

激光-MIG 复合打底焊熔滴过渡及电弧形态研究

李帅贞¹, 李刚卿¹, 杨志斌^{2*}, 毛镇东¹, 韩晓辉¹

(¹中车青岛四方机车车辆股份有限公司技术工程部, 山东 青岛 266111;

²大连交通大学材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要 针对轨道列车用 20 mm 厚 6005A-T6 铝合金激光-MIG 复合打底焊工艺, 借助高速摄像技术, 系统研究坡口形式及工艺参数对熔滴过渡、电弧形态和焊缝成形的影响。研究表明, 采用钝边高度 10 mm 的 U 形坡口, 更有利于获得稳定的焊接过程。电弧电流 280 A 时电弧形态稳定、无飞溅, 熔滴以射滴过渡和射流过渡为主; 电弧电流较小时电弧易被侧壁吸引且焊接飞溅较大, 电弧电流较大时电弧形态性降低且熔滴以球形熔体过渡影响焊缝成形。随焊接速度增加熔滴过渡频率略有增加, 焊缝表面鱼鳞纹日趋明显。热源间距 3 mm 时, 激光对电弧形态具有一定的压缩和稳定作用, 热源间距过大或过小均降低了热源耦合作用。

关键词 激光-MIG 复合焊; 打底焊; 铝合金; 熔滴过渡; 电弧形态

中图分类号: TG456.7

文献标志码: A

doi: 10.14128/j.cnki.al.20244408.039

Study on Droplet Transfer and Arc Shape of Laser-MIG Hybrid Backing Welding

Li Shuaizhen¹, Li Gangqing¹, Yang Zhibin^{2*}, Mao Zhendong¹, Han Xiaohui¹

(¹ Technical Engineering Department, CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, Shandong, China;

² School of Material Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, China)

Abstract This study systematically investigated the effects of groove type and welding parameters on droplet transfer, arc shape, and weld formation during laser-MIG hybrid backing welding of 20 mm thick 6005A-T6 aluminum alloy for rail trains. The results indicated that U-shaped groove with root face height of 10 mm was more conducive to obtaining stable welding process. The arc shape was stable and no spatters when the arc current was 280 A, the main types of droplet transition were spray transfer and jet transfer. The arc was easily attracted by the side wall and welding spatter was large when the arc current was low. The stability of the arc reduced and the droplet affected the weld formation by spherical melt transition. The droplet transition frequency increased slightly as the welding speed increased, and the welding fish scales became more obvious. The laser could compress and stabilize the arc form when the heat resource distance was about 3 mm, and the coupling effect of the heat source reduced if the distance between heat sources was too large or too small.

Key words laser-MIG hybrid welding; backing welding; aluminum alloy; droplet transfer; arc shape

0 引言

铝合金具有密度低、比强度高、耐腐蚀性强和成型性好等优点, 随着轨道车辆运营工况日趋多样、服役环境愈加复杂, 铝合金厚壁构件作为关键承载构件在轨道列车制造中应用得越来越多^[1]。这类厚壁构件大多具有不规则等特点, 实现一体化成型十分困

难, 因此高质量焊接成为其制造涉及的关键技术。

现阶段, 铝合金厚壁构件主要采用的焊接方法包括传统电弧焊和窄间隙焊等。传统电弧焊具有作业方式灵活、工程适应性强等优势, 但是热源的能量密度低, 坡口尺寸大且焊接速度低, 导致多层多道焊接时存在焊接效率低、线能量高、焊接残余应力及变

收稿日期: 2022-12-30; 修回日期: 2023-01-03

基金项目: 辽宁省教育厅科学研究经费项目(JDL2020026)

作者简介: 李帅贞(1986—), 男, 本科, 高级工程师。研究方向为铝合金焊接工艺。E-mail: lsz18106397585@163.com

* 通信作者: 杨志斌(1985—), 男, 博士, 副教授。研究方向为激光及其复合热源焊接技术及其应用。E-mail: yangzhibin@djtu.edu.cn

形大、组织性能恶化等问题^[2]。窄间隙焊接通过减小坡口尺寸及间隙,大大降低了焊缝金属的填充量,一定程度上可解决焊接效率低和接头质量差的问题,但窄间隙焊接工艺难度较大,因受极小间隙的限制,送丝、送气等实现都异常困难,更重要的是窄间隙焊接极易出现侧壁未熔合现象,工艺稳定性较差^[3]。

激光-MIG 复合焊工艺兼具激光焊和 MIG 焊优点,在提高效率、提升质量、减小应力及变形等方面具有显著优势,是厚壁构件高质高效焊接的理想技术,因而受到国内外研究学者的广泛关注^[4-6]。姜朝^[7]分别采用 MIG 焊、Tandem MIG 焊和激光-MIG 复合焊工艺焊接 30 mm 厚 5083 铝合金,对比分析了焊缝成形、组织特征及力学性能等。张林^[8]采用激光-MIG 复合焊+MIG 摆动盖面焊的方法,实现了 20 mm 厚 7A52 铝合金的焊接,研究了复合焊接工艺参数对焊缝成形的影响规律,分析了接头的组织特征和力学性能。激光-MIG 复合焊接过程存在两种热源,但并不是两种热源的简单叠加,激光和电弧在焊接过程中发生强烈的相互作用,对电弧行为和熔滴过渡行为具有明显的影响。Ono 等^[9]研究发现激光对电弧具有一定的吸引和压缩的作用,电弧电压由波动趋向稳定。Liu 等^[10-11]研究结果表明,激光-电弧复合焊滴状过渡时,激光等离子体和电弧等离子体相互作用使熔滴脱离焊丝速度和频率均明显变小。刘凯等^[12]研究结果表明,激光-MAG

复合焊接电弧功率越大熔滴过渡越稳定,熔滴直径越小,熔滴过渡频率越高。毕学松等^[13]针对 10 mm 厚钢板激光-MAG 复合焊工艺,研究了 Y 形坡口打底焊可行性及工艺适应性,指出激光与电弧电流的匹配对焊接稳定性有很大影响。当前针对铝合金厚板激光-MIG 复合焊接的研究,主要偏重于接头形貌、力学性能等方面,而关于打底焊熔滴过渡和电弧形态对稳定性影响的研究尚缺乏系统报道,这导致焊接过程难以精确控制,焊接质量难以得到稳定保证,极大地限制了激光-MIG 复合焊接技术在轨道客车铝合金厚壁承载构件焊接制造中的应用。

因此,本文针对轨道客车 20 mm 厚铝合金激光-MIG 复合打底焊工艺,借助高速摄像技术,系统研究了坡口形式及工艺参数对熔滴过渡、电弧形态和焊缝成形的影响,为优化坡口形式和复合焊接工艺参数,获得稳定可靠的焊接过程提供试验依据。

