

# 厚板 Ti-6Al-4V 磁控窄间隙 TIG 焊接头性能

孙清洁<sup>1,3</sup>, 李文杰<sup>1</sup>, 胡海峰<sup>1</sup>, 梁迎春<sup>3</sup>, 冯吉才<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学(威海)山东省特种焊接技术重点实验室, 威海 264209;

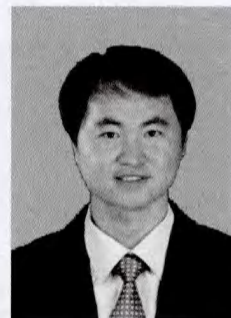
2. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001;

3. 哈尔滨工业大学 机械工程博士后流动站, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 对 56 mm 厚 Ti-6Al-4V 进行了磁控窄间隙 TIG 焊试验, 对接头的力学性能进行分析, 其中包括拉伸性能、冲击性能及硬度。结果表明, 焊缝的强度高于填充金属的原始性能值, 这是通过针状组织的啮合强化效果来实现的。而由于焊缝横截面沿厚度方向上的内应力分布导致后焊侧的中心线附近的强度及韧性明显提高。介于表层及中心层之间由于拉应力的存在而导致其强度及韧性较差, 而表面层由于没有内应力的存在而使得其强度和韧性介于前二者之间。同一位置深度上, 焊接热影响区熔合线附近的硬度最高。这是由于大量蓝网状分布的针状  $\alpha'$  相存在的原因。

**关键词:** 钛合金; 窄间隙; 磁控电弧; 力学性能

**中图分类号:** TG407 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2013)02-0009-04



孙清洁

## 0 序 言

钛及钛合金具有高强度和耐腐蚀性能, 因此被广泛地应用于航空航天、化工和核工业, 而 Ti-6Al-4V 更是由于其优异的综合性能成为了钛合金中的重要材料<sup>[1]</sup>。它的可焊方法有 TIG, MAG, EBW, PAW 和 LW 等<sup>[2]</sup>。而随着现代工业生产和国防装备中焊接结构的日益大型化, 厚板的应用越来越广泛, 以上的焊接方法存在焊接效率低、焊接变形及残余应力大。而采用窄间隙焊不仅能大幅度地减少坡口截面积, 大大减少焊缝金属的填充量, 因而被作为一种经济的、能够得到优良力学性能和变形较小的优质焊接方法, 广泛应用于各种大型重要结构。窄间隙焊所要攻克的难题就是保证侧壁熔合及改善焊缝成形<sup>[3]</sup>。而交变横向磁场的引入很好地解决了这一问题, 在合理的磁场频率和强度下得到了很好的焊接效果。研究同时发现, 在焊接过程中外加纵向磁场使得焊缝金属得到细化而使得焊缝的性能得到提高<sup>[4]</sup>。

文中对 56 mm 厚度的 Ti-6Al-4V 板材采用双 U

形坡口进行窄间隙磁控电弧 TIG 焊, 并对焊接接头的拉伸性能、冲击韧性、硬度进行测试并用扫描电镜对断后进行分析, 为厚板钛合金窄间隙磁控焊方法的工业化应用提供试验基础。

## 1 试验方法

此试验所采用的是窄间隙磁控电弧焊方法, 其工作原理见图 1。在钨极的运动截面上并在钨极运动的正前方引入如图 1 所示的电磁铁, 在线圈中通入交变电流后, 电弧会受垂直于钨极方向交变磁场的作用而周期摆动。一定的磁场频率及强度使得热源热量分布合理解决了窄间隙焊中的侧壁熔合问

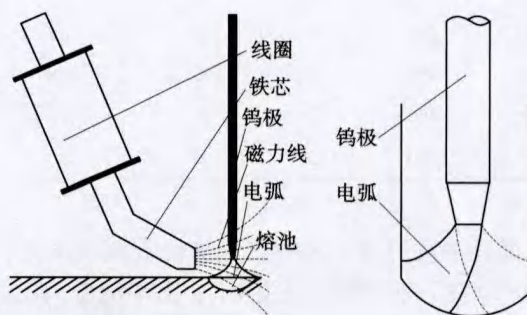


图 1 窄间隙磁控电弧焊方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of narrow interval magnetic control arc welding method

收稿日期: 2011-12-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51105109); 先进焊接与连接国家重点实验室开放课题; 江苏科技大学先进焊接技术省级重点实验室开放研究基金; 国家 863 高技术科技发展计划资助项目(2008AA092901)

题<sup>[5]</sup>. 而穿过熔池的磁场使凝固中的熔池具有复杂的流动和涡旋的特点, 获得均匀细小的焊缝组织<sup>[6]</sup>, 使得焊缝的力学性能提高. 试验所用材料为厚度 56 mm 的 Ti-6Al-4V 钛合金板材, 其化学成分见表 1.

