

文章编号: 0258-7025(2009)10-2722-06

Al 合金表面激光-钨极氩弧复合熔注 WC 颗粒研究

李福泉 陈彦宾 李俐群 魏连峰

(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 针对铝合金激光熔注(LMI)工艺过程中对激光反射率高、表面存在氧化膜且导热率高等主要问题,开发了激光-钨极氩弧(TIG)复合熔注工艺。研究了激光-TIG 复合方式,送粉方式,送粉载气流,TIG 保护气流,激光功率,TIG 电流等工艺参数的影响。研究发现,为实现有效的熔注强化效果,应选择后送粉方式;熔注层深度随 TIG 电流增加单调增加,随激光功率增加熔注层深度呈先增后降。送粉载气和 TIG 保护气相互匹配,是影响熔注工艺的关键因素。通过工艺参数匹配和优化,成功制备了 WCp/Al 表面复合材料层。熔注层厚度为 0.5~4.3 mm,深度可根据需要通过合理调节工艺参数来控制。

关键词 激光技术;激光熔注;复合;表面;Al 合金

中图分类号 TN249;TG456.7 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093610.2722

Investigation of Surface Modification of Al Alloy by Laser-TIG Hybrid Melt Injection WC Powder

Li Fuquan Chen Yanbin Li Liqun Wei Lianfeng

(State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract In order to overcome the difficulties of laser melt injection (LMI) on aluminium alloys, including high reflection of laser, oxide film and high heat conductivity, laser-tungsten inert gas (TIG) hybrid melt injection was exploited. The influence of process parameters, including the mode of hybrid laser-TIG, feeding powder type, the carrier gas flow, the shield gas flow of TIG, laser power and TIG current, were investigated. The results show that, in order to achieve appropriate surface enhancement effect, the powder should be fed from back side of laser beam. With the increase of TIG current, the depth of LMI layer increases monotonously. With the increase of laser power, the depth of LMI layer increases firstly and then decreases. The carrier gas flow and gas flow of TIG are the key factors which influence the LMI process, and should be matched and selected. Through optimization of process parameters, WCp/Al layer was prepared successfully on the surface of aluminium and the LMI layer with different thickness ranging from 0.5 to 4.3 mm can be achieved.

Key words laser technique; laser melt injection; hybrid; surface; Al alloy

1 引 言

激光熔注(LMI)是指采用激光束在金属材料表面形成熔池,同时将陶瓷增强颗粒直接注入到熔池中,在熔池冷却过程中,注入颗粒来不及熔化而被“冻结”在熔池中,从而形成颗粒增强的表面金属基复合材料层的过程^[1]。对碳钢和 Ti 合金的激光熔注已获得了成功^[2~5]。而对于 Al 合金的激光熔注实现起来

则非常困难,甚至无法注入。主要由于存在以下难点:一方面,Al 合金热导率高,散热速度快,同时对激光的反射率高,导致在 Al 合金表面形成熔池并保持足够的时间以实现粒子注入难度很大。另一方面,Al 合金表面存在一层致密的氧化膜,会对颗粒在 Al 合金表面注入形成阻碍。Vreeling 等^[6]采用激光熔注技术在铝合金表面制作了 SiC 层。条件是采用 YAG

收稿日期: 2008-12-22; 收到修改稿日期: 2009-02-10

作者简介: 李福泉(1972—),男,博士,讲师,主要从事激光表面处理及激光焊接等方面的研究。

E-mail: lifuquan@hit.edu.cn

激光器,在进行激光加热前要对材料表面进行喷砂处理,并且进行预热。喷砂处理及预热的目的是提高 Al 合金对激光的吸收率。研究发现,预热温度对激光熔注 SiC/Al 影响很大。当温度低于 300 °C 时,颗粒很难进入熔池,而当温度超过 300 °C 甚至更高时,才能够实现陶瓷颗粒注入铝基体熔池中。

针对铝合金激光熔注所存在的问题,本文借鉴焊接过程中的激光-钨极氩弧(TIG)复合焊接技术^[7],对铝合金表面复合材料层的制备工艺进行试验研究,开发了激光-TIG 复合熔注的新工艺,不需要预热即可获得良好的熔注效果,并对此新方法进

