



## TiNi/Nb/TC4 真空电子束焊接接头裂纹

占宇林<sup>1</sup>, 陈玉华<sup>1</sup>, 孙国栋<sup>2</sup>, 刘长华<sup>2</sup>, 孙松伟<sup>1</sup>

(1. 南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 南昌 330063;

2. 九江学院 机械与材料工程学院, 九江 332005)

**摘 要:** 采用真空电子束焊接方法对 3 mm 厚 TiNi 合金与 TC4 异种金属进行对接焊, 添加 Nb 为填充金属控制焊接裂纹的形成; 分析了裂纹形成机理, Ti<sub>2</sub>Ni 脆性相的形成条件, 接头元素分布特点及接头力学性能。结果表明: TiNi 合金与 TC4 直接焊接易使焊接接头产生裂纹, 大量 Ti<sub>2</sub>Ni 脆性相的形成导致焊缝中裂纹和孔洞的产生, 添加 Nb 为填充金属有效降低接头裂纹敏感性。填充金属厚度为 0.55 mm 时获得无裂纹缺陷的焊接接头, Ti<sub>2</sub>Ni 生成焓较小, 使 TC4 侧熔合线附近形成 Ti<sub>2</sub>Ni 脆性金属间化合物层, 焊缝中心组织 Nb 含量较高, 接头力学性能良好, 抗拉强度达到 391 MPa, 伸长率为 2.7%。

**关键词:** TiNi/Nb/TC4; 异种金属; Nb 填充金属; 真空电子束焊; 焊接裂纹

**文章编号:** 1004-0609(2018)-11-2242-07

**中图分类号:** TG406

**文献标志码:** A

异种金属材料的连接对现代化工业有着重要的意义。对于复合构件来说, 单一材料无法满足多种性能需求, 将异种材料连接可使复合构件具有多种功能; 但异种材料焊接过程中由于物理性能和化学性能上的差异使接头易产生裂纹, 降低焊缝质量, 从而难以获得具有一定强度的焊接接头, 限制其进一步应用<sup>[1-3]</sup>。

TiNi 合金是一种新型功能材料, 以其优异的比强度、耐磨性、耐腐蚀性、形状记忆性、阻尼性等特点广泛应用于航空航天、核工业、海上石油、家电、日用品等行业<sup>[4-5]</sup>; TC4 是  $\alpha+\beta$  型钛合金, 兼具  $\alpha$  相与  $\beta$  相性能, 具有良好的比强度、耐腐蚀性、生物相容性等性能, 广泛应用于航空航天、生物医疗、船舶等领域, 是使用量最多的钛合金<sup>[6]</sup>。TiNi 合金与 TC4 异种材料的焊接构件可用于飞机发动机的消音部件以降低噪音<sup>[7]</sup>, 但焊接冶金过程中易产生大量 Ti<sub>2</sub>Ni 等脆性金属间化合物<sup>[8-10]</sup>, 而且 TiNi 合金与 TC4 异种材料的热膨胀系数存在差异, 使焊缝容易产生裂纹, 此外, Ti 在高温下容易吸收 H、O、N, 增加焊接接头脆性<sup>[11]</sup>, 增大接头裂纹敏感性, 降低焊接接头质量, 传统的焊接方法难以满足 TiNi 合金与 TC4 的焊接要求。

国内外学者对 TiNi 类合金与 TC4 的研究以激光

焊为主, 陈玉华等<sup>[12-13]</sup>通过添加纯 Ti 丝和纯 Ni 丝的方式对 0.2 mm 薄片 Ni<sub>47</sub>Ti<sub>44</sub>Nb<sub>9</sub> 与 TC4 进行激光焊, 消除了焊接裂纹, 获得了表面成形平整, 内部无裂纹缺陷的焊接接头; ZOERAM 等<sup>[14-15]</sup>对 1 mm 厚的 NiTi 合金与 Ti-6Al-4V 进行对接焊中发现焊缝存在较多横向裂纹, 添加 75  $\mu\text{m}$  厚的铜箔的消除了焊接裂纹, 抗拉强度达到 318 MPa, Cu 厚度增加到 100  $\mu\text{m}$  时焊缝中金属间化合物增多使接头产生孔洞; OLIVEIRA 等<sup>[16]</sup>在 1.1 mm 厚 TiNi 与 TC4 中间加入中间层, 以熔-钎焊形式进行激光焊接, 获得无裂纹缺陷的焊接接头, 在激光的作用下 TC4 一侧形成熔焊接头, TiNi 合金侧形成钎焊接头, 抗拉强度为 300 MPa。真空电子束焊在近十几年得到广泛的关注与应用, 其相对于激光焊接具有真空环境、能量密度更高、熔池深宽比更大的特点, 适用于较厚且对气体保护要求较高材料的焊接, 而 TiNi 合金与 TC4 的电子束焊基本没有文献报道。本文作者通过添加 Nb 为填充金属, 采用真空电子束焊机对 3 mm 厚 TiNi 合金与 TC4 钛合金进行焊接, 观察焊缝微观组织结构, 研究接头裂纹形成原因, 分析焊缝中元素分布特点和断口特征, 为薄板 TiNi 合金与 TC4 的真空电子束焊接提供理论支持。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51565040); 江西省科技计划项目(20171BCB24007, 20151BBE50034); 江西省教育厅科技落地计划(科学前沿项目(KJLD14055))

