

# Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 异种材料激光焊接头的组织及性能

陈冰清<sup>1</sup>, 熊华平<sup>1</sup>, 孙兵兵<sup>1</sup>, 魏振伟<sup>2</sup>, 李万青<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北京航空材料研究院 3D 打印研究与工程技术中心, 北京 100095;

<sup>2</sup>北京航空材料研究院航空材料检测与评价北京市重点实验室, 北京 100095

**摘要** 以金属粉末为焊料,研究了 Ti<sub>3</sub>Al 基合金与 GH4169 高温合金异种材料之间的激光焊接,分析了接头各区域的微观组织,并测试了接头截面不同区域的显微硬度以及接头的室温拉伸强度。研究表明,当焊料为单一的 Ti-Ni-Nb 粉末时,接头的平均室温抗拉强度为 129 MPa,焊料与两种母材的界面均没有生成反应层,焊缝的成分主要为 Ti-Ni-Nb 相、Nb-Ti 固溶体及析出的 Nb,焊缝与母材界面的显微硬度高于焊缝中心及母材的;当焊料为 Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu 三种粉末的复合焊料时,接头的抗拉强度增大至 180 MPa,接头中主要元素的含量随焊料成分的不同沿焊缝逐渐发生变化,Ti<sub>3</sub>Al/Ti-Nb 界面具有较高的显微硬度,Ti-Nb 区和 Ti-Ni-Nb 区的硬度值高于 Ni-Cu 区的。

**关键词** 激光技术;激光焊接;微观组织;力学性能;Ti<sub>3</sub>Al 基合金;镍基高温合金

中图分类号 TG442

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0402004

## Microstructures and Properties of Laser Welded Dissimilar Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 Joints

Chen Bingqing<sup>1</sup>, Xiong Huaping<sup>1</sup>, Sun Bingbing<sup>1</sup>, Wei Zhenwei<sup>2</sup>, Li Wanqing<sup>1</sup>

<sup>1</sup>3D Printing Research and Engineering Technology Center, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

<sup>2</sup>Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China

**Abstract** With the metal powders as the filler materials, the laser welding between the dissimilar materials of Ti<sub>3</sub>Al-based alloy and GH4169 superalloy is carried out. The microstructures at different areas of the joints are analyzed. The micro-hardness in different cross sectional regions of joints and the tensile strength at the room temperature of the joints are tested. The study results indicate that, when the filler material is only the Ti-Ni-Nb powders, the average tensile strength at the room temperature of the joints is 129 MPa. There are no reaction layers generated in both interfaces between the filler material and the two kinds of base materials, and the welds mainly consist of Ti-Ni-Nb phase, Nb-Ti solid solution and precipitated Nb. The micro-hardnesses at the interfaces between welds and base materials are higher than those of the weld center and the base materials. When the filler material is composed of Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu powders, the tensile strength of the joints increases to 180 MPa. The contents of the main elements in the joints vary gradually along the weld line with the composition variation of the filler materials. The Ti<sub>3</sub>Al/Ti-Nb interface possesses the relatively high micro-hardness, and the hardnesses in the Ti-Nb and Ti-Ni-Nb regions are higher than that in the Ni-Cu region.

**Key words** laser technique; laser welding; microstructure; mechanical properties; Ti<sub>3</sub>Al-based alloy; Ni-based superalloy

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 160.3900; 180.5810

## 1 引 言

以 Ti<sub>3</sub>Al 金属间化合物为基体的新型合金,具

有熔点高、比强度和比模量高、高温力学性能和抗氧化性能良好等特点,是一种极具潜力的新型轻质高温结构材料<sup>[1-3]</sup>。与钛合金相比,Ti<sub>3</sub>Al 基合金具有

收稿日期: 2017-07-03; 收到修改稿日期: 2017-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(51405456)、中国科协 2016—2018 年度“青年人才托举工程”(2016QNRC001)

作者简介: 陈冰清(1984—),女,博士,高级工程师,主要从事航空先进材料的激光增材制造及焊接技术方面的研究。

E-mail: hwtkjcbq1984@163.com

较高的刚度、较好的高温力学性能和较高的抗氧化性,且 Ti<sub>3</sub>Al 基合金的长期工作温度可达到 650~800 °C,可提高结构件的使用温度;与普通高温合金相比,Ti<sub>3</sub>Al 基合金具有低密度的特性,因此可用来代替高温合金制造航空航天发动机上的相关部件,满足减重的需要<sup>[4-5]</sup>。发动机等相关部件的制造过程较多涉及到 Ti<sub>3</sub>Al 基合金自身及其与异种材料之间的焊接技术。

Ti<sub>3</sub>Al 基合金由于室温塑性较低,是一种较难焊接的新材料。国内外研究者开展了 Ti<sub>3</sub>Al 基合金的连接技术研究,内容主要集中在三个方面<sup>[6]</sup>:焊接工艺方法的研究<sup>[7-8]</sup>、焊接接头固态裂纹的控制<sup>[9-10]</sup>以及焊接材料的研制<sup>[11-12]</sup>。针对 Ti<sub>3</sub>Al 基合金与异种材料之间的焊接技术研究,目前较多集中在其与钛合金之间的焊接上,并取得了一定程度的进展<sup>[13-19]</sup>。Tan 等<sup>[14,19]</sup>研究了 Ti<sub>3</sub>Al 基合金与 TC11 合金的电子束焊接、Ti<sub>3</sub>Al 基合金与 TC4 合金的激光焊接,结果表明,接头室温拉伸强度均达到了钛合金母材的水平。张建伟等<sup>[20]</sup>研究了 Ti<sub>3</sub>Al 基合金与钛合金的电子束焊、激光焊及钎焊等多种工艺。Ti<sub>3</sub>Al 基合金与镍基高温合金之间的连接在实际工程中更具有吸引力,因为该材料组合不仅可以满足复合结构减重的需求,还可以充分发挥材料的高温性能优势。然而,关于 Ti<sub>3</sub>Al 基合金与镍基高温合金之间的焊接技术研究鲜有报道<sup>[21-22]</sup>。

要实现 Ti<sub>3</sub>Al 基合金与镍基高温合金之间的良好焊接是非常困难的。首先,Ti 和 Ni 具有极强的亲和力(Ti 在液态 Ni 中的溶解焓为 -170 kJ/mol<sup>[23]</sup>),根据 Ti-Ni 二元合金相图<sup>[24]</sup>,两种元素可反应生成多种 Ni-Ti 系金属间化合物,这些脆性相会严重恶化接头的力学性能,使得 Ti<sub>3</sub>Al 与镍基高温合金间的接头具有明显的开裂倾向<sup>[25]</sup>。另外,两种材料的熔点、热膨胀系数及热导率等物理性能差异较大,也会影响焊接过程中的热传导,并导致接头焊后产生一定的残余

