

引用格式: 郎志勇, 高延峰, 刘书健, 等. 激光-MIG 复合角焊缝成形工艺研究[J]. 热加工工艺, 2024, 53(1): 29-34.
DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20220012
http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

激光-MIG 复合角焊缝成形工艺研究

郎志勇, 高延峰, 刘书健, 张 华

(上海工程技术大学 上海市大型构件智能制造机器人技术协同创新中心, 上海 201620)

摘 要:目前,复合焊接技术研究多关注于薄板拼接焊,角焊缝焊接仍采用单热源,焊缝成形效果差。针对 8 mm 厚的 Q235 低碳钢板角焊缝,研究了激光-MIG 复合焊接时,各工艺参数对角焊缝成形尺寸及熔池状态的影响。结果表明:MIG 弧焊熔池飞溅较大,焊缝熔深、熔宽均较小,加入激光热源后,激光对电弧有一定的稳定作用,熔深、熔宽均增大,余高减小。弧焊熔池尺寸随电流增大而增大,当激光熔池与弧焊熔池耦合较好时,有利于稳定熔池、减少飞溅;随热源间距增大,熔滴不再滴入激光作用区,耦合作用下降;随焊接速度提升,热源在单位长度焊缝作用时间变短,熔深、熔宽下降。当激光功率为 1.5 kW,焊接电流为 220 A,热源间距为 2 mm,焊接速度为 600 mm/min 时,弧焊熔池与激光熔池耦合好,熔池最为稳定,焊缝成形最佳。

关键词:激光-MIG 复合焊;角焊缝;焊缝成形;熔池状态

中图分类号: TG444+.74; TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2024)01-0029-06

Research on Laser-MIG Hybrid Fillet Weld Forming Process

LANG Zhiyong, GAO Yanfeng, LIU Shujian, ZHANG Hua

(Shanghai Collaborative Innovation Center of Intelligent Manufacturing Robot Technology for Large Components, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: At present, the research of hybrid welding technology is mostly focused on thin plate splicing welding, and the welding of fillet weld still uses single heat source, the weld forming effect is poor. Aiming at the fillet weld of 8 mm thick Q235 low carbon steel plate, the effects of various process parameters on the forming sizes of the fillet weld and weld pool state during laser-MIG hybrid welding were studied. The results show that the splatter of the MIG arc welding melting pool is large, and the penetration and weld width are small. After adding the laser heat source, the laser has a certain stable effect on the arc, the penetration and weld width increase, and the reinforcement decreases. The size of the arc welding melting pool increases with the current increasing. When the laser melting pool and the arc welding melting pool are well coupled, it is conducive to stabilize the melting pool and reduce the spatter. With the increase of heat source spacing, the droplet no longer drips into the laser action area, and the coupling effect decreases. With the increase of welding speed, the action time of heat source in unit length weld becomes shorter, and the penetration and weld width decrease. When the laser power is 1.5 kW, the current is 220 A, heat source spacing is 2 mm, the welding speed is 600 mm/min, the coupling between the two molten pools is good, the weld pool is the most stable, and the weld forming is the best.

Key words: laser-MIG hybrid welding; fillet weld; weld formation; state of weld pool

目前,不同焊接工况下的复合焊接研究日趋成熟^[1],但大多集中在低碳钢或合金薄板拼焊、搭接焊^[2-3],中厚板的角焊缝仍多为单热源焊接^[4-5]。丛林对 T 型接头立角焊工艺进行研究,发现在布设坡口条件下采用三角形摆动方式,焊缝熔深及焊脚改善显

著,接头稳定性得到增强^[6]。梁梓铭结合热源模型对中厚板的角焊缝成形进行研究,优化了激光功率、焊接速度、离焦量等工艺参数,得到了熔深、熔宽较理想的焊缝成形^[7]。刘黎明等人采用低功率激光诱导电弧对钛合金薄板进行拼焊试验,发现激光、电弧能量之间相互配合对焊缝表面成形影响显著,且焊接速度得到了提升^[8]。吕晓辉等人采用低功率激光诱导 TIG 电弧,对不等厚带坡口钛合金角接结构进行背面焊接,得出了良好焊缝成形时对应的激光功率和焊接电流^[9]。

针对船舱中角焊缝焊接,采用传统电弧焊达到

收稿日期:2022-01-04

基金项目:上海市地方高校能力建设项目(21010501600)

作者简介:郎志勇(1994-),男,山西繁峙人,硕士研究生,主要从事焊接机器人及自动化焊接研究;E-mail:langzy666@163.com

通讯作者:张华(1964-),男,江西余干人,教授,博士,主要从事机器人智能化与焊接自动化研究;E-mail:h Zhang@sues.edu.cn

理想焊接效果所需的焊接电流较高,飞溅严重,焊接速度难以提升^[10],而激光焊接对焊接位置精度要求高,容错性低。本文针对 Q235 低碳钢板的角焊缝,研究了激光 -MIG 复合焊接时,激光功率、焊接电流、热源间距及焊接速度等工艺参数对角焊缝成形时熔深、熔宽、余高及熔池状态的影响,为角焊缝的复合焊接工艺优化奠定了基础。

1 试验设备与方法

本试验采用激光 -MIG 双热源复合对角焊缝进行焊接,母材为 Q235 低碳钢板,尺寸 200 mm×25 mm×8 mm。焊接设备系统主要包括锐科 RFL-C3000S 型光纤激光器,中心波长(1080±5) nm,最大输出功率 3 kW,聚焦镜焦距 150 mm,焦点光斑直径 0.15~0.25 mm;佳士 NB-315F 型 MIG 弧焊机,最大输出电流 300 A;佳士 WF-21 型送丝机,送丝速度 24 m/min,采用 MG50-6 型焊丝,直径 1.2 mm。复合焊接采用激光引导模式,激光在前,弧焊焊枪在后。试验设备如图 1 所示。

