

# 焊后热处理工艺对 TD3 合金钨极氩弧焊接头显微结构与力学性能影响

Influence of Postweld Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of TIG Welded Joint of TD3 Alloy

刘卫红<sup>1,2</sup>, 曹春晓<sup>1</sup>, 李 艳<sup>1</sup>, 毛 唯<sup>1</sup>, 李晓红<sup>1</sup>

(1 北京航空材料研究院, 北京 100095; 2 吉林大学 材料科学与工程学院, 长春 130025)

LIU Wei-hong<sup>1,2</sup>, CAO Chun-xiao<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, MAO Wei<sup>1</sup>,

LI Xiao-hong<sup>1</sup> (1 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095,

China; 2 School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

**摘要:** 用高 Nb 的 Ti-4Al-Nb 基合金作填充金属钨极氩弧焊 TD3 合金, 探讨了焊后时效处理和焊后固溶+ 时效处理状态下母材及其接头显微结构和力学性能特点。结果表明: 接头进行焊后固溶+ 时效处理相对较合理, 热影响区、焊缝区分别为其室温、高温力学性能的薄弱区域; 与焊后时效处理相比, 焊后固溶+ 时效处理状态下母材力学性能较低, 这主要归因于热处理过程中片状相粗化。

**关键词:** Ti<sub>3</sub>Al 基合金; 钨极氩弧焊; 焊后热处理; 显微结构; 力学性能

**中图分类号:** TG457.19 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2008)01-0068-05

**Abstract:** TD3 alloy was welded by Tungsten Inert Gas (TIG) welding with a Ti-4Al-Nb based alloy filler. The microstructure and mechanical properties of the base metal and the joint under postweld aging treatment condition and postweld solution plus aging treatment condition were investigated. The results showed that postweld solution plus aging treatment was relatively suitable for the joint. Heat affect zone and weld had the lowest tensile strength at room temperature and at 650 °C, respectively. Due to the coarsening of the plated phase, the mechanical properties of the base metal with postweld solution plus aging treatment were lower than those with postweld aging treatment.

**Key words:** Ti<sub>3</sub>Al based alloy; Tungsten Inert Gas (TIG) welding; postweld heat treatment; microstructure; mechanical property

与镍基高温合金和高温钛合金相比, Ti<sub>3</sub>Al 基合金具有体积小、高温性能好的特点, 是航空航天工业中具有工程应用潜力的新型轻质中高温结构材料之一<sup>[1-3]</sup>。Ti<sub>3</sub>Al 基合金自身及与其他材料焊(连)接问题的解决, 是进一步扩大其工程应用范围的一项重要技术。

适用于 Ti<sub>3</sub>Al 基合金焊接的熔化焊方法主要有电子束焊、激光焊和钨极氩弧焊。现有研究表明, 采用合适的焊接工艺规范能够获得完整的接头, 存在的主要问题是常温下塑性不足以及由此引起的固态裂纹<sup>[4]</sup>。钨极氩弧焊作为一种通用的焊接方法, 工艺操作灵活, 尤为适合制备复杂结构。若能够在焊接过程中克服上述难点, 必将提高构件设计的灵活性。时至今日, 它的钨极氩弧焊均不使用填充金属, 且必须进行焊前高温预热处理<sup>[5-7]</sup>。如果在焊接过程中采用合适

的填充金属, 调整焊缝区化学成分, 并合理选择焊接工艺, 获得具有一定使用性能的钨极氩弧焊接头是可行的。TD3 合金是新一代无 V 的 Ti-4Al 基合金, 其优化和调整后的名义成分为 Ti-24Al-15Nb-1Mo (原子分数/%)。用含有高 Nb 的 Ti-4Al-Nb 基合金作填充金属钨极氩弧焊 TD3 合金的前期实验结果显示, 焊缝中未见裂纹、气孔等任何缺陷, 接头力学性能也较佳<sup>[8]</sup>。因此, 本工作将进一步探讨不同焊后热处理工艺(焊后时效处理和焊后固溶+ 时效处理)条件下该接头的显微组织与力学性能特点, 较全面地认识它的焊接性, 完成相关基础数据积累, 为焊接工艺选择等深层次工作提供参照。

