

文章编号: 1001-3806(2012)06-0713-06

光纤激光焊接 5052 铝合金镁元素烧损研究

张宏圭 金湘中* 陈根余 张明军 邹宇峰

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室,长沙 410082)

摘要: 为了研究铝合金激光焊接过程中镁元素的蒸发烧损,采用特殊设计的实验装置采集了激光深熔焊接 5052 铝合金过程中孔内等离子体的光谱信号,并用电子探针显微分析仪检测了焊缝中的镁元素。发现激光焊接工艺参量对工件表面的镁元素等离子体信号强度的影响很大,小孔中各位置的光谱强度是变化的,在小孔的径向方向 Mg I 的相对强度逐渐减小,而在小孔的深度方向先增加后降低;焊缝区镁元素含量的变化趋势与光谱强度的变化趋势相反。结果表明,采用光谱仪能够监测激光焊接铝合金过程中镁元素的烧损;小孔中不同位置处镁元素的烧损主要由各位置吸收的激光能量决定,材料吸收的激光能量越高,镁元素的烧损越大。

关键词: 激光技术; 镁元素烧损; 激光焊接; 铝合金; 光谱信号

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.06.001

Study on the burning loss of magnesium element in fiber laser welding aluminum alloy 5052

ZHANG Hong-gui, JIN Xiang-zhong, CHEN Gen-yu, ZHANG Ming-jun, ZOU Yu-feng

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to study the burning loss of magnesium element in laser welding aluminum alloy, a specially-designed device was first used to collect the spectral signals emitted from the keyhole plasma in deep penetration laser welding aluminum alloy 5052. Then, the content of magnesium element in the welds was tested by an electron probe micro analyzer. Under the experimental conditions, the welding parameters heavily affect the spectral intensity of magnesium element plasma. The spectral intensity is not uniformly distributed in the keyhole region. In the radial direction, the spectral intensity of Mg I decreases from the center to the edge of the keyhole; in the depth direction, from the top to the bottom of the keyhole, the spectral intensity of Mg I increases first and then decreases. The Mg content changes inversely with the spectral intensity in the keyhole region. Therefore, spectral analysis technology can be used to monitor the burning loss of magnesium element in laser welding aluminum. It can be concluded that Mg loss in the keyhole region is determined by laser intensity absorbed there. The higher the absorbed laser intensity, the bigger the Mg loss.

Key words: laser technique; magnesium element burning loss; laser welding; aluminum alloy; spectral signals

引言

铝合金具有高强度、良好的导热导电性能、低温下保持良好的机械性能等优点,使其在汽车、船舶、坦克制造、压力容器、以及航空航天领域有着广泛的应用^[1-2]。激光焊接作为一种新型的焊接方法,与传统的焊接方法相比,有着功率密度高、热输入低、焊接变形小、深宽比大、易于实现焊接过程自动化等优点,因此,

激光焊接铝合金是国内外研究的热点^[3-5]。

铝合金具有热导率高、对光反射率高、表面有难熔的氧化膜、液态时吸氢能力强以及含有低沸点的合金元素等特性^[6],因此在激光焊接时容易产生气孔、焊接裂纹、焊缝塌陷以及接头软化等问题。

激光焊接过程中,高能量的激光束照射到工件表面,被照射的金属表面材料熔化、汽化而形成等离子体。研究发现,激光焊接铝合金时合金元素蒸发烧损更为明显^[7-10]。由于 Mg 的沸点(1380K)比铝的沸点(2723K)低很多,并且 Mg 的沸点仅仅比铝的熔点(933K)高 447K,所以在焊接过程中大量的镁元素以金属蒸气的形式从熔池中溢出。镁元素是铝合金的主要强化元素,镁元素的烧损会使焊接接头的力学性能降低^[11],因此研究激光焊接铝合

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50875079);湖南省自然科学基金资助项目(09JJ3088)

