

DOI: 10.3901/JME.2022.08.136

V/Nb 复合中间层对 NiTi 合金/不锈钢异种金属激光焊接接头微观组织及力学性能的影响*

王小强^{1,2} 高晓龙^{3,4} 刘 晶^{3,4} 李伦坤^{3,4}

(1. 新疆工程学院机电工程学院 乌鲁木齐 830023;

2. 新疆工程学院激光智能制造与再制造工程技术研究中心 乌鲁木齐 830023;

3. 宝鸡文理学院机械工程学院 宝鸡 721016;

4. 陕西省机器人关键零部件先进制造与评估省市共建重点实验室 宝鸡 721016)

摘要: 为避免 NiTi 合金与不锈钢焊接时 Ti-Fe 及 Ti-Ni 等脆性金属间化合物的形成, 采用 V/Nb 复合中间层与双道激光焊接的方法对 NiTi 合金与 301 SS 异种金属进行焊接, 对接头的显微组织和力学性能进行分析, 揭示其连接机理。试验结果表明, 由于未熔化 V 和 Nb 的存在成功阻碍了熔池中 NiTi 合金和 301 SS 的混合, 抑制了接头中 Ti-Fe 及 Ti-Ni 等脆性金属间化合物形成, 接头的最高抗拉强度达到 280 MPa。第一道焊接形成的 Fe/V 界面为熔化焊连接, 而第二道焊接则形成了 V/Nb 和 Nb/NiTi 两个连接界面, V/Nb 界面为熔化焊连接, Nb/NiTi 界面为接触反应钎焊连接。

关键词: NiTi 合金; 301 SS; 中间层; 接头性能; 金属间化合物

中图分类号: TG406

Effects of V/Nb Composite Interlayer on Microstructure and Mechanical Properties of NiTi Alloy/ Stainless Steel Dissimilar Metal Laser Welding

WANG Xiaoqiang^{1,2} GAO Xiaolong^{3,4} LIU Jing^{3,4} LI Lunkun^{3,4}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023;

2. Laser Intelligent Manufacturing and Remanufacturing Engineering Technology Research Center,

Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023;

3. School of Mechanical Engineering, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721016;

4. Shaanxi Province Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Evaluation of Robot Key Components, Baoji 721016)

Abstract: To prevent the formation of brittle intermetallic compounds such as Ti-Fe and Ti-Ni, the dissimilar metal of NiTi alloy and 301 SS were welded by V/Nb multi-interlayer and double laser welding. The microstructures and mechanical properties of the joints were studied by means of optical microscopy, scanning electron microscopy and energy dispersive spectrometer (EDS). The results show that the mixing of NiTi alloy and 301 SS is prevented by the presence of unmelted V and Nb during welding processing, thus no brittle intermetallic compounds such as Ti-Fe and Ti-Ni are formed in the joints. The maximum tensile strength of the joints increased to 280 MPa. The 301 SS and V were joined by fusion welding for first pass welding, while the two metallurgical bonding zones based on different bonding mechanisms were obtained in the second pass welding. V and Nb was joined by the fusion welding mechanism, and contact reaction brazing was responsible for bonding Nb and NiTi.

Key words: NiTi alloy; 301 SS; interlayer; joint properties; intermetallic compounds

* 国家自然科学基金(51905006)、陕西省自然科学基金(2018JQ5204)、陕西省重点研发计划(2021GY-322)和科技助力经济 2020 重点专项(SQ2020YFF0419689)资助项目。20210104 收到初稿, 20211209 收到修改稿

0 前言

NiTi 形状记忆合金具有形状记忆效应、超弹性和优良的生物相容性等特性,广泛应用于航空航天、仪器仪表、生物医疗等领域^[1-3],但其生产成本相对较高,加工性差。不锈钢的耐蚀性及生物相容性较好,价格低廉,可加工性好,具有较好的综合经济效益^[4-5]。NiTi 形状记忆合金/不锈钢复合构件将两种材料的优势结合,提高产生设计的灵活性,并降低生产成本,具有广泛的应用前景。但 NiTi 形状记忆合金与不锈钢直接对焊时,焊缝中形成大量的 TiFe、TiCr₂ 和 TiNi₂ 等脆性金属间化合物^[6-7],在高的应力作用下,焊后即发生断裂。

