

先进连接技术

PAW-GTAW 复合焊接平台设计及
复合焊接工艺探究王昊¹, 宋正昊¹, 丁同明², 李天庆^{1,3*}, 鲍健¹, 陈长新¹

(1.江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013; 2.大晃机械(青岛)有限公司, 山东 青岛 266108; 3.江苏省农机装备再制造重点实验室, 江苏 镇江 212013)

摘要: **目的** 研究 PAW-GTAW 复合焊接工艺, 实现“1+1>2”的复合焊接优势, 获得更高质、高效的复合焊接接头。**方法** 首先自行设计搭建了 PAW-GTAW 复合焊接平台, 通过拍摄耦合前后各工艺电弧的变化以及测量电弧电压、电流信号, 进一步分析耦合前后的电弧静特性, 从而初步探索 PAW-GTAW 复合焊接工艺机理; 其次定量对比复合前后焊接接头熔深、熔宽的变化情况, 并阐述耦合电弧对表面成形改善的作用机理。**结果** 耦合电弧的作用可以有效提升等离子电弧电压的稳定性, 并且降低复合后 PAW 平均电弧电压, 而非熔化极保护焊电弧复合前后没有明显变化。耦合后, 复合焊接接头熔深呈现“PAW 熔深+GTAW 熔深<PAW-GTAW 复合熔深”的复合焊接优势, 相较于单一 PAW 焊接接头, 其熔宽增加了 0.99 mm。**结论** PAW-GTAW 复合焊接工艺对焊接速度和焊接熔深具有“1+1>2”的复合焊接优势; 复合后, 电弧对焊缝表面成形有明显的改善作用, 可见复合工艺不仅能提升电弧的能量密度, 还能调节焊缝熔池热-力分布及熔融液态金属的流动。

关键词: PAW-GTAW; 复合焊接; 平台设计; 电弧特性; 焊缝表面成形**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2026.04.011**中图分类号:** TG456.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-6457(2026)04-0108-09Design of PAW-GTAW Hybrid Welding Platform and Exploration
of Hybrid Welding ProcessWANG Hao¹, SONG Zhenghao¹, DING Tongming², LI Tianqing^{1,3*}, BAO Jian¹, CHEN Changxin¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Jiangsu Zhenjiang 212013, China; 2. Taiko Kikai (Qingdao) Co., Ltd., Shandong Qingdao 266108, China; 3. Jiangsu Key Laboratory for Agricultural Machinery Equipment Remanufacturing, Jiangsu Zhenjiang 212013, China)

ABSTRACT: The work aims to study the PAW-GTAW hybrid welding process, achieve a synergistic effect of “1+1>2”, and obtain higher-quality and more efficient hybrid welded joints. A self-designed PAW-GTAW hybrid welding platform was constructed for experimentation. Firstly, by capturing the changes of each process arc before and after coupling and measuring the

收稿日期: 2025-04-27**Received:** 2025-04-27**基金项目:** 国家自然科学基金 (51605201)**Fund:** National Natural Science Foundation of China (51605201)**引文格式:** 王昊, 宋正昊, 丁同明, 等. PAW-GTAW 复合焊接平台设计及复合焊接工艺探究[J]. 精密成形工程, 2026, 18(4): 108-116.

WANG Hao, SONG Zhenghao, DING Tongming, et al. Design of PAW-GTAW Hybrid Welding Platform and Exploration of Hybrid Welding Process[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2026, 18(4): 108-116.

***通信作者 (Corresponding author)**

arc voltage and current signals, the static characteristics of the arc before and after coupling were further analyzed, thereby preliminarily exploring the mechanism of the PAW-GTAW hybrid welding process. Secondly, quantitative comparisons of weld penetration depth and bead width before and after coupling were conducted to elucidate the mechanism by which the coupled arc improved surface formation. The coupled arc significantly enhanced the stability of the plasma arc voltage while reducing the average PAW voltage after coupling, with minimal changes observed in the GTAW arc. The hybrid weld exhibited a synergistic penetration effect of "PAW penetration depth + GTAW penetration depth < PAW-GTAW hybrid welding penetration depth", and the bead width increased by 0.99 mm compared with single PAW welding. The PAW-GTAW hybrid welding process demonstrates a "1+1>2" advantage in welding speed and penetration depth. The coupled arc notably improves weld surface formation, indicating that the hybrid process not only increases arc energy density but also optimizes the thermal-mechanical distribution in the molten pool and the flow of molten metal.

KEY WORDS: PAW-GTAW; hybrid welding; platform design; arc characteristics; formation of weld surface

焊接技术因为其结构设计灵活、生产效率高、适应性强等优势,是工业制造中不可或缺的一环,在生产、生活的各个领域均有着广泛应用^[1-3]。而 PAW、GTAW 是工业技术和民生经济领域的重要焊接方法。高质量、高效率焊接一直是焊接领域永恒的目标与追求^[4]。然而,考虑到单一等离子弧焊接(Plasma Arc Welding, PAW)、单一非熔化极惰性气体保护焊(Gas Tungsten Arc Welding or Tungsten Inert Gas Welding, GTAW)焊接速度有限,受限于焊接工艺本身,PAW 与 GTAW 的复合热源焊接提供了新的解决方式,不只是 2 个热源的简单叠加,而是最大化地利用各自热源的特点,有望实现“1+1>2”复合协同作用;同时,各热源间优势互补,相辅相成,为获得高质高效的焊接接头提供了有效解决途径^[5-7]。

相较于激光焊、电子束焊等高能束焊接工艺,弧焊具有设备成本低、工艺适应性强、对间隙敏感性低等特点,各类弧焊技术相对成熟^[8-9],为复合焊接领域的发展提供了更多的选择。在各种弧焊技术广泛应用的年代下,非熔化极惰性气体保护焊因为其焊缝表面成形美观、焊接变形小、操作简便等特点在薄板焊接领域有着广泛应用^[10-12]。但是,GTAW 电弧本身挺度小且易于分散的缺点,导致其电弧能量较低、热输入小,在实际焊接过程中,为了确保良好的焊缝成形和质量,大多适用于较低速度下的薄板焊接。焊接速度的降低同时意味着热输入的增加,直观表现为增大焊接热影响区宽度和板材变形程度;而单一速度的增加势必又需要提高相匹配的焊接电流,往往此时焊缝易出现咬边气孔、焊道不连续等缺陷,只能通过调整相关工艺参数以优化焊缝成形与质量^[13-14]。