热应力<sup>[26-27]</sup>。陈波等<sup>[21]</sup>采用 Ti-Zr-Cu-Ni 钎焊料,对 Ti<sub>3</sub>Al 基合金与镍基高温合金进行了钎焊探索研究,但接头的最高强度仅为 86.4 MPa。钱锦文等<sup>[22]</sup>以 Nb+Ni 作为中间层,对 Ti<sub>2</sub>AlNb 基合金与镍基高温合金进行了真空扩散连接,界面获得了较好的结合,但接头中也出现了 Ni<sub>3</sub>Nb、Ni<sub>6</sub>Nb<sub>7</sub> 等化合物,而且扩散焊接接头中残余的纯 Nb 层可能会对接头的高温强度产生不利的影响,焊接接头的结构设计及接头的高温性能均存在改进的空间。

激光焊接是一种典型的先进焊接工艺方法<sup>[28-29]</sup>,它利用了激光的高能量密度和快熔快凝特点,热影响区小,工件应力和变形小,生产效率高,具有工艺灵活、能量和冷速可控等诸多优点。与电子束焊接相比,激光焊接不需要真空保护,更容易实现预热和添加焊料。同时,激光具有良好的工艺灵活性,适于焊接薄壁类构件,可实现航空、航天发动机等复杂零件的高质量焊接。

本文采用激光焊接的方法,对 Ti<sub>3</sub>Al 基合金与镍基高温合金异种材料进行了焊接,在工艺上具有一定优势。同时,通过对焊料成分的设计,降低了接头界面脆性相的产生趋势,改善了激光焊接头的组织及性能。

## 2 实验材料及方法

### 2.1 实验材料

用于焊接实验的 Ti<sub>3</sub>Al 基合金母材为北京航空材料研究院研制的牌号为 TD3 的合金<sup>[30]</sup>,名义化学成分为 Ti-24Al-15Nb-1Mo(24%、15%、1% 分别指对应组分所占的原子数分数),由 α<sub>2</sub> 相、β/B2 相及 O 相组成,长期工作温度为 650~700 °C。实验用镍基高温合金母材为 GH4169 合金,其为体心四方 γ'相和面心立方 γ'相沉淀强化的镍基高温合金,长期工作温度可达到 700 °C,是目前航空发动机上广泛应用的高温结构材料之一<sup>[31]</sup>,其化学成分见表 1。

表 1 GH4169 合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of GH4169 alloy (mass fraction, %)

Composition	Ti	Al	Ni	Cr	Mo	Nb	Fe
Value	0.75-1.15	0.30-0.70	50.0-55.0	17.0-21.0	2.80-3.30	4.75-5.50	Bal.

将 Ti<sub>3</sub>Al 和 GH4169 母材进行线切割,加工成厚度为 1.5 mm 的板状样品,被焊表面开 45°坡口,不留钝边,采用对接接头形式,不留间隙。对试板进行除油处理,采用机械方法去除表面的氧化膜,然后使用丙酮将其清洗干净。

Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 异种材料激光焊接用的填充材

料采用自行设计制备的金属粉末,包括 Ti-Nb、Ti-Ni-Nb 及 Ni-Cu 粉末。共设计使用三种金属粉末,其化学成分见表 2。

### 2.2 焊接实验

焊接设备为特制的 6000 W 光纤激光加工综合系统。焊接前,采用夹具将两种母材固定在基板上,

表 2 激光焊接用焊料的化学成分(质量分数,%)  
Table 2 Chemical compositions of filling materials for laser welding (mass fraction, %)

Filling material	Ti	Ni	Nb	Cu
Ti-Nb	37	48	15	-
Ti-Ni-Nb	40	-	60	-
Ni-Cu	-	70	-	30

并将焊缝位置摆好。采用铺粉的方式将金属粉末逐层预置在两种母材的坡口之间,然后利用激光束将其

表 3 以 Ti-Ni-Nb 为焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接的工艺参数

Table 3 Process parameters in laser welding of Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 with Ti-Ni-Nb as filling material

Filling material	Laser power /W	Scanning speed / (mm·min <sup>-1</sup> )	Protective gas flow / (L·min <sup>-1</sup> )	Layer height /mm	Spot diameter /mm
Ti-Ni-Nb	270-350	500-650	25-35	0.2-0.3	0.6-1.5

另外,尝试采用三种金属粉末作为梯度复合焊料,在 Ti<sub>3</sub>Al 与 GH4169 两种母材对接接头坡口中的不同位置逐层预置不同成分的金属粉末,然后利用激光束将它们熔化,实现两种母材及金属粉末之间的连接。图 1 所示为预置金属粉末的位置及方式的示意图。采用此方式,可实现金属元素的种类及含量从 Ti<sub>3</sub>Al 母材到 GH4169 母材的逐渐过渡,降低接头焊缝产生脆性金属间化合物的趋势。

基于 Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接的工艺参数见表 4。首先在 Ti<sub>3</sub>Al 母材一侧预置 Ti-Nb 粉末,并采用激光逐层熔化;然后在 GH4169 母材一侧预置 Ni-Cu 粉末,并采用激光逐层熔化;最后在 Ti-Nb 层与 Ni-Cu 层之间预置 Ti-Ni-Nb 粉末,并采用激光逐层熔化。在

熔化并与母材结合,实现连接。具体方法是:先将粉末预置一层,待激光束将其熔化并与母材结合后,在熔覆层表面再预置下一层粉末,继续利用激光束进行扫描,直到焊料将整个焊缝填满并实现与母材的连接。焊接前,利用陶瓷片对母材进行预热,预热温度为 300 ℃。在焊接过程中,采用氩气作为保护气,防止焊缝被氧化,根据激光工艺参数实时调节保护气流量。

实验中,首先单独采用 Ti-Ni-Nb 金属粉末作为焊料进行激光焊,其工艺参数见表 3。

三种粉末的混合焊接中,每种粉末每层的预置厚度为 0.3~0.5 mm。其中,Ti<sub>3</sub>Al 母材一侧熔覆的 Ti-Nb 粉末以及 GH4169 母材一侧熔覆的 Ni-Cu 粉末为 2~3 层,厚度为 0.6~1 mm,焊缝中 Ti-Nb、Ti-Ni-Nb、Ni-Cu 三种焊料的体积比例约为 1:1:1。

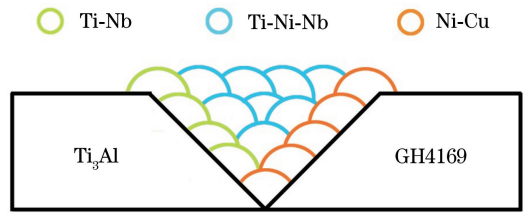


图 1 基于 Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu 复合焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接方式示意图

Fig. 1 Schematic of laser welding of Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 with Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu as composite filling material

