

# 钛及钛合金薄板的焊接

黄九龄 孔谅 王敏 华学明 李芳  
(上海交通大学材料科学与工程学院, 上海, 200240)

**摘要:** 钨极氩弧焊 (TIG 焊) 是钛及钛合金薄板焊接中应用最广泛的一种方法, 电子束焊 (EBW)、等离子焊 (PAW) 和激光焊 (LBW) 等高能束焊是钛及钛合金焊接中的重要方法, TIG 焊有潜力以低成本获得与高能束焊相近焊接质量的接头, 本文介绍并比较了薄板钛及钛合金的 TIG 焊和高能束焊的工艺特点, 分析认为串列 TIG 焊用于钛及钛合金的薄板焊接, 能提高焊接速度、获得与高能束焊相近焊接质量的接头。

**关键词:** 薄板钛及钛合金; 高能束焊; 低成本; 焊接速度; 串列 TIG 焊;

**中图分类号:** TG406

## Welding of Titanium and Titanium alloys Thin Sheets

Jiuling Huang, Liang Kong, Min Wang, Xueming Hua, Fang Li

(School of materials science and engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240)

**Abstract:** Tungsten inert gas (TIG) welding is widely used in the welding of titanium and titanium alloys thin sheets. Power beam process like electron beam welding (EBW)、plasma arc welding (PAW) and laser beam welding (LBW) are all processes capable of creating fusion welded joints. TIG welding offers the potential to achieve welds of equal quality to power beam process at much lower capital costs. This paper reviews the process characteristics for TIG welding titanium alloys and compares these characteristics with EBW、PAW and LBW titanium alloys. Tandem TIG welding is considered to improve welding speed and weld quality for titanium and titanium alloys thin sheets welding.

**Key words:** titanium and titanium alloys thin sheets; power beam process; lower capital costs; welding speed; tandem TIG welding;

## 0 引言

钛及钛合金导热率低、比强度高、耐腐蚀, 是非常优异的结构材料, 在航空航天、石油化工和海水淡化等行业发挥着巨大的作用[1]。

钛及钛合金的焊接方法有很多, TIG 焊、电子束焊、等离子弧焊、激光焊等焊接方法应用居多。目前国内在钛产品焊接中使用最普遍的是 TIG 焊, 包括手工、自动或半自动 TIG 焊, 真空电子束焊、等离子弧焊、激光焊等焊接方法使用相对较少。TIG

焊的成本低、灵活性好, 但 TIG 焊的缺点是焊速较慢, 高速焊时为保证线能量, 增加电流会有夹钨现象, 并且出现咬边、驼峰等缺陷[2,3,5]。为此, 许多学者提出改善高速焊缺陷的方法, 包括增加磁场促使电弧集中[35,36]、改变保护气体[37]等, 但改善效果都有限, 串列双电弧焊被认为既能有效提高焊接速度, 又能改善接头质量[34,38]。

## 1 钛及钛合金的焊接性

纯钛从 300℃开始吸氢, 400℃开始吸氧, 600℃开始吸氮, 在焊接的过程中很容易吸入这些气体, 含氮、氧、氢等杂质元素的焊接接头硬度强度增加

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB0301205)

作者简介: 黄九龄 (1992—), 男, 江苏徐州人, 在读硕士, 主要从事钛及钛合金的氩弧焊研究。

而塑性韧性下降，变得很脆。钛的热容量大，导热差，热影响区停留时间长，易引起焊接接头的过热倾向，焊接时要选择合适的焊接线能量和合适的冷却速度，既不能形成粗大的晶粒，也不能形成不稳定的  $\alpha'$  相组织。钛及钛合金的焊接中易产生气孔，细小且数量多。在焊缝金属冷却过程中，氢的溶解度会发生变化，如焊接区周围气氛中氢的分压较高时，焊缝金属中的氢不易扩散逸出，会聚集在一起形成气孔。

