

The TC2 Titanium Alloy Melting for VAR

Yabo Zheng^{1,2*}, Zhanqian Chen², Feng Chen², Lu Qiao², Lingling Mao²

¹Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi

²Baoji Titanium Industry Co., Ltd., Baoji Shaanxi

Email: [*yabo Zheng@163.com](mailto:yabo Zheng@163.com)

Received: Sep. 1st, 2015; accepted: Sep. 21st, 2015; published: Sep. 29th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Since the saturated vapor pressure of aluminum and manganese in the titanium alloys are much greater than matrix elements, the volatilization loss of main group elements was greater in melting, especially manganese, which is not conducive to the uniformity control of chemical composition of the ingot. Based on the activity coefficient model and the controlled mass transfer coefficient calculation model, this article analyzes the volatile trend of aluminum and manganese in the titanium melt, and the distribution characteristics of the elements in the TC2 titanium alloys. Combing with the actual production, by the reasonable control of raw materials, and selecting the appropriate alloying additives and melting parameters, TC2 titanium alloy with diameter of 720 mm was melted by VAR with inert gas protection. The results showed that: the chemical composition is uniform in the ingot's radial and axial direction; the products meet the standard requirements; and macrosegregation does not appear.

Keywords

VAR Melting, TC2, Volatilize, Composition Control

VAR熔炼TC2钛合金

郑亚波^{1,2*}, 陈战乾², 陈峰², 乔璐², 毛玲玲²

¹西安建筑科技大学, 陕西 西安

²宝鸡钛业股份有限公司, 陕西 宝鸡

Email: [*yabo Zheng@163.com](mailto:yabo Zheng@163.com)

*通讯作者。

收稿日期：2015年9月1日；录用日期：2015年9月21日；发布日期：2015年9月29日

摘要

由于Al、Mn元素在钛合金中的饱和蒸汽压远大于基体元素，因此，TC2钛合金在熔炼中主组元的挥发损失较大，尤其是Mn元素，不利于铸锭化学成分均匀性控制。本文基于活度系数计算模型和控制传质系数计算模型，从热力学角度分析了钛合金熔体中Al、Mn元素的挥发趋势，分析了TC2钛合金中各元素的分布特点，结合生产实际，通过合理控制原材料，选择合适的合金添加剂及熔炼参数等，采用真空自耗电弧炉惰性气体保护熔炼出直径为720 mm的TC2钛合金铸锭，结果表明：所熔炼的铸锭径向、轴向化学成分均匀，生产的铸锭经后续加工，所得到的产品均满足标准要求，未出现宏观偏析。

关键词

VAR熔炼，TC2，挥发，成分控制

1. 引言

TC2合金名义化学成分为：Ti-4Al-1.5 Mn，是一种700 MPa等级的中等强度和较好塑性的 $\alpha + \beta$ 型钛合金，与TC1、TA21同属于Ti-Al-Mn系合金。由于其具有较高的强度、良好的成型性和焊接性能，综合力学性能较好，在航空工业、宇航行业、化工工业、造船业等方面日益得到广泛的应用[1]-[3]。

在TC2铸锭真空自耗熔炼过程中，铝、锰属于易挥发组元，在真空熔炼条件下大量挥发，除相当部分被真空机组抽出外，大部分在铸锭周边和顶部富集，尤其是Mn元素更为严重，铸锭表层的含锰量可高达中心部位的15倍[4]，这会造成铸锭化学成分不均匀，产生严重锰偏析，影响产品的力学性能和质量。因此如何控制TC2合金熔炼过程中主组元挥发现象就显得尤为重要。本文将从热力学角度探讨TC2合金熔体中各组元的饱和蒸气压以及熔炼过程中各组元的挥发趋势，为TC2合金的VAR熔炼提供理论指导，并通过试验验证，生产出合格的TC2合金铸锭。

2. 热力学分析

合金成分的精确控制是获得性能优良合金的先决条件之一，而合金成分的变化主要由于在熔炼过程中易挥发组元的挥发。在高温条件下，熔体中一些主要组成元素在真空条件下的挥发会造成熔炼后合金成分偏离指定成分，对合金的组织性能产生影响[5]，而VAR熔炼时真空度较高，合金组元的挥发尤为严重。因此，控制合金成分的均匀性是工业化VAR熔炼生产的关键技术之一。

