

# TiNi 合金/纯镍/不锈钢激光微焊接熔化区的 微观组织

陈玉华 龚伟怀 戈军委 余 亮 柯黎明 刘奋成

(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)

**摘要** 以纯镍丝为填充材料,采用精密脉冲激光实现了厚度为 0.2 mm 的 TiNi 形状记忆合金/不锈钢异种材料的焊接,研究了熔化区(焊缝和熔合区)的组织形貌和微观结构。结果表明,焊缝中心晶粒呈外延连续生长的特征。连续生长的枝晶可以跨越 3~5 个脉冲激光形成的鱼鳞纹,长度可以达到约 200  $\mu\text{m}$ 。焊缝与两侧母材的熔合区呈现完全不同的形貌,在不锈钢母材与焊缝的接合界面,枝晶沿着不锈钢母材的熔合线生长,在枝晶间有二次晶轴;在 TiNi 合金与焊缝的熔合区,有一层宽度约为 5  $\mu\text{m}$  的过渡层将焊缝与母材隔开。

**关键词** 激光技术;激光焊接;焊缝;熔合区;微观组织

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s103004

## Microstructure of Welding Seam and Fusion Area in the Joint of TiNi/Pure Nickel/Stainless Steel by Laser Welding

Chen Yuhua Gong Weihuai Ge Junwei Yu Liang Ke Liming Liu Fencheng

(National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology,  
Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China)

**Abstract** Pure nickel wire is added into the butt joint of 0.2 mm thick TiNi alloy/stainless steel, and they are welded by pulsed laser. The morphological image and the interface microstructures of the fusion area are investigated. The results show that the characteristics of the welded joint center is extension of the continuous growth grain. The length of the fern-leaf crystal can reach about 200  $\mu\text{m}$  which may span several fish-scales lines formed by pulsed laser. The morphological image of welded joint with both sides of base material fusion is completely different. In the joint interface of stainless steel base material, the branch crystal grows along fusion line of stainless steel base material, and there have second crystal axis between the branch crystals. In the fusion area between TiNi alloy and welded joint, there is a transition layer between TiNi alloy and welded joint, whose width is about 5  $\mu\text{m}$ .

**Key words** laser technique; laser welding; welded joint; fusion area; microstructure

**OCIS codes** 140.3390; 140.3538; 140.0140

## 1 引 言

TiNi 形状记忆合金是一种新型的功能材料,具有优异的形状记忆效应和超弹性,加之高的比强度、抗腐蚀、抗磨损和生物相容性等特点,在航空航天、原子能、海洋开发、仪器仪表以及医疗器械等领域有着广阔的应用前景<sup>[1~4]</sup>。随着 TiNi 形状记忆合金的进一步研究及其在各领域的推广应用,其高昂的

使用成本也随着突显出来,TiNi 形状记忆合金因其昂贵的价格在一定程度上限制了其开启低成本应用市场。在实际应用中,为降低使用成本,TiNi 形状记忆合金往往需要与其他材料进行连接。特别是在医疗器械、微电子以及航空航天方面,由于材料的应用形态多为薄片状或细丝状,而且因为生产成本或应用上的要求,常常要与不锈钢等材料连接。但

收稿日期: 2012-01-12; 收到修改稿日期: 2012-03-13

基金项目: 江西省自然科学基金(2007GQC1513)和航空科技重点实验室开放基金(Zk201001001)资助课题。

作者简介: 陈玉华(1979—),男,副教授,主要从事先进材料连接、材料连接新工艺和新方法等方面的研究。

E-mail: ch.yu.hu@163.com

TiNi 形状记忆合金与不锈钢连接时,因为不锈钢与 TiNi 合金相差较大的热膨胀系数、接头易生成 TiFe 和 TiNi<sub>2</sub> 等脆性化合物而严重影响接头性能,甚至出现裂纹<sup>[5~7]</sup>。采用添加焊缝中间层的方法可以有效地解决两种母材热膨胀系数不同引起的内应力,控制焊缝裂纹产生<sup>[8,9]</sup>。

本文采用激光微焊接方法连接超薄片状(厚度为 0.2 mm)TiNi 形状记忆合金和不锈钢,焊接过程中采用直径为 0.3 mm 的纯镍丝作为中间层进行填

表 1 母材主要化学成分(质量分数,%)