**收稿日期:** 2017-08-24; **修订日期:** 2017-11-07

**通信作者:** 陈玉华, 教授, 博士; 电话: 0791-83863023; E-mail: ch.yu.hu@163.com

1 实验

本试验采用热轧态  $\text{Ni}_{50.4}\text{Ti}_{49.6}$ (摩尔分数, %)和 Ti-6Al-4V 钛合金(TC4), TiNi 合金尺寸为  $3.05\text{ mm}\times 70\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ , TC4 尺寸为  $3\text{ mm}\times 80\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ , 填充金属为纯度 99.99% 的纯 Nb, 表 1 所列为母材的主要化学成分及物理性能。

表 1 材料主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of materials

Elements	Mass fraction/%		
	TiNi	TC4	Nb
Al	—	5.5	—
V	—	4.37	—
Ti	44.34	90.13	—
Ni	55.66	—	—
Nb	—	—	100

试验前将 TiNi 合金置于  $V(\text{HF}):V(\text{HNO}_3):V(\text{H}_2\text{O})=1:3:5$  的混合溶液中酸洗去除表面氧化膜, 控制酸洗时间使试样的厚度控制为  $3\text{ mm}$ , 误差范围为  $\pm 40\text{ }\mu\text{m}$ ; 将  $3\text{ mm}$  厚的纯 Nb 板切割成高度为  $3\text{ mm}$  的条状金属, 再用砂纸将其表面打磨平整至指定厚度; TC4 钛合金分别用 800、1 500 号的砂纸均匀擦拭去除表面杂

表 2 材料物理性能

Table 2 Physical properties of Materials

Performance	Melting point/ $^{\circ}\text{C}$	Coefficient of linear expansion/ $(10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	Thermal conductivity/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	Specific heat capacity/ $(\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
TiNi	1310	10	18.0	0.461
Nb	2467	7.2	53.7	0.26
TC4	1668	9.1	6.8	0.611

质与氧化膜, 用丙酮清洗除去焊材表面杂质与油污, 吹干后置于自制夹具中进行装夹, 使装配间隙小于  $20\text{ }\mu\text{m}$ , TiNi 合金、Nb、TC4 表面置于同一水平高度, 如图 1。试验所用设备为德国生产的 KS15-PN150KM 型焊机, 可调参数有工作距离、聚焦电流、电子束流、焊接速度等, 本试验参数为: 工作距离  $295\text{ mm}$ , 聚焦电流  $498\text{ mA}$ , 电子束流  $27\text{ mA}$ (直接焊接时电子束流为  $23\text{ mA}$ ), 焊接速度  $900\text{ mm/min}$ 。TiNi 合金与 TC4 侧的腐蚀剂分别为  $5\text{ mL HF}+15\text{ mL HNO}_3+35\text{ mL H}_2\text{O}$  与  $5\text{ mL HF}+10\text{ mL HNO}_3+125\text{ mL H}_2\text{O}$ 。焊后对焊缝进行显微观察, 组织形貌分析, 裂纹敏感性元素分布规律等研究。

2 结果与分析

2.1 接头裂纹形成原因

TiNi 合金与 TC4 钛合金直接焊接时, 极易产生焊接裂纹。图 2(a)所示为直接焊接时接头横截面形貌, 可以看出焊后接头直接断裂, 裂纹沿熔合线方向扩展, 熔合区存在孔洞缺陷。图 2(b)所示为加入  $0.25\text{ mm}$  厚 Nb 后接头横截面形貌, 可以看出接头没出现断裂, 裂纹敏感性得到降低, 熔合线及焊缝中心存在较小裂纹, 并伴随孔洞的形成。根据 Ti-Nb 相图和 Ni-Nb 相图, Ti 与 Nb 能形成无限固溶体, Nb 与 Ni 有生成  $\text{Ni}_8\text{Nb}$ 、 $\text{Nb Ni}_3$ 、 $\text{Ni}_6\text{Nb}_7$  的可能, 但  $\text{Nb Ni}_3$  韧性较好, 添加 Nb

