

# 钛铝基金属间化合物熔焊工艺性的研究进展\*

吴会强 冯吉才 何鹏 石常亮

(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

**文 摘** 综述了钛铝基金属间化合物(主要是  $Ti_3Al$ ,  $TiAl$ ) 熔焊连接技术的研究现状, 主要涉及电子束焊、激光焊和氩弧焊等方法, 指出钛铝基金属间化合物的焊接性不存在本质上不可焊的问题。无论采用何种熔焊方法连接此类合金, 焊态下焊接接头的组织和性能一般不理想, 焊缝和热影响区很容易脆化。控制冷速是成功连接此类材料的关键, 同时受该类材料的物理冶金学特点限制, 其组织转变动力机制、氢脆、间隙元素的引入对其焊接性的影响尚未引起注意。

**关键词** 钛铝合金, 金属间化合物, 熔焊

## Research Progress in Fusion Welding Technology of Titanium Aluminide Based Intermetallic Compound

Wu Huiqiang Feng Jicai He Peng Shi Changliang

(State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract** Development of research on fusion welding technology of titanium aluminide based intermetallic compounds are summarized mainly dealing with electron beam welding, laser welding and argon arc welding. The difficult weldability of titanium aluminide based alloy is pointed out. Whichever fusion welding procedure is selected, ideal microstructure and performance of the welded joints is difficult to be obtained and embrittlement is easy to form in the weld and the heat affected zone. Controlling cooling rate is a key factor to join this materials successfully. No enough attentions are drawn on effect of microstructure transformation kinetics, hydrogen embrittlement and elements introduction on this materials weldability because of the lack of data on metallurgical studies.

**Key words** Titanium aluminide alloy, Intermetallic compound, Fusion welding

### 1 前言

在钛铝基金属间化合物系中由于  $Ti_3Al$ 、 $TiAl$  具有比强度、比模量高, 高温蠕变强度高和抗氧化性好等优点, 被认为是理想的、具有研究开发应用前景的航空、航天、军事及民用的新型高温结构材料<sup>[1~5]</sup>(表 1 列出了钛铝基金属间化合物与其他高温结构材料的性能比较), 针对两种金属间化合物

的连接问题也成为近来焊接领域的研究热点。到目前为止, 钛铝基金属间化合物自身的连接以及与其他金属的连接, 主要以固相连接为主<sup>[6~9]</sup>。尽管钎焊、扩散焊与熔焊相比具有其自身的特点和优越性, 但也存在其固有的缺陷, 如接头强度一般比较低、耐热性能较差, 并且由于较多地采用搭接接头, 增加了母材的消耗量和结构质量, 因而国内

收稿日期: 2003 - 11 - 05

\*国家 863 计划资助项目: 2002AA 305 402

吴会强, 1977 年出生, 博士研究生, 主要从事先进材料连接技术方面的研究工作

外研究学者对此类合金的熔焊连接技术进行了大量研究工作。本文重点综述了  $Ti_3Al$  和  $TiAl$  两种

金属间化合物的熔焊连接技术的研究现状与进展。

表 1 钛铝化合物、钛合金和高温合金的性能对比

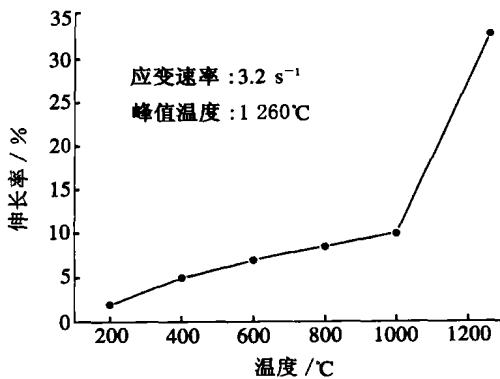
Tab. 1 Properties comparison between titanium aluminides, titanium alloy and high-temperature alloy