1 试验材料、设备及方法

1.1 试验材料

试验母材选用 6005A-T6 铝合金板材,试样尺寸为 350 mm×150 mm×20 mm,背部采用衬垫强制成形,坡口形式及衬垫尺寸如图 1 所示。填充材料选用直径为 1.2 mm 的 ER5356 铝合金焊丝。焊前对试样表面机械打磨并用丙酮擦拭,目的是去除其表面氧化膜及油污。

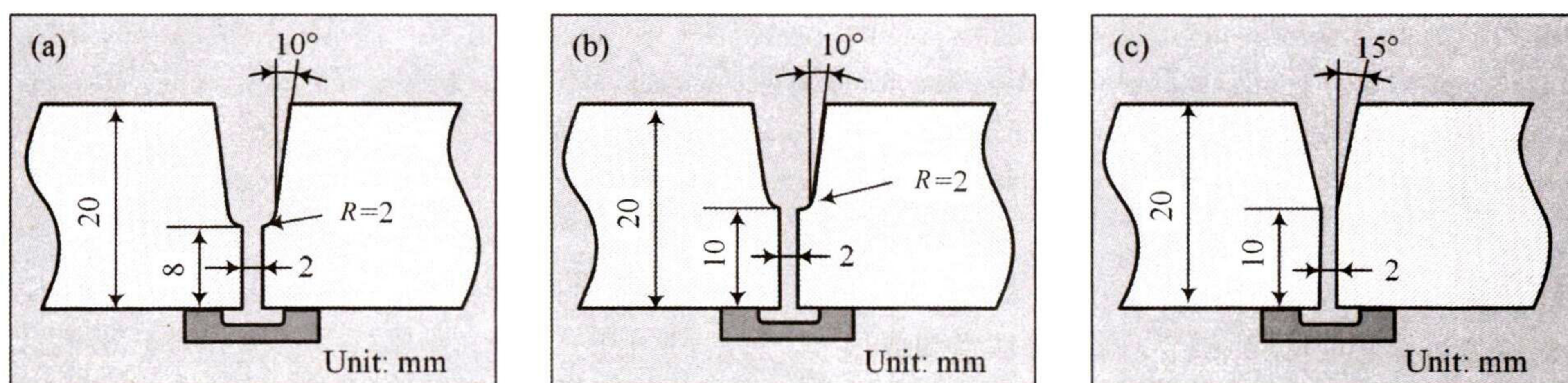


图 1 坡口形式示意图

(a)U 形坡口-8 mm 钝边;(b)U 形坡口-10 mm 钝边;(c)V 形坡口-10 mm 钝边

Fig. 1 Schematic diagram of grooves

(a)U-Shaped with root face height of 8 mm; (b)U-shaped with root face height of 10 mm;

(c)V-shaped with root face height of 10 mm

1.2 试验设备及方法

本试验采用的焊接设备及焊接方法如图 2 所示。激光器为德国 TRUMPF TruDisk 16003 碟片式激光器,最大输出功率 16 kW,波长 1.07 μm 。弧

焊电源为奥地利 FRONIUS TPS 5000 CMT 焊接电源,电弧电流、电弧电压和送丝速度一元化调节。熔滴过渡和电弧形态利用湖南科天健公司 Acuteye V4.0 高速摄像系统拍摄,高速相机为德国 OPTRO-

NIS CP70-1HS-M-1900,拍摄速度 4 000 f/s,利用主动激光光源照亮焊接区域。焊接过程利用平台运动实现工件移动,高速相机沿焊接方向拍摄。焊接时激光在前、电弧在后,激光与试板夹角 80°、焊枪与

试板夹角 60°,光斑直径 1.0 mm,离焦量+2 mm,保护气为高纯氩气(体积分数 99.999%),其流量为 50 L/min。

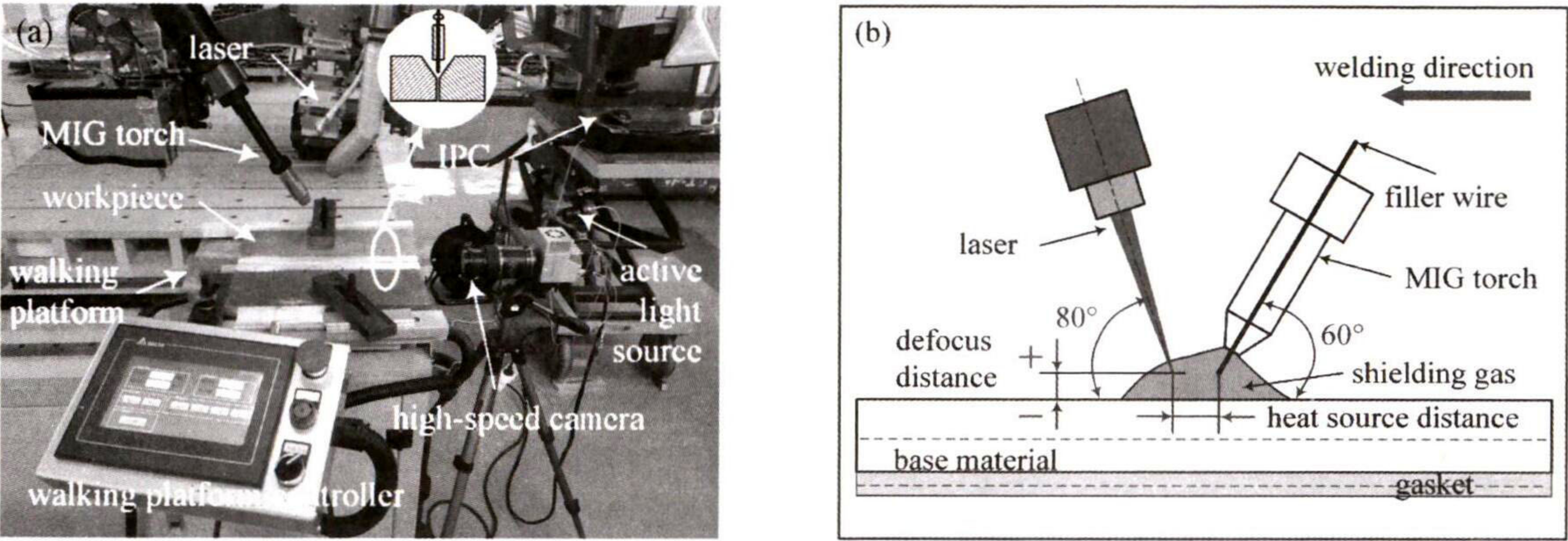


图 2 试验设备及焊接方法示意图
(a)试验设备;(b)焊接方法示意图

Fig. 2 Apparatus and schematic diagram of experiment
(a)Experimental apparatus; (b)schematic diagram

