

VAR 熔炼制备超大规格 TC4 ELI 钛合金铸锭研究

杨 健, 张开发, 曹江海, 刘 华, 李 维

(西部钛业有限责任公司 钛合金加工技术国家地方联合工程研究中心, 陕西 西安 710201)

摘 要: 舰船和海洋领域对钛合金材料的需求呈大型化发展趋势, 铸锭作为锻件和板材的母材, 其大型化也势在必行。为满足大型铸锭的工业化生产, 采用有限元分析法对真空自耗电弧熔炼 (VAR) 超大规格 TC4 ELI 钛合金一次锭和成品锭的熔炼过程进行了数值模拟研究。结果表明, 一次锭熔炼过程中稳弧电流和稳弧周期直接影响熔池中夹杂物的运动轨迹; 对于 TC4 ELI 钛合金一次锭熔炼, 较为合适的稳弧参数为稳弧电流 30 A, 稳弧周期 40 s; 成品锭熔炼时, 降低熔炼电流, 增大稳弧电流和稳弧周期, 即加强 VAR 熔炼过程中的搅拌有助于提高铸锭成分均匀性和表面质量。根据数值模拟结果进行了 12.8 t 级超大规格 TC4 ELI 钛合金铸锭的工业化生产, 所得铸锭表面质量良好, 成分均匀。

关键词: TC4 ELI 钛合金; 超大规格铸锭; 数值模拟; VAR 熔炼

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2023)04-001-05

Research on Preparation of Oversized TC4 ELI Titanium Alloy Ingots by VAR

Yang Jian, Zhang Kaifa, Cao Jianghai, Liu Hua, Li Wei

(National and Local Joint Engineering Research Center for Titanium Alloy Processing Technology,
Western Titanium Technologies Co., Ltd., Xi'an 710201, China)

Abstract: The large-scale development of titanium alloy in naval and marine fields has become an inevitable trend. As the basic material of titanium alloy forgings and plates, ingots are also developing towards large-scale. For the industrial production of oversized ingots, the melting process of vacuum arc melting (VAR) of oversized TC4 ELI titanium alloy primary and finished ingots was numerically simulated using finite element analysis. The results show that coil's current and coil's period during primary ingot melting directly affect the trajectory of inclusions in the molten pool. For TC4 ELI titanium alloy primary ingot, the more suitable coil's current is 30 A and coil's period is 40 s. When the finished ingot is melted, reducing the melting current and increasing the coil's current and coil's period, that is, strengthening the stirring in VAR melting process can help to improve the uniformity of ingot composition and surface quality. The industrial production of 12.8 t oversized TC4 ELI ingots with good surface quality and uniform composition was carried out based on the numerical simulation results.

Keywords: TC4 ELI titanium alloy; oversized ingots; numerical simulation; VAR melting

钛及钛合金由于高比强度和出色的耐腐蚀性, 且密度仅为钢和镍基超合金的一半, 因而在众多金属中脱颖而出^[1-3], 广泛应用于航空航天、兵器舰船、化工、医疗和体育休闲等领域^[4-7]。TC4 钛合金的名义成分为 Ti-6Al-4V, 属于 $\alpha+\beta$ 型钛合金, 其综合力学性能优良, 是应用最为广泛的钛合金之一。Al 元素在钛合金中有着

固溶强化的作用, 可提高合金的室温强度和热强性, 而 V 元素既能提高强度又能改善塑性^[8]。TC4 ELI 是 TC4 的改进型牌号, 主要区别在于降低了杂质元素 Fe 和间隙元素 N、H、O 的含量。TC4 ELI 钛合金强度虽有所降低, 但其具有更好的塑性、韧性、焊接性能及低温使用性能, 被广泛应用于低温工程、医疗、舰船及飞行器等重要领域^[9]。随着舰船和海洋装备的大型化发展, 对大规格、大批重钛合金锻件及板材的需求也不断提高。作为钛合金锻件和板材的母材——铸锭的大型化也势在必行。

真空自耗电弧熔炼法 (vacuum arc remelting, VAR)