材料	结构	密度 / $g \cdot cm^{-3}$	熔点 / K	弹性模量 / GPa	屈服强度 / MPa	拉伸强度 / MPa	蠕变极限 温度/	氧化极限 温度/	室温延性 / %	高温延性 / %
钛合金	hcp/ bcc	4.5	1 813	96 ~ 100	380 ~ 1 150	480 ~ 1 200	600	600	20	20 ~ 40
$Ti_3Al$ 基	$DO_{19}$	4.1 ~ 4.7	1 873	100 ~ 145	700 ~ 990	800 ~ 1 140	760	650	2 ~ 10	10 ~ 20
$TiAl$ 基	$Ll_0$	3.7 ~ 3.9	1 733	160 ~ 176	400 ~ 650	450 ~ 800	1 000	900	1 ~ 4	10 ~ 60
Ni 基高温合金	fcc/ $Ll_2$	8.3	1 726	206	865	1 030	1 090	1 090	3 ~ 5	10 ~ 20

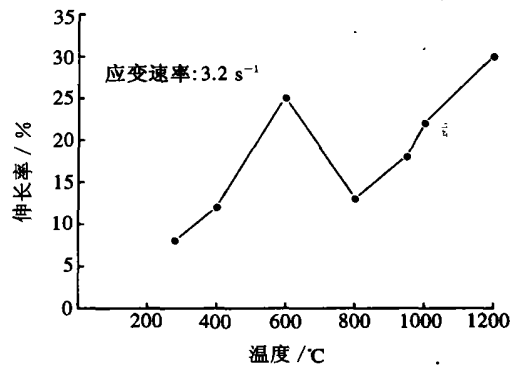
## 2 $Ti_3Al$ 基金属间化合物的熔焊连接

### 2.1 $Ti_3Al$ 基金属间化合物

$Ti_3Al$  为密排六方有序  $DO_{19}$  超点阵结构, 高温下 (800 ~ 850 ) 具有良好的高温性能, 美国已将  $Ti_3Al$  用于制造喷气涡轮发动机上的尾喷燃烧器, 高压压气机机匣、F404 发动机主排气装置的密封件及 GE29 的高压涡轮支撑环, 并认为这种合金在未来军用发动机上具有良好的应用前景。其主要问题是室温塑性低, 加工成形困难已通过添加 相稳定元素如 Nb、V、Mo 等进行合金化得以改善。根据现有的一些研究工作<sup>[10~18]</sup> 认为  $Ti_3Al$  合金焊接时无热裂纹问题。 $Ti_3Al$  合金产生裂纹的临界应力约为 250 MPa 左右, 处于奥氏体不锈钢的中间值, 因此它具有很好的抗热裂性能, 图 1 的热塑性试验结果说明  $Ti_3Al$  合金高温下的塑性较好, 不会产生热影响区 (HAZ) 裂纹<sup>[10]</sup>。焊接  $Ti_3Al$  合金时的主要问题是常温下塑性不足以及由此引起的固态裂纹。



(a) 冷却



(b) 加热

图 1 冷却和加热过程中  $Ti_3Al$  合金的热塑性曲线

Fig. 1 Thermoplastic curves of  $Ti_3Al$  alloy during cooling and heating processes

### 2.2 $Ti_3Al$ 基金属间化合物的高能束焊接

美国的 David 研究了 6 mm 厚  $Ti_3Al$  合金板材的电子束焊接特性, 发现焊件熔合区和热影响区的峰值硬度较基体都有明显增加<sup>[10]</sup>。David 还报道了焊缝组织结构、HAZ 宽度与热输入能量的关系: 随线能量输入的增加, HAZ 宽度增加, 峰值硬度也随之增加, 作者将此归于较低的能量输入条件下, 有较多的  $\beta$  相被保留下来, 从而  $\alpha_2$  马氏体的相对数量降低。热影响区的显微组织与距熔合线的距离有关, 凡是温度超过  $\beta$  相变温度的 HAZ, 在冷却过程中均会转变为针状的  $\alpha_2$  相组织, 在离熔合线较远的 HAZ 将保持  $\alpha_2 + \beta$  双相组织。因此, HAZ 中的显微组织变化是由熔合线附近的针状  $\alpha_2$  到远处的  $\alpha_2 + \beta$ 。