2.1. 活度系数的计算

从热力学上说，当熔体温度 T 一定时，合金熔体中元素的蒸汽压 p 受其浓度及各元素之间的相互作用影响，挥发程度与该元素的饱和蒸气压 p^0 有着密切的关系。对合金熔体中某组元 i 来说，其蒸汽压 p_i 为[6]

$$P_i = x_i \cdot \gamma_i \cdot p_i^0 \quad (1)$$

式中： p_i 是合金熔体中组元 i 的饱和蒸气压； γ_i 为组元 i 在合金熔体中的活度系数； x_i 是组元 i 的摩尔分数； p_i^0 为纯组元 i 的饱和蒸气压。

对于(1)式， p_i^0 可以从有关文献上查到，而 γ_i 的获得要困难的多。因此，通过理论上求解合金熔体中

各组元的活度系数对控制合金成分是必要的。要对多元合金熔体中各组元活度系数进行精确研究，特别是考虑到各组元之间的相互作用系数对活度的影响，在目前实验条件下是不太可能的，特别是对 TC2 合金这样的高活性熔体，用实验测量组元的活度系数非常困难，只能通过一些经验或半经验的模型对其进行理论上的预测。在这方面，近年来，国内外冶金和铸造工作者已经作了很多有意义的工作，有关熔体中组元的活度计算已经进行广泛而深入的研究，建立了一些与实际符合较好的计算模型。虽然利用这些模型来预测具体的合金体系尚有很大的困难，但这些模型对于理解活度和活度系数随成分的变化起到了重要的作用。郭景杰等曾借助 Miedema 的二元熔液生成热半经验模型和 Kohler 建立的三元熔液模型推导了三元系活度系数的统一公式 [7]。用该公式对 TC4 和 TA7 合金的计算结果与孔凡亚等 [8] 通过实验测得的结果吻合很好。

本文亦采用此公式计算 TC2 合金熔体中主组元的活度系数，由于计算过程复杂，故只给出最终的计算式如下。

公式：

$$\ln \gamma_i / \gamma_i^0 = \ln \gamma_k + \sum_{j=2}^3 \varepsilon_j^i x_j + \sum_{j=2}^3 \rho_j^i x_j^2 + \sum_{j=2}^3 \sum_{k>j}^3 \rho_i^{jk} x_j x_k + 0(x^3) \quad (2)$$

式中：

$$\ln \gamma_k = \left[\frac{\varepsilon_i^i x_i^2 + \varepsilon_i^i x_i x_j + \varepsilon_j^i x_j x_i + \varepsilon_j^i x_j^2}{(x_i + x_j)^2} \right] \cdot \left[(x_i + x_j) + \ln x_k \right] + 2 \left[\ln x_k + (x_i + x_j) + \frac{(x_i + x_j)^2}{2} \right]$$

$$\left[\frac{x_i^3 \rho_i^i + x_i x_j^2 \rho_i^j + x_i^2 x_j \rho_i^{ij} + x_j x_i^2 \rho_j^i + x_j^2 x_i \rho_j^{ij} + x_j^3 \rho_j^j}{(x_i + x_j)^3} \right]$$

$$\ln \gamma_i^0 = \frac{1}{RT} A$$

$$\varepsilon_i^i = \frac{1}{RT} (2B - C)$$

$$\varepsilon_i^j = \varepsilon_j^i = \frac{1}{RT} (-2A - 2D)$$

$$\rho_i^i = \frac{1}{2RT} (D + E - G)$$

$$\rho_i^j = \frac{1}{2RT} (-4A + 4G + H)$$

$$\rho_i^{jk} = \frac{1}{RT} (4A - 2B + C + 4D + 6I)$$

其中：

$$A = F_{ik} [1 + \mu_i (\phi_i - \phi_k)] / V_k^{2/3}$$

$$B = F_{ik} \left[-1 - (2\mu_i + \mu_k) (\phi_i - \phi_k) - \mu_i \mu_k (\phi_i - \phi_k)^2 \right] / V_k^{2/3}$$

