

T 添加纯钛夹层对 TA15 钛合金电子束焊接接头力学性能的影响

Influence of Adding Pure Titanium Interlayer on Mechanical Property of Electron Beam Welded TA15 Joint

中航工业沈阳飞机设计研究所 贺飞
中国科学院金属研究所东北大学材料与冶金学院 李士一
中国科学院金属研究所 雷家峰

[摘要] 为了进一步优化 TA15 钛合金电子束焊接接头的强韧性匹配,研究了添加纯钛夹层对焊接接头力学性能的影响。利用扫描电镜对焊接接头显微组织进行了表征,对添加不同纯钛夹层条件下焊接接头的硬度、拉伸性能、冲击韧性、断裂韧性进行对比分析。研究表明:添加纯钛夹层对焊缝显微组织形态无明显影响;焊缝熔合区中部硬度存在低谷,而硬度在热影响区则出现峰值。

关键词: TA15 钛合金 电子束焊接接头 纯钛夹层 强韧性匹配

[ABSTRACT] In order to further optimize the strength and toughness of the electron beam welding (EBW) joints of TA15 titanium alloy, the effect of pure titanium interlayer on mechanical properties of EBW joint is studied. Scanning electron microscope (SEM) is used to characterize the microstructure of the EBW joints. Hardness, tensile properties, impact toughness, fracture toughness of welded joint with different pure titanium interlayers are compared and analyzed. The results show that the addition of pure titanium interlayer has no obvious effect on the microstructure morphology of the joint. The hardness of fusion zone is relatively lower, and the hardness of the heat affected zone appears peak.

Keywords: TA15 titanium alloy Electron beam welded joint Pure titanium interlayer Matching strength and toughness

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.17.082

电子束焊接是钛合金板材一种先进的焊接形式。它利用定向高速运动的电子束撞击工件表面,将部分动能转化成热能,使被焊金属熔化、冷却结晶后形成焊缝。电子束焊的主要特点是加热功率密度大,能量集中,热

效率高,热影响区窄小,焊接变形小,接头焊缝的熔深比大。熔池周围在真空保护环境下,焊接质量良好^[1]。因为钛的化学性质活泼,在 400℃以上开始和空气中的氧、氮、氢、碳发生化学反应,高于 600℃时进行剧烈反应,所以钛合金非常适合于采用真空电子束焊接技术进行连接加工^[2]。目前国内通过多种科研渠道,针对大厚度 TC4 合金、TA15 合金以及 TC4-DT 合金等主要结构钛合金进行了深入的电子束焊接工艺研究。目前采用大功率电子束焊接深熔穿透焊接成形技术,并运用扫描搅拌焊接方法进行性能调控,形成了稳定的焊接工艺,积累了丰富的工艺经验及数据,并成功应用于国内先进飞机的研制。

相比其他焊接方式,采用常规电子束焊接的热输入较小,焊缝熔合区及热影响区在高温停留时间较短,焊接接头冷却速度较快,使焊接接头区易出现马氏体组织,焊缝的强度较高,但塑性及韧性较低^[3]。为了综合优化焊接接头的强度韧性匹配,研究了电子束焊接过程中添加纯钛夹层的焊接工艺对焊接接头力学性能的影响,工艺总体思路是通过降低焊接接头的合金化程度,降低焊接接头强度的同时提高其韧性。本文相关工作对钛合金电子束焊接工艺优化有一定的指导作用。

1 试验材料及方法

以 62mm 厚度的 TA15 钛合金板材为实验材料,开展了相关焊接工艺试验。TA15 钛合金属于 Ti-Al-Zr-Mo-V 系的高 Al 当量近 α 型钛合金,其强化机制主要是通过 α 稳定元素 Al 的固溶强化,同时也加入了少量的中性元素 Zr 和 β 稳定元素 Mo、V。该合金具有中等强度水平,兼有 α 型和 $\alpha + \beta$ 型钛合金的许多优点,同时还具有接近于 $\alpha + \beta$ 型钛合金良好的工艺塑性和 α 型合金的良好焊接性能。TA15 钛合金具有中等的室温和高温强度、良好的热稳定性和焊接性能^[4]。

焊前用钢丝刷打磨 TA15 合金试板、纯钛嵌条及垫板各面,再用丝绸布蘸丙酮擦拭干净。纯钛镶板焊前进行酸洗处理。试板两端对接焊缝用氩弧焊连续定位,焊丝采用 $\phi 2.5\text{mm}$ 的 TA0-1 焊丝,焊接电流为 216A。试板与垫板之间进行 3 处 30mm 长焊缝定位。

