

钛合金焊接

高强钛合金 TIG 焊接工艺研究

冯 靖¹, 樊立民¹, 耿乃涛², 杨 柳³, 武少杰¹, 程方杰^{1, 4*}

(1. 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350; 2. 鞍钢集团北京研究院有限公司, 北京 102200; 3. 成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司, 四川 成都 610300; 4. 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300350)

摘 要: 采用一种新型 Ti-V-Mo 系高强钛合金, 通过 TIG 自动送丝和手动填丝两种方式进行了焊接工艺试验, 对焊接接头的成形、组织和力学性能进行了分析测试。结果表明: 两种焊接方式下的焊缝外观成形都很美观, 没有飞溅和咬边等缺陷, 焊道表面呈银白色; 母材是一种等轴 α 相含量较高的双态组织, 热影响区晶粒十分粗大, 内部主要是针状 α' 相, 焊缝区晶粒也十分粗大, 主要由层片 α 相转变组织构成, 含有少量针状 α' 相; 自动送丝 TIG 和手动填丝 TIG 的接头抗拉强度分别为 822 MPa 和 612 MPa, 热影响区的冲击吸收功分别达到了 72.2 J 和 84.9 J, 表明该钛合金在 TIG 焊接工艺下, 热影响区具有良好的韧性特征。

关键词: 高强钛合金; TIG 焊; 手工填丝; 自动送丝; 微观组织; 热影响区

中图分类号: TF823, TG456

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2021)06-0158-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.06.023

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Research on TIG welding process of high strength titanium alloy

Feng Jing¹, Fan Limin¹, Geng Naitao², Yang Liu³, Wu Shaojie¹, Cheng Fangjie^{1, 4*}

(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Ansteel Beijing Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China; 3. Chengdu Advanced Metal Materials Industry Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610300, Sichuan, China; 4. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin 300350, China)

Abstract: A new type of high strength Ti-V-Mo titanium alloy was used as raw material. Welding test was carried out respectively by TIG automatic wire feeding and manual wire filling. The microstructure, forming, and mechanical properties of the joint were analyzed. The results show that the weld appearance shape is very smooth with no splash and edge defects. The base material has a duplex microstructure with higher content of equiaxed α phase. The grain size of the heat affected zone of Ti-V-Mo titanium alloy is very rough with needlelike α' phase inside the alloy. The grain size of weld area is very bulky, made up of a large number of layer α transitional phase structure and a small amount of needlelike α' phase structure. The tensile strength of the joint by TIG automatic and manual wire filling is 822 MPa and 612 MPa, respectively. And the impact absorbing energy of heat affected zone by TIG automatic and manual wire filling is 72.2 J and 84.9 J respectively. It shows good toughness characteristics in heat affected zone through the TIG welding process.

Key words: high-strength titanium alloy, TIG welding, manual wire-filled, automatic wire-feeding, microstructure, heat-affected zone

收稿日期: 2021-08-05

基金项目: 天津市科技计划项目 (项目编号: 18ZXJMTG00140)。

作者简介: 冯靖 (1999—), 男, 陕西榆林人, 硕士研究生, 主要研究方向为先进连接技术研究, E-mail: 18851197936@163.com; * 通讯作者: 程方杰 (1971—), 工学博士, 教授/博士生导师, 主要研究方向为先进焊接工艺和电弧增材制造, E-mail: chfj@tju.edu.cn。

0 引言

钛合金作为一种新兴的战略金属材料,性能上具有密度小、比强度高、耐蚀性强等优点,因而被广泛地应用在航空航天、石油化工以及武器装备等领域^[1-2]。但是另一方面,钛合金也具有熔点高、导热性差、高温下易氧化和吸收有害气体等特点。其在焊接过程中具有很强地吸收氧、氮和氢等有害气体元素的能力,严重地降低了焊接接头的综合力学性能^[3-4],这极大限制了钛合金的应用领域^[5-6]。

