

TiNi形状记忆合金与 不锈钢激光微焊接技术

■ 陈玉华 龚伟怀 徐世龙 柯黎明 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

013048565

TG457.1

14

南昌航空大学学术文库

TiNi 形状记忆合金与 不锈钢激光微焊接技术

陈玉华 龚伟怀 徐世龙 柯黎明 著



国防工业出版社

·北京·



北航

C1656642

TG457.1

14

013048282

南文木学学大空部昌南

图书在版编目(CIP)数据

TiNi 形状记忆合金与不锈钢激光微焊接技术 / 陈玉
华等著. —北京:国防工业出版社,2013.5
ISBN 978-7-118-08686-7

I. ①T... II. ①陈... III. ①形状记忆合金-激光焊
②不锈钢-激光焊 IV. ①TG457.1②TG456.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 044328 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 4 $\frac{3}{4}$ 字数 125 千字

2013 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 36.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

在微电子、微机械系统、医疗器械、航空航天及仪器仪表领域,随着科学技术的进步,焊接对象的尺寸日益微小精细,在传统焊接技术下可以忽略的因素将对材料的焊接性产生不可忽视的影响,这种必须考虑结合部位尺寸效应的焊接方法总称为微连接技术。激光微焊接技术作为一种高效、精密的焊接方法,由于具有能量密度高、穿透能力强、精度高、适应性强、热影响区小、焊接应力和变形小等特点而成为微连接技术的重要方法之一。激光微焊接技术已经成为航空电子设备、高精密机械设备微型件封装节点连接的重要手段。

TiNi 形状记忆合金作为一种新型功能材料,具有特殊的形状记忆效应、超弹性以及较高的强度、抗腐蚀性、良好的生物兼容性,因此在航空航天、汽车、仪器仪表、原子能、海洋开发及医疗器械等领域都有很好的应用前景。由于 TiNi 形状记忆合金在很多领域以薄片状或细丝状使用,需要采用微连接方法进行焊接。和其他任何一种新材料相同, TiNi 形状记忆合金与同质材料或异质材料焊接接头的质量是决定其应用价值的关键。因此,本书对厚度为 0.2mm 片状 TiNi 形状记忆合金、不锈钢以及 TiNi 形状记忆合金/不锈钢异种材料采用激光微焊接技术进行焊接的工艺、焊接接头微观组织结构和性能进行了阐述。

本书旨在为推动激光微焊接技术以及 TiNi 形状记忆合金材料焊接技术的发展和應用做出一些贡献。本书共分 7 章:第 1 章介绍 TiNi 形状记忆合金的发展及其应用、焊接技术现状和研究进展;第 2、3 章针对 0.2mm 厚度 TiNi 形状记忆合金激光微焊接工艺、焊接接头的微观组织结构、力学性能、形状记忆效应等进行系统研究和阐述;第 4 章介

绍0.2mm厚度的1Cr18Ni9Ti不锈钢激光微焊接工艺、焊接接头微观组织和力学性能的研究结果;第5~7章针对0.2mm厚度TiNi形状记忆合金/不锈钢异种材料的激光微焊接接头裂纹敏感性、裂纹形成机理和控制措施、焊接接头的微观组织结构、元素分布、物相组成以及焊接接头的强度、耐蚀性等研究结果进行了阐述。

本书的出版得到南昌航空大学学术文库出版基金的资助,部分研究内容得到江西省自然科学基金、先进焊接与连接国家重点实验室开放基金和江西省教育厅科技项目的资助。另外,南昌航空大学焊接工程系特别是先进连接技术课题组的同仁对本书的出版和部分试验工作提供了帮助,在此一并表示感谢。此外,向关心本书出版的同行以及书中所援引文献的作者表示谢意。