## 2 钛及钛合金的 TIG 焊

TIG 焊常用于焊接厚度 3mm 以下的钛及钛合金，电弧稳定、易于实现自动化，适合薄板焊接、全位置自动焊以及不加衬垫的单面焊双面成形焊接[2]。本文介绍工业纯钛、 $\alpha$  型钛以及  $\alpha+\beta$  型钛的 TIG 焊，针对焊接电流、焊接速度、脉冲参数和活性剂对焊缝组织、接头性能的影响进行详细的描述。

### 2.1 工业纯钛

工业纯钛最大的特点是其抗腐蚀性能，常用来生产海水淡化用的钛焊管，采用 TIG 焊对工业纯钛薄板进行焊接，焊缝组织通常为锯齿状  $\alpha$  相+板条状  $\alpha$  相或针状  $\alpha$  相，接头性能优良。

脉冲频率对电弧挺度有很大的影响，脉冲频率越高，电弧挺度越好，焊缝成形性越好，组织更加均匀。李玉儒等人[9]对 0.4mm 的 TA1 退火板进行焊接，脉冲电流 13A，焊接速度 300mm/min，发现低频脉冲会获得针状  $\alpha$  相组织，而中高频脉冲则会获得均匀的板条状  $\alpha$  相组织。

而在高温  $\beta$  相转变为  $\alpha$  相的过程中，由于纯钛的导热性差，热停滞时间过长，热影响区会获得粗大的等轴晶粒，熔合线处则根据不同的热输入获得

针状或板条状的晶粒。A. Karpagaraj 等人[7]对 1.6mm、2mm 的工业纯钛进行直流焊接，焊接电流 105A，焊接速度 250 mm/min，熔合线为沿  $\beta$  晶粒晶界分布的板条状  $\alpha$  晶粒，热影响区为粗大的等轴晶粒（如图 1 所示），硬度分布从焊缝到母材逐渐降低，屈服强度和抗拉强度高于母材。

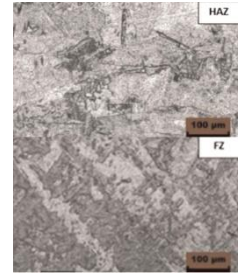


图 1. 焊缝组织

针状或板条状的晶粒。A. Karpagaraj 等人[7]对 1.6mm、2mm 的工业纯钛进行直流焊接，焊接电流 105A，焊接速度 250 mm/min，熔合线为沿  $\beta$  晶粒晶界分布的板条状  $\alpha$  晶粒，热影响区为粗大的等轴晶粒（如图 1 所示），硬度分布从焊缝到母材逐渐降低，屈服强度和抗拉强度高于母材。

刘中仁等人[10]对 0.5 mm 厚冷轧 TA2 钛板材进行焊接，脉冲电流 40A，焊接速度 350 mm/min，得到接头抗拉强度与母材相当，脉冲频率对熔池宽度的影响成递增趋势（如图 2 所示）。

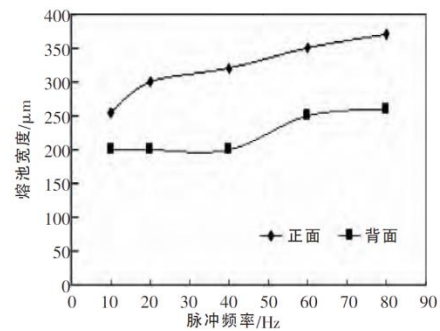


图 2 脉冲频率对熔池宽度的影响

### 2.2 $\alpha$ 型钛合金

$\alpha$  型钛合金具有稳定的  $\alpha$  单相组织，焊接性能好，耐蚀性也较好，塑性低。焊接时组织演变和纯钛差不多，要经历  $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$  的转变，焊缝组织得到的主要是针状的  $\alpha$  相+少量的  $\alpha'$  马氏体。

M.Junaid 等人[8]对 1.6mm 的 Ti-5Al-2.5Sn 钛合金板材进行焊接，脉冲基值电流 32A，焊接速度 32.5 mm/min，焊缝组织为粗大的  $\beta$  等轴晶粒+内部针状  $\alpha$  相+少量的  $\alpha'$  马氏体，硬度分布（如图 3 所示）从焊缝到母材逐渐降低，接头抗拉强度略低于母材，