目前,钛合金常用的焊接方法有激光焊、电子束焊、等离子弧焊、TIG 焊及 MIG 焊等^[7-8]。其中,激光焊、电子束焊及等离子弧焊属于高能束焊接方法,具有焊接效率高、焊缝深宽比大,接头冶金质量高,晶粒尺寸小等优点。但是激光、电子束及等离子弧焊接钛合金过程中容易产生大的残余应力,随板厚度的增加,焊缝处残余应力会显著增加,降低接头的塑、韧性^[9]。此外,激光焊与电子束焊设备成本较高,等离子弧焊焊接参数较多,且焊接过程中喷嘴易烧伤损坏,不宜作为常规的钛合金焊接方法。MIG 熔覆效率高,但是焊接过程中容易产生飞溅,且 MIG 焊对应的接头综合组织性能比其他焊接方式都低^[10];TIG 焊具有综合性好、焊接成本低、操作灵活方便的优势,被广泛用于钛合金焊接,但是对于钛合金 TIG 焊,大部分研究集中在 4 mm 以下的薄板,对中厚板报道较少^[11]。

笔者选用 300 mm×150 mm×15 mm 的新型 Ti-V-Mo 系($\alpha+\beta$)型双相高强钛合金为试验材料,以 TIG 手动填丝和自动送丝两种焊接方式进行工艺试验。对比分析了两种 TIG 焊接方式下焊缝的成型、组织及力学性能差异,为新型 Ti-V-Mo 系($\alpha+\beta$)型双相高强钛合金 TIG 焊接生产提供参考。

1 试验设备及方法

自动送丝 TIG 选用福尼斯 TransTIG 型焊接电源,手工填丝 TIG 选择米勒 350 型多功能焊接电源进行焊接。试验用母材为一种新型的 Ti-V-Mo 基($\alpha+\beta$)型双相高强钛合金,试样尺寸为 300 mm×150 mm×15 mm。自动送丝选用了直径 1.6 mm、钛含量大于 99.9%、标称抗拉强度为 295~470 MPa 的 HTA0-1 M 纯钛型焊丝;手工填丝工艺使用同材质直径 3.0 mm 的焊料棒,保护气选用 99.99% 的高纯氩,保护气流量设为 10 L/min,并采用焊接拖罩通氩

气的方式对高温焊缝进行保护,尾罩保护气流量为 20 L/min。对接板材加工成 V 形坡口,坡口角度为 60°,钝边尺寸为 1 mm,手工焊接时需要留 1.5 mm 的根部间隙。焊接电参数和运动参数如表 1 所示。

表 1 两种 TIG 方式下焊接参数
Table 1 Welding parameters of two TIG methods

	I/A	U/V	$v_f/(m \cdot min^{-1})$	$v_w/(m \cdot min^{-1})$
自动TIG	122	9.6	0.36	0.26
手工TIG	80~110	9.6		

由于 TIG 焊自动送丝与手动填丝选用的试验材料尺寸一致,因此采用相同的取样标准进行力学性能评定。采用线切割方法分别在钛合金对接板上取 2 个全厚度尺寸的拉伸试样,6 个冲击标准试样,其中冲击试样中有 3 个缺口开在热影响区处,3 个缺口开在焊缝处,取样参照 GB/T2650 和 GB/T2651。图 1 为两种焊接方式下的取样示意,图 2 为拉伸试样尺寸示意。

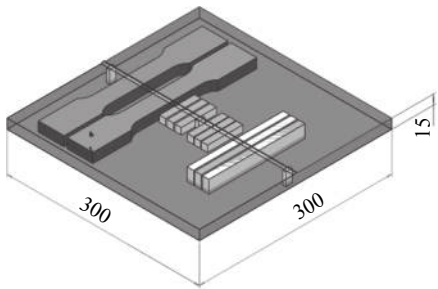


图 1 接头取样示意(单位:mm)
Fig. 1 Schematic of joint sampling (Unit: mm)