David 还认为,焊缝中可能有  $\beta$  相存在,但尚无有力的证据证明。国内的崔约贤等人对 Ti23Al14Nb3V 合金进行的电子束焊接研究中<sup>[11]</sup>,探讨了接头的断裂行为机制,指出熔合区的断裂特征为脆性解理断裂,塑性特征很少,解理过程起源于晶界和相界,并首次实现了对实用零件的焊接。清华大学的张文雪等人研究了焊接线能量对接头弯曲塑性的影响,指出随着线能量的增大,试件的弯曲塑性降低。焊接线能量低于 35 kJ/m 时,焊接试样断裂弯曲塑性大于 3.2%<sup>[12]</sup>。

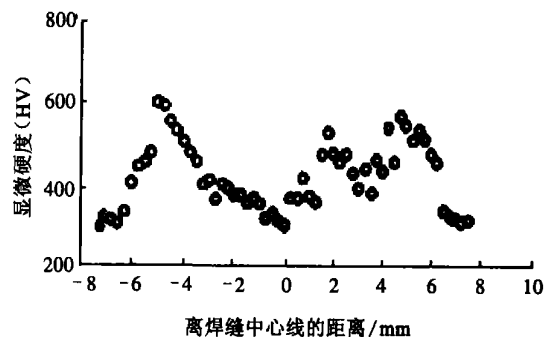
Baeslack III 报道了 1.7 mm 厚板材利用 Nd:YAG 激光焊的研究结果<sup>[13]</sup>,对熔合区进行的 TEM 组织分析表明,熔化区为完全的残余  $\beta$  相,以细小等轴有序 B2 结构存在,说明冷却过程中发生了动态再结晶, $\beta_2$  相只发现孤立地存在于初生  $\beta$  相的晶界和位错上。从硬度曲线上看,熔化区与热影响区相比,硬度有显著下降,主要与焊缝中存在大量的残余  $\beta$  相有关。Martin. G S<sup>[14]</sup>研究了 Ti26Al10Nb3Mo1V 合金的 CO<sub>2</sub> 激光焊接性。尽管  $\beta_2$  马氏体的存在使得焊缝硬度相对母材而言有所增加,相当低的最大硬度值(HV 约 375)仍表明有相当量的残余  $\beta$  相存在。Baeslack III 还研究了超  $\beta_2$  合金的 CO<sub>2</sub> 激光焊<sup>[15]</sup>,发现大量的  $\beta_2$  微观组织的存在和延伸的固态裂纹,这表明在有序的  $\beta_2$  组织中易发生断裂。在超  $\beta_2$  合金电容放电电阻焊中,Baeslack III 发现了相似的过程,微观组织也是由有序  $\beta_2$  组织组成,在冷却的过程中发生断裂。

### 2.3 Ti<sub>3</sub>Al 基金属间化合物氩弧焊接

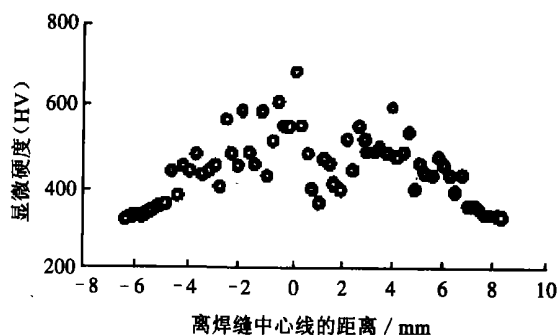
根据文献[16],在 90 A、10 V ~ 11 V 和 4.2 mm/s 条件下,用 GTAW 焊接 Ti - Al14 - Nb21 时,熔池中测得的冷却速度为 65 /s,焊缝和近缝区 HAZ 中的组织为细针状脆硬  $\beta_2$  相,这种细针状组织的塑性几乎为 0,因而为了获得理想的焊缝组织必须预热到很高的温度,如 3 mm 厚的板要求预热高达 600 ,冷却速度需要低于 25 /s。

国内也对 Ti<sub>3</sub>Al 基合金的氩弧焊接进行了相应的试验性研究<sup>[17,18]</sup>。刘博等人对 Ti23Al14Nb3V 合金的焊接性研究结果表明,该合金具有严重的冷裂敏感性,手工氩弧焊操作过程中即可出现大量裂纹,