表 1 Ti-6Al-4V 钛合金的化学成分(质量分数, %)  
Table 1 Chemical compositions of Ti-6Al-4V titanium alloy

| Al   | V    | Fe  | C     | N     | H       | O    | Ti |
|------|------|-----|-------|-------|---------|------|----|
| 6.06 | 3.92 | 0.3 | 0.013 | 0.014 | 0.001 4 | 0.15 | 余量 |

采用双 U 形坡口, 填充金属为直径 3 mm 的 TA2 焊丝, 其抗拉强度为 450 MPa; 焊接次序如图 2 所示, 焊接工艺参数如表 2 所示.

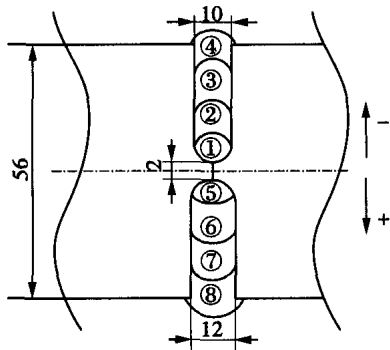


图 2 焊接次序示意图(mm)  
Fig. 2 Welding sequence diagram

表 2 焊接工艺参数  
Table 2 Welding parameters

| 焊道序号 | 焊接电流<br>$I/A$ | 电弧电压<br>$U/V$ | 送丝速度<br>$v_s/(m \cdot h^{-1})$ | 焊接速度<br>$v_w/(m \cdot h^{-1})$ |
|------|---------------|---------------|--------------------------------|--------------------------------|
| ①    | 440           | 12            | 65                             | 8                              |
| ②    | 440           | 12            | 70                             | 8                              |
| ③    | 450           | 12            | 77                             | 8                              |
| ④    | 450           | 13            | 77                             | 8                              |
| ⑤    | 440           | 12            | 75                             | 8                              |
| ⑥    | 450           | 12            | 75                             | 8                              |
| ⑦    | 450           | 12            | 78                             | 8                              |
| ⑧    | 450           | 13            | 78                             | 8                              |

焊后垂直焊缝方向不同深度位置截取试样. 在 WAW 1000 万能试验机上进行了拉伸试验, 并且采用 JBW300b 冲击试验机对其进行了冲击试验, 对不同厚度上的接头进行性能分析; 采用 HVS1000 型显微硬度计对接头横截面水平方向上 0,  $\pm 15$ ,  $\pm 26$  mm 上的硬度分布进行测量.

2 接头力学性能测试结果

2.1 拉伸性能

母材的拉伸性能为抗拉强度  $R_m = 850$  MPa, 断后伸长率  $A = 9\%$ . 图 3 为试样沿厚度方向的拉伸试验结果, 根据抗拉强度级别将其划分为 5 个区域.

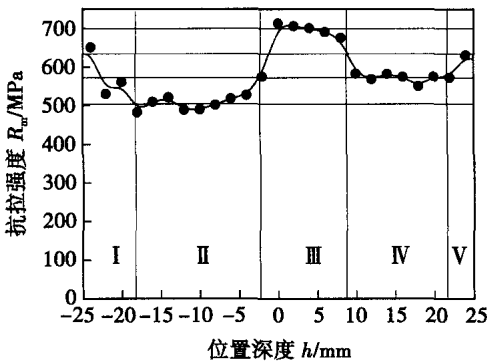


图 3 不同厚度被焊材料抗拉强度  
Fig. 3 Tensile strength of different depth layers

由图 3 可知, 啮合强化效应使得焊缝强度高于焊丝, 断口均在熔合线附近. 接头组织由原始等轴组织和马氏体  $\alpha'$  相针状组织组成, 彼此交错发生啮合, 焊缝的力学性能得到提高<sup>[7]</sup>. 越靠近焊缝中心马氏体越粗大, 啮合效果越弱.