行了工艺研究。

2 实验材料及方法

试验采用 2219 铝合金,尺寸为 120 mm × 50 mm × 5 mm,其主要成分见表 1,热处理状态为 T87,金相组织见图 1。2219 铝合金中的基体相为 $\alpha(\text{Al})$,根据文献[8]可以判断,图 1 中褐色相(图中 A 所示)为 $\alpha(\text{Al})$, CuAl_2 的二元共晶,黑色大块的(图中 B 所示)为 $(\text{FeMn})\text{Al}_6$,而颜色较浅(图中 C 所示)的相为 CuAl_2 相。

表 1 2219 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of aluminum alloy 2219

| Alloy elements | Cu | Mn | Ti | Zr | Si | Fe | Ni | Al |
|------------------|------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| Mass fraction /% | 6.38 | 0.32 | 0.064 | 0.18 | 0.084 | 0.18 | 0.032 | bal. |

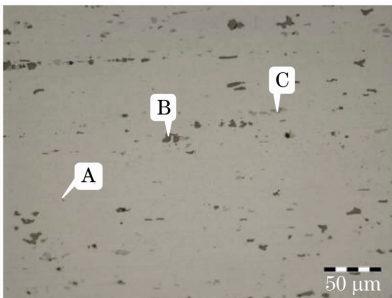


图 1 铝合金母材的金相组织

Fig. 1 Metallurgical structure of aluminum alloy substrate

对试样表面打磨,然后用丙酮清洗,去除油污,最后再对试件进行化学清洗以去除氧化膜。具体步骤为:在 40~60 °C 的质量分数为 6%~10% 的氢氧化钠水溶液碱洗 7 min;然后清水冲洗;放入体积分数为 30% 的硝酸中 3 min 进行中和光化;最后取出后清水冲洗,干燥风干。

实验采用的铸造 WC 陶瓷颗粒为立方晶系硬质颗粒,是制造硬质合金的主要材料,具有很高的显微硬度。注入粉末的粒度为 100~200 目,粉末的

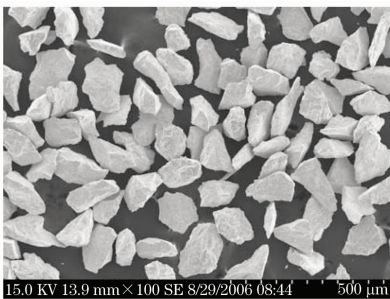


图 2 WC 粉末 SEM 形貌

Fig. 2 SEM micrograph of WC powder

SEM 形貌如图 2 所示。

实验是在 3 kW 轴流射频激励扩散冷却 CO₂ 激光器下进行的,配用 CNC 系统工作台。采用 PEL-1A 送粉器进行同步送粉,WX-300TIG 焊机。采用如图 3 所示实验系统,将 WC 颗粒注入到铝合金表面所形成的熔池中。

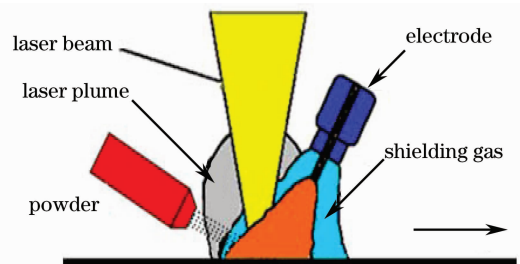


图 3 实验系统示意图

Fig. 3 Schematic of experimental system

3 实验结果及讨论

针对铝合金激光熔注存在的困难,采用交流 TIG 电弧热源辅助激光热源对铝合金进行加热形成熔池,同时将 WC 颗粒注入 Al 合金基体表面。采用激光-TIG 复合熔注有显著的优点:一方面由于电弧的作用,激光束能够直接辐射到液态熔池表面,而液态熔池对激光的反射率低于固态金属,导致对激光的吸收率增加,有利于提高液态熔池的存在时间;另一方面,由于存在“阴极雾化”作用,采用交流 TIG 电弧的负半周可有效清理 Al 合金表面氧化膜。而正半周则可以避免 TIG 电弧钨极的过度烧损。可见,采用激光-TIG 复合熔注的目的是在不需

对 Al 合金进行预热的条件下实现陶瓷颗粒的表面熔注。在激光-TIG 复合熔注工艺中,影响因素较多且其相互作用及相互匹配也很复杂。工艺因素包括送粉方式,激光功率(P),TIG 电流(I),TIG 保护气体流量(L_2),TIG 枪倾角(β),送粉角度(α),载气流量(L_1),载气压力,扫描速度(V),送粉率(M),喷嘴位置以及复合方式等。