## 1 实验

实验用母材为 TD3 合金, 填充金属为含有高 Nb

的  $Ti-41Nb$  基合金。母材采用真空自耗电弧炉与真空铸造凝壳炉相结合的 CS 工艺熔炼, 铸锭  $\beta$  相区开坯, 再经  $\alpha_2 + \beta$  区锻造, 固溶处理(固溶温度  $980^\circ C$ , 保温时间 1h, 空冷) 后用线切割方法加工成规格尺寸为  $105.0mm \times 50.0mm \times 2.0mm$  的试板。填充金属采用真空自耗电弧炉熔炼, 用线切割方法加工成截面尺寸为  $2.5mm \times 2.5mm$  的方条。

焊接前对母材和填充金属依次进行除油、去氧化膜处理, 装配在特定的夹具上进行焊接。接头形式为对接接头, Y 形坡口(钝边高度 1.0mm, 坡口角度  $90^\circ$ ), 根部间隙 1.0mm。焊接采用手工钨极氩弧(TIG) 焊(充氩箱中) 方法, 单面焊双面成形。焊缝进行 X 射线探伤检验合格再进行焊后热处理。焊后热处理工艺有两种: 焊后时效处理和焊后固溶+ 时效处理, 均在箱式电阻炉(充氩保护) 内进行。焊后时效处理由“高温/ 低温” 时效序列组成, 第一级: 时效温度  $815^\circ C$ , 保温时间 1h, 空冷; 第二级: 时效温度  $700^\circ C$ , 保温时间 8h, 空冷。焊后固溶处理工艺规范为: 固溶温度  $980^\circ C$ , 保温时间 1h, 空冷。

选用抗拉强度( $\sigma_b$ )、延伸率( $\delta_5$ ) 和冲击韧性( $a_{ku}$ ) 作为力学性能评价指标, 实验值为三个实测值的平均值。母材和焊接接头板形拉伸试样工作部分尺寸分别为  $a = 1.0mm$ ,  $b = 3.0mm$ ,  $L_0 = 10.0mm$  和  $a = 2.0mm$ ,  $b = 6.0mm$ ,  $L_0 = 20.0mm$ , U 型冲击试样尺寸为  $55.0mm \times 10.0mm \times 2.0mm$ , 其中焊接接头力学性能试样以焊缝轴线为对称轴且垂直于焊缝加工。依据标准 HB5143-96 在 Instron-4507 试验机上进行拉伸实验; 依据标准 HB5144-96 在 HB5 试验机上进行冲击实验。金相试样用氢氟酸(1~3mL)、硝酸(4~6mL) 和水(100mL) 的混合液进行腐蚀。采用材料图

像分析系统(PMG3 型)、配能谱仪的扫描电镜(SEM) (JSM-5600 型) 和 X 射线衍射仪(D/M ax 2500PC 型) 研究接头显微结构、断口形貌及相组成。

2 结果与分析

2.1 接头显微结构

图 1-4 为不同焊后热处理状态下 TD3 合金及其钨极氩弧焊接头显微结构和 X 射线衍射分析结果。由图 1a 可见, 焊后时效处理状态下母材(BM) 中片状  $\alpha_2/O$  相尺寸小, 且 O 相居多。此时接头显微结构如图 2 所示。由图 2 可以看出, 浸蚀后接头的近热影响区(Near-HAZ) 与焊缝区(weld) 在光学显微镜下仅晶界清晰可见, 晶内组织特征不明显, 即便扫描电镜下观察也如此。X 射线衍射分析结果显示(见图 3), 焊后时效处理状态下 Near-HAZ 和焊缝区均由  $\alpha_2$  相、O 相和  $\beta/B2$  相组成。焊后固溶+ 时效处理状态下, 母材中片状  $\alpha_2/O$  相尺寸(见图 1b) 增大; Near-HAZ 和焊缝区也主要由  $\alpha_2 + O + \beta/B2$  组成, 但各个区域具有自身的显微结构特点(见图 4)。由图 4a 可以看到, 邻近母材区的远热影响区(Far-HAZ) 由部分溶解的等轴  $\alpha_2$  相、片状  $\alpha_2/O$  相和基体组成; 邻近 Near-HAZ 的 Far-HAZ 为具有网篮排列图案的层片组织。(网篮组织), 其上存在一定数量未来得及完全溶入基体的等轴  $\alpha_2$  相(见图 4b)。随着至 Near-HAZ 距离愈近, 网篮组织中集束(在一定区域内形成同向排列) 愈大, 未来得及完全溶入基体的等轴  $\alpha_2$  相逐渐消失。Near-HAZ (见图 4c) 和焊缝区(见图 4d) 均为网篮组织, 且集束大, 焊缝区尤为显著。

