufacturing system, this study analyzed the formation mechanisms of defects at three typical characteristic positions and proposed a multi-parameter collaborative forming control method. For the arc termi-

收稿日期：2026-06-22　　**修回日期：**2026-07-08
基金项目：国家科技重大专项(2024ZD0703201)；国防科技重点实验室基金项目；通用技术集团高端数控机床重点实验室基金项目(KLHCMT2024180)
作者简介：孙雪君(1995—)，男，博士，工程师，主要从事航天器焊接技术研究。E-mail：sxjun@buaa.edu.cn。
通讯作者：杨　凯(1991—)，男，博士，高级工程师。E-mail：yk175yy@163.com。

nation position, a collaborative attenuation strategy of current, wire feeding, and motion was proposed, reducing the height difference between the arc termination and middle sections from 20% to 0.54%. For bending positions, arc transition, corner rotation, and end overlapping methods were adopted according to the angle characteristics, and the height deviations at 150°, 90°, and 30° bending positions were reduced from 1.2%, 4.7%, and 18.6% to 0.19%, 0.45%, and 0.9%, respectively. For crossing positions, a "crossing" control method was proposed based on the independent controllability of heat and mass transfer processes in the TIG process, reducing the height difference between the crossing point and the surrounding average height from 14.96% to 8.56%. Process validation tests on typical frame components were conducted, achieving a deposition efficiency exceeding 500 cm³/h with the maximum relative height difference at different positions controlled within 6%.

Keywords: aluminum alloy frame-type structures; wire-arc additive manufacturing; ultra-frequency pulse; TIG; multi-parameter synergistic control; forming accuracy optimization

引用格式:孙雪君,闫慧星,李文硕,等. 铝合金框类构件UFP-TIG电弧熔丝工艺成形控制策略[J]. 电焊机,2026,56(7):1-9.

Citation:SUN Xuejun, YAN Huixing, LI Wenshuo, et al. Control Strategies for UFP-TIG Wire-Arc Additive Manufacturing Process of Aluminum Alloy Frame Components[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(7): 1-9.

0 引言

铝合金框类结构在航空航天高端装备制造领域应用广泛,其制造质量直接影响运载器的服役可靠性,发展高质量、高效率的制造方法具有重要的工程应用价值[1]。随着新一代高速运载器对轻量化和高可靠性的需求日益迫切,传统整体坯料去除加工在材料利用率、制造周期和成本等方面的局限性愈发突出,电弧熔丝增材制造(Wire-Arc Additive Manufacturing,WAAM)技术凭借沉积效率高、材料利用率高、成形尺寸不受限制等优势,成为铝合金框类构件整体化制造的重要候选技术。

然而,WAAM成形的铝合金构件仍面临内部质量和成形精度两方面的挑战[2]。在内部质量方面,有研究表明,通过引入高频脉冲作用可有效改善熔池流动和凝固过程,实现细化晶粒、气孔抑制及力学性能提升的目的[3]。其中,超音频脉冲TIG(Ultra-Frequency Pulsed TIG,UFP-TIG)技术在改善铝合金构件内部质量控制方面优势明显。在微观组织调控方面,康金文等[4]证实UFP电弧可显著扩大6061铝合金焊缝中等轴细晶区域占比;姜自昊等[6]结合数值模拟和工艺试验进一步揭示了UFP电流能够改变熔池环流结构,增强熔池内的对流与紊流行为,提高熔池的内部混合与热传导能力,实现晶粒细化并改善组织均匀性。在缺陷抑制与性能提升方面,范霁康等[5]发现UFP电流作用下ER5356铝合金电弧增材构件的气孔率和晶粒尺寸大幅降低,抗拉强度和断后伸长率分别提高2%和24%以上。马静等[7]系统总结了超音频脉冲电弧的优势,指出该技术可在无需额外辅助设备的条件下,通过电流波形调制同步实现晶粒细化与孔隙率降低,适配性强、成本低。

在成形精度方面,现有面向复杂空间结构成形制造的研究大多聚焦于CMT等熔化极工艺[8-9],对TIG工艺专用装备和成形策略的研究相对较少。朱贝贝等[10]开发了TIG工艺弧压检测与滤波算法,通过在制造过程中基于弧压变化实时调控送丝速度,提高了交叉结构的成形质量;施孟含等[11]提出了基于过程图像监测的TIG工艺前馈与反馈复合控制系统,通过动态调控焊炬高度和送丝速度实现了曲面基板上构件的稳定成形。但上述方法仍存在工程实现难度大、制造效率偏低等问题,且多面向单一特征结构(如交叉件或曲面基板),对框类构件中熄弧、弯折、交叉等多类空间特征共存的工况尚缺乏系统性的成形控制策略。同时,现有UFP-TIG装备多面向手工或半自动焊接应用场景[12-14],难以满足复杂空间结构的自动化成形需求。

