

# 脉冲宽度对超薄 TiNi/不锈钢激光焊 接头 TiNi 侧界面的影响

陈玉华<sup>1</sup>, 孙松伟<sup>1</sup>, 周兴汶<sup>1,2</sup>, 于洋洋<sup>1</sup>

(1. 南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330063)

(2. 北京航空航天大学, 北京 100191)

**摘要:**在厚度为 0.2 mm 的 TiNi 合金/321 不锈钢异种材料激光微焊接时, 预置 Ni 作为填充材料, 获得了 TiNi 合金/Ni/321 不锈钢激光焊接头。研究了激光脉冲宽度对焊接接头 TiNi 侧界面的影响。结果表明, 不同脉冲宽度下, TiNi 合金侧界面区均由宽度不等的 TiNi 共晶层和 TiNi<sub>3</sub> 金属间化合物层组成; 随着脉冲宽度的增加, TiNi 共晶层平均宽度逐渐减小, TiNi<sub>3</sub> 金属间化合物层平均宽度逐渐增加; 界面区显微硬度随脉冲宽度的增加逐渐升高。TiNi 母材熔化量和 Marangoni 流动的改变是影响接头该侧界面区宽度及显微硬度的主要原因。

**关键词:** TiNi 合金; 不锈钢; 激光焊; 界面; 金属间化合物

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)06-1916-05

TiNi 形状记忆合金 (SMA), 具有优异的形状记忆性能和超弹性, 以及高的比强度、抗腐蚀、抗磨损和生物相容性等特点, 在航天航空、原子能、海洋开发、仪器仪表及医疗器械等领域应用前景广阔<sup>[1-3]</sup>。然而, TiNi 合金价格昂贵, 且单一形状记忆合金很难满足不同产品的使用性能要求。将 TiNi 合金与不锈钢连接是降低组件制造成本、扩宽其应用范围的常用手段<sup>[4-8]</sup>。

目前, 各国学者对 TiNi 合金与不锈钢的连接进行了相关研究, 可采用瞬时液相扩散焊、储能焊、激光焊等焊接方法实现 TiNi 合金与不锈钢连接<sup>[3-9]</sup>。其中, 脉冲激光焊具有能量密度高、穿透深、热影响区窄和变形小等优点, 常用于薄板之间的连接<sup>[10-12]</sup>。然而, 由于 TiNi 合金与不锈钢热物理性能的巨大差异及脆性金属间化合物的生成, 两种材料的激光对接极易产生裂纹<sup>[7,8]</sup>。为了抑制接头裂纹, 添加填充材料(如 Co、Cu、Ni 等<sup>[4-8]</sup>)是实现两者间连接的常用方法。其中 Ni 作为填充材料最为广泛。Li<sup>[7]</sup>采用激光焊通过添加 Ni 箔的方式进行了 TiNi 合金丝与不锈钢丝的连接, 结果表明, 填充材料 Ni 箔对焊缝中 Fe、Ti 起稀释作用, TiCr<sub>2</sub>、TiFe<sub>2</sub> 等金属间化合物明显减少, 接头强度显著提高, 可达到 372 MPa。TiNi 合金/Ni/不锈钢激光焊接时, 加热和冷却时间很快, 填充金属 Ni 与两侧母

材金属来不及混合和扩散, 而形成成分浓度梯度高的 TiNi 合金侧界面区和不锈钢侧界面区。且在拉伸试验中, 断裂多发生在 TiNi 合金侧的界面区, 此处为焊接接头的薄弱区<sup>[7]</sup>。然而, 对 TiNi 合金/Ni/不锈钢激光焊接接头界面相关研究较少。

本实验采用 Ni 丝为填充材料完成厚度为 0.2 mm 的 TiNi 合金/321 不锈钢异种材料激光微焊接。研究激光脉冲宽度的改变对 TiNi 侧界面组织的影响。为提高 TiNi 合金与不锈钢接头质量提供理论参考。

