

14 mm 厚钛合金 K-TIG 焊接接头组织与性能研究*



王洪潇¹ 王春生¹ 张雪红¹ 张智强¹ 王善更¹ 董娟²

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司, 130062, 长春; 2. 吉林大学材料科学与工程学院, 130025, 长春)

摘要 [目的] 钛合金焊接常采用多层、多道电弧焊工艺, 其存在焊接缺陷多、焊后变形大等焊接质量问题, 因此有必要对厚钛合金 K-TIG(锁孔型钨极氩弧)焊接接头组织与性能进行研究。[方法] 针对轨道交通行业钛合金构件的使用需求, 分析了钛合金焊接常用的 TIG(钨极氩弧)多层多道焊的工艺问题, 并采用 K-TIG 焊接技术研究了 14 mm 厚 TC4 钛合金的单面焊双面成型工艺。基于不同工艺参数下的 K-TIG 焊接接头表面形貌、组织结构、力学性能和显微硬度分析, 对钛合金 K-TIG 焊接接头提供工艺指导。[结果及结论] K-TIG 焊接过程中的热输入对焊接质量有直接影响。焊接热量过小会导致焊缝未焊透形成隧道孔, 焊接热量过大会导致焊缝坍塌。当焊接电流为 550~600 A、焊接速度为 22~28 cm/min 时, 钛合金 K-TIG 焊的焊缝区微观组织主要由高温柱状 β 钛和网篮状 α' 针状马氏体组成。在最优工艺条件下, 网篮组织焊接接头的最大抗拉强度接近峰值, 约为 990.18 MPa, 其断裂位置出现在热影响区与母材交界处。当焊接热输入过高时, 网篮组织转变为魏氏组织, 进而导致焊接接头的力学性能有所下降。

关键词 轨道车辆; 钛合金构架; K-TIG(锁孔型钨极氩弧)焊接

中图分类号 U270.32

DOI: 10.16037/j.1007-869x.20253001

Study on the Microstructure and Properties of 14-mm Thick Titanium Alloy K-TIG Welded Joint

WANG Hongxiao¹, WANG Chunsheng¹, ZHANG Xuehong¹, ZHANG Zhiqiang¹, WANG Shangeng¹, DONG Juan²

(1. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Jilin University, 130025, Changchun, China)

Abstract [Objective] The multi-layer multi-pass arc wel-

ding process commonly employed for titanium alloys, is prone to welding quality issues such as numerous welding defects and significant post-weld deformation. Therefore, it is necessary to conduct research on the microstructure and properties of K-TIG (keyhole tungsten inert gas) welded joints in thick titanium alloys. [Method] In response to the application requirements of titanium alloy components in rail transit industry, the technological issues of the commonly used TIG (tungsten inert gas) multi-layer multi-pass welding for titanium alloys are analyzed, and K-TIG welding technology is adopted to study the single-sided welding with double-sided forming process for 14-mm thick TC4 titanium alloys. Based on an analysis of the surface morphology, microstructure, mechanical properties, and micro-hardness of K-TIG welded joints under different process parameters, technical guidance is provided for titanium alloy K-TIG welded joints. [Result & Conclusion] The heat input during the K-TIG welding process has a direct impact on the welding quality. Insufficient welding heat will lead to incomplete penetration of the weld seam, resulting in the formation of tunnel pores; excessive welding heat, on the other hand, will cause the weld seam to collapse. When the welding current is 550~600 A and the welding speed is 22~28 cm/min, the microstructure of the weld zone in the K-TIG welding of titanium alloy is mainly composed of high-temperature columnar β -titanium and basketweave α' acicular martensite. Under the optimal process conditions, the maximum tensile strength of the welded joint with a basketweave structure is close to the peak value, approximately 990.18 MPa, and its fracture location occurs at the interface between the heat-affected zone (HAZ) and the base metal. When the welding heat input is excessively high, the basketweave structure transforms into a Widmanstätten structure, which in turn leads to a decrease in the mecha-

* 吉林省科技厅项目(20230201157GX)

引用格式: 王洪潇, 王春生, 张雪红, 等. 14 mm 厚钛合金 K-TIG 焊接接头组织与性能研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(11): 54-61.

WANG Hongxiao, WANG Chunsheng, ZHANG Xuehong, et al. Study on the Microstructure and Properties of 14-mm Thick Titanium Alloy K-TIG Welded Joint[J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(11): 54-61.

nical properties of the welded joint.

