

# 激光焊接熔池流动性试验研究

崔海超 芦凤桂 唐新华 姚舜

(上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240)

**摘要** 采用大功率 CO<sub>2</sub> 激光器研究 Al-ZL101/TiB<sub>2</sub>-Al 三层板激光焊接, 根据扫描电镜 (SEM) 及维氏硬度计观察并测量焊后各层 TiB<sub>2</sub> 分布及焊缝硬度, 得出了在激光焊透及未焊透时的熔池流动状态。结果表明, 在激光未穿透焊接时, 熔池内存在一个对流环, 其对流在小孔缩颈处最为强烈, 此处硬度值最大, TiB<sub>2</sub> 体积分数最高, 而在熔池底部对流最弱, 硬度值最低, TiB<sub>2</sub> 体积分数最小; 在激光全焊透焊接时, 熔池在上下两个表面分别存在对流环, 下表面对流比上表面对流更为强烈, 其硬度值较大, TiB<sub>2</sub> 体积分数较高, 对流在焊缝中间层两对流环连接处最弱, 此处对流流失的 TiB<sub>2</sub> 最少, 使得 TiB<sub>2</sub> 体积分数最大, 硬度值最高。

**关键词** 激光技术; 激光焊接; 熔池; 粒子分布; 硬度; 流动性

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0603004

## Experimental Research on Fluidity of Laser Welded Molten Pool

Cui Haichao Lu Fenggui Tang Xinhua Yao Shun

(Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification,  
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract** The fluidity of molten pool is analyzed with CO<sub>2</sub> laser welding on Al-ZL101/TiB<sub>2</sub>-Al triple plates. Scan electron microscope (SEM) and hardness tester are used to observe the TiB<sub>2</sub> distribution and measure the hardness. The fluidity of molten pool is inferred according to the TiB<sub>2</sub> distribution and hardness values of weld seam. In the incomplete penetration, a convection loop is presented and the strongest convection locates at the neck of keyhole where the highest hardness and TiB<sub>2</sub> volume fraction are presented. In the full penetration, two convection loops are presented on the top and bottom surfaces of molten pool, respectively. The convection is stronger at the bottom than that on the top so that it has higher TiB<sub>2</sub> volume fraction and hardness. The slightest convection occurs in the link of two loops, i. e. the center of weld seam where the highest hardness and TiB<sub>2</sub> volume fraction are presented because of the smallest reduction of TiB<sub>2</sub> flowing away with the convection.

**Key words** laser technique; laser welding; molten pool; particle distribution; hardness; fluidity

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3390

## 1 引 言

激光焊接采用高能束的激光作为热源, 与传统焊接方法相比具有速度快、热影响区小、成形好等特点。激光焊接依靠小孔的运动进行, 焊接熔池受到小孔中的蒸气压力、熔池的表面张力、保护气体对熔池的压力以及熔池内流体重力的影响, 产生剧烈运动<sup>[1]</sup>。激光焊接熔池的剧烈运动, 势必对焊缝成分分布产生影响。姚成武等<sup>[2]</sup>在激光焊接铜钢异种金

属时, 由于铜钢熔化比不同, 发现铜在熔池上部和下部均存在偏析, 导致焊缝成分不均匀。Xiaodong Qi 等<sup>[3]</sup>在激光搭接焊镁合金和铝合金时, 下部铝合金板同样在焊缝中存在成分偏析。因此了解激光焊接熔池流动机制对于解决异种金属焊接时成分偏析具有重要意义。日本学者 S. Katayama 等<sup>[4]</sup>曾采用 X 射线跟踪 W 粒子方法, 观察了在未焊透情况下的激光焊接过程中熔池的流动状况, 但该研究未报道在

