

旁路分流电弧钎焊钛/钢异种金属接头特性分析

苗玉刚¹, 林志成¹, 邹俊攀², 郭俊良², 韩端锋²

(1. 哈尔滨工程大学 水下机器人技术重点实验室 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 以旁路分流电弧焊方法为技术手段, 以 S211 铜合金为填充钎料, 进行钛/钢异种金属电弧钎焊工艺试验. 利用光学显微镜、扫描电镜、万能拉伸试验机等, 对钎焊接头的宏观及微观组织、元素分布、抗拉强度进行分析, 并利用显微硬度仪分析钎焊接头硬度的变化趋势. 结果表明, 采用该方法可获得成形良好的钛/钢异种金属钎焊接头, 未见明显的焊接缺陷; 硬度测试发现钛/铜界面处的硬度明显升高, 这与钛/铜区域易形成 Ti-Cu 金属间化合物有关; 钎焊接头的断裂发生在铜/钛侧, 断裂方式属于韧-脆混合断裂, 抗拉强度为 291.55 MPa, 约为铜钎料强度的 88%.

关键词: 钛/钢异种金属; 旁路分流电弧钎焊; 成分分析; 抗拉强度; 硬度

中图分类号: TG 457 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400243

0 序 言

钛合金具有密度低、比强度高、耐蚀性好等优点, 被广泛应用于舰艇、航空、航天、石油化工等领域^[1]. 钢具有机械强度高、韧性好、加工性能优良等优点, 是工业生产中应用最广泛的金属材料之一. 由于钛、钢应用的广泛性和交叉性, 以及在某些场合对其特殊性能的需求, 将钛、钢及其合金连接形成复合结构十分必要, 这样既可降低结构重量, 又可节约材料成本. 因此, 钛/钢复合结构在舰艇、航空、航天和汽车等工业领域具有巨大的应用潜力, 但是由于钛/钢热物理化学性能的巨大差异, 使二者之间的焊接一直存在着很大困难, 极大限制了钛/钢复合结构的生产应用^[2-4].

近年来, Elrefaey 等人^[5]进行了纯钛和低碳钢的焊接试验, 用一种铜基 (Cu-12Mn-2Ni)、两种银基钎料 (Ag-34Cu-2Ti、Ag-27.5Cu-12.5In-1.25Ti) 进行了真空钎焊的对比, 在 750 °C 使用银基钎料试件的最大抗剪强度为 113 MPa. 大连理工大学的王红阳等人^[6]利用 Cu-Zn 作为中间过渡层, 使用激光-电弧复合热源方法进行钛/钢异种金属焊接试验, 发现接头区域存在大量的 Ti-Cu 金属间化合物, 并指出这是影响钛/钢焊接性的关键因素之一.

文中利用旁路分流电弧焊技术对钛/钢异种金属进行钎焊试验, 对钎焊接头的宏观及微观组织、元素分布、抗拉强度、硬度等进行测试分析, 阐述钛/钢异种金属钎焊接头特性, 揭示影响钎焊接头组织性能变化的主要因素. 研究结果将为深刻理解钛/钢异种金属旁路分流电弧钎焊过程提供基础理论数据, 并为将来该项技术的工程应用提供技术依据.

1 试验方法

以 1 mm 厚 TC4 钛合金和 2 mm 厚镀锌钢板为试验材料, 镀锌钢为 Q235 钢热镀锌, 锌层厚度为 11.2 μm, 选择 1.2 mm 直径的 S211 铜合金焊丝为钎料, 其材料的化学成分如表 1、表 2 和表 3 所示.