国内外学者针对 PAW、GTAW、PAW-GTAW 焊接工艺已经开展了一系列相关研究工作。Zhang 等^[15]、Kobayashi 等^[16-17]提出双钨极氩弧焊(Twin-electrode TIG Welding Method, T-TIG)这一复合构想,对于薄板焊接的问题,在保留原焊接工艺本身特点的基础上利用双电弧降低电弧压力,实现了焊接速度和焊接电流的更大选择,并且对咬边、驼峰焊道等表面成形缺

陷的产生有一定的抑制效果。在中厚板焊接领域以及 GTAW 工艺的基础上,PAW 工艺是利用焊枪喷嘴内部的“三重压缩”作用,实现了高能量密度的等离子电弧转化,极大提高了电弧的穿透能力,从而获得了更加稳定的电弧以及较大的焊缝深宽比和焊接速度,但同时也存在着焊接参数裕度小,容易产生咬边、气孔、驼峰等成形缺陷^[18-19]。复合焊接有望有效结合 GTAW 工艺焊缝表面成形质量好和 PAW 工艺电弧穿透能力强的优点,实现两者优势互补。Shao 等^[20]、Zhang 等^[21]、Moulton 等^[22]提出了 PAW+GTAW 双面双弧焊接工艺,该工艺是通过 PAW 焊枪和 GTAW 焊枪对称分布于工件上下两侧,焊接过程中两电弧以相同的速度同向移动。研究表明,PAW+GTAW 双面双弧焊接工艺焊接热量集中,可以有效提高熔深和焊接效率。曹世杰等^[23]、纪昂等^[24]设计了 PAW+GTAW 的机械组合方式,利用 PAW 电弧的深熔效果和 GTAW 电弧良好的盖面能力,在筒体的直缝焊接上获得了较好的成形质量。纪昂等^[25]通过自制小型 PAW-GTAW 焊枪的新思路,利用特制水冷喷嘴实现俩焊枪较小热源间距下的电弧耦合效果。尽管 PAW-GTAW 复合焊接领域已经取得了一些研究进展,但仍有一些问题值得探究。譬如单一 PAW、单一 GTAW、PAW-GTAW 复合焊接的电弧特性、焊接能量、焊缝成形有哪些区别,产生区别的原因,这些都值得研究。

为此,本文首先设计并搭建 PAW-GTAW 复合焊接试验平台,然后开展单一 PAW、单一 GTAW、PAW-GTAW 焊接试验,检测单一 PAW、单一 GTAW、PAW-GTAW 电弧形态、电弧电信号等,对比分析耦合前后 PAW 电弧与 GTAW 电弧形态、电弧电信号、焊缝表面成形变化;最后初步探讨耦合电弧对单一 PAW 工艺表面凹凸状焊道不连续缺陷的改善机理。

1 PAW-GTAW 复合焊接实验平台设计与搭建及试验方法

图 1 为 PAW-GTAW 复合焊接原理示意图。PAW

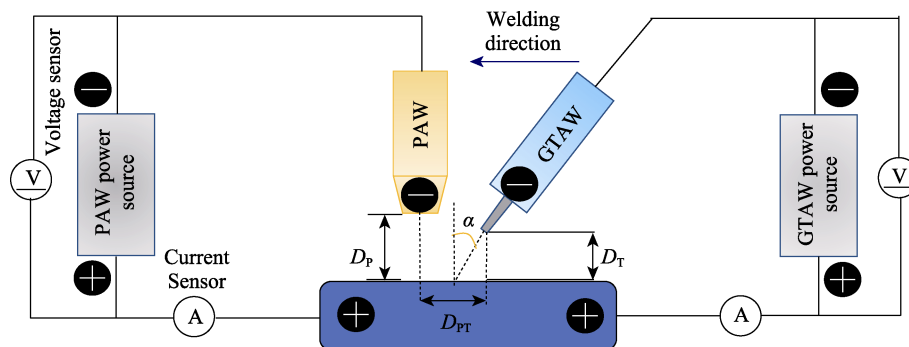


图1 PAW-GTAW 复合焊接原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of PAW-GTAW hybrid welding circuit

电弧焊接电源与 GTAW 电弧焊接电源均采用直流正接 (DCEN) 的电路连接, 在较小热源间距下, 同向电流的洛伦兹力吸引作用实现了两电弧在焊接过程中有效且稳定的耦合。在实际焊接过程中, PAW 焊枪在前, 发挥等离子弧焊接电弧能量密度高、熔深较大的优势; 而 GTAW 焊枪在后, 调控焊缝表面成形, 从而获得优质的耦合电弧复合焊接接头。焊接前起弧时需要先引燃 PAW 焊枪喷嘴与钨极间的非转移弧, 在非转移弧稳定后, 接通钨极与工件间的电源, 从而引燃转移弧, 待 PAW 电弧稳定后, 再引燃随着 PAW 焊枪一起移动的 GTAW 焊枪电弧, 从而形成 PAW-GTAW 耦合电弧共熔池的复合焊接。

试验平台主要包括等离子弧焊接电源、非熔化极惰性气体保护焊接电源、复合焊枪系统、机械运动平台系统、视觉信号采集系统、电弧电信号采集系统以及计算机集成控制系统, 具体复合焊接试验平台如图 2 所示。采用 Xiris XVC-1000 型号的 CCD 工业相机精确采集视觉信号, 采用电压传感器、电流传感器检测电弧电压、焊接电流, 通过 PCI 采集卡将采集到的信号传输到计算机集成控制端, 实现电信号与数字信号的转化; 同时, 计算机也可以通过 ROB 软件模拟焊接参数的输入与输出。

等离子弧焊接电源是 Fronius Trans Tig 4000 焊机, 该焊接电源具有焊接过程输出稳定、信号反馈迅

速、焊接质量较好等优点, 可以稳定输出 0.5~200 A 电流; 非熔化极惰性气体保护焊接电源是 Fronius Magic Wave 3000 焊机, 该焊机具备焊接过程电弧安静稳定、数字化精度高、操作简单便捷等优势, 可以有效输出 3~200 A 电流。这 2 种焊机可以满足本试验所需要的焊接参数要求。