强度沿厚度方向分为 4 个级别. I, V 为表层厚度层, 强度约为 630 MPa; II 区域对应厚度层强度达 520 MPa; III 区域对应厚度层强度达 700 MPa, 其中最高达 712 MPa; IV 区域对应厚度层强度达 580 MPa; 自由表层焊接应力几乎为 0, 强度最高; 后焊侧的中心线附近, 横向拉应力较小甚至为压应力, 诱导  $\beta$  相向针状马氏体  $\alpha'$  相转变, 强度值较高. 先焊的  $-18 \sim -4$  mm 厚度层内累积了很大的横向拉伸内应力, 大量  $\beta$  相残余加之后续的焊接热输入的影响降低了材料的强度<sup>[8]</sup>, 所以先焊侧材料的抗拉强度比后焊侧材料的抗拉强度普遍高.

由图 4 可知,  $-2 \sim 8$  mm 厚度层在裂纹的起裂区比较平坦, 为脆性的解理断裂, 而扩展区全部呈韧窝形貌, 对裂纹的扩展有较大的阻力, 故表现出较大的抗拉强度;  $10 \sim 22$  mm 厚度层断口整体比较平坦(图 4c), 为脆性穿晶断裂. 虽然整个断口大部分呈韧窝形貌, 但有明显的撕裂棱存在(图 4d).