作者简介:张宏圭(1985-),男,硕士研究生,研究方向为激光焊接。

* 通讯联系人。E-mail: jin9000xz@hotmail.com

收稿日期:2012-04-28;收到修改稿日期:2012-05-08

金过程中镁元素的烧损对提高焊接接头的性能有重大意义。

等离子体光谱分析是研究激光深熔焊接元素烧损的有效方法,国内外学者对激光焊接铝合金等离子体光谱信号的研究大多是建立在孔外等离子体的基础上的^[12-13],对激光焊接铝合金孔内等离子体的研究较少。作者采用特殊设计的装置采集了光纤激光焊接 5052 铝合金时孔内的等离子体信号,首先研究了激光焊接工艺参量对镁元素等离子体光谱强度的影响,然后研究了深熔焊接小孔径向和深度方向的镁元素的等离子体信号的变化趋势,同时用电子探针对焊缝区的镁元素进行线扫描,对比分析了镁元素等离子体的光谱信号和焊缝区镁元素含量,在对比的基础上分析了焊缝径向方向以及深度方向镁元素烧损的机理。

1 实验材料和设备

实验材料为 3mm 厚的 5052 铝合金,焊接采用的是 IPG 公司生产的 YLR-4000-C-WA 型光纤激光器,此激光器的最大输出功率为 4kW,输出光束波长为 $1.07\mu\text{m}$,光束模式为 TEM_{00} ,配合激光器使用的是 ABB 公司生产的 IRB2400 六轴机器人;光谱信号采集选用的是美国 Princeton Instruments 公司生产的 SpectraPro-2356 型光谱仪;成分测试采用从日本进口的电子探针显微分析仪 (electron probe microanalyzer, EPMA),型号为 JXA-8230。

2 实验过程

2.1 光谱信号采集

由于铝合金是不透明的金属,在焊接过程中很难采集到孔内的等离子体信号,本文中采用如图 1 所示的实验装置,成功地测得了光纤激光焊接 5052 铝合金的孔内等离子体信号。

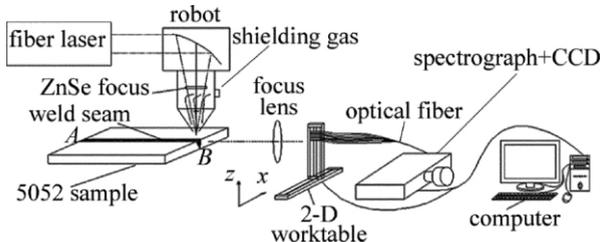


Fig. 1 Experimental set-up for plasma collection

如图 1 所示,5052 工件在实验中用夹具固定,激光束通过光纤传输到机器人,在机器人的焊接头上有一个焦距为 200mm 的抛物镜,光束通过此聚焦镜到达工件,在距离光轴 112mm 处固定有一双面凸的石英玻璃,而在距离石英玻璃一定位置的

方有 6 根光纤,等离子信号经过石英玻璃聚焦再通过 6 根光纤组件传输到光谱仪与 CCD。光纤组件的探测头安置在具有 x 和 z 两个自由度的 2 维工作台上,以实现准确定位。光谱数据信号经过数据线 (USB 接口) 传输到计算机,再经过软件处理成光谱和数据文件。其中光纤组、光谱仪和面阵 CCD 组成 1 个多通道光谱分析 (optical multichannel analyzer, OMA) 系统。

图 2 是 6 根光纤对应的工件位置示意图。从光学原理可知,第 6 根光纤采集到的是工件上表面的信号,而第 1 根光纤采集到的是工件下表面的信号,图 2 中的第 1 根 ~ 第 6 根光纤分别对应图 3 中的 10, 9, 8, 7, 5, 6 这 6 个位置。

