

引用格式: 吕彦龙, 范佳锋, 候金保, 等. Ti69NbCrZrX 中间层脉冲电流促进扩散焊 TiAl/Ti₂AlNb 接头的组织与性能[J]. 材料工程, 2024, 52(12): 143-150.

LYU Yanlong, FAN Jiafeng, HOU Jinbao, et al. Microstructure and properties of pulse current promoted diffusion welding TiAl/Ti₂AlNb joint with Ti69NbCrZrX interlayer[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(12): 143-150.

Ti69NbCrZrX 中间层脉冲电流 促进扩散焊 TiAl/Ti₂AlNb 接头的组织与性能

Microstructure and properties of pulse current
promoted diffusion welding TiAl/Ti₂AlNb
joint with Ti69NbCrZrX interlayer

吕彦龙^{1*}, 范佳锋², 候金保¹, 柴 禄¹, 陶 军¹

(1 中国航空制造技术研究院 航空焊接与连接技术航空科技
重点实验室, 北京 100024; 2 华南理工大学 国家金属材料
近净成形工程技术研究中心, 广州 510640)

LYU Yanlong^{1*}, FAN Jiafeng², HOU Jinbao¹, CHAI Lu¹, TAO Jun¹

(1 Aeronautical Key Laboratory for Welding and Joining Technologies,
AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;
2 National Engineering Research Center of Near-Net-Shape
Forming for Metallic Materials, South China University of
Technology, Guangzhou 510640, China)

摘要: 以新型 Ti69NbCrZrX (X=Sn, W, Al, Mo, 1%~2%, 质量分数) 为中间层, 采用脉冲电流促进扩散焊在 900 °C/30 min/8 MPa 参数下连接 TiAl 合金与 Ti₂AlNb 合金。通过 SEM, EDS, EBSD 和室温拉伸技术分析焊后接头显微组织和性能。结果表明: 以 Ti69NbCrZrX 为中间层可获得无缺陷 TiAl/Ti₂AlNb 接头。接头界面组织主要分为 TiAl 扩散影响区、中间层扩散区和 Ti₂AlNb 扩散影响区。TiAl 扩散影响区组织由白色 β 相和灰色块状 α₂ 相组成, 中间层扩散区组织主要由灰色块状的 α₂+α 相和白色的 β/B2 相组成, Ti₂AlNb 扩散影响区组织由 β/B2 基体相和分布在其中的板条状和针状 O 相组成。接头室温拉伸强度均值为 642.5 MPa, 达到母材强度的 91.57%。接头断裂以沿晶脆性断裂为主, 穿晶脆性断裂为辅。

关键词: TiAl; Ti₂AlNb; 脉冲电流促进扩散焊; 中间层

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2023.000242

中图分类号: TG453; TB31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2024)12-0143-08

Abstract: The novel Ti69NbCrZrX (X=Sn, W, Al, Mo, 1%-2%, mass fraction) was used as an interlayer to join TiAl alloy with Ti₂AlNb alloy by pulsed current diffusion welding at 900 °C/30 min/8 MPa. The post-weld joint microstructure and properties were analyzed by SEM, EDS, EBSD, and room temperature tensile test. The results show that defect-free TiAl/Ti₂AlNb joints can be obtained using Ti69NbCrZrX as the connecting interlayer. The joint interface microstructure is mainly composed of TiAl diffusion affected zone, interlayer diffusion zone, and Ti₂AlNb diffusion affected zone. The TiAl diffusion affected zone structure is composed of white β phase and gray block α₂ phase, the interlayer diffusion zone structure is mainly composed of gray block α₂+α phase, and white β/B2 phase composition, Ti₂AlNb diffusion affected zone is composed of β/B2 matrix phase with lath and acicular O phase. The average value of room temperature tensile strength of the joint is 642.5 MPa, which reaches 91.57% of the strength of the base material. The fracture mode of the joints is dominated by brittle intergranular fracture, supplemented

by brittle transgranular fracture.

Key words: TiAl; Ti_2AlNb ; pulse current promoting diffusion welding; interlayer

TiAl合金因其低密度(3.7~3.9 g/cm³)和高温下优异的力学性能,成为一种极具吸引力的轻质材料^[1-2]。然而,TiAl合金具有室温脆性、难热加工的缺点,难以制造成大尺寸复杂的部件^[3]。 Ti_2AlNb 具有良好的室温塑性、较高的断裂韧性和优异的抗氧化性。但由于 Ti_2AlNb 合金在密度和服役温度方面性能的降级,使其不能完全取代TiAl合金^[4]。实际上,航空发动机的大型部件通常会涉及温度梯度,如叶片和轮盘组件服役温度不同,工作时所受载荷也不同^[5]。叶片和轮盘使用单一的钛铝系列材料生产,不仅难以达到加工要求,而且会造成大量材料浪费。研究发现,将TiAl合金与 Ti_2AlNb 合金通过焊接进行连接,可以充分利用它们各自的优势,提高TiAl合金和 Ti_2AlNb 合金在大尺寸结构件方面的应用,达到发动机减重效果^[6]。由于TiAl合金易形成焊后冷裂纹和高温下难以变形,很难通过熔焊和摩擦焊形成无缺陷接头^[7-8],而扩散焊接可以避免上述问题。近年来,脉冲电流促进扩散焊作为一种快速、高效的扩散焊方法逐渐兴起。脉冲电流促进扩散焊接的主要特点是将脉冲大电流通入母材金属中,在扩散界面产生足够的焦耳热进行元素扩散焊接^[9-11]。该方法具有焊接温度低、焊接时间短、焊接压力小的特点。Bian等^[12]研究了高Nb含量TiAl合金与 Ti_2AlNb 合金的直接热压扩散焊接工艺。在970℃/120 s内获得的最大剪切强度仅为66.5 MPa,原因为在界面处形成了脆性相 $Al(Nb, Ti)_2$ 。Zhu等^[13-14]发现,在1000℃/20 MPa/90 min的热压扩散焊条件下,可以获得拉伸强度为281 MPa的TiAl/ Ti_2AlNb 接头,但接头界面处的连续 α_2 组织和 $Al(Nb, Ti)_2$ 脆性相阻碍了接头强度进一步提高,添加中间层后TiAl/ Ti_2AlNb 接头的界面组织得到优