$$C = F_{ik} [1 + \mu_i (\phi_i - \phi_k)] \cdot \left\{ V_i^{2/3} [1 + \mu_i (\phi_i - \phi_k)] + V_k^{2/3} [1 + \mu_k (\phi_k - \phi_i)] \right\} / (V_k^{2/3})^2 \quad D = F_{jk} [1 + \mu_j (\phi_j - \phi_k)] / V_k^{2/3}$$

$$\begin{aligned}
E &= F_{jk} \left[2 + (10\mu_i + 8\mu_k)(\phi_i - \phi_k) + 14\mu_i\mu_k(\phi_i - \phi_k)^2 \right] / V_k^{2/3} \\
F &= F_{ik} \left\{ \left[1 + \mu_i(\phi_i - \phi_k) \right] \left[1 + (3\mu_i - \mu_k) - \mu_i\mu_k(\phi_i - \phi_k)^2 \right] / V_i^{2/3} \right. \\
&\quad \left. + \left[1 + \mu_k(\phi_k - \phi_i) \right] \left[1 + (2\mu_i + \mu_k)(\phi_i - \phi_k) + \mu_i\mu_k(\phi_i - \phi_k)^2 \right] V_k^{2/3} \right\} / (V_k^{2/3})^2 \\
G &= F_{ij} \left[1 + \mu_i(\phi_i - \phi_j) \right] / V_j^{2/3} \\
H &= F_{jk} \left\{ \left[1 + \mu_j(\phi_j - \phi_k) \right] \left[V_j^{2/3} (12 + 4\mu_j(\phi_j - \phi_k)) + V_k^{2/3} (12 + 4\mu_k(\phi_k - \phi_j)) \right] \right. \\
&\quad \left. + 4 \left[-1 - (2\mu_j + \mu_k)(\phi_j - \phi_k) - \mu_j\mu_k(\phi_j - \phi_k)^2 \right] V_k^{2/3} \right\} / (V_k^{2/3})^2 \\
I &= F_{ij} \left[3 + (2\mu_i - \mu_j)(\phi_i - \phi_j) - \mu_i\mu_j(\phi_i - \phi_j)^2 \right] / V_j^{2/3}
\end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned}
F_{ij} &= a_{ij} \cdot f_{ij} \\
a_{ij} &= 1 - 0.1T \left(\frac{T_{m_i} + T_{m_j}}{T_{m_i} \cdot T_{m_j}} \right)
\end{aligned}$$

T_{m_i} , T_{m_j} , 分别为组元 i , j 的熔点, 由文献 [6] 给出:

$$f_{ij} = \frac{2pV_i^{2/3}V_j^{2/3} \left\{ q/p \left[(n_{ws}^{V/3})_j - (n_{ws}^{V/3})_i \right]^2 - (\phi_j - \phi_i)^2 - a(r/p) \right\}}{(n_{ws}^{V/3})_i^{-1} + (n_{ws}^{V/3})_j^{-1}}$$

F_{ij} , F_{ik} 与 F_{jk} 意义相同, a_{ij} , a_{ik} 与 a_{jk} 意义相同, f_{ij} , f_{ik} 与 f_{jk} 意义相同。

V_i , $(n_{ws})_i$, ϕ_i 分别代表组元 i 的摩尔体积、电子密度和电负性, p , q , r , a , μ 均为经验常数, 文献 [7] 中提供了上述所有参数的值。 x_i , x_j , x_k 分别是溶质 i , j 和溶剂 k 的摩尔分数, ε_i^i , ε_i^j , ε_i^k 是 i 与 i , j , k 的一阶相互作用系数, ρ_i^i , ρ_i^j , ρ_i^k 是 i 与 i , j , k 的二阶相互作用系数, γ_i^0 是组元 i 的零阶活度系数, γ_i 是组元 i 的活度系数。

不同温度(T)下各组元的活度系数(γ_i)计算结果如 图 1 所示。

由 图 1 可知, TC2 合金熔体中 Mn 元素的活度系数大于 1, 与理想溶液相比呈正偏差。而 Al 与 Ti 的活度系数小于 1, 与理想溶液相比呈负偏差。随着温度的升高, 合金元素之间相互束缚作用减弱, 溶液有向理想溶液过渡的趋势, 从而各组元的活度系数都逐渐向 1 趋近。