收稿日期: 2023-04-10

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。

是目前应用较为广泛和成熟的一种制备钛及钛合金铸锭的工业熔炼方法^[10-13]。VAR 熔炼过程中,随着铸锭规格的增大,其成分及缺陷的控制难度也逐渐增加。为预防超大规格 TC4 ELI 钛合金铸锭制备过程中产生冶金缺陷,首先通过原材料选择、优化电极混布料等方式从源头对铸锭质量进行控制,然后通过数值模拟研究 VAR 熔炼工艺对超大规格 TC4 ELI 钛合金一次锭和成品锭质量的影响,并基于数值模拟结果进行工业试制,最终确定最佳的熔炼参数,以期为超大规格 TC4 ELI 钛合金铸锭的工业化生产提供参考。

1 实验

1.1 实验材料

实验材料为 TC4 ELI 钛合金铸锭,配料成分为 Ti-6.4Al-4.3V,经 3 次 VAR 熔炼得到成品锭,其中一次锭规格为 $\phi 820$ mm,二次锭规格为 $\phi 920$ mm,成品锭规格为 $\phi 1020$ mm。铸锭生产流程包括海绵钛及中间合金选择、混布料、电极压制及焊接、VAR 熔炼 4 个工序。由于钛合金制造过程的质量遗传性,需要从原料开始对质量进行控制。此次铸锭试制选择 0 级海绵钛,严格限制原料中杂质元素含量;中间合金则选择铝钒合金 (AlV55)、铝豆 (Al 99.8%)、钛铁合金 (Ti-32Fe) 及 TiO_2 。

1.2 VAR 过程数值模拟

VAR 生产钛合金时一般需要重复熔炼 3 次,一次锭熔炼的主要目的是充分合金化及除去夹杂物;二次锭熔炼是为了进一步除杂并初步调节铸锭成分的均匀性;成品锭熔炼则是为了保证铸锭成分均匀性以及提高成材率。基于此,对 TC4 ELI 钛合金 VAR 一次锭熔炼和成品锭熔炼过程进行研究,以确定较优的熔炼工艺参数。

VAR 熔炼是在“黑箱”中进行,故合金熔炼及凝固过程无法完全实时可视化。因此,通过 MeltFlow-VAR 软件对钛合金 VAR 熔炼过程进行模拟。TC4 ELI 钛合金的物性参数如表 1 所示,变温物性参数如图 1 所示。

表 1 TC4 ELI 钛合金的物性参数

Table 1 Physical properties of TC4 ELI titanium alloy

Parameter	Value
Liquid density/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	3925
Solid density/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	4200
Volume expansion coefficient/ K^{-1}	6.9×10^{-5}
Solidus temperature/K	1860
Liquidus temperature/K	1898
Latent heat/ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	3.5×10^5
Electrical conductivity/ $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$	7.6×10^5

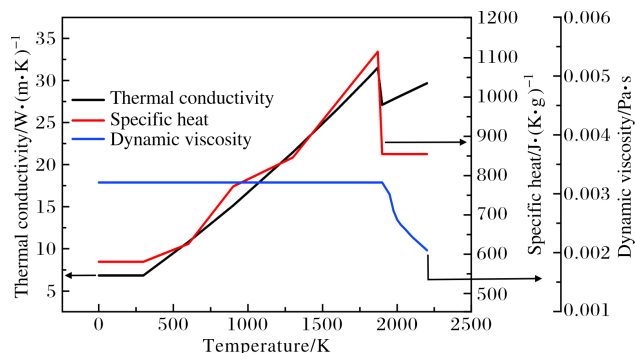


图 1 TC4 ELI 钛合金的变温物性参数

Fig.1 Physical properties of TC4 ELI titanium alloy at different temperatures

图 2 为 MeltFlow-VAR 熔炼非稳态行为分析的模拟区域。模拟过程中,建立轴对称数学模型并采用有限体积分法进行计算。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熔炼过程中从熔池健全到熔池上升整个阶段的温度场分布。

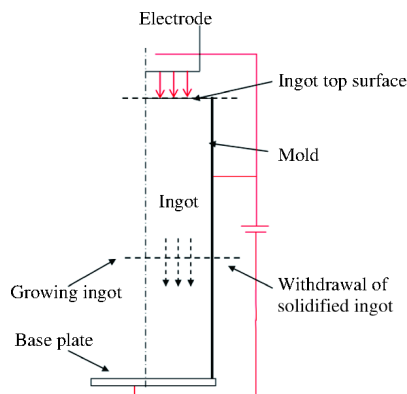


图 2 VAR 熔炼非稳态行为分析的模拟区域示意图

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

1.3 工业试制

根据 VAR 熔炼数值模拟优选出的工艺参数,进行 12.8 t 级 TC4 ELI 钛合金铸锭熔炼。观察铸锭表面质量,并在铸锭圆周上、中、下 3 个部位取样进行成分分析。