表 4 基于 Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接工艺参数

Table 4 Process parameters in laser welding of Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 with Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu as filling material

Filling material	Laser power /W	Scanning speed / (mm·min <sup>-1</sup> )	Protective gas flow / (L·min <sup>-1</sup> )	Layer height /mm	Spot diameter /mm
Ni-Cu	200-280	450-550	20-30	0.3-0.5	0.6-1.5
Ti-Nb	240-320	500-600	20-30	0.3-0.5	0.6-1.5
Ti-Ni-Nb	270-350	500-650	25-35	0.3-0.5	0.6-1.5

焊后对接头进行热处理:空气热处理炉中 700 ℃保温 1 h,然后随炉冷却,冷却速度为 0.02~0.05 K/s。

### 2.3 分析测试

利用美国沃伯特公司生产的 450-SVD 型显微硬度仪测量焊接接头截面不同区域的维氏显微硬度,所用载荷为 1.96 N,作用时间为 15 s,对每个测试区域至少选取 5 个点进行测量后取平均值。

利用扫描电镜(SEM)对焊接接头的微观组织

进行观察,利用能量色散 X 射线谱(XEDS)进行化学成分分析。测试接头的室温抗拉强度,并利用 SEM 及 XEDS 对断口进行分析。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 Ti-Ni-Nb 焊料

#### 3.1.1 微观组织

图 2 所示为基于 Ti-Ni-Nb 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头的实物照片。

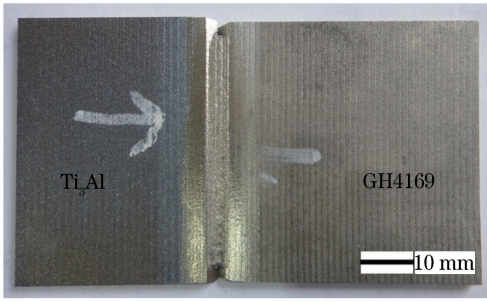


图 2 基于 Ti-Ni-Nb 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头的实物照片

Fig. 2 Photograph of laser welded Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 joints with Ti-Ni-Nb as filling material

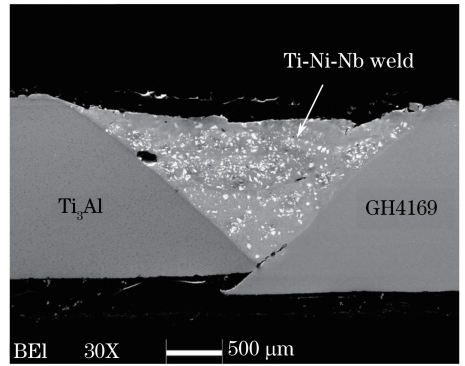


图 3 基于 Ti-Ni-Nb 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头截面的 BSE 照片

Fig. 3 Cross sectional BSE image of laser welded Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 joint with Ti-Ni-Nb as filling material

图 3 所示为采用 Ti-Ni-Nb 粉末作为焊料得到的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头截面的背散射扫描电镜(BSE)照片。可以看到,激光熔覆的 Ti-Ni-Nb 粉末基本能与两种母材形成较好的冶金结合,但是在 Ti-Ni-Nb 焊料与 GH4169 母材界面的底部,有一小部分产生了开裂。分析认为,开裂的位置在两种母材对接接头的最底端,因此可能是由激光熔覆过程中产生的残余热应力及两种母材之间较大的热膨胀系数差异造成的。

另外,由于焊缝与两种母材的界面为直线,未观察到激光束熔覆的光斑痕迹,因此推断在激光熔覆 Ti-Ni-Nb 金属粉末的过程中,两种母材基本没有发生熔化。

接头截面中各区域的微观组织如图 4 所示,其中典型相的 XEDS 分析结果见表 5。从图 4 中可以看到,Ti-Ni-Nb 粉末与 Ti<sub>3</sub>Al、GH4169 合金均没有发生反应。

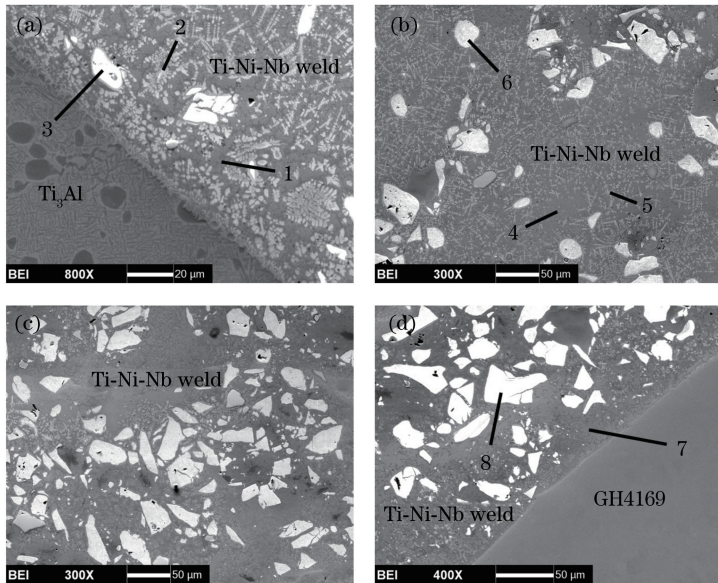


图 4 基于 Ti-Ni-Nb 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头截面的微观组织。(a) Ti<sub>3</sub>Al/Ti-Ni-Nb 界面; (b)(c) Ti-Ni-Nb 焊缝;(d) Ti-Ni-Nb/GH4169 界面

Fig. 4 Cross sectional microstructure of laser welded Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 joint with Ti-Ni-Nb as filling material. (a) Ti<sub>3</sub>Al/Ti-Ni-Nb interface; (b)(c) Ti-Ni-Nb weld; (d) Ti-Ni-Nb/GH4169 interface

图 4(a)所示为 Ti<sub>3</sub>Al/焊缝界面的 BSE 照片,左下部分为 Ti<sub>3</sub>Al 母材的微观组织,右上部分为 Ti-Ni-Nb 焊缝,其特征为灰色基体中分布着众多白色枝晶和一些亮色块状相。灰色基体(“1”)即为 Ti-

Ni-Nb 合金,但是由于该区域紧靠 Ti<sub>3</sub>Al 母材,因此 Ti 含量与焊料的相比有所增大。根据 XEDS 分析结果可知,白色枝晶相(“2”)为 Nb、Ti 固溶体,而亮色块状相(“3”)为 Nb 元素富集而形成的相,其中还

固溶了一些 Ti 元素。

图 4(b)、(c)所示为 Ti-Ni-Nb 焊缝的微观组织。其中,灰色基体(“4”)的化学成分与 Ti-Ni-Nb 粉末焊料的相近,因此应为 Ti-Ni-Nb 焊料本身。而基体中分布的枝晶相(“5”)为 Nb、Ti 固溶体,亮色块状相