Key words rail vehicle; titanium alloy frame; K-TIG welding

0 引言

随着我国轨道交通车辆制造水平的快速提升,新型结构材料及其焊接技术愈发重要。钛及其合金因其比强度高、耐蚀性好、生物相容性优异等优势被广泛应用于航空航天、海洋工程、石油化工和医疗器械等制造业大型结构件^[1-5]。钛合金焊接常采用多层、多道电弧焊工艺,存在焊接缺陷多、焊后变形大等焊接质量问题^[6-10]。

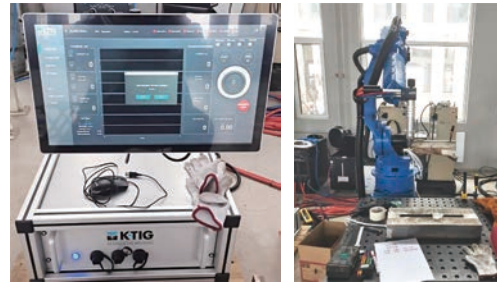
TIG(钨极氩弧)焊以其工艺稳定性好、焊缝品质好等特点,在石化工业、航空航天、轨道客车等领域应用广泛^[11-14]。但由于受到电极载流能力及焊接功率的制约,传统 TIG 焊接工艺始终存在熔深小、焊接速度慢、熔覆效率低等问题^[15-17]。K-TIG(锁孔型钨极氩弧)焊接技术是在传统的钨极氩弧焊接方法的基础上,采用大电流、高能量密度、高挺度和强贯穿能力的焊缝电弧,极大地提升了电弧的熔透能力,从而实现中厚板深熔焊的工艺目的^[18-21]。与常规焊接方法相比,K-TIG 焊接方法不仅焊接道少,而且具有单道焊缝熔深大、速度快、效率高、节约焊材等优点,在中厚板焊接中极具发展潜力。

本文研究提出采用 K-TIG 技术焊接厚为 14 mm 的 TC4 钛合金,整个过程采用两道焊接工艺。焊接完成后,分别对焊接接头的宏观形貌、微观组织、接头力学性能及硬度进行分析。本文研究可为钛合金自动深熔焊工艺工程化应用提供基础数据支撑。

1 试验材料及研究方法

试验选择 TC4 钛合金板作为母材,以 300 mm(长)×240 mm(宽)×14 mm(高)尺寸的板材为例进行工艺试验,制备无坡口对接接头。试验采用 K-TIG 1000 Evolve II 设备与 AR1440 型机器人设备进行焊接试验,K-TIG 焊接设备照片如图 1 所示。采用单一变量试验方法对焊接速度和焊接电流进行调整,其焊接参数如表 1 所示。

K-TIG 焊接属于高热输入焊接方法,而钛合金在高温条件下极易氧化,故焊接过程需使用 3 瓶纯



a) K-TIG 焊接参数监控台 b) K-TIG 焊接机械手

图 1 K-TIG 焊接设备照片

Fig. 1 Photos of K-TIG welding equipment

表 1 单一变量法焊接参数

Tab. 1 Welding parameters using the single-variable method

组号	焊接速度/(cm/min)	焊接电流/A
1	22	600
2	19	600
3	25	600
4	28	600
5	22	500
6	22	550
7	22	650

氩气作为保护气体,分别用于焊枪气体保护、焊缝正面气体保护和焊缝背面气体保护。保护气体输出装置照片如图 2 所示。

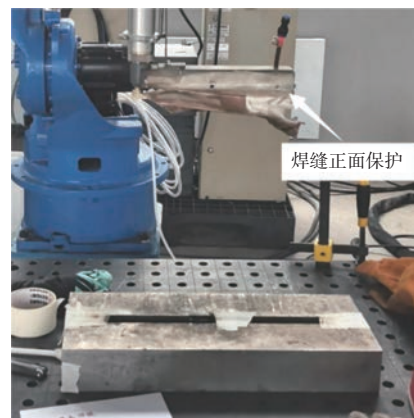


图 2 保护气体输出装置照片

Fig. 2 Photo of the shielding gas output device

焊缝分 2 次焊接。第 1 道焊缝使用锁孔大电流进行焊接,脉冲频率为 2.5 MHz,焊接电流及速度见表 1,能够实现单面焊双面成形。第 2 道焊缝采用脉冲小电流焊接进行焊缝盖面重熔,焊接电压为 15 V,脉冲频率为 2.5 MHz,焊接电流峰值为

300 A, 占空比为 30%, 焊接速度为 8 cm/min。

2 试验结果分析

2.1 焊缝宏观形貌分析

2.1.1 焊接电流影响

不同焊接电流条件下的焊缝表面形貌如图 3 所示。当焊接电流为 500 A 时, 焊缝起弧处形成稳定的熔池, 进而使得热输入较多而导致焊缝熔穿。然而, 由于其热输入过小, 所熔化的金属太少, 且后续热输入已经不能满足板材的持续焊穿条件, 最终导致焊缝背面不融合。随着焊接电流的增大, 焊缝开始逐渐均匀成形, 熔池中的金属熔化量不断增加。由于小孔效应的动态平衡效应, 焊缝正面两侧出现了咬边缺陷。当电流增大至 650 A 时, 由于热输入过大, 导致焊缝表面下塌严重。