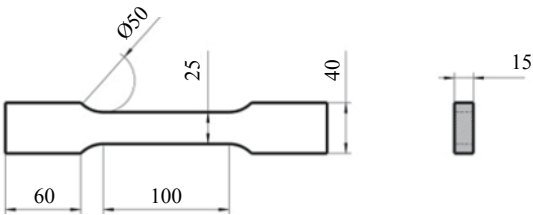


图 2 拉伸试样尺寸示意(单位:mm)
Fig. 2 Schematic of the tensile sample size (Unit: mm)

硬度测试选用了 SVD-432TS 型维氏硬度测试仪,测量载荷为 1 kg,负载时间 10 s,测量位置为焊缝上沿距离表面 2 mm 位置处。从焊缝中心线到母材方向,每隔 0.5 mm 进行一次硬度测试,如图 3 所示;拉伸试验在 MTS 的电子万能拉伸机上进行,试验前用水砂纸打磨线切割加工面,保证试验的准确性;冲击试验采用摆锤式冲击试验机在室温条件下对钛合金焊缝及热影响区区域各进行 3 组试验,测试结果取平均值。

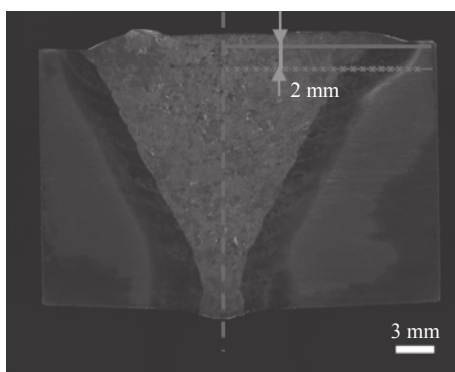


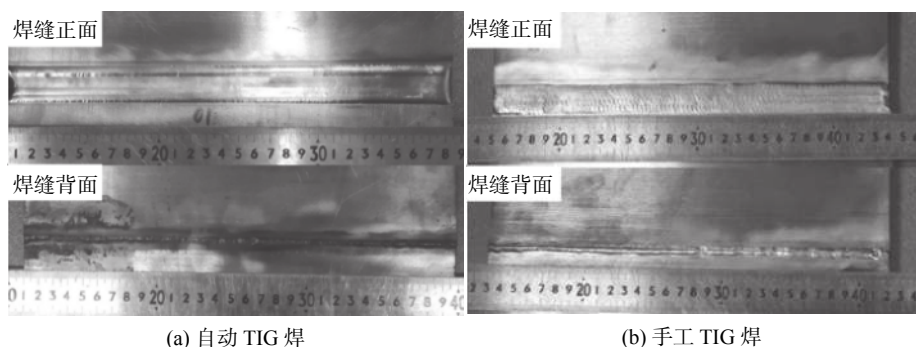
图3 硬度测试试验示意
Fig. 3 Schematic of hardness test

2 焊缝成型及组织分析

图4为两种焊接方式下得到的接头宏观形貌。可以看出,焊缝正面呈亮银色金属光泽,无氧化现

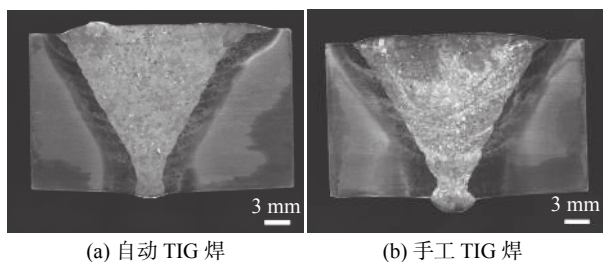
象,焊缝背面存在一定的氧化现象。其中自动焊的焊缝表面光滑平整,手工焊通过摆动在焊缝表面形成了均匀、稳定的鱼鳞纹,两者的焊缝背部均存在一定的余高。图5为焊接接头的宏观金相照片。可以看出,TIG焊过程熔合良好,无未熔合等明显缺陷。由于手工焊过程中存在摆动,使用焊丝更粗,因而手工焊热输入大于自动焊热输入;且手工焊受热过程相比于自动焊而言更加随机与复杂,因此在宏观形貌上可以看出手工焊组织比自动焊组织变化更复杂。

