

端接接头激光-MAG 复合焊熔滴过渡与气孔特征分析

雷正龙, 黎炳蔚*, 周恒, 何旺

哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 通过端接接头的激光-MAG 复合焊接实验,研究了焊接方式、光丝间距、能量输入等对熔滴过渡行为及气孔缺陷特征的影响规律。研究表明:激光-MAG 复合焊接比单激光焊更适用于端接接头的焊接,可以改善焊缝的成形,抑制气孔缺陷;激光引导方式优于电弧引导方式,得到的焊缝内的气孔缺陷较少;适当增加光丝间距有利于焊接过程的稳定性;电弧能量输入主要影响焊缝形态,而激光能量增加则会阻碍熔滴过渡,并使焊缝底部产生气孔缺陷。

关键词 激光技术; 激光-电弧复合焊; 熔滴过渡; 气孔缺陷

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0302007

Analysis of Droplet Transfer and Porosity Characteristics in Laser-MAG Hybrid Welding of Edge Joint

Lei Zhenglong, Li Bingwei*, Zhou Heng, He Wang

State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract The effects of welding mode, laser-wire distance, energy input on droplet transfer behavior and the weld porosity defects are studied by laser-MAG hybrid welding process of edge joint. The research results show that laser-MAG hybrid welding is more suitable for the edge joint because of the improvement of weld formation and inhabitation of porosity. Laser leading mode is better than arc leading mode for the less weld porosity. A large distance of laser-wire is beneficial for the stability of welding process. The arc energy input mainly affects the weld formation, while the increase of laser power prevents droplet transfer and increases porosity defects at the bottom of the weld.

Key words laser technique; laser-arc hybrid welding; droplet transfer; porosity defect

OCIS codes 140.3390; 160.3900

1 引言

兵器行业车辆中的机油箱、柴油箱等薄壁容器类产品,其结构件主要由 1.5~2 mm 的薄壁低碳钢板装焊而成,端接接头是其焊接的主要接头形式。目前采用的焊接方法主要为手工电弧焊等方法,采用传统的焊接方法容易出现焊接变形大、焊接应力控制难度大、焊缝质量和外观一致性难以保证等问题^[1],而且在产品使用过程中偶尔会出现焊缝渗漏现象,焊缝质量的可靠性有待进一步提高。凌伟等^[2]对马氏体和奥氏体不锈钢钨极氩弧焊(TIG)端

接接头的失效原因进行了分析,认为热输入较大造成较大应力,并且焊缝熔合线的有效承载面积不足,从而使其成为焊缝的薄弱点。李西恭等^[3]研究了薄壁 GH169 合金端接接头 TIG 焊和微束等离子弧焊的焊接缺陷,认为接头失效与母材状态的关联较小,而与端接接头的结构特征有关,并且由于两薄壁中间界面处的热输入较小,故其中存在的氧化物等无法熔化逸出,这与焊接方法、工艺参数的选择有关。与传统的焊接方法相比,激光以及激光-电弧复合焊接具有焊接速度快、生产效率高、焊缝深宽比大、热输入小、接头热影响区小、焊接变形小等优点^[4-5],更

收稿日期: 2018-10-18; 修回日期: 2018-11-26; 录用日期: 2018-12-05

基金项目: 技术基础科研项目(JSCG2016603B001)

* E-mail: 282033441@qq.com

适用于端接接头的焊接。前期采用单激光焊接的方法对低碳钢薄板进行焊接实验后发现,单激光焊接对对中精度的要求很高,焊缝中心容易出现下塌,且存在较多缺陷,致使接头的力学性能有所降低,因此可采用激光-电弧复合的方法进行焊接。

在激光-熔化极活性气体保护电弧焊(MAG)的复合焊接过程中,激光的加入产生了大量的光致等离子体,其可与电弧等离子体发生相互作用,改变熔滴的受力状态,使熔滴的过渡行为发生变化^[6-7]。陈彦宾等^[8]利用激光对电弧的吸引和收缩作用,通过减小光丝间距来控制熔滴过渡到熔池中。崔博等^[9]研究了保护气体组成对激光-电弧复合焊缝形貌、熔滴过渡特征和气孔缺陷的影响,但并没有直接分析熔滴过渡与气孔形成规律之间的关系。Zhang等^[10]对比了激光-冷金属过渡(CMT)复合焊与激光-MAG复合焊接中飞溅产生的原因,认为由于CMT采用了平稳的短路过渡形式,减小了熔滴对熔池的冲击以及电弧与激光之间的相互干扰,因此飞溅和

