

文章编号 1004-924X(2014)08-2075-06

TiNi 形状记忆合金/钛合金异种材料激光焊

陈玉华*, 戈军委, 刘奋成, 柯黎明

(南昌航空大学 航空工程学院, 江西 南昌 330063)

摘要: 由于 TiNi 合金与钛合金的物理和化学性能差异较大, 故其焊接性较差, 焊缝区易形成大量的金属间化合物并产生裂纹。为实现上述材料的良好连接、提高接头性能, 本文对采用激光焊连接 0.2 mm 厚 TiNi 形状记忆合金和 TC₄ 钛合金异种材料进行了探索。分别采用直接对接焊和手工填丝焊的方法, 研究了焊接接头的微观组织和力学性能。结果表明, 直接对接焊时焊缝中心产生了纵向裂纹; 手工填丝焊则通过合适的焊接工艺, 改善了焊缝成形, 避免了裂纹的产生。较优的焊接工艺参数为功率百分比 18%、脉冲宽度 3 ms、脉冲频率 3 Hz; 在界面区, Ni 与 TC₄ 形成的过渡层宽度约为 2 μm, Ni 与 TiNi 形成的过渡层宽度约为 0.5 μm。接头最大抗拉强度为 332 MPa, 断裂位置发生在靠近 TiNi 侧的熔合线附近。

关键词: TiNi 形状记忆合金; TC₄ 钛合金; 激光微焊接; 对接焊; 手工填丝焊

中图分类号: TG456.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142208.2075

Micro laser welding of dissimilar materials between TiNi shape memory alloy and titanium alloy

CHEN Yu-hua*, GE Jun-wei, LIU Fen-cheng, KE Li-ming

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

* Corresponding author, E-mail: ch_yu.hu@163.com

Abstract: The physical and chemistry properties of TiNi shape memory alloy and TC₄ titanium alloy are quite different, so the weldability is poor and a number of intermetallic compounds and cracks will produce in the weld seam. To achieve good joining of TiNi shape memory alloy and TC₄ titanium alloy and improve the welded joint properties, this paper explores the micro laser welding of dissimilar materials between TiNi shape memory alloy and titanium alloy. The butt welding method and manual welding filler wire method are carried out for 0.2 mm thick TiNi shape memory alloy and TC₄ titanium alloy to obtain the microstructure and mechanical properties. The results show that longitudinal cracks are brought out in butt welding, however, the appropriate welding process for manual welding filler wire improves weld forming and avoids cracks. The optimum welding parameters are the power percentage 8%, pulse width of 3 ms, and the pulse frequency of 3 Hz. Moreover, the transition width formed by Ni and TC₄ is about 2 μm, and that formed by Ni and TiNi is about 0.5 μm. In the com-

收稿日期: 2013-11-06; 修订日期: 2014-01-21.

基金项目: 上海航天科技创新基金资助项目 (No. SAST201209); 江西省自然科学基金资助项目 (No. CA200801040); 南昌航空大学“卧龙之星”计划资助项目 (No. 2013-2)

bined surface, transition is relatively weak link connector, the hardness is up to 650 HV with the maximum tensile strength of 332 MPa, and the fracture location occurs near TiNi side by the fusion line.

Key words: TiNi shape memory alloy; TC₄ titanium alloy; micro laser welding; butt welding; manual welding filler wire

1 引言

涡轮风扇发动机具有推力大、推进效率高、燃油消耗率低、飞机航程远等优点,但其在工作时会造成很大的噪音,尤其是飞机在起飞和爬升阶段产生的噪音更大。目前一种有效的降噪技术是采用锯齿状喷口,通过将在喷口处固定的锯齿结构伸入高速喷出的气流中,干预喷出气流与大气气流的混合,使两者的混合平稳,进而达到降低噪音的目的,这种方法在减小噪音的同时会损失一定的推力^[1]。

TiNi 形状记忆合金(简称 TiNi 合金)是一种新型功能材料,具有特殊的形状记忆效应、超弹性和较高的强度、良好的抗腐蚀性和生物相容性,被称为“跨越 21 世纪的理想材料”^[2]。自 20 世纪 60 年代初期问世以来,形状记忆合金在航空航天、医疗器械、精密仪表结构、汽车工业以及原子能等领域获得了重要应用^[3,4]。特别是在航空、航天领域,TiNi 合金的应用越来越广泛,1970 年美国首先将形状记忆合金用于宇宙飞船天线^[5];近年来美国已研制出几种可重复使用、响应速度快的记忆合金动作器,并成功应用于卫星的分离机构^[6]。

