

形状记忆合金 YAG 激光焊接^{*}

王蔚^{1, 2, 3}, 陈庚¹, 陈俐², 赵兴科¹, 黄继华¹

(¹北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083; ²北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024; ³空军航空大学, 吉林 长春 130022)

提要 采用 YAG 激光焊机对 TiNi 形状记忆合金板材进行焊接性研究。通过大量工艺试验确定合适的激光工艺参数范围。分别对焊接接头各部分微观组织特点、组织结构、记忆性能、抗拉强度进行了研究。研究发现, 焊缝组织晶粒粗大, 有新相 Ni₃Ti 的析出; 焊接热影响区较窄; 焊接接头的形状恢复率是母材的 97.4%; 母材抗拉强度为 1155MPa, 焊接接头抗拉强度达 798MPa, 是母材抗拉强度的 69%, 断裂部位在焊缝中心。

关键词 形状记忆合金; Ni-Ti; YAG 激光焊

中图分类号: TG456.2

文献标识码: A

YAG Laser Welding of Shape Memory Alloy^{*}

Wang Wei^{1, 2, 3}, Chen Geng¹, Chen Li², Zhao Xingke¹, Huang Jihua¹

(¹School of Material Science and Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China;

²Key Laboratory for High Energy Density Beam Processing Technology, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China; ³Aviation university of Air force, Changchun Jilin 130022, China)

Abstract With high energy YAG Laser beam method, the weld ability of the TiNi shape memory alloy sheet was studied. The relationship among parameters and its proper adjusting range are acquired. Thus the range of the parameters used in the engineering application was obtained. Some characteristics such as phase, microstructure, shape memory properties and tensile strength of the welded joint were discussed. Results show that the crystal grain in welded joint is large, and new phases such as Ni₃Ti separate out. Furthermore, the welding heat affected zone is narrow, and the welded joint shape recovery rate is 97.4% of the parent metal and the parent metal tensile strength is 1155MPa. The tensile strength of welded joint reaches 798 MPa which is 69% of the parent metal and the fracture appears in the center of weld.

Key words Shape memory alloy; NiTi; Laser welding

序言

NiTi 形状记忆合金是近二、三十年新兴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。目前, NiTi 形状记忆合金的成分设计和制备工艺日趋成熟,并已进入实用阶段。但由于实际应用要求 NiTi 合金焊接接头不仅应保证具有一定的强度和塑性,而且要尽量保持它的记忆功能,因此它比一般材料更难连接,连接工艺和焊接技术都有了一定的困难。激光焊接由于具有光束方向性好、能量密度高、焊缝窄、热影响区小、焊接变形小、能进行精密加工等优点,越来越受到人们的

关注。因为提高 NiTi 合金的焊接性、获得优质焊接接头是进一步拓宽其应用范围的重要条件^[1]。

国内外关于 NiTi 合金激光焊接研究^[2-3]多是用脉冲激光器,很少涉及到连续激光器的焊接,且激光焊缝的功能性较母材相比损失较多。本文通过利用 Nd:YAG 连续激光器进行了 2mm 厚的 Ti-50.9% at. Ni 合金平板单面焊双面成形试验,研究了 YAG 激光焊接 NiTi 合金,对其焊接接头各部分微观组织特点、组织结构、记忆性能、抗拉强度进行了研究。

1 试验

1.1 试验材料与焊前准备

NiTi 形状记忆合金的原材料由北京有色金属

^{*}基金项目: 武器装备重点基金资助项目(项目编号: 6104110)

收稿日期: 2008-01-09

研究院提供,于哈尔滨工业大学炼制。试验所用的 Ti-50.9at.% Ni 为厚度 2mm 的板,由于酸洗等原因,厚度有损耗,冷轧态,经 20 分钟 723K 真空退火后,在氢氟酸、硝酸和水的混合液中浸泡,去除表面的氧化膜,最后用丙酮超声波清洗干净,吹干备用。

1.2 试验设备及方法

激光焊机采用英国 Gsi Lumonics 公司 AM 356 型连续 YAG 激光器为核心的焊接系统;最大功率 4.5KW,波长为 1.06 μ m,模式为多模,焦距为 150mm,焦斑直径为 0.6mm,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,由机械手带动激光相对运动来实现。

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。采用特制的焊接夹具固定焊接试件的位置,并同时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,包括侧吹和垂直向下吹两路保护气,实现对焊接熔池和焊缝正面后端高温区的保护。试验装置示意图如图 1 所示。

