

钛与镍钛形状记忆合金焊接研究现状

王小强^{1,2,3} 李川江^{1,2} 肖萍¹ 黄勇^{1,2,3} 黄海博^{1,3}

1. 新疆工程学院机电工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830023

2. 新疆煤矿机电工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830023

3. 建筑钢结构智能制造技术兵团重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830023

[摘要] 文章综述了钛与 NiTi 形状记忆合金焊接技术的最新研究进展。重点阐述了有关 NiTi 形状记忆合金异种金属焊接方法(高能束焊接、固相焊和钎焊、熔焊热导钎焊)及如何避免焊接中金属间化合物和裂纹的产生。简单介绍了钛与形状记忆合金焊接现状, 且对 NiTi 形状记忆合金异种金属焊接技术未来发展进行了展望。

[关键词] 金属间化合物; NiTi 形状记忆合金; 接头性能; 异种金属焊接

DOI: 10.33142/ect.v3i2.15523

中图分类号: TG139.6

文献标识码: A

Research Status of Welding of Titanium and Nickel Titanium Shape Memory Alloys

WANG Xiaoqiang^{1,2,3}, LI Chuanjiang^{1,2}, XIAO Ping¹, HUANG Yong^{1,2,3}, HUANG Haibo^{1,3}

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi, Xinjiang, 830023, China

2. Xinjiang Coal Mine Electromechanical Engineering Technology Research Center, Urumqi, Xinjiang, 830023, China

3. Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Technology for Building Steel Structures, Urumqi, Xinjiang, 830023, China

Abstract: This article reviews the latest research progress in welding technology of titanium and NiTi shape memory alloys. Emphasis was placed on the welding methods of NiTi shape memory alloy dissimilar metals (high-energy beam welding, solid-state welding and brazing, fusion welding thermal conductivity brazing) and how to avoid the formation of intermetallic compounds and cracks during welding. This article briefly introduces the current status of welding between titanium and shape memory alloys, and looks forward to the future development of dissimilar metal welding technology for NiTi shape memory alloys.

Keywords: intermetallic compounds; NiTi shape memory alloy; joint performance; dissimilar metal welding

引言

NiTi 形状记忆合金是一种新型功能材料, 被称作“跨越 21 世纪的理想材料^[1]”, 其以优良的形状记忆效应、超弹性、耐磨性、阻尼性、良好的综合力学性能等广泛应用于航空航天, 医疗器械, 仪器仪表, 核工业, 家电等多行业^[2-4], 如人造卫星上庞大的天线可以用 NiTi 记忆合金制作。钛及钛合金作为一种战略资源金属, 具有密度低、比强度高、耐高温、韧性好、耐蚀性好和生物相容性等物化性好被广泛应用于航空航天、医疗、船舶和海洋多领域中^[5-8], 主要应用于制作飞机发动机压气机部件, 其次为火箭、导弹和高速飞机的结构件。因此, 将 NiTi 合金的功能特性与钛及钛合金的力学性能和耐腐蚀性能结合起来, 对整个现代化工程材料领域将会是一次新的突破。例如, 新一代高旁通比涡扇发动机对飞机起飞及降落噪声和巡航油耗提出了更高的要求, 开发自适应 NiTi 合金-钛合金异种金属锯齿形尾喷管, 利用 NiTi 合金形状记忆特性实现飞机智能降噪及节油, 对我国新一代航空发动机研制具有重要意义。由于 Ti/NiTi 合金物理化学性质差异显著, 在焊接过程中易形成脆性金属化合物, 导致焊接接头力学性能变差, 故实现 Ti/NiTi 合金的高质量连接存在较大困难。

本文主要以如何避免金属间化合物的生成、改善接头

力学性能为目的, 实现高质量焊接接头为主线进行 Ti/NiTi 合金异种金属连接论述。通过对不同焊接方法和工艺参数研究, 平衡 Ti/NiTi 合金的焊接性, 这是进一步拓宽 NiTi 形状记忆合金应用范围的重要条件^[9]。

