

# 光丝距对激光-电弧复合焊接熔池表面流动的影响

刘佳<sup>1,2\*</sup>, 李忠<sup>1,2</sup>, 石岩<sup>1,2</sup>, 白陈明<sup>1,2</sup>, 张宏<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup> 光学国际科技合作基地, 吉林 长春 130022

**摘要** 在焊接过程中,熔池的流动特征与气孔、咬边等缺陷密切相关,对熔池的结晶过程以及焊缝成形也有重要影响。以低合金高强钢为研究对象,通过钻孔填埋  $ZrO_2$  颗粒作为示踪粒子,利用高速相机记录匙孔位置、电弧形态及熔池的流动特征,研究了不同光丝距下激光-电弧复合焊接熔池表面的流动规律。结果表明:当光丝距为 1 mm 时,匙孔位置不稳定,发生了漂移现象,示踪粒子绕过电弧作用区后沿中轴线流向后;当光丝距增加至 3 mm 时,匙孔位置相对稳定,但示踪粒子在流动过程中出现了典型的卡门涡街现象;随着光丝距进一步增加至 5 mm 时,匙孔位置稳定,但示踪粒子在流经激光与电弧中间区域时出现了停滞现象,此条件下示踪粒子的运动距离最大。通过对比三种光丝距下的焊缝截面形貌可以发现:当光丝距为 1 mm 时,焊缝底部存在气孔缺陷,这是光丝距过小导致匙孔不稳定而造成的工艺性气孔;当光丝距为 5 mm 时,两热源间距过大,导致两热源的耦合效率下降,熔深显著减小;当光丝距为 3 mm 时,焊缝无缺陷,且熔深最大。

**关键词** 激光技术; 复合焊接; 熔池流动行为; 高强钢; 光丝距

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1002004

## Effect of Laser-Arc Distance on Surface Flow of Laser-GMAW Hybrid Welding Molten Pool

Liu Jia<sup>1,2\*</sup>, Li Zhong<sup>1,2</sup>, Shi Yan<sup>1,2</sup>, Bai Chenming<sup>1,2</sup>, Zhang Hong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> School of Electromechanical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup> National Base of International Science and Technology Cooperation in Optics, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** In welding process, the flow characteristics of molten pool are closely related to the defects such as porosity, undercut and so on. It also has important influence on the crystallization process of molten pool and weld formation. The research objects of low-alloy high-strength steel are drilled holes and then filled with  $ZrO_2$  particles as tracer particles. And the position of keyhole, arc shape and flow characteristics of molten pool are recorded by high speed camera. The flow law of the molten pool surface during laser-GMAW hybrid welding is studied at different laser-arc distances. The results show that when the laser-arc distance is 1 mm, the keyhole is unstable and drift occurs. At the same time, the tracer particle flows to the rear along the central axis after circumventing the arc action zone. When the laser-arc distance is 3 mm, the position of the keyhole is relatively stable. However, the typical Karman vortex phenomenon appears during the flow of tracer particles. When the laser-arc distance is 5 mm, the keyhole position is stable, while the stagnation phenomenon of tracer particles appears as it flows through the middle region of laser keyhole and arc action zone. Under this condition, the moving distance of tracer particles is the largest. Comparing the cross-section morphology of the joints at three kinds of laser-arc distances, we can find that when the laser-arc distance is 1 mm, there are some pores at the bottom of the weld, which is caused by the unstable keyhole because of the small laser-arc distance. When the laser-arc distance is 5 mm, the distance between the two heat sources is too large, resulting in the increase of the coupling efficiency of the two heat

收稿日期: 2018-04-02; 修回日期: 2018-05-07; 录用日期: 2018-05-12

基金项目: 吉林省教育厅科学技术项目(JJKH20170613KL)、吉林省科技厅重点科技研发项目(20170204065GX, 201802010663GX)、国家重点研发计划“增材制造与激光制造”专项(2017YFB1104601)

\* E-mail: liujia@cust.edu.cn

sources, and significant decrease of the penetration depth. When the laser-arc distance is 3mm, the weld has no defect and the penetration depth is the largest.

**Key words** laser technique; hybrid welding; molten pool flow behavior; high-strength steel; laser-arc distance

**OCIS codes** 140.3390; 140.3538; 350.3390

## 1 引 言

激光-电弧复合焊接是将激光能量和电弧能量耦合在一起的复合加工技术,具有高的焊接质量和焊接效率,克服了单独激光、电弧焊接时热源输入不稳定、焊接裂纹和熔深小的缺点<sup>[1-4]</sup>。目前,激光-熔池极惰性气体保护焊/熔池极活性气体保护焊(MIG/MAG)复合焊接技术在各生产制造领域被广泛地研究与应用<sup>[5]</sup>。与单热源焊接相比,复合焊接包含更多的工艺参数。焊接工艺参数的选取会直接影响熔池的流动特性,而熔池的流动行为也会对熔池的传热特性及溶质元素分布产生很大影响,对焊缝成形、结构强度及应力状态亦有重要影响<sup>[6-7]</sup>。因此,对激光-电弧复合焊接熔池流动行为开展研究,有助于理解复合焊接缺陷产生的机理,亦有助于控制焊接质量,具有较高的研究价值。赵琳等<sup>[8]</sup>研究了保护气体中 O<sub>2</sub> 对激光-电弧复合焊接过程中熔池流动行为的影响,结果发现,保护气体中 O<sub>2</sub> 的含量对熔池流动具有明显作用;当 O<sub>2</sub> 的体积分数大于等于 2% 时,Marangoni 对流方向由外向流动变为内向流动,从而促进熔池的整体流动,使焊缝溶质元素的分布更加均匀。刘双宇等<sup>[9]</sup>运用高速摄像机和扫描电子显微镜分析了激光-电弧复合焊接过程中熔池形成过程与熔池内溶质元素分布的关系,结果表明,光丝距是引起熔池流动特征变化的决定性因素,当光丝距为 3 mm 时,焊缝成形最好,溶质元素分布得最均匀。刘西洋等<sup>[10]</sup>以 304 不锈钢为研究对象,借助高速相机记录了光丝距对激光-电弧复合焊接过程中熔池形貌的影响,结果表明:光丝距决定了激光能量与电弧能量的耦合程度,当光丝距为 3 mm 时,焊接熔池的形貌和飞溅现象得到改善。马国龙等<sup>[11]</sup>对比研究了单/双光束激光焊接过程中的熔池形态和焊缝形貌,结果表明,单/双光束激光焊接具

