

文章编号: 0258-7025(2010)12-3168-04

TiNi 合金/不锈钢激光焊接头裂纹的形成和控制

陈玉华^{1,2} 龚伟怀¹ 倪 泉¹ 柯黎明¹

(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 哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 采用低功率脉冲激光对 0.2 mm 厚的 TiNi 形状记忆合金/不锈钢异种材料进行焊接,对焊接接头的裂纹形态和元素分布进行了研究,分析裂纹的形成原因,提出裂纹控制的措施。结果表明,TiNi 合金/不锈钢异种材料直接对接焊缝裂纹敏感性很大,仅通过调整激光焊接工艺参数无法避免裂纹的产生。裂纹产生的主要原因是不锈钢母材中的 Fe 元素大量进入焊缝,与 Ti 元素形成脆性金属间化合物导致焊缝变脆,在焊接应力作用下开裂。通过在 TiNi 合金与不锈钢之间预置纯 Ni 丝作为填充材料可以稀释焊缝中 Fe 和 Ti 元素的含量,对形成裂纹的脆性组织进行阻隔,避免裂纹的产生,焊接接头的平均抗拉强度达到 580 MPa。

关键词 激光技术;异种材料激光焊接;裂纹;TiNi 合金;不锈钢

中图分类号 TG456. 7 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103712.3168

Formation and Control Measure of the Cracks in the Laser Welded Joint between TiNi Alloy and Stainless Steel

Chen Yuhua^{1,2} Gong Weihuai¹ Ni Quan¹ Ke Liming¹

¹ National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

² State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract Low-power pulsed laser weld the 0.2 mm thickness of TiNi shape memory alloy /stainless steel welding dissimilar materials, the crack of the weld joint morphology and elemental distribution are studied, the reasons for crack formation are analyzed, and crack control measures are proposed. The results show that, TiNi alloy /stainless steel butt welding of dissimilar materials has large crack sensitivity. Only by adjusting the laser welding process parameters can't avoid cracks. The main reason of cracks is the weld elements Fe, and Ti elements in the stainless steel base metal in the formation of brittle intermetallic compounds, resulting in welds brittle, cracking under stress in the weld. TiNi alloy and stainless steel by pure Ni wire between the pre-filling materials can be diluted as a weld in Fe, Ti element content, on the formation of brittle cracks organizations barrier to avoid cracks. The tensile strength of the welded joint with pure Ni wire as filler material is 580 MPa.

Key words laser technique; laser welding of dissimilar material; crack; TiNi alloy; stainless steel

1 引 言

TiNi 形状记忆合金(SMA)作为一种新型功能材料,具有特殊的形状记忆效应、超弹性、较高的强度、抗腐蚀性和良好的生物相容性^[1,2]。激光焊作为一种高精度、高质量和低变形的焊接方法^[3,4],是

适合 TiNi 合金焊接的重要方法之一^[5]。TiNi 合金价格昂贵,若将其和不锈钢进行焊接形成复合结构,既可以利用 TiNi 合金的形状记忆效应,又可降低成本,在医疗器械、航空仪表以及微电子领域有着广泛的应用前景^[6]。因而,近年来一些学者对 TiNi 形状

