

引文格式: 梁国栋, 樊祥辰, 林如良, 等. 不锈钢板小电流 TIG 电弧辅助激光高速焊工艺[J]. 焊接学报, 2026, 47(8): 8 – 16.
LIANG Guodong, FAN Xiangchen, LIN Ruliang, *et al.* Low-current TIG arc-assisted high-speed laser welding process for stainless steel plates[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2026, 47(8): 8 – 16.



不锈钢板小电流 TIG 电弧辅助激光高速焊工艺

梁国栋, 樊祥辰, 林如良, 秦国梁

(山东大学, 材料科学与工程学院, 济南, 250061)

摘要: 为突破不锈钢薄板传统焊接工艺高质量与高效率难以同步提升的技术瓶颈, 提出小电流 TIG 电弧辅助激光高速焊接工艺, 利用 1.2 mm 厚 409L 铁素体不锈钢板系统研究了焊接工艺参数对焊缝成形的影响规律. 结果表明, 激光与钨极间距为 3 ~ 4 mm、焊接电流为 50 A 时, 激光与 TIG 电弧产生强耦合效应, 在实现低热输入焊接的同时能够有效稳定电弧, 焊接速度可达 4 ~ 5 m/min. 与 TIG 焊接工艺相比, 该工艺焊接效率提高 2.8 倍, 热输入降低 63.1%, 同时从根本上抑制了咬边和驼峰焊道缺陷的形成. 在不锈钢板焊接中展现出广泛适用性, 对于 2.0 mm 厚 304 奥氏体不锈钢和 409L 铁素体不锈钢板焊接速度分别达到 3.2 m/min 和 3.0 m/min, 断后伸长率分别为母材的 88.9% 和 76.4%, 实现不锈钢薄板优质高效低热输入焊接.

创新点: (1) 提出了不锈钢板小电流 TIG 电弧辅助激光高速焊工艺.
(2) 揭示了关键焊接工艺参数对电弧稳定性和焊缝质量的影响规律.
(3) 确定了不锈钢板激光 + TIG 复合焊最优工艺参数窗口.

关键词: 小电流 TIG 电弧辅助激光焊; 不锈钢薄板; 高效焊接; 低热输入

中图分类号: TG 442 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20250906002

Low-current TIG arc-assisted high-speed laser welding process for stainless steel plates

LIANG Guodong, FAN Xiangchen, LIN Ruliang, QIN Guoliang

(School of Materials Science & Engineering, Shandong University, Jinan, 250061, China)

Abstract: To overcome the technical bottleneck that high quality and high efficiency are difficult to simultaneously improve in traditional welding processes of thin stainless steel plates, a low-current TIG arc-assisted high-speed laser welding process was proposed, and the effects of welding process parameters on weld appearance were systematically studied using 1.2 mm thick 409L ferritic stainless steel plates. The results show that when the distance between laser and tungsten electrode is 3 ~ 4 mm, and the welding current is 50 A, the laser and TIG arc generate a strong coupling effect, which can effectively stabilize the arc while achieving low heat input welding, and the welding speed can reach 4~5 m/min. Compared with the TIG welding process, the welding efficiency of this process is improved by 2.8 times; the heat input is reduced by 63.1%, and the formation of undercut and humping weld defects is fundamentally suppressed. This process exhibits wide applicability in the welding of stainless steel plates. For 2.0 mm thick 304 austenitic stainless steel and 409L ferritic stainless steel plates, the welding speeds reach 3.2 m/min and 3.0 m/min, respectively, and the elongations after fracture are 88.9% and 76.4% of those of the base metal, respectively, realizing the high-quality, high-efficiency, and low heat input welding of thin stainless steel plates.

Highlights: (1) A low-current TIG arc-assisted high-speed laser welding process for stainless steel plates was proposed.
(2) The influence laws of key welding process parameters on arc stability and weld quality were revealed.
(3) The optimal process parameter window for laser-TIG hybrid welding of stainless steel plates was determined.

Key words: low-current TIG arc-assisted laser welding; thin stainless steel plate; high-efficiency welding; low heat input

0 序言

在轻量化趋势的推动下, 不锈钢薄板因其优异的耐腐蚀性、高强度、良好冲击韧性及焊接性, 广泛应用于工业制造、建筑工程、公共交通设施及能源装备等领域^[1-4]。与此同时, 随着工业发展迈向高速化、智能化与自动化, 生产要求日益提高, 不锈钢焊接技术亟需实现高质量、高效率和高可靠性的全面提升^[5-6]。

当前, 常见的不锈钢板焊接工艺为激光焊和钨极惰性气体保护焊 (tungsten inert gas, TIG)。激光焊以其低的热输入^[7-8], 在连接高热敏感性不锈钢时展现出显著优势。DINAHARAN 等人^[9]采用激光焊技术对 2 mm 厚双相不锈钢进行焊接, 系统研究了焊接速度对焊缝质量的影响, 成功获得了全熔透且无缺陷的良好焊接接头; LIU 等人^[10]研究了焊接速度对 0.2 mm 厚 316L 不锈钢激光焊焊缝成形的影响, 结果表明, 提高焊接速度会导致背面熔透质量难以保持稳定。为满足高速焊接要求, 激光焊往往需提高激光功率, 易诱发飞溅、气孔及塌陷等缺陷^[11]。TIG 焊工艺因其电弧稳定、无飞溅、热输入低等^[12-13]显著优势, 已成为不锈钢薄板焊接的主要工艺。徐书峰等人^[14]对 1.5 mm 厚 409L 不锈钢进行 TIG 焊试验, 重点研究了焊接速度对焊缝成形的影响, 研究发现, 随着焊接速度的提高, 熔池长宽比逐渐增大, 当焊接速度超过 0.65 m/min 时, 焊缝出现塌陷。由于 TIG 焊钨极载流能力低、熔深不足等^[15]问题, 难以通过同步提高焊接速度和焊接电流