1 Ti/NiTi 合金的焊接难点

1.1 钛及钛合金的焊接难点

钛的化学活性较强, 焊接时较杂质和气孔相当敏感, 且焊接中极易受空气、水分的污染, 迫使焊接接头力学性能下降。除此之外, 钛的熔点较高、电阻率大, 导致钛在焊后熔池中有较高的热量延续, 促使晶粒粗化, 从而降低了接头的塑性^[10]。基于钛及钛合金与异种金属焊接的挑战, 张润泽、陈沛等人^[11,12]对钛/钢异种金属焊接进行了研究, Deng、陈涛等人^[13,14]对钛/铜异种金属焊接进行了研究。最终他们证实了焊缝中 Ti-Fe、Ti-Cu 等系列金属间化合物的存在, 严重影响了焊接质量。

1.2 NiTi 合金的焊接难点

由于 NiTi 合金对温度和化学成分变化比较敏感, 在高温环境下能与气体中的 H、N、O 等反应, 易改变焊缝中原有成分含量, 且相变导致焊缝晶粒粗化和形成第二相粒子, 降低接头的力学性能和损伤了形状记忆性能^[15]。为了控制 NiTi 合金焊接过程中产生的金属间化合物和宏-微观缺陷, 一些

研究者做了相关研究。如 Li、刘兰胜、M. J. C 等人^[16-18]分别对 TiNi 合金/不锈钢焊接做了相应的实验分析, 结果显示, 焊缝区形成脆性化合物, 导致拉伸强度和延性明显下降。

1.3 Ti/NiTi 合金的焊接难点

根据以下物理性质和化学性质分析, 揭示焊接难点的本质。

(1) 物理性质差异影响

由于 Ti/NiTi 在熔点、比热、导热系数与线膨胀系数等性能存在如表 1 中显而易见的差异, 导致二者焊后焊接产生裂纹及焊缝成形质量较差, 导致接头处无法正常连接从而达到使用要求。

表 1 Ti/NiTi 的热物理性能

参数	熔点/℃	线膨胀系数 ($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	热导率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	比热容 ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
NiTi	1310	10	18.0	0.461
Ti	1668	8.2	13.8	0.52

(2) 化学性质差异影响

由图 1Ni-Ti 二元相图可知, 室温下镍在钛中的固溶度较小, 由于焊接过程中温度升高, 镍在钛中的固溶度会增加。而当焊接完成后, 镍在钛中的固溶度会随温度下降而下降, 造成镍在钛中过度饱和, 致使焊缝中形成 Ti_2Ni 和 Ni_3Ti 金属间化合物。Ti 与 NiTi 合金在高温下极易产生氧化, 形成 TiH_2 、 TiO_2 、 TiN 等化合物, 同样恶化接头力学性能, 严重时产生裂纹。

综上所述, Ti/NiTi 合金在化学成分、熔点、热导率、线膨胀系数、比热容等性能方面存在明显差异, 焊接时易形成 Ti_xNi_y 系列金属间化合物, 导致焊接接头发生脆性断裂。Ti/NiTi 焊接与所有钛合金一样, 对氧的反应非常剧烈。因此, 在焊接这种材料时, 可能会发生合金的脆化。当 NiTi 焊接到 Ti6Al4V 时, 会出现重大的冶金问题 Oliveira^[19]。因此, 如何在保证形状记忆特性的基础上, 获得强度高和塑性好的 Ti/NiTi 异种金属焊接结构是难点。