残余应力分析表明,脉冲氩弧焊比较适合此 $\alpha$ 型钛合金的薄板焊接。

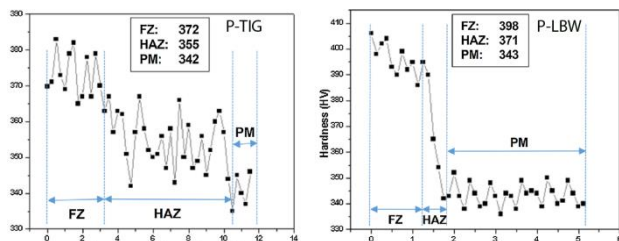


图3 P-TIG 和 P-LBW 的硬度分布

罗伟中[11]、魏晓棠[12]对 $\alpha$ 型钛合金焊接接头脆化进行了研究,分析表明,接头过热区导致组织变坏,多次焊接会形成粗大的魏氏 $\alpha$ 和 $\alpha'$ 组织,保护效果不好也会导致接头脆化,应该改进结构设计,避免多次焊接,改善保护措施。

### 2.3 $\alpha+\beta$ 型钛合金

$\alpha+\beta$ 型钛合金具有稳定的 $\alpha+\beta$ 型两相组织和良好的综合力学性能,焊接性能较好,比较常见的是TC4钛合金,常用于航空航天部件。脉冲参数、活性剂对焊缝组织和接头性能有很大的影响。

M.Balasubramanian 等人[13]对 1.6mm 的 TC4 钛合金板材进行焊接,发现脉冲 TIG 焊接头比直流 TIG 焊的腐蚀性能好,分析认为峰值电流、脉冲频率都能促使焊接起到细化晶粒的作用,从而获得较好的腐蚀性能。B.Mehdi 等人[14]对 2mm 的 TC4 钛合金板材进行焊接,脉冲电流 50A,焊接速度 100mm/min,研究脉冲对焊缝组织和残余应力的影响,增加脉冲频率,能够细化晶粒,降低残余应力,但保留的 $\beta$ 相变多,导致硬度下降。杨舟等人[15]对 2.5mm 的 TC4 钛合金板材进行焊接,基值电流 40A,峰值电流 100A,焊接速度 150 mm/min,与直流氩弧焊相比,脉冲频率使熔宽减少,熔深增加。

活性剂能够提高焊接速度、细化晶粒、改善接头力学性能并且对焊缝截面形貌有影响,焊接之前

在金属表面涂上一层活性剂,常见的有 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{CaF}_2$ 和 $\text{NaCl}$ 。王纯[16]比较了 1.5mm、3mm 的 TC4 钛合金板材 TIG 焊和 A-TIG 焊的焊接速度、晶粒大小以及力学性能,发现 A-TIG 焊所需电流、焊接速度比 TIG 焊的大,由于活性剂抑制电弧,使电弧能量密度变大,温度梯度减小,过冷度变大,焊缝晶粒要比 TIG 焊的细小,因此,最终力学性能比 TIG 焊的好。李晓红[17]比较了 2.5mm、4mm 的 TC4 钛合金板材 A-TIG 和 TIG 焊接头的力学性能,前者明显优于后者,在相同的载荷下,A-TIG 焊接头呈现出非常优异的耐疲劳性能。

A-TIG 焊热输入量小,热量主要向两侧散失,晶粒从两侧母材向熔合线方向生长;而 TIG 焊的热输入量较大,上面的热量保留的多,上面和下面有一定的温度梯度,热量是从上面向下面和两侧散失,导致晶粒也是从下面和两侧向熔合线生长,最终呈现不同的形貌(如图 4 所示),王纯、李晓红、张连锋[20]分别在他们的文献里也有提及。

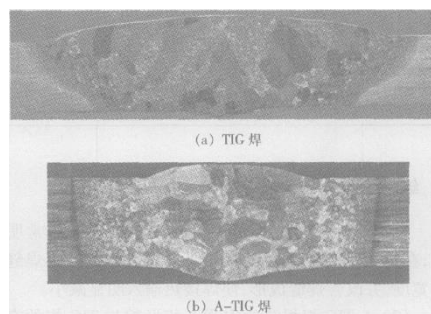


图4 焊缝形貌

量保留的多,上面和下面有一定的温度梯度,热量是从上面向下面和两侧散失,导致晶粒也是从下面和两侧向熔合线生长,最终呈现不同的形貌(如图 4 所示),王纯、李晓红、张连锋[20]分别在他们的文献里也有提及。

