

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.04.075

NiTiNb/TC4 异种材料激光微焊接头裂纹研究

陈玉华*, 李树寒, 陆巍巍

南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063

摘 要: NiTiNb/TC4 异种材料激光焊时, 焊接头的裂纹敏感性很强, 在较小激光功率时, 焊缝就出现了裂纹, 通过改变激光功率无法消除接头裂纹。通过添加 Ti 丝来调节接头中 Ti 的含量来减小 Ti₂Ni 的生成, 从而控制接头裂纹的生成。研究表明, 当加入 Ti 丝后, 在不同激光功率下, 接头成形良好, 焊缝中存在微细裂纹; 在 NiTiNb 侧存在宽 10 μm 的 Ti₂Ni 过渡区, TC4 侧结合良好; 当激光频率为 3Hz、激光脉宽为 4.5ms、激光平均功率为 13.6W 时, 接头最大抗拉强度达 447MPa。

关键词: 激光微焊接; NiTiNb 记忆合金; TC4 钛合金; 裂纹; 敏感性

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1007-5453 (2017) 04-0075-04

Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ (at. %, 以下简称 NiTiNb) 宽滞形状记忆合金是在 1986 年以后发展起来的一种新型记忆合金, 被广泛应用于航空、航天、海军舰艇以及海上石油平台等方面^[1-3], 钛合金是航空航天工业及航空发电机结构中重要的结构材料^[4]。NiTiNb/TC4 焊接结构可以用于飞机发动机的智能降噪结构, 通过 NiTiNb 的形状记忆性能改变排气口的大小, 可以降低起飞和降落过程的噪音, 使飞机进入低噪声时代^[5]; 也可在 TC4 钛合金制作的高尔夫球头“甜蜜区”嵌入超弹性的 NiTiNb 形状记忆合金, 使打得更准更远, 同时能补偿球头的刚度随温度的变化, 因此, 在运动器材方面也具有广阔的应用前景^[6, 7]。

但是, 在 NiTiNb/TC4 焊接的过程中容易出现焊接裂纹, 焊缝裂纹区域的相组成为 NiTi₂、NiTi 金属间化合物。根据 Ni-Ti 相图, 通过调节 Ti 的含量, 有可能使焊缝成分避开 Ti₂Ni 的区间, 从而减少接头的裂纹敏感性。此外, Ti 是母材的成分之一, 不会引入新的杂质元素, 同时也能稀释焊缝中的 Ni 元素, 减小第二相的生成数量。本文在 NiTiNb 和 TC4 中间预制 Ti 丝来研究接头裂纹敏感性和组织性能。

1 材料的选择

本文选用的 NiTiNb 合金为 300μm 厚热轧态薄片, TC4 为 200μm 厚退火态薄片, 用线切割将 NiTiNb 和 TC4 板材加工成 20mm×25mm 的焊接试样, 将 NiTiNb 放入 HF:HNO₃:H₂O=1:3:5 的混合溶液中浸泡, 去除 NiTiNb 表面较厚的氧化膜, 取出后用丙酮冲洗并吹干。填充材料为直径为 300μm 的纯 Ti 丝。

试验所用的激光微焊接设备是喜丝玛 (Sisma) 公司生产的 SL80 型 Nd:YAG 激光焊接系统, 激光平均功率为 80W。其平均功率可调范围为最大平均功率的 0~30%。脉冲宽度可调范围为 0.3~9.9ms。脉冲频率的可调范围为 0~15Hz, 焊接速度固定为 0.3m/min。如图 1 所示的方法进行焊接。

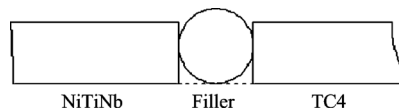


图 1 填丝对接接头示意图

Fig.1 Schematic diagram of butt joint

收稿日期: 2017-01-07; 录用日期: 2017-01-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51565040); 航空科学基金 (2014ZE56016); 江西省科技计划项目 (20151BBE50034)

* 通讯作者. Tel.: 13330067995 E-mail: ch.yu.hu@163.com

引用格式: CHEN Yuhua, LI Shuhan, LU Weiwei. Study on crack sensitivity of NiTiNb/TC4 laser micro-welding joints [J].

Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (04): 75-78. 陈玉华, 李树寒, 陆巍巍. NiTiNb/TC4 异种材料激光微焊接头裂纹研究 [J]. 航空科学技术, 2017, 28 (04): 75-78.