有效提升不锈钢板的生产效率, 且在高速焊接条件下易产生咬边、驼峰焊道等^[16-17]表面成形缺陷。

针对不锈钢薄板 TIG 焊工艺中存在的高质量和高效率难以协同提升的技术瓶颈, 文中提出小电流 TIG 电弧辅助激光低热输入高速焊工艺, 激光束作为主要热源, 保证焊缝稳定熔透; TIG 电弧起辅助作用, 用于调控熔池动态行为, 显著提升焊缝成形质量。TIG 电弧的引入扩大了熔池范围, 并延长其存在时间, 有助于稳定匙孔形态; 同时, TIG 电弧预热作用降低了实现熔透所需的激光功率, 避免了金属蒸气反冲压力对匙孔底部的冲击, 有效抑制咬边和驼峰焊道等表面成形缺陷, 实现低热输入、高速焊接。通过工艺试验系统研究了焊接工艺参数对焊接过程稳定性及焊缝质量的影响规律, 并明确了最佳焊接工艺窗口; 将复合焊接工艺与单一 TIG 焊和激光焊进行对比, 评估其技术优势。此外, 该工艺在多厚度、多材质不锈钢薄板焊接中表现出良好的适应性与稳定性, 为推动不锈钢板焊接效率与质量的协同提升提供了一种创新工艺。

1 试验方法

试验所用材料为冷轧 409L 铁素体不锈钢和 304 奥氏体不锈钢。平板自熔焊采用 300 mm × 60 mm × 1.2 mm 的 409L 不锈钢板, 以探究工艺窗口; 对接焊选用厚度为 1.2 mm, 1.5 mm, 2.0 mm 的 409L 和 1.2 mm, 2.0 mm 的 304 不锈钢板。母材化学成分见表 1。

表 1 409L 和 304 不锈钢母材化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical composition of 409L and 304 stainless steel base metals

材料	C	Mn	Cr	Ni	Si	Ti	Cu	N	S	P	Fe
409L	0.013	0.34	11.32	0.08	0.45	0.201	0.02	0.014	0.005	0.016	余量
304	0.042	1.05	18.05	8.03	0.47	0.005	0.023	0.049	0.005	0.028	余量

试验在自主搭建的激光 + TIG 复合焊试验平台进行, 该系统集成波长 1 070 nm、最小光斑直径 0.4 mm、额定功率 12 kW 的光纤激光器, 高精度六

轴工业机器人, 额定电流 400 A 的逆变式氩弧焊机以及高纯氩气保护装置等主要设备。为实时监测焊接过程状态, 试验系统还配备了多源信息监测装

置,包括基于工业相机(最大帧率 200 帧/秒)的视觉监测模块和霍尔传感器电参数采集模块,并与焊枪同步移动,确保观测准确性。

2 激光 + TIG 复合高速焊工艺试验

以 1.2 mm 厚 409L 不锈钢板为研究对象,系统开展小电流 TIG 电弧辅助激光平板自熔焊工艺试验,研究激光功率 (P)、焊接电流 (I)、光钨间距 (d) 及焊接速度 (v) 等焊接工艺参数对激光-电弧耦合效应和焊缝成形质量的影响。试验中激光束保持 5° 前倾角,以避免反射光损伤, TIG 焊枪与基板表面呈 60° 倾角布置,钨极尖端距工件表面 2 mm,如图 1 所示。

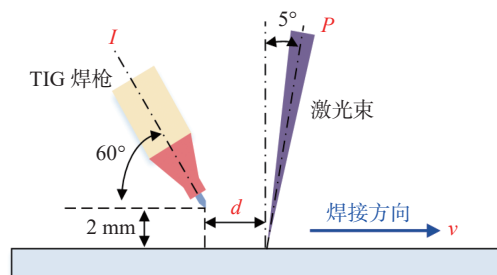


图 1 复合焊接热源布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hybrid welding head

2.1 激光功率对焊缝成形的影响

在小电流 TIG 电弧辅助激光焊工艺中,激光能量不仅决定了焊缝熔深和成形质量,更影响着复合热源的协同效应。在焊接电流 40 A、焊接速度 3 m/min 和光钨间距 4 mm 的固定参数下,试验研究了激光功率在 1.3 ~ 2.0 kW 范围内变化的焊缝成形,如图 2 所示。结果表明,小电流 TIG 电弧辅助激光焊在 1.8 kW 激光功率下达到稳定焊透,如图 2(c) 所示。值得注意的是,即使将激光功率提升至 2.0 kW,焊缝背面仍能保持良好的成形质量,特别是背面呈现均匀连续的熔透状态,如图 2(d) 所示。在焊接过程中,电弧对工件的预热增加了激光吸收率;同时电弧能够有效稳定熔池热—流动态行为,抑制高速焊接过程中咬边和驼峰焊道成形缺陷的产生,从而获得良好焊缝成形。