由于作者的水平有限,书中难免会有错误和不当之处,敬请读者批评指正。

作者
2012.12

目 录

第 1 章 TiNi 形状记忆合金及其焊接技术现状	1
1.1 TiNi 形状记忆合金的应用	2
1.2 TiNi 合金焊接技术的研究进展	5
1.2.1 TiNi 合金的压力焊和钎焊	6
1.2.2 TiNi 合金的熔焊技术	8
1.3 TiNi 合金异质接头连接技术现状	11
1.3.1 TiNi 合金异质接头的固相焊接和钎焊	12
1.3.2 TiNi 合金异质接头的熔化焊接	13
1.4 TiNi 合金及焊接接头耐蚀性研究现状	15
1.4.1 TiNi 合金母材耐蚀性研究	16
1.4.2 TiNi 合金焊接接头的耐蚀性	17
1.5 薄板激光焊的研究现状	17
1.6 本书的主要内容	19
第 2 章 片状 TiNi 形状记忆合金的激光微焊接	20
2.1 试验材料	20
2.2 试验设备及方法	20
2.2.1 试验设备	20
2.2.2 焊前准备	21
2.2.3 工艺试验	22
2.3 TiNi 合金激光微焊接的焊缝成形	23

2.3.1	保护气对焊缝成形的影响	23
2.3.2	激光功率对焊缝成形的影响	24
2.3.3	脉冲频率对焊缝成形的影响	30
2.3.4	脉冲宽度对焊缝成形的影响	34
2.3.5	焊接热输入对焊缝成形的影响	37
2.4	TiNi 合金激光微焊接接头的组织性能	38
2.4.1	焊接接头的组织特征	38
2.4.2	焊接接头的显微硬度分布	43
2.4.3	焊接接头拉伸断口形貌	46
2.5	TiNi 合金激光微焊接工艺优化	47
2.5.1	正交优化试验设计	47
2.5.2	工艺优化结果分析与最优工艺参数	48
2.5.3	正交优化结果的实验验证	49
	本章小结	50
第3章	热处理对 TiNi 合金激光微焊接接头组织性能的影响	51
3.1	退火态母材和焊接接头的相变行为及形状恢复率	51
3.1.1	相变行为	51
3.1.2	形状恢复率分析	54
3.2	退火态母材及焊接接头的拉伸性能	56
3.3	热处理顺序对焊接接头组织特征及显微硬度的影响	58
	本章小结	63
第4章	片状不锈钢的激光微焊接	64
4.1	试验材料	64
4.2	片状不锈钢激光微焊的焊缝成形规律	64
4.2.1	脉冲频率对焊缝表面成形的影响	65
4.2.2	脉冲宽度对焊缝表面成形的影响	67
4.2.3	激光功率对焊缝表面成形的影响	68

4.2.4	脉冲能量对焊接接头横截面形貌的影响	70
4.3	片状不锈钢激光微焊接接头的组织性能	71
4.3.1	焊接接头典型组织形态	72
4.3.2	工艺参数对焊接接头显微组织的影响	73
4.3.3	焊接接头的显微硬度	76
4.3.4	焊接接头的抗拉强度及工艺优化	77
	本章小结	80
第5章	TiNi 合金/不锈钢激光微焊接接头裂纹敏感性	81
5.1	焊接接头中裂纹的形成	81
5.2	填充材料镍对焊接接头裂纹敏感性的影响	84
5.2.1	镍的选择依据	84
5.2.2	镍作为填充材料对 TiNi 合金/不锈钢焊缝成形的影响	84
5.3	预留间隙对焊缝成形的影响	88
5.4	工艺参数对焊缝成形的影响	89
5.4.1	激光功率对焊缝成形的影响	89
5.4.2	脉宽对焊缝成形的影响	91
5.4.3	脉冲频率对焊缝成形的影响	92
	本章小结	93
第6章	TiNi 合金/纯镍/不锈钢焊接接头的微观组织结构	94
6.1	焊接接头组织结构及界面特征	94
6.1.1	焊接接头横截面组织形貌	94
6.1.2	焊接接头表面微观形貌	97
6.1.3	焊缝中心金相组织	102
6.2	焊接接头元素分布	104
6.2.1	焊接热输入对 TiNi 合金侧焊接接头元素分布的影响	104

