

# TiNi 记忆合金激光焊接缺陷分析

## Study on Laser Welding Defect of TiNi Shape Memory Alloy

中航工业北京航空制造工程研究所 欧阳捷 陈 俐 苗 玮

**[摘要]** 针对 TiNi 形状记忆合金薄板采用 Nd-YAG 连续激光进行自熔焊接和预填稀土薄片的工艺研究。试验表明,合理的焊接工艺参数可以获得良好的焊缝成形,然而,同常规的钛合金激光焊接一样, TiNi 形状记忆合金主要焊接缺陷是气孔和裂纹。基于 X 射线图像、扫描电镜等手段对焊缝缺陷的位置、形状、大小和周边组织变化进行了进一步观察,并对缺陷形成的原因和控制进行了分析。

**关键词:** TiNi 记忆合金 激光焊接 焊接气孔 焊接裂纹

**[ABSTRACT]** The TiNi shape memory alloy welded by Nd-YAG is investigated, both for autogeneous laser welding and for laser welding with pre-filling rare-earth sheet. The results show that the proper laser welding parameters can produce the joints with accepted weld shape and quality. TiNi alloy weld defects for laser welding are main porosities and welding cracks just the same as the usual titanium alloy. The porosity and crack are analyzed by means of X-ray and SEM to understand the occurring location of defects, and defect shape, size, as well as the microstructures surrounding defects. The reason of defect forming and their control method is also discussed.

**Keywords:** TiNi shape memory alloy Laser welding Welding porosity Welding crack

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.15.098

形状记忆合金 (Shape Memory Alloy—SMA) 是 20 世纪 70 年代发展起来的新型功能材料,在外力作用下发生塑性变形,加热达到某一温度之上,将恢复变形前的形状,被称为形状记忆效应。NiTi 形状记忆合金是目前应用较为广泛的一种记忆合金,它除了具有比强度高、抗疲劳、耐磨损、耐腐蚀和生物相容性好等特点外,还具有优异的形状记忆效应和超弹性 (Super-elasticity Effect—SE),延伸率可达 20% 以上,恢复应变大,稳定性好,疲劳寿命达 100 次,而且具有比强度高、生物相容性优、耐腐蚀、耐磨损和高阻尼的特性,已应用于飞行器、核反应堆、建筑、桥梁、海洋结构及日常

生活中,具有控制、减振和耐磨等作用,可以提高结构的安全可靠性。随着人们对 TiNi 形状记忆合金材料研究的进一步深入,对记忆合金的加工技术也提出了新的要求,其中之一就是焊接技术。激光焊接属于高能束流焊接,加热集中,对材料热损伤小,这对形状记忆与超弹性合金焊接后仍可保持一定的形状记忆与超弹性是十分有利的,而且激光焊接变形小<sup>[1]</sup>。为了制备出复杂记忆合金结构件,并降低成本,国外十分重视激光焊接应用技术研究<sup>[2-4]</sup>。然而,目前形状记忆合金结构焊接制造方面还存在困难,国内有关激光焊接 TiNi 记忆合金的基础性研究还比较少,相关焊接应用技术研究缺乏,且尚无关于焊缝缺陷的机理研究。本文在前人研究 TiNi 记忆合金激光焊接已有成果的基础上<sup>[3,5]</sup>,针对 TiNi 记忆合金激光焊接焊缝中出现的主要缺陷展开分析,研究缺陷的成因,为缺陷控制的工艺改进提供参考,使 TiNi 记忆合金的激光焊接领域拓展有更好的前景。

### 1 试验材料与试验方法

TiNi 合金采用原料按预定成分配比(海绵钛 + 电解镍或海绵钛 + 电解镍 + 铌)→熔炼(真空感应 + 电弧重熔)→锻造(1073K)→轧制(热轧 1073K,冷轧常温)→20min,723K 真空热处理的过程制备,通过热轧获得 1mm 和 2mm 厚的板材。Ti-50.9Ni 合金的化学成分如表 1 所示。为了减少激光焊接对 TiNi 合金记忆功能特性的损伤,本文也探讨了添加含稀土金属材料的激光焊接工艺性。TiNi 合金的稀土薄片制备过程为:原料(海绵钛 + 电解镍)按 Ti : Ni 的原子比 50.9% 配比,再加入重量比 2% 的混合稀土(La、Ce)→熔炼(真空感应 + 电弧重熔)→锻造(1073K)→轧制(热轧 1073K),然后加工成 25mm × 2mm × 0.2mm 的条片状。所有热轧态 Ti-50.9Ni 合金板和稀土片均采用 1HF:2HNO<sub>3</sub>:10H<sub>2</sub>O 化学酸洗去除氧化膜,单面厚度减薄为 0.1mm 左右,焊前

