

钛合金激光焊接接头的组织和力学性能

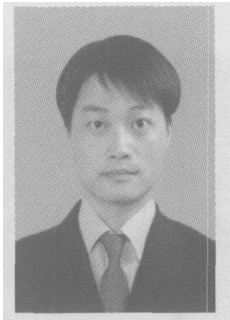
姚 伟， 巩水利， 陈 俐

(北京航空制造工程研究所 高能束流加工技术国防科技重点实验室, 北京 100024)

摘 要: 对 2.5 mm 厚 BT20 钛合金激光焊接接头各区域(包括焊缝和热影响区)的组织特征进行了观察,并测试了焊接接头各区域的显微硬度分布以及室温条件下的接头拉伸、弯曲、疲劳及断裂韧度等力学性能。研究表明,焊接接头各区域的微观组织均以“网篮状”马氏体组织为特征,接头各区域显微硬度均高于母材。接头静抗拉强度基本与母材相当,塑性略低于母材。接头中值疲劳寿命与应力水平有很大的关系。在低应力水平下,接头中值疲劳寿命与母材相当,而在高应力水平下,接头中值疲劳寿命远低于母材。接头焊缝金属的断裂韧度显著低于母材,而热影响区断裂韧度则介于母材和焊缝金属之间。

关键词: 钛合金; 激光焊接; 组织; 力学性能

中图分类号: TG407 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2006)02-69-05



姚 伟

0 序 言

BT20(Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V)钛合金强度水平超过 930 MPa,长时间(3 000 h)工作温度可达 500℃,已成为新型飞机和发动机中选用的主要钛合金之一,被大量用于制造飞机和发动机的承力结构件,尤其是焊接的承力结构件。随着 BT20 钛合金作为焊接结构材料的广泛应用,对其焊接接头组织和性能的研究显得十分重要,但目前国内外尚未见过相关报道。作者在对 BT20 钛合金激光焊接工

艺研究的基础上,采用光学显微镜对 BT20 钛合金激光焊接接头的微观组织形态进行了研究,并对 BT20 钛合金激光焊接接头的显微硬度、拉伸、弯曲、疲劳及断裂韧度等室温力学性能进行了测试。

1 试验条件和试验方法

试验采用的 BT20 钛合金试板厚度为 2.5 mm,供货状态为轧制、退火态,其化学成分如表 1 所示^[1]。

表 1 BT20 钛合金的化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical composition of BT20 titanium alloy

Al	Zr	Mo	V	Fe	Si	C	N	H	O	Ti
6.82	2.16	1.47	1.8	0.046	0.046	0.011	0.0069	0.0024	0.054	其余

研究采用了以 AM356 型 YAG 激光器为核心的激光焊接系统。激光器最大输出功率为 4 500 W,激光模式为多模。其机械系统部分采用六自由度机械手,激光通过光纤传输并反射聚焦后到达工件。反射镜焦距为 200 mm,焦斑直径为 0.6 mm。焊接过程以工作台静止,由机械手带动激光相对运动来实现。

焊接试验采用对钛合金试板进行板面堆焊的方法。堆焊前对试板进行化学清洗以去除试板表面的

油污和氧化层。焊接过程中采用五路氩气对焊接高温区进行全方位的保护。

2 接头微观组织形态

激光焊接具有能量密度高、焊接热输入低的特点,焊接接头中各特征区域(包括焊缝和热影响区)较常规熔焊方法都窄得多。观察钛合金激光焊接接头上、中、下三个不同区域从焊缝中心至母材的组织变化情况,如图 1 所示。