Table 1 Main chemical composition of base metal (mass fraction, %)

Base metal	Ti	Ni	Fe	C	Cr	Mn	Si	P	S
TiNi	44.34	55.66	—	—	—	—	—	—	—
321	0.54	9.72	residual	0.08	18.07	2	1.0	0.035	0.03

实验设备为意大利 Sisma 公司生产的 SL-80 型平均功率为 80 W 的 Nd:YAG 激光焊接系统及其附属设备。根据前期试验结果,选择的焊接工艺参数为:激光功率为 12 W,脉冲宽度为 4.0 ms,脉冲频率为 6 Hz,脉冲能量为 4.0 J,光斑直径为 0.3 mm,焊接速度为 0.3 mm/s。因为试样表面有一层较厚的氧化层,焊前将试样放入硝酸、氢氟酸和水的混合溶液中酸洗,除去表面氧化层后再用砂纸打磨。经过前期处理后,TiNi 合金薄片的厚度由原先的 0.3 mm 减小到 0.2 mm。为了保证装配精度,试样在焊前用砂纸仔细打磨使焊接端面平直、光整、清洁无倒角和毛刺。在施焊前,用丙酮、无水酒精等溶液去除工件坡口及其两侧的手印、灰尘、有机物质及表面的油污等,然后用吹风机吹干。焊接过程采用自制专用夹具将被焊试样两端固定在激光焊接工作台上,对接试板预留 0.2 mm 接头间隙,用直径 0.3 mm 的纯镍丝进行填丝焊接,采用氩气对双面焊缝进行保护。

焊后采用垂直及平行焊接方向截取接头横截面

丝焊,对异种材料焊接区的组织形貌、熔合区界面的微观结构进行研究。

## 2 实验条件及方法

本实验选用的 TiNi 合金为 0.3 mm 厚冷轧态薄片,其主要化学成分如表 1 所示。不锈钢材料为 0.2 mm 厚 321(1Gr18Ni9Ti)。两种材料都用线切割加工成尺寸为 25 mm×20 mm 的待焊试样。

金相试样,在 Olympus-PMG3 型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;用 Quanta2000 型扫描电镜(SEM)观察焊缝微观界面组织形貌;结合焊缝形貌、金相组织结果分析 TiNi 合金-不锈钢薄片接头的组织及界面微观结构。

## 3 结果与分析

### 3.1 焊缝上表面金相组织

图 1 为焊缝上表面俯视形貌,其中图 1(a)为焊缝整体形貌,可以看到脉冲激光的圆弧形层状纹路;图 1(b)为焊缝中央的局部放大,在图片中央,可以看见有一簇细长外延连续生长的枝晶,其长度约为 200 μm,从圆弧形脉冲激光焊间歇性加热形成的鱼鳞状纹路来看,此外延连续组织横跨了 5,6 个鱼鳞纹,一个鱼鳞纹即为一个脉冲激光所留下,说明此簇枝晶由几个光斑的连续加热所凝固成,即在焊接过程中,前一个光斑形成的熔池凝固所生成的枝晶在后一个光斑加热冷却中继续生长,如此反复循环,使枝晶不断生长。除了此簇有明显方向性的晶粒

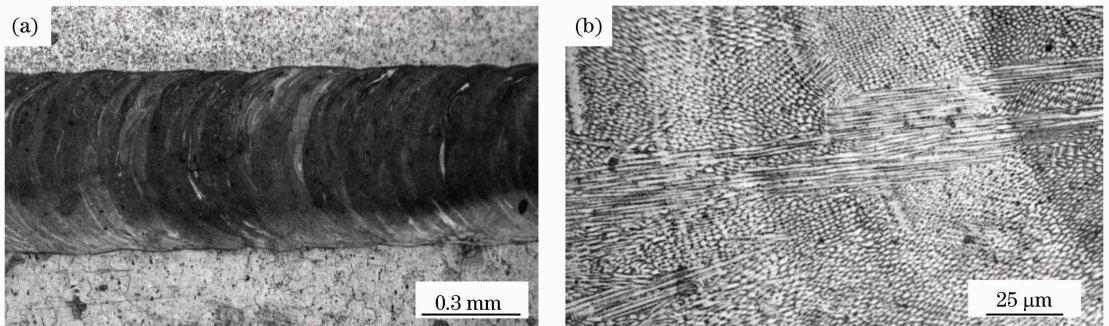


图 1 焊缝上表面腐蚀金相形貌。(a)整体;(b)局部

Fig. 1 Metallographic morphological image of the welding center. (a) Entirety; (b) part