表1 TiNi合金化学成分

|      | %  |      |        |        |         |        |
|------|----|------|--------|--------|---------|--------|
| 母材   | Ti | Ni   | C      | N      | H       | O      |
| TiNi | 余  | 50.9 | < 0.05 | < 0.05 | < 0.005 | < 0.05 |

再丙酮清洗去除表面油污。

激光器采用英国 Gsi Lumonics 公司生产的 AM356 型连续 YAG 激光器,最大功率 4.5kW,配置透镜式聚焦的 HIGHYAG 激光焊接头,其有两路镜片保护气 (shielding gas and purging gas),YAG 激光焊接系统参数如表 2 所示。焊接过程 YAG 激光焊接头由 ABB 公司制造的 IRB2400/16 型工业机器人驱动,实现动光式 YAG 激光焊接。

表2 激光器的主要技术指标

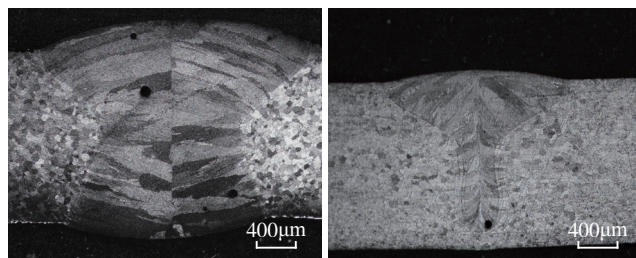
| 激光器型号 | 波长/ $\mu\text{m}$ | 模式 | 焦距/焦距/mm | 焦距直径/mm |
|-------|-------------------|----|----------|---------|
| AM356 | 1.06              | 多模 | 150      | 0.6     |

TiNi 形状记忆合金焊接需采用专用的焊接工装提供焊接区域的气体保护,侧吹及托罩气保护装置和焊接夹具组合可实现三路气保护,即焊接熔池侧吹气保护、焊缝表面高温区(250℃以上的区域)的托罩气保护和焊缝背面的夹具气保护。三路保护气均采用纯度为 99.99% 的氩气,焊缝背面夹具气流量 10~15 l/min,提前送气 2~3s,焊缝表面高温区的托罩保护气流量 10 l/min,侧吹气流与工件呈 60° 角度吹向焊接熔池。对接接头试板焊接利用夹具进行装配,填充稀土焊接则在焊前预置于对接间隙,所有试板的焊接方向均垂直于试板的轧制方向,焊后对焊缝进行 X-ray 探伤检验内部缺陷,并利用工具显微镜观察缺陷的尺寸和形状,分析缺陷形成的机理。

## 2 试验结果与分析

### (1) 焊缝气孔。

试验显示, TiNi 形状记忆合金 YAG 激光具有良好的焊缝成形,在激光功率和焊接速度合理匹配条件下,焊缝 X-ray 探伤很难识别焊缝气孔,但是对 TiNi 形状记忆合金 YAG 激光焊缝进行微观组织分析时发现,焊缝仍然存在微气孔,如图 1 所示。此外,对于未熔透的焊



(a) 全熔透焊缝 (b) 未熔透焊缝

图1 TiNi形状记忆合金YAG激光焊接焊缝界面的气孔特征  
Fig.1 Porosity feature of weld section for laser welding TiNi shape memory alloy

缝,焊缝气孔主要出现在焊缝的根部;对于全熔透焊缝,气孔出现位置随机,但都位于焊缝晶界处。利用扫描电镜(SEM)进一步观察, TiNi 记忆合金激光焊接未发现钛合金激光焊接因小孔效应引起的焊缝气孔,即气孔内壁存在熔池流动痕迹的气孔,而是气孔内壁光滑,呈规则圆形的气孔,如图 2 所示,根据已知钛合金焊缝气孔研究结果,将这一气孔与钛合金(BT20)在扫描电镜的结果进行比对<sup>[6]</sup>,推测这种气孔属于氢气孔。