利用 TiNi 合金在温度变化时热弹性马氏体相变产生的相变驱动力可制造出驱动器,如果将航空发动机上用于降噪的锯齿结构安装在 TiNi 合金制造的薄片驱动器上,制成可变形的智能锯齿结构,在飞机起飞和爬升过程中利用发动机高功率下喷出的炽热气体加热 TiNi 合金薄片驱动器,使其发生相变驱动锯齿结构变形,锯齿伸入气流中、降低噪音;当飞机处于巡航状态时,发动机较低的功率使周围空气相对冷却,TiNi 合金发生逆相变,锯齿结构返回初始状态,减少推力的损失。这种智能降噪结构可以有效降低发动机的噪音而不损失太多的推力,因此在新型航空发动机上具有广阔的应用前景^[7]。

然而,TiNi 合金与钛合金在物理和化学性能

方面存在较大差异,其焊接性较差,易在焊缝区形成大量的金属间化合物并产生裂纹,严重影响接头的性能。低功率脉冲激光焊接具有能量密度高、变形和应力小等特点^[8],因此有助于提高焊接质量^[9,10]。本文采用激光焊对 TiNi 合金与钛合金异种材料的连接进行了探索。采用直接对接焊和手工填丝焊的方法,研究了焊接接头的微观组织和力学性能,为异种材料激光焊方面的研究提供了参考。

2 试验条件及方法

TiNi 合金是用真空感应炉生产的合金锭,成分为 Ti-50.6%Ni,经过锻造、冷轧去除氧化膜后,形成厚度为 0.2 mm 的薄片;TC₄ 钛合金是厚度为 0.2 mm 的轧制薄片,试样的尺寸均为 30 mm×20 mm。为了解决直接对接焊焊缝中的裂纹问题,试验采用手工填丝焊(采用纯 Ni 丝,直径为 0.3 mm)方式,TC₄ 与 TiNi 金属性能如表 1 所示。

表 1 TC₄ 钛合金与 TiNi 合金的性能

Tab. 1 Properties of TC₄ titanium alloy and TiNi alloy

材料	熔点/°C	导热系数 /W·(m·°C) ⁻¹	线膨胀系数 ×10 ⁻⁶ /°C ⁻¹
TC ₄	1 668	7.2	7.89
TiNi	1 240~1 310	0.21	10

试验设备为 SISMA 公司生产的 SL-80 型 Nd:YAG 脉冲激光焊机,激光平均功率为 80 W、脉冲宽度量程为 0.3~9.9 ms、脉冲频率量程为 0~15 Hz,所有试样均在光斑直径为 0.3 mm 条件下焊接,焊接速度为 0.3 mm/s。采用自制、专用焊接工装,采用氩气对施焊面进行保护,流量为 5 L/min,喷嘴角度为 60°。

焊后垂直焊缝方向截取横截面金相试样,在 4XB-TV 倒置金相显微镜上观察焊缝表面、横截面宏观形貌和接头金相组织。采用线切割将焊接

接头加工成 $50\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$ 的拉伸试样,在 Instron5543 拉伸试验机上测试接头的抗拉强度。每种工艺拉伸 3 个试样,取其平均值。

3 试验结果与分析

3.1 TiNi 合金/TC₄ 钛合金对接焊裂纹敏感性

TiNi 形状记忆合金/TC₄ 钛合金异种材料直接对接焊焊接接头的裂纹敏感性极大,难以通过调整焊接工艺避免裂纹的产生,其宏观形貌如图 1 所示,焊缝表面有细致、均匀的鱼鳞纹生成,焊缝中间有条贯穿焊缝的纵向裂纹,并且焊接裂纹不可避免。分析认为:TC₄/TiNi 异种金属的熔点、热膨胀系数、导热系数等方面都存在较大的差异,在接合面上可能会形成 Ti₂Ni、TiNi₃ 等脆性金属间化合物,并且接头中存在较大的残余应力,导致焊接接头的开裂,严重影响接头性能。

