

## Ti-55M 高温 Ti 合金焊缝塑性的改善\*

郝传勇 李正林 毛先锋

(中国科学院金属研究所, 沈阳 110016)

**摘要** 考察了 Ti-55M 高温 Ti 合金焊接接头力学性能, 结果显示焊缝存在明显的室温脆性, 探讨了 Ti-55M 焊缝室温塑性的各种影响因素, 尝试使用调整焊缝化学成分的方法改善 Ti-55M 焊缝的塑性, 选择 ELI 级 Ti-5Al-2.5Sn 焊丝, 配合脉冲氩弧焊工艺和适当的焊后热处理制度, 获得的焊缝塑性接近母材的塑性, 接头的室温和高温强度以及高温持久等重要性能够满母材技术指标要求。

**关键词** Ti-55M, 高温 Ti 合金, 富 Nd 相, 焊缝塑性

**中图分类号** TG146.2, TG113.26 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2001)07-0709-04

## IMPROVEMENT IN WELD DUCTILITY OF Ti-55M HIGH TEMPERATURE TITANIUM ALLOY

HAO Chuanyong, LI Zhenglin, MAO Xianfeng

Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

Correspondent: HAO Chuanyong, associate professor, Tel: (024)23843531-55625, Fax: (024)23891320,

E-mail: cyhao@imr.ac.cn

Manuscript received 2000-12-12, in revised form 2001-03-01

**ABSTRACT** The investigation on the mechanical properties of Ti-55M alloy weldments showed that the autogenous gas tungsten arc weldments exhibit low room temperature weld ductility. Through analyzing the factors that affect the weld ductility, a modulation of weld compositions has been carried out and the Ti-5Al-2.5Sn ELI was selected as filler metal. Combined with pulsed current arc welding technique and appropriate postweld heat-treatment, the weld ductility nearly as high as that of base metal was achieved. At the same time the most important strength-concerning properties such as room temperature and high temperature strengths, and high temperature endurance of weldments, still can meet the base metal specifications.

**KEY WORDS** Ti-55M, high temperature titanium alloy, Nd rich phase, weld ductility

Ti-55 是我国近期研制的 550 ℃ 高温 Ti 合金, 在航空工业领域的应用主要集中在非焊接结构, 其卓越的高温性能, 使人们探讨其作为板材应用于焊接结构的可能性。为改善合金的轧制工艺性能, 对 Ti-55 的化学成分进行了调整, 新合金命名为 Ti-55M。一般高温 Ti 合金焊接接头都有室温塑性低的问题<sup>[1-4]</sup>, 本工作对 Ti-55M 焊接接头性能 (尤其是焊缝室温塑性) 做了考察和研究, 力求通过调整焊缝化学成分和焊后热处理制度改善 Ti-55M 焊缝的室温塑性, 以对该合金的设计优化和焊接生产提供实验依据。

### 1 实验方法

实验用板材及填充金属的化学成分见表 1, Ti-55M 板材性能技术指标见表 2, 板材厚度为 1.3 mm, 经过 880 ℃, 30 min 退火处理, 试板焊前经酸洗并机械刮出金属光泽, 焊接采用自动钨极氩弧焊, 焊后热处理采用真空加热, 真空度不低于  $10^{-3}$  Pa, 试样在焊接试板上横向截取, 性能测试包括室温拉伸、弯曲和 550 ℃ 拉伸、持久、弯曲实验压头直径为 3 mm。

### 2 实验结果及讨论

#### 2.1 Ti-55M 自熔焊焊接接头力学性能

焊接参数如下: 焊接电流为 24 A, 焊接速度为 40 mm/min, 电弧电压为 7 V, 试样分为 3 种状态: 焊态; 焊后 600 ℃, 2 h 处理和焊后 750 ℃, 1 h 处理, 550 ℃, 350 MPa 持久实验结果表明, 两种焊后

\* 国家自然科学基金资助项目 59901012

收到初稿日期: 2000-12-12, 收到修改稿日期: 2001-03-01

作者简介: 郝传勇, 男, 1970 年生, 副研究员, 博士

表 1 实验用合金及填充金属的化学成分  
Table 1 Chemical compositions of alloys used and filler metal

Material	(mass fraction, %)								
	Al	Sn	Zr	Mo	Si	Nd	O	H	Ti
Ti-55M	5.2	4.10	2.00	1.40	0.25	1.00	<0.15	<0.0100	Bal.
Ti-55	5.5	3.98	2.16	0.98	0.25	0.85	<0.15	<0.0100	Bal.
Ti-5Al-2.5Sn	4.5—5.8	2.0—3.0	-	-	-	-	<0.12	<0.0125	Bal.