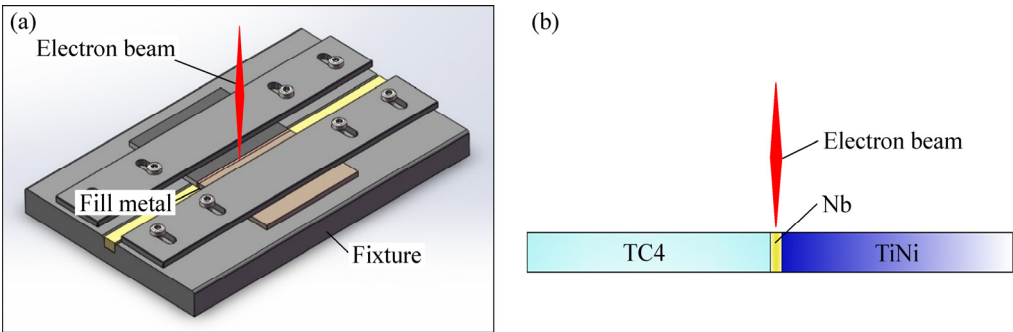


图 1 焊接装配示意图

Fig. 1 Schematic diagram of assembly principle in welding: (a) Whole assembly drawing; (b) Cross section diagram in welding

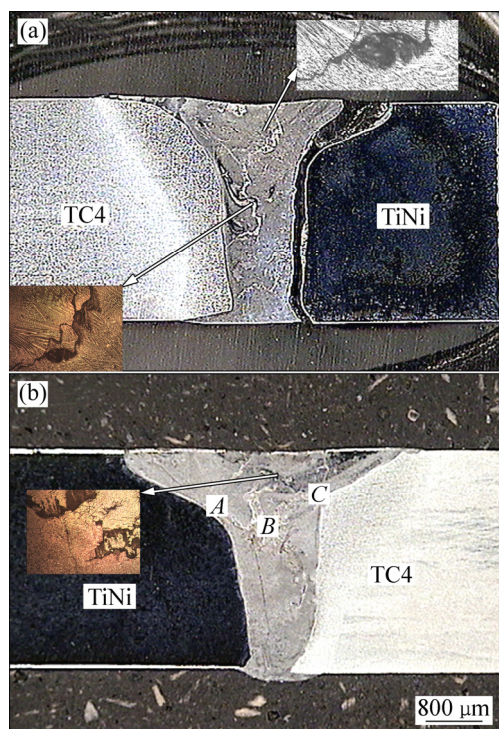


图2 接头的横截面形貌

Fig. 2 Cross-section morphologies of joint: (a) Direct butt welding; (b) Adding filler metal thickness of 0.25 mm

对 TiNi 合金与 TC4 起到一定的阻隔和改善焊接冶金环境作用, 达到降低接头裂纹敏感性的效果。

图 3(a)和(b)分别为图 2(b)中 TC4 侧 A 处和 TiNi 合金侧 C 处裂纹放大图, TC4 侧晶粒呈两端尖的枝晶形态, 裂纹呈沿晶间扩展特征, TiNi 合金侧组织呈块状, 裂纹附近组织有脱落现象, 脆性较大; 分别对两侧裂纹附近进行能谱分析, 裂纹附近主要含 Ti 与 Ni, Ti 和 Ni 的摩尔分数比约为 2:1, 符合  $Ti_2Ni$  相的比例, 同时含有少量的 Nb, 结合 SONG 等<sup>[17]</sup>的研究, 裂纹附近组织可能为  $Ti_2Ni$ , 对孔洞处放大如图 3(c)所示发现该区域含有  $Ti_2Ni$  颗粒<sup>[18]</sup>, 对颗粒及附近进行能谱分析, 元素含量与裂纹附近元素基本一致, 因此, 裂纹附近为  $Ti_2Ni$  脆性相; 可见, 裂纹附近、孔洞内均含较多的  $Ti_2Ni$  金属间化合物。

由于  $Ti_2Ni$  熔点较低, 往往在熔池凝固后期开始结晶, 其周围组织已经处于固体状态, 而凝固收缩和热收缩的作用下需要从周围得到金属液的补给, 分析以为,  $Ti_2Ni$  凝固过程中缺少液态金属的补充促使孔洞的形成, 而且随着凝固收缩的进行, 异种金属热膨胀系数间的差异, 更易使脆性相应力集中, 当应力超过材料结合力时使得裂纹产生。

