

TiAl 与 TC4 扩散焊接接头的组织与性能

杨荣娟¹ 黄源琦^{1,2} 薛志勇¹ 杨琴¹ 徐钢¹

(1 华北电力大学,北京 102206)

(2 华电淄博热电有限公司,淄博 255000)

文 摘 主要对 TiAl 基金属间化合物与 TC4 的扩散连接技术进行了研究。通过对钛铝基合金进行热处理,获得了高温性能良好的全片层组织;通过对扩散连接后的接头进行组织结构、力学性能和断口的分析发现,在 915℃/80 MPa/1 h 的扩散连接条件下, TiAl 基合金与 TC4 实现了冶金结合,在室温、400 和 500℃ 下,接头的抗拉强度分别达到了 TiAl 母材的 91.77%、95.27% 和 99.21%。

关键词 扩散连接,全片层组织,组织,性能

Structure and Joint Properties of Diffusion Bonded TiAl Alloy and TC4 Alloy

Yang Rongjuan¹ Huang Yuanxun^{1,2} Xue Zhiyong¹ Yang Qin¹ Xu Gang¹

(1 North China Electric Power University, Beijing 102206)

(2 Huadian Zibo Thermal Power Co. Ltd., Zibo 255000)

Abstract TiAl alloy was prepared using hot isostatic pressing process and the fully lamellar microstructure was achieved via heat treatment. Then the diffusion bonding of TiAl and TC4 was investigated. By the analysis of the microstructure, mechanical property and fracture surface, it is found that TiAl alloy and TC4 alloy can be jointed well under the conditions of 915℃/80 MPa/1 h, and the joint achieves metallurgical combination. The joint part appears both TiAl lamellar and TC4 rolling stripe. Strength of some joints exceeds the TiAl substrate. At room temperature, 400℃ and 500℃, the joint tensile strength reaches 91.77%, 95.27% and 99.21% of the TiAl substrate, respectively.

Key words Diffusion bonding, Full lamellar microstructure, Microstructure, Property

0 引言

TiAl 基合金具有较高的比强度、比模量,高温强度和抗蠕变能力,是一种有很大应用潜力的高温结构材料,其密度仅为 3.8 g/cm³,成为航空航天材料领域未来取代钛合金和镍基超合金的新宠^[1]。在该合金的使用过程中,不可避免的会遇到连接问题,特别是与异种金属的连接问题。与激光焊、电子束焊、摩擦焊等相比,扩散焊以其结合区域无凝固组织而不生成气孔和裂纹等熔焊缺陷、残余应力小、精度高、变形小、结合精密、可进行大面积板及圆柱连接的优点^[2],成为了近年研究的热点。本文利用钛合金的超塑性,对 TiAl 合金与 TC4 进行了扩散焊接,对接头的组织性能进行了研究。

1 实验

1.1 材料

TiAl 基金属间化合物为预合金粉在 1 200℃、压力≥130 MPa 的条件下,热等静压 4 h 所产生的 TiAl 坯料,其显微组织为近 γ 组织(NG),具有较好的力学性能,但高温性能低于全片层组织。TC4 为退火态棒材,其材料的组成为 Ti-6Al-4V,属于(α + β)型钛合金,比强度大,具有良好的力学性能。二者成分组成如表 1 所示。

表 1 TiAl 基金属间化合物和 TC4 合金的成分

Tab. 1 Composition of TiAl intermetallics and TC4 at%

材料	Ti	Al	Cr	Nb	W	B	V
TiAl	48.3	47	2	2	0.2	0.5	
TC4	余量	6					4

收稿日期:2012-10-28

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0849);北京市教委产学研合作项目(GJ2012002);国家重点基础研究发展计划(2011CB710706)

作者简介:杨荣娟,1980 年出生,博士。主要从事高温轻质材料制备及连接技术的研究。

通讯作者:薛志勇,1970 年出生,副教授,博士,主要从事高温轻质材料制备及连接技术的研究。E-mail:xuezy101@163.com

1.2 仪器设备

DSC 分析所用设备为耐驰 NETZSTH-DSC404C, 扩散连接所用设备为美国 DSI 科技 Gleeble 1500 热模拟试验机, 力学性能测试所用设备为日本岛津 SEM-SERVO 原位高温疲劳试验机, 对焊缝和断口的显微观察采用的是蔡司 EVO18 扫描电镜。

