

焊接电流对 TC4 钛合金窄间隙 TIG 焊缝成形及组织的影响

李双^{1,2}, 李锋¹, 徐望辉², 张宇鹏²

(1. 沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 广东省焊接技术研究所(广东省中乌研究院), 广东 广州 510651)

摘要:对 30 mm 厚的 TC4 钛合金板材进行窄间隙 TIG 单层填丝焊试验,研究了焊接电流对焊缝成形的影响,分析了焊接接头的显微组织和显微硬度。试验结果表明:随着焊接电流的增加,焊缝熔深、熔宽增加,焊缝表面下凹程度增大,但是焊缝熔宽增加幅度较小;焊缝区晶粒发生严重粗化,主要为粗大的柱状晶,其显微组织均为针状马氏体 α' 组织;靠近焊缝区侧的热影响区晶粒比靠近母材侧的粗化程度大。焊接接头显微硬度分布相似,焊缝区硬度稍高于母材硬度,并未存在明显的软化区;峰值硬度出现在热影响区,随着焊接电流增加,热影响区峰值硬度降低。

关键词:TC4 钛合金;窄间隙 TIG 焊;马氏体;显微硬度

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2017.23.009

中图分类号:TG444⁺.74

文献标识码:A

文章编号:1001-3814(2017)23-0035-04

Effect of Welding Current on Weld Formation and Microstructure of TC4 Titanium Alloy Narrow Gap TIG Weld

LI Shuang^{1,2}, LI Feng¹, XU Wanghui², ZHANG Yupeng²

(1.School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2.Guangdong Welding Institute (China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding), Guangzhou 510651, China)

Abstract: The narrow gap TIG single layer filler wire welding experiments of 30 mm thick TC4 titanium alloy plate were carried out. The influence of welding current on the weld formation was studied, and the microstructure and microhardness of the welded joints were analyzed. The test results show that with the increase of welding current, the weld depth and weld width increase, and the concave degree of the weld surface increases, while the increase amplitude of weld width is small. The grains of weld zone seriously coarsen, and the grains are mainly coarse columnar crystal, the weld microstructure is acicular martensite α' structure. The coarsening degree of grain in heat affected zone near the weld zone is bigger than that of the grain near the base metal. The microhardness distribution of the welded joints is similar. The hardness of weld zone is slightly higher than that of the base metal, and no obvious softening zone exists. The peak hardness is in the heat affected zone. With the increase of welding current, the peak hardness of heat affected zone decreases.

Key words: TC4 titanium alloy; narrow gap TIG welding; martensite; microhardness

钛合金具有较好的耐腐蚀性、高的比强度、好的抗蠕变能力,同时密度小、膨胀系数低、焊接性良好,在航空航天、船舶、核电等诸多重要工业领域得到广泛的应用^[1]。随着现代工业及国防事业的发展,应用较多的是大型焊接结构^[2],尤其航空工业的发展对焊接结构件的性能提出了更高的要求,甚至要求焊接结构

件中焊接接头的显微组织。显微组织、焊接工艺与使用性能之间存在着密不可分的关系,三者之间关系的研究也正是材料科学与工程的核心内容。钛及钛合金最为常用的焊接方法是钨极氩弧焊(TIG),也是焊接质量较好的一种焊接方法^[3]。在焊接过程中,如果焊接工艺选择不当,就会出现焊接裂纹、氢脆^[4]、气孔等焊接缺陷,因此有必要对不同焊接工艺条件下的钛合金焊接接头的显微组织进行对比分析。本文主要针对焊接电流对焊缝成形及组织的影响进行了一系列试验,为航空航天等领域中具有特殊性能要求焊件的焊接提供一些焊接工艺选择的试验依据。

1 试验材料与方法

试验采用轧制态钛合金 TC4(Ti-6Al-4V)板材,属于双相组织合金,尺寸规格为 200 mm×150 mm×

收稿日期:2017-07-12

基金项目:广东省科技项目(2017A070701026);广东省科技计划项目(2016B070701025);广东省对外科技合作项目(2013B050800032);广东省科学院项目(2016GDASPT-0311);广东省省级科技计划项目(2015B050502008);广州市科技计划项目(201508030023)

作者简介:李双(1992-),女,辽宁锦州人,硕士研究生,主要从事窄间隙 TIG 焊接工艺研究;电话:13840106634;
E-mail:571397076@qq.com

