工艺参数对钛合金激光T型接头焊缝成形及剪切力的影响

李玉龙　程　昊　王明正　周炼刚　焦好军

（航天材料及工艺研究所，北京　100076）

文　摘　采用连续激光焊工艺焊接TC4/TA15激光T型接头，运用体式显微镜及拉伸试验机对接头进行测试分析，研究工艺参数对激光T型接头焊缝成形及剪切性能的影响。结果表明：在其他参数保持不变的情况下，随着激光功率在一定范围内的提高，焊接速度在一定范围内的降低，骨架熔宽及骨架熔深增加；骨架熔宽是影响激光T型接头剪切性能的决定性参数，匹配激光功率超过4.1 kW、焊接速度低于80 mm/s、离焦量为-5～+10 mm，可使骨架熔宽超过0.51 mm，接头剪切力达到14 kN以上水平。

关键词　激光焊，工艺参数，焊缝成形，剪切力

中图分类号：TG4　　DOI：10.12044/j.issn.1007-2330.2018.03.014

Effect of Weld Parameters on Weld Appearance and Shearing Resistance of Laser Welding T-Joints of Titanium Alloys

LI Yulong　CHENG Hao　WANG Mingzheng　ZHOU Liangang　JIAO Haojun

（Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing　100076）

Abstract　T-joints of TC4 and TA15 titanium alloys have been welded by continuous wave laser beam. The effect of weld parameters on weld appearance and shearing resistance of the joints have been analyzed using metalloscope and tensile testing machine. The experimental results showed that when other parameters were fixed, the weld width and depth of skeleton was improved with the increase of laser beam power and decrease of weld speed. The weld width of skeleton was the determining parameter of shearing resistance of laser welding T-joints. With the laser beam power over 4.1 kW, weld speed less than 80 mm/s and defocusing amount between -5 and +10 mm, the weld depth of skeleton reached 0.51 mm, the shearing resistance of the joints reached 14 kN.

Key words　Laser welding, Weld parameters, Weld appearance, Shearing resistance

0　引言

随着航空航天产品对轻质高强的需求，钛合金因其较高的比强度和热强度、优良的低温性能及抗蚀性，成为航空航天关键结构件的首选材料[1-2]。钛合金高温下具有极强的晶粒长大倾向，传统的氩弧焊工艺易导致焊接热影响区晶粒严重粗化，降低接头的塑性和韧性[3-4]。因此能量密度高、焊接速度快、热影响区小的激光焊接工艺得到越来越广泛的应用[5]。

激光焊工艺参数直接影响焊缝成形行为，成形参数决定接头的力学性能。研究表明激光T型接头的结合面宽度（以下称为骨架熔宽）影响接头的抗扭转性能[6]，有效控制焊缝成形将有利于改善接头性能。本文基于钛合金蒙皮-骨架激光T型结构，研究工艺参数对焊缝成形行为及力学性能的影响。

1　实验

选用2 mm厚TC4钛合金板作为蒙皮材料，试板规格为100 mm×160 mm，选用6 mm厚TA15钛合金板作为骨架材料，试板规格为40 mm×160 mm，试板状态均为退火态。激光T型接头采用连续激光焊工艺，为了便于测试接头的剪切性能，焊接试板采用如

收稿日期：2017-12-21

第一作者简介：李玉龙，1987年出生，硕士，工程师，从事钛合金激光焊接工作。lyl6310206@126.com

图 1 所示的结构形式。激光器采用 IPG 公司 YLS-6000 型光纤激光器。焊前使用除油剂和丙酮清除试板表面油污，采用化学方法（20% HF + 40% HNO_3 + 40% H_2O 溶液）去除表面氧化膜，焊前采用机械方式打磨焊接区域。

图 2 为 T 型接头骨架熔宽（即蒙皮与骨架结合面宽度）、骨架熔深示意图，沿垂直于焊缝方向切割制备金相试样，采用化学试剂（20% HF + 30% HNO_3 + 50% H_2O 溶液）浸蚀抛光试样，使用 KEYENCE VHX-1000E 型体式显微镜观察焊缝组织，进而测量接头的骨架熔宽 B 和骨架熔深 H。将焊接完成的 T 型试板加工成横截面如图 1 所示，宽度为 30 mm 的剪切试样，每张试板加工 5 件，在美斯特 CMT5105 型电子拉伸试验机上进行剪切力测试，以 5 件试样的平均值作为试板的剪切力值。

