

一种钛/钢电阻钎焊接头专用复合过渡金属片

张鹏贤^{1,2}, 乔永丰^{1,2}

(1. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 有色金属合金及加工教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要:针对钛合金与不锈钢连接存在的困难,提出了一种以复合过渡金属片为过渡层的钛/钢电阻钎焊工艺方法。首先设计了复合金属片的结构及组分,探索了一种以钎料为基层,V、Cr、Mo 金属粉末为吸附层的金属片制备装置及方法。其次,探讨了金属片密度、厚度对接头组织及力学性能的影响。焊接结果表明,相比直接电阻钎焊接头,复合金属片为过渡层的钛/钢电阻钎焊接头抗剪切强度提高了近3倍,达到了237 MPa,采用复合金属片是实现钛/钢连接的一种可行方法。

关键词:钛/钢接头;复合过渡金属片;组织结构;组分

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20181303

中图分类号: TG454; TG453+.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2020)13-0136-06

A Special Composite Transition Metal Sheet for Titanium/Steel Resistance Brazing Joints

ZHANG Pengxian^{1,2}, QIAO Yongfeng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Nonferrous Metal Alloys and Processing, Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In view of the difficulties in connecting between titanium alloy and stainless steel, a method of titanium/steel resistance brazing process by using composite transition sheet as transition layer was proposed. First, the structures and components of the composite metal sheet were designed, and a preparation device and method of the metal sheet with solder as base layer and V, Cr, Mo metal powder as adsorption layer was explored. Secondly, the effects of density and thickness of the metal sheet on microstructure and mechanical properties of the joint were discussed. The welding results show that the shear strength of the titanium/steel resistance brazing joint with composite metal sheet as the transition layer is nearly three times higher than that of the direct resistance brazing joint, reaching 237 MPa. The adoption of composite metal sheet is a feasible method to realize the connection of titanium/steel.

Key words: titanium/steel joint; composite transition metal sheet; microstructure; component

钛/钢复合构件因同时具有两种金属的优异性能,在航空航天、能源化工等领域具有广泛的应用前景^[1-2]。采用熔焊方法直接制备钛/钢复合构件时,接头处易生成大量脆性金属间化合物,使接头发生开裂、失效等现象^[3]。宋庭丰等总结了以扩散焊、激光焊、电子束焊为主的焊接工艺对钛合金与不锈钢接头质量的影响,认为采用传统熔焊工艺对钛合金与不锈钢进行焊接时难以得到优质焊接接头^[4]。Lee等采用溅射技术在不锈钢侧镀敷V-Cr-Ni层,并使用

Ti-Zr-Ni 非晶钎料采用红外加热实现了钛板与不锈钢的连接。钎焊接头中几乎未发现Ti基脆性金属间化合物及 σ 相,V-Cr-Ni中间过渡层显著减少了接头的Ti基金属间化合物^[5]。作者也开展了添加中间过渡层的钛/钢电阻钎焊工艺研究,研究结果表明V、Cr、Nb等金属粉末层的介入降低了接头Ti-Fe系脆性金属间化合物含量,显著提高了接头的力学性能^[6-7]。本文以钛/钢电阻钎焊接头为研究对象,提出了一种复合金属片设计、制备的实现方法,并对金属片密度及厚度对接头组织和性能的影响进行了研究。

1 复合金属片的设计

钛合金与不锈钢连接时,中间过渡金属层存在

收稿日期:2019-04-23

作者简介:张鹏贤(1970-),男,甘肃靖远人,教授,博士,主要研究方向:

异种金属连接、焊接过程及自动化控制;

电话:13993195279;E-mail:13993195279@139.com

的目的是使过渡金属元素与母材扩散,原子发生冶金结合,避免大量 Ti、Fe 元素直接化合生成脆性相^[8]。为此,将金属片设计为三层结构,如图 1 所示。第一层为近钛合金侧吸附层,第二层为钎料层,第三层为近不锈钢侧吸附层。