1.3 性能测试

将焊接件分别在室温、400、500、600℃ 下进行拉伸试验, 并与 TiAl、TC4 母材进行对比。拉伸载荷增量为 60 N/min, 在真空条件下进行。

1.4 热处理工艺

TiAl 基金属间化合物组织一般分为四种: 近 γ 组织(NG)、双态组织(DM)、近全片层组织(NFL)和全片层组织(FL), 而全片层组织的高温力学性能明显优于其他 3 种^[3]。

图 1 为 TiAl 基合金薄片 DSC 曲线, 可以看出试样从室温到 1 000℃ 左右一直处于缓慢吸热阶段, 1 000℃ 之后, 曲线下降, 说明此时试样中已经发生了缓慢的化学反应, 结合 Ti-Al 二元相图^[4]可知此为部分 α_2 晶向 α 晶转变, 过程中的温度变化使得吸热变缓, 曲线下降。图 1 中出现了两个吸热峰, 第一个吸热峰在 1 364℃ 左右, 说明此时发生了剧烈的温度变化, 伴随的是金属材料相的变化, 由于温度变化是一个延迟过程, 因此相变的起始点必然处于吸热峰之前, 即低于 1 364℃。Ti-Al 二元合金相图中, Ti-47Al 由单相 $\alpha+\gamma$ 相向 α 双相转变的温度大约为 1 350℃, 因此结合 DSC 分析结果和 Ti-Al 二元合金相图可以选择 TiAl 基合金由 NG 组织向 FL 组织转变的热处理温度为 1 355℃。

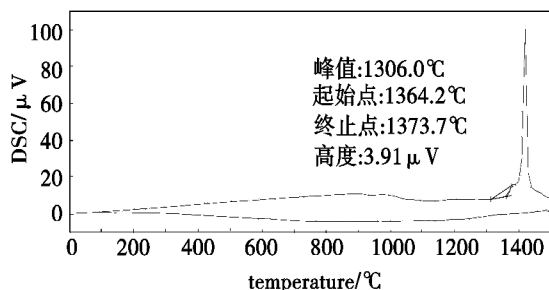


图 1 TiAl 基合金的 DSC 曲线

Fig. 1 DSC curve of TiAl alloy

为防止热处理过程中试样表面氧化, 采取了真空环境; 为使试样组织能够充分转变, 且降低骤冷可能带来的组织缺陷, 选择了加热到选定温度后保温 30 min 并随炉冷却的工艺。

最终确定的实验方案为真空环境下加热到 1 355℃, 保温 30 min 后随炉冷却, 得到了比较满意的全片层组织(图 2)。

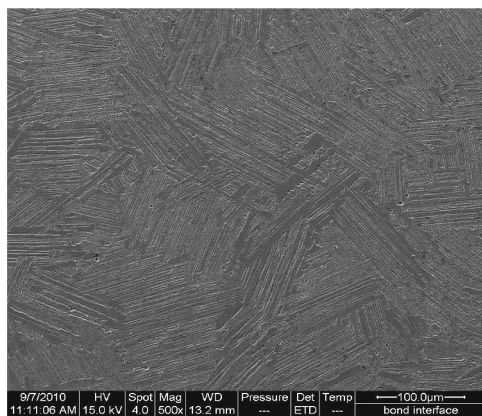


图 2 TiAl 基金属间化合物热处理后的全片层组织

Fig. 2 Fully lamellar microstructure of TiAl intermetallics after heat treatment

1.5 扩散连接工艺

将试样表面磨平, 并用超声波清洗后, 对 TiAl 和 TC4 进行了扩散连接。试样安装模型如图 3 所示。待焊试样外加装不锈钢保护套可以避免 TC4 合金在 850℃ 以上进行扩散连接处于超塑性状态而出现非焊接面的塑性变形, 保证了扩散连接实验的顺利进行。最终的扩散连接工艺参数为扩散连接温度 915℃, 压力 80 MPa, 保温保压时间 1 h, 氩气保护。