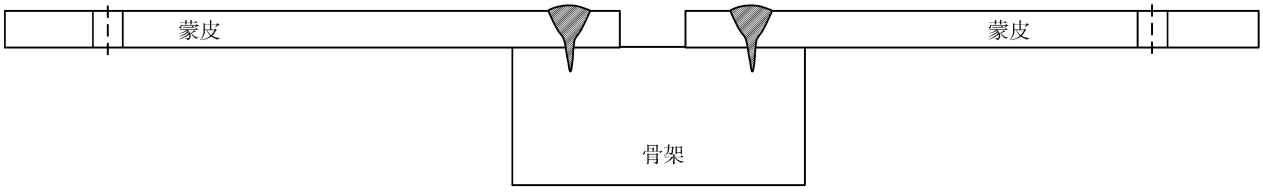


图 1　激光 T 型接头结构示意图

Fig.1　Structure of laser welding T-joint

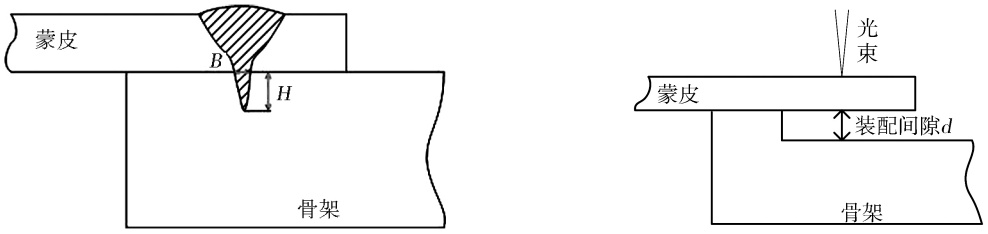


图 2　T 型接头骨架熔宽及骨架熔深示意图

Fig.2　Schematic diagram of T-joint geometry

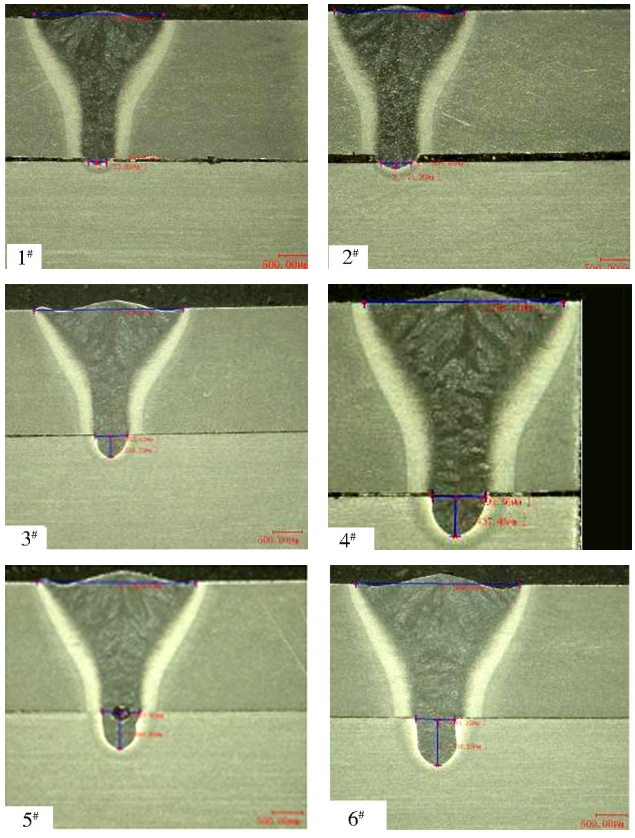
2　结果与讨论

T 型试板对应的成形参数及力学性能如表 1 所示，各焊缝的横截面金相图如图 3 所示。

表 1　不同工艺参数下 T 型焊缝的成形参数及力学性能

Tab.1　Weld appearance and shearing resistance of joints at different parameters

接头序号	激光功率/kW	焊接速度/mm·s^{-1}	离焦量/mm	装配间隙/mm	骨架熔宽/mm	骨架熔深/mm	接头剪切力/kN
1	3.5	80	0	0	0.35	0.04	7.45
2	3.7	80	0	0	0.46	0.07	11.42
3	4.1	80	0	0	0.56	0.35	14.59
4	4.3	80	0	0	0.60	0.44	15.03
5	4.5	80	0	0	0.63	0.59	14.26
6	4.3	65	0	0	0.63	0.73	17.71
7	4.3	95	0	0	0.49	0.36	12.57
8	4.3	110	0	0	0.42	0.11	9.49
9	4.3	80	−10	0	0.25	0.03	6.22
10	4.3	80	−5	0	0.56	0.24	14.50
11	4.3	80	+5	0	0.51	0.37	14.02
12	4.3	80	+10	0	0.74	0.56	16.21
13	4.5	80	0	0.1	0.70	0.25	13.87
14	4.5	80	0	0.3	0.59	0.13	14.27
15	4.5	80	0	0.5	0	0	0



