

# 钛/钢异种金属高能束焊接研究进展

李思阳

(陕西航空职业技术学院, 陕西 汉中 723000)

**摘 要:** 通过对钛/钢异种金属高能束焊接的研究现状阐述, 分析了高能束直接焊接、间接焊接(添加中间层、复合中间层)方法的优缺点, 认为通过控制热源位置、控制热输入、添加中间层等方法可调控焊缝中Ti-Fe熔化比, 抑制Ti-Fe金属间化合物的生成; 利用高熵合金具有形成单相固溶体的优势, 将高熵合金作为中间层可以实现焊缝高熵化, 进一步提高钛/钢焊接接头的综合性能, 这将是未来钛/钢异种金属焊接研究的重点。

**关键词:** 钛/钢; 高能束焊接; 中间层; 高熵化

**中图分类号:** TG456.7

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.19291/j.cnki.1001-3938.2024.05.002

## Research Progress of Ti/Steel Dissimilar Metal High-energy Beam Welding

LI Siyang

(Shaanxi Aeronautical Polytechnic Institute, Hanzhong 723000, Shaanxi, China)

**Abstract:** Based on the research status of high energy beam welding of titanium/steel dissimilar metals, the advantages and disadvantages of high energy beam direct welding and indirect welding (adding interlayer and compound intermediate layer) methods were analyzed, and it was concluded that the melting ratio of Ti-Fe in the weld could be controlled by controlling the location of heat source, controlling the heat input, adding intermediate layer and so on, so as to inhibit the formation of Ti-Fe intermetallic compounds. Using high entropy alloy has the advantage of forming single phase solid solution, and using high entropy alloy as the interlayer can realize high entropy of weld and further improve the comprehensive performance of titanium/steel welded joint, which will be the focus of future titanium/steel dissimilar metal welding research.

**Key words:** Ti/steel; high-energy beam welding; interlayer; high-entropy

## 0 前 言

钛/钢异种金属构件兼具钛合金的质量轻、比强度高、耐腐蚀性能优异以及钢的易加工、价格低廉等优势, 在航空航天、核电、能源、汽车、电子、石油石化、船舶等领域得到广泛应用。但由于脆性金属间化合物(如TiFe、TiFe<sub>2</sub>和TiCr<sub>2</sub>)的形成, 导致接头力学性能恶化, 使钛及其合金与不锈钢的焊接存在困难。因此, 对该焊接问题的研究具有重大理论意义和应用前景<sup>[1-4]</sup>。

目前钛/钢的常见焊接方法有电弧焊、固相焊和高能束焊<sup>[5-6]</sup>。相比于其他焊接方法, 高能束焊

接具有较小的热输入、焊接残余应力和形变, 焊接参数精确可调, 工艺适应性强, 特别适合异种金属的焊接, 钛/钢异种金属高能束焊接已经成为国内外的研究热点。本研究在分析钛/钢异种金属焊接性的基础上, 阐述了钛/钢异种金属高能束焊接的特点及国内外研究进展, 并对未来钛/钢异种金属高能束焊接的发展进行了展望。

## 1 钛/钢的焊接性分析

### 1.1 物理性能差异

钛和钢的物理参数见表1<sup>[7]</sup>, 可见两种金属的物理性能差异较大, 钢的热导率和膨胀系数分



焊接研究中,当采用高能束直接对焊时,焊缝中生成  $\text{TiFe}_2$ 、 $\text{TiFe}$ 、 $\text{TiCr}_2$  等脆性金属间化合物,同时因热物性差异产生应力,因此接头产生明显的裂纹,如图2<sup>[15]</sup>所示。

为改善钛/钢焊接接头质量,一些学者通过

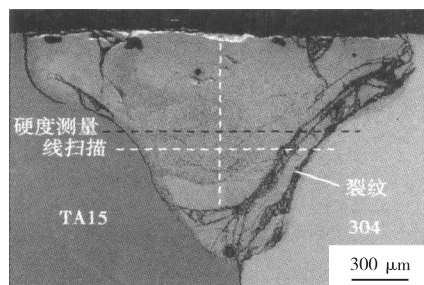
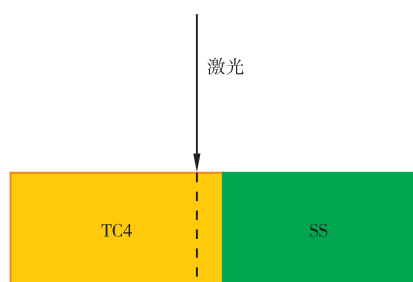
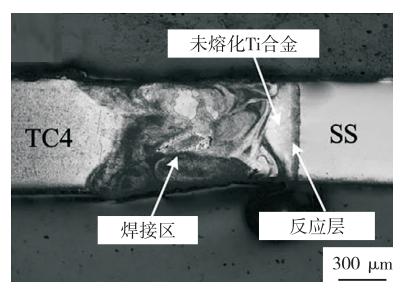