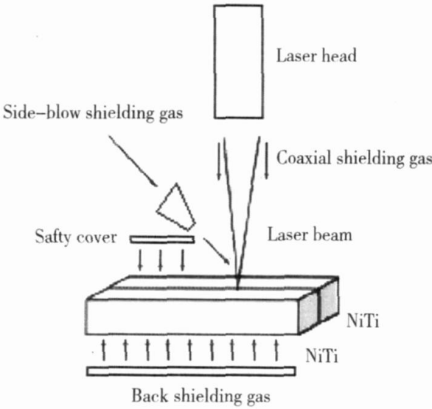


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

组织性能检测设备采用日本 OLYMPUS 金相显微镜;美国 FEI 公司 QUANTA-200 型 X 射线能谱成分分析仪(EDAX);英国 INSTRON 3367 型拉伸机;日本 RIGAKU 型 X 射线衍射仪;DSC Q100(Universal V4.1DTA Instruments)差示扫描量热仪(DSC)。

经正交试验对激光工艺参数进行的研究归纳,确定获得优良焊缝成形的热输入与保护气流量的调节范围为:激光功率为 1460W,焊接速度为 1.5m/min,侧吹保护气流量为 15L/min,离焦量为 0mm。

3 试验结果与讨论

3.1 相变点测试

用差示扫描量热仪(DSC)测试母材与激光焊缝相变特征温度:马氏体相变开始温度 M_s ,马氏体相变结束温度 M_f ,出现奥氏体的温度 A_s ,奥氏体相变结束温度 A_f 。采用线切割方法切取小于 50mg 的样品,取整个焊缝,以焊缝中心线对称,包括热影响区。测量过程中升降温速率为 10 $^{\circ}$ C/min,升降温度范围为 193K~423K。

TiNi 合金母材与其激光焊缝加热冷却时的热分析 DSC 曲线如图 2 所示,其中 R、M 和 P 分别代表 R 相、马氏体和母相。由图 2 可见,TiNi 合金母材加热与冷却时的相变类型为 P \rightarrow R \rightarrow M,激光焊缝冷却时的相变类型为 P \rightarrow R \rightarrow M,而加热时相变类型为 M \rightarrow P,没有出现 R 相变;激光焊缝 M_s 、 A_s 、 A_f 温度较母材相比略微有所提高;激光焊缝的吸热峰与放热峰较母材相比较尖锐,相变热(峰面积)较大。

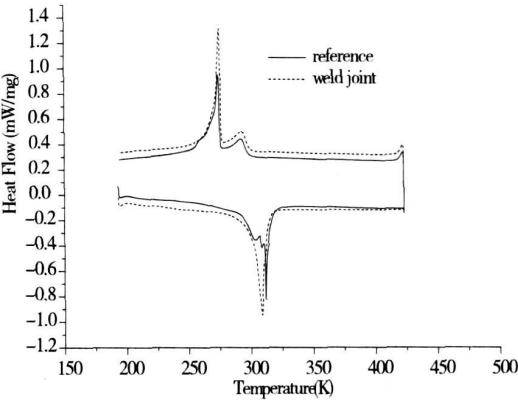


图 2 母材与激光焊缝相变温度变化曲线

Fig.2 Change curves of reference and weld joint phase transformation temperature

本试验采用的 TiNi 合金为冷轧态在 723K 保温退火后,内部存在高应力和高密度位错等不可逆缺陷,这种组织状态对随后加热冷却时的相变过程会产生抑制作用,故该状态下 DSC 曲线上的相变峰小而平缓。而合金在激光焊接过程中焊缝中的应力得到释放,位错通过滑移、攀移,密度降低,加工硬化程度削弱,形成稳态组织,对相变过程抑制作用减小,故该状态下 DSC 曲线上相变峰大而尖锐。

3.2 形状记忆效应的测试

TiNi 合金母材及其激光焊接接头的形状记忆效应的测定,采用国内外常用的弯曲变形方法,该方法的测定示意图如图 3。将母材与焊后样品分别沿

垂直焊缝方向线切割成试样尺寸为 0.6mm×1.6mm×10mm 的片状,焊缝位于试样的中部,焊接接头的形状记忆效应通过压弯后恢复的角度对应的形状恢复率表示。具体步骤是:在低于 M_s 温度的条件下,将平直试样在自制模具上均匀弯曲,卸载后即发生弹性回弹,测出试样的弹性回弹角 θ ,然后将变形后的试样缓慢升温,此时由于形状记忆效应,试样形状发生显著的回复,同时记录下回复时所对应的温度,并加热到 A_f 温度以上,直到不再回复变形为止。测量记忆回复角 θ_m 。试样的预变形量 ϵ ,形状回复率 η ,可回复变形量 ϵ_r 及塑性变形 ϵ_p 可分别由下列各式计算:

$$\epsilon = \frac{t}{d} \times 100\% \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\theta_m}{180 - \theta_e} \times 100\% \quad (2)$$

