“华光新材杯”高质量论文推荐

DOI：10.7512/j.issn.1001-2303.2026.09.01

激光-KTIG复合焊接工艺下的匙孔行为研究与工艺特点

闫瑞志，杜德志*，李柱良，孙润生，白宇鹏，李金龙

山东奥太电气有限公司，山东 济南 250014

摘　要：为了扩大KTIG的焊接工艺窗口和电弧稳定性，采用激光-KTIG复合焊接方法对对碳钢（Q235）与不锈钢（304L）进行焊接试验。研究了激光照射位置、焊接速度及激光功率对复合焊接过程稳定性和焊缝成形的影响，并借助X射线透射成像原位观测装置，实时采集了复合焊接与单独KTIG焊接过程中匙孔的生成与演化图像。结果表明，激光照射于匙孔前壁时形成电弧穿孔模式，照射于匙孔后壁时形成激光穿孔模式。在电弧穿孔模式下，焊接稳定性与电弧形态主要受到焊接速度与激光功率的影响。在匙孔产生与演化方面，激光的照射改变了电弧的燃弧位置与挺直性，致使电弧匙孔发生偏移，偏移量的多少取决于焊接速度和激光功率，通过合理的设置参数，可将匙孔优化为竖直状态，竖直状态下的匙孔降低了工艺气孔的倾向。

关键词：KTIG；匙孔；电弧形态；X射线衍射原位；复合焊接

中图分类号：TG456.7　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-2303（2026）09-0001-09

Study of Keyhole Behavior and Process Characteristics in Laser-KTIG Hybrid Welding

YAN Ruizhi, DU Dezhi*, LI Zhuliang, SUN Ruisheng, BAI Yupeng, LI Jinlong

Shandong Aotai Electric Co., Ltd., Ji'nan 250014, China

Abstract: To broaden the process window and improve arc stability of KTIG welding, laser-KTIG hybrid welding was employed to carry out butt-welding experiments on Q235 carbon steel and 304L stainless steel. The influences of laser irradiation position, welding speed and laser power on process stability and weld formation of hybrid welding were investigated. An in-situ X-ray transmission imaging system was utilized to acquire real-time images of keyhole initiation and evolution during hybrid welding and single KTIG welding. The results reveal that the arc-penetration mode is generated when the laser irradiates the front wall of the keyhole, while the laser-penetration mode forms as the laser irradiates the rear wall of the keyhole. Under the arc-penetration mode, welding stability and arc morphology are predominantly governed by welding speed and laser power. For keyhole generation and evolution, laser irradiation modifies the arc ignition position and arc stiffness, resulting in keyhole deflection whose magnitude depends on welding speed and laser power. Appropriate parameter configuration can achieve a vertical keyhole geometry, which mitigates the susceptibility to process-related porosity.

Keywords: KTIG; keyhole; arc morphology; in-situ X-ray diffraction; hybrid welding

引用格式：闫瑞志，杜德志，李柱良，等. 激光-KTIG复合焊接工艺下的匙孔行为研究与工艺特点[J]. 电焊机，2026，56（9）：1-9.

收稿日期：2026-07-20　　**修回日期：**2026-09-07

作者简介：闫瑞志（1987—），硕士，工程师，主要从事深熔焊、激光焊等自动化设备的整机研发及推广工作。

通讯作者：杜德志，工程师，主要从事高效焊接方面的研发工作。E-mail：897140776@qq.com。

Citation: YAN Ruizhi, DU Dezhi, LI Zhuliang, et al. Study of Keyhole Behavior and Process Characteristics in Laser-KTIG Hybrid Welding[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(9): 1-9.

0 引言

随着工业化进程的不断推进，机器工作效率与产品生产率逐步提升，在焊接行业，通常通过增加焊接速度或者提升厚板单次可焊厚度来提升生产效率，因此衍生出多种高效焊接方法。其中，KTIG在没有填充材料的条件下，可实现5~13 mm板材的单道全熔透[1]，与手动多层多道焊接相比，KTIG不开坡口、一次成形，生产效率大幅提升。它是在传统TIG焊的基础上通过增大焊接电流和强制冷却来压缩电弧、提高电弧压力，使电弧穿透工件形成匙孔，其后电弧通过匙孔与工件进行能量传输。形成的焊接熔池在电弧力、熔池静水压力、表面张力的共同作用下达到平衡，最终实现全熔透[2]，因此该种焊接方法的焊接速度与焊接厚度在一定范围内，当焊接速度过快或者板厚过厚时，匙孔打不开，无法实现全熔透焊缝，提高电弧的穿透性与匙孔稳定性是增加KTIG焊接速度的关键环节。

激光-电弧复合焊是一种将激光热源和电弧热源相结合的复合焊接热源模式，具有熔深更深、变形更小、焊接速度高、能够桥接相对较大的间隙、能够焊接高反射材料和提高电弧稳定性[3-4]。

激光和电弧协同焊接有两种不同的方法。第一种为激光辅助电弧焊接，激光仅用于预热待焊金属[7]，该过程中通常采用低功率激光增强电弧焊接，焊缝熔深和焊接速度的改善有限。第二种为高功率激光深穿透焊接，这是一种熔透模式焊接工艺，其特点是在接头处形成关键的匙孔[5-6]。在该过程中，高能量密度的激光和高能量效率的电弧协同作用实现焊接[7]，该工艺被称为电弧增强激光焊接[8]。经过多年的发展，激光-电弧复合焊接出现了多种组合形式，如激光与气保焊复合GMAW[9-16]。激光与氩弧焊/等离子弧焊复合、激光与埋弧焊复合焊接[17]等。