气孔均显著减少。

本课题组通过高速摄像拍摄与气孔缺陷检测等方式,重点研究了激光-MAG焊接过程中熔滴过渡行为的变化,并对端接接头中的气孔分布规律进行对比分析,为端接接头的激光-MAG电弧复合焊接提供实验数据与理论基础。

2 实验材料及方法

本实验采用08F沸腾钢为母材进行焊接,试件尺寸为300 mm×50 mm×2 mm,母材中碳的质量分数约为0.08%。实验钢属于低碳钢,强度、硬度很低,但塑性、韧性极高,具有良好的冷变形性和焊接性。焊丝选用直径为1.2 mm的ER304奥氏体不锈钢焊丝。08F沸腾钢母材和ER304奥氏体不锈钢焊丝的成分如表1所示。焊前对母材进行适当的弯板加工,用角磨机除去铁锈等杂质,并用丙酮等有机溶剂进行清洗,清除表面油污,防止焊接过程不稳定。

表1 母材及焊丝的化学成分

Table 1 Chemical composition of base metal and filler wire

Material	Mass fraction / %								
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Cu	Ni	Mo
08F	0.08	0.40	0.03	0.035	0.035	0.10	0.20	0.30	—
ER304	0.05	1.79	0.48	0.013	0.022	19.72	0.06	9.40	0.005

焊接系统所使用的主要设备为美国IPG公司生产的YLS-10000光纤激光器、德国KUKA机器人、德国Precitec公司的YW52激光焊接头、奥地利Fronius公司的TPS4000型MAG电弧焊机以及自制数控行走机构;光纤激光器发射激光的波长约为1070 nm,最小光斑直径为0.36 mm,焊机最大焊接电流为400 A。为准确、清晰地获得熔滴过渡过程的图像特征,采用湖南科天健光电技术有限公司的CR5000型高速摄像机对焊接过程进行拍摄。

激光-MAG复合焊接示意图如图1(a)所示,端接接头如图1(b)所示。激光倾角为85°,焊枪与激光头的夹角为45°,实验采用的焊接电流为70 A,电压为14.5 V左右,焊接速率为1.2 m/min,保护气体是由体积分数为80%的氩气和体积分数为20%的CO₂组成的混合气体,气体流量为25 L/min,激光功率为2000~3000 W,光丝间距为-1~+2 mm,离焦量为+10 mm。焊后采用光学显微镜对焊缝截面进行观察,通过X光检测观察气孔的分布情况。

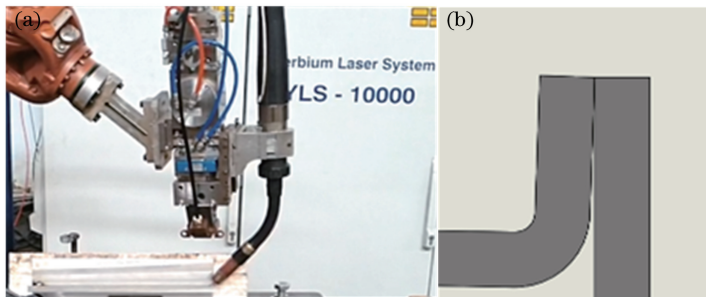


图1 激光-MAG复合焊接示意图。(a)设备;(b)端接接头

Fig. 1 Laser-MAG hybrid welding equipment and schematic of edge joint. (a) Equipment; (b) edge joint

3 实验结果与讨论

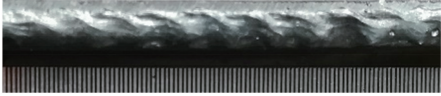
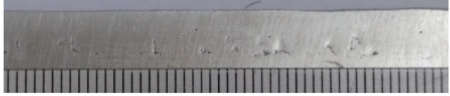
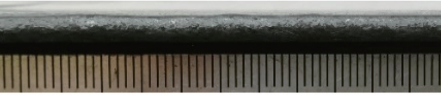

3.1 端接接头的焊接特性

表 2 显示了采用激光焊及激光-MAG 复合焊这两种方法焊接时的焊缝成形及纵截面气孔分布,对比不同焊接方法的焊缝成形可以发现:单采用激光焊进行焊接时,由于母材熔化,且没有其他填充材料的加入,试件下方存在一定间隙,导致熔池塌陷,且激光光斑尺寸较小,因此母材两侧极易出现少量的未熔化区域,且焊缝表面存在较大波动;采用激光与小电流的电弧进行复合焊接(光丝间距为 1 mm,电

