

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2021.04.006

钛/钢层状复合板焊接技术的现状与展望

闫婉迪, 孙新丰, 张 岩, 李福山, 徐荣正

(沈阳航空航天大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110136)

摘 要:兼具钛合金和钢优点的钛/钢复合板,被广泛应用于海洋、船舶、机械化工等工业领域中,而焊接技术在其推广应用的过程中发挥了不可替代的关键作用。讨论了钛/钢复合板焊接的特点,重点从坡口形式和过渡层的设计、选择与添加两方面综述了钛/钢复合板的钨极氩弧焊、熔化极气体保护焊及激光焊等焊接方法的研究现状,分析了不同工艺下接头的微观组织、力学性能等特征。结果表明,通过合理的坡口设计和过渡层的添加,可以实现钛/钢复合板的良好焊接。然而,当前钛/钢层状复合板焊接还存在工艺复杂、效率低等主要问题,有待进一步解决。同时,还对钛/钢复合板焊接技术未来发展的方向进行了展望。

关键词:钛/钢复合板;焊接;高效率;低成本

中图分类号: TG44

文献标志码: A

文章编号: 2095-1744(2021)04-0033-09

Research Status and Prospect of Welding Technology for Ti/Steel Laminated Composite Plate

YAN Wandi, SUN Xinfeng, ZHANG Yan, LI Fushan, XU Rongzheng

(School of Material Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: Ti/steel composite plates, which both have the advantages of titanium alloy and steel, are widely used in the fields of oceanographic, marine, mechanical and chemical industries, while welding technology plays an irreplaceable key role in its popularization and application. This paper discusses the welding characteristics of Ti/steel composite plates. The research status of TIG welding, gas metal arc welding and laser welding of Ti/steel composite plates are summarized from the aspects of groove form, design, selection and addition of transition layer. The microstructure and mechanical properties of joints under different technologies are analyzed. The results show that the welding of Ti/steel composite plates can be realized by reasonable groove design and adding transition layer. However, there are still some problems in the welding of Ti/steel composite plates, such as complex process and low efficiency. At the same time, the future development direction of welding technology for Ti/steel composite plates is prospected.

Key words: Ti/steel composite plate; welding; high efficiency; low cost

钛/钢复合板, 又称钛/钢双金属层状复合板, 它是采用轧制、焊接等成形工艺, 将性能优异的钛或钛合金与钢铁材料复合而成的一种层状复合材料^[1-3]。

其中, 价格较高的钛, 通常作为复层材料使用, 在复合板中厚度占比较小, 主要起到提高复合板耐腐蚀性能的作用; 成本较低的钢铁材料, 通常作为基层材

收稿日期: 2020-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51601121); 辽宁省自然科学基金项目(2020-MS-238)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51601121); Natural Science Foundation of Liaoning Province Program(2020-MS-238)

作者简介: 闫婉迪(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事轻质高强材料焊接技术的研究。

通信作者: 徐荣正(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事轻质高强材料焊接技术的研究。

引用格式: 闫婉迪, 孙新丰, 张 岩, 等. 钛/钢层状复合板焊接技术的现状与展望[J]. 有色金属工程, 2021, 11(4): 33-41.

YAN Wandi, SUN Xinfeng, ZHANG Yan, et al. Research Status and Prospect of Welding Technology for Ti/Steel Laminated Composite Plate[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(4): 33-41.

料使用,厚度占比较大,主要起到保证复合板结构强度的作用^[4]。通过钛复板和钢基板的有机复合,使其兼具钛合金和钢铁材料的一系列优点^[5],例如耐腐蚀性能好、塑韧性高、性价比高^[6-8]。目前,钛/钢复合板已经被广泛应用于海洋工程、淡水工程、船舶工程以及机械化工等领域,也是复合材料领域的一个重要发展方向^[9-11]。

焊接,作为一种重要且常用的成形技术^[12-13],在钛/钢复合板的应用与推广过程中,发挥着越来越重要的作用。在进行钛/钢复合板的焊接时,因其材料组成以及层状结构的特殊性,所以不仅需要考虑钛合金、钢铁材料、以及钛/钢异种金属的焊接特性,还需要考虑焊接过程对于复合板综合性能的影响,尤其是需要特别关注钛复层在焊接过程中的稀释问题^[14-15]。因此,在钛/钢复合板焊接过程中,需要重视以下几个方面因素:首先,构成钛/钢复合板的钛和钢之间,在熔点、热导率等物理性能上存在较大差异^[16-17],焊后在接头处会存在较大的残余应力,容易导致裂纹的萌生;其次,钛复层在加热到约 300、450 及 600 °C 时,将分别发生吸 H、O 及 N 的现象,这也增加了复合板接头产生气孔、裂纹等缺陷的可能性^[18];此外,依据 Ti-Fe 二元相图可见^[19],Ti 和 Fe 之间容易形成 TiFe_2 、 TiFe 等脆性金属间化合物,影响接头的性能^[20-23];另外,钛和钢在发生合金化反应生成脆性金属间化合物的同时,还会导致钛复层的稀释、破坏,所以焊接接头相比于母材在耐腐蚀等方面会出现严重降低。

目前,国内外学者针对钛/钢复合板的焊接技术,已经开展了较为广泛的研究,涉及到的主要焊接方法,包括常规的钨极氩弧焊、熔化极气体保护焊、激光焊等,上述焊接技术已经在促进复合板的工程化应用过程中发挥了重要的作用。

1 钛/钢复合板焊接技术的现状分析

对于钛/钢复合板的焊接而言,如何在焊接过程中有效抑制钛复层和钢基层的合金化反应,从而降低脆性 Ti-Fe 金属间化合物的生成,同时减轻甚至避免钛复层稀释问题的发生,是实现其高强、可靠连接的关键,也是国内外专家学者关注的焦点。目前,主要采用的方式之一是通过不同的坡口设计,利用分层焊接的方式来避免钛和钢的直接接触;另一种