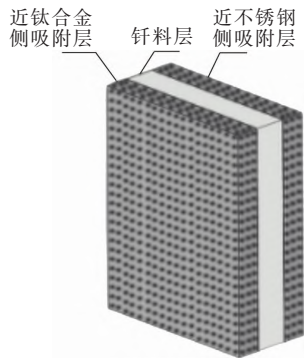


图 1 复合金属片结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of composite metal sheet structure

各层在热力联合作用下形成接头的过程中,所起的作用如图 2 所示。第一层和第三层做为吸附层,在接头装配时,分别与钛合金、不锈钢母材表面直接接触。所谓吸附层,就是吸附、捕获母材表面扩散过来的原子,同时接纳母材塑性变形或流动的组织,与吸附层簇团在热力作用下解离的原子发生冶金结合,从而形成特定固溶组织和化合物组织的反应区。为达到此目的,吸附层应为一种多空隙的疏松组织结构,从而为原子扩散、冶金结合提供足够的通道和

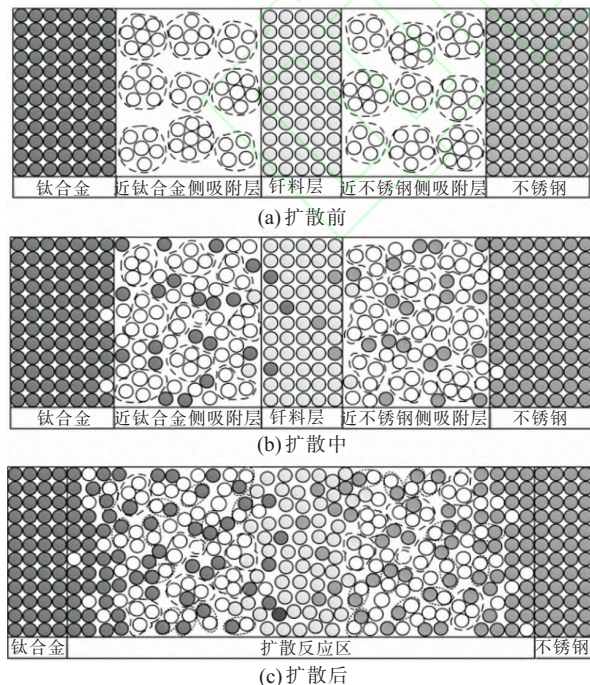


图 2 接头扩散反应示意图

Fig.2 Schematic diagram of joint diffusion reaction

空间,如图 2(a)所示,使钛合金和不锈钢母材中的 Ti、Fe 元素分别由于吸附结构的存在而“就近成家”。第二层钎料层的介入,作为第二道防线,能较好地阻挡 Ti、Fe 元素的直接化合,也能进一步为母材原子冶金反应物提供生长空间。图 2 中(b)、(c)分别给出了扩散和冶金结合过程中各层组织结构的变化。

复合金属片组成元素主要以可与钛合金、不锈钢母材扩散出的原子尽可能形成固溶体或化合物,获得良好的接头力学性能为选择依据。复合金属片组分选择过程如图 3 所示,钛合金中主元素为 Ti、V、Al 等,与其固溶的元素主要有 V、Zr、Nb、Hf、Ta、Mo 等,这些元素都可作为近钛合金侧吸附层组分元素。其中 Ti 与 V 具有很高的固溶度,二者具有较强的亲和力,V、Ti 之间可以形成无序固溶体。因此 V 可作为近钛合金侧吸附层的主要元素。Ni、Co、Cr、Mo 等元素可与 Fe 元素形成固溶体,并与不锈钢中 Cr、Ni 等元素生成各类固溶体、化合物。其中 Cr 与 α -Fe 均为体心立方结构,根据元素的相似相溶原理,二者具有良好的固溶度。因此 Cr 可作为近不锈钢侧吸附层的主要元素。