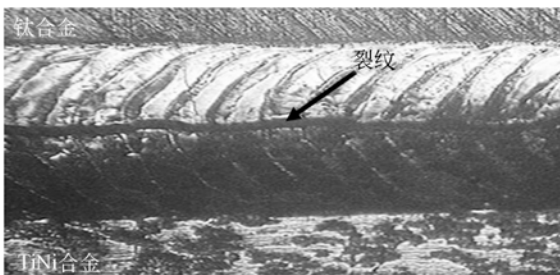


图 1 焊接接头裂纹宏观形貌

Fig. 1 Morphology of crack in welded joint

3.2 添加镍对裂纹敏感性的改善

纯 Ni 具有较高的塑性变形能力,能与 TC₄ 中的 Fe、TiNi 合金中的 Ti 在液态时无限互溶,在固态时有限互溶,且 Ti 在 Ni 中具有较大的溶解度,有利于改善激光熔化焊时的结合性能和力学性能。试验选用直径为 0.3 mm 的纯镍丝作为中间层材料,TC₄/TiNi 异种金属板材之间预留间隙为 0.2 mm, Ni 丝放置在间隙之上,焊接时手工填丝,避免了激光焊接时光斑对 Ni 丝的冲击力所造成的位置偏差。

激光焊主要参数包括功率百分比 P 、脉冲频率 F 和脉冲宽度 T 。通过大量实验研究发现:在功率百分比 $P=18\%$ 、脉冲频率 $F=3\text{ Hz}$ 、脉冲宽度 $T=3\text{ ms}$ 时,可以得到无缺陷、成形良好的焊缝,图 2 所示为无裂纹的焊缝横截面形貌。

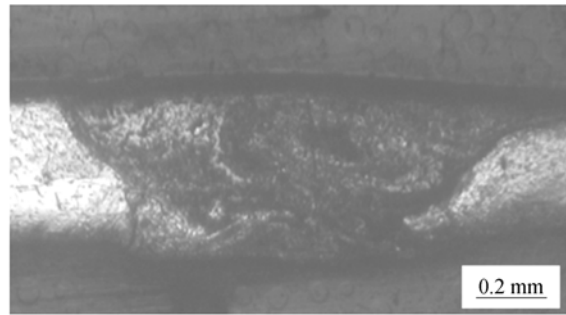


图 2 填丝焊焊接头的横截面形貌

Fig. 2 Morphology of cross section of welded joint

但填丝焊时,如果工艺参数不合适,容易产生未焊透现象。图 3 为 $P=15\%$, $T=3\text{ ms}$, $F=3\text{ Hz}$ 时的焊缝宏观形貌,焊缝出现未焊透现象, Ni 丝熔化,而 TC₄/TiNi 异种金属板材基本保持原样,激光能量被 Ni 丝吸收,这是因为功率百分比过小,输入焊缝的热量过小造成的。