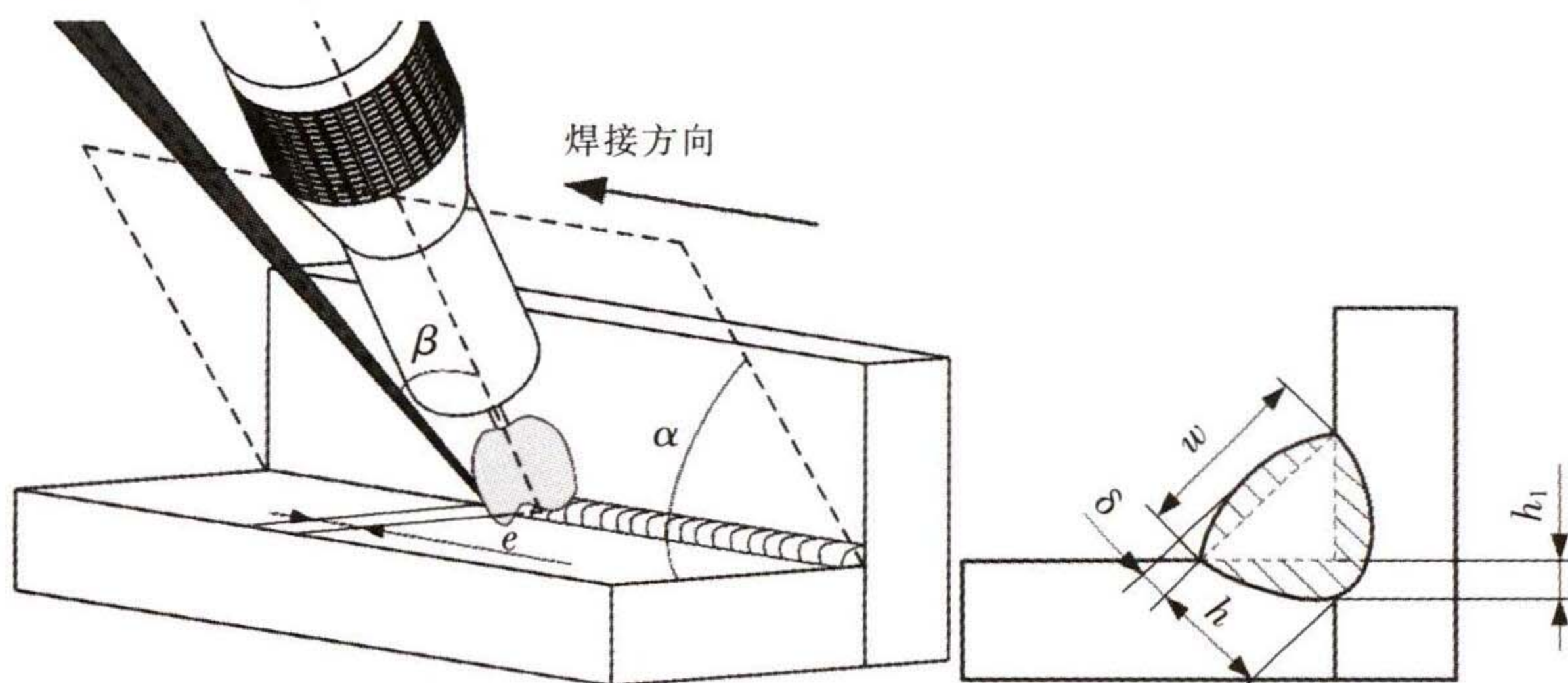


图 2 焊接工艺及焊缝参数图

Fig.2 Schematic of welding process and weld parameters

2 试验结果与分析

2.1 激光功率对焊缝成形的影响

探究激光功率对焊缝成形影响的试验过程中,激光功率为 0~2.5 kW,焊接电流为 220 A,热源间距为 2 mm,焊接速度为 600 mm/min。

图 4 为不同激光功率下焊缝的表面和截面形貌,图 5 为不同激光功率下焊缝熔深、熔宽、余高及接合熔深。由图 4、5 可知,激光功率为 0 kW 时,为 MIG 单热源焊接,焊接过程中飞溅大,熔深、熔宽及接合熔深均相对较小,余高较高,咬边比较严重;加入激光热源后,激光对电弧有一定的稳定作用,由 0.5、1.0 及 1.5 kW 的数据可知,随着激光功率的增高,熔深、熔宽均增大,余高逐渐减小,咬边也逐渐减

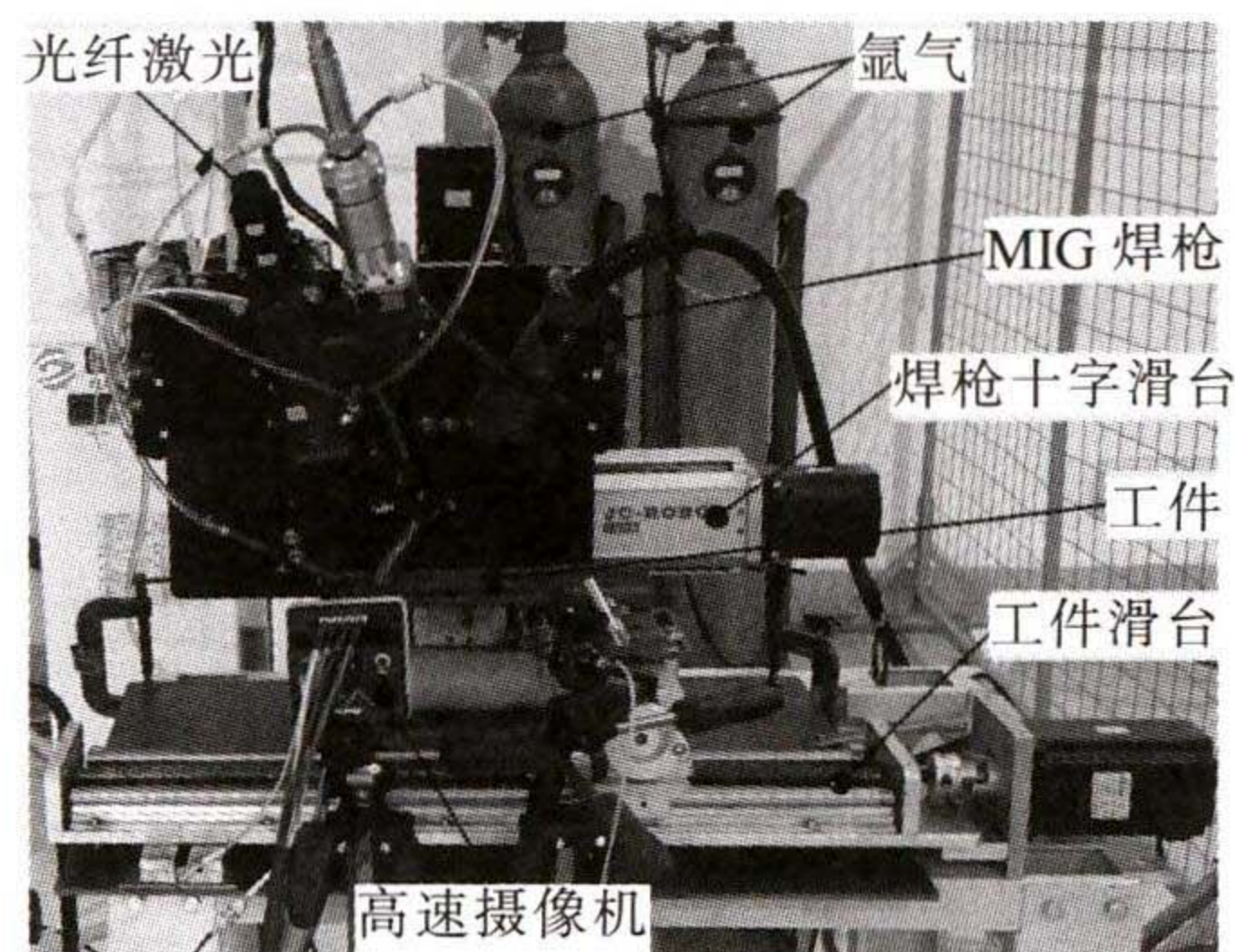


图 1 复合焊接试验设备

Fig.1 Test equipment for hybrid welding

复合焊接过程中,光纤激光离焦量 0 mm,激光功率 0~2.5 kW 持续输出;焊接电流 180~240 A,焊接电压 30 V;热源间距 e 为 1~3 mm,焊接速度为 400~800 mm/min,焊枪偏角 α 为 50°,热源夹角 β 为 30°,保护气体采用 80%Ar+20%CO₂,气流量 20 L/min。采用单变量控制法改变各焊接工艺参数,记录试验结果中焊缝的熔深 h 、熔宽 w 、余高 δ 、接合熔深 h_1 及在熔滴落入前后的熔池状态,焊缝截面参数如图 2 所示,熔池示意图如图 3 所示。

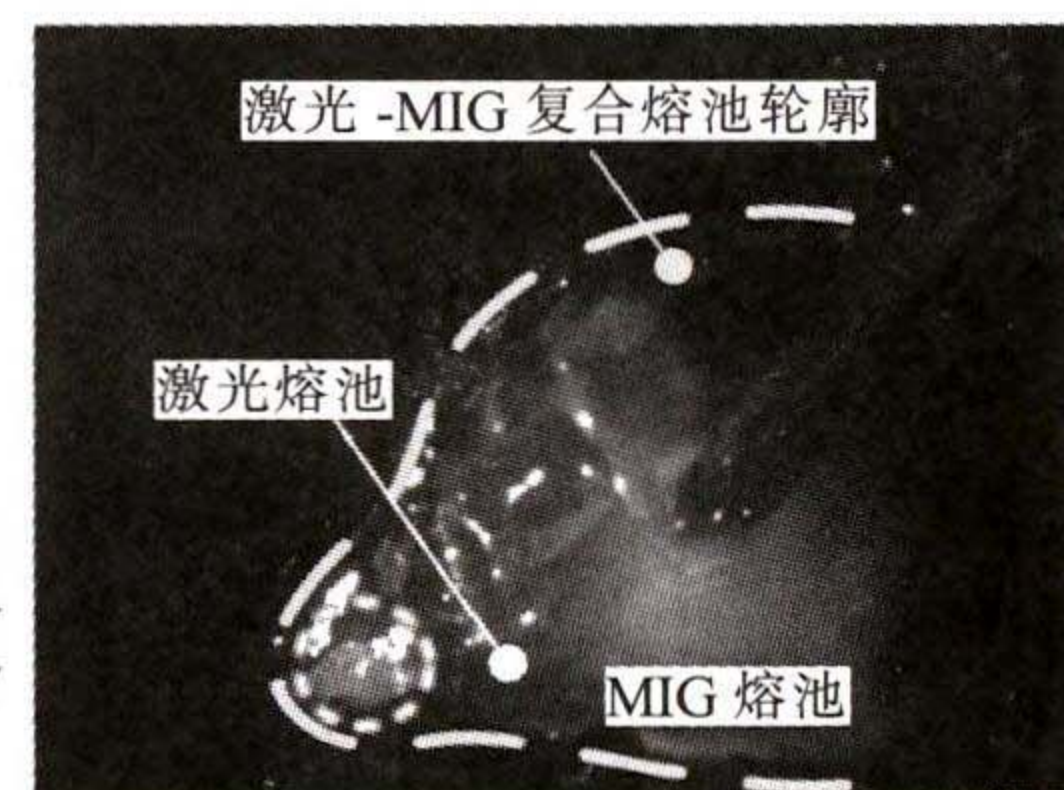


图 3 熔池示意图

Fig.3 Diagram of molten pool

弱;当激光功率达到 1.5 kW 时,与电弧热源复合效果理想,相互耦合性最好,焊缝成形良好,熔深、熔宽及接合熔深均达到了最大值,且余高减到了最低值;随着激光功率继续增大,两个热源之间耦合度下降,飞溅物增多,又出现了咬边现象,由 2.0、2.5 kW 的数据可知,熔深、熔宽及接合熔深均随激光功率增大减小,且余高也随之增加。