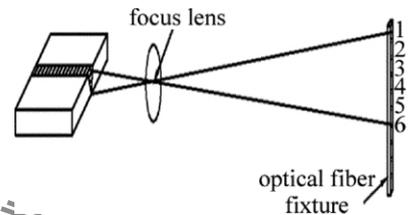


Fig. 2 Schematic of optical fiber group collecting plasma signals

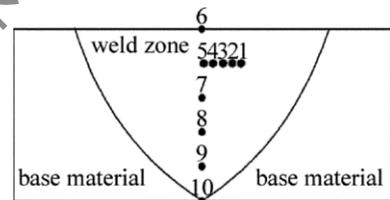


Fig. 3 Detection positions for spectral signals collection

2-D 控制平台的作用是在 x 和 z 两个方向定位光纤组件,使光谱仪能采集到光谱信号。本实验中,控制平台还有另外一个作用。由于光纤组件竖直布置,因此实验在一次施焊中光谱仪只能采集到小孔的深度方向的信号。为了采集小孔径向方向的等离子体信号,可通过调节 2-D 控制平台,使光纤组件在 x 方向整体移动。本实验中,小孔径向上 0mm ~ 0.4mm 的光谱信号是通过在 x 方向分别移动 2-D 平台 0mm ~ 0.4mm 情况下得到的。

2.2 焊缝镁元素测试

实验中所选用的焊接工艺参量见表 1 所示,根据表 1 可以采集到各个工艺参量变化时 Mg I 的光谱信号。

用实验参量表第 4 组中激光功率为 2300W 的焊接试件,在焊后用线切割沿焊缝横截面切开,表面经过抛光处理,在电子探针实验前,用密封袋密封。

用电子探针在焊缝的深度方向和径向方向进行线扫描,图 4 为线扫描的位置示意图。其中白色线代表深度方向,位于焊缝中心;黑线是焊缝的径向方向,离工件上表面 0.6mm。

Table 1 Welding process parameters

group	experimental parameters	channel numbers	gas flow rate/(L · min ⁻¹)
the first group	defocusing distance/mm	-2, -1, 0, 1, 2	13
	welding speed/(mm · s ⁻¹)	14	
	laser power/kW	2.3	
	gas flow rate/(L · min ⁻¹)	11, 13, 15, 17, 19	
the second group	laser power/kW	2.3	8
	defocusing distance/mm	0	
	welding speed/(mm · s ⁻¹)	13, 14, 15, 16, 17, 18, 19	
the third group	defocusing distance/mm	0	13
	laser power/kW	2.4	
	laser power/kW	2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5	
the fourth group	welding speed/(mm · s ⁻¹)	14	
	defocusing distance/mm	0	

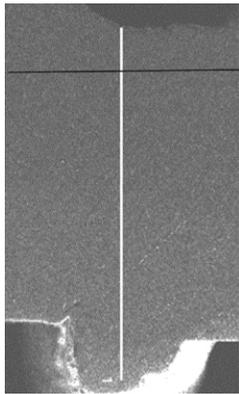


Fig. 4 Diagram of EPMA line scanning in the radial and depth direction

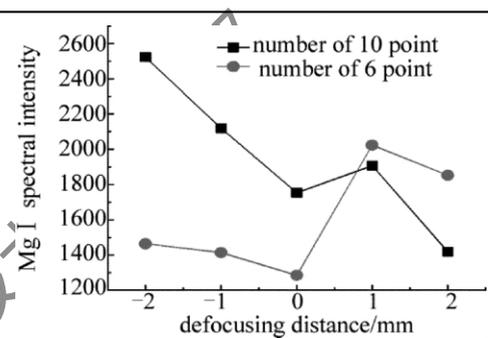


Fig. 6 Curve of defocusing distance and Mg I spectral intensity

3 实验结果及分析

3.1 工艺参量对光谱强度的影响

图5为光纤激光焊接5052铝合金在波长340nm~420nm范围内等离子体的特征谱线,从图中可以看到Fe, Mg以及Al 3个元素的等离子体特征谱线。本实验研究的对象是波长为383.83nm的Mg I的光谱强度。