收稿日期: 2010-04-06; 收到修改稿日期: 2010-04-29

基金项目: 现代焊接生产技术国家重点实验室开放基金(200803)和江西省自然科学基金(2007GQC1513)资助课题。

作者简介: 陈玉华(1979—),男,博士,副教授,主要从事特种焊接技术和异种材料焊接性等方面的研究。

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

记忆合金与不锈钢异种材料的焊接开展了初步的研究。李明高等^[7,8]在国内率先采用储能焊对 TiNi 形状记忆合金与不锈钢异种材料进行了焊接,研究了接头的力学性能,结果表明接头由于形成了铸态组织和脆性化合物而使得抗拉强度较低,仅仅是 TiNi 形状记忆合金母材强度的 11.9%,并且接头很脆、拉伸时几乎不发生应变;另一方面不锈钢与镍钛形状记忆合金熔化,改变了镍钛形状记忆合金成分和组织,异质接头的记忆效应受到严重影响。基于这种情况,研制了一种适合于 TiNi 形状记忆合金与不锈钢异质材料钎焊的银基钎料,采用激光钎焊对细丝状 TiNi 形状记忆合金与不锈钢异质材料进行了焊接,结果表明^[9,10],钎焊时镍钛形状记忆合金母材不熔化,不会改变 TiNi 形状记忆合金焊接区成分。汪应玲等^[11]采用 AgCu 金属箔作中间层,对 TiNi 形状记忆合金与不锈钢进行了瞬间液相扩散焊连接,接头最大抗剪强度为 239.4 MPa,断裂发生在 TiNi 母材和 AgCu 中间层扩散界面上。

上述研究虽然实现了 TiNi 形状记忆合金与不锈钢异种材料的焊接,但储能焊主要适合于丝材的焊接,激光钎焊和瞬间液相扩散焊主要针对搭接接头。本文采用低功率脉冲激光对厚度为 0.2 mm 的薄片状 TiNi 形状记忆合金与不锈钢异种材料进行了对接焊,研究了焊接接头裂纹的形成机理,并采用预置填充材料的方法控制裂纹的形成,获得了性能良好的焊接接头。

2 试验条件及方法

试验母材为 0.2 mm 厚的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢片

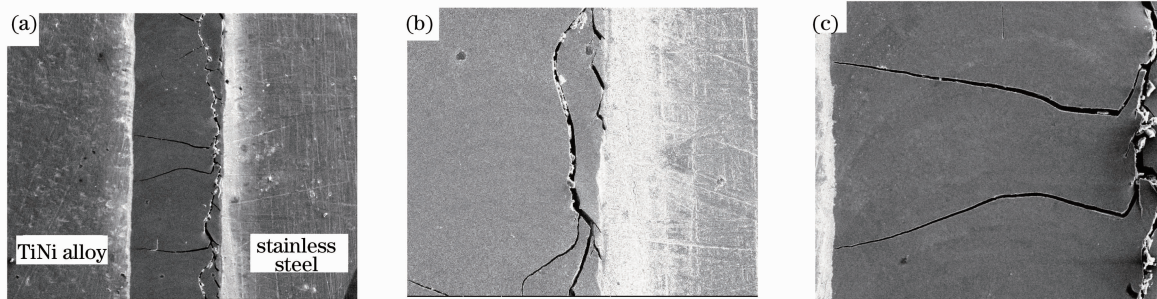


图 1 TiNi 形状记忆合金/不锈钢激光焊接头的裂纹。(a)裂纹全貌,(b)纵向裂纹,(c)横向裂纹

Fig. 1 Cracks in the welded joint of TiNi alloy/stainless steel. (a) full view of the cracks, (b) longitudinal cracks, (c) transverse cracks

3.2 裂纹形成原因

采用能谱分析对焊接接头的元素分布进行测试,如图 2 所示。焊缝中 Ti 元素含量明显高于不锈钢母材,而 Fe 元素含量高于 TiNi 记忆合金母材,和

和冷轧态 Ti-50.6%Ni(Ni 的原子数分数为 50.6%)形状记忆合金片,采用线切割加工成 60 mm×40 mm 的焊接试片。焊接前采用丙酮溶液对 TiNi 形状记忆合金脱脂并放入氢氟酸与硝酸的混合溶液中浸泡 15 min,然后采用清水冲洗,乙醇吹干,去除在熔炼和轧制过程中材料表面生成的氧化膜。

焊接设备为意大利 SYSMA 公司的 SL-80 型 Nd:YAG 脉冲激光焊机,平均功率为 80 W,可调节参数有脉冲功率百分比、脉冲宽度、脉冲频率和光斑直径。采用气流量为 5 L/min 的氩气对焊缝进行双面保护。焊后采用 Quanta 200 型扫描电镜观察焊缝表面裂纹形貌,并采用能谱仪分析焊接接头表面元素的分布情况。