(“6”)为纯 Nb。在激光熔覆 Ti-Ni-Nb 粉末的过程中,Nb 元素产生了偏析,在焊缝中分布着大量亮色的纯 Nb 相。图 4(d)所示为焊缝/GH4169 母材界面的 BSE 照片,左上部分焊缝一侧的组织仍主要由 Ti-Ni-Nb 合金基体上分布的大量纯 Nb 相组成。

表 5 基于 Ti-Ni-Nb 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头中典型相的化学成分及推测相

Table 5 Chemical compositions of typical phases in laser welded Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 joint with Ti-Ni-Nb as filling material and the corresponding deduced phases

Position	Atomic fraction /%						Deduced phase
	Ti	Al	Ni	Nb	Fe	Cr	
1	52.5	1.7	27.0	15.2	1.9	1.7	Ti-Ni-Nb alloy
2	43.1	1.3	17.0	35.3	1.8	1.5	Nb, Ti solid solution
3	14.4	-	2.2	83.4	-	-	Nb
4	51.5	-	34.5	14.0	-	-	Ti-Ni-Nb alloy
5	26.9	-	8.8	64.3	-	-	Nb, Ti solid solution
6	0.3	-	-	99.7	-	-	Nb
7	56.6	-	32.1	11.3	-	-	Ti-Ni-Nb alloy
8	-	-	0.8	99.2	-	-	Nb

### 3.1.2 力学性能

对基于 Ti-Ni-Nb 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头中不同区域的维氏显微硬度进行测试,得到了接头中硬度值的分布规律,如图 5 所示。可以看到,焊缝的显微硬度值高于两侧母材的。

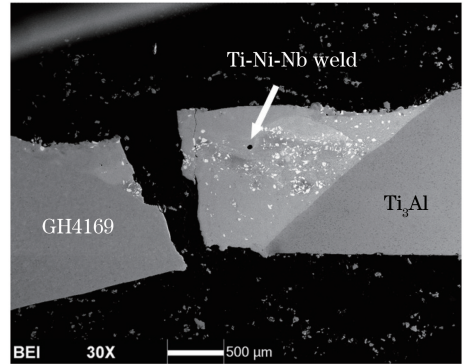


图 6 基于 Ti-Ni-Nb 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头断裂截面的 BSE 照片

Fig. 6 Cross sectional BSE image of fracture of laser welded Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 joint with Ti-Ni-Nb as filling material

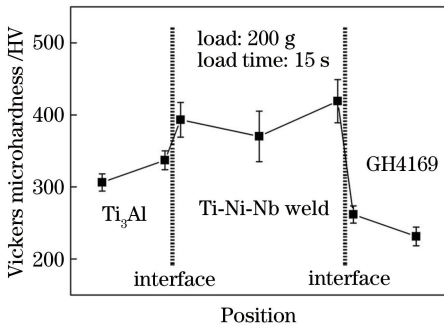


图 5 基于 Ti-Ni-Nb 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头的显微硬度分布

Fig. 5 Microhardness distribution in laser welded Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 joint with Ti-Ni-Nb as filling material

接头的室温抗拉强度见表 6。计算得到,接头的平均室温抗拉强度为 129 MPa。对重新组合的断裂试样截面进行观察发现,试样沿着焊缝/GH4169 界面底部的开裂位置发生断裂,如图 6 所示。

图 7 所示为接头断口的 SEM 照片,可以看到,试样的断裂方式为典型的解理断裂。XEDS 分析结

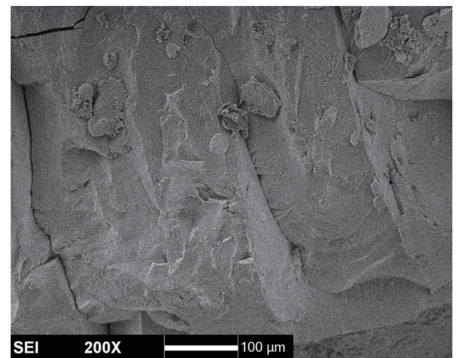


图 7 基于 Ti-Ni-Nb 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头拉伸断口的 SEM 照片

Fig. 7 SEM image of tensile fracture of laser welded Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 joint with Ti-Ni-Nb as filling material

表 6 基于 Ti-Ni-Nb 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头的室温抗拉强度

Table 6 Tensile strength at room temperature of laser welded Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 joint with Ti-Ni-Nb as filling material

Experiment No.	1	2	3
Value /MPa	102	154	132
Average value /MPa	129		

果见表 7, 可以看出, 断口的平均化学成分与 Ti-Ni-Nb 粉末焊料的接近。

表 7 基于 Ti-Ni-Nb 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头拉伸断口的 XEDS 分析结果

Table 7 XEDS analysis results of tensile fracture of laser welded Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 joint with Ti-Ni-Nb as filling material

Item	Atomic fraction / %						Deduced phase
	Ti	Al	Ni	Nb	Fe	Cr	
Content	32.2	0.7	44.3	18.2	1.7	2.9	Ti-Ni-Nb alloy

### 3.2 Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu 复合焊料

#### 3.2.1 微观组织

图 8 所示为采用 Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu 粉末作为梯度复合焊料时得到的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头的实物照片。

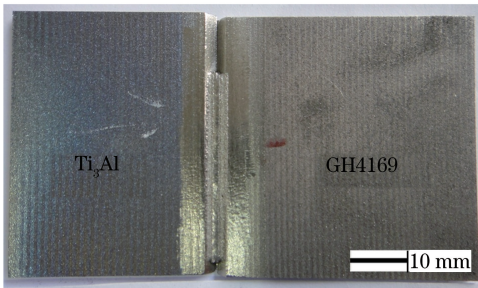


图 8 基于 Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头的实物照片

Fig. 8 Photograph of laser welded Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 joint with Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu as filling material

接头截面的 BSE 照片如图 9 所示。不难理解, 按照图 1 所示的方式, 利用激光束将三种金属粉末逐层熔覆填满坡口, 相当于在接头中形成了从 Ti<sub>3</sub>Al 母材到由 Ti-Nb、Ti-Ni-Nb、Ni-Cu 合金组成的焊缝, 再到 GH4169 母材的过渡。从图 9 中可以观察到, 焊缝中的不同区域具有不同的组织特征: 白色块状相分布在浅灰色基体中的紧靠 Ti<sub>3</sub>Al 母材的区域由激光熔覆 Ti-Nb 粉末形成, 靠近 GH4169 母材的无明显组织特征的区域由激光熔覆 Ni-Cu 粉末形成, 两个区域之间为 Ti-Ni-Nb 区域。