化^[14]。纯Ti是目前应用较多的一种中间层材料,其具有良好的消除 $Al(Nb, Ti)_2$ 相的效果,并且不会引入新的杂质相^[15]。然而,纯Ti中间层与TiAl, Ti_2AlNb 母材焊接后会在界面处形成连续的 α_2 相和B2相,残留的Ti合金组织限制接头的高温强度,并且焊接过程中,纯Ti中间层极易被高温氧化,进一步降低接头的强度。

为了获得高强度的TiAl/ Ti_2AlNb 合金接头,本工作通过在钛基材料中添加Nb,Cr,Zr等元素设计出新型的Ti69NbCrZrX中间层材料,并采用脉冲电流促进扩散焊对TiAl与 Ti_2AlNb 合金进行连接,同时对该接头的界面组织和力学性能进行分析。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验所用TiAl合金名义成分为Ti-48Al-2Nb-2Cr(原子分数/%,下同)。通过加入Mo,Nb等稳定 β 相的元素,使得合金从液相冷却凝固过程中穿过 β 单相区,获得的组织具有更好的热加工性能以及抗蠕变、抗氧化能力。根据测试结果,Mo主要存在于 β 相中,TiAl母材的室温抗拉强度为706~752 MPa,650℃下的抗拉强度 ≥ 723 MPa。图1(a)为TiAl合金的SEM图。可以看出,组织中包括大量的 γ -TiAl与 α_2 - Ti_3Al 组成的片层团、等轴状 γ -TiAl以及存在于晶界处的 β 相。 Ti_2AlNb 合金名义成分为Ti-22Al-27Nb,室温抗拉强度为1098~1164 MPa,650℃下的抗拉强度 ≥ 679 MPa。 Ti_2AlNb 合金组织形貌如图1(b)所示,可知,组织由O相以及B2基体构成,O相为衬度较暗的部分,包括粗大的板条状和细小的针状两种形态。

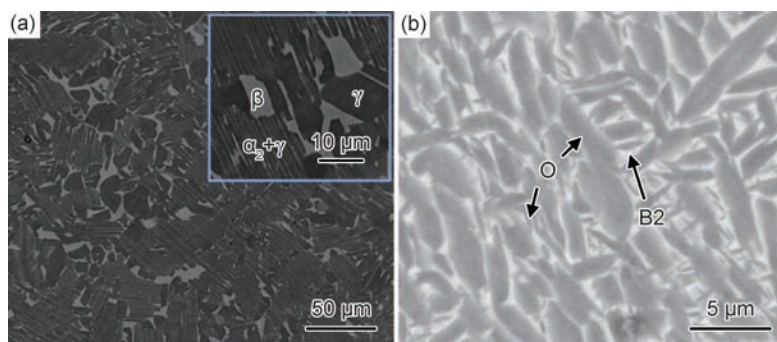


图1 母材的SEM图 (a)TiAl合金;(b) Ti_2AlNb 合金

Fig. 1 SEM images of base metal (a)TiAl alloy;(b) Ti_2AlNb alloy

1.2 实验方法

脉冲电流促进扩散焊是采用HPD-25-HV/SP型焊

机对待焊试件直接通电加热,电流产生焦耳热和接触电阻产生焊接界面局部高温的温度场,真空环境下大电流

通过待焊界面之间的微小间隙产生放电等离子体净化活化表面,电致扩散促使元素界面快速扩散与再结晶,消除界面孔洞,形成固相连接的扩散焊接接头。焊接设备和拉伸试样示意图如图 2 所示。Ti69NbCrZrX 中间层中的 X 包括 Sn, W, Al, Mo 等元素,质量分数均为 1%~2%,其中 Sn 和 Al 提高焊缝中 α 相强度,Mo 提高焊缝中 β 相强度,W 提高接头蠕变抗力。实验中主要

参数:扩散焊温度 900 °C,焊接时间 30 min,焊接压力 8 MPa, Ti69NbCrZrX 中间层厚 20 μm 。焊接过程电流波形图如图 3 所示,单位脉冲电流持续时间 t_{on} 为 1 ms,脉歇时间 t_{off} 为 0 ms。焊后取金相试样和拉伸试样,利用 Quanta 250 FEG 场发射扫描电子显微镜观察焊接接头显微组织和断口形貌,并采用 Z100 型材料万能试验机进行室温拉伸实验,接头强度取 3 次测试的平均值。