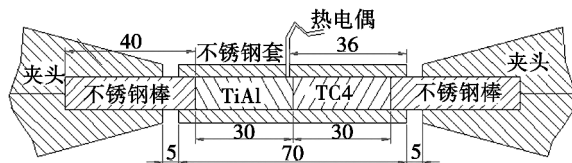


图 3 扩散焊模型

Fig. 3 Diffusion bonding model

2 结果与讨论

扩散连接后制备的接头拉伸试样尺寸如图 4 所示, 采用线切割方式加工。

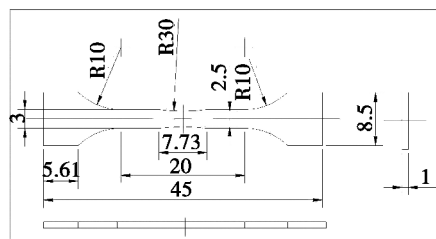


图 4 拉伸试样

Fig. 4 Tensile test specimen

2.1 力学性能分析

表 2 为 TiAl/TC4 扩散连接接头抗拉强度 σ_b 、屈服强度 δ_s 与 TiAl 和 TC4 母材的对比, 部分接头的断裂位置在 TiAl 合金母材上, 而不是在焊缝处, 如图 5 所示。从实验结果也可以看出, 室温、400 和 500℃ 下, 接头的抗拉强度均超过了 TiAl 母材, 分别达到了 TiAl 母材的 91.77%、95.27% 和 99.21%。屈服强度

接近于 TiAl 母材, 获得了等强度接头。

表 2 TiAl/TC4 扩散连接接头力学性能

Tab.2 Mechanical propertiss of TiAl/TC4 joint MPa

材料	RT		400°C		500°C		600°C	
	σ_b	$\sigma_{0.2}$	σ_b	$\sigma_{0.2}$	σ_b	$\sigma_{0.2}$	σ_b	$\sigma_{0.2}$
TiAl	446	386	483	334	500	346	542	286
TC4	973	897	672	536	628	435	443	237
接头	486	403	507	345	504	318	417	304

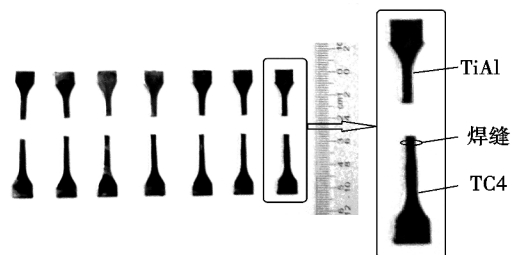


图 5 部分 TiAl/TC4 扩散连接接头拉伸试样(在钛铝处断裂)

Fig.5 Tensile test specimen(fracture at TiAl side)

2.2 金相组织观察和断口形貌分析

扩散连接接头的显微组织如图 6 所示。可以看出左侧的 TiAl 与右侧的 TC4 达到了良好的冶金结

合, 焊缝组织比较致密。而 TiAl 侧合金片层与片层之间分界明显, 有显微孔洞存在, 是裂纹萌生的源头。图中显示了 Al、Nb、Ti、V、Cr 等元素在两种合金之间的扩散情况。中间偏上的横线为线扫描的轨迹, 由上到下的强度波形分别代表了 Al、Nb、Ti、V、Cr 5 种元素线扫描的结果。可以看出 TiAl 侧中的 Al、Cr、Nb 在向 TC4 侧扩散, TC4 侧的 Ti、V 也在向 TiAl 侧扩散。接头两侧元素的相互扩散促进了这两种材料的结合。图 7 为电镜下的断口形貌。

