

# VAR 熔炼纯锆铸锭表面质量控制研究

杨 健<sup>1</sup>, 曹江海<sup>2</sup>, 侯秦龙<sup>2</sup>, 秦羽满<sup>1</sup>, 闫 昭<sup>1</sup>, 李 维<sup>1</sup>

(1. 西部钛业有限责任公司, 陕西 西安 710201)

(2. 西部金属材料股份有限公司, 陕西 西安 710201)

**摘要:** 以实际生产中遇到的纯锆铸锭表面夹层、结疤及冷隔缺陷为出发点, 通过数值模拟和工业生产实验相结合的研究方法, 确定了较佳的纯锆铸锭真空自耗电弧熔炼(VAR)工艺, 明显改善了铸锭的表面质量。研究发现: 各熔炼参数主要通过影响熔池形状和坩埚壁附近的熔体温度对铸锭表面质量产生影响; 增大熔炼电流可以同时改善熔池到边情况和增加坩埚壁附近熔体的温度; 增大稳弧电流和稳弧周期可以促进高温熔体向坩埚壁的运动, 使熔池更加饱满, 从而提高纯锆铸锭的表面质量。

**关键词:** 表面质量; 真空自耗电弧熔炼; 数值模拟; 纯锆铸锭

中图分类号: TG146.4<sup>+</sup>14

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2023)03-033-06

DOI:10.13567/j.cnki.issn1009-9964.2023.03.005

## Research on Surface Quality Control of Pure Zirconium Ingot Melted by VAR

Yang Jian<sup>1</sup>, Cao Jianghai<sup>2</sup>, Hou Qinlong<sup>2</sup>, Qin Yuman<sup>1</sup>, Yan Zhao<sup>1</sup>, Li Wei<sup>1</sup>

(1. Western Titanium Technologies Co., Ltd., Xi'an 710201, China)

(2. Western Metal Materials Co., Ltd., Xi'an 710201, China)

**Abstract:** Based on the defects of surface lamination, scarring and cold separation of pure zirconium ingots encountered in actual production, the optimal vacuum arc remelting (VAR) process of pure zirconium ingot was determined by combining numerical simulation and industrial production experiments, which significantly improved the surface quality of ingots. It is found that the melting parameters mainly affect the surface quality of ingot by influencing the shape of melting pool and melt temperature near the crucible wall; the increase of melting current can improve the situation of molten pool to the edge and increase the temperature of melt near the crucible wall; the increase of coil's current and period can promote the movement of high-temperature melt to the crucible wall, making the molten pool fuller, thereby improving the surface quality of the pure zirconium ingot.

**Key words:** surface quality; vacuum arc remelting; numerical simulation; pure zirconium ingot

锆是一种高活性金属, 在熔炼温度下可与许多元素发生化学反应。因此, 锆及锆合金的熔炼必须在真空中或惰性气氛保护下进行。在真空熔炼过程中, 可同时除去一些杂质, 提高锆铸锭的纯度。真空自耗电弧熔炼(vacuum arc remelting, VAR)是目前应用较为广泛和成熟的一种制备优质高温合金、钛及钛合金、锆及锆合金铸锭的工业熔炼方法<sup>[1-5]</sup>。

其特点是可以制取锭形和低倍组织符合要求的铸锭, 具有良好的组织和成分均匀性, 而且功率消耗低、熔化速率快。

实际生产中, 通过 VAR 熔炼得到的纯锆一次锭表面会出现夹层、结疤及冷隔缺陷, 如图 1a 所示。由于目前生产过程中对一次锭不进行扒皮操作, 这些表面缺陷易在后续二次锭熔炼时脱落, 进入二次锭内部, 从而对铸锭质量产生重要影响。此外, 生产过程中发现, 表面易产生缺陷的地方与自耗电极块位置具有对应关系, 自耗电极与坩埚间距较大的部位易产生表面缺陷, 如图 1b 所示。文献表明, VAR