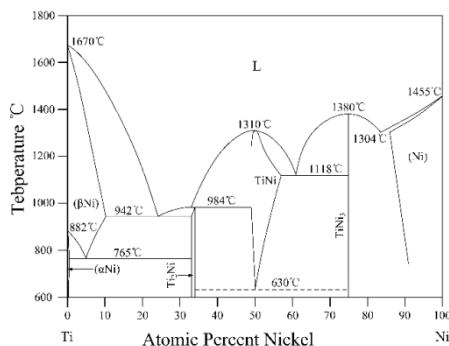


图 1 Ni-Ti 二元相图

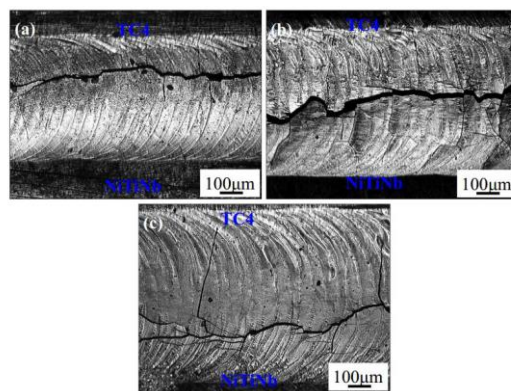
2 Ti/NiTi 形状记忆合金的研究现状

目前, Ti/NiTi 合金的焊接方法有高能束焊接(激光焊接和电子束焊接)、其他焊接方法(固相焊和钎焊)、熔焊热导钎焊。

2.1 高能束焊接

所谓高能束焊接, 是指焊接过程中, 将焊接接头在高温等的作用下至熔化状态。与传统的熔化焊相比, 高能束焊接具有焊缝窄而深、热影响区小、变形小和不添加焊接材料的高精度焊接等优点。

针对 Ti/NiTi 物理与化学性能差异较大, 致使对 Ti/NiTi 直接焊接产生大量的脆性金属间化合物和裂纹的情况。Chen、宋鹏等人^[20, 21]分别进行了 NiTi/TC4 的不同激光焊接实验, 观察了接头的宏观形貌、显微组织和力学性能等。分析表明, 焊缝处有 NiTi_2 和 NiTi 等脆性相形成, NiTi/TC4 焊接接头出现裂纹, 其裂纹形式如图 2 所示。其中 NiTi_2 相产生是导致接头变脆最主要因素。Miranda 等人^[22]做了 NiTi 与 Ti6Al4V 的焊接研究, 无论焊接过程中产生多少的热量, 在 FZ 中总是会出现裂纹。分析显示焊缝中有 Ti_2Ni 脆性相的存在。



(a) 7.2W; (b) 9.6W; (c) 12W

图 2 不同脉冲激光功率下 NiTiNb/Ti6Al4V 异种金属焊接接头裂纹形貌^[20]

解决 NiTi/Ti6Al4V 焊接接头脆化问题的方法是通过引入一种元素来抑制或减少在 FZ 中形成的脆性金属间化合物的数量, 从而克服 NiTi/Ti6Al4V 焊接接头的脆性, 改善接头的性能。陈玉华等人^[23]通过手工添加直径为 $\Phi 0.3\text{mm}$ 的纯 Ni 焊丝的方法调节焊缝中 Ni 的含量, 使焊缝成分避开 Ti_2Ni 化合物形成区间抑制 Ti_2Ni 的形成, 焊接接头强度达到了 332MPa。Zoeram 等人^[24, 25]采用脉冲 Nd:YAG 激光对 Ti6Al4V/NiTi 进行了脉冲激光焊接, 研究了 Cu 层间厚度对组织、化学成分、力学性能和断裂行为的影响。研究表明, 夹层厚度对接头的化学成分和极限抗拉强度有很大的影响。随着层间厚度的增加, 接头的抗拉强度和伸长率分别达到 300 MPa 和 3.3%。Cu 层间厚度的进一步增加导致焊缝金属中 Ti-Cu 金属间化合物的形成和缩孔的形成, 导致力学性能的恶化。因此, Ti6Al4V/NiTi 合金的异种焊接用铜中间层的厚度需要进一步优化。