弧电流为 70 A)时,不仅可以通过扩大焊缝上部区域的面积来克服其装配问题,也可以增大其熔合面的尺寸,该种复合焊接更适用于端接接头的焊接。从焊缝的纵截面来看:激光焊所产生的气孔主要是匙孔坍塌导致的工艺类气孔,其直径一般超过了 0.2 mm,分布于焊缝中心,由于熔深较大,底部间隙气体可能会混入熔池,导致焊缝下侧存在较多气孔;当采用激光-电弧复合的方式进行焊接时,由于电弧的加入缩短了熔池的冷却时间,增大了熔池长度,故而熔池内部的气泡得以逸出,从而抑制了气孔缺陷的产生。

表 2 不同焊接方法下的焊缝成形与气孔缺陷

Table 2 Weld formation and porosity defects with different welding methods

Welding method	Weld formation	Porosity
Laser welding		
Laser-MAG hybrid welding		

在端接接头的焊接中,激光-电弧复合焊接的方式优于单激光焊,可以获得更好的焊缝成形质量,并可以抑制气孔缺陷,但当激光与电弧耦合的参数发生变化时,焊缝内部同样可能会产生气孔缺陷。图 2 为端接接头的激光-MAG 复合焊接过程,由于接头尺寸的限制,熔池无法向两侧铺展,熔池液面高度

大于对接焊接时的高度,熔池的起伏波动也更剧烈,因此更容易导致匙孔不稳定。

另外,由于端接接头的焊接近似于对接接头未焊透时的情况,气泡难以从背面逸出,而向上逸出的路径又比较较长,因此易滞留在焊缝中,从而形成了气孔缺陷。

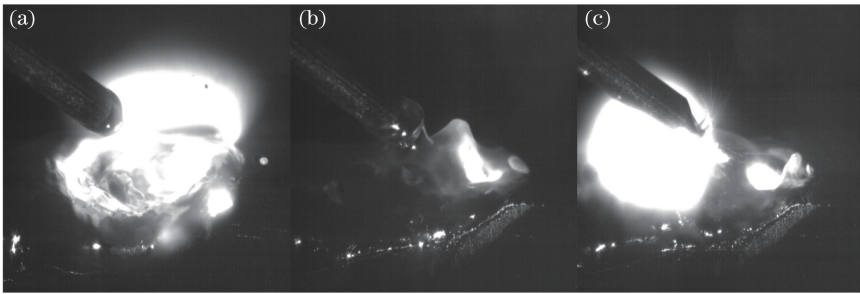


图 2 端接接头的激光-MAG 复合焊接过程。(a)燃弧;(b)短路;(c)起弧

Fig. 2 Laser-MAG hybrid welding process of edge joint. (a) Arcing; (b) short circuit; (c) arc striking

气孔缺陷的种类主要为工艺类气孔,均由匙孔坍塌造成,它的产生与匙孔的稳定性密切相关。在激光-MAG 复合焊接过程中,焊接方式、光丝间距等会直接影响激光作用的效果,能量输入则决定了匙孔深度和熔池的冷却速率,影响气孔的产生和气泡的逸出条件,因此本课题组对焊接方式、光丝间距、能量输入等参数和熔滴过渡与气孔分布特征之间的关系进行分析。

3.2 焊接方式对端接接头激光-MAG 复合焊接的影响

在激光-MAG 复合焊接过程中,焊接方式是一个重要的参量,不同的焊接方式对应的工作模式不同,激光与电弧相互作用的程度也存在差异。当激光在前时称为激光引导,当电弧在前时称为电弧引导。图 3 所示为激光引导和电弧引导这两种焊接方式的示意图,图 4 为两种焊接方式下获

得的焊缝横截面的金相照片。可见:两种焊接方式下的焊缝表面成形并无明显差异;与激光引导相比,电弧引导时获得的熔深提高了 15%,但焊缝底部存在较大的气孔缺陷(宽度达到 0.5 mm)。