整个复合焊枪系统是由自行设计的 PAW 焊枪、GTAW 焊枪、焊枪夹持器组成, 焊枪夹持器通过螺栓与螺帽固定在焊枪底座上。复合焊枪系统通过焊枪底座横向凹槽的水平移动来实现热源间距的调整, 复合焊枪装夹示意图如图 3 所示。

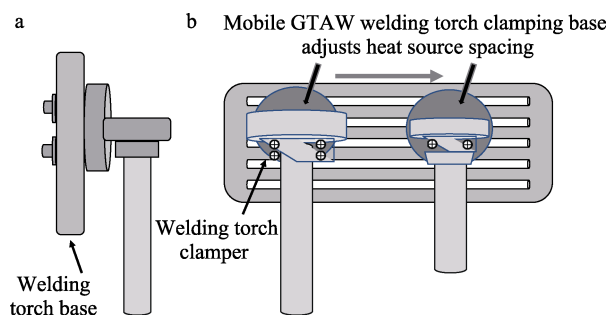


图3 复合焊枪装夹示意图

Fig.3 Schematic diagram of hybrid welding torch clamping

为了方便后续焊枪倾角与焊接弧长的调整, 对装夹设备进行合理设计, 焊枪夹持装置调节示意图如图 4 所示, 焊枪倾角可以通过图 4a 中固定在焊枪底座上的圆形夹持器调整, 实现 -60° ~ 60° 的焊枪倾角偏转, 而 GTAW 焊枪可以通过图 4b 中的焊枪夹偏转

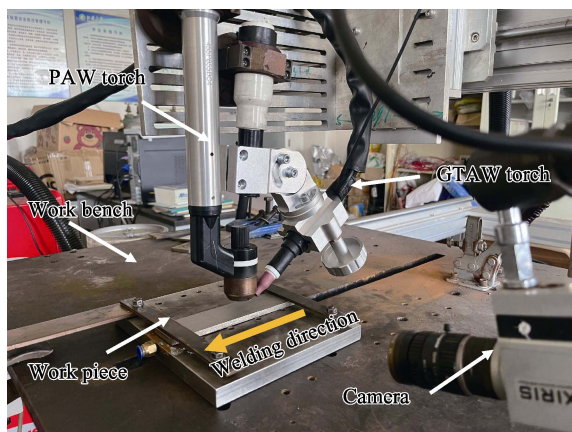


图2 PAW-GTAW 复合焊接试验平台

Fig.2 PAW-GTAW hybrid welding experimental platform

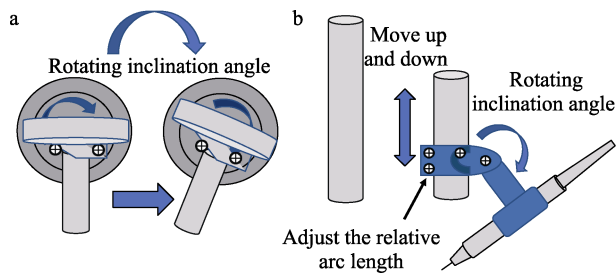


图4 焊枪夹持装置调节示意图

Fig.4 Schematic diagram of adjusting welding torch clamping device

0°~60°; 焊接弧长通过夹持位置与移动平台 z 轴的升降进行调整。

焊接试验选用的待焊工件为 150 mm×75 mm×6 mm 规格的 316L 奥氏体不锈钢。使用前先通过角磨机对板材表面进行机械打磨抛光, 再使用无水乙醇清洗, 去除板材表面杂质和氧化膜后自然烘干。实验选取 2 块相同规格的板材分别进行等离子弧焊接和 PAW-GTAW 耦合电弧复合焊接的对比试验。等离子弧焊枪喷嘴底部距离工件上表面 11 mm, 钨钨极内缩量为 3 mm; 非熔化极惰性气体保护焊焊枪倾角为 45°, 喷嘴处外伸钨极尖端距离工件表面 2.5 mm, 焊接保护气为纯度 99.99% 的氩气且气体流量均为 20 L/min, 其他主要焊接参数如表 1 所示。在焊接过程中, 通过传感器实时采集电弧电压、电流信号, 利用 CCD 工业相机拍摄电弧形态变化, 焊接试验完成以后沿垂直于焊接方向切取焊缝中部试样块, 最后通过镶嵌、磨样、抛光、腐蚀, 在体式显微镜下拍摄所需焊缝截面形貌。

2 试验结果分析

2.1 耦合前后电弧形态对比

对比图 5 中各焊接电弧形态, 发现耦合前后电弧

存在明显变化。首先沿着焊接方向(y 轴方向上), PAW 电弧弧柱下部区域相对远离喷嘴, 电弧拘束程度降低, 相对较为发散, 耦合后该区域电弧受同向电流洛伦兹力的吸引作用明显向 GTAW 侧偏移较多, 而 GTAW 电弧由于电弧挺度相对 PAW 电弧明显较弱, 所以在耦合后被 PAW 电弧完全吸引并形成明显耦合电弧面积区域, 如图 5a~c 所示。

在垂直于焊接方向(x 轴方向上), 如图 5d~f 所示, 耦合前后 PAW 电弧高温弧柱区直径略有减小。这可能是因为 PAW 电弧在沿着焊接方向(y 轴方向上)受到 GTAW 电弧的吸引, 复合电弧中的 PAW 电弧受到一定的压缩作用^[26], 而整体复合电弧由于受到发散程度更大的 GTAW 电弧补充和包裹, 整体轮廓在 x 轴方向上略有增大。

2.2 电弧电压和电流特性

图 6 为耦合前后 PAW 电弧实时电压与电流信号。可以明显看出, 耦合前单一 PAW 电弧电压波动较大, 电压平均值为 31.1 V; 而耦合后 PAW 电弧电压相对比较平稳, 电压平均值为 30.8 V。与单一 PAW 电弧相比, 耦合后 PAW 电弧稳定性提高, 并且电弧平均电压降低了 0.3 V。而耦合前后电弧实时电流没有明显变化, 平均电弧电流均为 149.8 A。耦合前后 PAW

