

电子束冷床炉熔炼 TC18 钛合金过程中元素挥发研究

杜彬^{1,2}, 曹寿林¹, 王龙^{1,2}, 马小艳¹, 王倩¹, 张炜华¹

(1. 青海聚能钛业股份有限公司, 青海 西宁 810007)

(2. 青海省钛及钛合金工程技术研究中心, 青海 西宁 810007)

摘要: 采用 BMO-25 型电子束冷床炉(EB 炉)熔炼 TC18 钛合金铸锭, 利用 Langmuir 定律建立了熔炼过程中各组元饱和蒸气压及挥发规律的数学模型, 并根据实测挥发率对 TC18 钛合金各组元的活度系数进行验证性分析。结果表明: 通过数学模型获得的活度系数及挥发率能够较好地匹配实际熔炼过程, 理论挥发率与实测挥发率吻合度较高。EB 炉熔炼 TC18 钛合金过程中, Al、Cr 元素挥发明显, 实测挥发率分别为 12.06% ~ 18.27% 和 30.77% ~ 37.16%。将 Al、Mo、Cr 补加率分别设为 15.6%、4.25%、30%, 并通过控制熔炼电流使熔炼速度稳定在 178 kg/h 左右, 由此所获得的 TC18 钛合金铸锭化学成分均匀性良好, 符合 GB/T 3620.1—2016 要求。

关键词: TC18 钛合金; 电子束冷床炉熔炼; 挥发率; 成分均匀性

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2022)02-001-06

Study on Elements Volatilization of TC18 Titanium Alloy during Electron Beam Cold Hearth Melting

Du Bin^{1,2}, Cao Shoulin¹, Wang Long^{1,2}, Ma Xiaoyan¹, Wang Qian¹, Zhang Weihua¹

(1. Qinghai Supower Titanium Co., Ltd., Xining 810007, China)

(2. Titanium and Titanium Alloys Engineering Research Center of Qinghai Province, Xining 810007, China)

Abstract: The TC18 titanium alloy ingots were prepared by BMO-25 electron beam cold hearth melting (EB). The mathematical model of vapor pressure and volatilization rule of each component during smelting process was established by Langmuir's law. And the activity coefficients of each component of TC18 titanium alloy were verified according to the measured volatilization rate. The results show that the activity coefficients and volatilization rate obtained by mathematical model can better match the actual smelting process, and the theoretical volatilization rate is in good agreement with the measured volatilization rate. The elements of Al and Cr volatilize obviously during the process of TC18 titanium alloy EB furnace smelting, the measured volatilization rates are 12.06% ~ 18.27% and 30.77% ~ 37.16%, respectively. The addition rates of Al, Mo and Cr are set to 15.6%, 4.25% and 30%, respectively, and the smelting speed is about 178 kg/h by controlling the smelting current. The chemical composition uniformity of the obtained TC18 titanium alloy ingot is good, which can meet the requirement of GB/T 3620.1—2016.

Key words: TC18 titanium alloy; electron beam cold hearth melting; volatilization rate; composition uniformity

TC18 钛合金名义成分为 Ti-5Al-4.75Mo-4.75V-1Cr-1Fe, 是一种高合金化的近 β 型钛合金。经退火处理后, TC18 钛合金具有较高的强度, 且淬透性良

好, 适用于制造飞机起落架等大型承力构件^[1,2]。

目前, 国内主要采用真空自耗电弧炉(VAR 炉)熔炼 TC18 钛合金铸锭, 存在工艺流程长、铸锭杂质含量高及宏观偏析严重等缺陷, 在实际应用中会严重影响发动机构件的疲劳强度和持久性能等。电子束冷床炉(EB 炉)熔炼技术具有铸锭脱气除杂效果好、成分均匀性高的优势^[3,4], 可有效避免 VAR 技

收稿日期: 2022-01-14

基金项目: 国家工业强基工程项目(TC150B5C0); 青海省重点研发与转化计划项目(2020-CX-105)