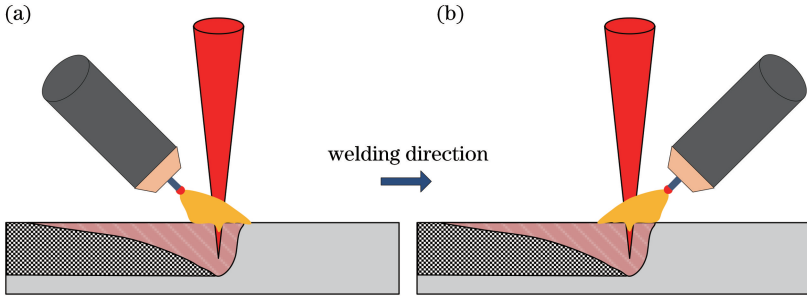


图 3 不同焊接方式示意图。(a)激光引导;(b)电弧引导

Fig. 3 Schematics of different welding modes. (a) Laser leading; (b) arc leading

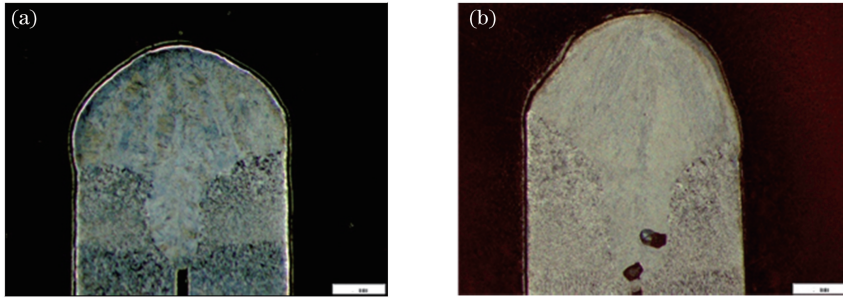


图 4 不同焊接方式下获得的焊缝截面的金相照片。(a)激光引导;(b)电弧引导

Fig. 4 Metallographs of weld cross-section obtained at different welding modes. (a) Laser leading; (b) arc leading

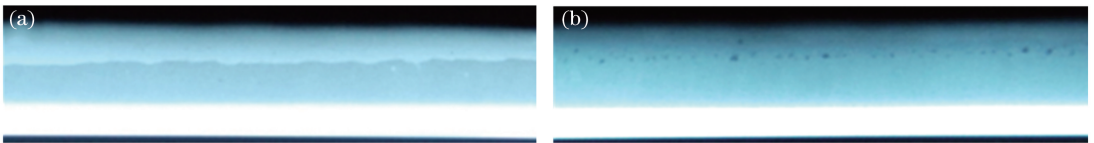


图 5 不同焊接方式下获得的焊缝的 X 光照片。(a)激光引导;(b)电弧引导

Fig. 5 Radiographs of weld obtained at different welding modes. (a) Laser leading; (b) arc leading

图 6 和图 7 分别是电弧引导和激光引导时的熔滴过渡过程, T 为焊接过程中的某一时刻。电弧引导时,熔滴过渡完成后,熔体由匙孔两侧向后流动需要一定的时间,匙孔前方的熔池高度上升,而后,电弧受到熔池吸引,主要作用于熔池与母材交界处,电弧压力直接作用于匙孔前壁的熔池,导致匙孔周围的熔体剧烈波动,在匙孔周围和内壁处产生飞溅,可能会导致激光匙孔不稳定而产生气孔缺陷。激光引导时,电弧主要作用于激光匙孔的上方和后方,会对匙孔后方的熔池造成一定压力,熔池向下凹陷,在这种小电流情况下,熔滴体积较小,后方熔池基本保持平稳,激光吸收电弧能量,激光匙孔面积增大,有利于其保持稳定;同时电弧在后方进行加热,降低了冷

图 5 为两种焊接方式下获得的焊缝的 X 光检测照片,可以发现:激光引导时,焊缝中的气孔数量很少,且气孔尺寸较小;电弧引导时,气孔主要分布在焊缝底部,且数量较多。

却速率,气泡有充分的时间逸出。

此外,对熔滴过渡图像进行统计分析,图 8 是两种焊接方式下的图像亮度曲线,可以看出:激光引导时,各个峰之间的距离比电弧引导时的大,表明熔滴过渡平均周期比较长。这主要是由于电弧引导时匙孔前壁的熔体起伏较大,当液面升高时会提前接触熔滴,从而造成短路过渡。另外,焊接速率较快,焊丝的移动会导致液桥较早断开。经计算可知,激光引导时的熔滴平均过渡周期为 32 ms,而电弧引导时的熔滴平均过渡周期只有 22 ms,熔滴过渡速度加快了 50%,过渡频次的增加可能会导致匙孔失稳的概率增加。另外,电弧引导下的平均峰值较高,说明电弧形态扩张,激光对电弧吸引压缩的作用相对较弱。