2.2 焊接电流对电弧稳定性及焊缝成形的影响

小电流 TIG 电弧辅助激光复合焊工艺采用小焊接电流实现低热输入控制,但需兼顾电弧稳定性,焊接电流过低会导致电弧失稳,直接影响工艺

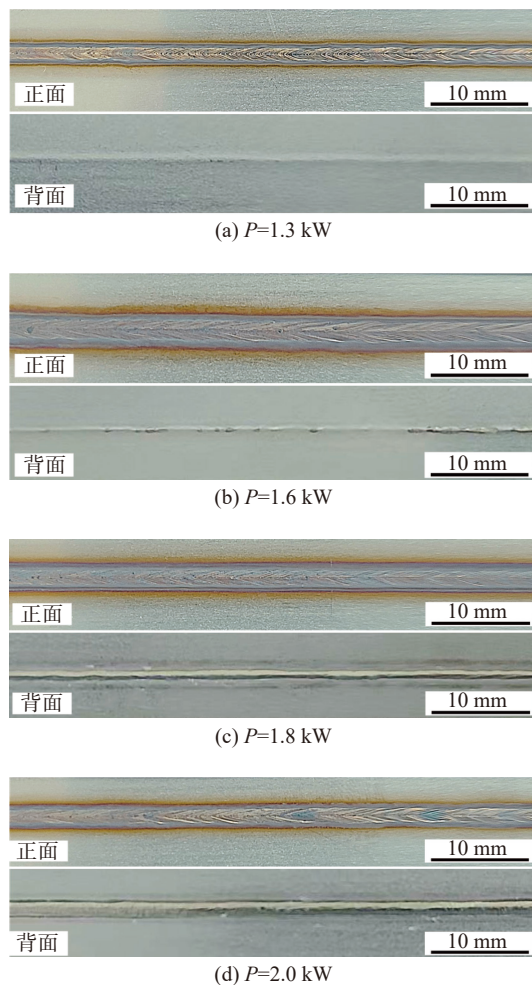


图 2 不同激光功率 TIG 电弧辅助激光焊焊缝成形

Fig. 2 Weld appearances at different laser powers in low current TIG arc assisted laser welding. (a) $P = 1.3$ kW; (b) $P = 1.6$ kW; (c) $P = 1.8$ kW; (d) $P = 2.0$ kW

可靠性。为此,在固定焊接参数(速度 3 m/min, 激光功率 1.8 kW, 光钨间距 4 mm)下,通过电弧形态与焊缝形貌分析,重点研究小电流(30 ~ 70 A)电弧稳定性与焊缝成形特征。

不同焊接电流下的电弧形态及对应的焊缝成形如图 3 所示。电流为 30 A 时,电弧能量较低,电弧等离子体范围明显收缩,电弧在激光诱导下产生明显偏转,导致加热范围受限,焊缝横截面呈单激光焊特征。随着电流增至 50 A,电弧等离子体密度增加,偏转角度减小,能够有效覆盖激光后方区域,形成稳定的复合焊熔池;进一步增加电流至 70 A 时,虽然电弧偏转现象减弱,热输入明显增加,焊缝熔宽由 50 A 时的 2.2 mm 显著增至 2.5 mm。综合分析表明,焊接电流 50 A 时不仅实现了电弧形态与激光的良好协同作用,同时有效控制了热输入,在焊缝成形质量、工艺稳定性和热输入控制等方面达

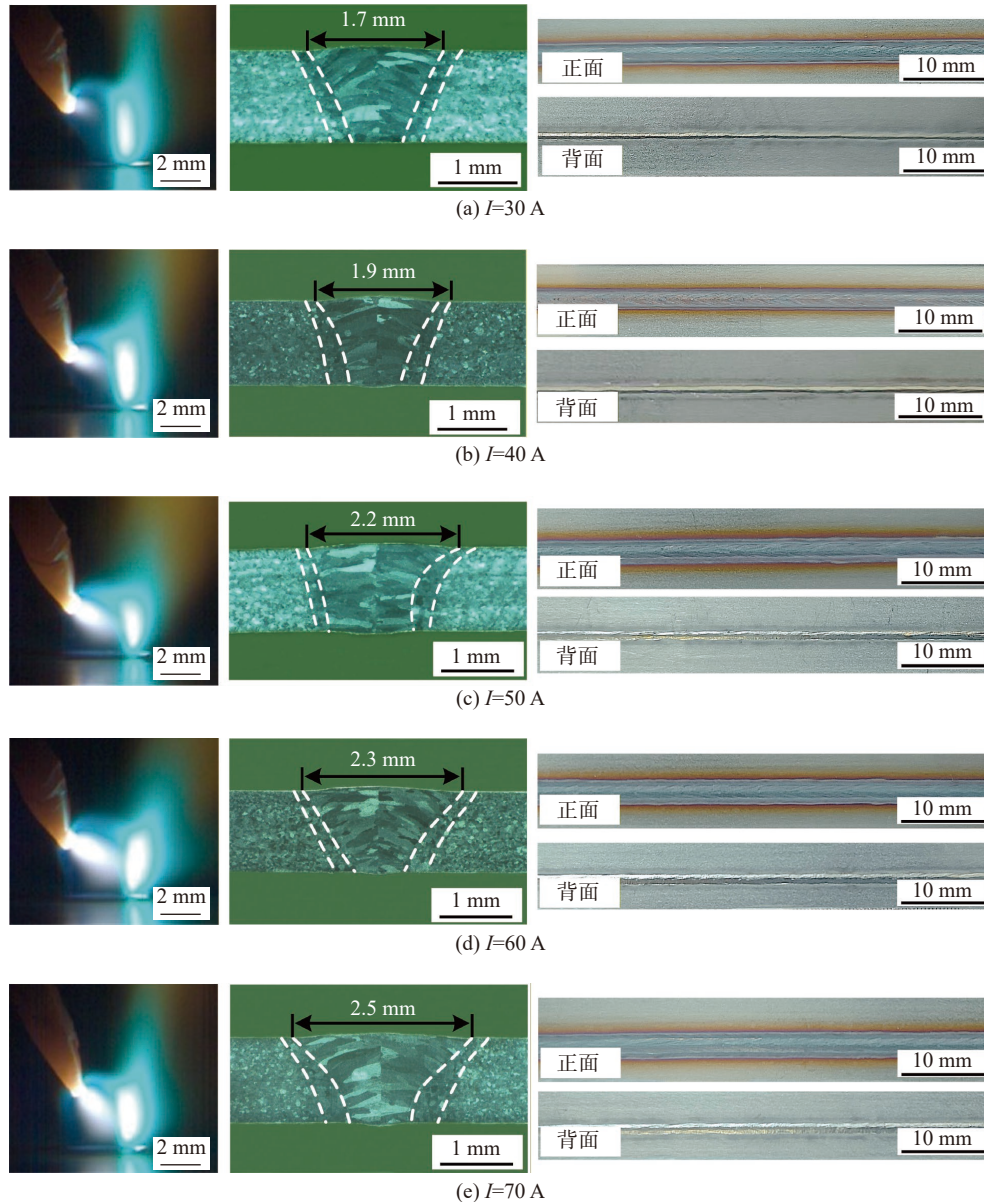


图 3 不同焊接电流 TIG 电弧形态及复合焊缝成形对比

Fig. 3 Comparisons of arc shapes and weld appearances at different TIG welding currents. (a) $I = 30$ A; (b) $I = 40$ A; (c) $I = 50$ A; (d) $I = 60$ A; (e) $I = 70$ A

