

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.09.07

钽与不锈钢焊接关键技术的研究进展

黄德鹏^{1,2}, 操齐高^{1,2*}, 李航宇², 王 轶², 汪 舸³

1. 东北大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004

2. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016

3. 西安优耐特容器制造有限公司, 陕西 西安 710201

摘要: 钽是一种具有极好的耐蚀性、良好的加工性及可焊性等优异性能难熔金属,但精炼工艺复杂,生产成本低,与异种金属的复合不但可以节约生产成本,还能使材料结构轻量化。不锈钢是一种广泛应用的结构材料,其化学性质和综合性能均较好。基于钽和不锈钢某些关键性能上的共性,将其复合极为重要。但由于二者焊接接头的强度和耐蚀性往往不理想,焊接出安全优质的复合构件成了全球共有的难题。针对这一问题,本文综述了近些年国内外研究人员关于引入中间层材料作为过渡介质来改善钽与不锈钢之间接头性能的研究,得出了不同焊接工艺对钽与不锈钢焊接接头性能及适用场合的影响,提出了相关技术和焊接工艺方面的改进方法,对钽与不锈钢焊接中添加中间层的未来研究方向进行展望,为钽与不锈钢复合构件的广泛应用提供一定的技术支持和理论指导,推动相关领域的发展与进步。

关键词: 钽; 不锈钢; 中间层; 焊接工艺; 研究现状

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)09-0080-11

Research Progress on Welding Key Technologies of Tantalum and Stainless Steel

HUANG Depeng^{1,2}, CAO Qigao^{1,2*}, LI Hangyu², WANG Yi², WANG Ge³

1. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China

2. Northwest Institute for Non-Ferrous Metal Research, Xi'an 710016, China

3. Xi'an United Container Manufacturing Co., Ltd., Xi'an 710201, China

Abstract: Tantalum is a refractory metal with excellent corrosion resistance, good machinability and weldability, but its refining process is complicated and the production cost is high. The composite with dissimilar metals can not only save production costs, but also make the material structure lightweight. Stainless steel is a widely used structural material, its chemical properties and comprehensive properties are good. Due to the commonality of tantalum and stainless steel in some key properties, it is extremely important to combine them. However, due to the strength and corrosion resistance of the welded joints of the two are often not ideal, welding safe and high-quality composite components has become a common problem in the world. In view of this problem, this paper reviews the study of researchers at home and abroad in recent years on the introduction of intermediate layer materials as transition media to improve the joint properties between tantalum and stainless steel, and obtains the influence of different welding processes on the properties and application occasions of tantalum and stainless steel welded joint, and puts forward the improvement methods of related technologies and welding processes. The future research direction of adding intermediate layer in the welding of tantalum and stainless steel is prospected, which provides certain technical support and theoretical guidance for the wide application of tantalum and stainless steel composite components, and promotes the development and progress of related fields.

Keywords: Tantalum; stainless steel; intermediate layer; welding process; research status

收稿日期: 2024-06-09 修回日期: 2024-08-07

基金项目: 西北有色金属研究院自开课题(09SK24Z014)

作者简介: 黄德鹏(2001—),男,硕士,主要从事钎焊材料的研究。

通讯作者: 操齐高(1982—),男,博士,正高级工程师,主要从事贵金属功能材料的研究。E-mail:50314712@qq.com。

引用格式:黄德鹏,操齐高,李航宇,等.钽与不锈钢焊接关键技术的研究进展[J].电焊机,2025,55(9):80-90.

Citation:HUANG Depeng, CAO Qigao, LI Hangyu, et al. Research Progress on Welding Key Technologies of Tantalum and Stainless Steel[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(9): 80-90.

0 引言

钽(Ta),硬度适中,热膨胀系数小,化学性质优异,不论在低温还是高温下,都不易与盐酸、硝酸及王水反应,耐蚀性极强;常温在空气中稳定,温度超过500℃时表面会加速氧化生成致密稳定、介电性好的无定形氧化膜 Ta_2O_5 。此外,Ta延展性佳,可直接拉成细丝;还具有良好的加工性和可焊性,韧脆转变温度低,韧性甚至优于铜。因此,钽及其合金成为超导、化学、电子、航空航天和医疗行业等现代制造业以及制造硬质合金领域必不可少的重要金属材料^[1-5]。然而,Ta的精炼工艺复杂,生产成本低,单一钽结构件的高成本严重限制了其规模化应用^[6]。

不锈钢是一种被广泛使用的关键结构材料,化学性质稳定,强度、塑性和焊接性良好,且在一定温度内力学性能稳定^[7-8]。由于Ta与不锈钢在某些关键性能上有共性,两者复合后既能兼具优异的高温力学性能、耐蚀性及抗氧化性,又比单一的钽合金结构大幅降低构件生产成本^[9],因此,钽-不锈钢复合材料在国内外很多行业的应用显著增加。

钽与不锈钢的焊接面临两大难题,一是物理性能差异显著,焊接过程中易因“加热-冷却”速率不均产生残余应力,导致接头开裂;二是冶金相容性差,易生成 $TaFe_2$ 、 Ta_7Fe_6 、 $TaCr_2$,这些相的存在使接头力学性能大幅劣化。为解决上述难题,研究人员开发了多种焊接工艺,但其适用性存在明显局限:以激光焊为代表的高能束熔焊具有极高的能量密度和集中的热源,能够迅速熔化母材,且热影响区小,能降低焊接过程中产生的热变形和残余应力,冷却和凝固速率高,大大降低偏析和脆性相过度形成的风险,但对设备精度要求高,且接头间隙小,合金元素易烧损以及易产生气孔等缺陷,适用于薄板搭接或管管焊接^[10-11]。爆炸焊虽能较容易实现二者板板复合,但其工艺复杂,成本较高且存在安全隐患^[6];储能焊依赖瞬时放电生热,仅适于金属管壳封

装或薄板搭接^[12]。钎焊技术则相对于其他焊接工艺较为简单,且成本较低,具有更高的灵活性,更容易实现钽-不锈钢板板复合,但也需设计出成分合适的钎料,以确保钽与不锈钢之间的良好连接^[13]。

添加中间层材料使钽-不锈钢复合是一种常见的工艺手段,其作用已被大量研究证实,它的选择和制备工艺对复合界面性能有着重要的影响。本文概括了近年来钽-不锈钢焊接领域的研究进展,重点围绕不同焊接工艺中间层的选择、性能与机理展开分析,为相关领域的研究人员提供较全面的借鉴与参考依据。