通信作者: 杜彬(1989—), 男, 高级工程师。

术的固有缺陷。美国航空发动机制造商曾要求,用于航空发动机旋转件的钛合金必须经过一次冷床炉熔炼,并将“冷床炉熔炼+VAR熔炼”作为标准的工业生产方法^[5]。

国内纯钛铸锭的EB炉熔炼已基本达到工业化水平,但成分复杂钛合金铸锭的EB炉熔炼目前仍处于研究的起步阶段。研究人员对TC4钛合金的EB炉熔炼技术进行了较多的研究,并取得了一定成果^[6,7]。岳旭等^[8]采用一次EB炉熔炼加一次VAR炉熔炼制备出大规格TC17钛合金铸锭,成分分析结果表明该铸锭具有较高的成分均匀性和洁净度。与TC4、TC17钛合金相比,TC18钛合金的成分更为复杂,熔炼过程控制难度大,目前鲜有关于EB炉熔炼TC18钛合金的报道。

本研究利用Langmuir定律建立元素挥发模型,并结合EB炉熔炼的实际运行状况,对TC18钛合金铸锭熔炼过程中元素的挥发规律进行研究,探索EB炉熔炼TC18钛合金铸锭的工艺路线。

1 元素挥发模型

在高温高真空环境下,液态金属会存在一定的挥发损失,挥发损失率与金属元素的饱和蒸气压密切相关^[9,10]。熔池表面金属元素的挥发行为服从Langmuir定律^[11]:

$$J_i = \alpha P_i^0 \gamma_i x_i S \sqrt{M_i / (2\pi RT)} \quad (1)$$

式中: J_i 为*i*组元的挥发速率,kg/s; α 为凝固系数,Langmuir证明一般金属的 $\alpha \approx 1$ ^[11]; P_i^0 为*i*组元的饱和蒸气压,Pa; γ_i 为*i*组元的活度系数; x_i 为*i*组元的摩尔分数,%; S 为熔体的表面积,m²; M_i 为*i*组元的摩尔质量,g/mol; T 为熔体温度,K; R 为气体常数,8.314 J/(mol·K)。

合金熔池中组元*i*的饱和蒸气压 P_i^0 可表示为:

$$P_i^0 = x_i \gamma_i P_i^0 \quad (2)$$

式中: P_i^0 为纯组元*i*的饱和蒸气压。根据文献[12,13]可知,各纯组元的饱和蒸气压可通过式(3)进行计算:

$$\lg P_i^0 = AT^{-1} + BlgT + CT + D \quad (3)$$

式中: A 、 B 、 C 、 D 为金属蒸气压常数,可以在相关文献中查到。

式(1)~(3)即为TC18钛合金EB炉熔炼过程中合金元素的挥发模型。该模型既可用于预测合金元素在真空熔炼过程中的挥发规律,设计或优化合金

熔炼方案;亦可用于验证铸锭中各组元的实际挥发损失,反向推算、验证合金在熔炼过程中,不同组分、温度及熔体表面积下的热力学参数。

活度系数是影响元素挥发速率的关键因素。在成分不同的铸锭中,同一合金元素的活度系数是不同的,其不仅与金属元素自身的化学性质密切相关,还会受到合金组分的影响,反映了合金元素在不同合金中化学活性的差异。大量研究表明,活度系数的获取方式主要有2种:一是通过理论模型计算获得,但目前也仅限于二元、三元合金的计算,对于多元合金尚未得到实际应用^[14,15];二是通过实验方法进行测定,但影响实验过程的因素过多,难以实现。因此,本研究根据EB炉熔炼TC18钛合金铸锭后各元素的实测挥发率,并结合熔炼工艺条件,对各元素在特定条件下的活度系数进行反向推算,再利用推算获得的活度系数验证所设计实验的挥发规律的准确性。

2 铸锭熔炼

实验材料选用海绵钛、Al-V55中间合金、Al-Mo70中间合金、Cr颗粒、Fe钉、Al豆等,混料后在80MN油压机上压制为150 mm×380 mm×580 mm的块体,单块质量为100 kg。

采用BMO-25型EB炉进行TC18钛合金铸锭熔炼。EB炉额定功率为1350 kW,图1为各电子束枪扫描区域示意图。其中,1[#]电子束枪电流为 I_M ,用于熔化物料;2[#]电子束枪电流为 I_R ,用于冷床内金属液的精炼;3[#]电子束枪电流为 I_S ,用于控制结晶器中金属液的温度,以使其保持较好的充型能力,有效控制结晶速度。

