

TC4 钛合金加入铝夹层的激光焊接

陈 曦^{1,2} 姚 刚³ 黄 锐³ 李 飞³ 陈根余^{1,2}

¹ 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082

² 湖南大学激光研究所, 湖南 长沙 410082; ³ 中航工业成都飞机工业集团有限责任公司, 四川 成都 610092

摘要 利用 4 kW 光纤激光, 对 1.5 mm 厚 TC4 钛合金板试件进行了激光对接焊试验。在对接试件中间夹入 0.08 mm 厚铝箔, 通过调整工艺参数获得最佳焊缝成形。对比研究了加铝箔前后焊接接头的成形、金相组织、拉伸性能及显微硬度。结果表明, 在 TC4 钛合金试件中添加铝箔中间夹层, 能获得成形更好、拉伸强度更高的焊接接头; TC4 钛合金/铝箔焊缝区显微硬度要明显高于未添加铝箔的焊缝区, 两者相差近 90 kg/mm²; TC4 钛合金/铝箔焊缝区晶粒更加细小, 针状 α' 相组织细小, 且呈现网篮状组织分布特征; 两种焊接接头热影响区的显微硬度和显微组织差别不大。

关键词 激光技术; 激光焊接; TC4 钛合金; 铝夹层; 焊缝成形; 显微硬度

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0603006

Laser Welding of TC4 Titanium with Aluminum Insert

Chen Xi^{1,2} Yao Gang³ Huang Rui³ Li Fei³ Chen Genyu^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

² Laser Research Institute, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

³ AVIC Chengdu Aircraft Industrial Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610092, China

Abstract Butt welding experiments on 1.5 mm thick TC4 titanium specimen are conducted by using 4 kW fiber laser. The specimen is jointed 0.08 mm aluminum foil in the intermediate layer. The optimal weld shape can be attained by adjusting craft parameters. The shape, metallographic structure, tensile properties and microhardness on welding joint are discussed. It is shown that better welding joint and stronger tensile strength can be achieved by adding aluminum foil in the intermediate layer of TC4 titanium specimen. Microhardness is dramatically stronger in the weld pool with TC4 titanium and aluminum foil than that in the weld pool with only TC4 titanium. The difference is about 90 kg/mm². In the weld pool with TC4 titanium and aluminum foil, grain is much smaller, and the acicular α' structure is tiny, and the metallographic structure is in net distribution. Besides, the two kinds of welding joints in the heat-affected zone have almost the same microhardness and microstructure.

Key words laser techniques; laser welding; TC4 titanium alloy; aluminum sandwich; weld appearance; microhardness

OCIS codes 140.3390; 350.4600; 060.2310; 140.3510

1 引 言

TC4 钛合金是一种非常重要的航空、航天材料, 具有密度小、耐腐蚀性优良、强度高及韧性和焊接性能优良等一系列优点^[1]。激光焊接技术具有能量密度高、焊接速度快、焊缝深宽比大、热影响区及变

形小等优点, 在钛合金及精密零件的焊接上具有广阔的应用前景^[2~4]。钛合金激光焊接时, 高能激光束作用于钛合金材料的表面, 材料在极短的时间内被加热、升温、熔化并发生剧烈的汽化。焊接高温特征将导致合金元素的烧损和蒸发^[5]。并且合金元素

收稿日期: 2012-12-26; **收到修改稿日期**: 2013-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(51175165)、湖南省自然科学基金重点项目(12JJ2032)资助课题。

作者简介: 陈 曦(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光焊接技术方面的研究。E-mail: cx.shine@163.com

导师简介: 陈根余(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光制造及激光微细加工等方面的研究。

E-mail: hdgychen@163.com

的损失将导致钛合金焊缝的化学成分比重与母材成分比重出现显著的差异,引起焊缝组织的变化,从而影响到钛合金的机械性能^[6~9]。铝是最重要的 α 相稳定元素,铝在钛中主要溶入 α 固溶体,起到固溶强化作用。且铝的加入还能提高钛合金的热稳定性和弹性模量,使合金的密度变小。因此本文通过在钛合金焊接中加入铝,以改善钛合金激光焊接性能。

