

焊接工艺参数对低碳钢 CO₂ 激光深熔焊接气孔形成的影响 *

陈 高 高子英
(长春理工大学理学院, 长春 130022)

摘 要 以低碳钢为研究对象, 采用高功率 CO₂ 激光焊接设备, 通过抛切焊缝断面统计气孔数量, 并观测焊缝中气孔位置和形貌, 研究了非熔透性深熔焊接过程中保护气体流量、激光束倾角、激光功率及焊接速率等工艺参数对低碳钢激光焊接气孔形成规律的影响. 结果表明, 在低碳钢 CO₂ 激光非熔透性深熔焊接过程中, 气孔的形成主要源于焊接过程中匙孔的不稳定塌陷所形成的工艺型气孔, 在熔池中气泡逸出熔池的速率低于熔池金属凝固速率的情况下会产生气孔. 随着气体流量的增加, 气孔数量呈现先增加后减少的过程, 流量为 35 L/min 时气孔数量最少; 随着激光束倾角的增加, 气孔数量呈现先增加后减少的趋势, 在满足较大熔深条件下, 倾角 22.5° 时可以获得较少的气孔数量. 激光功率为 4 kW 时气孔数量最少, 在 0.75 m/min 的低焊速下气孔得到较好抑制.

关键词 气孔, 激光深熔焊接, 低碳钢, 工艺参数

中图法分类号 TG456.7

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2013)02-0181-06

EFFECT OF WELDING PROCESSING PARAMETERS ON POROSITY FORMATION OF MILD STEEL TREATED BY CO₂ LASER DEEP PENETRATION WELDING

CHEN Gao, GAO Ziyiing

College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022

Correspondent: CHEN Gao, associate professor, Tel: (0431)85582291, E-mail: chengao@cust.edu.cn

Manuscript received 2012-10-08, in revised form 2012-11-12

ABSTRACT The porosity in the welded seam can be generated easily during the CO₂ laser nonpenetration deep welding of low carbon steel, which affects the quality of welding. This research uses the mild steel as the object for the high quality requirements of welding. The advanced high-power CO₂ laser generator was used for the welding experiment. The method of cutting cross-section of weld seam was used to analyze the porosity number and observe the morphology and location of porosity in the weld. The effects of such process parameters as shielding gas flow, laser beam inclination, laser power and welding speed on porosity generating were discussed. The research results show that the generating of porosity is due to the unstable collapse of the keyhole in the process of CO₂ laser nonpenetration welding of low carbon steel. The porosity would be formed when the speed of bubble escaping form the weld pool is lower than the speed of melting metal solidifying. The results also show that with the increase of shielding gas flow, the porosity number presents a curve of increase firstly and then decrease. The lowest porosity number can be obtained at a 35 L/min of gas flow. With the increase of laser beam inclination angle, the porosity number shows a trend of decrease after increase. Under the condition of deeper penetration welding, the relatively lower porosity number can be obtained at the inclination angle of 22.5°. When the laser power is 4 kW, the porosity number is lowest. At the condition of lower welding speed, the bubble can escape easily for the longer existence period of melting weld pool.

* 收到初稿日期: 2012-10-08, 收到修改稿日期: 2012-11-12

作者简介: 陈 高, 女, 1971 年生, 副教授

DOI: 10.3724/SP.J.1037.2012.00574

Thus lower porosity number and porosity number can be achieved. The porosity can be inhibited effectively at a welding speed of 0.75 m/min.

KEY WORDS porosity, deep penetration welding, mild steel, processing parameter

低碳钢由于具有优良的加工性能及机械性能, 在工业生产中得到广泛的应用. 实现低碳钢有效连接的焊接方法有很多, 随着激光焊接技术在国内外的广泛研究与应用^[1-7], 低碳钢的激光焊接方法也得到了普及. 但是对低碳钢厚板进行深熔焊接, 尤其是非熔透激光焊接时, 焊缝中容易产生气孔. 气孔是焊缝中常见的焊接缺陷, 对产品质量和部件可靠性有较大影响. 研究^[8-11]表明, 激光焊接工艺参数对气孔的形成有较大的影响, 研究者们提出了通过工艺优化、光束摆动、脉冲激光调制等方法控制气孔的产生. 国外也对激光焊接气孔产生机理及控制方法进行了较多的研究. 气孔产生的机理可以归纳为被焊接材料中所含气体的膨胀与释放^[12]及匙孔不稳定坍塌^[13]等因素. 气孔控制方法有: 利用电磁力来控制熔融金属的充填速率^[14], 双激光束焊接^[15,16], 调整激光脉冲的波形与频率^[17-19]及控制焊接参数^[20]等. 上述方法在一定程度上可以控制气孔的产生, 但增加了焊接工艺的复杂性.

