

铸造钛合金补焊技术研究进展

李广东^{1,2,3}, 石岳良^{1,2,3}

(1. 北京百慕航材科技股份有限公司, 北京 100094; 2. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 3. 北京市先进钛合金精密成型工程技术研究中心, 北京 100095)

摘要: 铸造钛合金存在缺陷时可以通过补焊修复, 在这过程中容易受到氢、氧、氮的影响而导致焊区出现裂纹、氧化、脆化等缺陷, 由此影响到整个构件的整体性能, 这都是由其自身的物理特性和化学特性所决定的。概述了铸造钛合金的补焊特性, 并对补焊中常见的缺陷进行了分析; 介绍了铸造钛合金补焊缺陷的检测方法, 进而提出了控制补焊缺陷的有效防范措施; 提出了补焊工艺参数的选择原则及注意事项; 描述了各种铸造钛合金补焊方法的优缺点, 并最终确定各补焊方法的选择原则及适用依据。随着钛合金铸件在航空、航天领域的广泛推广及应用, 铸造钛合金补焊技术将成为其不断向前发展的一种不可或缺的制造工艺。

关键词: 铸造钛合金; 补焊; 缺陷; 控制方法

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.03.019

中图分类号: V261.3⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2018)03-0105-05

Progress in Research on Cast Titanium Alloy Welding Repair

LI Guang-dong^{1,2,3}, SHI Yue-liang^{1,2,3}

(1. Baimtec Material Co., Ltd., Beijing 100094, China;

2. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

3. Beijing Engineering Research Center of Advanced Titanium Alloy Precision Forming Technology, Beijing 100095, China)

ABSTRACT: Defects of cast titanium alloy might be repaired by welding. The welding properties of cast titanium and titanium alloys have many notable characteristics, all of which are determined by their physical and chemical properties. Cast titanium alloys are easily affected by hydrogen, oxygen and nitrogen during welding repair, which affects the overall performance of the component. The welding repair characteristics of cast titanium alloy were summarized; the common defects in welding repair were analyzed; the detection methods of defects were introduced; the measurements to control welding repair defects were put forward; and the selection principles and notice of the welding parameters were described. Advantages and disadvantages of the welding repair method were obtained, and the selection principle and application of the welding repair methods were determined. With the generalization and application of cast titanium alloy in aviation and aerospace fields, the welding repair technology will become an indispensable process to promote the development.

KEY WORDS: cast titanium alloy; welding repair; defects; control methods

铸造钛合金因为其密度小、比强度高、塑韧性好、耐腐蚀性好等优点, 在结合精密铸造技术基础上, 各类钛合金铸件被广泛应用在航空、航天、航海、造船、化工、五金零件、体育用品、医疗器械等领域。铸造

钛合金在成形过程中, 会存在铸造缺陷如缩孔、气孔、裂纹、夹杂等, 这些缺陷可以通过补焊技术消除。铸造钛合金补焊质量直接关系到铸件的性能和使用寿命, 因此, 需要充分掌握铸造钛合金的补焊特性、补

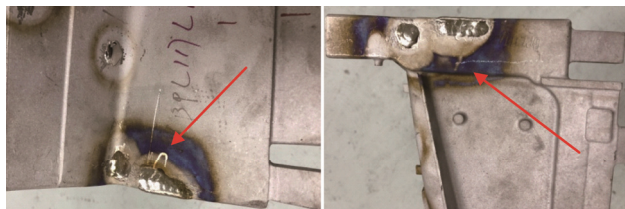
收稿日期: 2018-04-19

作者简介: 李广东(1982—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为钛合金补焊工艺技术。

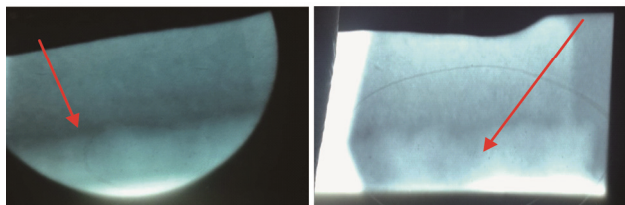
焊工艺特点、补焊方法适用性、补焊产生的缺陷控制和消除,并且在补焊之前做好充分的焊前准备,选择合适的补焊参数,焊后进行合理的冷却方法,必要时进行合适的后处理方法,从而最终确保钛及钛合金制件的补焊质量。可用于铸造钛合金的补焊方法有氩弧焊、电子束焊、等离子焊、激光焊等,为此,需要综合各方面因素考虑,选择最佳的补焊方法。