3 试验结果及分析

3.1 焊接接头表面裂纹形貌

采用微型脉冲激光对 TiNi 形状记忆合金/不锈钢异种材料进行了直接对接焊,结果发现,在试验所选参数范围内,焊接接头裂纹倾向很大,焊缝区域布满了裂纹,如图 1 所示。从图 1(a)可以看出,裂纹可分成纵向裂纹和横向裂纹两种类型。纵向裂纹位于靠近不锈钢一侧的焊缝和热影响区[图 1(b)];横向裂纹垂直于焊缝方向,从纵向裂纹处起裂,向 TiNi 记忆合金一侧延伸,止裂于记忆合金一侧焊缝的边缘[图 1(c)]。改变激光功率、脉冲频率、脉冲宽度和焊接速度等工艺参数进行大量工艺试验,结果发现裂纹不可避免,因此单纯依靠调整工艺参数无法避免裂纹的产生。

不锈钢母材的含量接近。焊缝中 Cr 的含量低于不锈钢母材,Ni 含量低于 TiNi 记忆合金母材。这说明 TiNi 合金/不锈钢异种材料焊接时,Cr 和 Ni 的扩散能力较弱,在焊缝中的含量较少,但 Fe 和 Ti 的

扩散能力较强,大量进入焊缝,Fe 和 Ti 元素在两母材的界面处可以形成脆性金属间化合物而导致焊缝变脆。另一方面,1Cr18Ni9Ti 不锈钢线膨胀系数为 $16.7 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$,TiNi 形状记忆合金线膨胀系数为 $10 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$,两者的线膨胀系数相差很大,焊后在不锈钢侧产生较大的残余应力。因此,在焊接应力作用下不锈钢侧界面处的脆性金属间化合物容易产生开裂,这是导致 TiNi 形状记忆合金/不锈钢异种材料采用直接对接焊时焊接接头裂纹倾向大的主要原因。

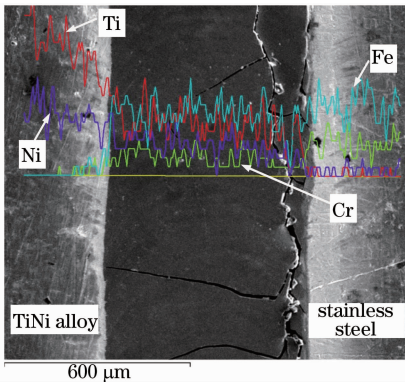


图 2 焊接接头表面的元素分布

Fig. 2 Element distribution on the welded joint surface

3.3 裂纹控制措施

分析 TiNi 形状记忆合金/不锈钢异种材料采用直接对接焊时裂纹的形成原因后,可通过向焊缝中添加填充材料阻隔脆性化合物的形成来避免裂纹。

由于 Ni 元素是 TiNi 形状记忆合金母材和不锈钢母材所共同含有的元素,而且 Ni 的强度、塑性、韧性和耐蚀性均较好,因此选择纯 Ni 丝作为填充材料。纯 Ni 丝的直径为 0.3 mm,难以采用送丝的方式,因此采用预置方式,如图 3 所示,采用自制的专用夹具将 2 片被焊试片和填充材料按图所示装夹固定在激光焊接工作台上进行焊接。选用的焊接脉冲功率百分比为 10,脉冲宽度为 5.1 ms,脉冲频率为 6 Hz,脉冲能量为 3.3 J,光斑直径为 0.3 mm,焊接速度为 0.3 mm/s。焊接接头的形貌如图 4 所示,可以看出焊缝成形良好,无裂纹和气孔等缺陷,采用精密拉伸试验机测试焊接接头的平均抗拉强度为 580 MPa,达到冷轧态 TiNi 形状记忆合金母材强度的 82%,不锈钢母材的 94%。因此以纯 Ni 丝为填充材料,采用以微型脉冲激光为热源可以实现 TiNi 合金/不锈钢异种材料的良好焊接。