**收稿日期**: 2011-03-28; **收到修改稿日期**: 2011-05-09

**基金项目**: 上海市自然科学基金(11ZR1417500)资助课题。

**作者简介**: 崔海超(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事铝基复合材料焊接方面的研究。E-mail: hccuisjtu@gmail.com

**导师简介**: 卢凤桂(1975—), 女, 博士, 副教授, 主要从事材料焊接及仿真模拟方面的研究。E-mail: lfg119@sjtu.edu.cn

全焊透时的熔池流动情况,并且忽略了 W 粒子本身重力的影响。鉴于试验研究激光焊接时熔池流动性的困难,许多研究学者<sup>[5~10]</sup>转向采用有限元方法对激光焊接时的熔池流场进行数值模拟,发现在未焊透情况下,熔池中仅存在一个对流环,而在焊透情况下熔池中存在两个对流环,但研究缺少试验验证。目前为止,对于激光焊接时在焊透及未焊透时熔池流动状态仍然没有定论。段爱琴等<sup>[11]</sup>曾采用试验方法证实了在激光焊透与未焊透时小孔稳定性不同,使得两种情况下熔池流动状态不同。因此,研究两种激光焊接情况下的熔池流动状态对于解决激光焊接时焊缝成形质量,焊缝内气孔及焊缝内成分偏析等具有非常重要的意义。在激光焊接原位纳米级 TiB<sub>2</sub> 粒子增强铝基复合材料中,TiB<sub>2</sub> 粒子没有发生溶解,且与 Al 基体具有良好的润湿性<sup>[12]</sup>。本文采用 Al-Al/TiB<sub>2</sub>-Al 三层板进行焊接,忽略纳米级 TiB<sub>2</sub> 粒子重力影响,研究激光焊透及未焊透时粒子在焊缝中的分布,并通过测试焊缝硬度,判断激光焊接时的熔池流动状态。

## 2 试验材料及设计

上海交通大学生态与材料环境研究所制备的原位 TiB<sub>2</sub> 增强铝基复合材料,TiB<sub>2</sub> 粒子为纳米级,其

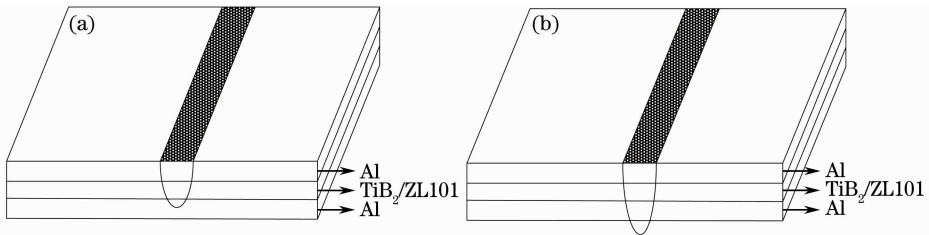


图 2 焊接示意图。(a)未焊透,(b)焊透

Fig. 2 Schematic of welding. (a) incomplete penetration, (b) full penetration

试验设备采用最大功率 15 kW 的 CO<sub>2</sub> 激光器 (Trumpf),焊接速度为 3 m/min,通过调整激光功率保证未焊透和刚焊透,焊接时采用功率分别为 8.5 kW 和 9.5 kW。焊接时采用氦气作保护气体,吹气方向与焊接方向夹角为 45°。焊后截取不同试样抛光腐蚀,采用 SEM 观察焊缝内 TiB<sub>2</sub> 粒子分布,并利用维氏硬度计测试了各层焊缝的硬度,每个硬度值均为周围 5 个点的平均值。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 未焊透时焊缝硬度及 TiB<sub>2</sub> 粒子分布

图 3(a)显示了未穿透焊时熔池上下两层的界

重力可以忽略不计,所以焊接时熔池的流动状态与焊后各层 TiB<sub>2</sub> 粒子数量相关,而 TiB<sub>2</sub> 粒子含量又决定了焊缝硬度。采用扫描电镜(SEM)观察焊接后各层 TiB<sub>2</sub> 分布,并测试焊缝各层的硬度,从而推断焊接时熔池的流动状态。为便于观察 TiB<sub>2</sub> 粒子分布,试验材料选用纯 Al 和 ZL101-14% TiB<sub>2</sub> (质量分数)复合材料,ZL101 材料成分为纯 Al,质量分数为 7% 的 Si 和质量分数为 0.3% 的 Mg。TiB<sub>2</sub> 粒子形貌如图 1 所示,TiB<sub>2</sub> 粒子约为 100 nm。试验方法采用 Al-ZL101/TiB<sub>2</sub>-Al 三层板焊接,每层板厚为 2 mm。图 2 分别显示了焊透及未焊透时的示意图。试验前采用机械打磨的方法除去各层板表面氧化膜,并保证试样表面光滑,层与层之间无间隙,焊接时采用夹具将其固定。

