

文章编号: 0258-7025(2008)02-0291-06

# 激光焊接工艺参数对 NiTi 形状记忆合金 焊缝成形的影响

王 蔚<sup>1,2,3</sup> 陈 俐<sup>2</sup> 赵兴科<sup>1</sup> 黄继华<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083

<sup>2</sup> 北京航空制造工程研究所, 北京 100024; <sup>3</sup> 空军航空大学, 吉林 长春 130022

**摘要** 采用 Nd:YAG 连续激光器对 2 mm 厚 NiTi 形状记忆合金(SMA)进行激光焊接。研究了激光焊接过程中激光功率、焊接速度、离焦量、侧吹保护气流量等主要工艺参数对焊缝成形的影响。结果表明,激光功率、焊接速度、离焦量等工艺参数的合理匹配是实现 NiTi 合金良好焊缝成形的关键因素。线能量为 59~75.6 J/mm 时能获得最佳焊缝成形;离焦量在 -2~3 mm 时均能使厚度 2 mm NiTi 合金试件焊透,其中离焦量在 0~1 mm 可以得到最佳焊缝成形;当侧吹气流量为 15~20 L/min 时,气体保护效果和焊缝成形最好。通过大量工艺实验得到 2 mm 厚 NiTi 合金焊接速度与激光功率的不同匹配对焊缝成形影响的曲线,为 NiTi 合金焊接加工及工程应用提供参考。

**关键词** 激光技术;激光焊接;NiTi 形状记忆合金;焊接工艺参数;焊缝成形

中图分类号 TG 456.7 文献标识码 A

## Effect of Welding Parameters on Formation of Welds during Laser Welding of NiTi Shape Memory Alloy

Wang Wei<sup>1,2,3</sup> Chen Li<sup>2</sup> Zhao Xingke<sup>1</sup> Huang Jihua<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Material Science and Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China

<sup>2</sup> Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China

<sup>3</sup> Aviation University of Air Force, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** Nd:YAG laser was used to weld 2 mm thick tapes of NiTi shape memory alloy (SMA). The effect of main welding parameters including laser power, welding speed, defocusing amount, gas-assisting blowing on weld shaping was investigated. The results show that appropriate matching of main welding parameters is the key of realizing good weld shaping. Linear heat input between 59~75.6 J/mm can acquired optimal formation of welds. The defocusing amount between -2~3 mm can relize full penetration of 2 mm thick tapes of NiTi alloys. The defocusing amount between 0~1 mm can obtain the optimal formation of welds. The protective effectiveness and the weld formation is the best when side-blow shielding gas flow rate is from 15 to 20 L/min. Different matching of laser power and welding speed effecting on different formation of welds were experimentally acquired which supply references to laser welding and engineering application for NiTi alloy.

**Key words** laser technique; laser welding; NiTi shape memory alloy; welding parameters; formation of welds

## 1 引 言

NiTi 形状记忆合金(SMA)是近二、三十年新发展起来的一种新型工程材料,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。TiNi 合金已在空间技术、能源开发、医疗器械、机械器具、电子设

收稿日期:2007-05-21;收到修改稿日期:2007-09-06

基金项目:武器装备重点基金(6104110)和高能束流加工技术国防科技重点实验室基金(51461010304ZS6004)资助项目。

作者简介:王 蔚(1973—),女,吉林人,博士研究生,主要从事记忆合金激光焊接性方面的研究。

E-mail:xiweier@yahoo.com.cn

导师简介:黄继华(1962—),男,江西人,教授,博士生导师,目前主要从事先进材料连接方面的研究。

E-mail:jihuahuang47@sina.com

备、汽车工业及日常生活各方面都得到了广泛的应用。而众多材料的结构件都是由焊接加工成形的,所以焊接加工技术对新材料的推广应用起着极为重要的作用。对于形状记忆合金焊接方法,如等离子束流焊<sup>[1]</sup>、氩弧焊<sup>[2]</sup>、惰性气体保护钨极电弧焊(TIG)<sup>[3]</sup>、扩散焊<sup>[4]</sup>、电阻焊<sup>[5,6]</sup>、激光焊<sup>[7,8]</sup>等在国内外文献中已有所报道。由于激光焊接时激光光束方向性好、能进行精密加工,并具有焊缝热影响区小、焊接变形小等优点<sup>[7]</sup>,通过适当调整激光工艺参数就能够确保重复实现优良的焊缝成形<sup>[8]</sup>。因此激光焊是适合此类材料焊接的较重要的方法之一<sup>[7,8]</sup>。