2 结果与讨论

2.1 VAR 一次锭熔炼除杂效果模拟

夹杂属于铸锭内部缺陷,一般分为高密度夹杂和低密度夹杂。高密度夹杂是由熔炼过程中 W、Mo 等高熔点金属造成的,目前钛合金生产中已控制了高密度夹杂物的来源,故基本不会产生高密度夹杂。低密度夹杂主要是钛的氧化物或氮化物,其硬度远高于钛基体,常被称为硬 α 夹杂。低密度夹杂的密度仍高于钛基体。VAR

一次锭熔炼除杂主要是通过选择合理的熔炼参数,使夹杂物富集在铸锭表皮,从而通过后续的扒皮除去。

熔炼电流一定时,熔炼过程中夹杂物的运动轨迹主要与稳弧参数(稳弧电流和稳弧周期)相关。图3给出了不同稳弧电流和稳弧周期下 VAR 熔炼时夹杂物的运动轨迹。从图3可以看到,当稳弧参数为 25 A+30 s(图3a)、25 A+40 s(图3b)、30 A+30 s(图3c)和 35 A+45 s(图3f)时,相对密度为 1.16 的夹杂物运动轨迹(红色曲线)为逆时针方向,这种运动轨迹会导致夹杂物被吸附在凝固体前沿,从而停留在铸锭内部。

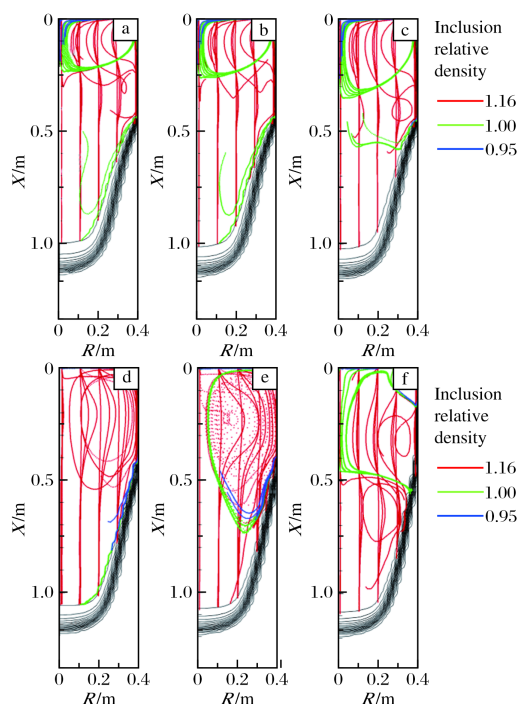


图3 不同稳弧参数下 TC4 ELI 钛合金一次锭熔炼过程中夹杂物的运动轨迹

Fig.3 Motion paths of inclusions in TC4 ELI titanium alloy primary ingots under different coil parameters: (a) 25 A + 30 s; (b) 25 A + 40 s; (c) 30 A + 30 s; (d) 30 A + 40 s; (e) 35 A + 40 s; (f) 35 A + 45 s

当稳弧参数为 30 A+40 s(图3d)和 35 A+40 s(图3e)时,相对密度为 1.16 的夹杂物运动轨迹为顺时针方向,此时夹杂物会从熔池内部运动至熔池表面,然后从熔池表面中心运动至坩埚壁附近,从而被吸附。但稳弧参数为 35 A+40 s(图3e)时,相对密度为 1.0 的夹杂物(绿色曲线)运动轨迹为逆时针方向,不利于去除。因此,在熔炼 TC4 ELI 钛合金一次锭时,为有效去除夹杂物,较为合适的稳弧参数为稳弧电流 30 A、稳弧周期 40 s。

2.2 VAR 成品锭熔炼过程模拟

VAR 成品锭熔炼要保证铸锭表面质量、内部质量、

成分均匀性以及成材率。铸锭表面不能出现夹层、结疤及冷隔,内部不能出现疏松、气孔等缺陷。成分均匀性要求合金元素在铸锭中分布均匀,偏析控制在一定范围内。在满足上述要求的前提下,需要尽可能减小冒口深度,提高铸锭成材率。为此,本研究设计了 3 组熔炼参数(见表 2),以探究熔炼参数对铸锭凝固过程中熔池形状、局部凝固时间及元素分布的影响。