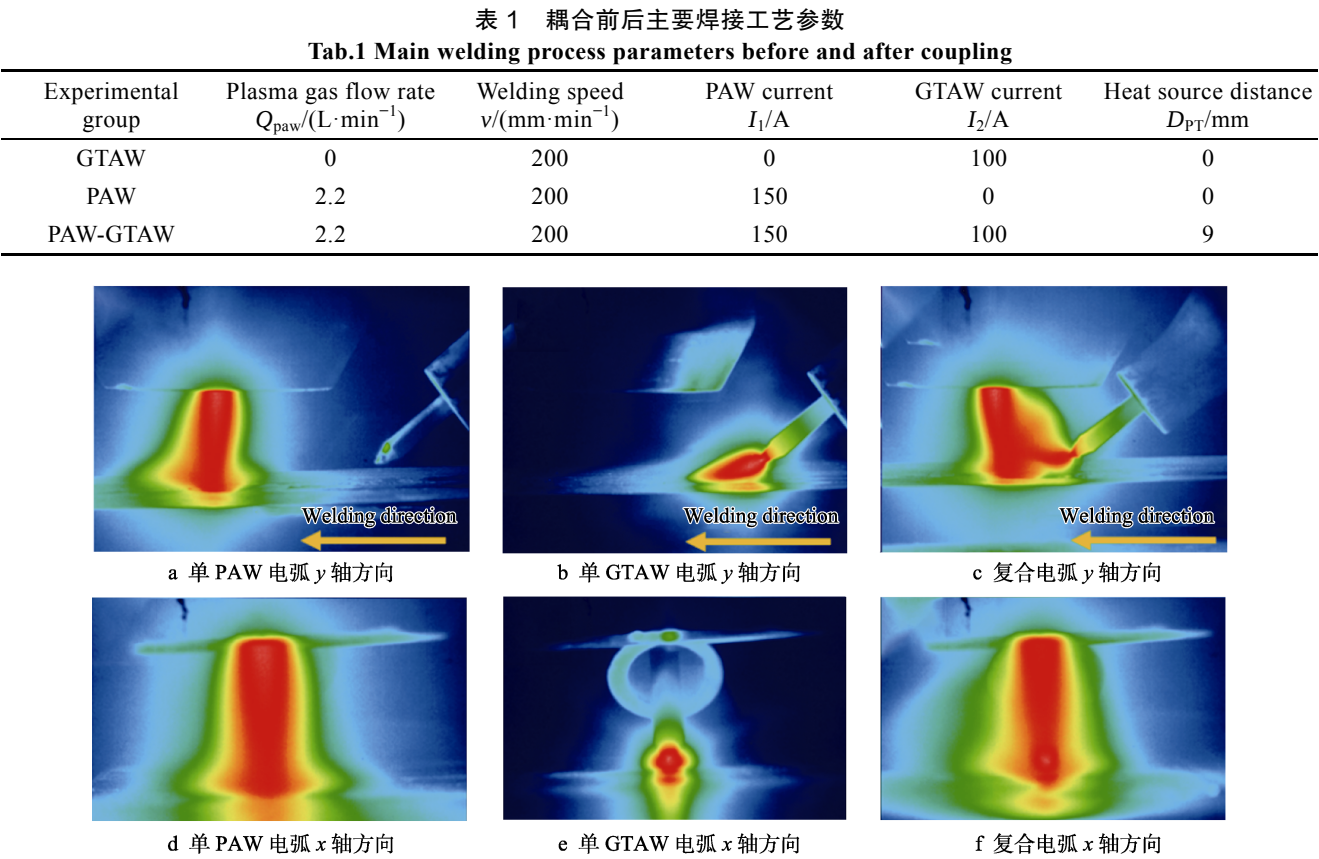


图 5 耦合前后电弧形态对比

Fig.5 Comparison of arc morphology before and after coupling: a) single PAW arc at y direction; b) single GTAW arc at y direction; c) coupling arc at y direction; d) single PAW arc at x direction; e) single GTAW arc at x direction; f) coupling arc at x direction

电弧波动程度变化现象表明:在复合形成的叠加电磁场中,耦合后的 PAW 电弧受到复合磁场的拘束作用,电弧的飘逸和波动程度得到改善;并且 GTAW 电弧对 PAW 电弧的吸引作用在一定程度上也减小了电弧的扩散程度;同时复合后 GTAW 电弧对 PAW 电弧的能量补充以及耦合后复合热源热效率的提升均可能存在提高了 PAW 电弧稳定性的作用。

耦合后 PAW 电弧的平均电压降低,这是因为在复合电弧中,GTAW 电弧的加入和吸引作用使 PAW 电弧的中下部电离子体在 GTAW 电弧的氛围内燃烧,部分等离子体燃烧更加充分,因此 PAW 电弧只需要较低的电压便可完成电弧的稳定燃烧;同时,相对较小电压的 GTAW 电弧可能在耦合过程中存在一定程度的等离子体分流作用,即较大电压的 PAW 电弧很可能借用 GTAW 电弧的部分通道,于是 PAW 电弧便可以降低相应的电压便可完成燃烧所需等离子体的传输。

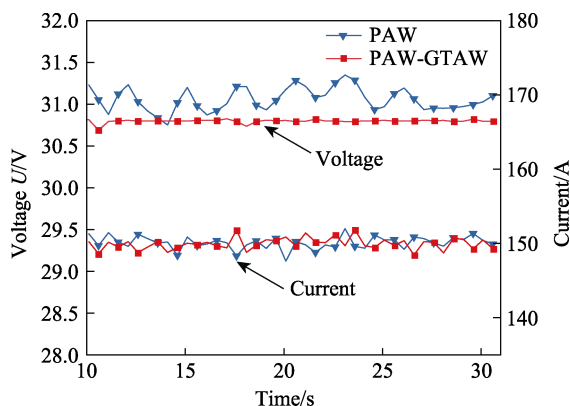


图6 耦合前后 PAW 电弧实时电压、电流信号
Fig.6 Real time voltage and current signals of PAW arc before and after coupling

图7为耦合前后 GTAW 电弧实时电压、电流信号。可以发现,耦合前后 GTAW 电弧电压、电流以

及电弧稳定性均没有明显变化,平均电弧电压为 11.2 V,平均焊接电流为 99.7 A。结果表明,与耦合前 GTAW 相比,耦合后 GTAW 电弧电压、焊接电流的基本没有变化。

分析其原因如下:相对 PAW 电弧而言,GTAW 电弧特性上存在明显差异,高电离度、高能量密度的 PAW 电弧在耦合电弧中承担主导深熔作用,而低电离度、高稳定性的 GTAW 电弧则是主要起到改善焊缝成形和稳定电弧的作用,能量分配上的差异使 GTAW 电弧相对稳定一些。