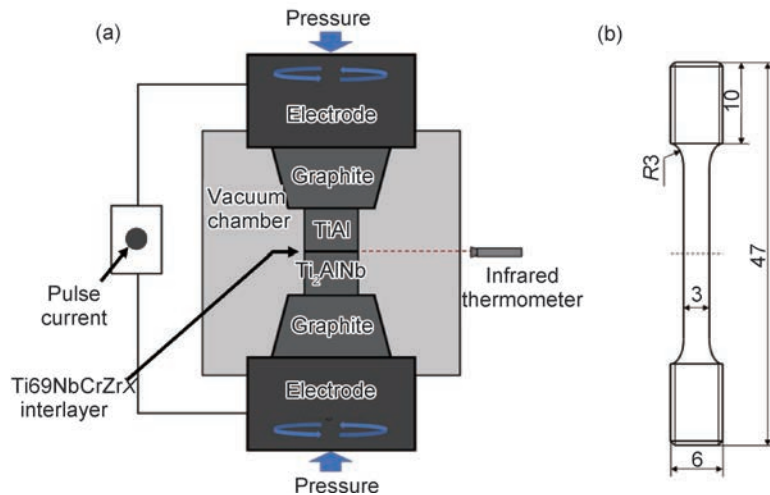


图 2 焊接设备(a)和拉伸试样(b)示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of welding equipment(a) and tensile specimen(b)

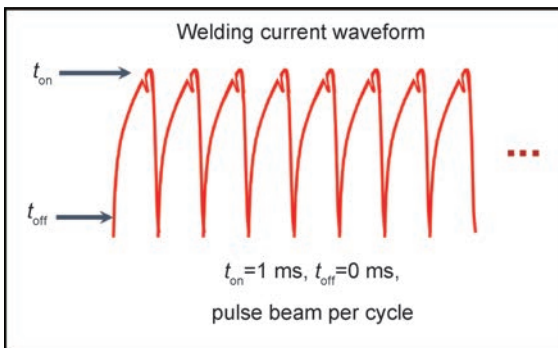


图 3 焊接过程电流波形示意图

Fig. 3 Schematic diagram of welding process current waveform

2 结果与分析

2.1 焊接接头组织形貌

以 Ti69NbCrZrX 为中间层,对 TiAl 合金和 Ti₂AlNb 合金进行脉冲电流促进扩散焊连接。图 4 为接头界面处背散射模式下的 SEM 图。根据界面组织形态,可以将扩散焊接头组织分为 TiAl 基体区、TiAl 扩散影响区(图 4(a) I 区)、中间层扩散区(图 4(a) II 区)、Ti₂AlNb 扩散影响区(图 4(a) III 区)和 Ti₂AlNb 基体区。I 区主要组织为白色和灰色块状相。III 区为

Ti69NbCrZrX 中间层与两侧母材扩散焊形成的组织,主要由灰色块状相和白色点状相构成,其中靠近 Ti₂AlNb 侧的白色点状相较为密集。III 区显微组织形态为板条状和针状灰色相分布在白色基体相中。

图 4(b) 为界面组织形貌放大图。为进一步分析接头组织中区域的相组成,对相应区域进行 EDS 元素扫描,结果如表 1 所示。根据各点元素含量,可以初步判断 TiAl 合金母材区(点 1)仍主要由 γ 和 α_2 相组成, TiAl 扩散影响区组成相分别为灰白色块状 β 相(点 3, 4)和灰色块状 α_2 相(点 5)。在 TiAl 影响区与中间层影响区界面形成 α_2 相层(与点 5 相连的灰色区域)。Al 元素向中间层扩散,中间层 Al 元素的含量从 5% 提高到 23%~28%, Nb 元素向 TiAl 合金扩散,中间层 Nb 元素的含量从 6% 降低到 4% 左右,点 6, 8 处发现有 α_2 相形成,同时该区域保留着 α 钛合金相。因此,点 6 和点 8 处的灰色连续区域由 α_2 相和 α 钛合金组成。Nb 元素自 Ti₂AlNb 向中间层扩散, Ti 元素向 Ti₂AlNb 扩散,中间层中形成的亮白色点为 β /B2 相(点 7, 9, 10),越靠近 Ti₂AlNb 合金侧, β /B2 相的数量越多。到 Ti₂AlNb 影响区, Nb 元素向中间层扩散而原子分数减少,中间层的 Ti 元素向 Ti₂AlNb 合金扩散而原子分数增加,形成白色 β /B2 相基体上分布着板条状和针状 O 相的组织形貌(点 11~14)。

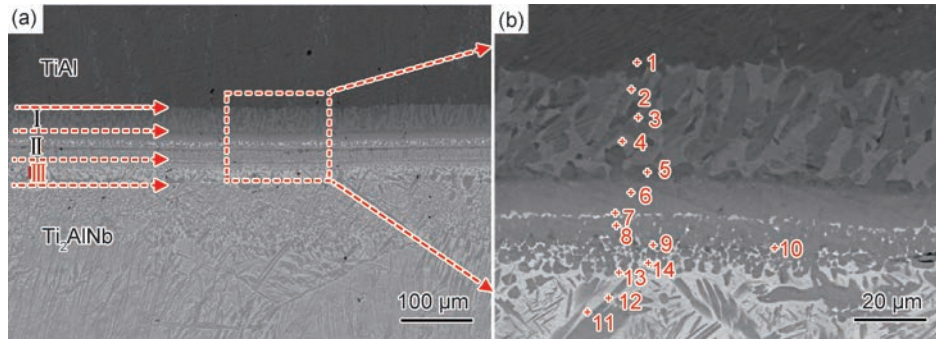


图4 Ti69NbCrZrX中间层扩散焊TiAl/Ti₂AlNb接头微观组织
(a)整体形貌;(b)界面组织放大图

Fig. 4 Microstructures of diffusion welded TiAl/Ti₂AlNb joint with Ti69NbCrZrX interlayer
(a)overall morphology;(b)enlarged view of interface structure