1 钽与不锈钢焊接性分析

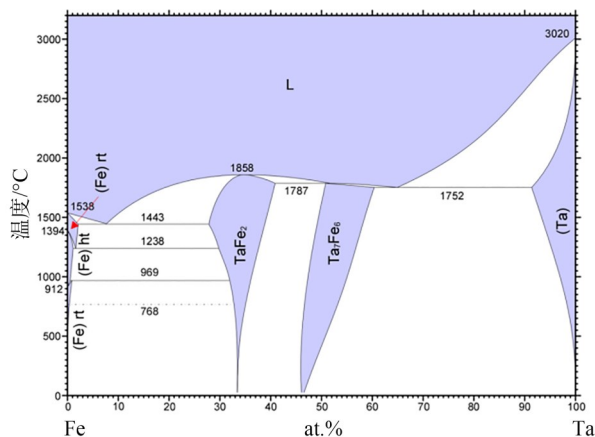
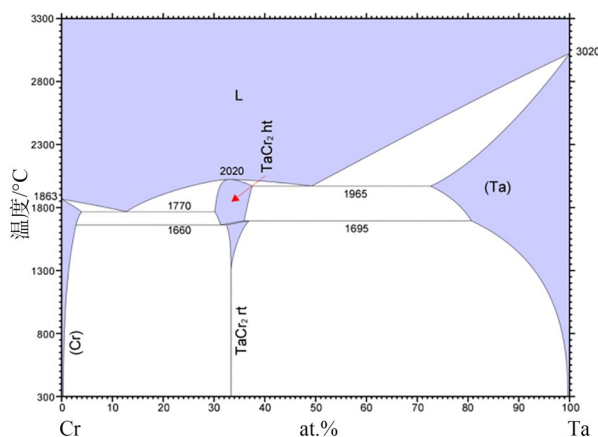
钽与不锈钢在物理性能方面存在着较大的差异:Ta的熔点(2 996℃)是Fe(1 537℃)的2倍,导致焊接时两种金属之间的相互扩散、原子迁移形成冶金结合的过程很慢;Ta热膨胀系数($6.6 \times 10^{-6} K^{-1}$)仅为Fe的近1/3,施焊时焊件会产生很大的残余应力;热导率和比热容远高于Fe,使得焊材熔化不同步,接头成形性欠佳。这些也导致焊接难度极高,Ta与Fe的物理性能参数如表1所示^[14-16]。

表1 Ta-Fe的物理性能参数^[14-15]

Table 1 Physical performance parameters of Ta-Fe^[14-15]

金属	熔点 /°C	密度 /g·cm ⁻³	热导率 /W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	电阻率 (20℃) /μΩ·cm	热膨胀 系数 /10 ⁻⁶ K ⁻¹	比热容 /J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹
Ta	2 996	16.6	57.5	12.4	6.6	150.7
Fe	1 537	7.86	13.3	9.7	15.2	481.5

根据Ta-Fe二元相图,如图1所示,常温下Ta与Fe的固溶度很小,较容易生成金属间化合物 $TaFe_2$ 和 Ta_7Fe_6 ,这些金属化合物通常具有较低的韧性和较高的脆性,在焊接过程中,如果大量生成这类金属化合物,将会对接头的性能产生不利影响。Ta-Cr二元相图如图2所示,Ta-Cr虽能生成中间相 $TaCr_2$ 和其他固溶体,但在室温下其脆性较大,在受到外力作用时容易发生断裂,同样对接头性能产生

图1 Ta-Fe 二元相图^[17]Fig. 1 Binary phase diagram of Ta-Fe^[17]图2 Ta-Cr 二元相图^[18]Fig. 2 Binary phase diagram of Ta-Cr^[18]

不利影响^[17-18]。

由此可见,钽与不锈钢异种金属焊接得到的接头其强度和耐蚀性难以满足工业需求,焊接出安全优质的钽-不锈钢复合构件成为全球共性难题。为解决这一问题,国内外研究人员在钽与不锈钢之间引入了中间层材料作为过渡介质,不仅可以作为屏障有效阻挡有害元素的扩散,保护基材的性能,还能缓解因热膨胀系数差异而产生的热应力,促进钽与不锈钢之间形成牢固的冶金结合,提高界面结合强度。

2 中间层材料在焊接中的应用

经上述分析,钽与不锈钢焊接时,焊缝区易形成共晶组织、晶间相等有害相。加入合适的中间层

材料可以生成减少异种材料间因冶金不相容而产生的脆性金属间化合物的中间相,同时一定程度上还可以降低二者物理化学性能差异导致的焊接残余应力。现有研究关于添加的中间层材料主要分为两种类型:一类是以金属箔片作为中间层的材料,利用金属箔具有延展性、蠕变特性和防止形成脆性反应层的性能以减少残余应力的产生;另一类是与母材热膨胀系数匹配的中间层材料,通过实现接头处热膨胀系数的平稳过渡,也能有效减少残余应力。根据中间层的形状和结构特点,可进一步细分为箔片状、泡沫金属和多孔陶瓷等类型^[19-20]。

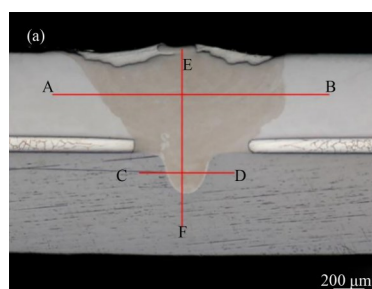
2.1 熔焊

在钽与不锈钢的熔焊过程中,中间层材料的选择对焊接接头质量起着决定性作用。首要原则是避免中间层与钽、不锈钢任一方形成脆性金属间化合物。以锆(Zr)、铌(Nb)和钼(Mo)为例,它们的熔点介于钽与铁之间,与钽有良好的冶金适应性,但根据 Zr-Fe、Nb-Fe、Mo-Fe 二元相图,这些元素与铁反应会生成 $ZrFe_2$ 、 $NbFe_2$ 、 $MoFe_3$ 等多种脆性化合物,严重降低接头的强度与韧性,不适宜作为中间层。结合相图及当前现有研究,发现铜(Cu)、银(Ag)、镍(Ni)被证实是较为理想的中间层材料。这三种元素均属于副族元素,物理化学性能相近,Cu、Ag 与 Ta 和 Fe 之间的固溶度极低,几乎不会产生金属间化合物;Ni 虽然会与 Ta 反应生成 $NiTa_2$ 相,但该相为韧性相,不仅能稳定焊接过程,还能提升接头的综合性能^[21]。

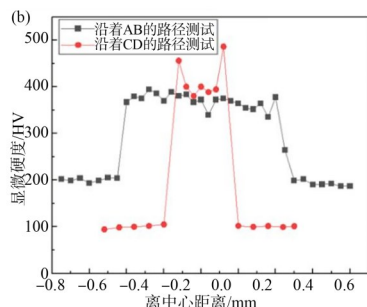
熔焊是将两种或多种材料加热至熔点,用或不用填充材料,利用热量将焊件熔合连接在一起的焊接技术^[22]。Ta 与不锈钢两种母材间物理化学性能相差较大,焊缝成形性较差,容易产生缺陷、残余应力等,若采用传统熔焊,如电弧焊、埋弧焊、气保焊是较难实现冶金结合的。高能束焊接因极高的能量密度和集中的热源,能迅速加热并熔化这两种熔点差异大的材料,同时热影响区相对较小,能够显著降低焊接过程中的热变形和残余应力。由于电子束焊和等离子弧焊成本相对激光焊来说较高,设备相对复杂,目前添加中间层材料的钽与不锈钢激光焊接成为研究者主要关注的技术手段。