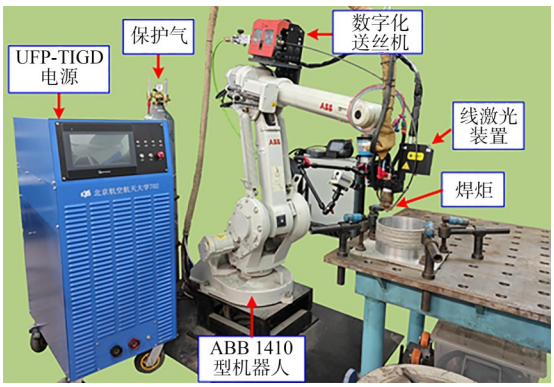
针对上述问题,本文围绕框类构件成形控制方法开展研究,利用TIG工艺传热和传质过程相对解耦的独特优势,基于UFP-TIG电弧熔丝制造装备,针对熄弧、弯折和交叉三类典型位置特征分别分析缺陷形成机制,提出多参数协同控制方法,并在典型框类构件上完成工艺验证,为铝合金框类结构的高质量快速制造提供理论支撑和技术基础。

1　UFP-TIG 电弧熔丝制造系统

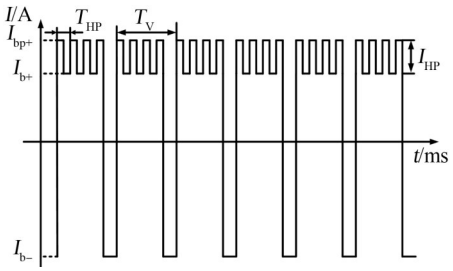
1.1　试验设备

基于图 1a 所示的 UFP-TIG 电弧熔丝制造系统开展铝合金框类构件成形试验。该系统由自研 UFP-TIG 电源[15]、ABB 机器人（型号：IRB 1410）及数字化送丝系统等组成，各单元之间通过 RS485、CAN 等工业总线实现实时数据交互与协同控制。

在线监测系统采用线激光测量装置（型号：ZXCK-RBTA4），在逐层沉积过程中实时扫描构件表面高度，为工艺参数的动态调控提供闭环反馈依据。送丝系统采用专门设计的类同轴结构一体式送丝焊炬（见图 2a），减小了焊炬位姿变换对制造过程稳定性的影响，显著提高了高速送丝条件下复杂结构的成形稳定性。试验采用焊丝牌号为 5B06，直径为 1.2 mm；保护气为高纯氩气，流量为 15 L/min。试验采用的电流波形模式如图 1b 所示。



（a）UFP-TIG 电弧熔丝制造系统



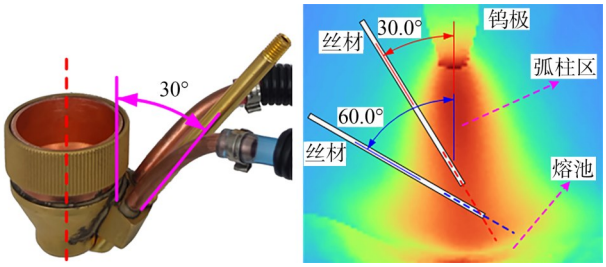
（b）UFP-TIG 电流模式

图 1　UFP-TIG 电弧熔丝装备及电流模式

Fig. 1　UFP-TIG wire-fed arc manufacturing system and current modes

1.2　试验参数及协同调控方法

构件成形过程中，选取基值电流 I_b、焊炬运动速度 v 和送丝速度 v_{WFS} 作为 3 个核心调控参数，各层试验参数如表 1 所示。其余工艺参数保持恒定：基值电流变极性频率 100 Hz（T_v=0.01 s），正极性电流占空比 80%，超音频脉冲电流幅值 I_{HP}=50 A，频率 20 kHz（T_{HP}=50 μs），电流占空比 50%，弧长 6 mm。



（a）类同轴结构焊炬　　（b）丝材送进过程

图 2　类同轴结构焊炬及丝材送进过程

Fig. 2　Quasi-coaxial structure welding torch and wire feeding process

表 1　试样成形工艺参数

Table 1　Process parameters for specimen fabrication

工艺参数	基值电流 I_b/A	运动速度 v/(mm·min^{-1})	送丝速度 v_{WFS}/(m·min^{-1})
预热层	180	100	0
第一层	180	140	2
第二层	160	180	4
第三层	140	260	5
第四及后续层	120	340	7.5

在框类构件成形过程中，熄弧、弯折和交叉等特征位置因焊炬运动方向与位姿的突变，导致熔池散热条件及电弧形态发生显著变化，易引发下塌、缩颈、堆高等成形缺陷。针对上述问题，提出一种多参数协同匹配控制算法，如图 3 所示。该算法以构件空间结构特征为输入，在制造过程中依据位置类型对焊炬位姿和电流参数进行调整，抑制电弧烧蚀现象，同时同步对送丝速度进行调控，避免丝材填充量不足或过度堆积，为构件的高质量成形奠定