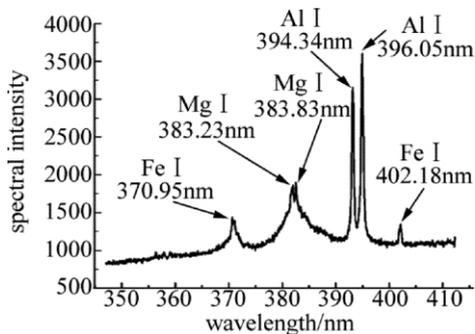


Fig. 5 Typical spectral lines during fiber laser welding of aluminum alloy 5052

3.1.1 离焦量对光谱强度的影响 图6为第1组实验的结果,圆点线为工件上表面第6点的Mg I的光谱强度,方块线为工件下表面第10点的Mg I的光谱

强度。从图中可以看出:当离焦量在-2mm~+1mm时,下表面的Mg I光谱强度比上表面的要大;而离焦量在+1mm~+2mm时,上表面的光谱强度比下表面的大。

产生这种趋势的原因是:负离焦时,激光能量深入小孔内部,工件下部的镁元素的蒸发烧损比工件上部要大,这样下表面的光谱强度要比上表面的要大,当离焦量从负到正变化时,激光直接照射的位置由工件内部向工件表面移动,这样上下表面的镁元素的烧损相差越来越小,而当离焦量为+1mm时,上下表面的镁元素的烧损程度一致。当离焦量继续增大,由于光束聚焦位置远离工件表面,这时候功率密度降低,工件出现未焊透的情况,这样主要的激光能量集中在工件的上表面,表面的镁元素的烧损大于下表面,表现为工件上表面的光谱强度比下表面的大。

3.1.2 保护气体流量对光谱强度的影响 图7为第2组实验结果。从图中可以发现,当保护气体流量从11L/min增加到19L/min时,Mg I的光谱强度成降低的趋势。这是由于保护气体流量增加时,保护气体对孔外等离子体的作用增强,大量的等离子体被保护气体吹走,等离子体的热辐射作用减小,工件表面的温度降低,表面上的镁元素的烧损降低,Mg I的相对强度

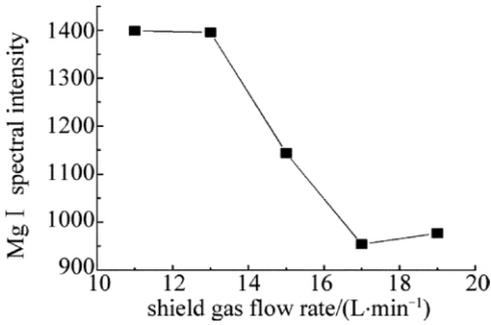


Fig. 7 Curve of shield gas flow rate and Mg I spectral intensity

就降低。

3.1.3 焊接速率对光谱强度的影响 图8为第3组实验结果,由图可知:激光功率为2400W时,在速率为13mm/s~16mm/s区间内,光谱强度成减小的趋势;在速率为16mm/s~19mm/s区间内,光谱强度成增大的趋势。图9是在功率为2100W~2600W,速率为9mm/s~22mm/s区间内根据焊缝背面的焊接质量作出的激光功率与焊接速率的匹配曲线图,图中圆点线以上的区域表明在相应的激光功率下焊接速率较大,焊缝背面未焊透;方块线以下表明焊接速率较小,焊缝下塌严重;圆点线和方块线之间的区域表示焊缝已焊透且下塌不严重。由图9可知:激光功率为2400W时,在焊接速率为13mm/s~16mm/s区间内,焊缝背面是焊透的;而在焊接速率为17mm/s~19mm/s区间内,焊缝背面未焊透。对比图8和图9可以发现:工件表面的光谱强度不是随着焊接速率的增大而增大,亦不是随着焊接速率的增大而减小,而是与工件的焊透与否则有关,在工件焊透的情况下,随着焊接速率的增大,工件