表 1 钛板的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of TC4

C	Fe	Al	V	Ti
0.02	0.10	6.30	4.00	余量

表 2 Q235 钢化学成分 (质量分数, %)

Table 2 Chemical composition of Q235 steel

Si	C	Cr	S	Mn	Fe
0.22	0.12-0.2	0.18	≤ 0.045	0.48	余量

表3 S211焊丝的化学成分(质量分数, %)
Table 3 Chemical composition of S211

Si	Zn	Mn	Sn	Fe	其它	Cu
2.8~4.0	≤0.2	0.5-1.5	≤0.2	≤0.3	≤0.45	余量

旁路分流电弧钎焊系统主要由主路焊枪、旁路焊枪、送丝机构、恒压电源、恒流电源、水平十字滑块工作台组成,其原理图如图1所示。

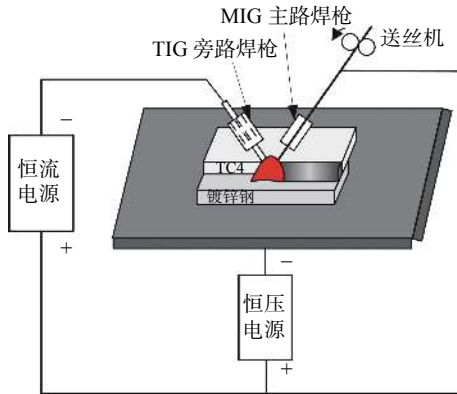


图1 旁路分流电弧钎焊原理图

Fig. 1 Sketch for bypass-current arc brazing

焊接过程中,相同条件下,增加旁路电弧会改变熔滴过渡模式,熔滴由大滴或短路过渡,变成更稳定的射滴或射流过渡。由于旁路电弧的存在,流经主路焊枪的焊接电流被分成两部分:一是旁路电流 I_p ,二是施加到母材的电流 I_m 。这样焊丝就可以通以大电流,在实现高熔敷率和稳定熔滴过渡的同时,又减少作用于母材的热输入,改善焊接质量^[7]。

2 试验结果及分析

2.1 焊缝成形与钎焊接头形貌

对钛/钢异种金属进行旁路分流电弧钎焊试验前,用丙酮去除镀锌钢表面杂质和油脂,用砂纸打磨钛合金表面,并用酒精擦拭去除表面油脂和氧化膜。确保试验材料表面清洁后,首先在镀锌钢上和钛板上研究不同工艺参数下铜基钎料的润湿性,寻求最佳的焊接工艺参数,然后进行钛板和镀锌钢板搭接形式的旁路分流电弧钎焊工艺试验,找到最佳的焊接工艺参数:总电流74 A,电压13.4 V,旁路电流30 A,焊接速度7.5 mm/s,钨极高度5 mm,焊丝伸出长度13 mm,钨极与焊丝夹角45°,保护气体流量15 L/min。

图2为钛/钢异种金属钎焊焊缝成形形貌。可

以看出,传统MIG钎焊的钎焊缝成形不均匀(图2a),且存在较大飞溅,这可能与焊接过程中熔滴过渡过程不稳定、焊接热输入较高等因素有关;从图2b可以看出,旁路分流电弧钎焊的焊缝成形均匀美观,未见明显的焊接飞溅,成形明显得到改善,这与该焊接方法的熔滴过渡稳定、焊接热输入较低等有关。



(a) 传统MIG焊



(b) 旁路分流电弧钎焊

图2 不同焊接方法TC4钛合金/镀锌钢异种金属钎缝成形
Fig. 2 Brazed forming of TC4 titanium/galvanized steel dissimilar metal with different methods

图3给出了钛/钢异种金属的旁路分流电弧钎焊接头形貌,未发现明显的钛、钢熔化现象,呈典型的钎焊接头形貌。由此可见,采用旁路分流电弧钎焊工艺可以实现钛/钢异种金属的良好焊接。



图3 TC4钛合金/镀锌钢旁路分流电弧钎焊接头形貌
Fig. 3 Cross-section of TC4/galvanized steel bypass-current arc brazing

2.2 成分分析

为分析钎焊接头组织性能的变化规律,进一步利用扫描电镜对钎焊接头进行观察分析.图 4 分别

是铜/钛界面层不同区域 EDS 面扫描分析,图中 A, B, C 三处分别为铜层、铜/钛交界、钛层三个区域.