为增加KTIG的穿孔能力与稳定性，已有研究将KTIG与激光复合，在多种材料上分析了焊接过程稳定性及匙孔成形机制，并讨论了工艺参数对焊缝成形与电弧形态的影响。本文搭建了X射线透射成像原位观测装置，实时记录复合焊接与KTIG焊接过程中匙孔的演化行为，对比Laser-TIG与TIG-Laser两种复合模式的穿孔特征与焊缝质量，分析了焊接速度与激光功率对TIG-Laser模式电弧形态及焊缝成形的影响，以期为激光-KTIG复合焊接工艺的优化提供试验依据。。

1 材料与方法

复合焊接试验装置由焊接电源、水冷KTIG焊枪、激光器、激光焊枪、水冷机、移动装置、工装夹具及熔池相机构成。

弧焊电源选用WSME1000，输出电流范围20~1 000 A，额定负载率80%。激光器为RFL-C3000，水冷方式，输出激光波长1 080 nm，光纤芯径50 μm，光束质量BPP为1.4~2.0 mm·mrad。水冷弧焊枪可承受800 A电流，焊枪使用8 mm钨极，钨极尖端角度为60°。水冷激光焊枪的最大激光功率为3 kW，其准直焦距为50 mm，聚焦焦距为150 mm，聚焦后的光斑尺寸约为150 μm。工装夹具为自行设计。熔池相机使用WeldEye-220，移动装置采用机器人。

焊接材料采用304L不锈钢与Q235碳钢。试样尺寸为200 mm×50 mm×15 mm，鉴于X射线透射系统的空间分辨率与成像质量，在工件宽度方向上加工了方形通孔，通过调整通孔距焊接表面的距离，获得6 mm、8 mm和10 mm三种有效壁厚，用于研究不同壁厚条件下的焊接工艺与匙孔行为。所有焊接试验均借助X射线透射成像系统进行原位观测，实时采集匙孔演化图像。

在焊接试验中，氩弧焊枪与工件表面垂直，激光焊枪旁轴布置，两者角度20°~30°，激光与钨极尖端在工件上的投影距离为2 mm，钨极尖端与工件的距离为4 mm，如图1所示。起弧时先点燃电弧，待电弧达到工作电流后开启激光。复合热源的布置采用激光在前电弧在后（Laser-TIG模式）和电弧在前激光在后（TIG-Laser模式）两种方式，整个焊接

过程中采用氩气保护。

2　结果与讨论

2.1　复合热源空间布置方式对焊接过程的影响

KTIG 与激光均为匙孔焊接。为充分利用电弧优势，使电弧方向与工件垂直，激光沿焊枪旁轴放置激光与电弧的空间布置分为激光在前电弧在后（Laser–TIG 模式）和电弧在前激光在后（TIG–Laser 模式），其他焊接参数如表 1 所示，焊接过程采用 99.9% 的氩气保护，气流量 25~30 L/min，材料选用通孔距上表面 8 mm 的不锈钢试样。

表 1　复合热源空间布置方式下的焊接工艺参数

Table 1　Welding process parameters under spatial arrangement of composite heat source

激光功率/W	焊接速度/（mm·min^{-1}）	电弧电流/A	离焦量/mm	钨极高度/mm	光丝间距/mm
1 700	720	460	–4	4	2

图 2 为不同复合焊模式下的穿孔行为与电弧形态。其中，图 2a 为 Laser–TIG 复合焊接模式，电弧形态呈典型的钟罩型，电弧后端出现尾焰，激光从电弧的右上方照射，背面出现偏淡黄色的等离子体，沿激光照射方向分布。图 2b 为焊接相机拍摄的 Laser–TIG 模式焊接工件时背面的匙孔状态，出现

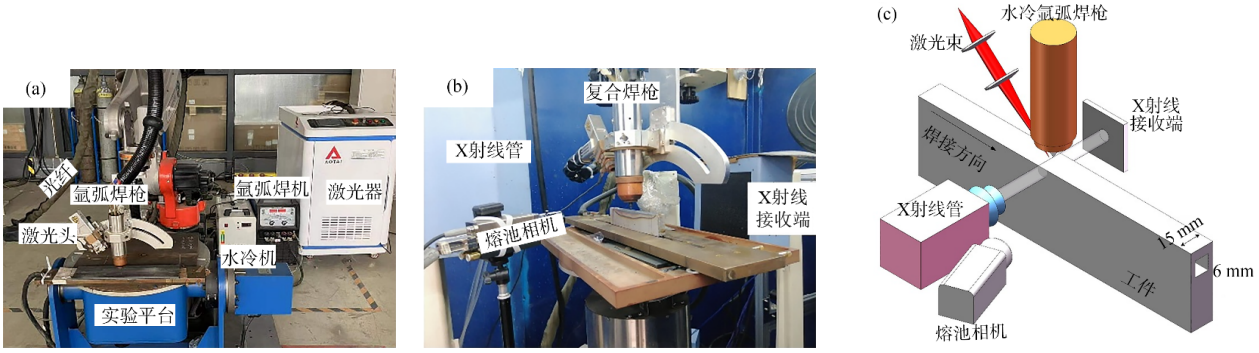


图 1　复合焊试验装置：(a)带有背保的平板对接试验平台；(b)X 射线成像系统；(c)X 射线成形系统空间示意，采集帧率 30 Hz

Fig. 1　Hybrid welding experimental setup: (a)flat plate butt joint test platform with backing protection; (b)X-ray imaging system; (c)schematic of the X-ray imaging system space, with a frame rate of 30 Hz