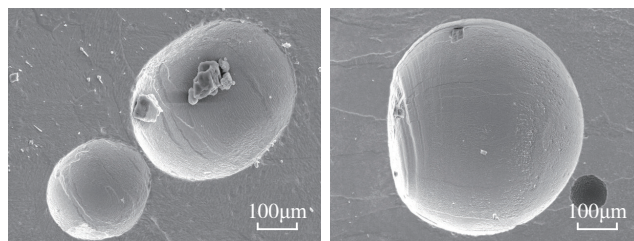


图2 TiNi形状记忆合金激光焊气孔SEM形貌特征  
Fig.2 SEM weld porosity feature for laser welding TiNi shape memory alloy

TiNi 形状记忆合金 YAG 激光焊接的焊缝中还可观察到一种氢依附于未完全熔化氧化膜直接形成的气孔,如图 3 所示,气孔的基本特征是形状不规则,孔内一般可以发现尚未熔化的氧化膜,内壁有微小的气孔,说明该气孔是聚集长大所成,这可能与所研究材料表面残存的氧化膜有关。对于 TiNi 形状记忆合金激光焊接,只要焊前表面处理合理,焊接过程气体保护效果良好,可有效地避免此类焊缝气孔的产生。

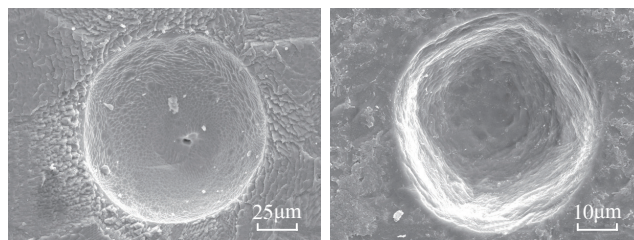


图3 2mm厚的TiNi形状记忆合金YAG激光焊缝与氧化膜相关氢气孔特征

Fig.3 Weld hydrogen porosity formed from oxide film TiNi shape memory alloy with 2mm thickness

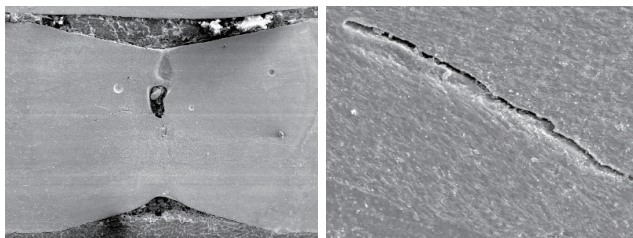
### (2) 焊缝裂纹。

许多研究认为, TiNi 形状记忆合金由于组织脆性易于产生焊接裂纹,但试验结果表明,在所研究条件下, 2mm 厚 TiNi 合金采用 YAG 激光连续焊接时裂纹倾向性低,没有发现焊接裂纹。但 TiNi 合金填充稀土进行激光焊接时,焊缝产生了裂纹,以焊缝横向裂纹为主。通过焊缝截面金相扫描电镜进一步观察发现,裂纹主要分为焊缝中心线开裂的裂纹和沿柱状晶开裂的晶间裂

纹 2 种。对于添加稀土的激光焊接焊缝,由于稀土质点析出产生应力集中,而 TiNi 形状记忆合金属于金属间化合物,焊缝本身具有较大的脆性,从而易于导致裂纹产生。

图 4 (a) 为焊缝中心线的裂纹。通常,熔化焊缝组织结晶的主轴方向总是与散热最快的方向或者说与最大温度梯度方向一致,熔池的最大散热方向垂直于结晶等温面。因此,焊缝柱状晶的生长方向总是垂直于结晶等温面。在焊接速度较低时,焊接熔池近似为椭球形,结晶组织以弯曲形状向焊缝中心成长。在高速焊接时,熔池变窄变长,晶粒主轴生长方向近似与焊缝中心线垂直。当晶粒主轴垂直于焊缝中心时,在焊缝中心形成脆弱的结合面,在横向收缩拉伸应力作用下就形成了沿焊缝中心线开裂的纵向长裂纹。由于激光焊接的速度较快,加之添加的稀土含有较多的脆性相,而焊缝中心是最后凝固部位,使得稀土质点往往在焊缝中心析出,引起焊缝中心开裂,产生孔洞,在焊接过程的应力作用下很容易形成沿焊缝中心线的裂纹。因此,控制焊接速度,匹配合理的线能量,降低焊接过程应力,将有利于减少中心线裂纹的产生。