不同焊接电流条件下的焊缝宏观形貌如图 4 所示。当焊接电流为 500 A 时, 观察到焊缝中存在气孔, 这是由于焊接电流较小, 电弧穿透能力不足, 而导致熔池中的气体无法及时从小孔中逸出。随着焊接电流的增大, 焊缝形状逐渐获得改

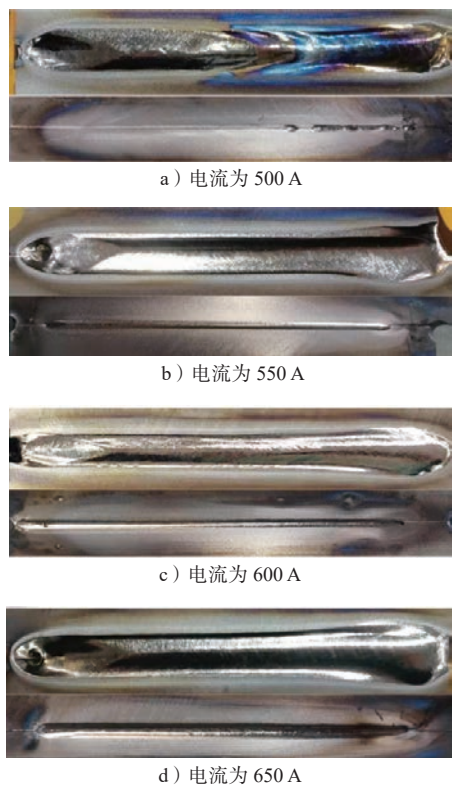


图 3 不同焊接电流条件下的焊缝表面形貌

Fig. 3 Weld surface morphology under different welding current conditions

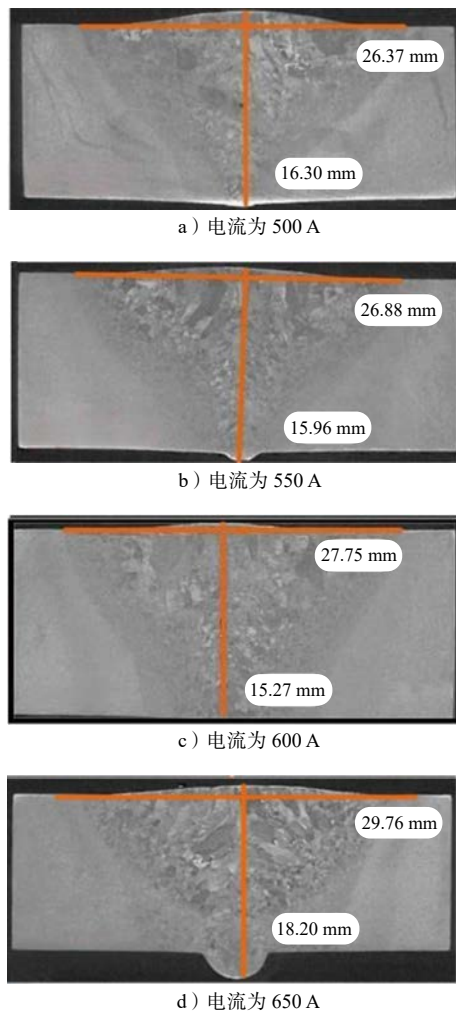


图 4 不同焊接电流条件下焊缝宏观形貌

Fig. 4 Macroscopic morphology of welds under different welding current conditions

善, 且其背面余高不断增大。当焊接电流增大至 650 A 时, 焊缝出现了明显的塌陷现象。同时, 从焊缝截面尺寸可以看出, 当焊接电流过低时, 焊缝未能完全焊透; 而当焊接电流过大时, 焊趾过大, 进而会影响焊接质量。

2.1.2 焊接速度影响

不同焊接速度下的焊缝宏观形貌如图 5 所示。当焊接速度为 19 cm/min 时, 观察到焊缝中存在气孔, 且焊缝出现严重塌陷, 焊缝表面存在咬边现象。随着焊接速度的增加, 焊缝成形良好, 焊缝表面余高增加而熔深有所减小。从焊缝截面尺寸可以看出, 焊接速度过低会导致焊缝熔深较大而熔宽较小, 同时反映出电弧的穿透能力不足。由于熔池中的气体不能及时从锁孔中逸出, 更容易形成气孔缺陷。