并伴有清晰的开裂声。采用合适的焊前预热工艺可有效降低该合金的冷裂倾向,同时避免焊件的过度氧化。经预热处理后,焊缝区的结晶层状线消失,热影响区的硬度峰得到缓和,整个焊缝的显微硬度分布趋于均匀,图 2 所示为预热前后的显微硬度分布曲线。可以看出未预热焊件接头的强度系数仅为 29.97%,预热后上升为 77.78%,但无论预热与否,接头区均不显示拉伸塑性(如表 2 所示)<sup>[17]</sup>。通过采用预热防止焊接冷裂纹,或焊后热处理改善焊缝组织和性能的方法顺利实现该合金的氩弧焊接,所得焊件的最终室温拉伸强度接近基体,拉伸塑性可提高到 3.89%,满足工程要求。对类似合金 TIG 焊中 HAZ 的研究表明,近 HAZ 中有严重的  $\beta$  相晶体长大,  $\beta$  相在冷却过程中分解为细小针状的  $\beta_2$  相,靠近 FZ 界面处出现大量的马氏体,而在远 HAZ 中则仅发生部分  $\beta$  转变,且沿  $\beta_2$  晶界分布,  $\beta$  相穿过  $\beta_2$  相形核和长大,温度增加,转变的程度也增加<sup>[18]</sup>。



(a) 预热前



(b) 预热后

图 2 焊接件预热前后的显微硬度分布

Fig. 2 Microhardness profiles before and after heating across the welding joint

表2 基体及预热和非预热条件下的焊件拉伸性能  
Tab.2 Tensile properties of the base metal, unpreheated and preheated welded workpieces

样品	$\sigma_b$ / MPa	$\sigma_s$ / MPa	$\delta$ / %
基本板材	820.22	583.53	17.21
未预热焊件	245.80	-	-
预热焊件	637.95	-	-

### 3 TiAl 基金属间化合物的熔焊连接

#### 3.1 TiAl 基金属间化合物

TiAl 具有面心四方有序  $L_{10}$  超点阵结构, 室温塑性差同样是这种材料的致命缺陷。Ti - Al54 的脆转变温度为 700 左右, 且随 Al 含量减少而降低。由于 TiAl 能在很大的 Al 含量范围内(原子分数为 49% ~ 66%) 保持相结构的稳定性, 所以可以通过 Cr、Mn、V、Mo 等元素合金化和微观组织的控制, 形成一定比例和形态  $\alpha + \beta_2$  的两相组织以提高其塑性和强度。因此, 一些 TiAl 合金都设计成室温具有  $\alpha + \beta_2$  的层片状组织,  $\beta_2$  呈薄片, 穿越晶粒。这种双相组织是在冷却过程中通过  $\alpha + \beta_2$  的共析反应获得的。在 Ti - Al48 二元合金中, 高温下相转变为  $\alpha$  相(大约在 1130 ~ 1375), 但冷却过程中  $\alpha$  相转变为  $\alpha$  相非常快, 且易形成块状组织, 只有在缓冷时才能获得层片状组织。因此, 焊接时快的冷却速度将使这种材料的理想组织状态受到破坏, 而使其恢复原来的脆性, 以致引起固态裂纹。

#### 3.2 TiAl 基金属间化合物的高能束连接

电子束焊在 TiAl 基金属间化合物合金连接中存在的主要问题是产生固态裂纹。为降低接头对裂纹的敏感性, 就必须采取合适的预热温度。英国的 P. L. Threadgill 和 B. G. I. Dance<sup>[19]</sup> 报道了 10 mm 厚 Ti - 48Al - 2Cr - 2Nb 锻造合金的电子束焊接性, 指出预热对接头的微观组织和裂纹敏感性有很大影响。预热温度越高, 热影响区冷速越低, 接头裂纹倾向越小。当不采取预热时, 焊缝因冷速过快而形成块状的微观组织, 并产生大量的横向裂纹; 当采取 773 K 预热时, 焊缝因冷速减慢而形成层片状的  $\alpha + \beta_2$  双相组织, 横向裂纹的数量大大降低, 接头最高拉伸强度达 550 MPa, 延伸率约为 7%, 且破坏发生在焊缝金属中心部位。