本工作以低碳钢为研究对象, 研究焊接工艺参数对低碳钢非熔透性激光深熔焊接气孔形成规律的影响, 探求气孔产生的机理, 从而控制低碳钢激光深熔焊接时气孔的产生, 减少焊接缺陷, 增强焊接质量, 为激光深熔焊在低碳钢焊接领域的应用提供参考.

1 实验方法

实验材料采用以 20 g 钢为代表的低碳钢, 其化学成分(质量分数, %)为: C≤0.20, Si 0.15—0.30, Mn 0.50—0.90, P≤0.035, S≤0.035, Fe 余量. 焊接试样尺寸为 80 mm×30 mm×12 mm. 图 1 所示为激光焊接实验示意图. 激光束经反射聚焦后, 以倾角 α 入射被焊接工件, 倾角 α 为激光束与工件法线方向夹角, 焊接方向如图 1 所示.

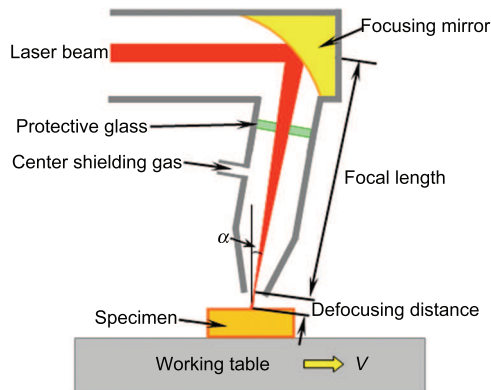


图 1 激光焊接实验示意图

Fig.1 Schematic illustration of laser welding test

激光设备采用 DC050 型 CO₂ 激光器, 输出激光模式为基模. 应用自制夹具将工件装夹在工作台上进行激光对接焊接实验. 焊接过程采用同轴气体保护, 保护气体采用 He 和 Ar 混合气体, 体积比为 He : Ar=1 : 2.

气孔观测一般采用两种方法: 第一种是沿焊缝纵向切开、研抛, 用 3% 硝酸酒精溶液进行腐蚀后, 用体式显微镜进行观测统计, 这种方法用于观测焊缝纵断面气孔分布及焊缝形貌; 第二种是截取焊缝横截面进行研抛, 用 5% 硝酸酒精腐蚀后, 用体式显微镜进行观测统计, 这种方法用于观测焊缝横断面气孔分布及焊缝横截面形貌. 本工作采用第二种方法统计 5 mm 焊缝内间隔 0.25 mm 的 20 个横截面气孔数和平均熔深, 被统计气孔以直径大于等于 0.05 mm 为采样标准.

2 实验结果与分析

2.1 保护气体流量对气孔形成的影响

在激光功率 $P=4.5$ kW, 焊接速率 $V=1.75$ m/min, 激光束倾角 $\alpha=22.5^\circ$, 离焦量 $f=+2$ mm 的条件下, 保护气体流量对气孔数量和焊缝熔深的影响如图 2 所示. 可以看出, 当保护气体流量从 15 L/min 增加到 20 L/min 时, 气孔数量略微降低. 保护气体流量从 20 L/min 增加到 25 L/min 时, 气孔数量显著增加. 随着保护气体流量超过 25 L/min, 气孔数量开始大幅度减少. 保护气体流量增加到 35 L/min 时, 气孔数量降到最少. 熔深随着气体流量的增加呈现出逐渐加深的趋势. 但保护气体流量过大超过 30 L/min 后, 熔深有减小趋势.