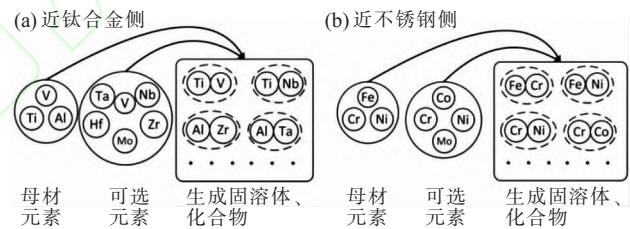


图 3 吸附层组分设计示意图

Fig.3 Schematic diagram of adsorption layer component design

Mo 元素与 V、Cr 元素无限互溶,可在两侧吸附层中加入适量 Mo 元素以改善焊缝组织。Mo 元素加入后,在结晶时产生异质形核效果,使焊缝获得优异的细晶组织^[9],同时增加接头原子的乱序程度,提升焊缝熵值,获得近似于高熵合金的焊缝组织^[10],并形成微量弥散分布的含 Mo 化合物,起到第二相强化的作用,进一步提升接头力学性能^[11]。根据合金相图,当 Mo 元素含量接近 10%时,Mo-V、Mo-Cr 的结晶温度最为接近,且熔点处于较低温度。银铜锌三元合金钎料具有优良的性能,这种系列的钎料塑性好,可以大大增加接头的韧性及弯折性能。且这类钎料能进行变质处理,可有效改善焊缝组织、降低接头脆性。因此,选用银基钎料 HL303(BAg45CuZn)作为复合金属片的中间结构,近钛合金侧吸附层选用含

10%Mo 的 V、Mo 混合粉末为组分, 近不锈钢侧吸附层选用含 10%Mo 的 Cr、Mo 混合粉末为组分, 采用粉末压制成型制成金属片。

2 复合金属片的制备

复合金属片采用在钎料两侧表面压制金属粉末的方法来制备。钎料采用 0.2 mm 厚的 BAg5CuZn 银基钎料片, 粉末选用颗粒度为 400 目、纯度 99.9% 以上的 V、Cr、Mo 粉。制备装置主要由粉末压制模具、铺粉装置和加压机构三部分组成。通过铺粉装置

将两层粉末以一定次序铺设在模具型腔内钎料片的两侧, 在加压机构的作用下使粉末与钎料被挤压成复合金属片。图 4 为粉末压制模具示意图, 所制备金属片的厚度与边长的比值远小于 2, 故将模具设计为单向压制结构, 由上模冲、阴模及下模冲组成, 如图 4(a)~(c)所示。冲孔及冲芯由硬度值 70HRC 以上的 YG15 硬质合金制成, 并在外围包裹由 45 钢制成的模套。冲孔与冲芯之间预留 0.2 mm 的配合间隙, 保证上模冲的下降与回升, 上模冲的冲芯高度大于冲孔深度, 以便压制完成后将金属片推出。

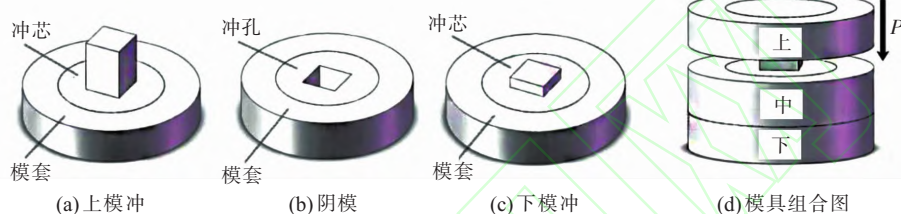


图 4 粉末压制模具示意图

Fig.4 Schematic diagram of powder pressing mold

铺粉装置组成如图 5 所示, 振动器与不锈钢筛刚性连接, 毛刷被装配在电机的主轴上, 毛刷宽度与不锈钢筛内径相同。铺粉时将待铺粉末置入筛中, 并将阴模、下模冲组合后移至筛网下方并放置挡粉板, 使挡粉板的漏粉孔与冲孔对齐, 在毛刷与振动器的双重作用下将粉末均匀地铺设在模具型腔内。毛刷与筛网的装配距离由水平杆与调节旋钮来控制。

