

# 热等静压钛合金与低碳钢包套间的界面反应层研究

鲍诗璐<sup>1,2</sup>, 卢正冠<sup>1</sup>, 徐 磊<sup>1</sup>, 马英杰<sup>1</sup>

(1. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016)

(2. 中国科学技术大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110016)

**摘 要:** 采用预合金粉末热等静压 (hot isostatic pressing, HIP) 近净成形工艺制备了一种新型高强韧钛合金, 研究了钛合金与低碳钢包套的界面反应。结果表明, 钛合金与低碳钢包套之间存在波浪状的界面反应层, 其厚度为 8  $\mu\text{m}$ , 钛合金中的合金元素 Al、Mo 和 V 向低碳钢中发生了一定程度的扩散, 而 2 种材料的基体元素 Ti 和 Fe 发生扩散的程度要明显低于前者; 通过选择性化学洗可以将包套去除, 并将反应层厚度减小 2.5  $\mu\text{m}$ , 但微观上仍存在波浪状反应层; 通过后续的喷砂处理可以进一步减小反应层厚度, 并且使界面反应层平直。

**关键词:** 钛合金; 低碳钢包套; 热等静压; 界面反应

**中图分类号:** TG146.23; TF124.32

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2021)07-2599-08

21 世纪被称为海洋的世纪, 海洋面积占地球表面积的大约 70%, 海洋空间与资源已日益成为各国竞争的重要领域, 因此对于海洋资源探索和开发利用, 一直以来都深受各国重视。然而海洋腐蚀会对深海作业的设备造成重大威胁, 深海中所需承受的巨大压力又对深海材料的强度提出了非常高的要求<sup>[1,2]</sup>, 而钛合金因其优异的耐蚀性和较高的强度被应用于海洋工程领域, 被称为海洋金属。蛟龙号载人潜水器是由中国自主设计的载人潜水器, 曾在马里亚纳海沟下潜达到 7062 米, 创下了同类型潜水器下潜深度的世界纪录<sup>[3]</sup>, 而其外壳就用到了抗蚀和力学性能优异的钛合金。

钛合金的成形方式有多种, 锻造产品性能优异, 但是材料利用率非常低; 精密铸造的成本低, 但是材料内部的疏松缩孔等缺陷难以彻底消除<sup>[4]</sup>; 粉末冶金热等静压 (HIP) 是在高温下对粉末或粉末压坯施加等静压力, 也就是将粉末烧结和等静压成形合并为一个工序, 其最大优点就是被压制的材料在高温高压下有很好的粘性流动, 且因其各向均匀受压, 所以能够得到晶粒细小、显微组织优良、接近理论密度且性能优异的产品<sup>[5]</sup>。由于粉末冶金热等静压产品克服了传统铸造材料不可避免的疏松、缩孔等缺陷, 因此其力学性能优于铸件, 甚至可与锻件相媲美<sup>[6]</sup>。热等静压已经成为了现代冶金技术中制备大型复杂形状制品和性能材料的先进工艺<sup>[7]</sup>, 且已广泛应用在多种粉末

合金的制备上。另外, 和铸造工艺相比, 热等静压压制成形过程中钛合金是固态, 而铸造过程中钛合金是液态, 液态相对固态来说更为活泼, 因此铸造过程中模具材料中的元素可能会扩散并溶解到钛合金液体中<sup>[8,9]</sup>, 形成液态固溶体; 而热等静压过程中包套材料和钛合金则只能发生固体之间的扩散, 并且热等静压的温度要低于铸造, 而温度是影响扩散速率最主要的因素<sup>[10]</sup>, 温度越高, 原子扩散激活能就越大, 扩散系数就越大。因此, 从理论上来说, 对于同种材料, 热等静压过程中的扩散过程要明显弱于铸造过程。

但是, 和铸造一样, 热等静压之后包套 (模具) 与钛合金是粘结在一起的, 并且 2 种材料之间会发生界面反应, 因此需要通过后续处理对包套 (模具) 进行去除, 常用手段有选择性化学洗和机加工等。哈尔滨工业大学 Zhao 等<sup>[11]</sup>研究了熔模铸造 Ti-1100 高温钛合金的界面反应特性, 发现界面反应层由反应层和硬化层组成, 模具温度越高, 界面反应越严重, 并且不同的涂层材料在界面反应层中的元素分布不同。沈阳铸造研究所有限公司刘鸿羽等<sup>[12]</sup>采用氧化钎铸型在真空自耗凝壳炉中浇注了大尺寸钛合金铸件, 并对铸件和铸型材料发生的界面反应进行了研究, 发现铸件表面形成了 3~7  $\mu\text{m}$  的富氧扩散层, 并且存在 200~500  $\mu\text{m}$  的组织过渡区, 硬度比基体高, 而选择性化学洗可以有效去除组织过渡区, 提升表面质量。中国科学院金

