

TA18钛合金管坯电子束冷床炉熔铸工艺及试验研究

于 辉¹ 罗 许² 王占瑞¹ 邓新吉³ 张永旭¹

(1. 燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004; 2. 攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司, 攀枝花 617000; 3. 攀钢集团江油长城特殊钢有限公司, 江油 621700)

摘 要 为获得凝固组织和力学性能良好的TA18钛合金管坯, 利用ProCAST有限元软件对电子束冷床炉熔铸TA18钛合金管坯凝固过程进行仿真模拟, 研究了浇注温度、拉坯速度和传热系数对TA18钛合金管坯凝固过程的熔池形貌、晶粒特征以及管坯应力场的影响。结果表明, 随浇注温度和拉坯速度增大以及冷却强度降低, 熔池深度和糊状区宽度以及晶粒尺寸逐渐增大, 管坯整体的等效应力逐渐减小。优化的工艺方案: 浇注温度为1 850 ℃, 传热系数为3 000 W/(m²·K), 拉坯速度为30 mm/min。采用优化方案获得的TA18钛合金管坯微观组织、化学成分和力学性能均匀性良好。

关键词 TA18钛合金; 凝固过程; 工艺优化; 有限元仿真

中图分类号 TG146.23; TP311; TG244

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240449

Electron Beam Cold Bed Furnace Melting and Casting Process and Experiment of TA18 Titanium Alloy Tube Billet

YU Hui¹, LUO Xu², WANG Zhanrui¹, DENG Xinji³, ZHANG Yongxu¹

(1. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004; 2. Panzhihua Research Institute of Iron & Steel Co., Ltd., Pangang Group, Panzhihua 617000; 3. Sichuan Changcheng Special Steel Co., Ltd., Pangang Group, Jiangyou 621700)

Abstract: In order to obtain TA18 titanium alloy tube billet with satisfied solidification microstructure and mechanical properties, the solidification process of electron beam cold bed furnace melting and casting TA18 titanium alloy tube billet was simulated using ProCAST finite element software. The influence of pouring temperature, drawing speed and heat transfer coefficient on the melt pool morphology, grain characteristics and stress field of TA18 titanium alloy tube billet during the solidification process was investigated. The results indicate that with the increase of pouring temperature and drawing speed as well as the decrease of cooling intensity, the depth of molten pool, width of mushy zone and average grain size are gradually increased, and the overall equivalent stress of tube billet is gradually decreased. The optimized process parameters are determined as pouring temperature of 1 850 ℃, heat transfer coefficient of 3 000 W/(m²·K), and drawing speed of 30 mm/min. According to the optimized process parameters, the microstructure, chemical composition and mechanical properties of TA18 titanium alloy billet exhibit desirable uniformity.

Key Words: TA18 Titanium Alloy, Solidification Process, Process Optimization, Finite Element Simulation

钛及钛合金具有耐高温、耐腐蚀以及强度高等特点, 被广泛应用于航空航天、海洋工程和武器装备等领域^[1-3]。通常采用非自耗真空电弧熔炼(NC)、真空自耗电弧熔炼(VAR)、冷床熔炼(CHM)、冷坩埚冶炼法(CCM)和电渣重熔(ESR)等工艺来冶炼钛及钛合金^[4-7]。其中, 冷床熔炼的优点在于分离了熔炼、精炼和铸造3个工序, 能够有效去除钛合金熔液中不同密度的夹杂, 确保铸锭的纯净度, 并减小钛的熔炼过程中的

烧损^[8]。

目前, 研究者对钛及钛合金铸锭的铸造工艺、过程仿真及质量控制等方面开展了许多研究工作。GAO L等^[9]通过电子束冷床熔铸TC4钛合金板坯研究了不同铸造条件下Al在熔融区和凝固区的宏观偏析问题, 发现Al偏析受到铸造速度和浇注温度的影响, 降低浇注温度可减少Al的蒸发损失。LIU Q L等^[10]研究了超长超薄TC4扁锭电子束冷床炉熔炼中结晶器尺寸对固液

收稿日期: 2024-11-01; 修订日期: 2024-11-29

基金项目: 四川省科技计划资助项目(SC2022A1C01J)

第一作者简介: 于辉, 男, 1974年出生, 教授, E-mail: yuhui@ysu.edu.cn

引用格式: 于辉, 罗许, 王占瑞, 等. TA18钛合金管坯电子束冷床炉熔铸工艺及试验研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(9): 1 387-1 393.