## 1 实验

本实验被焊材料为 0.2 mm 厚的热轧态 Ti-49.4 at% Ni 形状记忆合金 (简称 TiNi 合金) 和 321 不锈钢薄板。采用线切割将被焊材料加工成尺寸为 25 mm×20 mm 的待焊试样。填充材料选用直径 0.3 mm 的纯 Ni (99 at%) 丝。焊前采用砂纸去除被焊材料及填充材料表面的氧化层, 随后用丙酮清洗去除表面油污。焊材及填充材料的化学成分列于表 1, 其物理性能如表 2 所示。

本实验所用激光焊接设备为 Sisma 公司生产的 SL80 型 Nd:YAG 激光焊接系统, 激光平均功率为 80 W。焊接过程采用玻璃保护罩整体氩气保护, 保护气

收稿日期: 2018-06-02

基金项目: 国家自然科学基金 (51565040); 江西省教育厅科技落地计划 (科学前沿) 项目 (KJLD14055); 江西省科技计划项目 (20151BBE50034, 20133BBE50021)

作者简介: 陈玉华, 男, 1979 年生, 博士, 教授, 南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330063, 电话: 0791-83863023, E-mail: ch.yu.hu@163.com

表 1 实验材料的化学成分

| Material | Ti    | Ni    | C    | Cr    | Mn | Si  | P    | S    | Fe   |
|----------|-------|-------|------|-------|----|-----|------|------|------|
| TiNi     | 44.34 | 55.66 | -    | -     | -  | -   | -    | -    | -    |
| SS321    | 0.54  | 9.72  | 0.08 | 18.07 | 2  | 1.0 | 0.04 | 0.05 | Bal. |
| Ni       | -     | 100   | -    | -     | -  | -   | -    | -    | -    |

表 2 实验材料的物理性能

| Material | Density/<br>$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | Melting<br>point/ $^{\circ}\text{C}$ | Linear<br>expansion<br>rate/ $\times 10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ | Thermal<br>conductivity/<br>$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$ |
|----------|---|--------------------------------------|---|---|
| TiNi     | 6.5                                       | 1310                                 | 10  | 12.85   |
| SS321    | 7.9                                       | 1440                                 | 17  | 15.21   |
| Ni       | 8.9                                       | 1453                                 | 13  | 90.70   |

体流量为 10 L/min, 焊前自保护罩下侧通入 Ar 气 2 min 以避免杂质气体的污染, 焊接过程中激光作用于填充材料中部, 采用表面聚焦。焊接方法如图 1 所示。根据前期实验结果, 选取激光功率为 17.6 W、脉冲频率为 4.5 Hz、焊接速度为 0.3 mm/s, 以及脉冲宽度分别为 5.1、6.2、7.3 ms 的 3 组工艺参数进行实验, 实验所用工艺参数如表 3 所示。

焊后截取焊缝横截面并制备金相试样, 采用体积

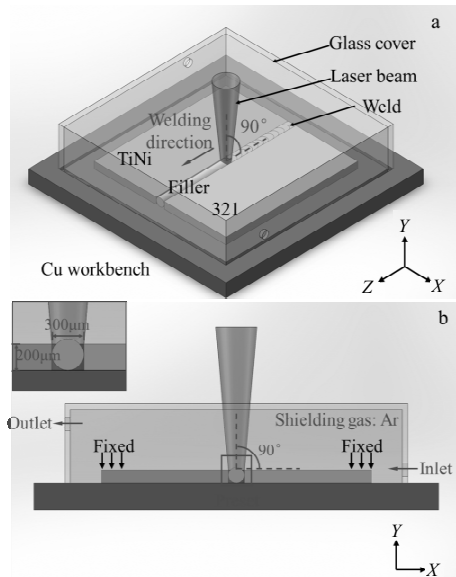


图 1 焊接方法示意图

Fig.1 Schematic of laser welding method

表 3 焊接工艺参数

| Laser power, $P/\text{W}$ | Frequency, $f/\text{Hz}$ | Welding speed, $v/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ | Pulse width, $t/\text{ms}$ |
|---------------------------|--------------------------|--|----------------------------|
| 17.6                      | 4.5                      | 0.3  | 5.1, 6.2, 7.3              |