常用的方式是焊接时添加过渡层,来阻碍在高温下钛和钢的直接接触,从而实现对于接头微观组织与性能的调控;另外,也有部分学者为了提高复合板焊接的效率,尝试采用激光一次性熔透的方式来进行钛/钢复合板的高效化焊接。

1.1 坡口形式的设计

通过不同的坡口结构设计,结合分层焊接的方法,可以避免焊接过程中熔化的钢基层与钛复层直接接触,从而达到降低接头中脆性 Ti-Fe 金属间化合物生成的目的。

其中,一种常用的处理方式是焊前将待焊区域的钛复层进行清除,随后仅对余下的钢基层进行焊接,然后在钛复层侧添加补偿板,最后再进行补偿板与钛复层之间的焊接。为了保证熔透的情况下减少钢基层一侧的焊丝填充量,设计坡口时会通常选择 Y 型坡口(图 1)。因为与钢基层接触的钛复层焊前被进行了清除,因此焊接时,避免了熔化的钢基层与钛复层的接触,从而可以避免金属间化合物的形成^[24]。焊后,通过在钛复层侧增加钛盖板进行补偿,再进行钛盖板与钛复层之间的焊接(图 1a)。这种工艺对焊接工艺控制的要求较为简单,获得的接头基本可以满足复合板服役过程中对于耐腐蚀性的要求,但是钛盖板仅在两侧位置实现了其与钛复层的冶金结合,而在内部仅为机械搭接;尤其需要注意的是钛复层被清理而预留的位置,会在焊后形成一个具有中空结构特征的区域(图 1a),从而严重降低接头在服役过程中的力学性能。为了降低钛盖板与钢基层焊缝之间的中空结构对于接头力学性能的不利影响,有学者在中空区域增加了一层与复层材质一致的钛填条(图 1b)^[25-27]。钛填条起到了一定的增强结构安全性的作用,但是钛填条与钢基层,以及钛盖板之间并未形成实质的冶金结合,因此会严重影响焊缝背弯等性能。为了进一步增强接头的塑韧性,有学者在焊前清除钛复层后,同样先对钢基层进行焊接,随后使用钛填条对清除掉的钛复层进行补偿,然后再将钛填条与钛复层进行焊接^[28-29](图 1c),采用这种方式可以使钛填条与钛复层之间形成冶金结合。但是,值得注意的是,在这种焊接方式下,钛填条与钢基层之间仍难以完全实现有效的冶金结合,这将会在一定程度上影响接头服役过程中的可靠性。

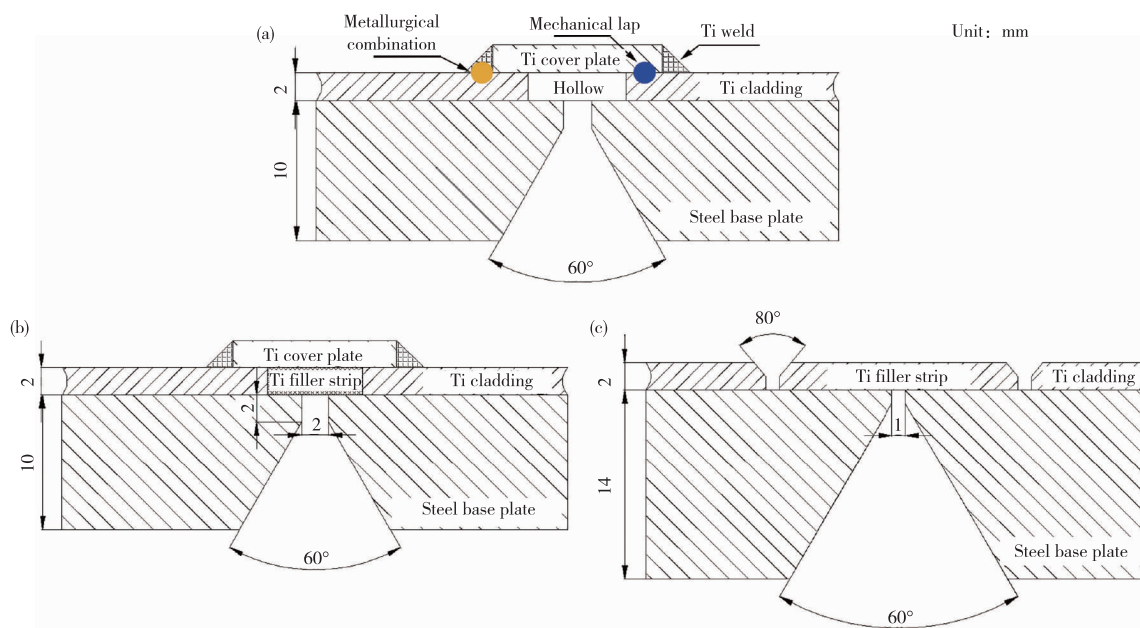


图1 不同钛复层补偿方式(Y型坡口):

(a) 钛盖板; (b) 钛盖板+钛填条; (c) 钛填条

Fig. 1 Different Ti cladding compensation methods(Y-groove):

