

NiTi 形状记忆合金与钛合金异种金属高能束焊接研究现状

王小强^{1,2,3}

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 30023
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] 综述了 NiTi 形状记忆合金与钛合金异种金属高能束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 NiTi 形状记忆合金与钛合金异种金属高能束焊接方法 (高能束焊接、固相焊和钎焊、熔焊热导钎焊) 及如何避免焊接中产生焊接缺陷。简单介绍了钛与形状记忆合金 NiTi 形状记忆合金与钛合金异种金属高能束焊接现状, 且对 NiTi 形状记忆合金异种金属 NiTi 形状记忆合金与钛合金异种金属高能束焊接技术未来发展进行了展望。

[关键词] NiTi 形状记忆合金; 钛合金; 高能束焊接; 异种金属焊接

DOI: 10.33142/ect.v3i3.15696

中图分类号: TG139.6

文献标识码: A

Research Status of High Energy Beam Welding of NiTi Shape Memory Alloy and Titanium Alloy Heterogeneous Metals

WANG Xiaoqiang^{1,2,3}

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 summarizes the latest research progress in high-energy beam welding technology of NiTi shape memory alloy and titanium alloy dissimilar metals. This article focuses on the high-energy beam welding methods of NiTi shape memory alloy dissimilar metal NiTi shape memory alloy and titanium alloy dissimilar metal (high-energy beam welding, solid-state welding and brazing, fusion welding thermal conductivity brazing) and how to avoid welding defects. This article briefly introduces the current status of high-energy beam welding between titanium and shape memory alloy NiTi shape memory alloy and titanium alloy dissimilar metals, and looks forward to the future development of high-energy beam welding technology between NiTi shape memory alloy dissimilar metals NiTi shape memory alloy and titanium alloy dissimilar metals.

Keywords: NiTi shape memory alloy; titanium alloy; high energy beam welding; dissimilar metal welding

引言

NiTi 形状记忆合金是一种功能材料, 被称作“跨越 21 世纪的理想材料^[1]”, 具有优良的形状记忆效应、超弹性、耐磨性而被广泛应用于航空航天、海洋工程、仪器仪表等领域^[2-4]。钛合金具有比强度高、低温韧性好、良好的耐蚀性的优点, 可有效减轻构件负重, 在航空航天、石油化工和船舶制造等行业有广阔的应用前景^[5-8]。NiTi 形状记忆合金和钛合金均以突出的生物相容性在医疗行业备受青睐。然而, 鉴于单一合金在较多情况下无法满足其实际使用要求, 通常将 NiTi 形状记忆合金和钛合金复合使用, 这种复合构件可同时兼具两种合金的优点, 更加充分地发挥性能优势。但是, NiTi 合金与钛合金异种金属焊接时, 因两种金属在化学性质和热物理性质方面都存在差异, 导致接头极易产生裂纹, 严重影响焊接质量。目前, 为了解决异种金属之间焊接的难点, 国内外学者对于

NiTi 合金/钛合金异种金属焊接研究颇多, 其中涉及不同的焊接方法 (熔化焊、固相焊、钎焊)、添加不同中间层 (Ni、Cu、Nb 等) 和提出新的焊接技术来解决 NiTi 合金与钛合金难焊接的问题。

本文通过对 NiTi 合金/钛合金异种金属焊接裂纹的产生机理、添加中间层的作用和高能束接触反应钎焊技术等总结, 论述了如何消除焊接裂纹、细化组织和提高力学性能, 并为 NiTi 合金与钛合金异种金属高能束焊接积累经验 and 研究导向。

1 焊接性分析

1.1 化学性质方面

有害元素的影响: 由于 NiTi 合金和钛合金中 Ti 化学活性较高, 在高温环境下能与气体中的 H、N、O 等元素发生化学反应, 增加了焊接接头的脆性, 导致接头具有更大的裂纹敏感度。其中, 当焊接温度为 250℃ 时, 与 H 发生

反应,接头中有 TiH_2 脆性相形成发生氢脆,焊缝处易产生微裂纹;当焊接温度大于 $600^{\circ}C$ 时,随温度升高,对 N 的吸收能力越强,与之形成间隙化合物,导致接头塑性、韧性下降,增加接头裂纹倾向;当焊接温度达到 $500\sim 750^{\circ}C$ 时,与 O 发生反应,使得接头脆化和组织粗大等。

金属间化合物:由图 1 可知,室温下 Ni 在 Ti 中的固溶度较小,由于焊接过程中温度升高, Ni 在 Ti 中的固溶度会增加。而当焊接完成后, Ni 在 Ti 中的固溶度会随温度下降而下降,造成 Ni 在 Ti 中过度饱和,致使焊缝中形成 Ti_2Ni 和 $TiNi_3$ 金属间化合物。

