

引用格式:董善文,赵雪雅,卢倩,等.电弧焊接与增材制造热质传递解耦方法研究进展[J].材料工程,2026,54(9):76-90.

DONG Shanwen, ZHAO Xueya, LU Qian, et al. Research progress in decoupling method of heat and mass transfer in arc welding and additive manufacturing[J]. Journal of Materials Engineering, 2026, 54(9): 76-90.

电弧焊接与增材制造热质传递解耦方法研究进展

董善文^{1,2}, 赵雪雅¹, 卢倩¹, 曾勇^{1*}, 蒋凡², 陈树君², 杨志东³

(1 盐城工学院 机械工程学院, 江苏 盐城 224051; 2 北京工业大学 机械与能源工程学院, 北京 100124;

3 江苏科技大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212028)

摘要:电弧热源在焊接及增材制造领域应用广泛,已成为金属构件连接与成形制造不可或缺的核心能量载体。然而,传统电弧热源存在传热与传质行为高度耦合、无法独立调控的固有缺陷,导致工件热输入与丝材熔敷率深度绑定,难以同时兼顾高效率沉积与高质量成形的双重需求,严重制约了大型复杂结构件的高性能制造进程。因此,开展电弧热源热质传递解耦研究,对于突破传统电弧制造技术具有重要的理论价值与紧迫的工程意义。本文系统综述了电弧热源热质传递解耦技术的研究进展,重点聚焦交叉电弧这一前沿构型。交叉电弧通过独立热源与独立质量源的协同配置,从控制架构上实现了热输入与质量传递之间的解耦。围绕交叉电弧热源的稳定性控制、熔滴过渡行为及发展挑战等关键方面展开深入评述,旨在为构建热质传递独立可控的新一代智能电弧制造系统提供坚实的理论依据与可行的技术路线支撑。

关键词:电弧热源;传热;传质;解耦;交叉电弧

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2026.000223 **CSTR:** 32421.14.j.issn.1001-4381.2026.000223

中图分类号: TG444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2026)09-0076-15

Research progress in decoupling methods of heat and mass transfer in arc welding and additive manufacturing

DONG Shanwen^{1,2}, ZHAO Xueya¹, LU Qian¹, ZENG Yong^{1*}, JIANG Fan²,
CHEN Shujun², YANG Zhidong³

(1 School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, Jiangsu, China;

2 School of Mechanical & Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3 School of Materials Science & Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212028, Jiangsu, China)

Abstract: Arc heat sources are extensively employed in welding and additive manufacturing, emerging as an indispensable core energy medium for the joining and forming of metal components. Nevertheless, traditional arc heat sources are plagued by inherent flaws, such as the highly-coupled heat and mass transfer behaviors that are difficult to control independently. This results in a profound coupling between the heat input to the workpiece and the wire deposition rate, posing a significant challenge in simultaneously satisfying the dual demands of high-efficiency deposition and high-quality forming. Consequently, it severely restricts the high-performance manufacturing process of large and complex structural components. Therefore, conducting research on the decoupling of heat and mass transfer in arc heat sources is of immense theoretical value and urgent engineering significance for transcending traditional arc manufacturing technology. This paper presents a systematic review of the research progress in the decoupling technology of heat and mass transfer in arc heat sources, with a particular focus on the state-of-the-art cross-arc configuration. From a physical perspective, this technology achieves orthogonal decoupling of heat input and mass transport through the coordinated arrangement of independent heat sources and independent mass sources. The article offers an in-depth examination of key aspects, including the stability control, droplet transfer behavior, and development challenges of cross-arc heat sources. Its objective is to provide a robust

theoretical foundation and feasible technical route support for constructing a new generation of intelligent arc manufacturing systems with independent and controllable heat and mass.

Key words: arc heat sources; heat transfer; mass transfer; decoupling; cross arc

电弧热源凭借成本低廉、环境适应性强、效率突出等显著优势,已发展成为焊接与增材制造领域的核心能量形式,广泛应用于汽车制造、石油化工、航空航天、船舶制造等国家关键领域,电弧热源应用场景如图1所示,进而使电弧焊接与增材制造技术成为现代金属成形制造不可或缺的重要基石^[1-4]。然而,尽管其工程应用已十分广泛,电弧热源在工艺质量调控方面仍面临根本性的科学与技术难题。加工效率、几何精度与组织性能作为衡量电弧焊接与增材制造技术水平的核心指标,如何实现三者的协同优化与均衡提升,始终是金属先进制造领域亟待突破的关键科学问题。

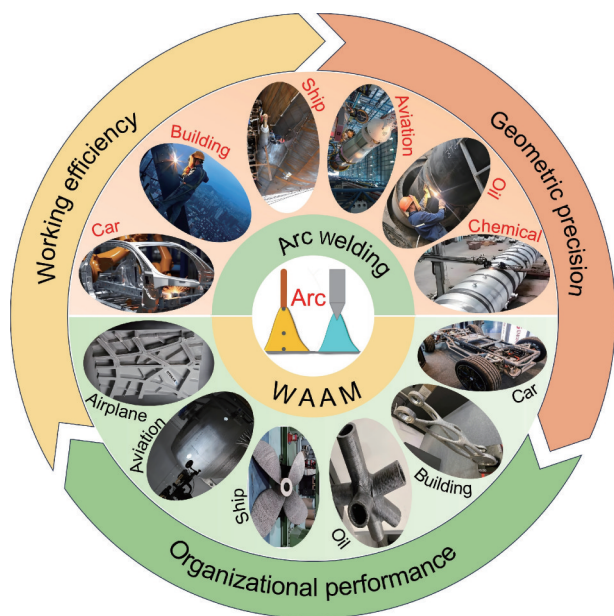


图1 电弧热源应用场景

Fig.1 Application scenarios of arc heat source

对于电弧热源而言,理想的热量分配模式应使绝大部分热量用于熔化丝材,以实现高传质效率,仅少量热量传递至工件熔池,从而保障优异的成形质量。然而,传统电弧热源受制于一项根本性物理约束:工件热输入与丝材熔敷效率之间存在强耦合关联^[5-7]。其本质原因在于,电弧同时承担熔化丝材(传质)与加热工件(传热)的双重作用,且传热与传质过程呈现显著强耦合特性。在通过增加电流提高传质效率的同时,工件热输入会同步显著增加。这种固有强耦合特性直接导致效率、精度与性能难以协同优化。任一目

标的提升均须牺牲至少另一项其他指标为代价。因此,传统电弧制造工艺始终被局限于多方妥协的狭窄工艺窗口内,无法实现传热与传质过程的独立解耦与精准调控。

为从根本上突破上述困境,亟须对电弧热源热质传递过程实施解耦调控,将工件热输入与丝材熔敷效率构建为相互正交的独立控制维度。该调控思路为破解效率、精度与性能之间的固有矛盾提供了可行途径:即在维持高传质效率的前提下,实现工件热输入的独立精准调控,进而协同保障成形几何精度与组织性能。需要指出的是,焊接过程通常为单道或有限道次成形,热累积效应相对有限,其热质解耦的核心在于控制热影响区宽度与熔深,避免过热或未熔合缺陷,同时保证接头力学性能。相比之下,增材制造为多层多道逐层堆积,热历史复杂,热质解耦不仅要控制单道沉积时的热输入与熔敷速率,还必须兼顾层间热积累、成形几何精度与组织均匀性。该本质差异使得能够实现热输入与熔敷速率正交化解耦的电弧热源构型在增材制造中展现出更为显著的优势:可在维持高沉积效率的前提下独立调控层间热积累,从而协同提升成形精度与组织性能。

基于上述分析,系统梳理了电弧热源热质传递解耦方法的研究脉络与发展历程。

其分类逻辑基于主能量承载与电路拓扑结构:若丝材的熔化和工件的加热仍共用同一主电弧导电通道(即电流路径不变),仅在时间、空间或辅助手段上进行改良,则归入单电弧解耦范畴;若引入了具有独立导电回路的第二热源或分流回路,则视为复合电弧体系。首先,归纳单电弧热质解耦的典型途径及其固有局限;随后,依据电路拓扑与空间位形布局,将复合电弧热源体系划分为共工件端、共焊枪端及无公共端3类构型,并重点聚焦交叉电弧这一前沿技术方案。在此基础上,从电弧稳定性与熔滴过渡行为特征出发,深入剖析交叉电弧的研究现状,并与斜交耦合电弧开展系统对比分析。最后,从系统集成、多物理场建模及智能控制3个核心层面,展望交叉电弧技术的发展趋势与关键科学挑战,以期构建热质独立可控的新一代智能电弧制造系统提供前瞻性的技术路线与理论支撑。

1 单电弧热源热质解耦方法

1.1 热质解耦的定义与量化评价

在电弧焊接与增材制造中,“热质耦合”是指工件热输入与丝材熔敷速率之间受同一电弧过程支配、难以独立调控的物理关联。相应地,“热质解耦”指通过调控手段使二者之间的耦合关系弱化,实现工件热输入与丝材熔敷速率的独立控制,理想状态下二者呈正交化调节关系。为定量评价不同技术路线的解耦程度,引入热质解耦系数 C_{hm} ,其定义为:

$$C_{hm} = \Delta Q / \Delta \eta \quad (1)$$

式中: ΔQ 为单位时间内工件热输入的变化量,J/mm; $\Delta \eta$ 为熔敷速率的变化量,g/min。该系数表征了为获得单位熔敷效率增量所需付出的热输入代价。 C_{hm} 值越小,表示在改变熔敷效率时对热输入的影响越小,解耦程度越高;当 C_{hm} 为0时,表明已达到正交化解耦。