通过改变中间层 Nb 熔化量来防止脆性相的生成, Zhou 等人^[26]实现了 NiTi 合金和 Ti6Al4V 激光焊接。随激光功率的增加, 中间层 Nb 的熔化量从 17.6 W (sample A)

增加到 22.4 W (sample C), 且金属间化合物的数量随 Nb 含量的增加而降低。由连续金属化合物层厚度的减小, 接头的抗拉强度增加。通过图 3 可以看出其接头的平均抗拉强度可达 Ti6Al4V 母材的 82%。占宇林^[27]利用真空电子束焊接方法对 3mm 厚的 NiTi 合金与 TC4 进行焊接。添加 Nb 作为中间层的焊接方式来控制焊接裂纹的产生并获得具有力学性能良好的焊接接头。当填充金属 Nb 的厚度达 0.55mm 时接头裂纹得到消除, 其接头抗拉强度可达 328MPa, 接头断裂方式为脆性断裂。当添加 Nb 中间层与偏束至 TC4 侧共同作用时, 成功抑制了 NiTi 合金与 TC4 异种金属焊接时 Ti₂Ni 相的形成, 接头裂纹同样得到消除, TC4 侧焊缝处的硬度与母材相当。

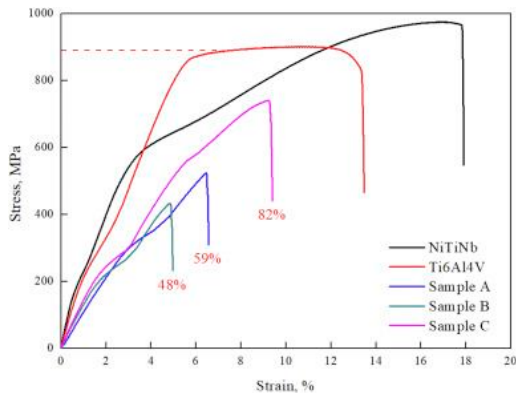


图 3 焊接接头和基材的应力-应变曲线和相对强度系数^[28]

上述的研究表明, 采用添加中间层或者添加中间层与控制光束位置的高能束焊接方法, 能够抑制 NiTiNb/TC4 接头中 Ti₂Ni 形成, 但是由于添加的中间层会与母材形成新的金属间化合物, 如 Cu-Ti 金属间化合物, 焊接接头的塑性仍然不能满足要求。因此, 在探索 Ti/NiTi 异种金属焊接中, 要进一步研究清楚添加中间层及中间层熔化量来调节金属间化合物与裂纹数量, 以此获得综合力学性能优异的焊接接头。

2.2 其他焊接方法

固相焊具有焊缝处金属微观结构变化小、能在较低的温度下获得连接焊缝(相对于熔化焊)及没有熔融金属等优点^[28]。实现起来比较困难, 因此相关研究较少。钎焊是适合于多种材料的焊接加工, 也适合于不同金属或异类材料的焊接加工。采用比母材熔点低的金属材料做钎料, 利用液态钎料润湿母材, 可以改善 Ti/NiTi 异种金属的焊接性, 利用添加钎料的方法避免接头部位形成金属间化合物和焊接裂纹。

有关 Ti/NiTi 异种金属焊接的固相焊和钎焊相比与激光焊接较少。王理涛^[29]通过添加 Ni、Al 夹层对 0.2mm 厚 NiTi/TC4 进行超声波焊接实验, 由于 NiTi/TC4 异种材料焊接材料性能差异的影响, 不能得到好的焊接效果。当采用添加塑性较好夹层后, 能够获得成形良好的超声波焊接接头。添加夹层 Ni 经超声波焊接后, 在界面处出现

晶粒细化现象, 而夹层 Al 无此现象。添加 Al 夹层的焊接接头, 断裂模式主要以韧性断裂为主, 而 Ni 中间层接头断裂模式主要以脆性断裂为主。通过接头强度测试, 添加 Al 中间层接头强度要远高于 Ni 中间层接头强度, Al 更适合作为中间层实现 TiNi/TC4 异种金属超声波焊。