$Ti_3Al$  基合金中, 可以用具有原子序数衬度效应

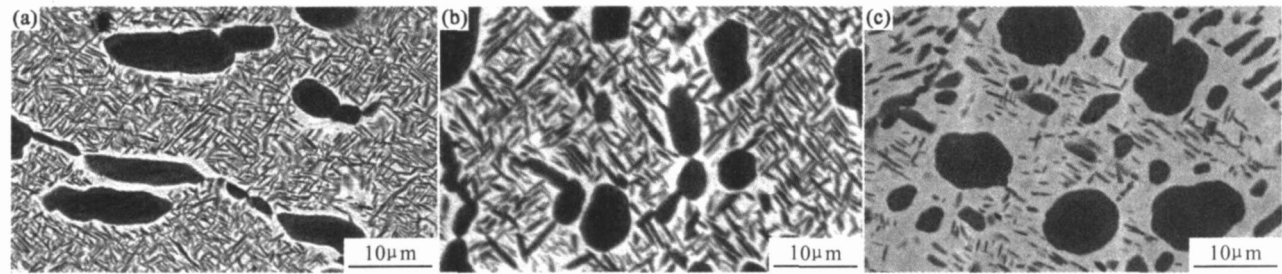


图 1 不同焊后热处理状态下 TD3 合金背散射电子图像

(a) 焊后时效处理; (b) 焊后固溶+ 时效处理; (c) 未焊后热处理

Fig 1 Microstructure of TD3 alloy under different postweld heat treatment conditions (BEI)

(a) postweld aging treatment; (b) postweld solution plus aging treatment; (c) as-welded

的背散射电子图像的衬度差异来鉴别相的类型, 即  $\alpha_2$  相在图象中最暗、B2 相最亮、O 相居中, 这是由于各相

中 Al 和 Nb 含量存在明显的差异(Al 含量在  $\alpha_2$  相最高、O 相居中、B2 相最低, Nb 含量在  $\alpha_2$  相最低、O 相居

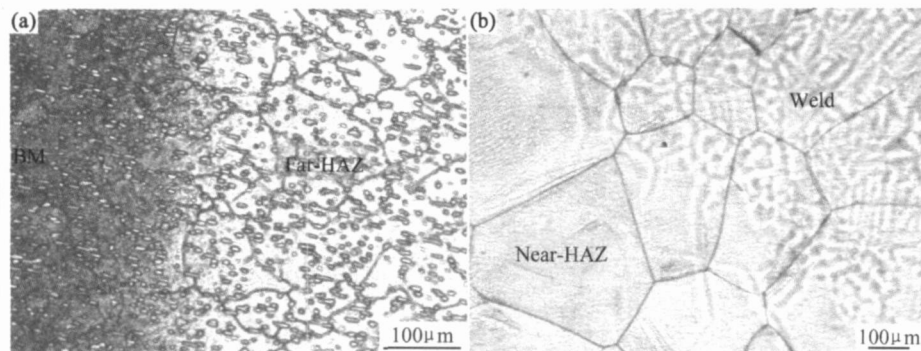


图 2 光学显微镜下焊后时效处理时 TD3 合金钨极氩弧焊接头显微结构 (a) 母材+ Far-HAZ; (b) Near-HAZ+ 焊缝区

Fig. 2 Microstructure of TIG welded joint of TD3 alloy under postweld aging treatment condition (OM)