图 6 为不同激光功率下复合焊接过程中熔滴落入前后的熔池状态。激光功率为 0 kW 时,MIG 弧焊熔池飞溅较严重。加入激光后,激光对焊缝有预熔化加热作用,更有益于增大熔深熔宽,但激光功率较小时,形成的熔池小,两熔池轮廓基本分离,与 MIG 弧焊熔池耦合性略有不足,改善效果不明显,0.5 kW 的

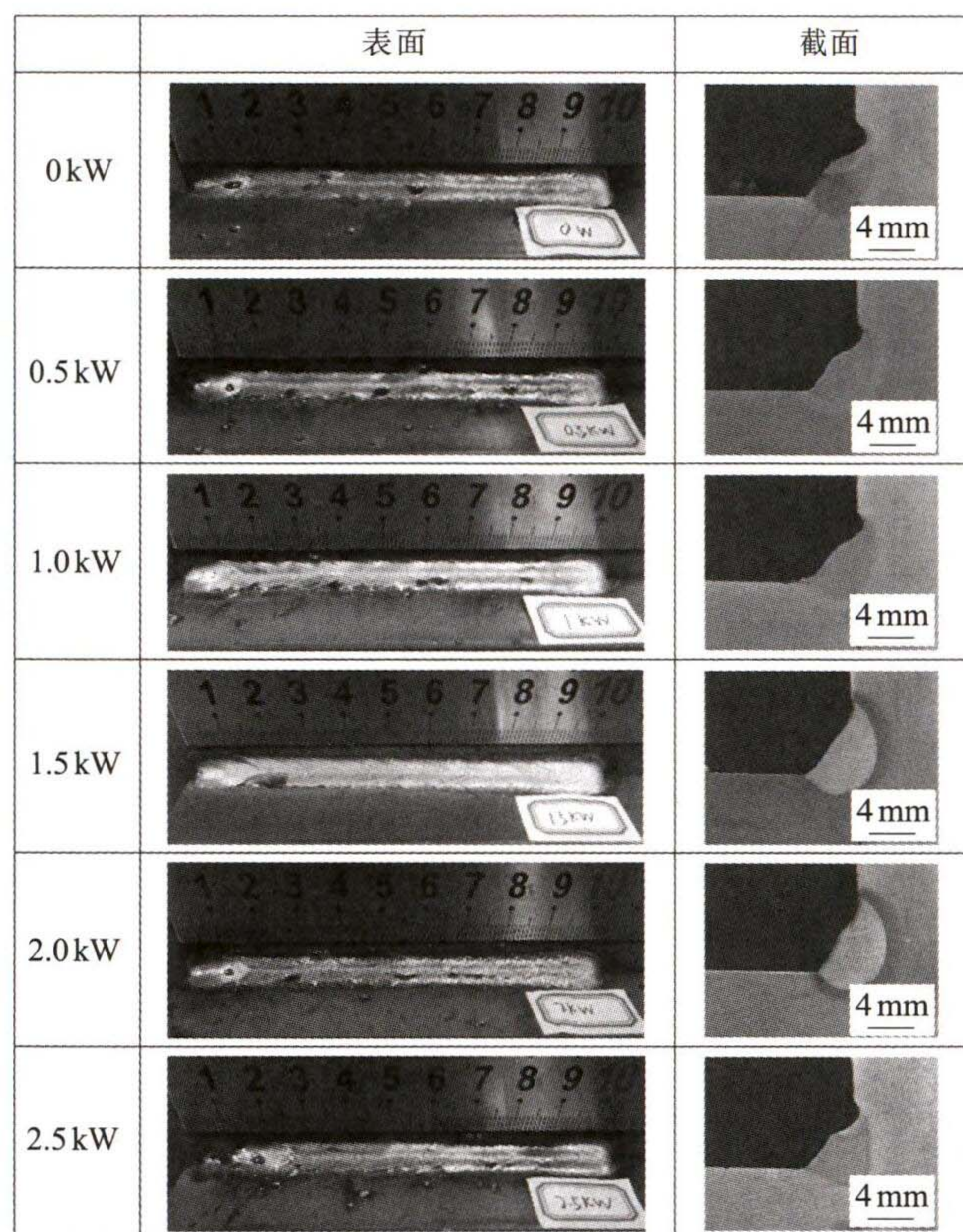


图4 不同激光功率下焊缝的表面和截面形貌
Fig.4 Morphologies of surface and cross section of the welds under different laser powers

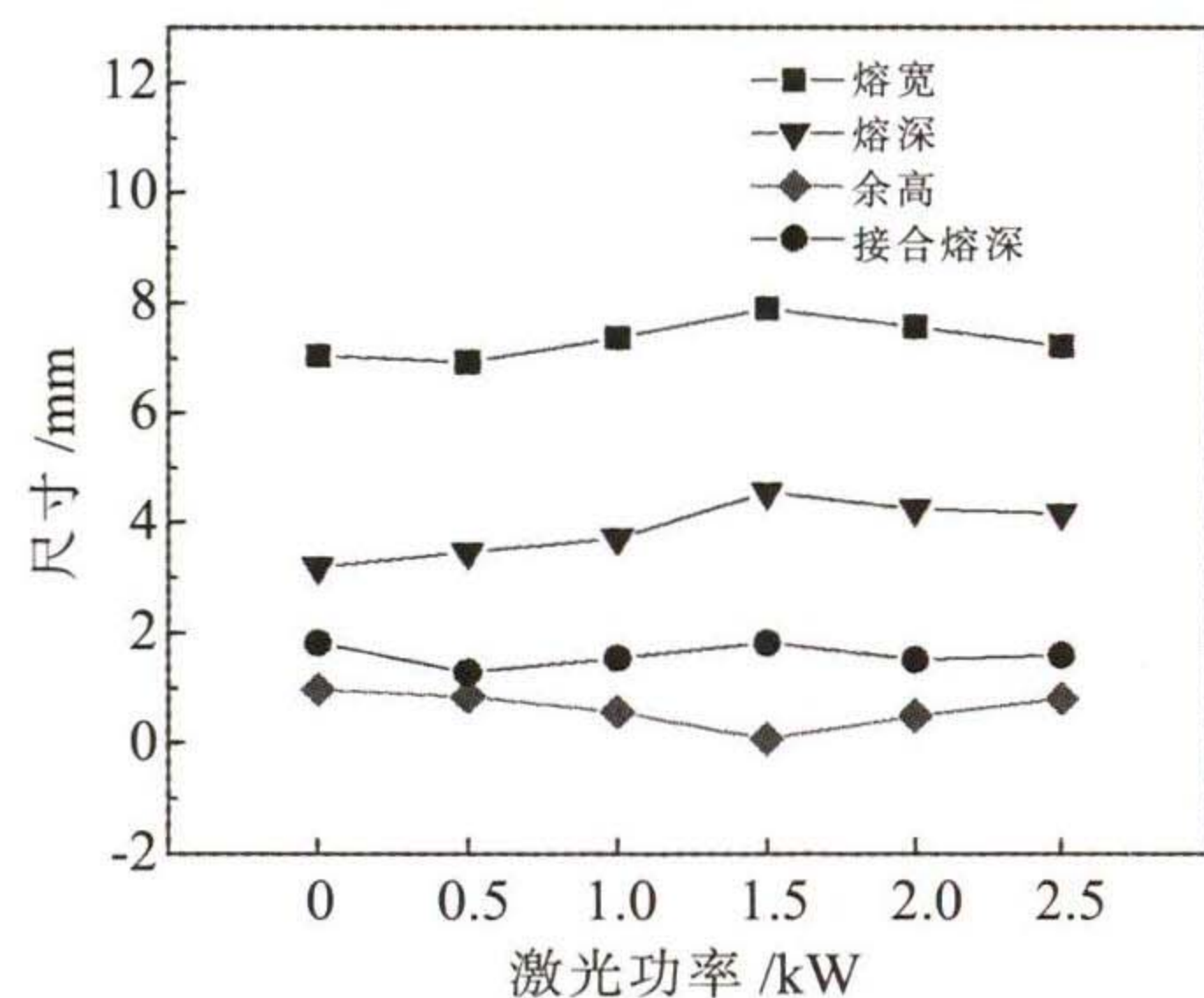


图5 熔深、熔宽、余高及接合熔深随激光功率的变化
Fig.5 Variation of penetration, width, reinforcement and joint penetration with laser power