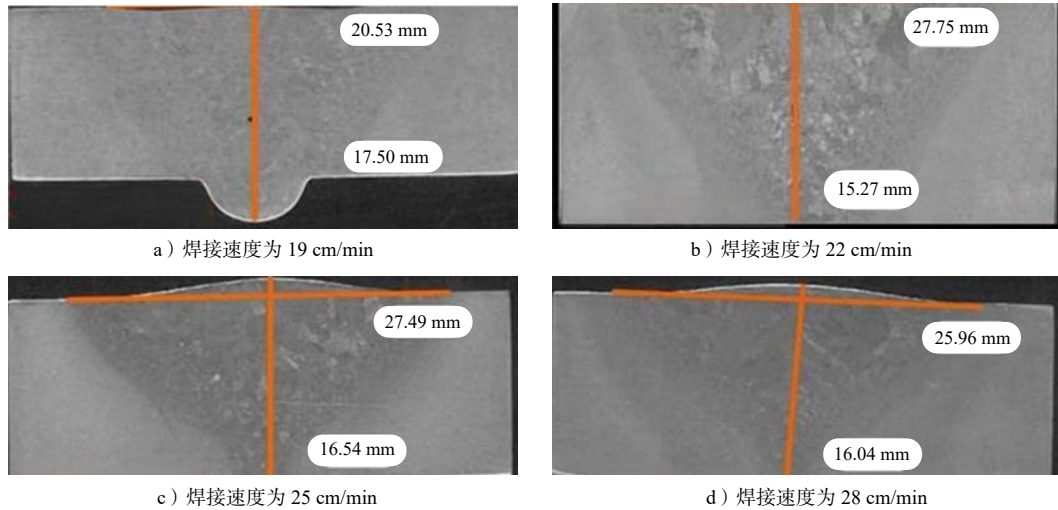


图 5 不同焊接速度下焊缝宏观形貌

Fig. 5 Macroscopic morphology of welds under different welding speeds

2.2 焊缝微观形貌分析

不同焊接电流下的焊缝微观形貌如图 6 所

示。当焊接电流较小时,高温 β 柱状晶的晶界非常明显,且均为大角度晶界。由于晶界处的原子排



图 6 不同焊接电流下焊缝微观形貌

Fig. 6 Microscopic morphology of welds under different welding currents

列不规则,晶界的强度和硬度通常高于晶内区域,因此这些部位容易形成缺陷。随着焊接电流的增大,可以观察到少许网篮状结构。当金属加热至较高温度并以比魏氏组织稍快的速度冷却时,凝固过程中 α' 针状马氏体未能充分长大,其网篮组织长度小于魏氏组织。若焊接电流过大,则会产生过多的魏氏组织,这将对焊缝的力学性能产生较大的影响。综上所述,焊接电流的最佳范围为550~600 A。

不同焊接速度下的焊缝微观形貌如图7所示。由图7可知:在相同区域内,图7 a)中的 α' 针状马氏体组织相比图7 b)和7 c)中更紧密细短。这是由于当焊接热输入较大时,熔池的冷却速率较快,焊缝中由 β 钛析出的 α' 钛组织生长时间较短,则焊缝中新形成的 α' 针状马氏体尺寸较小,排列更加紧密。此外,在图7 d)中可以明显看到右上方存在魏氏组织。在高热输入的焊接方法下,

在焊缝中心区域往往会或多或少地形成魏氏组织。魏氏组织在高温环境下表现出较优的抗蠕变性能,但其韧性相对较差。因此,在制造过程中必须严格控制焊接工艺条件,以防大量形成魏氏组织,从而确保焊接接头具备良好的力学性能和韧性。

2.3 力学性能分析

不同焊接参数下,焊接接头的静拉测试结果如图8所示。当焊接电流为550~600 A时,拉伸试件断裂位置均出现在热影响区与母材交界处,这表明当焊接电流过大或过小时,均会显著降低试样的抗拉强度。当焊接电流为600 A、焊接速度为22 cm/min时,拉伸试样的抗拉强度达到最大值,约为990.18 MPa。