母材微观组织形貌如图6所示,母材主要由的白亮色初生等轴状 α 组织以及由层片状次生 α 相和层间残留 β 相组成的网篮状 β 组织组成。同时观察到晶粒在轧制作用的影响下,沿轧制方向形成了具有一定取向的生长特征。



(a) 自动 TIG 焊 (b) 手工 TIG 焊

图4 两种 TIG 焊接方式下的焊缝表面成型
Fig. 4 Weld surface forming of two TIG welding methods



(a) 自动 TIG 焊 (b) 手工 TIG 焊

图5 两种 TIG 焊接方式下的焊缝截面成型

Fig. 5 Weld cross-section forming of two TIG welding methods

TIG 自动送丝与手动填丝的热影响区及焊缝组织如图7所示,两种 TIG 焊接方式下热影响区具有类似的微观组织特征,并无显著性差异。其中热影响区主要由过渡区、细晶区和粗晶区组成。热影响区组织特征表现为:原始母材中的等轴初生 α 相和层片状($\alpha+\beta$)网篮组织均发生了一定程度的粗化,在经历了峰值温度超过 β 相变点的焊接热循环,生成了一定量的细针状 α' 马氏体相,并且随着向焊缝方

向移动,双态组织含量逐渐减下, α' 马氏体的含量逐渐增加;过渡区组织如图7(a)、(e)所示,由图7可知,过渡区下的双态组织发生一定程度的粗化。相比于自动 TIG 焊,手工 TIG 焊下得到的过渡区原始等轴组织和网篮组织的晶界不再分明,且形成了极少量细针状 α' 马氏体;细晶区组织如图7(b)、(f)所示,由图7可知,焊接热循环过程中经历的峰值温度升高,冷却速度降低,晶粒异常长大,发生了明显的粗化,且内部生成了较多的细针状 α' 马氏体,几乎观察不到母材中原始的双态组织特征,相比于自动焊而言,手工焊热影响区的晶粒尺寸更加均匀,且生成的细针状 α' 马氏体含量更多;粗晶区组织如图7(c)、(g)所示,由于接近焊缝,焊接热循环所经历的峰值温度更高,远超过了组织相变点,因此晶粒粗化更加严重,焊接过程中发生大量的 β 组织转变,并且在随后的冷却过程中生成了大量的细针状 α' 马氏体,相

比于自动 TIG 焊而言,手工 TIG 焊粗晶区形成了更多的细针状 α' 马氏体。如图 7(d)、(h)所示,焊缝处组织为纯钛组织。从高温冷却过程中,焊缝冷却高于临界冷却速度, β 相发生一部分非扩散转变形成过饱和非平衡六方晶格 α 相,即针状 α' 马氏体,因此其内部组织存在一定的细针状 α' 马氏体。但是 TIG 焊接热输入相对较大,其晶粒内部不仅发生了马氏体非平衡转变,还在晶界上析出了晶界 α 相,并且发生了 β 相向 α 相的平衡组织转变,以层片状 α 相的形式从晶界析出后向晶内平行生长,形成大量的层片状平行集束。因此钛合金 TIG 焊接接头组织主要为细针状 α' 马氏体+晶界 α 相+大量 β 转变