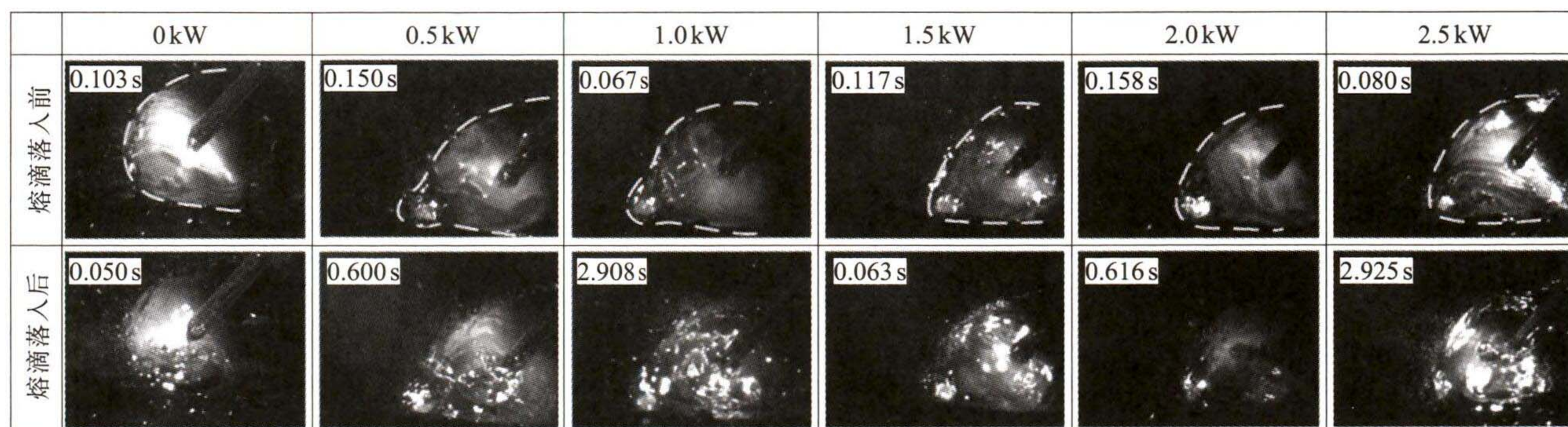


图6 不同激光功率下熔滴落入前后的熔池状态
Fig.6 State of weld pool before and after droplet transfer under different laser powers

熔池即为此状态。随着激光功率增加,激光产生的熔池液体从激光中心不断向两边扩散,有利于加强熔池的流动,提升热传导能力,增强与电弧熔池的耦合性,增大熔深熔宽,降低余高,提升焊缝焊接质量,1.5kW时,两个热源的复合熔池轮廓基本相切,飞溅物最少,耦合性最佳。但随着激光功率继续增大,激光产生的熔池扩大至弧焊熔池附近,MIG弧焊熔滴落入激光熔池作用区,熔池之间出现了相互干扰,产生了飞溅物,激光功率2.0、2.5kW的熔池状态即为此状态,且激光功率越大,飞溅越明显,熔池稳定性越差。

综上所述,激光-MIG复合焊接过程中,激光功率为1.5kW时,稳定了弧焊熔池,同时不会导致MIG弧焊熔滴落入激光熔池形成较大飞溅,激光熔池与弧焊熔池耦合性最好,焊缝表面成形光滑,焊缝熔深、熔宽及接合熔深均达到最大值,且余高降到了最低,焊缝成形质量最佳。

2.2 焊接电流对焊缝成形的影响

探究焊接电流对焊缝成形影响的试验过程中,激光功率为1.5kW,热源间距为2mm,焊接速度为600mm/min,焊接电流为0~240A。

图7为不同焊接电流下焊缝的表面状态和截面形貌。图8为不同焊接电流下焊缝的熔深、熔宽、余高及接合熔深。由图7、8可知,当焊接电流为0A时,仅有激光进行焊接,焊缝较窄,而且由于激光对角焊缝表面金属气化作用明显,焊缝余高为负,呈现下凹状;加入MIG弧焊后,焊缝的熔深、熔宽均出现了大幅度的提升。但焊接电流为180A时,余高仍为负值,这是由于电压与电流不匹配,导致熔池下凹;随着焊接电流增大至200A,余高转为正值,熔深、熔宽及接合熔深无明显变化;当焊接电流增大到220A时,熔深、熔宽及接合熔深均有了明显改善,

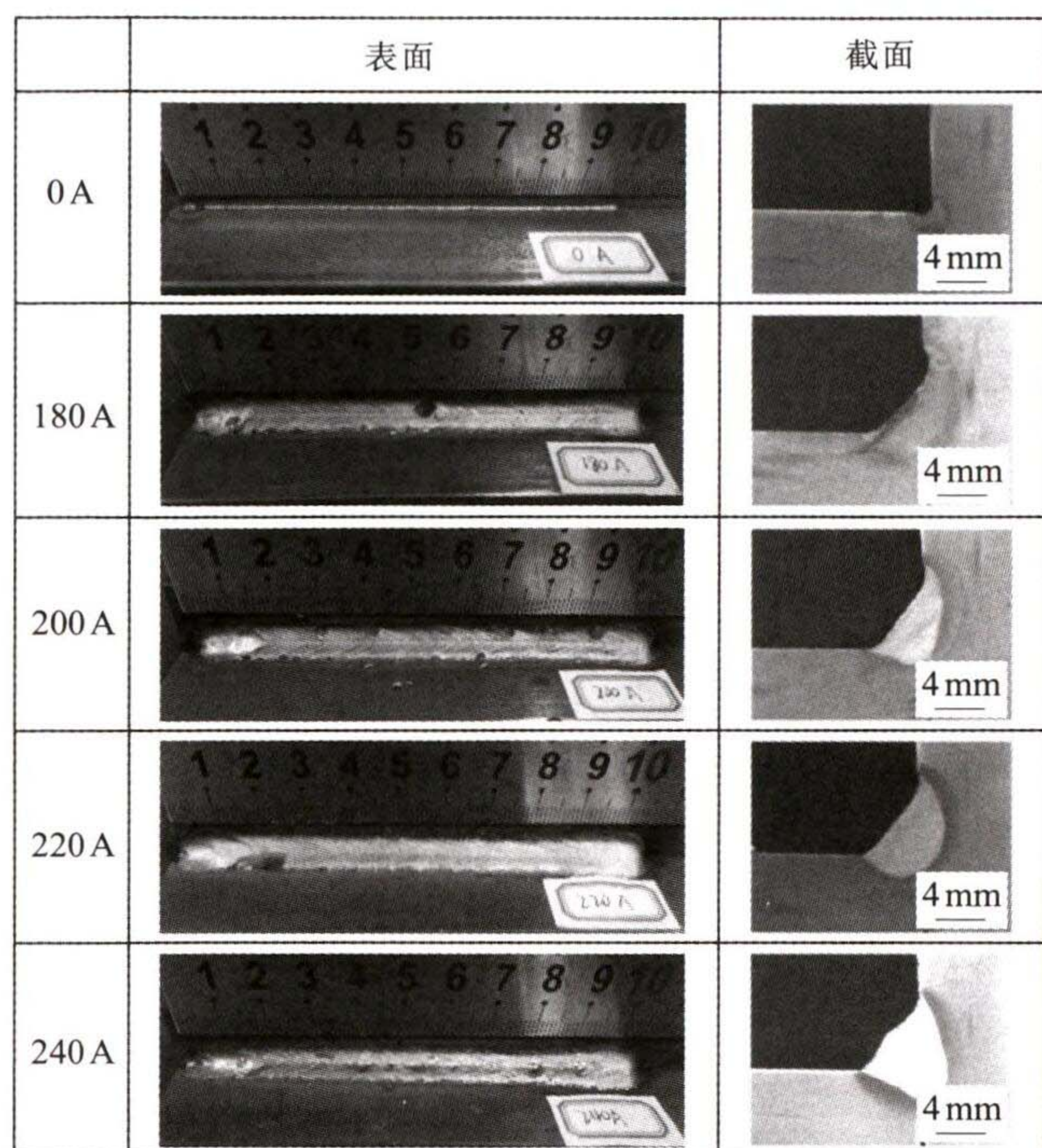


图7 不同焊接电流下焊缝的表面和截面形貌
Fig.7 Morphologies of surface and cross section of the welds under different welding currents