30mm。将板材加工成如图1所示的坡口。焊丝为与母材同质的 TC4 钛合金, 直径为 1 mm。使用 Babcock-Hitachi 公司开发的 HST 全位置窄间隙 TIG 焊接设备进行自动化填充焊丝焊接, 钨极直径为 3.2mm, 直线行进方式设置为平直轨道焊接, 保护气为 99.99%高纯度的氩气。采用不同的焊接电流, 其他参数均相同, 进行窄间隙 TIG 单层填丝焊接试验。焊接工艺参数为焊接电压 11 V, 焊接速度 85 mm/min, 送丝速度 70 cm/min, 摇动速度 45 r/min, 焊接电流分别为 165、175、195、215 A。焊接前, 将待焊板材坡口两侧 30 mm 内进行必要的清理工作, 除去坡口两侧的氧化膜, 再用丙酮擦拭坡口内部及周围区域的油污、灰尘等。

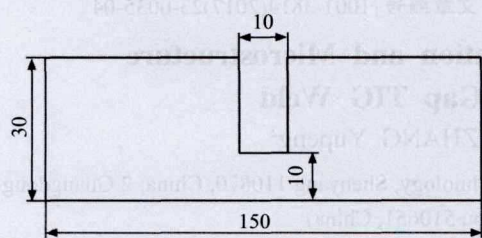


图1 窄间隙焊接坡口 (mm)
Fig.1 Narrow gap welding groove (mm)

利用线切割机从焊件切取金相试样。试样经打磨并抛光后, 使用配比为 $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=1:2:10$ 的腐蚀液进行腐蚀, 然后使用 Carl Zeiss-Axioplan Imager.M2m 型数字化金相显微镜观察窄间隙 TIG 焊接条件下钛合金焊接接头的显微组织, 并使用

HVS-1000 型数显显微硬度计对不同焊接电流的焊接接头进行硬度测量, 沿着横截面水平方向进行显微硬度测量, 测量点间距为 0.3 mm, 加载载荷为 1 kg, 加载时间为 10 s, 比较不同焊接工艺下焊接接头的显微硬度分布。

2 试验结果与讨论

2.1 焊接电流对焊缝成型的影响

焊接电流是影响焊接质量较为重要的一个工艺参数^[5]。随着焊接电流的增加, 焊接热输入增大, 坡口处获得的热量增多, 在摇动电弧的作用下, 电弧热量推动熔池向后运动, 在焊缝表面形成紧密排列的鱼鳞波纹, 如图2所示。当焊接电流为 165 A 时, 焊接热输入较小, 坡口侧壁未获得足够的能量, 使熔融焊丝与母材不能充分混合, 形成的焊缝出现侧壁未熔合现象, 如图2(a)所示。当焊接电流为 215 A 时, 焊接热输入较大, 电弧将较多的熔融焊丝推向坡口底部, 形成较大的凹形焊缝; 且焊缝处高温停留时间长, 熔池金属冷却速度较慢, 焊缝表面发生氧化呈金黄色, 如图2(c)、(d)所示。当焊接电流为 175 A 时, 焊缝鱼鳞纹均匀成形较好, 如图2(b)所示, 未出现侧壁未熔合、气孔、氧化等焊接缺陷。

图3为不同焊接电流下焊缝的截面形貌。从图可以看出, 随着焊接电流的不断增大, 焊缝表面的下凹程度增加, 焊缝区形成粗大的柱状晶, 清晰可见。这是因为在电弧左右摆动过程中, 使两侧壁部分母材熔化, 熔化金属在表面张力及电弧冲击力作用下,