外,其余位置晶粒看似细小的等轴晶,分析认为也都是簇状分布的枝晶,因枝晶生长方向垂直于观察面,因而在金相图片看看似细小的等轴晶。

外延连续生长的枝晶组织是在激光焊接中的一个显著特征,外延连续生长的枝晶沿着焊接方向生长。因为在熔池的凝固过程中,液态金属与前端固相母材始终保持接触。对比于熔池中的形核,熔池与母材界面处的形核过冷度最低,提供了很好的形核基底,从而导致熔池随后的冷却凝固呈现出外延

柱状生长特点。

图 2 给出了激光焊接过程中焊缝中熔池中的热量扩散和柱状枝晶定向连续外延生长方向示意图。在激光焊接过程中,熔池中的热量主要通过焊缝前端母材或焊缝底部向下扩散,在平行于焊接方向及垂直于熔池平面方向,有较大的过冷度。而熔池中液态金属凝固时,晶粒沿着温度梯度较大的方向择优生长,因此形成了如图 1(b)所示的焊缝晶粒。

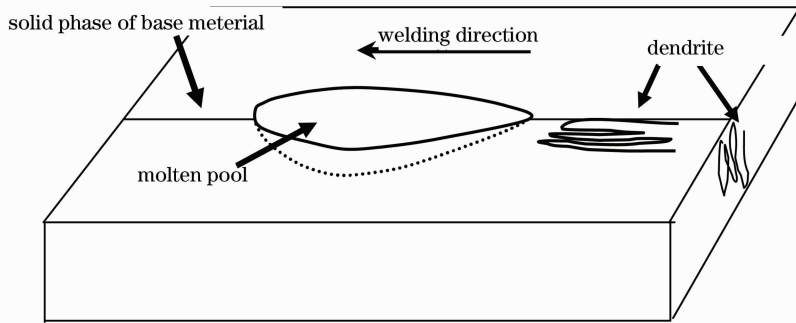


图 2 激光焊接过程中外延连续枝晶生长方向示意图

Fig. 2 Crystal growth direction of continuous extension in the laser welding

### 3.2 焊缝表面熔合区组织及成分分析

图 3(a)为焊接参数最佳、成形较好的焊缝表面震动抛光并带轻微腐蚀的形貌。从图中可以看出,焊缝在偏向 TiNi 合金部分不均匀,即图中黑色虚线方框位置,此处焊缝组织明暗混合极不均匀,说明此部分焊缝在形成熔池后,各合金元素混合紊乱,因为激光焊的快速冷却作用,熔池中的合金元素未来得及均匀化就已经凝固。因此处焊缝组织不均匀,导致了焊缝与 TiNi 合金母材相结合的界面显示出了较低的耐蚀性。且在虚线框内可以看出,焊缝与 TiNi 合金母材交界处,明显有个台阶状形貌, TiNi 合金母材经震动抛光后低于焊缝金属,说明焊缝处的耐磨性高于 TiNi 合金母材。而在不锈钢侧焊缝

与不锈钢母材结合紧密,过渡平缓,明显好于 TiNi 侧界面。

在图 3(a)中虚线方框位置处放大观察,如图 3(b)所示,可以看出,亮色的晶粒组织并没有很好的熔合到暗色的组织中,使此处成分混合不均匀。导致混合不均匀的原因为激光焊接所形成的熔池冷却速度过快,熔化的溶池来不及均匀化就已经凝固,形成了如图所示的白色雪花状晶粒生长在暗灰色的基体中。