图2 焊缝横截面宏观形貌



(a) 焊接示意图



(b) 接头宏观形貌

图3 Ti/Fe焊接示意图及接头宏观形貌

## 2.2 高能束中间层焊接

在钛/钢高能束直接焊接过程中,尽管电子束焊、激光焊能通过控制热输入和光束偏移改善焊缝中Ti-Fe熔合比,在一定程度上减少金属间化合物的形成,但仍然无法避免其形成,焊接接头性能较差,难以实现高质量焊接接头。实现焊接接头可靠连接,需要添加中间层改善焊缝的冶金条件,改变化合物的种类和分布<sup>[20-21]</sup>。

### 2.2.1 高能束单一中间层焊接

在选择中间层材料时,为避免脆性金属间化合物的生成,大多数研究都遵循与焊接基材生成脆相、与基材相互都不生成脆相两种简单的原则。王亚荣等<sup>[22]</sup>将Ag、Cu作为中间层添加元素,研究其对钛合金与不锈钢异种金属连接的影响,研究表明,Cu做中间层得到的接头抗拉强度要高于Ag中间层。Wang等<sup>[23]</sup>采用0.5 mm厚的Ni、V、Cu等不同中间层对Ti/Fe进行焊接,结果表明,填充金属抑制了Ti-Fe金属间化合物的生成,其

控制热输入、调节光束位置等方法降低焊接熔池中母材混合程度,抑制Ti-Fe脆性金属间化合物形成<sup>[16]</sup>。Chen等<sup>[17]</sup>采用激光焊接的方法对Ti/Fe组织及力学性能进行研究,结果表明,当激光偏向Fe侧或者偏Ti侧超过0.6 mm后,金属才能实现连接,同时偏向Fe侧有助于提高接头的抗拉强度。Chen等<sup>[18]</sup>使用激光脉冲对Ti/304不锈钢进行焊接,结果表明,合理选择脉冲激光参数有助于降低熔池中两种材料的混合,从而提升焊接质量。Zhang等<sup>[19]</sup>对Ti/Fe进行了激光焊接,研究结果表明,当激光束完全偏向Ti侧(如图3<sup>[19]</sup>所示)时,Ti/Fe界面处会产生较窄的共晶反应界面,组织也更为细化,有助于提升接头的力学性能,其强度可达336 MPa。

接头强度与不同填充金属界面处的金属化合物的成分有关,其微观组织如图4<sup>[23]</sup>所示。王廷等<sup>[24]</sup>采用1.5 mm厚QCr0.8铬青铜作为阻隔层对TA15钛合金与304不锈钢进行了电子束焊接,试验结果表明,Cu中间层的加入成功实现了Ti与Fe的物理隔离,抑制Ti-Fe化合物的形成。为了避免Ti-Cu界面化合物的生成,加入V元素,焊缝组织由Cu基固溶体、(Ti,V)基固溶体及少量Ti-Cu化合物组成,提高了接头强度及塑性,接头抗拉强度达到293 MPa,为塑性断裂模式。Tomashchuk等<sup>[25]</sup>以572±4 μm厚的Cu作为中间层,采用光束偏移的方法对Ti/316L不锈钢进行焊接,研究结果表明,光束位置不同会影响焊接质量,当光束偏向Ti侧会产生大量Ti-Fe金属化合物,而偏向Fe侧则会抑制Ti-Fe金属化合物的产生,接头抗拉强度可达350 MPa;然而以0.7 mm厚度的V作为中间层时,由于脆性金属化合物的存在,仍然未能得到性能良好的接