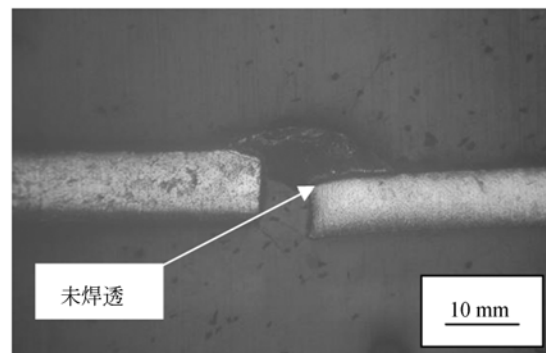


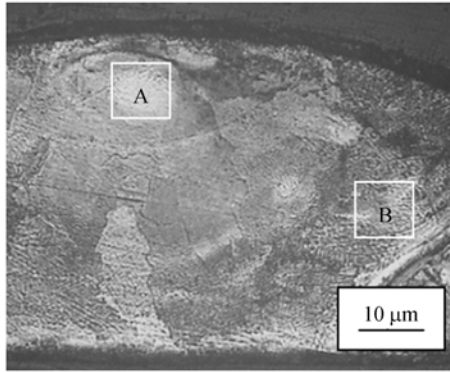
图 3 填丝焊时的未焊透

Fig. 3 Incomplete penetration in welded joint

3.3 焊接接头的组织结构及特征

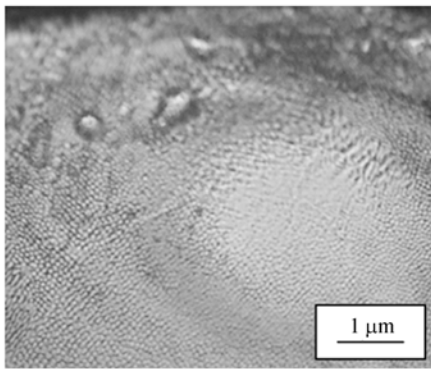
图 4 为 $P=18\%$, $T=3\text{ ms}$, $F=3\text{ Hz}$ 时的焊缝横截面显微组织形貌(对应的宏观形貌如图 2 所示)。由图 4 可以看出,焊缝成形良好,无焊接缺陷,横截面呈现“蘑菇”形状,但焊缝区组织不均匀。各层金属的耐蚀性不同;母材与焊缝金属有比较明显的界面,这是元素间发生扩散作用形成的过渡区。激光焊具有能量集中、加热速度快、时间短等特点,但采用激光填丝焊时,这些特点易使液态金属流动极不充分,各元素之间来不及彼此扩散,故会产生组织不均匀现象,如图 4(a)所示。图 4(b)、(c)分别为 4(a)图中 A、B 层的放大图,从图中可以看出,焊缝横截面中上部组织全部为

尺寸较小的等轴晶组织,下部为块状组织;熔合线附近为等轴晶和柱状晶的混合组织,且结晶方向无规律,B区等轴晶尺寸比A区大。



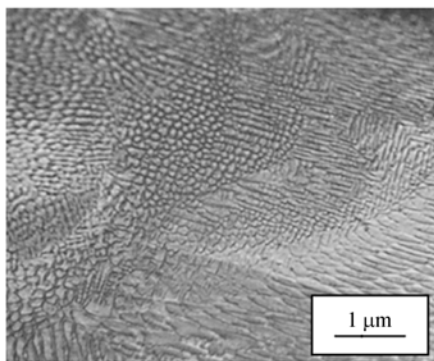
(a)焊接横截面形貌

(a)Morphology of cross section of weld seam



(b)A区微观组织

(b)Microstructure of zone A



(c)B区微观组织

(c)Microstructure of zone B

图 4 焊缝横截面积的微观组织

Fig. 4 Microstructures of cross section of weld

根据图 Ni-Ti 二元合金相图可知,Ni 与 Ti

之间的固溶度较低,在焊接过程中 Ni 与 TC₄ 基体会相互扩散,阻碍 Ti-Ni 脆性金属间化合物的形成。薄板焊接时,输入的线能量小,焊缝的冷却速度快,从而减小了近缝区热作用的影响,使得热影响区不明显。由于 TiNi 合金的热导率低,熔合线附近温度梯度最大,越靠近焊缝中心区,温度梯度越小,促进了焊缝中心区金属的细化,使该区表现为细小的等轴晶(A层)。而远离焊缝区,受母材及夹具冷作用影响较大,温度梯度大,有利于柱状晶生长(B层)。

3.4 界面区的微观结构

对于异种材料的焊接,结合界面一般都是焊接接头力学性能较薄弱的环节,研究结合界面的显微组织具有重要意义。图 5 所示为结合界面的显微组织图。



(a)焊接与 TC₄ 界面

(a)Interface between weld seam and TC₄ alloy



(b)焊缝与 TiNi 界面

(b)Interface between weld seam and TiNi alloy

图 5 界面区的微观结构

Fig. 5 Microstructures of interface

图 5(a)、(b)分别为 Ni 与 TC₄、Ni 与 TiNi 的结合界面。Ni 与 TC₄ 形成过渡层宽度约为 2 μm,Ni 与 TiNi 形成过渡层宽度约为 0.5 μm,过

过渡层宽度决定了焊接接头的力学性能,这也解释了拉伸时断裂位置发生在 TiNi 侧的原因。焊接时激光光斑没有偏移,因此,输入 TC₄ 与 TiNi 侧的热量基本是相同的,由于 TiNi 导热系数远远小于 TC₄ 的导热系数,抑制了 TiNi 侧原子与焊缝金属原子的扩散,这是 Ni 与 TiNi 侧过渡层宽度窄的原因。

3.5 焊接接头的抗拉强度

经过拉伸实验可知,采用不同的焊接工艺参数,得到焊缝抗拉强度不一样,故采用求平均值的方法来避免焊缝强度不均匀的现象。通过测量接头的抗拉强度值,得到较优焊接工艺为功率百分比 $P=18\%$ 、脉宽宽度 $T=3\text{ ms}$ 、脉冲频率 $F=3\text{ Hz}$,接头最大抗拉强度为 332 MPa,达到 TiNi 合金母材强度(705 MPa)的 47%。断裂位置发生在