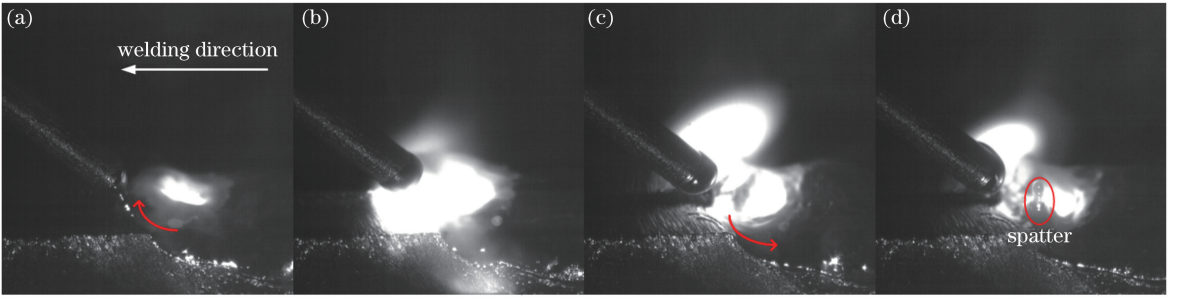


图 6 电弧引导时的熔滴过渡过程。(a) $T+0$ ms; (b) $T+2.2$ ms; (c) $T+4.8$ ms; (d) $T+8.4$ ms

Fig. 6 Droplet transfer process for arc leading. (a) $T+0$ ms; (b) $T+2.2$ ms; (c) $T+4.8$ ms; (d) $T+8.4$ ms

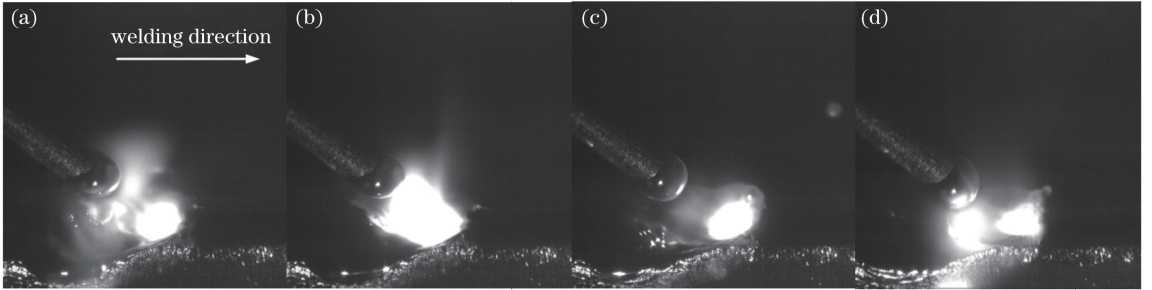


图 7 激光引导时的熔滴过渡过程。(a) $T+0$ ms; (b) $T+0.8$ ms; (c) $T+5.2$ ms; (d) $T+13.8$ ms

Fig. 7 Droplet transfer process for laser leading. (a) $T+0$ ms; (b) $T+0.8$ ms; (c) $T+5.2$ ms; (d) $T+13.8$ ms

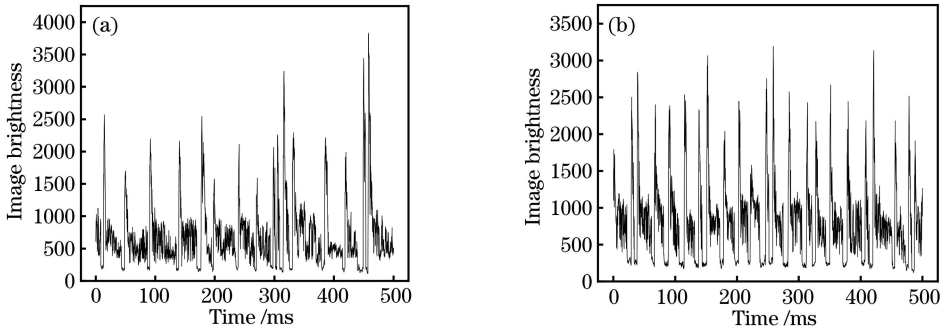


图 8 不同焊接方式下的图像亮度曲线。(a)激光引导;(b)电弧引导

Fig. 8 Image brightness curves at different welding modes. (a) Laser leading; (b) arc leading

3.3 光丝间距对端接头激光-MAG 复合焊接的影响

在激光-MAG 复合焊接过程中,光丝间距是一个十分重要的参数,改变激光束与焊丝尖端之间的距离,就意味着改变了激光与电弧能量的耦合效果,使得作用于熔滴下方的复合电弧电磁收缩力以及由

激光匙孔产生的反作用力的大小和方向均发生了改变,从而改变了复合焊接过程中熔滴的过渡特性和焊接质量。图 9 和图 10 分别为光丝间距对气孔缺陷、熔滴过渡周期和熔深的影响规律,可见:随着光丝间距从 -1 mm 增大到 2 mm,气孔缺陷呈现先增加后减少的趋势,熔滴过渡平均周期从 125 ms 减小