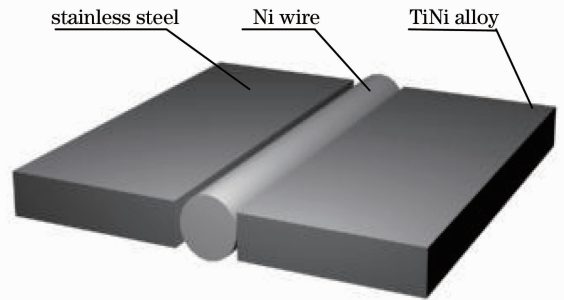


图 3 被焊材料和填充材料组表示意图

Fig. 3 Assembly diagram of welded and filler materials

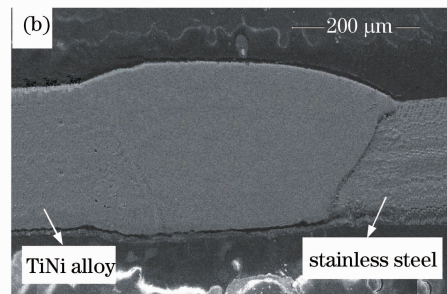


图 4 焊接接头的宏观形貌。(a) 表面形貌, (b) 截面形貌

Fig. 4 Macrography of the welded joint. (a) surface appearance, (b) cross-section appearance

采用能谱仪对填充 Ni 丝的焊接接头横截面进行 Ti, Ni 和 Fe 等主要元素的线扫描,结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,焊缝中 Ti 元素的含量和不锈钢母材基本接近,这可能是由两方面原因造成的:首先, TiNi 合金母材溶入焊缝的数量不多;其次填充材料纯 Ni 丝在焊缝中的数量占主要地位,对 Ti 元素起到了稀释作用。焊缝中 Ni 元素的含量略高于

TiNi 合金母材,远高于不锈钢母材。由于不锈钢母材熔化进入焊缝使得焊缝中含有少量 Fe,但 Fe 元素含量明显低于未填充 Ni 丝的接头。TiNi 合金母材一侧基本没有 Fe 元素,说明焊接时溶入焊缝中的 Fe 元素没有扩散进入 TiNi 合金母材, TiNi 合金母材中的 Ti 也没有穿过焊缝进入不锈钢母材,因此 Fe 和 Ti 在焊缝与不锈钢边界处形成金属间化合物的可能性大为减少,从而降低了焊缝开裂的可能

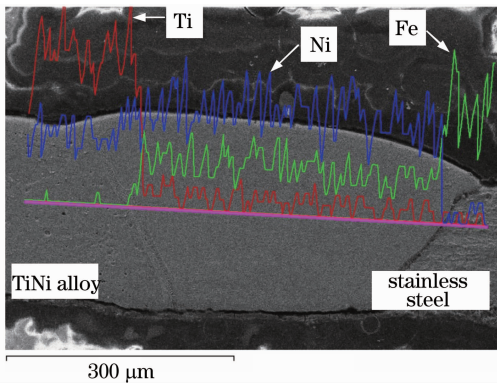


图 5 填充 Ni 丝的焊接接头的元素分布图

Fig. 5 Element distribution of the welded joint with pure Ni wire

性。另外, Ni 本身具有较好的塑性, 因此焊缝抵抗焊接应力的能力也有所提高。

4 结 论

TiNi 形状记忆合金与不锈钢异种材料采用直接对接焊时接头裂纹倾向很大, 极易开裂, 且单纯依靠调整工艺参数无法避免裂纹的产生。裂纹可分成纵向裂纹和横向裂纹两种类型。纵向裂纹位于靠近不锈钢一侧的焊缝和热影响区, 横向裂纹垂直于焊缝方向, 从纵向裂纹处起裂, 向 TiNi 记忆合金一侧延伸, 止裂于记忆合金一侧焊缝的边缘。焊接时, Fe 和 Ti 的扩散能力较强, 大量进入焊缝形成脆性金属间化合物, 是导致焊缝变脆和容易开裂的主要原因。