有不同的熔池形态演变过程,两激光热源间距是影响熔池流动行为的关键因素,双激光束间的相互作用加强了熔体流动,促进了焊缝的良好成形。

低合金高强钢是在非合金钢的基础上加入微量合金元素而形成的钢,该钢具有高的强度、耐腐蚀性能,被广泛应用于航空、航海及汽车工业等生产制造领域。然而,目前国内外研究人员对高强钢激光-电弧复合焊接技术的研究仍相对较少,尤其是关于复合焊接熔池流动行为的研究更少。针对这一情况,为深入研究激光-MAG 复合焊接熔池表面流动行为,本文以 6 mm 厚 HG785D 低合金高强钢为研究对象,选用高熔点、低密度的 ZrO<sub>2</sub> 颗粒作为示踪粒子,采用高速相机记录示踪粒子在复合焊接熔池中的运动轨迹,研究光丝距对熔池流动行为及焊缝形貌的影响规律。

## 2 试验方法

焊接设备采用德国 Trumpf 公司生产的 HL4006D 型 Nd:YAG 激光器、松下 Panasonic YD-350AG2HGE 型 MIG/MAG 焊机与 KUKA 机器人组成的旁轴复合焊接系统。试验材料为 150 mm×50 mm×6 mm 的 HG785D 低合金高强钢,在焊接前对其进行机械打磨并用丙酮擦拭,以去除其表面的氧化层和油污。填充材料采用牌号为 HCr20Ni10Mn7Mo 的奥氏体不锈钢焊丝,直径为 1.2 mm。母材及焊丝的主要化学成分如表 1 所示。采用型号为 CMOS-CR5000×2 的高速相机拍摄熔池的流动特征,频率为 4000 frame/s。为方便拍摄到连续的熔池形貌,焊接过程中复合焊枪与高速相机的位置被固定,高强钢被固定于数控工作台上作匀速运动。采用电弧在前、激光在后的焊接方式,焊枪保护气体为 5% 二氧化碳气体+95% 氩气,后置保护气体选择纯度为 99.99% 的氩气。焊接示意图如图 1 所示。

表 1 母材与焊丝的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of base metal and filler metal (mass fraction)

Material	C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	P	S	Fe
HG785D	0.11	0.6	0.75	0.28	1.4	0.5	0.025	0.015	Bal.
HCr20Ni10Mn7Mo	0.65	20.26	10.23	0.60	6.27	1.03	0.02	0.01	Bal.

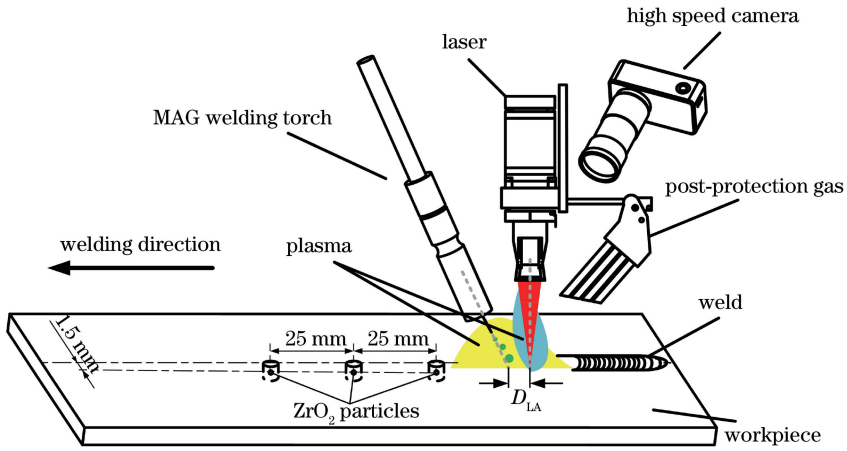


图 1 激光-电弧复合焊接示意图

Fig. 1 Schematic of laser-GMAW hybrid welding

在焊接路径轴线一侧 1.5 mm 处钻孔填埋  $ZrO_2$  颗粒(直径约为 0.8 mm)。放置  $ZrO_2$  颗粒的孔直径为 1.5 mm,深度为 2.0 mm,间隔为 25 mm。通过高速摄像技术,观察示踪粒子  $ZrO_2$  颗粒在熔池表面的运动轨迹,以获得复合焊接熔池表面的流动方向。试验过程中的具体工艺参数如表 2 所示。

表 2 激光-电弧复合焊工艺参数

Table 2 Process parameters of laser-GMAW hybrid welding

Processing parameter	Value
Laser power $P$ /kW	2.5
Arc current $I$ /A	200
Arc voltage $U$ /V	26
Defocusing distance $\Delta f$ /mm	-2
Laser-arc distance $D_{LA}$ /mm	1, 2, 3, 4, 5
Flow rate of shielding gas $f_g$ /( $L \cdot \min^{-1}$ )	30
Flow rate of GMAW shielding gas $f_{wg}$ /( $L \cdot \min^{-1}$ )	15
Welding speed $v$ /( $m \cdot \min^{-1}$ )	0.8

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 激光-电弧复合焊接熔池表面的流动行为

图 2 所示为光丝距为 1 mm 时,高速相机拍摄获取的熔池表面形貌,可见:在 高强钢激光-电弧复合焊接过程中,激光匙孔的位置存在较为明显的波动;示踪粒子绕着电弧作用区流动至后侧,然后沿熔