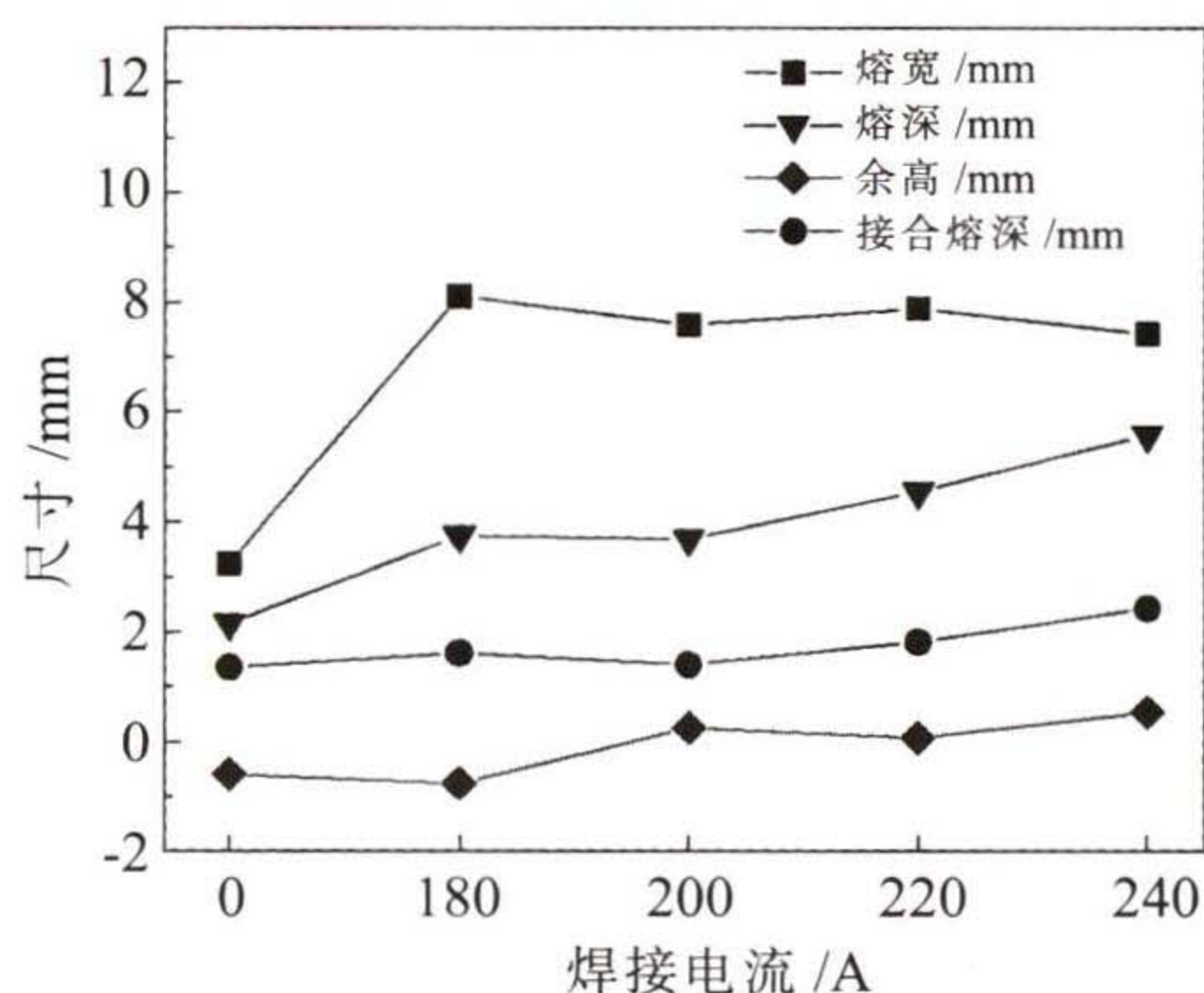


图8 焊缝熔深、熔宽、余高及接合熔深随焊接电流的变化
Fig.8 Variation of penetration, width, reinforcement and joint penetration with welding currents

余高也较小;随着焊接电流继续增大到 240 A,熔宽没有提高,熔深继续增大,但余高变高,焊缝综合成形质量下降。

图9 为不同焊接电流下复合焊接过程中熔滴落入前后的熔池状态。焊接电流为 0 A 时,仅为激光焊接,熔池较小,焊接件熔化过程稳定,几乎没有飞溅物产生。加入 MIG 弧焊且焊接电流为 180 A 时,弧焊形成的熔池较小,两热源形成的熔池耦合性不足,激光未起到稳定弧焊熔池作用,有少量飞溅物。当焊接电流增加到 200 A 时,MIG 弧焊熔池尺寸增大,运动较为剧烈,熔池飞溅物也增多;当焊接电流增加到 220 A 时,MIG 弧焊熔池尺寸增大至恰好与激光熔池内切,复合熔池耦合性达到最佳,熔池相互稳定,飞溅物极少,焊缝成形最佳;随着电流继续增大,MIG 弧焊形成的熔池继续增大,甚至熔滴过渡时熔滴落在激光熔池之上,在激光力的作用下熔池搅动过大,极其不稳定,飞溅物产生较多。

综上所述,激光 -MIG 复合焊接过程中,随电流增大弧焊熔池尺寸增大且波动增强,当焊接电流为 220 A 时,弧焊熔池与激光熔池耦合性最好,激光熔池起到了稳定弧焊熔池的作用,熔池状态最为稳定,焊缝的熔深、熔宽及接合熔深较大,余高较小,焊缝成形最佳。

2.3 热源间距对焊缝成形的影响

探究热源间距对焊缝成形影响的试验过程中,激光功率为 1.5 kW,焊接电流为 220 A,热源间距为 1~3 mm,焊接速度为 600 mm/min。

图 10 为不同热源间距下焊缝的表面状态和截面形貌,图 11 为不同热源间距下焊缝的熔深、熔宽、余高及接合熔深。由图 10、11 可知,当热源间距为 1 mm 时,两热源热能叠加效果较强,熔深、熔宽及接

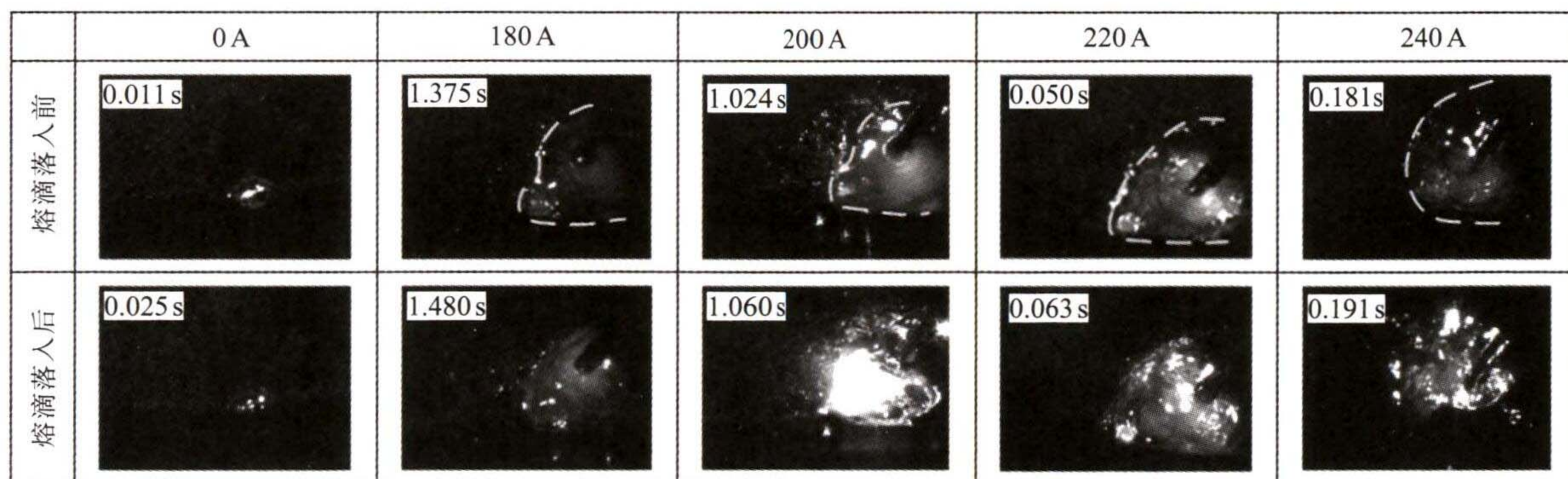


图9 不同焊接电流下熔滴落入前后的熔池状态
Fig.9 State of weld pool before and after droplet transfer under different currents