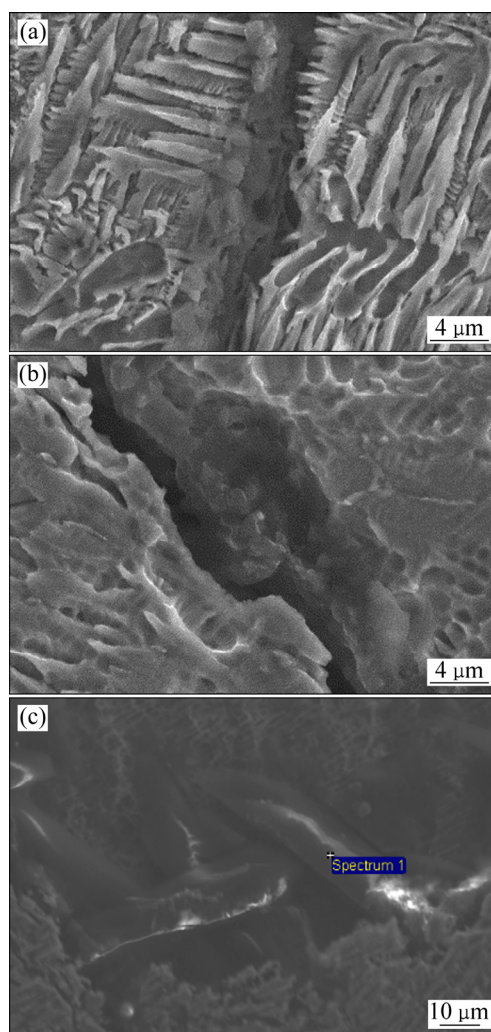


图3 接头缺陷的 SEM 像

Fig. 3 SEM images of defect in joint: (a) Crack in TC4 alloy side; (b) Crack in TiNi alloy side; (c) Hole in weld

## 2.2 填充金属厚度对接头裂纹的影响

图 4 所示为填充金属厚度为 0.4 mm 形貌, 接头成型平整, 无明显裂纹缺陷形成, 焊缝两边熔合线呈非对称结构, 主要与异种金属的导热系数差异有关; 由于热源在板厚方向上存在温度梯度, 使得缝底部具有较高熔点的 Nb 未完全熔化。图 4(b)所示为图 4(a)中 I 区域的放大图, 熔合区主要为柱状枝晶, TC4 侧熔合线附近存在脆性较大的层状组织, 熔合线上出现一条裂纹, 总体沿熔合线扩展, 裂纹形成可能与熔合线附近层状组织有关, 对 TC4 熔合线附近化合物层进行 EDS 分析, Ti 与 Ni 的摩尔比接近 2:1, 符合  $Ti_2Ni$  脆性相的比例, 结合前面分析可知, 该化合物层应该为  $Ti_2Ni$  脆性金属间化合物, 脆性相在残余应力作用下易造成应力集中, 进而促使裂纹的形成。

图 5(a)所示为填充金属为 0.55 mm 时接头形貌,



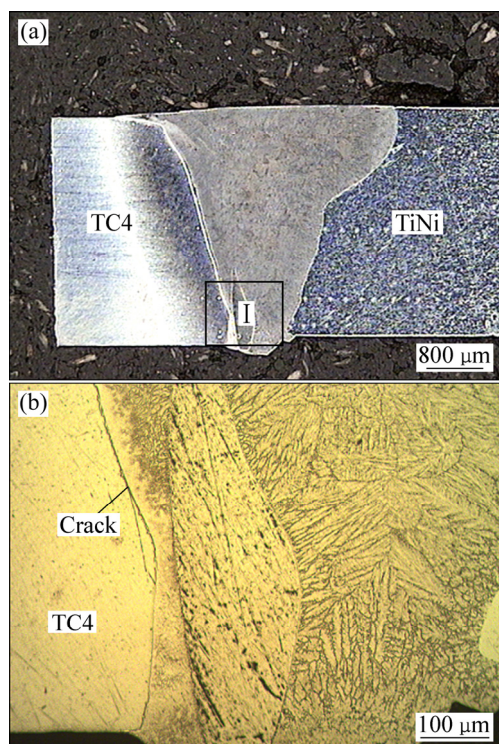


图 4 填充金属为 0.4 mm 时接头横截面形貌

Fig. 4 Cross-sectional morphologies of joint at filler metal thickness of 0.4 mm

接头无裂纹缺陷特征, 将 TiNi 合金侧 I 区域放大如图 5(b)所示, 焊缝晶粒为树枝晶, 暗色区域为晶间组织, 熔合线向母材均匀过渡, 无裂纹等缺陷的形成; 图 5(c)所示为图 5(a)中 TC4 侧 II 区域放大图, 焊缝主要由树枝状晶粒组成, 熔合线附近有一层明显的层状组织, 存在宏观偏析。