2 试验结果与分析

2.1 坡口形式的影响

不同坡口形式采用的激光-MIG 复合打底焊工艺参数如表 1 所示,对应的熔滴过渡和电弧形态特征分别如图 3、图 4 和图 5 所示。对比图 3 和图 4 可以发现:钝边高度 8 mm 和 10 mm 的 U 形坡口,电弧形态和熔滴过渡特征类似,电弧形态均为钟罩状且未出现侧壁吸引现象,如图 3(a)和图 4(a)所示;随焊丝熔化量增加,电弧形态钟罩状尺寸增大,焊丝端部熔滴尺寸增加,如图 3(b)和图 4(b)所示;当熔滴重力大于表面张力时,熔滴脱落并向熔池过渡,熔滴尺寸和焊丝直径相当,电弧形态钟罩状尺寸减小,

如图 3(c)和图 4(c)所示,熔滴为射滴过渡;熔滴脱落后电弧形态由钟罩状变为圆锥状,熔滴变为射流过渡,如图 3(d)、图 3(e)、图 4(d)和图 4(e)所示;随后完成一个熔滴过渡周期,如图 3(f)和图 4(f)所示。对比图 4 和图 5 可以发现:V 形坡口和 U 形坡口的电弧形态和熔滴过渡特征及其周期基本一致。但存在如下差异:① V 形坡口根部存在小尺寸飞溅,如图 4(a)和图 5(a)所示;② V 形坡口根部电弧长度大于 U 形坡口,且其熔池高度大于 U 形坡口,如图 4(f)和 5(f)所示。不同坡口形式时在优化工艺参数情况下,焊缝表面和背面成形质量均良好无明显缺陷。

表 1 不同坡口形式采用的激光-MIG 复合打底焊工艺参数

Table 1 The adopted laser-MIG hybrid backing welding parameters with different groove types

Groove type	Root face height/mm	Welding speed/(m · min ⁻¹)	Laser power/kW	Arc current/A	Heat source distance/mm
U-shaped	8	0.8	6.5	250	3
U-shaped	10	0.6	7.0	250	3
V-shaped	10	0.6	7.0	250	3

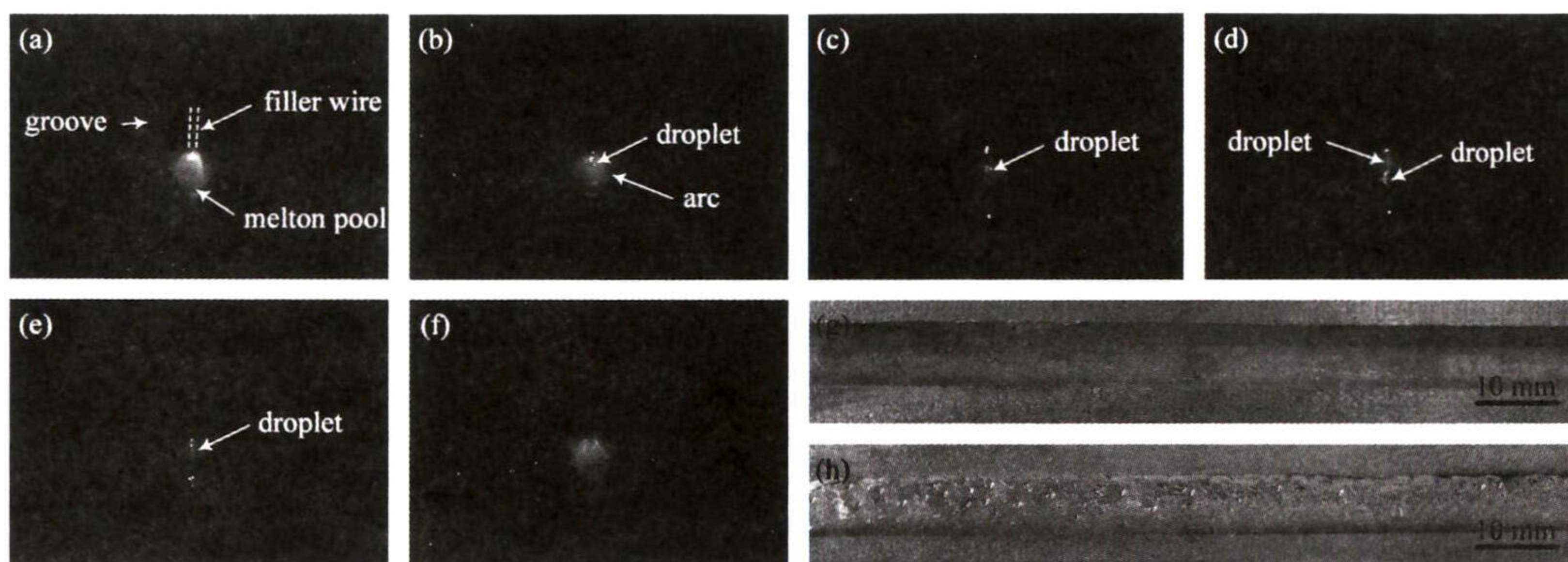


图 3 钝边高度 8 mm 时 U 形坡口的熔滴过渡、电弧形态和焊缝成形特征

(a) T ms; (b) $T + 0.5$ ms; (c) $T + 1.0$ ms; (d) $T + 1.5$ ms; (e) $T + 2.0$ ms; (f) $T + 2.5$ ms; (g) 表面成形; (h) 背部成形

Fig. 3 Characteristics of the droplet transfer, arc shape and weld formation of U-shaped groove with root face height of 8 mm

(a) T ms; (b) $T + 0.5$ ms; (c) $T + 1.0$ ms; (d) $T + 1.5$ ms; (e) $T + 2.0$ ms; (f) $T + 2.5$ ms; (g) surface formation; (h) backing formation