(a) Ti cover plate; (b) Ti cover plate + Ti filler strip; (c) Ti filler strip

另一种常用的处理方式是直接在钛/钢复合板上机加工出两侧不对称V型、单侧普通V型以及Y型等坡口形式(图2),然后分别进行钢基层、过渡层以及钛复层的焊接。常用的焊接工艺是先对钢基层进行焊接,然后填充一层过渡层,最后再对钛复层进行焊接^[30-38](图2a)。一方面,由于V型坡口的存在,在焊接钢基层时,能够避免熔化的钢与钛复层的直接接触;另一方面,在焊接钛复层前,通过添加过渡层来阻碍钛复层和钢基层之间的直接接触。该技术可以有效降低钛复层与钢基层之间的合金化反应,同时也在一定程度上保证了钛侧焊缝的完整性。然而,焊接过程中的热输入不可避免的会使接头熔合区附近的钛/钢界面处形成较厚的Ti-Fe金属间化合物,影响接头性能,需要引起注意。因此,有学者为了进一步改善接头的性能,在添加过渡层的基础上,提出再增加一层隔离层(图2b、c)的理念。例如,张亚运等^[39]采用单侧V型坡口(图2b),在焊接完隔离层(Ni层)之后,继续采用该Ni基焊丝对钢基层进行填充焊接,最后采用纯钛焊丝完成钛复层的焊接,因焊缝中的Cr、Ni元素扩散到了母材中,

导致焊后钛层组织以 β -Ti为主。但是焊缝中会含有 NiTi_2 、 Ni_3Ti 、 TiFe 、 TiCr_2 和 TiFe_2 等多种化合物,对接头的塑韧性会产生一定的影响,需要引起注意。此外,安同邦等^[40]对钛/钢复合板开设不对称双V型坡口,在钛复层侧先覆盖一层Cu隔离层,再依次对过渡层、钛复层及钢基层进行填充。焊后发现,各区域结合良好,无气孔、裂纹等焊接缺陷。除此之外,Y型(图2d)坡口也较为常用,采用这种坡口时,通过依次焊接钛复层、过渡层以及钢基层,达到降低化合物生成、避免钛复层稀释的目的^[41-43]。

可见,合理的坡口设计,对于减少焊接材料的添加量、便于实施分层焊接以及添加过渡层、隔离层等方面可以起到积极的作用。同时,根据不同服役条件的需要,结合不同的焊接工艺,对钛/钢复合板进行施焊,可以获得性能良好的接头。但是需要引起注意的是坡口的设计与制备、钛复层的清除和补偿,以及多层多道焊方式的采用,会增加焊接工艺的复杂程度。另外,焊接过程中,需要涉及过渡层材料的合理选择和添加等技术,也在一定程度上增加了上述焊接工艺的难度。

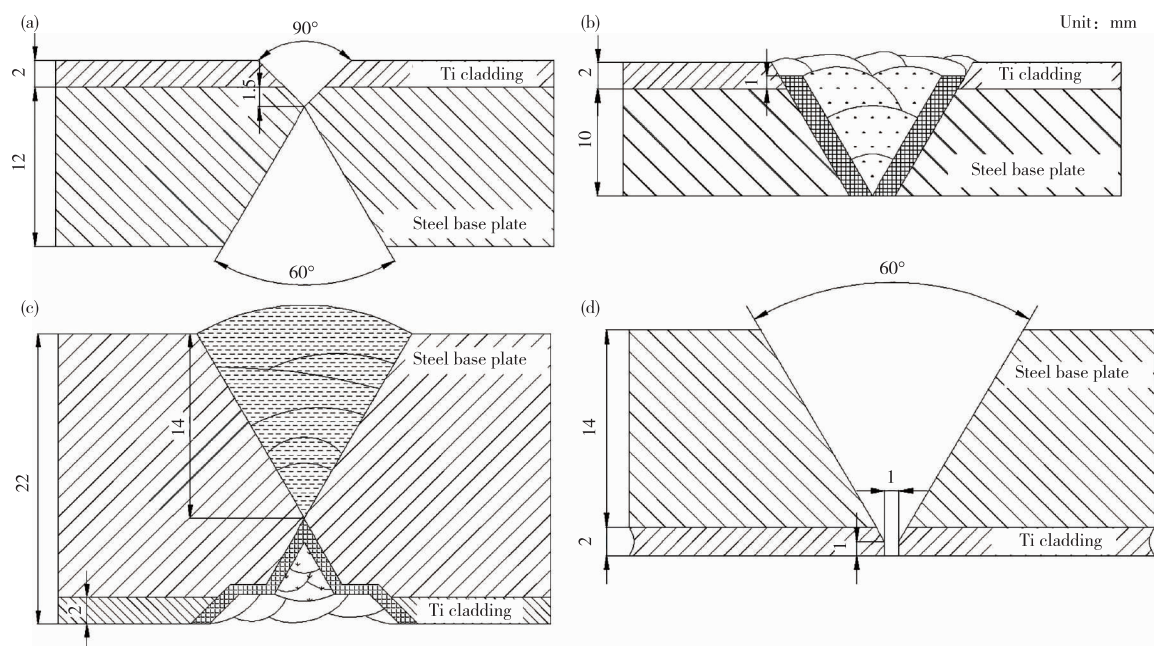


图 2 分层焊接的不同坡口形式:(a)不对称 V 型;(b)V 型;(c)不对称 V 型;(d)Y 型

Fig. 2 Different groove forms of layered welding:

(a)asymmetric V-shape(b)V-shape(c)asymmetric V-shape(d) Y-type

1.2 过渡层材料的设计与添加

依据 Ti-Fe 二元相图可见,在焊接过程中当熔化的钛和钢直接接触时,不仅会在焊缝内部形成脆性的金属间化合物,而且过度的合金化反应还会导致钛复层的稀释,从而恶化接头的性能,在二者之间添加过渡层是一种解决上述问题的良好方式。