表 2 Ti-55M 板材的性能技术指标  
Table 2 Mechanical property specification of Ti-55M alloy sheet

Room temperature			550 °C		Life <sup>1)</sup>	Bend angle
$\sigma_b$ , MPa	$\sigma_{0.2}$ , MPa	$\delta$ , %	$\sigma_b$ , MPa	$\delta$ , %	h	deg
$\geq 900$	$\geq 800$	$\geq 8$	$\geq 550$	$\geq 10$	$\geq 100$	$\geq 25$

1) 550 °C, 350 MPa

表 3 Ti-55M 板材拉伸及弯曲实验结果  
Table 3 Results of tensile test and bend test of Ti-55M alloy sheet

Postweld heat-treatment	Room temperature			550 °C
	$\sigma_b$ , MPa	Fracture position	Bend angle, deg	$\sigma_b$ , MPa
As welded	1172	Base metal	14	-
600 °C, 2 h	1177	Base metal	8	782
750 °C, 1 h	1133	Weld/base metal	7	812
Base metal	1169	-	37	797

热处理的焊接接头的持久寿命均大于 100 h, 达到板材技术指标. 拉伸及弯曲实验结果见表 3.

由以上数据可以看出: 焊接接头室温、高温强度及持久性能均无问题, 但室温塑性偏低. 两种焊后热处理对接头塑性不利, 尤其是 750 °C、1 h 处理. 在弯曲实验中发现, 几乎看不到自裂及裂纹扩展过程, 试件就迅速崩断, 且断口平齐, 呈明显的脆性特征.

## 2.2 Ti-55M 焊缝塑性的影响因素

Ti 合金焊缝的力学性能由宏观及微观组织决定. Ti-55M 自熔焊焊缝内初生  $\beta$  晶粒尺寸粗大, 焊缝内普遍分布着点状第二相颗粒. 扫描电镜观察表明, 第二相沿晶界或枝晶界断续排列 (图 1a), 元素面分布分析显示这些第二相颗粒为富 Nd 相 (图 1b). 弯曲试样断口呈现沿晶断裂特征 (图 2a), 表面存在大量第二相质点, 微观上没有韧窝等塑性断裂特征 (图 2b). 显然, 作为裂纹源的富 Nd 相和脆性基体共同导致焊缝脆化, 故 Ti-55M 焊缝塑性的改善应减少或消除裂纹源. 同时也需改善基体塑性. 据文献 [1] 报道, 高温 Ti 合金焊后塑性较差, 有的延伸率  $\delta$  不足 1%. 这主要是因为高温 Ti 合金焊缝与普通 Ti 合金焊缝一样, 具有粗大的初生  $\beta$  晶粒组织. 同时, 由于高温 Ti 合金的合金化程度高, 连续冷却的  $\beta$  转变组织更易形成脆性马氏体. 人们为解决高温 Ti 合金焊缝塑性问题做了许多努力. Mitchell [2] 提出, 增大焊接线能量, 降