2 激光功率对裂纹敏感性影响

当激光频率为 4.5Hz, 激光脉宽为 4.5ms, 光斑直径为 300 μ m, 不同激光功率时接头表面的裂纹形貌如图 2 所示。当激光平均功率为 7.2W 时, 焊缝宽度约为 570 μ m, 此时焊缝刚好被焊透, 在靠近 TC4 侧出现一条贯穿整个焊缝的纵向裂纹, 其中在纵向裂纹周围还存在细小的横向裂纹。当激光功率为 9.6W 时, 裂纹出现在焊缝中心处, 焊缝宽度约为 670 μ m, 纵向裂纹张开宽度较 7.2W 时有增加, 横向裂纹的数量也有增多。当激光平均功率增加到 12W 时, 裂纹出现在偏 NiTiNb 侧, 焊缝宽度增加到 800 μ m, 纵向裂纹张开宽度减小, 而横向裂纹张开宽度增加。焊缝宽度随着热输入的增加而逐渐变宽, 而裂纹在刚好焊透时就会产生, 并且随激光功率增加时, 裂纹变化不是很明显。分析认为, 焊缝中脆性相的生成是裂纹生成的主要原因, 而激光功率增加, 接头中脆性相的量不会减少, 因此, 通过改变工艺参数无法控制裂纹的生成。

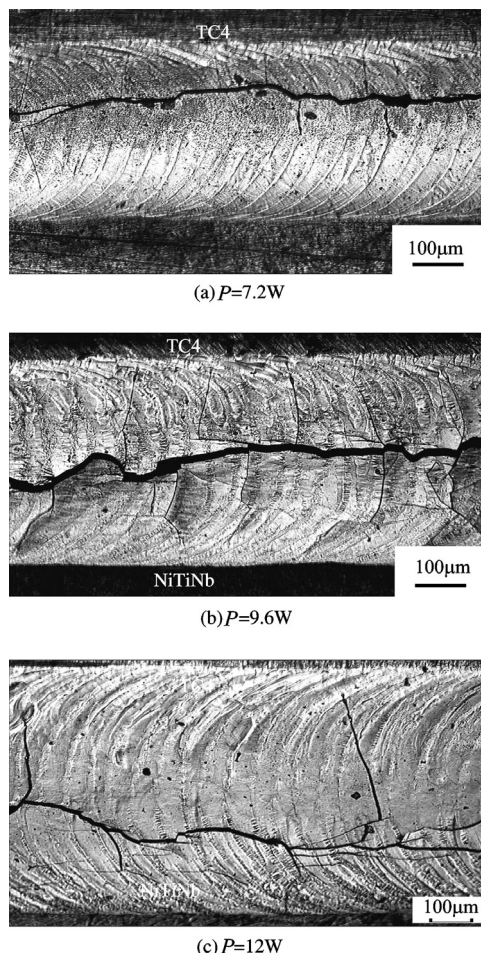


图 2 不同激光功率下的裂纹形貌

Fig.2 Crack morphology at different laser power

3 填 Ti 丝对接头裂纹组织性能的影响

当激光脉宽为 4.5ms 时, 频率为 3Hz, 光斑直径为 300 μ m, 不同激光功率下填 Ti 丝的焊缝表面宏观形貌如图 3 所示。图 3 (a) 是平均功率为 12W 时的表面形貌, 焊缝表面成形良好, 表面为清晰的鱼鳞纹。当激光功率为 13.6W 和 15.2W 时, 如图 3 (b) 和图 3 (c) 所示, 焊缝表面依然成形较好, 由于激光平均功率的增加, 焊缝表面宽度稍有增加, 但是对图 3 (c) 中 A 区域进一步放大后发现 (图 3 (d)), 焊缝中存在 200 μ m 长的微裂纹, 微裂纹的存在会使接头的力学性能严重下降, 整体来看, 添加 Ti 丝后的接头表面形貌有较大提升。