为提高 NiTi 形状记忆合金/不锈钢接头的力学性能,国内外学者进行了大量研究。尽管爆炸焊^[8]、瞬时液相扩散焊^[9-10]、钎焊^[11-12]等焊接方法能获得性能较高的接头,但这些方法受到接头形式、尺寸等限制,不利于工业生产。激光焊接具有高的能量密度和冷却速度,已被证明适合于焊接异种金属。在 NiTi 合金与不锈钢激光焊接中,采用 Ni、Cu 及 Ta 等金属作为中间层,可在一定程度上抑制 Ti-Fe、Ti-Cr 和 Ti-Ni 化合物的数量,从而提高接头的强度^[13-16]。但添加这些中间层后,又会引入新的金属间化合物,如 Ti-Cu、Ni-Ta 等,且 Ti-Fe、Ti-Cr 和 Ti-Ni 金属间化合物并未完全消除,接头的塑性较差。

为了完全抑制 Ti-Fe、Ti-Cr 和 Ti-Ni 金属间化合物的形成,文中采用 V/Nb 复合中间层与双道激光焊接的方法对 NiTi 合金/301 SS 异种金属进行焊接,分析了接头的显微组织、力学性能及连接机理。

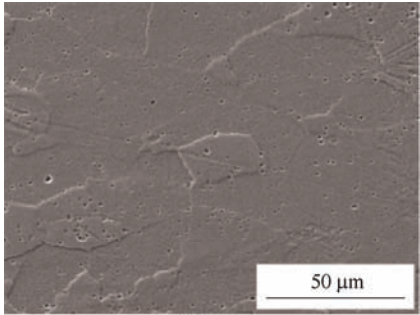
1 试验材料与方法

1.1 试验材料

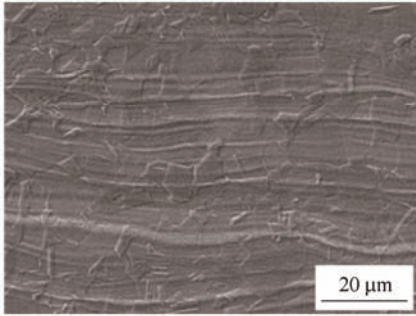
试验选用基材为 50 mm×50 mm×0.8 mm 和 50 mm×50 mm×1.0 mm 的 NiTi 合金和 301 SS 薄板,中间层材料为 50 mm×1.0 mm×0.8 mm 和 50 mm×0.8 mm×0.8 mm 的 V 和 Nb,化学成分如表 1 所示。图 1 是 NiTi 合金和 301 SS 两种基材的显微组织,NiTi 合金基材的组织为奥氏体等轴晶,301 SS 基材为奥氏体组织。

表 1 试验材料的化学成分

材料	质量分数(%)			
	Ti	Ni	C	O
NiTi 合金	余量	55.7	0.043	0.047
	Nb	Fe	Ta	O
铌	余量	<0.005	<0.1	<0.015
	V	O	N	Al
钒	余量	0.014	0.01	0.022
	Fe	Cr	Ni	Mn
301 不锈钢	余量	16.0~18.0	6.0~8.0	≤2.0



(a) 镍钛合金



(b) 301 不锈钢

图 1 母材显微组织

1.2 试验方法

采用 IPG-YLR-1000 激光器对 NiTi 合金和 301 SS 异种金属进行焊接,波长为 1.07 μm,光纤直径为 50 μm 和聚焦镜焦距为 200 mm,图 2 为激光焊接示意图,焊接参数如表 2 所示。整个焊接过程必须采用高纯氩对熔化区和热影响区进行正反面保护。

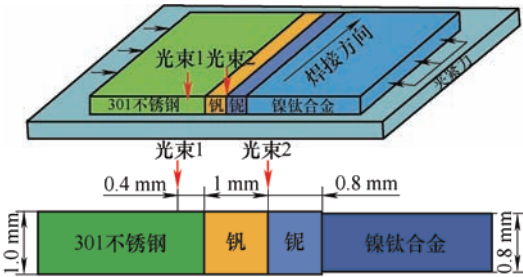


图 2 301 SS/V/Nb/NiTi 焊接示意图

表2 焊接参数

焊接	焊接功率 P/W	焊接速度 $v/(m \cdot \min^{-1})$	光束位置 /mm	离焦量 Δ/mm
第一次 焊接	800	1.2	铁-钒界面偏 铁 0.4	0
第二次 焊接	600	1.2	钒-铌界面	0