$$\epsilon_r = \epsilon \times \eta \quad (3)$$

$$\epsilon_p = \epsilon - \epsilon_r \quad (4)$$

式中: t —片材试样的厚度,mm; d —模具的直径,mm; θ_m —回复的角度差; θ_e —弯曲变形卸载前后的角度差。

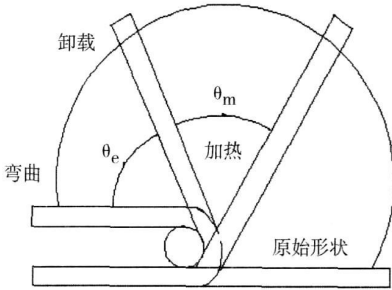


图3 弯曲试样形状恢复示意图

Fig. 3 Schematic illustration of bend model for measuring the shape recovery

模具压头曲率半径为 13mm (预置形变量为 6%)。使试样在 213K 温度下弯曲试样角度至 180°,随后以 3K/min 速度升温,记录弯曲试样不同温度下的角度,从而得出试样的形状回复率与温度的关系曲线如图 4 所示。在变形量为 6% 的情况下,在升温到 290K 后,母材形状回复率为 98.6%,焊接接头形状回复率为 96%。焊接接头的形状恢复率比焊前母材稍低,即相当于母材的 97.4%。

从图中还可以发现,与母材的变化曲线明显不同的是,激光焊缝曲线出现分段回复的特征,即对应于激光焊缝试样回复率为 50% 时,曲线出现拐点及平台。

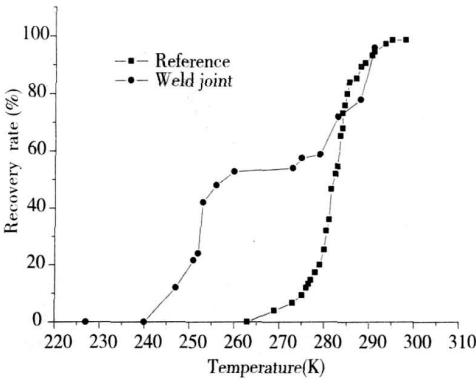


图4 母材与激光焊接接头的形状回复率与温度变化曲线

Fig. 4 Change curves of shape recovery rate with temperature of reference and weld joint

究其原因,认为是由于母材与激光焊缝的相变过程不尽相同,而试验中焊接接头的形状回复率与温度变化曲线在测试过程中包含激光焊缝与母材的相变过程的共同作用,尤其在升温段焊缝与母材的 M 相与 R 相发生分离变化不尽相同,这就导致了分段回复现象,并出现拐点;同时熔化后重新凝固的焊缝组织结构发生了变化,马氏体的界面有序性遭到破坏,位错密度增加^[4,5],从而增大了马氏体相变的阻力,这也是焊接接头的形状回复率降低的一个原因。

3.3 接头显微组织分析

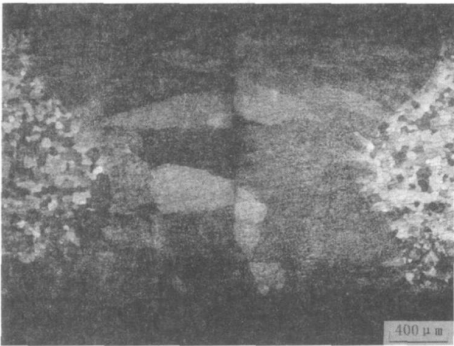


图5 激光焊接接头宏观组织图

Fig. 5 Macro structure of weld joint

由图 5 可以看到,采用 YAG 激光焊接接头是由母材、热影响区和焊缝组成。母材组织晶粒有明显的方向性,整个基体晶粒很细,晶粒度评为 9 级,为 TiNi 有序相。焊缝组织是熔融金属凝固时晶粒垂直于热影响区向中心呈放射状生长形成的树枝晶,晶粒度为 3~4 级;在凝固过程中,焊缝中心区域热量最高,高温停留时间最长,冷却速度最慢,所形成的柱状晶非常粗大,晶粒度评定为 2 级。图 6 为焊接接头微观组织图,可以看出, TiNi 合金激光焊

缝热影响区极窄为 62.17 μ m。

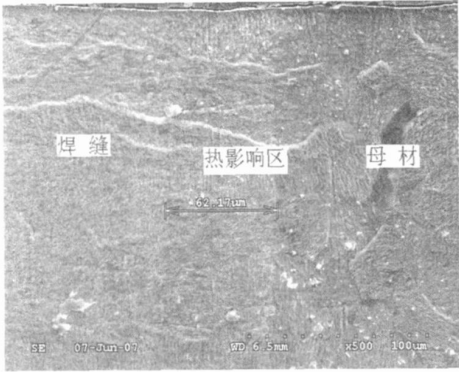


图 6 激光焊接接头微观组织图

Fig. 6 Micro structure of weld joint

对照图 7, 母材的衍射峰为单一的 B2 有序相; 焊缝的 X 衍射分析见图 8, 除 TiNi 相外有新相 Ni₃Ti 析出。新相的产生使得晶格之间的有序性受到破坏, 记忆性有一定的损失。