在焊接过程中, 熔池在水平方向的截面类似于椭圆状, 熔池中心附近液态金属以快速流动的紊流方式流动, 熔合线附近的金属以层流形式流动, 参考圆形管壁中层流速度分布:

$$v_x = v_{x, \max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (1)$$

式中:  $v_{x, \max}$  为流体中心流速,  $R$  为圆管半径,  $r$  为到中心线距离。由式(1)可知, 处于熔合线附近的液态金属达到最低流速, 并在此环境下形核结晶, 而熔池中心位置的金属液剧烈流动, 使其搅动均匀, 结晶过程中不易发生宏观偏析。由于 TiNi 合金中 Ni 含量为 49.6%(摩尔分数), TC4 中无 Ni 元素, 所以熔池中 Ni 元素的含量低于 50%(摩尔分数), 是在 Ti-Ni 二元相图中 Ni 含量低于 50%的情况下可能会形成 TiNi 和 Ti<sub>2</sub>Ni 两种金属间化合物, 对于 M<sub>x</sub>N<sub>y</sub> 型金属间化合物(M、N 为化合物符号,  $x$ 、 $y$  分别是 M、N 的系数), 其生

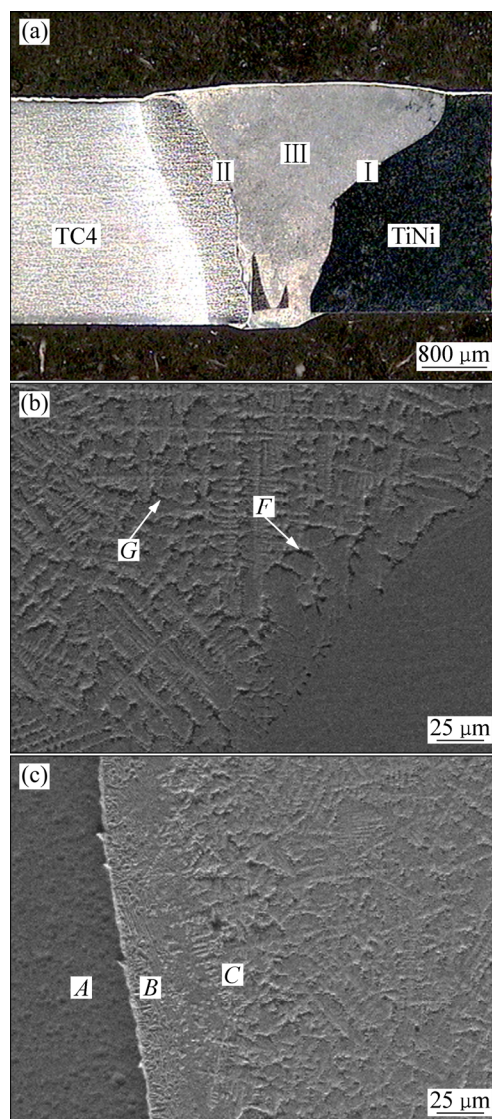


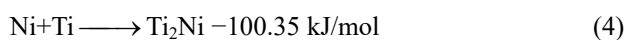
图 5 填充金属厚度 0.55 mm 时接头形貌

Fig. 6 Morphologies of joints at filler metal thickness of 0.55 mm: (a) Cross section morphology; (b) SEM image of TiNi alloy side; (c) SEM image of TC4 alloy side

成焓可用下式表示<sup>[19]</sup>:

$$\Delta H_{298}^{\ominus} = xa + yb + \frac{xy}{x+y}(a' + b') + d \quad (2)$$

式中:  $\Delta H_{298}^{\ominus}$  为金属间化合物的标准生成焓,  $a$  和  $a'$  为 M 的参数,  $b$  和  $b'$  为 N 的参数,  $d$  为常数(-1.119 kJ/mol, 298 K)。对 TiNi 和 Ti<sub>2</sub>Ni 生成焓计算结果为



由此可见, 熔池在焊接冶金过程中 Ti<sub>2</sub>Ni 的形成要比 NiTi 容易, 焊缝中尤其是熔合线附近难以避免 Ti<sub>2</sub>Ni 脆性金属间化合物的形成。

2.3 焊接接头元素分布特点

填充金属 Nb 厚度为 0.55 mm 时, TiNi 合金与 TC4 的焊接裂纹得到消除, 获得无裂纹缺陷的焊接接头, 其元素含量分布如表 3 所示。图 5(c)中 A 点区域为 TC4 侧熔合线附近的母材, 元素含量总体与母材一致; B 区域为 TC4 侧熔合线附近化合物层, 主要为 Ti 和 Ni 元素, 其摩尔分数比为 2.08:1, 符合 Ti<sub>2</sub>Ni 脆性金属间化合物的比例, 熔合线附近易形成脆性金属间化合物。C 点为熔池距离化合物层较近位置, Ti 与 Ni 摩尔分数比相对 B 点增大, Nb 的含量得到增大, 随着距离 TC4 母材距离的增加, Al 元素含量减少, V 元素消失, 随着距熔合线距离增加, 脆性金属间化合物的形成得到缓解。图 6 所示为图 5(a)中 III 区域放大图, 其组织主要分为亮色区域组织和暗色区域组织; D 点亮色区域 Ti 与 Ni 摩尔分数比约为 4:1, 其余为 Nb 元素, 含量高达 69.02%, 可能与 Ti-Nb 间的较大的固溶度有关; E 点暗色区域中 Ti 与 Ni 摩尔分数比为 1.54, Nb 含量为 7.01%(摩尔分数)。从元素分布可知, 焊缝中心元素比例不符合脆性相的比例, 抑制了脆性金属间化合物的形成, 对焊缝综合力学性能起到提高作用。F、G