采用纯 Ni 丝作为填充材料进行焊接时, 对 Fe 和 Ti 元素起到了稀释作用, 降低了焊缝中 Fe 和 Ti 的含量, 使得焊缝以及焊缝与不锈钢边界处生成脆性金属间化合物的可能性减小, 从而避免了焊缝开裂。以纯 Ni 丝为填充材料, 采用低功率脉冲激光为焊接热源可实现 TiNi 合金/不锈钢异种材料的良好焊接, 焊缝成形良好且无缺陷, 接头强度高达 580 MPa。

参 考 文 献

1 Yan Xiaojun, Yang Dazhi, Liu Xiaopeng. Electrochemical behavior of YAG laser-welded NiTi shape memory alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, **16**(3): 572~576

2 Yongqiang Yang, Cuihong Zhang, Yunfei Yang *et al.*. Laser induced self-propagating high-temperature synthesis of TiNi alloy [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(1): 35~37

3 Liu Liming, Huang Ruisheng, Cao Yunming. Behavior analysis of low power YAG laser-gas metal arc welding hybrid welding arc plasma [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3167~3173

刘黎明, 黄瑞生, 曹运明. 低功率 YAG 激光-熔化极气体弧焊复合焊接电弧等离子体行为研究 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3167~3173

4 Wu Xiaohu, Zhao Fei, Xie Wenjia *et al.*. Microstructure and properties of laser weld joints of reduced activation martensitic steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 577~580

吴小虎, 赵飞, 谢文佳等. 低活化马氏体钢激光焊接接头的组织与性能 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 577~580

5 Wang Wei, Chen Li, Zhao Xingke *et al.*. Effect of welding parameters on formation of welds during laser welding of NiTi shape memory alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 291~296

王蔚, 陈俐, 赵兴科等. 激光焊接工艺参数对 NiTi 形状记忆合金焊缝形成的影响 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 291~296

6 M. G. Li, D. Q. Sun, X. M. Qiu *et al.*. Effects of laser brazing parameters on microstructure and properties of TiNi shape memory alloy and stainless steel joint [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, **424**(1-2): 17~22

7 Li Minggao, Qiu Xiaoming, Sun Daqian *et al.*. Study on mechanical properties of the welded joints between TiNi shape memory alloy and stainless steel [J]. *Welding*, 2005, (3): 17~20

李明高, 邱小明, 孙大谦等. TiNi 形状记忆合金与不锈钢焊接接头性能比较 [J]. *焊接*, 2005, (3): 17~20

8 Li Minggao, Sun Daqian, Qiu Xiaoming *et al.*. Microstructures and properties of capacitor discharge welding joint of TiNi shape memory alloy and stainless steel [J]. *China Welding*, 2005, **14**(2): 95~100

9 Qiu Xiaoming, Li Minggao, Sun Daqian *et al.*. Microstructure and properties of brazing joint of TiNi shape memory alloy with stainless steel [J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2005, **41**(2): 132~136

邱小明, 李明高, 孙大谦等. TiNi 形状记忆合金与不锈钢钎焊接头的微观组织与性能 [J]. *机械工程学报*, 2005, **41**(2): 132~136

10 Qiu Xiaoming, Sun Daqian, Li Minggao *et al.*. Microstructures and properties of welded joint of TiNi shape memory alloy and stainless steel [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2004, **14**(3): 475~479

11 Wang Yingling, Li Hong, Li Zhuoxin *et al.*. Microstructure and properties of transient liquid phase diffusion bonded joint for TiNi shape memory alloy and stainless steel [J]. *Transaction of the China Welding Institution*, 2009, **30**(4): 77~80

汪应玲, 李红, 栗卓新等. TiNi 形状记忆合金与不锈钢瞬间液相扩散焊工艺研究 [J]. *焊接学报*, 2009, **30**(4): 77~80