此外, T. Y. Yang 等^[30]采用 Ti-15Cu-15Ni 钎料对 Ti50Ni50 进行了红外钎焊。接头中 CuNiTi 相的数量随钎焊时间的增加而减少, 而 Ti (Ni, Cu) 相刚好相反。结果可知, CuNiTi 相的存在恶化了接头的形状记忆效应, 而 Ti (Ni, Cu) 相仍能保持形状记忆行为, 即使加入大量的 Cu 也能保持形状记忆性能。因此, 钎焊进行较长的时间, 对试样有较高的形状恢复率。即使钎焊时间和温度不断地增加, 稳定的 Ti₂(Ni, Cu) 相也不会完全去除。

上述的研究表明, 通过固相焊、钎料焊接方式, 一定程度上能够避免焊接接头部位形成金属间化合物和焊接裂纹, 且能够改善接头组织与性能、保护形状记忆效应的作用及一定的强化效果。这将对拓宽 NiTi 形状记忆合金连接技术具有重要的现实意义。

2.3 熔焊热导钎焊

相比同种金属焊接接头, 两种母材具有客观的物理化学性质差异, 在异种金属焊接接头中不仅存在着同种金属焊接接头的不均匀性特点, 而且还存在着焊接熔池的形貌、成分及微观结构的不均匀性, 这使得异种金属焊接接头的不均匀性更为显著。在 Ti/NiTi 合金异种金属连接过程中, 希望 NiTi 母材侧组织及成分改变小, 尽量使焊接接头保持 NiTi 母材形状记忆特征^[31]。熔焊热导钎焊主要针对 NiTi 形状记忆合金类异种金属焊接且继承其特殊性能不受影响而提出的新的焊接方法。依靠热传导提供的热量在焊接界面形成共晶反应液态金属层, 随后冷却形成一种共晶组织, 实现异种金属的接触反应钎焊连接, 焊接原理如图 4 所示。

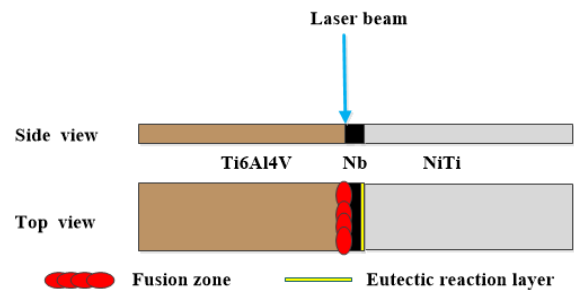


图 4 Ti6Al4V/Nb/NiTi 异质接头脉冲激光焊诱发共晶反应焊接示意图

为了研究熔焊热导钎焊焊接机理与微观组织、力学性能、元素扩散之间的联系, 还需做大量的研究工作。影响异种金属接触反应钎焊接头的主要工艺参数有焊接温度、保温时间、压力和中间层种类及厚度等多种因素。Song 等人^[32]研究了铜做中间层时钎焊温度对 Ti53311S 合金接触反应钎焊接头组织和力学性能的影响。随着钎焊温度的