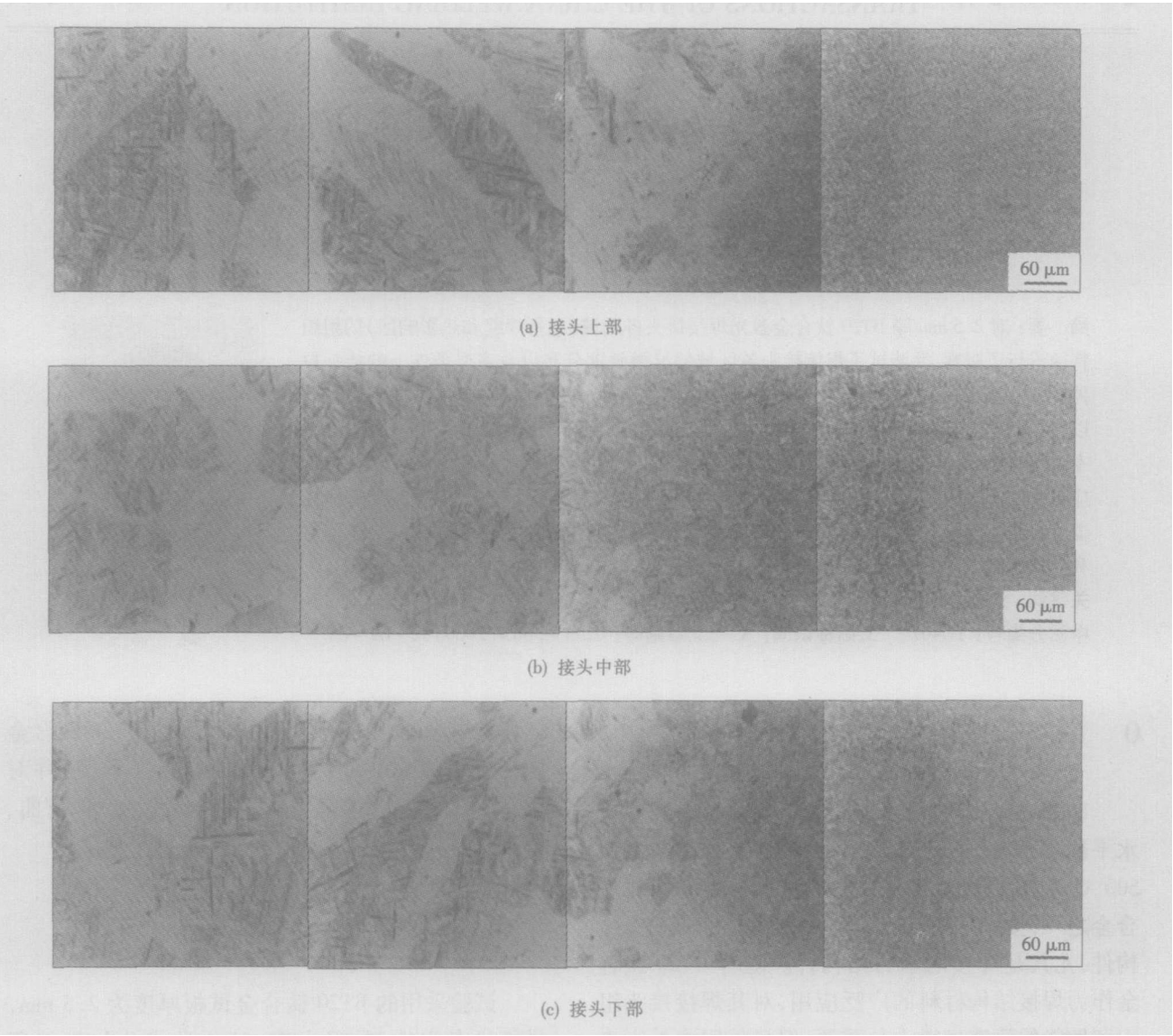


图 1 接头各区域从焊缝中心至母材的组织变化
Fig 1 Variation of microstructure in welded joint from weld to base metal

焊缝熔化区为典型的铸态组织, β 柱状晶以母材半熔化晶粒为基底通过联生结晶外延生长而成。由于钛合金母材的导热性能较差, 对过热非常敏感。在焊接热循环的作用下, 熔池边界半熔化晶粒的尺寸将十分粗大, 致使与之联生结晶而成的 β 柱状晶也十分粗大。 β 柱状晶的生长方向总是沿着最大散热方向进行的。在焊缝中部平直区段, β 柱状晶从焊缝两侧基本平行的熔合线向焊缝中心相对生长。然而在焊缝上部和焊缝下部半圆形区域, 靠近焊缝平直区段的 β 柱状晶首先由熔合线向焊缝中心相对生长, 但由于先期凝固的焊缝中部组织改变了散热条件, β 柱状晶在焊缝中心处改变其生长方向并几乎垂直地向焊缝表面生长。靠近焊缝表面的 β 柱状晶则直接由熔合线向焊缝表面中心生长。在焊缝中心能清晰地看到焊缝两侧 β 柱状晶相对生长的交界