2.2 激光束倾角对焊接质量的影响

在 $P=4.5$ kW, $V=1.75$ m/min, $f=+2$ mm, 保护气体流量 $L=20$ L/min 的条件下, 激光束倾角对气孔数量和焊缝熔深的影响如图 3 所示. 可以看出, 当激光束倾

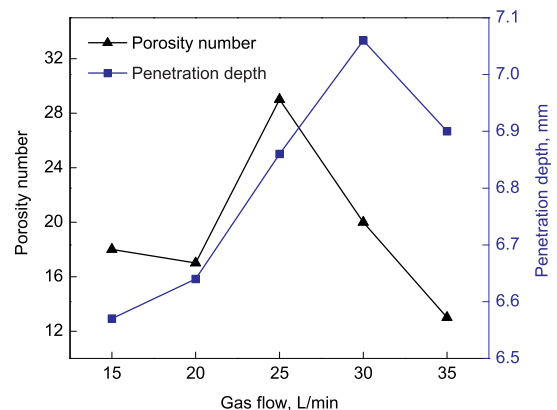


图 2 气体流量对气孔数和熔深的影响

Fig.2 Effects of gas flow on the porosity number and penetration depth

角从 0° 增加到 7.5°，气孔数量增加，但从激光束倾角为 7.5° 时开始转折，激光束倾角从 7.5° 增加到 37.5°，气孔数量呈减少趋势，但在倾角为 30° 时略微反弹。随着激光束倾角从 0° 增大到 37.5°，焊缝熔深先呈增加趋势，在激光束倾角为 15° 时达到最大熔深，然后随着激光束倾角的继续增大显著降低。在满足较大熔深条件下，倾角 22.5° 时可以获得较少的气孔数量。

2.3 激光功率对气孔形成规律的影响

在 $V=1.75\text{ m/min}$ ， $\alpha=22.5^\circ$ ， $f=+2\text{ mm}$ ， $L=20\text{ L/min}$ 的条件下，焊接功率对气孔数量和焊缝熔深的影响如图 4 所示。可以看出，激光功率从 3 kW 上升到 4 kW 时，气孔数量显著减少。激光功率继续增加，气孔数量又开始逐渐增多。随着激光功率的上升，焊接熔深一直在逐渐增加。

2.4 焊接速率对气孔形成规律的影响

在 $P=4.5\text{ kW}$ ， $\alpha=22.5^\circ$ ， $f=+2\text{ mm}$ ， $L=20\text{ L/min}$ 的条件下，焊接速率对气孔数量和焊缝熔深的影响如图 5 所示。可以看出，当焊接速率从 0.75 m/min 增加到 2.75 m/min，焊缝中的气孔数量呈现先增加再减少的趋势，在焊接速率为 1.75 m/min 时，气孔数量达到

最大值。而对于焊缝熔深，在焊接速率小于 1.75 m/min 这一相对低速阶段，焊接速率对焊缝熔深的影响不大，而当焊接速率超过 1.75 m/min 后，熔深显著降低。

3 分析与讨论

3.1 低碳钢激光非熔透焊接气孔形成机理

在激光深熔焊接过程中，在足够高的功率密度激光照射下，材料产生蒸发并形成匙孔。匙孔内充满了在光束照射下壁体材料连续蒸发产生的高温蒸汽，匙孔四壁包围着熔融金属，液态金属四周包围着固体材料。孔壁外液体流动和壁层表面张力与孔腔内连续产生的蒸汽压力相持并保持着动态平衡。光束不断进入匙孔，孔外的材料在连续流动，随着光束移动，匙孔始终处于流动的稳定状态。

图 6 为 20 g 钢激光深熔焊接焊缝底部纵向截面形貌。可见，焊缝底部焊接区与未焊接区交界处形貌并不平缓，凸凹不均，而且没有一定的规则，说明在焊接过程中，匙孔的活动缺乏稳定性，对底部的搅动非常剧烈。图 6 中不规则的尖端形貌不对称可以反映出匙孔前壁和后壁在焊接过程中受到光束、等离子体及金属蒸汽共同作用的不同。匙孔的后壁凹陷较深，前壁却有很小的隆起。这与激光束间倾斜入射，前壁隆起部位产生强烈蒸发，熔融金属蒸汽的动压使匙孔后壁发生凹陷有关。保护气体随光束卷入，气泡在凹陷的部位形成，不能逸出就会形成气孔。气泡的形成与匙孔的坍塌有密切关系，即匙孔的稳定性对于气