增加,焊缝中 Ti_2Cu 金属间化合物逐渐减少,以片层状 ($\alpha + \beta$) 组织为主。Wang 等人^[33]对 Nb 与 NiTi 形状记忆合金进行了接触反应钎焊试验,发现在反应界面有棒状富 Nb 相和层片状的共晶组织存在。Zhou 等人^[34]进行了以 Ti6Al4V 和 Ni 为填料激光连接 Mo 和 Ta 的研究。根据 Ti6Al4V (1655° C) 和 Ni (1455° C) 的熔点明显低于 Mo (2623° C) 和 Ta (3020° C) 等金属热物理性质的巨大差异,实现了 Mo 和 Ta 的接触反应钎焊试验。Gao 等人^[35]采用 Nb 中间层激光焊接 Ti6Al4V/Cu,实现了激光焊诱发共晶反应接头具有熔化焊和钎焊两个界面。通过如图 5(a) 可以清楚发现不添加 Nb 时 Cu 发生了完全熔化产生了脆性化合物;如图 5(b) 添加了 Nb 时且激光束位于 Ti6Al4V/Nb 界面,确保 Nb 中间层部分熔化,未熔 Nb 能阻止 Ti 和 Cu 的混合,防止熔融区域 Ti_3Cu_7 脆性相的形成。在适当的热输入条件下,将熔池中的热量传递到 Nb/Cu 界面,从而使 Cu 熔化,一次焊接可获得一种复合接头。

熔焊热导钎焊已经有了初步的探索,在 Ti/NiTi 合金异种金属连接过程中可以很好地利用。其中, Oliveira 等人^[36]利用 50 μm 厚 Nb 箔作为中间层,对 Ti6Al4V/NiTi 异种金属进行了脉冲激光焊接试验,发现焊缝中无 Ti_2Ni , Ni_3Ti 和 Al_3Ti 等金属间化合物的形成,熔化仅仅发生在 Ti6Al4V/Nb 界面,在 NiTi/Nb 界面发生了共晶反应实现了连接,但是拉伸强度低于 NiTi 形状记忆合金应力诱发马氏体相变的临界应力,需要进一步优化工艺参数。

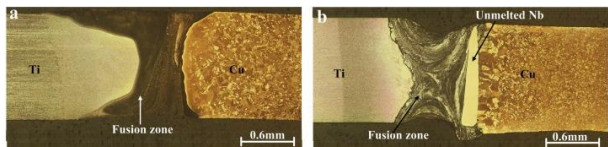


图5 (a) Ti6Al4V /Cu 焊缝形貌; (b) Ti6Al4V /Nb/Cu 焊缝形貌^[35]

通过上述研究,提出区别于传统的新焊接方法,有利于特殊要求、焊接性差、异种金属焊接等连接技术的研究。利用激光焊等高能束焊接的方法可以实现复合反应界面的焊接,也是 NiTi 形状记忆合金焊接的一种具有发展潜力的焊接方法,且易于实现自动化焊接及具有精确定位操作性。

3 结论

随着人们对 NiTi 形状记忆合金材料的不断认识及在各领域的广泛应用,对 NiTi 形状记忆合金复合接头焊接质量的要求越高。简要分析了现有焊接方法的研究现状基础上,充分说明了熔焊热导钎焊是一种有较大发展潜力的焊接方法。得出以下结论:(1) 在满足工程材料要求的前提下, Ti/NiTi 合金的焊接方法有高能束焊接(激光焊接和电子束焊接)、其他焊接方法(固相焊和钎焊)、复合反应界面焊接。目前来讲,激光焊接是 NiTi 形状记忆合金与其他异种金属焊接的热选焊接方法。(2) 为了防止 Ti/NiTi 合金异种金属焊接焊缝中金属间化合物的形成和裂纹的出现,可采用高能束焊接的前提下添加不同中间

层及控制中间层熔化量、控制光束位置等方法。(3) 传统焊接方法及目前所用焊接方法很难精确控制 NiTi 形状记忆合金焊接接头化学成分、微观组织、力学性能之间的联系,致使 NiTi 合金的形状记忆效应减弱。因此,提出了复合反应界面焊接方法进行焊接,既避免了金属间化合物的形成,也较好地继承了形状记忆效应。