3.1 工艺参数的优化

3.1.1 复合方式的选择

为了研究 TIG 与激光辅助方式的影响,建立了四种辅助模式如图 4 所示。图 4(a),(b)为非复合

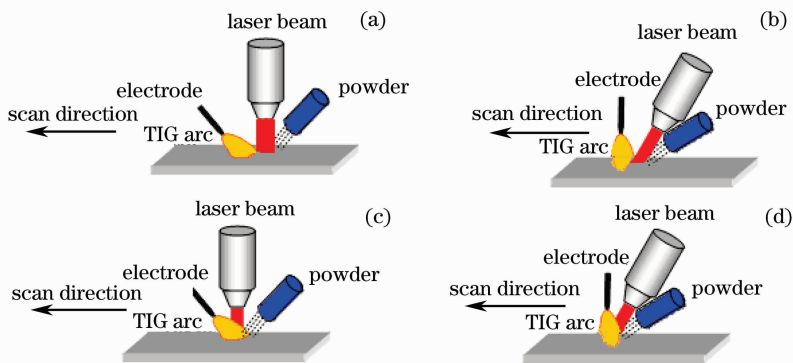


图 4 不同辅助方式的装置示意图。(a) 激光竖直非复合方式;(b) TIG 竖直非复合方式;
(c) 激光竖直复合方式;(d) TIG 竖直复合方式

Fig. 4 Schematic of instrument under different mode of laser-TIG hybrid. (a) Vertical laser and no-hybrid mode;
(b) vertical TIG and no-hybrid mode; (c) vertical laser and hybrid mode; (d) vertical TIG and hybrid mode

实验发现非复合方式下得到的熔注层成型极差,几乎没有粒子注入熔池。原因可能有两个方面:首先,铝合金极易与氧发生反应,TIG 焊炬离开之后工件在较高的温度下很快被氧化形成氧化膜;其次,铝合金热导率很高,TIG 加热工件后很快冷却,工件对激光吸收率的增加效果大大减弱。采用激光倾斜 TIG 焊炬竖立的方式[图 4(b)和图 4(d)所示系统]进行熔注时效果同样也很差,激光的倾斜使得熔池的拖尾前移,这同时增加了电弧与激光对颗粒的加热,颗粒烧损严重。基于以上研究,最终采用图 4(c)所示的复合熔注模式的装置系统进行试验。

3.1.2 送粉方式的确定

送粉方式分为前送粉和后送粉,前送粉是指送粉方向与激光扫描方向的夹角小于 90° ,后送粉是指送粉方向与激光扫描方向之间的夹角大于 90° 。图 5(a),(b)是在激光功率 1 kW,TIG 电流 60 A、扫描速度 0.3 m/h 下,分别采用前送粉和后送粉方式得到的熔注层 SEM 照片。由图 5(a)可以看出,采

形式的示意图,即用 TIG 先行扫描工件,激光紧跟其后加热工件形成熔池进行熔注,TIG 电弧离激光束有一段距离,二者未形成复合热源,如图 4(b)所示为将激光倾斜一定角度使 TIG 焊炬竖立或尽量向后倾斜。所谓复合方式是指采用激光-TIG 复合热源共同作用工件表面来进行熔注,此时 TIG 焊炬与激光束距离很近,电弧与激光叠加在一起相互作用共同加热工件,如图 4(c),(d)所示。同样为了进一步减小 TIG 保护气的影响,设计了如图 4(d)所示的实验系统,将激光倾斜一定角度让 TIG 焊炬竖立。

用前送粉方式注入的 WC 颗粒大部分熔化,熔注层中保留下来的很少。而后送粉的结果则明显不同,由图 5(b)可见熔注层中保留了较多的 WC 颗粒。这种现象产生的原因在于采用前送粉时,大部分颗粒从热源中心穿过,与热源作用时间较长,使大量的颗粒熔化严重,熔化后的 WC 颗粒以液态形式进入熔池,与熔池中的液态 Al 接触并反应,使凝固后的熔池中保留的固态 WC 颗粒很少,因而传统的激光熔覆加工一般采用向熔池前部送粉,将熔覆粉末吹向熔池前部,与光束充分作用,吸收光束的主要能量,避免基体的过量熔化,从而实现降低基体稀释率的目的。而采用后送粉方式,热源的主要加热对象为基底材料,使其熔化形成合适深度的熔池,尽管仍有部分颗粒经过热源中心,受其加热而熔化,但大部分注入颗粒受光束辐照程度较轻,主要由熔池后部进入,从而实现了熔池中保留足量的 WC 颗粒,发挥其增强基体的作用。为实现良好的熔注强化效果,应选择用后送粉方式。