本文利用 Nd:YAG 连续激光器进行了 2 mm 厚的 NiTi 合金平板单面熔焊实验,着重研究了激光焊接工艺参数的变化对焊缝成形的影响,并对其不同工艺情况下的焊缝横截面进行了观察分析。

## 2 实验条件与方法

### 2.1 实验材料与焊前准备

NiTi 形状记忆合金的原材料由北京有色金属研究院提供,于哈尔滨工业大学炼制。实验所用的 NiTi 为厚度 2 mm 的板,Ti 的原子数分数为 50.9%。由于酸洗等原因,厚度有损耗,冷轧态,经 20 min 450 °C 真空退火后,850 °C 固溶处理 30 min,在氢氟酸、硝酸和水体积比为 1:3:10 的混合液中浸泡,去除表面的氧化膜,最后用丙酮超声波清洗干净,吹干备用。

### 2.2 实验设备及方法

激光焊机采用英国 Gsi Lumonics 公司生产的 AM356 型连续 Nd:YAG 激光器为核心的焊接系统;最大功率 4.5 kW,波长为 1.06  $\mu\text{m}$ ,模式为多模,焦距为 150 mm,焦斑直径为 0.6 mm,配备 ABB 公司制造的 IRB2400/16 型工业机器人,其机械系统部分采用六自由度机械手。激光通过光纤传输并透射聚焦后到达工件,焊接过程以工作台静止,机械手带动激光做相对运动来实现。

实验装置如图 1 所示,焊接过程中采用三路高纯氩气对焊接高温区进行全方位的保护:用特制的焊接夹具固定焊接试件的位置,通过背保护气实现对焊缝背面的保护;特制的气体保护罩固定在机械手上,实现侧吹和垂直向下吹两路保护气,分别对焊接熔池和焊缝正面后端高温区进行保护。

焊接实验采用对 NiTi 合金平板单面熔焊的方式,通过改变激光焊接主要工艺参数(包括激光功

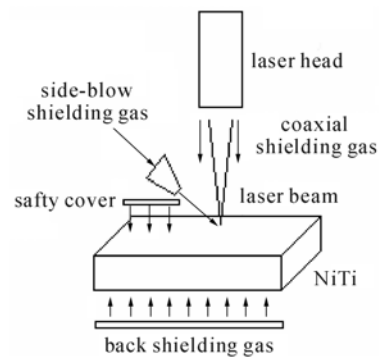


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup (rate, welding speed, defocus and side-blow shielding gas flow) to obtain a series of welds. Selecting specific laser welding process parameters, welds were obtained along the 5 different positions horizontally, measuring the weld depth and width, and taking the average value. Line cutting and sectioning of welds under different process parameters were used to make metallographic samples, which were then polished, ground, polished and corroded to observe the weld cross-section morphology under a low magnification metallographic microscope.

## 3 实验结果与分析

### 3.1 焊缝表面形貌

定义激光功率为  $P$ ,焊接速度为  $v$ ,侧吹保护气流量为  $U_i$ ,离焦量为  $\Delta Z$ ,熔深为  $H_b$ ,激光焊缝正面宽度为  $W_a$ ,焊缝背面宽度为  $W_b$ 。

图 2 为激光焊接而成的焊缝正面与背面形貌。焊缝表面成形美观,焊缝均匀平滑,无明显凹陷,正面、背面没有出现明显余高,无咬边,焊接接头的熔合线非常清晰,焊缝成形较好。

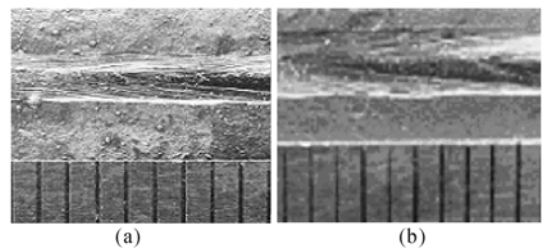


图 2 焊缝正面(a)与背面(b)形貌

Fig. 2 Top (a) and bottom (b) pattern of weld bead ( $\Delta Z = 0 \text{ mm}$ ;  $P = 3.28 \text{ kW}$ ;  $v = 3 \text{ m/min}$ ;  $U_i = 15 \text{ L/min}$ )