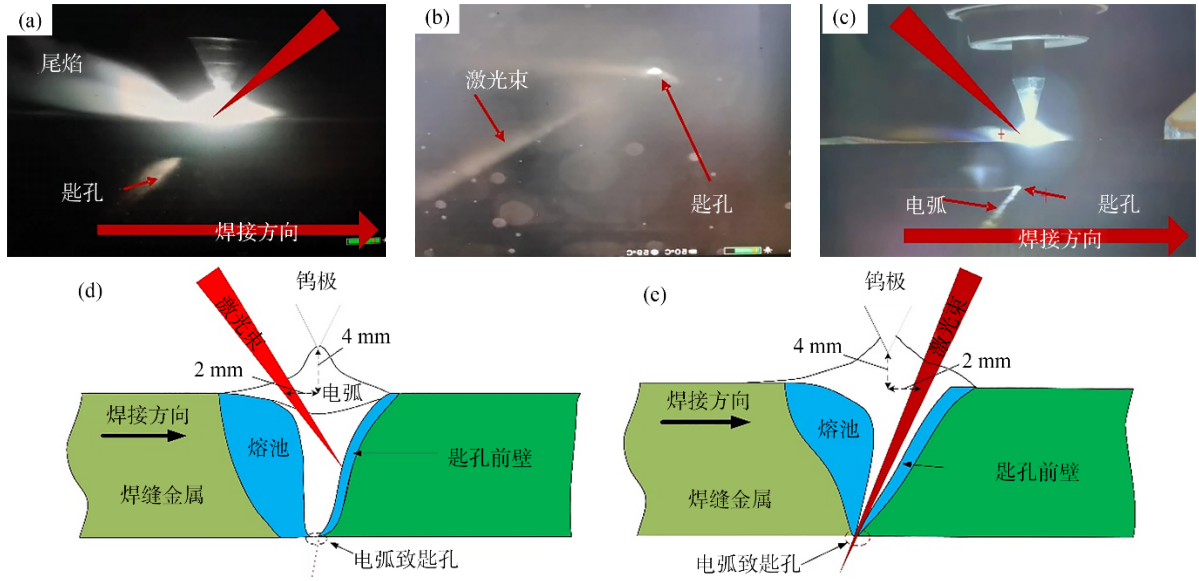


图 2　不同模式下电弧形态及其示意：(a)Laser-TIG 模式；(b)Laser-TIG 模式背部小孔形态；(c)TIG-Laser 模式；(d)TIG-Laser 模式电弧形态示意；(e)Laser-TIG 模式下电弧形态示意

Fig. 2　Arc shapes and their schematic diagrams under different modes: (a)Laser-TIG mode; (b)backside keyhole shape in Laser-TIG mode; (c)TIG-Laser mode; (d)schematic diagram of arc shape in TIG-Laser mode; (e)schematic diagram of arc shape in Laser-TIG mode

直径约 1 mm 的圆形均匀小孔，可观察到透射出的激光束，未见电弧等离子体。图 2c 为 TIG–Laser 复合焊接电弧形态，同样呈钟罩型并伴有尾焰，但尾焰较 Laser–TIG 模式小，工件背面出现电弧等离子体，位于电弧正下方，方向为以一定角度向焊接反向偏移，其小孔形状和尺寸与 KTIG 锁孔焊接一致[7]。

两种复合焊接模式的穿孔特征分为激光穿孔和电弧穿孔两类。电弧穿孔示意如图 2d 所示，在高焊速下，电弧无法穿透工件，留有剩余壁厚，激光束照射到匙孔前壁上，辅助电弧穿透工件，使熔池和匙孔保持稳定，实现匙孔焊接。激光穿孔示意如图 2e 所示，电弧以钟罩形态作用于工件上部，在 720 mm/min 的速度下，电弧力受到极大阻碍，产生拖拽，无法穿透工件，即在厚度上剩余部分无法焊透，此时高能量的激光束照射这部分剩余厚度，形成小孔，实现激光穿孔。

图 3 为两种模式和 KTIG 的焊缝形貌及探伤结果。两种模式均能实现稳定的匙孔焊接且各有特点，焊缝形貌基本一致，但探伤结果（见图 3c、3f、3i）表明 Laser–TIG 模式存在部分气孔，而 KTIG 与 TIG–Laser 模式未发现气孔。

图 4 为复合焊与 KTIG 的焊缝截面形貌。三者截面形状类似，均呈上宽下窄的特征。KTIG 的熔宽略宽，HAZ 区也略大于两种复合焊，主要原因是复合焊的热输低于 KTIG。

2.2 复合热源参数对电弧形态的影响

上述试验表明两种复合模式均能实现单面焊双面成形，但 Laser–TIG 模式存在气孔，主要是光致匙孔振荡[18]，无法完全避免，这对某些服役环境来说是严重的缺陷，因此后续研究主要针对 TIG–

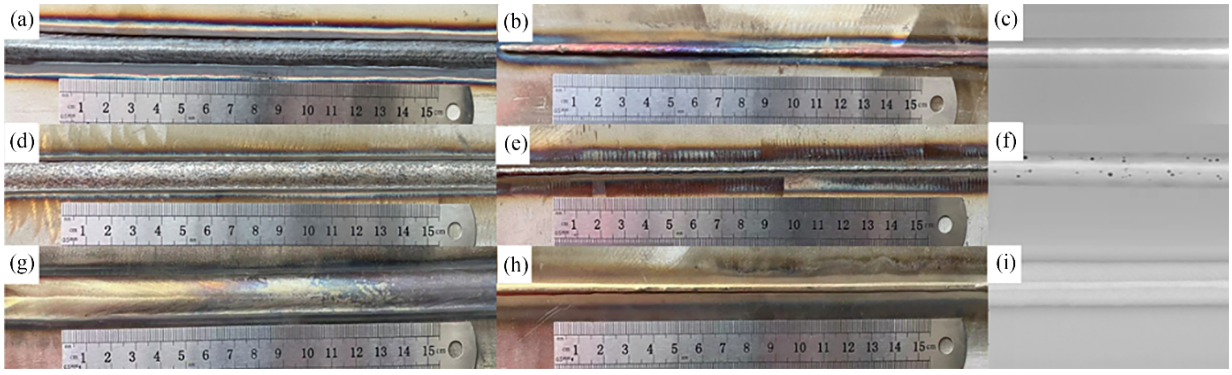


图 3 不同模式下的焊缝形貌及探伤结果：(a-c) TIG-Laser 模式；(d-f) Laser-TIG 模式；(g-i) KTIG

Fig. 3 Weld seam morphology and flaw detection results under different modes: (a-c) TIG-Laser mode; (d-f) Laser-TIG mode; (g-i) KTIG mode