YU H, LUO X, WANG Z R, et al. Electron beam cold bed furnace melting and casting process and experiment of TA18 titanium alloy tube billet [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(9): 1 387-1 393.

界面形貌的影响,发现当TC4扁锭截面长度超过有效距离时,熔池深度和糊状区宽度不再随结晶器长度增加而发生改变。MA C等^[11]研究了拉拔速度和铸造温度对钛合金铸件凝固组织和应力分布的影响,发现晶粒结构差异会导致应力分布不均匀,增加了铸件表面出现裂纹的趋势。雷文光等^[12-13]使用ProCAST软件开展数值模拟,研究了电子束冷床炉熔铸TC4钛合金铸锭在不同工况下温度场、熔池状貌和微观组织的分布规律。张浩泽等^[14]采用真空自耗电弧炉+电子束冷床炉熔铸出TA31钛合金铸坯,将铸坯通过斜轧穿孔制备出钛合金管坯,制备出的管坯外径尺寸精度高但壁厚偏厚。熊汉城等^[15]采用穿孔工艺将熔铸的TC4合金圆锭制备出 $\phi 219\text{ mm} \times 16\text{ mm}$ 大口径的TC4钛合金管坯,研究了不同退火温度对管材组织演变与力学性能的影响。李永林等^[16]采用斜轧穿孔法制备出TA18钛合金管坯,研究了管坯表面质量、氧化层厚度、组织和力学性能特点。目前研究主要是针对钛及钛合金铸锭制备展开,而对于钛及钛合金管坯,其制备工艺是通过铸锭进行穿孔、钻孔完成的,制备工艺流程长、成本高。因此,本研究通过电子束冷床炉直接熔铸TA18钛合金管坯的生产工艺,可降低管坯的制备成本和缩短生产周期。

本研究利用ProCAST有限元软件对电子束冷床炉熔铸TA18钛合金管坯的凝固阶段进行仿真模拟,研究浇注温度、拉坯速度和传热系数对TA18钛合金管坯凝固过程的熔池形貌、晶粒特征以及管坯应力场的影响。根据优化的熔铸工艺参数,铸造的TA18钛合金管坯的微观组织、化学成分和力学性能具有良好的均匀性,验证通过电子束冷床炉直接熔铸TA18钛合金管坯的可行性,为成功制备钛及钛合金管坯提供新路径。

1 研究方法

1.1 有限元模型建立

利用ProCAST软件对电子束冷床炉熔铸TA18钛合金管坯的凝固阶段进行仿真模拟,构建的三维模型主要包括冷床、结晶器、拉坯杆和管坯,熔铸工艺过程见图1。液态TA18钛合金通过外结晶器和内结晶器向外散发热量,进而冷却成固态,固态TA18钛合金管在拉坯杆的作用下向外运动。其中,外结晶器尺寸为 $\phi 230\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ (壁厚) $\times 150\text{ mm}$,内结晶器尺寸为 $\phi 100\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ (壁厚) $\times 160\text{ mm}$,拉坯杆尺寸为 $\phi 200\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ (壁厚) $\times 120\text{ mm}$,制备的管坯尺寸为 $\phi 200\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ (壁厚) $\times 300\text{ mm}$ 。采用

ProCAST软件前处理模块的网格划分功能进行网格划分,网格类型为六面体网格,管坯网格尺寸约为1 mm,结晶器网格尺寸约为3 mm,划分为约455 000个网格。