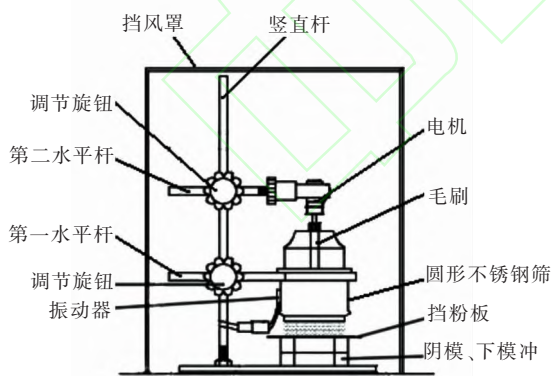


图 5 铺粉装置组成示意图

Fig.5 Schematic diagram of constitution of powder spreading device

加压机构组成如图 6 所示, 油压机与压头刚性连接, 组合后的模具放置在底座平台上。加压时压头在油压机的推动下向下移动, 当压头与上模冲接触并推动上模冲继续下移, 直至达到设定压力值时, 维持该恒定压力一定时间, 压制过程结束。

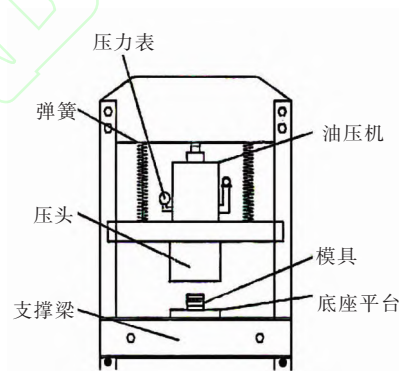


图 6 加压机构示意图

Fig.6 Schematic diagram of pressure mechanism

金属片的密度及厚度与压制压力 P 大小密切相关。当粉末量一定时, 随着压力的增加, 密度值也相应增大, 当密度超过一定值时, 压力的增加对密度值几乎没有影响。而金属片厚度随压力的增加逐渐减小, 当厚度达到一定值时, 压力的增加对厚度值几乎没有影响。图 7 为两种不同粉末压制时测定的压力与粉末密度、厚度的关系曲线, 压制压力对 V、Mo 和 Cr、Mo 混合粉末密度及厚度的影响规律相同。因此, 可通过控制粉末量和压制压力制备出一定厚度及密度的金属片。图 8 中 ρ_1 表示近钛合金侧吸附层密度, ρ_2 表示近不锈钢侧吸附层密度, ρ_3 表示钎料层密度, 故金属片密度 ρ 由 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 的平均值来确定。金属片厚度 h 则为 h_1 、 h_2 、 h_3 之和。