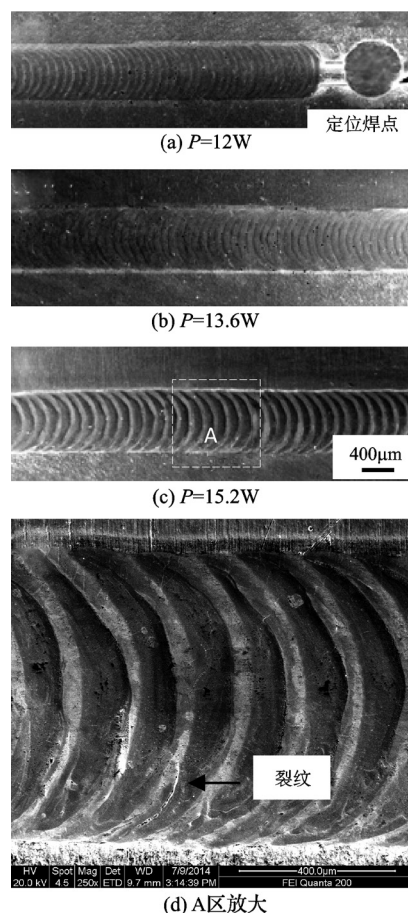


图 3 填 Ti 丝接头宏观形貌

Fig. 3 Joint macroscopic morphology with fill Ti wire

焊缝横截面形貌如图 4 (a) 所示。从图可以发现焊缝横截面无明显裂纹, 焊缝上表面略向上突起, 下表面略向上凹陷, 填丝后两侧熔合线形貌并不对称, 分析认为主要是 TC4 与 NiTiNb 的导热系数与热传导系数不一致引起母材熔化量不一样。图 4 (b) 为母材 NiTiNb 侧焊缝处界面的微观形貌, 图中可以看出, 界面处分界较为明显, 表 1 显示 A 处能谱 Ti、

Ni 原子比为 Ti : Ni $\approx$ 2.33 : 1, 接近 Ti₂Ni 相, 该区域宽度约为 10 μ m, B 区能谱显示 Ti 的含量达到 82%。分析认为, 在 NiTiNb 侧的过渡区是由于金属溶液搅拌不均匀引起的, 熔池中间剧烈的紊流与 NiTiNb 侧的层流形成过渡区, 减少该区域的厚度能减小裂纹敏感性。而 TC4 一侧焊缝与熔合线的界面结合较好, 如图 4 (c) 所示, 焊缝侧的 C、E 区域主要是 Ti 元素, Ni 含量较少, 两处化学成分基本相同, D 区域为 TC4 侧的热影响区, 能谱显示其化学成分与母材 F 处相同。

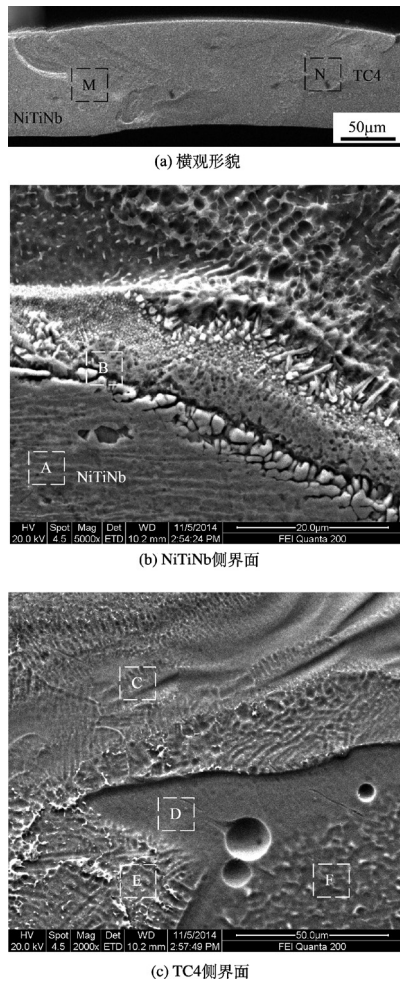


图 4 填 Ti 丝接头界面形貌
Fig. 4 Interface morphology with fill Ti wire

表 1 焊缝与母材界面区元素含量 (原子百分比, at. %)
Table 1 Weld and base metal interface area element content (atomic percentage, at. %)

Point	Ni	Ti	Nb	Al	V
A	27.89	65.07	7.04	—	—
B	12.28	82.70	3.16	1.86	—
C	8.5	86.24	1.53	2.09	1.65
D	—	85.64	—	10.33	4.03
E	8.5	85.05	1.80	3.34	1.31
F	—	86.56	—	9.79	3.64

图 5 为不同功率下填 Ti 丝接头的抗拉强度。激光功率为 12W 时, 接头的抗拉强度为 277MPa, 功率为 13.6W 时, 接头的抗拉强度为 447MPa, 功率为 15.2W 时, 接头的抗拉强度为 303MPa。分析认为, 在功率刚好焊透母材时, 焊缝背面熔宽较窄, 成形较差, 所以强度较低。随着功率的增加, 焊缝正反两面成形都很好, 由于焊缝中 Ti 元素含量增加, 脆性化合物减少, 接头强度提高。当功率进一步增加时, 焊缝热输入量也增加, 母材熔化更多, 导致脆性化合物含量增加, 同时热输入增大也会导致接头的残余应力增加。