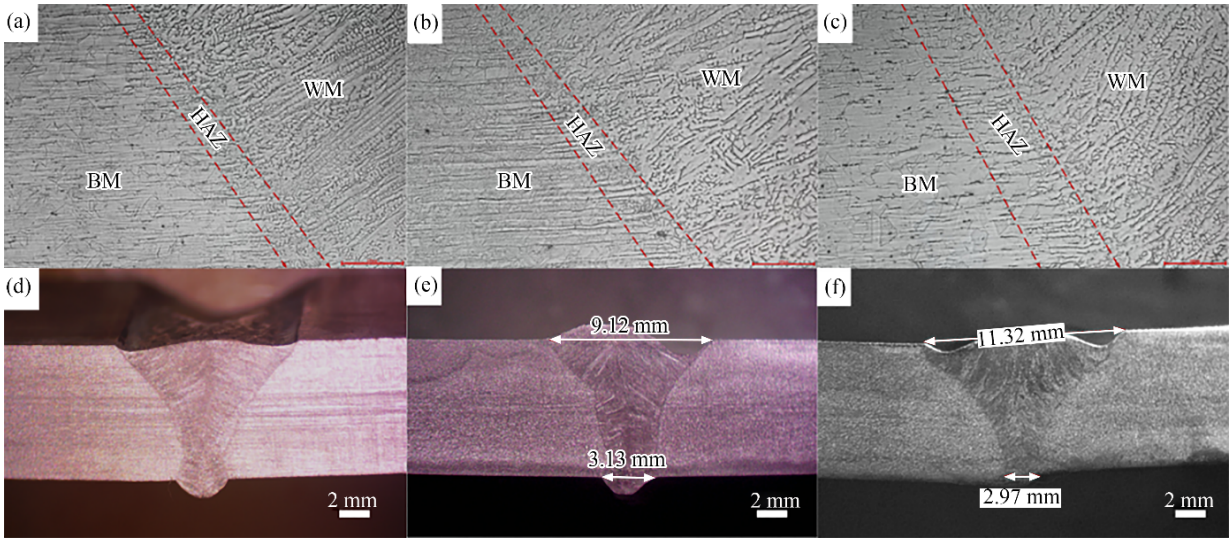


图 4 不同模式下的 HAZ 及焊缝截面：(a,d) Laser-TIG 模式；(b,e) TIG-Laser 模式；(c,f) KTIG

Fig. 4 HAZ (Heat-Affected Zone) and weld cross-sections in different modes: (a,d) Laser-TIG mode; (b,e) TIG-Laser mode; (c,f) KTIG mode

Laser模式展开。在TIG-Laser模式下，主要参数包括激光功率、电弧电流、焊接速度，其他参数（保护气流量，钨极高度、离焦量、热源距离等）与表1一致。

2.2.1　焊接速度对复合焊接的影响

图5为通孔距上表面6 mm的Q235碳钢试样在不同焊速下的焊缝形貌、尺寸及其对应的电弧形态。每组设置3次重复试验，熔宽数据取3次试验的平均值。除焊接速度外，其余参数与表1所列一致。

焊接速度为480 mm/min时，电弧形态十分稳定，呈钟罩形态，焊缝正面熔宽达10 mm，背部熔宽达3.62 mm；随着焊速提升12%至540 mm/min时，正面熔宽降低4%，背面熔宽降低5%，电弧形态仍保持稳定，焊缝形貌光滑。焊速提升至600 mm/min，正面熔宽降低2%，背面熔宽降低3%，电弧形态出现小尾焰。焊速提升至660 mm/min时，正面熔宽降低10%，背面熔宽降低16%，电弧尾焰增大，焊缝成形良好。焊速增加至780 mm/min时，正面熔宽降低18%，背面熔宽降低44%，电弧后方尾焰明显增大，焊接状态恶化，且出现钨极烧损。因此，最佳焊速范围为540~660 mm/min，可稳定焊接并获得良好焊缝成形。单独KTIG焊接相同有效壁厚时焊速为220~260 mm/min，复合焊焊速是KTIG的约2倍。

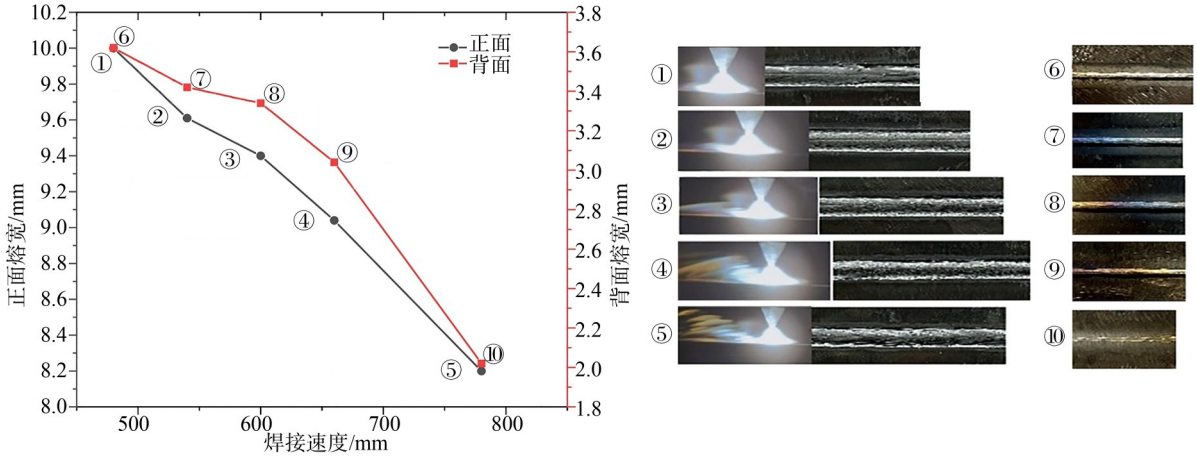


图5　焊接速度对于焊缝正面成形及背面成形及电弧形态的影响规律

Fig. 5　Influence of welding speed on front and back bead formation and arc morphology