冯彬彬^[21]首先通过对不同焊接功率下轧制 Ta

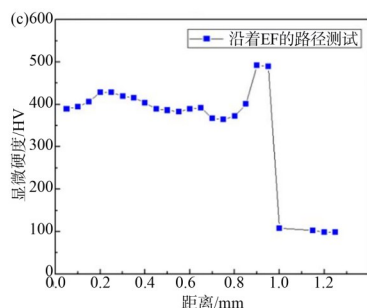
板与304L不锈钢板激光搭接进行研究,得出在功率为600 W时抗拉剪力达最大,然后分别添加Cu和Ag两种中间层材料。结果发现,两种中间层均能有效抑制Ta与304L不锈钢间的有害冶金反应,减少脆性相TaFe₂的生成,Ag中间层的效果尤为突出。如图3所示,添加Ag中间层后,焊缝区内均匀散布的Ag颗粒起到了弥散强化的效果,焊缝区的平均硬度降至460 HV,同时接头的抗剪切力显著提升至2 152.38 N。孟祥毅^[23]为了实现304SS不锈钢与纯钽异种金属之间圆筒对接的高强连接,同样采用激光焊接技术,添加不同厚度的Cu、Ni中间层材料来调控焊缝组织与接头力学性能,研究中间层厚度与元素扩散行为的关系。研究得出,0.4 mm厚的Cu中间层在阻碍Fe-Ta之间生成脆性化合物中效果最



(a) 硬度测试路径



(b) 沿AB和CD路径硬度分布



(c) 沿EF路径硬度分布

图3 夹Ag中间层接头焊缝显微硬度^[21]

Fig. 3 Microhardness of weld joint with Ag interlayer^[21]

佳;0.6 mm厚的Ni中间层在无优先级的向Fe、Ta进行扩散,并与Ta发生反应,减少有害相的数量上效果最佳,且二者均达到提高接头强度的作用,如图5、图6所示。在Cu、Ni中间层厚度相同的情况下,Ni比Cu对Ta的扩散抑制效果会更好些。

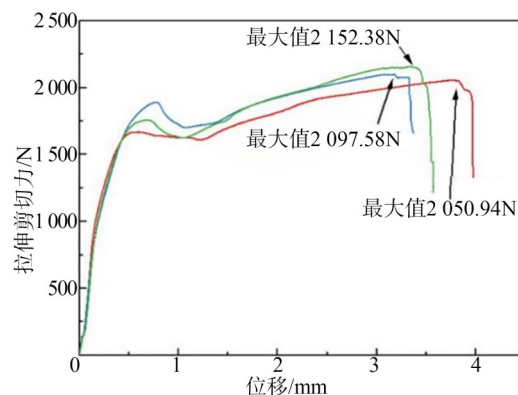


图4 夹Ag中间层接头拉伸的力-位移曲线^[21]

Fig. 4 Force-displacement curves of the clamped Ag interlayer joint stretched^[21]

从近些年关于添加中间层的钽与不锈钢激光焊接的研究可以看出,难熔金属的激光焊主要适用于管管焊接和薄板搭接。而对于钽与不锈钢在板板大面积的整体复合,激光焊接的效率较低且对设备的要求较高,成本价格高,因此在实际应用上采用激光焊来实现钽与不锈钢板整体复合条件受限。

2.2 压焊

从压焊技术考虑,选择合适的中间层材料时,需着重考虑其与钽和不锈钢的相容性、热传导性能及形变能力。理想的中间层材料应具备优异的热传导性能,以便在压焊过程中快速传递热量,从而促进两侧母材的塑性变形和原子扩散,实现有效连接。同时,良好的变形能力也应适应压焊过程中的应力分布和变形要求,确保钽和不锈钢形成牢固的冶金结合,提高焊接接头的整体质量和性能。常用的中间层材料包括铜、镍和钛及其合金,这些材料不仅能够填补钽与不锈钢之间的物理性质差异,并在一定程度上减轻焊接过程中产生的热应力。

压焊是通过加压的方式使工件在固态下实现原子间结合的焊接方法^[24]。在焊接过程中,压焊会对焊件施加一定的外界作用力,使材料在焊接处出现塑性变形,至接触面间的距离达微观原子水平,此时原子间的作用力会使被焊材料连为一体。压

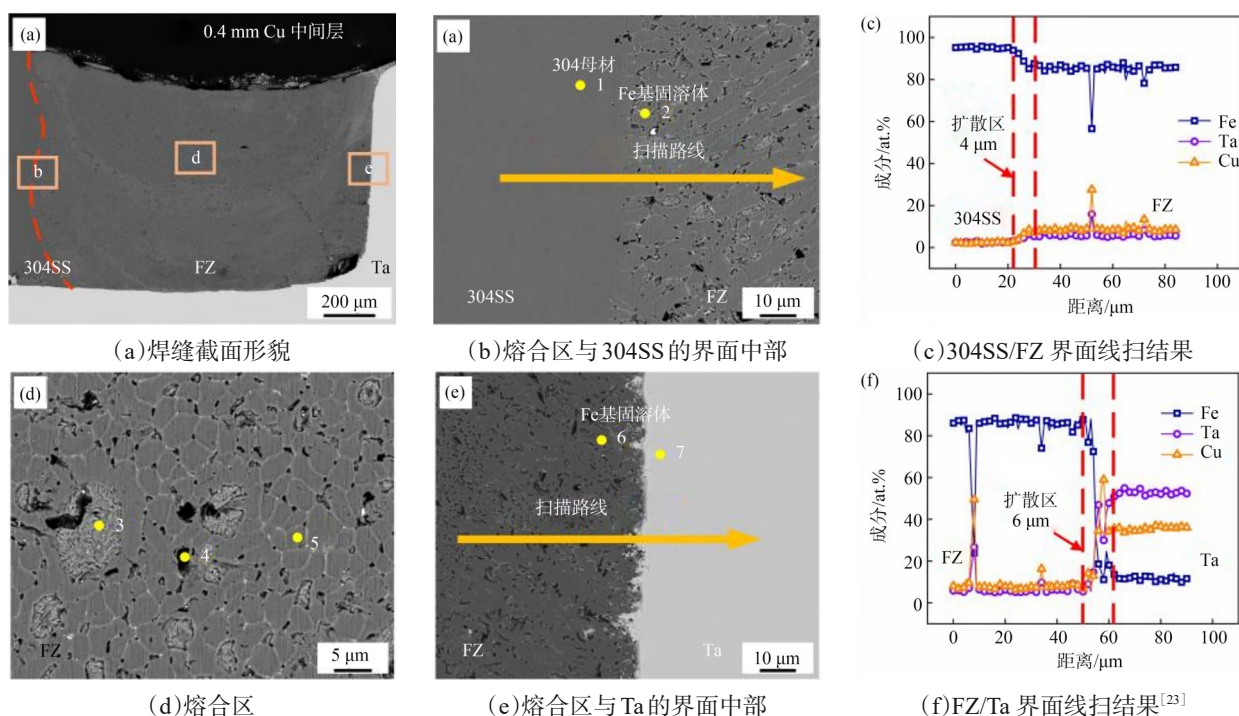


图5 厚为 0.4 mm Cu 中间层的 304SS/Ta 接头的 SEM 形貌及 EDS 线扫结果^[23]

Fig. 5 SEM morphology and EDS line scanning results of 304SS/Ta joint with a thickness of 0.4 mm Cu interlayer