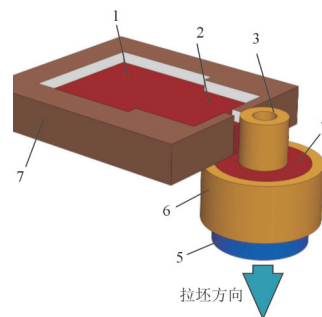


图1 TA18钛合金管电子束冷床炉熔铸工艺

Fig.1 Electron beam cold bed furnace melting and casting process of TA18 titanium alloy tube

1. 熔化区 2. 精炼区 3. 内结晶器 4. 凝固的管坯 5. 拉坯杆 6. 外结晶器 7. 冷床

在模拟TA18钛合金管坯的温度、应力和凝固组织时,需要确定凝固过程中的动力学生长系数、形核参数以及其他热物性参数。TA18钛合金的液相线温度和固相线温度分别为1 663 °C和1 538 °C,其他热物性参数参照文献[17-18]。结晶器的材料为金属Cu,密度 ρ 为8 930.5 kg/m³,其他热物性参数参照文献[19-20]。在仿真模拟TA18钛合金凝固过程中,动力学生长系数和形核参数参照文献[21-22]。

1.2 试验方案

采用电子束冷床炉(2400kW型)直接熔铸TA18钛合金管坯,熔铸原材料为TA18钛合金铸锭,其化学成分见表1。在熔铸的TA18钛合金管坯的横截面中心位置上,沿轴向截取拉伸试样。采用Zwick拉伸试验机(Z100)进行拉伸,拉伸速率为1 mm/min,根据GB/T 228.1-2021制备试样,试样尺寸及取样位置示意图见图2。为分析熔铸的TA18钛合金管坯的微观组织均匀性,分别在管坯横截面的周向方向(A、B、C)和径向方向(D、E、F)进行取样,取样位置见图2b,采用金相显微镜(Axio Observer3 Materials)进行观测和分析。首先,利用线切割制备尺寸为10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 10 mm的试样,并依次采用200、400、1 000和2 500目砂纸进行打磨;随后,利用SiO₂悬浊液进行机械抛光,直至表面无划痕;最后,使用Kroll试剂(配比为2 mL的HNO₃+4 mL的HF+100 mL的H₂O混合溶液)对观察面进行腐蚀。同时,为测试熔铸的TA18钛合金管坯的化学成分和力学性能的均匀性,在管坯横截面的周向方向和径向方向共取9块试样(编号1~9)进行化学成分和硬度的检测,取样位置见图2b。

表1 TA18钛合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of TA18 titanium alloy %

w_B							Ti
Al	V	Fe	C	N	O	H	
2.0~3.5	1.5~3.0	≤ 0.25	≤ 0.08	≤ 0.05	≤ 0.12	≤ 0.015	余量