图3是焊缝表面宏观形貌。利用高清影像仪观察后无微裂纹等缺陷存在,使用线切割沿垂直于焊接方向切取金相,经抛光腐蚀, NiTi 合金和 301 SS 所用腐蚀液体积比分别为 $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=1:4:5$ 和 $\text{HCl}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=3:1:1$, 中间层 V 和 Nb 所用腐蚀液体积比均为 $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=1:2:1$ 。利用光学显微镜、扫描电镜及能谱仪等设备对焊缝形貌、连接界面和化学成分进行了表征。图4为拉伸试样尺寸示意图,使用万能拉伸试验机进行了力学性能测试,拉伸速率为 0.2 mm/min 。采用扫描电镜观察断口形貌,分析接头断裂位置和形式。

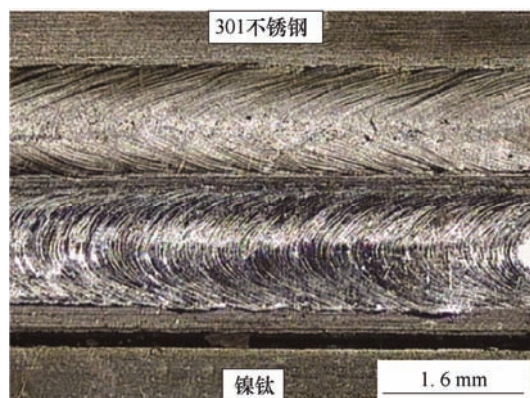


图3 焊缝表面宏观形貌

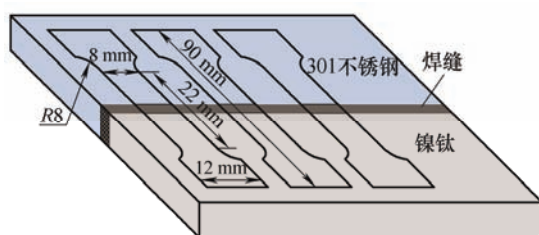


图4 拉伸试样示意图

2 试验结果与分析

2.1 接头宏观结构与微观组织

图5是 NiTi 合金/301 SS 异种金属激光焊接接头的宏观形貌。图5中清楚地发现,接头由 I (301 SS 基材)、II (Fe/V 熔化区)、III (未融 V)、IV (V/Nb 熔化区)、V (未融 Nb)、VI (Nb/NiTi 界面) 和 VII (NiTi 基材) 7 个区域构成。在 NiTi 合金/301 SS 接头中,并

未发现裂纹及气孔等缺陷存在,预示着好的焊接质量。在接头区域 II 与 IV 之间、IV 和 VI 之间分别有未熔化 V 和有未熔化 Nb 存在,成功阻碍了 301 SS 与 NiTi 在熔池中的混合,能够避免 Ti-Fe 及 Ti-Ni 等金属间化合物形成。在激光第二道焊接时,光束位于 V/Nb 界面, Nb 部分熔化, V 和 Nb 为熔化焊接,但 Nb/NiTi 界面并未受到激光束的直接照射,也实现了连接,这表明在第二道焊接时通过一次焊接形成了两个连接界面,并且 Nb/NiTi 的连接机理不同于熔化焊接。

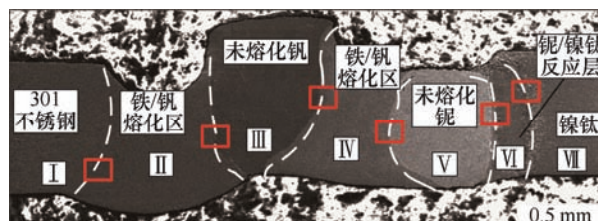


图5 NiTi 合金/301 SS 激光焊接接头宏观形貌

图6和表3分别是接头不同区域的高倍放大显微组织和相应点的成分分析结果。依据 Fe-V 相图 (图7a), 当 V 的含量低于 20% 时, $\alpha\text{-Fe}$ 相形成; 当 V 的含量在 20%~50% 之间时, 形成 $\alpha\text{-Fe}$ 相和 $\sigma(\text{Fe,V})$ 相。由此可知, 区域 II 是由 Fe 基固溶体和少量 $\sigma(\text{Fe,V})$ 相组成。如图 7b 所示, V 和 Nb 之间无任何金属间化合物形成, 因此区域 IV 是由 V 和 Nb 的固溶体组成。从图 6e 和 6f 中可以看到, Nb/NiTi