2.2 冲击性能

沿厚度方向进行 U 形缺口冲击试验, 结果如图 5 所示. 图 6 为母材及不同厚度上焊缝冲击试样断裂断口的 SEM 照片. 母材的冲击韧度约为 1 350

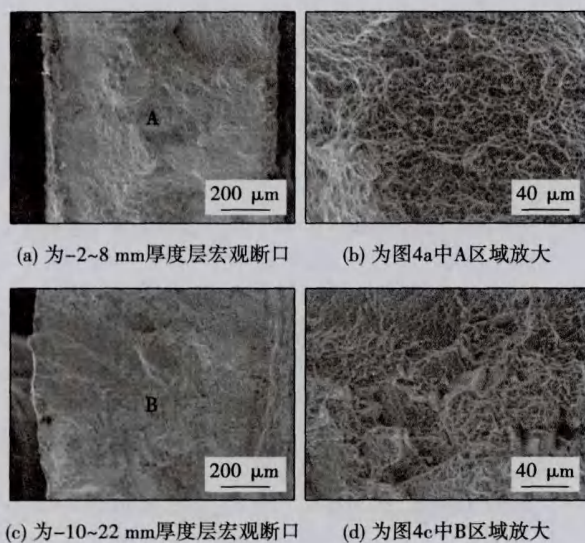


图4 试样拉伸断口形貌

Fig. 4 Fracture morphology of tensile samples

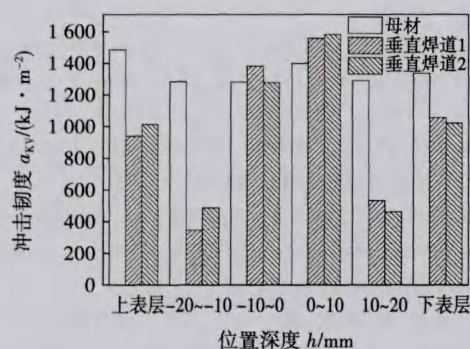


图5 沿厚度方向上母材及焊缝冲击韧度值

Fig. 5 Impact toughness value along depth direction

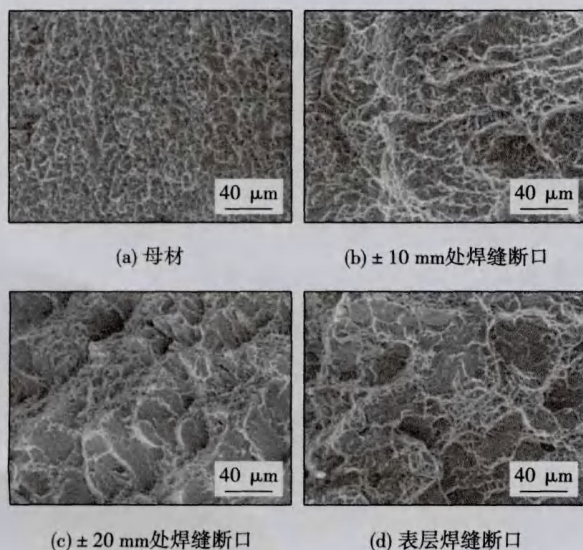


图6 冲击试样断裂断口的 SEM 形貌

Fig. 6 SEM fracture pictures of impact specimen

$\text{kJ/m}^2$ ,  $-10 \sim 10 \text{ mm}$  厚度层的焊缝冲击韧度值普遍比母材要高,  $-20 \sim -10 \text{ mm}$  和  $10 \sim 20 \text{ mm}$  厚度层的焊缝冲击韧度值约为母材的 40%, 表层焊缝冲击韧度值约为母材的 75%。

缺口在焊缝中, 焊缝中心区域为原始等轴晶界, 内部及晶间为马氏体组织, 同样变形量下, 变形会分散在更多的针状晶粒内部进行, 晶粒内部和晶界附近的应变度相差较小, 变形较均匀, 引起的应力集中也较小。此外晶界的曲折性也有利于阻碍裂纹的传播, 从而在断裂过程中可以吸收较多的能量, 表现出较高的韧性<sup>[9]</sup>。

在中心线附近的压应力及压缩塑性变形使得焊缝组织在焊接变形和焊接热处理共同作用下生成弥散分布的细小马氏体组织, 提高焊缝冲击断裂过程的阻力, 焊缝冲击韧度增加<sup>[10]</sup>。而在表层与中心线之间的组织介于以上二者之间, 性能自然也处于二者之间。

母材的冲击断口平整, 有明显的宏观塑性变形, 断口外貌呈杯锥状, 微观断口形貌如图 6a 所示, 大部分呈韧窝形貌, 有极少量的撕裂棱存在。  $-10 \sim 10 \text{ mm}$  厚度层及表层焊缝断口微观形貌如图 6b, 6d 所示, 其为准解理断裂的断裂性质, 断口中存在部分的撕裂棱及韧窝形貌。图 6b 与 6d 相比较而言, 图 6b 中的韧窝显然要比图 6d 中的明显, 而图 6d 中的解理台阶也比较凸出。二者的冲击韧度要比母材低很多, 而且表层的冲击韧度更差。而  $-20 \sim -10 \text{ mm}$  和  $10 \sim 20 \text{ mm}$  厚度层焊缝断口微观形貌如图 6c 所示, 其为脆性的解理断裂形貌, 该区域呈现出河流花样, 解理台阶较为明显<sup>[11]</sup>。多层单道焊的焊接热循环及焊接热量散失慢导致  $-20 \sim -10 \text{ mm}$  和  $10 \sim 20 \text{ mm}$  厚度层的马氏体组织粗大、脆性大, 并且生长方向趋于一致, 这在很大程度上降低了该厚度层上焊缝的冲击韧度。

### 2.3 显微硬度

对接头横截面不同位置深度水平方向的硬度分布进行了显微硬度测试如图 7 所示。焊后急冷导致焊缝中产生篮网状分布的针状  $\alpha'$  相使得焊缝硬度高于填充金属。

在不同厚度层上, 硬度的分布具有相同的趋势。焊缝区硬度最低, 熔合区及热影响区的硬度最高, 从热影响区到母材硬度逐渐降低, 因为热影响区产生了大量篮网状分布的针状  $\alpha'$  相, 只是热影响区是基于母材而生成的马氏体组织, 而焊缝中心是基于填充金属及部分熔化的母材而产生的马氏体组织, 所以热影响区的硬度比母材、焊缝中心的要高。

由于所开坡口为 U 形坡口, 并且表层有盖面焊,

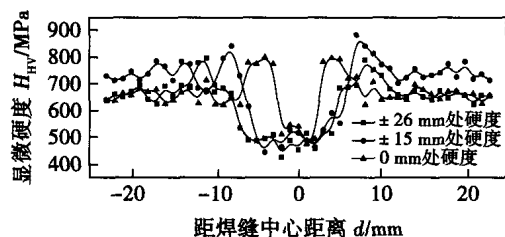


图7 垂直焊缝方向不同厚度层上横向硬度分布

Fig. 7 Hardness distribution perpendicular to welding direction in different depth layers

所以焊缝组织由表及里逐渐减少,硬度偏低区域逐渐变窄.距中心 $\pm 15$  mm处横向硬度峰值较高,这是因为该区域热量散失及扩散得慢,在热影响区产生马氏体组织生长方向趋于一致,粗大、脆性大,而且硬度高的情况.