### 3.2 激光功率和焊接速度对焊缝成形的影响

由图 3~图 6 可以看出,随着激光功率的增加或者焊接速度的降低,焊缝熔深和熔宽增大。焊缝形状、熔深和横截面积有较大变化,焊缝形状由“V”形向“T”字形再向近“X”形过渡。最佳焊缝成形所对应的线能量 ( $P/v$ ) 为 59~75.6 J/mm。

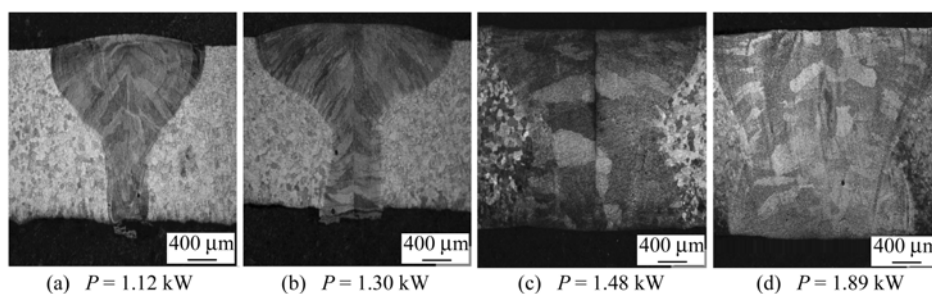


图 3 激光功率对焊缝横截面形貌的影响

Fig. 3 Effect of laser power on cross section of weld bead ( $\Delta Z = 0$  mm;  $v = 1.5$  m/min;  $U_i = 15$  L/min)

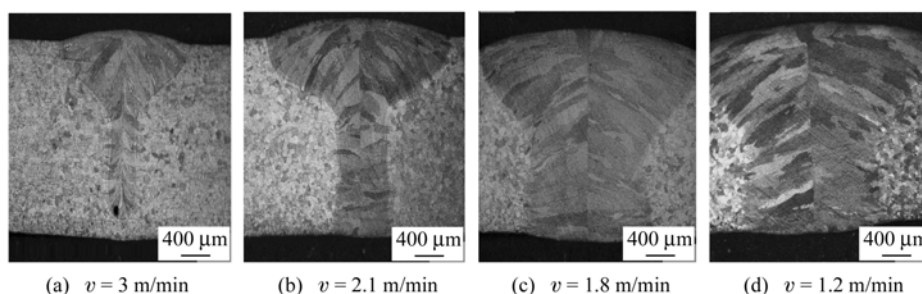


图 4 焊接速度对焊缝横截面形貌的影响

Fig. 4 Effect of welding speed on cross section of weld bead ( $\Delta Z = 0$  mm;  $P = 1.46$  kW;  $U_i = 15$  L/min)

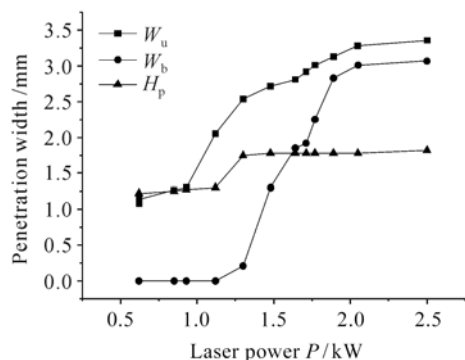


图 5 激光功率对焊缝熔深和熔宽的影响

Fig. 5 Effect of laser power on width and penetration of weld bead ( $\Delta Z = 0$  mm;  $v = 1.5$  m/min;  $U_i = 15$  L/min)

在小功率或高速度焊接时,由于焊接熔池快速冷却,焊缝结晶组织形态有所变化,有利于柱状晶的快速生长,从而得到方向性极强的细小柱状组织,具有相同散热条件的细小柱状晶沿相同的方向生长而形成一个个的柱状晶集团,显示出束状晶的结晶形式。焊接熔池近似“V”形,焊缝上部区域近似椭圆形而焊缝下部近似细长通道形,焊缝上部结晶组织以弯曲形状向焊缝中心成长,在下部熔池变窄变长,晶粒主轴生长方向近似与焊缝中心线垂直,如图 3 和图 4 中的(a),(b)所示。