1 铸造钛合金补焊特性

在常温下,钛及钛合金是比较稳定的,但是,在补焊过程中,合金在熔滴和熔池状态下与氢、氧、氮等元素发生强烈的反应,如果没有很好的气氛保护,在钛合金补焊后极易表面氧化、气孔和脆化缺陷。气孔的出现会使钛合金补焊区出现应力集中,并减小受力面积,严重影响补焊区强度。脆化也会导致产品出现裂纹,造成产品性能失效。



a 补焊氧化



b 补焊气孔



c 补焊裂纹

图1 补焊缺陷照片

Fig.1 Welding repair of defect

2 铸造钛合金补焊缺陷影响因素

2.1 氧

氧的吸入会使钛合金在高温时发生氧化,形成新的氧化物,如氧化钛、二氧化钛,这些氧化物的产生会导致补焊区塑性下降,在残余应力作用下,严重时会发生脆性裂纹,因此,为了得到极好的补焊性能,需要在补焊过程中防止补焊区和热影响区吸氧而发

生氧化。通常,补焊区和补焊热影响区的表面颜色是氧化程度的标志。银白色表示无氧化,浅黄色、黄色表示轻微氧化,浅蓝色、蓝色表示氧化较严重,深蓝色或灰色表示氧化极其严重。

2.2 碳

在钛合金补焊中,碳的存在会使金属塑性有所下降,在补焊应力作用下,极容易出现裂纹。碳的来源主要是气氛、铸件表面污染、石墨工装等。

2.3 氢

氢脆问题一直是钛合金使用过程中被广泛关注的问题。氢元素极易在高温下扩散入钛合金基体中,会导致补焊区裂纹出现。这是由过量氢形成的氢化物所造成的。在钛合金补焊中,如果有氢的吸入,会使补焊区产生较大力学性能的变化,其塑性和韧性显著降低。

2.4 氮

氮对补焊质量的主要影响是在补焊区产生气孔和裂纹,出现这些缺陷后,补焊区的抗拉强度、硬度均会产生较大的变化。

3 铸造钛合金补焊后缺陷的检测方法

铸造钛合金补焊后检测的方法包括目视检查、尺寸检查、荧光渗透检查、X光红色线检查等。目视检查主要是为了评估气体保护的好坏,通过焊后表面的颜色来判断焊后可接受,还是不可接受。尺寸检查主要是通过测量仪(如GOM光学测量仪、三坐标测量仪等)对焊后的变形、塌陷、凹凸、扭曲等做出判断。渗透检测主要是通过磁粉、荧光液等对焊后表面是否产生了表面裂纹进行确认。X光射线检测主要是对焊后补焊区内部进行探伤,来确认是否产生焊后的未熔合、气孔、裂纹、夹杂等内部缺陷,因此,射线检测也成了钛合金焊后表面气孔和裂纹、内部气孔和裂纹的应用较广泛的检测方法。

4 铸造钛合金补焊缺陷的有效控制方法

4.1 钛合金补焊气孔的控制措施

做好焊前处理。补焊工件和焊料的表面状况对补焊区的性能具有很大影响,因此必须选择合适的方法去除掉工件和焊料表面的氧化皮、油污等。在钛合金补焊领域内,常见的方法有化学清理和机械清理两种:①机械清理,使用硬质合金旋转锉刀对工件表面进行刮削,以去除氧化膜,油污、杂质等;②化学清理,