收稿日期: 2023-01-28

基金项目: 秦创原引用高层次创新创业人才项目(QCYRCXM-2022-179)

通信作者: 曹江海(1994—), 男, 工程师。

生产的铸锭表面质量与坩埚比、熔炼电压、熔炼电流、稳弧电流及稳弧周期密切相关<sup>[6-7]</sup>。已有学者针对钛合金表面质量与熔炼参数间的关系进行了大量研究<sup>[8-9]</sup>，但鲜有针对纯锆铸锭表面质量的研究。

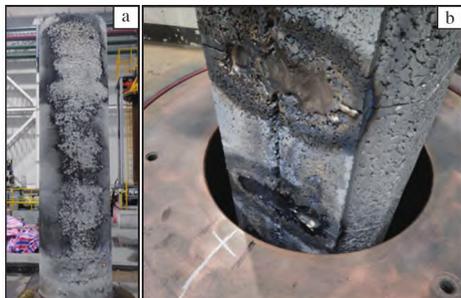


图1 纯锆一次铸锭表面缺陷及相应的自耗电电极

Fig. 1 Surface defects of pure zirconium primary ingot (a) and corresponding consumable electrode (b)

熔炼参数主要通过改变熔炼过程中的熔池形状和熔体温度对铸锭表面质量产生影响<sup>[10]</sup>。一般而言，与坩埚接触的熔体温度越高，熔池越饱满，铸锭表面质量越好。本研究首先通过 MeltFlow 软件模拟熔炼参数(熔炼电流、稳弧电流及稳弧周期)对熔池形状及熔体温度的单因素影响，然后通过工业生产实验进行组合验证，从而探索适合工业生产的纯锆铸锭熔炼工艺。

## 1 实验

### 1.1 基于 MeltFlow 的 VAR 熔炼过程数值模拟

MeltFlow-VAR 软件能够实现真空自耗电弧熔炼工艺的数字化仿真，快速、精确地模拟工艺全过程并优化工艺参数。由于 MeltFlow-VAR 软件只能计算固液相线温差大于 15 °C 以上的合金的熔炼过程，因此以熔炼直径 640 mm，名义成分为 Zr-1.05Nb-0.0285Fe-0.135O 的锆合金(物性参数如表 1 所示)为例，采用 MeltFlow-VAR 软件建立模型，从而研究 VAR 熔炼过程中熔池形貌及温度场的变化情况。由于建模过程中边界条件的输入是根据实际生产情况确定的，故模拟得到的结果可以有效反映 VAR 生产过程中熔池形貌及温度场，从而为纯锆铸锭的生产提供指导。

VAR 熔炼过程中温度场的计算涉及电极熔化、电弧辐射以及铸锭凝固等一系列问题，熔炼过程中存在传导、对流和辐射等各种热量传递方式<sup>[11]</sup>。图 2 给出了 MeltFlow-VAR 熔炼非稳态行为分析的模拟

表 1 Zr-1.05Nb-0.0285Fe-0.135O 合金的物性参数

Table 1 Physical properties of Zr-1.05Nb-0.0285Fe-0.135O alloy

Parameter	Value
Liquid density/kg·m <sup>-3</sup>	5840
Solid density/kg·m <sup>-3</sup>	6240
Volume expansion coefficient/K <sup>-1</sup>	6.44 × 10 <sup>-5</sup>
Solidus temperature/K	2053
Liquidus temperature/K	2108
Latent heat/J·kg <sup>-1</sup>	3.2 × 10 <sup>5</sup>
Electrical conductivity/S·m <sup>-1</sup>	11.0 × 10 <sup>5</sup>

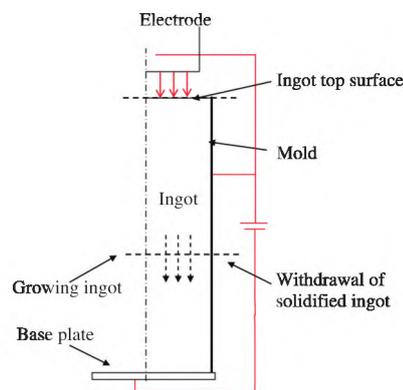


图 2 VAR 熔炼非稳态行为分析的模拟区域图

Fig. 2 Diagram of computational domain analysis for unsteady behavior of VAR process