收稿日期: 2020-08-23

作者简介: 鲍诗璐, 男, 1996 年生, 博士生, 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016, 电话: 024-83978843, E-mail: 1436810966@qq.com

属研究所鄂军等<sup>[13]</sup>研究了粉末冶金热等静压 TA7ELI 合金的界面反应层,发现 TA7ELI 合金与低碳钢包套的界面反应层厚度为 3~8 μm,富集了 Al 和 Sn 元素,Fe 则沿晶界通道快速扩散,在界面附近呈网状分布。

目前在包套(模具)与基体合金形成的界面反应层的研究方面,相关热等静压镍基合金的研究<sup>[14-16]</sup>较多,但是对钛合金的相关研究则主要集中在铸造工艺上<sup>[17,18]</sup>。本工作针对为海洋耐压结构开发的新型高强韧钛合金,开展了热等静压近净成形钛合金与包套之间的界面反应层研究,并对不同工序处理后的界面变化情况进行了对比。

## 1 实验

实验合金成分在传统的高损伤容限钛合金 Ti-6-22-22S (Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.2Si,质量分数,%)的基础上,进行了一定程度的调整。采用无坩埚感应熔炼超声气体雾化法 (electrode induction melting gas atomization, EIGA) 制备预合金粉末,将预合金粉末填充到 φ50 mm 的圆柱形低碳钢包套中,在国产 RD-200 热等静压机中进行热等静压,热等静压最高温度为 950 °C,保温时间为 3 h,压力为 150 MPa。从热等静压后的压坯中取下一块含包套的半圆柱形样品,尺寸为 φ28 mm×70 mm,其中包套层的厚度为 4 mm。

根据对半圆柱型样品处理方式的不同将样品分为 3 种状态,第 1 种是热等静压原始态;第 2 种是选择性化学洗之后的状态,其中使用的酸液配比为 HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O=4:96 (体积比);第 3 种是选择性化学洗+喷砂之后的状态,分别编为 1#、2#和 3#。从 1#样品上切取含包套的金相样品,从 2#样品切取含选择性化学洗表面的金相样品,从 3#样品切取含选择性化学洗+喷砂表面的金相样品。制样过程为研磨,抛光(抛光液为 SiO<sub>2</sub> 悬浊液),然后腐蚀,腐蚀液配比为 HNO<sub>3</sub>:HF:H<sub>2</sub>O=8:2:90 (体积比),最后使用 KQ-100DE 型数控超声波清洗器进行超声清洗。使用 FM-700e 型显微硬度计分别进行了本体材料和界面附近的硬度测试,载荷为 0.49 N。在 TESCAN MIRA3 型场发射扫描电镜(SEM)下观察组织,使用英国牛津仪器 Ultim MaxN 硅漂移型能谱仪(EDS)进行成分分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 硬度测试

界面附近发生的元素扩散会导致一定范围内合金成分变化,进而影响合金的性能,因此对钛合金基体和低碳钢包套的硬度值以及界面附近的硬度值进行了测试,目的是研究界面附近元素扩散对硬度的影响。

若测试点距界面距离太短,则会使硬度测试值受到界面另一侧的材料影响,为了使测试点尽可能距界面近,同时又不会受到另一种材料的影响,选择低碳钢一侧的测试点距界面 35 μm。考虑到钛合金硬度值较高,压痕较小,选择钛合金一侧的测试点距界面 25 μm。为了避免偶然误差,每组硬度值都选取了 3 个测试点取平均值。测试点位置示意图如图 1 所示。本实验中钛合金和低碳钢 2 种材料的本体硬度值如表 1 所示,2 种材料界面附近的硬度值如表 2 所示。对比表 1 和表 2 可以发现,界面附近几十微米处的硬度值与材料本体硬度值基本相当,说明界面反应层所产生的硬度影响区范围非常小,这与文献[11]中铸造 Ti-1100 合金中模具和基体之间的扩散层产生的小范围硬度影响区一致。

### 2.2 热等静压+不同后处理的样品宏观状态

1#半圆柱型样品如图 2a 所示。从图中可以看到,样品明显地分为两部分,较为光亮的是钛合金,呈棕黑色的为低碳钢包套,2 种材料之间有明显的分界线。这是因为钛合金与空气中的氧反应在表面形成了致密的 Ti 的氧化膜及 Al 的氧化物,相当于一层保护膜,使得钛合金基体不能直接接触空气中的氧气,因此不