(a) BM + Far-HAZ; (b) Near-HAZ+ weld

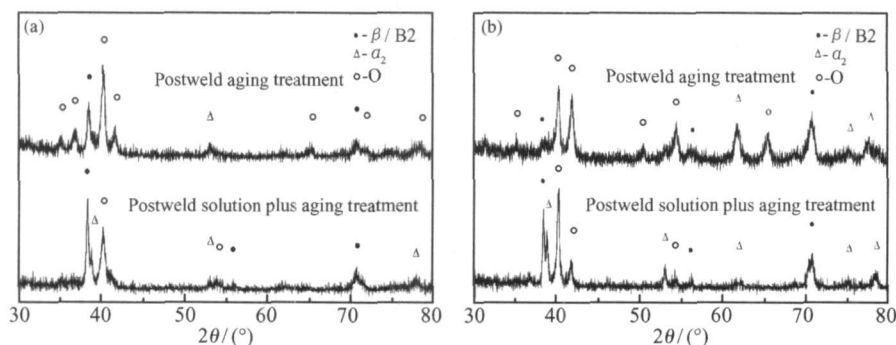


图 3 不同焊后热处理状态下 TD3 合金钨极氩弧焊接头 X 射线衍射分析 (a) Near-HAZ; (b) 焊缝区

Fig. 3 X-ray diffraction patterns of TIG welded joint of TD3 alloy under different postweld heat treatment conditions

(a) Near-HAZ; (b) weld

中、B2 相最高)。未焊后热处理时母材背散射电子图像见图 1c。片状  $\alpha_2$ /O 相数量少、尺寸小,且大部分为 O 相,它们形成于  $\alpha_2 + \beta$  两相区的锻造及随后的固溶处理;基体由次生  $\alpha_2$  相、次生 O 相及残留  $\beta$ /B2 相构成,形成于冷却过程中。前期工作结果表明,未焊后热处理时 Near-HAZ 和焊缝区的相组成主要为 B2 相。B2 相是亚稳态  $\beta$  有序化点阵结构,在随后的热处理过程中将发生分解,具体转变过程与材料主要化学成分、焊接时峰值温度、热处理工艺及其规范等因素密切相关。

对比焊后时效处理前、后母材背散射电子图像(图 1c 和图 1a)可知,本实验条件下 TD3 合金在焊后时效处理过程中有  $\alpha_2$  相和 O 相析出且大部分为 O 相。焊接热影响区为受热循环作用而发生组织与性能变化的母材,它们有相近的 B2 相转变过程。所以,焊后时效处理状态下 Near-HAZ 由  $\alpha_2$  相, O 相和  $\beta$ /B2 组成。与母材相比,焊缝区化学成分的特点是含 Al 量略低、含 Nb 量较高。随 Nb 含量增加,相变动力学变慢, O 相稳定区的温度上限提高。因而,焊后时效处理过程中焊缝区也有  $\alpha_2$  相和 O 相析出,也由  $\alpha_2$  相, O 相和  $\beta$ /

B2 相构成。此时, Near-HAZ 和焊缝区中析出的  $\alpha_2$  相和 O 相极其细小,在光学显微镜和扫描电镜下难以分辨。

为了认识焊后固溶+时效处理过程中 TD3 合金及其接头显微结构变化规律,在扫描电镜下观察了焊后固溶处理状态下它们的显微结构。结果显示,母材及其接头显微结构已具有类似图 1b 和图 4 所示的形貌特征。这表明其显微结构主要取决于焊后固溶处理工艺。固溶温度下母材和焊缝区合金处于  $\alpha_2 + O + B2$  区。焊后固溶处理状态下母材, HAZ 和焊缝区均可见析出的  $\alpha_2$  相和 O 相,它们在各个区域中形貌取决于焊接热循环。在母材中,这些析出的  $\alpha_2$ /O 相为片状,有的形成于原有  $\alpha_2$ /O 相的长大,有的形成于剩余 B2 相中析出、长大,它们的尺寸因焊后固溶温度较高而增大(相对焊后时效处理)。在邻近母材区的 Far-HAZ,焊接时合金中片状相被快速溶解、等轴  $\alpha_2$  相逐渐被溶解,峰值温度低于单相区。焊后固溶处理时,此区析出的  $\alpha_2$ /O 相仍为片状。在邻近 Near-HAZ 的 Far-HAZ,焊接时等轴  $\alpha_2$  相已被溶解,但还没有来得及完全溶入基体,峰值温度已进入单相区。所以,焊后固溶