束集(层片状 α 相+层间残留 β 相),且相比较可以发现,手工 TIG 焊组织过热更加严重,形成了更多的晶界 α 相。

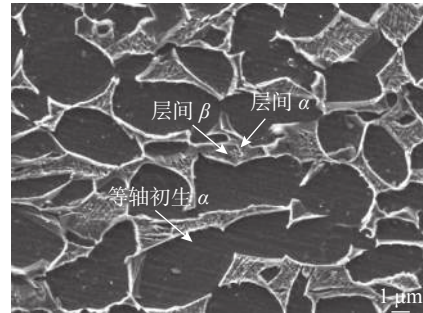
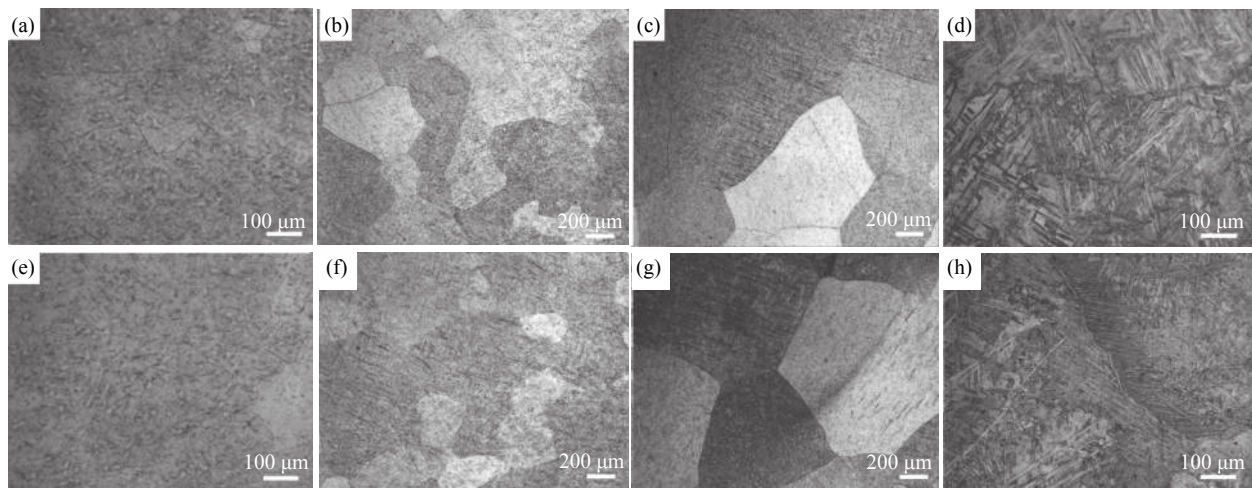


图6 母材金相组织

Fig. 6 Metallographic structure of base metal



(a) TIG 自动送丝过渡区; (b) TIG 自动送丝细晶区; (c) TIG 自动送丝粗晶区; (d) TIG 自动送丝焊缝; (e) TIG 手动填丝过渡区; (f) TIG 手动填丝细晶区; (g) TIG 手动填丝粗晶区; (h) TIG 手动填丝焊缝

图7 两种 TIG 焊接方式下的热影响区组织与焊缝微观组织

Fig. 7 The microstructure of the heat affected zone and the weld of two TIG welding methods

3 力学性能分析

3.1 显微硬度

图 8 给出的是两种焊接接头的硬度测试结果。可以发现,二者规律类似,都是焊缝区硬度最低,热影响区硬度最高而母材居中。这是由于焊材选用的是没有合金元素的纯钛,凝固过程中形成的 α' 马氏体比较少,存在较多的片层状 α 相导致的。而热影响区合金化程度较高而且冷却速度很快,所以形成大量的 α' 马氏体相,其硬度自然明显升高。进一步发现,手工 TIG 焊的 HAZ 区硬度比自动焊的要略高一些,应该是由于手工电弧摆动导致多次受热形成了更多的马氏体相引起的。