面。这种 β 柱状晶的生长方向改变是由激光穿透焊时的热源作用特点决定的^[2-3]。

根据再结晶特征的不同, 热影响区可以划分为粗晶区、细晶区、不完全再结晶区和无再结晶区。在焊接热影响区加热峰值温度远高于再结晶温度的区域内, β 晶粒将通过原子扩散重新形核与长大, 形成等轴晶。在激光焊接热循环的作用下, 靠近熔合线一侧的区域高温停留时间较长, β 等轴晶粒的尺寸较大, 为粗晶区。远离熔合线的一侧由于高温停留时间非常短, β 晶粒通过原子扩散形核与长大的过程进行不完全, 原始晶粒和新晶粒并存, 为不完全再结晶区。介于粗晶区和不完全再结晶区之间还可能存在一个细晶区。由于钛合金导热性能较差, 并且激光焊接热循环在热影响区陡降的程度比常规熔焊方法显著得多, 因此在粗晶区占据了几个晶粒的宽

度之外, 细晶区 and 不完全再结晶区相对窄得多, 尤其是细晶区不如常规熔焊那样明显。当加热峰值温度低于再结晶温度时, 由于冷却速度极快, 原子扩散和再结晶过程来不及进行, β 晶粒保持母材轧制状态, 为无再结晶区。无再结晶区虽然没有发生 β 晶粒的再结晶过程, 但由于受到焊接热循环的影响而存在明显的加热痕迹。

焊缝和热影响区在冷却过程中, 伴随 β 柱状晶和 β 等轴晶形核与长大的同时将发生 α' 片状马氏体相变。接头各区域的马氏体片大小和形态如图 2 所示。由于激光焊接熔池转变温度较高而冷却速度较快, 焊缝 α' 片状马氏体将在 β 柱状晶的晶粒边界和晶粒内部同时形核并长大。从光学金相照片上看, α' 片状马氏体以若干 α' 片状集团的形式交织在一起。在每个 α' 片状集团中, 通常存在一根或若干根相互平行的、贯穿整个集团的马氏体长针, 其周围则是一些较细小的马氏体针, 形成典型的“网篮状”马氏体组织。在焊缝区的一个 β 柱状晶粒内部, α' 片状集团的数量较少, 而 α' 马氏体片较大, 如图 2a 所示。相比较而言, 如图 2b、c 所示, 在热影响区的完全相变区和部分相变区中, β 等轴晶粒内部的 α' 片状集团数量较多, α' 马氏体片较细小。热影响区的无相变区加热温度低于相转变温度, 无马氏体相变, 但存在明显的加热痕迹, 如图 2d 所示。