表2 大规格 TC4 ELI 钛合金铸锭熔炼参数

Table 2 Melting parameters of oversized TC4 ELI titanium alloy ingots

No.	Current/kA	Voltage/V	Coil's current/A	Coil's period/s
1 [#]	36	35	20	20
2 [#]	34	35	20	25
3 [#]	32	35	25	25

VAR 熔炼过程中熔池越宽(即越饱满),表明熔池到边情况越好,越有利于提升铸锭的表面质量;同时,为得到较好的内部质量,希望得到“扁平状”熔池,即熔池不能太深。但通常情况下,“饱满”熔池和“扁平状”熔池不能兼得,只能尽可能平衡以同时获得较好的铸锭表面及内部质量。局部凝固时间(local solidification time, LST)代表铸锭凝固的先后顺序,局部凝固时间越小,表明此位置的溶液先凝固,反之则后凝固。

图4为 1[#]、2[#]和 3[#]工艺对应的熔炼参数下铸锭凝固过程中的熔池形状、局部凝固时间及凝固结束后 Al、V 元素在铸锭中的分布图。1[#]工艺的熔炼电流为 36 kA,由于熔炼电流较大,适当减小了稳弧电流和稳弧周期,分别为 20 A 和 20 s。模拟结果表明,此时熔池深而窄,最大熔池深度达到 2.123 m;铸锭中心极易存在疏松缺陷,而铸锭的冒口深度可达 1 m;Al、V 元素分布较为均匀,未存在严重偏析。

与 1[#]工艺相比,2[#]工艺减小了熔炼电流,增大了稳弧周期。模拟结果表明,此时熔池深度较 1[#]工艺浅,最大熔池深度为 2.031 m;铸锭冒口深度为 0.8 m;Al、V 元素在铸锭顶部有一定程度的富集。

与 1[#]和 2[#]工艺相比,3[#]工艺进一步降低了熔炼电流,但增大了稳弧电流和稳弧周期,即加强了 VAR 熔炼过程中的搅拌。模拟结果表明,3[#]工艺对应的熔池更浅,最大熔池深度为 2.002 m;铸锭冒口深度为 0.7 m;Al、V 元素在铸锭中下部的分布均匀,在铸锭顶部有所富集但未出现严重偏析。