图 1 界面附近的硬度测试点示意图  
Fig.1 Schematic diagram of hardness test points near the interface

表 1 2 种材料的本体硬度值

| Table 1 Hardness (HV) values of the two materials (MPa) |            |
|---|------------|
| Titanium alloy  | Mild steel |
| 3203  | 1177       |

表 2 2 种材料界面附近处硬度值

| Table 2 Hardness (HV) values of the two materials near the interface (MPa) |            |
|--|------------|
| Titanium alloy   | Mild steel |
| 3210   | 1167       |

会被继续氧化。而低碳钢的成分为基体元素 Fe 和少量的合金元素 Si、Mn、Cr、Ni 和 Cu 等，其中合金元素的质量分数低于 0.5%，这些元素并不能形成致密的氧化膜，因此容易被空气中的氧腐蚀而生锈。

经过选择性化学洗之后的 2#样品如图 2b 所示。可以看到经过一定时间的选择性化学洗之后，绝大部分低碳钢包套已经被去除，但是部分位置存在包套残留，可能是选择性化学洗时间不够充足的原因导致，但是钛合金表面已经显露出来，并且较为平整。

样品在选择性化学洗的基础上再进行喷砂后的 3#样品如图 2c 所示。与图 2b 对比可以发现，喷砂之后的钛合金表面比选择性化学洗之后更加洁净和平整，残留包套也变得更为光滑，但是没有被完全去除。

### 2.3 样品微观形貌及元素分布

#### 2.3.1 钛合金基体组织及界面形貌

钛合金预合金粉末经过热等静压之后的基体组织如图 3a, 3b 所示，界面附近的组织如图 3c, 3d 所示。从图 3a, 3b 中可以看出，该组织为魏氏组织，在原始  $\beta$  晶界上析出了连续的  $\alpha$  相，而原始  $\beta$  晶粒内部的不连续  $\alpha$  相则是从连续的  $\alpha$  相层或  $\beta$  相晶界上形核，并向晶粒内部生长。该组织具有细小的针状  $\alpha$  相，能够使材料具有较高的强度。在对组织的观察中并没有发现孔隙，说明热等静压实现了良好的致密化。但是，从图 3c 中可以看到，界面呈波浪状。这是因为界面处的钛合金粉末没有被压实，形成了原始粉末颗粒边界 (prior particle boundaries, PPB)，同时观察到界面附近处的组织中存



图 2 热等静压原始态，选择性化学洗，选择性化学洗+喷砂 3 种状态的热等静压压坯宏观形貌

Fig.2 Macro morphologies of hot isostatically pressed billets in original state after hot isostatic pressing (a), after selective chemical washing (b), and after selective chemical washing + sand blasting (c)

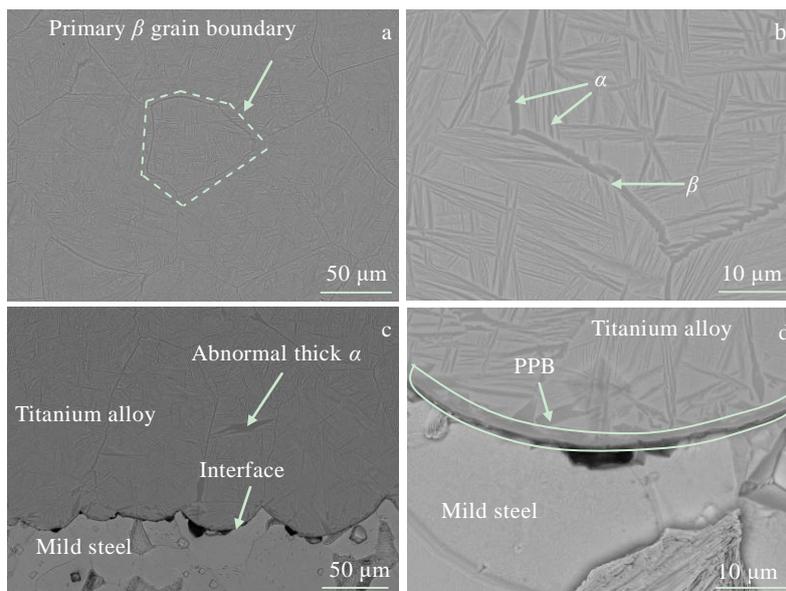


图 3 热等静压钛合金基体和界面附近的 SEM 图

Fig.3 SEM images of HIPed titanium alloy: (a, b) substrate; (c, d) near the interface