到最优平衡。

2.3 光钨间距对电弧稳定性及焊缝成形的影响

在激光 + 小电流 TIG 电弧复合焊工艺中, 激光束到钨极之间的距离 (光钨间距 d) 作为关键工艺参数, 直接影响激光—电弧协同效应。为优化热源耦合效应、维持匙孔稳定性并改善熔池热一流行为, 需确定最佳光钨间距参数。在激光功率 1.8 kW、焊接电流 50 A、焊接速度 3 m/min 工艺条件下, 系统研究了光钨间距 (2 ~ 6 mm) 对 TIG 电弧特性和焊缝成形的影响规律, 如图 4 所示。结果表明, 光钨间距对复合热源的协同效应具有显著调控作用, 随着光钨间距的增加, 逐步呈现相互干扰、强耦合、无显著影响三种情况。当间距为 2 ~ 3 mm 时, 激光与

电弧相互干扰导致飞溅明显增加, 同时钨极烧损风险提升; 当光钨间距为 4 ~ 5 mm 时, 复合热源呈现强耦合特征, 能量利用率最高。此时激光诱导并压缩电弧的能力最为显著, 表现为混合等离子体高度明显降低, 此外对比发现, 4 mm 间距下焊缝成形质量较 5 mm 间距更优; 当间距增至 6 mm 时, 激光电弧已无明显耦合, 两热源基本分离, 焊缝横截面处已经出现了明显的分层现象, 说明激光和 TIG 电弧未能产生有效协同作用。试验确定, 激光+小电流 TIG 复合焊接在 4 mm 光钨间距时展现出最佳耦合效应。