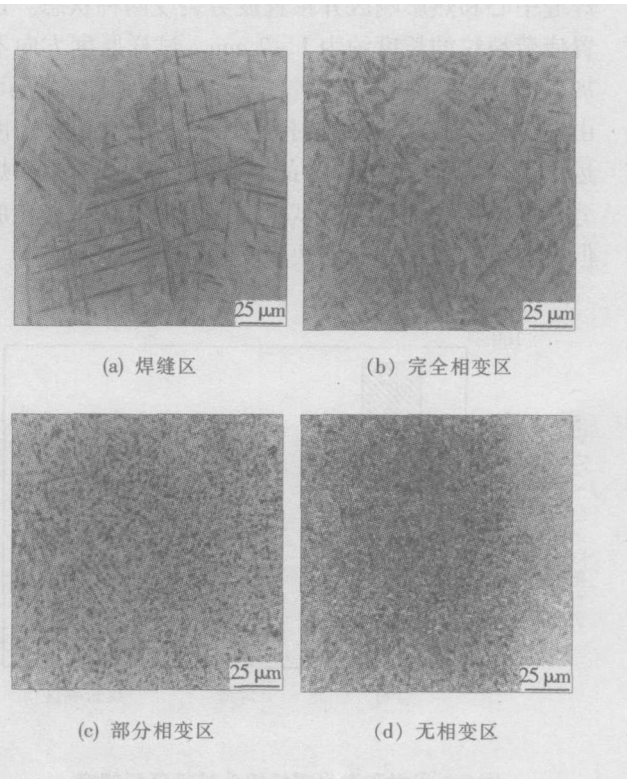


图 2 焊缝和热影响区各区域马氏体特征
Fig. 2 Characteristics of martensite in weld and HAZ

钛合金的导热性能较差, 对激光焊接热循环非常敏感, 因此焊接热输入的改变对焊缝和热影响区的组织将产生重大的影响。随焊接热输入的降低, 焊接熔池的转变温度降低而冷却速度加快, 焊缝和热影响区各区域的宽度变窄, 显微组织细化, 而热影响区中的某些区域可能完全消失。如图 3 所示, 热影响区中各区域的划分变得非常模糊, 粗晶区只有半个熔化晶粒宽度, 而细晶区则完全消失, 母材的轧制晶粒直接延伸至焊缝熔化区边界。

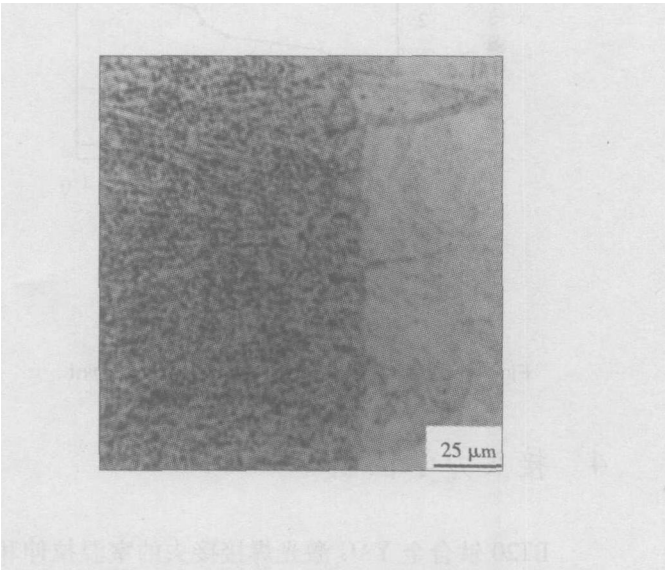


图 3 焊接热输入对热影响区组织的影响
Fig. 3 Influence of heat input on HAZ

3 接头显微硬度分布

分别对 BT20 钛合金 YAG 激光焊接接头焊缝中部横向和焊缝中心纵向的显微硬度分布进行测试, 结果如图 4 所示。从图 4a 可以看出, 接头各区域 (包括焊缝和热影响区) 的显微硬度均高于母材 (焊缝及热影响区平均硬度为 380HV0.2 而母材平均硬度低于 350HV0.2), 形成“软+硬+软”三明治式的硬度分布结构。显然, 焊缝和热影响区硬度的升高与高硬度马氏体相的形成有关。图 4b 为沿焊缝中心的硬度分布。激光穿透焊时, 等离子体对焊缝正面的加热作用受到轴向保护气的抑制被削弱, 而焊缝背面等离子体和高温金属蒸气在背面保护气的衬托下起到热沉的作用, 对焊缝背面进行持久加热。这就造成了焊缝上部冷却速度明显快于焊缝下部, 因此焊缝上部的硬度值 (约为 390HV0.2) 远高于焊缝下部 (低于 370HV0.2), 尤其是在焊缝表面附近显微硬度值最高, 超过 400HV0.2。