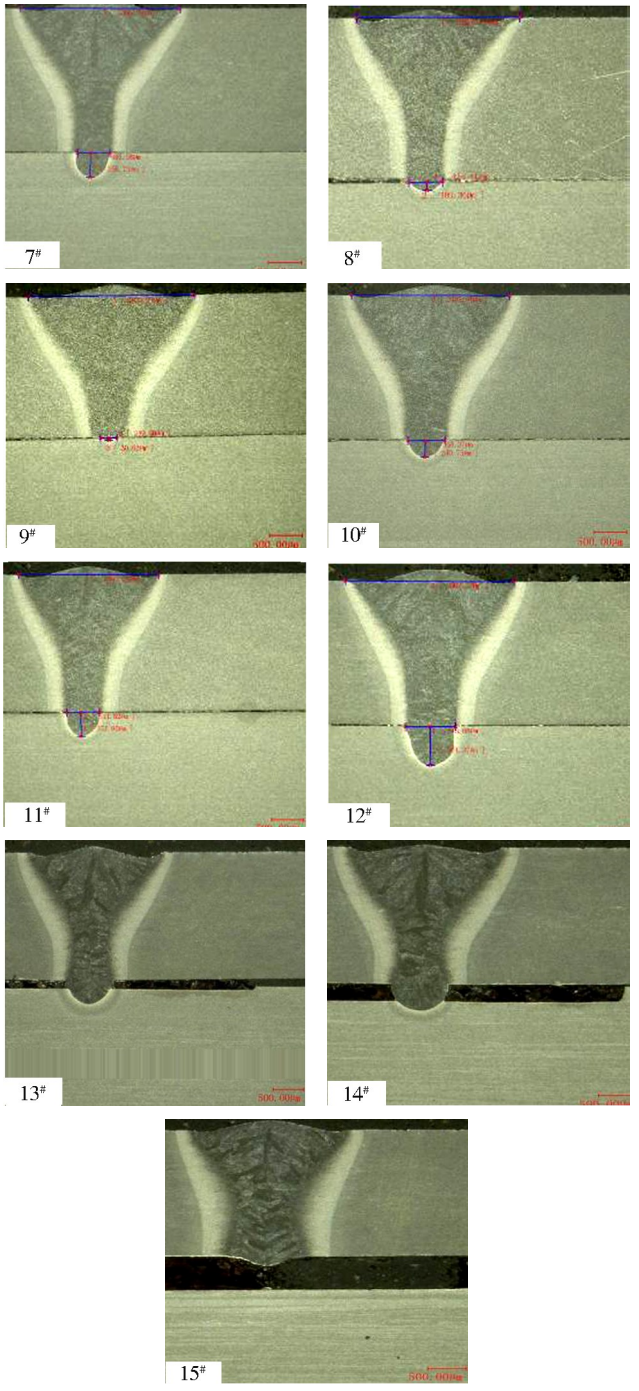


图 3　不同工艺参数下焊缝横截面金相图

Fig.3　Weld beads cross section at different parameters

2.1　激光功率的影响

T 型接头骨架熔宽、骨架熔深及接头剪切力随激光功率的变化趋势如图 4 所示。由表 1 和图 4 可知，在 3.5~4.5 kW 随着激光功率的增加，骨架熔宽及骨架熔深均呈现增长趋势，其中骨架熔宽由 0.35 mm 提高至 0.63 mm，骨架熔深由 0.04 mm 大幅提高至 0.59 mm。接头剪切力随着激光功率的增加同样呈现增长趋势：当功率由 3.5 kW 提高至 4.1 kW，剪切力由 7.45 kN 提高至 14.59 kN，增幅达 150%；当功率超过 4.1 kW 后，接头剪切力变化不再显著。随着功率的增加，T 型接头剪切力的提高与骨架熔宽及骨架熔深的增长相关。