2.4 焊接速度对焊缝成形的影响

通过前期焊接工艺参数的单因素变量试验, 已

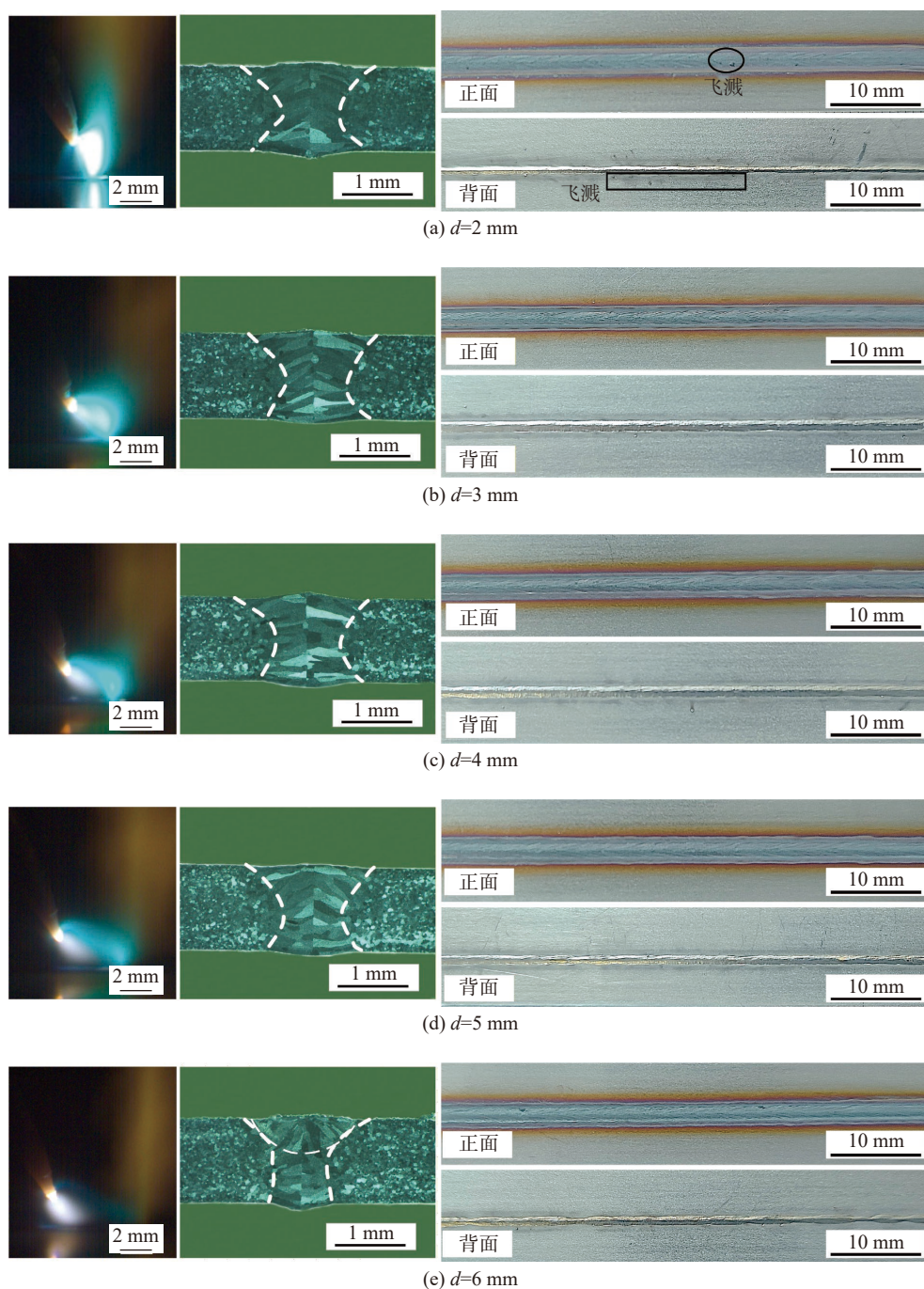


图 4 光钨间距对 TIG 电弧形态及复合焊接焊缝成形对比

Fig. 4 Comparisons of arc shapes and weld appearances among different distances between laser and tungsten. (a) $d = 2$ mm; (b) $d = 3$ mm; (c) $d = 4$ mm; (d) $d = 5$ mm; (e) $d = 6$ mm

获得小电流 TIG 电弧辅助激光焊接工艺中激光功率、焊接电流和光钨间距对焊接过程稳定性及焊缝成形的影响。为提高焊接速度,在优化工艺参数(焊接电流 50 A,光钨间距 4 mm)基础上,研究了 3~6 m/min 焊接速度对焊缝成形的影响。采用“先熔透后降功率”策略:首先采用高激光功率确保熔透,随后逐步降低功率,在保证焊缝质量的同时实现低热输入。

不同焊接速度下焊缝成形如图 5 所示。结果表明,焊接速度显著影响焊缝成形质量,当焊接速度在 4 m/min 以下时,优化激光功率均可获得成形良好焊缝,正背面成形均匀一致,熔透状态稳定;随着速度提升至 5 m/min,虽然仍能实现完全熔透,但焊缝均匀性变差,并伴有少量飞溅;当速度达到 6 m/min 时,焊缝出现局部未熔透和驼峰焊道等缺陷。

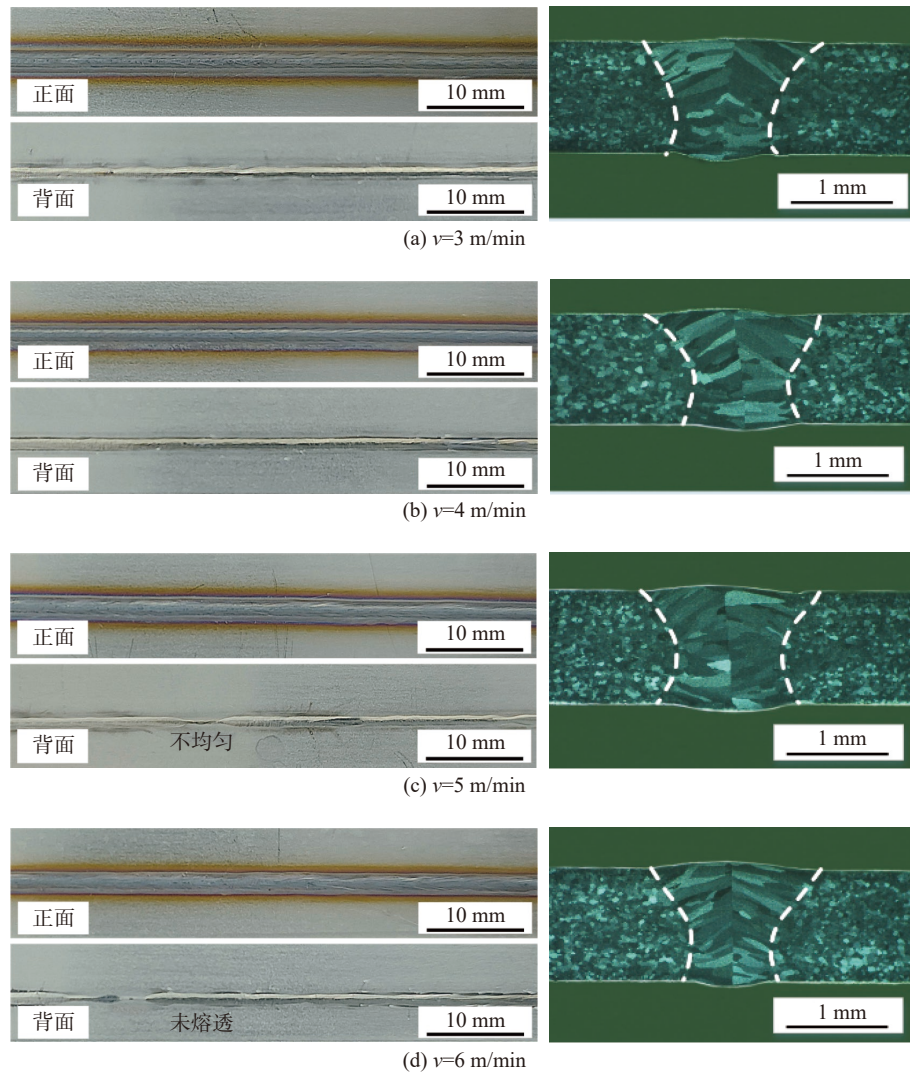


图 5 不同焊接速度下的焊缝成形

Fig. 5 Weld appearances at different welding speeds. (a) $v = 3$ m/min; (b) $v = 4$ m/min; (c) $v = 5$ m/min; (d) $v = 6$ m/min

3 焊接工艺对比

针对 1.2 mm 厚 409L 不锈钢薄板, 分别采用 TIG 焊、激光焊及小电流 TIG 电弧辅助激光焊进行对接试验, 并对比三种工艺的最大焊接速度、焊接热输入、焊接变形及焊缝成形, 分析接头性能, 以评估复合焊接工艺的优势。