2.4 硬度分析

不同焊接电流和焊接速度下,K-TIG焊接接头的硬度分布如图9和图10所示。K-TIG焊接接头

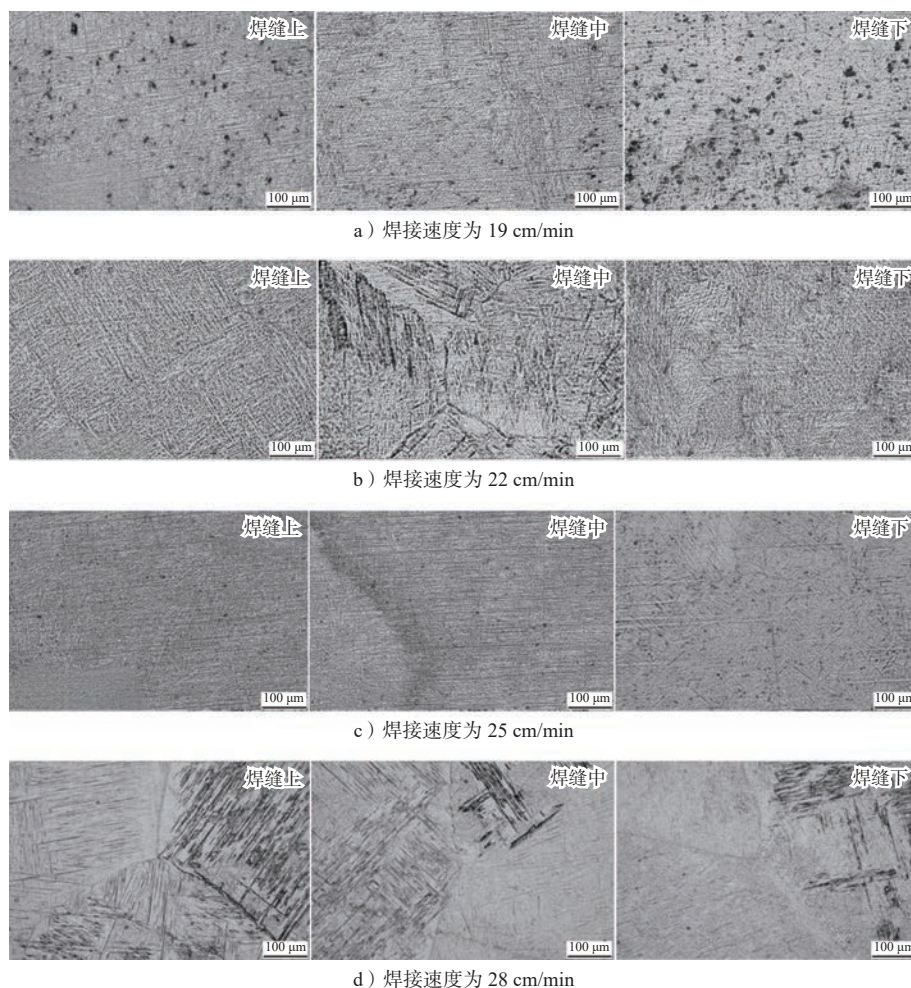


图7 不同焊接速度下焊缝微观形貌

Fig. 7 Microscopic morphology of welds under different welding speeds

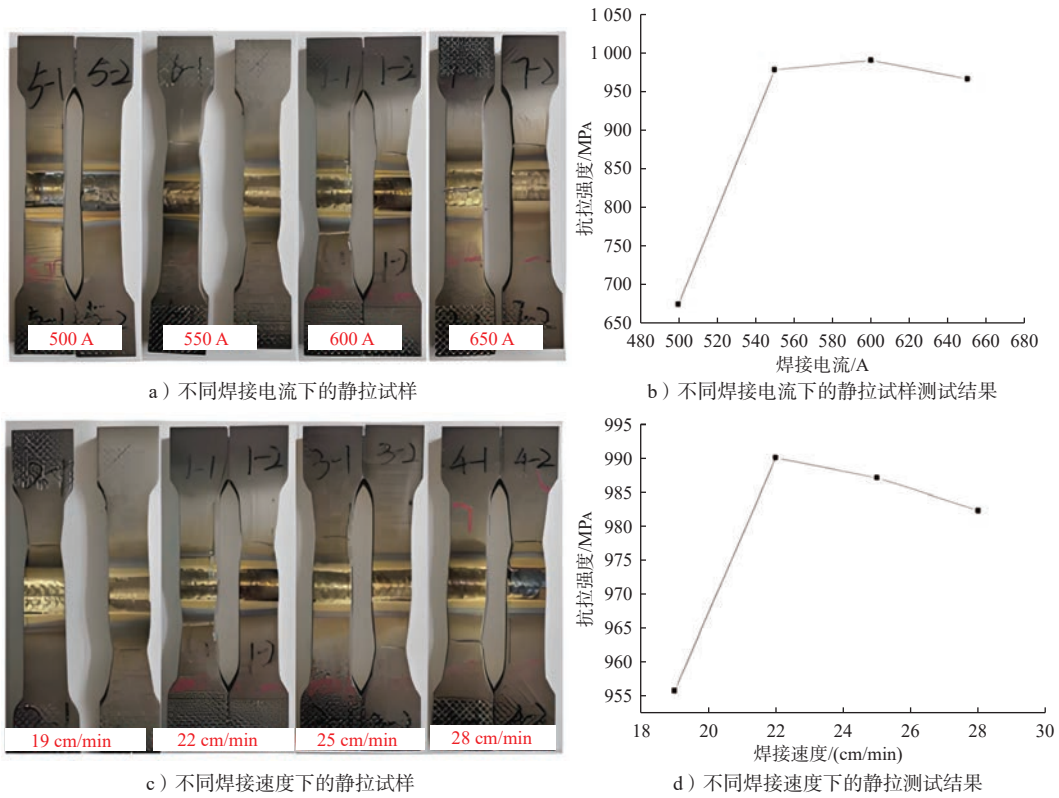


图 8 不同焊接参数下焊接接头的静拉测试结果

Fig. 8 Static tensile test results of welded joints under different welding parameters