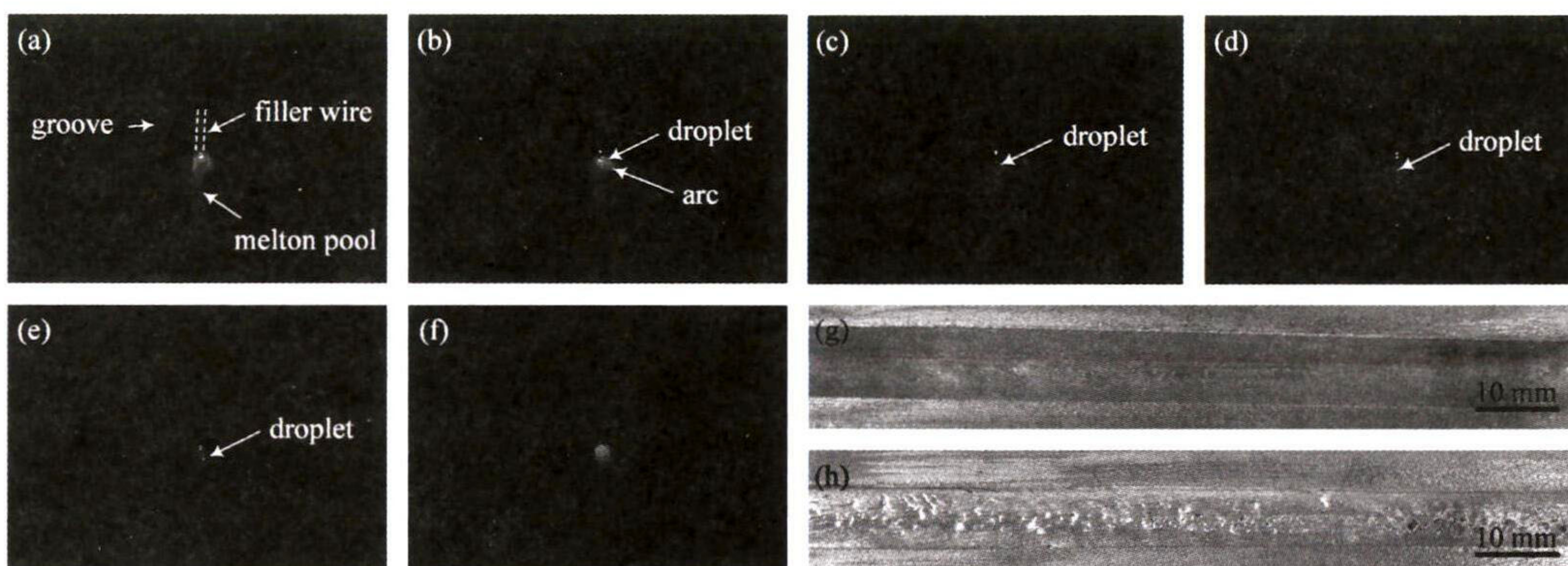


图 4 钝边高度 10 mm 时 U 形坡口的熔滴过渡、电弧形态和焊缝成形特征

(a) T ms; (b) $T + 0.5$ ms; (c) $T + 1.0$ ms; (d) $T + 1.5$ ms; (e) $T + 2.0$ ms; (f) $T + 2.5$ ms; (g) 表面成形; (h) 背部成形

Fig. 4 Characteristics of the droplet transfer, arc shape and weld formation of U-shaped groove with root face height of 10 mm

(a) T ms; (b) $T + 0.5$ ms; (c) $T + 1.0$ ms; (d) $T + 1.5$ ms; (e) $T + 2.0$ ms; (f) $T + 2.5$ ms; (g) surface formation; (h) backing formation

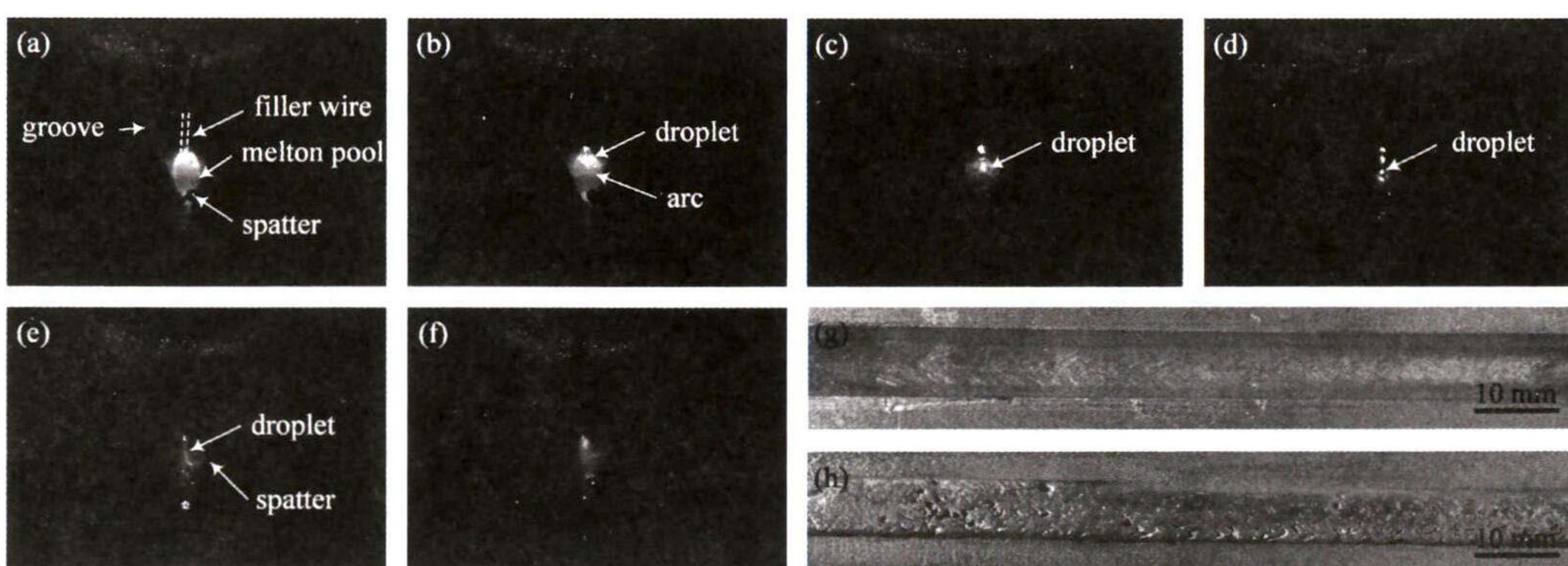


图 5 钝边高度 10 mm 时 V 形坡口的熔滴过渡、电弧形态和焊缝成形特征

(a) T ms; (b) $T + 0.5$ ms; (c) $T + 1.0$ ms; (d) $T + 1.5$ ms; (e) $T + 2.0$ ms; (f) $T + 2.5$ ms; (g) 表面成形; (h) 背部成形

Fig. 5 Characteristics of the droplet transfer, arc shape and weld formation of V-shaped groove with root face height of 10 mm

(a) T ms; (b) $T + 0.5$ ms; (c) $T + 1.0$ ms; (d) $T + 1.5$ ms; (e) $T + 2.0$ ms; (f) $T + 2.5$ ms; (g) surface formation; (h) backing formation

2.2 工艺参数的影响

基于钝边高度 10 mm 的 U 形坡口,主要研究电弧电流、焊接速度、激光功率和热源间距等主要工艺参数对打底焊熔滴过渡、电弧形态和焊缝成形的

影响,其工艺参数如表 2 所示。保持不变的工艺参数如下:激光功率 7.0 kW、光斑直径 1.0 mm,离焦量+2 mm,保护气流量为 50 L/min。

表 2 激光-MIG 复合打底焊接工艺参数及其熔滴过渡、电弧形态和焊缝形貌图序
Table 2 The adopted laser-MIG hybrid backing welding parameters for experimental study