2.2. 合金熔体中组元的饱和蒸气压

TC2 合金熔体为三元合金体系, 组元 Ti、Al 和 Mn 的摩尔分数分别为 91.8%、6.9%和 1.3%。纯组元的饱和蒸气压分别用下列公式计算 [9]:

$$P_i^0 = 2302.6 \exp(A \cdot T^{-1} + B \cdot \lg T + C \cdot T + D) \quad (3)$$

式中: P_i^0 为纯组元 i 的饱和蒸气压, 单位 Pa; T 为熔体温度, 单位 K; A 、 B 、 C 、 D 为热力学常数, 可在文献 [9] 中查到。

TC2 合金中各元素的金属蒸气压常数如 表 1 所示。

将 表 1 中的数据代入式(3), 得出 TC2 合金各合金元素的饱和蒸气压公式如下:

$$P_{Ti}^0 = 2302.6 \exp(-23200 \cdot T^{-1} - 0.66 \cdot \lg T + 10.86)$$

$$P_{Al}^0 = 2302.6 \exp(-16380 \cdot T^{-1} - 1.0 \cdot \lg T + 11.4)$$

$$P_{Mn}^0 = 2302.6 \exp(-14520 \cdot T^{-1} - 3.02 \cdot \lg T + 18.36)$$

由以上各式计算得不同温度下纯组元 Ti、Al 和 Mn 的饱和蒸气压如 图 2 所示。把以上各式代入(1)式，可以计算出 TC2 熔体中各组元在不同熔体温度下的饱和蒸气压如 图 3 所示。

由 图 2 可以看出，随着温度的升高，Ti、Al 和 Mn 元素纯金属的饱和蒸气压均增大，且可以看出 Mn 元素的饱和蒸气压随着温度的升高上升的最快。而 图 3 可以看出，随着温度的升高，TC2 合金熔体中主组元的饱和蒸气压均增大，即熔体温度的升高促使组元挥发趋势增大。同等温度下，TC2 合金熔体中 Mn

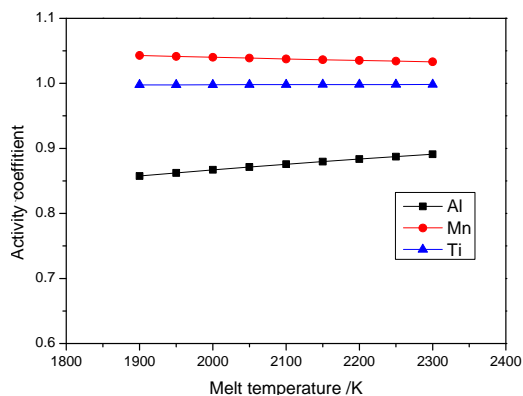


Figure 1. The relation of activity coefficient of each element and melt temperature in TC2 alloy

图 1. TC2 合金中各元素活度系数与熔体温度的关系

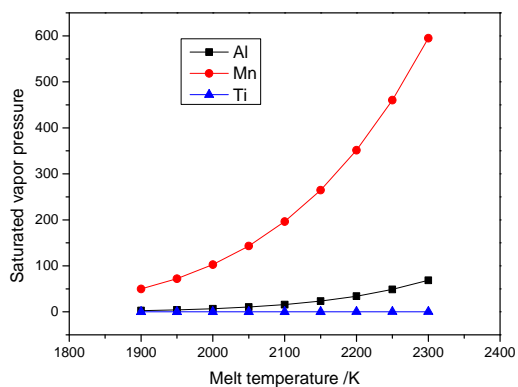


Figure 2. The relation of saturated vapor pressure and temperature for Ti, Al and Mn elements

图 2. Ti、Al 和 Mn 元素的饱和蒸气压与温度的关系

Table 1. Vapor pressure constant of elements in TC2 alloy
表 1. TC2 合金中各元素的金属蒸气压常数

Element	A	B	C	D	Temperature range/K
Ti	-23,200	-0.66	—	10.86	1943~3558
Al	-16,380	-1.0	—	11.4	933~2723
Mn	-14,520	-3.02	—	18.36	1517~2333