3.1 焊接效率与质量对比

1.2 mm 厚 409L 不锈钢对接 TIG 焊、激光焊及小电流 TIG 电弧辅助激光焊达到的最大速度及对应的焊接工艺参数和热输入见表 2。三种工艺下, TIG 焊极限速度最小, 且热输入最大, 达到 92.4 J/mm。相比之下, 激光焊和小电流 TIG 电弧辅助激光焊速度均可达 4.2 m/min, 较 TIG 焊效率提升 2.8 倍。小电流 TIG 电弧辅助激光焊具有最低的

表 2 三种焊接工艺的最大速度及对应参数

Table 2 Maximum welding speeds and corresponding parameters for three welding processes

焊接工艺	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	激光功率 P/kW	焊接速度 $v/(m \cdot min^{-1})$	焊接热输入 $E/(J \cdot mm^{-1})$
TIG 焊	160	10	—	1.1	92.4
激光焊	—	—	2.64	4.2	37.7
激光 + TIG 电弧复合焊	50	9.3	1.92	4.2	34.1

热输入, 仅为 34.1 J/mm, 较 TIG 焊降低 63.1%。

图 6 对比了三种工艺的焊后变形及焊缝横截面特征。在长度 300 mm 不锈钢板对接焊中, TIG 焊在 70 mm 长度焊缝下因高热输入导致最大变形, 中心挠度达 12 mm; 激光焊和复合焊在 260 mm 长度焊缝下基本无焊接变形, 焊后不锈钢板基本保持平整。对比焊缝横截面特征表明, TIG 焊呈“碗形”熔深形貌, 正面熔宽达 3.9 mm, 但背面熔宽极小且晶粒粗化严重; 激光焊热影响区窄、晶粒明显细化, 但存在表面凹陷问题。不锈钢薄板高速激光焊的难点在于工艺窗口窄, 提高焊接速度需大幅提升激光功率, 但功率过高易导致焊漏, 而功率不足又难以稳定熔透, 造成背面焊缝不连续。

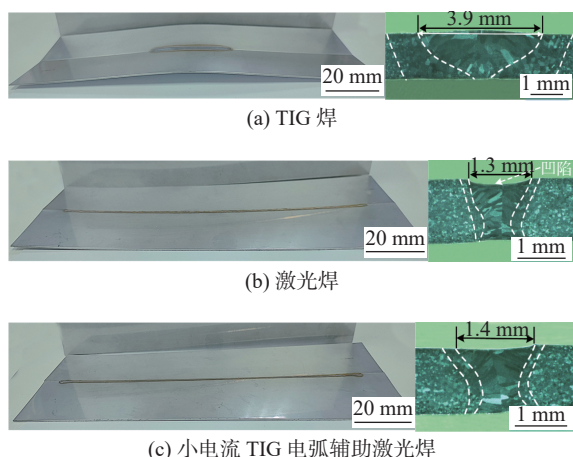


图 6 三种焊接工艺焊后变形及焊缝横截面形貌对比
Fig. 6 Comparisons of welding deformation and cross-section morphology among three welding processes. (a) TIG welding; (b) laser welding; (c) low-current TIG arc-assisted laser welding

相比之下, 小电流 TIG 电弧辅助激光焊工艺通过电弧的协同作用实现了对熔池及匙孔热力行为联合调控。此外, 从复合焊接横截面可以发现, 即使在错边条件下仍能实现良好焊接, 未出现凹陷、咬边等缺陷, 兼具优异的工艺适应性和稳定性。

3.2 接头性能对比

采用维氏硬度计(载荷 1 kgf、保载时间 10 s)对三种焊接工艺不锈钢对接接头进行显微硬度测试。测试路径沿垂直于焊缝方向, 覆盖焊缝区(fusion zone, FZ)、热影响区(heat affected zone, HAZ)及母材区(base metal, BM)。其中, 母材区测试间距为 0.5 mm, 焊缝区及热影响区测试间距加密至 0.2 mm。接头测试区域组织的硬度分布如图 7 所示。结果表明, 三种工艺接头硬度均呈现从焊缝中心向母材递减的趋势, 且焊缝区硬度显著高于母材。

TIG 焊接头表现出典型的宽热影响区特征: 焊缝中心硬度低于激光焊和复合焊, 这与 TIG 焊高热输入导致的组织粗化及残余应力分布相关。

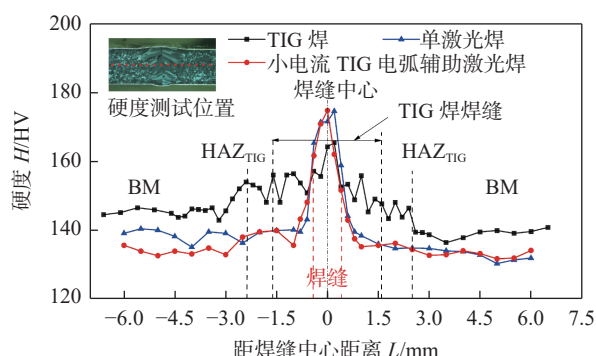


图 7 三种焊接工艺接头显微硬度分布
Fig. 7 Microhardness distribution across weld joints for three welding processes

4 焊接工艺普适性评估

采用 409L (1.2 mm, 1.5 mm 和 2.0 mm) 和 304 (1.2 mm 和 2.0 mm) 不同厚度的不锈钢板进行对接焊试验, 以评估该工艺对不同材质、不同规格不锈钢板焊接的适应性, 焊缝成形与试样断裂位置如图 8 所示。

4.1 焊缝成形对比

针对不同厚度的 409L 和 304 不锈钢板开展对接焊工艺试验, 通过优化激光功率、焊接电流与焊接速度的匹配, 在保证焊缝成形质量的同时, 实现高焊接速度与低热输入的平衡, 不同材质、不同厚度不锈钢板最终采用的工艺参数见表 3。从图 8 中可以看出, 采用小电流 TIG 电弧辅助激光焊工艺, 两种材料均能在高焊速下获得优质焊缝成形, 背面熔透均匀。