开展了 3 种焊接试验工艺方案,焊接方式及参数见表 1。焊后采用大气环境下的普通退火热处理,焊后热处理规范为 800°C 保温 2.5h 后空冷。

2 试验结果及讨论

2.1 焊缝低倍及高倍形貌

图 1 为试件上下表面分别加工去 1mm、0.5mm 后焊缝的横截面低倍组织形貌。3 种焊接工艺均能获得较为理想的平行焊缝形态。图 2 为焊接接头母材及不同状态的焊缝高倍显微组织形貌,其中母材为典型的双态组织形貌。由于电子束焊接过程中熔合区内冷却速度较快,易形成亚稳脆性相,导致焊接接头的韧性较低。采用焊后 800°C 并保温 2.5h 的热处理后,无夹层及添加纯钛夹层焊缝的熔合区晶粒内部均形成了网篮交织状

表1 TA15试件焊接工艺方案与规范

样片编号	添加纯钛层	电子束焊工艺参考数			
		电压/kV	聚焦电流/A	工作电流/mA	工作速度/mm ($\cdot \text{min}^{-1}$)
1#	不添加	55	2.01	350	300
2#	纯 Ti 板 厚度 0.76mm	55	2.01	350	300
		55	2.08	350	300
3#	厚度 0.94mm	55	2.08	350	300

的 α 片层,说明亚稳相得到分解,显著改善了焊缝的显微组织形貌。

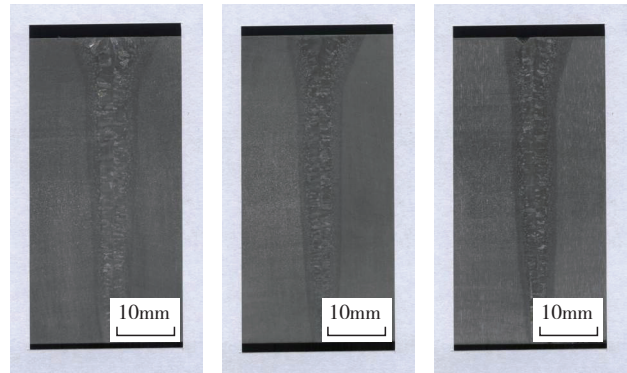
2.2 焊缝厚度方向元素分布测试结果

在扫描电子显微镜上采用能谱仪测量了 2#、3# 焊接试板焊缝熔合区中主要元素沿焊缝厚度的浓度变化,分别如图 3、图 4 所示。由于焊缝熔合区的熔宽由上向下逐渐变窄,因此纯钛板对熔合区元素的稀释作用逐渐增强。图 3、图 4 中,焊缝熔合区由上向下,纯 Ti 在焊缝中所占的比例增加,而 Al、V、Zr、Mo 含量呈降低趋势。进一步对比纯钛板厚度对元素分布的影响,图 3、图 4 中 0.76mm、0.94mm 纯钛板厚度的差异对元素含量分布的影响较小。通过添加纯钛,对焊接接头特别是熔合区内的合金化程度进行了优化,为调控焊接接头的力学性能建立了基础。

2.3 焊接接头硬度测试结果

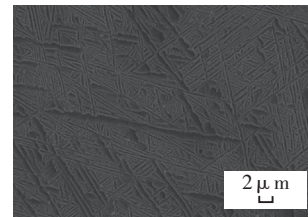
对不添加纯钛板的 1# 试板及添加 0.76mm 钛板的 2# 试板焊缝横向维氏硬度进行了测试,测试结果如图 5

所示。无纯钛夹层的母材位置的硬度水平相对为最低,由于焊缝区凝固过程中冷却速度较快,形成细小的显微

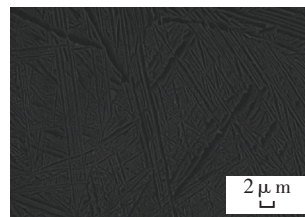


(a) 无纯钛夹层 (b) 镶 0.76mm 厚纯钛板 (c) 镶 0.94mm 厚纯钛板

图1 3种不同焊接工艺下TA15板材焊接接头低倍组织形貌
Fig.1 Macro morphology of TA15 joints under three kinds of welding process