对比 1[#]、2[#]和 3[#]工艺的模拟结果可以看出,熔炼电流较小时熔池深度会变浅,凝固后期冒口深度也会变

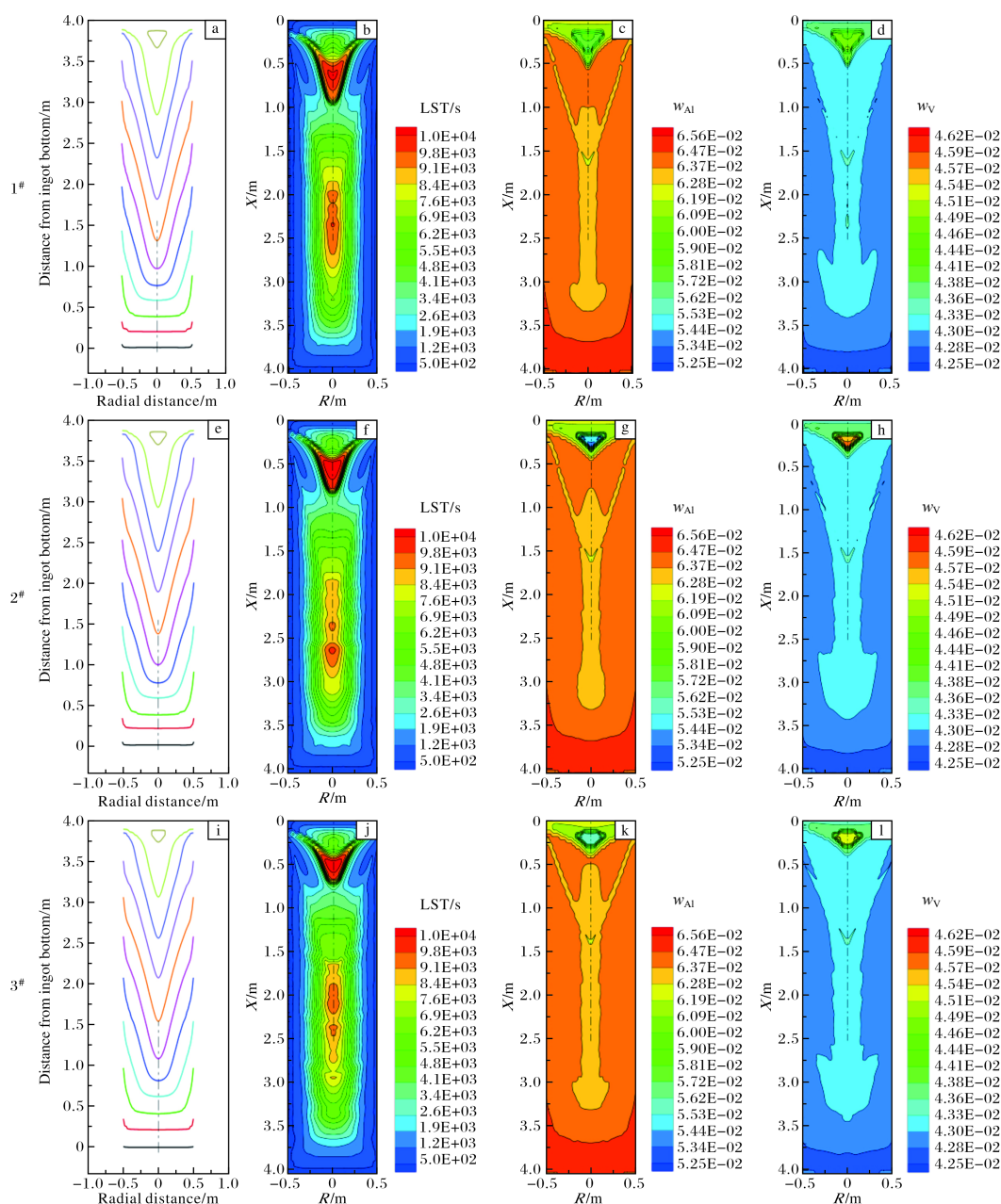


图4 不同工艺对应的成品锭熔池形状、局部凝固时间及Al、V元素分布图

Fig.4 Simulation results of finished ingots corresponding to different processes: (a, e, i) profiles of molten pool; (b, f, j) local solidification time; (c, g, k) distribution of Al; (d, h, l) distribution of V

浅,有利于提高成材率。但熔炼电流较小时,Al、V元素在铸锭冒口处的富集较为严重,可能是由于稳弧电流较小所导致的。因此,熔炼过程中还需注意熔炼电流与稳弧参数之间的匹配性。综合而言,Al、V元素在TC4 ELI钛合金中不属于易偏析元素,整体分布较为均匀。

2.3 工业试制结果

根据数值模拟结果,3[#]工艺对应的熔炼参数更有利于TC4 ELI钛合金铸锭表面和内部质量的综合控制。因此,以3[#]工艺进行工业试制,得到12.8 t级TC4 ELI钛

合金铸锭,如图5所示。TC4 ELI钛合金铸锭经表面扒皮后质量良好,无皮下气孔、夹渣等缺陷。切除锭底、冒口后的TC4 ELI钛合金铸锭质量为11.78 t,成材率达92%。

图6为工业试制的4支超大规格TC4 ELI钛合金铸锭圆周上、中、下3个部位Al和V元素含量的检测结果。从图6可以看出,实际检测结果与配料值接近,且铸锭上、中、下各部位元素分布均匀,表明3[#]工艺对应的熔炼参数适用于超大规格TC4 ELI钛合金铸锭的工业化生产。