表1 图4(b)中各点EDS元素扫描结果

Table 1 EDS element scanning results of each point in fig. 4(b)

Point	Atom fraction/%								Possible phase
	Al	Zr	Nb	Mo	Sn	Ti	Cr	W	
1	47.72	0.16	1.63	0.24	0.16	48.17	1.83	0.09	$\gamma + \alpha_2$
2	36.35	0.45	1.78	0.22	0.15	58.95	1.85	0.25	β
3	34.48	0.69	2.86	0.30	0.14	53.79	7.45	0.28	β
4	34.53	0.80	2.84	0.38	0.10	55.28	5.81	0.26	β
5	34.67	0.65	2.03	0.28	0.16	60.06	1.89	0.27	α_2
6	27.58	1.02	3.51	0.51	1.00	64.67	1.22	0.49	$\alpha + \alpha_2$
7	26.29	0.97	5.07	0.69	0.73	63.53	1.66	1.07	$\alpha + \beta/B2$
8	23.87	0.98	4.59	0.23	0.82	67.97	0.94	0.59	$\alpha + \alpha_2$
9	16.67	1.01	6.28	0.49	0.61	72.40	1.86	0.68	$\alpha_2 + \beta/B2$
10	16.80	1.19	8.08	1.13	0.82	67.16	3.56	1.26	$\alpha_2 + \beta/B2$
11	24.14	1.18	9.65	0.47	0.40	62.45	1.32	0.40	$\beta/B2$
12	14.25	1.75	20.41	0.99	0.21	55.94	5.84	0.62	O
13	22.65	1.14	8.99	0.44	0.50	63.73	2.04	0.50	$\beta/B2$
14	11.49	1.54	18.15	1.25	0.22	58.16	7.89	1.30	O

焊后的母材显微组织如图5所示。由图5(a)可知, TiAl合金的组织形貌和相组分没有变化, 组织仍以 γ -TiAl与 α_2 -Ti₃Al组成的片层为主, 也包含等轴状 γ -TiAl以及存在于晶界处的 β 相。TiAl合金焊后层片

组织出现明显的流变特征, 表明其发生显著塑性变形。由图5(b)可知, Ti₂AlNb合金组织形貌较焊前发生显著变化, 焊后Ti₂AlNb母材出现大量细小的针状O相, 这是由于板条状的O相在B2相中溶解再析出所致。

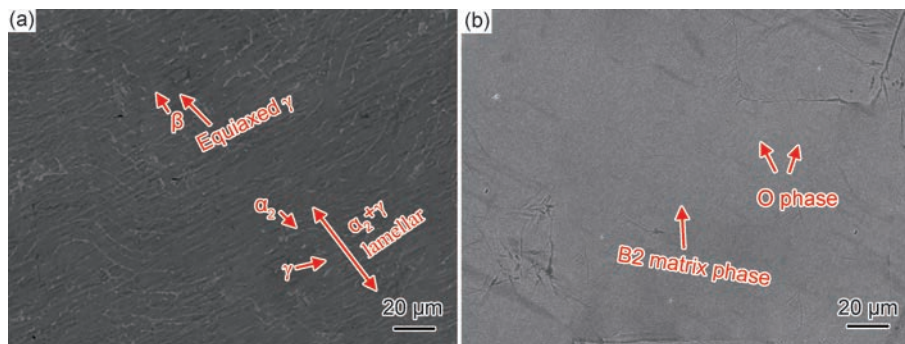


图5 焊后母材显微组织 (a)TiAl合金;(b)Ti₂AlNb合金

Fig. 5 Microstructures of base metal after diffusion welding (a)TiAl alloy;(b)Ti₂AlNb alloy

2.2 焊接界面组织

图 6 为以 Ti69NbCrZrX 为中间层的 TiAl/Ti₂AlNb 接头元素线扫描分布。可以看到,钛基中间层 Ti 元素含量最高,而 Al 元素含量最低。因此,焊接过程中 Ti 元素向 TiAl 和 Ti₂AlNb 两侧扩散,Al 元素和 Nb 元素分别自 TiAl 和 Ti₂AlNb 向中间层扩散。此外,中间层添加的 Cr, Zr, Sn 和 W 微量元素自中间层向两侧扩散。由于相应的元素扩散作用,导致 TiAl 扩

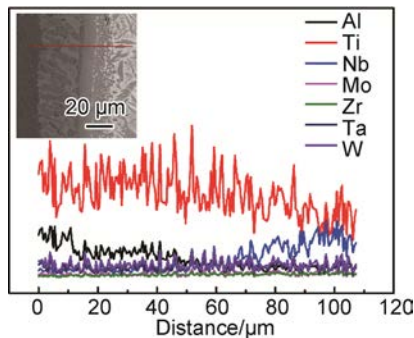


图 6 扩散焊接头线扫描曲线

Fig. 6 Line scan curves of diffusion welding joint

散影响区、Ti₂AlNb 扩散影响区和中间层扩散区发生扩散型相变,形成图 4 的多层相变区的组织形貌。

为验证 TiAl/Ti69NbCrZrX/Ti₂AlNb 接头界面的显微组织分析结果,采用 EBSD 对接头界面做进一步分析,如图 7 所示。图 7(a)为取向分布图,可以看出,每个相的晶粒取向基本是随机的,但 Ti₂AlNb 合金中的 B2 基体相呈现(0001)和(2 $\bar{1}$ 1 $\bar{0}$)的择优取向。图 7(b)为灰度图,蓝色表示晶界角度大于 15°的大角度晶界。界面处的 Ti69NbCrZrX 中间层区域由细小的等轴晶粒组成, TiAl 影响区由排列紧密的层片晶粒组成, Ti₂AlNb 影响区为细小的球形形态晶粒组成, TiAl 母材显微组织未发生显著变化,但 Ti₂AlNb 母材中的针状和板条状组织长大。图 7(c)为接头界面的相分布图,可以看到 TiAl 影响区物相组织主要是由 B2 相与 α 相交替排列形成,而 Ti69NbCrZrX 中间层以 α 相为主体,在靠近 TiAl 影响区一侧分布较多的 α_2 相。Ti₂AlNb 影响区主要由 B2 相组成,在该区与 Ti₂AlNb 基体交界处分布少量的 O 相组织。EBSD 展现的接头界面显微组织形态与 EDS 分析结果基本一致。