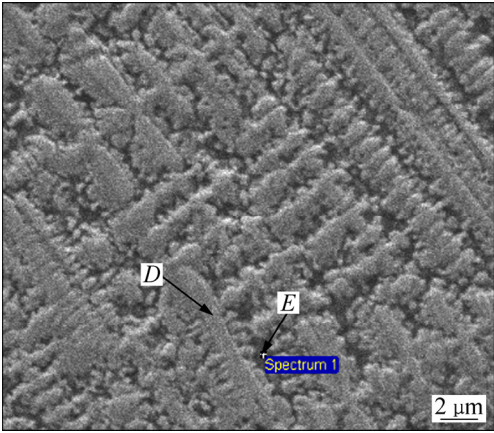


图 6 填充金属厚度为 0.55 mm 时焊缝中心组织形貌

Fig. 6 Morphology of weld center at filler metal thickness of 0.55 mm

表 3 焊缝元素含量分布

Element	Hole fraction/%						
	A	B	C	D	E	F	G
Ti	88.09	59.15	56.07	24.76	56.42	46.26	47.35
Ni	—	28.47	26.46	6.22	36.57	46.14	33.29
Nb	—	5.82	13.93	69.02	7.01	7.60	19.36
Al	8.51	6.56	3.54	—	—	—	—
V	3.40	—	—	—	—	—	—

为图 5(b)中 TiNi 合金侧组织; F 点处 Ti 与 Ni 摩尔分数比约为 1:1, 并且含有少量量的 Nb, 与 Ti-Ni 金属间化合物性质接近<sup>[20]</sup>, 结合 Ti-Ni 相图和 TiNi 的生成焓条件, F 点暗色区域可能为 Ti-Ni 金属间化合物; 由于 G 区域距离焊缝中心相对较远, 而 Nb 含量为 19.36%, 该区域组织对 Nb 具有较高的固溶性。

2.4 接头力学性能

图 7 所示为添加不同厚度填充金属时焊接接头硬度分布图。由图 7 可看出, 随着 Nb 厚度的增加, 对脆性金属间化合物的有效抑制使得焊缝组织硬度逐渐降低。TC4 钛合金热影响区相对母材硬度略有提高, 主要与热影响区形成的马氏体增强有关; 脆性相对焊缝组织硬度的影响较大, 对比于填充金属厚度为 0.25 mm 和 0.4 mm 的焊缝, TiNi 合金 TC4 直接焊接时焊缝中存在的脆性化合物相对较多, 焊缝两侧硬度较高, 最高达 634 HV。由上述分析可知, 焊缝中心熔池流动快, 使 Ti、Ni 等元素混合均匀, 减少了脆性相的生成, 使焊缝中心区域硬度值相对较低; 填充金属厚度为 0.55 mm 时, TC4 侧熔合区附近脆性化合物层的存在使得此处硬度升高, 焊缝其他区域硬度总体分布较均匀; TiNi 合金侧热影响区受焊接热源的影响, 热轧形成的轧制带消失, 晶粒增大, 硬度值较母材降低。

图 8 所示为填充金属厚度为 0.55 mm 时焊接试样的负荷-变形曲线, 5.68mm 宽的试样断裂时最大拉力为 6.78 kN, 抗拉强度为 391 MPa, 力学性能良好; 断裂在 TC4 侧熔合线附近, 分析以为熔合线附近的金属间化合物层在拉伸应力作用下易造成应力集中, 应力大于屈服强度时试样发生断裂, 断裂曲线具有一定的斜率, 伸长率为 2.7%, 接头具有一定韧性。