## 3 钛及钛合金的高能束焊

### 3.1 电子束焊

电子束焊(Electron Beam Welding, EBW)是以集中的高速电子束轰击工件表面时所产生的热能进行焊接的方法,本文介绍纯钛、近 $\beta$ 型钛以及 $\alpha+\beta$ 型钛电子束焊的焊缝组织、接头性能。

J.Adamus 等人[18]对 0.8mm 的 TA1 和 TC4 板材

进行异种金属焊接,电子束电流 4.6mA,电压 120KV,焊接速度 20mm/s,其中,TC4 侧热影响区(HAZ)抗拉强度和屈服强度略低于母材,硬度分布从 HAZ 到母材逐渐变大;而 TA1 侧 HAZ 抗拉强度和屈服强度略高于母材,硬度分布从 HAZ 到母材逐渐减小。付鹏飞等人[19]焊接 1.5mm 的 TA12 钛合金板材,发现接头的形貌成“倒三角”状,因为正面的热量比反面多,正面熔宽大,反面熔宽小。

J.C.Sabol 等人[21]对 1.6mm 的 Ti-5553 板材进行焊接,焊接电流 3.0mA,电压 150kV,焊接速度 8.5mm/s,焊缝熔合线处为  $\beta$  相柱状晶,热影响区为  $\beta$  相、 $\alpha+\beta$  相等轴晶,靠近熔合线的为  $\beta$  相,比较粗大,靠近母材的为较小的  $\alpha+\beta$  相等轴晶。分析认为,熔合线处冷却速度很快,来不及发生转变,故而是  $\beta$  柱状晶,靠近熔合线热影响区温度高于  $\alpha\rightarrow\beta$  转变温度,生成的  $\alpha$  相又发生  $\alpha\rightarrow\beta$  转变,形成  $\beta$  等轴晶,靠近母材热影响区温度低于  $\alpha\rightarrow\beta$  转变温度, $\alpha\rightarrow\beta$  转变未发生,最终是  $\alpha+\beta$  相。

吴新强等人[22]采用焊接电流 11 mA,电压 60KV,焊接速度 800 mm/min,获得网篮状的针状  $\alpha'$  马氏体。陈华等人[23]研究发现,TC4 钛合金电子束焊接接头强度达到了母材的 95%以上。

目前,电子束焊由于设备和维护成本比较高,还不能形成很好的普及应用。

### 3.2 等离子弧焊

等离子弧焊(Plasma Arc Welding, PAW)是近 20 多年来才迅速发展起来的一项先进技术,它在很大程度上填补了氩弧焊的不足。PAW 与 TIG 焊都是钨极产生电弧,所不同的是等离子弧是经过压缩的电弧,能量密度更高,温度更高,特别适合于单面焊

双面成形。

PAW 的特点是可以发生“小孔效应”,一般,热影响区温度高于母材的蒸发温度,即可发生“小孔效应”[25]。

V. Dhinakaran 等人[25]对 2mm 厚的 TC4 钛合金薄板材进行了焊接,焊接电流 60A,焊接电压 21V 左右,焊接速度 250mm/min,接头性能和母材相当。

由于设备投资大、操作要求较高、焊接参数较多以及焊接过程中易烧坏喷嘴等缺点,限制了其在钛合金焊接方面的普遍应用。

### 3.3 激光束焊

激光束焊(Laser Beam Welding, LBW)可用于纯钛、 $\alpha$  钛/近  $\alpha$  钛以及  $\alpha+\beta$  型钛合金的焊接,激光焊的特点是能量集中,焊缝成形好,并能提高焊接效率,缺点是设备成本高,容易产生飞溅。