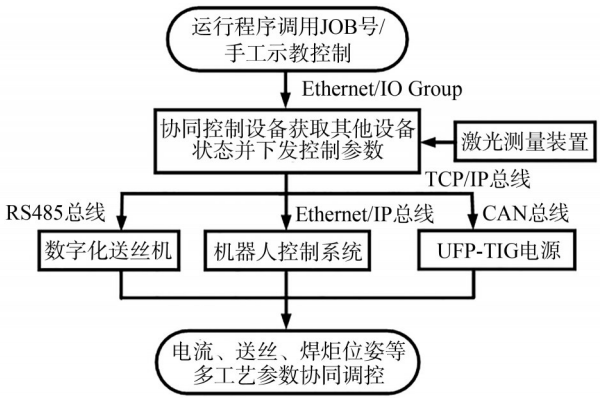


图 3　多参数协同控制算法

Fig. 3　Multi-parameter collaborative control algorithm

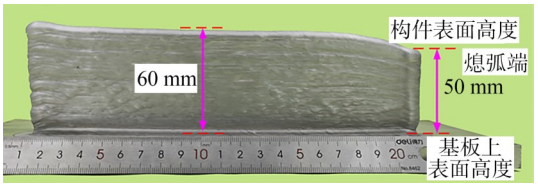
工艺基础。各位置特征的具体控制策略将在第2节中分别详述。

2 构件典型缺陷成因分析及成形参数优化

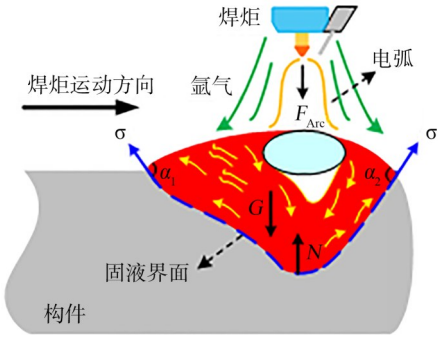
本节分别对框类构件熄弧、弯折、交叉位置特征典型成形缺陷的形成机制进行分析，并提出相应的工艺优化方法。采用三维激光扫描仪（型号：TRACKSCAN-P550）获取构件的形貌尺寸数据，导入开源软件CloudCompare进行处理，获得构件的Z向坐标伪彩色场图，以此对优化方法的可行性进行定量验证。

2.1 熄弧位置缺陷成因及成形参数优化

采用在熄弧位置直接停丝、熄弧方法成形的构件形貌如图4a所示，构件熄弧端与中部区域的高度差达到20%。熄弧过程中的熔池受力情况如图4b所示。在熄弧过程中，电弧持续作用于构件尾端，导致已沉积金属重熔，而尾端缺少实体金属的约束，熔池自由表面增大，液态金属更易在电弧力F_{Arc}、气流吹力及重力G的共同作用下更易发生流动。热输入越大，熔池体积越大，越容易突破表面张力σ及支撑力N的约束而失稳下塌[16-17]。因此，提高熄弧位置成形质量的关键在于实现热输入衰减、运动停止与填充结束三者的匹配。



（a）采用未优化参数成形试样的形貌尺寸



（b）熄弧位置熔池受力示意图

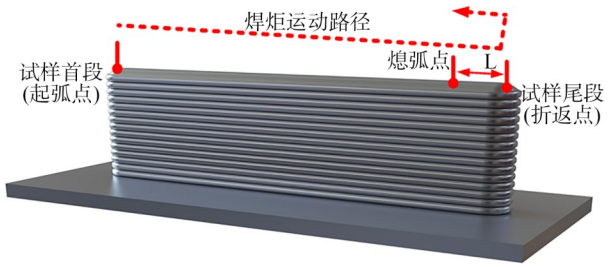
图4 未优化参数成形试样形貌及熔池受力分析

Fig. 4 Morphology of formed specimens with unoptimized parameters and force analysis of molten Pool

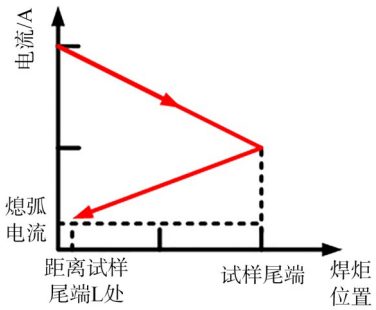
提出如图5a、5b所示的工艺优化方法：当焊炬移动至试样尾端后停留一段时间（t<2 s），同时控制电流和送丝速度同步线性降低，以减少热输入、减小熔池体积，并通过在尾端持续送丝补偿下塌缺陷。随后，焊炬反向折返，电流和送丝速度继续线性降低，当焊炬移动至熄弧点时，送丝速度降至0，电流降至熄弧电流，熄弧后控制焊炬快速上抬2~4 mm，减少电弧热、力作用对构件的破坏，避免形成弧坑。优化后构件的形貌尺寸如图5c所示，中部和熄弧位置的高度差仅为0.54%，尺寸精度得到显著提高。