实验中需要连续多次测试计算 ΔQ 和 $\Delta \eta$,如果一定范围内, ΔQ 与 $\Delta \eta$ 线性相关,那么 C_{hm} 为常数。

1.2 热质解耦调控方法

单电弧热源分为熔化极电弧与非熔化极电弧两大类。其中,熔化极电弧是热质耦合典型的技术代表(如图2(a)所示):电弧热量一方面用于熔化丝材形成熔滴,持续为工件提供材质输入(即质量源),另一方面直接为工件提供热量输入(即热源);两者受同一电流调控,形成“同源同路径”的强耦合特征,热质解耦难度显著高于非熔化极电弧。相比之下,如图2(b)所示,非熔化极电弧虽然在构型上实现了热源与质量源的空间分离:电弧建立于钨电极与工件之间,仅承担热源功能,填充丝则作为独立质量源单独送入熔池,但热质耦合并未因此消失,其仍受控于电弧电流的间接调控,仅耦合形式从强耦合转变为“热源与质量源空间分离”的弱耦合状态。

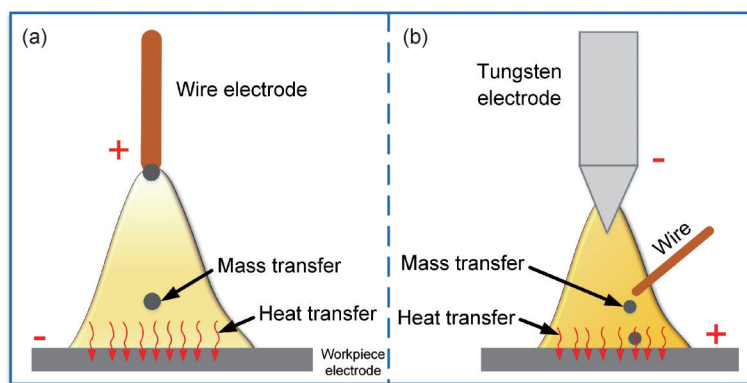


图2 传统单电弧热质传递耦合示意图

(a)熔化极电弧;(b)非熔化极电弧+填丝

Fig.2 Schematic diagram of traditional single arc heat and mass transfer coupling

(a)consumable electrode arcs;(b)nonconsumable electrode arcs+wire filling

无论何种单电弧,热质耦合均为其固有属性,核心差异在于耦合形式与强度。为从根本上打破热质传递耦合束缚,早期相关研究主要从时间、空间及能量等维度出发,对单电弧热源传热与传质行为实施主动调控(如图3所示)。目前,单电弧热质解耦的主要技术途径包括:电压电流波形调制、冷丝/热丝辅助技术、机械辅助调控、能场辅助调控以及物理拘束调控等。为精准理解不同解耦策略的适用性,需进一步厘清MIG、TIG和CMT 3种电弧热源在热质耦合特性上的本质差异。

MIG电弧属熔化极电弧,呈现“同源同路径”的强耦合特征,解耦难度最高。焊接时MIG电弧热源通常需借助波形调制、旁路分流或外加能场等手段实现有限度的分离。TIG电弧则属非熔化极电弧,呈现“热

源与质量源空间分离”弱耦合特征,为热质解耦提供了更灵活的调控空间,热丝TIG、冷丝TIG等技术可进一步优化能量分配。CMT电弧本质上仍属于熔化极电弧范畴,但通过焊丝机械回抽机制在时间维度上强制分离热输入与质量传递,使质量传递在近零热输入条件下完成,是一种时间维度的强解耦策略。由于多层多道堆积带来的复杂热历史,TIG或CMT电弧热源在增材制造中展现出更显著的优势。围绕上述3类热源,系统评述各类单电弧内部干预型解耦策略的原理、进展与局限性。

1.2.1 波形调制

电压电流波形调制技术通过在时间尺度上的能量分时分配,实现传热与传质的瞬时分时控制。表面张力过渡法(STT)在熔滴过渡关键阶段主动降低甚

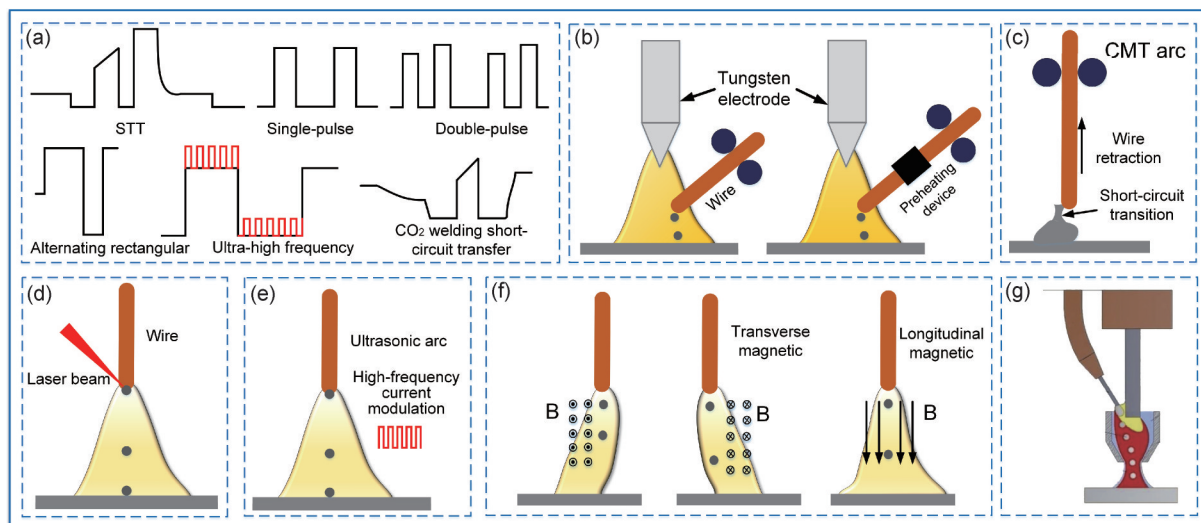


图3 单电弧热质解耦方法示意图

(a)波形调制;(b)冷丝/热丝;(c)机械辅助;(d)激光辅助;(e)超声辅助;(f)磁场辅助;(g)主动拘束电弧

Fig.3 Schematic diagram of single arc heat-mass decoupling method

(a) waveform modulation; (b) cold/hot wire; (c) mechanical assistance; (d) laser assistance; (e) ultrasonic assistance;

(f) magnetic field assistance; (g) actively constrained arc

至切断电流,使质量传递过程在近零热输入条件下完成^[8-10]。单脉冲波形调制通过峰值期主导传质、基值期主导传热的周期性交替,实现热质部分解耦^[11-13]。双脉冲波形在此基础上进一步叠加低频调制,通过优化低频相位差实现了熔滴过渡频率与热输入的独立调控,在微观与宏观双重时间尺度上强化热质分离效果^[14-17]。交流矩形波利用极性切换将传热与传质的时序解耦^[18]。超高频调制GTAW则以极高频率将能量分界为微量脉冲序列,在宏观上实现准连续热质分离^[19-23],能在维持熔深的前提下有效降低了热输入。CO₂短路过渡则通过燃弧与短路的自然交替,被动实现热与质的时序分离^[24-28],并基于电流波形特征实时识别的自适应调制策略进一步拓展了波形调制在复杂工况下的适用性。

1.2.2 冷丝/热丝

冷丝与热丝技术通过改变丝材进入电弧前的初始能量状态,重构电弧能量分配路径,将丝材熔化所需的部分热能从电弧内部转移至外部承担,从而实现电弧热源功能的局部解耦。热丝技术利用电阻预热为丝材提前提供部分熔化热能,降低电弧对丝材的热负荷,通过精确控制预热温度,在保持总热输入不变的条件下显著提升了沉积速率^[29-32]。冷丝技术则借助电弧弧柱热量熔化丝材,配合脉冲电流实现更低的净热输入,优化送丝角度可提高熔敷效率并进一步降低单位沉积质量对应的热输入量^[33-36]。

1.2.3 机械辅助

冷金属过渡(CMT)技术作为机械辅助调控的典

型代表,通过焊丝的机械回抽实现熔滴与焊丝的主动机械分离,并在熔滴过渡瞬间切断电弧,实现近乎零电流、低热输入的熔滴过渡过程^[37-40]。其解耦逻辑在时间维度上强制割裂热输入阶段与质量传递阶段,使工件热输入降至传统短路过渡的50%以下,同时实现无飞溅稳定成形。CMT技术已发展出多种变体,通过优化送丝速度与回抽频率,可在铝合金增材制造中有效降低孔隙率并改善表面质量;在异种金属连接领域,CMT能够有效抑制脆性金属间化合物的生成。尽管CMT涉及机械复杂系统,但其电弧本质仍是单回路,故归类于此。

1.2.4 外加辅助能场

引入激光、磁场、超声波等外部辅助能场,可通过施加额外物理力主动干预电弧形态、传热分布及熔滴过渡行为,实现传热与传质的部分解耦。激光辅助电弧利用高能量密度激光束分担丝材熔化能量并压缩电弧形态,优化能量在传质与传热过程中的分配比例^[41-45],从而降低工件热输入。磁场辅助电弧借助洛伦兹力驱动电弧旋转或摆动,实现热能的空间重分布与传质路径的精准调控^[46-49]。交变磁场能够驱动电弧摆动,改善热分布均匀性,适用于窄间隙焊接。超声辅助电弧则借助声流效应与空化作用强化熔池流动与传质过程,降低临界过渡电流,并细化焊缝组织,在不显著增加工件热输入的前提下提升传质效率^[50-52]。

1.2.5 主动约束电弧

主动约束电弧技术通过丝材-钨极间接电弧实现热源与工件的电路隔离,并借助陶瓷导电嘴对电弧等

离子体进行强制拘束,形成包裹熔滴的同轴射流结构^[53],实现高频稳定的熔滴过渡,在空间维度上实现热输入与质量传递的实质性解耦,其调控自由度显著优于传统时间维度解耦方法,在薄壁构件增材制造中展现出优异的成形精度。