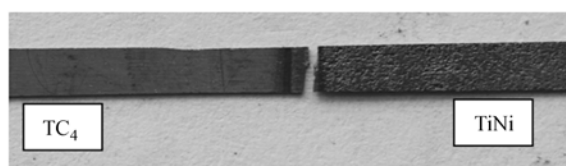


图 6 焊接接头拉伸断裂位置

Fig. 6 Tensile fracture position of welded joint

参考文献:

- [1] 于东,张博明,梁军,等. 形状记忆合金在航空工业中的应用研究进展[J]. 金属功能材料, 2007, 14(6):27-32.
- YU D, ZHANG B M, LIANG J, et al.. Advances of shape memory alloys in aviation industry [J]. *Metallic Functional Materials*, 2007, 14(6): 27-32. (in Chinese)
- [2] MOOCHUL S. *Seismic Retrofit and Repair of Reinforced Concrete Bridge Columns using Shape Memory Alloy spirals*[M]. Urbana:Illino,2012.
- [3] MORGAN N B. Medical shape memory alloy applications—the market and its products [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 378:16-23.
- [4] LV S X, YANG Z L, DONG H G. Welding of shape memory alloy to stainless steel for medical occluder [J]. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2013,23:156-160.
- [5] 曹运红. 形状记忆合金的发展及其在导弹与航天领

域的应用[J]. 飞航导弹, 2010, (10): 60-63.

4 结 论

TC₄ 与 TiNi 对接焊时,容易产生沿焊缝中心的纵向裂纹;本文通过添加 Ni 丝改善了焊缝成形,有效抑制了纵向裂纹的产生。添加 Ni 丝后,较优的焊接工艺参数为功率百分比 $P=18\%$ 、脉宽宽度 $T=3\text{ ms}$ 、脉冲频率 $F=3\text{ Hz}$,此时接头最大抗拉强度为 332 MPa,断裂位置发生在靠近 TiNi 侧的熔合线附近。添加 Ni 丝的焊接接头中,由于激光光斑直径与 Ni 丝直径相等,焊接过程中仅使 Ni 丝熔化、母材依靠液态 Ni 丝传递的热量而微量熔化。熔化的 Ni 丝与两侧母材形成了明显的过渡层,Ni 与 TC₄ 形成的过渡层宽度约为 $2\text{ }\mu\text{m}$,Ni 与 TiNi 形成的过渡层宽度约为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 。本文工作为异种材料激光焊接方面的研究提供了有益的参考。

- CAO Y H. The development of shape memory alloy and its applications in missile and aerospace field [J]. *Winged Missiles Journal*, 2010, (10): 60-63. (in Chinese)
- [6] 高滨. 形状记忆合金在航天器分离机构上的应用 [J]. 航天返回与遥感, 2005, 26(1): 48-52.
- GAO B. The applications of shape memory alloy on the the spacecraft separation mechanism [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2005, 26(1):48-52. (in Chinese)
- [7] CHAU E T F, FRIEND C M. Technical and economic appraisal of shape memory alloys for aerospace applications [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006,438-440:589-596.
- [8] 吴东江,王占宏,马广义,等. 脉冲激光焊接 Hastelloy C-276 合金的熔池流动传热特性分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 543-549.
- WU D J, WANG ZH H, MA G Y, et al.. Analy-

sis of fluid flow and heat transfer in weld pool during pulsed laser welding Hastelloy C-276 alloys[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 543-549. (in Chinese)

- [9] 郭玉泉, 吴东江, 马广义, 等. 夹具拘束距离对 Hastelloy C-276 薄板脉冲激光焊接变形的影响[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2465-2471. GUO Y Q, WU D J, MA G Y, *et al.*. Influence of

fixture restraint distance on pulsed laser welding distortion of Hastelloy C-276 thin sheet[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2465-2471. (in Chinese)

- [10] LI H M, SUN D Q, CAI X L, *et al.*. Laser welding of TiNi shape memory alloy and stainless steel using Co filler metal [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45:453-460.

作者简介:



陈玉华(1979—),湖北武穴人,博士,副教授,硕士生导师,2006年于中国石油大学获博士学位,主要从事激光加工技术、特种焊接技术、材料焊接性方面的研究。E-mail: ch.yu.hu@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)