2.2 弯折位置缺陷成因分析及成形参数优化

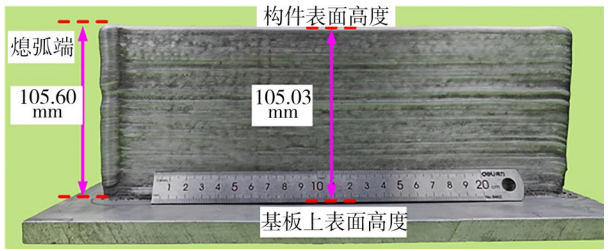
如图6a所示，丝材熔化点与工具中心点（Tool Center Point，TCP）之间存在距离d，当焊炬在弯折



（a）成形路径优化



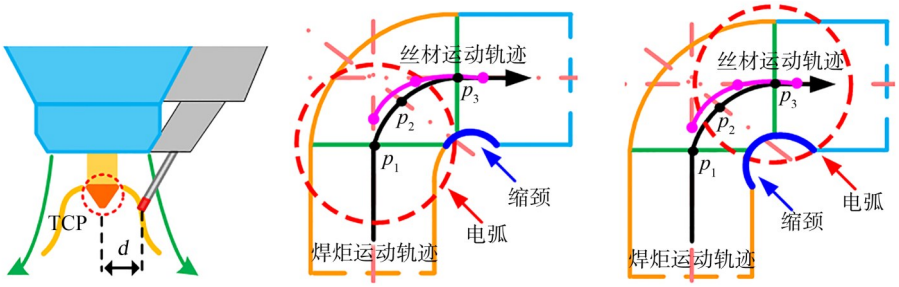
（b）电流参数优化



（c）采用优化参数成形构件的形貌尺寸

图5 熄弧过程工艺参数优化及成形试样形貌

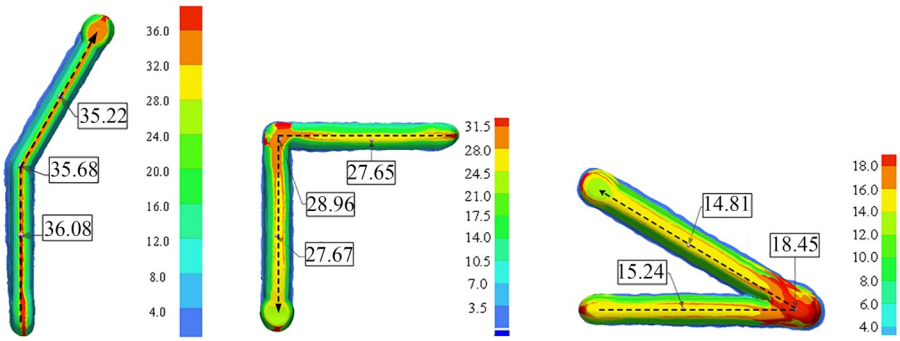
Fig. 5 Process parameter optimization of arc termination process and morphology of formed specimens



(a)TIG焊炬结构　　(b)焊炬到达弯折位置前　　(c)焊炬到达弯折位置后

图6　TIG焊炬结构及“缩颈”缺陷形成过程示意图

Fig. 6　Schematic diagram of TIG welding torch structure and necking defect formation process



(a)150°弯折构件　　(b)90°弯折构件　　(c)30°弯折构件

图7　采用未优化参数成形弯折构件的形貌尺寸(单位:mm)

Fig. 7　Morphology and dimensions of bent components formed with unoptimized parameters

位置变换位姿时，丝材与钨极的运动轨迹产生偏移，导致成形精度降低。如图6b、6c所示，焊炬换向时电弧烧蚀构件已成形区域，形成的熔池在电弧力与气流吹力的作用下向焊炬运动方向偏移，形成缩颈缺陷。同时，弯折位置丝材沉积区域重叠会导致局部堆高。如图7所示，当150°、90°、30°构件弯折位置高度分别为35.68 mm、28.96 mm、18.45 mm时，其与两侧中部高度的平均差值分别为1.2%、4.7%、18.6%，表明弯折角度越小，焊炬位姿变化越大，缺陷越集中。针对不同弯折角度构件，分别提出以下成形控制方法：

(1)钝角结构提出。采用“圆弧过渡”控制方法(见图8a)，以圆弧过渡路径替代折线路径，成形过程中保持电流和送丝参数恒定。路径最大偏差值s依据式(1)确定，R值根据精度要求与路径偏移量等确定，本文取s=1.0 mm。

(2)直角结构。采用“角点转动”成形控制方法(见图8b)，焊炬运动至p_1点后，通过快速旋转(大于90°/s)调整焊炬位姿，同时持续向p_1点送丝，以补偿下塌、缩颈及路径偏移导致的尺寸误差。