由于激光焊能量密度高、冷却速度快,焊缝组织包含大量的马氏体,接头的强度、硬度会比母材高,但热输入量不同也会有差异。刘芝侠[26]、Santosh Kumar Sahoo[27]、Krzysztof Szymlek[28]等人的研究表明熔合线为针状  $\alpha$  相+锯齿状  $\alpha$  相+沿晶界析出  $\alpha$  相,热影响区为粗大的  $\alpha$  晶粒+沿晶界析出  $\alpha$  相+少量的锯齿状  $\alpha$  相,接头的抗拉强度高于母材,塑性低于母材。而汤昱等人[29]对 0.4mm 的 TA7 钛板进行激光焊接,接头强度只达到母材的 90%以上。

接头的组织和性能由激光功率和焊接速度共同决定。一般,较小的激光功率、较大的焊接速度有更细小的焊缝组织,激光功率和焊接速度越大,接头的硬度和强度越大。较小的激光功率、较大的焊接速度焊缝组织为细小的针状  $\alpha'$  马氏体+细小的  $\beta$  晶粒,较大的激光功率、较小的焊接速度的焊缝

组织为针状  $\alpha$  马氏体+粗大的  $\beta$  晶粒+针状  $\alpha$  晶粒+沿晶界析出  $\alpha$  相[30,31,32,33]。

#### 4 串列 TIG 焊

相关文献[34,38,39]表明,串列双电弧焊能够有效提高焊接速度,改善接头质量。串列双电弧焊分为两种,串列 TIG 焊和串列双丝气体保护焊(GMAW),但串列双丝 GMAW 适合填丝的厚板焊接,串列 TIG 焊适合不填丝的薄板焊接。串列 TIG 焊在钛合金焊接中还没有相关文献,本文就薄板不锈钢的焊接介绍一下串列 TIG 焊原理。

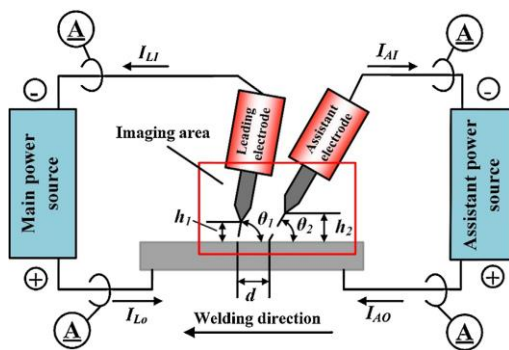


图 5. 串列 TIG 焊原理图.

G Qin 等人[34]对 1.5mm 的不锈钢薄板进行焊接,如图 5 所示,辅电极比主电极略高,主电极主要作用是获得需要的熔深,辅电极作用是加热主电极形成的熔池,使熔池铺展面积变大。研究表明,辅助电流是影响焊缝形貌的主要因素,辅助电流变大,焊缝质量好,其次是电极间距和电极角度,由于电弧对熔池有影响,通过不断调节电极间距和电极角度来降低电弧干扰,稳定焊接过程,并且阻止形成的熔池向后流动,从而抑制驼峰、咬边等缺陷。串列 TIG 焊、TIG 焊焊接速度分别为 3m/min、1.33m/min,串列 TIG 焊的金相组织更加细小,硬度强度更高,延伸率略下降但能满足工程需要。

分析认为,串列 TIG 焊保留了普通 TIG 焊的优

点,针对焊速慢、组织粗大等缺点进行改进,就焊接性而言,这种焊接方式也将适合钛及钛合金薄板的焊接。

#### 5 结论

(1) 通过比较 TIG 焊与高能束焊的焊缝组织、接头性能,发现 TIG 焊较高能束焊熔宽大、焊缝组织粗大,接头性能没有较大的区别;硬度分布均是从“熔合线”到母材逐渐减小,强度均与母材相当。而通过比较 TIG 焊与高能束焊的工艺参数,发现高能束焊热输入量小,能量密度大,接头冷却速度快,焊接速度比 TIG 焊高 1 倍左右。