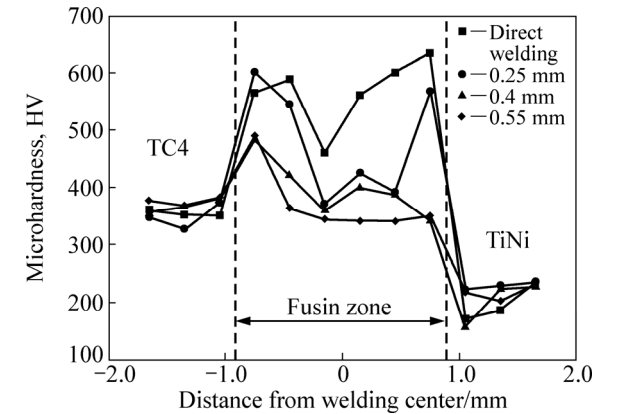


图 7 焊接接头的硬度分布

Fig. 7 Distribution of micro hardness in weld

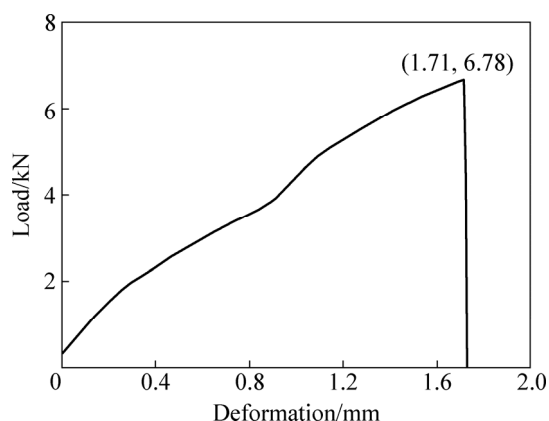


图8 焊接接头的负荷-变形曲线

Fig. 8 Load-deformation curve of joint in weld

### 3 结论

1) TiNi 合金与 TC4 直接焊接时, 焊接接头沿熔合线附近断裂, 不能获得具有一定强度的接头, 添加 Nb 为填充金属可大大降低接头裂纹敏感性, 填充金属厚度为 0.55 mm 时获得无焊接裂纹缺陷的接头。

2) 接头裂纹的形成主要与生成焓较小的  $Ti_2Ni$  脆性金属间化合物有关, 大量脆性相的生成促使裂纹产生; 此外, 由于  $Ti_2Ni$  脆性相熔点低, 在凝固后期难以从周围获得金属液补给, 使熔合区产生孔洞。

3) 消除焊接裂纹后的接头抗拉强度达 391 MPa, 伸长率为 2.7%, 断裂位置为脆性的 TC4 熔合线附近, 脆性相对接头力学性能影响较大。

### REFERENCES

- [1] KAH P, SHRESTHA M, MARTIKAINEN J. Trends in joining dissimilar metals by welding[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, 440: 269–276.
- [2] NADA R A, DUSAN M A, VUKIC N L, NIKOLIC R R, HADZIMA B. Influence of friction welding parameters on properties of the Al-Cu joint[J]. *Fme Transactions*, 2017, 45(1): 165–171.
- [3] 李 燕. SAF2205 双相不锈钢与异种金属的焊接性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011: 19–55.  
LI Yan. Research on weldability of SAF2205 duplex stainless steel and dissimilar metals[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011: 19–55.
- [4] ZHOU J, WANG K, CHEN Q, WANG G Y. Calculation of the pull-out force of  $Ni_{47}Ti_{44}Nb_9$  shape memory alloy pipe coupling[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2015, 697: 360–364.
- [5] PIOTROWSKI B, ZINEB T B, EBEHANDT A, PATOOR E. Experimental analysis of  $Ni_{47}Ti_{44}Nb_9$  shape memory alloy behavior for tightening application numerical design[J]. *International Journal of Plasticity*, 2012, 36: 130–147.
- [6] PENG X, GUO H, SHI Z, QING C, ZHAO Z. Constitutive equations for high temperature flow stress of TC4-DT alloy incorporating strain, strain rate and temperature[J]. *Materials & Design*. 2013, 50(17):198–206.
- [7] MABE J. Variable area jet nozzle for noise reduction using shape memory alloy actuators[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, 123(5): 3871–3871.
- [8] YANG D, JING H C, ZHAO M J, LONG L G. Microstructure and mechanical behaviors of electron beam welded NiTi shape memory alloys[J]. *Materials & Design*, 2014, 57(39): 21–25.
- [9] 周 勇, 杨冠军, 吴 限, 李长久. 层叠 Ni/Ti 热扩散形成金属间化合物的规律[J]. *焊接学报*, 2010, 31(9): 41–44.  
ZHOU Yong, YANG Guan-jun, WU Xian, LI Chang-jiu. The formation of metal intermetallic compounds with cascade Ni/Ti diffusion[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(9): 41–44.
- [10] CHEN Y H, MAO Y Q, LU Y Y, HE P. Investigation of welding crack in micro laser welded NiTiNb shape memory alloy and Ti6Al4V alloy dissimilar metals joints[J]. *Optics and Laser Technology*, 2017, 97: 197–202.
- [11] 邹莱莲. TC1 和 TC3 钛合金的焊接性研究[J]. *航空材料学报*, 1986, 12(1): 16–20.  
ZOU Mo-lian. Study of weldability between TC1 and TC3 titanium alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 1986, 12(1): 16–20.
- [12] 陈玉华, 戈军委, 刘奋成, 柯黎明. TiNi 形状记忆合金/钛合金异种材料激光焊[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2075–2080.  
CHEN Yu-hua, GE Jun-wei, LIU Fen-cheng, KE Li-ming. Micro laser welding of dissimilar materials between TiNi shape memory alloy and titanium alloy[J]. *Optics and Precision Engineer*, 2014, 22(8): 2075–2080.
- [13] 陈玉华, 李树寒, 陆巍巍. NiTiNb/TC4 异种材料激光微焊接头裂纹研究[J]. *航空科学技术*, 2017, 28(4): 75–78.  
CHEN Yu-hua, LI Shu-han, LU Wei-wei. Study on crack sensitivity of NiTiNb/TC4 laser micro-welding joints[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2017, 28(4): 75–78.
- [14] ZOERAM A S, MOUSAVI SAAA, AKBARI M. Effect of interlayer thickness on microstructure and mechanical properties of as welded Ti6Al4V/Cu/NiTi joints[J]. *Materials Letters*, 2014, 133(10): 5–8.
- [15] ZOERAM A S, MOUSAVI S A A A, AKBARI M. Laser welding of Ti-6Al-4V to niobium[J]. *Materials & Design*, 2014, 61(9): 185–190.
- [16] OLIVEIRA J P, PANTON B, ZENG Z, OLIVEIRA J P, QUINTINO L. Laser joining of NiTi to Ti6Al4V using a niobium interlayer[J]. *Acta Materialia*, 2016, 105(2): 9–15.