区域。模拟过程中，建立轴对称数学模型并采用有限体积法进行计算。此模型考虑了整个熔炼过程中铸锭的连续上升行为，并通过求解能量控制方程获得从熔池健全到熔池上升整个阶段的温度场分布。

### 1.2 VAR 熔炼纯锆铸锭

利用 MeltFlow-VAR 软件模拟得到的各熔炼参数对 Zr-1.05Nb-0.0285Fe-0.135O 合金铸锭表面质量影响的定性结果，结合以往生产经验制定了表 2 所示 3 组纯锆铸锭熔炼工艺，并进行工业生产实验，熔炼结束后观察铸锭的表面质量。

表 2 纯锆铸锭工业生产实验熔炼参数

Table 2 Melting parameters for industrial production of pure zirconium ingot

No.	Current /kA	Voltage /V	Coil's current /A	Coil's period /s
1 <sup>#</sup>	28→25→22	35→37	25→22	50
2 <sup>#</sup>	25→22	35	15	20
3 <sup>#</sup>	24	35→36	25	50

## 2 结果与讨论

### 2.1 现行工艺下的熔池形状及温度变化

现行的纯锆铸锭生产工艺为: 熔炼电流 16 kA, 电压 35 V, 稳弧电流 15 A, 稳弧周期 30 s。图 3 为通过 MeltFlow-VAR 软件模拟得到的 Zr-1.05Nb-0.0285Fe-0.135O 合金铸锭凝固过程中液相分数为 0.9 和 0.1 时的等值线图, 即熔池形状。液相分数大于 0.9 的区域可认为是纯液相, 液相分数小于 0.1 的区域为纯固相, 液相分数 0.1~0.9 之间的区域为固液两相区。从图 3 可以看出, 从熔炼开始到结束熔池形状由“扁平状”逐渐过渡为“漏斗状”, 且熔池深度逐渐增加。图 3a 中靠近坩埚壁的轮廓有向里凸的现象, 表明靠近坩埚壁的区域熔池到边情况不佳。

图 4 为铸锭熔炼过程中不同时刻的温度场云图。熔炼过程中, 铸锭上部不断接收自耗电极掉落的液滴, 其温度始终保持在 2100 °C 左右, 而铸锭下部与坩埚底接触, 温度较低, 所以熔炼前期会形成定向

凝固。此外, 不同熔炼时刻高温液相熔体与坩埚壁的接触长度不同, 即不同熔炼时刻坩埚壁附近熔体的过热度不同。坩埚壁附近熔体过热度较高时, 可以将喷溅或熔池中搅拌到坩埚壁且已凝固的飞边重新熔化, 从而保证铸锭的表面质量。

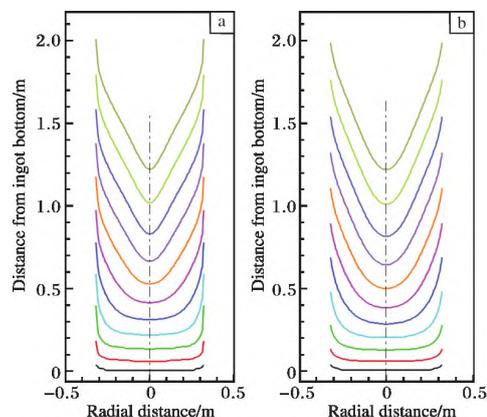


图 3 铸锭凝固过程中不同液相分数的等值线图  
Fig. 3 Isograms of ingot at different liquid fraction during solidification: (a) 0.9; (b) 0.1