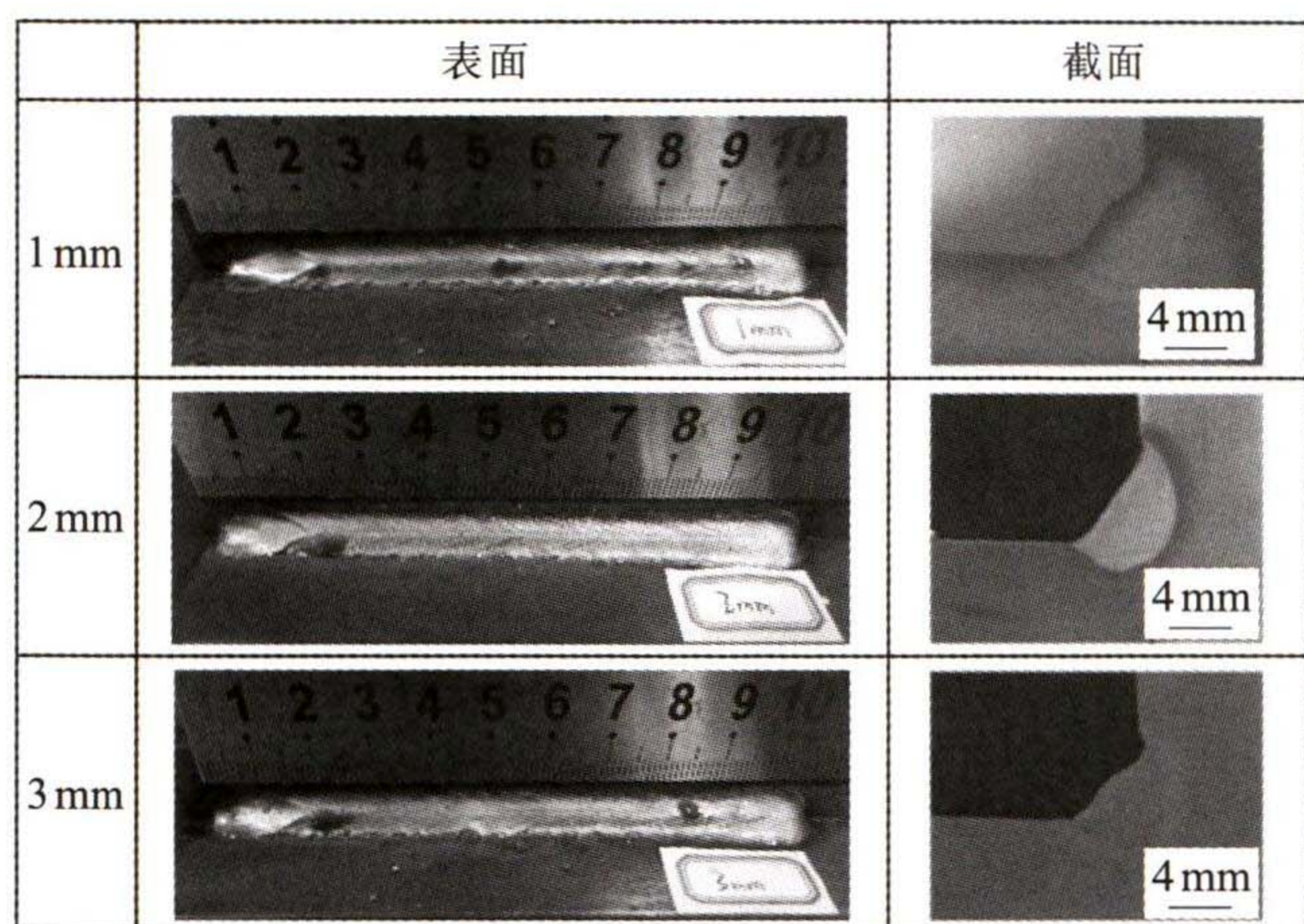


图 10 不同热源间距下焊缝的表面和截面形貌
Fig.10 Morphologies of surface and cross section of the welds under different distance between heat sources

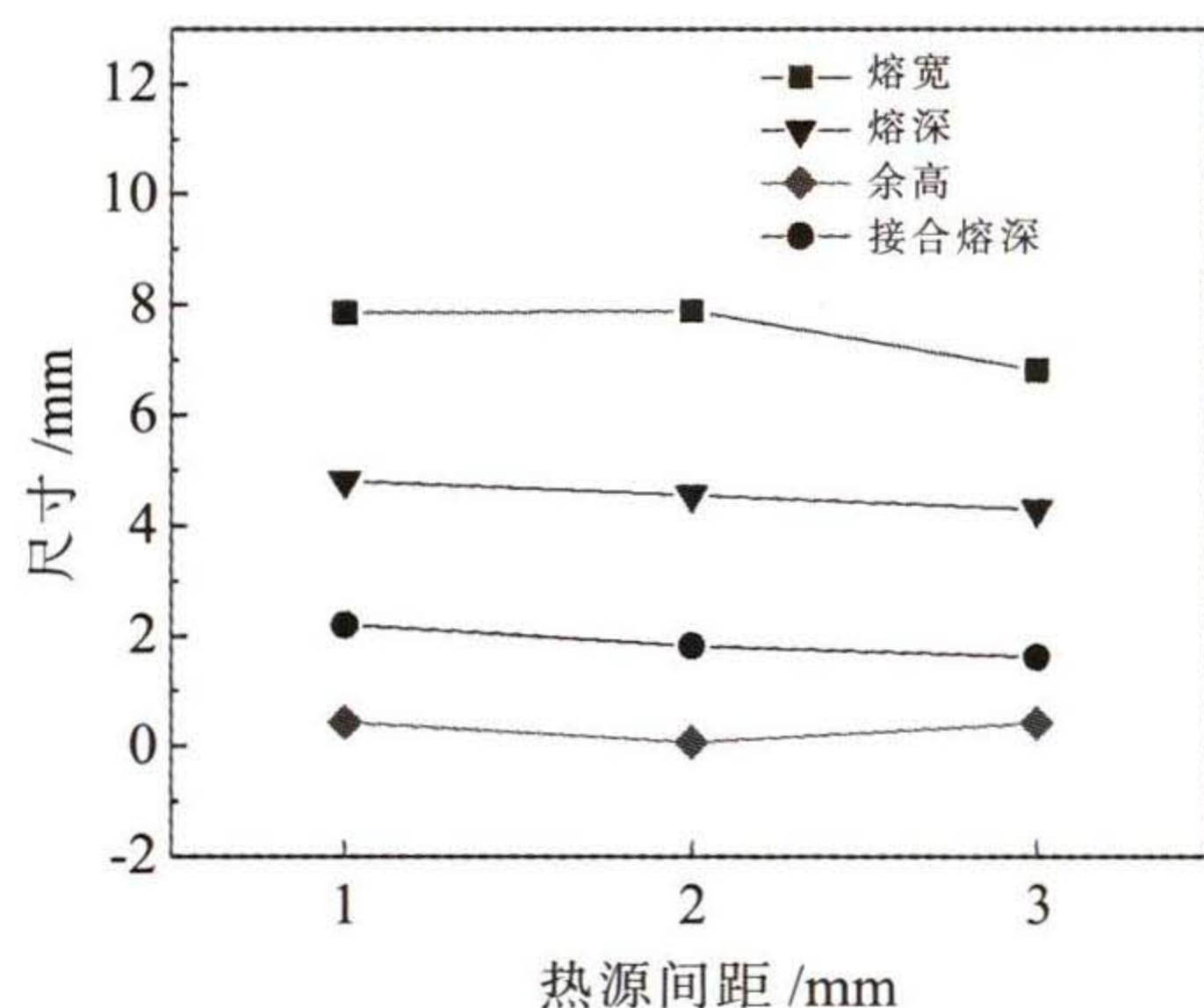


图 11 焊缝熔深、熔宽、余高及接合熔深随热源间距的变化
Fig.11 Variation of penetration, width, reinforcement and joint penetration with distance between heat sources