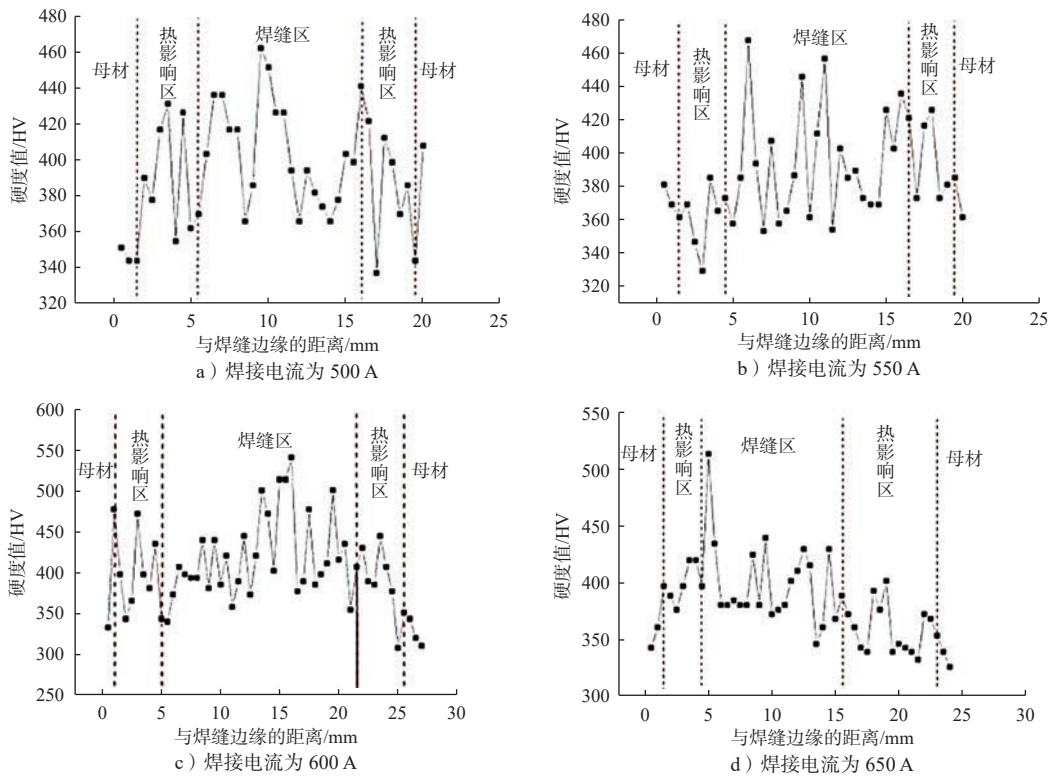


图 9 焊接电流对 K-TIG 焊接接头硬度分布影响

Fig. 9 Effect of welding current on the hardness distribution of K-TIG welded joints