而在大功率或低速度焊接时,冷却速度相对缓慢,柱状晶有足够的时间长大,从而生成粗大的柱状

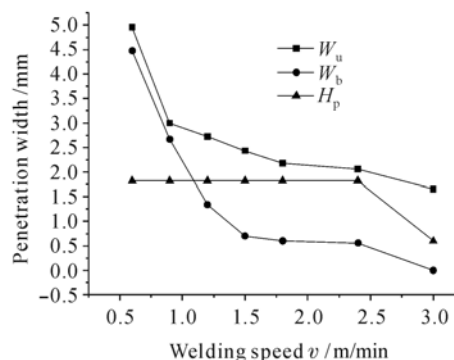


图 6 焊接速度对焊缝熔深和熔宽的影响

Fig. 6 Effect of welding speed on width and penetration of weld bead ( $\Delta Z = 0$  mm;  $P = 1.46$  kW;  $U_i = 15$  L/min)

晶。焊缝的不同区域内,体现出柱状晶所具有的不同生长方向。垂直焊缝方向的中部区域的液态金属由于能量吸收得相对较少,依靠母材的散热首先凝固,柱状晶直接由熔合线向焊缝中心相对生长。焊缝上部和焊缝下部区域分别由于热输入能量集中和熔池体积较大,而且受到高温金属蒸气和等离子体的热辐射作用随后凝固。靠近焊缝垂直方向的中部区域的柱状晶首先由熔合线向焊缝中心相对生长,随后在焊缝中心改变其生长方向几乎垂直地向焊缝表面生长。而靠近焊缝表面的柱状晶则直接由熔合线向焊缝表面中心生长。如图 3 和图 4 中的(c),(d)所示。

激光焊接在深熔焊接过程时产生的小孔效应使焊透后的小孔上部外边缘的尺寸变化较小,而焊缝下部熔宽加大<sup>[9]</sup>。由于激光焊接是一种快速加热冷却凝固和结晶过程,在这种条件下柱状晶优先发展。柱状晶由熔合线向焊缝中心生长,焊缝组织结晶的主轴方向总是与最大温度梯度方向一致的<sup>[10]</sup>,所以在图3和图4中可以看到焊缝中心处形成一道明显的分界线。

### 3.3 离焦量对焊缝成形的影响

激光焦点位置是指激光焦点相对于被焊工件表面的位置,也称为离焦量。定义焦点在工件表面以下时为负,在工件表面以上时为正。按照几何光学理论,当正、负离焦量相等时,工件表面的激光功率密度相等,但获得的熔池形状不同,在正离焦(入焦)

的情况下可获得更大的熔深,这主要与激光焊接熔池的形成过程有关。实践表明,大多数材料在激光加热  $50\sim 200\ \mu\text{s}$ <sup>[11]</sup>时开始熔化,并出现部分气化,产生高压蒸气,并以极高的速度喷射出来;之后,高浓度气体(金属蒸气和辅助气体)使液相金属运动至熔池边缘,并在熔池中心形成小孔。当焦点位置为正时,材料内部的激光功率密度比工件表面还要高,因此能够形成更强的熔化和气化,并使激光能量向材料的更深处传递<sup>[9~12]</sup>。

由图7和图8可以看出,随着离焦量的绝对值加大,熔深和熔宽减小,焊缝形状由“X”形、近“T”字形向“V”形过渡。离焦量在  $-2\sim 3\ \text{mm}$ 时均能使厚度  $2\ \text{mm}$  NiTi 合金试件焊透,其中离焦量在  $0\sim 1\ \text{mm}$ 之间可以得到最佳焊缝成形。