图5 12.8 t 级 TC4 ELI 钛合金铸锭照片

Fig.5 Photo of 12.8 t TC4 ELI titanium alloy ingot

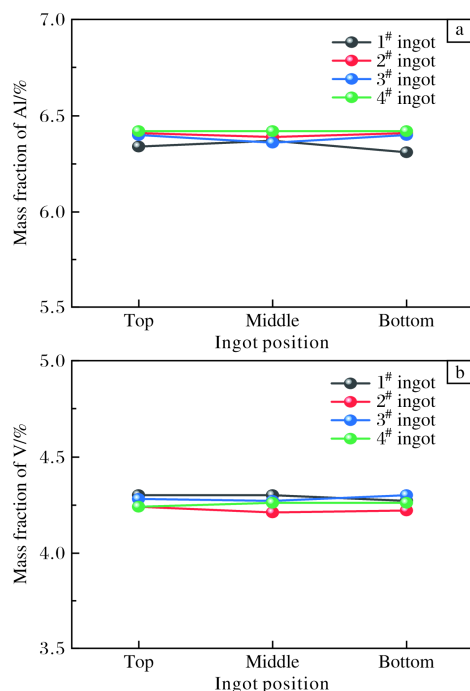


图6 12.8 t 级 TC4 ELI 钛合金铸锭不同部位 Al、V 元素的含量

Fig.6 Elements content of 12.8 t TC4 ELI titanium alloy ingot in different positions: (a) Al; (b) V

3 结 论

(1) 稳弧参数对 VAR 一次锭熔炼时的除杂效果有显著影响。在熔炼超大规格 TC4 ELI 钛合金一次锭时, 较为合适的稳弧参数为稳弧电流 30 A、稳弧周期 40 s。

(2) 超大规格 TC4 ELI 钛合金成品锭熔炼过程中, 降低熔炼电流, 增大稳弧电流和稳弧周期, 有助于得到“扁平状”熔池、改善熔池的到边情况, 从而实现铸锭

成分均匀性和表面质量的综合控制。

(3) 采用 3[#]工艺进行工业试制, 得到 12.8 t 级 TC4 ELI 钛合金铸锭。铸锭经表面扒皮后质量良好, 无皮下气孔、夹渣等缺陷。切除锭底、冒口后的铸锭质量 11.78 t, 成材率达到 92%。

参考文献 References

- [1] 洪权, 郭萍, 周伟. 钛合金成形技术与应用[J]. 钛工业进展, 2022, 39(5): 27-32.
- [2] 李永华, 张文旭, 陈小龙, 等. 海洋工程用钛合金研究与应用现状[J]. 钛工业进展, 2022, 39(1): 43-48.
- [3] Leyens C, Peters M. Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications[M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2006.
- [4] 刘全明, 张朝晖, 刘世锋, 等. 钛合金在航空航天及武器装备领域的应用与发展[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(3): 1-4.
- [5] 李雅迪, 弭光宝, 李培杰, 等. 增材制造 600 °C 高温钛合金组织特征及力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(7): 2507-2518.
- [6] Festas A, Ramos A, Davim J P. Machining of titanium alloys for medical application — a review[J]. Journal of Engineering Manufacture, 2022, 236(4): 309-318.
- [7] 孙纯纯, 郭志君, 张金勇, 等. 亚稳 β 钛合金在生物医学领域的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(3): 1111-1124.
- [8] Lu J W, Ge P, Zhao Y Q. Recent development of effect mechanism of alloying elements in titanium alloy design [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(4): 775-779.
- [9] 冯雅奇, 贾栓孝, 王伟琪, 等. 深潜器载人舱用 TC4 ELI 钛合金半球壳的研制[J]. 钛工业进展, 2016, 33(1): 19-22.
- [10] 杨健, 曹江海, 侯秦龙, 等. VAR 熔炼纯锆铸锭表面质量控制研究[J]. 钛工业进展, 2023, 40(3): 33-38.
- [11] 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.
- [12] 杜彬, 张志斌, 曹寿林, 等. 多组元钛合金电子束冷床炉熔炼挥发规律研究[J]. 钛工业进展, 2021, 38(1): 13-19.
- [13] Takachio K, Nonomura T. Improvement in the quality of superalloy VAR ingots[J]. ISIJ International, 1996, 36(S1): 85-88.

专利信息

一种表面纳米化的大规格超细晶钛合金薄板及其制备方法

申请号: CN202210654861.6

申请日: 2022-06-10

公开(公告)日: 2023-07-04

公开(公告)号: CN115058672B

申请(专利权)人: 北京航空航天大学

摘要: 本发明公开了一种表面纳米化的大规格超细晶钛合金薄板及其制备方法, 包括初步轧制、包覆叠轧和表面处理。该方法通过初始大变形轧制及后续低温包覆叠轧工艺得到晶粒尺寸小于 2 μm 的大规格超细晶钛合金薄板; 且随着碾压道次数的增加, 下压力逐渐增加, 经过多道次碾轧后可获得表面为纳米晶、芯部为超细晶的钛合金薄板。