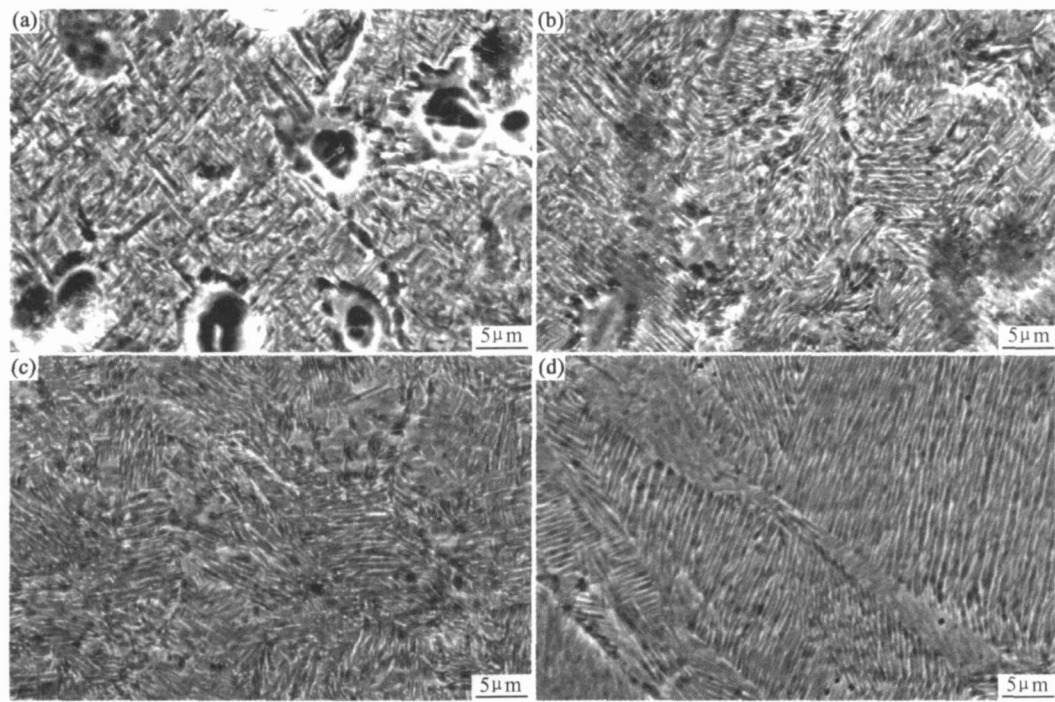


图 4 焊后固溶+ 时效处理状态下 TD3 合金钨极氩弧焊接头显微结构(SEM)

(a) 邻近母材区的 Far-HAZ; (b) 邻近 Near-HAZ 的 Far-HAZ; (c) Near-HAZ; (d) 焊缝区

Fig 4 Microstructure of TIG welded joint of TD3 alloy under postweld solution plus aging treatment condition (SEM)

(a) Far-HAZ of base material side; (b) Far-HAZ of Near-HAZ side; (c) Near-HAZ; (d) weld

处理时, 此区的  $\alpha_2/O$  相以层片状析出。在 Near-HAZ, 焊接时片状相与等轴  $\alpha_2$  相完全溶入基体, 晶粒长大; 焊缝区为铸造组织。因此, 焊后固溶处理时这两个区域的  $\alpha_2/O$  相也以层片状析出, 集束随晶粒尺寸提高而增大, 焊缝区尤为显著。随后的时效处理过程中, 各个区域继续发生相应的转变, 得到图 1b 和图 4 所示显微结构。