6.2.2	焊接热输入对不锈钢侧焊接接头元素分布的影响	107
6.2.3	焊缝表面元素分布	108
6.3	含裂纹焊接接头的物相分析	110
	本章小结	111
第7章	TiNi 合金/纯镍/不锈钢焊接接头的性能	112
7.1	焊接接头的力学性能	112
7.1.1	激光功率对焊接接头抗拉强度的影响	112
7.1.2	脉冲宽度对焊接接头抗拉强度的影响	115
7.1.3	脉冲频率对焊接接头抗拉强度的影响	116
7.1.4	激光微焊接工艺的优化	118
7.1.5	焊接热输入对焊接接头显微硬度的影响	122
7.2	焊接接头的耐蚀性能	125
7.2.1	电化学测试试验	125
7.2.2	焊缝的耐蚀性	126
7.2.3	焊缝及母材极化曲线比较	127
7.2.4	焊缝及母材的电化学阻抗谱	131
	本章小结	136
	参考文献	138

第1章 TiNi 形状记忆合金及其 焊接技术现状

形状记忆合金是一种新型的功能材料,有着特殊的形状记忆效应。形状记忆效应,就是将材料在其高温的母相状态下成形后,急冷至低温的马氏体状态,如果在此状态下进行任意的塑性变形使其形状发生改变后,再将其加热到高温母相稳定的温度区,则通过马氏体相变可使其塑性变形前的形状得到恢复,即恢复到母材原有的形状,如图 1.1 所示。

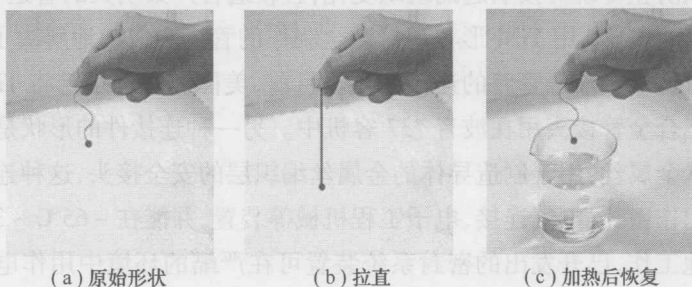


图 1.1 形状记忆效应

金属中发现形状记忆效应可追溯到 1938 年,当时美国的 Greninger 和 Mooradian 在 Cu - Zn 合金中发现了形状记忆效应,但这些都未引起人们的重视,直到 1962 年,美国海军军械研究所的 Buehler 发现了 TiNi 合金中的形状记忆效应,才开创了“形状记忆”的应用阶段。20 世纪 70 年代,人们对 Cu - Al - Ni 合金记忆效应的微观机制、应力诱发马氏体相变晶体学有了比较清楚的认识,并对形状记忆效应和相变伪弹性效应机制也进行了广泛的研究,发现了双程形状记忆效应、全方位形状

记忆效应、R 相变、记忆机制、时效行为等现象,为形状记忆合金的应用开拓了广阔的前景。20 世纪 80 年代相继成功开发出 FeNiCoTi 和 FeMnSi 基形状记忆合金,形状记忆合金开始飞速进入工业化和实用化阶段。20 世纪 90 年代至今,高温形状记忆合金、宽滞后形状记忆合金等也成为研究热点。

1.1 TiNi 形状记忆合金的应用

形状记忆合金由于具有优异的形状记忆效应、超弹性等性能,因此得到广泛的应用,其应用领域涉及电子、机械、航空航天、运输、建筑、化学、医疗、能源及日常生活用品等。在众多形状记忆合金中,Ti-Ni 系形状记忆合金显示出极强的发展势头。