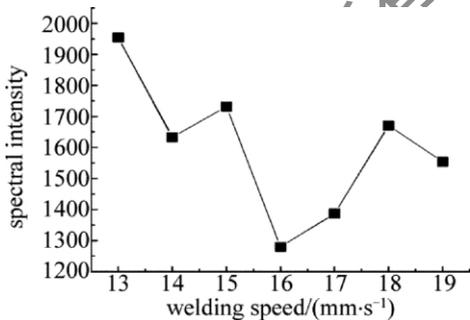


Fig. 8 Curve of welding speed and Mg I spectral intensity

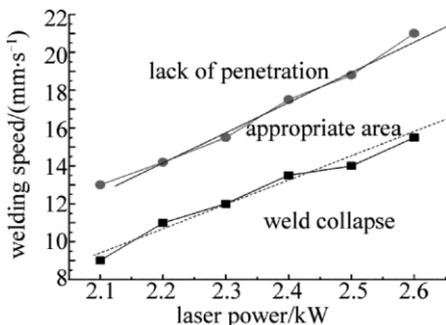


Fig. 9 Match interval of laser power and welding speed

表面的光谱强度呈现减小的趋势;在工件未焊透的情况下,随着焊接速率的增大,工件表面的光谱强度呈现增大的趋势。

产生以上趋势的原因是:在工件焊透的情况下,焊接速率越小,热输入越大,通过小孔的反射到达工件下表面的激光能量就越高,整个工件内部的镁元素的烧损较大,孔内等离子体越多,溢出到表面的金属蒸气也越多,工件表面在等离子体和金属蒸气的热辐射作用下温度也越高,表面的镁元素在高温作用下的蒸发烧损越多,所以光谱仪中监测到的Mg I的强度也越高;在工件未焊透的情况下(焊接速率在17mm/s以上),由于焊接速度较快,工件未焊透,激光能量主要集中在小孔的上部,表面Mg的烧损大,Mg I的相对强度就越高。

3.1.4 激光功率对光谱强度的影响 图10为第4组实验的结果,由图可以看出激光功率增大时,Mg I的光谱强度增加。这是由于激光功率增加,热输入增加,工件表面的温度升高,表面上的镁元素烧损增加,Mg I的光谱强度增大。

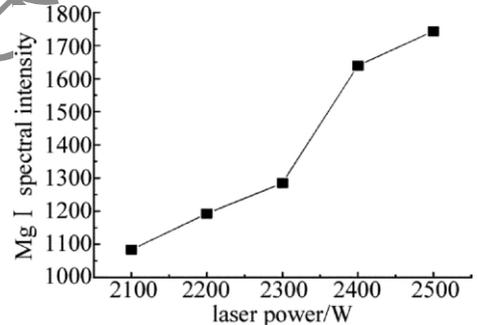


Fig. 10 Curve of laser power and Mg I spectral intensity

3.2 光谱强度在小孔径向和深度方向的变化

作者还采集了第4组实验中激光功率为2300W时小孔径向和深度方向的等离子体信号,从图11中可以看出,离小孔中心0mm~0.4mm的径向方向上(对应于图3中5,4,3,2,1各点),Mg I的光谱强度呈现减小的趋势,而在小孔的深度方向上(对应图3中的6,5,7,8,9,10各点),Mg I的强度先增加后减小(见图12)。