No.	Arc current/A	Welding speed/(m · min ⁻¹)	Laser power/kW	Heat source distance/mm	Fig. No.
1 #	250	0.6	7.0	3	Fig. 4
2 #	270	0.6	7.0	3	Fig. 6
3 #	230	0.6	7.0	3	Fig. 7
4 #	250	0.8	7.5	3	Fig. 8
5 #	250	1.0	7.0	3	Fig. 9
6 #	250	0.6	7.0	1	Fig. 10
7 #	250	0.6	7.0	5	Fig. 11

2.2.1 电弧电流的影响

不同电弧电流的熔滴过渡、电弧形态和焊缝形貌分别如图 4、图 6 和图 7 所示。对比可以发现:电弧电流 250 A 时,电弧形态稳定,熔滴以射滴过渡和射流过渡为主,过渡周期约 2.5 ms,焊接飞溅极少;电弧电流 270 A 时,电弧形态不稳定,熔滴易出现球形熔体无法进入熔池,致使焊缝凸起影响成形质量,

如图 6(d)所示,这主要是由于电弧力过大导致熔滴过渡发生偏离导致的;电弧电流 230 A 时,电弧易被侧壁吸引而发生偏移,其指向性和稳定性降低,这也是焊缝未全熔透原因之一,如图 7(b)、图 7(c)、图 7(d)和图 7(h)所示,熔滴过渡以射滴过渡和射流过渡为主,但焊接飞溅较大,过渡周期约为 3.75 ms。

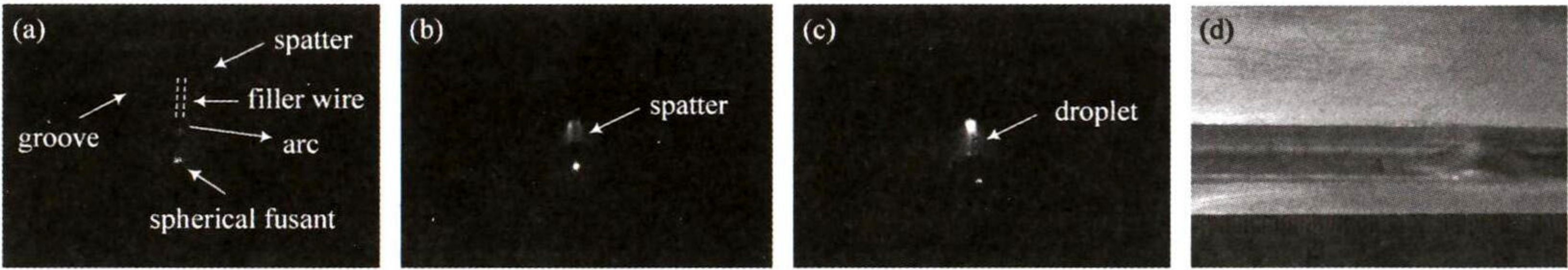


图 6 电弧电流 270 A 时的熔滴过渡、电弧形态和焊缝成形特征
(a) $T+2.25\text{ ms}$; (b) $T+4.0\text{ ms}$; (c) $T+12.5\text{ ms}$; (d) 表面成形

Fig. 6 Characteristics of the droplet transfer, arc shape and weld formation with arc current of 270 A
(a) $T+2.25\text{ ms}$; (b) $T+4.0\text{ ms}$; (c) $T+12.5\text{ ms}$; (d) surface formation

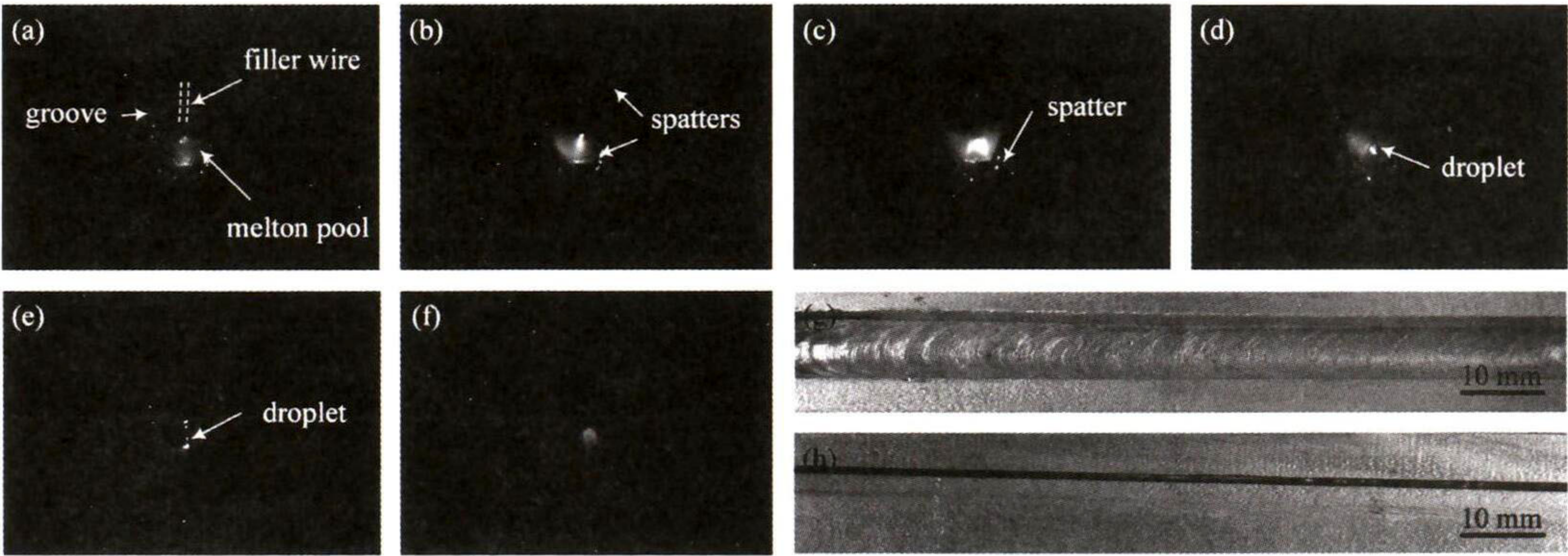


图 7 电弧电流 230 A 时的熔滴过渡、电弧形态和焊缝成形特征
(a) $T\text{ ms}$; (b) $T+0.5\text{ ms}$; (c) $T+1.25\text{ ms}$; (d) $T+1.75\text{ ms}$; (e) $T+2.75\text{ ms}$; (f) $T+3.75\text{ ms}$; (g) 表面成形; (h) 背部成形

Fig. 7 Characteristics of the droplet transfer, arc shape and weld formation with arc current of 230 A
(a) $T\text{ ms}$; (b) $T+0.5\text{ ms}$; (c) $T+1.25\text{ ms}$; (d) $T+1.75\text{ ms}$; (e) $T+2.75\text{ ms}$; (f) $T+3.75\text{ ms}$; (g) surface formation; (h) backing formation