用做管道连接件是形状记忆合金用量最大的一项用途,其特点就是可以防止传统焊接引起的组织变化,且较适合严禁明火的管道连接。1970 年,美国利用 TiNi 形状记忆合金制作的管接头成功地解决了 F14 战斗机钛合金液压管路的连接问题。目前,美国波音公司已将 TiNi 形状记忆合金管接头用在波音 737 客机中。另一种连接件的形状是焊接的网状金属丝,用于制造导体的金属丝编织层的安全接头,这种连接件已经用作密封、电气连接、电子工程机械等装置,并能在 $-65^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$ 可靠地工作,已开发出的密封系统装置可在严酷的环境中用作电气件连接。

在航天领域,飞船天线是形状记忆合金成功应用的实例之一。美国在 1970 年率先将 TiNi 形状记忆合金用于阿波罗宇宙飞船的天线,发射前折成直径为 5cm 的球状,飞船进入太空后,通过加热使合金丝升温,达到 77°C 相变温度后,天线就完全打开成为原先设定的抛物面形状,如图 1.2 所示。近年来,美国已经研制出几种可重复使用、响应速度快的记忆合金驱动器,并开始在卫星的分离机构上应用。中国已将 TiNi 合金应用到伊尔 B208、伊尔 62B2022 型飞机中,使用 Ni-Ti-Co 三元合金开尾铆钉连接中央翼和货舱门加强框。

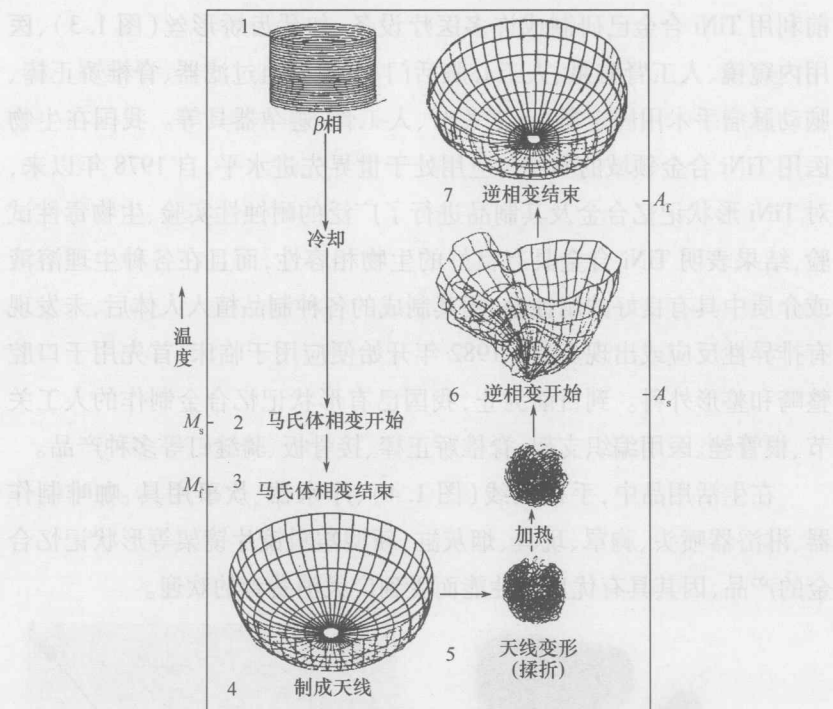


图 1.2 形状记忆合金用作宇宙飞船天线示意图

在土木、能源动力工程领域中,利用形状记忆合金制成的阻尼器、隔震装置、智能混凝土结构已应用到桥梁等建筑物中,使建筑物的生存能力得到提高,在遭地震和强风灾害时倒塌和损坏的可能性降低。另外,利用形状记忆合金的特性可以将热能转变为机械能。形状记忆合金的相变滞后只有几十度,只需两个温差为几十度的高温源和低温源就能产生马氏体与母相之间的转换,而变形后的马氏体能产生高达 700MPa 的回复力。根据这种换能特性,可以对低质热能进行回收和利用,如工业废水、废气、原子反应堆或地热源排出的水等,利用这种原理制造的热发动机输出功率可达 1kW。