4 展望

本课题组关于 NiTi 合金异种金属焊接做了大量的研究工作,在控制金属间化合物的前提下,既要保证焊接接头的力学性能,又要保证 NiTi 侧形状记忆效应。阐明熔化焊界面与共晶反应界面的微观组织状态匹配关系对接头强度及形状记忆效应的影响机制,揭示 Ti/NiTi 接头整体力学性能优良时熔化焊界面与共晶反应界面的微观组织。目前, Ti/NiTi 形状记忆合金异种金属焊接深入技术所能解决问题有限。如何在保证形状记忆特性的基础上,实现 NiTi 形状记忆合金异种金属的高质量焊接是有待进一步发展,也是当前研究者的研究热点。

基金项目:十二师重大科技项目(S422022003): 钢结构智能生产线关键技术研究及应用示范; 丝绸之路经济带创新驱动发展试验区、乌昌石国家自主创新示范区科技发展规划自治区两区项目的项目(20231115777): 钢结构加工物料智能管理及二次利用系统研发。

【参考文献】

- [1] 沈利群,周涟庚. 形状记忆合金的应用现状[J]. 上海金属, 1996(6): 33-35.
- [2] 贺志荣,周超,刘琳,等. 形状记忆合金及其应用研究进展[J]. 铸造技术, 2017, 38(2): 257-261.
- [3] T. Deepan Bharathi Kannan, Abhijeet R Shegokar, P. Sathiya, et al. Parameter Design And Analysis In Laser Welding Of NiTiNol Shape Memory Alloy[J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(8): 78.
- [4] 杨静宁,王其晨,王永祥. 形状记忆合金悬臂梁变形特性分析[J]. 甘肃科学学报, 2019, 31(1): 12-16.
- [5] 韩海林. Cu-Zn-Al 形状记忆合金等离子束流的连接研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [6] 常泽雨. 论钛合金的特性及应用[J]. 科技经济导刊, 2019, 27(1): 86.
- [7] 刘鹏飞. 钛及钛合金结构焊接技术研究进展[J]. 金属加工(热加工), 2012(20): 11-13.
- [8] 江洪,陈亚杨. 钛合金在舰船上的研究及应用进展[J]. 新材料产业, 2018(12): 11-14.
- [9] 韩立军,赵熹华,赵蕾,等. TiNiNb 形状记忆合金丝精密脉冲电阻对焊工艺分析[J]. 材料科学与工艺, 1999(1): 76-79.
- [10] 刘鹏飞. 钛及钛合金结构焊接技术研究进展[J]. 金属加工(热加工), 2012(20): 11-13.