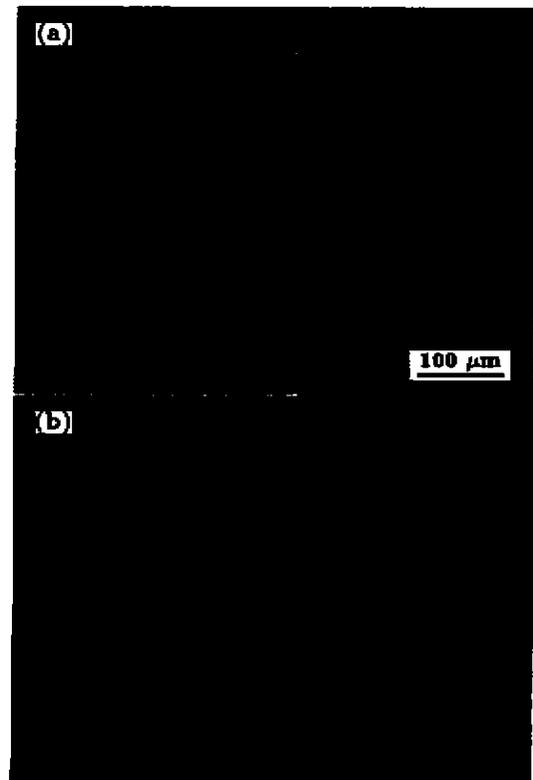


图 1 Ti-55M 合金焊缝微观组织及 Nd 元素面分布  
Fig.1 Microstructure (a) and neodymium distribution (b) in the Ti-55M alloy weld

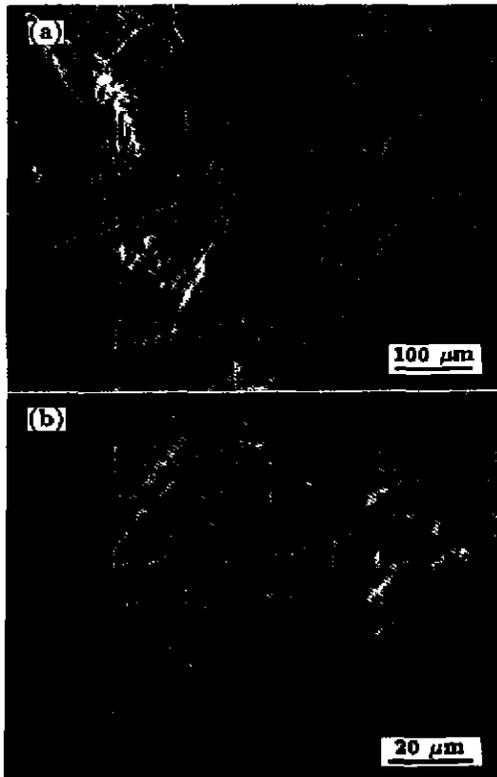


图 2 焊态 Ti-55M 焊缝弯曲样品断口形貌

Fig.2 Fractographs of as welded Ti-55M weld bend sample  
(a) showing intergranular fracture  
(b) showing the second phase particles

低焊接冷却速度,有利于降低焊缝 $\beta$ 转变组织马氏体化程度,从而改善焊缝塑性。Baeslack 和 Bands<sup>[3]</sup>则指出,用线能量集中的焊接方法获得细小的 $\beta$ 晶粒组织,对焊缝塑性有利。Mullins 和 Becker<sup>[4]</sup>研究了焊后热处理制度的作用,认为低温退火不能使 $\beta$ 转变组织粗化,只能使马氏体内弥散析出细小第二相,反而更加硬化了晶内组织,使焊缝塑性进一步降低;只有高温长时间退火才能使 $\beta$ 转变组织粗化,从而使整个焊缝软化,塑性恢复。

为探讨焊接工艺、焊后热处理制度和化学成分等因素对 Ti-55M 焊缝塑性的影响,本工作选择 2 种母材——Ti-55M 和 Ti-55(成分见表 1),选择 3 种线能量的焊接工艺参数: 40 mm/min, 24 A; 260 mm/min, 63 A; 500 mm/min, 80A。另外,选择 3 种焊后热处理制度: 870 °C, 8 h; 920 °C, 2 h; 960 °C, 2 h。

室温弯曲实验结果见表 4。由表可以看出,焊接线能量降低对焊缝塑性有利,但影响不是很大。低温(600 °C)及中温(750 °C)退火继续恶化焊缝塑性;高温退火能使塑性有所恢复。920 °C, 2 h 退火与 870 °C, 8 h 退火的效果相似;960 °C, 2 h 退火可使焊缝塑性显著提高。另外,在相同焊接参数及焊后热处理条件下, Ti-55M 焊缝比 Ti-55 焊缝塑性低,这主要是由于 Ti-55M 合金中