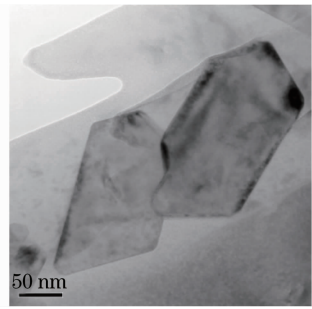


图 1 TiB<sub>2</sub> 粒子形貌

Fig. 1 Pattern of TiB<sub>2</sub>

面区域,图中标记为分界线。可以看出层与层结合处无明显缝隙,上层 TiB<sub>2</sub> 粒子数量多于中间层。图 3(b)显示了中间层和下层界面处的微观组织,标记为分界线,下层纯 Al 中出现大量的 TiB<sub>2</sub> 粒子。图 4(b)显示了图 4(a)处不同位置的焊缝硬度。可以看出,在上层纯 Al 焊缝中,硬度从上往下逐渐增加,而到达中间复合材料焊缝层时硬度又逐渐下降,尤其在最下层纯 Al 焊缝的底部硬度值最低。整个上层焊缝的平均硬度值大于中间层焊缝硬度值,最下层焊缝平均硬度值最低。整个焊缝硬度均高于纯 Al 母材的硬度,而低于复合材料母材硬度。

焊缝内的硬度与 TiB<sub>2</sub> 的体积分数相关。图 5

显示了图 4(a)中 3,5 和 7 处的  $TiB_2$  粒子分布。采用网格方法测出了  $TiB_2$  粒子的相对面积分数,从而得出其体积分数。在 3,5 和 7 处的  $TiB_2$  粒子体积分数分别为:13.6%,11.2%和 9.0%。在上层 3 处对应的硬度值最高,相应的  $TiB_2$  粒子体积分数最大, $TiB_2$  分布较均匀。而中间层 5 处  $TiB_2$  粒子数量明显少于 3 处,下层 7 处  $TiB_2$  粒子数量又略少于

与中间层 5 处粒子数量。另外在每一层  $TiB_2$  粒子的数量均低于中间层母材中的  $TiB_2$  粒子的数量,而明显高于纯 Al 层中  $TiB_2$  粒子数量。在纯 Al 层中有 Si 相在晶界析出, $TiB_2$  粒子沿着晶界分布,少量  $TiB_2$  粒子出现在晶内。纯 Al 层中 Si 相和  $TiB_2$  粒子的出现均说明在焊缝熔池的内部发生了对流运动。

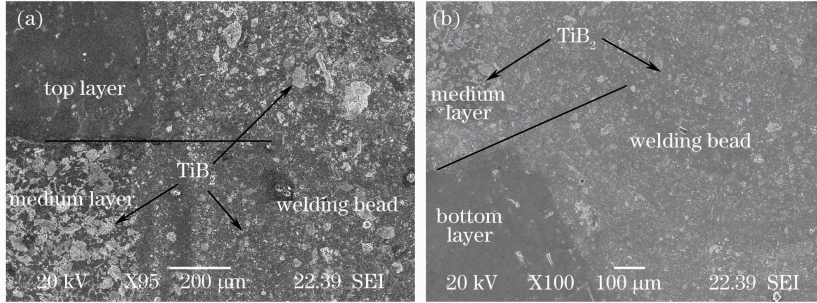


图 3 焊缝层与层结合处微观组织。(a)上层与中间层结合处,(b)中间层与下层结合处  
Fig. 3 Microstructure of bonded layers. (a) location between top and medium layer, (b) location between medium and bottom layer