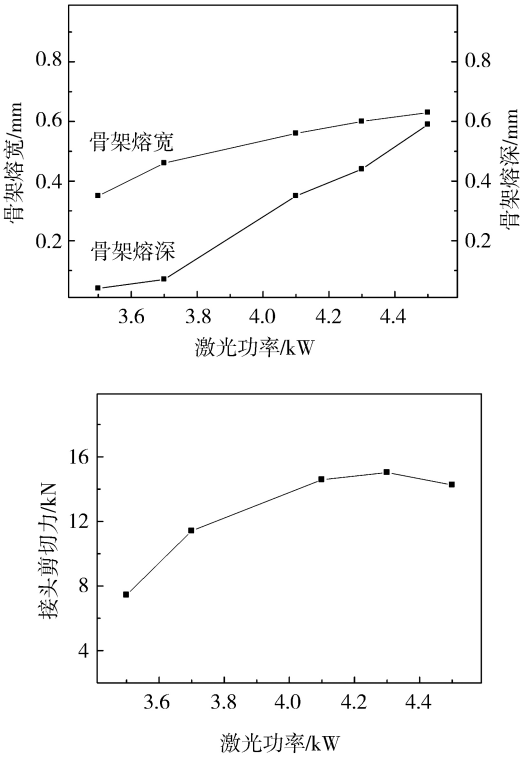


图 4　激光功率对接头成形及力学性能的影响

Fig.4　Weld appearance and shearing resistance of joints at different laser beam power

2.2　焊接速度的影响

T 型接头骨架熔宽、骨架熔深及接头剪切力随焊接速度的变化趋势如图 5 所示。

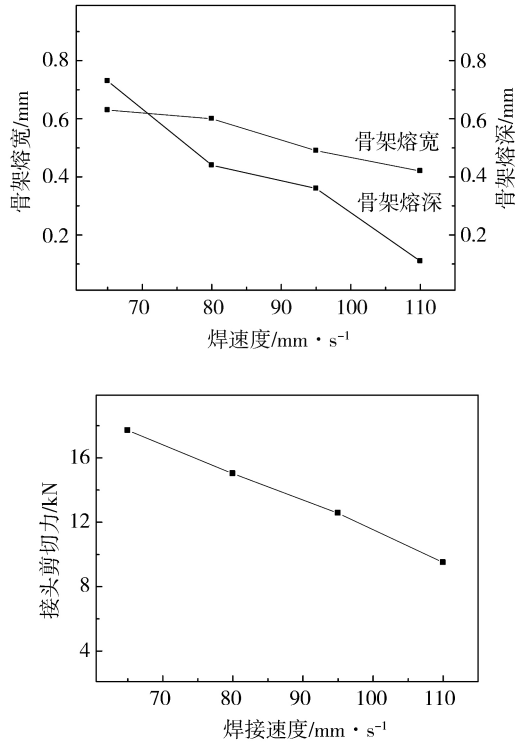


图 5　焊接速度对接头成形及力学性能的影响

Fig.5　Weld appearance and shearing resistance of joints at different weld speed

由表 1 和图 5 可知,随着焊接速度由 65 mm/s 提高至 110 mm/s,T 型接头的骨架熔宽及骨架熔深均显著减小,其中骨架熔宽由 0.63 mm 减小到 0.42 mm,骨架熔深由 0.73 mm 减小到 0.11 mm。接头剪切力随着焊接速度的提高同样呈现下降趋势,由 17.71 kN 降低至 9.49 kN。同样,随着焊接速度的提高,T 型接头剪切力的下降与骨架熔宽及骨架熔深的减小相关。

2.3 离焦量的影响

T 型接头骨架熔宽、骨架熔深及接头剪切力随离焦量(焊接时焊件表面距激光焦点的距离)的变化趋势如图 6 所示。由表 1 和图 6 可知,随着离焦量由-10 mm 向 0 变化,T 型接头的骨架熔宽及骨架熔深均呈增长趋势,其中骨架熔宽由 0.25 mm 增加到 0.60 mm,骨架熔深由 0.03 mm 增加到 0.44 mm;当离焦量由 0 向+10 mm 变化,接头骨架熔宽、骨架熔深呈波动变化。

接头剪切力随离焦量的变化趋势与骨架熔宽、骨架熔深的变化趋势基本一致。随着离焦量由-10 mm 向 0 变化,接头剪切力由 6.22 kN 提高至 15.03 kN;当离焦量由 0 向+10 mm 变化,接头剪切力呈现出与骨架熔宽及熔深类似的波动变化趋势。因此,离焦量在-10 ~+10 mm 变化时,T 型接头的成形参数及剪切力对负离焦量变化敏感,对正离焦量不敏感。