在医学领域, TiNi 形状记忆合金除了利用其形状记忆效应或超弹性外,还可满足化学和生物学等方面的要求,即良好的生物相容性。目

前利用 TiNi 合金已研制成许多医疗设备,如牙齿矫形丝(图 1.3)、医用内窥镜、人工肾脏泵、人工心脏活门、去除凝血过滤器、脊椎矫正棒、脑动脉瘤手术用固定器、人工关节、人工骨、避孕器具等。我国在生物医用 TiNi 合金领域的研究与应用处于世界先进水平,自 1978 年以来,对 TiNi 形状记忆合金及其制品进行了广泛的耐蚀性实验、生物毒性试验,结果表明 TiNi 合金具有良好的生物相容性,而且在各种生理溶液或介质中具有良好的耐蚀性,用其制成的各种制品植入人体后,未发现排异性反应或出现炎症。1982 年开始便应用于临床,首先用于口腔整畸和整形外科。到目前为止,我国已有形状记忆合金制作的人工关节、根管锉、医用编织支架、脊椎矫正棒、接骨板、骑缝钉等多种产品。

在生活用品中,手机天线(图 1.4)、净水器、炊事用具、咖啡制作器、淋浴器喷头、胸罩、玩具、烟灰缸、新型塑料镜片镜架等形状记忆合金的产品,因其具有优良的性能而受到广大消费者的欢迎。

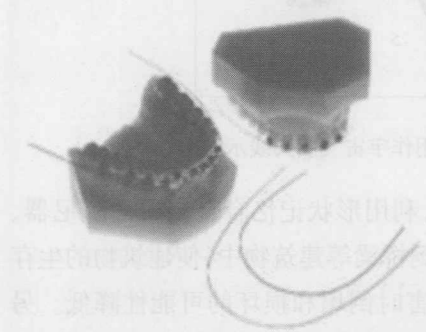


图 1.3 TiNi 合金制成的牙齿矫形丝

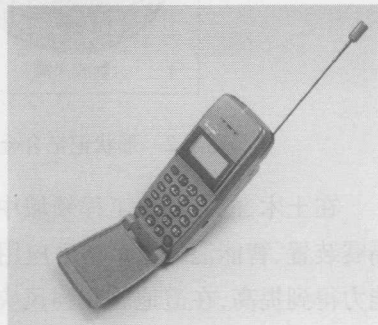


图 1.4 手机上的形状记忆合金天线

在工业工程应用方面,TiNi 形状记忆合金的应用主要是利用其形状记忆效应、超弹性及其派生的阻尼效应等特性。TiNi 合金以丝、板、簧、管、钉和圈等元件形式已逐步应用于航空航天飞行器、空间结构平台、核反应堆、建筑、桥梁及海洋结构等方面,用于控制结构的变形或振动,监测结构内部的应力、应变、温度、损伤等状况,从而提高了工程结构的安全性和可靠性。在纺织科技方面,TiNi 形状记忆合金丝作为一

种新型的具有优良性能的纺织材料,与其他纺织品结合生产出的产品有独特的性能优点。

此外,形状记忆合金在汽车、微机电系统、机器人等领域也有着广泛的应用。利用 TiNi 合金制成的汽车制动器已逾百种,主要用于控制引擎、传送、悬吊等,以提高安全性、可靠性及舒适性。例如,美国 Rachen 公司和德国宝士公司把 TiNi 合金制成弹簧引入汽车排挡系统中,借记忆行为来调整油压,还可增加减缓器的效能。另外,这种合金构件在汽车传动系统的防噪装置及发动机燃料气体控制装置上也得到应用。利用材料兼有传感和驱动的双重功能,可以实现控制系统的微型化和智能化的特点,现已制成全息机器人、毫米级超微型机械手等。用 TiNi 合金制造的机器人,其动作除温度外不再受其他环境因素的影响,具有仿真性好、控制灵活、动作柔顺、无振动噪声、易于结构微型集成化等优点,这种产品有望在反应堆、加速器、太空实验室等高技术领域中得到应用。