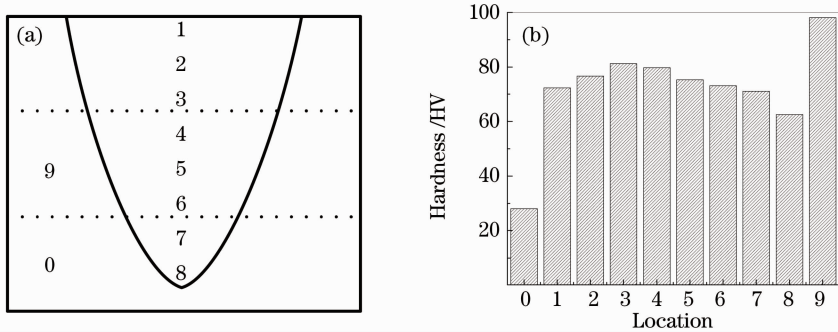


图 4 硬度测试点位置及对应焊缝各部位硬度。(a)硬度测试点位置,(b)各点处的硬度值  
Fig. 4 Schematic of location and corresponding hardness values. (a) schematic of location, (b) hardness values relative to the location

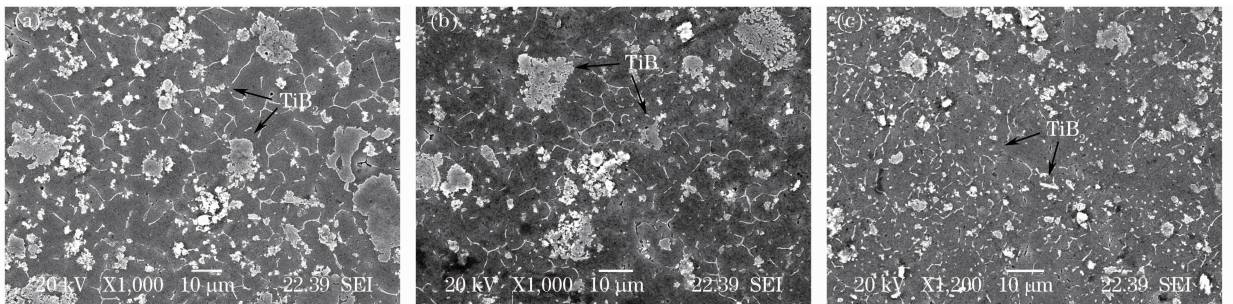


图 5 焊缝  $TiB_2$  分布。(a)上层 3 处,(b)中间层 5 处,(c)下层 7 处

Fig. 5  $TiB_2$  distribution in the bead. (a) location 3 on the top, (b) location 5 in the medium, (c) location 7 at the bottom

### 3.2 未焊透时二维熔池流动模型假设

焊缝各层中均有不同体积分数的  $TiB_2$  粒子,同时也有 Si 相析出,且体积分数和硬度均小于复合材料母材,说明焊接过程中熔池发生了对流。激光焊接时由于小孔向前移动,所以小孔前壁流体向小孔

两侧移动。根据文献[13]报道,熔池的流动主要集中在小孔后壁。当激光深熔焊接时,小孔的瞬间变化是由浅逐渐变深的,最后稳定、移动。小孔后壁不同部位,温度不同,温度梯度引发表面张力对流(Marangoni)。根据焊缝硬度及粒子分布表明,在



上层纯 Al 层的下部硬度值最大, 粒子分数最高, 表明此处对流最强烈, 使得中间层更多的  $TiB_2$  粒子移动到该处。根据文献[14]报道, 此处为熔池缩颈处, 最容易出现大气孔。而在小孔表面, 由于受到表面等离子体及侧吹气体压力的影响, 对流较弱。在小孔底部, 蒸气压方向垂直于下层液体, 只有表面张力引起的对流, 所以也较弱, 粒子数量较少。根据以上分析, 得出了熔池流动示意图, 如图 6 所示。熔池中存在一个对流环, 与文献[8]中采用有限元方法模拟未穿透焊接时熔池流动情况相符合。

