

## 变形钛及钛合金熔炼技术

李 雄<sup>1</sup>, 庞克昌<sup>1</sup>, 郭 华<sup>2</sup>, 李红恩<sup>3</sup>

- (1. 宝山钢铁股份有限公司 特钢事业部, 上海 200740;
2. 沈阳飞机工业(集团)有限公司 冶金处, 沈阳 110034;
3. 沈阳飞机设计研究所 材料应用室, 沈阳 110035)

**摘 要:** 讨论变形钛及钛合金的 3 种主要熔炼方法。高密度夹杂和低密度夹杂是导致钛及钛合金制品疲劳裂纹和锻造裂纹的两种主要缺陷, 真空自耗电弧熔炼(VAR)去除这两种缺陷的能力有限, 而电子束冷床炉(EBCHM)和等离子冷床炉(PACHM)熔炼却有很好的效果, 但 HM + VAR 工艺的铸锭仍有低密度夹杂存在。多次 VAR 熔炼会加剧合金成分不均匀, 而 CHM 熔炼的铸锭成分不均匀程度更大。EB 炉适合熔炼纯钛和低合金钛, PA 炉适合熔炼钛合金, 前者元素挥发较厉害, 后者的铸锭中存在气孔和表面冷隔。HM 熔炼的扁锭对轧制板材具有成本优势, 而对其他类型的产品这种优势可能不复存在。基于成本的考虑, 对熔炼技术的掌握程度是一个不可忽视的因素。

**关键词:** 变形钛; 钛合金; 真空自耗电弧熔炼; 电子束冷床熔炼; 等离子冷床熔炼; 熔炼成本

中图分类号: TF806.82

文献标志码: A

## Melting technology of wrought Ti and Ti alloy

LI Xiong<sup>1</sup>, PANG Ke-chang<sup>1</sup>, GUO Hua<sup>2</sup>, LI Hong-en<sup>3</sup>

- (1. Special Steel Business Unit, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 200740, China;
2. Metallurgy Department, Shenyang Aircraft Industries Group, Shenyang 110035, China;
3. Material Application Office, Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang 110034, China)

**Abstract:** The main three kinds of melt methods were discussed for wrought Ti and Ti alloy. High-density inclusions (HDIs) and low-density inclusions (LDIs) can initiate the fatigue cracks and forging cracks. Both electron-beam cold hearth melting (EBCHM) and plasma-arc cold hearth melting (PACHM) processes have significantly greater capabilities to eliminate LDIs and HDIs compared with the three VAR processes (3-VAR), however LDIs are found in a few HM+VAR heats. Although repeated VAR makes the chemical composition heterogeneity become serious, it is still better than HM. The melting of Ti alloys using EBCHM makes the marked volatile of high vapor pressure alloying elements, EB furnace is more suitable for melting CPTi and low alloy titanium. PACHM is a good process for melting titanium alloy, despite existing gas pores within ingots and cold shuts in the ingot surfaces. There is cost advantage directly rolling into plate and sheet products by HM compared with two VAR processes (2-VAR) to cost Ti and Ti alloy into a rectangular ingot, while the advantage maybe no longer exists for other types of products. Based on cost considerations, technical mastery of the melting should not be ignored.

**Key words:** wrought titanium; titanium alloy; vacuum arc remelting (VAR); electron-beam cold hearth melting (EBCHM); plasma-arc cold hearth melting (PACHM); melting cost

变形钛及钛合金的熔炼有 ESR(电渣熔炼)、  
VAR(真空自耗电弧熔炼)、EBCHM(电子束冷床熔炼)、

PACHM(等离子冷床熔炼)等<sup>[1-4]</sup>。在美、俄、日、中、  
德等主要钛及钛合金生产国家, 主要采用 VAR、EBCHM

及 PACHM 的熔炼方式,据 2005 年美国矿业年鉴的统计<sup>[5]</sup>:80%的钛锭采用 VAR 生产,20%的钛锭采用 HM 生产。由此可见,VAR 仍然是最主要的钛锭生产方式。

由于现代冶炼技术的进步,钛及钛合金的熔炼方式变得多样化,采用何种熔炼方式决定于质量要求、成本驱动及对熔炼技术的掌握程度。钛及钛合金的熔炼缺陷有硬 $\alpha$ 夹杂(Hard  $\alpha$  inclusions, Type I,也叫低密度夹杂,LDIs)、高密度夹杂(HDIs)、富 $\alpha$ 相(Type II)、块状 $\alpha$ 相(Blocky  $\alpha$ )、 $\beta$ 斑( $\beta$  Fleck)等。富 $\alpha$ 相主要出现在锭头,可通过增加熔炼次数或热封顶时减小缩管或增加切头解决;块状 $\alpha$ 相和 $\beta$ 斑则可通过减小锭型或通过扩散处理解决,而硬 $\alpha$ 夹杂和高密度夹杂的去除则较为困难<sup>[6]</sup>。美国对飞机重要部件及发动机转动件要求三次 VAR 或 HM + VAR 处理,以保证钛锭的纯净度和成分的均匀性,这对于提高低周疲劳性能有好处。冷床炉对去除硬 $\alpha$ 夹杂和高密度夹杂具有独特的优势,而且单熔法(一次冷床炉熔炼, single melt)可用于降低钛合金冶炼成本,双熔法(HM+VAR, double melt)可用于获取优良品质的钛合金<sup>[7-9]</sup>。