(3)锐角结构。采用“端部搭接”成形控制方法(见图8c)，焊炬自p_1运动至p_2点后立即折返，防止尾端下塌，返回p_1点时停止送丝，随后快速(大于1 000 mm/min)移动至p_3点，恢复送丝并采用圆弧过渡方法完成后续成形。该方法通过小幅度调整焊炬位姿，将锐角构件转化为钝角构件进行成形，降低了成形难度。

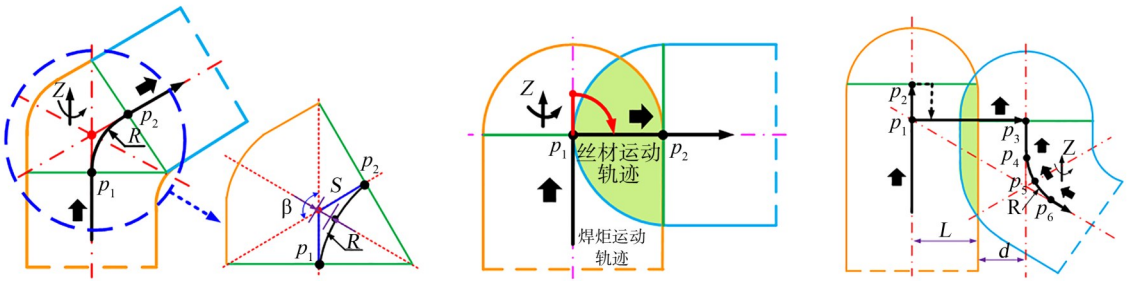
$$s=\sqrt{R^2+\left[R\tan\left(\frac{\pi-\beta}{2}\right)\right]^2}-R \tag{1}$$

式中　R为圆弧过渡半径；β为弯折角度。

采用优化方法成形的构件形貌如图9所示。150°、90°、30°构件弯折位置高度分别为32.54 mm、29.87 mm、20.80 mm时，其与两侧中部高度的平均差值分别为0.19%、0.45%、0.9%，不同弯折角度构件的尺寸精度均得到大幅提升。

2.3　交叉位置缺陷成因分析及成形参数优化

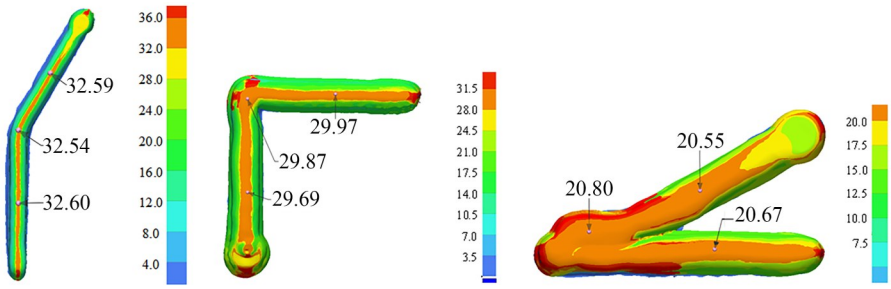
现有研究多采用熔化极工艺，以图10a、10b所示的直线搭接和圆弧搭接路径成形交叉构件[18]。



(a)“圆弧过渡”成形控制方法　(b)“角点转动”成形控制方法　(c)“端部搭接”成形控制方法

图8　弯折构件成形控制方法优化

Fig. 8　Optimization of forming control strategies for bent components



(a)150°弯折构件　(b)90°弯折构件　(c)30°弯折构件

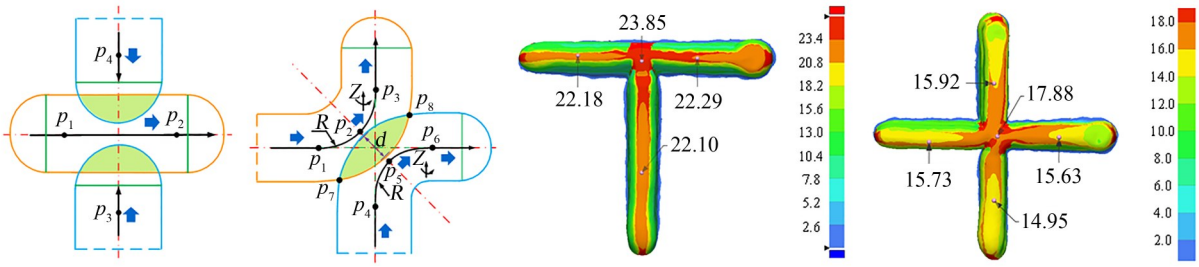
图9　采用优化参数成形弯折构件的形貌尺寸(单位:mm)

Fig. 9　Morphology and dimensions of bent components formed with optimized parameters

其中,直线搭接路径规划难度低,但需在交叉位置频繁起熄弧,制造效率低且易产生较多内部缺陷;圆弧搭接路径连续无断点,制造效率较高,但路径规划难度较大——路径间距d较小时,送丝区域重叠面积较大导致堆高;d较大时,因丝材填充量不足导致下塌。两种策略的成形构件形貌如图10c、10d所示,当构件交叉位置的高度分别为23.85 mm和17.88 mm时,周围部分的平均高度与其分别相差7.47%和14.96%。因此,交叉位置成形的核心矛盾在于路径连续性与局部填充精度之间的平衡。