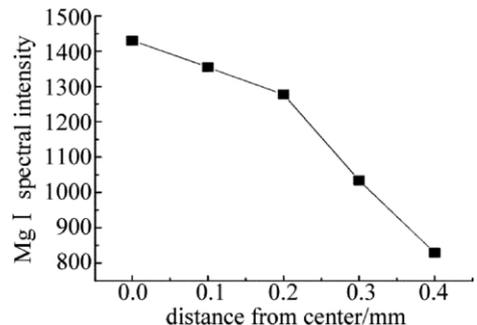


Fig. 11 Mg I spectral intensity in the radial direction

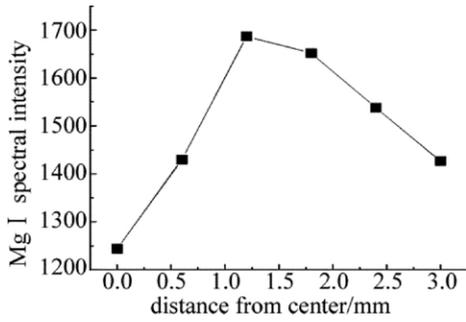


Fig. 12 Mg I spectral intensity in the depth direction

3.3 焊缝镁元素测试结果

图 13 和图 14 分别是电子探针在焊缝径向和深度方向上的线扫描结果,由图可以看到,焊缝中镁元素相对母材有很大程度的烧损。

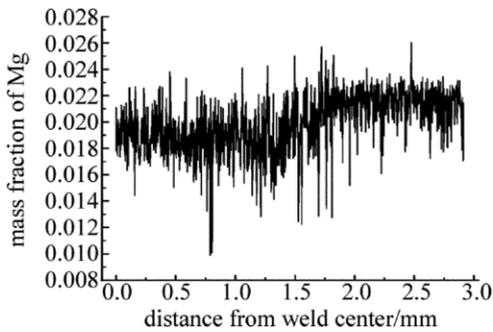


Fig. 13 Mg content by line scanning in the radial direction

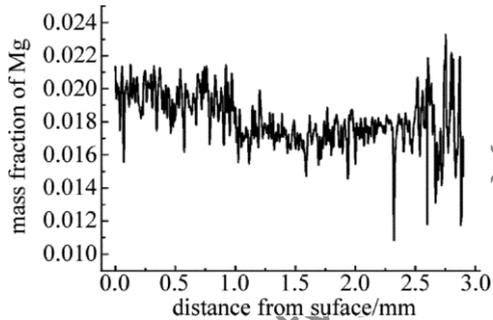


Fig. 14 Mg content by line scanning in the depth direction

由图还可以发现镁元素在焊缝中的分布是不均匀的,即使在间距很小的范围内,镁元素的含量的变化也较大。这是由于激光焊接中,金属熔化和冷却的速度非常快,镁元素在熔池中分布不均匀,某些位置存在元素聚集。

为了准确分析焊缝中镁元素的变化趋势,本文中采用平均值的办法,取相邻的 50 个电子探针的数据来作为某一位置处的镁元素含量值,图 15 和图 16 分别是径向和深度方向相应位置数据的平均值。由图 15 可知,在焊缝的径向方向,在离焊缝中心 0mm ~ 0.4mm 各个位置,镁元素的含量呈递增的趋势;而在离焊缝中心 0.5mm ~ 1.5mm 各处,镁元素含量有较大波动。从图 16 中可知,在深度方向上,镁元素含量变化趋势为先减小再增加,最后再降低。

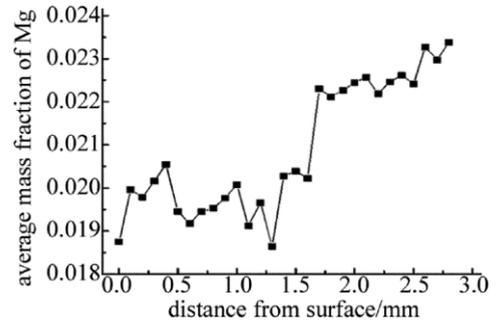


Fig. 15 Average Mg content in the radial direction

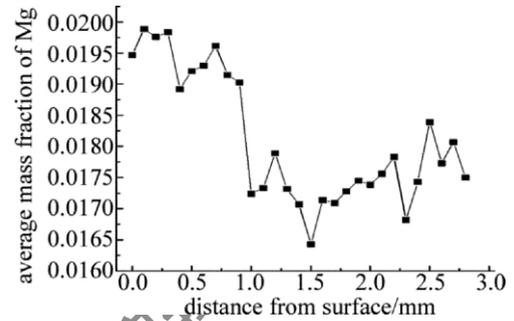


Fig. 16 Average Mg content in the depth direction

4 焊缝镁元素烧损机理

4.1 焊缝径向上的镁元素烧损

对比图 11 和图 15 可以发现:在小孔径向方向上, Mg I 光谱强度大的位置处,焊缝中镁元素的含量较低; Mg I 光谱强度小的位置处,焊缝中镁元素的含量较高。因此 Mg I 光谱强度准确地反应了镁元素的烧损。