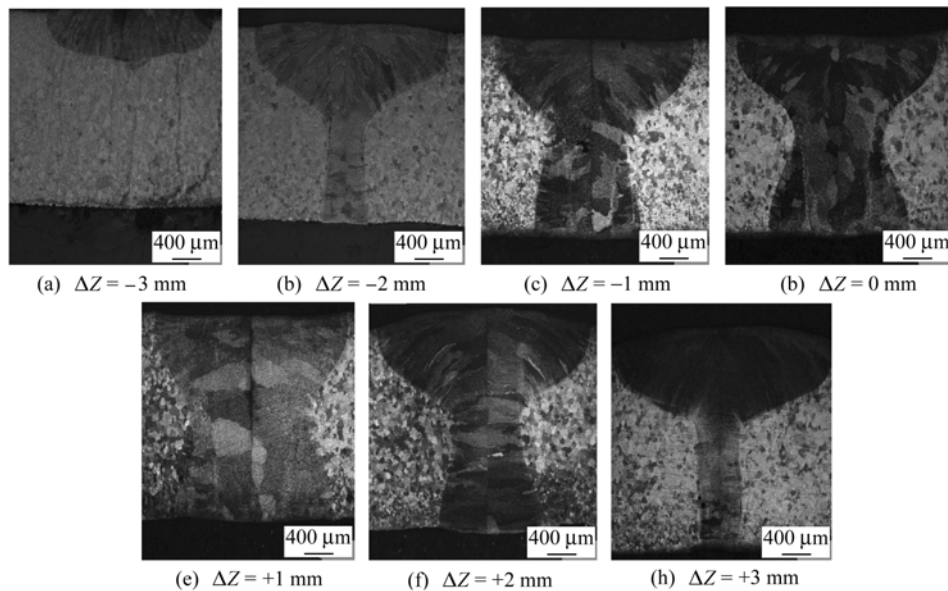


图7 离焦量对焊缝横截面形貌的影响

Fig. 7 Effect of defocusing amount on cross section of weld bead ( $P=1.61\ \text{kW}$ ;  $v=1.5\ \text{m/min}$ ;  $U_i=15\ \text{L/min}$ )

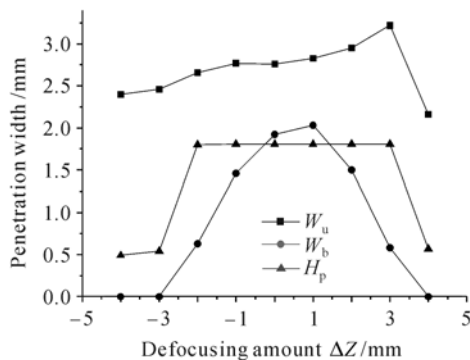


图8 离焦量对焊缝熔深和熔宽的影响

Fig. 8 Effect of defocusing amount on top and bottom width of weld ( $P=1.61\ \text{kW}$ ;  $v=1.5\ \text{m/min}$ ;  $U_i=15\ \text{L/min}$ )

### 3.4 侧吹气流量对焊缝成形的影响

实验中使用纯度为  $99.99\%$  的氩气作为侧吹气以一定角度吹向焊接熔池。侧吹保护气能保护工件的表面免受氧化并且除去在高功率焊接中产生的对激光束有吸收和散射作用的等离子体云。图9和图10是使用侧吹气流量分别为  $25\ \text{L/min}$ ,  $20\ \text{L/min}$ ,  $15\ \text{L/min}$ ,  $10\ \text{L/min}$  和  $5\ \text{L/min}$  时的焊缝表面成形情况。当侧吹气流量低于  $5\ \text{L/min}$  时,焊缝金属表面氧化严重,保护效果不好;当加大侧吹气流量达到  $10\ \text{L/min}$  以上时,焊缝表面呈现银白色外观,保护效果好。随着侧吹气流量的增加,熔宽略有降低;但随着侧吹气流量的加大,焊缝表面的成形有如下特征:表面粗糙、成形不均匀、焊缝表面的状态呈阶段

性变化;当侧吹气流量增大至 25 L/min 时,焊缝表面粗糙最为明显。当侧吹气流量为 15~20 L/min 时,焊缝保护效果和焊缝成形最好。由此可见侧吹气流量的加大会造成焊缝熔池成形不稳定,侧吹气流量的大小直接影响到焊缝熔池成形的状态<sup>[13]</sup>。