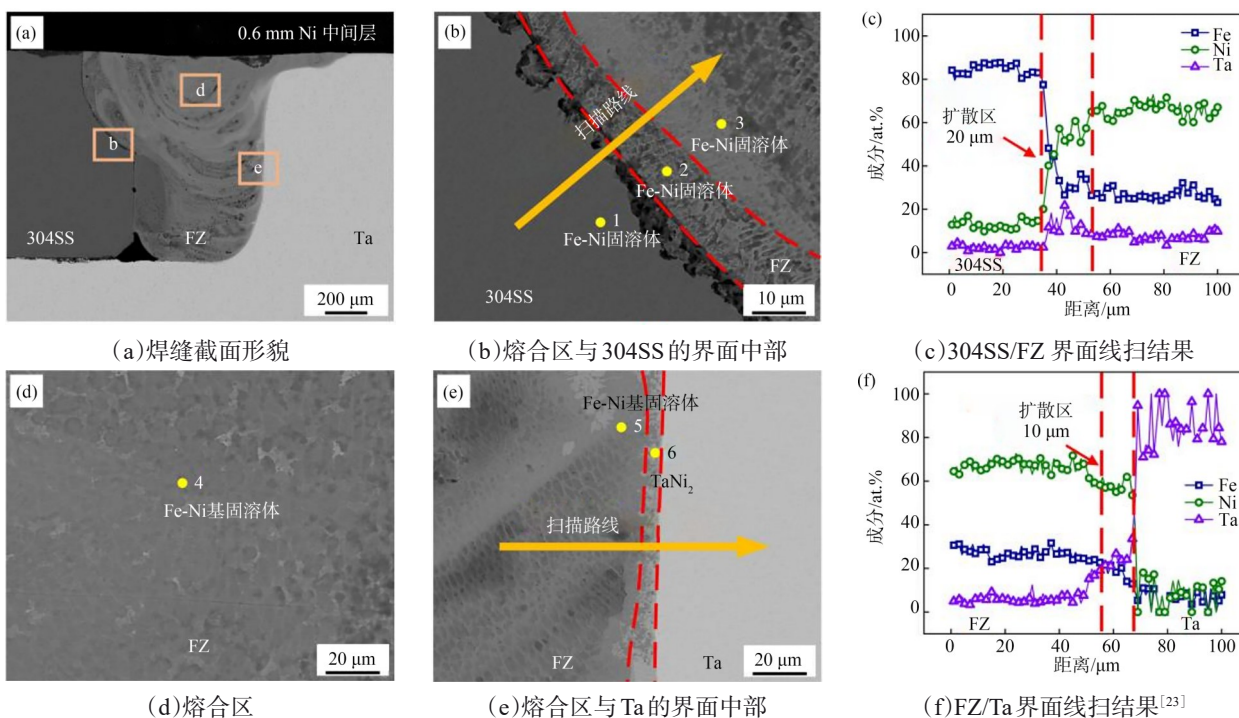


图6 0.6 mm 厚度 Ni 中间层的 304SS/Ta 接头的 SEM 形貌及 EDS 线扫结果

Fig. 6 SEM morphology and EDS line scanning results of 304SS/Ta joint with a thickness of 0.6 mm Ni interlayer

焊过程中材料未熔化,也就避免了熔焊过程中有益合金元素烧损和有害元素侵入焊缝的问题。因此,一些较为先进的压焊方法如爆炸焊、储能焊等得以

应用于钽和不锈钢焊接中。

Henryk P 等人^[25]对 Ta/Cu/304L 不锈钢板复合层采用爆炸焊,系统研究了 Ta/Cu 和 Cu/304L 不锈

钢界面的微观组织和力学性能。Ta/Cu 和 Cu/304L 不锈钢界面处的熔合区形态、组成完全不同。如图 7 所示,靠近 Ta/Cu 界面的熔合区多由不同尺寸的纯 Cu 和 Ta 颗粒的混合物组成,而靠近 Cu/304L 不锈钢界面的熔合区则由 Cu 和 304L 不锈钢中的元素组成的纳米颗粒化合物组成。如图 8 所示,两个界面熔合区的显微硬度明显低于 304L 不锈钢基体因爆炸冲击而形成的应变硬化层的,说明界面并未形成连续的脆性相,从而保证了接头的基本韧性。杨全虎^[26]采用储能点焊对钽与不锈钢薄板进行搭接焊,通过泛函理论计算得出三种适于 Ta/不锈钢储能焊的中间层材料成分含量,并采用快冷凝固制备中间层合金箔。对比研究发现,添加 $\text{Ta}_7\text{Ni}_{32}\text{Cr}_{19}\text{Co}_{42}$ 中间层合金的储能焊其接头无焊接缺陷,在剪切口出现大量韧窝,且无脆性金属间化合物产生,综合性能是三者中最高的,如图 9 所示。翟秋亚等人^[27]根据以等组分的 $\text{Ta}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Cu}_{20}$ 合金为目标成分的熔核金属高熵化的方法,根据焊接过程两母材熔合比折合获得 $\text{Ta}_8\text{Ni}_{30}\text{Cr}_{20}\text{Cu}_{42}$ 中间层合金,采用急冷中间层合金箔对 Ta1/0Cr18Ni9 不锈钢薄板进行电容储能点焊,从源头上通过熔核金属高熵化消除脆性化合物,促使固溶体形成,达到改善接头性能的目的。由图 10 可知,在接头处的熔核组织均匀致密,且无裂纹、气孔等常见焊接缺陷存在。

从上述压焊工艺中可以看出,添加中间层的钽与不锈钢板复合采用爆炸焊是较为容易实现的,但由于爆炸焊操作难度和复杂性相对较大,成本较高且存在安全隐患,因此将爆炸焊应用于钽与不锈钢板复合并不是最佳选择。而根据储能焊的工作原理其往往适合金属管壳封装或薄板搭接,对于板板复合是极不易实现的。

2.3 钎焊

从钎焊技术考虑,由于钽与不锈钢焊接属于异种金属的焊接,二者之间存在物理化学性能差异,易产生脆性金属间化合物,影响接头的使用性能。因此,添加钎料层可避免母材之间的相互扩散作用,减少脆性相的生成。通过合理设计钎料,选择合适的钎焊工艺可有效避免 TaFe_2 等脆性相的产生。