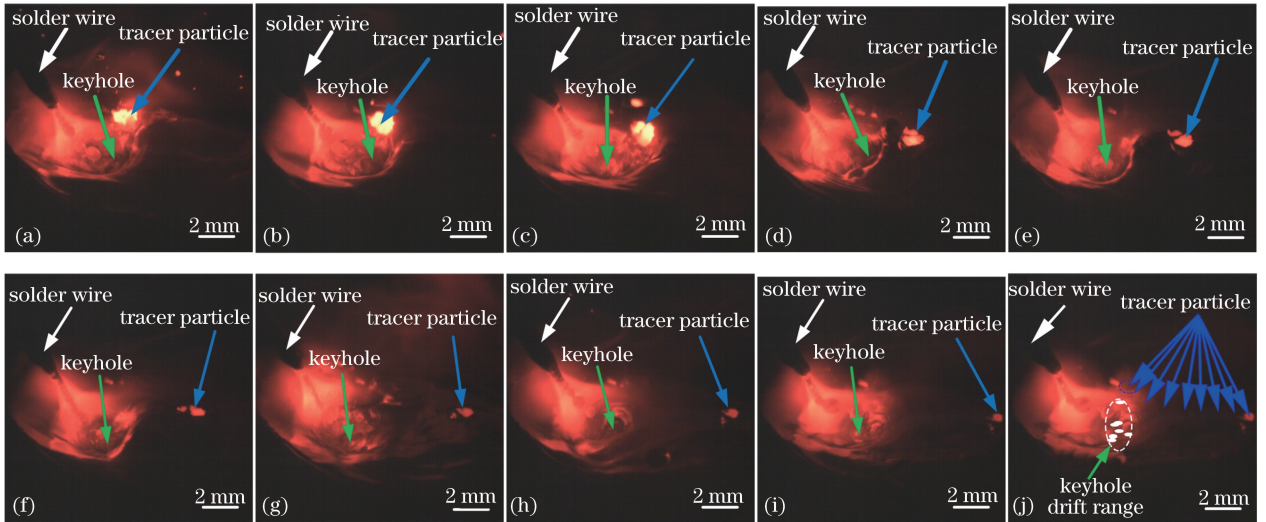


图 2 高强钢激光-电弧复合焊接熔池的表面形貌( $D_{LA}=1$  mm)。(a)  $t=0$  ms;(b)  $t=5$  ms;(c)  $t=10$  ms;(d)  $t=15$  ms;(e)  $t=20$  ms;(f)  $t=25$  ms;(g)  $t=30$  ms;(h)  $t=35$  ms;(i)  $t=40$  ms;(j) 示踪粒子轨迹

Fig. 2 Surface morphology of molten pool during laser-GMAW hybrid welding of high strength steel ( $D_{LA}=1$  mm).

(a)  $t=0$  ms; (b)  $t=5$  ms; (c)  $t=10$  ms; (d)  $t=15$  ms; (e)  $t=20$  ms; (f)  $t=25$  ms; (g)  $t=30$  ms; (h)  $t=35$  ms; (i)  $t=40$  ms; (j) trajectory of tracer particle



池中轴线向熔池后方运动。示踪粒子的运动轨迹及激光匙孔的漂移位置具体如图 2(j)所示。这主要是由于当激光和电弧距离较近时,电弧等离子体会对激光产生吸收、散射和折射现象,又由于电弧等离子体处于一种十分不稳定的状态,从而使得激光束在工件表面的位置发生漂移,故表现为匙孔在焊接熔池中的位置发生波动<sup>[12]</sup>。

此外,从图 2(j)中还可以发现,匙孔上下移动的范围大于其左右移动的范围。这主要是由于除了等离子体对激光束位置产生影响外,焊接熔池液面的高

低起伏也会反映为匙孔的上下移动。因此,在图片上显示为匙孔上下移动的范围大于其左右移动的范围。

当其他参数不变,光丝距增加到 3 mm 时,示踪粒子整体呈现出先顺时针运动而后逆时针运动的轨迹,此过程是较为典型的卡门涡街现象,如图 3 所示。事实上,在焊接过程中,增加光丝距就会弱化电弧等离子体对激光束的影响。因此,在该条件下,高强钢激光-电弧复合焊接过程中激光匙孔的位置相对稳定,且位于电弧作用区的外侧。然而,电弧后侧的流体在经过匙孔时,类似于层流液体绕过一个圆柱