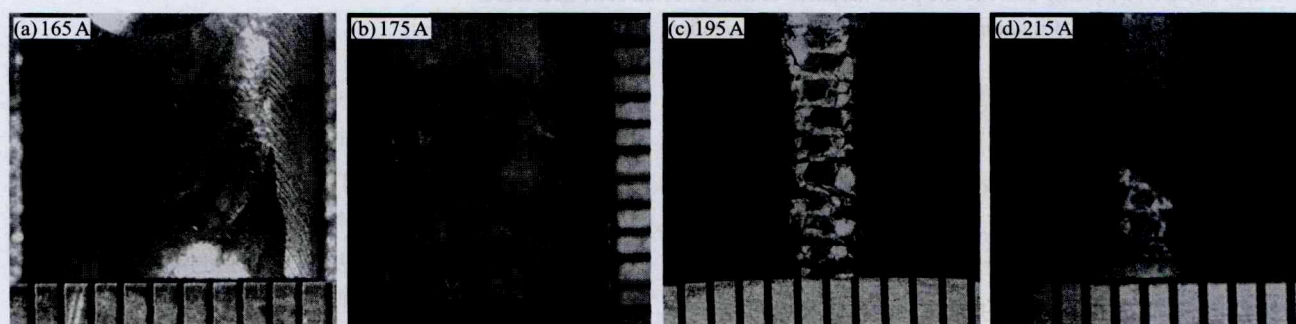


图2 不同焊接电流下焊缝的正面形貌
Fig.2 Positive appearances of welding seams under different welding currents

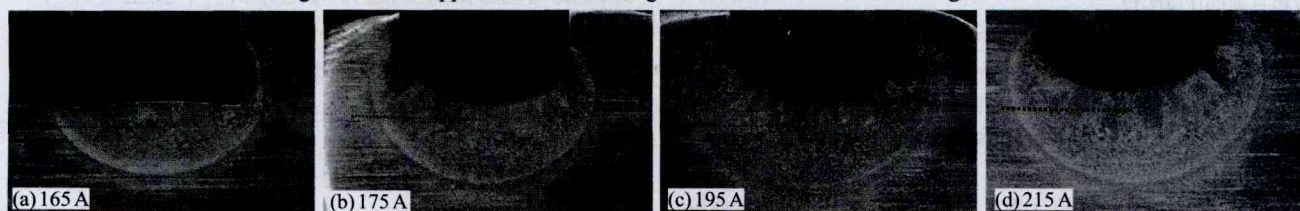


图3 不同焊接电流下焊缝的截面形貌
Fig.3 Sectional appearances of welding seams under different welding currents

熔融金属向两侧壁铺展^[6],造成了焊缝表面下凹成形。焊接电流增加,电弧弧柱直径增大,电弧潜入工件的深度增大,焊缝熔深、熔宽增加,熔宽增加幅度小。不同焊接电流的焊缝熔深、熔宽如图 4 所示。由于钛的导热系数小,高温停留时间长,焊缝区组织粗大生长。当焊接电流达到 215 A 时,在钨极尖端区产生的扇形电弧对窄间隙坡口传递较高的热量,增大了熔融金属的流动性,较多的热量推动熔池金属向两侧壁流动,侧壁熔合较好,但是焊缝区组织严重粗大,形成了粗大的柱状晶,如图 3(d)所示。

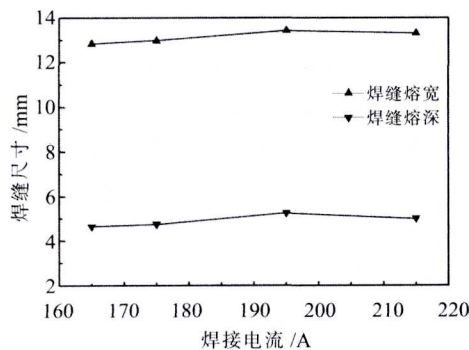


图 4 不同焊接电流的焊缝熔深、熔宽
Fig.4 Weld penetration and weld width with different welding currents

2.2 焊接接头的显微组织

如图 5 所示,钛合金母材的原始显微组织为片状 α 相和 β 相,以 α 相为基体, β 相分布在 α 相晶界处^[7]。由于母材为轧制态,晶粒沿着轧制方向整齐排列。

图 6 为不同焊接电流下焊缝区(WZ)的显微组

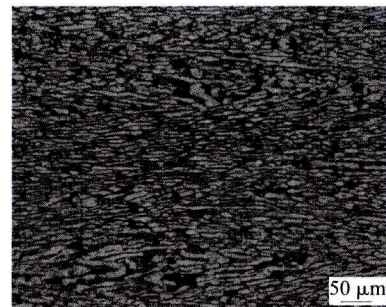


图 5 母材的显微组织
Fig.5 Microstructure of base metal

织。与母材显微组织相比,焊缝区显微组织有很大不同,焊缝区组织均为粗大的晶粒。随着焊接电流的增加,焊缝熔池金属获得更多的热量,因钛合金导热系数小,高温停留时间长,焊缝组织过热出现了明显粗化现象,晶粒严重粗大。从图 6 可以看出,不同焊接电流下焊缝区的显微组织均为针状马氏体 α' 相和由 β 相分开的 α 相板束组成的混合组织,其中初生 α 相板条相互平行,穿过分割 β 相晶粒^[8]。由于高温 β 相向 α' 相转变过程中, α' 首先在 β 相晶界上形核,并向晶内生长,形成片状 α' 组织,且呈一定位向排列,而原始 β 相晶界保留下来,由于焊缝金属冷却很快,片状 α' 又细又尖,呈针状 α' 马氏体形态。