头<sup>[26]</sup>。这主要原因是V作为中间层,会产生 $(\text{Fe}, \text{V})\sigma$ 硬脆相,而这种 $(\text{Fe}, \text{V})\sigma$ 硬脆相是导致接头易脆的主要原因。Tomashchuk等<sup>[27]</sup>以1.06 mm厚度的V作为中间层对Ti6Al4V/316L不锈钢进行单、双道焊接,结果表明,双道焊接接头可获得较高的强度(367 MPa)。Adomako

等<sup>[28]</sup>以2 mm厚度的V作为中间层对Ti6Al4V/17-4PH不锈钢进行焊接,结果表明,Ti/V侧界面良好,而V/Fe侧出现了裂纹,最终影响了强度。而Nogami等<sup>[29]</sup>在研究V/316L不锈钢焊接时,也发现了硬脆相的析出,而这种硬脆相影响了接头的力学性能。

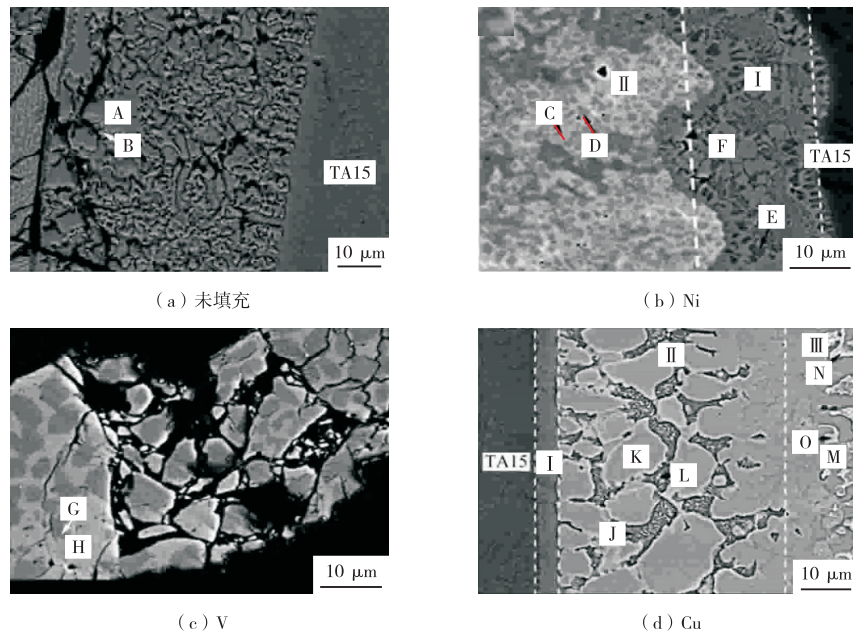


图4 不同中间层Ti/Fe界面Ti侧微观组织

钛/钢异种金属高能束焊接通过添加不同的单一中间层,新的一些较小的脆性相替代了Ti-Fe相,减少了Ti-Fe脆性金属间化合物的数量,很大程度改善了钛/钢焊接接头的质量,但并没有完全抑制Ti-Fe脆性金属间化合物的生成。

### 2.2.2 高能束复合中间层焊接

为了使钛/钢焊接接头的综合性能进一步提高,Fang等<sup>[30]</sup>添加Cu-Nb复合中间层对TC4钛合金和AISI 316L不锈钢进行脉冲激光焊接,结果表明,较低的热输入可以减少焊缝裂纹的形成,并且(Cu, Nb)固溶体代替Cu与Nb熔合区的微观组织,完全

抑制了Ti-Fe、Ti-Cu化合物的生成。王红阳等<sup>[31]</sup>采用Cu-Zn中间层进行钛合金与不锈钢的激光-电弧复合焊接,结果表明,钛合金与不锈钢复合焊接接头过渡区组织成分主要包括Ti-Cu金属间化合物、铜基固溶体及Fe-Cu共析混合物,Ti-Cu金属间化合物成了焊接接头的薄弱点,断裂位置在Ti-Cu界面处。Hosseini等<sup>[32]</sup>研究了激光焊接Ti6Al4V/304SS接头(图5<sup>[32]</sup>)在单层和双层结构中不同层间厚度下的力学性能和微观结构特征,在1 mm厚的铜中间层试验中没有发现Ti-Fe IMCs或 $\text{TiCr}_2$ 。同时,有TiCu和 $\text{Ti}_2\text{Cu}_3$ 新的化合物生成,成为焊接