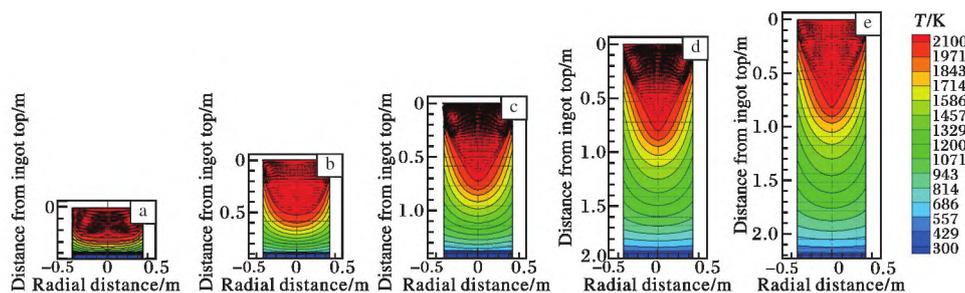


图 4 铸锭熔炼过程中不同时刻的温度场云图

Fig. 4 Contours of temperature field at different time during ingot melting: (a) 54 min; (b) 110 min; (c) 168 min; (d) 224 min; (e) 252 min

上述分析表明, 现行生产工艺下熔池到边情况不佳, 导致铸锭表面出现夹层、结疤及冷隔缺陷。为此, 分别探讨各熔炼参数对 VAR 熔炼过程中熔池形状及温度的影响。

### 2.2 熔炼电流对熔池形状及温度的影响

图 5 为不同熔炼电流 (16、18、20 kA) 下 Zr-1.05Nb-0.0285Fe-0.135O 合金铸锭凝固过程中液相分数为 0.9 时的等值线图。从图 5 可以看出, 随着熔炼电流的增大, 熔池深度明显增加。熔池深度增加有利于原料中气体的排出, 但不利于控制元素偏析。

图 6 为不同熔炼电流下铸锭凝固过程 (凝固时间 150 min) 的温度场云图。当熔炼电流为 16 kA 时高温液相熔体与坩埚壁的接触长度约为 0.2 m, 熔炼

电流为 18 kA 时接触长度约为 0.25 m, 熔炼电流为 20 kA 时接触长度约为 0.30 m, 即随着熔炼电流的增加, 高温液相熔体与坩埚壁的接触长度逐渐增加。

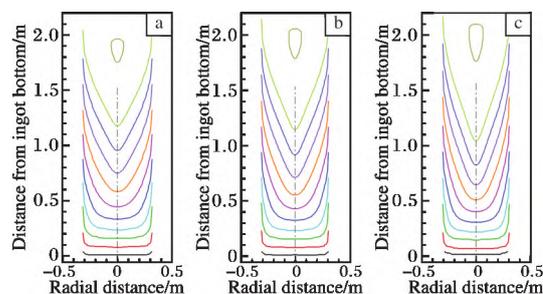


图 5 不同熔炼电流下铸锭液相分数为 0.9 时的等值线图  
Fig. 5 Isograms of ingot at liquid fraction of 0.9 under different melting currents: (a) 16 kA; (b) 18 kA; (c) 20 kA

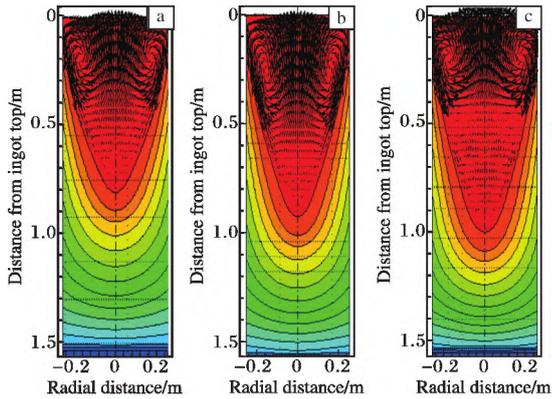


图6 不同熔炼电流下铸锭的温度场云图

Fig. 6 Contours of temperature field of ingot at different smelting currents: (a) 16 kA; (b) 18 kA; (c) 20 kA