2.2.2 焊接速度的影响

不同焊接速度(匹配相应的激光功率保证熔透)的熔滴过渡、电弧形态和焊缝形貌分别如图4、图8和图9所示。对比可以发现:不同焊接速度时电弧形态和熔滴过渡特征基本一致,如图4(a)、图8(a)和图9(a)所示,但过渡周期随焊接速度增加略有增加,焊接速度为0.6 m/min、0.8 m/min和1.0 m/min

时的熔滴过渡周期分别约为2.5 ms、3.0 ms和3.5 ms,如图4(f)、图8(f)和图9(f)所示。随焊接速度增大,焊缝表面鱼鳞纹日趋明显,如图4(g)、图8(g)和图9(g)所示,这主要是由于熔滴过渡周期延长且焊接速度提高使单位时间内过渡到熔池的熔滴减少而导致的。

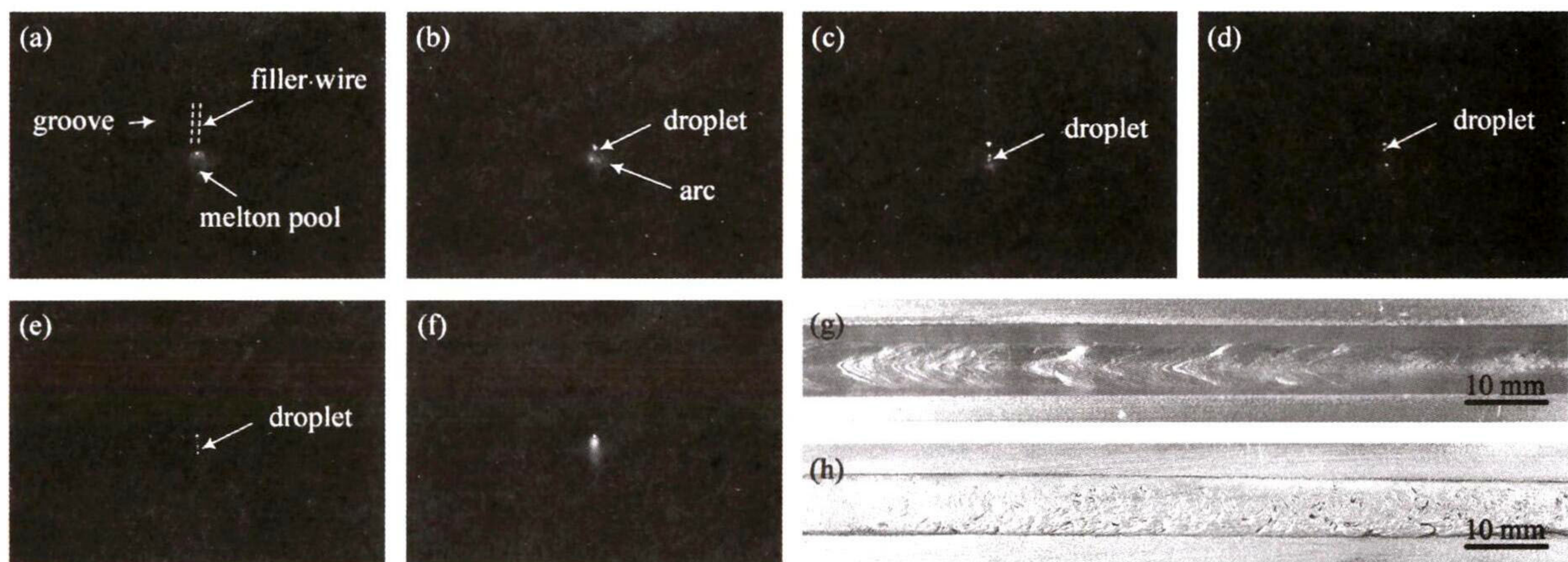


图8 焊接速度0.8 m/min时的熔滴过渡、电弧形态和焊缝成形特征

(a) T ms; (b) $T + 0.75$ ms; (c) $T + 1.25$ ms; (d) $T + 1.75$ ms; (e) $T + 2.25$ ms; (f) $T + 3.0$ ms; (g) 表面成形; (h) 背部成形

Fig. 8 Characteristics of the droplet transfer, arc shape and weld formation with welding speed of 0.8 m/min

(a) T ms; (b) $T + 0.75$ ms; (c) $T + 1.25$ ms; (d) $T + 1.75$ ms; (e) $T + 2.25$ ms; (f) $T + 3.0$ ms;

(g) surface formation; (h) backing formation

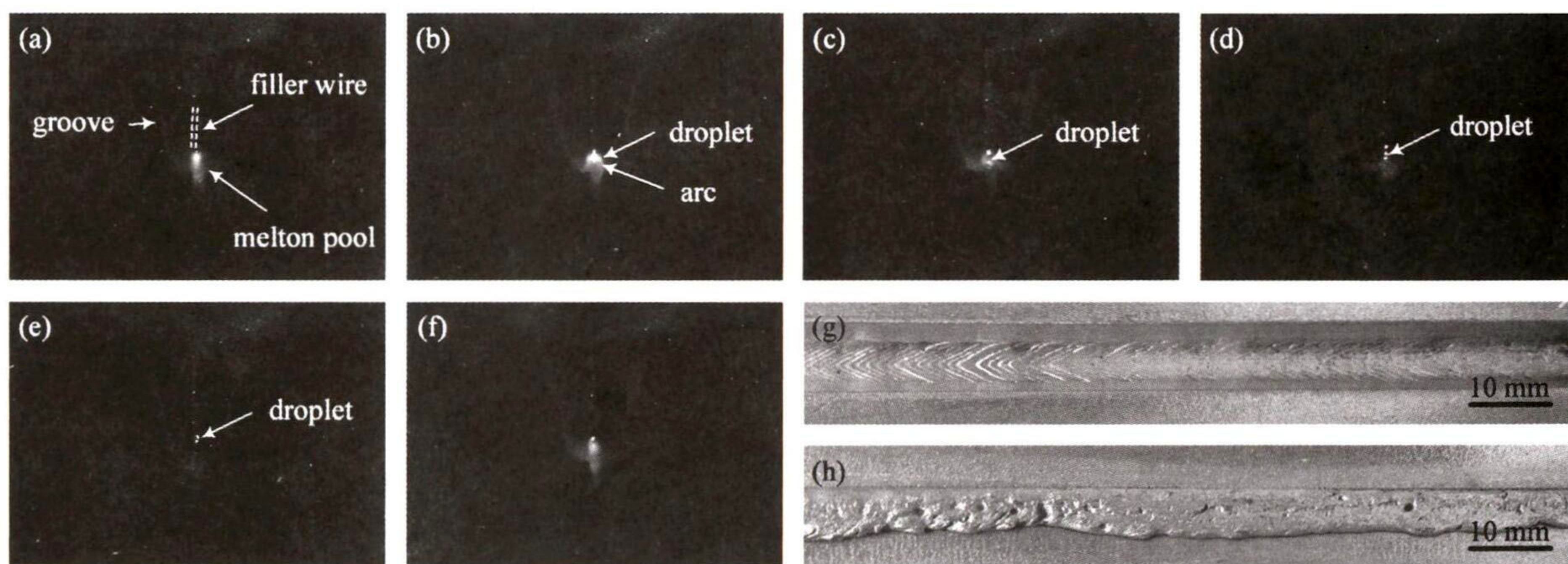


图9 焊接速度1.0 m/min时的熔滴过渡、电弧形态和焊缝成形特征

(a) T ms; (b) $T + 0.5$ ms; (c) $T + 1.0$ ms; (d) $T + 1.5$ ms; (e) $T + 2.0$ ms; (f) $T + 3.5$ ms; (g) 表面成形; (h) 背部成形