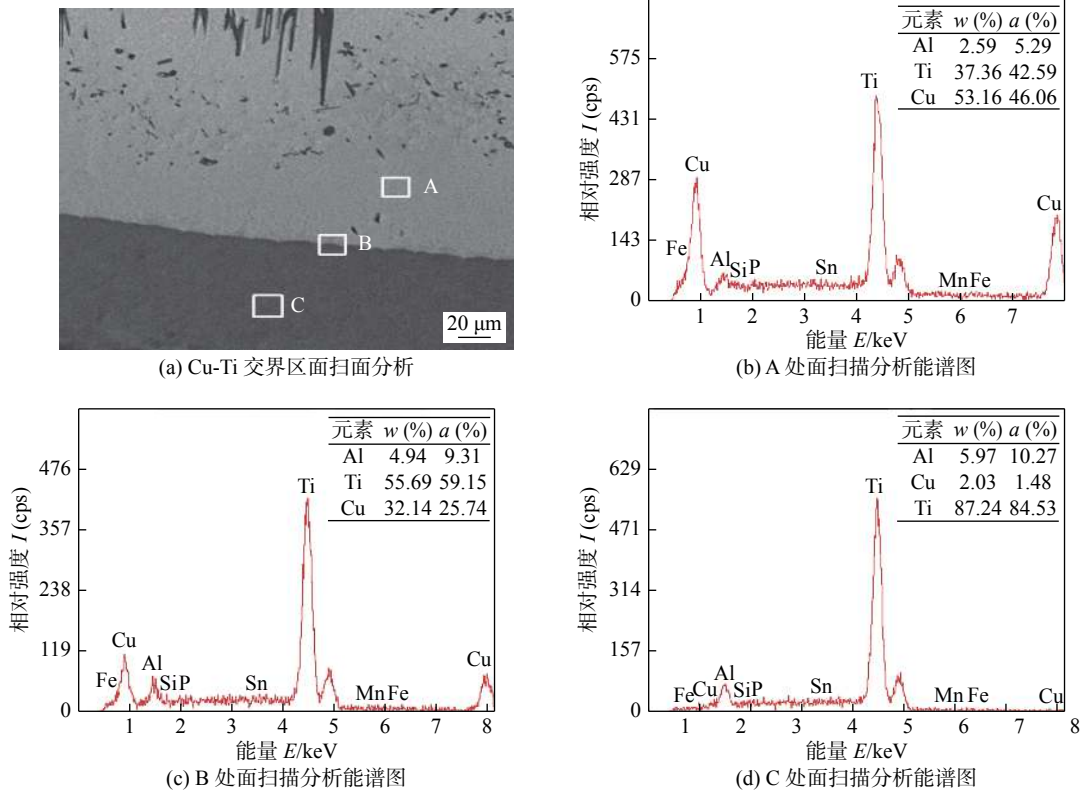


图 4 CuSi₃/TC4 钎焊接头面扫描分析

Fig. 4 Surface scanning analyses of CuSi₃/TC4 brazed joint

结合图 4b, 4c, 4d 能谱图, 分析图 4a 中 A, B, C 三处化学成分. 根据图 4b 钎焊缝区的能谱图可以得出 A 区域主要为钛/铜金属间化合物, 结合两种金属的金属间化合物种类以及钛和铜的原子比例为 43:46, 符合 TiCu 化合物的原子比例. 图 4a 中 B 区域中的铜与钛的钎焊接头位置呈现近似直线接头形态, 二者未出现明显熔化现象, 但是反应层不明显; 根据图 4c 能谱图, 钛铜原子比 59:26, 符合 Ti₂Cu 化合物的原子比例. 根据图 4a 中 C 区域表示的钛侧无明显缺陷, 图 4d 中仍然存在很少量铜元素, 但是硅元素含量为零, 分析可能是在焊接过程中铜元素扩散到钛合金母材中, 其它元素的情况基本符合钛合金的成分含量. 根据断裂位置发生在铜/钛一侧, 二者接头的一大部分区域存在着 Ti-Cu 金属间化合物, 这部分化合物的存在使铜/钛钎焊接头区域发生脆性变化, 影响钎焊接头的力学性能^[8-10].