以上分析表明, 熔炼电流大小是影响铸锭表面质量的关键因素之一。在一次锭熔炼过程中增大熔炼电流有利于熔池到边, 从而改善铸锭表面质量。同时, 熔炼电流增大还有利于气体的排出。因此, 在实际一次锭熔炼过程中应尽可能采用大熔炼电流。

### 2.3 稳弧电流对熔池形状及温度的影响

图7为不同稳弧电流(20、25、30 A)下液相分数为0.9时的等值线图。从图7可以看出, 稳弧电流对熔池深度的影响不大, 但对熔池的饱满程度有明显影响。当稳弧电流增加时, 熔池宽度增加。合适的稳弧电流既可以细化晶粒, 减轻结晶偏析程度, 也可以增加熔池饱满程度, 从而改善铸锭表面及内部质量。

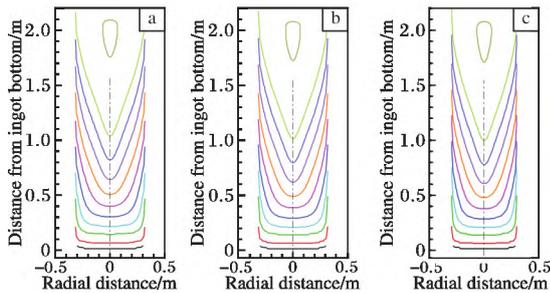


图7 不同稳弧电流下铸锭液相分数为0.9时的等值线图

Fig. 7 Isograms of ingot at liquid fraction of 0.9 under different coil's currents: (a) 20 A; (b) 25 A; (c) 30 A

图8为不同稳弧电流下铸锭凝固过程(凝固时间150 min)的温度场云图。当稳弧电流为20 A时, 高温液相熔体与坩埚壁的接触长度约为0.28 m, 熔炼电流为25 A时的接触长度约为0.30 m, 熔炼电流为30 A时的接触长度约为0.32 m, 即稳弧电流增大也会促使高温液相熔体与坩埚壁的接触长度增加。

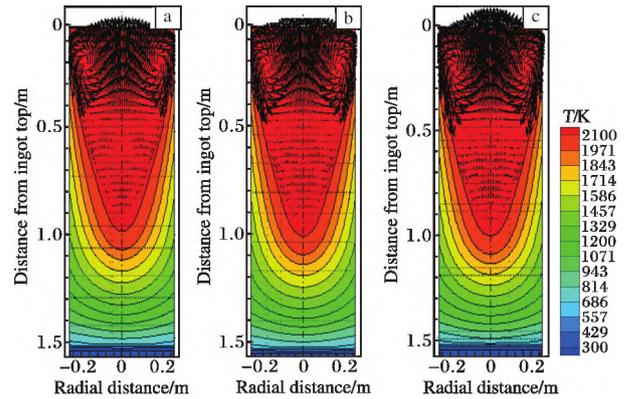


图8 不同稳弧电流下铸锭的温度场云图

Fig. 8 Contours of temperature field of ingot at different coil's currents: (a) 20 A; (b) 25 A; (c) 30 A

图8中黑色箭头表示熔体的流动方向以及速率的大小(箭头越密集, 熔体流动速率越大)。从图8可以看出, 稳弧电流会不断促进坩埚壁附近的熔体产生回路流动, 左侧熔体逆时针流动, 右侧熔体顺时针流动, 而熔池表面的液相会向坩埚壁附近流动, 且稳弧电流越大, 流动越强烈。因此, 增大稳弧电流会促进高温熔体向坩埚壁的运动, 改善熔池到边情况; 但稳弧电流过大会加剧熔池运动, 容易产生飞溅。