综上所述,各类单电弧内部干预型解耦策略的本质均为优化热质耦合过程,而非从根源上解除耦合。无论从时间、空间、能量或电路维度实施调控,均未改变热源与质量源同源一体的基本架构,其解耦能力始终受单一电弧通道的固有物理约束。此类技术的核心局限在于:控制变量同时决定传热与传质过程,无法真正实现二者独立调控,因而难以突破效率、精度、性能相互制约的“三难困境”,工艺窗口仍局限于多目标妥协状态。该本质局限直接推动电弧热质传递解

耦研究范式从单电弧内部优化向多热源分离式系统构建的根本性转变。

2 复合电弧热源热质解耦方法

复合电弧热源的核心思路是引入多个电弧协同作用,重构工件热输入与丝材熔敷过程中的能量-物质传递路径,从物理机制层面打破传统单电弧下传热与传质过程固有的强耦合关联。复合电弧热源热质解耦方法示意图如图4所示,从图中可见,根据电路拓扑结构与空间位形布局的差异,现有技术体系可划分为共工件端、共焊枪端与无公共端3类构型;从解耦效果来看,3类构型在热质耦合强度与调控自由度上,呈现出显著的递进式解耦演化特征。

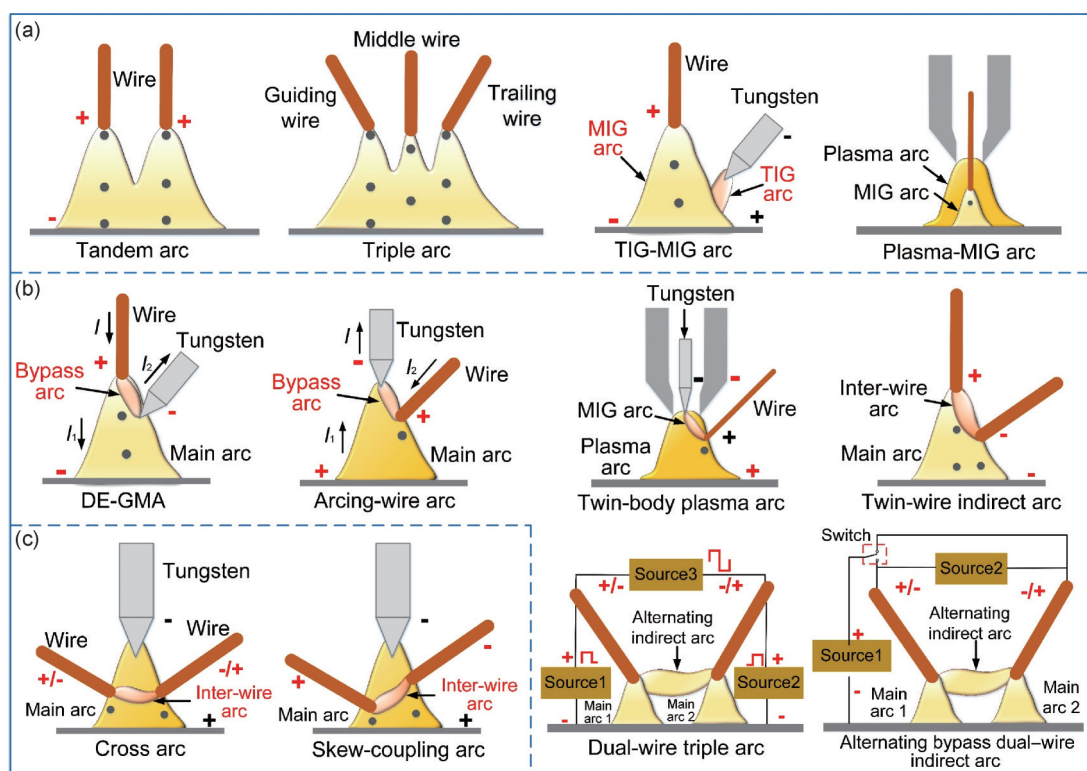


图4 复合电弧热源热质解耦方法示意图

(a)共工件端电弧;(b)共焊枪端电弧;(c)无公共端电弧

Fig.4 Schematic diagram of heat-mass decoupling method for hybrid arc heat sources

(a)arc at the workpiece end;(b)arc at the welding gun end;(c)arc without a common end

2.1 共工件端电弧

共工件端复合电弧的核心特征为各电弧电流均流经工件,以工件为公共电极,典型技术包括 Tandem 双丝电弧、三丝电弧、TIG-MIG 电弧及 Plasma-MIG 电弧等(如图4(a)所示)^[54]。在传统单电弧体系中,传热与传质共用同一电弧通道及激励电流,二者呈现高度耦合特性;而共工件端电弧通过多个电弧独立配

置,将传热与传质功能分配至不同电弧单元,实现了功能专一化与空间上的初步分离。

Tandem 双丝电弧是该类构型的典型代表:两根独立供电的焊丝共享同一个熔池,可分别承担差异化功能,一根焊丝侧重熔深控制与母材熔合(主导传热),另一根焊丝专注于填充金属填充与成形调控(主导传质)^[55-57],两路电弧参数可独立调节,在功能分配

层面上实现传热与传质的初步解耦。在总电流不变的条件下有效降低了母材热输入;前后弧相位差的优化调整可显著改善焊道成形,抑制咬边缺陷。三丝及更多丝极的多丝电弧则是该思路的延伸:增设独立可控的熔化极电弧进一步提升沉积速率,通过优化焊丝的空间排布(例如,等边三角形布置),可有效减弱电弧间的电磁干扰,在提升熔敷效率的同时控制热输入增幅。但因各电弧仍共用工件导电回路,电弧间电磁干扰与工件热累积问题显著加剧^[58-59]。

与多丝电弧不同,TIG-MIG复合电弧采用非熔化极与熔化极电弧协同构型:TIG弧作为专用热源,精确调控熔池热循环与母材熔深;MIG弧作为独立质量源,专司丝材熔化与熔滴过渡过程^[60-62]。二者空间分离、参数独立调控,相比多丝电弧实现了更为清晰的热质功能解耦。TIG弧与MIG弧的空间夹角存在最优范围,在此范围内电弧相互吸引可避免偏吹,并显著降低工件热输入,适用于中厚铝合金板材的高速焊接。在此基础上发展的Plasma-MIG电弧进一步提升调控精度:等离子弧能量密度更高、热指向性更强,可实现工件热输入的精细化控制,与MIG传质弧协同作用,推动热质解耦向高精度方向发展^[63-65]。

此类技术在能量效率上具有共性优势:通过多个质量源并行送进或热源-质源独立调控,可显著提升整体沉积速率;且总电流增长速率低于沉积速率的增幅,甚至实现热源与质量源电流完全解耦,从而在单位热输入下获得更高的沉积速率,从能量效率层面进一步强化热质分离效果。

然而,由于所有电弧热量最终均需通过工件传导或直接作用于工件,当工艺参数匹配不当时,存在工件热累积过大的风险,使其在极端热敏感材料或超薄壁件的应用中面临严峻挑战,需通过严格的参数窗口控制来规避热损伤。从本质上看,该类构型仅实现了功能与空间的局部解耦,并未打破电路与能量归宿的底层耦合,传热与传质的最终能量均作用于工件这公共电极,无法从电路根源上解除二者的强关联。

2.2 共焊枪端电弧

双丝间接电弧作为从“电路共享”向“电路解耦”过渡的关键一步,堪称旁路型与无公共端型电弧构型的先驱概念。双丝间接电弧通过电路拓扑重构实现热质解耦,其核心特征为:电弧完全建立于两根焊丝之间,工件不参与主导电回路。丝材熔化所需热量由间接电弧独立提供,工件仅通过熔滴携带热量与电弧辐射获得热能,从而在电路路径上实现熔化热源与工件热输入的物理隔离^[66-67]。该构型显著降低工件净热输入,适用于热敏感材料与薄壁结构;同时间接电弧

可在高电流条件下稳定运行,能够兼顾高沉积效率与低热输入的双重需求。

相较于共工件端构型仅实现功能与空间层面的局部解耦,共焊枪端电弧进一步从电路拓扑上突破底层耦合约束,其核心特征在于增设一条或多条不流过工件的旁路电流分支,借助电流分流机制实现丝材熔化电流与工件热输入电流的物理分离,从电路本质上优化传热与传质的耦合关系。如图4(b)所示,该类技术主要包括旁路钨极电弧(DE-GMAW)、旁路丝材电弧、旁路双体等离子弧、旁路双丝间接电弧、双丝动态三电弧及交流旁路双丝间接电弧等。

DE-GMAW是该类构型的典型代表:其在传统GMAW焊枪与工件之间增设钨极或第二焊枪作为旁路电极,构建主电弧-旁路电弧协同系统^[68-70]。工作时总电流分为两路:一路经主电弧(焊丝至工件)流入工件,承担工件加热功能;另一路经旁路电弧(焊丝至钨极)直接返回电源,不参与工件热输入。通过维持总电流恒定,可保证送丝速度与沉积速率稳定;同时,增大旁路电流会相应减小流经工件的主电流,从而同步降低工件热输入。该机制彻底打破了传统GMAW中“提高送丝速度必然伴随工件热输入增加”的强耦合关系,真正实现热质参数的独立主动调控。