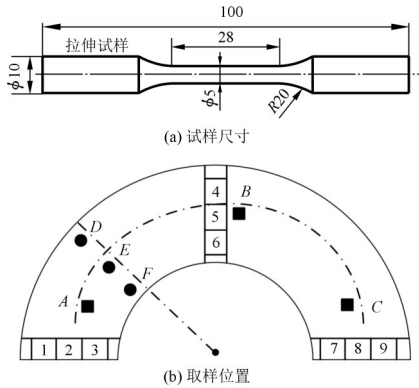


图2 试样尺寸及取样位置示意图

Fig.2 Dimension of specimen and sampling position

1.3 有限元模型验证

为验证有限元模型的正确性,选取浇注温度为 1 750 $^{\circ}\text{C}$,对流传热系数为 2 000 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$,拉坯速度为 20 mm/min ,进行有限元仿真模拟和熔铸试验,试验结果和模拟结果见图 3。可以看出,仿真模拟和熔铸试验得到的 TA18 钛合金管坯的晶粒平均尺寸分别约为 84 μm 和 92 μm ,表面细晶、柱状晶和等轴晶的分布大致相同。使用 Image-Proplus 图像处理软件和有限元软件 ProCAST 的后处理模块,对仿真模拟和熔铸试验得到的 TA18 钛合金管坯的晶粒类型占比进行统计,见图 3c。可见仿真模拟和熔铸试验得到的 TA18 钛合金管坯的晶粒类型占比存在着一定差异,这是因为管坯熔铸过程实际环境与仿真模拟存在差异,这导致实际熔铸过程中的结晶器冷却能力

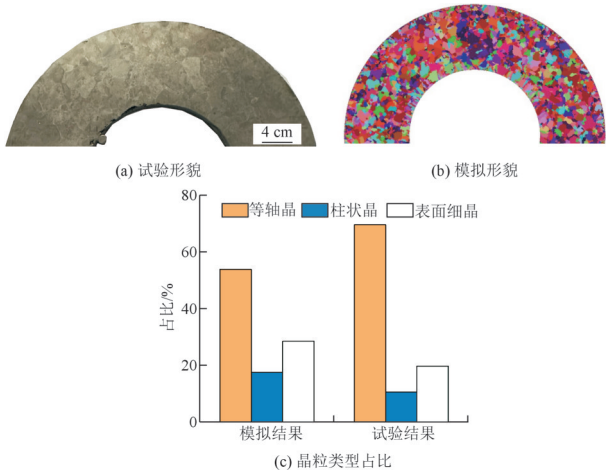


图3 试验结果和模拟结果对比

Fig.3 Comparison of experimental and simulation results

小,导致晶粒尺寸和等轴晶占比偏大。因此,在考虑试验和仿真模拟存在一定误差的条件下,证明了所建立的熔铸 TA18 钛合金管坯的有限元仿真模型的正确性。

2 试验结果与讨论

2.1 工艺参数优化

通过有限元仿真模拟,探究浇注温度、拉坯速度和传热系数对电子束冷床炉熔铸 TA18 钛合金管坯凝固过程的熔池形貌、管坯晶粒和管坯应力场的影响,具体的有限元仿真工艺参数见表 2。

表2 有限元仿真的工艺参数

Tab.2 Process parameters for finite element simulation

浇注温度/ $^{\circ}\text{C}$	拉坯速度/ $(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	传热系数/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$
1 700	10	2 000
1 750	20	3 000
1 800	30	4 000
1 850	40	—
1 950	50	—

不同的浇注温度、拉坯速度和传热系数对熔池形貌的影响见图 4。根据测量熔池顶部与固相界面之间的深度 h_1 、熔池顶部与液相界面之间的深度 h_2 以及糊状区域的宽度 Δh ,从而预测坯料质量。由图 4b 可知,当浇注温度由 1 700 $^{\circ}\text{C}$ 升高到 1 950 $^{\circ}\text{C}$ 时,熔池顶部与固相界面的深度 h_1 由 11.5 mm 增加至 27.2 mm ,熔池顶部与液相界面的深度 h_2 由 5.5 mm 增加至 19.0 mm ,糊状区宽度 Δh 由 6.0 mm 增加至 8.2 mm 。随浇注温度升高,糊状区逐渐扩大,导致温度梯度增加,进而降低了熔体形核率,促进了柱状晶的生长,并对等轴晶的生长产生阻碍。当浇注温度过高时,TA18 钛合金中的 Al 元素挥发量增大,导致凝固后的 TA18 钛合金管坯由于 Al 含量不足而出现质量问题。当浇注温度过低时,由于在凝固过程中溶质流动性不足,导致管坯的内部出现缩孔、缩松等质量缺陷。由图 4c 可知,当拉坯速度由 10 mm/min 增加至 50 mm/min 时,熔池顶部与固相界面的深度 h_1 从 13.5 mm 增加到 15.5 mm ,熔池顶部与液相界面的深度 h_2 则从 11.0 mm 增加到 11.7 mm ,糊状区宽度 Δh 从 2.5 mm 增加到 3.8 mm 。对比图 4b 和图 4c 可知,相对于浇注温度,拉坯速度对管坯熔池深度的影响较小。过低的拉坯速度会使得管坯在结晶器内停留时间长,管坯内壁和外壁的应力过大进而导致管坯表面质量不合格。过高的拉坯速度会导致熔池深度变深,管坯未凝固的部位被拉出结晶器,造成拉漏现象。