1.2 TiNi 合金焊接技术的研究进展

一般来说,焊接技术是新材料开发走向实用化的一种途径。和其他新材料相同,TiNi 合金焊接接头的质量是决定其应用价值的关键所在。TiNi 合金焊接时,除了要求没有缺陷和具有一定的力学性能外,还须保留其记忆效应和超弹性等性能,这就给焊接带来了很大的难度。由于 TiNi 合金中钛在高温下易吸收氮、氧、氢等气体,形成脆性化合物,使焊接接头性能恶化,因此,焊接 TiNi 合金存在巨大的困难。但由于 TiNi 合金的连接有着广阔的应用前景,因此国内外学者进行了大量研究。

目前,TiNi 合金的连接研究工作主要集中在焊接方法及焊接工艺对焊接接头组织与性能的影响规律,焊接方法包括钨极氩弧焊、摩擦焊、电阻焊、钎焊、等离子束焊和激光焊等。

1.2.1 TiNi 合金的压力焊和钎焊

1. 电阻焊

一般认为,熔焊时焊缝易于形成铸造状组织,而且易吸收氮、氢、氧并在熔池凝固过程中形成降低焊接接头性能的 Ti_2Ni 、 $TiNi_3$ 等金属间化合物,薛松柏等人认为电阻钎焊比较适合 TiNi 合金的连接,并用数控交流电阻焊机对 TiNi 形状记忆合金丝材的电阻钎焊技术进行了研究,分析了焊接热量、焊接时间、焊接压力及保护气体等参数对焊接接头力学性能的影响规律。得到的焊接接头剪切强度最高可达 577MPa,可形成良好的搭接头,在最佳工艺参数下,焊接接头没有明显的热影响区,钎缝连续、致密,可以说明焊接过程中对母材的热影响区影响非常小。

赵熹华等研究了焊接电流、焊接压力及焊后热处理等参数对 TiNi 合金焊接接头相变温度的影响,研究结果发现焊接电流及焊接压力对焊接接头的相变温度影响不大,奥氏体相变起始温度 A_s 和结束温度 A_f 区间基本无变化。但是焊后热处理对焊接接头的相变温度有一定影响,相变温度随着热处理温度升高而升高。当热处理时间为 99cyc 时,焊接接头出现 R 相变,这为 TiNi 合金作为热敏元件的应用提供了必要条件。

牛济泰等通过储能焊试验分析认为,储能焊的热影响区较宽,比电阻焊的宽 3 倍,当焊接过程的峰值电流过大时,易引起飞溅、过热等缺陷;另外,储能焊存在一个较长时间的振荡过程,即从焊接电流最大到电流零稳态的时间长,焊接接头的热影响区显著增大,增加了焊缝金属的高温停留时间,使吸气量增加,强度和塑性下降。充电电容大时储能点焊机放电波形平缓、电流峰值低、飞溅小,所以尽量选用大的充电电容。对此,牛济泰等把储能焊与电阻焊进行了对比,认为电阻焊比储能焊更适合焊接 TiNi 合金。

从以上研究结果可以看出,电阻焊焊接 TiNi 合金有其独特的优势。但是不足的是,用电阻焊只能形成搭接头,对于薄片的对接无法

实现,且该方法的灵活性一般都受到限制,对工件形状和焊接接头的复杂程度及尺寸大小等限制较大,因而限制了其应用。

2. 爆炸焊

蔺宇龙等进行了 TiNi 合金的爆炸焊接研究。结果表明,两块 TiNi 形状记忆合金板爆炸焊结合面呈微波状结合,在部分结合区,几乎看不出结合界面,焊缝的波长为 $30\mu\text{m} \sim 40\mu\text{m}$,这种焊合有极高的焊缝强度,是爆炸焊的最高焊接强度。邢廷勇则做了两种不同成分及不同转变温度 TiNi 合金的爆炸焊接,研究结果认为通过爆炸焊可以使两种材料较好地结合,并扩大了母材的高温阻尼温度范围。