比为 HF:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O=1:4:5 的腐蚀剂腐蚀焊缝及部分母材, 采用 MR5000 倒置金相显微镜观察焊缝横截面形貌和微观组织结构。采用 NOVA NANOSEM 450 型场发射扫描电镜及其附带的 OXFORD X-Max 型能谱仪分析接头界面处组织。采用 QnessQ10 全自动维氏硬度计测量焊接接头显微硬度分布, 测试标距为 0.05 mm, 加载力为 1.96 N, 加载时间 10 s。

## 2 实验结果

### 2.1 脉冲宽度对焊接接头横截面的影响

在所择工艺区间内, 不同脉冲宽度均可得到无明显缺陷的接头。图 2 所示为不同脉冲宽度下接头的横截面宏观形貌。接头自左向右均可划分为 TiNi 合金母材、焊缝、321 不锈钢母材。从中可以看出, 随着脉冲宽度的增加, 焊缝逐渐从“酒杯状”变成“碗状”。这是因为脉冲宽度较小时, 运动熔池上部分对流传热起主要作用, 下部分扩散传热起主要作用, 并且由于板材很薄且底部与金属夹具接触, 使得下部分母材散热较上部分母材快得多, 造成了上部分母材吸收热量快释放热量慢, 下部分母材吸收热量慢释放热量快的现象, 从而使得上部分母材熔化量多下部分母材熔化量少, 形成“酒杯状”焊缝形貌。然而, 随着脉冲宽度增加, 热作用时间增加, 使得熔池内热量传递更加均匀充分, 热量能够更快传递到下部分母材, 从而下半部分母材熔化加快, 形成“碗状”焊缝形貌。焊缝中可以观察到明显的“洋葱环”, 这是由于激光焊接过程中快速升温及冷却, 以及强对流作用造成的。且焊缝与两侧母材均由明显的熔合线分隔, 可以发现两侧熔合线近焊缝侧都存在界面区。如前文所述, TiNi 合金侧界面为接头的薄弱区, 因此下面重点分析 TiNi 合金侧界面微观组织。

### 2.2 TiNi 侧界面的显微组织

图 3 所示为图 2 中脉冲宽度分别为 5.1、6.2、7.3 ms 时 TiNi 侧界面处 A 区域的 SEM 形貌。从中可以看出, 不同脉冲宽度下, 接头 TiNi 侧界面的微观组织相似。根据组织形貌和成分可将界面区分为图 3 所示的 2 个区域。图 3c 中不同区域相应的成分如表 4 所示。

基于图 3 和表 4 对 TiNi 合金侧界面微观组织及成分的分析, 以及 Ti-Ni 二元合金相图和以往对 TiNi 合金焊接形成的金属间化合物的研究<sup>[7,13]</sup>, 可以推断出区域 1 为 TiNi 共晶组织, 其形成原因是 TiNi 合金母材与熔池金属熔点差异, 形成“沙滩状”宏观偏析<sup>[14]</sup>造成的。区域 2 中包括 TiNi<sub>3</sub>+TiNi 的共晶组织, 以及 TiNi<sub>3</sub> 金属间化合物。可以看出, 区域 2 中以 TiNi<sub>3</sub> 金属间化合物为主要组织, 因此把区域 2 称为 TiNi<sub>3</sub> 金