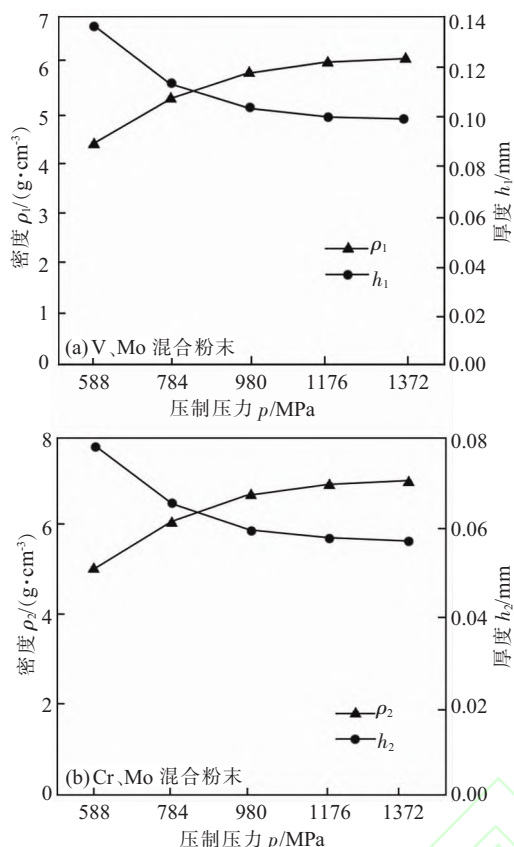


图7 压制压力对粉末密度、厚度的影响
Fig.7 Influence of pressing pressure on powder density and thickness

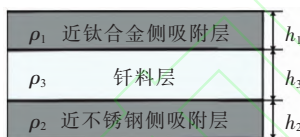


图8 金属片密度、厚度
Fig.8 Density and thickness of metal sheet

3 金属片密度及厚度对接头组织和性能的影响

焊接试验采用规格均为 80 mm×20 mm×1.5 mm 的 TC4(Ti-6Al-4V) 钛合金板材与 304 不锈钢(1Cr18Ni9Ti) 板材, 根据电极头的形状及大小, 制备了尺寸为 10 mm×10 mm 的复合金属片。母材预处理过程与作者之前所做试验相同^[7]。为防止接头氧化, 如图 9(a) 所示将高温硅胶片贴敷在不锈钢表面硅胶片区域, 金属片放置在金属片区域, 预留间隙为金属片在热力作用挤压下向四周扩散时的预留空间, 然后将钛合金覆盖在其上。将装配好的接头加持在上、下电极头之间, 加压通电完成电阻钎接, 如图 9(b) 所示。焊接工艺参数为: 焊接电流 3.5 kA, 焊接时间 2 s, 电极头压力 0.5 MPa。

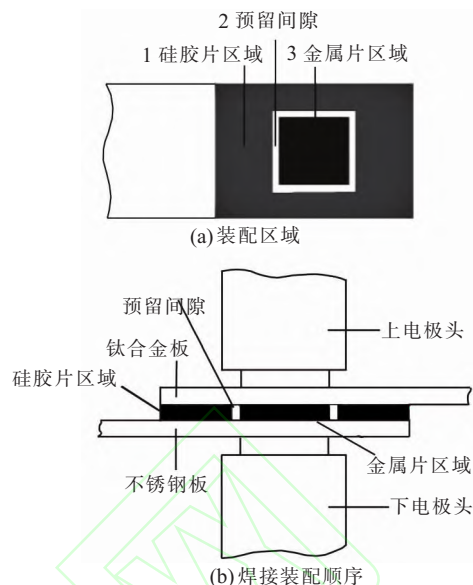


图9 接头装配示意图
Fig.9 Assembly diagram of the joint

金属片密度、厚度对接头组织的形成及力学性能有直接影响。接头拉伸结果表明, 当选择合理的金属片密度、厚度值时, 可保证接头获得最佳抗剪切强度值。表 1~3 为两类粉层厚度、金属片密度对接头性能的影响。其中钎料层厚度 h_3 始终保持 0.2 mm 不变。当 V、Mo 粉层厚度 h_1 在 0.03 mm~0.09 mm 之间变化时, Cr、Mo 粉层厚度 h_2 保持为 0.04 mm; 当 Cr、Mo 粉层厚度 h_2 在 0.01 mm~0.07 mm 之间变化时, V、Mo 粉层厚度 h_1 保持为 0.06 mm。试验数据表明, 两类粉层厚度、金属片密度对接头抗剪切强度的影响呈正态分布, 接头性能峰值对应的密度、粉层厚度值, 就是钛 / 钢连接时金属片规格的选择依据。

表 1 V、Mo 粉层厚度对接头性能的影响
Tab.1 Influence of V and Mo powder thickness on joint's performance