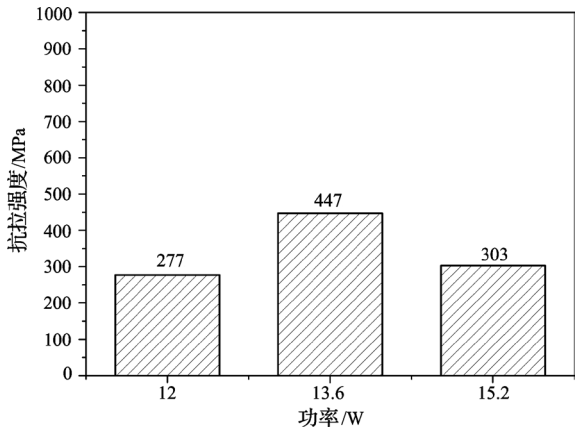


图 5 不同功率下接头的抗拉强度
Fig.5 Tensile strength under different power

4 结论

通过研究 NiTiNb/TC4 异种材料激光焊时激光功率对裂纹敏感性的影响, 以及填 Ti 丝对接头裂纹组织性能的影响, 可以得到以下几点结论:

- (1) NiTiNb/TC4 异种材料激光焊时, 焊接接头的裂纹敏感性很强, 通过改变激光工艺参数无法消除接头裂纹。
- (2) 在中间加入 Ti 丝后, 能有效控制裂纹的生成, NiTiNb 侧存在 10 μ m 的 Ti₂Ni 相区, 而 TC4 侧界面结合良好。
- (3) 填 Ti 后激光频率为 4.5Hz、激光脉宽为 4.5ms、激光平均功率为 13.6W 时, 接头最大抗拉强度达 447MPa。

AST

参考文献

[1] Otsuka K, Wayman C M. Shape memory materials[M]. Cambridge CB2 1RU: Cambridge University Press, 1999.

[2] 曹云红. 形状记忆合金的发展及其在导弹与航天领域的发展 [J]. 飞航导弹, 2000 (10): 60-63.

- CAO Yunhong. Development of shape memory alloys and their development in missile and space field[J]. Winged Missiles, 2000 (10): 60-63. (in Chinese)
- [3] Edwards J E, Le Gloahec R, Vercaemer C J, et al. Flow control; U.S. Patent 20, 060, 185, 849[P]. 2006.
- [4] Leyens C, Peters M. Titanium and titanium alloys [M]. Wiley-VCH, Weinheim, 2003.
- [5] Mabe J. Variable area jet nozzle for noise reduction using shape memory alloy actuators [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 123 (5): 3871.
- [6] Van Humbeeck J, Kustov S. Active and passive damping of noise and vibrations through shape memory alloys: applications and mechanisms [J]. Smart Materials and Structures, 2005, 14 (5): S171.
- [7] 陈玉华, 龚伟怀, 倪泉, 等. TiNi 合金 / 不锈钢激光焊接接头裂纹的形成和控制 [J]. 中国激光, 2010 (12): 3168-3171.
- CHEN Yuhua, GONG Weihuai, NI Quan, et al. Formation and control measure of the cracks in the laser welded joint between TiNi alloy and stainless steel [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010 (12): 3168-3171. (in Chinese)
- 作者简介**
陈玉华 (1979—) 男, 博士, 教授。主要研究方向: 特种焊接技术和材料焊接性方面的研究。
Tel: 13330067995
E-mail: ch.yu.hu@163.com

Study on Crack Sensitivity of NiTiNb / TC4 Laser Micro-welding Joints

CHEN Yuhua*, LI Shuhan, LU Weiwei

School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China

Abstract: When the NiTiNb / TC4 dissimilar material is welded by laser, the crack sensitivity of the welded joint is very strong. Weld cracks appeared even at low laser power. Changing the laser power can not eliminate the joint crack. The formation of Ti₂Ni was controlled by adding the Ti wire to adjust the content of Ti in the joint, so as to control the formation of the joint crack. Research showed, when the Ti wire was added, the joint was formed well under different laser power, and the micro cracks exist in the weld. There was a width 10 μ m Ti₂Ni transition regions on the NiTiNb side, and the TC4 side was well bonded. When the laser frequency was 3Hz, the laser pulse width was 4.5ms and the laser average power was 13.6W, the maximum tensile strength of the joint was 447MPa.

Key Words: laser micro-welding; NiTiNb memory alloy; TC4 titanium alloy; crack; sensitivity

Received: 2017-01-07; **Accepted:** 2017-01-20

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (51565040); Aeronautical Science Foundation of China (2014ZE56016); Jiangxi Science and Technology Project (20151BBE50034)

***Corresponding author. Tel. :**13330067995 **E-mail:** ch.yu.hu@163.com