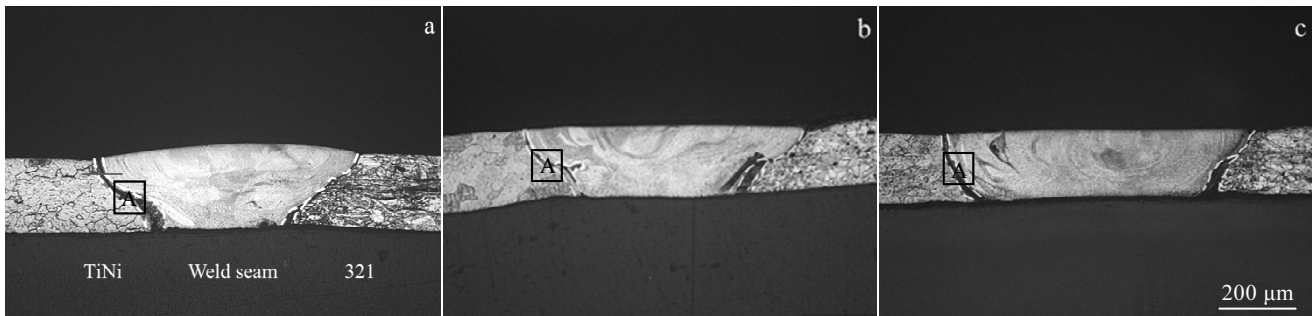


图 2 不同脉宽下接头宏观形貌

Fig.2 Macroscopic morphologies of joints under different pulse widths: (a)  $t=5.1$  ms, (b)  $t=6.2$  ms, and (c)  $t=7.3$  ms

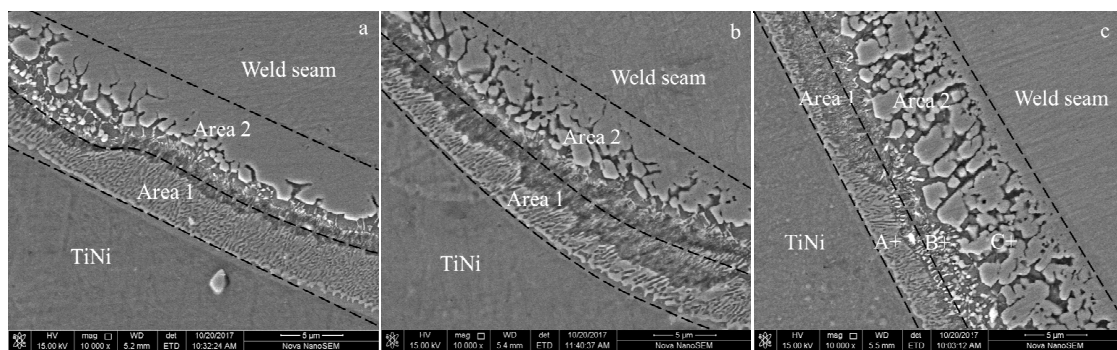


图 3 图 2 中不同脉宽下 A 区 SEM 形貌

Fig.3 SEM morphologies of A area in Fig.2 under different pulse widths: (a)  $t=5.1$  ms, (b)  $t=6.2$  ms, and (c)  $t=7.3$  ms

表 4 图 3c 中不同点相应成分

| Point | Ti    | Ni    | Fe    | Cr   |
|-------|-------|-------|-------|------|
| A     | 47.92 | 50.81 | 1.27  | -    |
| B     | 37.38 | 58.79 | 3.83  | -    |
| C     | 22.22 | 63.62 | 12.22 | 1.94 |

属间化合物区。区域 1 中全为 TiNi 共晶组织，因此把区域 1 称之为 TiNi 共晶体区。

脉冲宽度的变化没有改变 TiNi 侧界面的微观组织，然而各区域的宽度却随着脉冲宽度的变化而改变。图 4 所示为不同脉冲宽度下 TiNi 合金侧 TiNi 共晶体区、TiNi<sub>3</sub> 金属间化合物区以及总界面的平均宽度。可以看出，随着脉冲宽度的增加，TiNi<sub>3</sub> 金属间化合物区以及总界面的平均宽度不断增加，而 TiNi 共晶体区平均宽度不断减小。当脉冲宽度为 7.3 ms 时，界面区中 TiNi 共晶体区平均宽度仅为 4.27 μm，TiNi<sub>3</sub> 金属间化合物区平均宽度达到 21.08 μm。