钎焊是利用熔融钎料来填充固态焊件缝隙使金属达到冶金结合的重要焊接方法。钎焊的应用

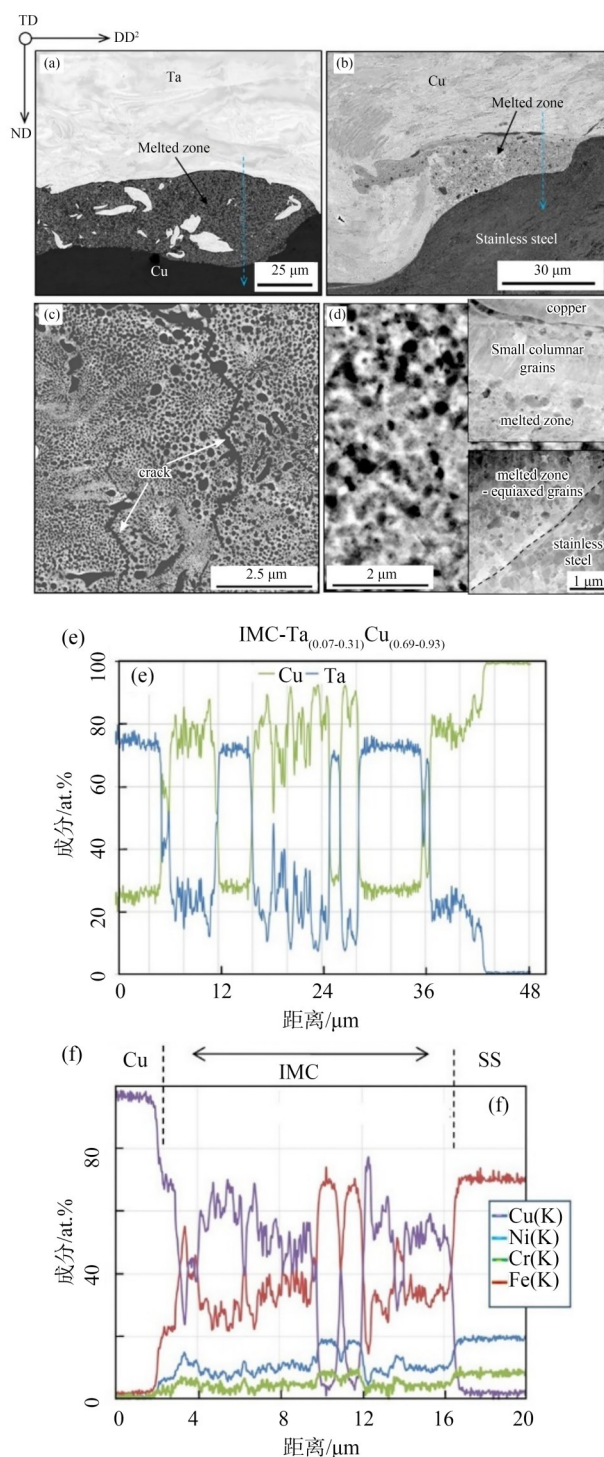


图 7 (a), (b) 为 Ta/Cu 和 Cu/304L 之间的熔合区组织; (c), (d) 为内部组织; (e), (f) 为化学成分线扫描显示熔合区主要元素的分布^[25]

Fig. 7 (a), (b) Shows the organization of the fusion zone between Ta/Cu and Cu/304L; (c), (d) internal organizations; (e), (f) shows chemical composition line scans showing the distribution of major elements in the fusion zone^[25]

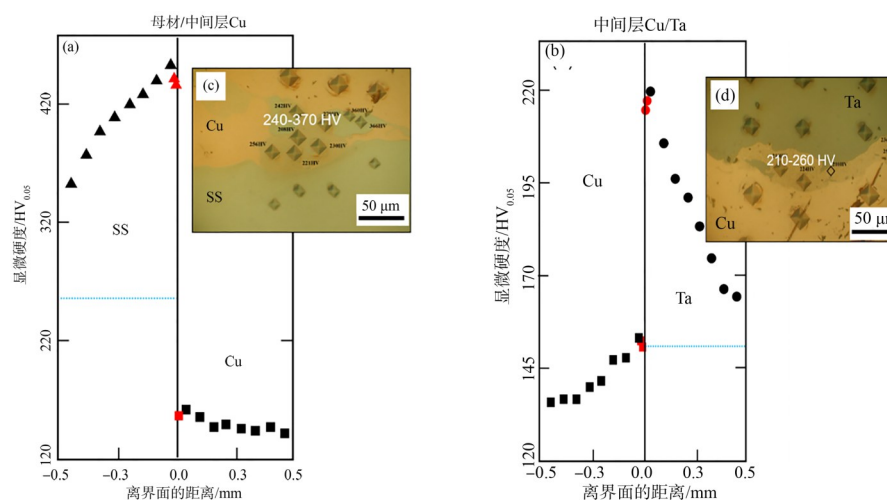


图8 (a),(b)为Cu/Ta和Cu/304L界面层的显微硬度(红色三角形表示靠近熔合区的界面层测得的显微硬度值);(c),(d)为光学显微图下熔合区的显微硬度值^[25]

Fig. 8 (a),(b)Shows the microhardness of Cu/Ta and Cu/304L interface layer(The red triangles represent the microhardness values measured at the interface layer near the fusion zone);(c),(d) are the microhardness values of the fusion zone under the optical micrograph^[25]

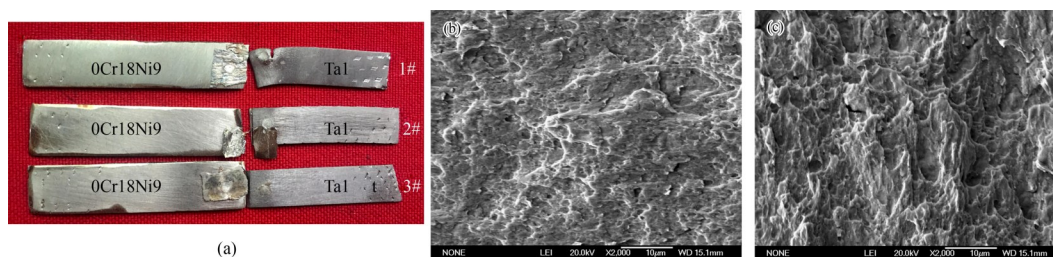


图9 Ta1/Ta₈Ni₃₀Cr₂₀Cu₄₂/0Cr18Ni9拉剪断口形貌^[26]

Fig. 9 Tensile shear fracture morphology of Ta1/Ta₈Ni₃₀Cr₂₀Cu₄₂/0Cr18Ni9^[26]

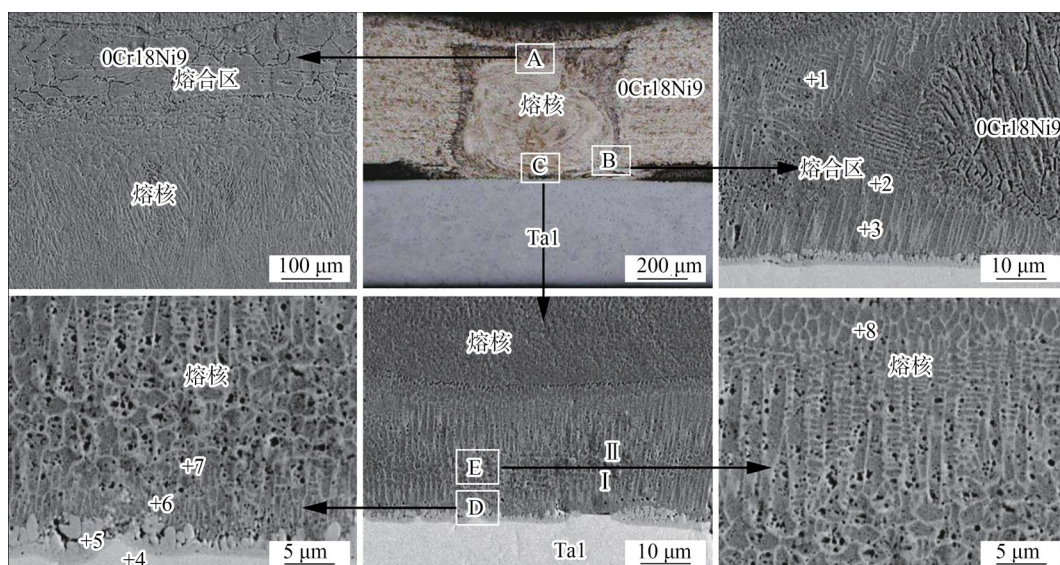


图10 Ta1/Ta₈Ni₃₀Cr₂₀Cu₄₂/0Cr18Ni9储能焊接头的微观组织^[27]