以上研究表明,在激光焊即使是最佳工艺参数下 TiNi 合金/不锈钢接头在 TiNi 合金侧仍组织分布不均匀。

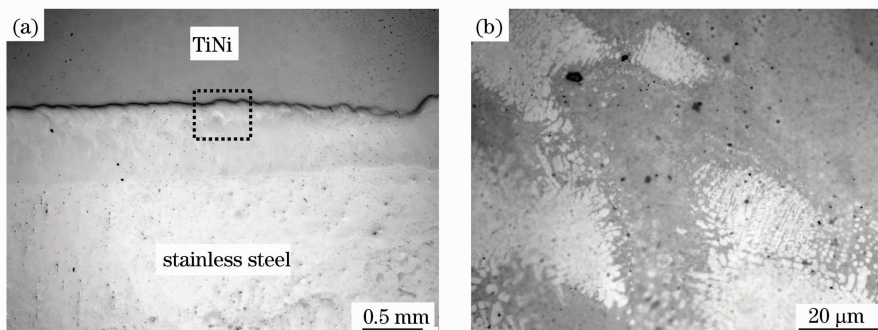


图 3 抛光后焊缝形貌。(a)整体;(b)局部

Fig. 3 Welding morphological image after polishing. (a) Entirety; (b) part



图 4 为抛光后接头横截面在抛光后试样 SEM 下背散射电子像形貌, 图片通过试样不同原子序数有不同衬度成像。图 4 中所显示位置即为图 3(b) 中的雪花状晶粒边界的局部位置。如图 4 所示, 可以把 4 图大体分为如下 4 个区域: 焊缝金属区、过渡结晶区(a 区)、界面过渡层(b 区)、TiNi 合金母材。可以发现: 焊缝金属区晶粒分布较均匀, 结合紧密; 而在过渡结晶区(a 区), 可以看出此处晶粒分布松散, 分布形态也相差较大, 在靠近界面过渡层(b 区) 的位置, 几乎看不见正常形态的晶粒; 在界面过渡层(b 区) 中, 晶粒以紧密结合的方式排列分布, 宽度约为  $5\ \mu\text{m}$ ; 在 TiNi 合金母材区能看见分布有一些孔洞, 应为 TiNi 合金母材前期去除氧化层时化铣所留下的腐蚀坑。

采用能谱仪对富镍焊缝与 TiNi 合金结合界面反应区的成分进行分析, 结果如图 4 所示。从图 4

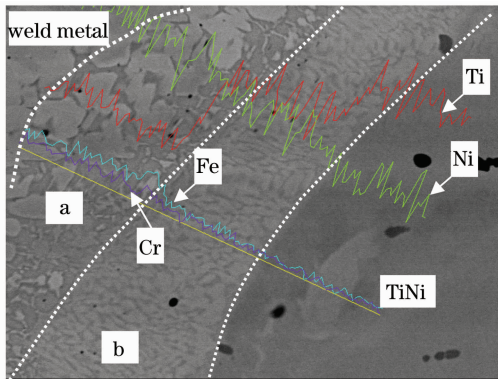


图 4 TiNi 合金侧为焊缝界面试样形貌  
Fig. 4 Morphological image of the welding-seam interface in TiNi alloy

中可以看出, Ni 元素从焊缝到 TiNi 合金母材过渡平缓, 呈缓慢降低的趋势。Ti 元素含量变化较大, 在过渡结晶区(图中 a 区), Ti 含量相对较低, 此处的 Ti 应为 TiNi 合金母材熔化进入焊缝; 从 a 区到 b 区, Ti 含量显著增加, 从 b 区延伸至 TiNi 合金母材, Ti 含量继续上升。Fe、Cr 两元素在过渡结晶区有较少的含量, 并在 a 区与 b 区交界处开始下降, 认为从 b 区开始, 已不存在 Fe、Cr, 所显示的曲线仅为能谱分析中的基值峰。从能谱成分分析结果显示, 在界面过渡层以 Ti、Ni 元素为主, 基本不含 Fe、Cr 等不锈钢中的合金元素, 说明不锈钢中的各合金元素扩散至界面过渡层边缘, 并未进入其内部。

图 5 是焊缝腐蚀后两侧熔合区附近形貌, 可以看出, 图 5(a) 所显示的不锈钢焊缝界面结合紧密, 表现为一条熔合线, 焊缝中晶粒垂直于熔合线生长, 因为焊接形成的熔池过冷度不一样, 使焊缝中晶粒生长情况也不一样, 贴近熔合线附近的一层晶粒因为过冷度大, 使其比往焊缝中央方向的晶粒短小, 排列也更加紧密, 越往焊缝中心延伸, 晶粒越细长粗大。图 5(b) 为 TiNi 合金侧界面, 不同于不锈钢侧熔合界面, 此处界面更容易腐蚀, 试样腐蚀后留下一条约  $2\ \mu\text{m}$  宽的腐蚀沟, 在腐蚀形成的沟状区域, 此处晶粒生长情况较不锈钢侧复杂, 晶粒排列相对较紊乱。可以看到有一层极细小的针状晶粒垂直于焊缝熔合线生长, 排列极紧密, 如图 5(b) 中白色箭头所指的 I 区。沿着熔合线往焊缝方向, 紧贴着 I 区生长的一层晶粒紧密但不具特定的方向性, 即图中黑色箭头所指的 II 区。