墨西哥的 R Patterson<sup>[20]</sup> 等人研究了体积分数为

6.5% Ti B2 强化的 Ti - 48Al 锻造合金电子束焊接冷却速度对焊接裂纹敏感性的影响规律(冷却速度对裂纹倾向的影响如图 3 所示), 指出预热温度越高, 热影响区冷速越低, 接头裂纹倾向越小。试验结果表明, 防止裂纹发生的临界预热温度为 523 K, 临界冷却速度为 300 K/s。

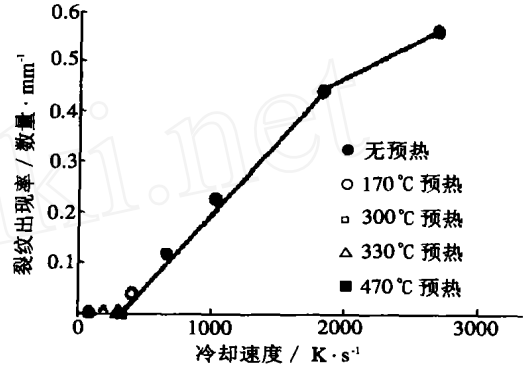


图3 裂纹出现率与冷却速度之间的关系

Fig.3 Relationship between crack occurring ratio and cooling speed

#### 3.3 TiAl 基金属间化合物的氩弧焊连接

TiAl 基金属间化合物氩弧焊接常在修复工程中应用<sup>[21, 22]</sup>, 美国的 M. F. Arenas 和 V. L. Acoff 等人研究了在预热与非预热情况下此类合金的氩弧焊焊接性, 并获得了非预热情况下的无缺陷焊接接头(焊后需经过 615 / 2 h 的消应力处理)<sup>[23]</sup>。M. F. Arenas 指出焊缝组织主要为  $\beta_2$  过饱和固溶体和亚稳态的相混合结构组织构成, 并呈现出柱状和枝状形态。柱状晶粒从熔合区延伸到焊缝中心区, 且在焊缝中心区形成等轴结构。此时焊缝的机械强度明显低于母材, 作者通过焊后热处理有效地提高了接头的强度, 将此归因于焊缝组织等轴再结晶行为的产生。M. F. Arenas 还研究了裂纹产生与热输入能量的关系, 指出随着焊接电流的增加, 裂纹产生的敏感性降低, 这主要与熔合区中  $\beta_2$  相的减少有关。

### 4 结语

钛铝基金属间化合物的焊接性不存在本质上不可焊的问题。无论采用何种熔焊方法连接此类合金, 焊态下焊接接头的组织和性能一般是不理想的, 焊缝和热影响区很容易脆化, 焊接的主要困难在于需找到某种合适工艺, 使焊件在室温下仍能保持一