4.2 接头拉伸性能对比

采用标准拉伸试样, 以 1 mm/min 的拉伸速率测试了对接接头的拉伸性能。409L 和 304 不锈钢母材的抗拉强度分别为 400.7 MPa 和 815.2 MPa, 断后伸长率分别为 48.3% 和 69.5%。从图 8 中可以看出, 所有接头均断裂于母材区, 表现出优异的力学性能。表 3 接头拉伸性能表明, 409L 接头抗拉强度与母材等强, 断后伸长率最高达母材的 76.4%。304 不锈钢接头抗拉强度与母材相当, 断后伸长率达母材的 88.9%, 焊缝与母材变形均匀。两种材料的焊接接头均具有可靠的力学性能。

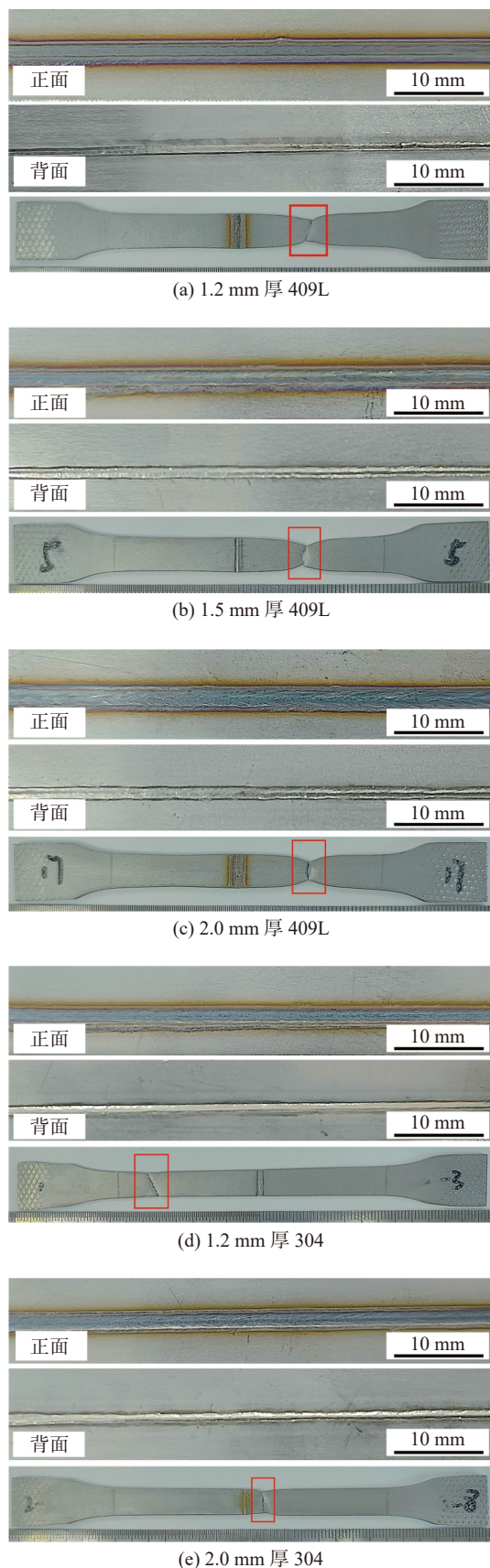


图 8 不同厚度 409L 与 304 不锈钢焊缝成形及断裂位置
Fig. 8 Weld appearances and fracture locations of 409L and 304 stainless steels with different thicknesses: (a) 1.2 mm thick 409L; (b) 1.5 mm thick 409L; (c) 2.0 mm thick 409L; (d) 1.2 mm thick 304; (e) 2.0 mm thick 304

表 3 409L 与 304 不锈钢不同厚度拉伸性能对比
Table 3 Tensile properties of welded joints between 409L and 304 with different thicknesses

试样	工艺参数	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A(\%)$
1.2 mm厚409L	$v = 4.2 \text{ m/min}$	392.9	35.9
	$P = 1.9 \text{ kW}$		
	$I = 50 \text{ A}$		
1.5 mm厚409L	$d = 4 \text{ mm}$	395.6	33.4
	$v = 4.0 \text{ m/min}$		
	$P = 2.2 \text{ kW}$		
2.0 mm厚409L	$I = 50 \text{ A}$	401.5	36.9
	$d = 4 \text{ mm}$		
	$v = 3.0 \text{ m/min}$		
1.2 mm厚304	$P = 2.2 \text{ kW}$	784.9	59.6
	$I = 60 \text{ A}$		
	$d = 4 \text{ mm}$		
2.0 mm厚304	$v = 4.5 \text{ m/min}$	793.7	61.8
	$P = 1.8 \text{ kW}$		
	$I = 50 \text{ A}$		
	$d = 4 \text{ mm}$		
	$v = 3.2 \text{ m/min}$		
	$P = 2.0 \text{ kW}$		
	$I = 60 \text{ A}$		
	$d = 4 \text{ mm}$		

5 结论

(1) 提出了不锈钢板小电流 TIG 电弧辅助激光高速低热输入焊工艺. 光钨间距 $3 \sim 4 \text{ mm}$ 时, 激光与电弧形成强耦合效应; 焊接电流为 50 A 时, 实现低热输入焊接的同时能够有效稳定电弧.

(2) 小电流 TIG 电弧辅助激光焊工艺与 TIG 焊和激光焊相比, 实现了最高的焊接速度、最低的热输入, 并兼具了优异的焊缝成形及焊接变形控制. 焊接效率较 TIG 焊提升 2.8 倍, 热输入降低 63.1%, 同时克服了激光焊高装配要求及表面凹陷等问题.