2.2 接头力学性能

表 1 给出了不同焊后热处理状态下 TD3 合金及其钨极氩弧焊接头力学性能实验结果, 接头拉伸试样断口形貌见图 5。由表 1 可以看到, 焊后时效处理状态下, 室温时接头抗拉强度 755MPa、接头延伸率 1.5%、焊缝冲击韧性  $3.9J \cdot cm^{-2}$ , 明显低于母材力学性能 ( $\sigma_b = 1014MPa$ ,  $\delta_5 = 5.0\%$ ,  $\alpha_{ku} = 6.0J \cdot cm^{-2}$ )。拉伸断裂发生在 HAZ。宏观下, 断口较平直, 表面呈浅灰色; 微观分析可见, 断口表面多为解理断裂, 还有少量沿晶断裂(见图 5a)。焊后固溶+ 时效处理状态下, 室温时, 接头抗拉强度 934MPa, 略低于母材抗拉强度(953MPa); 接头延伸率 2.1%, 接近母材延伸率(4.5%)的一半; 焊缝冲击韧性  $8.0J \cdot cm^{-2}$ , 高于母材冲击韧性( $5.5J \cdot cm^{-2}$ )。拉伸断裂发生在热影响区, 并且多位于邻近焊缝区侧。宏观下, 断口较平直, 表面呈灰色; 微观分析显示, 断裂形式主要为解理断裂(见

图 5b)。高温(650℃)时, 接头抗拉强度 534MPa, 达到了母材抗拉强度(661MPa)的 80%; 接头延伸率 4.5%, 低于母材延伸率(10.7%)。拉伸断口均位于焊缝区, 断口附近有较明显的塑性变形。由此可见, 接头进行焊后固溶+ 时效处理相对较合理, 它具有较高的室、高温力学性能, 热影响区、焊缝区分别是其力学性能的薄弱区域。所以, 减小接头力学性能薄弱区域, 改善它们的力学性能, 是进一步提高接头力学性能的有效途径之一。与焊后时效处理相比, 焊后固溶+ 时效状态下母材力学性能略有下降。适当调整焊接前、后热处理工艺及其制度, 改善母材力学性能, 成为后续研究工作中的一项主要内容。

$Ti_3Al$  基合金力学性能取决于其显微结构。它有四种典型组织: 魏氏组织、网篮组织、双态组织和等轴组织。魏氏组织, 室温塑性非常低, 不具有工程意义; 网篮组织, 高温蠕变、持久性能较好, 室温塑性、断裂韧性较差; 等轴组织, 室温塑性、断裂韧性较佳, 高温蠕变、持久性能略为逊色; 双态组织, 具有较优综合性能。同时, 每一种显微组织中相的尺寸、含量、形态等对其力学性能也有影响<sup>[1]</sup>。焊后时效处理状态下, HAZ 合金力学性能低, 导致了其接头力学性能下降。焊后固溶+ 时效处理状态下, 母材、邻近母材区的 Far-HAZ 为双态组织, 邻近 Near-HAZ 的 Far-HAZ、Near-HAZ 和焊缝区为网篮组织。因此, 接头具有较好的室、高温

表 1 不同焊后热处理状态下 TD3 合金及其钨极氩弧焊接头力学性能对比

Table 1 Comparison of mechanical properties after postweld heat treatment of TD3 alloy with those of the TIG welded joint

Heat treatment condition	Test temperature/ °C	Tensile property				Impact property	
		$\sigma_b$ / MPa		$\delta_5$ / %		$a_{ku}$ / (J • cm <sup>-2</sup> )	
		Welded joint	Base metal	Welded joint	Base metal	Welded joint	Base metal
Postweld aging treatment	Room temperature	755	1014	1.5	5.0	3.9	6.0
	650		770		13.8		
Postweld solutionplus aging treatment	Room temperature	934	953	2.1	4.5	8.0	5.5
	650	534	661	4.5	10.7		