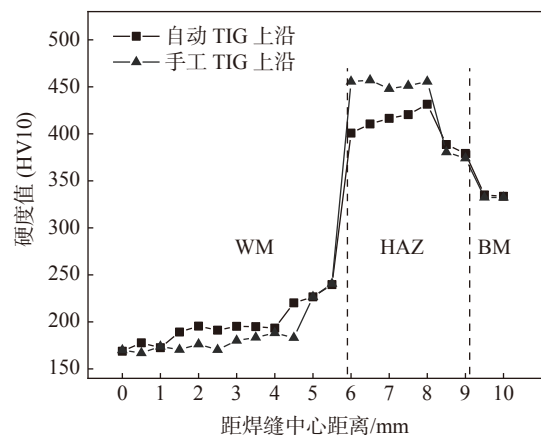


图8 两种 TIG 焊接方式下焊缝的显微硬度分布

Fig. 8 The micro-hardness distribution of welds of two TIG welding methods

3.2 拉伸性能

由表2可知,自动TIG焊缝的平均抗拉强度为822 MPa,手工TIG焊缝的平均抗拉强度为612 MPa,手工TIG焊抗拉强度低于自动TIG焊。由图9可知,拉伸试样均断裂在焊缝的位置处,表明两种TIG焊接方式下焊缝的抗拉强度均低于母材。

由图10可知,两种焊接方式断口处均存在大量网状等轴韧窝,手工TIG焊断口对应的韧窝尺寸小于自动TIG焊断口,且分布更加致密。但是两种焊

接方法下的拉伸试样断裂形式均混合了一定量的解理断裂形式。

表2 自动TIG和手工TIG焊拉伸性能

Table 2 Tensile properties of automatic TIG and manual TIG welding

编号	抗拉强度/MPa	平均值/MPa
ZD-TIG-1	728	822
ZD-TIG-2	916	
SG-TIG-1	599	612
SG-TIG-2	625	

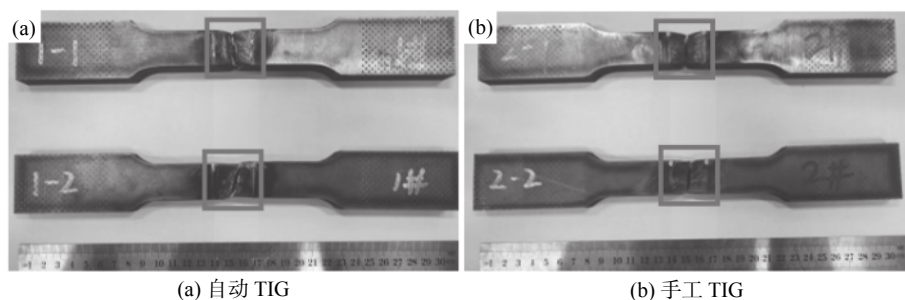


图9 拉伸试样断裂位置
Fig. 9 Fracture position of tensile specimen

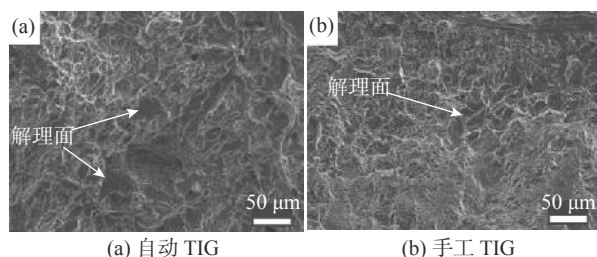


图10 试样断口形貌
Fig. 10 Fracture morphologies of sample

3.3 冲击试验结果

图11给出的是夏比冲击试验的结果。可以发现,两种焊接方法相比,自动送丝TIG焊接头普遍略低于手工填丝焊接头;从焊缝和热影响区两个位置相比来看,焊缝金属的冲击韧性都要高于热影响区。图12给出的是两种焊接方式下的冲击断口形貌。断口上均是大量的韧窝,且形成了明显的撕裂棱,属于韧性断裂。