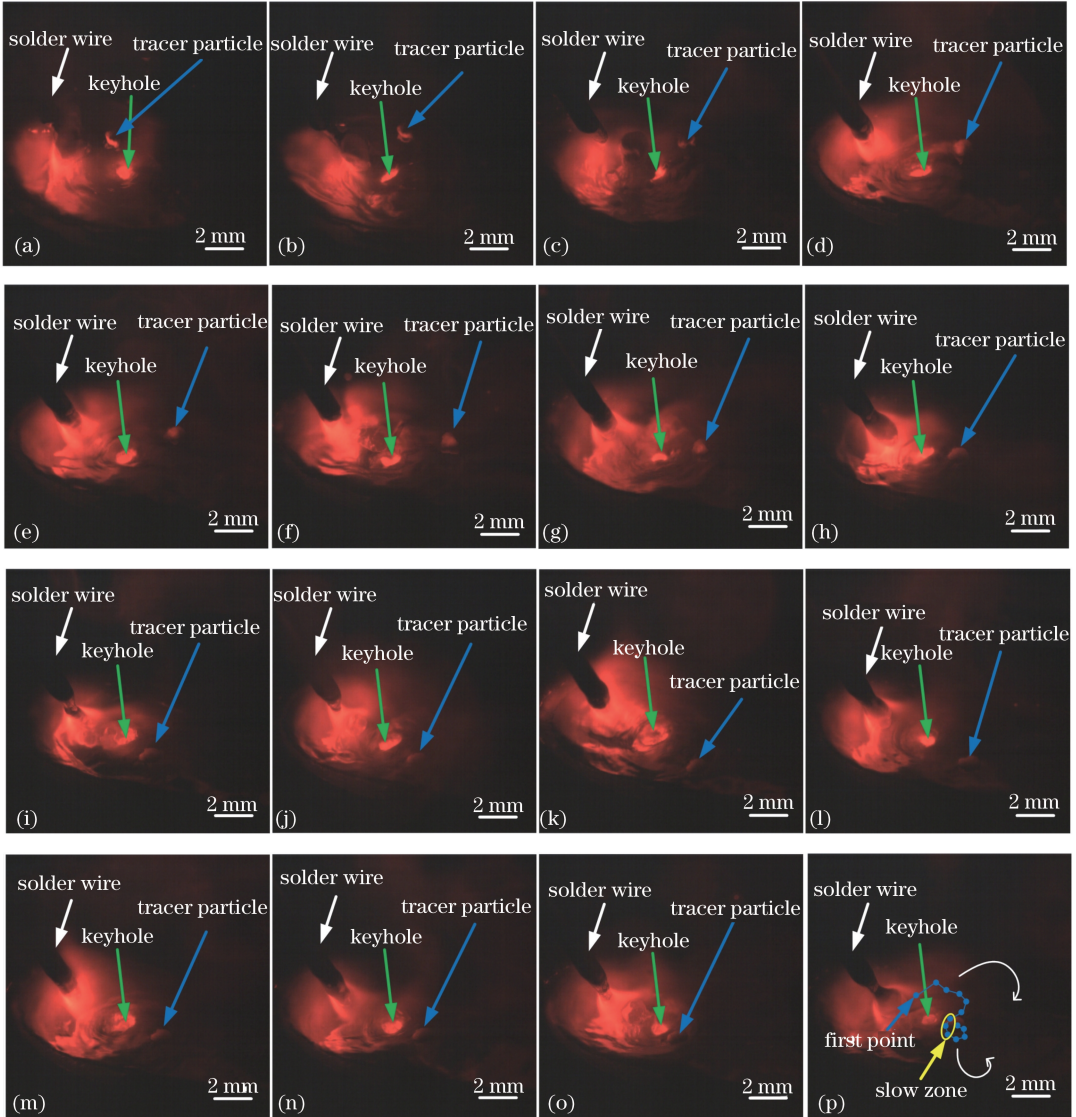


图 3 高强钢激光-电弧复合焊接熔池的表面形貌( $D_{LA} = 3 \text{ mm}$ )。(a)  $t = 0 \text{ ms}$ ; (b)  $t = 5 \text{ ms}$ ; (c)  $t = 10 \text{ ms}$ ; (d)  $t = 15 \text{ ms}$ ; (e)  $t = 20 \text{ ms}$ ; (f)  $t = 25 \text{ ms}$ ; (g)  $t = 30 \text{ ms}$ ; (h)  $t = 35 \text{ ms}$ ; (i)  $t = 55 \text{ ms}$ ; (j)  $t = 75 \text{ ms}$ ; (k)  $t = 95 \text{ ms}$ ; (l)  $t = 100 \text{ ms}$ ; (m)  $t = 105 \text{ ms}$ ; (n)  $t = 110 \text{ ms}$ ; (o)  $t = 115 \text{ ms}$ ; (p) 示踪粒子轨迹

Fig. 3 Surface morphology of molten pool during laser-GMAW hybrid welding of high strength steel ( $D_{LA} = 3 \text{ mm}$ ). (a)  $t = 0 \text{ ms}$ ; (b)  $t = 5 \text{ ms}$ ; (c)  $t = 10 \text{ ms}$ ; (d)  $t = 15 \text{ ms}$ ; (e)  $t = 20 \text{ ms}$ ; (f)  $t = 25 \text{ ms}$ ; (g)  $t = 30 \text{ ms}$ ; (h)  $t = 35 \text{ ms}$ ; (i)  $t = 55 \text{ ms}$ ; (j)  $t = 75 \text{ ms}$ ; (k)  $t = 95 \text{ ms}$ ; (l)  $t = 100 \text{ ms}$ ; (m)  $t = 105 \text{ ms}$ ; (n)  $t = 110 \text{ ms}$ ; (o)  $t = 115 \text{ ms}$ ; (p) trajectory of tracer particles



体,且由于钢液具有较大的黏度,在绕过匙孔区域时会产生摩擦损耗,流速会有所降低,示踪粒子在顺时针运动的结束端出现了一个缓慢运动区域,从而会在匙孔后方形成漩涡。故而,示踪粒子先是绕着焊接匙孔向熔池后方运动,然后折返回来向焊接匙孔方向运动,具体运动轨迹如图 3(p)所示。

由图 4 可见,当光丝距增加到 5 mm 时,在激光-电弧复合焊接过程中,匙孔位置未发生类似于光丝距为 1 mm 时的漂移现象。此外,通过观察示踪粒子 2、3 在熔池中的运动轨迹可以发现,在电弧作用区与激光匙孔中间存在一个低温区域,当示踪粒子的体积较小时可以很容易地穿过该区域(见示踪

粒子 2 的运动轨迹),当示踪粒子体积略微大一点时则很难通过该区域(见示踪粒子 3 的运动轨迹)。观察 30 ms 时刻的照片很容易发现,示踪粒子 3 之所以最终能够穿过该区域主要是电弧在那一瞬间发生了短路过渡,对整个熔池形成了一个较大的冲击力。图 4(m)为上述过程中示踪粒子的具体运动轨迹,观察示踪粒子 3 的运动轨迹不难发现,该示踪粒子在电弧作用区与焊接匙孔间的某一区域出现了停滞现象。同时,由于相机视场的原因,在光丝距为 5 mm 时,焊接匙孔在照片的右侧边缘位置,故在该光丝距条件下,未看到如光丝距 3 mm 时出现的漩涡现象。