使用氢氟酸和硝酸对工件及焊料进行表面清洗。

做好焊前烘干。在清洗的基础上,补焊工件和焊料在焊前均需要使用烘箱进行烘干,确保干燥,以防止因为受潮而含有大量水分,避免在补焊过程中出现气孔缺陷。

使用真空下惰性气体保护。在补焊时,尽量在真空焊箱内或采用惰性气体保护,可以有效减少气孔和表面氧化的产生。在钛合金补焊的实际生产应用中,常用的惰性气体为氩气,纯度一般不低于99.99%,露点一般在-40℃以下。

使用合适的补焊坡口形式。一般来讲,选择合适坡口的原则是,在满足缺陷修复的条件下,尽量使补焊区域少、补焊填充金属量少。因为补焊量越大补焊区域越容易吸气、氧化,热应力越大,易导致补焊区产生补焊缺陷的概率升高,因此钛合金工件补焊时一般选择开设70°~80°的“U”型坡口形式。

使用合适的补焊工艺参数。影响钛合金补焊质量的补焊工艺参数主要有:保护气体的流速、使用的补焊电流、补焊速度、焊道层数、焊丝直径等。通常选择合适的补焊工艺参数,可以提高补焊质量,也可以提高工艺效率。

4.2 铸造钛合金补焊裂纹的控制措施

补焊工件及焊料的焊前预热处理。在补焊前,需要对钛合金工件进行整体均匀的预热。如果不进行预热,补焊时由于金属局部的激热,导致在补焊区附近产生较大的温度梯度,会出现应力裂纹。在补焊前,采用预热也就是减少这种激冷效应,即减少应力集中。换句话说,将工件进行均匀的整体预热,可以减少补焊区域热影响区的温度梯度。另外,在焊料的选择上,一般选择与母材金属相同的成分,当然,有时也是为了提高补焊区塑性,可经常选择比母材金属低一级的焊料,这也是避免补焊区产生脆性裂纹的办法。

焊后冷却处理。焊后施行随炉缓慢冷却,可以降低冷却速度,减少补焊区残余应力,对于结构复杂易变形开裂的钛合金结构件,有助于降低补焊裂纹倾向。

焊后振动时效去应力。使用振动时效设备对补焊工件进行处理,用以消除残余应力。目前应用最广泛的方法有两种:一种是超声振动,另一种是机械振动。

焊后真空热处理去应力。补焊工件在焊后会产生补焊应力,补焊应力在工件中的存在会降低补焊区的实际承载能力,产生塑性变形,严重时还会导致补焊工件的损坏。焊后真空热处理是通过高温将焊后应力进行均匀稳定释放的过程。最常规的热处理方法是將工件整体放入真空炉中,缓慢加热到一定温度,一般采用730~750℃,然后保温一定时间,一般采用2~

3 h,最后随炉冷却至室温。由于钛合金高温下易氧化,所以必须真空热处理或惰性保护气氛下热处理。

5 铸造钛合金补焊方法的优缺点及选用原则

5.1 钨极氩弧焊

氩弧焊是在惰性气体氩气的保护作用下进行的一种加料式电弧补焊方法。这种补焊电弧热量集中、电流密度较高、热影响区大,得到补焊区的补焊质量高。补焊方法简单易行,设备投资较少,成本较低。钨极氩弧焊属于明弧操作,熔池可观性好,便于观察和操作,技术容易掌握,不受补焊工件位置限制,可进行复杂构件全位置补焊。目前该方法在钛合金缺陷修复中使用最广泛。

5.2 等离子弧焊

在钛合金补焊中,等离子弧焊一般选用氩气来进行保护,等离子弧补焊方法比氩弧焊速度快、熔深大,但逊于激光焊。由于其重复性差,导致等离子弧焊在钛合金中一直不能很好推广,还有另外一个原因是,补焊设备较贵,初次投资大,等离子弧焊枪及控制线路复杂,喷嘴使用寿命低,这些均对钛合金补焊工艺的发展造成了一定的影响。