(2) TIG 焊脉冲参数能够起到一些细化晶粒和降低残余应力的作用,活性剂能够提高焊接速度、改善组织和性能,但与高能束焊相差甚远。

(3) 串列 TIG 焊电弧挺度好,焊接速度比 TIG 焊高 1~2 倍左右,并且细化组织,改善性能。

经预测:串列 TIG 焊用于钛及钛合金薄板的焊接,能够获得与高能束焊一样的焊接速度并且获得与高能束焊相近质量的焊接接头,但成本只是普通 TIG 焊的两倍,在低成本、高质量焊接方面,具有一定的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 王桂生. 钛的应用技术[M]. 湖南:中南大学出版社,2007.
- [2] 李亚江,刘强,王娟. 气体保护焊工艺及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [3] 戚运莲,洪权,刘向,赵永庆. 钛及钛合金的焊接技术[J]. 钛工业进展,2004,21(6):25-29.
- [4] A. B. Short. Gas tungsten arc welding of  $\alpha+\beta$  titanium alloys: a review [J]. Materials Science and Technology, 2009, 25(3):309-324.
- [5] 高福洋,廖志谦,李文亚. 钛及钛合金焊接方法与研究现状[J]. 航空制造技术,2012,419(23):86-90.
- [6] 韦生,费东,田雷,徐连勇,韩永典,郭靖. 钛及钛合金焊接工艺探讨[B]. 焊工之友,201-3,42(4):73-75.