### 2.3 脉冲宽度对接头显微硬度的影响

图 5 所示为脉冲宽度分别为 5.1、6.2、7.3 ms 时，

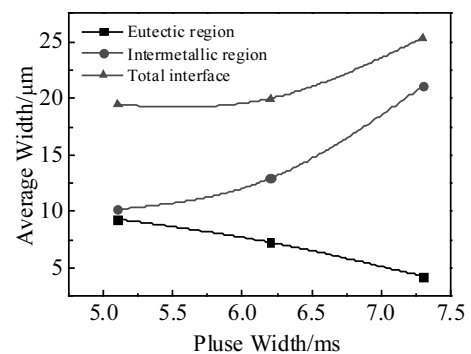


图 4 不同脉宽下各区域平均宽度

Fig.4 Average width of each area under different pulse widths

TiNi 侧界面的显微硬度分布图。可以看出，3 个不同脉冲宽度下接头的 TiNi 侧显微硬度值变化趋势相同，界面区显微硬度明显高于母材和熔池的显微硬度。当脉冲宽度为 7.3 ms 时，接头显微硬度最高达到 7.48 GPa，大于脉冲宽度为 5.1 和 6.2 ms 时接头最高显微硬度。脉冲宽度为 6.2 和 5.1 ms 时，其界面处最高显

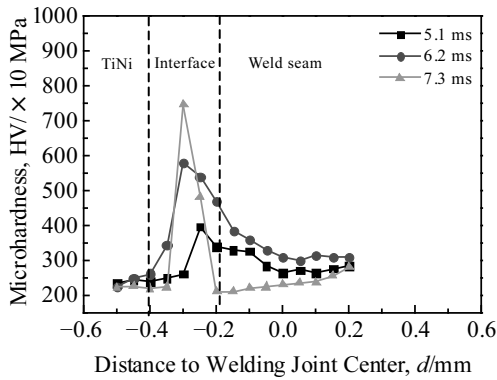


图 5 不同脉宽下 TiNi 合金侧界面显微硬度分布  
Fig.5 Microhardness distribution of TiNi alloy side interface under different pulse widths

微硬度分别为 5.82 和 3.97 GPa。

### 3 讨论

综上所述，脉冲宽度的改变对 TiNi 侧界面有重要影响，而 TiNi 侧界面的组织分布主要与该界面处的元素分布有关。图 6 所示为脉冲宽度为 5.1 ms 时 TiNi 侧界面的 EDS 线扫描结果，扫描位置如图 2a 中红线位置所示。从图 6 可以看出，在 TiNi 侧界面处主要元素为 Ti、Ni、Fe、Cr，且各元素含量在界面处都发生变化，其中 Ti 元素分布变化较大，而 Ni、Fe、Cr 等元素在界面处的变化较小。界面区中 Ti 元素含量低于母材中 Ti 含量，这是由于熔池金属在 Marangoni 流动作用下稀释界面区中 Ti 元素造成的，因此 TiNi 侧界面组织分布主要与熔池中 Marangoni 流动有关。且熔化的 TiNi 母材是熔池中 Ti 元素的唯一来源，因此 TiNi 侧界面组织分布也与母材熔化量有关。

TiNi 侧界面组织分布与母材熔化量有关，而脉冲

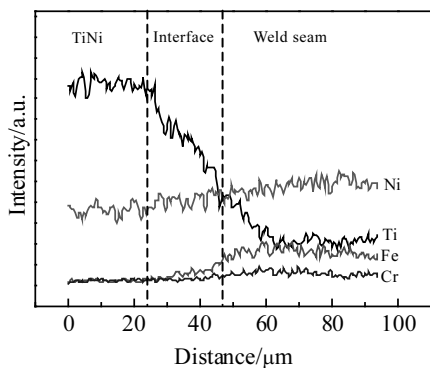


图 6 脉冲宽度为 5.1 ms 时 TiNi 侧界面 EDS 线扫描  
Fig.6 EDS line scan of TiNi side interface under pulse width of 5.1 ms