定的塑性。此外受该类材料的物理冶金学特点研究限制,间隙元素的引入对其焊接性的影响尚未引起注意,这一点值得深入研究。

### 参考文献

- 1 Chesnult J C, Williams J C. The development of intermetallic compound. *Metals and Materials*, 1990;(6): 509 ~ 511
- 2 钱九红. 航空航天用新型钛合金的研究发展及应用. *稀有金属*, 2000;24(3): 218 ~ 223
- 3 邹敦叙,李世琼,仲增墉. 航天航空理想新材料 Ti<sub>3</sub>Al 和 TiAl 金属间化合物合金研究开发进展. *钢铁研究学报*, 1997;9(5): 30 ~ 32
- 4 秦高梧,郝士明. Ti - Al 系金属间化合物. *稀有金属材料与工程*, 1995;24(2): 1 ~ 7
- 5 Cai Z G. Intermetallic TiAl compounds for engine. *Light metal Age*, 1996;53(7): 26 ~ 29
- 6 Fernie J A. Progress in Joining of advanced materials. *Welding & Metal Fabrication*, 1991;59(4): 179 ~ 184
- 7 刘博,崔约贤,钱宗德等. Ti<sub>3</sub>Al - Nb 基合金的焊接性研究进展. *宇航材料工艺*, 1997;27(5): 1 ~ 6
- 8 何鹏,冯吉才,韩杰才等. TiAl 金属间化合物及其连接技术的研究进展. *焊接学报*, 2002;23(4): 84 ~ 86
- 9 刘会杰,冯吉才. TiAl 基合金连接技术的研究进展. *焊接*, 2001;(4): 6 ~ 10
- 10 David S A et al. Weldability and microstructure of a titanium aluminide. *Welding Journal*, 1990;69(4): 133s ~ 144s
- 11 崔约贤,甄良,杨德庄等. Ti<sub>23</sub>Al<sub>14</sub>Nb<sub>3</sub>V 合金电子束焊接接头的显微组织及力学性能. *焊接学报*, 1998;19(6): 130 ~ 135
- 12 张文雪,王国庆,张益坤. Ti<sub>3</sub>Al 基合金的电子束焊接性研究. *航天工艺*, 1998;(1): 11 ~ 12
- 13 Baeslack W A, Cielack MJ, Headley TJ. Structure, properties and fracture of pulsed Nd: YAG laser welded Ti - 14.8wt %Al - 21.3wt %Nb titanium aluminide. *Scripta Met.*, 1988;22(7): 1 155 ~ 1 160
- 14 Martin G S, Albright C E, Jones T A. Evaluation of CO<sub>2</sub> laser beam welding on a Ti<sub>3</sub>Al - Nb alloy. *Welding Journal*, 1995; 74(2): 77s ~ 82s
- 15 Baeslack W A. Joining of  $\gamma_2$  titanium aluminides. In: *Proceedings symposium weldability of materials*, ASM Fall Meeting, Detroit, 1990: 115 ~ 120
- 16 Baeslack W A et al. Weldability of a titanium aluminide. *Welding Journal*, 1989;68(12): 483s ~ 498s
- 17 刘博,武英,崔朝霞等. Ti<sub>23</sub>Al<sub>14</sub>Nb<sub>3</sub>V 合金氩弧焊接头的显微组织及其力学性能. *材料科学与工艺*, 1997;5(1): 45 ~ 49
- 18 张文雪,王国庆,张益坤. Ti<sub>3</sub>Al 基合金 GTAW 焊接性的试验研究. *航天工艺*, 1997;(4): 14 ~ 16
- 19 Threadgill P I, Dance B G I. Joining of intermetallic alloys - further studies. *The TWI Journal*, 1997;6(2): 257 ~ 316
- 20 Patterson P A, Martin P I, Damkroger B K. Titanium aluminide - electron beam weldability. *Welding Journal*, 1990;69(1): 39s ~ 44s
- 21 Mallory L, Baeslack III W, Phillips D. Evolution of the weld heat-affected zone microstructure in a Ti<sub>48</sub>Al - 2Cr - 2Nb gamma titanium aluminide. *Journal of Materials Science Letters*, 1994;(13): 1 061 ~ 1 065
- 22 Bharani D J, Acoff V L. Autogenous gas tungsten arc weldability of cast alloy Ti<sub>48</sub>Al<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>Nb versus extruded alloy Ti<sub>46</sub>Cr<sub>2</sub>Nb<sub>0.9</sub>Mb. *Metallurgical Transactions A*, 1998;29A: 927 ~ 935
- 23 Arenas M F, Acoff V L. Analysis of gamma titanium aluminide welds produced by gas tungsten arc welding. *Welding Journal*, 2003;72(5): 110s ~ 115s

(编辑 李洪泉)

## 金属塑料复合管道

本成果采用金属骨架——塑料复合管道,是以钢丝为增强体,塑料为基体,利用拉模成型工艺,在生产线上连续加工复合而成的新型防腐管道。该产品质量轻、强度高、耐腐蚀,使用寿命长。管道内壁光洁,输送介质阻力小,可广泛使用于石油、化工、船舶、通讯、市政和民用建筑等领域。与其它同类产品相比,其性价比高。

现生产从 80 mm ~ 300 mm 的系列产品,并可生产相同材质和尺寸规格的配套管道附件。管道的安装采用经特殊处理的法蓝加密封圈的方式进行连接,维护使用极为方便。

(中国海鹰机电技术研究院民品总公司 68375378)

·李连清·

宇航材料工艺 2004 年 第 5 期