针对现今主流的 3 种熔炼方式,本文作者将对其熔炼特点及熔炼成本进行分析,为合理选择熔炼工艺提供依据。

## 1 熔炼技术分析

20 世纪 80 年代以前,钛及钛合金的生产基本上依靠 VAR,进入 20 世纪 80 年代后,冷床炉熔炼技术进入钛及钛合金的生产领域,首先是 EBCHM,接着是 PACHM。1989 年美国航空公司的一架 DC-10 喷气式飞机在索斯市(Sioux city)发生空难,原因是钛合金低密度夹杂导致飞机发动机风扇盘失效,所以美国对低密度夹杂和高密度夹杂进行了严格限制,这为冷床炉在钛合金熔炼领域的发展提供了契机。

### 1.1 真空自耗电弧熔炼

真空自耗电弧熔炼(VAR)是一种以提高纯净度、细化铸锭组织为目的的半连续工艺技术,VAR 炉由水冷铜坩埚、真空系统、电极驱动和控制系统组成,其结构示意图如图 1 所示。一些较新型的 VAR 炉水冷套外侧还装有搅动线圈,搅动线圈产生的电磁场和熔化电流产生的电磁场交互作用可以提高熔池金属成分的均匀性<sup>[10]</sup>。使用的锭要求没有夹杂、偏析小、表面质量好,须经过 2~3 次熔炼。

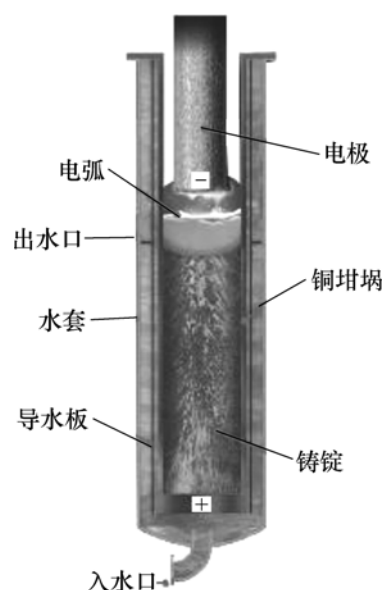


图 1 VAR 炉的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of VAR furnace

夹杂分高密度夹杂和低密度夹杂,前者可用 X 线检测得到,而后者除非伴随有裂纹,否则用 X 线和超声波检测不到,所以低密度夹杂因其隐蔽性强而更具危害<sup>[11-12]</sup>。

高密度夹杂来源于钛废料中混入的切削工具和钨极焊枪颗粒以及中间合金,在海绵钛生产、电极压制及钛锭熔炼等过程都有可能产生低密度夹杂,如海绵钛生产和电极压制时出现火星或着火燃烧、电极焊接时被污染、熔炼时出现漏气漏水、以及锭表清理时的混入等<sup>[6]</sup>。高密度夹杂和低密度夹杂的熔点均很高,如 WC、Ta、Mo、V 的熔点分别为 2 800、2 996、2 660 和 1 900, TiN 的熔点为 2 950。虽然电弧的温度很高,但由于这些夹杂只瞬间暴露于电弧中,不足以使其熔化。高密度夹杂密度比钛大,脱离电极后快速沉淀于熔池底部,VAR 对抑制高密度夹杂没有有效的措施。图 2 所示为 CAMPACT-VAR 软件模拟 VAR 熔炼的计算结果<sup>[13]</sup>,其中,  $R$  为锭径,  $X$  为锭高。冶炼对象为 TC4 钛合金,锭直径为 760 mm。稳态阶段熔化速率为 12.5 kg/min,可以推算出熔池液面上升速度为 6 mm/min。无磁力搅拌的熔池温度区间和深度分别为 1 670~1 900 和 0.64 m,有磁力搅拌时熔池温度相对均匀,熔池温度区间和深度分别为 1 670~1 690 和 0.8 m。TiN 在纯钛中的熔化速率有两个试验结果: 124~344  $\mu\text{m}/\text{min}$  (1 625~1 825)<sup>[14]</sup>和 304~426  $\mu\text{m}/\text{min}$  (1 750~1 783)<sup>[15]</sup>,假如 TiN 在 TC4 中的熔化速度与在纯钛中的一样,且 TiN 在熔池中的下移速度为 50 mm/min,熔化速度取为 300  $\mu\text{m}/\text{min}$ ,熔池中心部位