Ti<sub>3</sub>Al 母材与 Ti-Nb 金属粉末、Ti-Nb 与 Ti-Ni-Nb、Ti-Ni-Nb 与 Ni-Cu、Ni-Cu 金属粉末与 GH4169 母材均能形成冶金结合, 没有宏观裂纹产生。在激光焊接的过程中, 两种母材的坡口之间第一层预置的为 Ni-Cu 粉末, Ni-Cu 合金与 Ti<sub>3</sub>Al 母材会反应生成 Al(Cu, Ni)<sub>2</sub>Ti、(Cu, Ni)<sub>2</sub>Ti 等脆性金属间化合物及固溶 Ni、Cu 元素的 Ti<sub>2</sub>AlNb 相<sup>[32]</sup>, 是裂纹容易产生和扩展的地方, 因此在第一层的焊缝中, Ti<sub>3</sub>Al/焊缝界面处发生了开裂。在进一步的研究工作中, 可通过采用精确送粉的方式, 使 Ni-Cu 金属粉末不与 Ti<sub>3</sub>Al 母材接触, 避免这种开裂现象的产生。

从图 9 中还可以看到, 焊缝与 Ti<sub>3</sub>Al 母材的界面为直线, 而在焊缝与 GH4169 母材的界面中可以明显观察到激光光斑的痕迹。这一现象说明, 在激光熔覆的过程中, Ti<sub>3</sub>Al 母材表面基本没有发生熔化, 而在另一侧, Ni-Cu 粉末与 GH4169 母材同时发生了熔化并快速凝固。

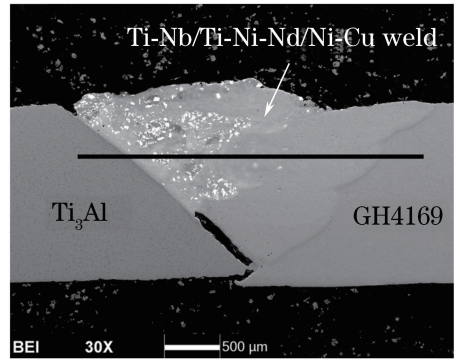


图 9 基于 Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头截面的 BSE 照片

Fig. 9 Cross sectional BSE image of laser welded Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 joint with Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu as filling material

沿图 9 中黑色线所示路径对接头进行线扫描, 结果如图 10 所示, 根据各元素的含量水平, 可把曲线图分成 5 个区域, 分别对应于 Ti<sub>3</sub>Al 母材、Ti-Nb 区、Ti-Ni-Nb 区、Ni-Cu 区和 GH4169 母材。

从图 10 中可以看到, 从 Ti<sub>3</sub>Al 母材到 Ti<sub>3</sub>Al/焊缝界面, 元素含量发了明显变化。由于熔覆在 Ti<sub>3</sub>Al 母材表面的是 Ti-Nb 粉末, 因此在这个区域, Nb 元素的含量迅速增大, Al 含量几乎为零, Ti 含量与母材的相比有所减小。当到达 Ti-Ni-Nb 区时, Ti、Nb 含量均有所减小, 而 Ni 元素的含量则有显著的增大。在其右侧的 Ni-Cu 区, Ni 含量继续增大到最大值, 同时 Cu 含量也随之增大, Ti、Nb 含量减小至较低水平。到达 GH4169 母材后, Ni、Cu 含量减小, Cr、Fe 含量增大。值得注意的是, Ti-Nb 区中含有一定量的 Ni 元素, 它们来自于右侧的 Ti-Ni-Nb 区; 而 Ti-Ni-Nb 区的右半部分也含有一些 Cu 元素, 它们是从 Ni-Cu 区扩散到这一区域的; GH4169 母材中的 Cr、Fe 也有少量进入到了 Ni-Cu 区。

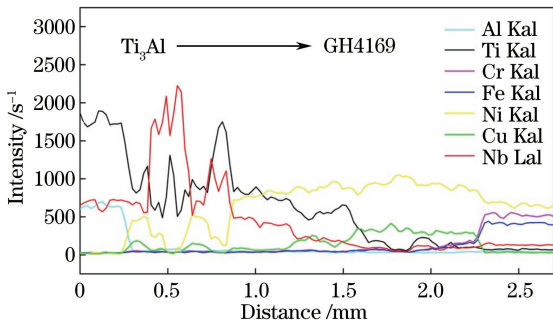


图 10 基于 Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头截面的线扫描结果

Fig. 10 Cross-sectional line scanning result of laser welded Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 joint with Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu as filling material

接头截面的微观组织照片如图 11 所示,接头中不同区域的 XEDS 分析结果见表 8。图 11(a)所示为 Ti<sub>3</sub>Al/焊缝界面的微观组织,左下部分为 Ti<sub>3</sub>Al 母材,右上部分为 Ti-Nb 区。如表 8 所示,数字“9”所在的宽度约为 60 μm 的灰色区域,其主要组成元素为 Ti 和 Nb,为(Ti, Nb)固溶体。在这个区域的右上侧,组织特征为灰色基体中分布着众多白色枝晶及亮色块状相。根据 XEDS 分析结果可知,亮色相(“10”)为纯 Nb,白色枝晶相(“11”)为(Ti, Nb)固溶体,而灰色基体(“12”)中除含有 Ti、Nb 两种元素外,还含有一定量来自右侧 Ti-Ni-Nb 区的 Ni 元素,形成了 Ti-Ni-Nb 合金相。

图 11(b)所示为 Ti-Ni-Nb 区的微观组织,同样是白色枝晶及亮色块状相分布在灰色基体中。由化学成分分析结果可知,灰色基体(“13”)与采用的 Ti-Ni-Nb 粉末的成分相近,白色枝晶相(“14”)为(Ti, Nb)固溶体,亮色块状相(“15”)为激光熔覆过程中析出的 Nb。

图 11(c)所示为 Ti-Ni-Nb/Ni-Cu 界面处的 BSE 照片,其中亮色相(“16”)仍为 Nb,而“17”所在区域为(Ti, Nb)固溶体。根据 XEDS 分析结果可知,在靠近 Ti-Ni-Nb/Ni-Cu 界面处的 Ni-Cu 区,其化学成分中除含有 Ni、Cu 外,还含有一定量的 Ti 和 Nb 元素。图 11(d)和图 11(e)所示分别为 Ni-Cu 区和 Ni-Cu/GH4169 界面的微观组织照片,可以看到 Ni-Cu 粉末与 GH4169 母材具有良好的冶金相容性,界面处没有微裂纹产生。