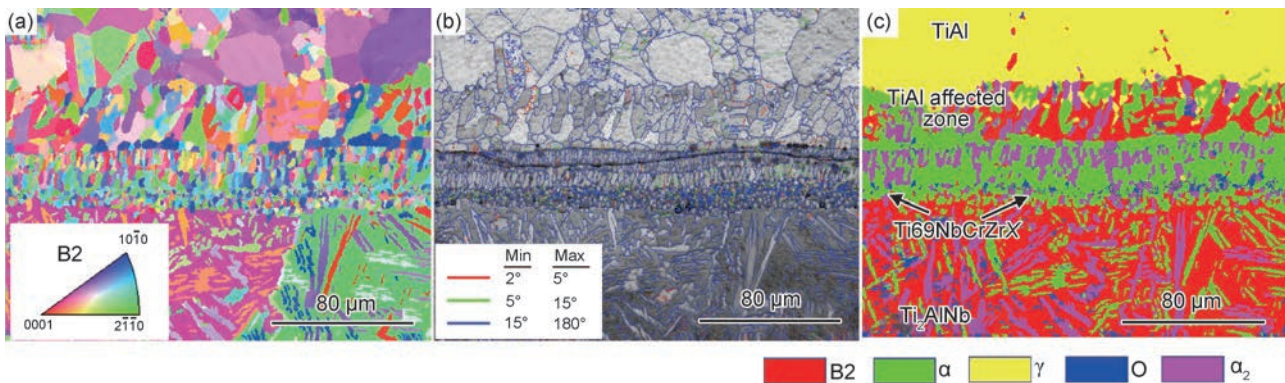


图 7 TiAl/Ti69NbCrZrX/Ti₂AlNb 接头 EBSD 图

(a)取向分布;(b)灰度;(c)相分布

Fig. 7 EBSD images of TiAl/Ti69NbCrZrX/Ti₂AlNb joint

(a)orientation distribution;(b)grayscale;(c)phase distribution

2.3 接头断口分析

对焊后 TiAl/Ti69NbCrZrX/Ti₂AlNb 接头进行室温拉伸测试,接头强度均值为 642.5 MPa,达到母材强度的 91.57%,展现出较高的抗拉强度。图 8 为 TiAl/Ti69NbCrZrX/Ti₂AlNb 接头拉伸断裂横截面形貌。可以清晰看到接头拉伸断裂后, Ti69NbCrZrX 中间层处的组织发生剥离。通过对断裂区域做进一步放大,可以在图 8(b)中看到 TiAl 扩散影响区组织依然保存较完整,而 Ti69NbCrZrX 中间层仅残留一部分组织在界面处。同时,还可以看到一些裂纹自断口表面扩展至 TiAl 基体中,表明接头拉伸断裂后母材也出现

严重损伤。图 8(c)显示,由灰色 $\alpha + \alpha_2$ 基体相 + 白色 β /B2 相组成的 Ti₂AlNb 影响区基本剥落,说明该区域组织脆性较高。

图 9 为 TiAl/Ti69NbCrZrX/Ti₂AlNb 接头拉伸断裂 TiAl 一侧表面形貌。图 9(a)所示的断口整体形貌较为光滑,表面未观察到较大的裂纹和破碎区域。断口放大后(图 9(b)),发现表面部分区域呈现较粗糙的形态,而该区域周边位置的表面形貌较为光滑。通过进一步放大观察(图 9(c)),可以看到较粗糙的区域表面呈现一定的河流花样,表现为典型的脆性穿晶断裂失效形式。对图 9(b)中较光滑的 B 区放

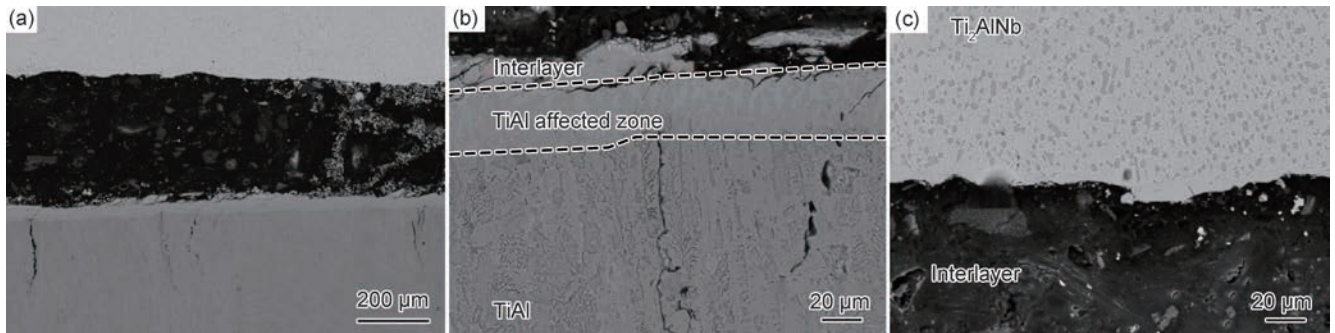


图8 TiAl/Ti69NbCrZrX/Ti₂AlNb接头拉伸断裂横截面形貌

(a)断口界面;(b)TiAl一侧放大图;(c)Ti₂AlNb一侧放大图

Fig. 8 Cross sectional morphologies of tensile fracture of TiAl/Ti69NbCrZrX/Ti₂AlNb joint
(a)fracture interface;(b)enlarged view on TiAl side;(c)enlarged view on Ti₂AlNb side