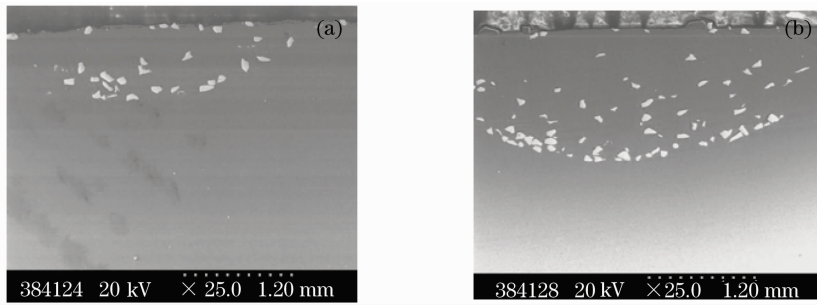


图5 不同送粉方式下熔注层的SEM照片。(a) 前送粉熔注层的形貌;(b) 后送粉熔注层的形貌

Fig. 5 SEM morphology of LMI layer under different type of powder flow. (a) Flow from the front of the laser beam; (b) flow from the back of the laser beam

3.1.3 送粉载气, TIG 保护气, 送粉角及 TIG 焊炬倾角选择

对于激光-TIG 复合熔注工艺, 主要问题是 TIG 保护气与送粉载气对吹, TIG 保护气对颗粒产生一个向后的吹力, 对颗粒向熔池的注入有着极为不利的影 响。送粉载气, TIG 保护气, 送粉角及 TIG 焊炬倾角的变化及匹配对粉末向熔池顺利注入有很大的影响。

送粉载气流量的大小影响着粉末送出喷嘴时的出口速度。载气流量太小, 则粉末送出时的初速度过小, 粉末流的挺度不够, 易于被 TIG 保护气吹走, 难以保证向熔池的顺利注入; 载气流量太大, 则会造成粉末流紊流, 出现送粉不稳。TIG 保护气流量的大小直接决定了对钨极和熔池保护情况的好坏, 流量过小钨极烧损十分严重, 同时熔池得不到充分的保护, 熔注层金属容易氧化, 产生气孔等缺陷。另外, TIG 保护气流量过小对等离子体的压缩能力降低, 特别是在对铝合金进行熔注时, 强烈的等离子体容易烧坏陶瓷嘴和钨极, 使工艺无法继续进行。TIG 保护气流量过大时则会出现紊流, 导致空气卷入, 严重影响熔注质量。通过实验研究发现, 在保证对钨极和熔池良好保护前提之下, TIG 保护气流量范围应在 240~450 L/h。

送粉角可定义为注入粉末流与待加工试样表面的夹角, 而 TIG 倾角是指 TIG 焊炬(或钨极)与待加工试样表面的夹角。这两个角度的大小及其匹配对颗粒向熔池的注入有显著的影响。在激光-TIG 复合熔注过程中, 当送粉角较小时, 粉末大部分被吹到熔池的前方, 能够进入熔池的颗粒很少, 难以保证熔注层中注入颗粒达到要求的体积分数。增大送粉角, 颗粒注入情况有所改善, 可以将熔注层控制在合

适的深度。但当送粉角度过大时, 颗粒在进入熔池前在光束中运行的时间较长, 受光束辐照会引起大量颗粒熔化, 粉末烧损严重, 而且当送粉率控制不好时, 还有可能产生“堆粉”现象。

根据以上分析, 通过试验对送粉载气, TIG 保护气, 送粉角及 TIG 倾角进行了调试, 结果表明送粉载气流量(L_1) 600~800 L/h, TIG 保护气流量(L_2) 240~450 L/h, 送粉角(α) $30^\circ\sim 50^\circ$, TIG 倾角(β) $60^\circ\sim 80^\circ$ 时, 可以获得较好的熔注层。