Fig. 10 Microstructure of Ta1/Ta₈Ni₃₀Cr₂₀Cu₄₂/0Cr18Ni9 energy storage welding joint^[27]

非常广泛,特别是不锈钢的钎焊,因其能有效降低焊接温度,防止被连接材料发生蠕变,减小焊接过

程中的残余应力,提高强度、耐蚀性等,广泛应用于飞机零件、汽车发动机、热交换器等^[28-30]。考虑到钽

与不锈钢的热膨胀系数差异大,而钎焊能在比熔焊更低的温度下实现二者复合,从而减轻焊接接头热应力的影响,这也是很多研究人员更倾向于采用钎焊使其复合的原因。但由于钎料成分设计存在较大挑战,目前应用钎焊方法于钽与不锈钢之间连接的研究主要采用感应钎焊、炉中钎焊等。

为了解决钽与不锈钢物理化学性能差异大,导致焊接接头开裂的问题,刘京召^[31]通过成分设计,制备出Zr-Ti-Cu-Ni系和Ni-Cr-Fe-Si-B系非晶钎料,分别对Ta-2.5W合金/0Cr18Ni9不锈钢进行高频感应钎焊和真空炉中钎焊,来研究不同成分的钎料和钎焊工艺对焊接接头组织和性能的影响。在使用 $Zr_{45}Ti_{30}Cu_{15}Ni_{10}$ 和 $Ni_{82.5}Cr_7Fe_3Si_{4.5}B_3$ 钎料对Ta-2.5W合金/0Cr18Ni9不锈钢进行钎焊发现,得到的接头组织致密均匀,无明显缺陷且断裂均发生在Ta-2.5W侧靠近钎缝处,但对比发现Ta-2.5W/ $Ni_{82.5}Cr_7Fe_3Si_{4.5}B_3$ /0Cr18Ni9进行真空炉中钎焊得到由 Ni_2Ta +NiSi、 Ni_2Ta +NiTa+NiTa₂+NiSi和NiSi+Ni₃Si+NiTa组成的钎缝中心区,且钎缝与0Cr18Ni9不锈钢的过渡区为Ni基固溶体,与Ta-2.5W合金的过渡区为NiTa+NiSi,其剪切强度超过116.2 MPa,远高于感应钎焊的结果,如图11、图12所示。通过正交和单因素试验,王妮君^[32]设计出钽与0Cr18Ni9不锈钢钎焊用钎料,分别为 $(Ti_{37.5}Zr_{37.5}Cu_{15}Co_{10})_{95}V_5$ 和Ni-7Cr-5Zr-3Fe-3B-4.5Si,采用高频感应钎焊来实现钽板与0Cr18Ni9不锈钢板异种金属的连接。以 $(Ti_{37.5}Zr_{37.5}Cu_{15}Co_{10})_{95}V_5$ 为钎料钎焊后,接头填充致密,最大剪切强度达71.0 MPa,而以Ni-7Cr-5Zr-3Fe-3B-4.5Si箔材为钎料在焊接电流9 500A、电极压力3 500 N、焊接时间60 ms得到的接头剪切强度为188.0 MPa,其连接效果更佳。纪腾飞^[33]对钎料成分设计,制备出Ni-Cr-Fe-Si-B和Ni-Cu-Ge-Si-B两系的合金钎料,利用这两种钎料对钽/S30408不锈钢板材进行炉中钎焊,均能实现钽-不锈钢的有效连接,但采用 $Ni_{81.5}Cr_8Fe_2Si_5B_{3.5}$ 钎料形成的钎焊接头强度高些,钎缝无明显脆性化合物,如图13所示。

由此可见,钎焊在实现钽与不锈钢板板复合的操作相对简单,设备要求较低,焊接条件可控,因此在板板复合过程中,可以更容易地控制焊接质量和保证生产效率。此外,钎焊还可以通过调整钎料成

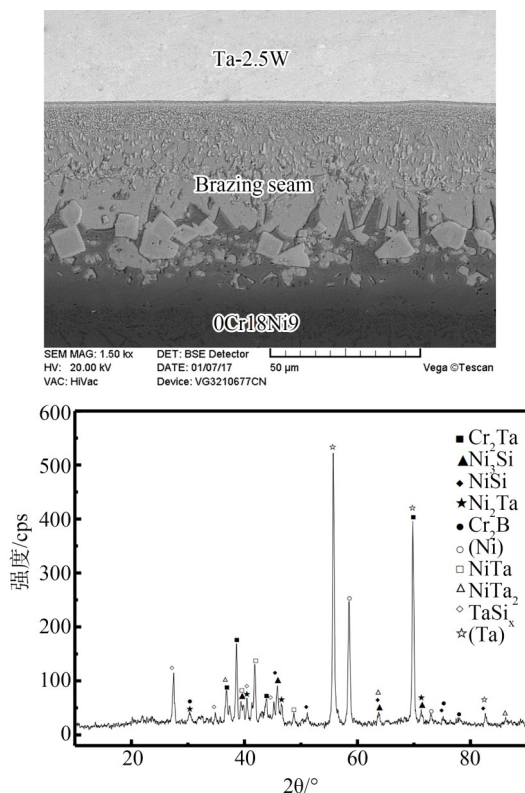


图11 Ta-2.5W/ $Ni_{82.5}Cr_7Fe_3Si_{4.5}B_3$ /0Cr18Ni9炉中钎焊接头组织及钎缝XRD分析图谱^[31]

Fig. 11 Ta-2.5W/ $Ni_{82.5}Cr_7Fe_3Si_{4.5}B_3$ /0Cr18Ni9 furnace brazing head of organization and the brazing seam XRD analysis^[31]



图12 拉剪断裂的炉中钎焊Ta-2.5W/ $Ni_{82.5}Cr_7Fe_3Si_{4.5}B_3$ /0Cr18Ni9接头形貌^[31]

Fig. 12 Furnace brazed Ta2.5W/ $Ni_{82.5}Cr_7Fe_3Si_{4.5}B_3$ /0Cr18Ni9 joint morphology with tensile shear fracture^[31]

分来适应不同材料和厚度的板板复合需求,具有更高的灵活性。但具体的钎焊方法和钎料成分设计还需根据材料的特性、工艺要求以及生产条件等因素来综合考量。

3 未来研究方向与展望

3.1 采用更先进的焊接工艺

为克服传统熔焊、压焊及钎焊在连接钽与不锈

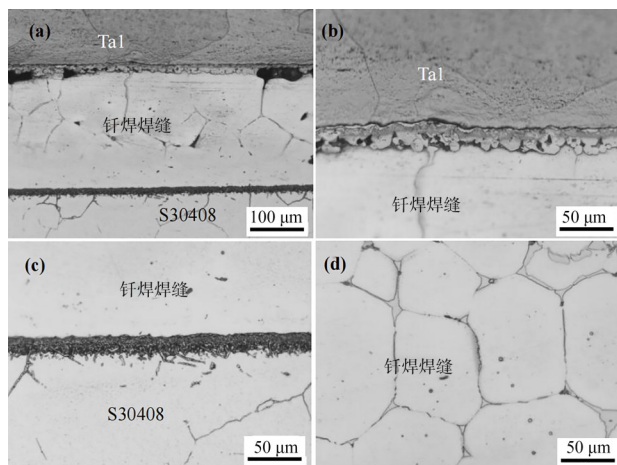


图 13 Ta1/Ni_{81.5}Cr₈Fe₂Si₅B_{3.5}/S30408 钎焊接头组织^[33]