本文以航空用 TC4 钛合金为研究对象,进行激光对接焊试验。对比研究了在对接处加入中间层铝箔的焊缝和不加铝箔的焊缝时,焊后的焊缝机械性能,并观察了焊缝的宏观形貌和微观组织结构及相成分变化。光纤激光焊接 TC4 钛合金的研究数据可为激光焊接钛合金技术在航空航天领域的推广及应用起到一定的指导作用。

表 1 TC4 钛合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of TC4 (mass fraction, %)

Grade of titanium	Al	V	Fe	C	N	H	O
TC4	5~5.6	3.5~4.5	≤0.30	≤0.10	≤0.05	≤0.015	≤0.20

试验试件尺寸为 100 mm×30 mm×1.5 mm 的平板试件,采用对接焊方式,焊前装配间隙为 0。试验前将试件的对接面进行打磨,以保证焊接时对接面无间隙对接。焊前用砂纸打磨试件以去除氧化膜,用丙酮清洗去除油污,再用 5% HF+30% HNO₃+65% H₂O(体积分数比)进行酸洗。试件装夹好后再次用丙酮擦拭试件表面。

2.3 试验方法

钛合金激光对接焊示意图如图 1 所示。将 TC4 钛合金板对接装配,对接处夹入 0.08 mm 厚的铝箔,夹紧后进行激光对接焊试验。激光束垂直照射在 TC4 钛合金板上表面,随着光束的移动在对接部位形成连续的焊缝。焊接过程中采用高纯氩气作为保护气体,双面保护。正面为自制保护装置,侧吹高纯氩气保护焊接熔池及其周围的高温区域。侧吹装置出气口直径为 8 mm,出气口距试件表面为 15 mm,吹气管中心线与激光焦点在试件表面上的距离为

2 试验设备与方法

2.1 试验设备

试验所采用的设备为由 IPG 光纤激光器、六轴机器人以及焊接头等组成的焊接系统。激光器最大输出功率为 4 kW,连续输出激光波长为 1.07 μm,输出模式为 TEM₀₀,传输用光纤芯径为 300 μm。焊接头准直聚焦系统由焦距为 200 mm 的聚焦镜和 150 mm 的准直镜组成,聚焦光斑直径为 0.4 mm。

2.2 试验材料

试验所用材料为 TC4 钛合金,是 $\alpha+\beta$ 型钛合金。材料的化学成分如表 1 所示。其室温抗拉强度 $R_{am} \geq 895$ MPa,室温屈服强度 $R_{p0.2} \geq 825$ MPa,伸长率 $\delta_5 \geq 10\%$,断面收缩率 $\psi \geq 25\%$ 。

45 mm。焊接开始前 1 min 左右预先充入氩气,以保证焊接时背面保护装置方形槽中已注满氩气,可对焊接试件背面进行有效保护。在 TC4 钛合金激光对接焊时,以获得表面氧化程度较低、焊缝连续且平整、缺陷少的良好焊接接头为目标,通过试验得到表 2 的优化工艺参数。并在此优化参数下,对夹铝箔的 TC4 钛合金对接接头进行了光纤激光焊接试验。对比研究了在此工艺参数下的焊接试验结果。

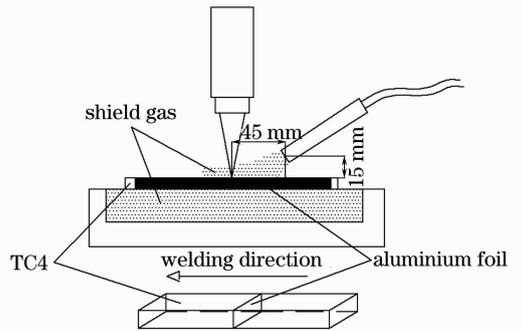


图 1 焊接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of welding

表 2 焊接参数

Table 2 Welding parameters

Laser power /W	Welding speed /(mm/min)	Gas-flow rate on the back side /(L/min)	Gas-flow rate on the right side /(L/min)	Defocusing distance /mm
950	900	10	20	0