在异常粗大的  $\alpha$  相,而这种  $\alpha$  相在距界面较远的基体组织中并不存在。图 3d 中 PPB 附近绝大部分都为  $\alpha$  相。这是因为粉末表面会形成氧化膜,Al 元素富集,容易形成  $Ti_3Al$ ,所以粉末颗粒边界一般为  $\alpha$  相。文献[19]中镍基合金粉末热等静压后存在组织过渡区,并且在距界面 500  $\mu m$  以内的区域都能够观察到 PPB,但是本研究中除了界面处以外,在钛合金组织内部并未发现组织过渡区或 PPB 的存在,这可能是不同合金与包套之间的相互作用不同导致,同时热等静压参数的合理调整对 PPB 的抑制也有很大影响。

1#, 2#和 3#样品的钛合金基体与低碳钢界面形貌分别如图 4a, 4b, 4c 所示。从图 4a 中可以看出 1#样品的界面呈现波浪状,郭军<sup>[13]</sup>对此的解释是低碳钢加工表面不平直导致,但本研究认为这是因为在热等静压的过程中,钛合金与低碳钢包套不同的性能所致。钛合金粉末的致密化过程大体分为 4 个阶段:粉末颗粒重排、塑性变形、幂律蠕变和高温扩散<sup>[20]</sup>,但是,与低碳钢包套相邻的钛合金粉末,一侧与内部钛合金粉末相接触,可以正常进行致密化过程,而另一侧与低碳钢包套接触,低碳钢的硬度要比钛合金低,所以低碳钢施加给钛合金的压力还不足以使钛合金发生塑性变形时,自身就已经开始发生变形,导致钛合金粉末压入低碳钢中。另外,由于钛合金最初是粉末态,因此与低碳钢包套接触区的形状是拱形,拱形结构在径向载荷的作用下,不仅产生径向反力,并且会产生垂直于径向的推力,而这个推力可以减小拱形结构受到的弯矩,从而使整个拱主要承受压力,而钛合金的抗压强度要比抗拉强度高,这也使得钛合金粉末不容易发生变形。综合以上 2 个原因,导致了钛合金基体与低碳钢包套之间的界面呈向包套内突出的波浪状。即便如此,低碳钢包套由于发生塑性变形而产生的加工硬化效应使得其施加给钛合金粉末的应力逐渐增大

至其屈服强度,因此钛合金粉末与低碳钢包套相邻的一侧仍会发生一定程度的塑性变形,因此界面并不是规则的圆弧形。而文献[19]中热等静压镍基高温合金与低碳钢包套的界面中镍基高温合金粉末的圆弧则要比本文中的更加完整,这可能是由于该文献中的镍基高温合金强度比本文中的钛合金高,不容易发生变形导致。从图 4b 中可以看出,2#样品的界面形状与与 1#样品一样呈现波浪状,说明选择性化学洗并不能改变界面的微观形貌;而图 4c 中 3#样品的界面则呈近直线,说明喷砂能够使界面在微观上变得平直。

### 2.3.2 界面附近的元素分布

1#样品钛合金与低碳钢包套界面附近的主要元素分布如图 5 所示。不难看出,2 种基体元素 Ti 和 Fe 的扩散程度并不明显,从 EDS 面扫描图上几乎看不出扩散痕迹;而钛合金中的合金元素 Mo、Al 和 V 则发生了明显的扩散。

基体元素发生扩散的程度要小于合金元素,这是因为合金元素 Al、Mo 和 V 在钢中的溶解度明显大于 Ti 在钢中的溶解度(见表 3),并且低碳钢中原本几乎不含这 3 种合金元素,所以在热等静压的高温高压条件下,Al、Mo 和 V 元素发生扩散在钢中所产生的浓度梯度要大于 Ti 元素扩散所产生的浓度梯度,根据菲克第二定律<sup>[10]</sup>,浓度梯度越大,则扩散速度越快,Al、Mo 和 V 元素所产生的较大的浓度梯度增加了扩散驱动力,这就促进了 Al、Mo 和 V 元素的扩散,而 Ti 元素在钢中的浓度梯度则始终保持在一个比较小的范围内,因此不利于其扩散。同理,由于 Fe 在 Ti 中的溶解度非常低,所以低碳钢中的 Fe 元素扩散到钛合金基体中的量也非常少。