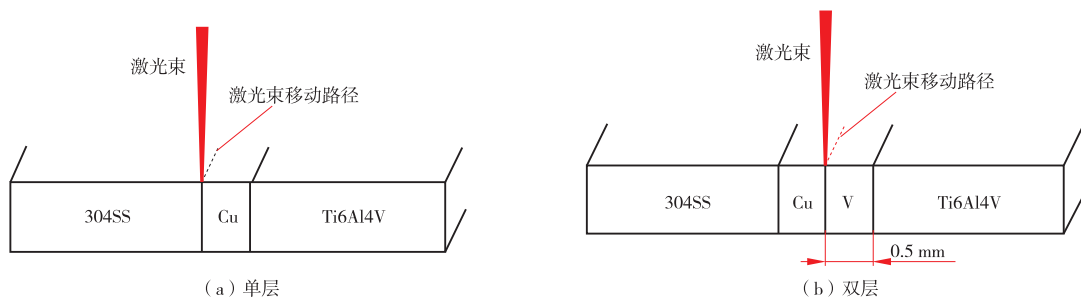


图5 激光焊接示意图



接头的薄弱点, 接头抗拉强度 300 MPa。为改善焊接接头的质量, 进行 Cu/V 复合中间层试验, 结果发现 Cu/V 中间层完全抑制了  $Ti_xFe_y$ 、 $Ti_xCu_y$  脆性金属间化合物的生成, 接头质量得到进一步提高。王廷等<sup>[33]</sup>采用片状和楔形两种结构的 Cu/V 复合中间层对钛合金/不锈钢进行电子束双道焊接工艺试验, 试验结果表明, Cu/V 复合中间层有效抑制了 Ti-Fe 脆性金属间化合物的产生, 楔形结构接头抗拉强度 (385 MPa) 高于片状结构, 为不锈钢母材的 75%。

Gao 等<sup>[34]</sup>采用双道激光-爆炸焊、TA2/Q235 复合中间层对 TC4/304SS 进行了焊接, 结果证明, 采用 TA2/Q235 复合中间层可防止焊接过程中 Ti-Fe

金属间化合物的形成, 改善钛合金-SS 接头的组织和性能, 接头在 TA2/Q235 爆炸焊接界面处断裂, 最大抗拉强度为 548 MPa, 延伸率仅为 0.4%。Zhang 等<sup>[35]</sup>为完全避免接头中出现脆性 Ti-Fe 等金属间化合物, 利用 Ta/V/Fe 复合中间层对 TC4/不锈钢进行双道激光焊研究 (图 6<sup>[35]</sup>), 研究表明, Ta 和 V 元素也是完全可混溶的, Fe 夹层可以降低 V-SS 界面焊缝区 V 浓度, 同时可减少焊缝中 Cr、Ni 等合金元素的比例, 避免形成 (Cr、V) 固溶体促进裂纹的萌生和扩展。通过这种方法, 获得了两个未熔透的 V 区, 完全避免了 Ti-Fe 金属间化合物的存在, 接头强度和延伸率都较好。