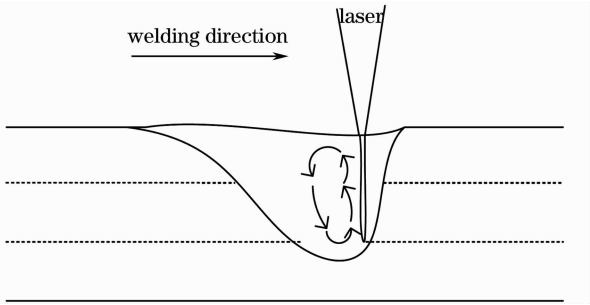


图 6 未焊透时熔池流动性示意图

Fig. 6 Schematic of molten pool fluidity in incomplete penetration

### 3.3 全焊透时焊缝硬度及 $TiB_2$ 粒子分布

图 7 显示了全焊透时各层熔合线的微观组织。可以看出在纯 Al 层中, 焊缝中均出现了大量的  $TiB_2$  粒子, 并且伴有 Si 相在晶界析出, 而复合材料层中,  $TiB_2$  粒子分数明显低于母材。图 8(a) 和 (b) 分别显示了对应位置的硬度分布图。可以看出, 此时硬度最高值出现在中间层, 上层硬度较低, 而中间层硬度最高, 下层硬度略小于中间层硬度, 同时三层的硬度均比未焊透时低。焊缝整个硬度分布从上到下为先增加后减小。与未焊透时相比, 整个焊缝硬度值低于未焊透时硬度值, 主要原因是熔池体积增大,  $TiB_2$  相对体积分数减小, 所以硬度均小于未焊透时硬度。另外, 对比中间层硬度值发现, 中间层焊接后晶粒明显细化, 但其硬度值远小于中间层中母材硬度, 表明细晶强化所引起的硬度增加效果远小于  $TiB_2$  体积分数的降低导致的强化效果。图 9 分别显示了图 8(a) 中对应 2, 6 和 8 处的微观组织, 同样采用网格方法测出了  $TiB_2$  粒子的相对体积分数分别为 7.4%, 10.6% 和 8.2%。可以看出, 6 处  $TiB_2$  体积分数明显最大, 2 处体积分数略低于 8 处, 同样说明了焊缝中间层  $TiB_2$  粒子分数较高, 最上层略低于最下层。

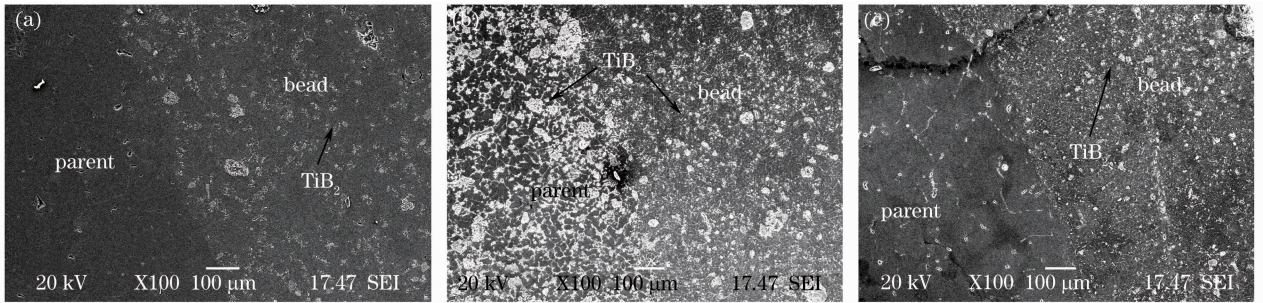


图 7 熔合线微观组织。(a) 上层熔合线组织, (b) 中层熔合线组织, (c) 下层熔合线组织

Fig. 7 Microstructure of fusion line. (a) top layer, (b) medium layer, (c) bottom layer

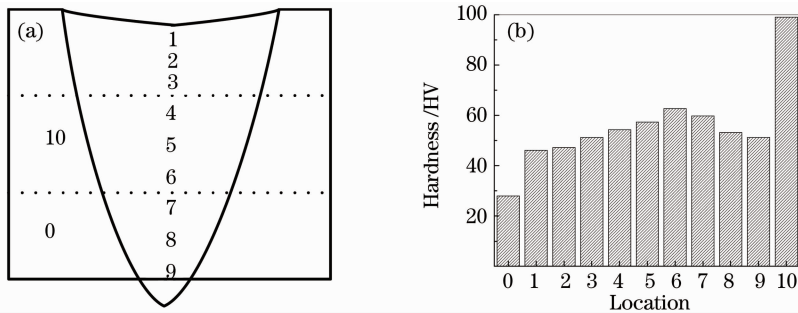


图 8 硬度测试点位置及对应焊缝各部位硬度。(a) 硬度测试点位置, (b) 各点处的硬度值

Fig. 8 Schematic of location and corresponding hardness values. (a) schematic of location, (b) hardness values relative to the location