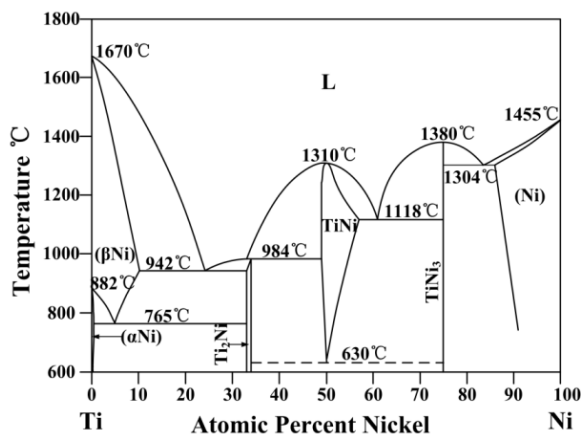


图 1 Ti-Ni 二元相图

1.2 热物理性质方面

表 1 为 NiTi 合金与 Ti6Al4V 合金的热物理性能,两者性能有显而易见的差异,导致二者焊后接焊缝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 NiTi 合金与 Ti6Al4V 的热物理性能

材料	熔点/ $^{\circ}C$	线膨胀系数/ ($10^{-6} \cdot ^{\circ}C^{-1}$)	热导率/ ($W \cdot m^{-1} \cdot ^{\circ}C^{-1}$)	比热容/ ($J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$)
NiTi	1310	10	18.0	0.461
Ti6Al4V	1668	8.2	13.8	0.52

2 NiTi 合金与钛合金高能束焊接研究现状

所谓高能束焊接,是指将焊接接头在高能量等的作用下至熔化状态,经过冷凝使焊件连接在一起的工艺过程。与传统的熔化焊相比,高能束焊接具有焊缝窄而深、能量密度集中、变形小和焊接速度快等优点,其中包括激光焊接和电子束焊接。

目前,针对 NiTi 合金与钛合金焊接存在问题,研究者采用直接焊接、添加中间层、焊后热处理和不断在实践中探寻新的焊接技术等解决途径。主要阐述了 NiTi 合金与钛合金接头裂纹产生原因、焊缝成形、微观组织、力学性能等的研究。

2.1 直接接触型共熔池高能束焊接

为了解 NiTi 合金与钛合金焊接接头由异种金属差异

引起的不匹配度,研究者们进行不断探索,揭示了 NiTi 合金与钛合金异种金属焊接接头产生裂纹的原因。Zoeram^[9]等对 NiTi/Ti6Al4V 异种金属激光焊接接头进行了研究。研究结果表明,由于异种金属之间存在焊接性差异, NiTi/Ti6Al4V 直接焊后在接头中易形成 Ti_2Ni 脆性相,导致接头有裂纹产生,最终导致接头失效。

为进一步清楚地认识 NiTi 合金与钛合金焊接难点, Chen^[10,11]等采用激光微焊对接 $200\mu m$ 厚 NiTiNb 薄片和 Ti6Al4V 薄片进行焊接。研究了接头的焊接裂纹,揭示了产生 Ti_2Ni 金属间化合物是导致接头裂纹的主要原因。当激光功率为 $7.2W$ 时,焊缝中心有纵向裂纹、焊缝边缘有液相裂纹及热影响区有热裂纹形成,如图 2 所示。

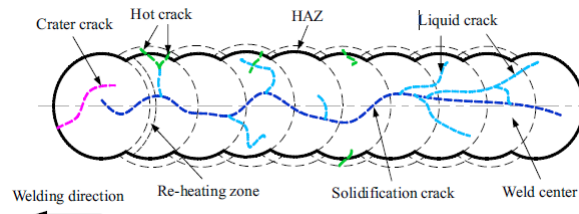


图 2 NiTiNb/Ti6Al4V 微激光焊接接头裂纹原理图^[10]

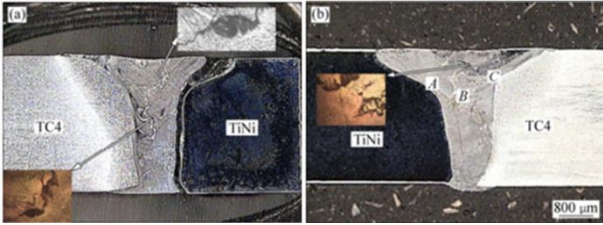
Song^[12]等通过对激光焊接 NiTi 形状记忆合金和 TC4 接头宏观形貌、微观组织和断口分析,探索了产生冷裂纹的原因。研究结果表明,断口类型属于脆性断裂模式,发生裂纹部位有 Ti_2Ni 和 $TiNi$ 两相组成。同样 Ti_2Ni 金属间化合物导致接头脆性,加之焊接应力作用产生裂纹。