焊接完成后观测 TC4 焊缝外观形貌、截面形状,分析焊缝的成型及表面质量。利用电子万能试验机测试焊接试件的抗拉强度与断后伸长率。用

3 mL 的 HF 溶液(体积分数为 40%)和 5 mL 的 HNO₃ 溶液(体积分数为 65%)以及 92 mL 的 H₂O 制备的侵蚀剂侵蚀打磨抛光好的试样表面,制备标

准 TC4 钛合金金相试样。利用卧式金相显微镜分析焊缝的金相组织。利用数字式智能显微硬度计,测试焊接试件接头的显微硬度。

3 试验结果分析

3.1 焊缝宏观形貌

图 2 为 TC4 钛合金焊缝及 TC4 钛合金/铝箔焊缝的宏观形貌图。对比图 2(a)与(b)可知,TC4 钛合金/铝箔焊缝更加饱满,无明显咬边、塌陷、裂纹及气孔等缺陷存在。TC4 钛合金/铝箔焊缝的截面尺寸明显大于 TC4 钛合金焊缝,焊缝较宽,但热影

响区大小无明显区别。这是因为铝的熔点要低于 TC4 钛合金的熔点,且铝的热导率要远高于钛,由激光能量转变而来的热能使夹在中间的铝箔先于钛合金熔化,随着焊接熔池的形成,液态铝混合在钛合金焊接熔池中,加速热能的传递同时提高了对激光能量的吸收,使得熔池截面尺寸变大。同时铝的加入,使能量在铝钛合金液态熔池内传递更快,减低了激光照射的小孔熔池表面局部过热,从而减少了材料的热烧损,因此观察到的焊缝没有因材料损失而产生的下凹现象。

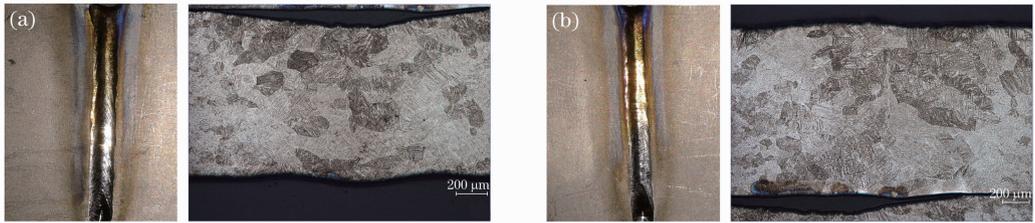


图 2 焊缝宏观形貌。(a) TC4 钛合金焊缝;(b) TC4 钛合金/铝箔焊

Fig. 2 Macro-morphologies of the welds. (a) TC4 titanium alloy weld; (b) TC4 titanium alloy/aluminum foil weld

3.2 焊接接头的能谱及 X 射线衍射分析

图 3 为 TC4 钛合金/铝箔焊接接头横向能量色散谱(EDS)铝元素的相对含量测试结果,取点从焊缝中心开始向母材延伸,每隔 0.2 mm 取一个点测试铝元素的相对含量。从图 3 可以看出,焊缝中心处 Al 元素的含量最高且 Al 元素的相对含量从焊缝中心经热影响区到母材呈现逐渐降低的趋势。说明铝箔的加入一方面填补了由于激光能量转变而来的热能引起 TC4 钛合金中 Al 元素的热烧损;另一方面发生了 Al 元素的迁移与扩散。