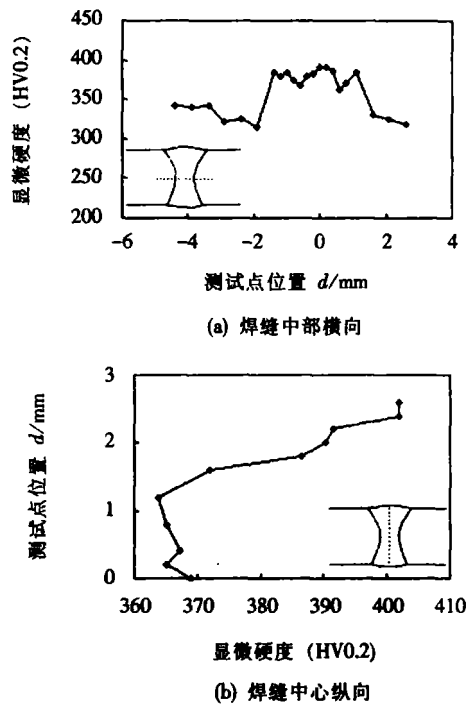


图 4 接头各区域显微硬度分布
Fig 4 Distribution of microhardness in joint

4 接头力学性能

BT20钛合金 YAG 激光焊接接头的室温拉伸和弯曲性能测试结果如表 2 所示。由表可知，接头抗拉强度与母材相当，接头延伸率低于母材，且拉伸试样均断于母材，而弯曲角略低于母材。拉伸试样均断于母材，这主要是由于接头的高硬度所致。激光焊接接头各区域（焊缝和热影响区）的显微硬度远高于母材，形成“软+硬+软”三明治式的硬度分布结构。试样在承受静态拉伸载荷的过程中，焊接接头作为硬相不容易变形，而母材作为软相首先发生塑性变形。随着拉伸载荷的不断增大，母材的塑性变形量增大直至缩颈现象发生，此时由于母材的承载面积急剧减小而发生迅速断裂。

表 2 母材及其激光焊接接头的拉伸和弯曲性能

Table 2 Tensile and bending properties of base metal and laserwelded joint

测试对象	抗拉强度 R_m MPa	延伸率 $A(\%)$	弯曲角 $\alpha(^{\circ})$
母材	1 030.5	17.2	27.4
接头	1 047.0	12.7	25.7

对 BT20钛合金母材及激光焊接接头疲劳寿命进行测试。轴向加载，三角波循环，应力比 $R=0.1$ ，最大应力水平分别取接头静载强度 σ_b 的 0.65、

0.75 和 0.85 试验频率为 25 Hz，其中值疲劳寿命如图 5 所示。由图可以看出，在较高的应力水平（ $0.75\sigma_b$ 和 $0.85\sigma_b$ ）作用下，激光焊接接头的中值疲劳寿命远低于母材，而在较低应力水平作用下，激光焊接接头的中值疲劳寿命与母材相当。

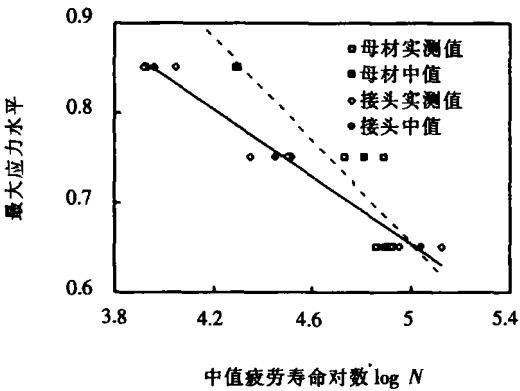


图 5 母材和激光焊接接头中值疲劳寿命
Fig 5 Fatigue life of base metal and joint

对 BT20钛合金母材及激光焊接接头断裂韧性进行测试。母材试样采用线切割开缺口并预置疲劳裂纹沿垂直于轧制方向扩展，焊接试样有缺口开在焊缝中心和热影响区并预置疲劳裂纹两种状态。预置疲劳裂纹的长度约为 1~2mm。试样厚度方向不加工，采用原始板厚。其特征断裂韧性如图 6 所示。由图可以看出，激光焊接接头焊缝金属的断裂韧性远低于母材，而热影响区的断裂韧性介于母材和焊缝金属之间。并且所有试样均为裂纹经过缓慢扩展但没有达到峰值载荷即快速失稳断裂。