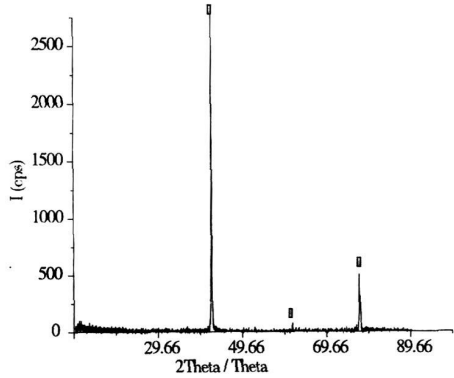


图 7 母材的 X 射线衍射图

Fig. 7 X-ray diffraction pattern of base metal

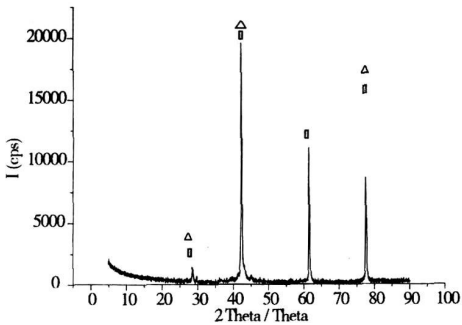


图 8 激光焊缝的 X 射线衍射图

Fig. 8 X-ray diffraction pattern of weld metal

3.4 常温下母材与焊接接头力学性能

如图 9 所示, 常温下母材的抗拉强度为 1155MPa, 焊接接头抗拉强度达 798MPa, 是母材抗拉强度的 69%, 断裂于焊缝中心。

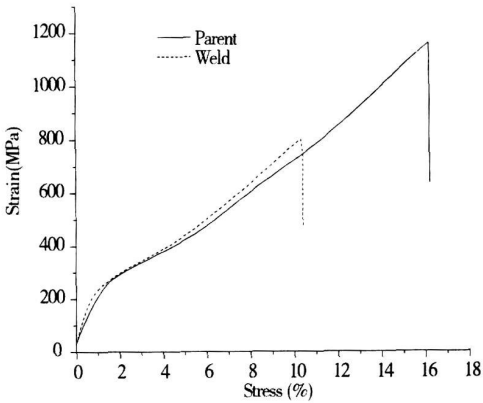


图 9 激光焊接母材与接头的拉伸曲线

Fig. 9 Stress-strain curves of the welded and reference materials

4 结论

采用 YAG 激光焊接 TiNi 记忆合金, 焊接热影响区窄, 焊缝组织粗大, 有少量新相析出。

经 DSC 测试, 焊缝放热峰幅度较强, 激光焊缝的 M_s 相变温度较母材相比略微有所提高, 且焊接接头形状记忆性能达到了母材的 97.4 %。

常温下, 焊接接头抗拉强度是母材抗拉强度的 69%。

参考文献

- [1] Xue Song-bai, Li Xiao-chun, Dong Jian. Research Status And Development Trend Of Ti-Ni Alloy Joining[J]. welding & Joining, 2003(11): 5-9.
- [2] 薛松柏, 吕晓春, 董健. TiNi 合金连接技术的研究现状及发展趋势[J]. 焊接, 2003(11): 5-9.
- [3] A. Tuissi, S. Besseghini. Effect of Nd:YAG laser welding on the functional properties of the Ni-49.6at. % Ti [J]. Materials Science and Engineering. A 273-275 (1999): 813-817.
- [4] Schlömacher P, Hass T, Schöller A. Laser welding of Ni-Ti shape memory alloy [J]. Proceedings of the International Conference on shape memory and superelastic technologies. California, USA, March 7-10, 1994.
- [5] Zhao Xihua, Han Lijun, Zhao Lei. Effect of Consequent Post Heat Treatment on the Joints in Precise Pulse Resistance Butt Welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(1): 1-5.
- [6] 赵熹华, 韩立军, 赵蕾. 随机后热处理对 TiNi 记忆合金精密脉冲电阻对焊接头性能的影响[J]. 焊接学报, 2001, 22(1): 1-5.
- [7] Guo Liwei, YU Yandong. Weldability of CuZnAl alloy in diffusion bonding[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2003(4): 404-408
- [8] 郭立伟, 于彦东. 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(4): 404-408