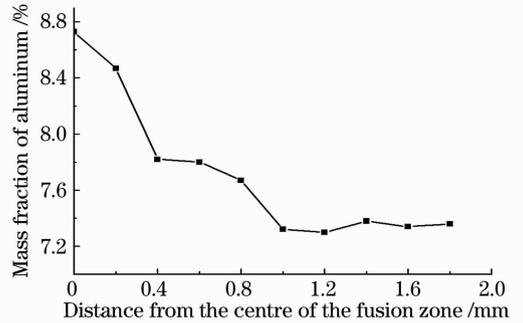


图 3 铝元素相对含量测试

Fig. 3 Relative content test for aluminum elements

图 4 为 TC4 钛合金/铝箔焊缝及 TC4 钛合金焊缝的 X 射线衍射(XRD)谱图,可以看出,焊接过程中无论是否添加铝箔,两种形式下 TC4 钛合金激光

焊缝均主要由 α' 相和 β 相组成, β 相的含量远小于 α' 相。TC4 钛合金/铝箔焊缝中 α' 相的含量要少于 TC4 钛合金焊缝。此外,焊缝中并未析出其他相成分。

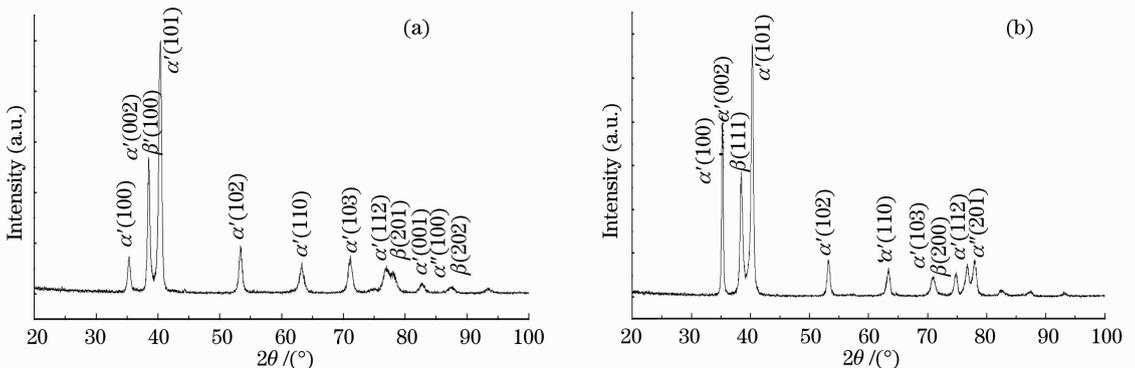


图 4 XRD 图谱。(a) TC4 钛合金/铝箔焊缝;(b) TC4 钛合金焊缝

Fig. 4 XRD patterns. (a) TC4 titanium alloy/aluminum foil weld; (b) TC4 titanium alloy weld

3.3 焊缝显微组织

试验所用的 TC4 母材原始组织为等轴的 $\alpha+\beta$ 型组织组成, α 相为基体, β 相分布在 α 相边界处^[10]。

图 5 为 TC4 钛合金/铝箔焊缝熔池区域显微组织图。焊接接头组织与母材组织相比, 发生了很大变化。焊缝区为针状马氏体组成的网篮组织, 依稀可见粗大的 β 柱状晶。焊缝区主要为针状 α' 马氏体相。 α' 相是由于焊后冷却速度极快, β 相通过共格切

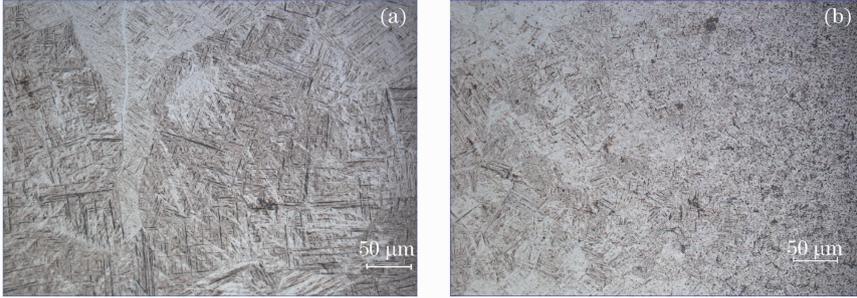


图 5 TC4 钛合金/铝箔焊缝熔池区域显微组织图。(a) 熔池区; (b) 热影响区

Fig. 5 Microscopic organization of TC4 titanium alloy/aluminum butt weld. (a) Molten pool area; (b) heat affected zone