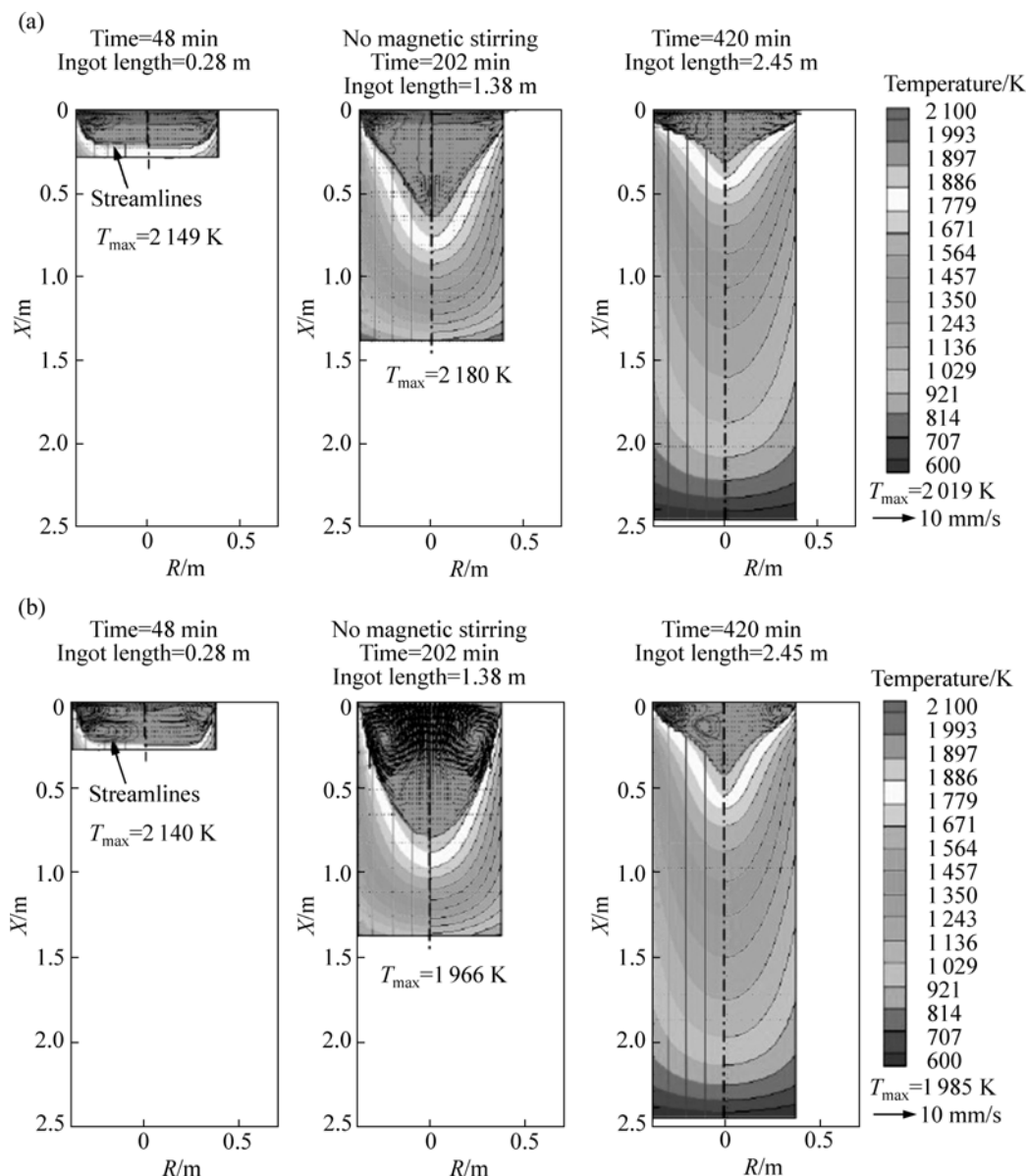


图2 VAR熔炼 Ti-6-4 钛合金无磁力搅拌和有磁力搅拌的流场和温度场

Fig.2 Flow and temperature fields in ingot during VAR process for Ti-6-4 alloy: (a) Without magnetic stirring; (b) With magnetic stirring

的 TiN 如垂直下落在无磁力搅拌时,尺寸小于 3.8 mm 可以扩散溶解,有磁力搅拌时尺寸小于 4.8 mm 可以扩散溶解;但距离钛锭中心部位越远,熔池越浅,TiN 存在的可能性越大,这必须经过多次熔炼来减小 TiN 存在的可能性。合金含量更高的钛合金 Ti-17 和 Ti-1023,其熔化速度比 TC4 的慢,熔池比 TC4 的浅,夹杂溶解更为困难。鉴于夹杂的危害性,俄罗斯 VSMPO-AVISMA 公司要求在熔炼前对海绵钛和中间合金进行 100% 的检查,美国也对钛合金熔炼原料进行了严格规定,如中间合金必须 100% 经过 X 线检查,不允许使用钨极氩弧焊,钛回收料进行磁选分离,飞机引擎转动件必须使用 Timet 公司的海绵钛等<sup>[16]</sup>。

偏析分微观偏析和宏观偏析,微观偏析源于枝晶间的析出;宏观偏析源于溶质偏聚和液体流动,而这主要受电磁力和浮力的影响,其根本原因在于熔池内的温度梯度和密度差<sup>[17]</sup>。如 $\beta$ 斑是典型的微观偏析,而钛锭截面成分的不均匀性则属于宏观偏析。前一次熔炼出现的成分不均匀性被带入下次熔炼,2~3 次熔炼完毕,最终成分偏析较上次熔炼更为严重。由图 3 的仿真结果可见,从第 1 次熔炼至第 3 次熔炼,Fe 偏析越趋严重,两次熔炼间电极换向对改善成分均匀性有好处,但其影响小于 5%,低功率的 Fe 偏析程度小于高功率的 Fe 偏析程度<sup>[2]</sup>。图 4~6 所示为元素在稳态熔化区横截面的分布和整个钛锭纵截面的分布<sup>[18]</sup>。横