除DE-GMAW外,其余旁路型电弧均遵循相同的电流分流原理,仅在电弧形态设计与功能侧重上各具特点。旁路丝材电弧采用焊丝作为旁路电极,在实现电流分流的同时可使旁路焊丝同步熔化。恒流模式下的旁路电源可有效抑制电流波动,保证熔滴过渡的稳定性,适当的旁路电流比例能够缩短主弧弧长,降低热输入,并进一步提升整体熔敷效率^[71-72]。旁路双体等离子弧以高能量密度等离子弧为主弧,利用其高热指向性与电弧刚性稳定主弧形态,有效削弱旁路电弧带来的电磁干扰^[73-74];旁路双丝间接电弧将旁路钨极替换为焊丝,在保留热质解耦特性的基础上强化传质功能,实现低热输入与高效率的双重提升^[75-76]。双丝动态三电弧通过实时切换电弧导通路径,动态交替调节旁路与主弧的电流分配,动态交替频率的优化选择可获得稳定的电弧形态与较低的飞溅率,可灵活适配不同工况下的热质匹配需求,提升工艺适应性^[77-78]。而交流旁路双丝间接电弧则进一步在焊丝与工件之间建立直流主电弧、焊丝之间构建交流间接电弧,主电弧交替作用于两根焊丝和工件之间,兼顾焊丝加热、工件热输入控制与熔滴过渡稳定性,间接电弧则熔化焊丝与熔敷速率调节^[79]。

综上所述,此类技术均围绕“总电流恒定、旁路电流调控工件主电流”的核心分流机制,实现热质主动

解耦。共焊枪端电弧优势突出:可在不牺牲熔敷速率的前提下独立降低工件热输入,适配薄壁件与热敏感材料加工,并通过连续调节旁路电流占比,实现热输入与填充量的宽范围精准匹配,显著拓宽工艺窗口。但其固有瓶颈同样明显:主弧与旁路电弧空间邻近易引发强电磁耦合作用,导致电弧飘移、熔滴过渡失稳;为稳弧需增大主弧弧长,又与熔滴过渡所需电流条件形成参数匹配矛盾;同时,多电源协同控制增加了设备与控制系统复杂度。总体而言,该构型较共工件端电弧实现了热输入与熔敷速率的质变性解耦,但电弧间相互制约的问题仍制约其工业化应用。

2.3 无公共端电弧

无公共端复合电弧的核心特征在于:热源作用与丝材熔化在电路拓扑与物理空间上完全独立,无任何公共导电节点,从而实现热质传递过程最高层级的解耦控制,典型技术包括交叉耦合电弧、斜交耦合电弧等(如图4(c)所示)。其核心解耦思路是将工件加热与丝材熔化两大核心功能,分别交由两套完全独立的电源与导电回路承担,仅在熔池区域完成最终的能量与物质耦合。

交叉耦合电弧是该类构型的典型代表,采用双回路完全独立架构的解耦机制:独立热源回路(如 TIG

或等离子弧)仅与工件相连,电流全部流经工件,作为专用纯热源控制熔池尺寸、熔深及热循环过程;独立质量源回路为丝间电弧,建立于两根焊丝之间,电流完全不流经工件,专司丝材熔化、熔滴生成与过渡行为调控,直接决定熔敷速率、熔滴温度及过渡频率^[80-83]。两大回路电学上无公共节点、空间上相互独立,工艺参数可实现完全独立调节,能量与物质的耦合仅发生在过程末端。交叉电弧虽在控制架构上实现了热质解耦,将工艺映射为近似正交的二维空间,但目前受限于“绕弧”行为等非理想稳定性问题,导致各独立参数自身的有效工艺窗口收窄,尚未完全释放正交解耦带来的调控自由度。斜交耦合电弧则在交叉耦合电弧基础上实现进一步优化,通过非对称空间几何布局,使焊丝与热源电弧呈一定斜角布置,降低了主电弧的偏转程度,在保留双回路完全隔离、热质高度解耦的核心优势前提下,显著提升电弧整体稳定性与工艺鲁棒性^[84-85]。

综上所述,3类构型电弧体系的热质解耦程度呈现清晰的逐级递进规律,其核心指标参数对比见表1。该技术演进脉络,完整展现了复合电弧热源从“功能分离”到“电路解耦”再到“系统架构重构”的迁变过程。

表 1 3种典型电弧热质解耦技术关键参数对比

Table 1 Comparison of key parameters of three typical arc heat and mass decoupling technologies

Core indicators	Tandem arc	DE-GMA arc	Cross arc
Relative heat input(vs. MIG arc)	80%-120%	40%-70%	30%-60%
Relative deposition rate(vs. MIG arc)	100%-225%	100%-130%	100%-230%
Level of heat and mass decoupling	Preliminary decoupling	Moderate decoupling	Highest level decoupling
Applicable material	Carbon steel, stainless steel, aluminum alloy, etc.	Magnesium alloy, aluminum alloy, etc.	Carbon steel, stainless steel, aluminum alloy, heterogeneous metals, etc.
Thickness range	1-40 mm	2-5 mm	0.5-25 mm
Decoupling mechanism	Independent control of dual wires and function allocation	Current shunting via bypass circuit	Complete electrical and spatial isolation
Main advantage	High deposition efficiency, suitable for high-efficiency welding of thick plates	Independently controllable heat input and wide process window	Complete independence of heat and mass with high precision
Main limitation	High total heat input and strong electromagnetic interference	Arc stability influenced by the bypass circuit.	Complex system and high demands on dual-loop control

3 交叉电弧热源研究现状

以交叉电弧为代表的无公共端解耦架构,通过独立热源与独立质量源的协同配置,从控制架构上实现了热质解耦。但这种极致的解耦特性在赋予工艺广阔调控空间的同时,也带来了新的物理现象与工程挑战。从电弧稳定性控制、熔滴过渡行为两大核心维度,系统梳理交叉电弧热源的研究进展,明确当前研

究重点与现存问题,为后续工艺优化、设备改进及工程化应用提供理论支撑与技术参考。

3.1 电弧稳定性控制:绕弧行为及稳弧策略

交叉电弧绕弧行为及产生原因如图5(a)所示,交叉电弧热源中,主电弧(非熔化极电弧,如GTA弧、等离子弧),建立于钨电极与工件之间,负责精准调控工件热输入;丝间电弧(熔化极电弧)建立于两根焊丝之间,与工件无任何电气连接,主导丝材熔敷速率调控。

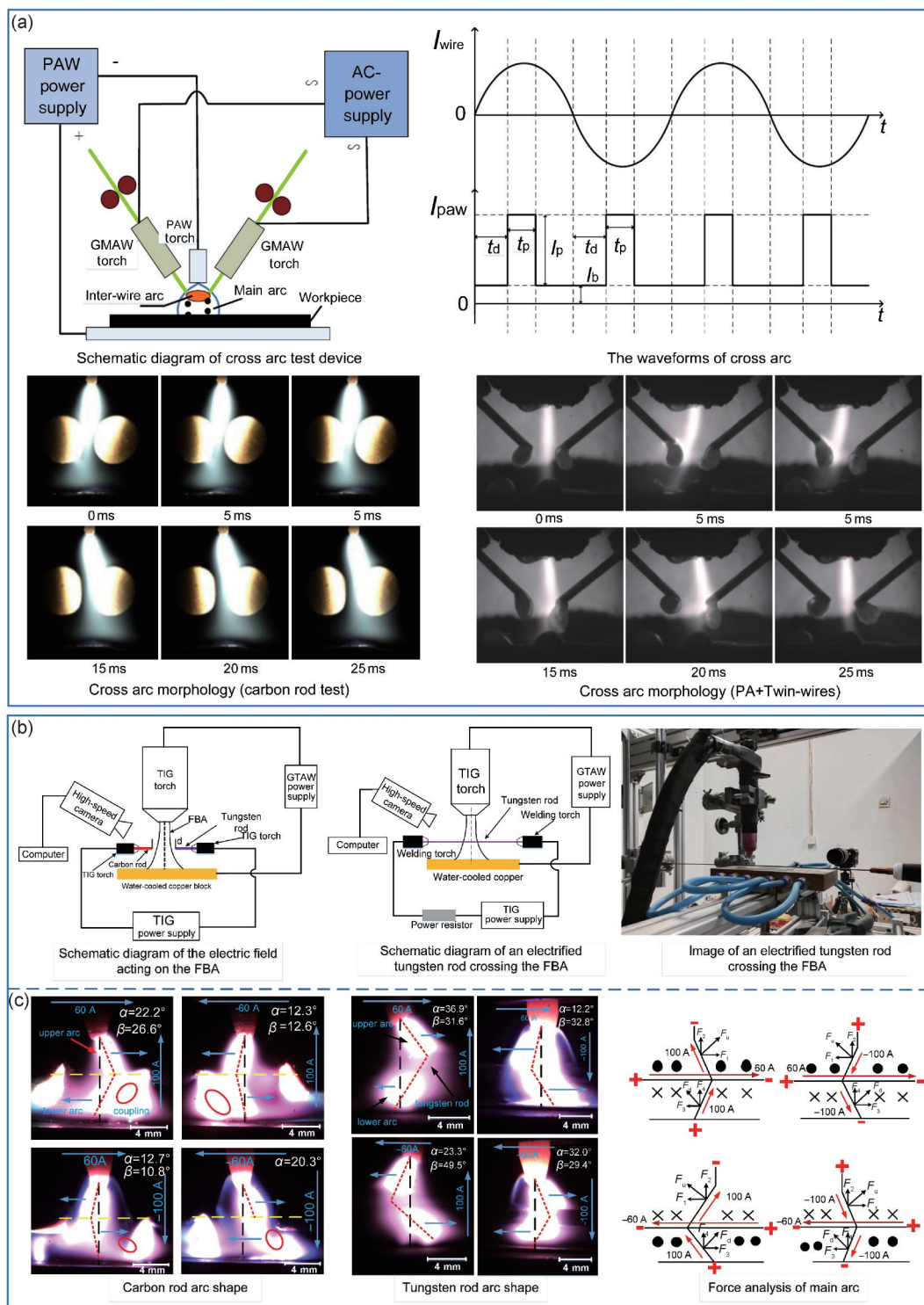


图5 交叉电弧绕弧行为及产生原因

(a)交叉电弧绕弧行为^[83];(b)电场与磁场发生装置^[85];(c)绕弧行为成因分析^[85]

Fig.5 Behavior and causes of cross-arc looping

(a)cross-arc looping behavior^[83];(b)device for generating electric and magnetic fields^[85];(c)analysis of causes of looping behavior^[85]