合熔深均达到最大,但同时也导致余高增加;热源间距增加至 2mm 时,熔深、熔宽及接合熔深微弱下降,但余高得到改善,两个热源耦合效果最佳,焊缝成形效果良好;随着热源间距增加到 3mm,两个热源的耦合性又减弱,熔深、熔宽及接合熔深继续下降,同时余高又增大,焊缝成形效果下降。

图 12 为不同热源间距下复合焊接过程中熔滴落入前后的熔池状态。当热源间距为 1mm 时,激光熔池与 MIG 弧焊熔池过耦合,弧焊熔滴掉落时直接落入激光作用区域,在激光焊接产生的力的作用下,熔池翻动严重,极其不稳定,飞溅严重。热源间距为 2mm 时,激光熔池与复合熔池轮廓相切,熔池作用力保持平衡,不会产生相互干扰,熔液流动稳定,几乎没有飞溅物产生,两热源耦合性最佳。热源间距增加至 3mm 时,激光熔池与弧焊熔池基本分离,两个热源耦合性下降,激光无法稳定弧焊产生熔池,飞溅物增多。

综上所述,激光-MIG 复合焊接过程中,当热源间距为 2mm 时,激光产生熔池与 MIG 弧焊产生的熔池耦合性最强,熔池状态最为稳定,焊缝的熔深、熔宽及接合熔深均较高,且余高得到了改善,更有利于提高焊缝成形质量。

2.4 焊接速度对焊缝成形的影响

探究焊接速度对焊缝成形影响的试验过程中,激光功率为 1.5kW,焊接电流为 220A,热源间距为

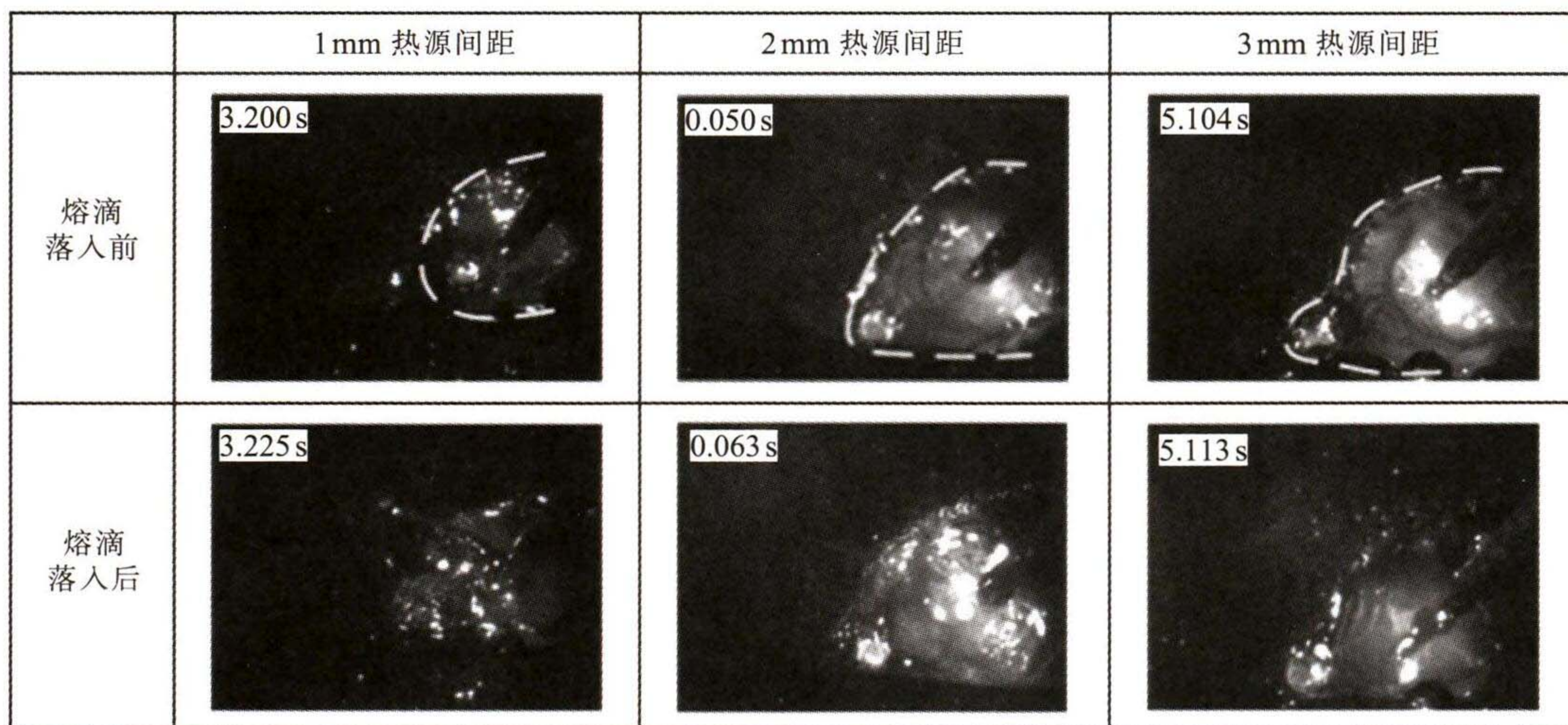


图 12 不同热源间距下熔滴落入前后的熔池状态
Fig.12 State of weld pool before and after droplet transfer under different distance between heat sources