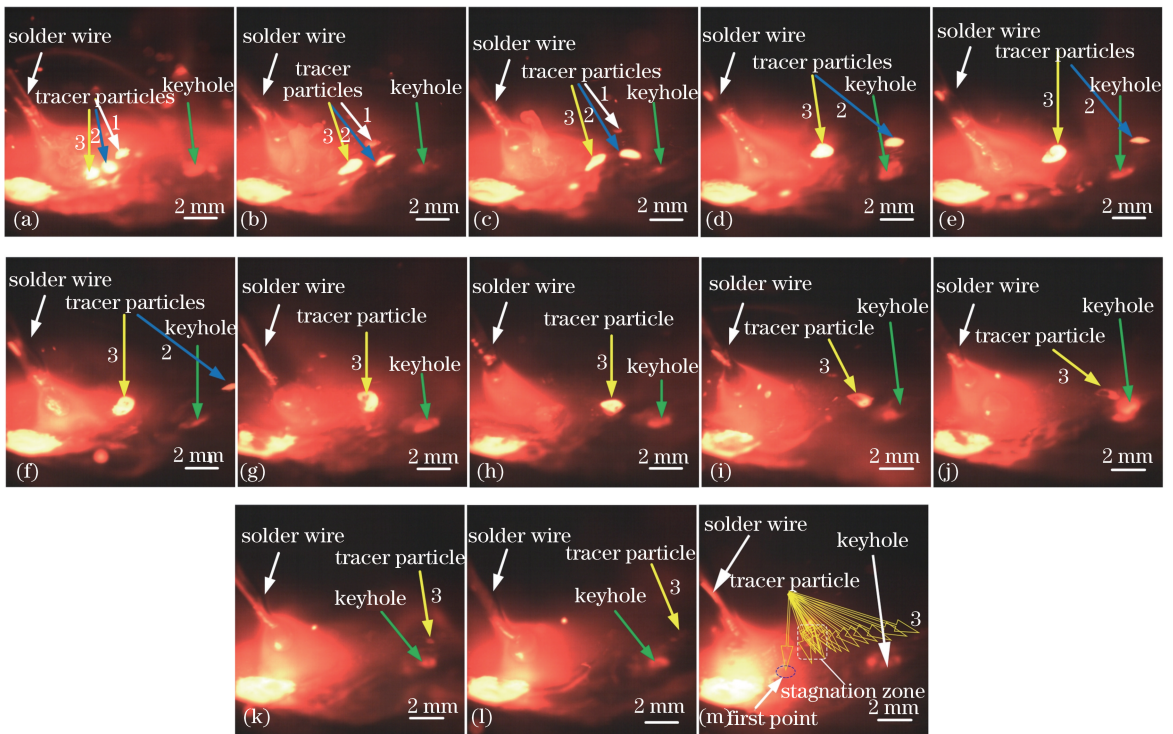


图 4 高强钢激光-电弧复合焊接熔池的表面形貌( $D_{LA}=5\text{ mm}$ )。 (a)  $t=0\text{ ms}$ ; (b)  $t=5\text{ ms}$ ; (c)  $t=10\text{ ms}$ ; (d)  $t=15\text{ ms}$ ; (e)  $t=20\text{ ms}$ ; (f)  $t=25\text{ ms}$ ; (g)  $t=30\text{ ms}$ ; (h)  $t=35\text{ ms}$ ; (i)  $t=40\text{ ms}$ ; (j)  $t=45\text{ ms}$ ; (k)  $t=50\text{ ms}$ ; (l)  $t=55\text{ ms}$ ; (m) 示踪粒子轨迹

Fig. 4 Surface morphology of molten pool in laser-GMAW hybrid welding of high strength steel( $D_{LA}=5\text{ mm}$ ). (a)  $t=0\text{ ms}$ ; (b)  $t=5\text{ ms}$ ; (c)  $t=10\text{ ms}$ ; (d)  $t=15\text{ ms}$ ; (e)  $t=20\text{ ms}$ ; (f)  $t=25\text{ ms}$ ; (g)  $t=30\text{ ms}$ ; (h)  $t=35\text{ ms}$ ; (i)  $t=40\text{ ms}$ ; (j)  $t=45\text{ ms}$ ; (k)  $t=50\text{ ms}$ ; (l)  $t=55\text{ ms}$ ; (m) trajectory of tracer particle

综合上述不同光丝距条件下的激光-电弧复合焊接熔池表面示踪粒子的流动现象可以发现:当光丝距较小时,电弧对激光的吸收、散射、折射等现象明显,出现了较为显著的匙孔位置漂移和电弧等离子体膨胀现象,从而使得电弧作用区面积增加,示踪粒子绕着该区域向熔池后方流动,如图 5(a)所示;随着光丝距增加,电弧对激光的作用减弱,电弧作用区的面积比光丝距为 1 mm 时有所减小,使得焊接匙孔位于

电弧作用区的边缘,匙孔后方区域不再受电弧压力的影响,绕过电弧作用区的熔体流经匙孔时发生反向旋转,从而出现了卡门涡街现象,如图 5(b)所示;当光丝距为 5 mm 时,电弧对激光的作用几乎消失,此时的激光匙孔位置不再发生漂移,且在电弧作用区与焊接匙孔区之间出现了一个较为明显的低温带,导致较大粒径的示踪粒子在该区域难以通过,从而出现了停滞现象,如图 5(c)所示。