图 4d 为不同的传热系数对熔池形貌的影响。随传热系数从 $2\,000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ 提高到 $4\,000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ 时,熔池顶部与固相界面深度 h_1 从 15.0 mm 减小到 14.0 mm ,熔池顶部与液相界面深度 h_2 从 11.3 mm 减小到 10.9 mm ,糊状区宽度 Δh 从 3.7 mm 减少到 3.1 mm 。对

比图 4b~图 4d 可知,冷却条件对熔池深度的实际影响微乎其微。过高的冷却强度可能会导致管坯在结晶器内过早凝固,使得管坯无法从结晶器内顺利拉出,对生产效率和产品质量不利。过低的冷却强度无法确保管坯能够正常凝固,也会影响管坯的质量。

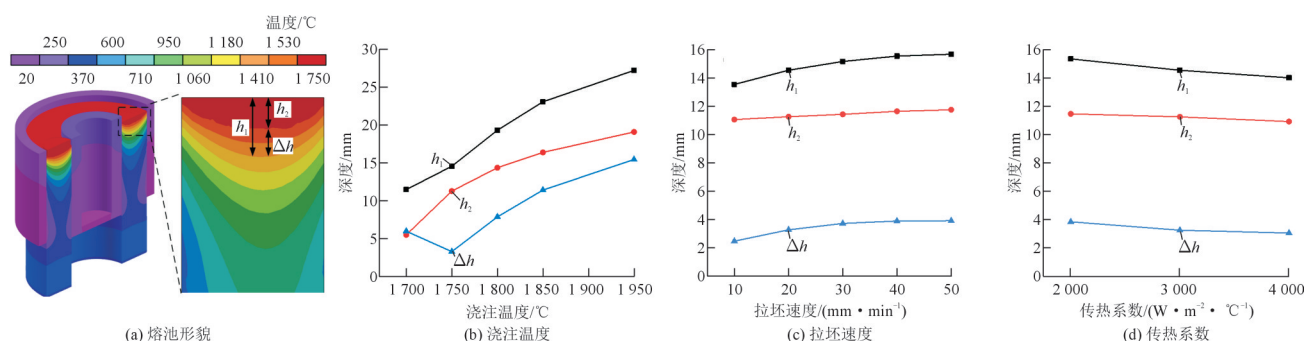


图 4 不同的工艺参数对 TA18 合金熔池形貌的影响

Fig.4 Influence of different process parameters on molten pool morphology of TA18 alloy

浇注温度、拉坯速度和传热系数对管坯晶粒的影响见图 5。由图 5a 可知,随浇注温度提高,晶粒数逐渐减少,平均晶粒直径从 50 mm 增加到 90 mm 。同样,随浇注温度提高,等轴晶和柱状晶占比逐渐增加,表面细晶占比逐渐减小。这是因为熔体过冷度随浇注温度升高而逐渐降低,导致形核率下降,从而促进了柱状晶的生长,等轴晶因尺寸增大而数量减少。因此,为了得到管坯较小的晶粒,可以选择较低的浇注温度。由图 5b 可知,随拉坯速度增加,等轴晶占比逐渐降低,柱状晶占比逐渐增加,表面细晶占比存在较小波动。同样,随拉坯速度增加,平均晶粒直径呈先减小后增大的趋势,最大为 77 mm ,最小为 40 mm ,晶粒数则是先增加后减少。这是因为管坯表面与结晶