- [17] SONG P, ZHU Y, GUO W, PU P, KANG H. Mechanism of crack formation in the laser welded joint between NiTi shape memory alloy and TC4[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42(2): 6–9.
- [18] MIRANDA R M, ASSUNCAO E, SILVA R J C, OLIVERIA J P, QUINTINO P. Fiber laser welding of NiTi to Ti-6Al-4V[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81(9): 1533–1538.
- [19] 赵定国, 郭培民, 赵 沛. 金属间化合物的标准生成焓估算模型[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(6): 1578–1583.
- ZHAO Ding-guo, GUO Pei-ming, ZHAO Pei. Estimating model of standard enthalpy of intermetallics[J]. *Journal of Central South University(Science Technology)*, 2011, 42(6): 1578–1583.
- [20] PIAO M, MIYAZAKI S, OTSUKA K, NISHIDA N. Effects of Nb addition on the microstructure of Ti-Ni alloys[J]. *Materials transactions - JIM*, 1992, 33(4): 337–345.

## Cracks in TiNi/Nb/TC4 joints welded by vacuum electron beam welding

ZHAN Zi-lin<sup>1</sup>, CHEN Yu-hua<sup>1</sup>, SUN Guo-dong<sup>2</sup>, LIU Chang-hua<sup>2</sup>, SUN Song-wei<sup>1</sup>

(1. National Defense Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

2. School of Mechanical and Material Engineering, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China)

**Abstract:** The TiNi alloys and TC4 alloys with thickness of 3 mm were welded by vacuum electron beam welding method, the formation of welding cracks was controlled by adding Nb for the filler metal. The formation mechanism of crack, the formation conditions of Ti<sub>2</sub>Ni brittle phase, the distribution characteristics of joint elements and the mechanical properties of joint were analyzed. The results show that it is easy to generate cracks in the joint when welding of TiNi alloy to TC4 directly; adding Nb as the filler metal can reduce the crack sensitivity of joint when welding TiNi alloy and TC4 alloy, the Ti<sub>2</sub>Ni brittle phase can contribute to the formation of cracks and holes in weld. The crack defect can eliminate when the thickness of the filler metal is 0.55 mm; the Ti<sub>2</sub>Ni brittle intermetallic compound layer formed near the fusion line of TC4 side due to the Ti<sub>2</sub>Ni enthalpy of formation is smaller; the Nb content in the center of weld is higher, the mechanical performance of joint is excellent. The tensile strength of joint reaches 391 MPa, and elongation is 2.7%.

**Key words:** TiNi/Nb/TC4; dissimilar metal; filler metal; electron beam; welding crack

**Foundation item:** Project(51565040) supported by National Natural Science Foundation of China; Project(20171BCB24007, 20151BBE50034) supported by Science and Technology Project of Jiangxi Province, China; Project(KJLD14055) supported by the Department of Education Science and Technology Plan (scientific frontier) Project of Jiangxi Province, China

**Received date:** 2017-08-24; **Accepted date:** 2017-11-07

**Corresponding author:** CHEN Yu-hua; Tel: +86-791-83863023; E-mail: ch.yu.hu@163.com

(编辑 李艳红)