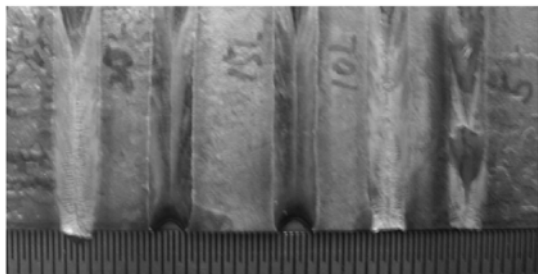


图 9 焊缝成形随侧吹气流量的变化

Fig. 9 Effect of side-blow shielding gas flow rate on weld shaping

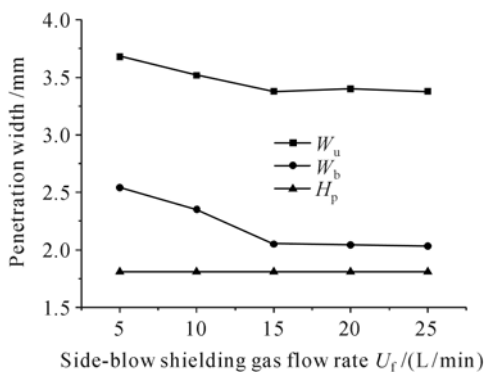


图 10 焊缝熔深(熔宽)随侧吹气流量的变化

Fig. 10 Effect of side-blow shielding gas flow rate on width and penetration depth of weld ( $P = 1.46$  kW;  $v = 0.9$  m/min;  $\Delta Z = 0$  mm)

### 3.5 激光功率与焊接速度匹配变化对焊缝成形的影响

在激光焊接中,激光功率和焊接速度合理匹配是保证焊接接头质量和提高焊接生产效率的关键。激光熔焊焊缝成形大体划分为三个区域:位于焊缝临界熔透曲线(Unstable penetration)以下的区域,由于焊接时输入的能量过小,焊缝不能熔透;位于焊缝过熔透曲线(Excessive penetration)以上的区域,由于焊接输入的能量过大,焊缝过宽,余高、塌陷缺陷严重,甚至出现焊漏情况,成形质量较差;只有位于焊缝临界熔透曲线与焊缝过熔透曲线之间的焊缝全熔透(Full penetration)区域,激光功率与焊接速度的合适匹配才能获得成形好的焊缝。实验中根据焊缝临界熔透、焊缝完全熔透和焊缝过熔透三种焊缝表面成形情况设计了激光功率与焊接速度匹配系

列实验,获得了 2 mm 厚 NiTi 记忆合金激光焊接的激光功率-焊接速度匹配关系曲线,如图 11 所示。

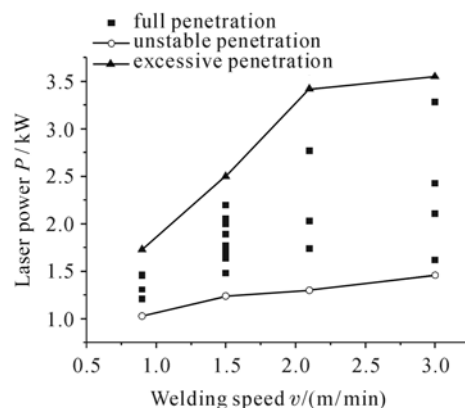


图 11 焊接速度与激光功率对焊缝成形的影响

Fig. 11 Effect of laser power and welding speed on formability of weld ( $P = 1.03 \sim 3.55$  kW;  $v = 0.9 \sim 3$  m/min;  $\Delta Z = 0$  mm;  $U_f = 15$  L/min)

激光功率与焊接速度的匹配关系对焊缝成形的影响表明:要获得稳定成形好的全熔透焊缝,激光输入能量(即激光功率密度和线能量)是决定因素。必须同时考虑激光功率密度(离焦量不变的情况下主要由激光功率决定)与线能量(由激光功率与焊接速度决定)才能获得好的焊缝成形。

## 4 结 论

1) NiTi 形状记忆合金激光焊缝表面成形美观,焊缝均匀平滑,无明显凹陷,焊缝正面、背面没有出现余高,无咬边,焊接接头的熔合线非常清晰,焊缝成形好,激光可焊性好。

2) 随着激光功率的增加或焊接速度的降低,焊缝熔深和熔宽增大。线能量为 59~75.6 J/mm 时能获得最佳焊缝成形。

3) 随着离焦量的绝对值加大,熔深和熔宽减小。离焦量在 -2~3 mm 之间时均能使厚度 2 mm NiTi 合金试件焊透,其中离焦量在 0~1 mm 之间可以得到最佳焊缝成形。

4) 随着侧吹气流量的增加,熔宽略有降低,焊缝表面成形不稳定。侧吹气流量的大小直接影响到焊缝熔池成形的状态。当侧吹气流量为 15~20 L/min 时,焊缝保护和成形效果最好。