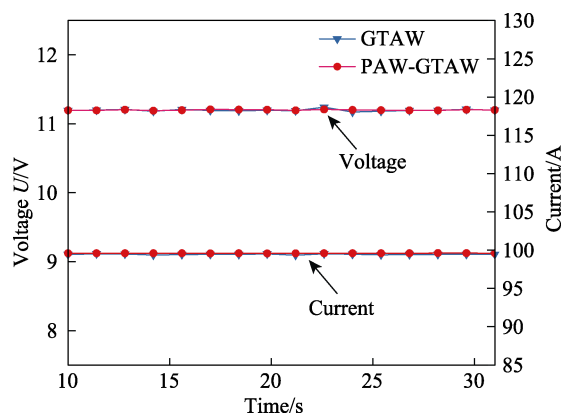


图7 耦合前后 GTAW 电弧实时电压、电流信号
Fig.7 Real time voltage and current signals of GTAW arc before and after coupling

2.3 焊缝成形质量

表2为耦合前后各焊接工艺下焊缝表面成形情况及焊缝截面形貌对比,为保证焊接接头成形效果,均采用 6 mm 厚度规格的 316L 不锈钢板进行焊接且保证均不焊透。从焊缝表面成形情况可以看出:单 GTAW 焊缝在该工艺参数下仍保持较好的焊缝表面成形效果,单 PAW 焊缝表面存在大量凹凸状焊道不连续缺陷,但耦合后复合焊缝表面成形质量得到明显

表2 耦合前后焊缝表面成形情况及横截面形貌

Tab.2 Surface forming and cross-sectional morphology of weld seam before and after coupling

Case	Surface forming of weld seam	Cross-sectional morphology
GTAW		
PAW		
P-T		

改善,可见,PAW-GTAW 耦合电弧复合焊接工艺对单 PAW 因为焊接参数不匹配而产生的焊缝表面成形问题有着一定的优化能力。对比焊缝横截面形貌发现,单 GTAW 因电弧能量密度较低而焊缝熔深较小,单 PAW 则因电弧弧长增大而导致弧柱能量密度降低,相对而言,焊缝熔深小于常规弧长下的 PAW 焊缝熔深。而耦合后复合焊缝熔深较大,可见耦合电弧能量密度和热输入有明显提升。

耦合前后焊缝熔深及熔宽变化如图 9 所示。可见,耦合前 PAW 熔深为 1.74 mm, GTAW 熔深为 2.10 mm, 而耦合后复合熔深为 5.68 mm, 呈现出“ $H_1+H_2<H_3$ ”的熔深变化趋势,也说明在该工艺及参数下,达到了“ $1+1>2$ ”的复合焊接效果;耦合前,PAW 熔宽为 7.40 mm, GTAW 熔宽为 3.89 mm, 耦合后复合熔宽为 8.39 mm, 呈现出“ $W_2<W_1<W_3$ ”的熔宽变化趋势,说明耦合后复合焊接在原有 PAW 焊缝熔宽基础上没有增加太多,耦合后电弧能量密度的增加还是主要作用在焊缝熔深上。

2.4 PAW-GTAW 耦合电弧对焊缝表面成形缺陷的调控机制

图 10 为 CCD 相机拍摄单 PAW 焊缝表面凹凸状焊道不连续的形成过程,在 PAW 电弧作用下一个形

成周期过程中,由于电弧向前移动,液态金属熔池尾部中部分金属液受到排挤堆积在熔池尾部,并逐渐增大,凝固形成凸状“波峰”,前方的熔池中并没有接收到回流熔融金属液,形成“波谷”。

焊缝表面缺陷形成过程如图 11 所示。首先在 PAW 电弧能量作用下,熔化金属工件形成焊接熔池,随着 PAW 电弧沿着焊接方向向前移动,熔池沿着焊接方向逐渐增大,当增加到一定长度时,远离 PAW 电弧的熔池尾部液态金属开始冷却并逐渐趋向凝固;在电弧压力作用下,电弧正下方熔池液态金属首先向下流动,液态金属到达熔池底部后转向并沿着熔池凝固前沿流向熔池尾部,在流向熔池尾部过程中远离电弧热源作用部分熔池金属开始形成较小的凝固固态区^[27-29],如图 11b 所示。其次,熔池尾部的液态金属液因为无法回流补充该区域,从而形成了凹状“波谷”区,如图 11c 所示。最后,“波谷”的完全长大进一步阻碍熔池尾部液态金属液的回流,脱离热源的液态金属不断堆积冷却,固态凝固区面积逐渐增大,并逐渐冷却堆积形成凸状“波峰”区,堆积高度也逐渐增加,最终形成一个完整的凸状“波谷”,且紧靠着新的熔池尾部,如图 11d 所示。随后,熔池内熔融金属液再一次因为远离热源而形成凝固固态区,如此循环往复,便形成了具有周期性的凹凸状焊道不连续缺陷。

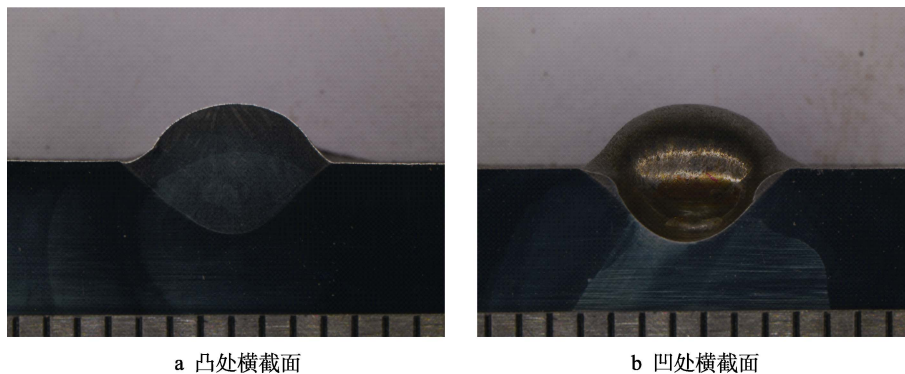


图 8 凹凸位置焊缝横截面形貌

Fig.8 Cross-sectional morphology of concave convex position weld seam; a) convex cross section; b) concave cross section