Fig. 9 Characteristics of the droplet transfer, arc shape and weld formation with welding speed of 1.0 m/min

(a) T ms; (b) $T + 0.5$ ms; (c) $T + 1.0$ ms; (d) $T + 1.5$ ms; (e) $T + 2.0$ ms; (f) $T + 3.5$ ms;

(g) surface formation; (h) backing formation

2.2.3 热源间距的影响

不同热源间距的熔滴过渡、电弧形态和焊缝形貌分别如图4、图10和图11所示。对比可以发现:热源间距1 mm和3 mm时,电弧形态基本一致且较稳定,没有出现侧壁吸引现象,但热源间距1 mm

时的电弧尺寸略大;热源间距5 mm时,电弧形态出现侧壁吸引现象,且伴随左右跳跃现象;不同热源间距的熔滴过渡特征基本一致,但过渡频率存在差异。同时从焊缝成形看,热源间距3 mm时,焊缝成形良好且背部成形连续;热源间距1 mm时,焊缝背部成

形出现断续情况,这是由于激光与电弧能量耦合有所降低,导致电弧力降低致使熔深降低造成的;热源间距 5 mm 时,焊缝出现未熔透现象,这表明激光与

电弧能量耦合显著降低;从电弧形态来看,热源间距 3 mm 时,激光对电弧具有一定压缩作用和稳定作用。

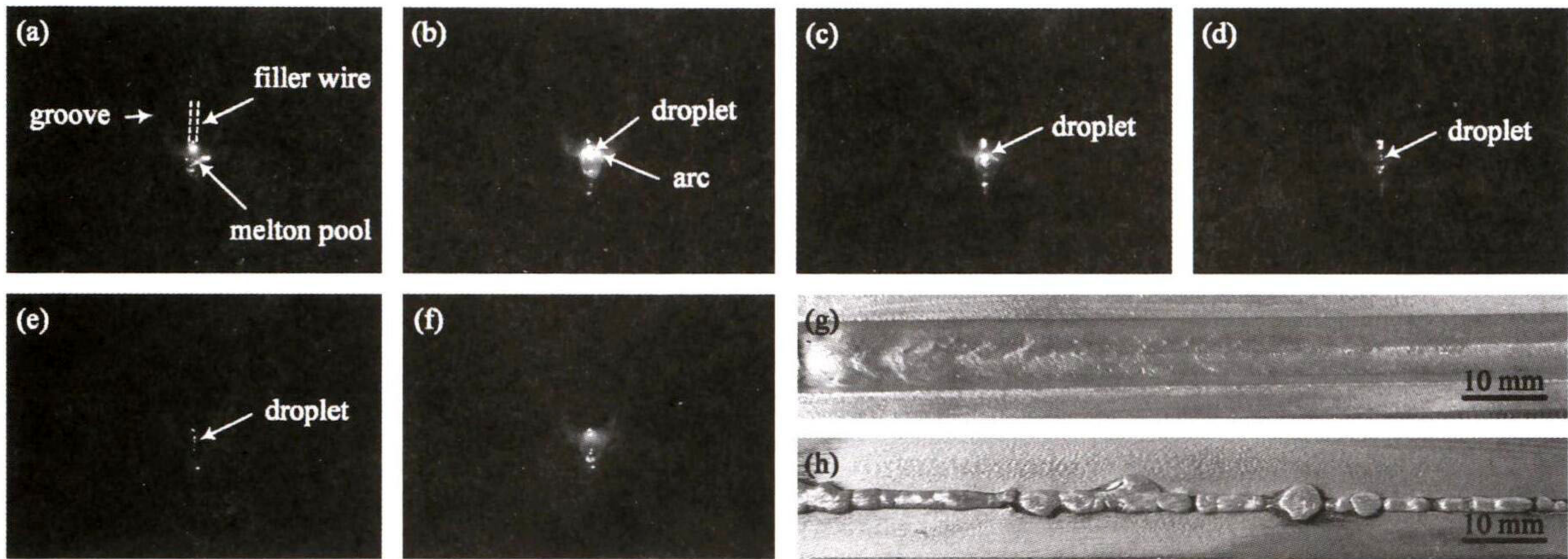


图 10 热源间距 1 mm 时的熔滴过渡、电弧形态和焊缝成形特征

(a) T ms; (b) $T + 1.0$ ms; (c) $T + 1.5$ ms; (d) $T + 2.0$ ms; (e) $T + 2.75$ ms; (f) $T + 3.5$ ms; (g) 表面成形; (h) 背部成形

Fig. 10 Characteristics of the droplet transfer, arc shape and weld formation with heat source distance of 1 mm

(a) T ms; (b) $T + 1.0$ ms; (c) $T + 1.5$ ms; (d) $T + 2.0$ ms; (e) $T + 2.75$ ms; (f) $T + 3.5$ ms;
(g) surface formation; (h) backing formation