交叉电弧打破了“电弧是两个电极之间强烈而持久的放电现象”这一传统认知,工件熔池仅作为主电弧与丝间电弧相互耦合的一个电极。交叉电弧最显著的特征是电弧呈交叉形态,可实现工件热输入与金属熔敷速度的独立可控,这也是其实现热质解耦的关键

所在。

双电弧同步控制是保障等离子弧与丝间电弧稳定耦合的前提,丝间电弧(主动电弧)采用交流正弦波形,等离子弧(被控对象)通过电流采样单元实时采集丝间电弧电流信号并反馈至控制单元,控制单元将预

设等离子弧参数转化为控制波形,调控等离子弧电源IGBT单元占空比,进而完成对其电流波形的精准调控,实现双弧同步协同控制。为适配电弧稳定与熔滴过渡稳定的双重需求,等离子弧采用脉冲波形,通过优化基值电流、峰值电流、脉冲延时及持续时间等参数,可进一步提升双电弧耦合稳定性。

在交叉电弧前期探索中,研究者采用碳棒电极替代丝材电极、主电弧作为GTA电弧,通过高速摄像机观测发现:主电弧可稳定建立于钨电极与工件之间,但呈现出规律性左右摆动的现象。结合电路采集系统分析表明,主电弧的摆动具有明确指向性(规律性摆动至丝间电弧的阴极),该现象被定义为绕弧行为^[84]。后续研究采用等离子弧替代GTA电弧以增强主电弧力,测试发现等离子弧仍保持规律性左右摆动,因等离子弧电流设置较小,其电弧力不足以促使熔滴脱离焊丝,但可实现等离子弧与丝间电弧的稳定耦合。绕弧行为的负面影响显著:一是导致热源分布不对称,引发焊道成形不均、咬边等缺陷;二是严格控制电流匹配精度与弧间距离,导致工艺窗口变窄。

为揭示绕弧行为成因,研究者设计外加电场、外加磁场作用于自由电弧的对比测试(如图5(b)所示):外加电场由TIG电源在两根碳棒之间产生,两根碳棒由焊枪夹持并分别位于自由电弧两侧;外加磁场由通电钨棒产生,钨棒由TIG电源供电且两端分别由TIG焊枪夹持固定。测试结果(如图5(c)所示)表明:仅施加外加电场时,TIG电弧无偏转;当主电弧电流由工件流向钨极时,主电弧始终偏向丝间电弧的阴极碳棒端,以及通电钨棒的电流流出方向;当主电弧电流由钨极流向工件时,主电弧始终偏向丝间电弧的阳极碳棒端,以及通电钨棒的电流流入方向。

结合测试对比与电磁学分析,研究者发现主电弧受力规律与通电钨棒测试中主电弧偏转规律完全一致,明确丝间电弧电流水平分量产生的磁场是交叉电弧绕弧行为的根本原因。如图5(c)所示,研究者将交叉电弧的主电弧与丝间电弧等效为通电探针模型,并建立通电探针自由旋转模型,进一步验证了该结论。基于绕弧行为成因,斜交耦合电弧通过优化两根焊丝的空间布置(采用一高一低非对称布局),改变丝间电弧的空间位姿,降低丝间电弧电流的水平分量与主电弧所受安培力,最终在保留热质解耦核心优势的同时,显著提升主电弧的稳定性,为交叉电弧工程应用奠定基础。

3.2 熔滴过渡行为

交叉耦合电弧特性研究表明,电弧绕弧行为会显

著改变熔滴受力状态:主电弧力直接作用于熔滴表面,其稳定性直接决定熔滴过渡的稳定性,可有效提升熔滴过渡稳定性。图6(a)为丝间电弧电流、主电弧电流波形与熔滴过渡图像的时间对应关系。等离子弧作用于熔滴的电弧力主要包含两部分:一是电场加速主电弧粒子后,粒子与熔滴碰撞产生的冲击力;二是等离子电弧轴向电磁力对熔滴形成的压力。模拟分析证实,等离子弧脉冲峰值电流的变化是调控等离子弧对熔滴作用力大小及熔滴过渡形式的核心因素。

为研究斜交耦合电弧中丝材极性排布对熔滴过渡的影响,如图6(b)所示,当阴极丝在上、阳极丝在下时,随着丝间电弧输入电压增大,阳极斑点力可促进熔滴过渡并降低射流过渡临界电流,但阴极斑点力显著增强,会严重抑制熔滴过渡。当阴极丝在下、阳极丝在上时,阳极熔滴处于滴状与射滴过渡,阴极熔滴则主要处于滴状过渡。相同丝间电弧输入电压下,阳极在下、阴极在上时的等离子弧电弧电压要高于阳极在上、阴极在下的情况,而丝间电弧电流则完全相反。

针对斜交耦合电弧中等离子主弧对熔滴过渡的调控作用(图6(c)~(e)),测试发现:增加等离子弧电流或离子气流量,对丝间电弧电流基本无影响,但会使等离子弧电压呈上升趋势。其中,增大等离子弧电流可显著提高作用于阳极与阴极熔滴的等离子流力:阳极熔滴可由搭桥过渡转为滴状过渡;对于阴极熔滴,等离子流力的影响更为显著,可促使其由滴状过渡转变为喷射过渡。

对比两种调控方式可见,与增加等离子弧电流相比,提高离子气流量更能有效促进阴极熔滴过渡,同时抑制阴极斑点力的不利影响,推动阴极熔滴由滴状过渡转为射流过渡;而对于阳极熔滴,受离子气冷却效应影响,增加等离子弧电流对其过渡形式的调控作用更为显著。此外,阴极丝材末端形成的液流束,可大幅缩短熔滴初始位置与工件熔池的间距,对于改善阴极熔滴过渡、提升熔滴过渡的稳定性与精准度具有重要作用。

4 未来发展趋势与挑战

以交叉电弧为代表的无公共端电弧热源,虽在控制架构上实现热输入与质量传递的解耦,但在电弧稳定性、熔滴过渡调控及系统集成等方面仍面临瓶颈。以下从硬件集成、物理机制、智能控制3个核心层面,明确核心挑战与发展趋势。

(1) 硬件层面: 从分立系统走向一体化集成

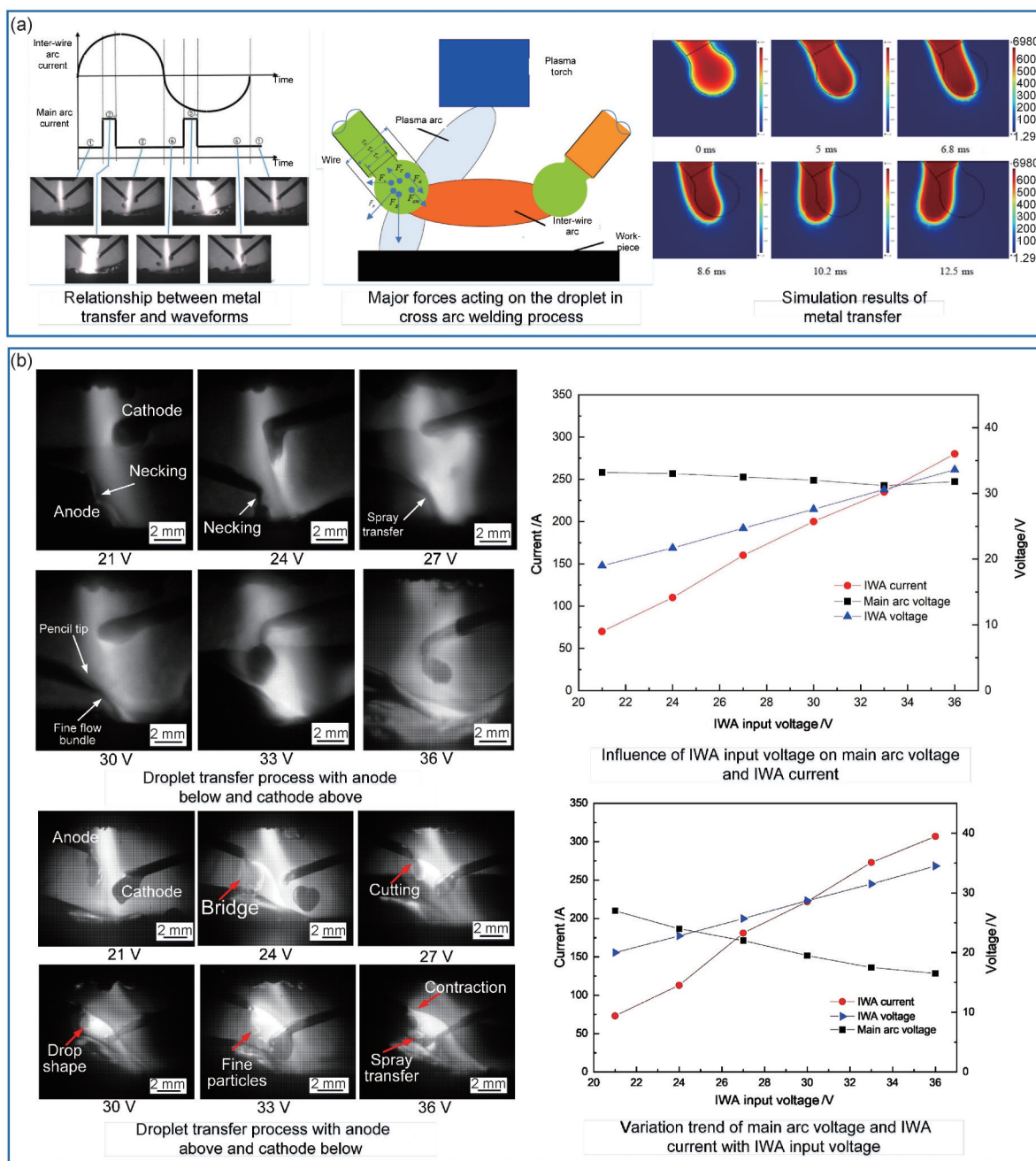
交叉电弧系统采用两套分立电源及送丝系统, 不仅使整体结构复杂、成本高昂, 更因空间电磁耦合而引发“绕弧行为”, 严重制约电弧稳定性。为从根源上解决这一问题, 未来硬件集成应重点围绕3个方向: 共享逆变拓扑电源, 即将双回路电源整合于同一平台, 共享直流母线, 从源头上抑制电磁干扰; 紧凑型复合焊枪, 即设计集成钨极、双丝通道、气路及水冷的一体化焊枪, 优化电极空间位形, 减小丝间电弧电流水平分量, 从而抑制绕弧行为; 主动电磁屏蔽, 即在焊枪内部嵌入磁屏蔽层或补偿线圈, 进一步削弱电弧间的互感影响。