2.2.2　激光功率对复合焊接的影响

在TIG-Laser复合焊中，电弧为主要热源，激光为辅助热源。图6为不同材料、不同有效壁厚（通孔距上表面距离不同）下改变激光功率实现匙孔焊接所得的焊接接头背部成形、尺寸及电弧形态，具体参数如表2所示。其中，红线、绿线分别表示通孔距上表面8 mm、10 mm厚304不锈钢试样，蓝线表示通孔距上表面8 mm厚Q235碳钢试样。

其他条件不变的情况下，激光功率增大使背面熔宽增大，与背面熔宽近似呈正比，而对正面熔宽基本无影响。激光功率增加还可稳定电弧形态。如图6所示，在1 500 W功率下，电弧后端出现拖拽现象；增至1 700 W时，拖拽减弱；增至2 000 W时，拖拽消失，电弧后端更加集中。对于不同材料和厚度，实现匙孔焊接所需的激光功率不同。在背部熔宽相近的条件下，Q235碳钢所需激光功率比304不锈钢增加约25%；更厚的板材所需激光功率更高。

2.3　匙孔机制

等离子焊接、KTIG及激光深熔焊均通过匙孔实现单面焊双面成形，即在焊接时，沿着板厚方向形成一个贯穿板材的小孔，小孔沿着焊接方向前进，小孔后方熔池凝固形成焊缝，电弧或者激光通过小孔对板材进行能量传输，因此匙孔的产生与演化对于理解该种焊接方法及调试工艺都非常重要。已有学者采用高速摄影拍摄熔池正面和背面形貌，以获得焊接参数对小孔的影响[19-21]，但此方法无法监测到小孔沿板厚方向的生长情况。也有学者使用GG17石英玻璃和工件组成“三明治结构”，在板厚方向通过高速摄影获取匙孔的侧面演化[22]。为直观观测激光与电弧的相互作用，本文搭建了X射线透射成像原位观测装置，用于拍摄和记录焊接过程，分析复合焊工艺下匙孔的产生与演化。

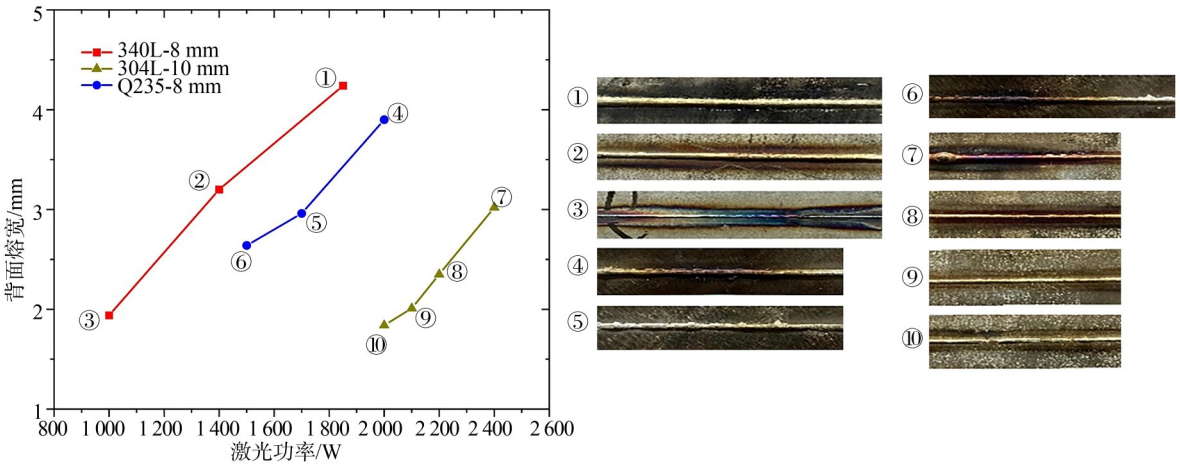


图 6　激光功率对于不同材料焊缝背面成形及电弧形态的影响规律

Fig. 6　Influence of laser power on back bead formation and arc morphology of weld seams in different material

表 2　TIG-Laser 复合焊接工艺参数

Table 2　Process parameters of TIG-Laser hybrid welding

编号	材料	厚度 /mm	焊接速度 /(mm·min^{-1})	电弧电流 /A	激光功率 /W	正面熔宽 /mm	背面熔宽 /mm
①	304L	8	600	460	1 000	9.4	2.0
②	304L	8	600	460	1 400	9.3	3.3
③	304L	8	600	460	1 800	9.4	4.3
④	304L	10	600	460	2 000	9.2	1.9
⑤	304L	10	600	460	2 100	9.3	2.0
⑥	304L	10	600	460	2 200	9.2	2.5
⑦	304L	10	600	460	2 400	9.1	2.9
⑧	Q235	8	600	460	1 500	9.2	2.6
⑨	Q235	8	600	460	1 700	9.2	2.9
⑩	Q235	8	600	460	2 000	9.4	3.9

图 1b、1c 为 X 射线透射成像试验装置的实物与原理示意。如第 1 节所述，所有焊接试验均采用带方形通孔的镂空试样，本组观测的通孔距上表面距离为 6 mm，在此条件下开展复合焊接匙孔演化的原位观测。复合焊接参数如表 3 所示。