Fe 元素向钛合金基体中的扩散会影响到界面附近钛合金的性能,因此对 Fe 元素扩散的程度进行了定量分析。对界面附近以及钛合金基体中的 Fe 元素含量

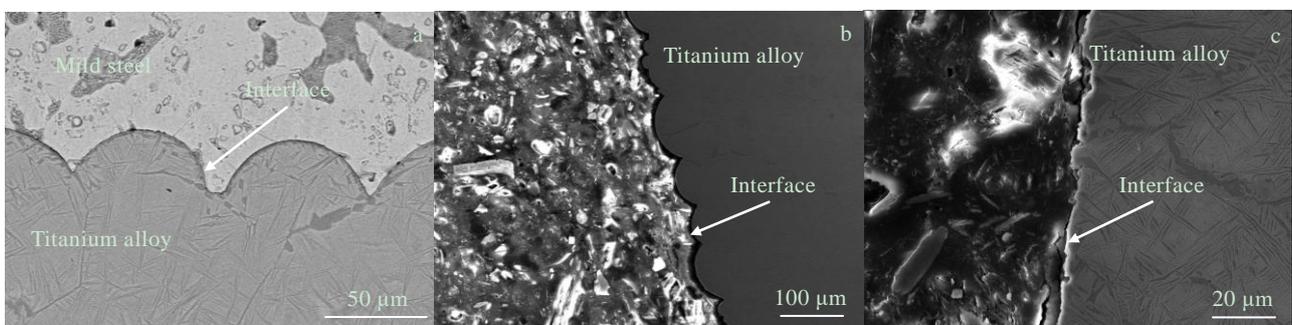


图 4 热等静压原始态界面,选择性化学洗界面和选择性化学洗+喷砂界面形貌

Fig.4 Interface morphologies of as-built sample (a), sample after selective chemical washing (b), and sample after selective chemical washing+sand blasting (c)

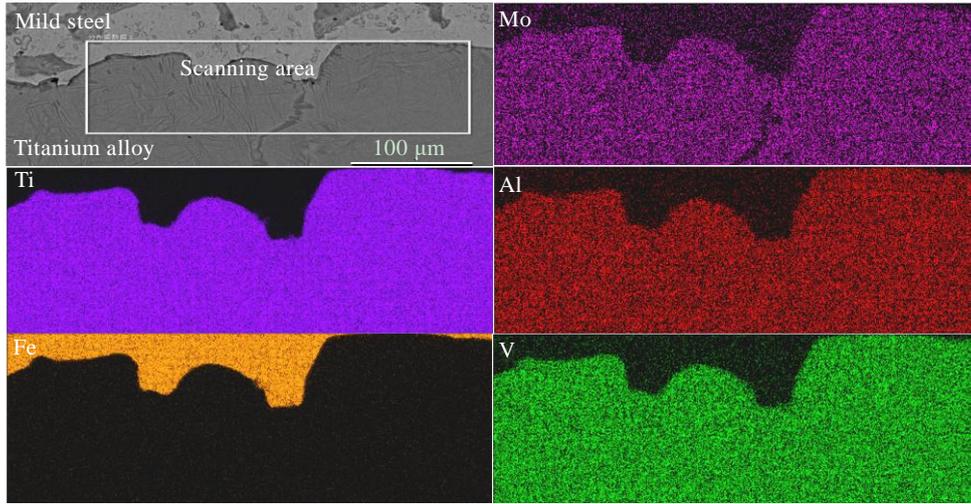


图 5 1#样品钛合金与包套界面形貌及界面的 EDS 元素面扫描

Fig.5 Interface morphology and EDS mapping of element Ti, Fe, Mo, Al, V between titanium alloy and low carbon steel capsule for sample 1#

进行了 EDS 点分析，为减小偶然误差，界面处和基体各选取了 3 个点，点位置如图 6 所示，表 4 为 EDS 点分析结果。从表 4 中可以看出，即使贴近界面附近处，Fe 元素的扩散程度也非常小，平均质量分数在 3% 左右，而距界面几十微米处则几乎不存在 Fe 元素。这与

表 3 合金元素在钢中的溶解度

**Table 3 Solubility of alloying elements in steel<sup>[21]</sup>**

| Alloying element | Solubility in $\alpha_{Fe}/\%$ | Solubility in $\gamma_{Fe}/\%$ |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Ti               | 6                              | 0.75~1.0                       |
| Al               | 30                             | 0.6                            |
| V                | Infinite solid solution        | 1~2                            |
| Mo               | 32                             | 3~8                            |

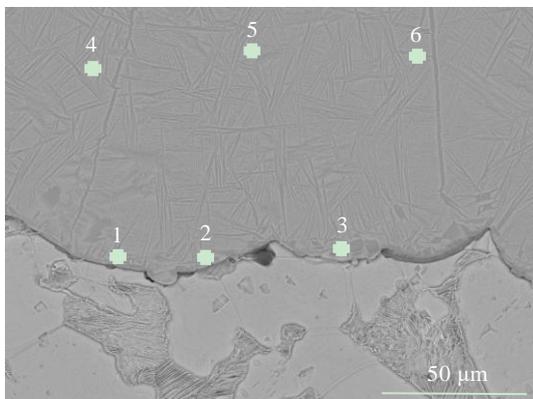


图 6 界面附近及钛合金基体中 EDS 分析点位置分布

Fig.6 EDS analysis point location near the interface and in the Ti alloy

表 4 图 6 中元素 Fe 的 EDS 点分析结果

**Table 4 EDS results of element Fe of marked points in Fig.6 (wt%)**

| Point         | 1     | 2    | 3    | 4     | 5     | 6    |
|---------------|-------|------|------|-------|-------|------|
| Content       | 1.9   | 1.07 | 5.95 | 0     | 0.001 | 0.01 |
| Average value | 2.973 |      |      | 0.004 |       |      |