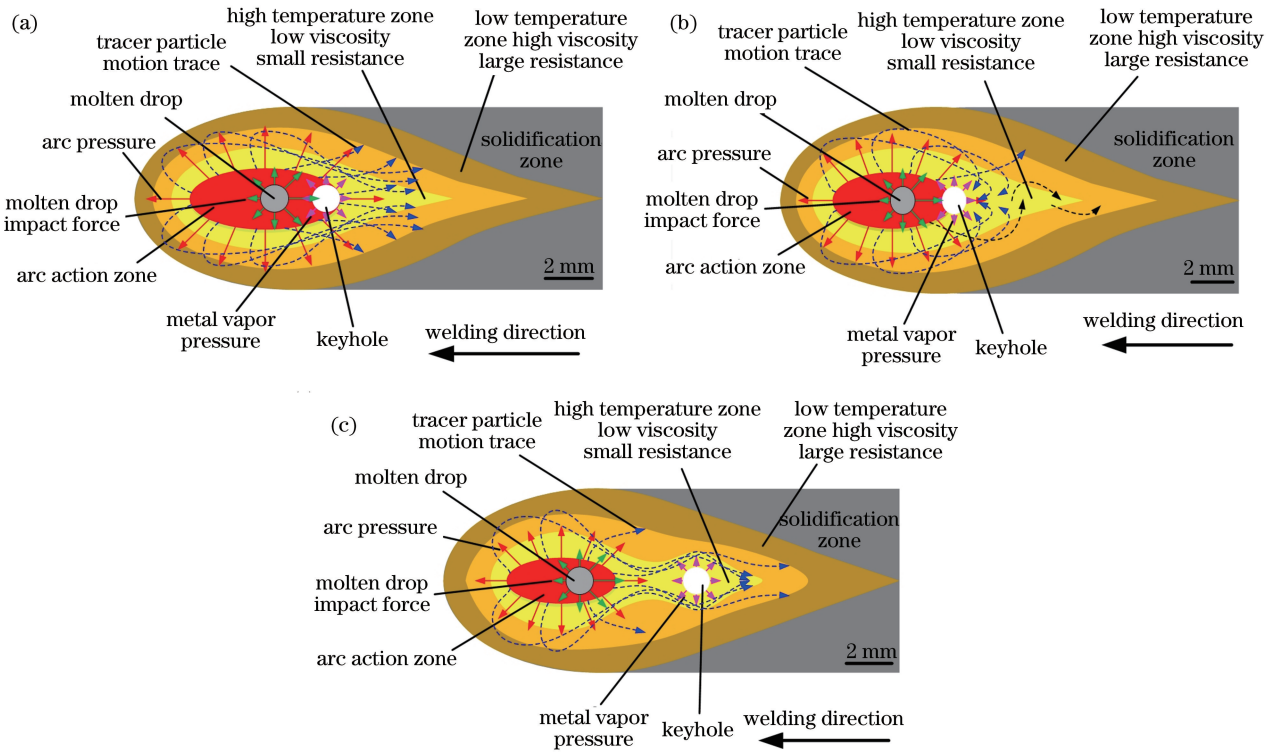


图5 示踪粒子在各作用力下的运动轨迹示意图。(a)  $D_{LA}=1\text{ mm}$ ; (b)  $D_{LA}=3\text{ mm}$ ; (c)  $D_{LA}=5\text{ mm}$

Fig. 5 Schematics of the trajectory of tracer particles at various forces.

(a)  $D_{LA}=1\text{ mm}$ ; (b)  $D_{LA}=3\text{ mm}$ ; (c)  $D_{LA}=5\text{ mm}$

### 3.2 光丝距对熔池表面示踪粒子流动距离的影响

为进一步研究熔池表面的流动行为,对不同光丝距下示踪粒子的流动距离进行对比分析,测量方法如图6所示,即测量示踪粒子在焊接前后的水平位移  $L$ 。

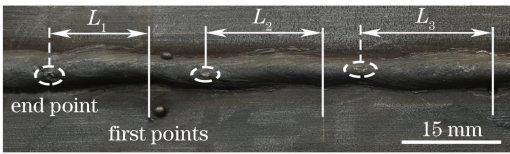


图6 测量示踪粒子流动距离的示意图

Fig. 6 Schematic for measuring the flow distance of a tracer particle

图7所示为高强钢激光-电弧复合焊接时,光丝距对熔池表面示踪粒子流动距离的影响,可见:在光丝距由1 mm增加到2 mm的阶段,示踪粒子流动距离的变化相对较大;在其余阶段显示,光丝距对焊接熔池表面示踪粒子运动距离的影响较小。由于示踪粒子的流动距离主要由示踪粒子的流动速度和熔池的液相停留时间决定,而示踪粒子的流动速度受熔滴进入熔池一瞬间所形成的冲击力的影响较大,因此,从熔滴过渡频率和熔池的液相停留时间两个方面来分析光丝距对示踪粒子流动距离的影响原

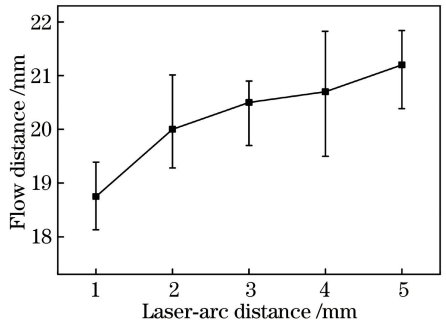


图7 光丝距对示踪粒子流动距离的影响  
Fig. 7 Effect of laser-arc distance on flow distance of tracer particle

理。图8所示为光丝距对高强钢激光-电弧复合焊接过程中熔滴过渡周期影响结果的非线性拟合曲线,可见:随着光丝距由1 mm增加到2 mm,熔滴过渡周期由9.2 ms降至5 ms左右,变化较为明显;当光丝距为2~5 mm时,熔滴过渡周期始终在5 ms左右。