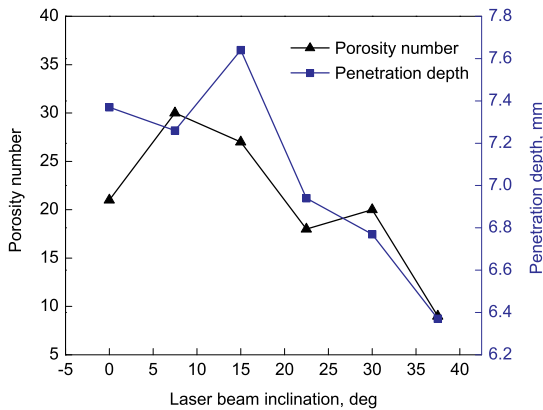


图 3 激光束倾角对气孔数和熔深的影响

Fig.3 Effects of laser beam inclination on the porosity number and penetration depth

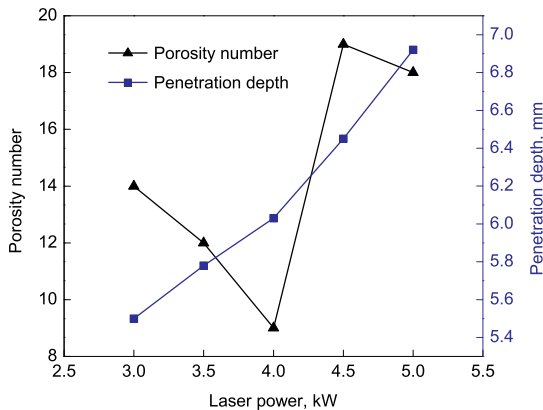


图 4 激光功率对气孔数和熔深的影响

Fig.4 Effects of laser power on the porosity number and penetration depth

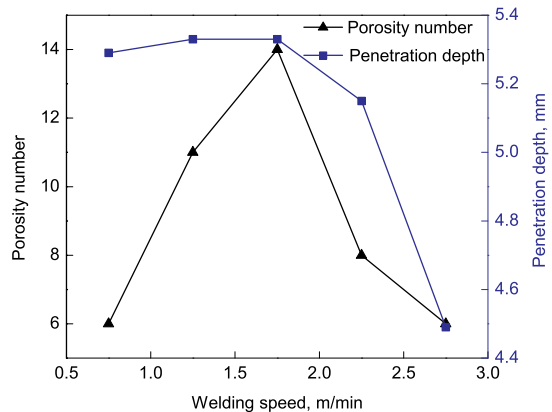


图 5 焊接速率对气孔数与熔深的影响

Fig.5 Effects of welding speed on the porosity number and penetration depth

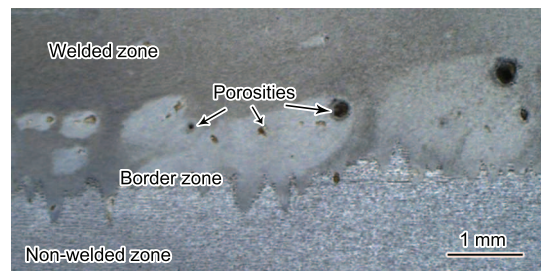


图 6 焊缝底部纵向截面图

Fig.6 Vertical section of a welded seam

泡的产生有着决定性的作用. 匙孔的平衡公式为

$$P_{abl} + P_g = P_h + P_\sigma \quad (1)$$

式中, P_{abl} 为反冲压力, P_g 为过量蒸汽压力, P_h 为流体压力, P_σ 为表面张力. 各力之间平衡情况如图 7 所示.

进入匙孔的激光功率会随着匙孔半径的增大而增大, 假设功率呈 Gauss 分布, 那么随着半径的继续增大功率会逐步趋于饱和, 使得吸收的能量流和蒸汽压力达到最大值. 蒸汽压力和表面张力的交点决定匙孔半径的平衡值. 表面张力与蒸汽压力的不平衡会使匙孔产生振荡性的收缩及扩张. 激光深熔焊接过程中, 匙孔会进行周期性的膨胀、颈缩, 不稳定的匙孔就容易颈缩, 形成气泡^[21,22]. 当气泡上浮速率小于液态金属凝固速率时, 便形成了气孔.

在低碳钢激光深熔焊接过程中, 匙孔不稳定坍塌被金属熔池卷入形成气泡. 气泡在熔融焊缝金属中会上浮、逸出. 图 8 给出了 20 g 钢 CO₂ 激光非熔透焊接焊缝横断面及气孔形貌. 可以看出, 气孔并不是都分布在焊缝底部, 在下部和中部均有气孔存在, 这证实了气泡上浮过程的存在. 当气泡脱离熔池的速率小于熔池凝固速率时形成气孔.