### 2.4 稳弧周期对熔池形状及温度的影响

稳弧周期会直接影响液相熔池的搅拌情况: 稳弧周期太小, 搅拌不充分; 稳弧周期太大, 容易造成熔池晃动<sup>[12-13]</sup>。图9为不同稳弧周期(10、30、50 s)下铸锭凝固过程中液相分数为0.9时的等值线图。当稳弧周期为10 s时, 熔池形状较为狭长; 稳弧周期为30 s时, 熔池宽度增加; 稳弧周期为50 s时, 熔池宽度进一步增加且熔池更为饱满。由此可见, 稳弧周期的增加有助于拓宽熔池宽度, 使熔池变得更加饱满。

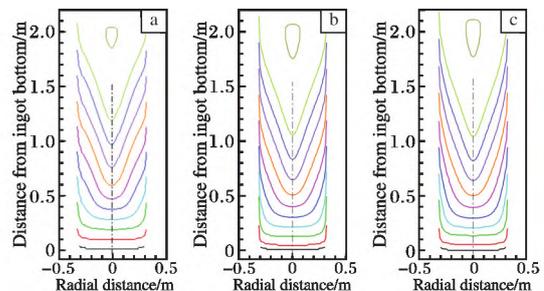


图9 不同稳弧周期下铸锭液相分数为0.9时的等值线图

Fig. 9 Isograms of ingot at liquid fraction of 0.9 under different coil's periods: (a) 10 s; (b) 30 s; (c) 50 s

图 10 为稳弧周期为 10、30、50 s 时铸锭凝固过程(凝固时间 150 min)的温度场云图。当凝固时间为 150 min 时,不同周期下高温液相熔体与坩埚壁的接触长度均约为 0.20 m,即稳弧周期的增加不会显著增大高温熔体与坩埚壁的接触长度。但增大稳弧周期会增加高温熔体的体积和熔体的流动强度。可见,稳弧周期增加也有利于熔池到边,但与稳弧电流类似,稳弧周期太大也会加剧熔池运动,易造成熔池飞溅。

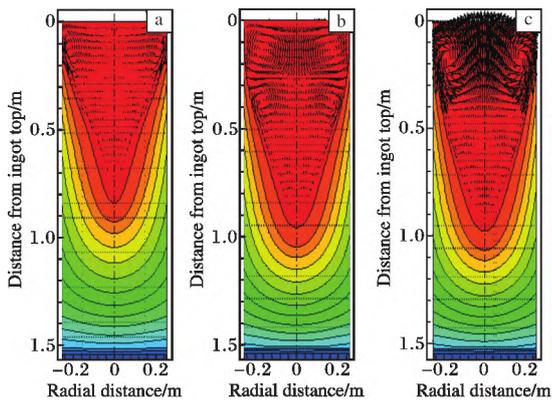


图 10 不同稳弧周期下铸锭的温度场云图

Fig. 10 Contours of temperature field of ingot at different coil's periods: (a) 10 s; (b) 30 s; (c) 50 s

综合上述单因素影响结果发现,熔炼电流是影响铸锭表面质量的关键因素,稳弧电流和稳弧周期也会在一定程度上对铸锭表面质量产生影响。以上述模拟结果为依据,并结合生产数据,设计了 3 种熔炼工艺以进行进一步的工业生产实验。

### 3 工业生产实验

采用表 2 所示熔炼参数进行纯锆铸锭的工业生产实验。1#工艺最初设定的熔炼电流为 28 kA,但熔炼过程中发现在此电流下熔炼时自耗电容易短路(将电压升高至 37 V 仍会发生短路),需要人为不断抬高电极,在熔炼曲线上表现为电压剧烈波动,见图 11a。这主要是因为熔炼电流越大,单位时间内进入熔池内部的熔滴数量越多,熔滴甚至会以“滴液成线”的方式进入熔池,从而造成短路。为了保证生产的顺利进行,尝试将电流降为 25 kA,但仍然会出现短路情况,将电流继续降低至 22 kA 时再未出现短路情况。分析熔炼电流为 28 kA 和 25 kA 时容易出现短路的情况,认为可能是熔池搅拌太强所导致,所以在此基础上制定了 2#熔炼工艺。