为进一步研究熔池的变化特征,利用SYSWELD焊接仿真软件,并借助前期开发的旋转组合热源模型和有限元网格模型对高强钢复合焊接过程中熔池的温度场进行仿真计算<sup>[13]</sup>,获得了如图9(a)所示的不同光丝距下激光-电弧复合焊接过

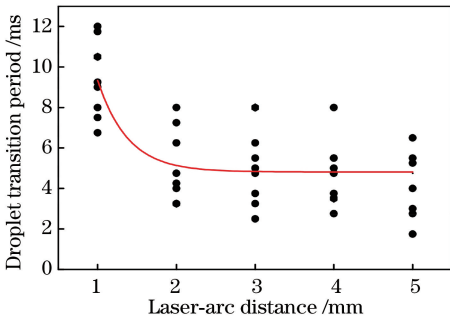


图 8 光丝距对熔滴过渡周期的影响  
Fig. 8 Effect of laser-arc distance on transition period of droplets

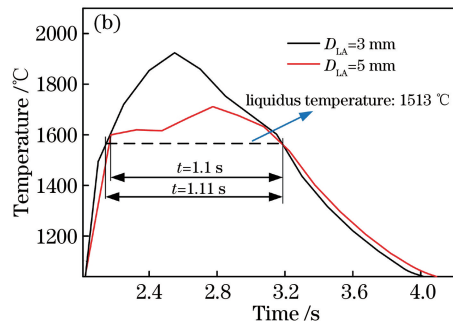
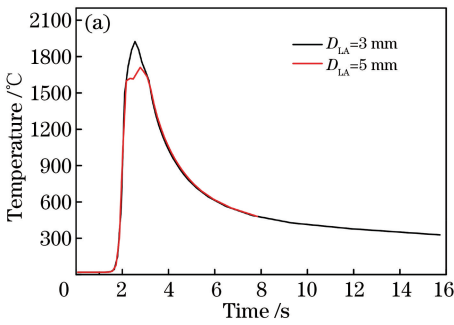


图 9 仿真得到的不同光丝距下激光-电弧复合焊接的热循环曲线。(a) 全图；(b) 局部放大图  
Fig. 9 Simulated thermal cycle curves of laser-GMAW hybrid welding at different laser-arc distances.

(a) Whole view; (b) partial view

### 3.3 光丝距对焊缝成形的影响

图 10 为不同光丝距下高强钢激光-电弧复合焊接焊缝的形貌,可见:当光丝距为 1 mm 时,焊缝底部存在气孔缺陷。这是因为两热源距离过近时,电弧等离子体对激光的散射、折射和吸收作用强烈,致使匙孔位置出现漂移,如图 2(j) 所示,大大增加了匙孔坍塌的风险,因此会在底部形成工艺性气孔<sup>[14-16]</sup>。当光丝距为 3 mm 时,此时激光能量与电弧能量达到最佳的耦合效果,一方面激光等离子体为电弧提供了良好的导电通道,减小了

弧柱的电阻,降低了场强,将电弧压向匙孔,提高了电弧的稳定性<sup>[17]</sup>;另一方面电弧对激光等离子体具有一定的稀释作用,减小了等离子体对激光的影响,匙孔的稳定性得到增强,且熔池内出现卡门涡街现象,熔体的流动性提高,焊缝成形良好。当光丝距增加至 5 mm 时,过大的热源间距使光致等离子体与电弧等离子体逐渐分离,此时两热源间的相互作用减弱,激光束作用于已冷却的熔池中,工件表面对激光的吸收率降低,致使焊缝熔深显著减小<sup>[18]</sup>。

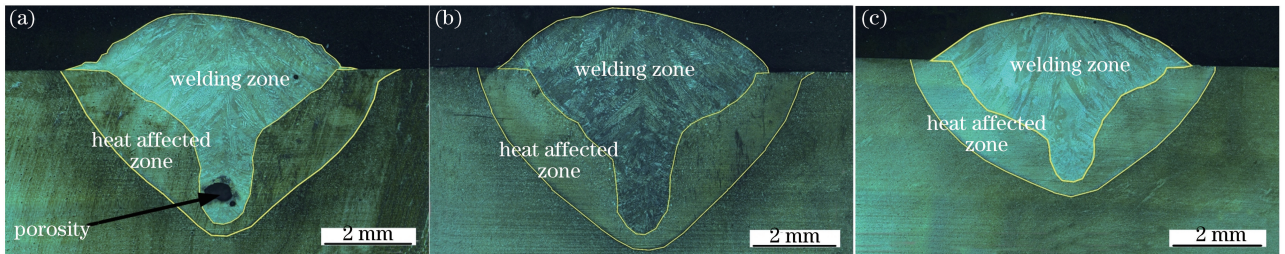


图 10 不同光丝距下激光-电弧复合焊接的焊缝形貌。(a)  $D_{LA}=1$  mm; (b)  $D_{LA}=3$  mm; (c)  $D_{LA}=5$  mm  
Fig. 10 Laser-GMAW hybrid welding seam morphology at different laser-arc distances.

(a)  $D_{LA}=1$  mm; (b)  $D_{LA}=3$  mm; (c)  $D_{LA}=5$  mm



## 4 结 论

在 高 强 钢 激 光-电 弧 复 合 焊 接 中,光 丝 距 的 改 变 对 焊 接 熔 池 流 动 特 征 及 焊 缝 成 形 等 具 有 重 要 影 响。当 光 丝 距 为 1 mm 时,由 于 激 光 束 与 电 弧 位 置 太 近,电 弧 对 激 光 的 散 射、折 射 和 吸 收 作 用 强 烈,使 得 激 光 匙 孔 位 置 波 动 较 大,导 致 匙 孔 很 容 易 发 生 闭 合,焊 缝 底 部 存 在 明 显 的 气 孔 缺 陷。当 光 丝 距 为 3 mm 时,激 光 能 量 与 电 弧 能 量 达 到 最 佳 的 耦 合 效 果,激 光 匙 孔 较 为 稳 定,在 熔 池 表 面 出 现 了 典 型 的 卡 门 涡 街 现 象,熔 体 流 动 性 较 强,焊 缝 成 形 良 好,焊 接 熔 深 较 深。当 光 丝 距 为 5 mm 时,在 电 弧 作 用 区 与 激 光 匙 孔 之 间 存 在 明 显 的 低 温 区 域,小 颗 粒 示 踪 粒 子 能 够 顺 利 通 过,但 大 颗 粒 示 踪 粒 子 只 有 在 电 弧 发 生 短 路 过 渡 时 才 能 通 过 该 低 温 区。同 时,该 低 温 区 的 存 在 也 证 明 了 在 该 光 丝 距 下 激 光 与 电 弧 两 热 源 间 的 耦 合 效 率 下 降,焊 接 熔 深 明 显 减 小。