2.3 拉伸性能测试

为了验证旁路分流电弧钎焊工艺的钎焊接头

力学性能, 用万能拉伸试验机进行钎焊接头性能测试. 图 5 为钎焊接头拉伸位移-应力曲线.

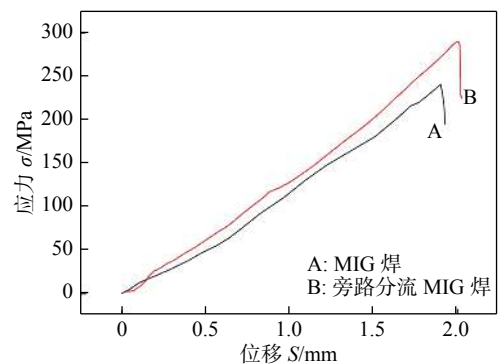
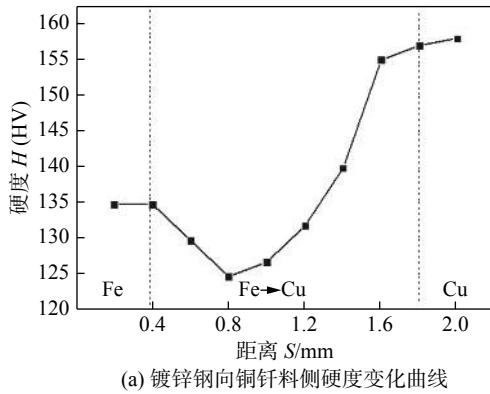


图 5 钎焊接头拉伸位移-应力曲线

Fig. 5 Relation between tensile displacement and strength of brazed joint

拉伸钎焊接头的断裂发生在铜/钛一侧, 断裂前无明显的缩颈, 断口呈灰白色, 呈脆脆混合断口的特征. 这可能与钛/铜侧产生了较多的 Ti-Cu 金属间化合物, 导致该部分的组织性能变脆等有关. 根据

图5所示的MIG钎焊接头与旁路分流电弧钎焊接头的力学性能对比分析,旁路分流电弧钎焊工艺钎焊接头抗拉强度高达291.55 MPa,约为铜钎料(330 MPa)抗拉强度的88%,相较于传统MIG钎焊接头241.43 MPa(约为钎料的抗拉强度的73%)有



明显提高.

2.4 硬度分析

测量旁路分流电弧钎焊工艺的钎焊接头硬度变化,采用显微硬度仪测量钎焊接头的硬度变化,不同界面层的硬度变化如图6所示.

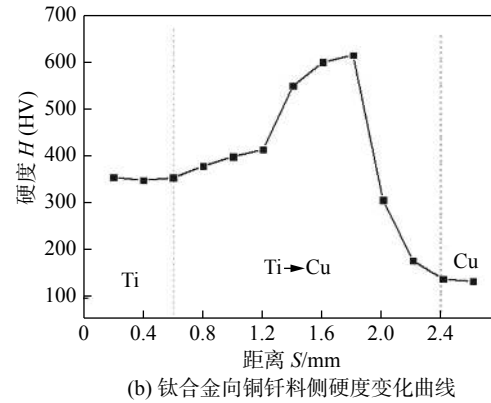


图6 钎焊接头硬度变化曲线

Fig. 6 Hardness curve of brazed joint

从图6a可知,从镀锌钢到钎焊缝区的硬度值差别不大,与镀锌钢母材与焊丝钎料本身的硬度差别不大有关;靠近镀锌钢一侧的钎焊缝区硬度由镀锌钢向钎焊缝侧有递减的趋势,可能是由于焊接过程中,液态钢与液态铜无限互溶,在靠近钢的一侧,温度降低后,以 ϵ -Cu铜基固溶体析出,降低了马氏体的硬度,致使硬度轻微下降^[11];而后硬度有升高趋势可能是与钢的扩散溶解有关,随着距离增大,扩散溶解降低,最终达到钎焊缝区.从图6b可以看出,从钛合金母材向热反应区的硬度逐渐升高,根据成分分析在这个区域,形成了新的金属间化合物,同时,钛在热反应中吸收了空气中氮、氧等物质,增加了这部分区域的硬度,结合力学拉伸试验的断裂位置分析,这部分金属间化合物虽然使钎焊接头的硬度升高,但却降低了钎焊接头力学性能,过了这部分区域的钎焊接头硬度逐渐降低,最终达到了近似铜钎料的硬度值.