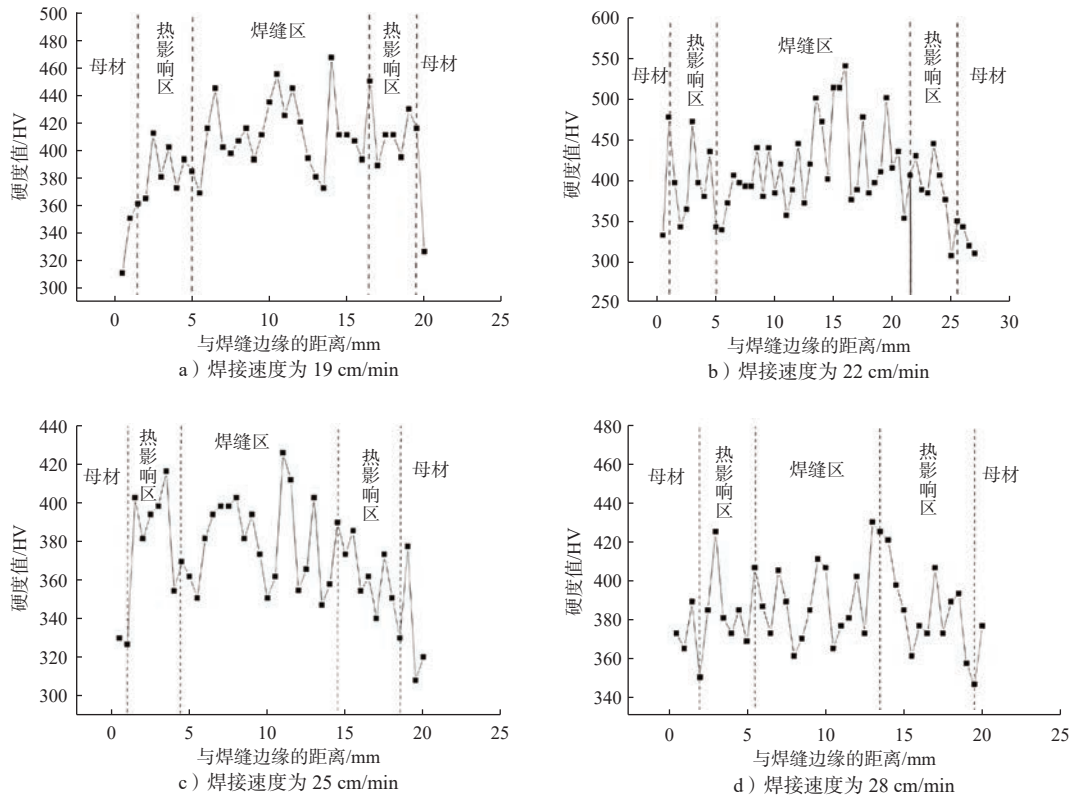


图 10 焊接速度对 K-TIG 焊接接头硬度分布影响

Fig. 10 Effect of welding speed on the hardness distribution of K-TIG welded joints

通常呈现出焊缝区硬度高、母材硬度低的特点。由图 9 和图 10 可以看出: 整体接头的硬度分布呈马鞍状, 具体表现为焊缝区硬度 > 热影响区硬度 > 母材硬度; 随着热输入的增加, 焊缝硬度呈递增趋势; 当焊接电流为 600 A、焊接速度为 22 cm/min 时, 焊缝硬度达到峰值, 为 568.9 HV。

3 结论

1) 随着焊接速度的提高, 焊缝熔深逐渐减小, 焊缝熔宽与余高近似呈反比关系; 随着焊接电流的增大, 焊缝的表面熔宽大致呈上升趋势, 熔深在试样熔透后即趋于稳定。

2) TC4 钛合金焊接接头的焊缝区组织主要由高温柱状 β 钛和网篮状 α' 针状马氏体组成, 网篮组织具有良好的综合性能。当焊接热输入过大时, 会导致网篮状组织转变为魏氏组织。

3) 对厚为 14 mm 的 TC4 钛合金采用 K-TIG 焊接方法时, 焊接热量过小会导致焊缝未焊透, 进而形成隧道孔; 焊接热量过大, 会导致焊缝坍塌, 故焊接电流应控制在 550~600 A, 焊接速度应控制在 22~28 cm/min。

参考文献

- [1] 黄旭, 朱知寿, 王红红. 先进航空钛合金材料与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
HUANG Xu, ZHU Zhishou, WANG Honghong. Advanced aeronautical titanium alloys and applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [2] 安仲生, 陈岩, 赵巍. 2022 年中国钛工业发展报告 [J]. 钛工业进展, 2023, 40(2): 40.
AN Zhongsheng, CHEN Yan, ZHAO Wei. Report on China titanium industry progress in 2022[J]. Titanium Industry Progress, 2023, 40(2): 40.
- [3] 赵永庆, 葛鹏. 我国自主研发钛合金现状与进展 [J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 51.
ZHAO Yongqing, GE Peng. Current situation and development of new titanium alloys invented in China[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 51.
- [4] LI B, ZHOU H, LIU J, et al. Multiaxial fatigue damage and reliability assessment of aero-engine compressor blades made of TC4 titanium alloy[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 119: 107.
- [5] 刘晓, 张克木, 罗金, 等. 轨道交通车辆用 TC4 钛合金的电偶腐蚀性能研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(4): 9.
LIU Xiao, ZHANG Kemu, LUO Jin, et al. Galvanic corrosion properties of TC4 titanium alloy in rail transit vehicle[J]. Urban