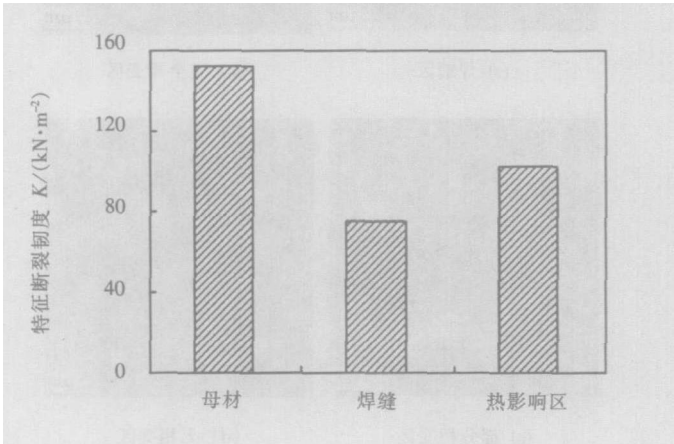


图 6 母材和激光焊接接头特征断裂韧性
Fig 6 Fracture toughness of base metal and joint

stant keyhole diameter[J]. Welding Journal 1972 51(6): 408-418.

[3] He De-fu, Katunori I. Penetration self adaptive frequency pulsed plasma arc welding process with photo cell sensor[J]. Transaction of JWRI 1984 13(1): 2-5.

[4] 胡百喜, 黄从达. 利用声音信号进行脉冲等离子弧全位置焊接质量控制系统的研究[J]. 焊接, 1980 (5): 17-20

[5] Martinez L E, Marques R E, Mcchire J C. Front side keyhole detection in aluminum alloys[J]. Welding Journal 1992 71(5): 49-51

[6] 董春林, 朱轶峰, 张 慧, 等. 穿孔等离子弧焊正面弧光传感技术研究[J]. 机械工程学报, 2001 37(3): 27-30

[7] 王慧钧, 王其隆, 刘正华. 铝合金等离子弧焊穿孔熔池正面图像检测与处理[J]. 材料科学与工艺, 1998 6(3): 92-96

[8] Zhang Y M, Zhang S B, Liu Y C. A plasma cloud charge sensor for pulse keyhole process control[J]. Measurement Science and Technology 2001 (12): 1-6

[9] 易小林. 等离子弧焊中等离子云检测机理与模糊控制的研究[D]. 天津: 天津大学, 2003

[10] 朱玉欣. 等离子弧焊小孔信号的等离子云传感研究[D]. 天津: 天津大学, 2005

作者简介: 马 立, 男, 1981 年 3 月出生, 硕士研究生。主要从事焊接过程控制及自动化方向的研究工作。

Email malid313@126.com

[上接第 72 页]

5 结 论

- (1) 接头焊缝区为粗大的 β 柱状晶组织, 激光穿透焊时的热源作用特点决定了 β 柱状晶生长方向的改变。接头热影响区可以划分为粗晶区、细晶区、不完全再结晶区和无再结晶区。焊接接头各区域的微观组织均以“网篮状”马氏体组织为特征, 在不同的区域内, 马氏体组织的形貌和尺寸有很大的不同。
- (2) 接头各区域的显微硬度均高于母材, 接头硬度的升高与高硬度马氏体相的形成有关。由于激光穿透焊时焊缝正面和焊缝背面冷却条件不同, 焊缝上部的显微硬度远高于焊缝下部, 并且焊缝上表面的硬度值达到最高。
- (3) 接头静抗拉强度基本与母材相当, 塑性略低于母材。
- (4) 接头中值疲劳寿命与应力水平有很大的关

系。在低应力水平下, 接头中值疲劳寿命与母材相当, 而在高应力水平下, 接头中值疲劳寿命显著低于母材。

(5) 接头焊缝金属的断裂韧度远低于母材, 而热影响区断裂韧度则介于母材和焊缝金属之间。

参考文献:

[1] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册(第 2 版)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001 74-83.

[2] 姚 伟, 巩水利, 陈 俐, 等. 钛合金激光穿透焊的焊缝成形(I)[J]. 焊接学报, 2004 25(4): 119-122

[3] 姚 伟, 巩水利, 陈 俐, 等. 钛合金激光穿透焊的焊缝成形(II)[J]. 焊接学报, 2004 25(5): 74-76.

作者简介: 姚 伟, 男, 1978 年 1 月出生, 工程师。现主要从事钛合金激光焊接技术研究, 发表论文 4 篇。

Email yaoweing@163.com

effect of vacuum electron beam welding by different processing parameter optimize the welding parameters and reduce the cost. The result shows that the residual stress peak value of joint welded by EBW with medium-voltage electron beam welding is higher than that of the joint with high voltage and its high residual stresses zone is much more concentrated on the central section of the joint.