与 TC4 钛合金焊缝显微组织(如图 6 所示)对比, 整个 TC4 钛合金/铝箔焊缝区针状 α' 相形态较细小且数量较少。这是因为在激光深熔焊接过程中, 形成了液态铝和液态 TC4 钛合金的混合熔池, 而 Al 的

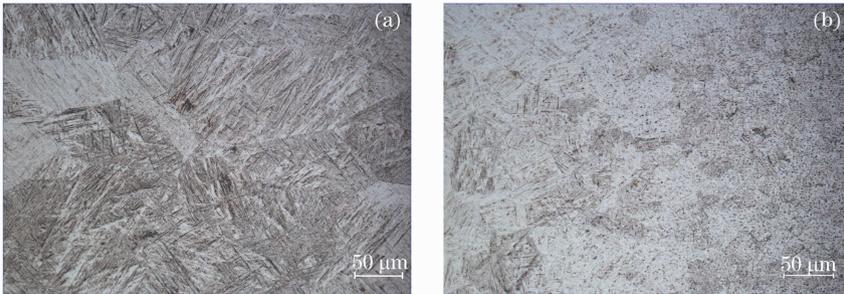


图 6 TC4 钛合金焊缝熔池区域显微组织图。(a) 熔池区; (b) 热影响区

Fig. 6 Microscopic organization of TC4 titanium alloy butt weld. (a) Molten pool area; (b) heat affected zone

3.4 焊缝力学性能分析

将 TC4 钛合金焊接件及 TC4 钛合金/铝箔焊接件切割成标准拉伸试样, 试样尺寸如图 7 所示。在微机控制电子万能拉伸试验机上进行拉伸试验, 载荷精度为指示载荷的 0.5%, 由计算机输出机械性能数据, 力的加载速度为 2.0 mm/min。分别取 2 个试样做拉伸试验, 取平均值来衡量焊缝的拉伸性能。图 8 为 TC4 钛合金焊接接头以及 TC4 钛合金/铝箔焊接接头抗拉强度及断后延伸率。由图可知, 两种形式下的焊接接头抗拉强度都接近于母材抗拉强度, TC4 钛合金/铝箔焊接接头断后延伸率略低于母材延伸率但要远高于 TC4 钛合金焊接接

变形成过饱和的 α 固溶体, 即六方结构的马氏体 α' 。针状 α' 马氏体在原始 β 柱状晶晶粒边界和晶粒内部形核长大。焊缝凝固过程中, 先形成单根或多根相互平行的一次 α' , 并在长距离内扩展贯穿整个晶粒; 接着形成一系列相对细小的二次针状 α' , 遇晶界或一次马氏体而停止。由此焊缝形成了典型的网篮状组织^[11]。这种网篮状组织具有较好的蠕变抗力、高温持久强度及塑性等综合性能。

热导率远高于 Ti 的热导率, 导致熔合区冷却速度加快, 使得 β 相的结晶转变时间减少, 等轴 β 相组织向针状的 α' 相组织转变相应减少。此外, 两种焊接接头热影响区显微组织差别不大[图 3(b)、4(b)]。

头。虽然两种焊接接头形式下抗拉强度都和母材相近, 但是 TC4 钛合金焊接接头断裂部位为焊缝区域, TC4 钛合金/铝箔焊接接头断裂部位在母材, 如图 9 所示。说明添加铝箔对焊接接头拉伸强度有一定改善作用。产生这种情况可能主要有两方面原因: 一方面, 添加铝箔能获得更好的焊缝成形, 减少咬边、塌陷等焊接缺陷; 另一方面, Al 是最重要的 α 相稳定元素, Al 在钛中主要溶入 α 固溶体, 少量溶入 β 相, 铝的加入弥补了由于深熔焊接过程中引起的钛合金中铝元素烧损, 并且使得熔池区域组织细化, 起到了固溶强化的作用, 使得焊接接头的抗拉强度得到提高。