基于TIG焊工艺传热与传质过程可独立调控的优势,提出如图11所示的“跨越”控制方法。

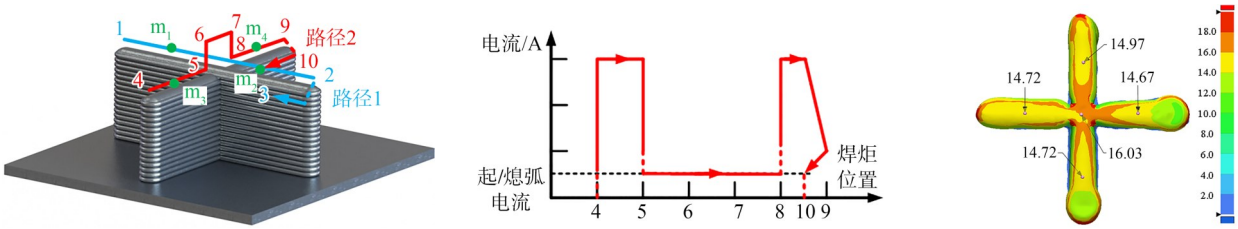
具体过程如下:焊炬运动至p_5时停止,同时控制电流和送丝速度线性缓降,以降低热输入、减小熔池体积,并通过持续送丝补偿缩颈缺陷;当送丝速度降至0且电流降低至维弧电流后,控制焊炬快速(大于1 000 mm/min)经p_6、p_7运动至p_8并停止;随后,电流和送丝速度回升至设定值,通过持续送丝补偿缩颈缺陷,随后控制焊炬向尾端移动,在不熄弧条件下完成交叉位置的成形。成形构件形貌如图11c所示,当交叉点高度为16.03 mm时,四周中部位置平均高度与其相差8.56%。该方法在保证路径连续的同时避免了交叉位置因频繁起熄弧产生裂纹、弧坑等缺陷,并对缩颈、下塌缺陷进行了有效抑制。



(a)直线搭接控制方法　(b)圆弧搭接控制方法　(c)试样形貌尺寸(直线搭接)　(d)试样形貌尺寸(圆弧搭接)

图10　交叉构件熔化极工艺成形方法及试样尺寸(单位:mm)

Fig. 10　GMA process forming method for cross components and specimen dimensions



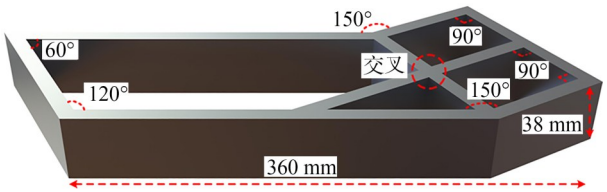
(a)成形路径　　(b)电流随焊炬位置变化规律　　(c)试样形貌尺寸

图 11　“跨越”控制方法及试样形貌尺寸(单位:mm)

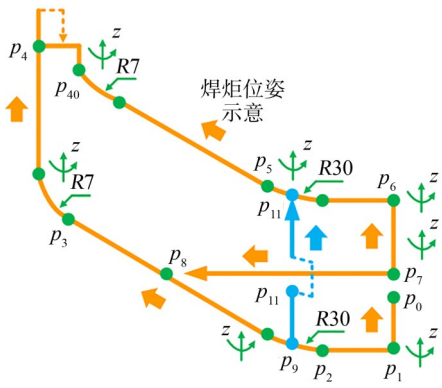
Fig. 11　"Crossing" forming method and morphology and dimensions of specimens

3　典型铝合金框类构件成形工艺试验

为验证装备系统的性能及提出控制方法的可行性，以铝合金框类构件(牌号:5B06)为研究对象开展工艺试验，如图 12a 所示。该构件同时包含锐角(p_4)、直角(p_1、p_6、p_7)、钝角(p_2、p_3、p_5)和交叉(p_{11})特征，能够全面反映框类构件的成形控制难点。成形过程中，各特征位置分别采用第 2 节提出的相应控制方法(成形路径见图 12b)。



(a)构件结构



(b)成形控制方法

图 12　铝合金框类构件结构及成形控制方法

Fig. 12　Structure and forming control method of aluminum alloy frame components

3.1　在线测量与数据筛选方法

在构件制造过程中，因激光传感器安装于焊炬前端。当焊炬运动至弯折等位置时，激光束易超出构件边界，导致传感器输出异常数据。由于图 12a 所示构件为竖直结构，各沉积层的焊炬运动轨迹仅 Z 轴坐标存在差异，因此可采用基于采集数据的时间戳对测量结果进行筛选：根据图 12b 所示的焊炬运动轨迹，控制机器人以预设速度空载运行，以起始运行时刻为 t_0，依次记录焊炬到达各弯折、交叉及停止位置时与 t_0 的时间差值。实际制造过程中，通过预标定的时间差值与焊炬实时运行时长判定焊炬当前位置，精准提取各特征位置的高度测量值，同时识别并剔除激光束越界导致的异常跳变数据。