邬军<sup>[8]</sup>所得出 Fe 元素沿晶界快速扩散，并且扩散较深的结论不符，这也有可能是钛合金成分不同造成的结果。  
2.3.3 基体元素 Ti 和 Fe 的扩散

为了进一步定量表征基体元素扩散的距离，对样品界面附近进行了 EDS 线扫描。不同元素的扩散程度不尽相同，本文重点关注基体元素 Ti 和 Fe 的扩散层厚度随样品状态的变化情况，而对钛合金基体产生影响的主要是 Fe 元素的扩散层厚度，因此关注 Fe 元素扩散层的变化更具实际意义。

图 7a, 7b 和 7c 分别为 1#, 2#和 3#样品界面附近的 EDS 线扫描。从图 7a 中可以看出，1#样品基体元素 Ti 和 Fe 在界面附近均有一个渐变的过程，说明这 2 种基体元素均发生了一定程度的扩散，只是相较于钛合金中的其它合金元素而言扩散程度要小得多。其中 Ti 元素的扩散层厚度为 8  $\mu\text{m}$ ，Fe 元素的扩散层厚度为 4  $\mu\text{m}$ 。这说明粉末冶金热等静压原始态钛合金的边界处渗入了一定量的 Fe 元素，渗层厚度为 4  $\mu\text{m}$ ，这对钛合金边界性能会产生一定的影响，因此该渗层必须去除。图 7b 中显示 2#样品中界面附近 Ti 元素的扩散层厚度为 5.5  $\mu\text{m}$ ，而 Fe 元素含量始终保持在非常低的水平，其扩散层厚度几乎为 0。与 1#样