- [7] A.Karparaj,N.Sivashanmugam,K.Sankaranarayananamy. Some studies on mechanical properties and microstructural characterization of automated TIG welding of thin commercially pure ti-tanium sheets. [J].Materials Science&Engineering A 640(2015)180-189.
- [8] M.Junaid, M.N. Baig, M.Shamir, F.N.Khan, K. Rehman, J.Haider. A comparative study of pulsed laser and pulsed TIG welding of Ti-5Al-2.5Sn titanium alloy sheets[J]. Journal of Materials Processing Technology ,242 (2017): 24-38.
- [9] 李玉儒. 钛薄板材的脉冲钨极氩弧焊[J]. 钛工业进展, 1998 (3) : 11-13.
- [10] 刘中仁, 张荣俭, 乔春城, 王宝森. 氩弧焊工艺对薄壁纯钛板焊接接头性能的影响[J]. 焊接技术, 2014, 43 (3) : 19-20.
- [11] 罗伟中.  $\alpha$  型钛合金焊接接头的脆化[J]. 兵器材料科学与工程, 1987 (7) : 22-28.
- [12] 魏晓棠. 钛合金的钨极氩弧焊[J]. 钛工业进展, 2008, 25 (6) : 38-41.
- [13] M. Balasubramanian, V. Jayabalan, V. Balasubramanian.Effect of pulsed gas tungsten arc welding on corrosion behavior of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Materials &Design, 2008 , 29(7) :1359-1363.
- [14] B.Mehdi,R.Badji,V.Jib,B.Allilic,D.Bradaic,F.Deschaux-Beaumed,F.Soulié.Microstructure and residual stress-es in Ti-6Al-4V alloy pulsed and unpulsed TIG welds[J].Journal of Materials Processing Technology , 2016, 231:441-448.
- [15] 杨舟, 齐铂金, 从保强, 杨明轩. 脉冲电流频率对 TC4 钛合金焊缝成形的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(12) : 37-40.
- [16] 王纯. TC4钛合金的活性焊剂钨极氩弧焊工艺研究[J]. 现代焊接, 2009 (1) : 15-22.
- [17] 李晓红, 张连锋, 杜欲晓. 活性焊剂对钛合金氩弧焊焊接接头性能的影响[J]. 航空航天国际论坛, 2004.
- [18] J Adamus ,P Lacki ,M Motyka .EBW titanium sheets as material for drawn parts[J]. Archives of Civil & Mechanical Engineering, 2015,15(1):42-47.
- [19] 付鹏飞, 毛智勇, 唐振云, 王亚军. 薄板 Ti6Al4V 钛合金电子束焊接组织性能分析[J]. 焊接, 2013(2) : 50-52.
- [20] 张连锋, 李晓红, 杜欲晓. 钛合金活性焊剂氩弧焊接头组织分析[J]. 焊接, 2006 (7) : 16-19.
- [21] J.C.Sabol , T.Pasang , WZ.Misiolek ,J.C.Williams .Localized tensile strain distribution and metallurgy of electron beam welded Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr titanium alloys.Journal of Materials Processing Technology, 2012 , 212 (11) :2380-2385.
- [22] 吴新强, 王少刚, 李燕. 电子束焊工艺参数对 Ti-6Al-4V 钛合金接头组织与性能的影响[J]. 焊接, 2009(10) :61-65.
- [23] 陈华, 杨磊, 倪家强, 刘新宇, 赵忠华, 张春光. 钛合金薄板对接及锐角接电子束焊接[J]. 航空制造技术, 2013, 421 (1) : 112-114.
- [24] 刘立成, 于晶, 谷彦军. 钛合金材料的等离子弧焊接技术[J]. 国防技术基础, 2007 (7) : 59-62.
- [25] V.Dhinakaran,NS.Shanmugam,K.Sankaranarayananamy.Experimental investigation and numerical simulati-on of weld bead geometry and temperature distribution during plasmaarc welding of thin Ti-6Al-4V sheets[J].Journal of Strain Analysis for Engineering Design,2017,52(1) :30-44.
- [26] 刘芝侠, 王宗斌. 工业纯钛激光焊性能及组织分析[J]. 焊接技术, 2004, 33 (3) :24-25.
- [27] Santosh Kumar Sahoo,Bibhudutta Bishoyi,Upendra Kumar Mohanty, Sushant Kumar Sahoo,Jambeswar Sahu,Ravi Nathuram Bathe.Effect of Laser Beam Welding on Microstructure and Mechanical Properties of Commercially Pure Titanium[J].Transactions of the Indian Institute of Metals ,2016 :1-9.
- [28] Krzysztof Szymlek.Laser beam welding of sheets of commercial pure titanium[J].Welding International , 2012 , 26(6):421-423.
- [29] 汤昱, 邹世坤. 钛合金薄板 YAG 脉冲激光焊接[J]. 全国荷电粒子源、粒子束学术会议, 2001.
- [30] J.Ahn,L.Chen,CM.Davies,JP.Dear.Parametric optimisation and microstructural analysis on high power Yb-fibre laser welding of Ti-6Al-4V[J].Optics&Lasers in Engineering, 2016, 86:156-171.
- [31] Ali Gursel. Crack risk in Nd: YAG laser welding of Ti-6Al-4V alloy[J].Materials Letters , 2016.
- [32] B Sarre, S Flouriot, G Geandier, B Panicaud, VD Rancourt.Mechanical behavior and fracture mechanisms of titanium alloy welded joints made by pulsed laser beam welding[J]. Procedia Structural Integrity, 2016, 2:3569-3576.
- [33] 徐培全, 马春伟, 李永平, 马丁, 张培磊. TC4钛合金激光焊缝成形与显微组织分析[J]. 热加工工艺, 2012 ,41(11):207-209.
- [34] G Qin ,X Meng ,B Fu. High speed tandem gas tungsten arc welding process of thin stainless steel plate[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 220 :58-64.
- [35] CS Wu , F Yang , J Gao. Effect of external magnetic field on weld pool flow conditions in high-speed gas metal arc welding[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2016 , 230 (1).

[36] L Wang , CS Wu , JQ Gao. Suppression of humping bead in high speed GMAW with external magnetic field[J].Science & Technology of Welding & Joining, 2015,21(2): 1362171815Y.000.

[37] Savage, W.Nippes, E.Agusa, K. Effect of arc force on defect formation in GTAwelding[J]. Weld, 1979, 58, 212–224.

[38] UEYAMA Tomoyuki, OHNAWA Toshio,YAMAZAKI Kei, TANAKA Manabu, USHIO Masao,NAKATA Kazuhiro. High-Speed Welding of Steel Sheets by the Tandem Pulsed Gas Metal Arc Welding System[J]. Transactions of Jwri, 2005 , 34 :11-18.

[39] 张红兵 ,黄石生 , 周漪清 , 蒋晓明. 双电弧共熔池气保焊技术特点与发展现状[J]. 电焊机, 2004, 34 (11): 25–27.

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35
- 36
- 37
- 38
- 39

电话：18721616386

QQ：984752360

微信：Avenword

地址：上海市闵行区东川路 800 号