3.2 工艺参数影响机理分析

He 气和 Ar 气混合同轴保护气体可以抑制等离子体的产生并保护焊缝. 在保护气体流量为 15—20 L/min 条件下, 保护气体对于匙孔和熔池的作用达到一种相对稳定的状态, 气孔数量较少; 随着保护气体流量增加到 25 L/min 时, 气孔数量增加. 原因是气体流量增加, 焊接熔池所受到的气体压力增加, 同时气体对匙孔前壁的作用使其出现局部性膨胀, 导致其它部位相应发生颈缩, 造

成气泡形成的趋势急剧上升; 在气体流量进一步增大到 30 L/min 时, 熔深达到最大值. 可见, 此时保护气体较明显地消除了等离子体. 而气体流量增加的另一个结果是使气体挺度增大, 能与等离子体在工件表面一个很小的范围内进行能量交换, 从而得到较深的熔池. 气体流量增大也会使得匙孔孔径变大, 使其更加稳定, 气孔减少. 大的气流不但增加了匙孔孔径, 使匙孔稳定, 而且还明显增加了大气流对熔池的搅拌作用, 使形成的气泡能够更快地从熔池排出.

当激光束倾角 α 从 0° 变到 7.5° 时, 熔深差距不大, 但是由于激光束倾角为 7.5° 时, 匙孔前壁局部金属蒸发更加剧烈, 反冲到后壁产生凹陷相对大些, 液态金属填充

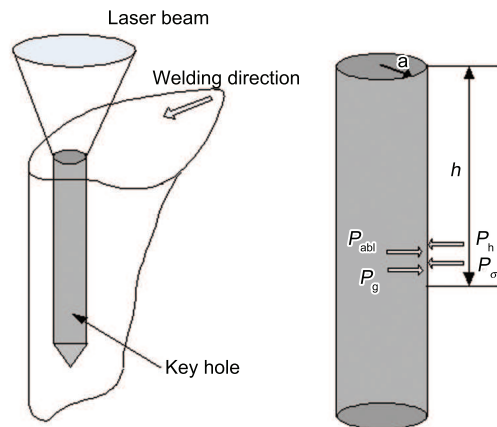


图 7 孔壁的压力平衡示意图

Fig.7 Schematic diagram of pressure balance at the key-hole wall (P_{abl} —recoil pressure, P_g —excess steam pressure, P_h —fluid pressure, P_σ —surface tension)

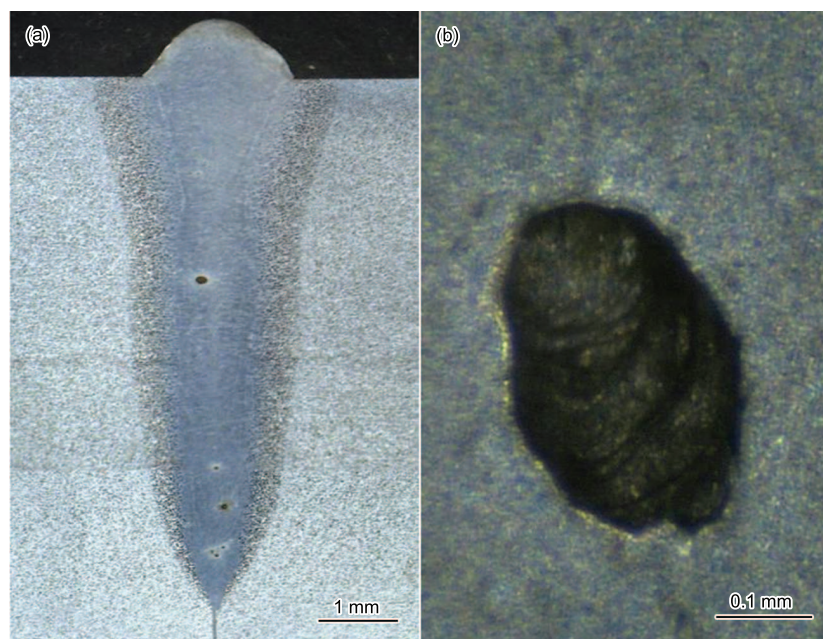


图 8 焊缝横断面及气孔形貌

Fig.8 Morphologies of cross-section of a weld seam (a) and a porosity (b)