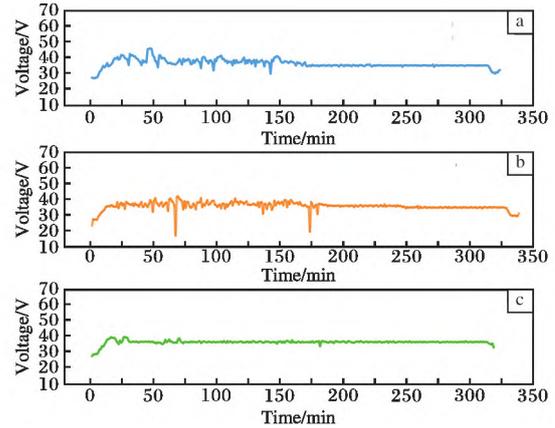


图 11 不同工艺熔炼纯锆铸锭时的电压-时间曲线

Fig. 11 Voltage-time curves of pure zirconium ingot during melting by different processes: (a) 1#; (b) 2#; (c) 3#

2#熔炼工艺最初设定的熔炼电流为 25 kA,并降低了稳弧电流和稳弧周期,减弱了熔池的搅拌强度,此时仍会出现频繁短路的情况,如图 11b,但相比 1#工艺中 28 kA 时有所改善。当铸锭熔炼至一半时,将电流降低至 22 kA,之后未出现短路情况。数值模拟结果表明,熔炼电流越大,铸锭表面质量越好。但综合 1#和 2#情况,造成电极短路的主要原因是熔炼电流过大,而非熔池搅拌。熔炼过程中电流增加至一定程度后会影响到熔炼的稳定性,故熔炼电流的选择具有上限。

3#熔炼工艺减小了熔炼电流,为保证熔池到边情况增大了稳弧电流和稳弧周期,并加大了熔池的搅拌强度。在纯锆铸锭生产过程中发现,此工艺条件下熔炼前期仍会出现短路情况,如图 11c。结合现场生产经验,认为此时电压较低,未能与电流较好匹配,因此将电压从 35 V 升高至 36 V,随后熔炼过程顺利进行,同时观察看到熔池饱满,到边情况良好。

图 12 为 1#、2#和 3#熔炼工艺对应的纯锆铸锭的照片。从图 12 可以看到,与现有工艺(熔炼电流 16 kA,电压 35 V,稳弧电流 15 A,稳弧周期 30 s)相比,工艺改进后的铸锭表面质量有明显改善(现有工艺对应的铸锭表面见图 1a)。1#、2#熔炼工艺获得的铸锭底部表面质量较好,但上部表面质量变差(图 12a、12b),是由于 1#和 2#工艺后期将电流降低至 22 kA,电流较小,这也进一步验证了熔炼电流是影响铸锭表面质量的关键因素。3#工艺获得的铸锭从底部到顶部表面质量均较好,说明对于纯锆一次铸锭熔炼而言,3#熔炼工艺较优。

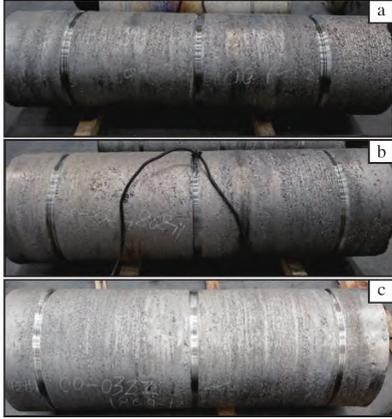


图 12 不同工艺熔炼的纯锆铸锭照片

Fig. 12 Photos of pure zirconium ingots melted by different processes: (a) 1<sup>#</sup>; (b) 2<sup>#</sup>; (c) 3<sup>#</sup>