图 4 (b) 为晶间裂纹,当焊接速度提高时,虽然焊缝组织得到细化,但另一方面快速冷却也有利于柱状晶的快速生长,从而得到方向性极强的小的柱状组织。那些具有相同散热条件的细小的柱状晶沿相同的方向生长,而形成一个一个的柱状晶集团,这种结晶形式称为“束状晶”,在束状晶之间的界面上形成有利于裂纹产生的条件。对于添加稀土的激光焊接焊缝,稀土质点析出也会出现在柱状晶晶界,由于稀土质点析出产生应力集中,而 TiNi 形状记忆合金属于金属间化合物,焊缝本身具有较大的脆性,从而易于导致裂纹产生。又由于记忆合金焊缝的脆性,裂纹由焊缝中心产生,沿柱状晶晶界向熔合线方向扩展,一般扩展至熔合线附近停止,可见,记忆合金添加稀土激光焊接的关键是控制裂纹的形成,这在很大程度上与稀土薄膜的制备质量有关。



(a) 焊缝中心线裂纹 (b) 裂纹沿晶开裂

图4 TiNi形状记忆合金添加稀土激光焊接裂纹

Fig.4 Weld crack of laser welding with filling rare-earth sheet for TiNi shape memory alloy

### 3 结论

(1) TiNi 记忆合金焊缝中气孔的形成与焊接过程中合金表面氧化膜有关,因此在焊接前对焊接区域的金属表面进行清洗去除氧化膜,可减少焊缝中气孔的生成。

(2) TiNi 记忆合金激光焊接裂纹倾向性小,然而现有研究条件下添加稀土的激光焊接的焊缝易于产生气孔与裂纹。从对焊缝裂纹产生的机理分析来看,激光焊接 TiNi 记忆合金时,激光焊接速度提高会增加裂纹产生的倾向,因此焊接速度是焊缝中心线裂纹和晶间裂纹产生的原因之一。

### 参考文献

- [1] Tuissi A, Besseghini S. Effect of Nd-YAG laser welding on the functional properties of the Ni - 49.6at.%Ti. Materials Science and Engineering, 1999(A273-275):813-817.
- [2] Keisuk U, Masaya T, Kojiro F K. Fourth international symposium on laser precision micro fabrication. Proceedings of SPIE ,2003,5063:282-287.
- [3] Tuiss A, Besseghini S, Ranucci T, et al. Effect of Nd-YAG laser welding on the functional properties of the Ni-49. 6at. %Ti. Materials Science and Engineering:A,1999, 273-275:813-817.
- [4] Falvo A, Furguiele F M , Maletta C. Laser welding of a NiTi alloy:Mechanical and shape memory behavior. Materials Science and Engineering: A ,2005, 412:235-240.
- [5] 王蔚. 预置填充稀土激光焊接对 TiNi 形状记忆合金微观组织及成分的影响. 稀有金属材料与工程, 2008,37(11):1941-1945.
- [6] 陈俐. 航空钛合金激光全熔透稳定性及焊接物理冶金研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.

(责编 玲犀)

(上接第 97 页)

200: 364-372.

[8] 梁志芳, 史清宇, 康旭. 7A52 铝合金搅拌摩擦焊工艺优化. 焊接学报, 2011, 32 (2):17-20.

[9] 王廷, 朱丹阳, 刘会杰, 等. 7050-T7451 铝合金的搅拌摩擦焊接试验分析. 焊接学报, 2009, 30 (8):109-112.

[10] Higginbotham D. Proven friction stir welding technology brings together reliability and affordability for NASA's space launch system [EB/OL].2012[2014-12-10].Http://www.sciencedaily.com/releases/2012/05/120521153524.html.

[11] Perrett J G. Evaluation of advanced tool material technology for the friction stir welding of 6mm AISI 304L stainless steel. TWI Ltd, Granta Park, Great Abington Cambridge CB21 6AL, United Kingdom. 17244.02/2009/1380.3.

[12] 李颖. 铝合金激光-MIG 复合横向焊接特性分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

(责编 谷雨)