小孔位置处镁元素的烧损不难理解,材料吸收激光能量后主要以金属蒸气的形式从小孔顶部溢出。工件吸收激光能量大的地方,镁元素的蒸发烧损就大,溢出的镁元素蒸气就多,这些位置上检测到的 Mg I 的强度就大,焊缝中相应位置的镁元素的含量就较低。由于光纤激光能量呈高斯分布,激光光斑中心的能量大于边缘的能量,光斑中心处的材料吸收的能量相对边缘的要多,这样中心处的镁元素蒸发烧损大于边缘的蒸发烧损。所以光谱仪监测到的 Mg I 光谱强度从小孔中心到小孔边缘逐渐降低,而 EPMA 检测的焊缝镁元素含量从中心到边缘逐渐升高。

小孔以外的焊缝区的镁元素含量主要受熔池的流动影响,由于热传递的作用,此区域的金属材料熔化形成熔池。当小孔张开时,熔融金属在小孔张力的驱动下向母材一侧移动,熔池中的镁元素向熔池边缘移动;当小孔闭合时,熔融金属回流以填充小孔,熔池中的镁元素又向小孔中心移动,在冷却的过程中,熔融金属从边缘到中心依次凝固,这使熔池中靠近小孔处位置的 Mg 元素含量较低,这就是图 15 中离焊缝中心 0.5mm ~ 0.7mm 处的 Mg 元素含量较低的原因。

4.2 深度方向上的烧损机理

对比图 12 和图 16, 可以发现在深度方向上 Mg I 的强度也反应了镁元素的蒸发烧损, 下面解释深度方向镁元素的烧损机理。

在激光深熔焊接中, 高功率密度的激光能量照射在工件上, 工件表面的材料首先熔化, 部分材料蒸发、气化。工件表面的液态金属在元素蒸发的反作用力的作用下变成凹形, 这时材料对激光能量的吸收增加, 金属蒸气逐渐增多, 液面被进一步压凹, 形成一个通道。激光束经过通道直接照射到凹形底部的金属, 使通道向工件深度方向发展。当金属蒸气压力、液体表面张力和流体的静压力等几种力达到平衡时, 通道的发展停止而形成稳定的小孔。小孔形成后, 激光束直接进入小孔内部, 激光能量在小孔的内部经过多次反射 (见图 17)^[14] 而被小孔壁吸收。激光束在小孔内部反射过程中, 某点处孔壁吸收的能量最大, 这个位置处的材料的蒸发烧损也最厉害。当激光功率为 2400W 时, 焊接 3mm 厚的 5052 铝合金, 在小孔深度方向 1.5mm 处材料吸收的激光能量最大, 这个位置上的镁元素蒸发烧损也最大, 所以深度方向上光谱仪监测的 Mg I 光谱强度在此点最大, 深度方向上 EPMA 检测的镁元素含量在此点也最低。

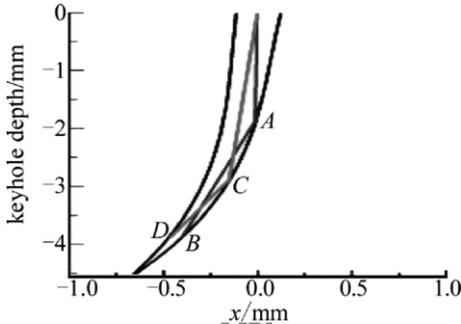


Fig. 17 Propagation of laser beam in the keyhole

5 结论

(1) 可以通过光谱分析技术来监测激光焊接铝合金过程中镁元素的烧损损失。

(2) 工件表面上的镁元素烧损受激光焊接工艺参数的影响。正离焦时, 镁元素的烧损比负离焦时的大; 保护气体流量越小, 工件表面的镁元素的烧损越小。焊接速度对镁元素的烧损的影响趋势是: 在焊透的情况下, 表面镁元素烧损随着速度的增加而减小; 在未焊透的情况下, 表面镁元素烧损随速度的增加而增加。激光功率增大时, 工件表面镁元素的烧损增加。