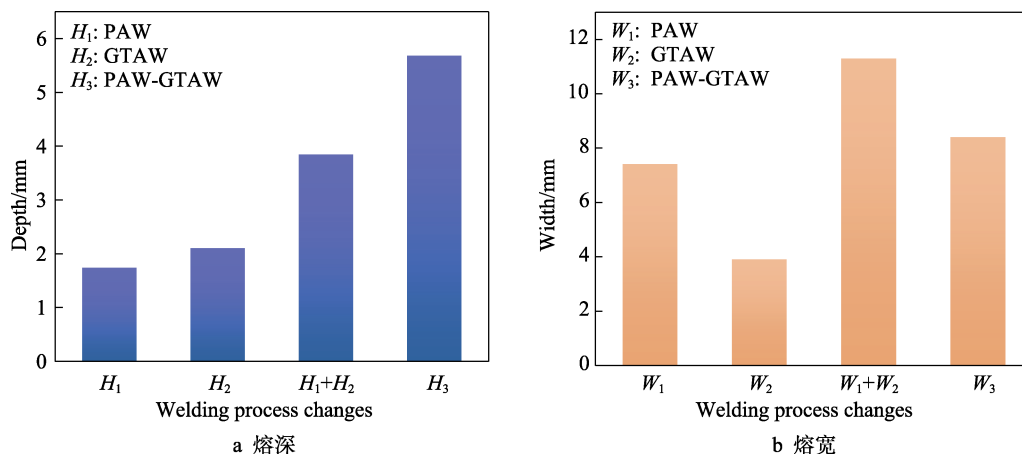


图 9 耦合前后焊缝熔深及熔宽变化

Fig.9 Changes in weld penetration depth and bead width before and after coupling: a) penetration depth; b) bead width

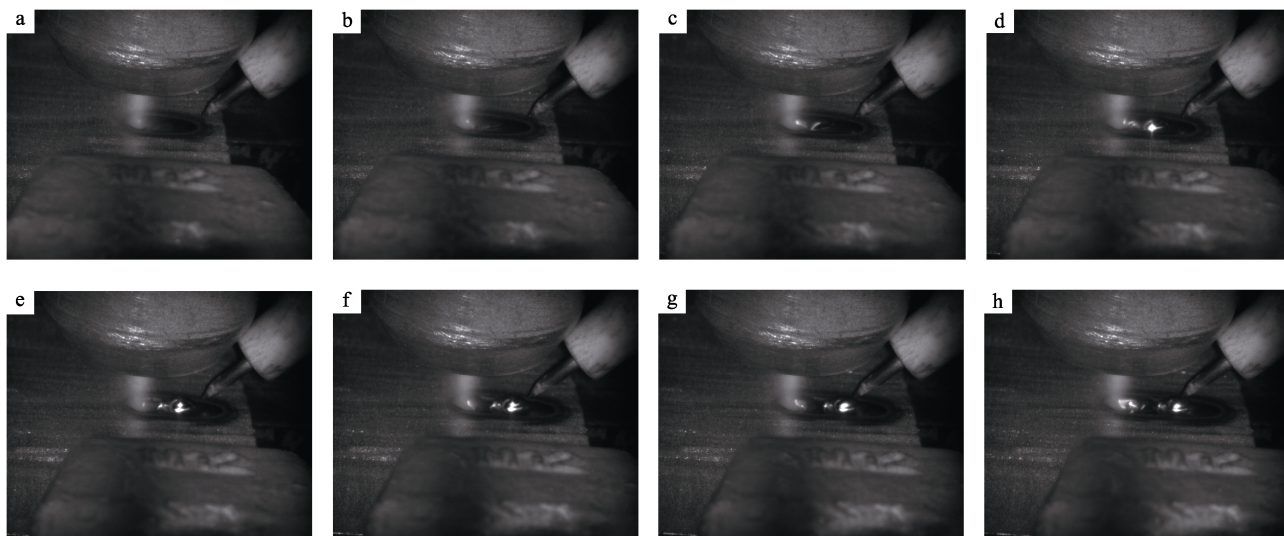


图 10 PAW 电弧焊接熔池中表面缺陷形成过程动态图像
Fig.10 Dynamic image of surface defect formation process in PAW arc welding molten pool

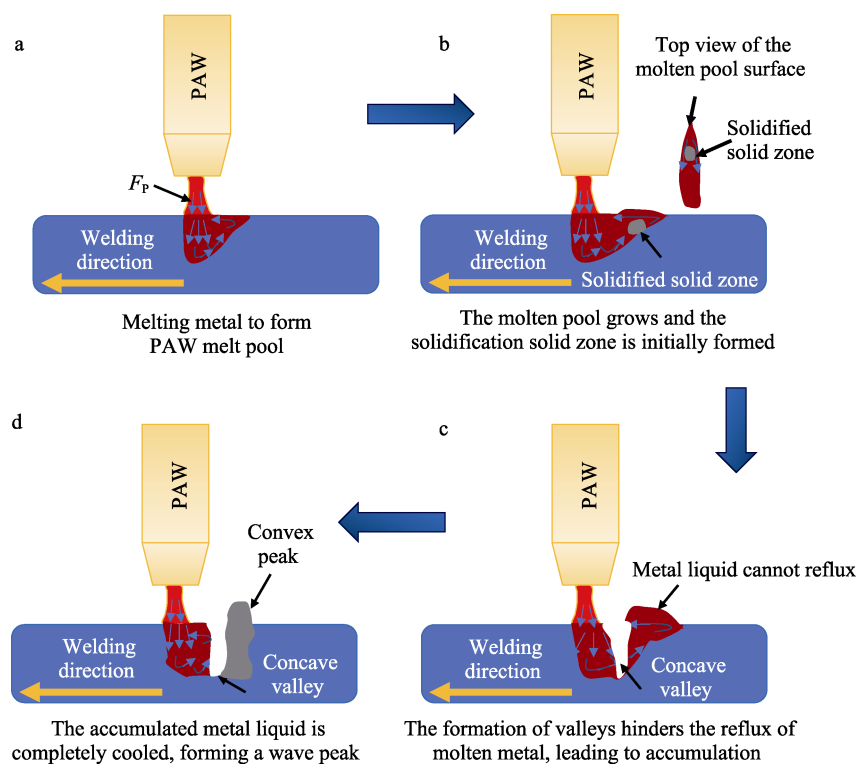


图 11 PAW 焊接过程中表面缺陷形成示意图
Fig.11 Schematic diagram of surface defect formation during PAW welding process