(a) 无夹层焊缝熔合区



(b) 添加 0.76mm 纯钛板的焊缝熔合区



(c) 母材区

图2 TA15合金试板焊接接头高倍显微组织形貌

Fig.2 Microstructural morphology of EBW joint of TA15 alloy

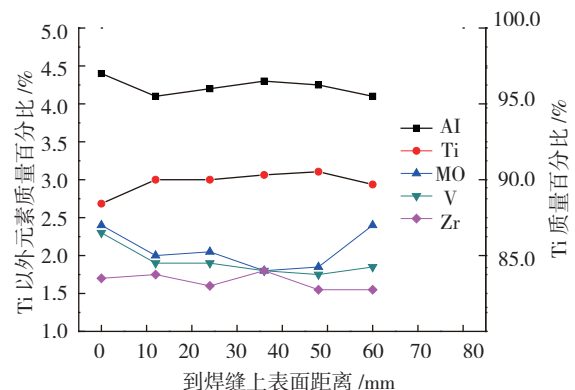


图3 2#焊接试板(镶0.76mm纯钛板)焊缝熔合区厚度方向元素含量分布

Fig.3 Distribution of element content along thickness direction of fusion zone of 2# plate (with pure titanium plate of 0.76 mm)

组织,因此随着距焊缝中心线距离的缩短,硬度值急剧上升,在近缝区附近达到峰值^[5]。而采用中间纯钛夹层的焊缝中间熔合区存在硬度低谷,在热影响区硬度出现峰值,这是由于熔合区的合金化程度降低,降低了硬度,热影响区合金化未受到明显影响,并且热影响区的冷却受到熔合区的影响同样较快,因此在热影响区的硬度最

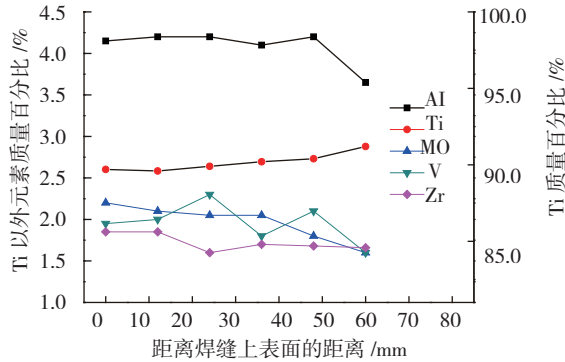


图4 3#焊接试板(镶0.94mm纯钛板)焊缝熔合区厚度方向元素含量分布

Fig.4 Distribution of element content along thickness direction of fusion zone of 3 # plate (with pure titanium plate of 0.94mm)

高。

2.4 拉伸性能

表2、表3分别为3种焊接工艺下焊接接头的室温、高温拉伸性能检测结果。可以看出随着添加纯钛夹层及夹层厚度的增加,焊接头的拉伸强度整体上略有降低,这主要归结于焊缝位置合金化水平降低。

表4为3种焊接工艺下焊接接头的室温冲击、断裂韧性试验结果。可以看出,随着焊缝区域合金化程度的降低,焊缝的冲击韧性及断裂韧性均获得了提升。镶0.94mm纯钛板的焊缝韧度达到42.8J/cm²,且厚度方向韧度变化不大,断裂韧性达到93MPa,可见焊缝的的韧性较常规焊接工艺获得了较大提升。

图6为不同工艺焊缝断裂韧性试样的断口SEM照

表3 3种焊接工艺下TA15试板电子束焊接头500℃高温拉伸性能试验结果

样品编号	添加纯钛层	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$	$Z/\%$	断裂位置
		均值	均值	均值	均值	
1#	不添加	508	641	14.2	64.4	母材1
2#	镶纯钛板 δ 0.76	496	634	11.6	57.6	热影响区与熔合区界面
3#	镶纯钛板 δ 0.94	488	624	12.4	65.0	热影响区与熔合区界面

表4 3种焊接工艺下TA15试板电子束焊接头室温冲击韧性及断裂韧性

样品编号	添加纯钛层	断链韧性(均值)/(MPa·m ^{1/2})	冲击韧性(均值) $K_{IKI}/(\text{J}\cdot\text{cm}^{-2})$
1#	不添加	77	37.8
2#	镶0.76mm纯钛板	90	38.5
3#	镶0.94mm纯钛板	93	42.8