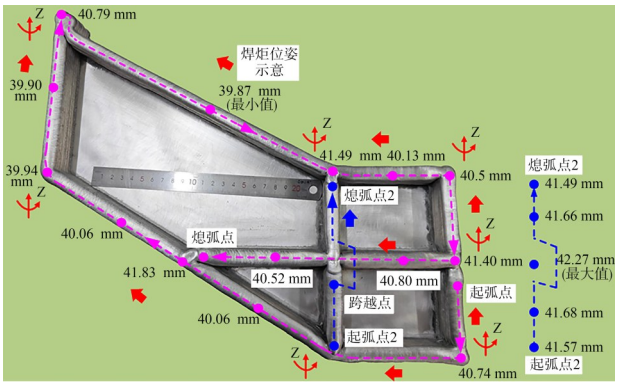
3.2　试验结果与分析

构件形貌尺寸见图 13，构件未出现严重的缩颈、塌陷和堆高等缺陷，成形高度最小值为 39.87 mm，最大值为 42.27 mm，相差约 5.7%。起弧点至熄弧点的平均高度为 40.56 mm，起弧点 2 至熄弧点 2 的平均高度为 41.73 mm，相差约 2.90%。构件第四及后续层的送丝速度为 7.5 m/min，焊丝直径为 1.2 mm，基于焊丝截面积与长度计算得一小时沉积铝合金的体积约为 509 cm^3。外观检验及尺寸测量结果表明，在多种空间特征同时存在的条件下，本文提出的控制方法能够在实现高沉积效率的同时，保证铝合金框类构件成形质量的稳定，充分验证了 UFP-TIG 电弧熔丝制造系统的性能及提出成形控制方法的可行性。

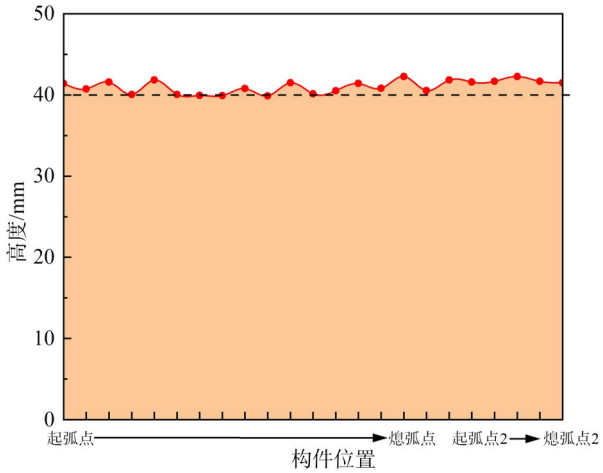
4　结论

(1)因增材焊炬运动状态改变易引发局部热输入突变和金属填充行为失配，熄弧、弯折和交叉位置是铝合金框类构件成形缺陷的主要集中区域。

(2)针对铝合金框类结构不同位置特征分别提出了熄弧位置多参数协同控制、弯折位置差异化过



(a)构件形貌尺寸



(b)构件不同位置高度

图13 铝合金框类构件形貌及尺寸

Fig. 13 Morphology and dimensions of Al alloy frame components

渡和交叉位置“跨越”控制方法，通过多参数协同调控，显著提升了构件的成形质量与尺寸一致性。

(3)开展了典型铝合金框类构件UFP-TIG成形工艺试验，实现了500 cm^3/h以上的高沉积效率，试制构件最大相对高度差在6%以内，验证了提出优化控制方法的技术可行性。

参考文献：

[1] 吴世凯，潘朋，黄文琪，等. 面向航空航天金属增材制造构件的焊接技术研究进展[J]. 航空制造技术，2026，69(07)：50-64.
WU S K，PAN P，HUANG W Q，et al. Research Progress of Welding Technology for Aerospace Metal Additive Manufacturing Components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology，2026，69(07)：50-64.

[2] YU K，TAN Z J，ZENG C Y，et al. Oscillating Laser Beam Welding of Additively Manufactured Al-Cu with Hot-Rolled Al-Mg Dissimilar Aluminum Alloys：The Role of Laser Beam Offset[J]. Optics & Laser Technology，2025，192：113947.

[3] 陈超. 脉冲超声辅助电弧焊接特性研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2021.
CHEN C. Research on Characteristics of Pulsed Ultrasound Assisted Arc Welding[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2021.

[4] 康金文，梁宝山，武永利，等. 6061铝合金超音频脉冲MIG焊接头微观组织及力学性能[J]. 焊接技术，2024，53(12)：41-46.
KANG J W，LIANG B S，WU Y L，et al. Microstructure and Mechanical Properties of 6061 Aluminum Alloy Welded Joints by Ultrasonic Frequency Pulsed MIG Welding[J].Welding Technology，2024，53(12)：41-46.