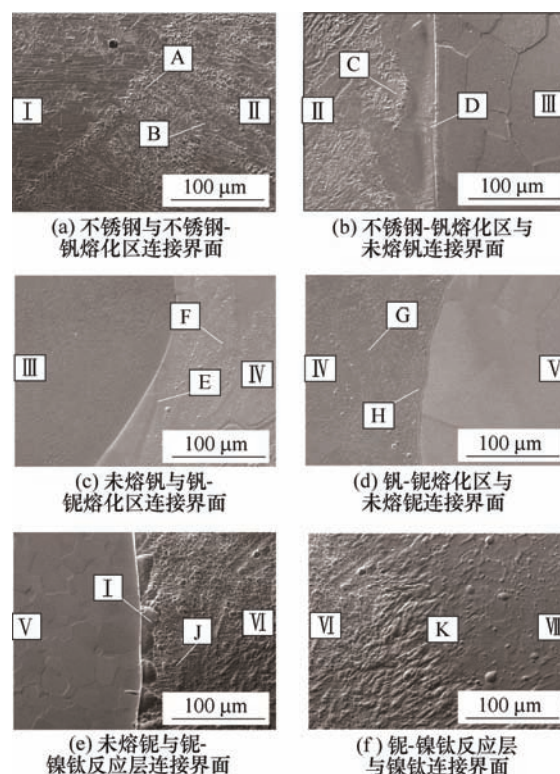
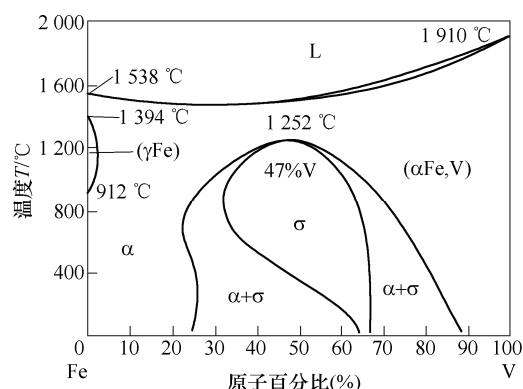


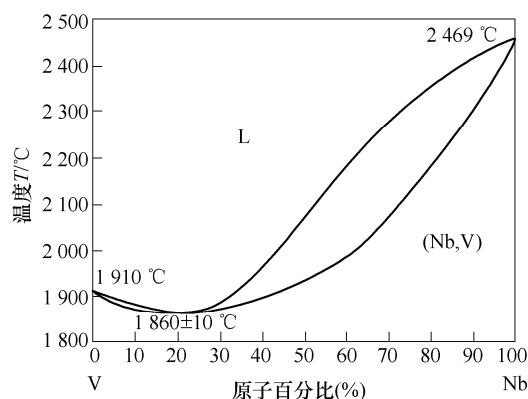
图6 接头不同区域显微组织及成分分析

表 3 图 6 中不同位置能谱分析结果

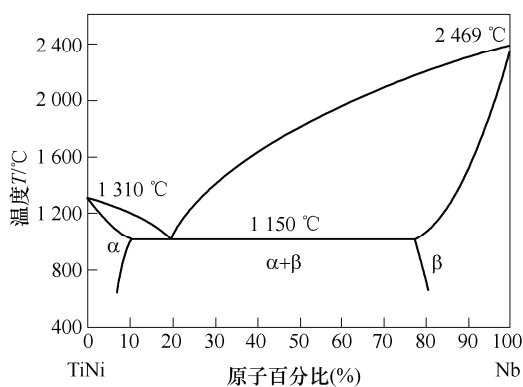
区域	原子百分比 $\pi(\%)$						
	Fe	Ni	Cr	V	Nb	Ti	Mn
A	73.24	5.33	19.37	—	—	—	2.07
B	71.96	5.24	19.74	1.0	—	—	2.06
C	68.96	5.54	18.65	4.71	—	—	2.14
D	46.08	5.31	11.65	35.86	—	—	1.10
E	—	—	—	71.45	28.55	—	—
F	—	—	—	60.80	39.20	—	—
G	—	—	—	51.04	48.96	—	—
H	—	—	—	45.87	54.13	—	—
I	—	48.47	—	—	10.23	41.29	—
J	—	46.77	—	—	5.29	47.31	—
K	—	50.03	—	—	—	49.97	—