- [11]张润泽,夏月庆,董红刚,等.钛合金与钢异种材料钎焊研究现状[J].机械制造文摘(焊接分册),2018(5):1-10.
- [12]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.
- [13]Deng Yongqiang, Sheng Guangmin, Yin Lijing. Impulse Pressuring Diffusion Bonding of Titanium to Stainless Steel Using a Copper Interlayer[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(5): 1041-1045.
- [14]陈涛, 崔旭亮, 马元学, 等. 钛铜异种金属 CMT 焊接参数的优化[J]. 化工机械, 2015, 42(5): 639-642.
- [15]汪应玲, 李红, 栗卓新, 冯吉才. 形状记忆合金连接技术的研究进展[J]. 焊接, 2008(9): 5-8.
- [16]Qiao Li, Yuanxiang Zhu, Jialin Guo. Microstructure and mechanical properties of resistance-welded NiTi/stainless steel joints[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017(249): 538-548.
- [17]刘兰胜. TiNi 合金/不锈钢异种材料微激光焊缝组织性能[J]. 电焊机, 2015, 45(3): 122-126.
- [18]M. J. C. Oliveira, R. H. F. Melo, T. M. Maciel, C. J. de Araújo, Microstructural evaluation and mechanical behaviour of dissimilar niti-stainless steel joints welded by micro gas tungsten arc welding[J]. Materials Chemistry and Physics, 2019(224): 137-147.
- [19]J. P. Oliveira, R. M. Miranda, F. M. Braz Fernandes, Welding and Joining of NiTi Shape Memory Alloys: A Review[J]. Progress in Materials Science, 2017(88): 412-466.
- [20]Y. H. Chen, Y. P. Mao, W. W. Lu, P. He. Investigation of welding crack in micro laser welded NiTiNb shape memory alloy and Ti6Al4V alloy dissimilar metals joints[J]. Optics & Laser Technology, 2017(91): 197-202.
- [21]宋鹏, 朱颖, 郭伟, 等. NiTi 形状记忆合金和 TC4 的激光焊接裂纹产生机理分析(英文)[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(2): 6-9.
- [22]MIRANDA R M, ASSUNCAO E, SILVA R J C, OLIRIVERIA J P, QUINTINO P. Fiber laser welding of NiTi to Ti-6Al-4V[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(9): 1533-1538.
- [23]陈玉华, 戈军委, 刘奋成, 等. NiTi 形状记忆合金 / 钛合金异种材料激光焊[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2075-2080.
- [24]A. S. Zoeram, S. A. A. Mousavi. Laser welding of Ti-6Al-4V to Nitinol[J]. Materials and Design, 2014, 61(9): 185-190.
- [25]A. Shojaei Zoeram, S. A. A. Akbari Mousavi. Effect of interlayer thickness on microstructure and mechanical properties of as welded Ti6Al4V/Cu/NiTi joints[J]. Materials Letters, 2014(11): 133.
- [26]Xingwen Zhou, Yuhua Chen, Yongde Huang, Yuqing Mao, Yangyang Yu. Effects of niobium addition on the microstructure and mechanical properties of laser-welded joints of NiTiNb and Ti6Al4V alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018(5): 735.
- [27]占字林. NiTi 合金/TC4 钛合金电子束焊接接头裂纹敏感性及其控制[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
- [28]王非森, 高增, 文申柳, 等. NiTi 形状记忆合金连接的研究现状与展望[J]. 兰州工业高等专科学校学报, 2008, 15(4): 53-55.
- [29]王理涛. NiTi 合金/TC4 钛合金超声波焊接接头性能与界面组织研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
- [30]T. Y. Yang, R. K. Shiue, S. K. Wu, Infrared brazing of Ti50Ni50 shape memory alloy using pure Cu and Ti-15Cu-15Ni foils[J]. Intermetallics, 2004, 12(12): 1285-1292.
- [31]李洪梅, 孙大千, 王文权, 等. 采用纯铜中间层的 NiTi 形状记忆合金激光焊接[J]. 材料工程, 2010(10): 9-12.
- [32]X. G. Song, J. Cao, H. Y. Chen, H. Q. Wang, J. C. Feng. Contact reactive brazing of Ti53311S alloy using Cu foil as interlayer: Interfacial microstructure and joining properties[J]. Materials & Design, 2013(46): 895-901.
- [33]Wang Liqiang, Wang Cong, Zhang Lai-Chang, Chen Liangyu, Lu Weijie, Zhang Di. Phase transformation and deformation behavior of NiTi-Nb eutectic joined NiTi wires[J]. Scientific reports, 2016(6): 33.
- [34]Xingwen Zhou, Yongde Huang, Yuhua Chen, Peng Peng. Laser joining of Mo and Ta sheets with Ti6Al4V or Ni filler[J]. Optics & Laser Technology, 2018(106): 487-494.
- [35]Xiao-Long Gao, Huan Liu, Jing Liu, Haokui Yu. Laser welding of Ti6Al4V to Cu using a niobium interlayer[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019(270): 293-305.
- [36]J. P. Oliveira, B. Panton, Z. Zeng, C. M. Andrei, Y. Zhou, R. M. Miranda F. M. B. Fernandes. Laser joining of NiTi to Ti6Al4V using a Niobium interlayer[J]. Acta Materialia, 2016(105): 9-15.
- 作者简介: 王小强(1993—), 男, 硕士, 主要研究方向为激光加工、表面改性及增材制造; 黄海博(1990—), 男, 博士, 主要研究方向为表面改性及增材制造。