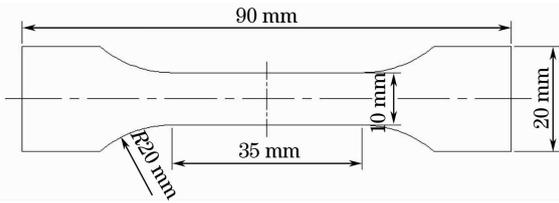


图 7 标准拉伸试件

Fig. 7 Standard tensile specimen

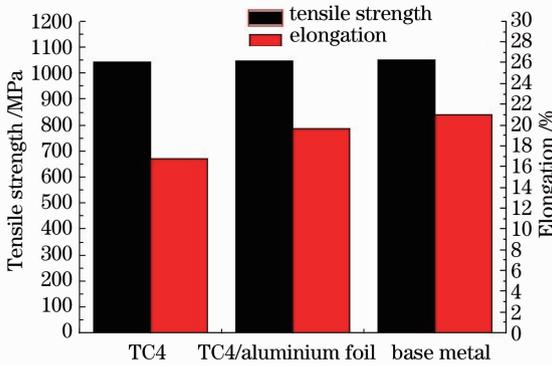


图 8 抗拉强度及断后延伸率

Fig. 8 Tensile strength and elongation

图 9 拉伸断裂图。(a) TC4 钛合金焊缝；
(b) TC4 钛合金/铝箔焊缝

Fig. 9 Tensile fracture diagram. (a) TC4 titanium alloy weld; (b) TC4 titanium alloy/aluminum foil weld

3.5 显微硬度分析

焊接试件接头的显微硬度测试过程中，取点从焊缝中心开始向母材延伸，每隔 0.2 mm 取一个点测试显微硬度。图 10 为 TC4 钛合金光纤激光焊接接头以及 TC4 钛合金/铝箔光纤激光焊接接头显微硬度变化图。从图中可以看出，显微硬度从焊缝中心开始经过热影响区到母材区呈现逐渐降低趋势。采用激光焊接时，因其能量密度极高，速度快，被焊工件经快速加热和冷却的热循环作用，焊缝区和热影响区出现冷却强化效果，其硬度高于母材。此外，TC4 钛合金/铝箔焊缝熔池区显微硬度要明显高于未添加铝箔 TC4 焊缝熔合区显微硬度，两者最大极差约 90 kg/mm²。热影响区与近母材区显微硬度无明显差别。由显微硬度的变化特征可得出：铝元

素的加入使得合金熔池中铝元素的含量增加，在焊缝中起到了固溶强化的作用，使得焊缝区的硬度增加。另一方面，焊接熔池中高热导率的液态铝的加入，增加了能量在材料中传递的速度同时也增加了焊缝的冷却速度，使得焊缝组织更细化。综合两方面因素，最后导致添加铝后的焊缝显微硬度更高。

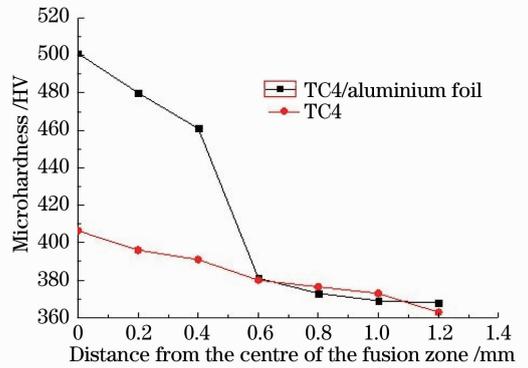


图 10 显微硬度变化图

Fig. 10 Variations of microhardness

4 结 论

1) TC4 钛合金光纤激光对接焊，加入铝箔夹层与未加入铝箔夹层相比，能获得成形更加饱满、无塌陷、咬边等缺陷的焊接接头，拉伸断裂处在母材区，断后延伸率有所提高并接近母材性能。