从 Ni-Fe 相图可见,Ni 可以与 Fe 无限固溶,并且与 Ti 形成的金属间化合物有较好的塑韧性,其脆性小于 Ti-Fe 金属间化合物^[44-46]。而将 V 添加到钢铁材料中,可以提高其高温性能,并且 V 可以与 Ti 无限固溶,不会生成金属间化合物^[47]。因此在钛/钢复合板的分层焊接时,Ni、V 等金属常被选择作为过渡层材料,来进行复合板的焊接。例如,在钛/钢复合板的激光+MAG 复合焊接中^[43],分别选择了 Ni 和 V 作为过渡层金属进行焊接。研究发现当 Ni 作为过渡层金属时,在复层与过渡层的界面处生成了 Ni-Ti 金属间化合物;而当 V 作为过渡层金属时,焊缝中没有金属间化合物的产生,仅发现单相的 Ti、V 及它们的固溶体存在。添加 Ni、V 作为过渡层的接头均具有良好的抗拉性能,分别为 396、398 MPa,相比较于拉伸强度仅为 249 MPa 的直接焊接头,性能得到了进一步提升。此外,对两者进行冲击试验发现,二者的平均冲击功分别为 78、99 J,V 作为过渡层材料的接头性能明显优于 Ni 作为过

渡层。

除了 Ni、V 可以作为过渡层使用外,Cu 因与 Fe 之间不存在金属间化合物,并可以通过控制焊接热输入减少 Cu-Ti 金属间化合物的数量,也是适用于钛/钢复合板焊接的过渡层材料之一^[48-51]。例如,在复合板激光焊接时,NING 等^[41]在完成钛复层焊接后,采用填丝激光焊的方式在其上方堆积了一层铜金属,最后再焊接钢基层。由于 Cu 的熔点远小于 Fe 的熔点,因此在焊接钢基层时,铜过渡层会发生脱溶现象,导致过渡层的厚度在不同位置上会存在较大差异,在 Cu 较厚的区域,Fe 和 Ti 被有效地隔离开来,同时虽然 Cu 和 Ti 发生了合金化反应,产生了金属间化合物,但其分布在塑韧性较好的 Cu 中,能够有效地避免裂纹的扩展,从而起到了提高接头性能的作用。但是由于焊接时存在搅拌作用,因此仍难以避免在 Cu 薄弱区以及界面处产生金属间化合物,导致裂纹等缺陷的产生,在一定程度上限制了接头性能的进一步提高。

为进一步减少接头中,尤其是界面处金属间化合物的数量,达到提高焊接接头质量的目的,近年来多组元合金已被用来作为钛/钢复合板焊接的过渡层材料。例如,有学者^[33-34,37]以 Cu 为基体成分,添加 Ag、Mo、Nb、Cr 等合金粉制成 Cu 基药芯焊丝,通过 TIG 焊技术,实现了过渡层的熔覆与添加,焊接过程中 Mo 与 Ti 可以形成固溶体,能够降低焊缝中 Ti

的含量,从而抑制 Ti-Fe 金属间化合物的形成,并且由于过渡层中含有流动性强的 Ag 元素,能够起到阻碍裂纹扩展的作用,因此相比于纯铜金属过渡层而言,多元合金作为过渡层的接头的质量得到了改善。此外,Cu-Nb、Cu-V 以及 Cu-V-Ag^[30-32,36,38]等合金作为过渡层材料使用时,也能起到积极的效果。例如,研究发现当合理控制 Cu-Nb 系合金中 Nb 的含量时(Cu₂₀Nb),接头中的裂纹会得到有效抑制,这是因为焊接过程中产生的 Fe-Nb、Fe-Ti 金属间化合物分布在柔软的 Cu 基固溶体中,可以显著提高金属的抗裂性能;V 元素的添加可以稀释金属间化合物的数量,但是需要优化 V 的含量才能保证焊后接头中没有裂纹的产生;研究还发现在药芯焊丝中添加 Ag 元素,可以获得低脆性的 Ti-Ag 金属间化合物,同时因其具有良好的流动性,还可以起到很好的避免接头中产生裂纹的作用。

除了采用多元合金的方式提高过渡层的作用效果外,添加多层过渡层(或过渡层+隔离层),也是一种常见且有效的方式。例如,在复合板的多层多道焊时^[35,52],通过 MIG+TIG 技术,辅以合理的坡口设计,先后填充 Cu 以及 V 两种金属作为过渡层,可以有效降低接头中裂纹的产生。焊后接头中存在明显的分区现象,钛复层与钢基层之间的相互扩散作用得到有效抑制。但因 Cu-V 过渡层区域发生了强烈的冶金反应,产生了 V 基及 Cu 基固溶体,V 基固溶体分布在 Cu 基固溶体中,这会导致熔体过冷现象的发生,使产生裂纹的概率增加,CHU 等的研究也得到了相似的结果^[32]。研究还证实,焊缝中 V 可以有效阻隔 Fe 和 Cu 进入 Ti 焊缝,避免 Ti-Fe 及 Ti-Cu 金属间化合物的产生,对于提高焊缝的综合性能具有较大的贡献。通过该方式添加过渡层获得的接头,性能显著提高,焊后接头的拉伸强度可达 546 MPa,且表现出良好的塑性。

此外,史倩茹等^[42]分别选用 Ni-Cr-Fe(近钢层过渡层材料)、Ti-Al-Mo 和 Ti-Ni-Al 三种合金粉作为过渡材料,进行了复合板的焊接。结果表明,选择 Ti-Ni-Al 作为近钛层过渡层的接头中晶粒更加细小,组织的过渡效果也更好。焊后在钛层与近钛层界面处的主要成分为 Ti、Ni 及 Cr,焊缝组织由钛层粗大的等轴晶逐渐转变为过渡层细小的等轴晶或树枝晶,并与钢层的铁素体和珠光体组织相互交织连接,实现了钛焊缝与钢焊缝的优质结合,最终该接头的抗拉强度为 501 MPa,达到复合板接头等强匹配的效果。为了更好地达到阻断钛复层与钢基层接触