4 分析与讨论

本次试验选用的焊材为TA0级的纯钛,其标称的熔覆金属抗拉强度仅有295~470 MPa。根据拉伸试验结果表明,尽管焊缝抗拉强度仍比母材低,但是TIG手工填丝工艺的抗拉强度仍然达到了612 MPa,而TIG自动送丝工艺抗拉强度更是高达822 MPa。接头的抗拉强度远远超过了熔覆金属的标称强度。这一现象从焊缝微观组织上可以给出较合理的解释:

在较厚的钛合金板多层多道焊接时,由于冷却速度相对较快,焊缝金属中会形成一定量的马氏体相,从而显著提升了其抗拉强度。这也为钛合金焊接选材提供了一个参考,就是要充分考虑板厚、焊接热输入等对焊缝组织转变过程的影响,可以选择合金含量较低的材料作为填充金属,借助快速冷却产生马氏体强化来实现接头强度的匹配设计,而不宜简单遵循钢材焊接时的成分相似的选材原则。

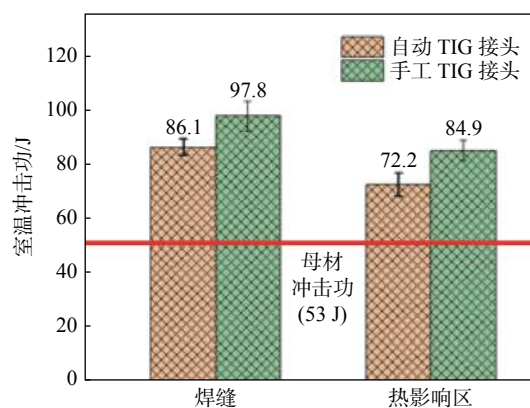
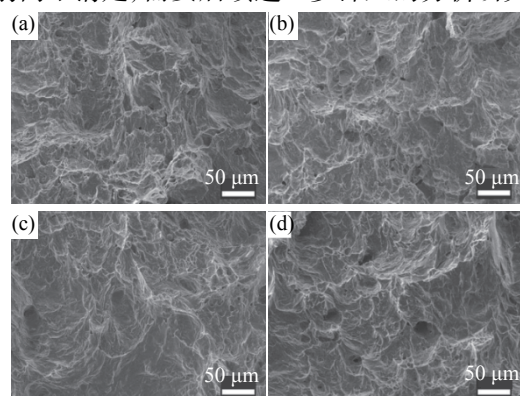


图11 焊缝及热影响区冲击功结果
Fig. 11 Impact energy results of welds and heat-affected zone

其次,根据冲击试验结果发现一个非常有趣的现象:热影响区表现出了非常优秀的冲击韧性,甚至已经超过了母材(53 J)。可以推测,热输入合适的多层多道焊接过程对于该钛合金母材来讲可能正好

也是一个理想的热处理过程。出现这一结果的机理目前尚不清楚,需要后续进一步深入的分析研究。



(a) 自动 TIG 焊缝; (b) 手工 TIG 焊缝; (c) 自动 TIG 热影响区; (d) 手工 TIG 热影响区

图 12 焊缝及热影响区断面形貌

Fig. 12 Fracture morphologies of weld and heat-affected zone

5 结论

1) 两种 TIG 焊接头的热影响区具有类似特征,

主要为粗化后的双态组织和针状 α' 相组成,而焊缝区主要为细针状 α' 马氏体+晶界 α 相+ β 转变束集组成。

2) 硬度试验结果表明两种 TIG 焊接头都是热影响区硬度最高,焊缝区硬度最低而母材居中。其中手工填丝 TIG 焊接头热影响区的硬度要高于自动送丝 TIG 焊工艺,接头的硬度跟马氏体组织的含量正相关。

3) 自动 TIG 接头平均抗拉强度为 822 MPa,手工 TIG 焊缝的平均抗拉强度为 612 MPa,均明显高于焊材本身的抗拉强度,认为钛合金焊接接头熔覆金属的强度不仅取决于焊材成分,还取决于其在冷却过程中形成的马氏体含量。