和 Al 元素的饱和蒸气压比 Ti 元素大很多, 说明在熔炼过程中, 挥发元素主要为 Mn 和 Al。由于 TC2 合金中 Ti 为基体元素, 因此, 如何控制 Mn、Al 元素成分均匀性是熔炼的关键。

2.3. 合金熔体中各组元的挥发损失

根据 Langmuir 理论, 当外压为 0 Pa 时, 合金元素 i 的自由挥发速率可用下面的公式 [6] 进行计算, 此方程也可以推广到外压小于 1.33 Pa 时。

$$J_i = 4.37 \times 10^{-4} \cdot P_i \cdot \sqrt{\frac{M_i}{T}} \quad (\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (4)$$

式中: J_i 为合金元素的蒸发损失速率 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$); P_i 为合金中组元 i 在温度 T 时的饱和蒸气压; M_i 是元素 i 的原子量 (g/mol); T 为绝对温度 (K)。

将(3)式代入(4)式得不同温度下 Ti、Al、Mn 的挥发速率如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 随着温度的升高, Ti、Al、Mn 的挥发速度不断增大, 这是由于随着温度的升高, 合金熔体中各元素的平衡分压增大使得各元素的挥发驱动力增大。熔池过热度超过 200°C 以后, 各组元的挥发有加速的趋势。在 TC2 合金熔炼温度范围内, Mn 元素的挥发损失约为 Al 元素挥发损失的 1.5 倍。

国内外很多学者通过实验得出了真空熔炼过程合金熔体中组元的挥发速率随真空室的压力(简称外压)的变化规律 [10] [11]。随着外压的提高, 从总体上看, 挥发损失速率是呈下降趋势。不过, 不同外压

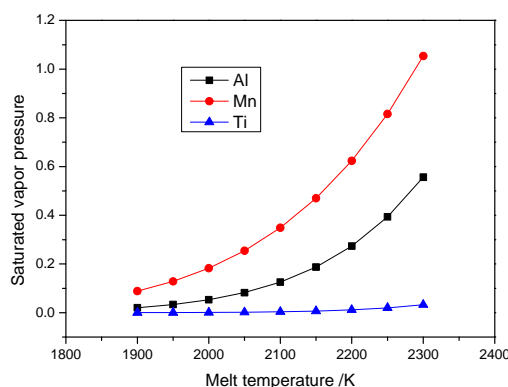


Figure 3. The relation of saturated vapor pressure and temperature in TC2 alloy melt

图 3. TC2 熔体中各组元的饱和蒸气压与温度的关系

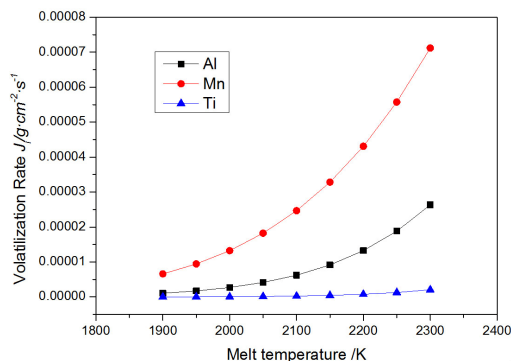


Figure 4. Relationship between volatilization rate of Ti, Al, Mn and the temperature

图 4. Ti、Al 和 Mn 的挥发速度与温度的关系

对挥发损失速率的影响是不一样的, 具体来说, 当外压小于 133.3 Pa (临界压力) 时, 外压对组元的挥发损失几乎没有影响, 元素可以自由挥发; 当外压大于 133.3 Pa 而小于 1333 Pa 时, 元素的挥发损失速率随外压的增大而减小, 到外压为 1333 Pa 时, 挥发损失速率几乎减少了一百倍; 随着外压的急剧增大, 挥发速率曲线趋于水平, 增大外压对减少元素的挥发损失没有多大意义。

在钛合金熔炼实践中, 合金的过热度一般都有一定的, 依靠降低温度来减少合金元素的挥发速率的作用意义不大。因此, 在实际中, 可以向真空室中充入一定量的惰性气体来减少元素的挥发损失, 从而达到控制成分的目的。