器接触受到强冷作用,表面细晶的细化程度大于柱状晶的生长速度,导致整体的晶粒数量增加,平均晶粒直径减小。当再次提高拉坯速度时,柱状晶的生长进一步得到促进,柱状晶占比增加,进而使得整体晶粒数量减少,平均晶粒尺寸增加。由图 5c 可知,随冷却强度增加,平均晶粒直径从 84 mm 减小到 55 mm ,同时晶粒数量逐渐增加。这是因为管坯内表面和外表面受到更强的冷却作用,这促进了表面细晶的发展,并导致整体上晶粒数量增加、平均晶粒尺寸减小。除此之外,随冷却强度增加,等轴晶占比逐渐减少,柱状晶占比没明显变化,表面细晶占比逐渐增大。因此,在管坯能够被顺利拉出的前提下,可选用较大的冷却强度。

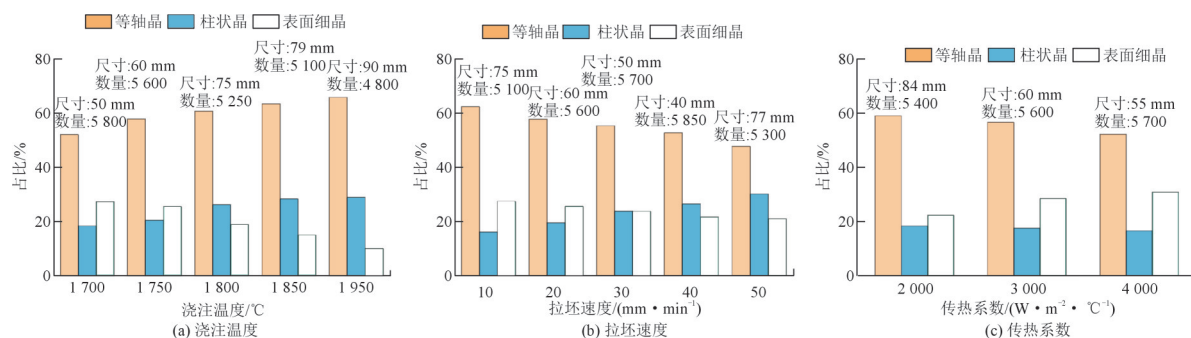


图 5 不同工艺参数对 TA18 合金管坯晶粒的影响

Fig.5 Influence of different process parameters on grain size of TA18 alloy billet

为了研究管坯的应力场随浇注温度、拉坯速度和传热系数的变化关系,在距离管坯底部 100 mm 处进行了横截面和纵截面切片观察,管坯的应力场见图 6。由图 6a~图 6e 可知,随浇注温度升高,管坯整体的等效应力逐渐减小,管坯表面处应力的下降趋

势大于管坯内部应力的下降趋势。这是因为管坯表面和结晶器直接接触,较高的浇注温度会加快管坯表面温度的降低,则管坯表面处的应力变化越快,这会增大管坯表面和内部的应力差,从而导致管坯产生裂纹。由图 6f~图 6j 可知,随拉坯速度增加,管坯

整体的等效应力不断减小。这是因为随拉坯速度增加,管坯和结晶器接触的时间短,散失的热量少,管坯在离开结晶器时的温度高,空冷阶段散热缓慢,产生的等效应力就小。随拉坯速度增加,管坯表面处的等效应力先减小后增大。这是因为管坯表面与结晶器直接接触,随拉坯速度进一步增大,管坯表面处

的应变速率增大,从而导致等效应力再逐渐增大。由图 6k~图 6m 可知,随传热系数增加,管坯整体上的等效应力逐渐增大,管坯的等效应力变化主要集中于管坯表面处。这是因为在凝固过程中管坯的表面最先凝固,所以传热系数的变化对管坯内部应力场的变化影响不明显。