3.1.4 激光功率与 TIG 电流的调试与匹配

激光功率和 TIG 电流的大小直接决定了复合热源对工件的热输入, 决定了所形成熔池的大小及其存在时间。并进一步影响着表面氧化膜的破碎情况。实验结果表明, 熔注层厚度与宽度随着热输入的增加而增大。对 TIG 电流和激光功率影响熔注深度的情况进行单独考察, 发现两者有明显不同的规律。图 6(a) 为 $P = 1.1 \text{ kW}$, $M = 125 \text{ mg/s}$, $V = 0.2 \text{ m/min}$ 时得到的熔注层厚度随 TIG 电流变化关系, 图 6(b) 为 $I = 50 \text{ A}$, $M = 135 \text{ mg/s}$, $V = 0.3 \text{ m/min}$ 时熔注层厚度随激光功率的变化关系。可以看出, 熔注层厚度随电流的增加而单调增加, 但随着激光功率的增加熔注层的厚度先是逐渐递增而后又有所下降, 在 2 kW 处出现转折。出现这种现象的主要原因在于铝合金含有较多的合金元素, 熔注过程中会产生强烈的等离子体, 而激光功率对等离子体的影响要强于 TIG 电流的作用, 特别是正离焦的时候, 激光的焦点在工件上方, 很容易把上方气体“点燃”, 形成很高的等离子体。等离子体罩在熔池上方, 对颗粒的注入熔池有着十分不利的影 响。因此, 本实验采用负离焦方式增大光斑直径, 并将激光控制在 1~2 kW 范围之内。

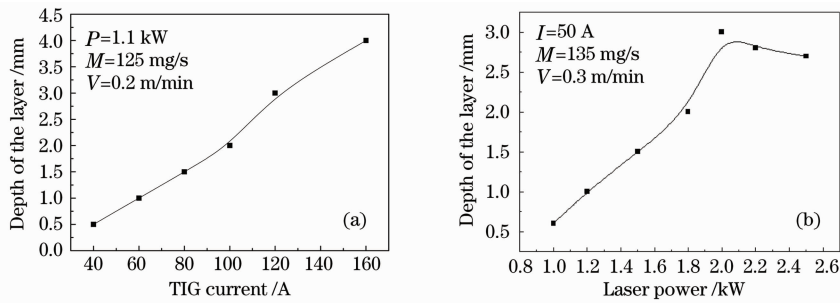


图 6 TIG 电流、激光功率对熔注层厚度的影响。(a) TIG 电流对熔注层厚度的影响；(b) 激光功率对熔注层厚度的影响

Fig. 6 Influences of TIG current and laser power on the thickness of LMI layer.

(a) Influence of TIG current; (b) influence of laser power

通过控制热输入与送粉率以及扫描速度之间的匹配,在如下的工艺范围内,获得良好的铝合金表面颗粒增强的复合材料层:激光功率(P)1~1.5 kW, TIG 电流(I)40~100 A,扫描速度(V)0.2~0.4 m/min,载气流量(L_1)600~800 L/h, TIG 保护气流量(L_2)240~450 L/h,送粉角(α)30°~50°, TIG 倾角(β)60°~80°,送粉率(M)120~150 mg/s。激光采用负离焦的方式以保证光斑直径在3~4 mm。成功制备了铝合金表面的复合材料层,其厚度为0.5~4.3 mm,深度可根据需要通过合理调节工艺参数来控制。

3.2 熔注层形貌

图 7 为不同工艺参数下获得的不同厚度的复合材料层横截面的 SEM 照片,从图 7(b)中可以看出

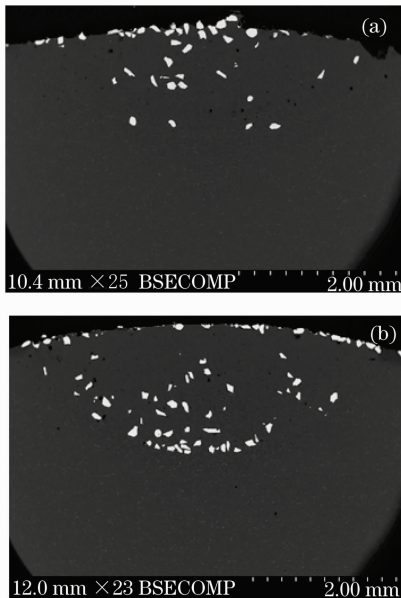


图 7 不同工艺参数下获得的熔注层形貌

Fig. 7 Morphology of LMI layer at different parameters (a) $I = 60$ A, $P = 1$ kW, $M = 120$ mg/s, $V = 0.2$ m/min; (b) $I = 80$ A, $P = 1.5$ kW, $M = 145$ mg/s, $V = 0.35$ m/min