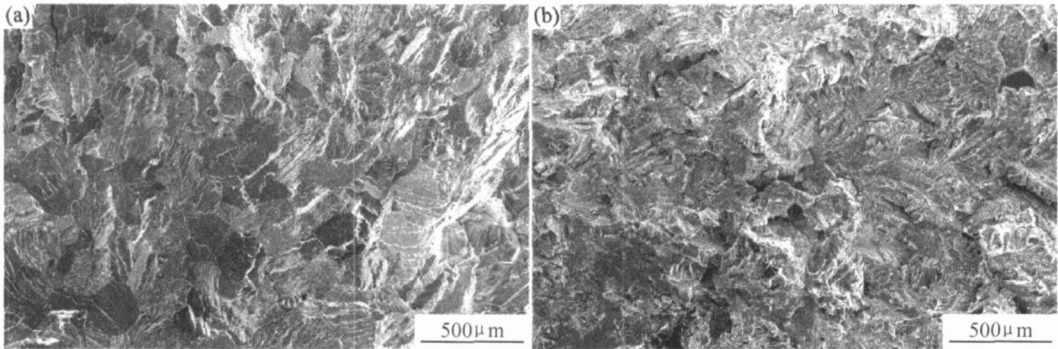


图 5 不同焊后热处理状态下 TD3 合金钨极氩弧焊接头拉伸试样断口形貌(室温)  
(a) 焊后时效处理; (b) 焊后固溶+ 时效处理

Fig 5 Fracture morphology of tensile sample of TIG welded joint of TD3 alloy under different postweld heat treatment conditions at room temperature  
(a) postweld aging treatment; (b) postweld solution plus aging treatment

力学性能, HAZ 是接头室温力学性能的薄弱区域。高温拉伸时, 焊缝金属屈服强度较低, 接头塑性变形主要产生于焊缝区, 故断裂发生于此。焊后固溶+ 时效处理状态下母材力学性能降低, 依据实验结果分析认为主要归咎于焊后固溶处理时 TD3 合金中片状相粗化。降低固溶温度或缩短固溶时间是相应的防止措施。较低的固溶温度有利于 Ti<sub>3</sub>Al 基合金塑性, 有益于降低材料的焊接裂纹敏感性。所以, 降低焊接前、后固溶温度, 改善母材显微结构和力学性能是可行的。

3 结论

- (1) 与焊后时效处理相比, 焊后固溶+ 时效处理对 TD3 合金钨极氩弧焊接头力学性能有利, 热影响区和焊缝区依次为接头室、高温力学性能的薄弱区域;
- (2) 焊后固溶+ 时效处理状态下 TD3 合金力学性能略有降低, 归因于其片状相的粗化。

参考文献

[1] 曹京霞, 孙福生, 曹春晓, 等. Ti<sub>3</sub>Al 基合金研究进展[ J]. 材料工

程, 2001, (增刊): 90- 92.  
[2] 张永刚, 韩雅芳, 陈国良, 等. 金属间化合物结构材料[ M ]. 北京: 国防工业出版社, 2001.  
[3] 彭超群, 黄伯云, 贺跃辉. Ni-Al 系、Fe-Al 系和 Ti<sub>3</sub>Al 金属间化合物研究进展[ J ]. 特种铸造及有色合金, 2001, (6): 27- 29.  
[4] 任家烈, 吴爱萍. 先进材料的连接[ M ]. 北京: 机械工业出版社, 2000.  
[5] 刘博, 武英, 周朝霞, 等. Ti-23Al-14Nb-3V 合金氩弧焊接头的显微组织及其力学性能[ J ]. 材料科学与工艺, 1997, 5(1): 45- 49.  
[6] REDDY G M, MOHANDAS T, CHANDRESHEKAR K. Observations on welding of  $\alpha_2$  + O +  $\beta$  titanium aluminide[ J ]. Science and Technology of Welding and Joining, 2001, 6(5): 300- 304.  
[7] SAMUEL CHRISTY. A study of the weldability of  $\alpha$ -2 titanium aluminide[ D ]. USA: University of Cincinnati, 1995.  
[8] 刘卫红, 李艳, 毛唯, 等. Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金氩弧焊[ J ]. 航空材料学报, 2005, 26(3): 111- 115.

收稿日期: 2006-12-04; 修订日期: 2007-07-24  
作者简介: 刘卫红(1969- ), 女, 副教授, 在职博士后, 主要从事材料焊(连)接技术研究, 联系地址: 北京 81 信箱 20 分箱(100095)。E-mail: lwh2028@126.com