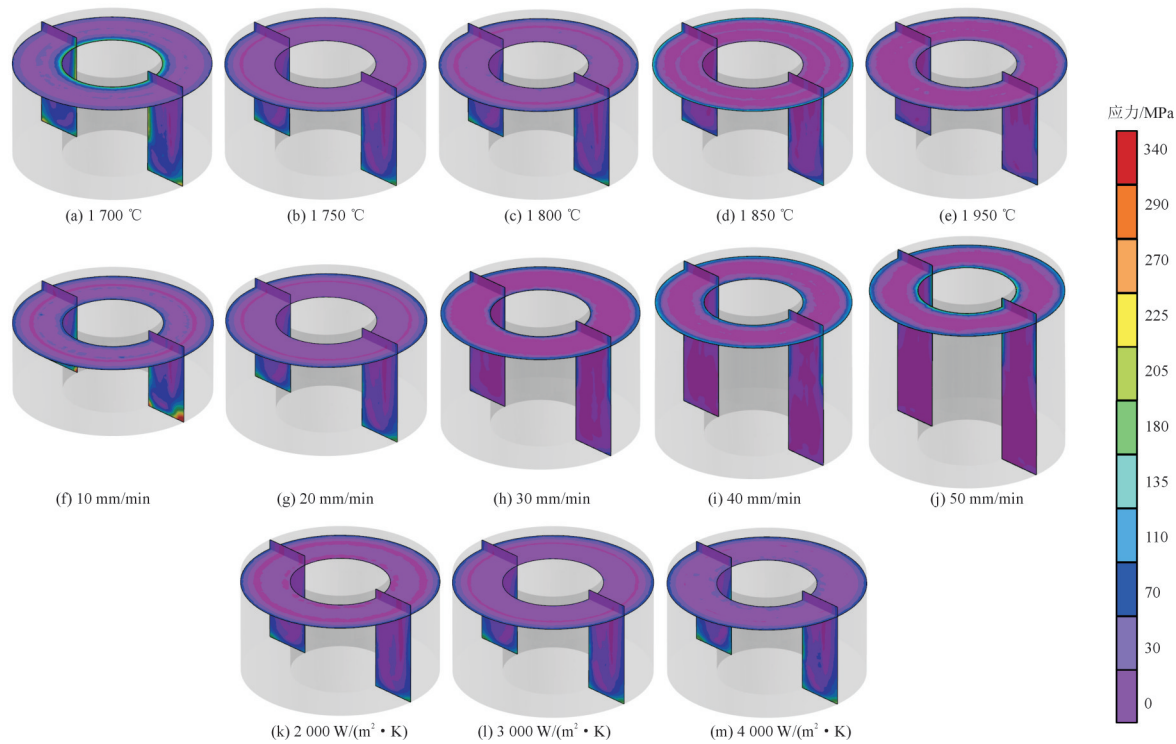


图 6 不同工艺参数下 TA18 合金管坯等效应力分布

Fig.6 Equivalent stress distribution of tube billets with different process parameters

根据单个工艺参数对熔铸 TA18 钛合金管坯的影响,以管坯的晶粒尺寸为评价标准,选用合适的工艺参数进行正交试验,得出最优的工艺参数。正交模拟试验参数见表 3,结果见表 4,其中 k 为各因素下水平 3 次的晶粒尺寸的和, R 为各因素下 k 的极差。根据表 4 可知,3 个因素对平均晶粒尺寸的影响程度为传热系数 > 浇注温度 > 拉坯速度。这表明在熔铸 TA18 钛合金管坯的过程中,传热系数是对管坯晶粒尺寸影响最为显著的因素,其次是浇注温度,拉坯速度对管坯晶粒尺寸的影响最小。虽然,当工艺参数选择浇注温度为 1 750 °C、传热系数为 3 000 W/(m²·°C)、拉坯速度为 40 mm/min 时,管坯的晶粒尺寸最小。但是,当浇注温度过低和冷却强度过大时,由于管坯在凝固过程中溶质流动性不足,容易导致管坯的内部出现缩孔、缩松等质量缺陷。因此,最佳的工艺参数选择是浇注温度为 1 850 °C,传热系数为 3 000 W/(m²·°C),拉坯速度为 30 mm/min。