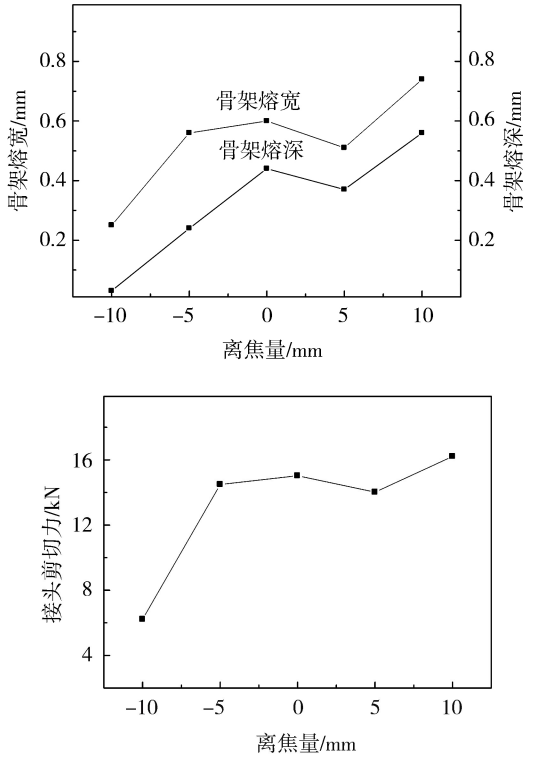


图 6 离焦量对接头成形及力学性能的影响

Fig.6 Weld appearance and shearing resistance of joints at different defocusing amount

T 型接头激光焊接时,当激光束功率密度较高($\geqslant 10^6$ W/cm^2),在光束的作用下,蒙皮被迅速加热,表面温度在极短时间内(10^{-8}~10^{-6} s)升高到沸点,蒙皮汽化产生的金属蒸气以一定速度逸出熔池表面,同时蒸气反作用于熔池液态金属,压迫熔池表面下凹出现小凹坑。当光束继续作用于坑底,逸出的蒸气促使凹坑进一步加深;此外,飞出的蒸气挤压液体金属流向熔池四周。随着焊接的连续,光束可直接射入凹坑底部,使液体金属中产生细长的小孔。当金属蒸气的反作用力与液态金属的重力和表面张力相平衡,便形成深度稳定的小孔,实现激光小孔焊接[7]。

采用连续激光焊工艺焊接平板,焊缝熔深与激光功率、焊接速度的关系如式(1)所示,

$$h = \beta P^{1/2} v^{-\gamma} \tag{1}$$

式中,h 为焊缝熔深,P 为激光功率,v 为焊接速度,β 和 γ 为取决于激光源、聚焦系统和焊接材料的常数[7]。由式(1)可知,在其他参数保持不变的情况下,随着一定范围内激光功率的提高以及焊接速度的降低,焊缝熔深增加。由 2.1~2.2 节试验结果可知,骨架熔深(焊缝熔深减去蒙皮厚度)随工艺参数的变化规律与式(1)相吻合,即平板焊缝熔深与激光功率、焊接速度的关系式同样可应用于激光 T 型接头。

2.4 蒙皮与骨架间隙的影响

由图 3 可知,蒙皮与骨架间隙为 0.1 mm 的 13#试样、间隙 0.3 mm 的 14#试样,焊缝成形良好,光束可穿透蒙皮作用于骨架,在骨架上形成一定的熔深;当间隙超过 0.5 mm(激光功率 4.5 kW,焊接速度 80 mm/s,离焦量 0 mm),15#试样光束未作用于骨架,蒙皮与骨架间未实现可靠连接,接头无承载能力。

T 型接头骨架熔宽、骨架熔深及接头剪切力随蒙皮与骨架间隙的变化趋势如图 7 所示。由表 1 和图 7 可知,随着蒙皮与骨架间隙由 0 增大到 0.3 mm,骨架熔宽没有显著变化,骨架熔深显著减小,对应接头剪切力未见显著变化,结合 2.1~2.3 节,接头剪切力随工艺参数的变化趋势与骨架熔宽、骨架熔深的变化趋势基本一致,因此,骨架熔宽是影响激光 T 型接头剪切性能的决定性参数。这是由于骨架熔宽决定了接头进行剪切试验时受力面积的大小。