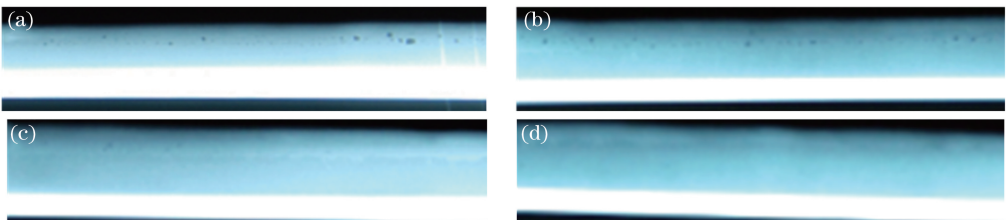


图 9 光丝间距对气孔缺陷的影响。(a) -1 mm; (b) 0 mm; (c) 1 mm; (d) 2 mm

Fig. 9 Effect of laser-wire distance on porosity. (a) -1 mm; (b) 0 mm; (c) 1 mm; (d) 2 mm

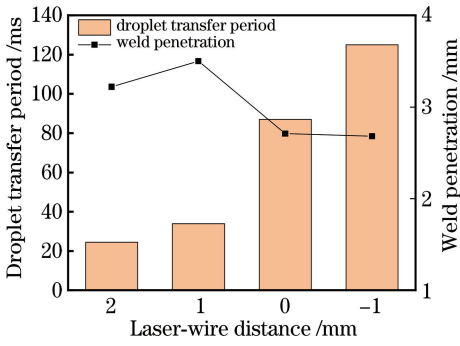


图 10 光丝间距对熔滴过渡周期和熔深的影响
Fig. 10 Effects of laser-wire distance on droplet transfer period and weld penetration

到23 ms, 缩短了81.6%, 而熔深则随着焊丝对

激光干扰的减小(光丝间距由-1 mm增大到1 mm)而增加, 但当光丝间距大于1 mm后, 由于激光与电弧的耦合作用减弱, 熔深有所下降。

图 11 是光丝间距为-1 mm 时的熔滴过渡图像, 平均过渡周期为 125 ms。由于激光束部分照射在焊丝及熔滴上, 熔深有所下降, 并导致焊丝前端熔化, 快速形成较大尺寸的光亮熔滴。在重力、匙孔蒸气反作用力、电磁收缩力的作用下, 熔滴飘浮于激光匙孔上方, 直至形成较粗的短路液桥, 之后爆断并产生较多飞溅。在熔滴阻碍激光能量以及大量液态金属的加入导致熔池后方发生较大波动的情况下, 匙孔失稳, 产生气孔, 但由于过渡频率很低, 因此气孔数量较少。

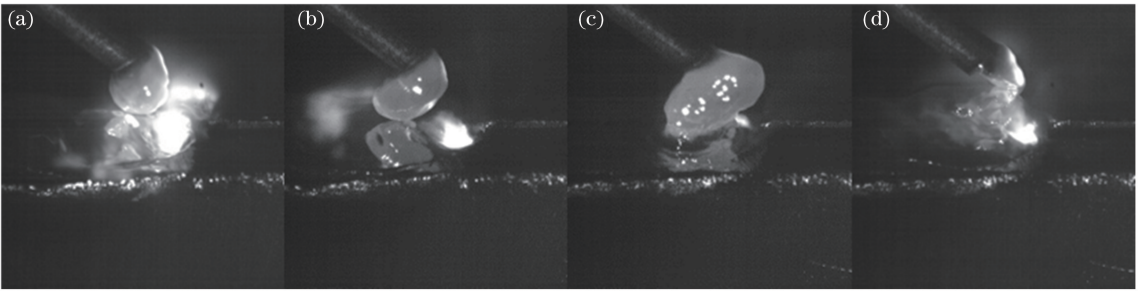


图 11 光丝间距为-1 mm 时的熔滴过渡过程。(a) $T+0$ ms; (b) $T+29.6$ ms; (c) $T+87.2$ ms; (d) $T+104$ ms

Fig. 11 Droplet transfer process when laser-wire distance is -1 mm.