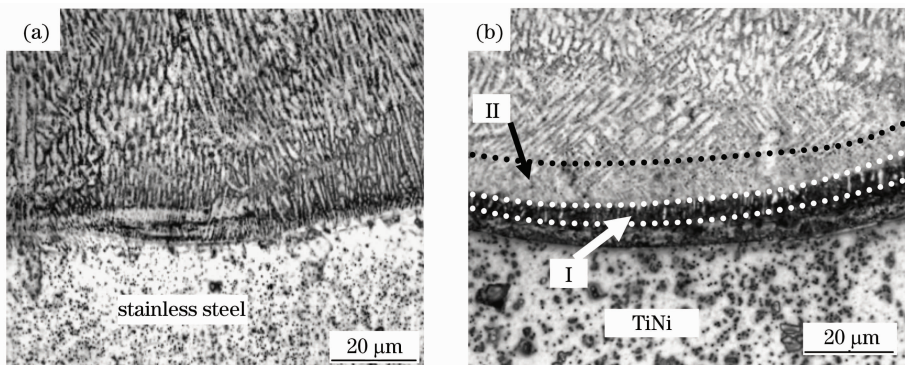


图 5 焊缝两侧界面形貌。(a) 不锈钢侧; (b) TiNi 侧

Fig. 5 Morphological image of both sides in weld interface. (a) Stainless steel side; (b) TiNi side

图 6 是图 5 焊缝形貌的扫描电镜形貌, 图 6(a) 为不锈钢母材与焊缝的接合界面, 可以看出细长的枝晶沿着不锈钢母材的熔合线生长, 在熔合线附近

因温度梯度高, 等温线平行于熔合线分布, 使枝晶主要垂直于焊缝熔合线方向生长。在细长的枝晶中间, 可以看见少量树枝晶的二次晶轴。

从图 6(b)可以看出,在图 5(b)中显示为腐蚀沟的位置为一层致密的过渡带,过渡层晶粒非常细小,镍基焊缝与缓冲带结合处在腐蚀后晶粒颗粒感明显,说明此处晶间耐蚀性比其他地方低,晶界腐蚀掉后使晶粒突出。TiNi 合金母材与焊缝结合紧密无缺陷。而拉伸试样结果显示,所有的拉伸试样均断裂于 TiNi 合金与焊缝的界面处,说明此处界面是焊缝中最薄弱位置。图 6(b)显示致密的过渡层与

TiNi 合金母材结合紧密;而与焊缝的结合处(即图中虚线所处位置),晶粒形貌转变突然,几乎没有过渡的跳跃式转变,且在此位置附近的焊缝晶粒晶间耐蚀性极差,说明此处晶粒的分布较松散,晶间析出物较其他位置多,即图 4 中的过渡结晶区(a 区)。由此认为,整个焊缝接头的薄弱位置应为界面过渡层与焊缝的结合处的过渡结晶区(虚线所处位置)。

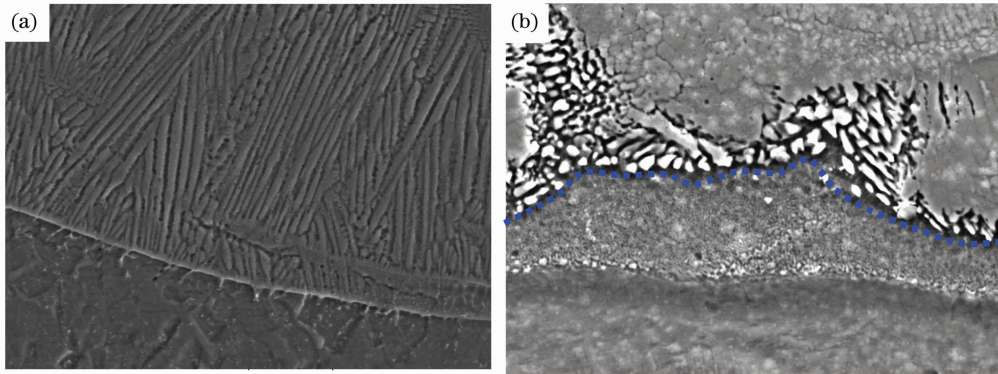


图 6 焊缝熔合界面形貌。(a)不锈钢侧;(b) TiNi 侧

Fig. 6 Morphological image of the fusion seam in weld interface. (a) Stainless steel side; (b) TiNi side