5) 在实验基础上得出 2 mm 厚 NiTi 合金焊接速度与激光功率的匹配曲线,可为 NiTi 合金薄板激光焊接时选取合适的工艺参数提供参考。

## 参 考 文 献

- 1 Xu Yuelan, Cheng Zhifu, Fan Xiaolong *et al.*. Plasma beam welding of shape memory alloy [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, **27**(12):90~92  
徐越兰, 成志富, 范晓龙 等. 形状记忆合金等离子束流的焊接 [J]. *焊接学报*, 2006, **27**(12):90~92
- 2 Wu Ye, Meng Xianglong, Cai Wei *et al.*. Microstructure and mechanical behaviors of TiNiNb wide hysteresis shape memory alloy wire argon arc welding joint [J]. *Material Science and Technology*, 2005, **13**(3):312~316  
吴 冶, 孟祥龙, 蔡 伟 等. Ni<sub>47</sub>Ti<sub>44</sub>Nb<sub>9</sub> 合金丝氩弧焊接头的显微组织和力学行为 [J]. *材料科学与工艺*, 2005, **13**(3):312~316
- 3 H. Tobush, A. Ikai. TIG welding and shape memory effect of TiNi shape memory alloy [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1996, **7**(6):646~655
- 4 Guo Liwei, Yu Yandong, Gu feng *et al.*. Weldability of CuZnAl alloy in diffusion bonding [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, **13**(2):404~408  
郭立伟, 于彦东, 谷 丰 等. 形状记忆合金 CuZnAl 的扩散焊接头组织性能 [J]. *中国有色金属学报*, 2003, **13**(2):404~408
- 5 Han Lijun, Zhao Xihua, Zhao Lei *et al.*. Analysis of welding parameters of precise pulse resistance butt welding on TiNiNb shape memory alloys [J]. *Material Science and Technology*, 1999, **7**(Suppl.):76~79  
韩立军, 赵熹华, 赵 蕾 等. TiNiNb 形状记忆合金丝精密脉冲电阻对焊工艺分析 [J]. *材料科学与工艺*, 1999, **7**(增刊):76~79
- 6 Zhao Xihua, Han Lijun, Zhao Lei. Analysis on the joint tensile strength and fractography of TiNi shape memory alloy precise pulse resistance butt welding [J]. *China Welding*, 2002, **11**(1):84~88
- 7 Y. T. Hsu, Y. R. Wang, S. K. Wu *et al.*. Effect of CO<sub>2</sub> laser welding on the shape-memory and corrosion characteristics of TiNi alloys [J]. *Metall. Mater. Trans. A*, 2001, **32A**(3):569~576
- 8 A. Tuissi, S. Besseghini, T. Ranucci *et al.*. Effect of Nd-YAG laser welding on the functional properties of the Ni-49.6at.%Ti [J]. *Materials Science and Engineering A*, 1999, **273-275**:813~817
- 9 Qin Guoliang, Lin Shangyang. Radial dimension of keyhole and its dynamic characteristics in laser deep penetration welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4):557~561  
秦国梁, 林尚扬. 激光深熔焊接过程中小孔径向尺寸及其动态特性 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(4):557~561
- 10 Zuo Tiechuan. Laser Materials Processing of High Strength Aluminum Alloys [M]. 1st edition. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 74  
左铁钊. 高强铝合金的激光加工 [M]. 第 1 版. 北京: 国防工业出版社, 2002. 74
- 11 Wang Jiachun, Wang Xizhe, Hui Songxiao. Research of linear heat input and laser focus position for laser welding HE130 titanium alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2):179~184  
王家淳, 王希哲, 惠松晓. HE130 合金激光焊接线能量与焦点位置研究 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(2):179~184
- 12 Qiang Hongliang, Cheng Zhaogu, Luo Jiangtao *et al.*. Influencing factors on topography of weld in deep penetration laser welding [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9):1289~1295  
强宏亮, 程兆谷, 雒江涛 等. 激光深熔焊焊缝表面形状的影响因素 [J]. *光学学报*, 1999, **19**(9):1289~1295
- 13 Pang Ming, Yu Gang, Liu Zhao *et al.*. Dissimilar metal of K418 and 42CrMo full penetration laser welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8):1122~1126  
庞 铭, 虞 钢, 刘 兆 等. K418 与 42CrMo 异种金属的激光穿透焊接 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(8):1122~1126