粉层厚度 h_1 /mm	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
接头抗剪切强度 σ_s /MPa	161	189	207	233	205	190	165

表 2 Cr、Mo 粉层厚度对接头性能的影响
Tab.2 Influence of Cr and Mo powder thickness on joint's performance

粉层厚度 h_2 /mm	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07
接头抗剪切强度 σ_s /MPa	163	187	209	235	205	190	159

表 3 金属片密度对接头性能的影响
Tab.3 Influence of metal sheet density on joint's performance

金属片密度 ρ /(g·cm ⁻³)	5.64	6.22	6.53	6.67	6.71
接头抗剪切强度 σ_s /MPa	188	203	236	210	197

对不同金属片密度、厚度的焊接接头进行了 SEM、EDS、XRD 等微观组织分析。分析结果表明,金属片的密度、厚度直接影响了母材原子、钎料层原子的扩散及冶金反应的程度。当厚度较小时,母材原子直接进入钎料层,粉末层未能吸附母材原子,无法避免 Ti、Fe 等原子直接化合生成脆性金属间化合物,故抗剪切强度值较小。当厚度较大时,钎料层原子无法与母材原子发生冶金反应,致使粉末层在结构上替代了钎料层的功能,反而导致钎料层成为薄弱环节,使接头抗剪切强度降低。密度的大小直接决定了粉末层颗粒间的疏密程度,当密度较小时,母材原子极易从粉末层扩散通过,致使粉末层失去吸附效能。当密度较大时,母材原子与钎料层原子失去了扩散通道,难以发生冶金反应,同样导致接头抗剪切强度值降低。故合理的金属片密度、厚度为原子的扩散及冶金反应提供了通道和空间,可使其获得相对较高的接头抗剪切强度。图 10 为不同厚度、密度金属片下的接头微观组织图,左右两侧分别为钛合金与不锈钢,1、2、3 区域分别表示近钛合金侧吸附层、钎料层、近不锈钢侧吸附层。其中图 10(a)为不加金属片的钛/钢电阻钎焊接头微观组织,A 处所在区域明显存在大量的灰色脆性组织,该组织主要成分为 Ti-Fe、Ti-Cu 系金属间化合物。图 10(b)~(f)中,接头在原金属片三层结构的基础上形成了五个反应区。图 10(b)为金属片厚度较小时接头的微观组织,2 区域仍存在少量成分为 Ti-Fe、Ti-Cu 系金属间化合物的灰色脆性组织,这表明吸附层效能不足。图

10(c)为金属片厚度较大时接头的微观组织,2 区域几乎无灰色脆性组织存在。尽管吸附层有效阻止了 Ti、Fe 元素间的化合,但同时大大降低了钎料层原子参与冶金反应的程度,故钎料层成为接头的薄弱环节。图 10(d)为金属片密度较小时接头的微观组织,密度较小时母材原子易透过吸附层,在钎料层所在的 2 区仍生成一定量成分为 Ti-Fe、Ti-Cu 系金属间化合物的灰色脆性组织。图 10(e)为金属片密度较大时接头的微观组织,2 区域几乎无灰色脆性组织存在,各区域存在明显的界线,此时接头中几乎无 Ti-Fe、Ti-Cu 系金属间化合物存在,但新生成了 Fe-Cr、Fe-Mo、Ti-V、Ti-Mo 系金属间化合物,这表明金属片密度较大时,母材原子、钎料层原子向对侧扩散受阻,限制了钎料层的冶金反应程度,使钎料层成为薄弱环节,故密度值适中时,可使吸附层和钎料层充分发挥各自效能,获得较高的抗剪切强度值。A 反应区的宽窄变化也同样印证了密度对接头原子冶金反应程度的影响规律,即密度较小时,母材原子较易扩散,故在母材与吸附层之间形成的反应区较窄。而当密度较大时,母材原子扩散受阻,只能与吸附层原子在其间发生冶金反应,致使反应区相对较宽。图 10(f)的接头相对于其他 5 类接头具有最高的抗剪切强度值,从 1~3 区域的组织分布可以明显观察到,吸附层中有大量白色钎料组织镶嵌其中,而 2 区域也存在大量灰色组织,表明母材原子、钎料层原子相互扩散程度是充分的,在各区域的冶金反应产物也比较明显,固溶体、化合物及未参与反应的吸附