片。无中间夹层焊缝断口以解理断裂特征为主,解理面上韧窝的出现表明塑性变形特征增强,并且断口上还出现二次裂纹。这都意味着裂纹扩展需要消耗更多的能量,因此所表现出的断裂韧度增加。采用镶纯钛板焊缝断口,解理特征进一步增强,解理面边缘撕裂韧窝特征明显,解理面上的韧窝也变大变深,因此断裂韧度比无中间夹层焊缝提高。图7为不同工艺焊缝冲击韧度试样的断口SEM照片,无中间夹层焊缝断口呈现沿晶与解理断裂混合特征。采用镶纯钛板的焊缝断口,解理特征进一步增强,因此断裂韧度比无中间夹层焊缝显著提高。

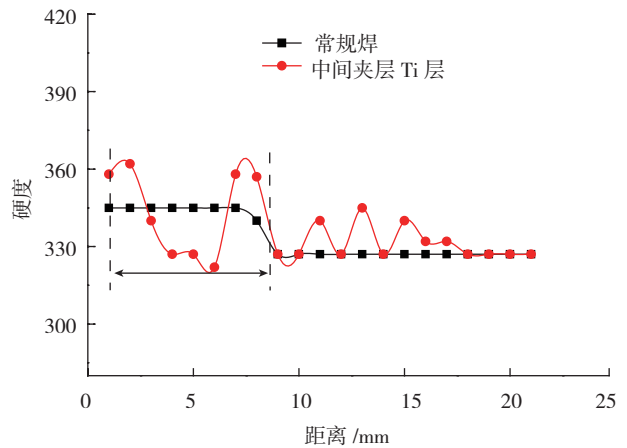


图5 1#及2#焊接试板焊缝横向硬度分布

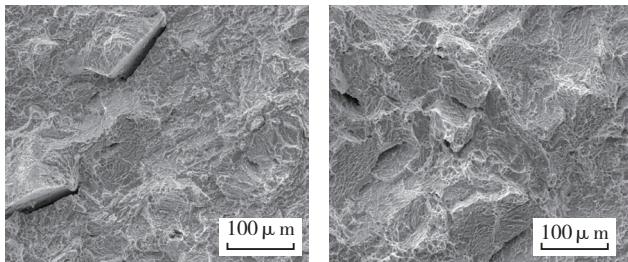
Fig.5 Distribution of hardness of joints with transverse direction of 1 # and 2 # plates

表2 3种焊接工艺下TA15试板电子束焊接头室温拉伸性能试验结果

样品编号	添加纯钛层	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$	$Z/\%$	断裂位置
		均值	均值	均值	均值	
1#	不添加	882	953	12.2	47.0	母材
2#	镶纯钛板 δ 0.76	876	957	13.0	47.2	母材
3#	镶纯钛板 δ 0.94	855	947	11.4	43.1	母材

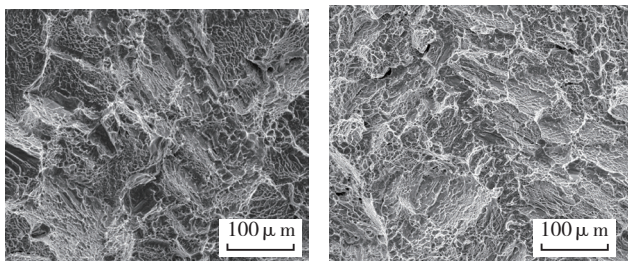
3 结论

(1) 焊后采用普通退火处理,使焊缝熔合区晶粒内部 α 片层充分生长,焊缝的过饱和状态得到有效缓解。普通退火处理对母材的组织性能影响不大,却可以显著改善焊缝的显微组织特征。中间镶纯钛板对焊缝组织形态无明显影响。(2) 用中间纯钛夹层的焊缝熔合区存在硬度低谷,在热影响区硬度出现峰值。(3) 添加纯钛层后,焊缝合金化程度降低,焊接接头的拉伸强度略有降低,但仍可满足接头强度系数大于 0.9 的技术要求。(4) 通过添加纯钛夹层,并且配合相应的焊后热处理工艺,能够显著改善焊缝冲击韧性和断裂韧性。镶 0.94mm



(a) 1# 无夹层焊缝 (b) 3# 镶 0.94mm 纯钛板焊缝

图6 两种焊接工艺下焊缝断裂韧性试样断口扫描电镜形貌
Fig.6 Fracture morphology of fracture toughness specimens with two kinds of welding processes