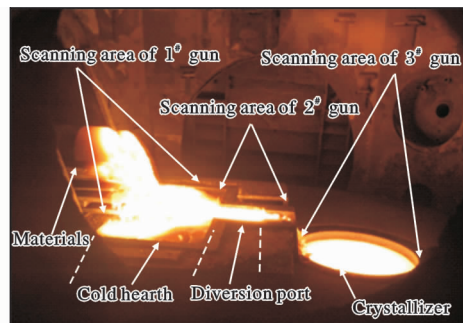


图1 EB炉各电子束枪扫描区域示意图

Fig. 1 Diagram of scanning areas of EB furnace electron guns

EB炉熔炼过程中涉及的工艺参数主要有配料比、熔炼电流、真空度、进料速度及拉锭速度等。

根据合金元素的挥发规律及熔炼经验^[12,16,17], 设计了4组 TC18 钛合金铸锭熔炼试验(编号依次为 No. 1 ~ No. 4), 具体工艺参数如表 1 所示。熔炼过程中, 冷床熔体面积为 600 mm × 400 mm, 结晶器熔体面积为 $\pi \times 190 \text{ mm} \times 190 \text{ mm}$, 炉内压力为 0.20 ~ 0.50 Pa。熔炼后得到规格为 $\phi 380 \text{ mm} \times L$ 的 TC18 钛合金铸

锭。铸锭经扒皮后, 沿轴向在头、中、尾部切取长条状试样, 采用德国 Eltra 公司的 ONH-2000 氧氮氢分析仪检测 O、N 含量; 在铸锭表面及横截面上取屑样, 经硫酸溶液(H_2SO_4 、 H_2O 体积比为 1:2)溶解后, 用美国 PE 公司的 ICP-7300V 电感耦合等离子体发射光谱仪分析 Al、V、Mo、Cr、Fe 等元素的含量。

表 1 EB 炉熔炼 TC18 钛合金铸锭的工艺参数

Table 1 Processing parameters of EB melting process for TC18 titanium alloy ingot

No.	Alloying element supplement/%					Current/A			Smelting speed /kg·h ⁻¹
	Al	Mo	V	Cr	Fe	I_M	I_R	I_S	
1	20	0	0	20	-5	8.5 ~ 9.0	3.5 ~ 4.0	2.0 ~ 2.5	195.5
2	16	10	5	30	0	9.0 ~ 9.5	3.8 ~ 4.2	2.4 ~ 2.8	178.5
3	24	5	0	35	0	8.5 ~ 9.0	3.5 ~ 4.0	2.0 ~ 2.5	191.2
4	15.6	4.25	0	30	-1.8	9.5 ± 0.2	3.8 ± 0.2	2.5 ± 0.2	178.1

3 结果与讨论

3.1 元素挥发规律分析

合金熔体中各组元的饱和蒸气压不同于纯金属的饱和蒸气压, 受到摩尔分数、活度系数的影响较为显著。一般而言, 钛合金中 Al、Sn、Cr 等属于易挥发元素, V、Fe、Zr、Mo 等属于难挥发元素。在成分复杂的合金中, 元素之间亲和力的差异会造成“易挥发-难挥发”元素的“联合挥发”问题, 即易挥发元素挥发的同时会带动难挥发元素的挥发。这种“易挥发-难挥发”元素联合挥发的现象不同于 VAR 熔炼, 是 EB 炉熔炼特有的规律, 与 EB 炉设备加热热源、真空环境等因素有关^[16]。

对 No. 1 ~ No. 4 试验所得 TC18 钛合金铸锭中各元素含量进行分析, 结果见表 2。测量时, 沿铸锭轴向不同横截面上 30 个点取样, 剔除差异性较大的测量值(异常值)后, 取平均值作为测量结果。

表 2 No. 1 ~ No. 4 试验所得 TC18 钛合金铸锭中各元素含量实测值(w/%)

Table 2 Measured value of elements mass fraction of TC18 titanium alloy ingot produced by No. 1 - No. 4 test