另外,值得注意的是,在焊缝中某些区域观察到了气孔的存在,如图 12 所示。分析认为,粉末状态及焊接工艺参数都会影响气孔的产生。如粉末中存

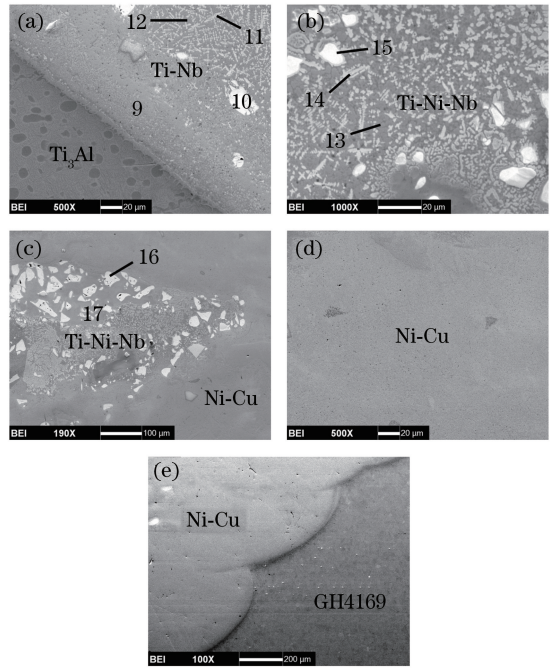


图 11 基于 Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头截面的微观组织。(a) Ti<sub>3</sub>Al/Ti-Nb 界面; (b) Ti-Ni-Nb 区;(c) Ti-Ni-Nb/Ni-Cu 界面; (d) Ni-Cu 区;(e) Ni-Cu/GH4169 界面

Fig. 11 Cross sectional microstructures of laser welded Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 joint with Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu as filling material. (a) Ti<sub>3</sub>Al/Ti-Nb interface; (b) Ti-Ni-Nb region; (c) Ti-Ni-Nb/Ni-Cu interface; (d) Ni-Cu region; (e) Ni-Cu/GH4169 interface

在一定数量的空心粉,则这些空心粉在熔化再凝固过程中,会在焊缝中留下气孔;而焊接速度主要影响熔池的结晶速度,如果焊接速度较快,熔池结晶快,则气体不容易排出,也容易产生气孔;同时,若保护气流量不合适,也会在焊缝快速凝固过程中形成气孔。这些气孔会降低接头的强度,可通过调整粉末粒度、粉末质量及激光工艺参数等来消除这些缺陷。

### 3.2.2 力学性能

图 13 所示为基于 Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头维氏显微硬度的分布规律。从 Ti<sub>3</sub>Al 母材到 GH4169 母材,随着焊缝中合金成分的变化,显微硬度值发生改变。

在 Ti<sub>3</sub>Al/焊缝界面附近, Ti<sub>3</sub>Al 一侧区域的硬度值与原始母材的相比略有增大。Ti-Nb 区及 Ti-Ni-Nb 区具有较高的显微硬度,达到 550~600 HV。而在 Ni-Cu 区,硬度值迅速减小至约 210 HV,到达 Ni-Cu 与 GH4169 母材的界面处又略有升高(平均值为 235 HV)。在该界面附近, GH4169 一侧区域的显微硬度与原始母材的相比基本没有发生变化。

表 8 基于 Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头中典型相的化学成分及推测相

Table 8 Chemical compositions of typical phases in laser welded Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 joint with Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu as filling material and the corresponding deduced phases

Position	Atomic fraction / %							Deduced phase
	Ti	Al	Ni	Cu	Nb	Fe	Cr	
9	53.5	1.5	8.2	3.8	32.1	0.4	0.5	(Ti, Nb) solid solution
10	/	/	0.6	/	99.4	/	/	Nb
11	49.5	1.5	7.6	4.3	35.9	1.2	/	(Ti, Nb) solid solution
12	46.8	0.7	19.7	3.3	27.3	1.3	0.9	Ti-Ni-Nb alloy
13	50.0	/	31.0	5.0	14.0	/	/	Ti-Ni-Nb alloy
14	33.1	/	7.3	1.1	58.5	/	/	(Ti, Nb) solid solution
15	/	/	/	/	100.0	/	/	Nb
16	/	/	/	/	100.0	/	/	Nb
17	69.5	/	0.9	/	29.6	/	/	(Ti, Nb) solid solution

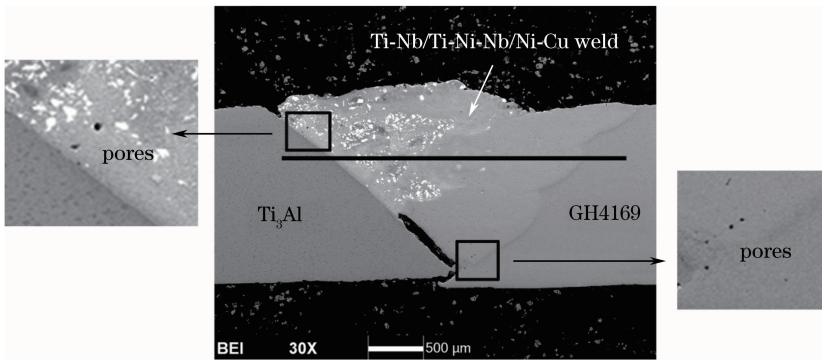


图 12 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头中的气孔

Fig. 12 Pores in laser welded Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 joint

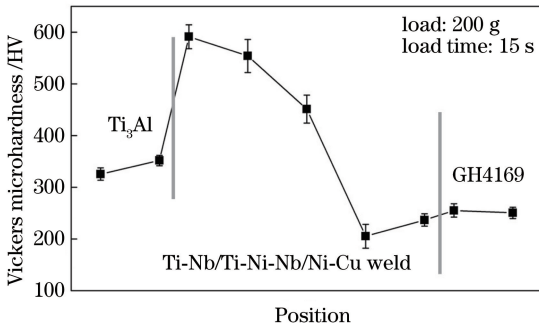


图 13 基于 Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头的显微硬度分布

Fig. 13 Micro-hardness distribution in laser welded Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 joint with Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu as filling material

接头的室温抗拉强度数据见表 9, 可以看到, 采用 Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu 粉末作为复合焊料时, 接头的平均室温抗拉强度为 180 MPa, 相比于单独采用 Ti-Ni-Nb 粉末作为焊料时, 强度增大了约 40%。但 Ti<sub>3</sub>Al/焊缝界面底部位置存在的裂缝及焊缝中存在的气孔等缺陷很大程度上影响了接头的力学性能。在进一步的研究工作中, 可通过采用精

确的送粉方式, 并对不同粉末焊料的化学成分、粉末用量的比例以及每种粉末对应的激光熔覆工艺参数进行优化等, 改善接头的组织及力学性能。

表 9 基于 Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头的室温抗拉强度

Table 9 Tensile strength at room temperature of laser welded Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 joint with Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu as filling material