(a) $T+0$ ms; (b) $T+29.6$ ms; (c) $T+87.2$ ms; (d) $T+104$ ms

图 12 是不同光丝间距下的熔滴过渡特征。由图 12(b)可以看出: 当光丝间距为 0 mm 时, 由于熔滴靠近激光匙孔, 金属蒸气的反作用力和电磁力等的合力大于熔滴的重力, 导致熔滴被托起并被拉长, 沿焊丝上方向上流动, 而焊丝受热不断熔化, 使得熔滴的体积不断增加, 最终形成较大的熔滴, 并直接过渡于匙孔后半部分, 激光能量被部分阻碍, 从而导致焊缝熔深较小且气孔缺陷较多。由图 12(c)可以看出: 当光丝间距为 1 mm 时, 熔滴受到的匙孔金属蒸气的反作用力减小(方向改变), 不足以抵消重力的

影响, 熔滴基本呈半球形并保持在轴线方向上, 熔滴过渡周期显著缩短。在此参数下并未发现明显的飞溅, 熔池未发生剧烈震荡, 熔滴过渡周期波动幅度小, 熔滴短路过渡的整个过程非常稳定, 因而焊缝成形均匀。由图 12(d)可以看出: 当光丝间距为 2 mm 时, 焊丝端部距离激光束较远, 激光与电弧的耦合作用较弱, 熔滴主要受重力的影响而偏向焊丝轴线下方向(其所受激光匙孔中金属蒸气的反作用力很小)。焊缝熔深下降, 且有充分的冷却时间, 因此焊缝中未观察到气孔缺陷。

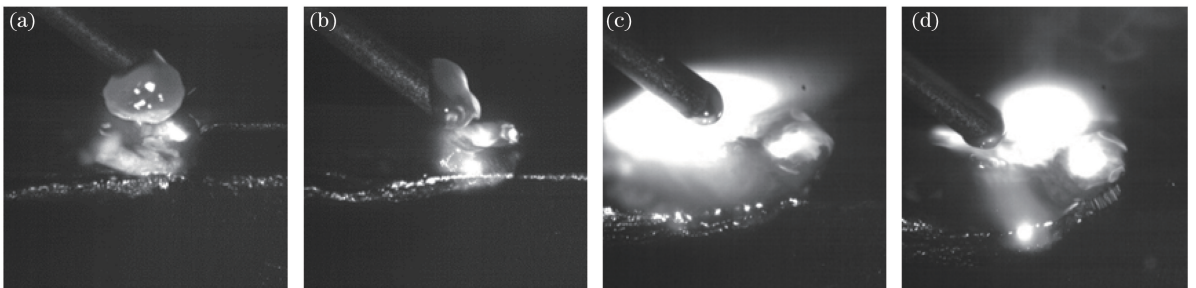


图 12 不同光丝间距下的熔滴过渡特征。(a) -1 mm; (b) 0 mm; (c) 1 mm; (d) 2 mm

Fig. 12 Droplet transfer characteristics at different laser-wire distances. (a) -1 mm; (b) 0 mm; (c) 1 mm; (d) 2 mm

3.4 能量输入对端接头激光-MAG 复合焊接的影响

由表 3 可以发现,激光功率主要影响焊缝熔深,而电弧电流则主要影响填充量和焊缝中上部的形态。通过 X 光检测发现,电弧电流的增大并不会使气孔缺陷增多,这是由熔池的冷却速率进一步下降,气泡逸出导致的。随着激光功率增大,气孔缺陷的

数量和尺寸都增加。图 13 为不同激光功率下获得的焊缝的纵截面,可以看到:随着激光功率增大至 2500 W,由于熔深增加而导致的匙孔失稳、底部间隙气体进入熔池等原因,焊缝底部首先出现气孔缺陷;而当激光功率增大至 3000 W 后,热输入的增大导致熔池冷却时间变长,部分气泡长大并上浮,气孔缺陷出现在焊缝中部。

表 3 不同能量输入下获得的焊缝的横截面金相照片

Table 3 Metallographs of weld cross-section obtained at different energy inputs

Laser power /W	Current /A		
	70	90	130
2000			
2500			
3000			

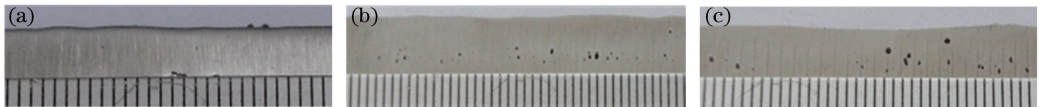


图 13 不同激光功率下获得的焊缝中的气孔缺陷。(a) 2000 W;(b) 2500 W;(c) 3000 W

Fig. 13 Porosity in weld obtained at different laser powers. (a) 2000 W; (b) 2500 W; (c) 3000 W

图 14 为不同功率下的熔滴和匙孔形态。当激光功率较大时,匙孔开口面积较大,有利于匙孔的稳定,但由于反冲作用力加强,熔滴逐渐偏转向上,并因受激光热作用而迅速长大,熔滴过渡周期由 35 ms 增至 47 ms,熔滴过渡对熔池的冲击作用也增加,不利于气孔缺陷的抑制。