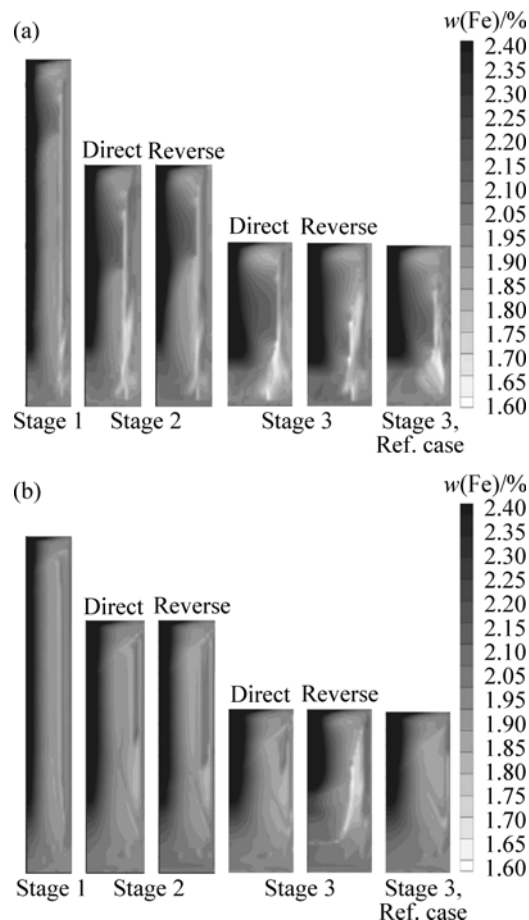


图3 Ti-10-2-3 三次 VAR 熔炼时 Fe 的分布

**Fig.3** Fe composition for Ti-10-2-3 by 3-VAR: (a) high power; (b) low power

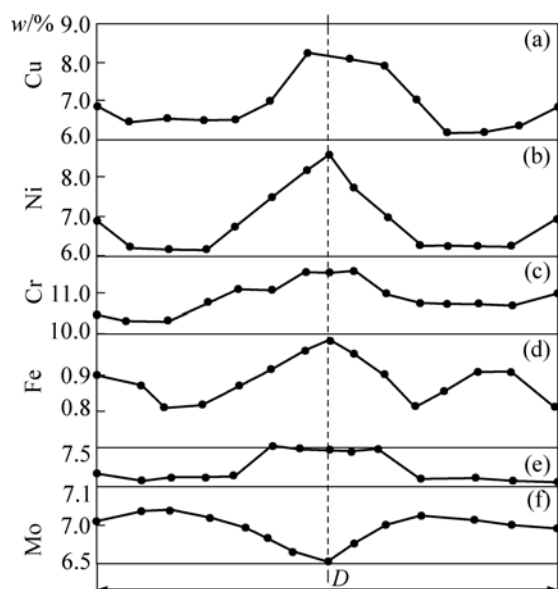


图4 钛锭稳态熔化区横截面元素含量变化

**Fig.4** Change of element content in cross-sections of stable melting ingot areas: (a) Ti-8Cu alloy,  $d380$  mm ingot; (b) Ti-8Ni alloy,  $d380$  mm ingot; (c) BT15 alloy,  $d380$  mm ingot; (d) BT22 alloy,  $d380$  mm ingot; (e) Mn-a OT4 alloy,  $d850$  mm ingot; (f) BT15 alloy,  $d380$  mm ingot

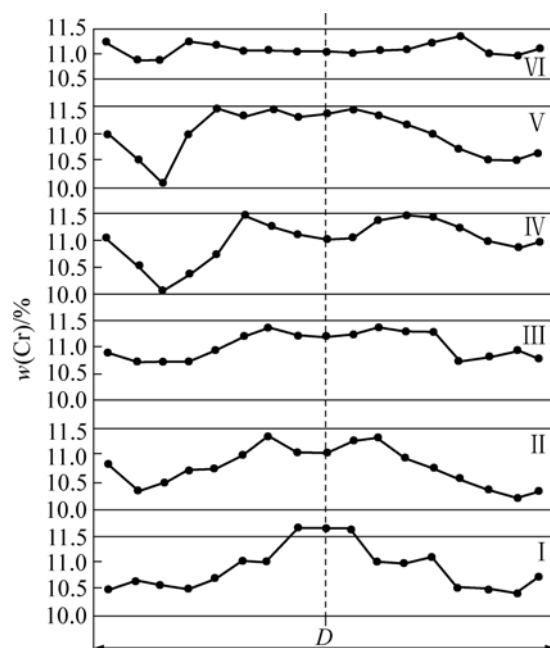


图5 直径 380 mm 的 BT15 锭纵截面 Cr 元素含量变化(收缩管、孔已切除)

**Fig.5** Change of Cr content in top-end of BT15 alloy  $d380$  mm ingot produced without solenoid and shrinkage cavity removal: Section I—At bottom of final pool; Section VI—At top of ingot; Sections II–V—Intermediate sections