No.	Al	V	Mo	Cr	Fe
1	4.976	4.484	3.954	0.817	0.869
2	5.286	4.712	4.366	0.861	0.863
3	4.900	4.490	4.451	0.843	1.002
4	5.05	4.75	4.78	0.90	0.99

表 3 为根据铸锭中各元素含量实测值和配入值(表 1)计算得到的各元素的实测挥发率。以表 3 中 No. 4 试验结果为例, 对 EB 炉熔炼过程中, 各元素的挥发规律进行分析, 反向推算 TC18 钛合金熔体中各组元的活度系数。

表 3 No. 1 ~ No. 4 试验所得 TC18 钛合金铸锭中各元素的实测挥发率(%)

Table 3 Measured value of elements volatilization rate of TC18 titanium alloy ingot produced by No. 1 - No. 4 test

No.	Al	V	Mo	Cr	Fe
1	18.27	4.95	16.65	37.16	6.96
2	12.06	0.823	8.065	31.25	7.60
3	15.22	5.05	10.1	35.38	-1.8
4	12.63	0	3.43	30.77	-0.814

首先, 在对 TC4、Ti6242、Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn、Ti-25V-15Cr-0.2Si 等钛合金中各元素活度系数推算^[18-20]的基础上, 借用 Ti、Al、V、Mo、Cr、Fe 等元素的活度系数, 利用式(1)得到 TC18 钛合金各组元在 2000、2050 K 下的挥发速率。其中, 2000 K 对应结晶器中金属溶液温度, 2050 K 对应冷床中金属溶液温度。

由式(1)、(2)可得活度系数计算公式如下:

$$\gamma_i^2 = \frac{J_i/S}{\alpha x_i^2 P_i \sqrt{M_i/(2\pi RT)}} \quad (4)$$

在已知挥发速率的基础上, 利用式(4)计算出 TC18 钛合金中各组元在 2000、2050 K 下的活度系

数。根据文献[12, 18-21]可知, 钛合金中各组元在 1800~2200 K 范围内的活度系数基本呈线性分布, 故对其进行线性外推插值计算, 获得 TC18 钛合金各组元在 1800~2200 K 之间的活度系数, 如表 4 所示。

表 4 TC18 钛合金中各组元活度系数与温度的关系

Table 4 Relationship between activity coefficient and temperature of each component in TC18 titanium alloy

T/K	Ti	Al	V	Mo	Cr	Fe
1800	0.8797	0.0182	0.8472	0.8457	0.4461	0.8422
1850	0.8822	0.0226	0.8511	0.8491	0.4663	0.8455
1900	0.8847	0.0270	0.8550	0.8525	0.4865	0.8488
1950	0.8873	0.0314	0.8589	0.8559	0.5067	0.8521
2000	0.8898	0.0358	0.8628	0.8593	0.5269	0.8554
2050	0.8921	0.0402	0.8667	0.8627	0.5471	0.8587
2100	0.8944	0.0446	0.8706	0.8661	0.5673	0.8620
2150	0.8965	0.049	0.8745	0.8695	0.5875	0.8653
2200	0.8985	0.0534	0.8784	0.8729	0.6077	0.8686

利用推算得到的活度系数(表 4), 结合各组元热力学参数、挥发模型及 BMO-25 型 EB 炉运行参数(熔炼温度、熔池面积等), 通过式(1)计算得到 TC18 钛合金熔体中各组元的饱和蒸气压, 如图 2 所示。从图 2 可以看出, 在 2000~2200 K 范围内, 各组元饱和蒸气压由大到小为 Al、Cr、Ti、Fe、V、Mo。由此可见, 熔炼过程中 Al、Cr 元素的挥发速率高于 Ti 基体, Fe、V、Mo 元素的挥发速率低于 Ti 基体。因此, 在 TC18 钛合金 EB 炉熔炼过程中, 需重点关注 Al、Cr 元素的挥发规律, 同时对难挥发元素 Fe、V、Mo 的含量变化进行分析。