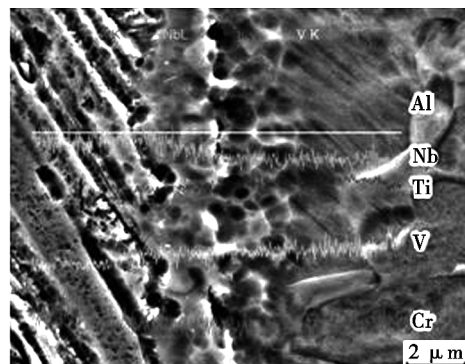
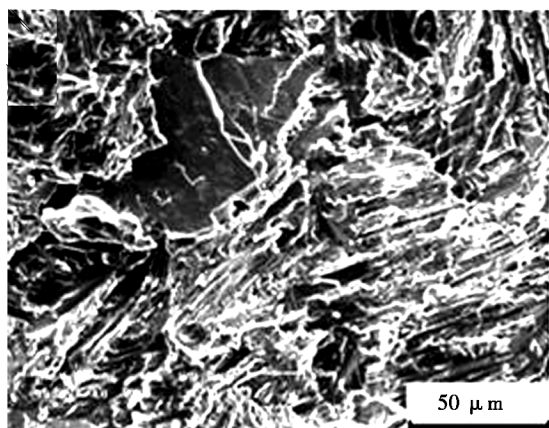
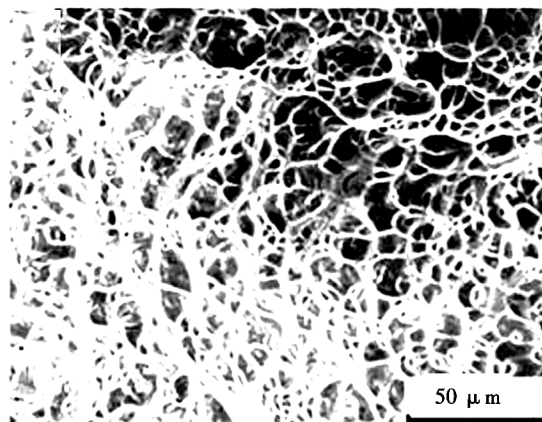


图 6 扩散连接接头元素的扩散情况

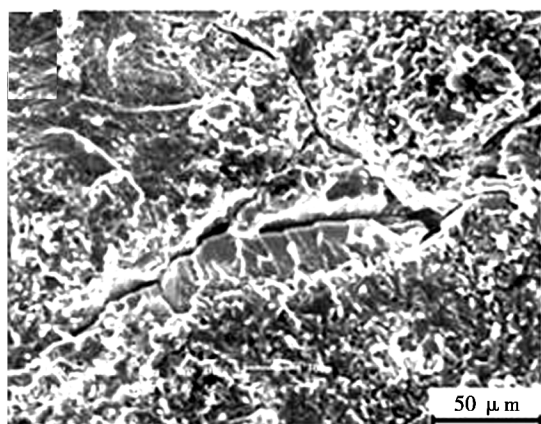
Fig.6 Element diffusion condition of joint