(2) 物理机制层面: 从现象描述走向高保真建模

交叉电弧热质传递的跨尺度解耦机理尚未明确, 缺乏电弧参数输入与热量输出、质量输出的精准量化模型, 导致参数预测与优化难以实现。未来需依托高速X射线、光谱诊断等先进测试, 厘清电弧输入参数与热量输出、质量输出响应之间的映射关系, 构建多物理场跨尺度数值模型, 实现电弧-熔滴-熔池一体化预测, 推动工艺从“经验试错”向“预测设计”转型。

(3) 控制层面: 从经验调节走向自适应学习

现有控制算法难以满足交叉电弧双回路的实时解耦需求, 未来需深度融合AI与具身智能技术: 基于深度强化学习建立双回路协同控制框架, 以热质解耦



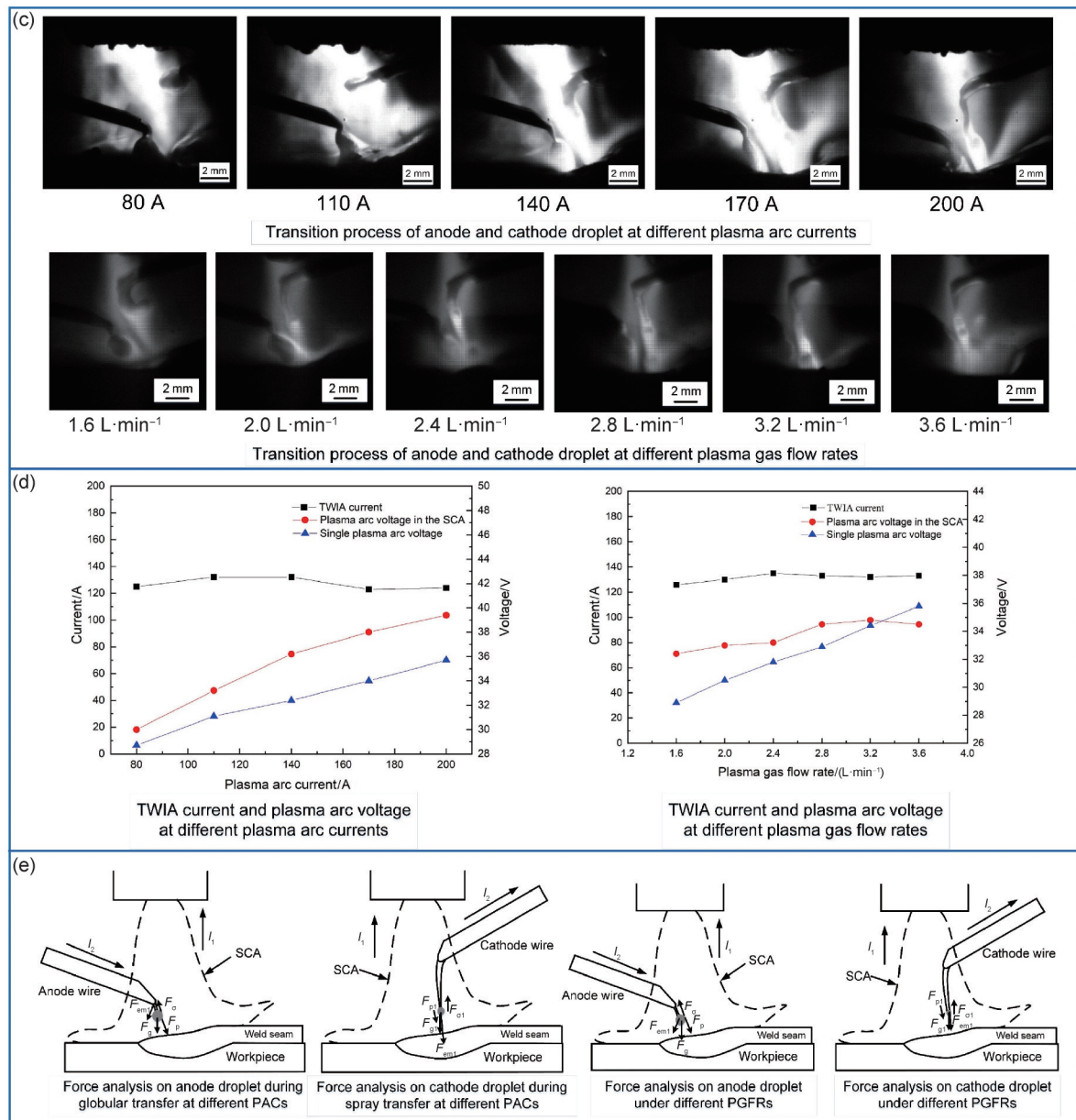


图6 熔滴过渡行为研究

(a)交叉电弧熔滴过渡^[83];(b)斜交电弧熔滴过渡^[86];(c)等离子弧激励熔滴过渡^[87];(d)丝间电弧与等离子弧波形^[87];(e)阴阳极熔滴受力分析^[87-88]

Fig.6 Research on droplet transfer behavior

(a)cross arc droplet transfer^[83];(b)skew-coupling arc droplet transfer^[86];(c)plasma arc-induced droplet transfer^[87];

(d)waveforms of inter-wire arc and plasma arc^[87];(e)force analysis of anode and cathode droplets^[87-88]

为目标,自主优化电流、送丝速度等参数;引入数字孪生,融合物理模型与数据驱动,实现虚拟调试、故障预测与在线自校正;探索具身智能应用,将电源设备视为感知-决策-执行智能体,融合多源传感实时感知电弧与熔滴状态,动态调整解耦策略,推动热质解耦从“静态预设”迈向“动态智能”。

5 结束语

电弧制造中效率与质量的核心矛盾,本质源于电

弧传热与传质过程的刚性耦合,实现热质传递解耦是突破该瓶颈的关键路径。从技术演进来看,热质传递解耦呈现清晰层级:单电弧内部优化仅能优化耦合关系,难以突破同源架构固有局限;复合电弧系统通过功能分离与结构优化,实现热质独立调控,其中无公共端交叉电弧及斜交耦合设计,进一步提升了解耦精准与稳定性。

无公共端架构交叉电弧架构通过热源与质量源的空间、电路双重隔离,实现热输入与质量传递的正交控制,彻底打破传统单电弧的耦合约束;斜交耦合

电弧等优化方案有效改善电弧稳定性与工艺适配性,为工程化应用奠定基础。未来随着硬件集成、多场协同控制与智能算法的深度融合,交叉电弧技术将持续突破现有瓶颈,实现效率、精度与性能协同提升,助力其从经验试错迈向科学可控的新阶段,为高端制造领域提供更高效、精准的加工方案。