表 3　复合焊匙孔演化下的焊接工艺参数

Table 3　Welding process parameters corresponding to keyhole evolution in composite welding

激光功率 /W	焊接速度 /(mm·min^{-1})	电弧电流 /A	离焦量 /mm	光丝间距 /mm	钨极高度 /mm
2 000	540	360	−4	2	5

2.3.1　复合焊匙孔演化——锁孔

图 7 为 X 射线透射成像原位观测拍摄的复合焊接过程。由于 X 射线装置会受到焊机起弧高频干扰，故采用滑擦起弧方式，起弧电弧 200 A，起弧后通过机器调节将钨极高度调整为 5 mm，然后沿焊接方向（图中白色箭头）移动，经过 1 s 后到达工作电流 360 A，经一段时间后开启激光照射（开启时刻 t=4.29 s），整个过程通过 X 射线装置拍摄，帧率 30 fps。

KTIG 的匙孔形成过程如图 7 所示（t=2.29 s）。在大电流水冷钨极下，电弧产生强有力的电弧力，使熔池不断向下凹陷形成匙孔。由于工件与电弧存在相对运动，匙孔前壁被不断补充并发生偏移，形成“电弧拖尾”的现象，这也是 KTIG 焊速受到限制的原因之一。随后电弧力继续作用，直至穿透工件，在电弧力及静水压力作用下形成稳定匙孔。Rosellini C 和 Jarvis L[19] 通过研究提出了稳定匙孔的力学条件。

匙孔穿孔状态下，熔池中液态金属力平衡方程：

$$yK+P_{\text{hydrostatic}}+P_{\text{arc}}+P_{\text{inertial}}+\cdots\cdots=0$$

式中　$P_{\text{hydrostatic}}$ 为熔池中液态金属静压力；P_{arc} 为电弧压力；P_{inertial} 为液态金属因流动而产生的压力。

对于不同材料的金属板材，由于液态金属的导热系数和表面张力的差异，KTIG 单道稳定穿孔的最大板厚也不同。为获得稳定高质量的焊缝，焊接过程中匙孔要处于始终开放的状态，且形状和尺寸保持稳定，须满足[7]：

$$w\cdot H<\gamma/(\rho g)$$

式中　w 为焊缝成形背面宽度；H 为工件厚度；Y 为表面张力系数；ρ 为液态金属密度；g 为重力加速度。因此，KTIG 在不同材料下的焊速速度和可焊厚度均受到限制。

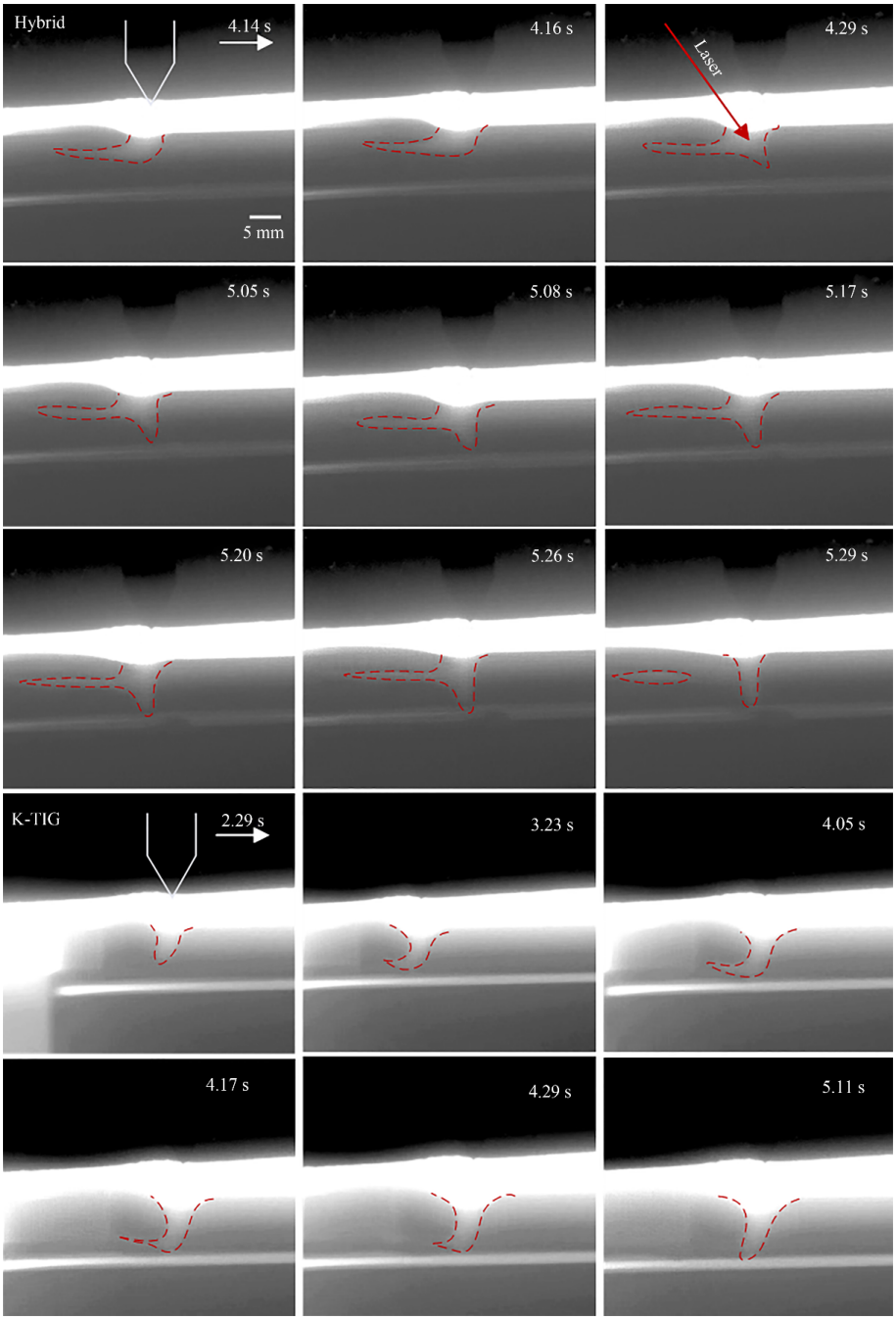


图 7　复合焊与 KTIG 匙孔形貌与演化行为的 X 射线结果

Fig. 7　Morphology and evolution behavior of keyhole formation in hybrid welding and KTIG captured by X-ray imaging