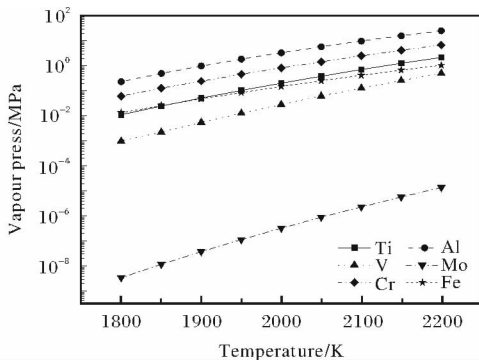


图 2 TC18 钛合金熔体中各组元饱和蒸气压和温度的关系
Fig. 2 Relationship between vapor pressure and temperature of each component in TC18 titanium alloy melt

在已知各组元不同温度下饱和蒸气压的基础上, 利用式(1)计算不同温度下 TC18 钛合金中各组元的挥发速率, 结果如图 3 所示。在 No. 4 试验条件下, 通过图 3 获得 TC18 钛合金 EB 炉熔炼过程中, 冷床熔体和结晶器熔体表面 Al、Cr 元素的挥发速率, 如表 5 所示。

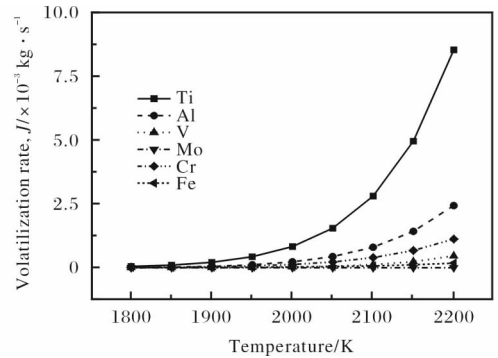


图 3 TC18 钛合金熔体中各组元挥发速率和温度的关系
Fig. 3 Relationship between volatilization rate and temperature of each component in TC18 titanium alloy melt

表 5 冷床和结晶器内 Al、Cr 元素的挥发速率

Table 5 Volatilization rate of Al, Cr elements in cold hearth and crystallizer ($\times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)

Liquid region	Al	Cr
Cold hearth (2050 K)	0.123 80	0.063 68
Crystallizer (2000 K)	0.064 34	0.035 27

3.2 熔炼挥发验证分析

由挥发模型可知, 在活度系数、饱和蒸气压等热力学参数确定的情况下, 合金元素的挥发主要受熔体中该元素摩尔分数、熔体表面积及熔炼温度等影响。No. 1~No. 4 试验中, 不同配料比值下各元素的摩尔分数相差不大(最大不超过 0.007), 熔体表面积恒定, 熔炼温度亦无较大变化, 故理论挥发率的推算均采用表 5 中所列数据。表 6 为 TC18 钛合金 EB 炉熔炼过程中 Al、Cr 元素的理论挥发率和实测挥发率。从表 6 可以看出, No. 1 试验中 Al、Cr 元素的实测挥发率与理论挥发率相差较大。另外, 化学成分检测结果显示, No. 1 铸锭中 Mo 元素大量流失。分析原因可能是原材料备料过程中, 压制的钛块不够密实, 造成合金元素撒漏(Cr、Al-Mo 中间合金均为粒度 $\leq 6 \text{ mm}$ 的颗粒)。No. 3 试验结果略优于 No. 1, 但仍不符合预期, 主要是因为 No. 3 试验中 Al、Cr 等元素含量的配入值较高, 而相应的熔炼速度

表6 TC18 钛合金 EB 炉熔炼过程中 Al、Cr 元素的理论挥发率和实测挥发率

Table 6 Theoretical volatilization rate and measured volatilization rate of Al, Cr elements during EB melting of TC18 titanium alloy

Test	Theoretical volatilization rate/%		Measured volatilization rate/%		Deviation/%		Composition uniformity
	Al	Cr	Al	Cr	Al	Cr	
1	11.34	29.59	18.27	37.16	6.93	7.57	Poor
2	12.87	29.91	12.06	31.25	-0.81	1.34	Excellent
3	11.24	31.89	15.22	35.38	3.98	3.49	Good
4	12.95	30.00	12.63	30.77	-0.32	0.77	Optimal