宽度会影响母材熔化量，进而影响到界面区中 Ti 元素含量。脉冲宽度的改变主要影响热输入大小以及热作用时间的长短，通过单脉冲能量密度  $E_t$  来表征热输入大小，热作用时间则通过占空比  $D_c$  来表征，如式 (1) 式 (2) 所示：

$$E_t = \frac{E}{vt} \tag{1}$$

$$D_c = tf \tag{2}$$

式中， $E_t$  为单脉冲能量密度； $v$  为焊接速度； $t$  为脉冲宽度； $f$  为脉冲频率。由以上两公式可以看出：在单脉冲能量  $E$ 、焊接速度  $v$  不变的条件下，脉冲宽度  $t$  增加使得单脉冲能量密度  $E_t$  减小，意味着热输入减少，导致母材熔化量减少；在脉冲频率  $f$  不变的条件下，脉冲宽度  $t$  增加使得占空比  $D_c$  变大，意味着激光作用在材料的时间增加，非激光作用时间减少，即热作用时间增加且冷却时间缩短，使母材的熔化量增加。母材熔化量由热输入与热作用时间共同决定，然而在较长脉冲宽度的条件下，即使此时热输入较小，但由于此时焊缝热积累时间较长，使得母材熔化量随着脉冲宽度的增加而增大。

TiNi 侧母材熔化量增加，使得更多熔化母材中的 Ti 元素进入熔池，进而对界面处组织的形成分布产生主要影响。当脉冲宽度增加时，向熔池中扩散的 Ti 元素增加，与熔池中大量的 Ni 元素反应生成  $TiNi_3$  金属间化合物，一方面使得  $TiNi_3$  金属间化合物层平均宽度增加，继而使得 TiNi 侧界面显微硬度升高，另一方面使得界面总宽度增加。

不同于 TiNi 金属间化合物，TiNi 共晶体随着脉冲宽度的增加而减小。这是因为随着脉冲宽度增加，从而减少了 TiNi 侧界面中宏观偏析造成的。脉冲宽度增加即热作用时间增加，对熔池中的 Marangoni 对流起重要作用。Marangoni 对流效应可通过 Marangoni 数 ( $M_a$ ) 表示<sup>[15]</sup>，如式 (3) 所示：

$$M_a = \frac{\left| \frac{\partial \gamma}{\partial T} \left( \frac{\Delta T}{L} \right) L^2 \right|}{K \mu \alpha} \tag{3}$$

式中： $\frac{\partial \gamma}{\partial T}$  为表面张力温度系数； $\frac{\Delta T}{L}$  为熔池表面温度梯度； $L$  为熔池半径； $\mu$  为动力粘度； $\alpha$  为热扩散系数； $K$  为常数。从上式看出，当脉冲宽度增加即热作用时间增加时，温度梯度持续时间增长，强化了 Marangoni 对流。熔池中 Marangoni 对流的强化，意味着焊缝中元素分布更加均匀，对于 TiNi 侧界面区来说，意味着 TiNi 母材与 TiNi 侧熔池金属成分差异减小，两者的熔点更加接近，从而减弱了该处的宏观偏析<sup>[13]</sup>，因此 TiNi 侧界面中 TiNi 共晶体减少，TiNi 共晶体层平均宽度减小。

## 4 结 论

1) 在所择工艺条件下均可得到无缺陷的 0.2 mm 厚度的 TiNi 合金/321 不锈钢异种材料激光微焊接头。不同脉冲宽度下, 接头中焊缝近 TiNi 合金侧均可观察到明显的界面区。界面区由宽度不等的 TiNi 共晶体层和 TiNi<sub>3</sub> 金属间化合物层组成。