在熔注层中颗粒的体积分数随着深度的增加略有增加,与熔注层上部相比底部颗粒的体积分数略大。尽管 WC 密度较之于 Al 液相要大,WC 颗粒在熔注过程中有下沉的趋势,但激光熔池中温度梯度和溶质梯度所引起的马兰戈泥(Marangoni)流会促进 WC 颗粒位置重排,抑制其于熔池底部聚集。两者共同作用,对 WC 在激光熔池中的分布产生影响。图 8 为熔注层水平截面颗粒分布的 SEM 照片,采用的实验参数为: TIG 电流 80 A,激光功率 1.5 kW,送粉率 145 mg/s,扫描速度 0.35 m/min。可以看到水平截面颗粒分布较为均匀。用软件 Image-pro plus 对熔注层颗粒体积分数进行分析,电弧电流 70~90 A,激光功率 1.2~1.5 kW,送粉率 130~140 mg/s,扫描速度 0.3~0.4 m/min 时所获得的熔注层的颗粒体积分数在 0.23~0.4 之间。

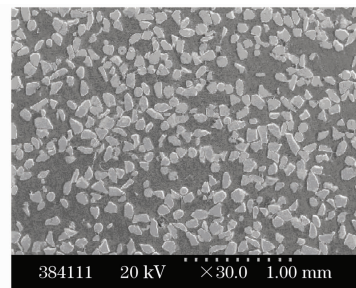


图 8 熔注层水平截面 SEM 形貌

Fig. 8 SEM morphology of horizontal cross-section of LMI layer

4 结 论

针对铝合金激光熔注存在的困难和问题,开发了激光-TIG 复合熔注技术。采用交流 TIG 电弧热源辅助激光热源进行加热形成熔池,采用送粉方式形成陶瓷注入颗粒 WC 对 Al 合金基体表面的注入。不需要预热即可获得良好的熔注效果。研究了不同 TIG 辅助方式对工艺的影响,分析了复合热源对熔注层深度

的影响,发现了熔注层深度随 TIG 电流增加单调增加,随激光功率增加先增后降的特点。在铝合金表面制备形成 WC_p/Al 复合材料层的工艺参数范围如下:激光功率 1~1.5 kW, TIG 电流 40~100 A,扫描速度 0.2~0.4 m/min,载气流量 600~800 L/hTIG,保护气流量 240~450 L/h,送粉角 30°~50°,TIG 倾角 60°~80°,送粉率 120~150 mg/s。

参 考 文 献

- 1 J. D. Ayers. Modification of metal surface by the laser melt-particle injection process[J]. *Thin Solid Films*, 1981, **84**(4): 323~331
 - 2 B. Kloosterman, B. J. Kooli, J. Th. M. De. Hosson. Electron microscopy of reaction layers between SiC and Ti-6Al-4V after laser embedding[J]. *Acta Mater.*, 1998, **46**(17): 6205~6217
 - 3 Y. T. Pei, V. Ocelik, J. Th. M. De. Hosson. SiC_p/Ti6Al4V functionally graded materials produced by laser melt injection[J]. *Acta Mater.*, 2002, **50**(8): 2035~2051
 - 4 Chen Yanbin, Liu Dejian, Li Liqun *et al.*. Formation mechanism of WC_p/Ti-6Al-4V graded metal matrix composites layer produced by laser melt injection[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1718~1722
 - 5 Liu Dejian, Chen Yanbin, Li Fuquan *et al.*. WC particulate reinforced metal matrix composites layers produced by laser melt injection[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1083~1086
 - 6 J. A. Vreeling, V. Ocelik, Y. T. Pei *et al.*. Laser melt injection in aluminum alloys; on the role of the oxide skin[J]. *Acta Mater.*, 2000, **48**(17): 4225~4233
 - 7 J. Wendelstorf, L. Decker, H. Wohlfahrt. Laser-enhanced gas tungsten arc welding [C]. 1994 International Conference of International Institute of Welding, Beijing, 1994: 384~385
 - 8 Meng Qingguo, Fang Hongyuan, Xu Wenli *et al.*. Microstructure and mechanical properties of 2219 Al-alloy heat-affected zone with twin wire welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, **27**(3): 9~12
- 孟庆国,方洪渊,徐文立等. 2219 铝合金双丝焊热影响区组织及力学性能[J]. *焊接学报*, 2006, **27**(3): 9~12