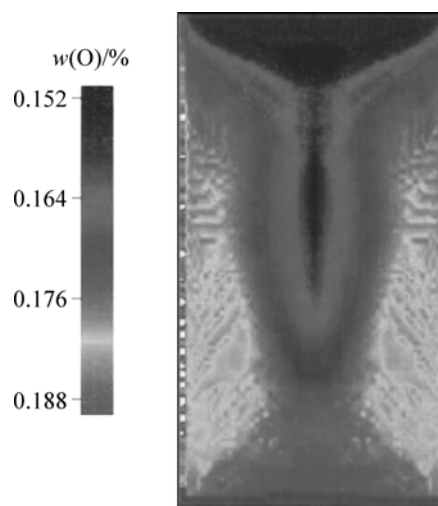


图6 计算机模拟的 Ti-6Al-4V VAR 锭中氧的分布

**Fig.6** Predicted oxygen distribution in VAR melted Ti-6Al-4V ingot

向分析可知: Cu、Ni、Cr、Fe、Mn 在锭表层的浓度高于内部, 而以心部为最高, Mo 在心部则呈负偏析状态; 纵向分析可知: 锭头中心部位 Cr 的含量最低, 而锭尾中心部位 Cr 的含量最高。无论纵向横向, 钛锭不同部位元素浓度都存在显著的差异。降低熔化速度

可以减少偏析,但是降低了锭表质量和生产效率。国外往往在锻造或轧制前进行均匀化退火<sup>[6]</sup>,以改善成分均匀性,这一点未引起国内足够的重视。值得注意的是均匀化退火不能消除高密度夹杂和低密度夹杂。

## 1.2 冷床炉熔炼

与 VAR 炉不同的是,冷床炉分为独立的 3 个区:熔炼区、精炼区和凝固区,3 个区均由水冷铜坩埚组成。依据热源的不同分为电子束冷床炉和等离子冷床炉,如图 7 所示。海绵钛、中间合金、钛回收料在熔炼区熔化后流入精炼区精炼,由于炉床中液态金属的

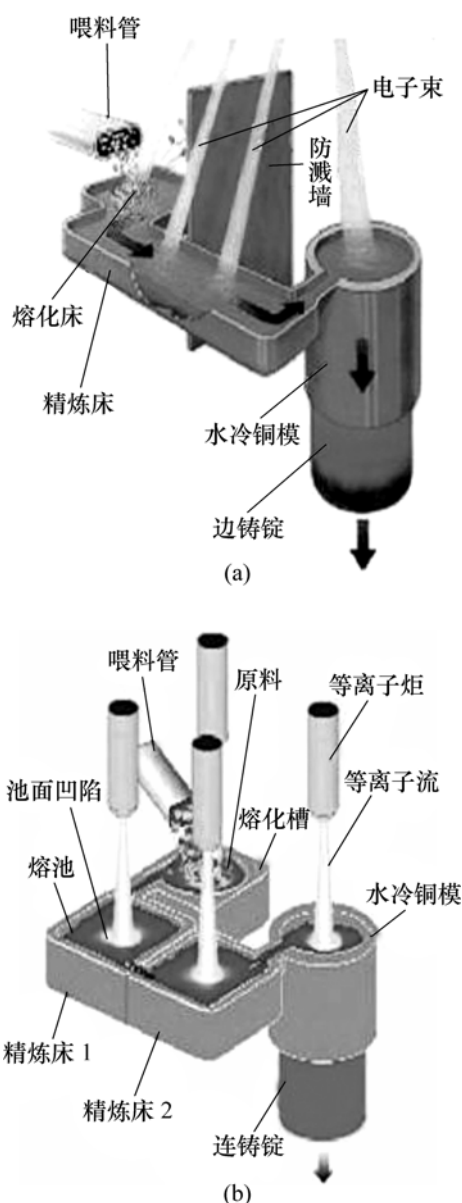


图 7 电子束冷床炉和离子束冷床炉示意图

**Fig.7** Schematic diagram of electron-beam cold hearth melting furnace (a) and plasma-arc cold hearth melting furnace (b)

滞留时间和温度可控,高密度夹杂和密度大于液态金属的低密度夹杂完全可被凝壳捕获,而密度小于液态金属的低密度夹杂则可得到完全的分解或溶解,所以液态金属的纯净度优于 VAR。EB 炉金属熔池表面暴露在高真空环境(0.001~10 Pa)下,十分有利于脱气,但蒸汽压较高的元素(Al、Cr、Mn 等)很容易挥发,如 EB 炉熔炼 Ti-6-4 时,30%的 Al 被挥发<sup>[19]</sup>,所以 EB 炉比较适合熔炼纯钛和低合金钛<sup>[20]</sup>。通过对元素挥发规律及电子束扫描模式、扫描频率和聚焦进行研究,熔池的化学成分已得到较好的控制,目前,EB 炉均可成功熔炼 Ti-6-4、Ti-6-4 ELI、Ti-17、Ti-6-2-4-2 和 Ti-6-2-4-6<sup>[7, 21]</sup>。与 EB 炉的高真空环境不同,PA 炉熔炼区和精炼区处于 5~100 kPa 的高纯氦气氛(99.999%)或氩气氛中,等离子气和炉内气氛均为氦气时,热效率最高(达 64%);炉内气压越高,金属元素挥发越少,所以 PA 炉较适合熔炼钛合金<sup>[4, 19]</sup>。对于 PACHM,惰性气体等离子体在熔池中形成小气泡,在连续铸锭过程中会形成小气孔,影响钛锭的致密性,而且 PA 锭表面容易形成冷隔。EBCHM 时的 Al 蒸汽以及真空室墙和顶上的沉淀物很可能掉进精炼区而被带入锭内形成富 Al 区,所以对于重要部件,后续的 VAR 过程有利于释放出 PA 锭中的惰性气体和消除 EB 锭中的 Al 偏析,并且可以提高铸锭成分的均匀性<sup>[6]</sup>。对于合金元素含量较高的合金(如 Ti-17),将原料压块是控制 HM 锭成分的有效方式<sup>[22]</sup>。EBCHM 和 PACHM 都采用连铸方式,在锭表未完全凝固时,抽锭必然影响结晶过程,从而影响铸锭组织的连续性。