(a) 1# 无夹层焊缝 (b) 3# 镶 0.94mm 纯钛板焊缝

图7 两种焊接工艺下焊缝冲击韧性试样断口扫描电镜形貌
Fig.7 Fracture morphology of impact toughness specimen with two kinds of welding processes:

纯钛板的焊缝冲击韧度达到 $42.8\text{J}/\text{cm}^2$, 断裂韧度最高达到 $93\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

参考文献

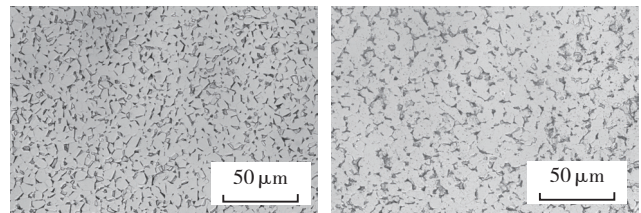
- [1] 李亚江. 焊接组织性能与质量控制. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [2] 李兴无, 沙爱学, 张旺峰. TA15 合金及其在飞机结构中的应用前景. 钛工业进展, 2003, 20:4-5.
- [3] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [4] 胡刚, 李晋炜, 付纲, 毛智勇. 热处理对 TA15 钛合金电子束焊接接头力学性能和微观组织的影响. 航天制造技术, 2005 (4): 1-4.
- [5] 王利发, 刘建中, 胡本润. TA15 钛合金电子束焊接接头力学性能. 焊接学报, 2007, 28(1):97-100.

(责编 叶枫)

(上接第 81 页)

3 结论

(1) 对 TC4 钛合金搅拌摩擦焊接后的板材超塑性进行了研究,发现搅拌头转速对锥形件的胀破压力和高度影响不大,120r/min 和 150r/min 两个搅拌摩擦焊参数的胀破压力分别为 0.7MPa 和 0.8MPa,最大高度分别为 76.2mm 和 74.5mm。(2) 经超塑成形后焊缝的微观组织长大显著,基本与母材在相同变形条件后的相当。这可能是由于搅拌头对微观组织破碎较为剧烈,晶粒内部存在畸变或亚晶,导致在 SPF 过程中晶粒长大明显。(3) 超塑成形后的焊接接头平均抗拉强度下降 11.7%,延伸率降低显著。



(a) 焊缝 (b) 母材

图9 超塑成形后焊缝和母材的微观组织
Fig.9 Microstructure of weld and base material after SPF

参考文献

- [1] 任淑荣, 马宗义, 陈礼清. 搅拌摩擦焊接及其加工研究现状与展望. 材料导报, 2007(01):86-92.
- [2] 栾国红, 柴鹏, 孙成斌. 钛合金的搅拌摩擦焊探索. 焊接学报, 2005, 26(11):83-88.
- [3] 郭和平, 曾元松, 韩秀全, 等. 飞机钛合金整体结构的超塑成形/焊接组合工艺技术. 焊接, 2008 (11):41-45.
- [4] Sanders D G, Ramulu M, Klock-McCook E J, et al. Characterization of superplastically formed friction stir weld in titanium 6Al-4V: preliminary results. Journal of Materials Engineering and Performance, 2008, 17(2):187-192.
- [5] Ramulu M, Edwards P D, Sanders D G, et al. Tensile properties of friction stir welded and friction stir welded-superplastically formed Ti-6Al-4V butt joints. Materials and Design, 2010 (31):3056-3061.
- [6] Sanders D G, Ramulu M, Edwards P D, et al. Effects on the surface texture, superplastic forming, and fatigue performance of titanium 6Al-4V friction stir welds. Journal of Materials Engineering and Performance, 2010, 19(4):503-509.
- [7] Daniel Sanders, Paul Edwards, Ramulu M. Optimization of the friction stir welding process for superplastic forming and improved surface texture for titanium aerospace structure. Key Engineering Materials, 2010(433):153-167.
- [8] Edwards P D, Sanders D G, Ramulu M. Simulation of tensile behavior in friction stir welded and superplastically formed-titanium 6Al-4V alloy. Journal of Materials Engineering and Performance, 2010, 19(4):510-514.
- [9] Sanders D G, Ramulu M, Edwards P D. Superplastic forming of friction stir welds in Titanium alloy 6Al-4V: preliminary results. Inter Science, 2008(39):4-5.

(责编 古京)