4) 两种焊接工艺的焊接接头都具有良好的冲击韧性,而且热影响区的韧性要优于母材。其中,自动 TIG 焊缝处平均冲击功 86.1 J,热影响区处平均冲击功为 72.2 J;手工 TIG 焊缝处平均冲击功 97.8 J,热影响区处平均冲击功为 84.9 J。

参考文献

- [1] Zhu Zhishou. Recent research and development of titanium alloys for aviation application in China[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2014, 34(4): 44-50.
(朱知寿. 我国航空用钛合金技术研究现状及发展[J]. *航空材料学报*, 2014, 34(4): 44-50.)
- [2] Li Yi, Zhao Yongqing, Zeng Weidong, *et al.* Application and development of aerial titanium alloys[J]. *Materials Report*, 2020, 34(S1): 280-282.
(李毅, 赵永庆, 曾卫东. 航空钛合金的应用及发展趋势[J]. *材料导报*, 2020, 34(S1): 280-282.)
- [3] Jia Haitao, Zhang Ruiwei. Analysis and application of welding titanium and titanium alloy[J]. *Welding Technology*, 2020, 49(1): 55-60.
(贾海涛, 张睿伟. 钛及钛合金的焊接性分析与应用[J]. *焊接技术*, 2020, 49(1): 55-60.)
- [4] Luo Sheji, Li Dan, Li Ning. Research status of thermal oxidation behavior of titanium and titanium alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2021, 50(10): 17-21.
(雒设计, 李丹, 李宁. 钛及钛合金热氧化行为的研究现状[J]. *热加工工艺*, 2021, 50(10): 17-21.)
- [5] Guo Li, He Weixia, Zhou Peng, *et al.* Research status and development prospect of titanium and titanium alloy products in China[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(22): 22-28.
(郭鲤, 何伟霞, 周鹏, 等. 我国钛及钛合金产品的研究现状及发展前景[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(22): 22-28.)
- [6] Li Yulong, Yang Jin, Yu Yexiao. Characteristic and current status of titanium and its alloys[J]. *Hot Working Technology*, 2011, 40(9): 130-133.
(李玉龙, 杨瑾, 禹业晓. 钛及钛合金钎焊特点及现状[J]. *热加工工艺*, 2011, 40(9): 130-133.)
- [7] Yu Deshui, Zhang Yan, Zhou Jianping, *et al.* Research status titanium alloy and dissimilar metal welding of aluminum[J]. *Welding & Joining*, 2020, (11): 37-45, 63.
(于得水, 张岩, 周建平, 等. 钛合金与铝合金异种金属焊接的研究现状[J]. *焊接*, 2020, (11): 37-45, 63.)
- [8] Huang Jiuling, Kong Liang, Wang Min, *et al.* Welding of titanium and titanium alloy sheet[J]. *Welding Technology*, 2018, 47(11): 1-5.
(黄九龄, 孔谅, 王敏, 等. 钛及钛合金薄板的焊接[J]. *焊接技术*, 2018, 47(11): 1-5.)
- [9] Gao Fuyang, Liao Zhiqian, Li Wenya. Welding method and research of titanium and titanium alloy[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012, (Z2): 86-90.
(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, (Z2): 86-90.)
- [10] Zheng Chengbo. Research on molten wire tungsten inert gas welding process of TA2 titanium alloy[J]. *Shenyang: Shenyang Ligong University*, 2020.
(郑成博. TA2钛合金熔丝钨极氩弧焊工艺研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2020.)
- [11] Mou Gang, Hua Xueming, Xu Xiaobo, *et al.* Comparative study on TIG and MIG welding process and performance of 8 mm thick TC4 titanium alloy[J]. *Electric Welding Machine*, 2020, 50(4): 70-74, 138.
(牟刚, 华学明, 徐小波, 等. 8 mm厚TC4钛合金TIG、MIG焊接工艺及性能对比研究[J]. *电焊机*, 2020, 50(4): 70-74, 138.)