参考文献

- [1] Gao H Q, Li H R, Shao D D, et al. Towards quality controllable strategies in wire-arc directed energy deposition [J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2025, 7(4): 042004.
- [2] 熊江涛, 耿海滨, 林鑫, 等. 电弧增材制造研究现状及在航空制造中应用前景[J]. 航空制造技术, 2015, 58(增刊2): 80-85.
Xiong J T, Geng H B, Lin X, et al. Research status of wire and arc additive manufacture and its application in aeronautical manufacturing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(S2): 80-85.
- [3] 韩启飞, 符瑞, 胡锦龙, 等. 电弧熔丝增材制造铝合金研究进展[J]. 材料工程, 2022, 50(4): 62-73.
Han Q F, Fu R, Hu J L, et al. Research progress in wire arc additive manufacturing of aluminum alloys [J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(4): 62-73.
- [4] 胡青松, 闫朝阳, 蒋凡, 等. 多电极电弧焊接与增材制造技术的现状与未来趋势[J]. 材料工程, 2025, 53(5): 17-34.
Hu Q S, Yan Z Y, Jiang F, et al. Current status and future trends of multielectrode arc welding and additive manufacturing technology [J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(5): 17-34.
- [5] 张含嫣, 熊俊, 陈勇, 等. 低热输入高效成形电弧增材制造研究进展及展望[J]. 电焊机, 2023, 53(2): 1-11.
Zhang H Y, Xiong J, Chen Y, et al. Research progress and prospect of wire and arc additive manufacturing with low heat input and high-efficiency forming [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(2): 1-11.
- [6] 张岩, 闫婉迪, 国旭明, 等. 基于熔化极电弧增材制造的控“形”与控“性”技术研究现状与展望[J]. 有色金属工程, 2021, 11(6): 17-23.
Zhang Y, Yan W D, Guo X M, et al. Research status and prospect of control technology of shape and property based on gas metal arc welding additive manufacturing [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(6): 17-23.
- [7] 贾传宝, 宋亚东, 王卫, 等. 金属材料电弧增材制造技术研究现状[J]. 稀有金属, 2023, 47(5): 633-646.
Jia C B, Song Y D, Wang W, et al. A survey of wire arc additive manufacturing technologies for metal materials [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2023, 47(5): 633-646.
- [8] Wang Z J, Yang L X, Lin Z C, et al. Segmented adaptive predictive control of backside weld width in all-position STT root-pass welding [J]. Welding in the World, 2026, 70(4): 1471-1485.
- [9] 刘光云, 吕向阳, 王义. STT焊接工艺参数对根焊质量的影响[J]. 焊接技术, 2010, 39(5): 56-58.
Liu G Y, Lyu X Y, Wang Y. Effect of STY welding procedure parameters on root welding quality [J]. Welding Technology, 2010, 39(5): 56-58.
- [10] 冯靖, 武少杰, 高洪明, 等. 基于熔池受力的全位置STT打底焊分段工艺[J]. 焊接, 2022(2): 1-5, 17.
Feng J, Wu S J, Gao H M, et al. Subsection process of all-position STT backing welding based on the force in molten pool [J]. Welding & Joining, 2022(2): 1-5, 17.
- [11] 杜茂华, 韩永全, 樊伟杰, 等. 高强铝合金双脉冲VPPA焊缝成形机理[J]. 焊接学报, 2020, 41(2): 43-47, I0007.
Du M H, Han Y Q, Fan W J, et al. Mechanism of weld formation using double pulsed variable polarity plasma arc welding of high strength aluminum alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(2): 43-47, I0007.
- [12] Wu K Y, Ding N, Yin T, et al. Effects of single and double pulses on microstructure and mechanical properties of weld joints during high-power double-wire GMAW [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 35: 728-734.
- [13] Yang M X, Zheng H, Qi B J, et al. Effect of arc behavior on Ti-6Al-4V welds during high frequency pulsed arc welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243: 9-15.
- [14] 吴开源, 陈梓威, 黄浩, 等. 低频相位对双丝双脉冲GMAW熔滴过渡和焊缝成形的影响[J]. 焊接学报, 2022, 43(7): 43-48, I0005.
Wu K Y, Chen Z W, Huang H, et al. Effect of low-frequency phase on metal transfer and weld formation in double-wire double-pulse GMAW [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(7): 43-48, I0005.
- [15] 谷晓鹏, 段珍珍, 邓钢, 等. 双脉冲MIG/MAG焊全数字控制策略[J]. 材料工程, 2015(2): 20-25.
Gu X P, Duan Z Z, Deng G, et al. Full digital control strategy for double-pulse MIG/MAG welding [J]. Journal of Materials Engineering, 2015(2): 20-25.
- [16] Wu K Y, Chen Q R, Liu Z T, et al. Arc characteristic in aluminum alloy double-wire variable polarity double base pulsed gas metal arc welding [J]. Vacuum, 2025, 233: 113914.
- [17] Ye Z, Zhu H Y, Wang S F, et al. Fabricate high-strength 7075 aluminum alloy joint through double pulse MIG welding process [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 125: 512-522.
- [18] 孙丽云, 黄松涛, 焦向东. 矩形波脉冲交流电源的控制系统设计与分析[J]. 北京石油化工学院学报, 2004, 12(3): 23-26.
Sun L Y, Huang S T, Jiao X D. Design and analysis of control system for a rectangular pulse AC power supply [J]. Journal of Beijing Institute of Petro-Chemical Technology, 2004, 12(3): 23-26.
- [19] 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 molten behavior with ultra high frequency pulsed arc welding [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(4): 589-593.
- [20] 张景璋, 何广平, 赵红雁, 等. 超高频可调多脉冲GTAW电弧温度分布特征[J]. 焊接学报, 2025, 46(8): 16-27.
Zhang J Z, He G P, Zhao H Y, et al. Temperature distribution characteristics of ultrahigh frequency adjustable multi-pulse GTAW arc [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2025, 46(8): 16-27.

- [21] Zhao H Y, Xing Y, Zhang J Z, et al. Transient characteristics of ultra-high frequency adjustable multi-pulse gas tungsten welding arc[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 32: 2309-2325.
- [22] Chen S J, Zhang J Z, Zhao H Y, et al. Development of ultra-high frequency adjustable multi-pulsed gas tungsten arc welding power supply and analysis of arc morphology[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 125: 295-305.
- [23] 贾志宏, 万晓慧, 郭德伦. 基于响应面法的超高频电弧增材制造工艺优化[J]. *焊接学报*, 2020, 41(6): 90-96.
Jia Z H, Wan X H, Guo D L. Optimization of ultra-high frequency arc additive manufacturing process based on response surface methodology[J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2020, 41(6): 90-96.
- [24] 马跃洲, 王春柏, 陈剑虹. CO₂焊接过程动态信号的特征分析[J]. *焊接学报*, 2001, 22(2): 67-70.
Ma Y Z, Wang C B, Chen J H. Characteristic analysis of dynamic signals in CO₂ arc welding process[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2001, 22(2): 67-70.
- [25] Yang Z D, Fang C F, Chen Y, et al. Arc behavior and droplet transfer of CWW CO₂ welding[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2016, 23(8): 808-814.
- [26] Wahba M, Mizutani M, Katayama S. Hybrid welding with fiber laser and CO₂ gas shielded arc[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 221: 146-153.
- [27] 邹文凤. 大电流CO₂焊接“燃弧-短路”过程精细电磁控制研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
Zou W F. Research on elaborate electromagnetic control of “arc-short circuit” process in high current CO₂ welding[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.
- [28] Miao J Y, Li Y W, Dong Z H, et al. Research progress of low spatter CO₂ welding technology[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 123 (11/12): 3715-3736.
- [29] 刘健, 贺智涛, 牛继承. 船用高强度钢板窄间隙热丝TIG焊接工艺研究[J]. *材料开发与应用*, 2018, 33(3): 10-15.
Liu J, He Z T, Niu J C. Research on narrow gap hot wire TIG welding of thick plate of high strength steel for shipbuilding[J]. *Development and Application of Materials*, 2018, 33(3): 10-15.
- [30] Zeng Z W, Zhang Z Q, Jin X, et al. Microstructure evolution and properties of Inconel 625 alloy fabricated by hot-wire TIG additive manufacturing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1032: 181113.
- [31] 张杰, 窦泉山, 吴业俊, 等. 热丝TIG焊层间未熔合缺陷成因与预防措施[J]. *金属加工(热加工)*, 2020(11): 66-68.
Zhang J, Dou Quanshan, Zhang Jie, Wu Yejun, et al. Causes and preventive measures of non-fusion defects between hot wire TIG welding layers[J]. *MW Metal Forming*, 2020(11): 66-68.
- [32] Cao F J, Chen S J, Du C C. Investigation of hot-wire TIG welding based on the heat-conduction[J]. *Energy Procedia*, 2018, 144: 9-15.
- [33] 吴洁, 沈以赴, 黄国强. 2024铝合金填丝TIG焊接头搅拌摩擦加工组织和性能研究[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(20): 153-161.
Wu J, Shen Y F, Huang G Q. Investigation into the microstructure and properties of 2024Al TIG joint with wire filler subjected to friction stir processing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(20): 153-161.
- [34] Sood A, Schimmel J, Ferreira V M, et al. Directed energy deposition of Invar 36 alloy using cold wire pulsed gas tungsten arc welding: effect of heat input on the microstructure and functional behaviour[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 25: 6183-6197.
- [35] Zhilin P, Gavrilov G, Gerasimov E, et al. Advanced welding and cladding methods using auxiliary cold and hot wires[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2020, 30: 209-215.
- [36] Díaz V V, Cortes J M, Alvarez A E. A contribution to the study of the cold wire TIG process in the flat, horizontal and overhead position with new torch designs and wire feed methodologies[J]. *Welding International*, 2017, 31(6): 415-424.
- [37] Chen M A, Zhang D, Wu C S. Current waveform effects on CMT welding of mild steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 243: 395-404.
- [38] 周星宇, 刘红伟, 田甜. 冷金属过渡(CMT)技术综述[J]. *材料导报*, 2024, 38(增刊1): 422-430.
Zhou X Y, Liu H W, Tian T. A review of cold metal transition (CMT) technologies[J]. *Materials Reports*, 2024, 38 (S1): 422-430.
- [39] 付毅帅, 樊磊, 常云峰, 等. 冷金属过渡技术在异质连接及增材制造中的应用[J]. *金属加工(热加工)*, 2025(1): 81-90.
Fu Y S, Fan L, Chang Y F, et al. Application of cold metal transfer technology in heterogeneous bonding and additive manufacturing[J]. *MW Metal Forming*, 2025(1): 81-90.
- [40] Kesarwani S, Yuvaraj N. Optimization of CMT-WAAM process parameters to minimize the porosity and surface roughness in bi-metallic wall of aluminium alloys[J]. *Welding in the World*, 2025, 69(4): 989-1002.
- [41] 肖荣诗, 吴世凯. 激光-电弧复合焊接的研究进展[J]. *中国激光*, 2008, 35(11): 1680-1685.
Xiao R S, Wu S K. Progress on laser-arc hybrid welding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(11): 1680-1685.
- [42] 罗煜林. 探究激光与MAG电弧在复合焊接中的相互影响[J]. *金属加工(热加工)*, 2025(9): 55-62.
Luo Y L. Investigating the interaction between laser and MAG arc in hybrid welding[J]. *MW Metal Forming*, 2025(9): 55-62.
- [43] Wendt Dreveck N, Messias Donizete Borba T, Custódio de Moura Filho O, et al. Buried arc application in hybrid laser-arc welding of thermo-mechanical control process steels[J]. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2024, 11(2): 179-192.
- [44] Zhou J H. Application and development prospect of laser-arc hybrid welding[J]. *International Core Journal of Engineering*, 2026, 12(3): 105-112.
- [45] Ma Y X, Zhang J Q, Xu H, et al. Enhancing droplet transfer in laser-arc hybrid welding via oscillating laser-induced plasma interaction[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2026, 41: 4422-4434.
- [46] Zhao H L, Zhang S Y, Chen H, et al. Magnetic control of laminar