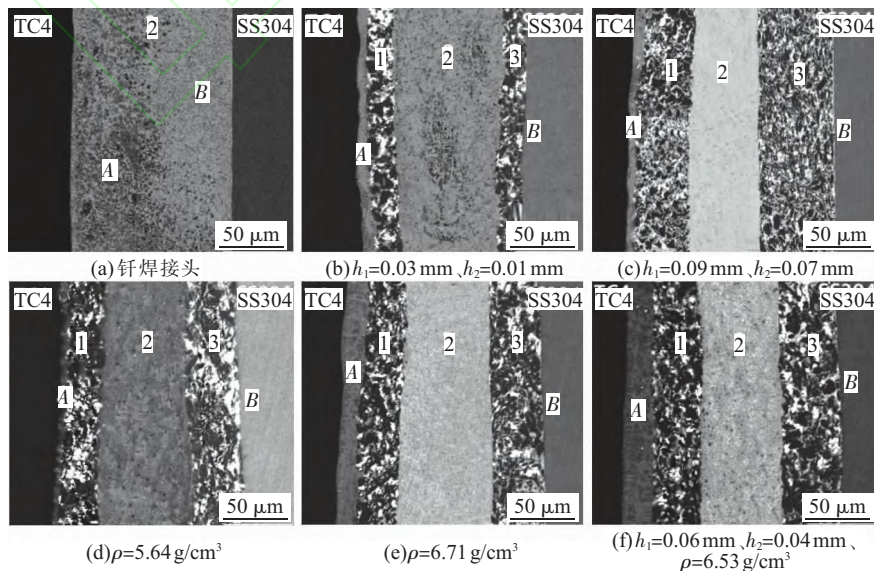


图 10 各类接头微观组织
Fig.10 Microstructure of each joint

层、钎料层原子共存是这类接头典型的组织特征。

图 11(a)为图 10(a)接头的 XRD 衍射结果,接头中化合物主要为大量的 Ti-Fe、Ti-Cu 系脆性金属间化合物。图 11(b)为图 10(f)接头的 XRD 衍射结果,接头中化合物主要为含量较高的 Ti-V、Fe-Cr、Ti-Cr 系化合物及含量较低的 Ti-Mo、Fe-Mo、V-Fe 化合物。衍射结果表明,金属片的介入改变了接头中化合物的种类及含量。

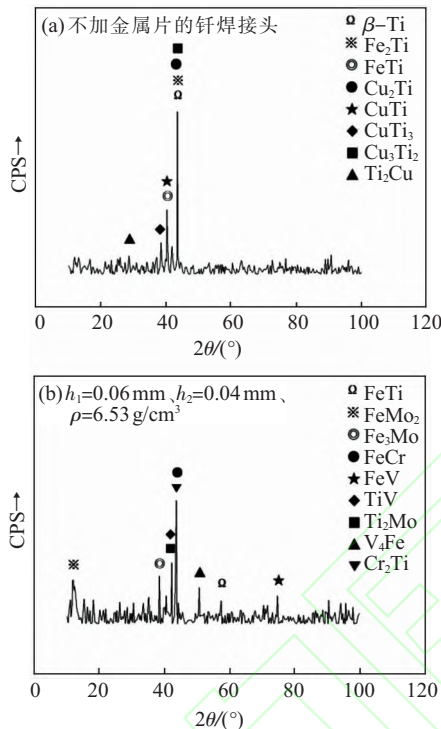


图 11 接头 XRD 衍射结果
Fig.11 XRD diffraction results of the joints

对图 10 (a)、(f) 两类接头进行了拉伸试验,图 10(a)对应的电阻钎焊接头平均抗剪切强度值为 87 MPa,而复合金属片介入的图 10(f)接头平均抗剪切强度值为 237 MPa,提高了近 3 倍。图 12 为这两类接头的断口形貌,在图 12(a)中接头断裂发生在钎料层,呈现出明显的山谷、河流状花样,在 A 点处可以观察到有明显的裂纹存在,该接头的断裂方式主