在 TIG–Laser 复合焊接下，穿孔行为存在差异。初始阶段在强电弧力作用下，工件上形成盲孔，盲孔沿着焊接方向前进，在 t=4.14 s 时匙孔根部出现“拖尾”现象，与 KTIG 过程一致。在 t=4.19 s 时，加入激光使激光照射匙孔前壁靠近根部位置，匙孔沿着激光照射方向生长，在极快的时间 t=30 ms 之后，匙孔改变生长方向，沿着竖直方向生长，经约 t=200 ms 后匙孔穿透工件，此时匙孔后壁为高温液态熔池，在表面张力作用下，匙孔后壁闭合，形成稳定的小孔，而匙孔后方的孔洞由于熔池的快速凝固而被保留下来。上述过程有 5 个显著的特点：

（1）匙孔方向发生两次改变。第一次发生在激光初始照射在匙孔前壁位置，匙孔前壁由一层液态薄膜和固态金属构成，高温下激光更易被材料吸

收，此处产生的低电离能金属蒸汽在电弧热作用下快速电离形成带电粒子。依据最小电压原理，电弧在此处更易燃烧，电弧被吸引至激光照射位置，电弧力改变方向，驱动匙孔沿激光照射方向生长。由于激光功率较低（2 kW）加上匙孔前壁材料的及时补充，金属蒸汽密度的增加有限，使得匙孔的生长方向向焊接反方向偏移，偏移量取决于金属蒸汽密度与匙孔前壁材料补充量，即取决于焊接速度与激光功率。

（2）穿孔后匙孔始终保持竖直的方向。匙孔的生长方向表征了电弧的形态，即激光的加入使电弧更加挺直。该现象主要取决于激光功率与焊接速度的比例，即作用在材料单位体积上的能量。在2 000 W与540 mm/min条件下，电弧形态呈现竖直状态。

（3）与穿孔前相比，匙孔尺寸缩小，熔池体积减小，匙孔状态更稳定，工艺参数区间更宽。

（4）上述过程发生在极短时间内（约1 s）。激光可瞬态改变电弧形态，且稳定性好，是复合焊接的理想辅助热源。

（5）复合焊小孔的形成机制与KTIG类似，均在电弧力作用下形成。激光的加入使电弧燃弧位置改变，激光作用位置处产生的金属蒸汽提高了电弧电流密度，提高了电弧力。匙孔根部前壁材料在电弧作用下熔化为液态金属，流向后壁形成焊缝，工件移动不断前壁材料，消耗与补充的配比决定了穿孔位置偏离钨极的距离。当激光照射在匙孔根部时，激光与电弧共同消耗匙孔根部前壁材料，穿孔偏移量减小甚至成为负值。

与KTIG相比，复合焊在获得相同背面成形的条件下匙孔尺寸更小，形态近似圆台状（KTIG为圆锥状）。主要原因是复合焊的穿孔电弧电流小于KTIG，即激光的引入降低了穿孔临界电流（通孔距上表面8 mm的不锈钢试样，焊接速度9 mm/s，KTIG穿孔电流510 A，复合焊360 A，降低30%）。