通过对原材料、熔炼过程的控制以及冷床炉熔炼技术的使用,两次 VAR、三次 VAR 及 CHM+VAR 的钛坯和钛棒中的夹杂出现次数得以明显降低,图 8 所

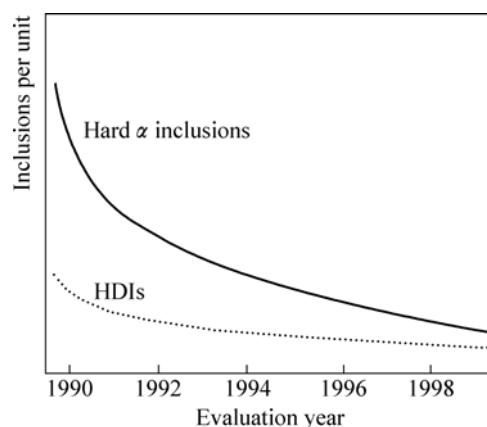


图 8 1990~2000 年期间高品质钛合金中夹杂出现的频率<sup>[22]</sup>

**Fig.8** Inclusion frequencies in premium-quality Ti alloys from 1990 to 2000<sup>[22]</sup>

示为 GEAE 在 1990~2000 年的统计数据<sup>[22]</sup>。除了两例高密度夹杂(分别由 EB 炉和 PA 炉熔炼的电极)出现在 VAR 锭头中, HM+VAR 锭的高密度夹杂是 0。HM+VAR 锭的低密度夹杂出现的概率与三次 VAR 相似, 冷床炉熔炼后磨削会导致 HM+VAR 锭出现低密度夹杂, 但禁止磨削后低密度夹杂仍会出现。原因为低密度夹杂出现在冷床炉熔炼后, 且概率可达 93%, 或是探伤方法不同: HM+VAR 锭采用的是分区探伤方法(MZUI), 而三次 VAR 锭采用的是传统超声波探伤方法, 分区探伤方法曾检测出被传统探伤方法遗漏的应变诱导的小孔, 前者较后者对缺陷更敏感<sup>[22]</sup>。

2 熔炼成本分析

除了有比 VAR 更好地去除高密度夹杂和低密度夹杂的能力外, 冷床炉还拥有降低钛制品成本的潜在优势, 如冷床炉可以 100%利用钛回收料、不需压制及焊接电极、方形铸锭有利于轧板等。图 9 所示为不同熔炼方法钛制品的工艺路线图。DMTC(美国国防金属中心)的研究报告认为<sup>[23]</sup>:冷床炉的原料完全采用钛回收料可以节省 19%的成本;直接连铸成扁锭免除锻造工序可节省 10%~11%的成本;到最后的成品板, 整个过程的成本可以降低 28%。但这个结论有一定的局限性, 如 2005 年和 2007 年美国钛回收料的价格高于海绵钛, 对钛回收料需要严格的管理, 如清洗、分选、化验及压块等, 这些都增加了成本。在生产量不大时凝壳浪费的材料所占比例偏高。虽然美国 TIMET 公

司使用的钛回收料达 40%<sup>[16]</sup>, 但我国钛产业规模远比美国小, 钛回收料的管理水平低, 通过使用钛回收料来降低成本, 在几年内不会有明显的效果。目前, 美国的冷床炉扁锭直接轧制的板主要用于民用设施及军用装甲板<sup>[24]</sup>, 而高端板坯及非板类件的冶炼工艺往往采用 HM+VAR, 所以, 将两次 VAR 与一次 HM 的成本进行比较对于大多数钛产品来说比较有意义。

表 1 所列专业咨询师 SAMPATH 对 VAR、EBCHM、PACHM 熔炼设备的投资估算<sup>[25]</sup>, 这三种设备的投资金额大致相当, 其中 VAR 熔炼含两套 VAR 设备。SAMPATH 经估测后认为, 轧制 1 英寸板和 2 英寸板, VAR 的成本分别是 EBCHM 的 1.35 和 1.76 倍, PACHM 的 1.4 和 1.4 倍。这个结果虽然与 DMTC 的结论有较大的差异, 但能说明由扁锭轧制成板有成本上的优势。但 SAMPATH 是从原材料、设备及后续的工序(HM 锭无需锻造开坯)的角度来考虑, 而电耗、水耗、人工成本、HM 的元素挥发及凝壳金属的浪费却未进入计算范畴。表 2 所示为从能源消耗、人工成本、产品收得率等角度对 3 种熔炼工艺的成本比较, 3 种熔炼方法中 2xVAR 的成本与 PACHM 相当, 但低于 EBCHM, 这种测算方法不适合评估板坯制品。