Experiment No.	1	2	3
Value	172	174	196
Average value / MPa	180		

从图 14 可以看到, 在拉伸实验中, 接头断裂于焊缝。从断裂的位置推测, 试样应断裂于 Ti-Ni-Nb 层与 Ni-Cu 层的界面。图 15 所示为断口的 SEM 照片, 可以观察到典型的解理断裂特征。对断口进行化学成分分析, 结果见表 10。可以看到, 断口的化学成分中含有 Ti、Ni、Cu、Nb 等元素, 因此断口应位于 Ti-Ni-Nb 与 Ni-Cu 粉末的混合区域。不难理解, 这两种粉末的成分差异较大, 冶金相容性较接头中其他区域的弱, 因此该 Ti-Ni-Nb 与 Ni-Cu 粉末的混合区域为接头的薄弱环节。



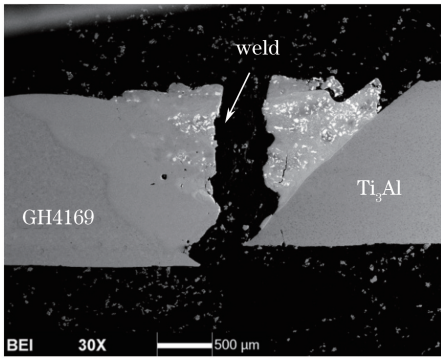


图 14 基于 Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu 焊料的

Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头的断裂截面 BSE 照片

Fig. 14 Cross sectional BSE image of fracture of laser welded Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 joint with Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu as filling material

## 4 结 论

研究了 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 的激光焊接,分析了接头的微观组织及力学性能,得到如下结论。

1) 采用 Ti-Ni-Nb 粉末作为焊料时,焊缝基本能与两种母材形成较好的冶金结合,但在 Ti-Ni-Nb/GH4169 界面底部,残余热应力的作用引起开裂,焊缝中存在气孔。焊料与两种母材的界面均没有生成反应层,焊缝的相组成主要为 Ti-Ni-Nb 相、Nb-Ti 固溶体及析出的 Nb。焊缝与母材界面的显微硬度高于焊缝中心及母材的。接头的平均室温抗拉强度为 129 MPa。在拉伸实验中,试样在焊缝/GH4169 界面底部的开裂位置处发生断裂。

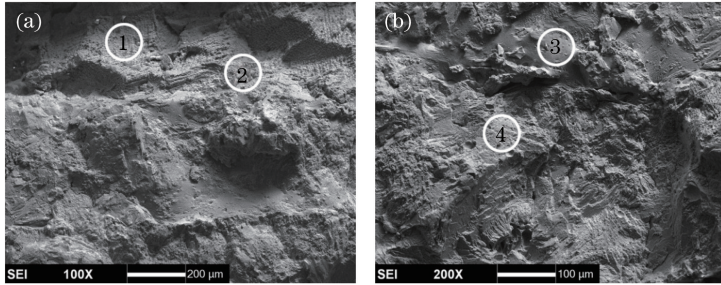


图 15 基于 Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头的拉伸断口 SEM 照片

Fig. 15 SEM images of tensile fracture of laser welded Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 joint with Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu as filling material

表 10 基于 Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu 焊料的 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 激光焊接头的拉伸断口的 XEDS 分析结果

Table 10 XEDS analysis results of tensile fracture of laser welded Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 joint with Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu as filling material

Position	Atomic fraction / %						
	Ti	Al	Ni	Nb	Cu	Fe	Cr
①	12.1	3.4	51.3	5.2	20.9	3.5	3.6
②	5.6	5.0	58.3	2.7	21.4	3.3	3.7
③	30.8	-	53.5	11.9	3.1	0.3	0.4
④	25.5	-	51.7	15.5	7.3	-	-

2) 采用 Ti-Nb/Ti-Ni-Nb/Ni-Cu 三种粉末作为复合焊料时,可实现两种母材的连接,但在第一层 Ni-Cu/Ti<sub>3</sub>Al 界面处发生开裂。接头中主要元素的含量随焊料成分的不同沿焊缝逐渐发生变化。Ti<sub>3</sub>Al/Ti-Nb 界面、Ti-Nb 区、Ti-Ni-Nb 区均主要由 Ti-Nb 固溶体、Ti-Ni-Nb 相及析出的纯 Nb 组成; Ni-Cu 粉末与 GH4169 母材形成了良好的冶金结合。焊缝中有气孔存在。Ti<sub>3</sub>Al/Ti-Nb 界面具有较高的显微硬度, Ti-Nb 区、Ti-Ni-Nb 区的硬度值高于 Ni-Cu 区的。接头的平均室温抗拉强度为 180 MPa。

3) 在进一步针对 Ti<sub>3</sub>Al/GH4169 异种材料的激光焊接研究工作中,可对金属粉末焊料的化学成分、粉末用量的比例以及每种粉末对应的激光工艺参数进行优化,并采用精确的送粉方式及送粉位置,避免冶金相容性差的金属粉末之间、金属粉末与母材之间接触发生反应,以改善接头的微观组织和力学性能。

## 参 考 文 献

[1] Djanarthany S, Viala J C, Bouix J. An overview of monolithic titanium aluminide based on Ti<sub>3</sub>Al and TiAl[J]. Materials Chemistry and Physics, 2001,