图 7 为不同焊接电流下接头热影响区(HAZ)的显微组织。随着焊接电流的增加,热影响区组织发生粗化,其组织主要为受焊接热循环影响形成的大量扭曲变形的模糊片状 α 相和原始 β 相。处于近焊缝区的热影响区温度较高,晶粒长大粗化程度较高,热影响区的晶粒较母材区的粗大,近焊缝侧热影响区

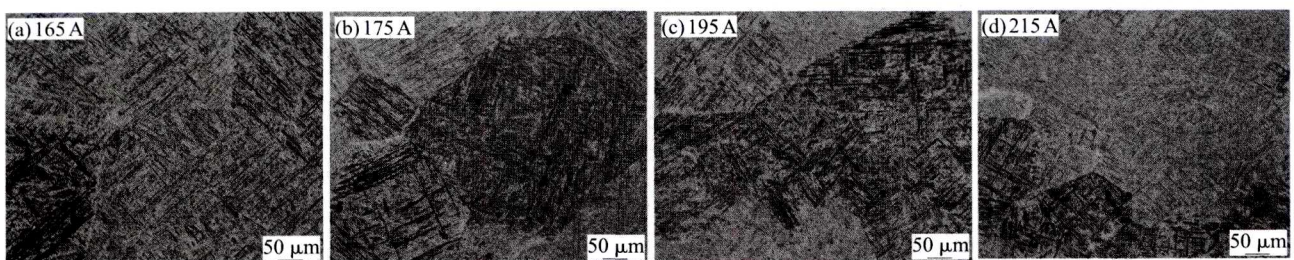


图 6 不同焊接电流下焊缝区的显微组织
Fig.6 Microstructure of weld zone under different welding currents

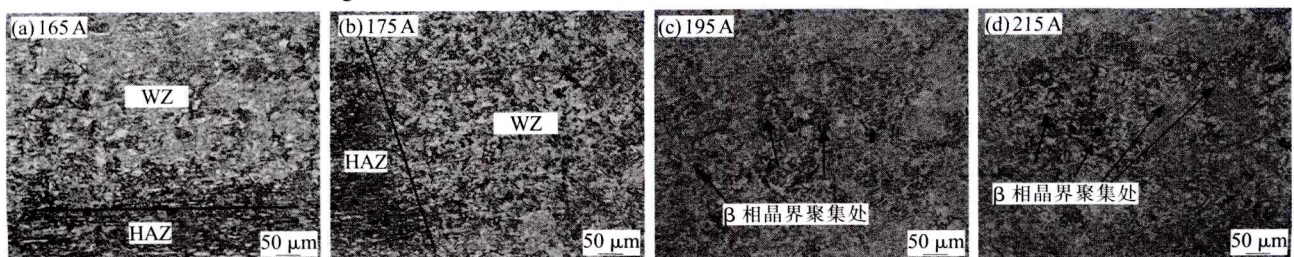


图 7 不同焊接电流下接头热影响区的显微组织
Fig.7 Microstructure of heat affected zone of welded joint under different welding currents

的晶粒比近母材侧的粗大,这是因为靠近母材一侧金属导热快,温度低,焊接后冷却速度较靠近焊缝区的金属快,组织长大倾向小,并且随着焊接电流的增加,热影响区组织中的 α 相明显增多, β 相减少。J W Elmer等人^[9]研究发现在近母材侧热影响区,温度没有达到 β 相转变温度,在该相变温度下发生淬火,使 β 相平衡分数不足1,残留下的 β 相分布少而集中。图7也说明了该现象。当焊接电流为175 A时,热影响区出现了较多排列紧密细小的等轴晶粒,并且均匀分布,使接头硬度得到提高。