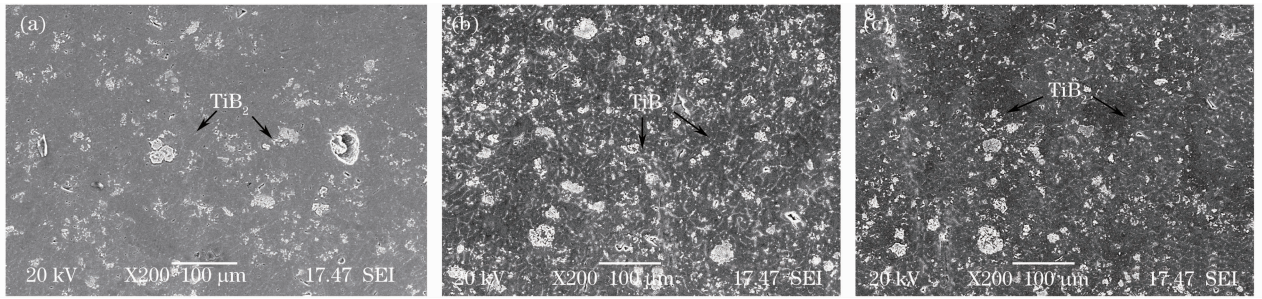


图9 焊缝  $TiB_2$  分布。(a)上层 2 处,(b)中间层 6 处,(c)下层 8 处

Fig. 9  $TiB_2$  distribution in the bead. (a) location 2 on the top, (b) location 6 in the medium, (c) location 8 at the bottom

### 3.4 穿透焊接二维熔池流动性模型假设

在全焊透焊接时,小孔是贯穿的,小孔内等离子体从背面逸出,导致小孔内等离子体对孔壁的作用力减弱,此时熔池上下两个表面均存在不同程度的对流。根据焊缝中粒子分布,上层中  $TiB_2$  粒子体积分数略小,中间层体积分数最高,而下层体积分数略高于上层,说明熔池在上层和中间层之间存在对流,这种对流与未焊透类似,但由于小孔内蒸气压力减小,所以对流减弱,导致上层内粒子数量减少。而在小孔底部,中间层和下层之间也发生对流,重力和表面张力是引起对流的主要动力。由于小孔底部没有受到来自表面等离子体压力和侧吹气体压力,所以对流比上表面剧烈,所以在下层中  $TiB_2$  粒子数量相对较多。此时引起的两种对流在中间层形成临界区,此处对流较弱,使得该处参与对流的  $TiB_2$  粒子数量较少,剩余  $TiB_2$  粒子较多,因此硬度最高。根据以上分析,得出了熔池流动示意图,如图 10 所示。熔池中上下表面分别存在一个对流环,该研究与文献[9]采用有限元方法计算结果相一致,为计算模拟提供了试验依据。

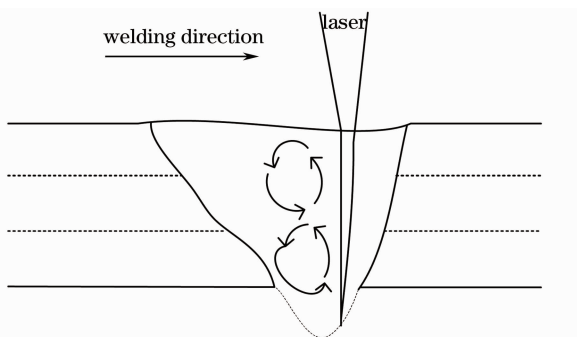


图 10 未焊透时熔池流动性示意图

Fig. 10 Schematic of molten pool fluidity in incomplete penetration

接,根据焊后  $TiB_2$  分布及硬度值,推断了激光焊接时焊透与未焊透时的熔池流动性。

2) 在未焊透时,  $TiB_2$  体积分数沿焊缝纵截面从上往下依次先增加后降低,在上层纯铝中体积分数最高,焊缝硬度值大小与  $TiB_2$  体积分数相对应。根据  $TiB_2$  分布及焊缝硬度值,推断此时焊缝熔池中存在一个对流环,熔池在小孔颈缩处对流比较强烈。