焊缝接头在 TiNi 形状记忆合金侧界面呈现较复杂的形貌,各形貌区域对接头性能的影响规律特征,尚有待进一步的研究探索。

## 4 结 论

本文采用镍丝作为填充材料,采用激光微焊接方法连接 TiNi 形状记忆合金和不锈钢,并对异种材料焊接区的组织形貌、熔合区界面的微观结构进行了研究,得到如下结论:

1) TiNi 形状记忆合金-镍丝-不锈钢激光焊时接头焊缝中心晶粒呈外延连续生长的特征。连续生长的枝晶可以跨越 3~5 个脉冲激光形成的鱼鳞纹,长度可以达到约 200  $\mu\text{m}$ 。

2) 焊缝与两侧母材的熔合区呈现完全不同的形貌。在不锈钢母材与焊缝的接合界面,枝晶沿着不锈钢母材的熔合线生长,在树枝晶间有二次晶轴;在 TiNi 合金与焊缝的熔合区,有一层宽度约为 5  $\mu\text{m}$  的过渡层将焊缝与母材隔开。

## 参 考 文 献

- 1 N. H. Morgan. Medical shape memory alloy applications-the market and its products [J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2004, **378**(1-2): 16~23
- 2 Weihui Gong, Yuhua Chen, Liming Ke. Microstructure and properties of laser micro welded joint of TiNi shape memory alloy [J]. *T. Nonferr. Metal. Soc.*, 2011, **21**(9): 2044~2048

- 3 Zhou Jiubao, Xi Kang. Shape Memory Alloys [M]. Qian Dongfan Transl.. Beijing: China Machin Press, 1992. 160~184
- 舟久保, 熙 康. 形状记忆合金[M]. 千东范译. 北京:机械工业出版社,1992. 160~184
- 4 Geng Fang, Shi Ping, Yang Dazhi. Review on the development of NiTi shape memory alloy as biomaterial [J]. *J. Functional Materials*, 2005, **36**(1): 11~14
- 耿 芳, 石 萍, 杨大智. NiTi 形状记忆合金在生物医用领域的研究进展[J]. *功能材料*, 2005, **36**(1): 11~14
- 5 Li Hongmei, Sun Daqian, HanYaowu. Microstructures and mechanical properties of laser-welded TiNi shape memory alloy and stainless steel wires[J]. *China Welding*, 2010, **19**(3): 1~5
- 6 Casper van der Eijk, Hans Fostervoll, Zuhair K. Sallom *et al.*. Plasma welding of NiTi to NiTi, stainless steel and hastelloy C276 [C]. ASM Materials Solutions 2003 Conference . Pittsburgh, 2003
- 7 Li Hong, Li Zhuoxin, Wang Yingling *et al.*. Transient liquid phase diffusion bonding of TiNi shape memory alloy and stainless steel [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, **40**(8): 1382~1386
- 李 红, 粟卓新, 汪应玲等. TiNi 形状记忆合金与不锈钢的瞬态液相扩散焊[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, **40**(8): 1382~1386
- 8 Chen Yuhua, Gong Weihui, Ni Quan *et al.*. Formation and control measure of the cracks in the laser welded joint between TiNi alloy and stainless steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3168~3171
- 陈玉华, 龚伟怀, 倪 泉. 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
- 9 Chen Yuhua, Gong Weihui, Ni Quan. Microstructure characteristics of laser micro welding joint between TiNi shape memory alloy sheet and stainless steel sheet [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, **40**(11): 2026~2029
- 陈玉华, 龚伟怀, 倪 泉等. 薄片状 TiNi 合金/不锈钢激光微焊接接头组织特征[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, **40**(11): 2026~2029