(a) Fe-V 二元相图



(b) V-Nb 二元相图



(c) NiTi-Nb 伪二元相图

图 7 Fe-V、V-Nb、NiTi-Nb 相图

界面结合良好。如图 8 所示,在 Nb/NiTi 界面发生了 Nb 和 NiTi 的元素扩散,这表明尽管激光未照射到 Nb/NiTi 界面,但 Nb/NiTi 发生了冶金反应。激光束位于 Nb/V 界面形成熔池时,由于 Nb 高的导热率,从熔池中吸收了大量的热,传递到 Nb/NiTi 界面,导致界面温度升高。当 Nb/NiTi 界面温度高于 1 150 °C 时,即高于 Nb-NiTi 反应的共晶点(图 7c),将会具有 Nb-NiTi 共晶成分的液相形成,在随后的冷却过程中形成了 Nb-NiTi 共晶组织,从而实现了 Nb 和 NiTi 的连接。因此, Nb 和 NiTi 为接触反应钎焊连接,区域 VI 由 Nb-NiTi 共晶组织构成^[17]。OLIVEIRA 等^[18]在 Ti6Al4V 和 NiTi 形状记忆合金异种金属焊接过程中,使用 Nb 做中间层,也发现 Nb 与 NiTi 能发生接触反应钎焊,形成了 NiTi 奥氏体相和 BCC-Nb。

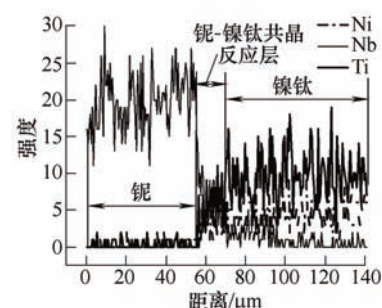
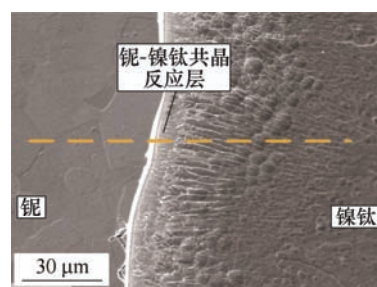


图 8 Nb/NiTi 界面成分线扫描分析试验结果

2.2 接头性能

图 9 是 NiTi 合金/301 SS 激光焊接接头的拉伸试验结果,接头的拉伸强度最高达到 280 MPa,

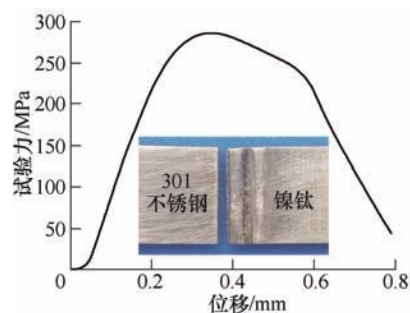


图 9 接头拉伸强度-位移曲线

接头的延性较好。图10是NiTi合金/301 SS焊接接头的拉伸断口,有大量的韧窝出现,表明接头呈现韧性断裂模式。拉伸断口表面能谱分析结果显示,接头的断裂位置为未熔化V中间层。上述结果表明,Fe/V界面、V/Nb和Nb/NiTi界面具有高的连接质量。

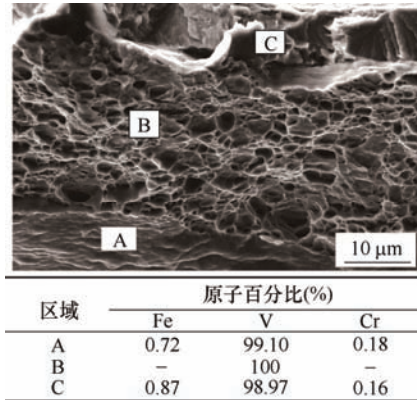


图10 拉伸断口形貌

2.3 激光诱导共晶反应原理

图11是NiTi形状记忆合金/不锈钢的双道激光

焊接连接原理图。当第一道光束位于Fe/V界面偏Fe一侧0.4 mm时,301 SS和部分的V熔化形成熔池,在随后的冷却过程中形成了Fe基固溶体和 $\sigma(\text{Fe,V})$ 相。当第二道光束位于V/Nb界面时,部分的V和Nb熔化形成了熔池,在随后的冷却过程中形成了V基固溶体和Nb基固溶体。未熔化Nb对Nb/NiTi界面起热量传导的作用,将从熔池中吸收的热传递到Nb/NiTi界面,使其温度升高。由于Nb/NiTi界面在焊接过程中是紧密接触的,会发生元素扩散,并且Nb-NiTi共晶反应时需要的Nb原子含量较低(图6c),很容易达到Nb-NiTi的共晶反应成分。当Nb/NiTi界面温度高于Nb-NiTi共晶反应温度时,将会有少量具有Nb-NiTi共晶成分的液相形成,随着Nb/NiTi界面温度的升高,形成的液相量增加,在随后的冷却过程中形成了Nb-NiTi共晶组织。