5.3 电子束焊

电子束焊是靠一束加速高能密度电子流撞击工件,在被焊工件表面很小密积区域内产生巨大的热量,形成“小孔”效应,从而实施深熔补焊。真空电子束补焊工艺在钛合金补焊中得到的补焊区质量较高。电子束补焊方法的能束焦点小,热量非常集中,因此电子束焊后得到的补焊区较窄,热影响区极其小。补焊区的晶粒也比较均匀,致使补焊接头的强度较高。当然,电子束补焊也具有一定的缺点,比如其需要在高真空环境下进行,因此,这导致补焊工件的尺寸具有一定的局限性,这将对补焊工件装配质量要求严格,因此电子束补焊方法在钛合金补焊中无法进行大批量的生产应用,也不适合复杂结构件的全位置补焊修复。

5.4 激光焊

激光补焊,焊料可以采用丝材和粉料,具有能量密度集中、补焊区成形好、操作简单、易实现自动化、可以实现精准修复等优点。钛合金的激光补焊区成形均匀、熔深和熔宽均很小,所以焊后变形较小。达到补焊质量好,可实现精密补焊。然而,激光补焊成本较高,设备投资也比较昂贵,补焊工件位置需要非常精确,因此均需要投资制作专用工装。在成本可控条

件下,未来激光焊在铸造钛合金修复应用中会越来越广泛,是一个值得关注的新技术。

鉴于表 1 所述各种补焊方法优缺点的对比,考虑到投资成本、工作效率、操作方法、质量水平等综合因素,钛合金补焊生产中最优选的是钨极氩弧焊。钨极氩弧焊可以获得补焊质量好、施焊效率高、操作方法易掌握、补焊变形较小、修复位置可达性高等较好的综合性能。

表 1 各种补焊方法优缺点的对比
Tab.1 Comparison of advantages and disadvantages of various welding repair methods

补焊方法	优点	缺点
钨极氩弧焊	电弧热量集中、电流密度较高、方法简单易行、设备投资少、成本低。技术容易掌握、不受工件位置限制、可进行复杂构件全位置补焊	热影响区大
等离子弧焊	速度快、熔深稍大	设备较贵、初次投资大、等离子弧焊枪及控制线路复杂、喷嘴使用寿命低
电子束焊	能束焦点小、热量集中、补焊区较窄,热影响区小。补焊区晶粒均匀、补焊接头强度高	工件的尺寸具有一定的局限性、不适合复杂结构件全位置补焊修复
激光焊	能量密度集中、补焊区成型好、操作简单、易实现自动化、可以实现精准修复。补焊区成型均匀、熔深和熔宽均很小、焊后变形较小,可实现精密补焊	成本较高、设备投资比较昂贵。补焊工件位置需要非常精确,均需要制作专用工装

6 结论

在铸造钛合金补焊中,需要熟练掌握钛合金的补焊特性,熟知产生补焊缺陷的影响因素,通过不同的检测方法对焊后缺陷进行识别及分析,从而对补焊缺陷进行有效控制。通过优选合适的补焊方法在钛合金补焊中进行推广及应用,可有效提高钛合金铸件质量、降低废品率、减少成本、扩大应用范围。

参考文献:

[1] 胡柱疆. 钛及钛合金焊接特点及焊接工艺[J]. 新疆化工, 2015(4): 16—19.
HU Zhu-jiang. Welding Character and Process of Titanium and Titanium Alloy[J]. Journal of Xinjiang Chemical Industry, 2015(4): 16—19.

[2] 赵红凯, 王春亮, 任飞, 等. 钛合金焊接的研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(5A): 342—348.
ZHAO Hong-kai, WANG Chun-liang, REN Fei, et al. Progress in Research on Titanium Alloy Welding[J]. Journal of Materials Review, 2007, 21(5A): 342—348.

[3] 韩忠. 钛合金焊接冶金研究进展[J]. 材料科学与工程, 2000, 18(4): 107—110.
HAN Zhong. Advances in Titanium Alloy Welding Metallurgy[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2000, 18(4): 107—110.