(3) 提出的小电流 TIG 电弧辅助激光复合焊工艺, 在多种厚度和材质的不锈钢薄板焊接中展现出广泛适用性, 均实现优质高效低热输入焊接. 在 2.0 mm 厚的 304 奥氏体不锈钢和 409L 铁素体不锈钢对接焊中分别实现了 3.2 m/min 和 3.0 m/min 的高效焊接速度, 并具备优异的接头塑性变形能力, 断后伸长率分别达到母材的 88.9% 和 76.4%.

参考文献

- [1] 胡明珠, 陈琪昊, 杨志东, 等. 周期超声振动对 316L 不锈钢

- TIG 焊缝成形及性能的影响 [J]. 焊接学报, 2025, 46(8): 55 – 65.
- HU Mingzhu, CHEN Qihao, YANG Zhidong, *et al.* Effect of periodic ultrasonic vibration on forming and properties of 316L stainless steel's TIG weld[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2025, 46(8): 55 – 65.
- [2] PANT S, KUMAR S, SHAHI A S. Metallurgical, mechanical, and corrosion behavior of wire arc additively manufactured super duplex stainless steel ER2594 wall fabricated using CMT welding[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2025, 35(2): 1 – 16.
- [3] XIANG H, LIN J, HUANG X, *et al.* Grain-coarsening induced joint enhancement for ultrasonic welding of duplex stainless steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2025, 943: 148840.
- [4] GHUMMAN K Z, ALI S, KHAN N B, *et al.* Optimization of TIG welding parameters for enhanced mechanical properties in AISI 316L stainless steel welds[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 136(1): 353 – 365.
- [5] 刘淑仪, 王会峰, 孙有辉, 等. 2205 双相不锈钢焊接接头各微区的耐点蚀性能 [J]. 焊接学报, 2025, 46(7): 50 – 58.
- LIU Shuyi, WANG Huifeng, SUN Youhui, *et al.* Pitting corrosion resistance of different micro-zones in 2205 duplex stainless steel welded joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2025, 46(7): 50 – 58.
- [6] 夏佩云, 封小松, 王春明, 等. 激光摆动焊接工艺参数对不锈钢焊缝成形与气孔率的影响 [J]. 焊接学报, 2023, 44(4): 39 – 44.
- XIA Peiyun, FENG Xiaosong, WANG Chunming, *et al.* Effect of parameters on weld formation and porosity of stainless steel in laser oscillating welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(4): 39 – 44.
- [7] PALANIVEL R, DINAHARAN I, ASFER M, *et al.* Effect of laser power on metallurgical and tensile properties of CO₂ laser welded AISI 409 ferritic stainless steel tubes[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 182: 112088.
- [8] ŠIMEKOVÁ B, DOMÁNKOVÁ M, KOVAŘÍKOVÁ I, *et al.* Microstructural and mechanical characterization of the laser beam welded SAF 2507 super-duplex stainless steel[J]. Metals, 2024, 14(10): 1184.
- [9] DINAHARAN I, RAMESH R, RAVIKUMAR R, *et al.* Effect of Nd: YAG laser beam welding on microstructure and mechanical properties of super duplex stainless steel sheets[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2025, 35(3): 1 – 13.
- [10] LIU J, NIE Y, FENG Q, *et al.* Influence of welding speed on the microstructure and mechanical properties of laser-welded joints in 316L stainless steel sheets[J]. Metals, 2025, 15(6): 624.
- [11] 李小兵, 束长荣, 陆立婷, 等. 不锈钢复合板的焊接工艺研究现状及进展 [J]. 中国冶金, 2025, 35(1): 15 – 31.
- LI Xiaobing, SHU Changrong, LU Liting, *et al.* Research status and progress of welding technology of stainless steel clad plate[J]. China Metallurgy, 2025, 35(1): 15 – 31.
- [12] 刘爱国, 刘震昊. 我国近 10 年双相不锈钢焊接研究进展分析 [J]. 焊接技术, 2024, 53(8): 1 – 9.
- LIU Aiguo, LIU Zhenhao. Analysis of research progress in duplex stainless steel welding in China over the past decade[J]. Welding Technology, 2024, 53(8): 1 – 9.
- [13] 刘自刚, 周晓静, 朱婷婷, 等. A-TIG 焊接方法研究现状及展望 [J]. 材料导报, 2021, 35(52): 353 – 357.
- LIU Zigang, ZHOU Xiaojing, ZHU Tingting, *et al.* Research status and prospects of A-TIG welding method[J]. Materials Reports, 2021, 35(52): 353 – 357.
- [14] 徐书峰, 徐芳泓, 柳阳, 等. 相同热输入条件下参数匹配对 SUH409L 焊缝组织的影响研究 [J]. 太原理工大学学报, 2019, 50(3): 329 – 334.
- XU Shufeng, XU Fanghong, LIU Yang, *et al.* Influence of welding parameters under the same heat input on microstructure in weld joints of SUH409L[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2019, 50(3): 329 – 334.
- [15] ZHAO H, ZHANG S, CHEN H, *et al.* Methods to improve TIG welding efficiency[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2024, 77(9): 2231 – 2245.
- [16] 江海红. 双直流脉冲协调列置双 TIG 高速焊接工艺 [D]. 济南: 山东大学, 2018.
- JIANG Haihong. High-speed pulsed tandem TIG welding process based on coordination control of tandem pulsed welding current[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [17] ASSEFA A T, AHMED G M S, ALAMRI S, *et al.* Experimental investigation and parametric optimization of the tungsten inert gas welding process parameters of dissimilar metals[J]. Materials, 2022, 15(13): 4426.

作者简介: 梁国栋, 博士研究生; 主要从事激光 + 电弧复合热源焊接过程数值分析; Email: 202114098@mail.sdu.edu.cn.

秦国梁 (通信作者), 博士, 教授; 主要从事高效焊接制造技术; Email: glqin@sdu.edu.cn.

(编辑: 郑红)