(3) 在径向上, 在小孔内, 自中心到边缘镁元素烧损逐渐减小; 在小孔以外, 由于熔融金属的流动, 镁元素含量在离焊缝中心 0.5mm ~ 1.5mm 处波动较大。在深度方向上, 镁元素的烧损先增加、后降低, 工件中部镁元素的烧损程度最大。

参考文献

- [1] EL-BATAHGY A, KUTSUNA M. Laser beam welding of AA5052, AA5083 and AA6061 aluminum alloys [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2009, 974182.
- [2] BROWN K R, VENIE M S, WOODS R A. The increasing use of aluminum in automotive applications [J]. *Journal of Metals*, 1995, 47 (7): 20-23.
- [3] KUO T Y, LIN H C. Effects of pulse level of Nd:YAG laser on tensile properties and formability of laser weldments in automotive aluminum alloys [J]. *Materials Science and Engineering*, 2006, A416 (1/2): 281-289.
- [4] WANG H L, HUANG W L, ZHOU Z Y, *et al.* Laser welding of aluminum alloy 2007 [J]. *Laser Technology*, 2003, 27 (2): 24-26 (in Chinese).
- [5] LI H, HUANG A Q, LI J, *et al.* Investigation on solidification crack of laser welding ZL114A aluminum alloy [J]. *Laser Technology*, 2010, 34 (2): 154-156 (in Chinese).
- [6] ZHANG H, WHITE D R, DEBROY T. Current issues and problems in laser welding of automotive aluminum alloy [J]. *International Materials Reviews*, 1999, 44 (6): 238-266.
- [7] NATSUNA A, KATAYAMA S, KOJIMA K. CO₂ laser weld ability of aluminum alloys (report 1): effect of welding conditions on melting characteristics [J]. *Welding International*, 1998, 12 (7): 519-528.
- [8] MOON D W, METZBOWER E A. Laser beam welding of aluminum alloy 5456 [J]. *Welding Journal Research supplement*, 1983, 62: 53-58.
- [9] WANG X J. Laser welding of aluminum alloys 5083 and 5052 [J]. *Journal of Gansu University of Technology*, 1994, 20 (4): 1-6 (in Chinese).
- [10] JANDAGHI M, PARVINAR P, TORKAMANY M J, *et al.* Measurement of the composition change in Al5754 alloy during long pulsed Nd:YAG laser welding based on LIBS [J]. *Journal of Physics*, 2009, D42 (20): 205301-205308.
- [11] PASTOR M, ZHAO H, MARTUKANITZ R P, *et al.* Porosity, underfill and magnesium loss during continuous wave Nd:YAG laser welding of thin plates of aluminum alloys 5182 and 5754 [J]. *Welding Research Supplement*, 1999, 78 (6): 207-216.
- [12] SIBILLANO T, ANCONA A, BERARDI V, *et al.* Correlation spectroscopy as a tool for detecting losses of ligand elements in laser welding of aluminium alloys [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44 (12): 1324-1335.
- [13] SIBILLANO T, ANCONA A, BERARDI V, *et al.* A study of the shielding gas influence on the laser beam welding of AA5083 aluminum alloys by in-process spectroscopic investigation [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44 (10): 1039-1051.
- [14] CHENG Y Y, JIN X Z, LI S C, *et al.* Fresnel absorption and inverse bremsstrahlung absorption in an actual 3-D keyhole during deep penetration CO₂ laser welding of aluminum 6016 [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44 (5): 1426-1436.