又较慢(电流设定值较低),导致挥发率存在较大差异。No. 2 和 No. 4 试验中, Al、Cr 元素的实测挥发率与理论挥发率吻合度较高,说明通过该数学模型获得的活度系数及挥发率,能够较好地匹配实际熔炼过程。

对 No. 2 和 No. 4 试验获得的 TC18 钛合金铸锭进行化学成分分析,结果如图 4 所示。由图 4 可以看出, No. 4 铸锭中各元素的轴向均匀性均优于 No. 2 铸锭。No. 2 铸锭中 V、Mo 元素含量的标准差分别为 0.324%、0.189%, No. 4 铸锭中 V、Mo 元素含量的标准差仅为 0.090%、0.053%。

以上结果表明, No. 4 试验工艺参数最佳,所得铸锭成分均匀性最优。在 No. 4 铸锭头、中、尾不同

部位取样,分析杂质元素含量,结果见表 7。从表 7 可以看出,采用 EB 炉熔炼的 TC18 钛合金铸锭,其杂质元素含量均较低,明显优于 VAR 炉熔炼。可见,采用 BMO-25 型 EB 熔炼 TC18 钛合金铸锭过程中,按 No. 4 试验方案将 Al、Mo、Cr 补加率分别设为 15.6%、4.25%、30%,并通过控制熔炼电流使熔炼速度稳定在 178 kg/h 左右,由此所获得的铸锭化学成分均匀性良好,符合 GB/T 3620.1—2016 要求。

表7 No. 4 试验所得的 TC18 钛合金铸锭中杂质元素含量(w%)

Table 7 Content of impurity elements of TC18 titanium alloy ingot by No. 4 test

Sample point	O	N	C	H	Si	Zr
1	0.059	0.006	0.046	<0.0006	0.017	<0.01
2	0.062	0.009	0.059	<0.0006	0.015	<0.01
3	0.054	0.007	0.038	<0.0006	0.018	<0.01
4	0.074	0.008	0.052	<0.0006	0.013	<0.01

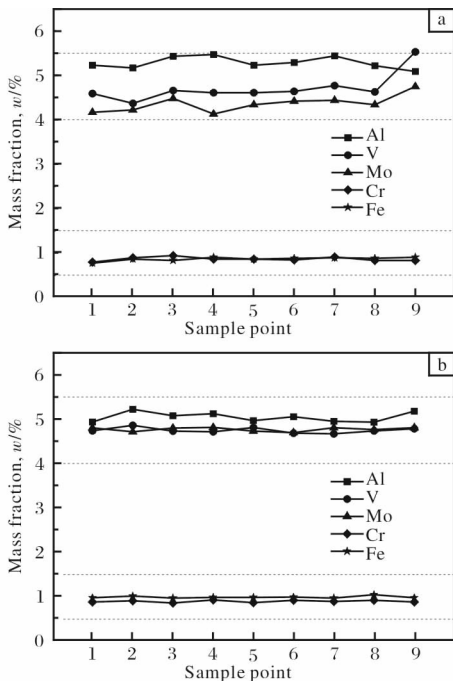


图4 TC18 钛合金铸锭轴向的化学成分分布

Fig. 4 Axial direction distribution of chemical composition of TC18 titanium alloy ingot; (a) No. 2 test; (b) No. 4 test

4 结 论

(1) 采用 EB 炉熔炼 TC18 钛合金铸锭过程中, Al、Cr 元素挥发损失明显,实测挥发率分别为 12.06% ~ 18.27% 和 30.77% ~ 37.16%。

(2) 采用 Langmuir 定律建立 EB 炉熔炼 TC18 钛合金过程中各组元挥发规律的数学模型,通过该数学模型所获得的活度系数及挥发率能够较好地匹配实际熔炼过程,理论挥发率与实测挥发率吻合度较高。

(3) EB 炉熔炼 TC18 钛合金铸锭过程中,将 Al、Mo、Cr 补加率分别设为 15.6%、4.25%、30%,并通过控制熔炼电流使熔炼速度稳定在 178 kg/h 左右,可获得成分均匀的铸锭。