时卷入保护气体几率变大, 在匙孔末端也可能有一小部分液态金属扎在前壁底端, 增加了它的不稳定性; 由于激光束倾角为 15° 时熔深最深, 匙孔越到下面越细, 越不稳定, 熔池流动使得匙孔尖端闭合, 形成气泡残留的可能性增大. 随着激光束倾角逐步增加, 气孔数量越来越少, 统计到的大气孔数也是越来越少, 到了激光束倾角为 37.5° 时, 甚至未发现大气孔存在. 主要原因是随着入射到工件表面的光斑尺寸的逐渐增大, 匙孔的孔径也有所增加, 而功率密度变小, 熔深变浅, 匙孔变得更加稳定, 不易产生大气孔. 另外, 孔径增大和熔深变浅也有利于气泡的排出, 这时熔池与竖直方向成一定角度, 由于气泡上浮基本沿着竖直方向, 显然当角度大时气泡逸出更加容易.

在焊接速率一定的情况下, 激光功率越小, 线能量越小, 热输入越小, 熔池冷却时间很短. 在激光功率较低时 (3 kW), 熔宽较窄, 卷入熔池的保护气体形成的气泡和冶金反应聚集的气泡逸出的范围变小, 金属导热率高, 熔池维持液态时间很短, 冷却凝固快, 气泡不易从熔池逸出, 从而残留在焊缝里, 形成较多的气孔. 随着激光功率增加到 3.5 和 4 kW, 熔宽不断变宽, 线能量的增大使熔池冷却越来越缓慢, 这有利于气泡从熔池逸出. 激光功率增加到 5 kW 时, 由于熔池表面温度进一步上升, 造成在很短的时间内金属蒸汽压力变大, 匙孔提前, 底部表面张力较大, 闭合时间缩短. 另外, 激光功率的增加也使得匙孔开口处金属蒸汽涡流幅度增加, 卷入的保护气体增加, 形成气孔的几率加大.

焊接速率影响线能量, 从而会影响焊接金属材料的熔化效率和熔池冻结时间. 随着焊接速率从 0.75 m/min 增加到 1.75 m/min, 线能量降低, 热输入量减少, 焊缝金属凝固变快, 熔池存在时间变短, 留给气泡从熔池逸出的时间减少, 使气泡来不及逸出, 残留后形成气孔, 同时由于焊接速率低的情况下, 激光束能量较多的作用到匙孔底端, 导致金属蒸汽对熔池的冲击性变弱, 使焊接过程更加稳定, 焊接速率增加, 稳定性会下降, 匙孔不稳定就容易形成气孔; 而焊接速率从 1.75 m/min 增加到 2.25 m/min, 气孔数明显减少, 这可能是由于焊接速率较快的情况下, 匙孔孔径会沿焊接方向有较大的拉长, 使得金属蒸汽较易排出, 孔径增大也会使毛细不稳定性得到抑制, 气孔形成减少; 尽管由于焊接速率的提高会导致熔池存在时间变短, 金属凝固加快, 但是焊接速率增加熔深也会相应变浅, 仍利于气泡逸出. 尽管在激光功率和焊接速率均较高的条件下, 有利于改善熔池流动形态, 这对于抑制气孔产生非常重要. 但随着焊接速率从 2.25 m/min 增加到 2.75 m/min, 金属凝固速率进一步变快, 反而不利于气泡排出, 同时, 焊接速率过快时激光束能量的大部分会作用于匙孔前壁偏上的部位, 使金属蒸汽沿垂直匙孔前壁方向喷发出去, 造成匙孔后方熔池产生较强冲击, 引起飞溅,

使熔池和匙孔稳定性变差, 虽然气孔数量减少, 但有反弹趋势.

4 结论

(1) 低碳钢 CO₂ 激光非熔透性深熔焊接过程中, 气孔的形成主要源于焊接过程中匙孔的不稳定塌陷所形成的工艺型气孔.

(2) 保护气体流量为 35 L/min 时, 相对较大的气流使匙孔孔径增大, 使其稳定性增强, 大大减少了气孔产生的倾向; 这时气流对熔池搅拌作用明显, 加快了气泡在焊缝熔池中的上浮速率, 减少了气孔在焊缝中的驻留.