3. 钎焊

T. Y. Yang 等研究了等原子比 TiNi 合金的红外钎焊,用 Cu 做中间层。研究发现,在 1150°C 的钎焊过程中有 3 种物相生成,分别是富 Cu 相、CuNiTi 相及 $\text{Ti}(\text{Ni}, \text{Cu})$,其中富 Cu 相迅速在钎焊刚开始的 10s 消失,随后在焊接接头中产生不利形状记忆效果的 CuNiTi 相及有利于形状记忆效果的 $\text{Ti}(\text{Ni}, \text{Cu})$,当钎焊时间增加,导致焊接接头中的 Cu 含量减少,CuNiTi 相也随之减少,焊接接头的形状记忆效应增强,当试样在 1150°C 下的钎焊时间为 300s 时, $\text{Ti50Ni50}/\text{Cu}/\text{Ti50Ni50}$ 接头在 130°C 下的形状恢复率为 99%,与母材基本一致。

R. H. Shiue 等研究了两种不同钎料对 Ti50Ni50 钎焊性能的影响。当用 CuSi1 - ABA 钎料时产生富铜相、富银相及 CuNiTi 相;而用 TiCuSi1 钎料时则产生富铜相、富银相及 TiCu_2 相,通过弯曲试验发现 CuNiTi 相比 TiCu_2 相更不利于焊接接头的形状恢复率。两种钎料的剪切强度相差不大,当钎焊温度在 $870^\circ\text{C} \sim 900^\circ\text{C}$ 施焊 180s 以上时,焊接接头强度在 200MPa 以上。界面层 CuNiTi 相及 TiCu_2 相的形成都会降低焊接接头的强度。

以上研究表明,对于 TiNi 合金同质材料的焊接,总体上固相连接对 TiNi 合金的形状记忆效应影响不大,但固相连接接头的强度并不高,且大多需要特殊的设备,影响生产效率。

1.2.2 TiNi 合金的熔焊技术

固相连接因为其设备及焊接接头形式的限制,影响生产效率的同时也制约了其在 TiNi 合金焊接中的推广和应用。熔焊能有效解决焊接接头形式的限制,对于各种形式的焊接接头都能实现焊接,研究中需解决的是焊接接头的强度及形状恢复率,国内外学者对 TiNi 合金熔焊进行了较多的研究。

1. 氩弧焊(TIG 焊)

哈尔滨工业大学吴冶对 Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ 合金丝氩弧焊接头的显微组织和性能做了研究,发现熔合区为较大的铸态树枝晶,热影响区为大小不均的等轴晶,热影响区往熔合区方向,晶粒逐渐变大。对氩弧焊接头进行适当温度退火后,发现退火可改善焊接接头的显微组织、细化晶粒;而未做退火处理的焊接接头性能相对较差,拉伸断裂于焊缝的熔合区,为典型的脆性解理断裂。作者认为焊接接头的铸态组织影响了其拉伸性能,焊接产生的再结晶区与熔合区则影响了焊接接头的形状恢复率。

日本 Stao 等学者进行了 TiNi 合金在 Ar - O₂ 的氛围下的钨极氩弧焊接,研究了保护气中氧含量对焊接接头形状恢复率及焊接接头拉伸性能的影响,研究发现增加保护气中氧含量或焊接电流,焊缝中氧含量都随之增加,并产生很多氧化物的第二相颗粒,焊接接头性能则随之恶化;同时还对焊接接头在 10℃ ~ 100℃ 下的形状恢复率做了研究,发现在温度为 372K 时,焊接接头有与母材相当的形状恢复率。

2. 等离子束焊

成志富采用等离子弧焊分别对 TiNi 合金板材和丝材进行了焊接性研究。研究发现用等离子束较为适合焊接 TiNi 合金板材,焊接接头强度达到母材的 54%,为 640MPa。经过真空退火后焊接接头强度能提高约 100MPa,作者认为焊接时形成的非平衡相在退火时得到溶解,使焊接接头强度整体提高。与板材相比,丝材的焊缝强度及形状恢复率都比板材差,焊接接头断口为等轴微孔断裂,而母材的断口为沿孪晶界的解理断裂。