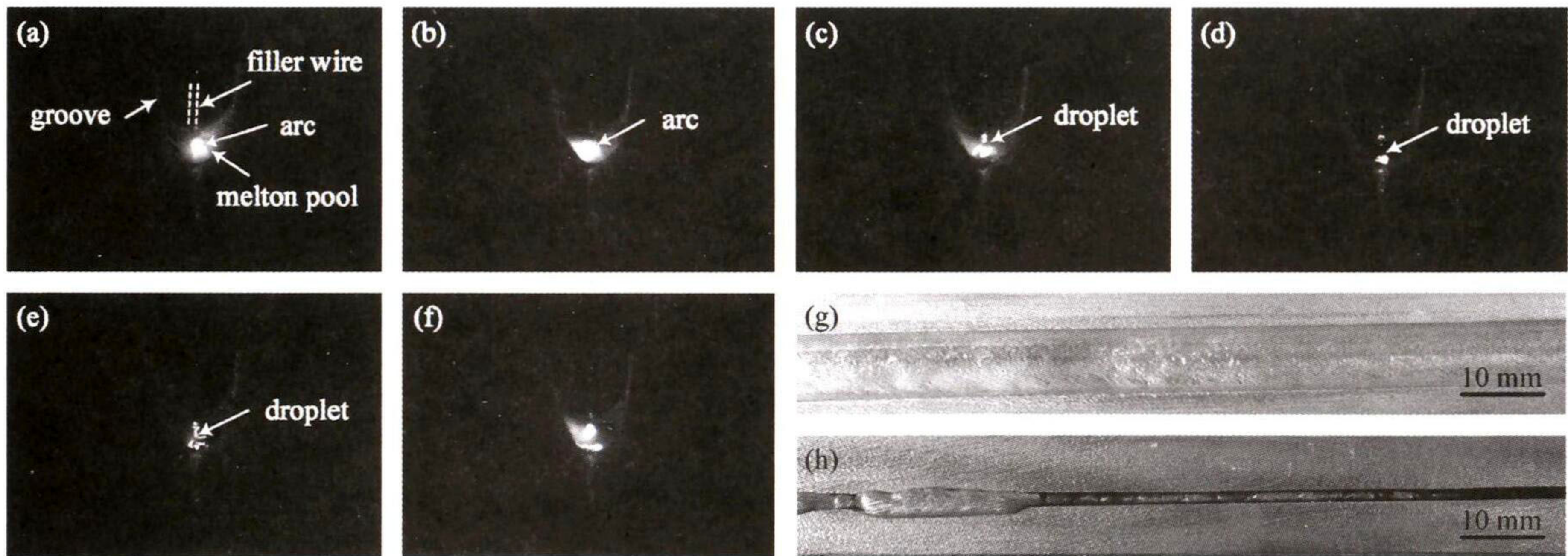


图 11 热源间距 5 mm 时的熔滴过渡、电弧形态和焊缝成形特征

(a) T ms; (b) $T + 1.0$ ms; (c) $T + 1.5$ ms; (d) $T + 2.25$ ms; (e) $T + 2.75$ ms; (f) $T + 4.0$ ms; (g) 表面成形; (h) 背部成形

Fig. 11 Characteristics of the droplet transfer, arc shape and weld formation with heat source distance of 5 mm

(a) T ms; (b) $T + 1.0$ ms; (c) $T + 1.5$ ms; (d) $T + 2.25$ ms; (e) $T + 2.75$ ms; (f) $T + 4.0$ ms;
(g) surface formation; (h) backing formation

3 结论

(1)为考虑打底焊的填充量和过程稳定性,20 mm厚铝合金激光-MIG 复合打底焊,采用钝边高度 10 mm 的 U 形坡口更合适。获得的优化激光-MIG 复合打底焊参数如下:激光功率 7.0 kW、电弧电流 250 A、焊接速度 0.6 m/min、热源间距 3 mm、离焦量 +2 mm、光斑直径 1.0 mm、保护气流量 50 L/min。

(2)电弧电流较小时电弧易被侧壁吸引且焊接飞溅较大,熔滴以射滴过渡和射流过渡为主;电弧电

流较大时电弧形态不稳定,熔滴易形成球形熔体致使焊缝凸起,降低成形质量;电弧电流 250 A 时,电弧形态稳定且几乎无焊接飞溅,熔滴以射滴过渡和射流过渡为主。

(3)不同焊接速度的电弧形态和熔滴过渡特征一致,但随焊接速度增加熔滴过渡频率略有增加,且焊缝表面鱼鳞纹日趋明显;热源间距过大或过小均降低了热源耦合作用,热源间距 3 mm 时,激光对电弧形态具有一定的压缩和稳定作用。

参考文献

- [1] 韩晓辉, 张志毅, 李刚卿, 等. 轨道客车轻量化材料及其连接技术的发展与展望[J]. 焊接, 2020(10): 34-42.
HAN X H, ZHANG Z Y, LI G Q, et al. Development and prospect of lightweight materials and their connection technology for rail passenger cars[J]. Welding & Joining, 2020(10): 34-42.
- [2] 吴志明, 李金龙, 彭章祝. 轨道交通车体用铝合金材料及其焊接技术[J]. 金属加工(热加工), 2021(2): 5-10.
WU Z M, LI J L, PENG Z Z. Aluminum alloy material for rail transit car body and its welding technology[J]. MW Metal Forming, 2021(2): 5-10.
- [3] 刘永翔. 厚板低碳钢窄间隙激光-MIG 复合焊接工艺研究[J]. 应用激光, 2016, 36(3): 326-330.
LIU Y X. Study of laser-MIG hybrid welding of thick mild steel plates with a narrow gap[J]. Applied Laser, 2016, 36(3): 326-330.
- [4] HAN X H, YANG Z B, MA Y, et al. Comparative study of laser-arc hybrid welding for AA6082-T6 aluminum alloy with two different arc modes[J]. Metals, 2020, 10: 407.
- [5] BUNAZIV I, AKSELSSEN O M, REN X B, et al. Laser beam and laser-arc hybrid welding of aluminium alloys [J]. Metals, 2021, 11(8): 1150.
- [6] ACHERJEE B. Hybrid laser arc welding: State-of-art review[J]. Optics Laser Technology, 2018, 99: 60-71.
- [7] 姜朝. 厚板 5083 铝合金激光-MIG 复合焊接工艺与焊缝组织性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018: 48-57.
JIANG Z. Study on laser -MIG hybrid welding technology and weld microstructure and properties of thick plate 5083 aluminum alloy[D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2018: 48-57.
- [8] 张林. 7A52 铝合金厚板激光-MIG 复合焊接工艺研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018: 34-44.
ZHANG L. Study on laser -MIG hybrid welding technology of 7A52 aluminum alloy thick plate[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018: 34-44.
- [9] ONO M, SHINBO Y, YOSHITAKE A, et al. Development of laser-arc hybrid welding[J]. NKK Technical Review, 2002(86): 8-12.
- [10] LIU S Y, LIU F D, XU C Y, et al. Experimental investigation on arc characteristic and droplet transfer in CO₂ laser-metal arc gas (MAG) hybrid welding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 62: 604-611.
- [11] LIU S Y, LIU F D, ZHANG H, et al. Analysis of droplet transfer mode and forming process of weld bead in CO₂ laser-MAG hybrid welding process[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(4): 1019-1025.
- [12] 刘凯, 宋佳妮. CO₂激光-MAG 电弧复合焊电弧能量对熔滴过渡特征和焊缝形貌的影响[J]. 应用激光, 2021, 41(1): 154-160.
LIU K, SONG J N. Effects of the arc energy on droplet transfer and bead shape in CO₂ laser-MAG arc hybrid welding [J]. Applied Laser, 2021, 41(1): 154-160.
- [13] 毕学松, 朱加雷, 李伟, 等. 激光-MAG 电弧复合高速打底焊工艺研究 [J]. 应用激光, 2019, 39(2): 239-242.
BI X S, ZHU J L, LI W, et al. Process of high speed backing welding by laser-MAG hybrid welding [J]. Applied Laser, 2019, 39(2): 239-242.