Fig. 13 Brazing joint structure of Ta1/Ni_{81.5}Cr₈Fe₂Si₅B_{3.5}/S30408^[33]

钢时的固有局限,未来研究应着眼于开发更先进和智能化的焊接工艺:(1)选择其他焊接技术来提高焊接质量,增强接头性能。如累积叠轧焊(ARB),通过重复的堆叠和轧制,可有效实现材料之间的冷焊,细化晶粒,提高接头性能,能够避免钽与不锈钢因熔点差异带来的影响^[34-35];(2)通过将多种焊接工艺进行复合,充分利用各种焊接工艺的优势,实现对接头性能的全面优化。如激光与 TIG 复合焊,激光焊能够产生高能量密度的热源,而 TIG 焊则能够稳定地维持焊接过程,两者相结合,相互弥补不足,实现更深的熔透,确保接头的质量,提升大厚度接头焊接的制造水平^[36-37]。

3.2 优化中间层材料制备工艺

虽然中间层材料在钽与不锈钢焊接领域的研究上已取得一定的进展,但仍存在些问题亟需解决。比如,中间层材料的选择和制备过程需要更精确的控制和优化,界面相容性和结合机理等方面的研究也有待深入。未来的研究可以通过应用先进的材料表征技术和数值模拟方法,来进一步探索中间层材料在钽与不锈钢焊接中的相互作用机制,从而为提升焊接接头的性能提供新的研究方向。

3.3 开发新型中间层材料

新型中间层材料的开发可以为钽与不锈钢异种金属焊接提供更多的技术选择和创新思路。通过综合考虑界面兼容性、功能性、环境影响和成本效益等因素,制备出性能优异、环保绿色、成本效益高的新型中间层材料,进一步推动钽与不锈钢焊接

的发展和应用。由于 Ag、Cu 与 Ta 和 Fe 之间几乎不产生金属间化合物,在钽与不锈钢熔焊、压焊中的研究得以证实,并得到较为优异的性能,但对于钽与不锈钢板板复合来说,这两类焊接工艺在应用实施上受限。因此,还可考虑采用钎焊通过添加银基、铜基等钎料来实现复合,在银基钎料中考虑到 Ag 为贵金属,可再添加其他合金元素如 Ni 等来减少 Ag 含量,来达到降低成本的目的,还能抑制脆性相产生,进一步提升接头性能^[38-39]。

4 结论

添加中间层材料在钽与不锈钢的焊接中起到了至关重要的作用,并且这一领域的研究正在不断深入。目前国内外关于添加中间层的钽与不锈钢异种金属的连接主要采用了激光焊、爆炸焊、储能焊和钎焊等技术。在实现添加中间层的钽与不锈钢板板复合时,激光焊具有极高的能量密度和集中的热源,能够迅速熔化母材,降低焊接过程中产生的热变形和残余应力,但对设备的要求高,存在合金元素易烧损以及易产生气孔等缺陷,适用于薄板搭接或管管焊接;爆炸焊虽能较容易实现二者板板复合,但其工艺复杂,成本较高且存在安全隐患;储能焊由其工作原理往往适用于金属管壳封装或薄板搭接。而采用钎焊技术相对于其他焊接技术来说工艺较简单,成本较低,具有更高的灵活性,更容易实现钽-不锈钢板板复合,但也需设计出成分合适的钎料,以确保钽与不锈钢之间的良好连接。因此,综合来看,采用钎焊技术实现钽与不锈钢复合是最具应用前景的工艺手段。

随着技术持续更新和工艺不断改进,钎焊技术正成为连接钽与不锈钢板更高效、更稳定的解决方案。设计出成分合理,性能优异的钎料,也将是研究人员重点关注对象。相信未来钎焊技术在钽与不锈钢板复合的应用领域内具有巨大的发展空间和无限的可能性。

参考文献:

- [1] 王晖,张小明,李来平,等.钽及钽合金在工业装备中的应用[J].装备制造技术,2013(08):115-117.

- WANG H, ZHANG X M, LI L P, et al. Tantalum and tantalum alloy application in industrial equipment [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2013 (08): 115-117.
- [2] 左更. 中国钽铌市场发展现状及未来展望[J]. 冶金经济与管理, 2023(05): 4-7.
- ZUO G. Development status and future prospect of tantalum niobium market in China [J]. Metallurgical Economy and Management, 2023(05): 4-7.
- [3] 陈燕飞, 张金祥, 周吉学, 等. 钽的焊接技术研究进展[J]. 电焊机, 2021, 51(01): 37-41+65.
- CHEN Y F, ZHANG J X, ZHOU J X, et al. Research progress on welding technology of tantalum [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(01): 37-41+65.
- [4] Wei X, Xia L, Liu Z. A review of tantalum resources and its production [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(10): 3132-3156.
- [5] Zuo X, Zhu X, Chen J. Trade dependence network structure of tantalum trade goods and its effect on trade prices: An industry chain perspective [J]. Resources Policy, 2022, 79: 103065.
- [6] 周永强, 冯杉杉, 朱政强. 钽与不锈钢异种材料焊接的研究进展[J]. 电焊机, 2023, 53(01): 63-70.
- ZHOU Y Q, FENG S S, ZHU Z Q. Research progress on welding of tantalum and stainless steel dissimilar materials [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(01): 63-70.
- [7] Hsu P H, Huang S Y, Chiang C C, et al. Dynamic friction properties of stainless steels [J]. Dynamic Behavior of Materials, 2016, 1: 149-154.
- [8] Dong Z H, Li Y W, Lee B, et al. Research status of welding technology of ferritic stainless steel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118: 2805-2831.
- [9] 周春阳, 吴世凯, 肖荣诗. 高温合金-不锈钢异种金属光纤激光焊接试验研究[J]. 应用激光, 2012, 32(02): 108-111.
- ZHOU C Y, WU S K, XIAO R S. Experimental study on laser welding of superalloy-stainless steel dissimilar metal fiber [J]. Applied Laser, 2012, 32(02): 108-111.
- [10] Mai T A, Spowage A C. Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel - kovar, copper - steel and copper - aluminium [J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 374(1-2): 224-233.
- [11] 韩永全, 孙振邦, 杜茂华, 等. 铝合金高能束焊接及其复合焊接的研究现状[J]. 电焊机, 2020, 50(09): 221-231.
- HAN Y Q, SUN Z B, DU M H, et al. Research status of high energy beam welding and composite welding of aluminum alloy [J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(09): 221-231.
- [12] 王旭光, 杨稼溢, 江凯, 等. 基于MATLAB的集成电路储能封装能量分布研究[J]. 电子与封装, 2022, 22(01): 11-16.
- WANG X G, YANG J Y, JIANG K, et al. Research on Energy Distribution of Energy Storage Welding in Integrated Circuit Package Based on MATLAB [J]. Electronics & Packaging, 2022, 22(01): 11-16.
- [13] 崔洁. 钎接TA2/Q235用非晶钎料研究[D]. 陕西: 西安理工大学, 2014.
- CUI J. Research on amorphous brazing fillers for brazing Titanium TA2 and Q235 steel [D]. Shan Xi: Xi'an University of Technology, 2014.
- [14] 马雁. Nb-1Zr合金与不锈钢焊接结合层的研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2003.
- MA Y. Study of Welded Joint Layer of Nb-1Zr Alloy and Stainless Steel [D]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2003.
- [15] 刘玉奎. 一种钽钨合金厚板焊接工艺分析[J]. 中国机械, 2023(35): 18-21.
- LIU Y R. Welding process analysis of a tantalum-tungsten alloy thick plate [J]. Machine China, 2023 (35): 18-21.
- [16] 陈国庆, 甘展华, 张戈, 等. 钼合金与不锈钢异种金属焊接技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2023, 66(19): 93-99.
- CHEN G Q, GAN Z H, ZHANG G, et al. Research progress of welding technology between niobium alloy and stainless steel dissimilar metal [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(19): 93-99.
- [17] Okamoto H. Fe-Ta (Iron-Tantalum) [J]. Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 2013, 34(02): 165-166.
- [18] Okamoto H. Cr-Ta (Chromium-Tantalum) [J]. Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 2006, 27(02): 199-199.
- [19] 马菁, 陈永威, 王涛, 等. 中间层辅助钎焊陶瓷与金属缓解残余应力研究进展[J]. 材料开发与应用, 2023, 38(03): 17-23.
- MA Q, CHEN Y W, WANG T, et al. Progress research on the interlayer assisted brazing of ceramic and metal to relieve residual stress [J]. Development and Application of Materials, 2023, 38(03): 17-23.