## 参 考 文 献

- [1] Stauffer H. Laser hybrid welding in the automotive industry[J]. *Welding Journal*, 2007, 86(10): 36-40.
- [2] Roepke C, Liu S, Kelly S, *et al.* Hybrid laser arc welding process evaluation on DH36 and EH36 steel [J]. *Welding Journal*, 2010, 89(7): 140S-150S.
- [3] Cui L, He D Y, Li X Y, *et al.* Effects of welding direction on weld shape of fiber laser-MIG hybrid welded titanium alloys [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(1): 0103002.  
崔丽, 贺定勇, 李晓延, 等. 焊接方向对光纤激光-MIG 复合焊接钛合金焊缝成形的影响[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0103002.
- [4] Xiao R S, Wu S K. Progress on laser-arc hybrid welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(11): 1680-1685.  
肖荣诗, 吴世凯. 激光-电弧复合焊接的研究进展 [J]. *中国激光*, 2008, 35(11): 1680-1685.
- [5] Xu C Y, Liu S Y, Zhang H, *et al.* Droplet transition characteristics and force analysis of laser-arc hybrid welding process [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(6): 154-161.  
徐春鹰, 刘双宇, 张宏, 等. 激光-电弧复合焊过程的熔滴过渡特征与受力分析[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(6): 154-161.
- [6] Cho M H, Farson D F. Simulation study of a hybrid process for the prevention of weld bead hump formation[J]. *Welding Journal*, 2007, 86(9): 253-s-262-s.
- [7] Zhao L, Tsukamoto S, Arakane G, *et al.* Distribution of wire feeding elements in laser-arc hybrid welds [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0406006.  
赵琳, 塚本进, 荒金吾郎, 等. 激光-电弧复合焊接合金元素分布的研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0406006.
- [8] Zhao L, Tsukamoto S, Arakane G, *et al.* Influence of shielding oxygen content on weld homogeneity and fluid flow in laser-arc hybrid welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 0603006.  
赵琳, 塚本进, 荒金吾郎, 等. 激光-电弧复合焊接保护气体 O<sub>2</sub> 含量对焊缝均匀性和熔池流动的影响 [J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0603006.
- [9] Liu S Y, Zong S S, Liu F D, *et al.* Behaviors of element density distribution and melting metal flow in CO<sub>2</sub> laser-MAG hybrid welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(1): 17-20, 113-114.  
刘双宇, 宗士帅, 刘凤德, 等. 激光-MAG 复合焊熔质分布与熔池流动特征 [J]. *焊接学报*, 2013, 34(1): 17-20, 113-114.
- [10] Liu X Y, Sun F L, Wang X Y, *et al.* Arc characteristics and welding pool morphology of Nd:YAG laser + CMT arc hybrid welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(3): 81-84, 117.  
刘西洋, 孙凤莲, 王旭友, 等. Nd:YAG 激光+CMT 复合热源电弧形态和熔池形貌 [J]. *焊接学报*, 2011, 32(3): 81-84, 117.
- [11] Ma G L, Li L Q, Chen Y B. Comparative study of molten pool behavior and weld formation characteristic in single/dual beam laser welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0202002.  
马国龙, 李俐群, 陈彦宾. 单/双光束激光焊接熔池行为及焊缝成形特性比较 [J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0202002.
- [12] Acherjee B. Hybrid laser arc welding: state-of-art review [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 99: 60-71.
- [13] Zhang T, Zhang H, Liu J. Laser-arc hybrid welding heat source model for numerical simulation [J]. *Applied Laser*, 2016, 36(1): 58-62.  
张拓, 张宏, 刘佳. 激光-电弧复合焊接数值模拟的热源模型 [J]. *应用激光*, 2016, 36(1): 58-62.
- [14] Tucker J D, Nolan T K, Martin A J, *et al.* Effect of travel speed and beam focus on porosity in alloy 690 laser welds [J]. *Journal of Metals*, 2012, 64(12): 1409-1417.
- [15] Kawahito Y, Mizutani M, Katayama S. Elucidation of high-power fibre laser welding phenomena of stainless steel and effect of factors on weld geometry

- [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(19): 5854-5859.
- [16] Wang H Y, Sun J, Liu L M. The formation of laser gas-arc composite high-speed welding pores in 6061-T6 aluminum alloy and its control mechanism [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 0302001.  
王红阳, 孙佳, 刘黎明. 6061-T6 铝合金激光-电弧复合高速焊气孔形成及控制机制[J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0302001.
- [17] Chen Y B, Chen J, Li L Q, *et al.* Arc shape and weld characteristics during laser-arc interaction [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(1): 55-56, 60.  
陈彦宾, 陈杰, 李俐群, 等. 激光与电弧相互作用时的电弧形态及焊缝特征 [J]. 焊接学报, 2003, 24(1): 55-56, 60.
- [18] Tian X B. Study on TIG-laser hybrid welding process for medium thick aluminum alloy[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013: 35-36.  
田新兵. 中厚板铝合金 TIG-激光复合焊接工艺研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013: 35-36.