2.3 不同焊接电流下的焊接接头显微硬度

沿着图3所示焊缝截面水平方向的虚线进行显微硬度测量,不同焊接电流下焊接接头的显微硬度分布如图8所示。可以看出,四种焊接电流下接头显微硬度分布曲线走向趋势相似,焊缝区的硬度值平均值达到350HV,稍高于母材(BM)的硬度。较高的显微硬度值与焊缝的组织是密不可分的,在这几种焊接电流下焊缝组织均是排列紧密的细针状马氏体 α' 相,因此硬度值较高。硬度峰值出现在靠近焊缝区的热影响区处,这是因为在不同的焊接热输入下,该区加热温度低于焊缝区,冷却速度比焊缝快,组织由大量扭曲变形的模糊片状 α 相和原始 β 相组成,其硬度高于焊缝区。当焊接电流为165 A时,热影响区的显微硬度最低,在该焊接工艺条件下,焊缝侧壁未能实现熔合,热影响区很窄,因此硬度值较低,和母材的硬度相差不多。当焊接电流达到175 A时,接头热影响区的显微硬度达到峰值410HV,这是由于在该焊接热输入下热影响区组织由较多排列紧密细

小的等轴晶晶粒组成,显微硬度得到较大提高。随着焊接电流的增加,焊接接头热影响区峰值硬度降低,因为焊接热输入增加,热量增加,焊缝高温停留时间长,热影响区晶粒粗大生长,硬度降低,性能较差。在整个焊接接头的显微硬度分布中,并未出现明显的软化区,显微硬度值均在300HV以上。

3 结论

(1) 在该窄间隙TIG焊接试验中,焊缝表面成形较好,随着焊接电流的增加,焊缝熔深、熔宽增加,焊缝区为粗大的柱状晶晶粒。

(2) 随着焊接电流的增加,TC4钛合金焊缝区及热影响区晶粒粗化,焊缝区显微组织主要为针状马氏体 α' 相,互相平行分布穿割在 β 相晶粒内,近焊缝区的热影响区晶粒较近母材区粗大,少量残留的 β 相分布密集。当焊接电流为175 A时,热影响区的显微硬度值最高,性能较好。

(3) 接头的硬度峰值出现在热影响区,焊缝区硬度稍高于母材硬度,并未存在明显的软化区;随着焊接电流增加,热影响区峰值硬度降低。

参考文献:

- [1] 李明利,舒澧,冯毅江,等. 我国钛及钛合金板带材应用现状分析[J]. 钛工业进展,2011,28(6):14-17.
- [2] Boyer R, Welsch G, Collings E W. Materials Properties Handbook: Titanium Alloys[M]. ASM International, 1994.
- [3] 魏晓棠. 钛合金的钨极氩弧焊[J]. 钛工业进展,2008,25(6):38-41.
- [4] 王者昌. 钛及钛合金焊接时氢的行为[J]. 稀有金属材料与工程,1986(5):11-15.
- [5] 文申柳,余滕义,王非森,等. 焊接电流对镀锌钢板点焊接头质量的影响[J]. 热加工工艺,2009,38(11):134-135.
- [6] 徐望辉,范成磊,林三宝,等. 摆动电弧窄间隙焊接工艺参数对焊缝成形的影响[J]. 焊接,2015(2):13-17.
- [7] 杨攀,徐洁洁,杨武雄,等. TC4钛合金光纤激光焊接工艺研究[J]. 应用激光,2011,31(6):456-459.
- [8] 吴巍,程广福,高洪明,等. TC4合金TIG焊接接头组织转变与力学性能分析[J]. 焊接学报,2009,30(7):81-84.
- [9] Elmer J W, Palmer T A, Babu S S, et al. Phase transformation dynamics during welding of Ti-6Al-4V [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 95(12): 8327-8339. 

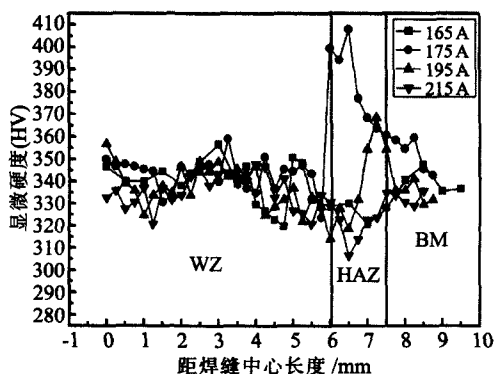


图8 不同焊接电流下焊接接头的显微硬度分布
Fig.8 Microhardness distribution of welded joints under different welding currents