[4] 戚运莲, 洪权, 刘向, 等. 钛及钛合金的焊接技术[J]. 钛工业进展, 2004, 21(6): 25—28.
QI Yun-lian, HONG Quan, LIU Xiang, et al. Welding

Technology of Titanium and Titanium Alloy[J]. Journal of Titanium Industry Progress, 2004, 21(6): 25—28.

[5] 袁双喜, 沙庆涛, 徐培麒. 钛合金电子束焊接的研究进展[J]. 高能束流加工技术, 2009(9): 51—54.
YUAN Shuang-xi, SHA Qing-tao, XU Pei-qi. Research Progress of Titanium Alloy by Electron Beam Welding[J]. Journal of High-Energy Beam Processing Technology, 2009(9): 51—54.

[6] 赵永庆. 国内外钛合金研究的发展现状及趋势[J]. 中国材料进展, 2010, 29(5): 1—4.
ZHAO Yong-qing. Current Situation and Development Trend of Titanium Alloys[J]. Journal of Materials China, 2010, 29(5): 1—4.

[7] 陈阳. 钛合金焊接工艺技术研究[J]. 山东工业技术, 2007(18): 26.
CHEN Yang. Research on Welding Technology of Titanium Alloy[J]. Journal of Shandong Industrial Technology, 2007(18): 26.

[8] 张慧婧, 董俊慧, 陈超, 等. TC4 钛合金等离子弧焊接头组织性能[J]. 材料导报, 2016, 30(28): 554—556.
ZHANG Hui-jing, DONG Jun-hui, CHEN Chao, et al. Microstructure and Properties of the TC4 Titanium Alloy Welded Joints by the Plasma Arc Welding[J]. Journal of Materials Review, 2016, 30(28): 554—556.

[9] 刘志成, 张利军, 张晨辉. 氧含量对 TC4 钛合金力学性能的影响[J]. 世界有色金属, 2016(8): 151—153.
LIU Zhi-cheng, ZHANG Li-jun, ZHANG Chen-hui. Effect of Oxygen Content on the Mechanical Properties of TC4 Titanium Alloy[J]. Journal of World Nonferrous

- Metals, 2016(8): 151—153.
- [10] 王莉. 钛合金焊接工艺及缺陷预防浅析[J]. 科技与企业, 2015(8): 179.
- WANG Li. Analysis of Welding Technology and Defect Prevention of Titanium Alloy[J]. Journal of Science Technology and Enterprise, 2015(8): 179.
- [11] 高善柱. 钛及钛合金焊接工艺分析[J]. 中国机械, 2014(2): 139.
- GAO Shan-zhu. Analysis of Welding Technology of Titanium and Titanium Alloy[J]. Journal of Machine China, 2014(2): 139.
- [12] 王新宽. 钛及钛合金焊接缺陷的控制措施[J]. 石油化工建设, 2006, 28(3): 46.
- WANG Xin-kuan. Measures of Welding Defect of Titanium and Titanium Alloy[J]. Journal of Petroleum and Chemical Construction, 2006, 28(3): 46.
- [13] 赵健. 钛合金焊接方法的探讨[J]. 中国修船, 2012, 25(2): 33—35.
- ZHAO Jian. Discussion of Welding Method of Titanium Alloy[J]. Journal of China Shiprepair, 2012, 25(2): 33—35.
- [14] 张旭. 钛合金焊接工艺和质量控制的探讨[J]. 化工设备与管道, 2002(4): 59—61.
- ZHANG Xu. Discussion of Weld Process and Quality Control for Titanium Alloy[J]. Journal of Process Equipment and Piping, 2002(4): 59—61.
- [15] 刘立成, 于晶, 谷彦军. 钛合金材料的等离子弧焊接技术[J]. 国防技术基础, 2007(7): 59—62.
- LIU Li-cheng, YU Jing, GU Yan-jun. Plasma Arc Welding of Titanium Alloy[J]. Journal of Technology Foundation of National Defence, 2007(7): 59—62.