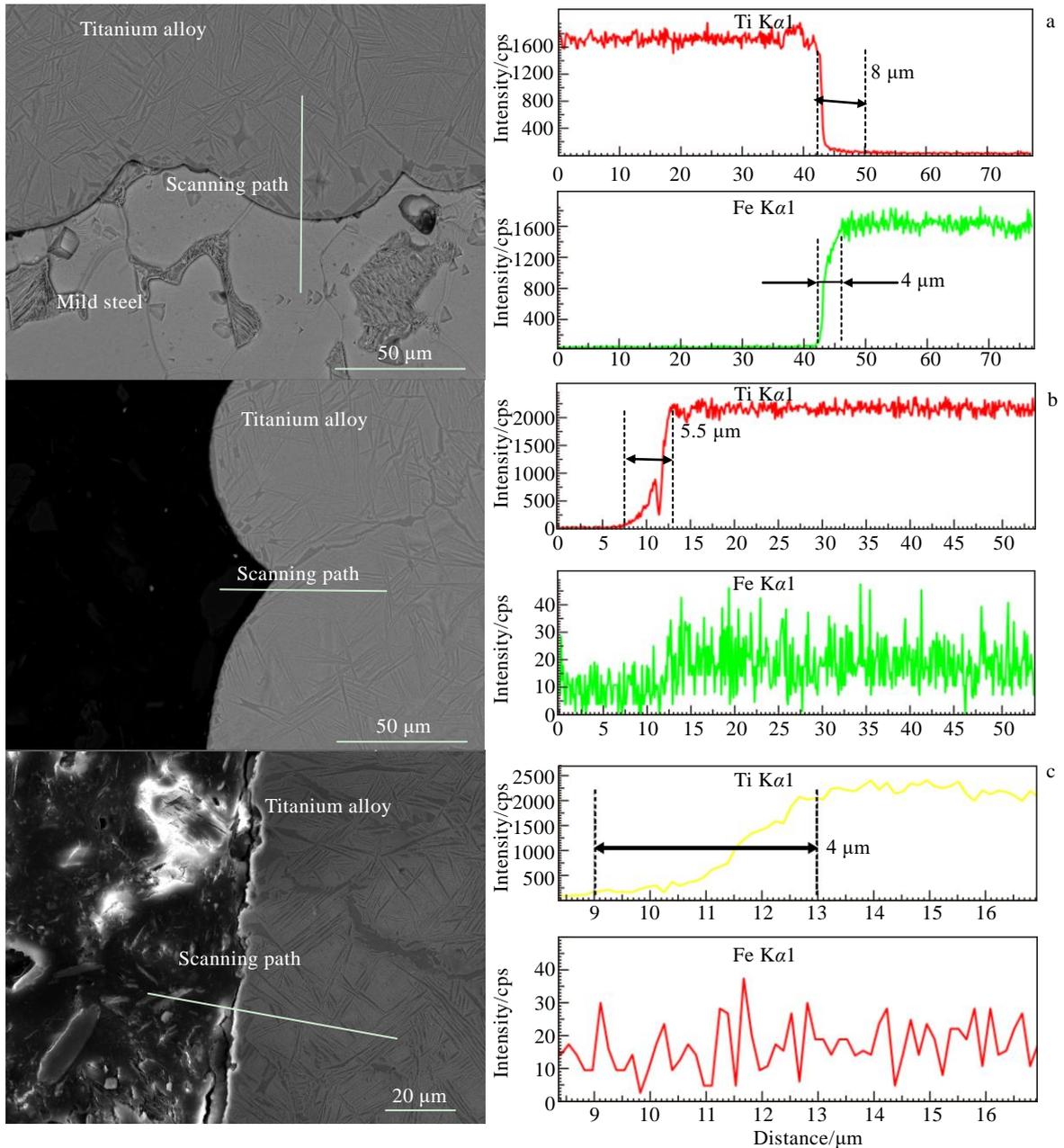


图 7 1#、2#和3#样品钛合金与包套界面附近的 EDS 线扫描

Fig.7 EDS line scanning near the interface between titanium alloy and capsule: (a) sample 1#, (b) sample 2#, and (c) sample 3#

品相比，Ti 元素扩散层厚度减小了 2.5  $\mu\text{m}$ ，这说明选择性化学洗去除包套的同时也去除了 2.5  $\mu\text{m}$  厚度的 Ti 元素扩散层，因此可以认为，Ti 元素扩散到低碳钢包套中的深度约为 2.5  $\mu\text{m}$ 。而 Fe 扩散层的消失则说明选择性化学洗过程中酸液能够溶解扩散到钛合金中的 Fe 元素。图 7c 中 3#样品 Ti 元素的扩散层厚度为 4  $\mu\text{m}$ ，说明喷砂能够进一步减小 Ti 元素扩散层厚度。Fe 元素与 2#样品一样几乎不存在扩散层。

为了直观表示 Ti 和 Fe 元素扩散层厚度 ( $D_N$ ) 随样品状态的变化情况，将不同样品的扩散层厚度绘制在同一个坐标图中，如图 8 所示，其中  $D_{Ti}$  为 Ti 元素

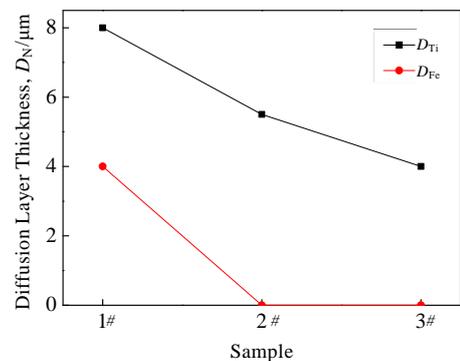


图 8 不同样品的扩散层厚度

Fig.8 Diffusion layer thicknesses of different samples

的扩散层厚度,  $D_{Fe}$  为 Fe 元素的扩散层厚度。从图 8 中可以看出。选择性化学洗和喷砂均能够去除一定厚度的 Ti 元素扩散层, 而 Fe 元素扩散层在选择性化学洗之后就已经基本被去除, 而对钛合金基体有影响的主要为 Fe 元素扩散层, 因此选择性化学洗能够基本消除 Fe 元素扩散的影响, 使钛合金界面附近成分更加均匀。而喷砂则能够进一步减小 Ti 元素的扩散层厚度, 并且使界面微观形貌变得平直。

### 3 结 论

1) 粉末冶金热等静压工艺能够获得高强韧钛合金的致密化组织, 获得的组织类型为魏氏组织, 晶粒内部具有细小的针状  $\alpha$  相。

2) 钛合金与低碳钢包套界面处发生了元素扩散, 基体元素 Ti 和 Fe 发生的扩散程度要小于合金元素 Mo、Al 和 V 的扩散程度。

3) 热等静压态合金与低碳钢包套之间的界面处发生了基体元素扩散, 形成了界面反应层, 界面呈波浪状, 其中 Ti 元素扩散层厚度为  $8\ \mu\text{m}$ , Fe 元素扩散层厚度为  $4\ \mu\text{m}$ 。