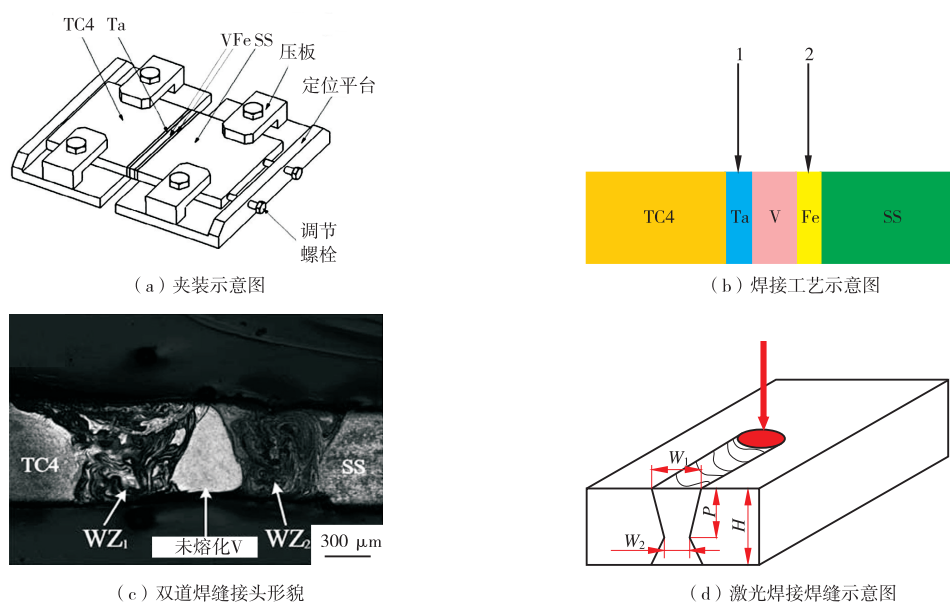


图 6 添加 Ta/V/Fe 复合中间层的 Ti/Fe 异种金属双道焊接接头

高能束复合中间层焊接钛/钢实现了零脆性金属间化合物生成, 能够得到高质量的焊接接头, 但焊接时焊接工艺参数调控较为困难, 对试板夹装要求也非常高, 焊缝成形不稳定且焊接效率较低。

### 3 钛/钢异种金属焊缝高熵化

钛/钢高能束焊接时, 会出现脆性金属间化合物, 严重影响接头的力学性能, 随着复合中间层的加入, 完全抑制了 Ti-Fe 金属间化合物的产生, 提高了接头焊接质量, 但加入复合中间层对焊接夹装提出了更高的要求, 并且在焊接时工艺参数的匹配比较困难, 焊接效率会大大降低。因此, 一些学者将高熵合金引入焊接领域中, 高熵

合金具有形成单相固溶体结构的优异性能, 通过焊材金属的设计, 使焊后的钛/钢接头焊缝形成单相固溶体结构, 使焊缝高熵化<sup>[36-37]</sup>, 从而实现钛/钢高质量焊接。

候光远<sup>[38]</sup>采用 Ti5Fe15Ni28Cu23V29 TIG 焊进行 TA2/Q235 的焊接, 焊缝组织细小均匀, 焊缝与母材的结合区未出现金属间化合物, 获得了无裂纹、气孔和夹杂等缺陷的优良接头, 接头强度为 230 MPa。Hao 等<sup>[39]</sup>研究了 TC4 钛合金与 304 不锈钢激光焊接用  $(CoCrFeNi)_{100-x}Cu_x$  高熵合金作为填充金属的可行性, 在焊接区和 304 不锈钢之间实现了可靠的冶金结合, 其焊缝区域组织如图 7<sup>[39]</sup>所示, 通过调节元素含量, 强度达到 161 MPa。利用高熵合金具有形成单相固溶体的优良特性和接头优异的强