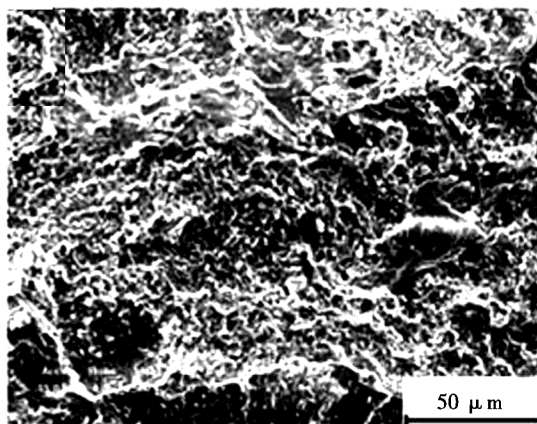
(a) Tial



(b) TC4



(c) TiAl侧断口



(d) TC4侧断口

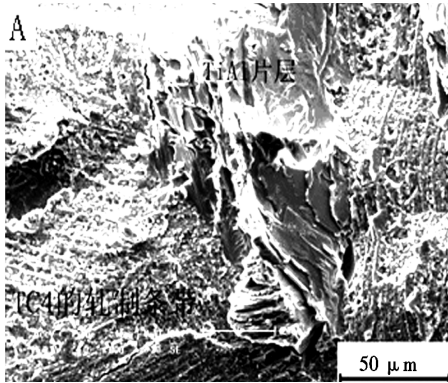
图 7 扩散连接接头断口形貌

Fig.7 Fracture surface

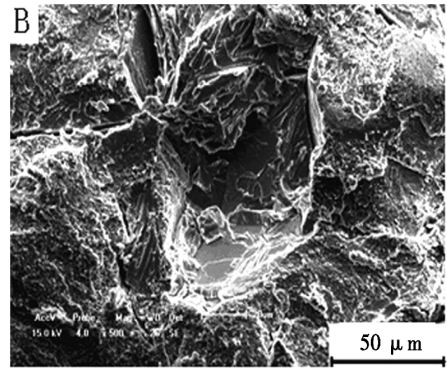
其中,图7(a)沿层片断裂,为典型的脆性断裂特征;图7(b)韧窝明显,为典型的韧性断裂特征。图7(c)和(d)已经不再具有单纯的TiAl断口和TC4断口特征,而是既有韧性断裂特征,也有沿层片断裂的脆性特征,结合了两者的断裂特点。这是因为在扩散连接的过程中,由于Ti、Al、Cr、V、Nb、W、B等元素的扩散,使得连接接头形成了一种新的组织,这种新组织的形貌和性能均介于TiAl合金和TC4合金之间。图7(c)和(d)上的脆性和韧性断裂的特征已经不再像母材那样泾渭分明的分离开来,而是两种特征相互交织,互相影响,使其形成了一种新的断裂形貌:沿层片开裂的特征只能看到垂直于拉伸方向的小面积层片组织,而韧窝也变得浅且细小。图7(c)中,由于其基体是TiAl合金,室温脆性比较严重,因此尽管出现了一些细小的韧窝,在接头组织中仍然存在一些

纵向的开裂特征,裂纹的两侧是不同的组织,具有明显的沿晶开裂特征。可见TiAl侧的接头裂纹倾向仍然具有的TiAl母材脆性开裂特征是限制接头屈服强度改善的一大因素。图7(c)相对(d)整体观感要平滑,也是由于其脆性较大的原因。图7(d)中,由于其基体是TC4,没有出现二次裂纹,韧性组织也较多。TC4的韧性组织从一定程度上消减了TiAl合金脆性对接头性能的不良影响。

图8(a)为TC4侧断口的另一视场形貌,TC4的轧制条带特征和TiAl的片层解理断裂特征非常明显,由于基体为TC4,因此图片中突出的TiAl片层组织应为从TiAl基体撕裂下来的部分。图8(b)为断口相应的TiAl侧,该图中间部分少了一块,与TC4凸起的部分互相吻合,二者的结合强度在局部超过了TiAl合金基体的强度。



(a) TC4侧断口



(b) TiAl侧断口

图8 TiAl/TC4另一视场断口形貌

Fig. 8 Fracture surface of TiAl/TC4 side

3 结论

(1)在915℃、80 MPa的条件下扩散连接1 h,实现了全片层TiAl与TC4的冶金结合。

(2)室温、400和500℃下,接头的抗拉强度分别达到了TiAl母材的91.77%、95.27%和99.21%;屈服强度接近于TiAl母材,获得了等强度接头。

(3)拉伸断口分析发现,焊缝处TC4侧出现了从TiAl基体上撕裂下来的TiAl片层组织,TiAl侧也出现了细小的韧窝,TC4参与了拉伸变形,使得部分接头的抗拉强度超过了TiAl母材。

参考文献

[1] Zhang W J, Reddy B V, Deevi S C. Physical properties

of TiAl-base alloys[J]. Scripta Materialia, 2001, 45(6):645-651

[2] Machara Y, Komizo Y, Langdon T G. Principles of superplastic diffusion bonding[J]. Materials Science and Technology, 1988(4):669-674

[3] Chen W R, Triantafillou J, Beddoes J, et al. Effect of fully lamellar morphology on creep of a near γ -TiAl intermetallic[J]. Intermetallics, 1999(7):171-178

[4] McCullough C, Valencia J J, Levi C G, et al. Phase equilibria and solidification in Ti-Al alloys[J]. Acta Metallurgica, 1989, 37(5):1321-1336

(编辑 吴坚)