耦合前后焊接熔池侧面动态图像如图 12 所示。可知,复合焊接工艺不仅是 2 个热源能量上的复合作用提升,而且具备一定的焊缝表面成形改善效果。分析复合焊接工艺对焊缝表面成形作用的改善效果,如图 13a 中熔池内部受力示意图所示,在等离子弧电弧压力 F_p 作用下,熔池液态金属到达熔池底部后发生偏转,当 F_p 大于熔融金属液重力 G 时,推动熔池前部熔融金属液往后上方移动。在复合焊接工艺中:一方面,与 PAW 焊接相比,在耦合电弧作用下焊接能

量增加,熔池中熔融金属重力 G' 增大;另一方面,后方施加的 GTAW 电弧产生 GTAW 电弧压力 F_T 。当 $F_p < F_T + G'$ 时,凸状“波峰”便不易产生;同时,复合中由于电弧热量的提升,熔池温度场得到调控,熔池沿着焊接方向增大,熔池尾端的熔融金属液存在时间变长,使后端焊缝金属液得到充分回流,如图 13b 熔池尾端液态金属流动示意图所示,不会提前形成凝固固态区,因此“波峰”“波谷”的表面形成缺陷得到改善。

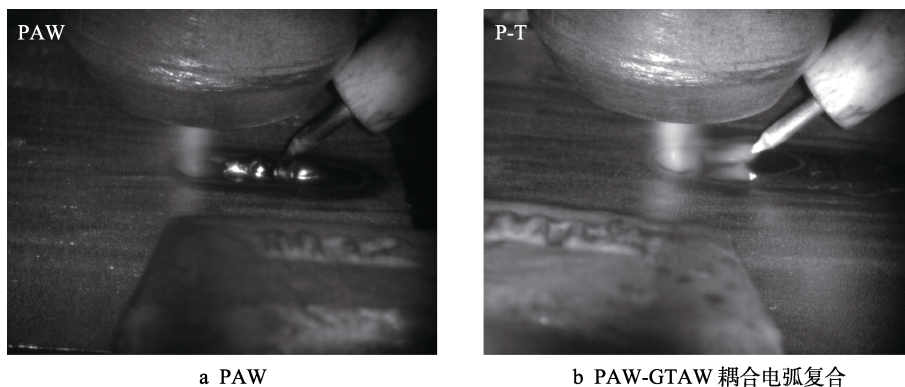


图12 耦合前后焊接熔池侧面动态图像

Fig.12 Dynamic images of molten pool side before and after coupling: a) PAW; b) PAW-GTAW coupled arc hybrid welding

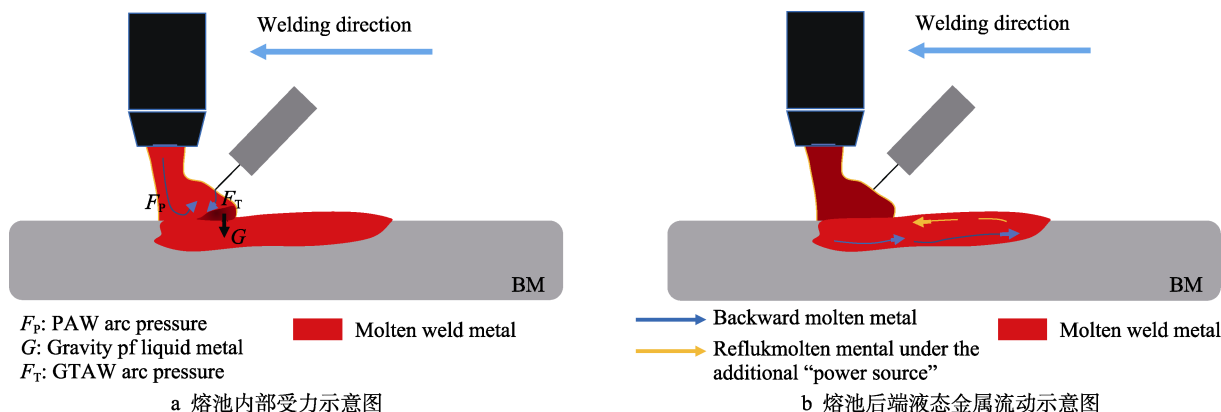


图13 耦合电弧复合焊接熔池内部示意图

Fig.13 Schematic diagram for interior of molten pool in coupled arc hybrid welding: a) schematic diagram for internal forces of molten pool; b) schematic diagram for liquid metal flow at the back of molten pool

3 结论

1) 设计并搭建了 PAW-GTAW 复合焊接试验平台, 实现了 PAW 电弧与 GTAW 电弧的高质、高效耦合, 提高了焊接速度。

2) 耦合后 PAW 电弧和 GTAW 电弧受同向电流洛伦兹力的相互吸引, 较大挺度的 PAW 电弧中下部区域形态偏移较多, 而较为发散的 GTAW 电弧则整体吸附在 PAW 电弧上。

3) 耦合后 PAW 电弧由于复合磁场的作用以及部分等离子体在 GTAW 电弧氛围内充分燃烧作用可以有效提升 PAW 电弧实时电压的稳定性。

4) 复合后焊接接头熔深增加明显, 具备“1+1>2”的复合焊接优势。

5) PAW-GTAW 耦合电弧复合焊接工艺可以调控复合熔池的热-力分布及熔融金属液的流动, 对凹凸状焊道不连续缺陷有着一定的抑制效果。

参考文献:

[1] 潘际奎. 二十一世纪焊接科学研究的展望[C]// 中国机械工程学会焊接学会. 第九次全国焊接会议论文集, 天津, 1999: 10-26.

PAN J L. Prospects for Welding Science Research in the 21st Century[C]// Welding Society of the Chinese Mechanical Engineering Society. Collected Papers of the 9th National Welding Conference, Tianjin, 1999: 10-26.

[2] 崔旭明, 李刘合, 张彦华. 高效焊接工艺研究现状[J]. 新技术新工艺, 2004(7): 32-35.

CUI X M, LI L H, ZHANG Y H. Research Situation of High Efficiency Welding Process[J]. New Technology & New Process, 2004(7): 32-35.

[3] 刘鸿铭, 朱宗涛, 刘云祺, 等. 12 mm 厚 TC4 钛合金激光-MIG 复合焊接接头组织与性能研究[J]. 精密成形工程, 2024, 16(5): 21-29.