的目的,还有学者提出在填充过渡层之前,可以在坡口处预置一层隔离层。例如,张亚运等^[39]在钛/钢复合板上加工出 V 型坡口后,首先在坡口处熔覆 Ni-Cr-Mo 焊丝,形成一层 3 mm 厚的隔离层,然后通过熔覆 Ni 基焊丝填充一层过渡层,最后分别进行钢基层和钛复层的焊接。研究发现,在焊接热循环的作用下,界面处的钛复层与钢基层冶金结合良好,并且未发现焊接裂纹。过渡层中的 Ni、Cr、Mo 等元素通过扩展到 Ti 焊缝中,使钛复层侧焊缝中除了存在 β -Ti 以外,还存在 NiTi₂、TiFe、TiFe₂ 等硬脆的金属间化合物,对于焊缝的力学性能会产生轻微的不利影响,抗拉强度约为 425 MPa,达到母材的 97%。可见,隔离层及过渡层的联合添加,可以有效阻碍 Fe 和 Ti 的直接接触,保证接头的质量。

另外,安同邦等^[40]选用同样的方式,在钛/钢复合板上开设不对称 V 型坡口,并在钛复层坡口处熔覆一层 Cu 隔离层,然后依次在过渡层、钛复层以及钢基层上,分别填充纯 Nb、纯 Ti 焊丝、508 焊条。研究发现,Cu 隔离层的存在可以有效阻挡 Fe 进入焊缝,从而减少了 Ti-Fe 金属间化合物的数量。此外,在 Nb/Ti 过渡区主要以 Ti 和 Nb 的固溶体为主,焊缝中发生了固溶强化现象,但因同时存在着 CuTi₃ 等硬脆的金属间化合物,会在一定程度上影响焊缝的性能。

可见,在钛/钢复合板的焊接过程中,合理添加纯金属、合金或多层材料作为过渡层(或隔离层),结合多层多道焊技术,能够很好地抑制 Ti-Fe 金属间化合物的生成。但是在复合板焊接中关于过渡层(隔离层)与母材之间作用机制等方面的研究,仍有待于进一步深入。另外,价格较贵的合金元素或金属的添加带来的焊接成本的增加,以及当前复合板焊接工艺过程复杂等因素,也需要引起足够的重视。

1.3 穿透焊接

通过多层多道焊接,以及分层焊接+过渡层等形式,均可以起到减少接头中金属间化合物数量、提高性能的效果,研究也证实降低焊接热输入对减少金属间化合物的数量会起到积极的作用。相比较于传统的电弧焊方法,高能束焊接因其具有能量密度高且焊接热输入低的显著优点,在钛/钢复合板的焊接方面具有很好的应用潜力,但是目前在钛/钢复合板高能束焊接方面的研究,还处于起步阶段。

郑祖山^[53]采用激光焊接技术,进行了钛(TA2)/钢(409 不锈钢)复合板的单面焊双面成形焊接。研究发现,激光辐照钛复层和钢基层侧表面时,均可以实

现其焊接,但前者焊接效果不如后者,分析认为以钛复层为辐照表面的焊缝中钛复层被稀释的程度高于以钢基层为辐照表面的焊缝,因此以钛复层为辐照表面的焊缝中 Ti 的含量更高,导致 Ti-Fe 金属间化合物的含量增多以及热应力增大,最终致使焊缝中裂纹增多、力学性能下降。拉伸测试结果表明,以钢基层为辐照表面的接头的抗拉强度能够达到 408 MPa,为基体的 78%。为了抑制金属间化合物的生成,该学者继续以性能较好的钢基层作为辐照表面,同时在钢表面熔覆厚度为 0.1 mm 的 Cu 箔,再进行激光焊接。研究发现,焊后接头中存在大量 Fe-Cr 固溶体、Cu 固溶体以及 FeTi₂,且未发现焊接裂纹的存在,接头的性能得到改善,达到了复合板基材的 88.6%,相比较于未添加 Cu 过渡层的接头提升了 10%。虽然通过激光焊接技术可以实现复合板的高效化焊接,但是复层的稀释问题,仍有待于后续进行深入的研究。

初步的研究结果表明,利用高能束热源能量密度高、热输入低以及可控性强的特点,实现复合板的穿透焊接,相比于多层多道焊接技术,可以有效地提高焊接效率。同时,可以通过添加夹层金属的方式,进一步提高焊接接头的质量。但是目前在采用高能束焊接技术进行复合板的焊接,包括在过渡层金属类型的选择以及添加方式等方面,仍待于进行系统而深入的研究。

2 结语

目前通过结合添加过渡层的多道焊施焊技术进行钛/钢复合板焊接的研究与及其工程化应用,已经比较成熟。但是多层多道焊工艺存在过程繁琐、效率低的缺点,在一定程度上限制了其更为广泛的应用。虽然,利用激光、电子束等高能束焊接技术能量密度高、热输入低的特点,进行复合板的一次性熔透焊接,在提高复合板焊接效率等方面,已经表现出了很好的潜力,但是在如何选择、设计以及添加过渡层金属来进一步提高接头的质量等领域,仍亟待深入而系统的研究,这也将是该领域未来重点发展的方向之一。此外,一些新兴的焊接技术,如固相的搅拌摩擦焊接技术,因其具备焊接热输入低的显著优点,所以可以有效降低复合板在焊接过程中脆性金属间化合物的形成,该技术目前在铝/铜复合板的焊接领域已经得到了初步的应用,并且获得了较好的效果。由于复合板在结构与焊接特征方面有一定的相似性,所以其在钛/钢复合板的焊接领域也具有一定的应用前景。因此,如何推动一些新型焊接技术在