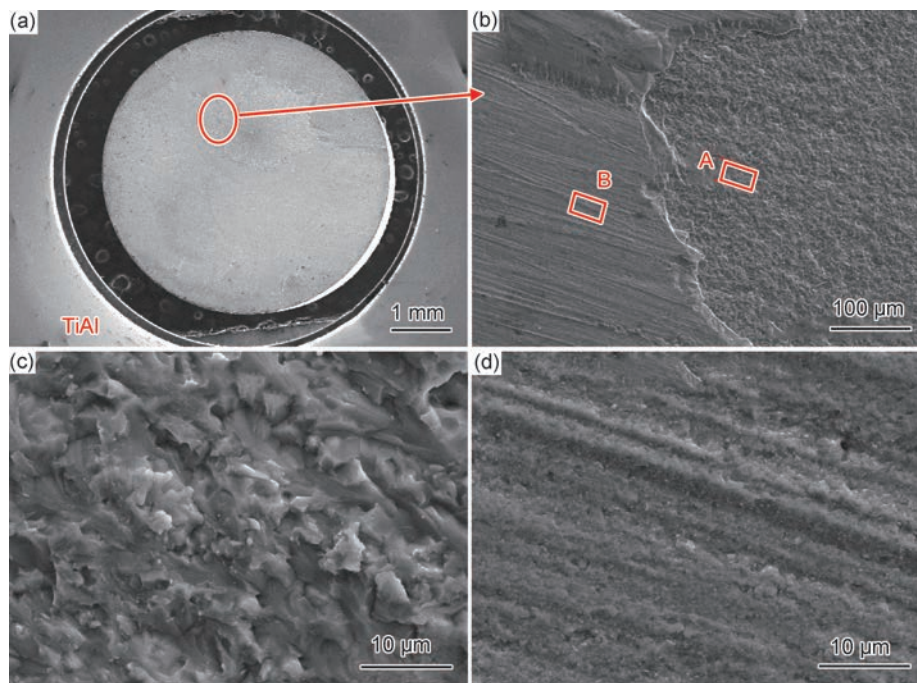


图9 TiAl/Ti69NbCrZrX/Ti₂AlNb接头拉伸断裂TiAl一侧表面形貌

(a)整体形貌;(b)图9(a)区域放大图;(c),(d)图9(b)中A,B区放大图

Fig. 9 Surface morphologies of TiAl/Ti69NbCrZrX/Ti₂AlNb joint with tensile fracture on TiAl side
(a)overall morphology;(b)enlarged view of area in fig.9(a);(c),(d)enlarged views of area A,B in fig.9(b)

大,如图9(d)所示,可以看到表面由许多微纳米级的小断面组成。结合图8的断口横截面形貌,可以判断该断裂区域为中间层与Ti₂AlNb基体的界面处。图10为TiAl/Ti69NbCrZrX/Ti₂AlNb接头拉伸断裂Ti₂AlNb一侧表面形貌。与TiAl基体一侧对应位置相反,Ti₂AlNb一侧的宽断口滑面处于粗糙面下一层,也就是说接头拉伸过程中,中间层完全剥落,导致粗糙度较小,这与上述分析一致。对光滑区进一步放大发现(图10(d)),中间层剥落后的Ti₂AlNb表面与TiAl合金一侧的光滑表面相似,呈现类似“砂粒”

的断裂表面形态,表明断裂时的裂纹是沿着晶粒界面处扩展。此外,在Ti₂AlNb基体表面区域观察到许多孔洞,推测是由于Nb等元素大量向中间层扩散而引发的柯肯达尔效应,在表面留下许多纳米级的孔洞。

图11为Ti₂AlNb一侧断口表面的元素分布。可以清晰看到脆性断裂表面所在区域的Nb,Cr,Al和Mo元素富集,进一步证实图10(b)的C区为残留的Ti69NbCrZrX中间层,D区为Ti₂AlNb基体,证实TiAl/Ti69NbCrZrX/Ti₂AlNb接头拉伸断裂为沿晶脆性断裂为主,穿晶脆性断裂为辅。