综上所述,第一道激光焊接形成了一个连接界面,即Fe/V熔化焊接界面,而第二道激光焊接形成了两个连接界面,即V/Nb熔化焊接界面和Nb/NiTi接触反应钎焊连接界面。

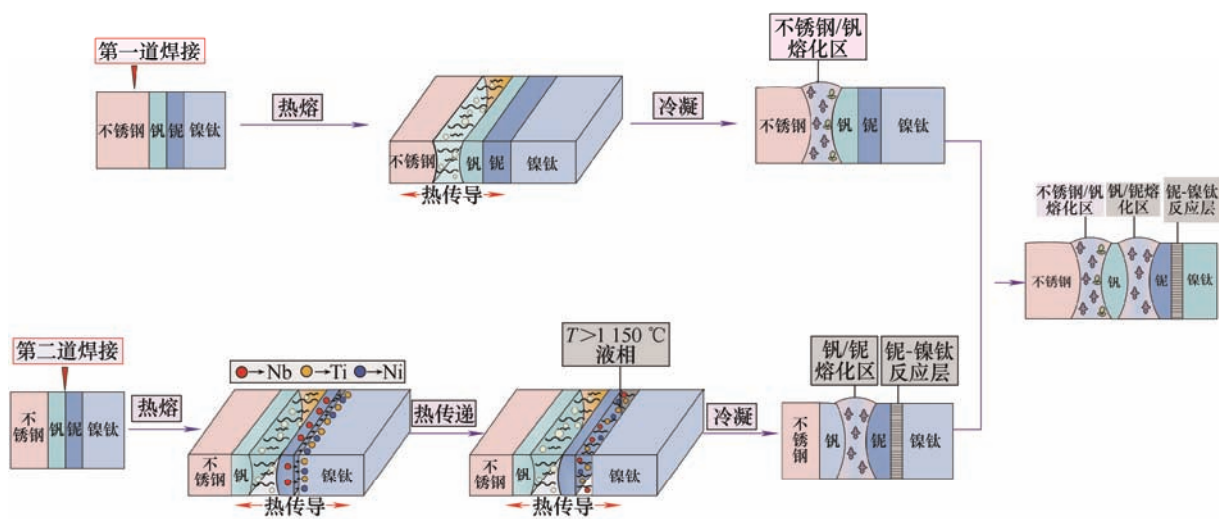


图11 双道焊接焊缝形成原理图

3 结论

(1) 采用V/Nb复合中间层与两道激光焊的工艺焊接了NiTi合金/301 SS异种金属,未熔化的V和Nb成功地阻碍了两种基材的混合,抑制Ti-Fe和Ti-Ni脆性金属间化合物的形成。

(2) Fe/V界面与V/Nb界面为熔化焊连接机理,

而Nb/NiTi界面为接触反应钎焊连接机理。

(3) 接头的抗拉强度可达280 MPa,呈延性断裂模式,断裂位置为未熔化V中间层,表明接头具有优良的综合力学性能。

参考文献

- [1] 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.