钛/钢复合板焊接领域的应用,从而进一步提高其焊接效率与质量,也将是该领域未来发展的重要方向之一。

随着钛/钢复合板应用领域的持续增加以及焊接技术的不断发展,焊接技术在促进钛/钢复合板的工程应用过程中,必将发挥越来越重要的作用。同时,对于钛/钢复合板焊接的实验与理论研究,也将为难焊的异种金属以及其他复合板的焊接提供指导和借鉴。

参考文献:

- [1] 骆宗安,杨德翰,谢广明,等. 真空制坯热轧钛/钢复合板工艺及性能[J]. 钢铁研究学报, 2019, 31(2): 213-220.
LUO Zongan, YANG Dehan, XIE Guangming, et al. Production process and performance of Ti-steel vacuum roll-cladding plates [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019, 31(2): 213-220.
- [2] 苑晨晨,蒋健博,李慧,等. 超轻双相 LZ91 镁锂合金搅拌摩擦搭接焊接技术研究[J]. 有色金属工程, 2020, 10(7): 26-31.
YUAN Chenchen, JIANG Jianbo, LI Hui, et al. Study on friction stir lap welding of ultraligh dual-phase LZ91 Mg-Li alloy[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(7): 26-31.
- [3] 曾周燊,王光磊,江姗,等. 真空轧制钛/钢复合板的组织与性能[J]. 宽厚板, 2016, 22(5): 6-9.
ZENG Zhouyu, WANG Guanglei, JIANG Shan, et al. Microstructure and mechanical properties of titanium clad steel plate by vacuum rolling cladding [J]. Wide and Heave Plate, 2016, 22(5): 6-9.
- [4] 沈春豫,樊科社,李莹,等. 爆炸焊接钛/钢复合板残余应力分布状态研究[J]. 中国化工装备, 2019, 21(4): 31-35.
SHEN Chunyu, FAN Keshe, LI Ying, et al. Study on residual stress distribution of explosive welded titanium/steel composite plate [J]. China Chemical Industry Equipment, 2019, 21(4): 31-35.
- [5] YU C, XIAO H, YU H, et al. Mechanical properties and interfacial structure of hot-roll bonding TA2/Q235B plate using DT4 interlayer [J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 695: 120-125.
- [6] YANG D H, LUO Z A, XIE G M, et al. Interfacial microstructure and properties of a vacuum roll-cladding titanium-steel clad plate with a nickel interlayer [J]. Materials Science and Engineering A, 2019, 753: 49-58.
- [7] HANG S U, LUO X B, CHAI F, et al. Manufacturing

- technology and application trends of titanium clad steel plates [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2015, 22(11): 977-982.
- [8] 许哲峰. 热压扩散法制备钛/钢复合板的研究进展[J]. 热加工工艺, 2017, 46(10): 14-17.
XU Zhefeng. Research progress of titanium steel composite plate prepared by hot-pressing diffusion method [J]. Hot Working Technology, 2017, 46(10): 14-17.
- [9] 胡杰, 谢荣, 杜训柏. 钛/钢复合板加工技术及其在船海工程中的应用[J]. 江苏船舶, 2016, 33(6): 6-8, 12.
HU Jie, XIE Rong, DU Xunbai. Processing technology of titanium/steel composite plate and its application in marine engineering [J]. Jiangsu Ship, 2016, 33(6): 6-8, 12.
- [10] 闫力. 钛/钢复合板的特点及应用领域[J]. 中国钛业, 2011(3): 12-14.
YAN Li. Characteristics and applications of Ti/steel composite sheets [J]. China Titanium Industry, 2011(3): 12-14.
- [11] 段恒杰. 钛/钢复合板在真空制盐装置蒸发室的应用[J]. 钛工业进展, 1993(1): 19-22.
DUAN Hengjie. Application of titanium/steel composite plate in evaporation chamber of vacuum salt making plant [J]. Titanium Industry Progress, 1993(1): 19-22.
- [12] 吴雪飞, 段红涛, 王生章. 工程机械焊接工艺的发展现状及发展趋势[J]. 内燃机与配件, 2020(9): 117-118.
WU Xuefei, DUAN Hongtao, WANG Shengzhang. Development status and development trend of welding technology for construction machinery [J]. Internal Combustion Engine Parts, 2020(9): 117-118.
- [13] 赵志锋. 我国焊接技术的现状与发展趋势[J]. 时代农机, 2016, 43(7): 23-24.
ZHAO Zhifeng. Current status and trend of welding technology in China [J]. Times Agricultural Machinery, 2016, 43(7): 23-24.
- [14] 宋爱平. 钛/钢复合板焊接技术[J]. 钢结构, 2012, 27(7): 55-57.
SONG Aiping. Welding technology of titanium steel composite plates [J]. Steel Construction, 2012, 27(7): 55-57.
- [15] 焦阳阳. 钛复合板焊接技术[J]. 焊接技术, 2018, 47(9): 76-82.
JIAO Yangyang. Welding technology of titanium clad plate [J]. Welding Technology, 2018, 47(9): 76-82.
- [16] 祝要民, 李青哲, 邱然锋, 等. 钛/钢异种金属焊接的研究现状[J]. 电焊机, 2016, 46(11): 78-82, 106.
ZHU Yaomin, LI Qingzhe, QIU Ranfeng, et al. Researching status of dissimilar metal welding of titanium and steel [J]. Electric Welding Machine, 2016, 46(11): 78-82, 106.
- [17] 吕攀, 王克鸿, 朱和国. 钛合金与不锈钢异种金属焊接的研究现状[J]. 热加工工艺, 2017, 46(13): 26-32.
LYU Pan, WANG Kehong, ZHU Heguo. Research status of titanium alloy and stainless steel dissimilar metal welding [J]. Hot Working Technology, 2017, 46(13): 26-32.
- [18] 贾海涛, 张睿伟. 钛及钛合金的焊接性分析与应用[J]. 焊接技术, 2020, 49(1): 55-60.
JIA Haitao, ZHANG Ruiwei. Analysis and application of weldability of titanium and titanium alloys [J]. Welding Technology, 2020, 49(1): 55-60.
- [19] MURRAY J L. Phase diagrams of binary titanium alloys [M]. ASM: International Novelty, 1987: 99-111.
- [20] 刘阳, 张贵锋, 王士元. 钛合金与不锈钢异种金属钎焊的研究进展[J]. 焊管, 2019, 42(3): 1-7.
LIU Yang, ZHANG Guifeng, WANG Shiyuan. Research progress on dissimilar metal brazing of titanium alloy and stainless steel [J]. Welding Pipe and Tube, 2019, 42(3): 1-7.
- [21] 刘艳, 李丽. 钛/钢连接方法的研究[J]. 科技创新导报, 2014, 11(26): 91-96.
LIU Yan, LI Li. Research on titanium/steel connection method [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2014, 11(26): 91-96.
- [22] 刘继雄, 张杭永, 郭佳林, 等. 界面金属间化合物对钛/钢复合板力学行为的影响[J]. 中国钛业, 2014(2): 24-28.
LIU Jixiong, ZHANG Hangyong, GUO Jialin, et al. Effects of interfacial intermetallic compounds on mechanical behaviors of titanium clad steel plates [J]. China Titanium Industry, 2014(2): 24-28.
- [23] 张义福, 张华, 苏展展, 等. 钛/钢激光焊接头中脆性化合物调控研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(6): 116-123.
ZHANG Yifu, ZHANG Hua, SU Zhazhan, et al. Research progress on the regulation of brittle compounds in titanium alloy/steel dissimilar metal joint by laser welding [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019, 42(6): 116-123.
- [24] 许书贤, 葛蔚, 李艳. 钛/钢复合板烟囱钛面焊接质量的控制[J]. 焊接技术, 2019, 48(增刊2): 77-79.
XU Shuxian, GE Wei, LI Yan. Welding quality control of titanium surface of titanium/steel composite plate chimney [J]. Welding Technology, 2019, 48(S2): 77-79.
- [25] 岳明生. 烟囱钢内筒钛/钢复合板焊接技术[J]. 建筑技