4) 采用选择性化学洗可以去除 Fe 元素扩散层, 并减小 Ti 元素扩散层厚度, 喷砂能够进一步减小 Ti 元素的扩散层厚度, 并使波浪状的界面平直。

#### 参考文献 References

- [1] Lin Junhui(林俊辉), Dan Zhenhua(淡振华), Lu Jiafei(陆嘉飞) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(3): 1090
- [2] Jiang Peng(蒋鹏), Wang Qi(王启), Zhang Binbin(张斌斌) *et al. Strategic Study of CAE*(中国工程科学)[J], 2019, 21(6): 95
- [3] Lei Ting(雷霆). *Titanium and Titanium Alloy*(钛及钛合金)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018: 94
- [4] Guo Ruipeng(郭瑞鹏), Zhang Jing(张静), Xu Lei(徐磊) *et al. Chinese Journal of Materials Research*(材料研究学报)[J], 2018, 32(5): 333
- [5] Chen Gang(陈刚), Lu Xin(路新), Zhang Lin(章林) *et al. Materials Science and Technology*(材料科学与工艺)[J], 2020, 28(3): 98
- [6] Xu Lei(徐磊), Guo Ruipeng(郭瑞鹏), Wu Jie(吴杰) *et al.*

- Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2018, 54(11): 1537
- [7] Guo Zhimeng(郭志猛), Lu Boxin(芦博昕), Yang Fang(杨芳) *et al. Powder Metallurgy Industry*(粉末冶金工业)[J], 2020, 30(2): 1
- [8] Li Zhixian(李志贤), Yang Wei(杨伟), Yu Huan(余欢). *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2019, 39(9): 984
- [9] Liu Lvguo(刘吕果). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2018
- [10] Hu Gengxiang(胡赓祥), Cai Xun(蔡珣), Rong Yonghua(戎咏华). *Fundamentals of Materials Science*(材料科学基础)[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2010: 132
- [11] Zhao Ertuan, Kong Fantao, Chen Yuyong *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2011, 21(2): 348
- [12] Liu Hongyu(刘鸿羽), Chai Hao(柴皓), Lou Yanchun(娄延春) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(3): 890
- [13] Wu Jun(邬军), Xu Lei(徐磊), Lei Jiafeng(雷家峰) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(S1): 299
- [14] Özgür Özgün, H Özkan Gülsoy, Ramazan Yılmaz *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2013, 576: 140
- [15] Ning Y Q, Yao Z K, Fu M W *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528(28): 8065
- [16] Gómez X, Echeberria J. *Materials Science and Engineering A*[J], 2003, 348(1-2): 180
- [17] Liang Xiaowen(梁小文), Xu Zhifeng(徐志锋), Zhao Kaifa(赵开发) *et al. Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2017, 37(5): 518
- [18] Liu Aihui(刘爱辉), Li Bangsheng(李邦盛), Sui Yanwei(隋艳伟) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(3): 554
- [19] Bassini E, Vola V, Lorusso M *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 695: 55
- [20] Guo Ruipeng(郭瑞鹏). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014
- [21] Bain Edgar C, Paxton Harold W. *Alloying Elements in Steel*[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1966

## Study on Interfacial Reaction Layer Between HIPed Titanium Alloy and Low Carbon Steel Capsule

Bao Shilu<sup>1,2</sup>, Lu Zhengguan<sup>1</sup>, Xu Lei<sup>1</sup>, Ma Yingjie<sup>1</sup>

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

(2. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Shenyang 110016, China)

**Abstract:** A new type of high strength and toughness powder titanium alloy used for marine was prepared by hot isostatic pressing (HIP) near net forming process using pre-alloyed powder. The interface reaction between titanium alloy and low carbon steel capsule was studied. Results show that there is a wavy interface between titanium alloy and low carbon steel capsule and the thickness of interfacial reaction layer is 8  $\mu\text{m}$ . Alloying elements Al, Mo and V in titanium alloy diffuse into low carbon steel to a certain extent, while matrix elements Ti and Fe of the two materials diffuse significantly less than the former. After selective chemical washing, the capsule is removed, and the thickness of interfacial reaction layer is reduced by 2.5  $\mu\text{m}$ , but the interface is still wavy. Subsequent sand blast could not only reduce the thickness of the interfacial reaction layer, but also make the interface flat.

**Key words:** titanium alloy; mild steel capsule; hot isostatic pressing; interfacial reaction

---

Corresponding author: Xu Lei, Ph. D., Professor, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, P. R. China, Tel: 0086-24-83978843, E-mail: lxu@imr.ac.cn