总之,当 NiTi 合金与钛合金直接焊接时,焊缝中极易产生 Ti_2Ni 金属间化合物,导致接头变脆。再者异种金属之间存在膨胀系数等差异,促进焊接裂纹形成,使得接头力学性能显著下降,甚至完全失效。

2.2 添加中间层型共熔池高能束焊接

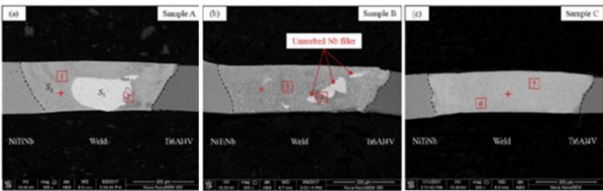
NiTi 合金与钛合金直接焊后接头易产生金属间化合物和裂纹, Miranda^[13-16]认为采用中间层的方法能够减少硬脆金属间化合物的形成。

通过添加 Cu、Nb、Ti、Ni 等中间层,有效地抑制了金属间化合物的形成。Zoeram^[1,2]等完全消除了 NiTi/Ti6Al4V 异种金属激光焊接后接头的焊接裂纹,同时减少了 Ti_2Ni 金属间化合物的数量。但加入 Cu 中间层厚度需加以控制,如若熔池中熔于过多 Cu 之后,焊缝中有一定数量的 Ti-Cu 金属间化合物和局部的富 Cu 区域出现,严重降低了 NiTi/Cu/Ti6Al4V 接头力学性能,延性较差。同时,占宇林^[1]等采用真空电子束焊接添加 Nb 中间层对 TiNi 合金与 TC4 进行了研究。研究结果表明,没有添加中间层时,熔化区与 NiTi 合金界面极易形成裂纹;添加 Nb 中间层时,接头生成了 (Ti, Nb) 固溶体和少量 Ti_2Ni 金属间化合物,在一定程度上改善了 TiNi 与 TC4 焊接的冶金原理和缓解了裂纹敏感性,焊接裂纹被消除,焊缝形貌观察如图 3 所示。

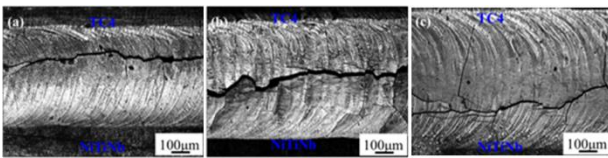
图3 接头的宏观形貌(a)无中间层;(b)Nb中间层^[13]

2.3 焊接参数对接头的影响

通常调节激光焊接功率、激光焊接速度等可以有效控制 NiTi 合金与钛合金异种金属高能束焊接接头的热输入,能够改变焊缝中元素含量和焊缝形貌,获得合理的焊接工艺窗口,得到综合性能良好的焊接接头。Zhou^[17]等采用改变激光功率对 200 μm 的 NiTiNb 和 Ti6Al4V 进行了实验。通过对接头焊缝形貌、微观组织、化学成分和力学性能研究,得到以下结果:随着激光功率增大,焊缝中的未融化 Nb 的含量不断减少,焊缝形貌如图 4 所示。当激光功率达到 22.4W 时, Nb 中间层全部融化,此时接头抗拉强度最高,达 Ti6Al4V 母材的 82%。

图4 TiNiNb/Nb/Ti6Al4V 接头焊缝形貌^[17]

同样,为揭示激光功率对 NiTiNb 和 Ti6Al4V 焊接接头裂纹的影响,Chen^[10,11]等采用变功率的方法,得到如下结论:随激光功率的增大,裂纹数量和纵向裂纹的宽度先增加后减少,说明调控激光焊接参数对 NiTiNb 与 Ti6Al4V 接头裂纹有显著影响。

图5 TiNiNb/Ti6Al4V 接头在不同焊接功率下的焊缝形貌^[11]

精确控制高能束焊接参数对于 NiTi 合金与钛合金是极其重要的,通过控制焊接参数可以决定异种金属焊接接头的热输入,从而控制焊缝形貌、母材相互熔化量、焊接裂纹敏感性 & 接头组织形态。