冷床炉用于冶炼钛在国外有近 30 年的历史, 但近几年我国才引进这项设施。即使冷床炉熔炼拥有可使用低成本原材料及减少工序的优势, 但是国内市场小、钛回收料不够、技术储备不足, 其优势不能得到有效发挥, 而在民用钛市场, 用 EB 炉熔炼的扁锭轧制的纯钛板将拥有成本优势。但 10~20 年后, 用 VAR 熔炼钛及钛合金仍将是国内市场的主流。

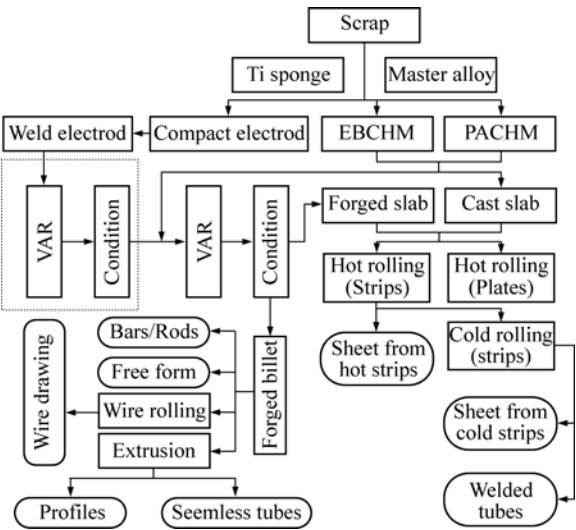


图 9 不同熔炼方法生产的钛及钛合金工艺路线

Fig.9 Processing routes for Ti and Ti alloy produced using different melting methods

表 1 3 种熔炼方法设备投资比较

Table 1 Estimated investments for 2-VAR, EBCHM, PACHM equipments<sup>[25]</sup>

| Processing          | Step                        | Throughput/<br>(kg·h <sup>-1</sup> ) | Equipment<br>investment/<br>US\$ |
|---------------------|-----------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| 2-VAR<br>processing | Electrode compacting        | 7 000                                | 5 400 000                        |
|                     | VAR primary melt            | 400                                  | 7 200 000                        |
|                     | VAR secondary melt          | 1 700                                | 7 200 000                        |
| EBCHM<br>processing | Raw material<br>preparation | 7 000                                | 180 000                          |
|                     | Electron beam melt          | 700                                  | 18 000 000                       |
| PACHM<br>processing | Raw material<br>preparation | 7 000                                | 5 400 000                        |
|                     | Plasma arc melting          | 450                                  | 14 400 000                       |

表 2 不同熔炼方法参数比较

Table 2 Comparison of different smelting process parameters of Ti

| Parameter                                                | Type of smelting process |       |       |
|----------------------------------------------------------|--------------------------|-------|-------|
|                                                          | VAR                      | EBCHM | PACHM |
| Specific electricity consumption/(kW·h·t <sup>-1</sup> ) | 1 100                    | 3 000 | 3 000 |
| Water consumption/(L·min <sup>-1</sup> )                 | 1 150                    | 2 275 | 2 275 |
| Specific scrap content in consumable electrode/%         | 45                       | 100   | 100   |
| Required number of remelting                             | 2                        | 1     | 1     |
| Output of good product (Single /double remelting)        | 87.5/75.7                | 93.0  | 99.0  |
| Number of operators                                      | 1                        | 3-4   | 3     |
| Capital cost (VAR-1.0)                                   | 1.0                      | 2.5   | 2.1   |
| Cost of production/(US\$·kg <sup>-1</sup> )              | 1.2                      | 3.3   | 2.4   |

### 3 结论

1) 冷床炉熔炼的钛锭纯净度优于 VAR 容量的钛锭。冷床炉对于去除高密度夹杂和低密度夹杂有良好的效果, VAR 去除高密度夹杂困难。但 HM+VAR 锭中低密度出现的概率与三次 VAR 锭中类似,这可能是因为冷床电极导入或是探伤方法不一样的原因。

2) VAR 熔炼次数越多,成分越不均匀;冷床炉熔炼采用连续熔炼连续铸锭的方式,其成分不均匀,对原料采用配料和压块的方式有利于提高铸锭成分的均匀性,但会增加成本。冷床炉熔炼室金属蒸汽沉淀物掉落会造成铸锭局部偏析。

3) EB 炉熔炼时,蒸气压高的元素耗损较多,PA 锭内部存在气孔且表面存在冷隔,EBCHM 和 PACHM 均采用拉锭的方式,影响了铸锭的结晶过程,其致密性比 VAR 锭的差。

4) 采用 HM+VAR 的熔炼方式可提高作为飞机重要部件铸锭的成分均匀性和表面质量。而飞机非重要部件、军用运载工具装甲板和民用市场中,CHM 锭已得到广泛应用。