- plasma arc: arc behavior and narrow gap welding[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2025, 47(12): 649.
- [47] 谢昶. 外加横向磁场的磁控电弧异种钢 GTAW 温度场与残余应力研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2023.
- Xie C. Research on temperature field and residual stress of magnetically controlled arc GTAW for dissimilar steels with external transverse magnetic field[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2023.
- [48] 孙雅杰, 常云龙. 磁控电弧焊接过程及新技术研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(21): 21155-21165.
- Sun Y J, Chang Y L. Development of magnetically controlled arc welding process and new technology[J]. Materials Reports, 2020, 34(21): 21155-21165.
- [49] 华爱兵, 陈树君, 殷树言, 等. 磁控电弧焊接工艺在非熔化极气体保护焊中的应用[J]. 焊接, 2007(2): 26-30.
- Hua A B, Chen S J, Yin S Y, et al. Application of non-consumable gas shielded arc welding controlled by magnetic field[J]. Welding & Joining, 2007(2): 26-30.
- [50] 孙清洁, 林三宝, 杨春利, 等. 超声钨极氩弧复合焊接电弧压力特征研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(4): 53-57.
- Sun Q J, Lin S B, Yang C L, et al. Characteristic of arc pressure in ultrasonic-TIG hybrid welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(4): 53-57.
- [51] 杨春利, 林三宝, 范成磊. 高效超声电弧复合及窄间隙 GMA 焊接技术[J]. 金属加工(热加工), 2013(增刊2): 82.
- Yang C L, Lin S B, Fan C L. High efficiency ultrasonic arc compound and narrow gap GMA welding technology[J]. MW Metal Forming, 2013(S2): 82.
- [52] Li W L, Jia C C, Gao Y H, et al. Arc change mechanism in ultrasonic-magnetic field coaxial hybrid GTAW[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2025, 299: 110407.
- [53] Liu W Q, Jia C B, Guo M, et al. Compulsively constricted WAAM with arc plasma and droplets ejected from a narrow space[J]. Additive Manufacturing, 2019, 27: 109-117.
- [54] 张瑞英, 蒋凡, 陈树君. 多电极电弧焊接技术的研究现状及展望[J]. 电焊机, 2017, 47(9): 6-11.
- Zhang R Y, Jiang F, Chen S J. Current research status and prospect of multi-electrode arc welding[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(9): 6-11.
- [55] Kim J Y, Lee J, Lee S H. Effect of reverse-polarity hot wire on the tandem arc welding process[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2022, 36: 101168.
- [56] 刘国强. 低合金钢 Tandem NG-GMAW 电弧行为对熔池流动和缺陷形成影响机制[D]. 上海: 上海交通大学, 2021.
- Liu G Q. Influence mechanism of arc behaviors on molten pool flow and defect formation in tandem NG-GMAW of low alloy steel[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2021.
- [57] 苏立虎. Tandem 双丝气保焊引弧控制方法的研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(17): 132-136.
- Su L H. Research on arc ignition control method of tandem dual-wire arc welding[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(17): 132-136.
- [58] 张晓枫. 三丝熔化极气体保护焊接电弧行为及熔滴过渡研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- Zhang X F. Research on the arc behavior and metal transfer of triple-wire gas metal arc welding[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [59] 马晓丽, 华学明, 徐琛, 等. 三丝焊接参数对电弧稳定性的影响研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(1): 16-18, 23.
- Ma X L, Hua X M, Xu C, et al. Research on effect of triple-wire welding parameters on arc stability[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(1): 16-18, 23.
- [60] 陈姬, 宗然, 武传松, 等. TIG-MIG 复合焊电弧间相互作用对焊接过程的影响[J]. 机械工程学报, 2016, 52(6): 59-64.
- Chen J, Zong R, Wu C S, et al. Influence of arcs interaction on TIG-MIG hybrid welding process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(6): 59-64.
- [61] 杨涛, 张生虎, 高洪明, 等. TIG-MIG 复合焊电弧特性机理分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(7): 25-28.
- Yang T, Zhang S H, Gao H M, et al. Analysis of mechanism for TIG-MIG hybrid arc properties[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(7): 25-28.
- [62] Cui X F, Chen J, Xia C Y, et al. The mechanism study of TIG-MIG hybrid welding process based on simulation[J]. Vacuum, 2023, 215: 112341.
- [63] Miao X L, Zhang H T, Cao W H, et al. Study on the depth and evolution of keyholes in plasma-MIG hybrid welding[J]. Crystals, 2023, 13(3): 412.
- [64] 韩蛟, 韩永全, 洪海涛, 等. 铝合金等离子-MIG 复合焊接电弧行为[J]. 焊接学报, 2022, 43(2): 45-49.
- Han J, Han Y Q, Hong H T, et al. Arc behavior of plasma-MIG hybrid welding of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(2): 45-49.
- [65] Yuji T, Tashiro S, Kinoshita H, et al. An investigation on plasma-MIG hybrid welding process of thick plate aluminum[J]. Journal of Advanced Joining Processes, 2024, 9: 100188.
- [66] 曹梅青, 赵雪勃, 仇楠楠, 等. 工艺参数对双丝间接电弧气体保护焊熔滴过渡的影响[J]. 焊接技术, 2013, 42(10): 31-34.
- Cao M Q, Zhao X B, Qiu N N, et al. Influence of Process parameters on drop transition in twin-wire indirect arc argon arc welding[J]. Welding Technology, 2013, 42(10): 31-34.
- [67] 吴东亭, 史传伟, 邹增大, 等. 基于 ANSYS 的双丝间接电弧的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2012, 41(9): 160-162.
- Wu D T, Shi C W, Zou Z D, et al. Numerical simulation of twin-wire indirect arc based on ANSYS[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(9): 160-162.
- [68] Xiang R, Huang J K, Yu X Q, et al. A review of double-electrode GMAW: approaches, developments and variants[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 133: 1160-1182.
- [69] 武传松, 张明贤, 李克海, 等. DE-GMAW 高速电弧焊工艺机理的研究[J]. 金属学报, 2007, 43(6): 663-667.
- Wu C S, Zhang M X, Li K H, et al. Study on the process mechanism of high speed arc welding DE-GMAW[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(6): 663-667.
- [70] Zhu M, Li C K, Zhang G, et al. Modeling and control of consum-

- able DE-GMAW process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 24: 293-297.
- [71] 张瑞英, 蒋凡, 陈树君, 等. 旁路电源工作模式对 arcing-wire PAW 电特性与熔滴过渡的影响[J]. 焊接学报, 2017, 38(2): 41-46.
- Zhang R Y, Jiang F, Chen S J, et al. Influence of bypass power mode on electrical properties and droplet transition of arcing-wire PAW[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(2): 41-46.
- [72] Chen S J, Zhang S L, Huang N, et al. Droplet transfer in arcing-wire GTAW[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 23: 149-156.
- [73] Zhang R Y, Jiang F, Chen S J. Power transferred to the filler wire in twin-body plasma arc welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 62: 566-576.
- [74] Zhang R Y, Jiang F, Chen S J. Comparison of energy acted on workpiece among twin-body plasma arc welding, non-transferred plasma arc welding and plasma arc welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 24: 152-160.
- [75] Wu D T, An Q, Zheng C Y, et al. Effect of bypass coupling current on corrosion resistance of twin-wire indirect arc surfacing layer[J]. Corrosion Science, 2020, 174: 108817.
- [76] Zhang Z H, Wu D T, Zou Y. Effect of bypass coupling on droplet transfer in twin-wire indirect arc welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 262: 123-130.
- [77] Wang Z L, Liu L M. Physical characteristics of triple-wire gas indirect arc plasma[J]. Vacuum, 2023, 215: 112246.
- [78] Zhong P, Li L Y, Liu H H, et al. Arc shape and dynamic behavior of the tri-arc twin-wire GMAW process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(3/4): 1633-1643.
- [79] 陈树君, 张亮, 王旭平, 等. 双送丝辅助电弧驱动主电弧摆动的焊接方法: CN201310253480.8[P]. 2017-08-25.
- [80] Chen S J, Zhang L, Wang X P, et al. Stability of the cross-arc process-a preliminary study[J]. Welding Journal, 2015, 94: 158-168.
- [81] Zhang L, Su S, Wang J, et al. Investigation of arc behaviour and metal transfer in cross arc welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 37: 124-129.
- [82] Zhang L, Chen S J, Song Y X, et al. Metal transfer in the cross-arc welding process[J]. Welding Journal, 2016, 95(9): 340S-356S.
- [83] 张亮. 交叉耦合电弧焊接方法及热力传输机制研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
- Zhang L. Study on the thermo-dynamic transmission mechanisms in cross arc welding process[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
- [84] Zhao H Y, LYU T, Zhang J Z, et al. Research on suppression of cross coupled arc oscillation behavior[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 115: 365-374.
- [85] Dong S W, Jiang F, Xu B, et al. Physical mechanism of polar zone phenomena in cross-coupling arc welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50: 440-449.
- [86] Dong S W, Jiang F, Xu B, et al. Influence of polarity arrangement of inter-wire arc on droplet transfer in cross-coupling arc welding[J]. Materials, 2019, 12(23): 3985.
- [87] Dong S W, Xu B, Lu Z Y, et al. Effect of plasma main arc on droplet transfer in skew-coupling arc welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 285: 116799.
- [88] 董善文. 斜交耦合电弧焊电弧特性及熔滴过渡行为研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2020.
- Dong S W. Study on arc characteristics and droplet transfer behavior of oblique coupling arc welding[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52335007)

收稿日期: 2026-04-17; 录用日期: 2026-05-28

通讯作者: 曾勇(1982—), 男, 教授, 博士, 研究方向为机器人等离子喷涂工艺与加工制造工艺, 联系地址: 江苏省盐城市亭湖区希望大道中路1号盐城工学院机械优集学院(224051), E-mail: zengyong@ycit.edu.cn

(本文责编: 张宝玲)