## 4 结 论

(1) 采用 VAR 熔炼纯锆铸锭，熔炼电流是影响铸锭表面质量的关键因素。随着熔炼电流的增大，高温液相熔体与坩埚壁的接触长度逐渐增加，既改善了熔池到边情况，也提高了坩埚壁附近熔体的过热度，从而可有效改善铸锭表面质量。但熔炼电流增加至一定程度后会影响到熔炼的稳定性，故熔炼电流的选择具有上限。

(2) 增大稳弧电流和稳弧周期会促进高温熔体向坩埚壁的运动，改善熔池到边情况；但稳弧电流和稳弧周期太大也会加剧熔池运动，易造成熔体飞溅，形成飞边缺陷。

(3) 在熔炼电流 24 kA、熔炼电压 36 V、稳弧电流 25 A、稳弧周期 50 s 条件下制备的纯锆铸锭表面质量较佳。

### 参考文献 References

[1] 雷文光, 赵永庆, 韩栋, 等. 钛及钛合金熔炼技术发展现状[J]. 材料导报, 2016, 30(5): 101-106.

- [2] 马济民, 贺金宇, 庞克昌, 等. 钛铸锭和锻造[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 2-8.
- [3] 赵永庆, 吴聪, 王欢. 1200 MPa 级高强高韧损伤容限钛合金强韧性研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(12): 4389-4397.
- [4] 靖振权, 孙彦辉, 刘睿, 等. 钛合金 TC4 真空自耗熔炼工艺参数对宏观偏析影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(3): 815-822.
- [5] Kiyotake T, Toshiaki N. Improvement in the quality of superalloy VAR ingots[J]. ISIJ International, 1996, 36(S1): 85-88.
- [6] 罗文忠, 赵小花, 刘鹏, 等. 采用数值模拟方法分析影响 VAR 熔炼钛合金铸锭表面质量的因素[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(3): 927-932.
- [7] 岳旭, 陈威, 阿热达克·阿力玛斯, 等. 熔炼工艺对 Ti-662 合金化学成分均匀性的影响[J]. 钛工业进展, 2022, 39(4): 1-5.
- [8] 李小孟. TC11 钛合金铸锭表面质量和电压关系的研究[J]. 稀有金属快报, 2007, 26(11): 42-43.
- [9] Karimi-Sibaki E, Kharicha A, Wu M H, et al. A parametric study of the vacuum arc remelting (VAR) process: effects of arc radius, side-arcing, and gas cooling[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2020, 51(1): 222-235.
- [10] Chapelle P, Jardy A, Bellot J P, et al. Effect of electromagnetic stirring on melt pool free surface dynamics during vacuum arc remelting[J]. Journal of Materials Science, 2008, 43(17): 5734-5746.
- [11] Mir H E, Jardy A, Bellot J P, et al. Thermal behaviour of the consumable electrode in the vacuum arc remelting process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(3): 564-572.
- [12] Shevchenko D M, Ward R M. Liquid metal pool behavior during the vacuum arc remelting of INCONEL 718[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2009, 40(3): 263-270.
- [13] 文豪, 郑亚波, 陈峰, 等. 基于 MeltFlow-VAR 的 TC2 钛合金铸锭熔炼工艺研究[J]. 世界有色金属, 2022(14): 12-15.

### 专利信息

## 一种 Ti600 钛合金球形粉及其制备方法和用途

申请号: CN202210878256.7

申请日: 20220725

公开(公告)日: 20230616

公开(公告)号: CN115229198B

申请(专利权)人: 中国科学院赣江创新研究院; 中国科学院过程工程研究所

摘要: 本发明提供一种 Ti600 合金球形粉制备方法及其用途。采用不同的混合方式将二氧化钛、氧化铝、氧化锡、二氧化锆、二氧化硅、氧化钨和氧化钼等原料混合, 并依次通过第一还原、第一湿法处理和第二还原、第二湿法处理实现各种元素在钛基体中的均匀分布, 从而得到球形度高、氧含量低的 Ti600 合金球形粉。本发明中所述的制备方法所需设备更为简单、工艺过程成本较低且易于实现, 具有较高的工业利用价值。