3 结 论

(1) 旁路分流电弧钎焊可以实现钛/钢异种金属的可靠连接. 相同参数下,旁路分流电弧钎焊工艺钎焊接头抗拉强度高达291.55 MPa,约为铜钎料(330 MPa)抗拉强度的88%,相较于MIG钎焊接头241.43 MPa(约为钎料的抗拉强度的73%)有很大

提高.

(2) 拉伸断裂位置在铜/钛结合位置,结合铜/钛界面层成分与硬度分析,控制铜钎料与钛合金间金属化合物的形成,将会进一步改良钎焊接头的力学性能.

参考文献:

- [1] 王怀柳. 钛及钛合金在船舶工业的应用现状及发展[J]. 特钢技术, 2013(4): 1-5.
Wang Huailiu. Application status and development of titanium and titanium alloy in shipbuilding industry[J]. Special Steel Technology, 2013(4): 1-5.
- [2] Zhang Y, Sun D Q, Gu X Y, et al. Strength improvement and interface characteristic of direct laser welded Ti alloy/stainless steel joint[J]. Materials Letters, 2018, 231: 31-34.
- [3] 李继红, 谢威威, 杨军, 等. 钛/钢复合板熔化焊接头的组织和性能[J]. 金属热处理, 2016, 41(5): 48-52.
Li Jihong, Xie Weiwei, Yang Jun, et al. Microstructure and properties of melting welded joint of ti/steel composite plates[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(5): 48-52.
- [4] 吕攀. 不同中间层对钛-钢激光焊接焊缝组织与性能的影响[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [5] Elrefaey A, Tillmann W. Brazing of titanium to steel with different filler metals: analysis and comparison[J]. Journal of Materials Science, 2010, 45(16): 4332-4338.
- [6] 王红阳, 李权, 宋刚, 等. 基于铜合金中间层的钛合金与不

- 锈钢激光-电弧复合热源焊接研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(5): 44 - 50.
- Wang Hongyang, Li Quan, Song Gang, *et al.* Laser-arc hybrid welding of titanium alloy and stainless steel with copper interlayer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 44 - 50.
- [7] 苗玉刚, 吴斌涛, 韩端锋, 等. 铝/镀锌钢异种金属旁路分流 MIG 电弧熔钎焊界面区组织与接头性能 [J]. 焊接学报, 2014, 35(9): 6 - 10.
- Miao Yugang, Wu Bintao, Han Duanfeng, *et al.* Characteristics of joint and interface layer during bypass-current MIG welding-brazing of aluminum and steel dissimilar metals[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(9): 6 - 10.
- [8] Hao X Y, Dong H G, Li S, *et al.* Lap joining of TC4 titanium alloy to 304 stainless steel with fillet weld by GTAW using copper-based filler wire[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 257: 88 - 100.
- [9] Cheng Z, Huang J H, Ye Z, *et al.* Interfacial microstructure evolution and mechanical properties of TC4 alloy/304 stainless steel joints with different joining modes[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 36: 115 - 125.
- [10] 刘德义, 蔡建伟, 任瑞铭. 钛/铜中间层/钢扩散焊复合管界面组织与性能 [J]. 焊接学报, 2013, 34(1): 49 - 52.
- Liu Deyi, Cai Jianwei, Ren Ruiming. Microstructure and properties of diffusion bonded interface of titanium-copper interlayer-carbon steel composite tube[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(1): 49 - 52.
- [11] 陈基明. 铜/钢热丝 TIG 堆焊工艺及接头组织分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
-
- 第一作者简介:** 苗玉刚, 男, 1978 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师. 主要从事船舶与海洋工程焊接工艺及特种焊接技术的教学和科研工作. 发表论文 40 余篇. Email: miaoyg@hrbeu.edu.cn