3) 穿透焊接时,  $TiB_2$  体积分数沿焊缝纵截面从上往下依次先增加后降低,在焊缝中间层部位  $TiB_2$  体积分数最高,焊缝内硬度值与  $TiB_2$  体积分数相对应。根据  $TiB_2$  分布及焊缝硬度值,推断此时焊缝熔池中存在两个对流环,且底部对流比表面对流较强烈。

### 参 考 文 献

- 1 Chen Xi, Ye Xiaohu. A numerical simulation study of laser full-penetration welding[J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(2): 185~188
- 2 陈 熙, 叶晓虎. 激光穿透焊的数值模拟研究[J]. *应用激光*, 2002, **22**(2): 185~188
- 3 Chengwu Yao, Binshi Xu, Xiancheng Zhang *et al.*. Interface microstructure and mechanical properties of laser welding copper-steel dissimilar joint[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, **47**(7-8): 807~814
- 4 Xiaodong Qi, Liming Liu. Fusion Welding of Fe-added lap joints between AZ31B magnesium alloy to 6061 aluminum alloy by hybrid laser-tungsten inert gas welding technique[J]. *Materials and Design*, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2011.04.046
- 5 S. Katayama, M. Mizutani, A. Matsunawa. Development of porosity prevention procedures during laser welding[C]. *SPIE*, 2003, **4831**: 281~288
- 6 Hong Wang, Yaowu Shi, Shuili Gong. Effect of pressure gradient driven convection in the molten pool during the deep penetration laser welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, **184**(1-3): 386~392
- 7 R. Fabbro, S. Slimani, I. Doudet *et al.*. Experimental study of the dynamical coupling between the induced vapour plume and the melt pool for Nd: YAG CW laser welding[J]. *Journal of Physics*, 2006, **39**: 394~400
- 8 Xu Jiuhua, Luo Yumei, Zhang Jingzhou. Numerical study for heat transfer in high power density keyhole welding process[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(2): 174~178
- 9 徐九华, 罗玉梅, 张靖周. 高能束流小孔焊接模式传热过程的数值模拟[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(2): 174~178
- 10 Won-ik Cho, Suck-Joo Na, Min-Hyun *et al.*. Numerical study of

## 4 结 论

1) 采用三层板 Al-ZL101/ $TiB_2$ -Al 进行激光焊

- alloying element distribution in CO<sub>2</sub> laser-GMA hybrid welding [J]. *Computational Materials Science*, 2010, **49**(4): 792~800
- 9 Du Hanbin, Hu Lunji, Wang Dongchuan *et al.*. Research on the numerical simulation of thermal and velocity field in laser full-penetration welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, **26**(12): 65~69  
杜汉斌, 胡伦骥, 王东川 等. 激光穿透焊温度场及流动场的数值模拟[J]. *焊接学报*, 2005, **26**(12): 65~69
- 10 Liu Huixia, Xing An, Zhang Huizhong *et al.*. Temperature field simulation on laser transmission welding of polyvinylchloride[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1801~1807  
刘会霞, 邢 安, 张惠中 等. 聚氯乙烯激光透射焊接温度场的有限元模拟[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1801~1807
- 11 Duan Aiqin, Hu Lunji, Wang Yajun. Research on welding penetration monitoring by laser plasma optical signal in laser welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 131~134  
段爱琴, 胡伦骥, 王亚军. 激光深熔焊缝的熔透性监测研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 131~134
- 12 Cui Haichao, Lu Fenggui, Tang Xinhua *et al.*. Laser welding of in-situ particulate reinforced aluminum matrix composites [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, **31**(8): 68~72  
崔海超, 芦凤桂, 唐新华 等. 原位生成铝基复合材料的激光焊接[J]. *焊接学报*, 2010, **31**(8): 68~72
- 13 E. H. Amara, R. Fabbro, F. Hamadi. Modeling of the melted bath movement induced by the vapor flow in deep penetration laser welding[J]. *Journal of Laser Applications*, 2006, **18**(1): 2~11
- 14 Yang Decai. Analysis on two different abnormal phenomenon in laser welding[J]. *Laser Journal*, 2001, **22**(4): 44~46  
杨德才. 激光焊接两种异常现象的分析[J]. *激光杂志*, 2001, **22**(4): 44~46