### 3 结 论

(1) 厚板 Ti-6Al-4V 窄间隙焊接头在针状组织的啮合强化效果作用下,焊缝的强度均高于 TA2 的 450 MPa,其中最高值达 712 MPa.

(2) 厚板窄间隙焊过程中,由于焊缝横截面沿厚度方向上的内应力分布不一致,后焊侧的中心线附近呈现低拉应力或压应力状态,该区域的焊缝强度较高、韧性较好.处于拉应力区的近表层呈现出焊缝强度及韧性较差,表层区域的焊缝强度和韧性介于前二者之间.

(3) 焊缝热影响区存在大量蓝网状分布的针状 $\alpha'$ 相,使得不同位置水平方向的显微硬度均呈现熔合线附近的数值较高的情况.

#### 参考文献:

- [1] 尹丽香, 许鸿吉, 魏志宇, 等. TC4 钛合金电子束焊接接头高温性能与组织[J]. 焊接学报, 2007, 28(10): 49-52.  
Yin Lixiang, Xu Hongji, Wei Zhiyu, *et al.* Microstructures and high-temperature properties of TC4 titanium alloy joints welded by electron beam[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(10): 49-52.
- [2] 张田仓, 李 晶, 季亚娟, 等. TC4 钛合金线性摩擦焊接头组织和力学性能[J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 53-57.  
Zhang Tiancang, Li Jing, Ji Yajuan, *et al.* Structure and mechanical properties of TC4 linear friction welding joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(2): 53-57.
- [3] 赵 博, 范成磊, 杨春利, 等. 双丝窄间隙焊接工艺参数对焊缝成形的影响[J]. 焊接学报, 2008, 29(6): 81-84.  
Zhao Bo, Fan Chenglei, Yang Chunli, *et al.* Effect of double-wire narrow gap GMA welding parameters on weld appearance[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(6): 81-84.
- [4] 常云龙, 李敬雅, 杨殿臣, 等. 低频磁场对堆焊层组织及耐磨性的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(2): 37-40.  
Chang Yunlong, Li Jingya, Yang Dianchen, *et al.* Influence of low frequency magnetic field on microstructure and wear resistance of submerged arc welding cladding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(2): 37-40.
- [5] Belous V Y, Akhonorin S V. Influence of controlling magnetic field parameters on weld formation in narrow-gap argon-arc welding of titanium alloys[J]. Scientific and Technical, 2007(4): 2-5.
- [6] Jackson K A, Hunt J D, Uhlmann D R, *et al.* On the origin of the equiaxed zone in castings[J]. Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1966, 263: 149-158.
- [7] 郑喜刚, 赵 勇, 蒋成禹. 钛合金窄间隙 TIG 焊技术研究[J]. 钛工业进展, 2006, 23(5): 40-43.  
Zheng Xigang, Zhao Yong, Jiang Chengyu. Research on narrow-gap TIG welding technology of titanium alloys[J]. Titanium Industry Progress, 2006, 23(5): 40-43.
- [8] 田锡唐. 焊接结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [9] 尹丽香. TC4 钛合金电子束焊接接头组织形态与性能的研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2006.
- [10] 胡伟明, 李国林, 刘希林, 等. 钛合金厚板窄间隙 TIG 焊接接头的组织和力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(s1): 48-53.  
Hu Weiming, Li Guolin, Liu Xilin, *et al.* Microstructure and mechanical property of narrow-gap TIG welding joint of titanium alloys thick plate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(s1): 48-53.
- [11] 钟群鹏, 赵子华. 断口学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

**作者简介:** 孙清洁,男,1980 年出生,博士,讲师. 主要从事厚板窄间隙、复合电弧及高效化焊接方面的研究工作,发表论文 10 余篇.  
Email: sunqingjie@gmail.com