3. 成分均匀性控制

由于 TC2 合金中 Al、Mn 元素在真空熔炼中挥发损失较大, 此外, 根据结晶偏析经典理论 [12] 可知, 决定结晶偏析程度大小的溶质组元分布系数 K 越偏离 1, 偏析程度越大。在实际熔炼过程中 K 不是常数, 与结晶条件有关, 如过冷度、熔池形状、熔池温度、熔池深度等都会影响 K 值。

一些元素在钛合金中的分配系数列于表 2, 由表 2 可见 Al、Mn 元素的分配系数分别为 0.4、0.3, 可见有很大的结晶偏析倾向。因此, 对于 TC2 合金的真空熔炼其成分均匀性控制更加困难。

鉴于以上工程化技术中存在的问题, 本实验采取以下控制措施:

3.1. 原料及合金化方式

合金添加剂和海绵钛颗粒大小必须严格控制, 使二者的大小匹配, 这样有利于混料的均匀性。本实验选择了一定粒度优质海绵钛和适当尺寸的合金添加剂。

TC2 合金中 Al、Mn 元素的熔点分别为 660℃、1245℃, 其都与基体 Ti 的熔点差别较大。若这些元素以纯金属的形式加入, 易造成 Al、Mn 元素在进入熔区前即被熔化, 提前进入熔池而引起无规律的宏观偏析, 导致铸锭成分不均匀。

为了消除铸锭组织中出现的各组分的偏析, 确保其组分的均匀化, 中间合金的选择和制备是至关重要的, 根据钛合金中间合金选择的原则: 化学成分稳定、均匀, 熔点、密度、比热、熔化潜热要与钛相近。本实验 Al、Mn 组元采用二元中间合金的形式加入, 并且对海绵钛及中间合金进行特殊处理后压制电极。

3.2. 熔炼方式

由于 Al、Mn 的蒸汽压比 Ti 的蒸汽压高很多, 尤其是 Mn 元素, 在熔炼过程中挥发损失太多, 以至于较难控制。同时考虑生产实际的安全操作, 因此, 本实验一次熔炼在真空中进行, 为了使化学成分均匀, 有效降低合金元素挥发损失, 二次熔炼在惰性气体保护气氛中进行, 并适当增合金元素的配入量。

3.3. 工艺参数

从 VAR 熔炼特征来看, 合金组元偏析的因素与熔池深度有关, 而控制熔池深度最关键的参数为电极熔炼速度。熔池深度计算经验公式:

$$H = 5(1 - 0.25D) [1 - 0.0015(1 + 5D) \times (D/v)^2] v \quad (5)$$

Table 2. Partition coefficient of alloy components in titanium alloy
表 2. 钛合金中合金组元的分配系数 K 值

Element	V	Al	Fe	Mn	Sn	Cu	Si	Ni
K	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.05

式中：

H ——为熔池深度，mm；

D ——为铸锭直径，m；

v ——为液体金属加入速度，kg/s。

由上式可以看出：可通过控制熔炼速度，来达到控制金属液体凝固速率。

常规熔化工序是直接调整熔炼电流和电压来控制熔化速度，实际熔化速度凭经验控制。而本实验熔炼过程采用“恒熔速熔炼”。利用具备称重系统及自动控制系统的 10 吨真空自耗电弧炉，通过在线检测单位时间内熔化的合金重量，与设定目标值进行比较，再根据比较结果自动调整熔炼电流和电压以保证熔化速度与设定目标一致。除此之外，严格控制其它参数，如搅拌磁场，冷却强度、锭高比以及炉室压力等，使熔池形状尽量扁平，从而达到控制熔池深度及形状的目的。

4. 实验验证及结果分析

实验采用优质的海绵钛，在小型铸锭及中型铸锭生产实验的基础上，进行了工业化大型铸锭的生产研究。按照以上控制措施试制了经两次熔炼规格为 $\Phi 700$ mm 的 TC2 合金铸锭。