度、热稳定性、耐腐蚀和抗氧化等性能<sup>[40]</sup>,使用高熵合金作为中间层可实现焊缝高熵化,提高钛/钢

焊接接头质量,为钛/钢焊接提供了新的突破点。

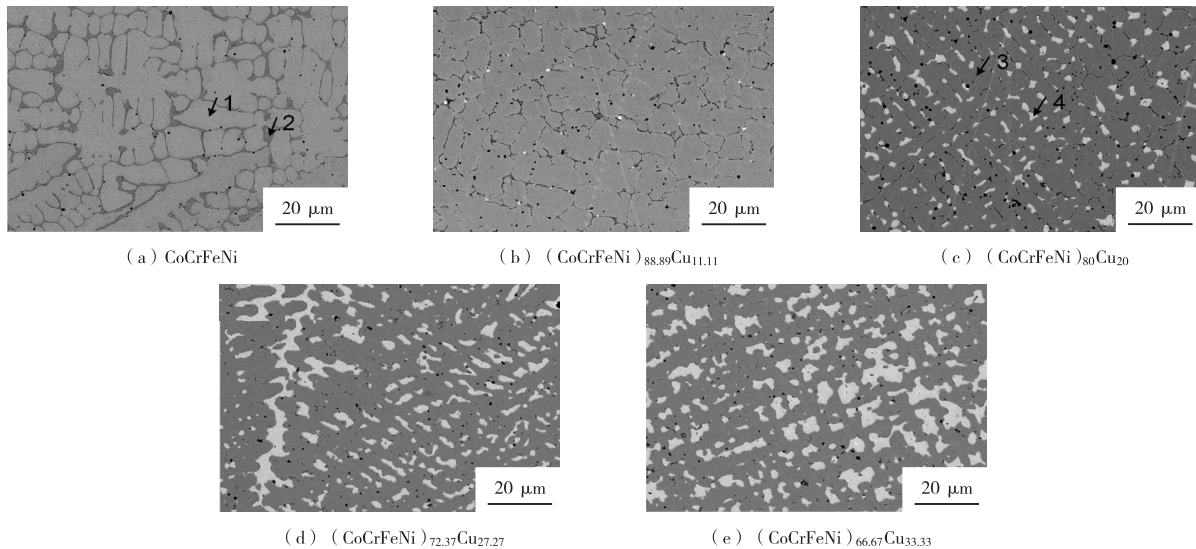


图7 TC4/304SS接头焊缝区显微组织

## 4 结 论

(1) 钛/钢异种金属高能束焊接时极易形成脆性金属间化合物导致接头力学性能降低,使用单一中间层进行焊接时,Cu中间层与Ag、V中间层相比性能较优。

(2) 现有的高能束添加过渡层(单道、双道)焊接方法,可以抑制焊缝中金属间化合物生成,使用单道复合中间层焊接时,Cu/V复合中间层与Cu/Nb、Cu/Zn复合中间层相比性能较优;而使用双道焊接时,V无论是作为单一中间层还是复合中间层,均表现出优良的焊接性。

(3) 通过使用高熵合金作为中间层可以实现焊缝高熵化,从而提高钛/钢焊接接头的综合性能,这将成为未来钛/钢异种金属焊接研究的重点。

### 参考文献:

- [1] 宋庭丰,蒋小松,莫德锋,等.不锈钢和钛合金异种金属焊接研究进展[J].材料导报,2015,29(11):81-87.
- [2] LI P, DONG H G, XIA Y Q, et al. Inhomogeneous interface structure and mechanical properties of rotary friction welded TC4 titanium alloy/316L stainless steel joints [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018(33): 54-63.
- [3] 陈沛,段卫东,唐玉成.钛/钢多层爆炸焊接界面的实验研究

[J].爆破,2018,35(1):123-129.

- [4] AKMAN E, DEMIR A, CANEL T, et al. Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(8): 3705-3713.
- [5] FAZEL-NAJAFABADI M, KASHANI-BOZORG S F, ZAREI-HANZAKI A. Dissimilar lap joining of 304 stainless steel to CP-Ti employing friction stir welding [J]. Materials & Design, 2011, 32(4): 1824-1832.
- [6] 赵礼,王少刚,陈源,等.铝锂合金的高能束焊接技术研究进展[J].焊接技术,2017,46(10):1-6.
- [7] 王廷,张秉刚,陈国庆,等.钛/钢异种金属焊接存在问题及研究现状[J].焊接,2009(9):29-33,70.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 王毅,马凯.钛对钴铬合金丝/不锈钢丝激光接头组织与性能的影响[J].热加工工艺,2018,47(9):188-190.
- [11] COSTA J D, DE SOUSA M B, LIA FOOK N C M, et al. Obtaining and characterization of Ni-Ti/Ti-Mo joints welded by TIG process [J]. Vacuum, 2016, 133: 58-69.
- [12] 李立泽,王少刚,陈源,等.异种钛合金的焊接研究现状及发展趋势[J].焊接技术,2019,48(3):1-7.
- [13] DINDA S K, WARNETT J M, WILLIAMS M A, et al. 3D imaging and quantification of porosity in electron beam welded dissimilar steel to Fe-Al alloy joints by X-ray tomography [J]. Materials & Design, 2016, 96: 224-231.
- [14] DINDA S K, KAR J, JANA S, et al. Effect of beam oscillation on porosity and intermetallics of electron beam welded DP600-