[5] 范霁康，朱世宇，李孟孟，等. 超音频脉冲电流对GMA增材铝合金性能的影响[J/OL]. 机械工程学报，2026(12)：143-150[2026-07-15]. https://link. cnki. net/urlid/11.2187.TH.20260702.1628.042.
FAN J K，ZHU S Y，LI M M，et al. Effect of Hybrid Ultrasonic Pulsed Current on the Properties of GMA Additive Manufactured Aluminum Alloys[J]. Journal of Mechanical Engineering，2026(12)：143-150[2026-07-15]. https://link. cnki. net/urlid/11.2187. TH. 20260702. 1628.042.

[6] 姜自昊，曾才有，蔡鑫祎，等. 超音频脉冲电弧增材制造TiC/Al-Cu合金组织性能优化调控机制[J]. 稀有金属材料与工程，2026，55(2)：389-396.
JIANG Z H，ZENG C Y，CAI X Y，et al. Microstructure and Property Optimization Mechanisms of TiC/Al-Cu Alloys Prepared by Ultrasonic Frequency Pulsed Wire Arc Additive Manufacturing[J]. Rare Metal Materials and Engineering，2026，55(02)：389-396.

[7] 马静，范思越，姜庆伟. 铝合金复合增材制造工艺研究现状[J]. 热加工工艺，2026，55(7)：59-70.
MA J，FAN S Y，JIANG Q W. Research Status of Composite Additive Manufacturing Process for Aluminum Alloys[J]. Hot Working Technology，2026，55(7)：59-70.

[8] 赵宏伟. 高强铝合金交叉结构电弧增材制造质量控制[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2025.
ZHAO H W. Quality Control of Arc Additive Manufacturing for High-Strength Aluminum Alloy Cross Structures[D]. Harbin：Harbin University of Science and Technology，2025.

[9] 毕家伟. CMT+P电弧增材制造铝合金交叉与横筋结构组织性能研究[D]. 太原：中北大学，2024.

BI J W. Research on Microstructure and Properties of Aluminum Alloy Cross and Rib Structures Fabricated by CMT+P Arc Additive Manufacturing[D]. Taiyuan: North University of China, 2024.

[10] 朱贝贝，熊俊. 交叉件GTA填丝增材制造弧压检测与成形控制[J]. 机械工程学报，2019，55(15)：17-23.
ZHU B B, XIONG J. Arc Voltage Detection and Forming Control of GTA Wire-Filling Additive Manufacturing for Cross Components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(15): 17-23.

[11] 施孟含. 曲面基板上机器人脉冲GTA增材制造成形高度传感与控制[D]. 成都：西南交通大学，2022.
SHI M H. Forming Height Sensing and Control of Robotic Pulsed GTA Additive Manufacturing on Curved Substrates[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.

[12] CONG B Q, CAI X Y, QI Z W, et al. The Effects of Ultrasonic Frequency Pulsed Arc on Wire-Arc Additively Manufactured High Strength Aluminum Alloys[J]. Additive Manufacturing, 2022, 51: 102617.

[13] ZENG C Y, SUN X J, QI B J, et al. In-Situ TiC Particles Reinforced AA2219 Al-6.3Cu Alloy Joint via Ultra-sonic Frequency Double-Pulsed Arc[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 842: 143078.

[14] SUN X J, ZENG C Y, CONG B Q, et al. Microstructure and Mechanical Property of A356 Cast Remanufactured by Ultrasonic Frequency Pulsed TIG Process[J]. Materials Letters, 2024, 357: 135766.

[15] 王强，齐铂金，王义朋，等. 超音频复合脉冲GMAW电源设计[J]. 北京航空航天大学学报，2017，43(10)：1953-1959.
WANG Q, QI B J, WANG Y P, et al. Design of Ultra-Audio Frequency Composite Pulse GMAW Power Supply[J]. Journal of Beihang University, 2017, 43(10): 1953-1959.

[16] 杨明轩，杨舟，从保强，等. 超高频脉冲电弧焊接熔池金属流动行为[J]. 北京航空航天大学学报，2015，41(4)：589-593.
YANG M X, YANG Z, CONG B Q, et al. Metal Flow Behavior in Welding Molten Pool under Ultra-High Frequency Pulsed Arc[J]. Journal of Beihang University, 2015, 41(4): 589-593.

[17] PARVEZ S, SIDDIQUI M I H, ALI M A, et al. Modeling of Melt Flow and Heat Transfer in Stationary Gas Tungsten Arc Welding with Vertical and Tilted Torches[J]. Materials, 2021, 14(22): 6845.

[18] 徐俊，潘挺，单伟，等. 电弧增材制造轨迹规划及成形性能研究进展[J]. 热加工工艺，2026，55(07)：16-34.
XU J, PAN T, SHAN W, et al. Research Progress of Trajectory Planning and Forming Performance for Arc Additive Manufacturing[J]. Hot Working Technology, 2026, 55(07): 16-34.