4.1. 一次锭化学成分分析

对所熔化的一次铸锭距铸锭底部每间隔 300 mm 取样分析铸锭轴向化学成分，结果如 图 5 所示。

由 图 5 可以看出一次铸锭表面 Al、Mn 含量均超出名义化学成分，且成分分布不均匀，Al 元素表层含量约为名义含量的 1.1~1.3 倍，Mn 元素表层含量约为名义含量的 6~14 倍，Al 元素各部位分析结果最大偏差为 0.6%，而 Mn 元素为 9%，说明一次铸锭化学成分均匀性较差，存在严重的偏析现象，这主要是由于 Al、Mn 元素的饱和蒸汽压较高，在真空熔炼过程中挥发，向铸锭表面富集所致。

对一次铸锭头部断面取样分析化学成分，结果如 图 6 所示。

由 图 6 可以看出，一次铸锭头部 Al 含量比名义成分略有增加，Mn 含量较铸锭配入量损失约 60%~70%，说明在 TC2 合金中，Mn 元素的挥发损失远大于 Al 元素的挥发损失。

4.2. 一次熔炼金属挥发物化学成分分析

对所熔化的一次铸锭表面挥发物进行取样分析，分析结果 Al 含量为 6.2%，Mn 含量为 36.2%，由此可见，经一次真空熔炼后，TC2 铸锭表面金属挥发物中 Al 含量约为配入量的 1.6 倍，Mn 含量约为配入量

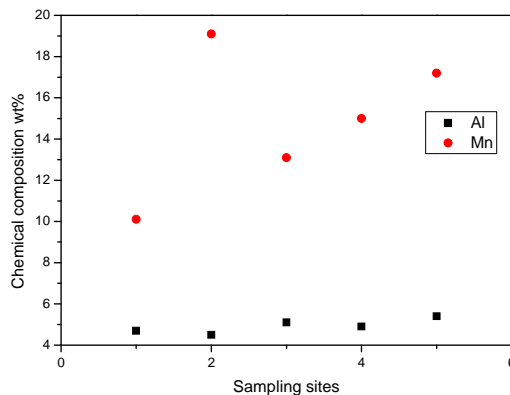


Figure 5. The axial chemical composition of the once ingot

图 5. 一次铸锭轴向化学成分

的 24 倍。由此可以看出，真空熔炼中，TC2 铸锭中的 Mn 大量富集在铸锭的表面及其金属挥发物中。

4.3. 成品锭化学成分分析

自耗电极经一次真空熔炼 + 二次惰性气体保护熔炼后得到成品铸锭，将其表面缺陷层去除，由铸锭底部至头部每间隔 300 mm 取样，头部断面进行 13 点取样，分别分析其 Al、Mn 含量，分析结果如 图 7、图 8