图 8 为接头剪切力随骨架熔宽的变化趋势图。整体来看,随着骨架熔宽的增大,接头剪切力呈显著上升趋势。当骨架熔宽由 0.25 mm 增加到 0.51 mm,接头剪切力由 6.22 kN 大幅提高至 14.02 kN,提高一倍以上;随着骨架熔宽的继续增加,接头剪切力进一步提高至 16.21 kN。另外,随着骨架熔宽的增加,剪切力曲线的斜率逐渐减小,当熔宽超过 0.63 mm,曲线已趋于水平,说明随着骨架熔宽的继续增加,接头

剪切力将趋于稳定。

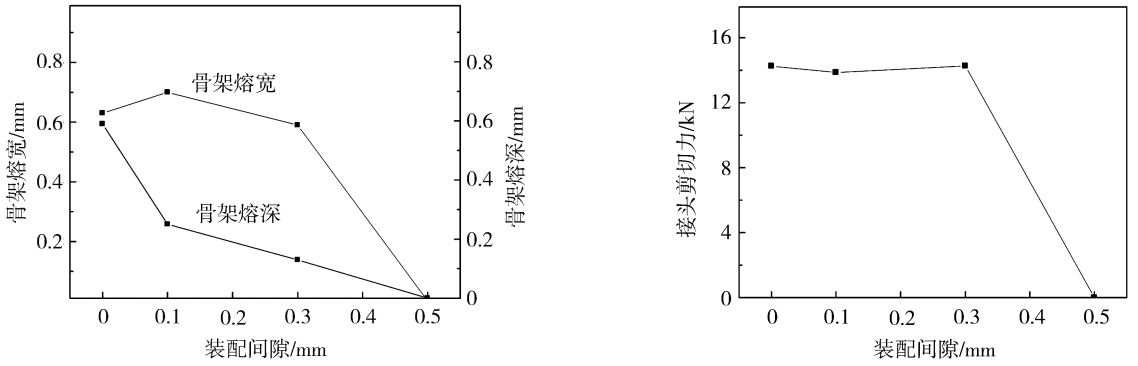


图 7　蒙皮与骨架间隙对接头成形及力学性能的影响

Fig.7　Weld appearance and shearing resistance of joints at different welding space

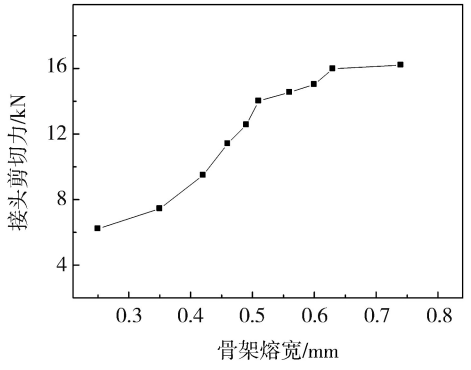


图 8　不同骨架熔宽对应接头剪切力

Fig.8　Shearing resistance of joints at different weld width of skeleton

因此,当匹配焊接工艺参数使 T 型接头的骨架熔宽超过 0.51 mm 时,接头剪切力可达到 14 kN 以上的水平,对应激光焊工艺参数调节范围为:连续激光焊功率不小于 4.1 kW,焊接速度不超过 80 mm/s,离焦量处于-5~+10 mm。

3　结论

(1)蒙皮厚度为 2 mm 的激光 T 型接头,在其他参数保持不变的情况下,随着激光功率在一定范围内的提高,焊接速度在一定范围内的降低,骨架熔宽及熔深增加。

(2)当连续激光焊功率超过 4.1 kW,焊接速度低于 80 mm/s,离焦量为-5~+10 mm,骨架熔宽可超过 0.51 mm,接头剪切力达到 14 kN 以上水平。

参考文献

[1] 赵永庆. 国内外钛合金研究的发展现状及趋势[J]. 中国材料进展,2010,29(5):1-8.

[2] 付艳艳,宋月清,惠松骁,等. 航空用钛合金的研究与应用进展[J]. 稀有金属,2006,30(6):850-856.

[3] 吴巍,高洪明,吴林. 细晶粒钛合金粗晶区组织及接头力学性能分析[J]. 焊接学报,2008,29(1):61-64.

[4] 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.

[5] 孙燕洁,徐艳利,李瑞. TC4 钛合金薄板 T 型接头激光焊接工艺研究[J]. 航天制造技术,2010(4):19-23.

[6] 郭晓军,李铸国,孟威,等. 低合金高强钢激光穿透焊接头性能研究[J]. 热加工工艺,2012,41(9):151-153.

[7] 李亚江. 特种连接技术[M]. 北京:国防工业出版社,2007:53-72.