2.3.2　复合焊匙孔演化——盲孔

在电弧型匙孔焊接中，匙孔未稳定形成时会产生工艺气孔，即盲孔阶段电弧根部的空腔遗留形成气孔。图8为X射线装置拍摄的未焊透条件下

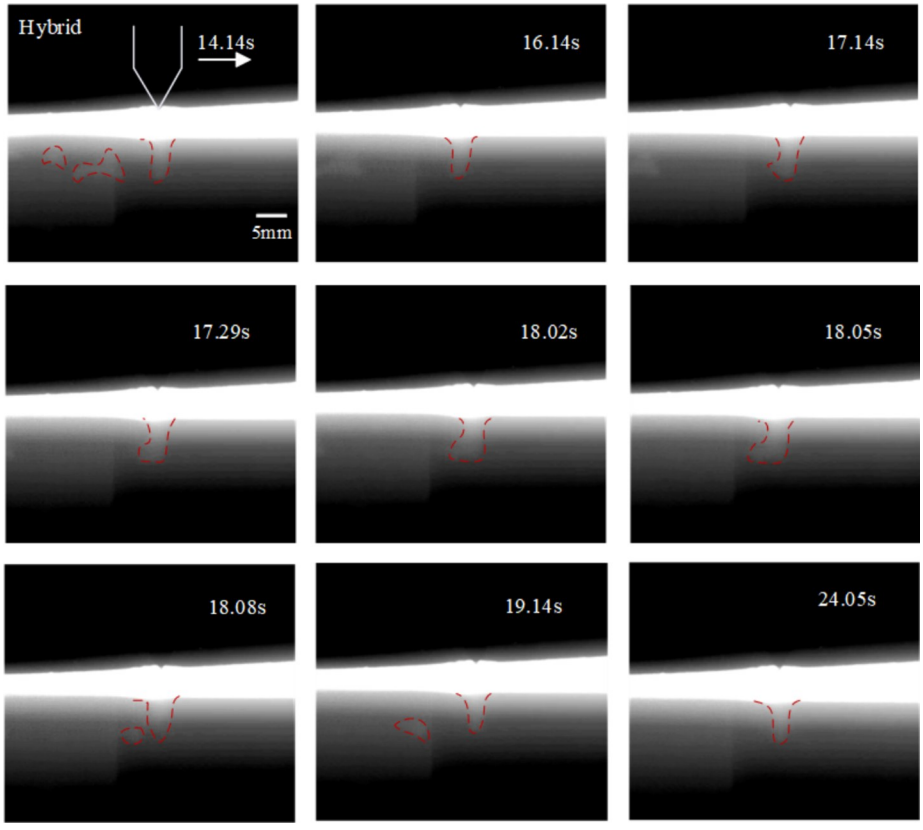


图8　未焊透下复合焊的匙孔形貌与演化行为的X射线结果

Fig. 8　X-ray capture of welding and penetration behavior in hybrid welding keyhole morphology and evolution

TIG-Laser复合焊接过程，采用与图7相同的镂空试样，参数设置如表2所示，焊接过程与图7一致。

试验过程中首先产生电弧匙孔，然后加入激光照射，匙孔继续生长，而熔池后方的空腔被保留形成气孔。在t=14.14 s时，在上述机制作用下匙孔已沿竖直方向生长完成，随后小孔保持稳态沿焊接方向前进。当t=17.14 s时，匙孔根部变宽；t=17.29 s时，匙孔后壁根部出现凸起。由于设备分辨率有限，未捕捉到更多细节，凸起产生的原因推测与保护气流波动或材料中杂质粒子有关。t=18.02 s时，凸起现象更加明显；t=18.08 s时，凸起转变为圆形空洞，且匙孔长度缩短；t=19.14 s时，匙孔状态未再改变，稳定存在。

3　结论

（1）激光-KTIG复合焊接存在电弧穿孔（TIG-Laser模式）与激光穿孔（Laser-TIG模式）两种机制。在电弧穿孔模式下，焊接接头未检出气孔；在激光穿孔模式下，焊缝中出现了小而分散的气孔。两种模式下焊接速度均较单独KTIG提高约1倍。

（2）在TIG-Laser模式下，焊接速度和激光功率是影响电弧形态与焊缝成形的关键因素。焊接速度过高导致电弧失稳、出现严重尾焰和钨极烧损；焊接速度过低则背部易产生焊瘤。激光功率增大可改善背面成形并促使电弧收敛，正面熔宽则无明显变化。

（3）当激光辐照匙孔前壁，电弧发生方向偏转，会驱动匙孔沿激光入射方向发展，实现匙孔形态调控；在适配的工艺参数条件下能够形成近似竖直的匙孔。由试验现象可做机理性推测：匙孔呈竖直状态，或许是试样工艺性气孔得到抑制的潜在影响因素之一。

参考文献：

[1] Gao M, Zeng X, Hu Q. Effects of gas shielding parameters on weld penetration of CO_2 laser-TIG hybrid welding[J]. J Mater Process Technology, 2007, 184(1-3): 177-183.

[2] Han L, Han T, Wang B, et al. Effects of Keyhole Tungsten Inert Gas Welding Parameters on 2205 Duplex Stainless Steel Welded Joints[J], J. of Materi Eng and Perform, 2022, 31: 1358-1372.

[3] Liu L, Chen M. Interactions between laser and arc plasma during laser-arc hybrid welding of magnesium alloy[J]. Opt. Lasers Eng., 2011, 49(9-10): 1224-1231.

[4] Casalino G, Mortello M, Leo P, et al. Study on arc and laser powers in the hybrid welding of AA5754 Al-alloy [J]. Mater. Des., 2014, 61: 191-198.

[5] Zhang L J, Ning J, Zhang X J, et al. Single pass hybrid laser-MIG welding of 4 mm thick copper without preheating[J]. Mater. Des., 2015, 74: 1-18.

[6] Fan X Q, Tristan G F, Samuel J C, et al. Magnetic modulation of keyhole instability during laser welding and additive manufacturing [J]. Science, 2025, 387 (6736): 864-869.

[7] Lathabai S, Jarvis B L, Barton K J. Comparison of keyhole and conventional gas tungstenarc welds in commercially pure titanium[J]. Materials Science & Engineering A, 2001, 299(1-2): 81-93.

[8] Lv X Z, Liu L M. Characteristics of laser-offset-TIG hybrid welding of AZ31Mg alloy with 6061Al alloy via Zn filler[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 152: 108126.

[9] Turichin G, Kuznetsov M, Tsibulskiy I, et al. Hybrid laser-arc welding of the high-strength shipbuilding steels: equipment and technology [J]. Phys Procedia, 2017, 89: 156-163.

[10] Swanson P T, Page C J, Read E, et al. Plasma augmented laser welding of 6 mm steel plate[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2007, 12(2): 153-160.

[11] Campana G, Ascari A, Fortunato A, et al. Hybrid laser-MIG welding of aluminum alloys: The influence of shielding gases[J]. Appl Surf Sci, 2009, 255: 5588-5590.

[12] Vaidya W V, Angamuthu K, Koçak M, et al. Strength and Fatigue Resistance of Laser-MIG Hybrid Butt Welds of an Airframe Aluminium Alloy AA6013 [J]. Weld World, 2006, 50: 88-97.

[13] Ishide T, Shuho Tsubota, Masao Watanabe. Latest MIG, TIG Arc-YAG laser hybrid welding systems for various welding products [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2003: 4831.

[14] Webster S, Kristensen J K, Petring D. Joining of thick section steels using hybrid laser welding[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2008, 35(7): 496-504.

[15] Ono M, Shinbo Y, Yoshitake A, et al. Development of laser-arc hybrid welding[J]. NKK Technical Review,

下转第65页