- Mass Transit, 2023, 26(4): 9.
- [6] ZHAO Z, JI H, ZHONG Y, et al. Mechanical properties and fracture behavior of a TC4 titanium alloy sheet[J]. *Materials*, 2022, 15(23): 8589.
- [7] 习文顺, 任鑫焱, 张金元, 等. 高速列车 TC4 钛合金焊接构架强度及寿命评估 [J]. *焊接学报*, 2022, 43(5): 29.
XI Wenshun, REN Xinyan, ZHANG Jinyuan, et al. Strength and life assessment of TC4 titanium alloy welded frame for high-speed railway vehicles[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2022, 43(5): 29.
- [8] LIN H, JIN G, ZHAN Q, et al. Correction to: mechanical properties and constitutive model of TC4 titanium alloy at cryogenic[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, 33(24): 13744.
- [9] NIE X, HE W, CAO Z, et al. Experimental study and fatigue life prediction on high cycle fatigue performance of laser-peened TC4 titanium alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 822: 141658.
- [10] 刘甲, 雷小伟, 余巍, 等. TC4 钛合金中厚板激光焊接接头组织及性能研究 [J]. *热加工工艺*, 2023, 52(11): 19.
LIU Jia, LEI Xiaowei, YU Wei, et al. Study on microstructure and properties of laser welded joint of TC4 titanium alloy medium plate[J]. *Hot Working Technology*, 2023, 52(11): 19.
- [11] 孙文君, 王善林, 陈玉华, 等. 钛合金先进焊接技术研究现状 [J]. *航空制造技术*, 2019, 62(18): 63.
SUN Wenjun, WANG Shanlin, CHEN Yuhua, et al. Development of advanced welding technologies for titanium alloys[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(18): 63.
- [12] 张勇, 唐家成, 葛泽龙, 等. 高铝粉煤灰活性剂影响 TIG 电弧行为研究 [J]. *材料科学与工艺*, 2020, 28(5): 90.
ZHANG Yong, TANG Jiacheng, GE Zelong, et al. The effect of an active flux of high alumina fly ash on arc dynamic behavior in tungsten argon welding[J]. *Materials Science and Technology*, 2020, 28(5): 90.
- [13] 苏允海, 艾星宇, 宋碧倩. AZ91 磁控 A-TIG 焊电弧形态及焊接接头组织性能 [J]. *沈阳工业大学学报*, 2018, 40(5): 505.
SU Yunhai, AI Xingyu, SONG Biqian. Arc shape of magnetic field controlled A-TIG welding for AZ91 alloy and microstructure and properties of welded joint[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2018, 40(5): 505.
- [14] 龚玉兵, 王善林, 李娟, 等. TC4 钛合金厚板电子束焊接接头的组织与性能 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2017, 37(3): 324.
GONG Yubing, WANG Shanlin, LI Juan, et al. Microstructure and properties of the joints in thick TC4 titanium alloy plate by the vacuum electron beam[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2017, 37(3): 324.
- [15] 王鹏, 马蕊, 魏永胜, 等. TC4 钛合金不同焊接方法焊接性及接头性能分析 [J]. *焊管*, 2022, 45(8): 17.
WANG Peng, MA Rui, WEI Yongsheng, et al. Analysis of weldability and joint properties of TC4 titanium alloy with different welding methods[J]. *Welded Pipe and Tube*, 2022, 45(8): 17.
- [16] 魏玉顺, 马青军, 武鹏博, 等. TC4 钛合金激光焊接技术研究进展 [J]. *电焊机*, 2023, 53(8): 55.
WEI Yushun, MA Qingjun, WU Pengbo, et al. Research progress in laser welding technology of TC4 titanium alloy[J]. *Electric Welding Machine*, 2023, 53(8): 55.
- [17] TATHGIR S, RATHOD D W, BATISH A. Process enhancement using hydrogen-induced shielding: H₂-induced A-TIG welding process[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2020, 35(10): 1084.
- [18] 王洪潇, 王春生, 何广忠, 等. 不锈钢管自动非熔化极惰性气体钨极保护焊环焊工艺研究 [J]. *城市轨道交通研究*, 2019, 22(2): 26.
WANG Hongxiao, WANG Chunsheng, HE Guangzhong, et al. Study on automatic TIG circle welding technology for stainless steel pipe[J]. *Urban Mass Transit*, 2019, 22(2): 26.
- [19] CUI S W, SHI Y H, ZHANG C S. Microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy K-TIG welded joints[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2021, 31(2): 416.
- [20] 夏良俊, 秦优琼, 唐贤锋. 钎焊工艺参数对 TC4 钛合金钎焊接头组织及性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2019, 48(15): 171.
XIA Liangjun, QIN Youqiong, TANG Xianfeng. Effects of brazing parameters on microstructures and mechanical properties of TC4 brazed joints[J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48(15): 171.
- [21] 吴叶军, 吕涛, 马国新. TC4 钛合金等离子弧焊接头组织与性能分析 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2020, 43(6): 60.
WU Yejun, LÜ Tao, MA Guoxin. Microstructure and properties of plasma arc welded joint of TC4 titanium alloy[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2020, 43(6): 60.
- 收稿日期: 2025-01-07 修回日期: 2025-03-17 出版日期: 2025-11-10
Received: 2025-01-07 Revised: 2025-03-17 Published: 2025-11-10
- 第一作者: 王洪潇, 正高级工程师, wanghongxiao.ck@crrecg.com
通信作者: 董娟, 高级工程师, dongjuan@jlu.edu.cn
- ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license