表 4 Ti-55M 和 Ti-55 焊缝的室温弯曲实验结果  
Table 4 Results of the room temperature bend test of Ti-55M and Ti-55 weld bend samples

Alloy	Heat input kJ/cm	Postweld heat-treatment	Bend angle deg
Ti-55M	3.00	As welded	14
Ti-55M	3.00	600 °C, 2 h	8
Ti-55M	3.00	750 °C, 1 h	7
Ti-55M	3.00	870 °C, 8 h	15
Ti-55M	1.16	As welded	17
Ti-55M	1.16	600 °C, 1 h	13
Ti-55M	1.16	750 °C, 2 h	14
Ti-55M	0.77	As welded	17
Ti-55M	0.77	870 °C, 8 h	20
Ti-55M	0.77	920 °C, 2 h	18
Ti-55M	0.77	960 °C, 2 h	24
Ti-55	3.00	As welded	18
Ti-55	3.00	870 °C, 8 h	20
Ti-55	0.77	As welded	21
Ti-55	0.77	870 °C, 8 h	28

强 $\beta$ 稳定化元素 Mo 含量比 Ti-55 合金中的高, $\beta$ 转变组织更稳定且马氏体化程度更深,相同的高温退火制度对焊缝塑性的恢复效果不如 Ti-55 合金明显。不同线能量的焊缝塑性对相同的高温退火的响应也不同,大的线能量的焊缝冷却速度慢,晶内 $\beta$ 转变组织已经较粗,高温退火使其继续粗化的余地相对较小。

应该指出的是,过分提高焊后热处理温度及延长热处理时间对于实际生产似不现实,而且对母材性能可能也有较大影响。因此,为解决 Ti-55M 板材焊接脆性问题,主要应从调整焊缝化学成分着手,同时注意选择不损害接头塑性的热处理制度。

### 2.3 Ti-55M 填丝钨极氩弧焊焊缝室温塑性

母材的强度比技术指标有较大余量,而自熔焊缝比母材强度还高,所以考虑将焊缝金属稀释,降低一部分强度,以改善焊缝塑性。考虑塑性指标的同时,还必须兼顾强度及持久性能等重要指标,因此,选择填充金属的原则应是使焊缝中保留足够的主要热强元素 Al 和 Sn,有选择地稀释对焊缝塑性有较大影响的 Mo 和 Nd 等元素。本实验选择 ELI 级 Ti-5Al-2.5Sn 合金作为填充金属。1.3 mm 的 Ti-55M 板材,焊前加工出 90° 坡口。从 Ti-5Al-2.5Sn 板材上切下小条,磨成直径为 2.2 mm 的均匀圆截面焊丝。为减小焊接线能量,焊接采用脉冲自动钨极氩弧焊,工艺参数选为:峰值电流  $I_p=160-174$  A,基值电流  $I_b=20\%I_p$ ;峰值时间  $t_p=$  基值时间  $t_b=0.05$  s;焊速  $v=500$  mm/min。焊丝摆在试件上,与试件夹角约为 25°,焊接过程中保持焊丝不动(即 1/1 填入)。焊后计算熔合比。对 Ti-55M 填丝焊缝去掉加强高后进行焊后弯曲实验,结果表明:熔合比为 65%,56% 和 49% 时的弯

表 5 Ti-55M 焊接接头及母材的力学性能  
Table 5 Mechanical properties of the Ti-55M alloy base metal and weldments

Fusion ratio, %	Postweld heat-treatment	Room temperature		550 °C	Life <sup>1)</sup> h
		$\sigma_b$ , MPa	Bend angle, deg	$\sigma_b$ , MPa	
65	800 °C, 2 h	963	47	-	-
61	800 °C, 2 h	973	-	588	86
56	800 °C, 2 h	979	47	619	>100
50	800 °C, 2 h	991	25	620	-
45	800 °C, 2 h	983	24	644	>100
Base metal	880 °C, 30 min + 800 °C, 2 h	1049	45	689	>100