- 术开发,2014,41(6):30-33.
- YUE Mingsheng. Titanium steel composite plate welding technique for steel inner cylinder chimney[J]. Building Technique Development,2014,41(6):30-33.
- [26] 胡浈艺,王文平. 电厂烟囱用钛/钢复合板焊接工艺分析[J]. 机械研究与应用,2016,29(4):160-162,165.
- HU Longyi, WANG Wenping. Welding progress analysis on the titanium clad steel plate of power plant chimney [J]. Mechanical Research & Application, 2016,29(4):160-162,165.
- [27] 刘亚丽. 钛-钢复合板 CMT+激光焊接工艺研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.
- LIU Yali. Research on CMT+laser welding process of titanium/steel composite plate [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2018.
- [28] 杨军,关尚虎,田磊,等. TA1/X65 复合板对焊工艺及焊缝组织和性能分析[J]. 焊管,2016,39(10):30-34.
- YANG Jun, GUAN Shanghu, TIAN Lei, et al. Analysis on the butt welding process of TA1/X65 composite plates and weld microstructure and properties [J]. Welded Pipe and Tube,2016,39(10):30-34.
- [29] 毕宗岳,杨军,田磊,等. TA1/X65 钛/钢复合板对焊工艺及焊缝组织和性能[J]. 材料导报,2016,30(增刊2):558-563.
- BI Zongyue, YANG Jun, TIAN Lei, et al. Investigation on the welding progress and microstructure and mechanical property of butt joints of TA1/X65 titanium steel clad plates[J]. Materials Reports,2016,30(S2):558-563.
- [30] CHU Q L, ZHANG M, LI J H, et al. Intermetallics in CP-Ti/X65 bimetallic sheets filled with Cu-based flux-cored wires[J]. Materials & Design,2016,90:299-306.
- [31] CHU Q L, BAI R X, ZHANG M, et al. Microstructure and mechanical properties of titanium/steel bimetallic joints [J]. Materials Characterization, 2017, 132: 330-337.
- [32] CHU Q L, ZHANG M, LI J H, et al. Experimental investigation of explosion-welded CP-Ti/Q345 bimetallic sheet filled with Cu/V based flux-cored wire [J]. Materials and Design,2015,67:606-614.
- [33] 宋丽平,高章虎,张保林. 钛板与管线钢复合板过渡层焊接工艺研究[J]. 焊接技术,2020,49(6):60-62.
- SONG Liping, GAO Zhanghu, ZHANG Baolin. Study on welding technology of transition layer between titanium plate and pipeline steel composite plate[J]. Welding Technology,2020,49(6):60-62.
- [34] 李继红,王晓伟,韩挺,等. Cu 基材料作焊接过渡层 TA1/Q345 复合板接头的组织与性能[J]. 金属热处理,2017,42(8):49-53.
- LI Jihong, WANG Xiaowei, HAN Ting, et al. Microstructure and properties of TA1/Q345 composite plate joint with Cu based material for welding transition layer[J]. Heat Treatment of Metals,2017,42(8):49-53.
- [35] 毕宗岳,杨军,刘海璋,等. TA1/X65 复合板焊接工艺及焊缝组织和性能研究[J]. 金属学报,2016,52(8):1017-1024.
- BI Zongyue, YANG Jun, LIU Haizhang, et al. Investigation on the welding process and microstructure and mechanical property of butt joints of TA1/X65 clad plates[J]. Acta Metallurgica Sinica,2016,52(8):1017-1024.
- [36] CHU Q L, ZHANG M, LI J H, et al. Joining of CP-Ti/Q345 sheets by Cu-based filler metal and effect on interface[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015,225:67-76.
- [37] 张敏,王晓伟,韩挺,等. 中间 Cu 层对 TA1/X65 复合板熔焊接头性能的影响[J]. 材料研究学报,2018,32(2):81-89.
- ZHANG Min, WANG Xiaowei, HAN Ting, et al. Effect of intermediate Cu-layer on mechanical properties of welded joints of TA1/X65 composite plate[J]. Chinese Journal of Materials Research,2018,32(2):81-89.
- [38] CHU Q L, TONG X W, XU S, et al. The formation of intermetallics in Ti/Steel dissimilar joints welded by Cu-Nb composite filler [J]. Journal of Alloys and Compounds,2020,828:154389.
- [39] 张亚运,魏金山,齐彦昌,等. TA2/Q235 复合板用 Ni 基过渡层熔焊接头组织和性能[J]. 焊接学报,2019,40(1):75-79,164.
- ZHANG Yayun, WEI Jinshan, QI Yanchang, et al. Microstructure and properties of Ni based transition layer fusion welded joint for TA2/Q235 composite plate[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019,40(1):75-79,164.
- [40] 安同邦,由恒源,李弟,等. TA2/Q235 复合板 Nb/Cu 双过渡层熔焊焊缝组织性能[J]. 热加工工艺,2019,48(9):18-21.
- AN Tongbang, YOU Hengyuan, LI Di, et al. Microstructure and property of fusion weld seam of TA2/Q235 composite plat with Nb/Cu double transition layers [J]. Hot Working Technology,2019,48(9):18-21.
- [41] NING J, ZHANG L J, JIANG G C, et al. Narrow gap multi-pass laser butt welding of explosion welded CP-Ti/Q235B bimetallic sheet by using a copper interlayer[J].