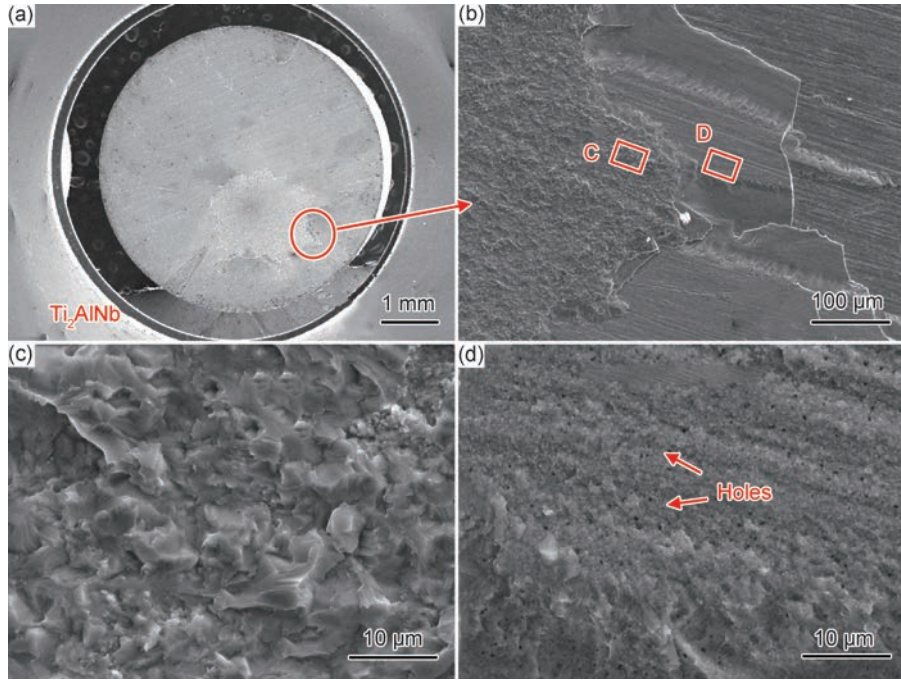


图 10 TiAl/Ti69NbCrZrX/Ti₂AlNb 接头拉伸断裂 Ti₂AlNb 一侧表面形貌

(a)整体形貌;(b)图 10(a)区域放大图;(c),(d)图 10(b)中 C,D 区放大图

Fig. 10 Surface morphologies of TiAl/Ti69NbCrZrX/Ti₂AlNb joint with tensile fracture on Ti₂AlNb side (a)overall morphology;(b)enlarged view of area in fig10.(a);(c),(d)enlarged views of area C,D in fig10(b)

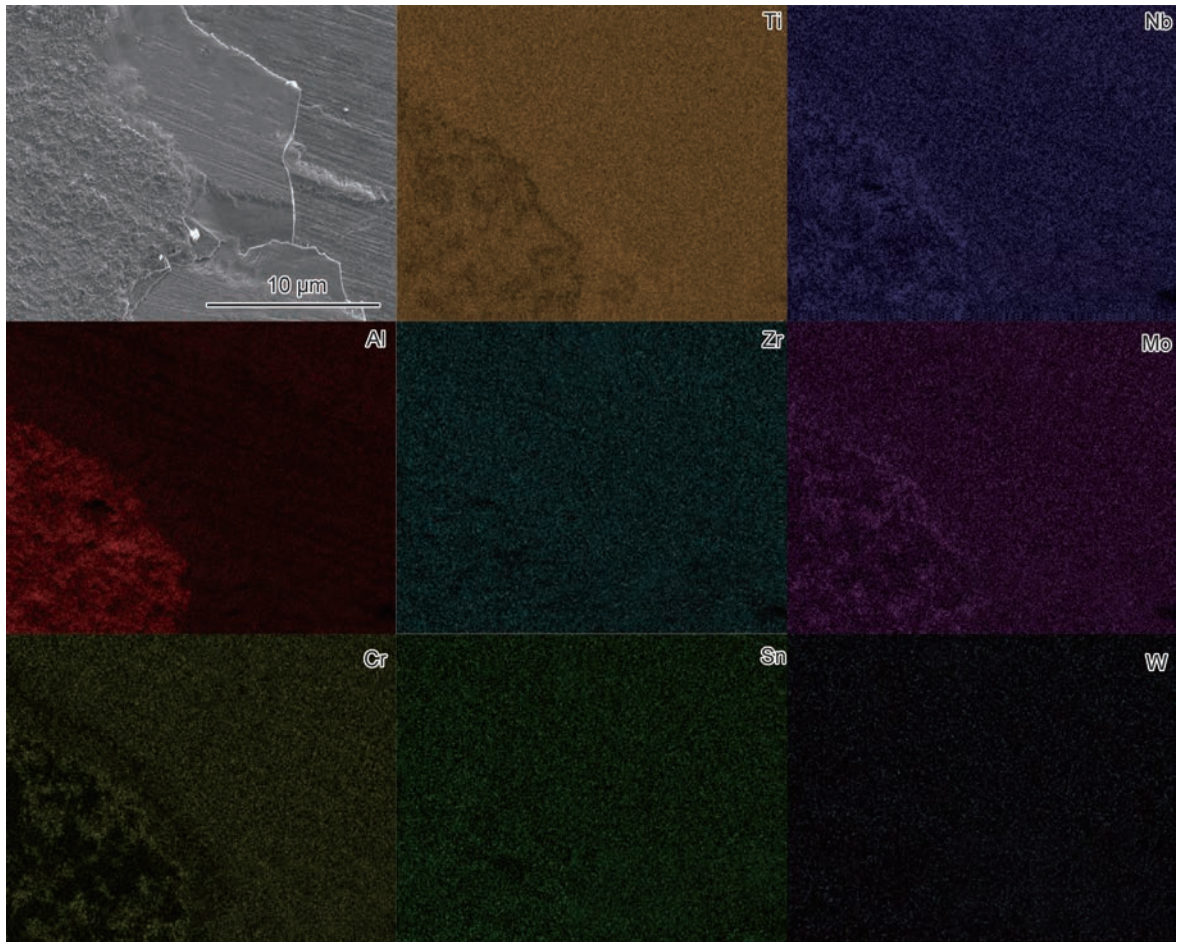


图 11 Ti₂AlNb 一侧断口表面元素分布

Fig. 11 Element distributions of Ti₂AlNb side fracture surface

3 结论

(1)以 Ti69NbCrZrX 为中间层,对 TiAl 合金和 Ti₂AlNb 合金进行脉冲电流促进扩散焊连接,获得无缺陷 TiAl/Ti₂AlNb 接头。接头界面形成多层组织,可以分为 TiAl 扩散影响区、中间层扩散区和 Ti₂AlNb 扩散影响区。