1) 550 °C, 350 MPa

曲角分别为 47°, 47° 和 25°。可以看出, 采用 Ti-5Al-2.5Sn 焊丝能显著改善 Ti-55M 焊缝的塑性。

#### 2.4 焊后热处理对 Ti-55M 填丝焊缝塑性的影响

Ti-55M 焊接结构要经过热校形或去应力处理, 故探索合适的焊后热处理制度是必要的。本实验选择熔合比为 56% 的焊接接头, 分别进行工业可行的 4 种真空热处理: 600 °C, 2 h; 700 °C, 2 h; 750 °C, 1 h 和 800 °C, 2 h, 然后进行焊接接头横向弯曲实验。结果显示, 焊后态和上述 4 种热处理状态的焊接接头弯曲角分别为 47°, 44°, 36°, 34° 和 44°。可以看出: 700 °C, 2 h 及 750 °C, 1 h 热处理损害了焊缝塑性; 600 °C, 2 h 和 800 °C, 2 h 处理未对焊缝塑性构成明显损害。考虑实际焊接结构在 550 °C 下长期工作, 600 °C, 2 h 处理不能获得完全稳定的组织, 在使用过程中可能继续发生不利的组织转变, 脆化焊缝, 因此可以认为, 800 °C, 2 h 是比较合适的焊后热处理制度。

#### 2.5 熔合比对 Ti-55M 填丝焊接接头力学性能的影响

除了焊丝种类、焊接工艺及焊后热处理制度外, 对薄板焊接接头力学性能影响最大的因素还有熔合比。故本工作考察了熔合比对 Ti-55M 填丝焊接接头力学性能的影响。所有试件焊接工艺同本文 2.3 节所述, 焊后经过 800 °C, 2 h 真空热处理, 去掉加强高。性能测试包括: 室温拉伸、弯曲及 550 °C 高温拉伸、持久, 结果见表 5。

如果以 Ti-55M 板材技术指标 (见表 2) 作为判据衡量各熔合比的优劣, 可以看到各熔合比的室温及高温强度均达到板材指标要求。弯曲角指标要求熔合比不应低于 50%, 持久寿命指标要求熔合比不超过 61%。综合比较, 熔合比在 56% 时, 主要性能均达到板材的技术要求。表 5 同时给出了母材经 880 °C, 30 min+800 °C, 2 h 热

处理后的性能。一方面可以与焊接接头性能作比较, 另一方面可考察焊后 800 °C, 2 h 处理对母材是否造成不良影响。结果表明该热处理制度使母材强度略有下降, 但塑性提高, 仍可以满足技术指标要求。

另外, 从本文的实验结果不难看出, Ti-55M 焊接脆性产生的根本原因是合金化程度高, 尤其是 Mo 和 Nd 两元素含量高, 同时注意到 Ti-55M 板材实际性能比技术指标有很大余量, 因此本文作者认为, 为兼顾焊接性能, 对板材成分还应进行调整, 使其合金化程度低一些, 以降低工业化焊接生产的难度。Ti-55M 板材才能具有广阔的应用前景。

### 3 结论

(1) Ti-55M 板材自熔焊焊缝强度超过母材, 但存在明显的焊接脆性, 依靠调整焊接工艺和焊后热处理制度很难消除。

(2) 焊缝脆化的原因是合金化程度高, 连续冷却条件下形成的马氏体硬而脆。Mo 和 Nd 含量的影响很大。Mo 决定马氏体转变的程度, 富 Nd 相颗粒可能起到裂纹源的作用。

(3) 选择 ELI 级 Ti-5Al-2.5Sn 焊丝稀释焊缝, 配合适当的焊接工艺和焊后热处理制度, 并注意熔合比控制在 56% 左右, 使焊缝塑性明显改善, 同时其它重要性能也能达到板材技术指标。

### 参考文献

- [1] Greenfield M A, Duvall D S. *Weld J*, 1975; 54 (3): 73s
- [2] Mitchell D R. *Interim Report No. 1, Project BW-10-1*, Titanium Metals Corp. of America, 1967
- [3] Baeslack W A, Bands C W. *Weld J*, 1981; 60 (7): 121s
- [4] Mullins F D, Becker D W. *Weld J*, 1980; 59 (6): 177s