2) 随着脉冲宽度的增加, TiNi 合金侧界面平均宽度逐渐增加。其中, TiNi 共晶体区平均宽度逐渐减小, TiNi<sub>3</sub> 金属间化合物区平均宽度逐渐增大。界面区显微硬度值随着脉冲宽度的增加而逐渐升高。

3) 脉冲宽度的增加一方面导致母材熔化量增加, 使得 TiNi 侧界面区中 Ti 元素含量增加, 从而造成该侧 TiNi<sub>3</sub> 金属间化合物层宽度增加; 另一方面使得 Marangoni 对流持续时间增加, 减少了该处宏观偏析, 从而造成 TiNi 共晶体层宽度减小。界面区中 TiNi<sub>3</sub> 金属间化合物的增加是导致该处显微硬度升高的主要原因。

### 参考文献 References

- [1] Chen Yuhua(陈玉华), Gong Weihuai(龚伟怀), Ni Quan(倪 泉) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(11): 2026
- [2] Wang Wei(王 蔚), Chen Li(陈 俐), Zhao Xingke(赵兴科) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(10): 1819
- [3] He Peng(何 鹏), Li Haixin(李海新), Lin Tiesong(林铁松) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(11): 2248
- [4] Chen Yuhua(陈玉华), Ge Junwei(戈军委), Liu Fencheng(刘奋成) *et al. Optics and Precision Engineering*(光学精密工程)[J], 2014, 22(8): 2075
- [5] Wang Yingling(汪应玲), Li Hong(李 红), Li Zhuoxin(栗卓新) *et al. Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2008(9): 48
- [6] Li Minggao(李明高), Qiu Xiaoming(邱小明), Sun Daqian(孙大千) *et al. Light Metals*(轻金属)[J], 2005, 25(1): 57
- [7] Li H M, Sun D Q, Cai X L *et al. Materials & Design*[J], 2012, 39(1): 285
- [8] Li H M, Sun D Q, Cai X L *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2013, 45: 453
- [9] Zhou Xingwen, Chen Yuhua, Huang Yongde *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2018, 735: 2616
- [10] Cao X, Jahazi M, Immarigeon J P *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2006, 171(2): 188
- [11] Sun Z, Ion J C. *Journal of Materials Science*[J], 1995, 30(17): 4205
- [12] Rizwan U H S, Wei J, Wen J X *et al. Advanced Materials Research*[J], 2013, 628: 183
- [13] Fukumoto S, Inoue T, Mizuno S *et al. Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2010, 15(2): 124
- [14] Soysal T, Kou S, Tat D *et al. Acta Materialia*[J], 2016, 110: 149
- [15] Limmaneevichitr C, Kou S. *Welding Journal*[J], 2000, 79(11): 126

## Effect of Pulse Width on TiNi Side Interface of Laser Welded Joint of TiNi/Stainless Steel

Chen Yuhua<sup>1</sup>, Sun Songwei<sup>1</sup>, Zhou Xingwen<sup>1,2</sup>, Yu Yangyang<sup>1</sup>

(1. National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology,

Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2. Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** TiNi alloy/Ni/321 stainless steel laser welding joint with thickness of 0.2 mm was obtained using Ni as filler material in laser micro-welding. The effect of laser pulse width on the TiNi side interface of the welding joint was studied. The results show that the interface zone of TiNi alloy side under different pulse widths is composed of TiNi eutectic layer and TiNi<sub>3</sub> intermetallic layer with different widths. With the increase of pulse width, the average width of TiNi eutectic layer gradually decreases, the average width of TiNi<sub>3</sub> intermetallic compound layer increases gradually, and the microhardness of interface zone increases. The change of the melting amount of TiNi and the flow of Marangoni are the main reasons that affect the width and microhardness of the interface zone.

**Key words:** TiNi alloy; stainless steel; laser weld; interface; intermetallic compound

Corresponding author: Chen Yuhua, Ph. D., Professor, National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, Tel: 0086-791-83863023, E-mail: ch.yu.hu@163.com