2mm,焊接速度为 400~800mm/min。

图 13 为不同焊接速度下焊缝的表面状态和截面形貌,图 14 为不同焊接速度下焊缝的熔深、熔宽、

余高及接合熔深。由图 13、14 可知,焊接速度为 400 mm/min 时,焊接速度相对较慢,热源在焊缝单位面积的作用时间长,焊缝的熔深、熔宽及接合熔深均最

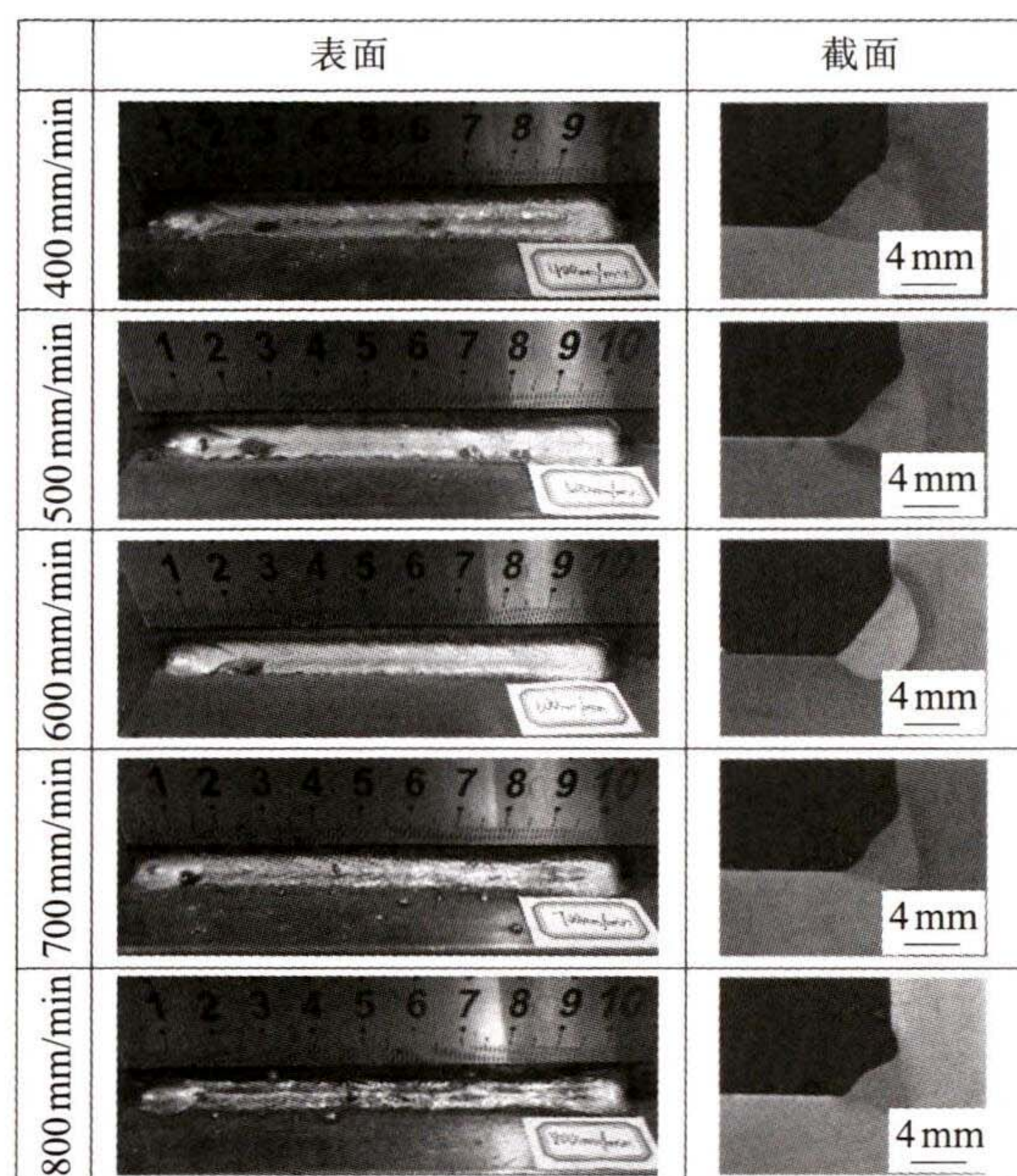


图 13 不同焊接速度下焊缝的表面和截面形貌
Fig.13 Morphologies of surface and cross section of the welds under different welding speeds

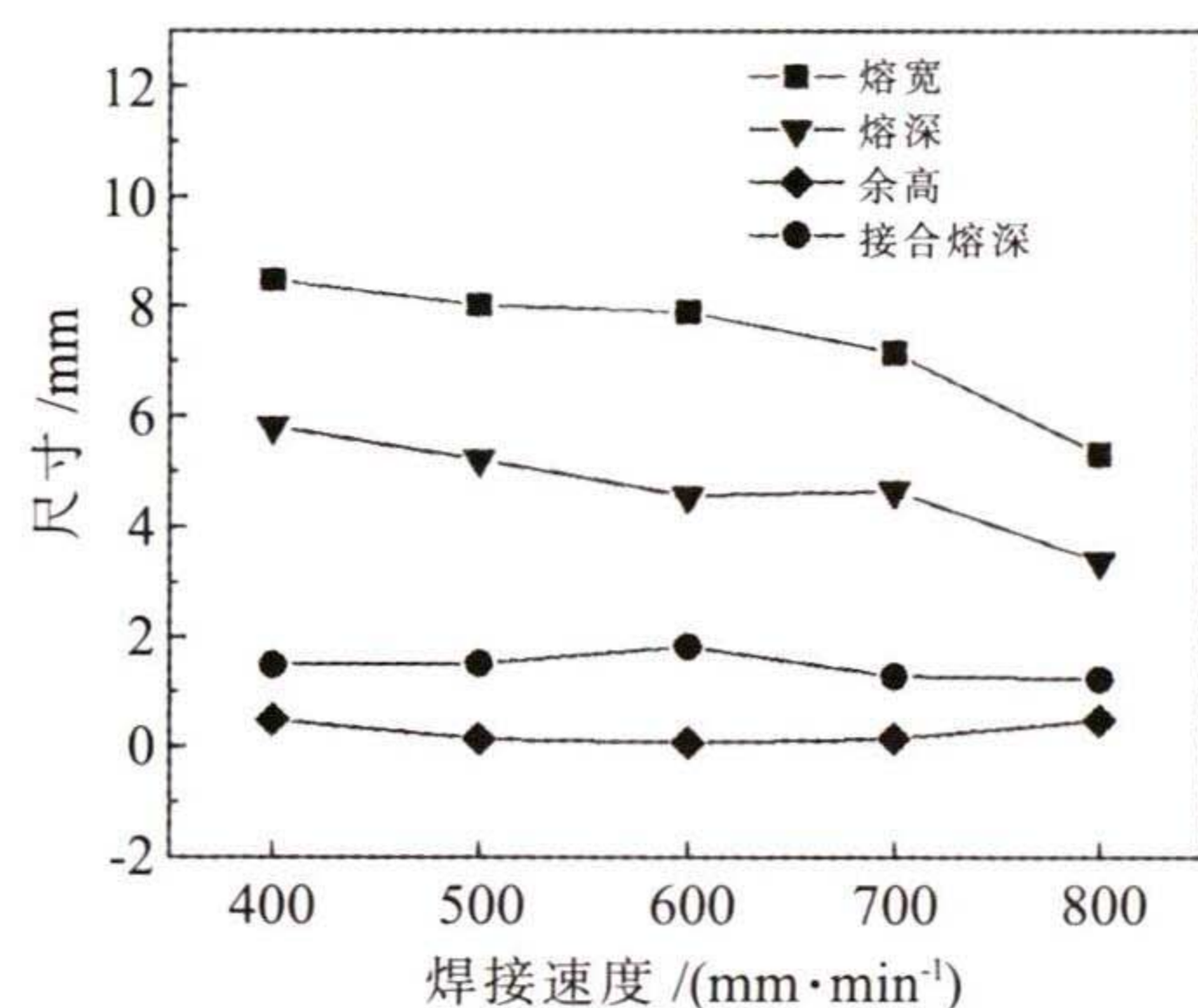


图 14 熔深、熔宽、余高及接合熔深随焊接速度的变化
Fig.14 Variation of penetration, width, reinforcement and joint penetration with welding speed

大,但余高也最高;随着焊接速度从 400 mm/min 增至 600 mm/min,焊缝单位面积的热能未及时扩散,集中在焊枪运动轨迹周围,接合熔深上升,余高下降,但熔深熔宽都呈减小趋势;随着焊接速度从 600 mm/min 继续增至 800 mm/min,焊缝的熔深熔宽仍为下降状态,同时由于焊接速度过快,热能来不及停留,导致接合熔深也下降,而余高随之提升。

综上所述,激光-MIG 复合焊接过程中,当焊接速度为 600 mm/min 时,焊缝的熔深、熔宽满足要求,没有大幅度下降,接合熔深最大,且余高最小,焊缝

成形质量最佳。

3 结论

(1) MIG弧焊熔池飞溅较大,焊缝熔深、熔宽均较小,加入激光热源后,熔深、熔宽均增大,余高减小。激光对电弧有一定的稳定作用,当激光功率为 1.5 kW 时,与电弧热源复合效果理想,相互耦合性最好,焊缝成形良好。

(2) 与激光焊缝相比,加入弧焊后,焊缝的熔深、熔宽均出现了大幅度的提升。弧焊熔池尺寸随电流增大而增大,当焊接电流为 220 A 时,激光熔池与弧焊熔池耦合性好,熔池稳定,飞溅减少,焊缝成形良好。

(3) 随热源间距增大,熔滴不再滴入激光作用区,耦合作用下降,热源间距为 2 mm 时,两熔池耦合性最佳。

(4) 随焊接速度提升,热源在单位长度焊缝作用时间变短,熔深熔宽下降,焊接速度为 600 mm/min 时,焊缝成形良好,余高改善明显。

参考文献:

- [1] Bappa Acherjee. Hybrid laser arc welding: State-of-art review [J]. Optics and Laser Technology, 2018, 99: 60-71.
- [2] 陈智,李超,王羽泽,等. 船用薄板激光-电弧复合焊表面气孔缺陷试验分析[J]. 船海工程, 2021, 50(2): 87-90.
- [3] 汪彦钧. 薄板拼接激光-电弧复合焊工艺研究[J]. 中国重型装备, 2021(2): 36-40.
- [4] 聂春戈,张旭,管明珠,等. 非承载角焊缝十字接头疲劳性能[J]. 焊接, 2021(1): 8-12.
- [5] 唐锋,黄爱龙. T 型接头全焊透角焊缝自动焊接工艺研究及应用[J]. 中国修船, 2021, 34(S1): 36-40.
- [6] 丛林. 中厚板双机器人 T 型接头立角焊焊接工艺研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.
- [7] 梁梓铭. 中厚板激光角接焊焊缝成形机制研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- [8] 刘黎明,史吉鹏,王红阳. 低功率激光诱导电弧复合焊接钛合金薄板工艺研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(18): 38-43.
- [9] 吕晓辉,徐信坤,高健,等. 焊接参数对不等厚钛合金角接结构激光诱导电弧焊接成形的影响 [J]. 电焊机, 2020, 50(7): 18-23.
- [10] 马晓丽,华学明,林航,等. 三电极 MAG 高速角焊焊接工艺试验研究[J]. 热加工工艺, 2008, 37(17): 102-104. [H]