- HE Zhirong, ZHOU Chao, LIU Lin, et al. Progress in shape memory alloys and their applications[J]. Foundry Technology, 2017, 38(2): 257-261.
- [2] DEEPAN BHARATHI KANNAN T, ABHIJEET R S, SATHIYA P, et al. Parameter design and analysis in laser welding of NiTiNol shape memory alloy[J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4 (8): 8883-8891.
- [3] 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.
- YANG Jingning, WANG Qichen, WANG Yongxiang. Deformation characteristics analysis of shape memory alloy cantilever beam[J]. Journal of Gansu Sciences, 2019, 31(1): 12-16.
- [4] 宝春, 王佳朦. 不锈钢复合钢管预制安装技术在煤制油工业应用的综合优势浅析[J]. 化工管理, 2018(2): 61-62.
- BAO Chun, WANG Jiameng. Comprehensive advantages of prefabrication and installation technology of stainless steel composite pipes in coal-based oil industry[J]. Chemical Enterprise Management, 2018(2): 61-62.
- [5] 刘亚丕, 牛振标, 周焊峰, 等. 现代不锈钢材料: 结构、性能、特点和应用[J]. 磁性材料及器件, 2016, 47(5): 72-77.
- LIU Yapi, NIU Zhenbiao, ZHOU Hanfeng, et al. Modern stainless steel materials: structure, properties, characteristics and application[J]. Journal of Magnetic Material and Devices, 2016, 47 (5): 72-77.
- [6] 陈玉华, 龚伟怀, 倪泉, 等. TiNi 合金/不锈钢激光焊接头裂纹的形成和控制[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 3168-3171.
- CHEN Yuhua, GONG Weihuai, NI Quan, et al. Formation and control of cracks in TiNi alloy/stainless steel laser welded joints[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(12): 3168-3171.
- [7] 李洪梅, 孙大千, 董鹏, 等. TiNi 形状记忆合金与不锈钢激光焊接头裂纹分析及防止措施[J]. 焊接学报, 2012, 33(12): 41-44.
- LI Hongmei, SUN Daqian, DONG Peng, et al. Crack analysis and preventive measures for laser welded joint of TiNi shape memory alloy and stainless steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(12): 41-44.
- [8] BELYAEV S, RUBANIK V, RESNINA N, et al. Functional properties of bimetal composite of “stainless steel-TiNi alloy” produced by explosion welding[J]. Physics Procedia, 2010, 10: 52-57.
- [9] 李红, 栗卓新, 汪应玲, 等. TiNi 形状记忆合金与不锈钢的瞬时液相扩散焊[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(8): 1382-1386.
- LI Hong, LI Zhuoxin, WANG Yingling, et al. Transient liquid phase diffusion welding of TiNi shape memory alloy and stainless steel[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(8): 1382-1386.
- [10] 汪应玲, 李红, 栗卓新, 等. TiNi 形状记忆合金与不锈钢瞬间液相扩散焊工艺研究[J]. 材料工程, 2008(9): 48-51.
- WANG Yingling, LI Hong, LI Zhuoxin, et al. Study on the instantaneous liquid phase diffusion welding process of TiNi shape memory alloy and stainless steel[J]. Journal of Material Engineering, 2008(9): 48-51.
- [11] QIU X M, LI M G, SUN D Q, et al. Study on brazing of TiNi shape memory alloy with stainless steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 176(1): 8-12.
- [12] 李明高, 孙大千, 邱小明. TiNi 形状记忆合金与不锈钢激光钎焊接头界面组织特征[J]. 中国有色金属学报, 2007(3): 373-377.
- LI Minggao, SUN Daqian, QIU Xiaoming. Microstructure characteristics of interface between TiNi shape memory alloy and laser brazed stainless steel[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007(3): 373-377.
- [13] 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.
- LIU Lansheng. Microstructure and properties of TiNi alloy/stainless steel dissimilar material micro-laser weld[J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(3): 122-126.
- [14] SHOJAEC ZOERAM A, RAHMANI A, AKBARI MOUSAVI S A A. Microstructure and properties analysis of laser-welded Ni-Ti and 316l sheets using copper interlayer[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 26: 355-363.
- [15] RAVINDRA B, MALLIK A. Performance of non-linear vibration isolators under harmonic excitation[J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 170(3): 325-337.
- [16] LI H M, SUN D Q, CAI X L, et al. Laser welding of TiNi shape memory alloy and stainless steel using Ni

- interlayer[J]. *Materials & Design*, 2012, 39: 285-293.
- [17] GAO Xiaolong, LIU Jing, ZHANG Linjie. Dissimilar metal welding of Ti6Al4V and Inconel 718 through pulsed laser welding-induced eutectic reaction technology[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(1): 1061-1071.
- [18] OLIVEIRA J P, PANTON B, ZENG Z, et al. Laser joining of NiTi to Ti6Al4V using a Niobium interlayer[J].

Acta Materialia, 2016, 105: 9-15.

作者简介: 王小强, 男, 1993 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为激光加工、表面改性及增材制造。

E-mail: 16609424206@163.com

刘晶(通信作者), 女, 1983 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。

主要研究方向为激光加工、表面改性及增材制造。

E-mail: elfsmile@163.com