(3) 激光束倾角为 37.5° 时, 光斑变大使得孔径增大, 匙孔末端趋于稳定, 使匙孔尖端闭合形成气泡残留的可能性减小. 同时激光束倾斜角度后, 增加了气泡的上浮时间, 利于气泡的排出, 气孔数量最少. 在满足较大熔深条件下, 倾角 22.5° 时可以获得较少的气孔数量.

(4) 当激光功率为 4 kW 时, 熔宽和熔深均较为理想, 卷入熔池的保护气体形成的气泡逸出的范围较大, 由于熔池维持液态时间较长, 气泡易从熔池逸出, 气孔数量降到最少.

(5) 焊接速率较低时, 热输入量很大, 熔池存在时间长, 利于气泡逸出, 气孔数量很少. 但当焊接速率为 2.25 m/min 时, 较高功率和较快的焊速有利于气泡逸出, 气孔数较少, 但焊接熔深较浅.

参考文献

- [1] Mikhail S, Antti S, Vladislav S, Alexander F. *Opt Laser Technol*, 2012; 44: 2064
- [2] Reigen U, Schleser M, Mokrov O, Ahmed E. *Opt Laser Technol*, 2012; 44: 255
- [3] Ruggiero A, Tricarico L, Olabi A G, Benyounis K Y. *Opt Laser Technol*, 2011; 43: 82
- [4] Yilbas B, Arif A, Abdul A. *Opt Laser Technol*, 2010; 42: 760
- [5] Chang B H, Bai S J, Du D, Zhang H, Zhou Y. *J Mater Process Technol*, 2010; 210: 885
- [6] Mei L F, Chen G Y, Jin X Z, Zhang Y, Wu Q. *Opt Lasers Eng*, 2009; 47: 1117
- [7] Emel T, Eddy D, Alfred D, Erdinc K. *Mater Des*, 2009; 30: 1193
- [8] Zhang X D, Chen W Z, Eiji A, Fukuhisa M. *Trans Chin Weld Inst*, 2002; 23(6): 51
(张旭东, 陈武柱, 芦田荣次, 松田福久. 焊接学报, 2002; 23(6): 51)
- [9] Zhao L, Zhang X D, Chen W Z, Bao G. *Trans Chin Weld Inst*, 2004; 25(1): 29
(赵琳, 张旭东, 陈武柱, 包刚. 焊接学报, 2004; 25(1): 29)
- [10] Zhang X H, Zhang X D, Chen W Z, Lei H D. *Laser Technol*, 2007; 31: 419
(张晓红, 张旭东, 陈武柱, 雷华东. 激光技术, 2007; 31: 419)
- [11] Zhao L, Zhang X D, Chen W Z, Wang J. *Appl Laser*, 2004;

- 24: 21
(赵琳, 张旭东, 陈武柱, 王晶. 应用激光, 2004; 24: 21)
- [12] Wahba M, Kawahitoc Y, Kondohc K, Katayamac S. *Mater Sci Eng*, 2011; A529: 143
- [13] Seto N, Katayama S, Matsunawa A. *Q J Jpn Weld Soc*, 2001; 19: 600
- [14] Zhou J, Tsai H L. *Int J Heat Mass Transfer*, 2007; 50: 2217
- [15] Haboudoua A, Peyrea P, Vannesb A B, Peixc G. *Mater Sci Eng*, 2003; A363: 40
- [16] Hayashi T, Matsubayashi K, Katayama S, Nobuyuki A, Matsunawa A, Omori A. *Q J Jpn Weld Soc*, 2002; 20: 228
- [17] Kawaguchi I, Tsukamoto S, Arakane G, Honda H. *Q J Jpn Weld Soc*, 2005; 23: 259
- [18] Matsunawa A. *Sci Technol Weld Join*, 2001; 6: 351
- [19] Kuo T Y, Jeng S L. *J Phys*, 2005; 38D: 722
- [20] Alessandro A, Alessandro F, Leonardo O, Giampaolo C. *Opt Laser Technol*, 2012; 44: 1485
- [21] Seto N, Katayama S, Matsunawa A. *Weld Int*, 2002; 16: 451
- [22] Matsunawa A, Mizutani M, Katayama S, Seto N. *Weld Int*, 2003; 17: 431

(责任编辑: 肖素红)