- steel to Al 5754-alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 265: 191–200.
- [15] 王廷, 张秉刚, 陈国庆, 等. TA15 钛合金与 304 不锈钢的电子束焊接[J]. 焊接学报, 2010, 31(5): 53–56.
- [16] MANNUCCI A, TOMASHCHUK I, MATHIEU A, et al. Direct laser welding of pure titanium to austenitic stainless steel [J]. Procedia CIRP, 2018, 74: 485–490.
- [17] CHEN S H, ZHANG M X, HUANG J H, et al. Microstructures and mechanical property of laser butt welding of titanium alloy to stainless steel [J]. Materials & Design, 2014, 53: 504–511.
- [18] CHEN H C, BI G J, LEE B Y, et al. Laser welding of CP Ti to stainless steel with different temporal pulse shapes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 58–65.
- [19] 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.
- [20] TOMASHCHUK I, SALLAMAND P, JOUVARD J M. Multi-physical modeling of dissimilar welding via interlayer [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(11): 1796–1803.
- [21] TOMASHCHUK I, SALLAMAND P, JOUVARD J M. The modeling of dissimilar welding of immiscible materials by using a phase field method [J]. Applied Mathematics and Computation, 2013, 219(13): 7103–7114.
- [22] 王亚荣, 樊亚丽, 余洋. 电镀阻隔层对钛/钢电子束焊接接头性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(1): 299–304.
- [23] WANG T, ZHANG B G, FENG J C. Influences of different filler metals on electron beam welding of titanium alloy to stainless steel [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(1): 108–114.
- [24] 王廷, 张秉刚, 张艳桥, 等. 添加 QCr0.8 阻隔层的钛/钢电子束焊接接头组织与性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(5): 1209–1213.
- [25] TOMASHCHUK I, SALLAMAND P, BELYAVINA N, et al. Evolution of microstructures and mechanical properties during dissimilar electron beam welding of titanium alloy to stainless steel via copper interlayer [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 585: 114–122.
- [26] SHANMUGARAJAN B, PADMANABHAM G. Fusion welding studies using laser on Ti – SS dissimilar combination [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(11): 1621–1627.
- [27] TOMASHCHUK I, GREVEY D, SALLAMAND P. Dissimilar laser welding of AISI 316L stainless steel to Ti6 – Al4 – 6V alloy via pure vanadium interlayer [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 622: 37–45.
- [28] ADOMAKO N K, KIM J O, LEE S H, et al. Dissimilar welding between Ti – 6Al – 4V and 17–4PH stainless steel using a vanadium interlayer [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 732: 378–397.
- [29] NOGAMI S, MIYAZAKI J, HASEGAWA A, et al. Study on electron beam weld joints between pure vanadium and SUS316L stainless steel [J]. Journal of Nuclear Materials, 2013, 442: S562–S566.
- [30] FANG Y J, JIANG X S, SONG T F, et al. Pulsed laser welding of Ti–6Al–4V titanium alloy to AISI 316L stainless steel using Cu/Nb bilayer [J]. Materials Letters, 2019, 244: 163–166.
- [31] 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): 0503002.
- [32] ELMI HOSSEINI S R, FENG K, NIE P L, et al. Interlayer thickening for development of laser - welded Ti–SS joint strength [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 112: 379–394.
- [33] 王廷, 张秉刚, 张艳桥, 等. 采用不同结构 Cu/V 填充层的钛合金/不锈钢电子束焊接试验 [J]. 焊接学报, 2014, 35(8): 71–74.
- [34] GAO Y D, ZHOU J P, ZHANG Y, et al. Two pass laser welding of TC4 titanium alloy and 304 stainless steel using TA2/Q235 composite interlayer [J]. Materials Letters, 2019, 255: 126521.
- [35] ZHANG Y, SUN D Q, GU X Y, et al. Nd: YAG pulsed laser welding of TC4 Ti alloy to 301L stainless steel using Ta/V/Fe composite interlayer [J]. Materials Letters, 2018, 212: 54–57.
- [36] WU Z, DAVID S A, FENG Z, et al. Weldability of a high entropy CrMnFeCoNi alloy [J]. Scripta Materialia, 2016, 124: 81–85.
- [37] KASHAEV N, VENTZKE V, PETROV N, et al. Fatigue behaviour of a laser beam welded CoCrFeNiMn type high entropy alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 766: 138358.
- [38] 侯光远. 基于焊缝金属高熵化的钛/钢 TIG 焊研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2015.
- [39] HAO X H, DONG H G, XIA Y Q, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welded TC4 titanium alloy/304 stainless steel joint with (CoCrFeNi)<sub>100-x</sub>Cu<sub>x</sub> high - entropy alloy interlayer [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 803: 649–657.
- [40] PARK J M, KANG J W, LEE W H, et al. Preparation of spherical WTaMoNbV refractory high entropy alloy powder by inductively - coupled thermal plasma [J]. Materials Letters, 2019, 255: 126513.

作者简介: 李思阳 (1995—), 男, 陕西汉中, 硕士, 助理讲师, 主要从事激光焊接和激光熔覆方面的研究。

收稿日期: 2023-08-19

修改返回日期: 2024-02-21

编辑: 黄蔚莉