- [20] 陈席国,姜文雍,王胜. 陶瓷-金属钎焊接头残余热应力研究进展[J]. 南方农机, 2024, 55(03): 131-137.
CHEN X G, JIANG W Y, WANG S. Research progress of residual thermal stress in ceramic-metal brazed joints[J]. South Agricultural Machinery, 2024, 55(03): 131-137.
- [21] 冯杉杉. Ta/304L 激光焊接接头组织与力学性能研究[D]. 江西:南昌大学, 2023.
FENG S S. Study on Microstructure and Mechanical Properties of Ta/304L Laser Welded Joint[D]. Jiangxi: Nanchang University, 2023.
- [22] Tushar S, Mikhail I, Evgeny T, et al. A comprehensive review on fusion welding of high entropy alloys—Processing, microstructural evolution and mechanical properties of joints[J]. Inter-national Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2024, 7(01): 122-183.
- [23] 孟祥毅. 基于元素调控的不锈钢/钽激光焊接界面行为及机理研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学, 2022.
MENG X Y. Research on Interface Behavior and Mechanism During Laser Welding of Stainless Steel to Tantalum Based on Elemental Regulation [D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [24] 陈祝年,陈茂爱. 焊接工程师手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2019.
- [25] Henryk P, Chulist R, Mania I. Structural properties of interfacial layers in tantalum to stainless steel clad with copper interlayer produced by explosive welding [J]. Metals, 2020, 10(07): 3-18.
- [26] 杨全虎. Ta1 与 0Cr18Ni9 薄板的电容储能放电连接 [D]. 陕西:西安理工大学, 2022.
YANG Q H. Research on Capacitor Discharge Welding of Tantalum Ta1 and 0Cr18Ni9 Sheets [D]. Shan Xi: Xi'an University of Technology, 2022.
- [27] 翟秋亚,刘帅宾,杨全虎,等. Ta1/Ta₈Ni₃₀Cr₂₀Cu₄₂/0Cr18Ni9 储能焊接接头组织与性能[J]. 焊接学报, 2020, 41(10): 60-64+86.
DI Q Y, LIU S B, YANG Q H, et al. Microstructure and properties of Ta1/Ta₈Ni₃₀Cr₂₀Cu₄₂/0Cr18Ni9 energy storage welding joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(10): 60-64+86.
- [28] 刘蔓钦. Ni 基高温合金钎料钎焊 SiC 陶瓷工艺及机理研究[D]. 重庆:重庆大学, 2022.
LIU M Q. Study on Technology and Mechanism of Brazing SiC Ceramics with Ni Base Superalloy Filler Metal[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [29] Kim W, Jung J. Brazing process of stainless steel [J]. Journal of Welding and Joining, 2011, 29(06): 660-664.
- [30] Diana B, Alexey S, Julia G, et al. Brazing tungsten/tantalum/RAFM steel joint for DEMO by fully reduced activation brazing alloy 48Ti-48Zr-4Be [J]. Metals, 2021, 11(09): 4-15.
- [31] 刘京召. Ta-2.5W 与 0Cr18Ni9 的钎焊研究[D]. 陕西:西安理工大学, 2022.
LIU J Z. Research on Brazing of Tantalum Alloy Ta-2.5W and 0Cr18Ni9 Stainless Steel Plates [D]. Shan Xi: Xi'an University of Technology, 2022.
- [32] 王妮君. 钽 Ta1 与 0Cr18Ni9 不锈钢的钎焊研究[D]. 陕西:西安理工大学, 2019.
WANG N J. Research on Brazing of Tantalum Ta1 and 0Cr18Ni9 Stainless Steel Plates [D]. Shan Xi: Xi'an University of Technology, 2019.
- [33] 纪腾飞. Ta1 钽与 S30408 不锈钢的炉中钎焊研究 [D]. 陕西:西安理工大学, 2018.
JI T F. Research on Vacuum Furnace Brazing of Tantalum Ta1 and S30408 Stainless Steel Plates [D]. Shan Xi: Xi'an University of Technology, 2018.
- [34] Mahmoud E, Wang Q. Accumulative roll-bonding of aluminum alloys and composites: An overview of properties and performance [J]. Journal of Materials Research and Technology-JMR&T, 2022, 19: 4381-4403.
- [35] Ghalehbandi S M, Malak M, Gupta M. Accumulative roll bonding—A review [J]. Applied Sciences, 2019, 9(17): 3627.
- [36] Zhu B Q, Zhao Z J, Zou J L, et al. The influence of the arrangement for fiber laser and TIG on the hybrid welding process[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 174: 110564.
- [37] 马然,董丽喆,吴世凯,等. 薄板钛合金光纤激光-钨极惰性气体保护电弧复合焊接工艺研究[J]. 中国激光, 2014, 41(05): 85-92.
MA R, DONG B Z, WU S K, et al. Study on fiber laser-TIG arc composite welding technology of titanium alloy sheet [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(05): 85-92.
- [38] Sa'ad A A, Hashim F A, Salim R K. Active Brazing of Tantalum-to-Tantalum [J]. Thi-Qar University Journal for Engineering Sciences, 2010, 1: 1.
- [39] Wang X R, Yu D K, He Y M, et al. Effect of Sn content on brazing properties of Ag based filler alloy [J]. Mater Sci, 2013, 3: 14.