5) HM 对于钛板制品的生产具有成本优势,而对于其他制品, HM 不具有成本优势。

6) 对成本的影响,除使用的原材料和工艺过程外,对熔炼技术的掌握也至为关键。即使 HM 技术具有成本优势,但如技术掌握不透,由于质量问题导致的损失将会抵消成本优势。

### REFERENCES

- [1] SENKOV O N. Metallic materials with high structural efficiency[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004: 413-418.
- [2] ZAGREBELNYY D, KRANE M J M. Segregation development in multiple melt vacuum arc remelting[J]. Metall Mater Trans B, 2008, 39(2): 281-288.
- [3] WATAKABE S, SUZUKI K, NISHIKAWA K. Control of chemical compositions of Ti-6Al-4V alloy during melting by electron beam furnace[J]. ISIJ Int, 1992, 32(5): 625-629.
- [4] NISHL S, KUSAMTCHI T, ONOYE T. Arc voltage and heat efficiency during plasma arc melting of titanium[J]. ISIJ Int, 1995, 35(2): 114-120.
- [5] U.S. Department of the Interior, 2005 Minerals Yearbook [EB/OL]. [2007-02-01]. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/asbestos/asbesmyb05.pdf>
- [6] LUTJERING G, WILLIAMS J C. Titanium[M]. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg Press, 2003: 27-70.
- [7] WOOD J R. Producing Ti-6Al-4V plate from single-melt EBCHM ingot[J]. JOM, 2002, 2: 56-58.
- [8] YU K O, CRIST E M, PESA R. Single-melt beta C for spring and fastener applications[J]. J Mater Eng Perf, 2005, 14(6): 697-702.
- [9] LOUVIGNÉ P F. Challenges for the development of titanium in france and in the european industry[C]//Niinomi M eds. Ti-2007 Science and Technology: Proceedings of the 11th World Conference on Titanium (JIMIC5). Kyoto: The Japan Institute of Metals Publishers, 2007: 33-40.
- [10] CHAPELLE P, JARDY A, BELLOT J P. Effect of electro-magnetic stirring on melt pool free surface dynamics during vacuum arc remelting[J]. J Mater Sci, 2008, 43: 5734-5746.
- [11] CHAN K S, PEROCCHIN L, LEVERANT G R. Constitutive properties of hard-alpha titanium[J]. Metall Mater Trans A, 2000, 31(12): 3029-3040.
- [12] BELLOT J P, FOSTER B, HANS S. Dissolution of hard-alpha inclusions in liquid titanium alloys[J]. Metall Mater Trans B, 1997, 28(6): 1001-1010.
- [13] KELKAR K M, PATANKAR S V, MITCHELL A. Computational modeling of the vacuum arc remelting (VAR) Process used for the production of ingots of titanium alloys[C]//Niinomi M eds. Ti-2007 Science and Technology: Proceedings of the 11th World Conference on Titanium (JIMIC5). Kyoto: The Japan Institute of Metals Publishers, 2007: 1275-1278.
- [14] SHAMBLEN C E, HUNTER G B. Technical information series report[R]. Cincinnati: GEAE, 1986.
- [15] BERTRAM L A, ZANNER F J. Modeling of casting and welding processes[J]. TMS-AIME, 1980, 3: 246-255.
- [16] SEONG S, YOUNOSSI O, GOLDSMITH B W. Titanium:

- Industrial base, price trends, and technology initiatives[M]. The RAND Corporation, 2009: 26–28.
- [17] ZAGREBELNYY D, KRANE M J M. Segregation development in multiple melt vacuum arc remelting[J]. Metall Mater Trans B, 2009, 40(3): 281–288.
- [18] DOBATKIN V I, ANOSHKIN N F. Comparison of macro-segregation in titanium and aluminium alloy ingots[J]. Mater Sci Eng A, 1999, 263: 224–229.
- [19] POULSEN E, CHINNIS W, MATT M. Advances in titanium cold hearth melting[J]. Industrial Heating, 2000, 67(1): 49–51.
- [20] KUSAMICHLH T, KANAYAMA H, ONOYE T. Temperature measurement of molten metal surface in electron beam melting of titanium alloys[J]. ISIJ Int, 1992, 32 (5): 593–599.
- [21] BAKISH R. Optimizing operating efficiency of EBM[J]. Industrial Heating, 2004, 71(2): 39–41.
- [22] SHAMBLEN C E, WOODFIELD A P. Progress in titanium-alloy hearth melting[J]. Industrial Heating, 2002, 69(1): 49–52.
- [23] TRZCINSKI M. Armor plate produced using 100% titanium scrap solids[R]. Waikoloa: GENE, 2009, 9: 13–16
- [24] MONTGOMERY J S, WELLS M G H, ROOPCHAND B. Low-cost titanium armors for combat vehicles[J]. JOM, 1997, 5: 45–47.
- [25] SAMPATH K. The use of technical cost modeling for titanium alloy process selection[J]. JOM, 2005, 5: 25–32
- [26] LEE Y T, LEE C D. The dissolution of titanium and defect prevention techniques[J]. Machinery and Materials, 2008, 20 (4): 103–114.
- (编辑 刘华森)