头激光-MAG 复合焊接过程中对熔滴过渡行为、气孔缺陷特征的影响。采用激光-MAG 复合焊接获得的焊缝中主要存在的缺陷为匙孔不稳定导致的工艺类气孔,这些气孔一般分布于焊缝中心线附近。优化激光-MAG 复合焊接工艺参数不仅可以改善熔滴过渡的稳定性,减少气孔缺陷的产生,还可以通过电弧的缓冷作用促进气泡的上浮逸出,获得具有无明显缺陷的焊缝,进而提高焊缝的力学性能。本研究可以为提高薄壁油箱等端接接头的焊接效率和焊缝强度提供理论依据。

4 结 论

本课题组通过高速摄像和 X 光检测等方法研究了焊接方式、光丝间距、能量输入等参数在端接接

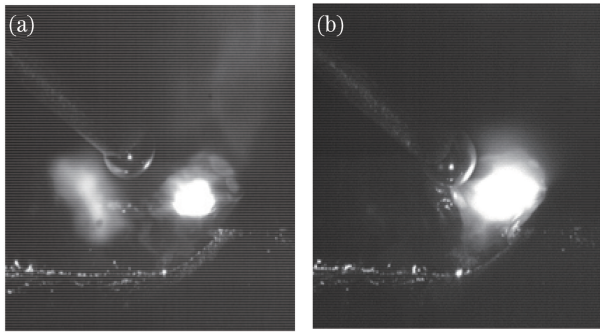


图 14 不同功率下的熔滴和匙孔形态。

(a) 2000 W; (b) 3000 W

Fig. 14 Droplet and keyhole shapes at different laser powers. (a) 2000 W; (b) 3000 W

参 考 文 献

- [1] Wang R M. Welding deformation control of Q235 thin plate case body [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2013, 39(9): 63-67.
王瑞明. Q235 薄板箱体焊接变形控制[J]. 内蒙古石油化工, 2013, 39(9): 63-67.
- [2] Ling W, Ge L H, Ren Z A, *et al.* Failure analysis on TIG welded joint between martensitic and austenitic stainless steels [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(5): 89-92.
凌伟, 葛辽海, 任振安, 等. 马氏体和奥氏体不锈钢 TIG 焊端接接头失效分析[J]. 焊接学报, 2007, 28(5): 89-92.
- [3] Li X G, Yin X Q, Yin S Y. Study to welding flaw in Inconel 718 edge joints of thin sheet [J]. Material Science and Technology, 1998, 6(1): 93-95.
李西恭, 殷晓强, 殷树言. 薄壁 GH169 合金端接接头焊接缺陷研究[J]. 材料科学与工艺, 1998, 6(1): 93-95.
- [4] Cao X, Wallace W, Immarigeon J P, *et al.* Research and progress in laser welding of wrought aluminum alloys. II. Metallurgical microstructures, defects, and mechanical properties [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2003, 18(1): 23-49.
- [5] Ribic B, Palmer A, Debroy T. Problems and issues in laser-arc hybrid welding [J]. International Materials Reviews, 2009, 54(4): 223-244.
- [6] Liu S Y, Zhang H, Shi Y, *et al.* Effects of process parameters on droplet transfer and bead shape in CO₂-MAG hybrid welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(12): 3172-3179.
刘双宇, 张宏, 石岩, 等. CO₂激光-MAG 电弧复合焊接工艺参数对熔滴过渡特征和焊缝形貌的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 3172-3179.
- [7] He S, Chen H, Chen Y, *et al.* Effects of laser power on droplet transfer behaviour in laser-MAG hybrid welding [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 021408.
何双, 陈辉, 陈勇, 等. 激光功率对激光-MAG 复合焊熔滴过渡行为的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 021408.
- [8] Chen Y B, Feng J C, Li L Q. Research on the characteristics of double-sided hybrid laser-GMAW synchronous horizontal welding of high-strength thick steel plates [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(2): 47-55.
陈彦宾, 冯杰才, 李俐群. 高强钢厚板激光-GMAW 复合双面同步横焊特性研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(2): 47-55.
- [9] Cui B, Zhang H, Liu J, *et al.* Study on the impact of the shielding gas on the droplet transfer mode and blowhole defect of high nitrogen steel welding [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(22): 87-94.
崔博, 张宏, 刘佳, 等. 保护气体对高氮钢焊接熔滴过渡模式和气孔缺陷的影响研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(22): 87-94.
- [10] Zhang C, Li G, Gao M, *et al.* Microstructure and process characterization of laser-cold metal transfer hybrid welding of AA6061 aluminum alloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(5/6/7/8): 1253-1260.