LIU H M, ZHU Z T, LIU Y Q, et al. Microstructure and Mechanical Properties of 12 mm Thick TC4 Titanium Alloy Laser-MIG Hybrid Welded Joints[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(5): 21-29.

[4] YU J, CAI C, XIE J, et al. Weld Formation, Arc Behavior, and Droplet Transfer in Narrow-Gap Laser-Arc Hybrid Welding of Titanium Alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 91: 44-52.

[5] VASHISHTHA H, KUMAR D, TAIWADE R V. Advanced Welding Techniques: Current Trends and Future Perspectives[M]. Boca Raton: CRC Press, 2024

[6] YEO J S, SONG M K, KIM J D. ISMT2021 Effect of Parameters on Penetration Properties in Butt Welding of

- Super Duplex Stainless Steel Using PAW-TIG Heat Source[J]. *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, 2022, 46(1): 15-22.
- [7] KUMAR P R, SATHISH S, PRASAD A V S R, et al. Hybrid Optimization of Process Parameters in Manual Metal Arc Welding for Nanostructured Hard Facing[J]. *E3S Web of Conferences*, 2024, 588: 03019.
- [8] KHOSHNAW F, KRIVTSUN I, KORZHYK V. *Arc Welding Methods*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2023: 37-71.
- [9] ZHANG L X, WU Z S, LI Y, et al. Mechanical Properties and Corrosion Resistance of TC4 Titanium Alloy Joints by Plasma Arc Welding+gas Tungsten Arc Welding Combination Welding[J]. *Journal of Materials Science*, 2024, 59(28): 13234-13250.
- [10] LU F G, YAO S, LOU S N, et al. Modeling and Finite Element Analysis on GTAW Arc and Weld Pool[J]. *Computational Materials Science*, 2004, 29(3): 371-378.
- [11] NILES R W, JACKSON C E. Weld Thermal Efficiency of the GTAW Process[J]. *Welding Journal*, 1975, 54(1): 25.
- [12] GONÇALVES C V, VILARINHO L O, SCOTTI A, et al. Estimation of Heat Source and Thermal Efficiency in GTAW Process by Using Inverse Techniques[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 172(1): 42-51.
- [13] DUPONT J N, MARDER A R. Thermal Efficiency of Arc Welding Processes[J]. *Welding Journal-Including Welding Research Supplement*, 1995, 74(12): 406s.
- [14] NGUYEN T C, WECKMAN D C, JOHNSON D A, et al. High Speed Fusion Weld Bead Defects[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2006, 11(6): 618-633.
- [15] ZHANG Y M, PAN C, MALE A T. Improved Microstructure and Properties of 6061 Aluminum Alloy Weldments Using a Double-Sided Arc Welding Process[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2000, 31(10): 2537-2543.
- [16] KOBAYASHI K, YUKI M, TEJIMA A, et al. Development of High Efficiency TIG Welding Method (SEDAR-TIG)[J]. *IHI Engineering Review*, 2006, 35: 137-142.
- [17] KOBAYASHI K, NISHIMURA Y, IJIMA T, et al. Practical Application of High Efficiency Twin-Arc TIG Welding Method (Sedar-TIG) for PCLNG Storage Tank[J]. *Welding in the World*, 2004, 48(7): 35-39.
- [18] TASHIRO S. Interaction Mechanism of Arc, Keyhole, and Weld Pool in Keyhole Plasma Arc Welding: A Review[J]. *Materials*, 2024, 17(6): 1348.
- [19] DWIBEDI S, BAG S. Critical Assessment on the Influence of Process Parameters in Micro-Plasma Arc Welding Process: A Review[J]. *Welding International*, 2024, 38(9): 583-617.
- [20] SHAO Y K, WANG Y X, YANG Z B, et al. Plasma-MIG Hybrid Welding Hot Cracking Susceptibility of 7075 Aluminum Alloy Based on Optimum of Weld Penetration[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(4): 547-556.
- [21] ZHANG Y M, ZHANG S B. Double-sided Arc Welding Increases Weld Joint Penetration[J]. *Welding Journal-Including Welding Research Supplement*, 1998, 77(6): 57-62.
- [22] MOULTON J A, WECKMAN D C. Double-sided Arc Welding of AA5182-O Aluminum Sheet for Tailor Welded Blank Applications[J]. *Weld Journal*, 2010, 89(1): 11-23.
- [23] TABAN E. Joining of Duplex Stainless Steel by Plasma Arc, TIG, and Plasma Arc+TIG Welding Processes[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2008, 23(8): 871-878.
- [24] 曹世杰, 张晓辉, 孙潇, 等. 纵缝等离子弧/TIG 焊接系统[J]. *焊接技术*, 2015, 44(2): 58-60.
- CAO S J, ZHANG X H, SUN X, et al. Longitudinal Seam Plasma Arc/TIG Welding System[J]. *Welding Technology*, 2015, 44(2): 58-60.
- [25] 纪昂. 等离子-TIG 复合焊接电弧物理特性及工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 12-15.
- JI A. Research on Arc Physical Properties and Welding Processing Performance of PAW-TIG Hybrid Welding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 12-15.
- [26] 王波, 桑健, 张洪涛, 等. 低碳钢等离子-TIG 耦合电弧高效复合焊接工艺性能分析[J]. *焊接学报*, 2019, 40(6): 94-99.
- WANG B, SANG J, ZHANG H T, et al. Analysis on Welding Processing Properties of Plasma-TIG Coupling Arc Hybrid Welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(6): 94-99.
- [27] 黄巍. 高速 GMAW 驼峰焊道成因及 GMAW+TOPTIG 复合焊抑制机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015: 54-56.
- HUANG W. Study on the Causes of High-speed GMAW Hump Weld Bead and the Inhibition Mechanism of GMAW+TOPTIG Hybrid Welding[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015: 54-56.
- [28] 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: 56-58.
- ZHANG L. Study on the Thermos-dynamic Transmission Mechanisms in Cross Arc Welding Process[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016: 56-58.
- [29] 胡志坤. 高速 GMAW 焊接驼峰焊道的产生过程及抑制[D]. 济南: 山东大学, 2009: 47-54.
- HU Z K. The Generation Process and Suppression of Humping Bead in High-speed GMAW[D]. Jinan: Shandong University, 2009: 47-54.