(2)TiAl 扩散影响区由白色 β 相、灰色块状 α₂ 相和黑色块状 γ 相组成,中间层组织主要由灰色块状的 α₂+α 相和白色的 β/B2 相组成;Ti₂AlNb 扩散影响区由 β/B2 基体相和分布在其中的板条状和针状 O 相组成。

(3)TiAl/Ti69NbCrZrX/Ti₂AlNb 接头室温拉伸强度均值为 642.5 MPa,达到母材强度的 91.57%;接头断裂行为以沿晶脆性断裂为主,穿晶脆性断裂为辅。

参考文献

- [1] 林均品,陈国良. TiAl 基金属间化合物的发展[J]. 中国材料进展, 2009, 28(1):31-37.
LIN J P, CHEN G L. Development of TiAl intermetallic based compound[J]. Materials China, 2009, 28(1):31-37.
- [2] 林均品,张来启,宋西平,等. 轻质 γ-TiAl 金属间化合物的研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(2):1-8.
LIN J P, ZHANG L Q, SONG X P, et al. Status of research and development of light-weight γ-TiAl intermetallic based compounds [J]. Materials China, 2010, 29(2):1-8.
- [3] 蔡建明,弭光宝,高帆,等. 航空发动机用先进高温钛合金材料技术研究与发展[J]. 材料工程, 2016, 44(8):1-10.
CAI J M, MI G B, GAO F, et al. Research and development of some advanced high temperature titanium alloys for aero-engine [J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(8):1-10.
- [4] 李万青,魏红梅,何鹏,等. Ti₃Al 和 Ti₂AlNb 合金扩散连接界面的组织及力学性能[J]. 材料工程, 2015, 43(1):37-43.
LI W Q, WEI H M, HE P, et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of diffusion bonding of Ti₃Al and Ti₂AlNb alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(1):37-43.
- [5] 陈玮,李晋炜,史一宁. Ti₂AlNb 合金及其焊接技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2015(17):136-139.
CHEN W, LI J W, SHI Y N. Development of Ti₂AlNb alloys and welding technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(17):136-139.
- [6] 乌彦全,周军,张春波,等. Ti-Al 系金属间化合物焊接技术研究现状[J]. 电焊机, 2019, 49(5):32-38.
WU Y Q, ZHOU J, ZHANG C B, et al. Research status of welding technology for Ti-Al intermetallic compound [J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(5):32-38.
- [7] DU S G, WANG S L, XU W T. Characterizing micromechanical properties of friction welding interface between TiAl alloy and GH3039 superalloy[J]. Materials, 2020, 13(9):2072.
- [8] CHEN G Q, ZHANG G Q, YIN Q X, et al. Microstructure evolution of electron beam welded joints of Ti-43Al-9V-0.3Y and Ti-6Al-4V alloys[J]. Materials Letters, 2018, 233:336-339.
- [9] 吕彦龙,贺建超,侯金保. TiAl/Ti₂AlNb 放电等离子扩散接头的组织性能研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(19):72-76.
LYU Y L, HE J C, HOU J B. Microstructure and properties of TiAl/Ti₂AlNb spark plasma diffusion bonding joint[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(19):72-76.
- [10] 吕彦龙,贺建超,侯金保,等. 热处理对 TiAl/Ti₂AlNb 放电等离子扩散接头微观组织与力学性能的影响[J]. 材料工程, 2021, 49(9):87-93.
LYU Y L, HE J C, HOU J B, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of TiAl/Ti₂AlNb joint by spark plasma diffusion bonding[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(9):87-93.
- [11] 林盼盼,林金城,于迪,等. 放电等离子体烧结技术在材料连接领域的应用现状[J]. 焊接学报, 2022, 43(11):15-21.
LIN P P, LIN J C, YU D, et al. Application status of spark plasma sintering technology in the field of material joining [J]. Transactions of China Welding Institution, 2022, 43(11):15-21.
- [12] BIAN H, LEI Y Z, FU W, et al. Diffusion bonding of Ti₂AlNb alloy and high-Nb-containing TiAl alloy: interfacial microstructure and mechanical properties[J]. Metals, 2018, 8(12):1061.
- [13] ZHU L, LI J S, TANG B, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of diffusion bonding high Nb containing TiAl alloy to Ti₂AlNb alloy[J]. Vacuum, 2019, 164:140-148.
- [14] ZHU L, TANG B, DING M X, et al. Interface characteristic and mechanical performance of TiAl/Ti₂AlNb diffusion bonding joint with pure Ti interlayer[J]. Rare Metals, 2020, 39:1402-1412.
- [15] GAO Q, ZHANG L Q, QIAO Y, et al. Diffusion bonding behaviour of β-γ TiAl alloys containing high niobium with Ti interlayer by spark plasma sintering [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(12):3973-3984.

收稿日期:2023-04-04;修订日期:2024-01-29

通讯作者:吕彦龙(1993—),男,工程师,硕士,研究方向为耐高温金属材料钎焊/扩散焊连接,联系地址:北京市朝阳区朝阳路1号中国航空制造技术研究院102所(100024),E-mail:lvyanlong0210@126.com

(本文责编:王 晶)