参考文献 References

- [1] 卢凯凯, 段启辉, 王成长. TC18 钛合金大规格棒材生产工艺概述[J]. 世界有色金属, 2016(16): 63-64.
- [2] 郑超, 胡生双, 李斌博, 等. 去应力退火对 TC18 和 TC21 钛合金吸氢含量的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(6): 80-83.
- [3] 朱知寿. 新型航空高性能钛合金材料技术研究与发展[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
- [4] 李育贤, 杨丽春. 3150KWB BMO-01 型大功率电子束冷床熔炼 TC4 钛合金[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2017(3): 58-61.
- [5] Vutova K, Mladenov G. Computer simulation of the heat transfer during electron beam melting and refining[J]. Vacuum, 1999, 53(1): 87-91.
- [6] 杜彬, 唐增辉, 韵海鹰, 等. 电子束冷床炉制备的 TC4 合金直轧工艺性能研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(23): 34-37.
- [7] 刘千里, 李向明, 蒋业华, 等. 工艺条件对大规格 TC4 扁锭连铸过程固液界面的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(8): 1641-1648.
- [8] 岳旭, 杨国庆, 李渭清, 等. 熔炼方式对 TC17 钛合金铸锭化学成分及棒材组织均匀性的影响研究[J]. 钛工业进展, 2016, 33(5): 11-15.
- [9] 毛小南, 罗雷, 于兰兰, 等. 电子束冷床熔炼工艺参数对 TC4 钛合金 Al 元素挥发的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 419-424.
- [10] 罗雷. TC4 钛合金电子束冷床熔炼技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- [11] 雷文光, 毛小南, 于兰兰, 等. TC4 钛合金电子束冷床熔炼过程中 Al 元素挥发损失的数学模型[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(11): 1048-1051.
- [12] 罗雷, 于兰兰, 雷文光, 等. 电子束冷床熔炼 TC4 合金元素挥发机制研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(4): 625-629.
- [13] 刘贵仲, 苏彦庆, 郭景杰, 等. Ti-13Al-29Nb-2.5Mo 合金 ISM 熔炼过程中多组元挥发损失[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(2): 108-112.
- [14] 张永伟. TC4 组元挥发机制及配料参数的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- [15] 曹瑞, 吕华江, 张晋, 等. 钛合金 VAR 熔炼过程中 Al 元素烧损差异分析[J]. 钛工业进展, 2021, 38(5): 1-5.
- [16] 杜彬, 张志斌, 曹寿林, 等. 多组元钛合金电子束冷床熔炼挥发规律研究[J]. 钛工业进展, 2021, 38(1): 13-19.
- [17] 杜彬, 张志斌, 雷云清, 等. 电子束冷床炉熔炼 TA15 钛合金的工艺技术[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(11): 2706-2713.
- [18] 杜彬, 张志斌, 辛社伟, 等. Ti6242 钛合金电子束冷床熔炼(EB)技术[J]. 金属功能材料, 2020, 27(4): 10-15.
- [19] 苏彦庆, 郭景杰, 刘源, 等. Ti-15-3 合金真空感应凝壳熔炼(ISM)过程研究[J]. 特种铸造及有色合金, 1999(6): 1-5.
- [20] 朱艳, 杨延清. 钛合金及金属间化合物中各组分的活度系数[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(8): 600-603.
- [21] 蒋光锐, 刘源, 李言祥, 等. 多元合金熔体组元活度系数计算方法的改进[J]. 金属学报, 2007, 43(5): 503-508.

行业动态

宝钛集团主导制定的首个钛领域国际标准正式发布

2022年4月,由中国牵头、宝钛集团主导制定的ISO 23515《钛及钛合金命名系统》正式发布。这是我国在钛领域国际标准化工作中的一次历史性重大突破,填补了国际钛牌号命名规则及各牌号化学组分范围要求的空白。

据介绍,ISO 23515是围绕钛及钛合金加工材牌号和化学成分建立的专用基础标准,首次在国际范围内统一了钛牌号命名规则及各牌号化学组分的范围要求,并将我国钛牌号命名方式和相关要求有机融入国际标准体系,是未来全面推广中国钛走出国门、建立系列化钛加工材料标准的基础,也是宝钛集团代表中国从项目立项论证、申报、研制、报批等全程主导制定的第一项钛领域国际标准。

来源: 陕西科技报