Keywords electron beam welding; numerical simulation; residual stresses

Simulation system of IGM arc welding robot station LIU Yong^{1,2}, WANG Ke hong¹, YANG Jing yu², DU Shanshan², Du Shanshan² (1. Nan Jing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China; 2. Material Department of Science & Engineer Computer Department of Science & Technology, Nanjing 210094, China). p59-63

Abstracts Under the present situation that teach and play robot is used in the automatic welding universal off line programming system of IGM arc welding robot was developed. The three dimensional (3D) simulation of robot welding process is a graphic platform of off line programming. A new development way had been put forward to realize the simulation system of 3D graphics which was to develop independently an off line programming system of the work station including an OLE item based on C/S structure. And no slot integration of the three dimensional graphic and topological information of the welding workpiece had been realized by COM interface. Under VC++ development environment framework with three degrees of freedom joint type arc welding robot with six degrees of freedom and positioner with two degrees of freedom had been developed by using OpenGL graphic developing instrument based on object oriented programming.

Keywords arc welding robot; graphic simulation; OpenGL

Effects of welding parameters on CO₂ laser welding of magnesium alloys WANG Hong ying, LI Zhi jun (Industry Center, Shenzhen Polytechnic, Guangdong, Shenzhen 518055, China). p 64-68

Abstract The effect of welding parameters including laser power, welding speed and shielding gas flow rate on the laser welding process of magnesium alloys were researched. It was indicated that the weld widths at top and back side are both increased when the laser power is higher. And the weld width decrease with welding speed being increased. AZ61 magnesium alloys had a higher molten efficiency than AZ31 under the same welding parameters and a larger weld width is obtained for AZ61. The top and back shielding gas flow rate have few effect on the weld width. However, they directly determine the shielding effect of weld surface. The welding of AZ61 and AZ31 magnesium alloy sheets with different thickness can be successfully carried out by using CO₂ laser welding

method under the proper process conditions. Moreover, the formed weld has ideal appearance and good mechanical properties.

Key words magnesium alloys; laser welding; welding parameters

Microstructure and mechanical properties of laser welded joint of titanium alloy YAO Wei, GONG Shu li, CHEN Li (National Key Laboratory For High Energy Density Beam Processing Technology, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China). p 69-72, 76

Abstract The microstructure in various zones of laser welded joint of BT20 titanium alloy with 2.5 mm thickness was observed and the mechanical properties, such as the microhardness, the tensile and the bending properties, the fatigue life and the fracture toughness of the joint at room temperature were tested. The microstructure in various zones consists of martensite and the microhardness of the joint is higher than that of the base metal. The tensile strength of the joint is equal to that of the base metal and the ductility of the joint is slightly lower. The stress level has an important influence on the fatigue life of the joint, which is equal to that of the base metal at low stress level but obviously lower at high stress level. The fracture toughness of the weld metal is lower than that of the base metal and the fracture toughness of heat affected zone (HAZ) is intermediate between those of weld metal and base metal.

Key words titanium alloy; laser penetration welding; microstructure; mechanical property

Plasma cloud sensing of keyhole molten pool during pulsed plasma arc welding MA Li, HU Sheng sui, ZHU Yu xin, YIN Feng liang (Material Science and Technology Institute, Tianjin University, Tianjin 300072, China). p 73-76

Abstract Based on the theory of sensing the plasma cloud with a metal probe, an applied multi probe plasma cloud charge sensor was developed, and its reliability and precision were tested and compared with a designed efflux plasma charge sensor. The plasma cloud charge sensor was applied to detect the status of keyhole molten pool during pulsed plasma arc welding. Furthermore, the detected signals were studied. As a result, the detected undershoot of plasma cloud signal can be used as the criterion of the keyhole molten pool's status, and the frequency of the undershoot can be used as the criterion to judge whether the pulse welding is one pulse one keyhole or not. It was shown that the detected plasma cloud signal can reflect the keyhole molten pool's status.

Key words pulsed current plasma arc welding; keyhole molten pool; plasma cloud sensing

Microstructure and properties of the T91 TLP bonded joint with dif