- Journal of Alloys and Compounds, 2017, 701: 587-602.
- [42] 史倩茹, 张敏, 吴伟刚. 钛-钢爆炸复合板熔焊对接过渡层焊接材料[J]. 材料工程, 2018, 46(9): 138-143.
SHI Qianru, ZHANG Min, WU Weigang. Transition layer welding materials of fusion welding joint for titanium-steel explosive composite plate[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(9): 138-143.
- [43] 王洋. (Ni、V)过渡层对钛/钢复合板 MAG+激光焊接接头组织及性能的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
WANG Yang. Effect of nickel and vanadium intermediate layer on microstructure and properties of MAG+Laser welded joint of titanium-steel composite plate [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [44] SAM S, KUNDU S, CHATTERJEE S. Diffusion bonding of titanium alloy to micro-duplex stainless steel using a Nickel alloy interlayer: interface microstructure and strength properties[J]. Materials and Design, 2012, 40: 237-244.
- [45] 马英, 容耀, 王敬忠. 轧制钛/钢复合板过渡层的研究[J]. 钛工业进展, 2010, 27(2): 24-27.
MA Ying, RONG Yao, WANG Jingzhong. Research on transition layer of rolled titanium/steel cladplate[J]. Titanium Industry Progress, 2010, 27(2): 24-27.
- [46] KUNDU S, CHATTERJEE S. Characterization of diffusion bonded joint between titanium and 304 stainless steel using a Ni interlayer [J]. Materials Characterization, 2007, 59(5): 631-637.
- [47] 张鹏贤, 李世龙. 铬、铌、钒金属粉末为过渡层的钛/钢电阻钎焊研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(21): 53-56.
ZHANG Pengxian, LI Shilong. Resistance brazing of titanium/steel using Cr, Nb, V metal powder as transition layer [J]. Hot Working Technology, 2018, 47(21): 53-56.
- [48] WANG T, ZHANG B G, CHEN G Q, et al. Electron beam welding of Ti-15-3 titanium alloy to 304 stainless steel with copper interlayer sheet[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(10): 829-834.
- [49] 刘德义, 周纯, 丛立军, 等. 铜中间层钛-钢扩散复合界面组织与性能[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(4): 105-109.
LIU Deyi, ZHOU Chun, CONG Lijun, et al. Microstructure and mechanical properties of diffusion bonded joints between titanium and low carbon steel with copper interlayer [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(4): 105-109.
- [50] 边婧如, 侯军才, 张秋美, 等. 焊接电流对铜中间层钛/钢异种金属等离子焊接接头成形性能及显微组织的影响[J]. 机械工程材料, 2020, 44(6): 38-42, 48.
BIAN Jingru, HOU Juncai, ZHANG Qiumei, et al. Effect of welding current on formability and microstructure of plasma arc cladding titanium/steel dissimilar metal joint with copper intermediate layer [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2020, 44(6): 38-42, 48.
- [51] 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, 115.
LIU Deyi, CAI Jianwei, REN Ruiming. Interface microstructure and properties of Ti/Cu interlayer/steel diffusion welded composite pipe [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(1): 49-52, 115.
- [52] 杨军, 毕宗岳, 牛辉, 等. TA1/X65 复合板焊接工艺及焊缝组织和性能研究[J]. 焊管, 2015, 38(6): 1-10.
YANG Jun, BI Zongyue, NIU Hui, et al. Research on welding process, microstructure and mechanical property of TA1/X65 clad plates [J]. Welding Pipe and Tube, 2015, 38(6): 1-10.
- [53] 郑祖山. 冷轧钛/钢层状复合板激光焊接工艺与力学性能研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2018.
ZHENG Zushan. Study on laser welding technology and mechanical properties of cool rolled titanium/steel laminated composite plate [D]. Suzhou: Soochow University, 2018.