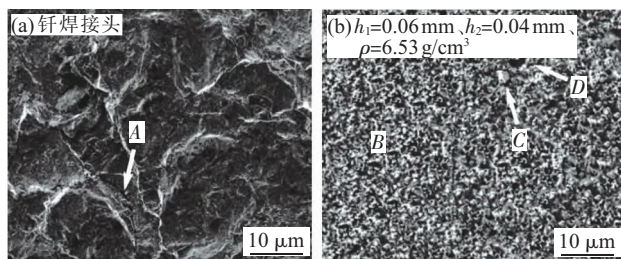


图 12 接头断口形貌图
Fig.12 Fracture morphology of the joints

要为脆性断裂。在图 12(b)中接头断裂发生在近钛合金侧的吸附层,点 B 区域有大量的韧窝存在,在 C、D 处存在颗粒状的凸起与凹陷。这表明这类接头的断裂方式主要为塑性断裂,且存在少量弥散分布的颗粒状化合物,对接头起一定的强化作用。

4 结论

(1) 以 V、Mo 和 Cr、Mo 混合粉为组分的三层结构金属片介入的钛 / 钢电阻钎焊接头,其抗剪切强度相较于钛 / 钢直接电阻钎焊接头显著提高,表明这种工艺是钛 / 钢实现可靠连接的一种可行方法,同时,也为其他异种金属连接提供了一种解决思路。

(2) V、Mo 和 Cr、Mo 混合粉为吸附层的介入,使接头呈现为多种化合物、多反应区共存的组分及结构特征,这种结构特征使其接头抗剪切强度明显高于直接电阻钎焊的主要原因。

参考文献:

- [1] 金和喜,魏克湘,李建明,等. 航空用钛合金研究进展[J]. 中国有色金属学报,2015,25(2):280-292.
- [2] Kumar R, Balasubramanian M. Experimental investigation of Ti-6Al-4V titanium alloy and 304L stainless steel friction welded with copper interlayer[J]. Defence Technology,2015,11(1):65-75.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Lee M K, Lee J G, Choi Y H, et al. Interlayer engineering for dissimilar bonding of titanium to stainless steel[J]. Materials Letters,2010,64(9):1105-1108.
- [6] 张鹏贤,汪舸,李世龙. Cr、V 粉末层介入对钛 / 钢电阻钎焊接头组织和性能的影响[J]. 兰州理工大学学报,2017,43(1):24-28.
- [7] 张鹏贤,李世龙. 铬、钒、钽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.
- [8] 吕学勤,杨尚磊,吴毅雄,等. 铝合金与不锈钢的过渡层钎焊[J]. 焊接学报,2004(1):95-98.
- [9] Lei Xuanwei, Wang Honghong, Wu Kaiming, et al. Mechanical properties and grain refinement by acicular ferrite in high strength high toughness weld metal [J]. China Welding, 2016,25(1):71-76.
- [10] 徐锦锋,郭嘉宝,田健,等. 基于焊缝金属高熵化的钛 / 钢焊材设计与制备[J]. 铸造技术,2014,35(11):2674-2676
- [11] Han Wentuo, Liu Pingping, Yi Xiaou, et al. Impact of friction stir welding on recrystallization of oxide dispersion strengthened ferritic steel [J]. Journal of Materials Science & Technology,2018,34(1):209-213.