2.4 激光诱导反应钎焊技术

影响异种金属激光诱导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因素。刘黎明等^[18]使用 Zn 合金做中间层对镁铝合金进行了激光诱导钎焊试验,发现接头的剪切强度略低于 Zn 合金。Song 等人^[12]研究了铜做中间层时钎焊温度对 Ti5331S 合金激光诱导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 Ti₂Cu 金属间化合物逐渐减少。Wu 等人^[19]

采用 Cu 做中间层对 Al/不锈钢异种金属进行激光诱导钎焊,研究了保温时间对反应界面微观组织的影响。试验结果表明,随着保温时间的增加,Cu-Al 共晶反应层厚度增加。Wang 等人^[20]对 Nb 与 NiTi 形状记忆合金进行了激光诱导钎焊试验,发现在反应界面有棒状富 Nb 相和层片状的共晶组织存在。

Ti6Al4V/Nb/NiTi 异种脉冲激光焊诱发共晶反应凝固反应过程如图 6 所示。Nb/NiTi 界面的热循环曲线不同于激光诱导钎焊时的温度控制过程,加热及冷却速度较快。但是,在 Ti6Al4V/Nb/NiTi 脉冲激光焊接过程中,Nb/NiTi 界面热循环特征对界面反应产物及界面组织结构影响的相关研究报道较少。

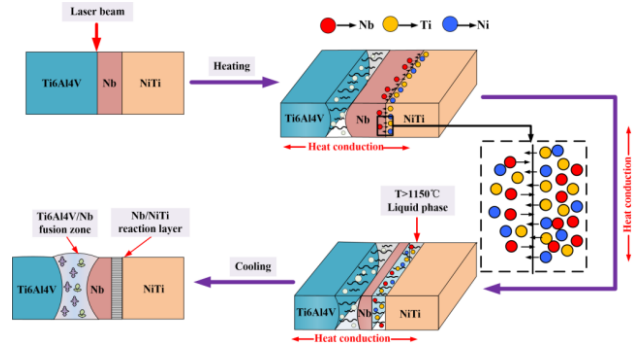


图6 激光诱导共晶反应钎焊技术

3 结论

本文简要综述了对 NiTi 形状记忆合金与钛合金异种金属高能束激光焊接,主要从焊接性分析、焊接材料直接接触性焊接、焊接材料非直接接触性焊接、新的激光诱导钎焊焊接方法等方面的做了阐述得出以下结论:

(1) 随着高质量的发展, NiTi 形状记忆合金与钛合金异种金属高能束焊接方法逐渐已被应用,并且在类似异种金属焊接中能够抑制较传统焊接中产生的焊接缺陷。

(2) 为了防止 NiTi 形状记忆合金与钛合金异种金属高能束焊接焊缝中金属间化合物的形成和裂纹的出现,可采用添加不同种类的有效中间层、控制中间层在焊缝中的合理含量。

(3) 相对于传统的焊接方法,高能束焊接确实能够有效的应用与类似 NiTi 形状记忆合金的新型功能材料的焊接技术当中。

4 展望

高能束焊接技术是当前乃至今后持续较长时间的研究热点,在异种金属焊接中发挥不可替代的地位,能够有效解决 NiTi 形状记忆合金与钛合金异种金属焊接接头缺陷,提高 NiTi 形状记忆合金与钛合金异种金属焊接接头质量,确保了接头力学能满足特殊服役要求,在国家航空航天、精生物医疗等领域有较大的应用背景。高能束焊接技术相对于高新技术的材料焊接研究者来讲,既是挑战也是机遇。

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计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,T. Ramesh. Parameter Design And Analysis In Laser Welding Of NiTiInol Shape Memory Alloy[J]. Materials Today: Proceedings,2017,4(8).
- [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]A. S. Zoeram,S. A. A. Mousavi. Laser welding of Ti-6Al-4V to Nitinol[J]. Materials and Design,2014,61(9):185-190.
- [10]Y. H. Chen,Y. P. Mao,W. W. Lu,et al. 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.
- [11]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.
- [12]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.
- [13]MIRANDA R M,ASSUNCAO E,SILVA R J C,et al. Fiber laser welding of NiTi to Ti-6Al-4V[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2015,81(9):1533-1538.
- [14]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.
- [15]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.
- [16]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.
- [17]Xingwen Zhou,Yuhua Chen,Yongde Huang,et al. 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.
- [18]Wang Liqiang,Wang Cong,Zhang Lai-Chang,et al. Phase transformation and deformation behavior of NiTi-Nb eutectic joined NiTi wires[J]. Scientific reports,2016(6):33.

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。