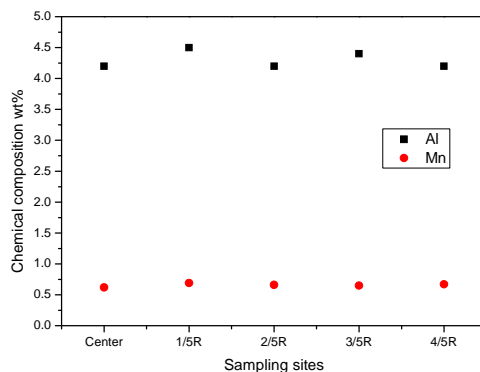


Figure 6. The section chemical composition of the once ingot

图 6. 一次铸锭断面化学成分

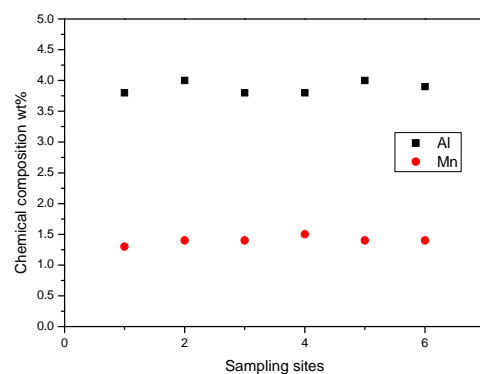


Figure 7. The chemical composition of the finished ingot surface

图 7. 成品铸锭表面的化学成分

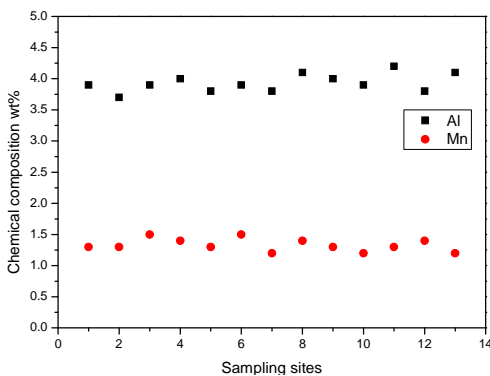


Figure 8. The chemical composition of head section for the finished ingot

图 8. 成品铸锭头部断面的化学成分

所示。

从图 7 和图 8 中可以看出, 经一次真空熔炼 + 二次惰性气体保护熔炼后得到的 TC2 铸锭, Al、Mn 元素的含量在铸锭表面和断面分布较均匀, 化学成分均能控制在标准范围之内, 铸锭中 Al 含量损失约为 1%~11%, Mn 含量的损失约为 3%~22%。Mn 元素挥发损失约为 Al 元素挥发损失的 2 倍, 考虑到二次惰性气体保护熔炼时, 其压力超过 1333 Pa, 合金元素挥发损失很小, 因此, 经真空+惰性气体保护熔炼后, 实际金属的挥发损失与理论计算结果差别不大。

5. 结论

- 1) TC2 铸锭中 Al、Mn 元素的饱和蒸汽压较高, 在真空熔炼过程中易挥发, 尤其是 Mn 元素, 向铸锭表面富集。经一次 VAR 熔炼后, 铸锭表层 Mn 含量约为名义含量的 6~14 倍。
- 2) TC2 合金在真空熔炼中, Mn 元素的挥发损失约为 Al 元素挥发损失的 2 倍。
- 3) 经一次真空熔炼后的金属挥发物中大量富集 Al、Mn 元素, Mn 含量约为配入量的 24 倍。
- 4) 经一次真空熔炼后, TC2 合金存在严重的宏观偏析现象, 经二次惰性气体保护熔炼可得到化学成分均匀的 TC2 合金铸锭。

参考文献 (References)

- [1] 《中国航空材料手册》编委会 (2002) 中国航空材料手册第 4 卷钛合金铜合金. 中国标准出版社, 北京, 562.
- [2] 朱宝辉, 胡晓晨, 吴孟海, 王培军, 刘彦昌 (2010) TC2 钛合金精锻棒的拉伸性能及断口形貌. *中国有色金属学报*, **1**, 144.
- [3] 羊玉兰, 佟文学, 李长江, 李玉霞, 王东, 刘世萍 (2003) TC2 钛合金管材工艺研究. *钛工业进展*, **4-5**, 66.
- [4] 《稀有金属材料加工手册》编写组 (1984) 稀有金属材料加工手册. 冶金工业出版社, 北京, 404.
- [5] 刘贵仲, 苏彦庆, 郭景杰 (2003) Ti-13Al-29Nb-2.5Mo 合金 ISM 熔炼过程. *稀有金属材料与工程*, **2**, 108-109.
- [6] 戴永年 (1998) 有色金属真空冶金. 冶金工业出版社, 北京.
- [7] 郭景杰, 苏彦庆 (1998) 钛合金 ISM 熔炼过程热力学和动力学分析. 哈尔滨工业大学出版社, 哈尔滨, 65-84.
- [8] 孔凡亚, 杨克努 (1991) 钛合金液表层中合金元素溶度分布研究. *金属学报*, **27B**, 361-363.
- [9] 梁英教, 车荫昌 (1993) 无机热力学数据手册. 东北大学出版社, 沈阳, 432-434.
- [10] 俞景禄, 魏季和 (1981) 冶金中的传热传质现象. 冶金工业出版社, 北京, 638-644.
- [11] 程荆卫, 郭景杰, 等 (1999) Ti-13Al-29Nb-2.5Mo ISM 熔炼过程中 Al 元素的挥发损失速率. *材料科学与工艺*, **7**, 124-128.
- [12] 周尧和, 胡壮麒, 介万奇 (1998) 凝固技术. 化学工业出版社, 北京, 56.