- 72(3): 301-319.
- [2] Yang S J, Nam S W, Hagiwara M. Investigation of creep deformation mechanisms and environmental effects on creep resistance in a  $Ti_2AlNb$  based intermetallic alloy[J]. *Intermetallics*, 2004, 12(3): 261-274.
- [3] Cao J X, Sun F S, Cao C X, *et al.* Research progresses on the  $Ti_3Al$ -based alloy[C]. *Advanced Materials Technology Symposium*, 2000: 90-92.  
曹京霞, 孙福生, 曹春晓, 等.  $Ti_3Al$  基合金研究进展[C]. *先进材料技术研讨会*, 2000: 90-92.
- [4] Qiu H Z. Latest developments in advanced materials for aerospace aircraft in the United States[J]. *Aerospace Materials Technology*, 1994, 24(6): 5-9.  
邱惠中. 美国空天飞机用先进材料最新进展[J]. *宇航材料工艺*, 1994, 24(6): 5-9.
- [5] Kim Y W, Froes F H, Whang S H, *et al.* Physical metallurgy of titanium aluminides[J]. *Physical Metallurgy of Titanium Aluminides*, 1989: 465-492.
- [6] Xiong H P, Mao J Y, Chen B Q, *et al.* Research advances on the welding and joining technologies of light-mass high-temperature structural materials in aerospace field[J]. *Material Engineering*, 2013(10): 1-12.  
熊华平, 毛建英, 陈冰清, 等. 航空航天轻质高温结构材料的焊接技术研究进展[J]. *材料工程*, 2013(10): 1-12.
- [7] He P, Feng J C, Zhou H. Microstructure and strength of brazed joints of  $Ti_3Al$ -based alloy with NiCrSiB [J]. *Materials Characterization*, 2004, 52(4): 309-318.
- [8] Liu B, Wu Y, Zhou Z X, *et al.* The microstructure and mechanical properties of TIG welding joint of Ti-23Al-14Nb-3V aluminide alloy[J]. *Material Science and Technology*, 1997, 5(1): 45-49.  
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]. *材料科学与工程*, 1997, 5(1): 45-49.
- [9] David S A, Horton J A, Goodwin G M, *et al.* Weldability and microstructure of a titanium aluminide[J]. *Welding Journal*, 1990, 69(4): 133-140.
- [10] Baeslack W A I, Mascarella T J, Kelly T J. Weldability of a titanium aluminide[J]. *Welding Journal*, 1989, 68(12): 483-498.
- [11] 李艳, 刘卫红, 袁鸿, 等.  $Ti_3Al$  基合金熔化用填充材料: 200610055865.3[P]. 2006-10-05.
- [12] Liu W H, Li Y, Mao W, *et al.* Gas tungsten arc welding of Ti-24Al-15Nb-1Mo alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2006, 26(3): 111-115.  
刘卫红, 李艳, 毛唯, 等. Ti-24Al-15Nb-1Mo 合金氩弧焊[J]. *航空材料学报*, 2006, 26(3): 111-115.
- [13] Cheng Y J, Li S Q, Zhang J W. Electron beam welding of  $Ti_3Al$ -based alloy and Ti-6Al-4V alloy plate[J]. *Electron Beam Processing Technology*, 2004(s1): 164-167.  
程云君, 李世琼, 张建伟.  $Ti_3Al$  基合金与 Ti-6Al-4V 合金板的电子束焊接[J]. *电子束加工技术*, 2004(s1): 164-167.
- [14] Tan L J, Yao Z K, Zhou W, *et al.* Microstructure and properties of electron beam welded joint of Ti-22Al-25Nb/TC11[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2010(14): 302-306.
- [15] Tan L J, Yao Z K, Ning Y Q, *et al.* Effect of isothermal deformation on microstructure and properties of electron beam welded joint of  $Ti_2AlNb/TC11$ [J]. *Materials Science and Technology*, 2011, 27(9): 1469-1474.
- [16] Tan L J, Yao Z K, Wang T, *et al.* Effect of post-weld heat treatment on microstructure and properties of electron beam welded joint of  $Ti_2AlNb/TC11$ [J]. *Materials Science and Technology*, 2011, 26(8): 1315-1320.
- [17] Zhang H T, He P, Feng J C, *et al.* Interfacial microstructure and strength of the dissimilar joint  $Ti_3Al/TC4$  welded by the electron beam process[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 425(1/2): 255-259.
- [18] Yang H H, Yao Z K, Gao J, *et al.* Influence of gradient heat treatment on microstructure and microhardness in weld seam of  $Ti_3Al/TC11$  dual alloys[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2010, 39(1): 22-26.
- [19] Lei Z L, Dong Z J, Chen Y B, *et al.* Microstructure and mechanical properties of laser welded Ti-22Al-27Nb/TC4 dissimilar alloys [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 559(1): 909-916.
- [20] Zhang J W, Liang X B, Cheng Y J, *et al.* Research progress of  $Ti_3Al$  alloy and  $Ti_2AlNb$  alloy for aeroengine applications[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2011, 23(2): 545-548.  
张建伟, 梁晓波, 程云君, 等. 航空发动机用  $Ti_3Al$  合金和  $Ti_2AlNb$  合金研制进展[J]. *钢铁研究学报*, 2011, 23(2): 545-548.
- [21] Chen B, Xiong H P, Mao W, *et al.* Microstructures and properties of  $Ti_3Al/Ti_3Al$  and  $Ti_3Al/GH536$  joints using Ti-Zr-Cu-Ni brazing filler[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2010, 30(5): 35-38.  
陈波, 熊华平, 毛唯, 等. 采用 Ti-Zr-Cu-Ni 真空钎焊  $Ti_3Al/Ti_3Al$  和  $Ti_3Al/GH536$  接头组织及性能[J]. *航空材料学报*, 2010, 30(5): 35-38.
- [22] Qian J W, Li J L, Hou J B, *et al.* Microstructures

- and mechanical properties of diffusion bonded Ti<sub>2</sub>AlNb and GH4169 joints by using Nb + Ni interlayer [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2009, 29(1): 57-62.
- 钱锦文, 李京龙, 侯金保, 等. Nb + Ni 中间层对 Ti<sub>2</sub>AlNb 与 GH4169 扩散连接接头组织与性能影响 [J]. *航空材料学报*, 2009, 29(1): 57-62.
- [23] Takeuchi A, Inoue A. Classification of bulk metallic glasses by atomic size difference, heat of mixing and period of constituent elements and its application to characterization of the main alloying element [J]. *Materials Transactions*, 2005, 46(12): 2817-2829.
- [24] Keyzer J D, Cacciamani G, Dupin N, *et al.* Thermodynamic modeling and optimization of the Fe-Ni-Ti system [J]. *Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*, 2009, 33(1): 109-123.
- [25] Li H M, Sun D Q, Gu X Y, *et al.* Effects of the thickness of Cu filler metal on the microstructure and properties of laser-welded TiNi alloy and stainless steel joint [J]. *Materials and Design*, 2013, 50(17): 342-350.
- [26] Wei P S, Chung F K. Unsteady marangoni flow in a molten pool when welding dissimilar metals [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2000, 31(6): 1387-1403.
- [27] Lee M K, Lee J G, Choi Y H, *et al.* Interlayer engineering for dissimilar bonding of titanium to stainless steel [J]. *Materials Letters*, 2010, 64(9): 1105-1108.
- [28] Gong Y B, Wang S L, Chen Y H, *et al.* Forming and mechanical properties of FeSiB amorphous ribbon joint by laser welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(3): 0303001.
- 龚玉兵, 王善林, 陈玉华, 等. FeSiB 非晶薄带激光焊焊缝成形及接头力学性能 [J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0303001.
- [29] Cao X L, Xu P Q, Cao Z Y, *et al.* Research on microstructure and element diffusion in YG20/45 # steel laser welds [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0303006.
- 曹晓莲, 徐培全, 曹卓玥, 等. YG20/45 # 钢激光焊焊缝组织与界面元素扩散研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0303006.
- [30] Cao J X, Bai F, Li Z X. High temperature low cycle fatigue behavior of titanium aluminide Ti-24Al-15Nb-1Mo alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 424(1/2): 47-52.
- [31] 《中国航空材料手册》编辑委员会. *中国航空材料手册* [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 323-360.
- [32] Chen B Q, Xiong H P, Sun B B, *et al.* Microstructure evolution and tensile properties of Ti<sub>3</sub>Al/Ni-based superalloy welded joint [J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2014, 30(7): 715-721.