2) XRD 衍射结果表明，焊缝主要由 α' 相和 β 相组成，且 TC4 钛合金/铝箔焊缝 α' 相要少于 TC4 钛合金焊缝。TC4 钛合金/铝箔焊缝组织比 TC4 钛合金焊缝更细小，针状 α' 相组织更细小，且组织呈现网篮状分布特征，使得焊缝机械性能出现差异。

3) EDS 检测结果表明，铝箔夹层的加入，使得铝元素在焊缝中的含量增加，起到了明显的固溶强化作用，且铝箔的加入提高了能量的传递，减少了熔池的冷却时间，熔池区显微硬度与未添加铝箔夹层相比提高了约 90 kg/mm²。

参 考 文 献

- 1 M. W. Turner, P. L. Crouse, L. Li. Comparison of mechanisms and effects of Nd: YAG and CO₂ laser cleaning of titanium alloys[J]. *Applied Surface Science*, 2006, **252**(13): 4792~4797
- 2 E. Akman, A. Demir, T. Canel *et al.*. Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2009, **209**(8): 3705~3713
- 3 Wang Tao, Zhou Dianwu, Peng Yan *et al.*. Steel-to-aluminum fiber laser butt welding with Si powder pre-filling[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(3): 0303009
王 涛, 周惦武, 彭 艳等. 钢/铝异种金属预置 Si 粉的光纤激光焊接[J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0303009
- 4 Chen Donghai, Huang Jihua, Lin Haifan *et al.*. Titanium alloy

- laser spell welding head microstructure and mechanical properties [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, **30**(2): 103~106
程东海, 黄继华, 林海凡 等. TC4 钛合金激光拼焊接头显微组织及力学性能分析[J]. 焊接学报, 2009, **30**(2): 103~106
- 5 K. Mundra, T. Debroy. Calculation of weld metal composition change in high-power conduction mode carbon dioxide laser-weld stainless steel[J]. *Metallurgical Transaction B*, 1993, **24B**(2): 145~155
- 6 Zhang Honggui, Jin Xiangzhong, Chen Genyu *et al.*. Study on the burning loss of magnesium element in fiber laser welding aluminum alloy 5052 [J]. *Laser Technology*, 2012, **36**(6): 713~718
张宏圭, 金湘中, 陈根余 等. 光纤激光焊接 5052 铝合金镁元素烧损研究[J]. 激光技术, 2012, **36**(6): 713~718
- 7 Tang XiaoHong, Pang Tao. Al-Mg-Si608 alloy argon arc welding joint of porosity and alloy element loss[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, **31**(4): 21~24
汤小红, 庞涛. Al-Mg-Si608 合金氩弧焊焊接接头的气孔与合金元素烧损[J]. 焊接学报, 2010, **31**(4): 21~24
- 8 Zhu Xiujun, Xiong Jiangang, Huang Anguo *et al.*. Laser welding of TC4 Ti alloy[J]. *Electric Welding Machine*, 2004, **34**(9): 13~16
朱秀军, 熊建钢, 黄安国 等. 钛合金 TC4 的激光焊接[J]. 电焊机, 2004, **34**(9): 13~16
- 9 Hu Qiang. Laser Welding Seam Composition Prediction Model [D]. Wu Han: Huazhong University of Science and Technology, 2002. 7~11
胡强. 激光焊接焊缝成分预测模型[D]. 武汉: 华中科技大学, 2002. 7~11
- 10 Yang Pan, Xu Jiejie, Yang Wuxiong *et al.*. Experimental study on fibre laser welding of titanium alloy TC4[J]. *Applied Laser*, 2011, **31**(6): 456~459
杨攀, 徐洁洁, 杨武雄 等. TC4 钛合金光纤激光焊接工艺研究[J]. 应用激光, 2011, **31**(6): 456~459
- 11 Yang Jing, Cheng Donghai, Huang Jihua *et al.*. TC4 titanium alloy laser welding joint organization and performance[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, **38**(2): 259~262
杨静, 程东海, 黄继华 等. TC4 钛合金激光焊接接头组织与性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, **38**(2): 259~262

栏目编辑: 宋梅梅