表 3 正交试验因素与水平

Tab.3 Factors and levels of orthogonal test

水平	浇注温度/°C	传热系数/ (W·m ⁻² ·°C ⁻¹)	拉坯速度/ (mm·min ⁻¹)
1	1 750	2 000	20
2	1 850	3 000	30
3	1 950	4 000	40

表 4 正交试验结果

Tab.4 Orthogonal test results

编号	浇注温 度/°C	传热系数/ (W·m ⁻² ·°C ⁻¹)	拉坯速度/ (mm·min ⁻¹)	晶粒尺 寸/mm
1	1	1	1	84
2	1	2	3	40
3	1	3	2	55
4	2	1	3	116
5	2	2	2	78
6	2	3	1	57
7	3	1	2	112
8	3	2	1	90
9	3	3	3	71
k_1	179	312	231	—
k_2	251	208	245	—
k_3	273	183	227	—
R	94	129	18	—

2.2 力学性能

根据优化的工艺参数,开展电子束冷床炉熔铸TA18钛合金管坯试验,成功熔铸出 $\phi 200\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ (壁厚) $\times 300\text{ mm}$ TA18钛合金管坯,并对熔铸后的管坯进行力学性能和硬度测试。将熔铸后的TA18钛合金管坯加工出3组拉伸试样,其中2组试样随加热炉分别升温至 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温 60 min ,随炉自然冷却。不同热处理温度下TA18钛合金管坯的力学性能见表5。由表5可知,铸态和经过热处理之后管坯的抗拉强度和屈服强度满足GB/T 3624-2023,但热处理后管坯的力学性能相对于铸态提升不明显,且其伸长率不满足GB/T 3624-2023。这是因为经过电子束冷床炉熔铸出的管坯的晶粒尺寸较大,其晶界相对较少,这使得热处理过程中的原子扩散和相变反应受到限制,热处理效果不显著。

表5 TA18钛合金管坯力学性能

Tab.5 Mechanical properties of TA18 titanium alloy billet			
试样状态	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
铸态	601	732	10.5
650℃	606	738	13.5
700℃	609	741	10.0

为探究熔铸的TA18钛合金力学性能的均匀性,对熔铸的管坯沿着横截面的周向和径向进行洛氏硬度(HRB)测试,硬度测量结果见表6。可以看出,熔铸的管坯的硬度(HRB)为 $84.0\sim 92.8$,其平均值为 88.6 ,这表明熔铸管坯的硬度分布在横截面上比较均匀。尽管直接熔铸的TA18钛合金管坯在抗拉强度、伸长率和屈服强度等指标上与国家标准存在一定差距,但硬度分布比较均匀,没有出现明显的硬度低谷或峰值。因此,熔铸的管坯的力学性能具有良好的均匀性和稳定性,为其在后续加工和使用过程中提供了良好的基础。

表6 不同位置的硬度测试结果

Tab.6 Hardness test results at different positions									
硬度(HRB)									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	均值
86.0	88.0	84.0	90.7	92.8	89.7	90.3	86.0	89.8	88.6

2.3 微观组织和化学成分

TA18钛合金管坯沿横截面的周向和径向的微观组织见图7。可以看出,管坯横截面上不同位置的微观组织均为片状($\alpha+\beta$)+晶界 α ,且晶界明显可见。晶粒由许多不同方向排列的集束组成,集束是从晶界处向内部生长,形成了典型的魏氏组织,未发现组织缺陷。这些集束内含 α 相片状结构,且 α 相片间距分布均匀。

因此,熔铸的管坯在周向和径向上分布的组织具有良好的均匀性。

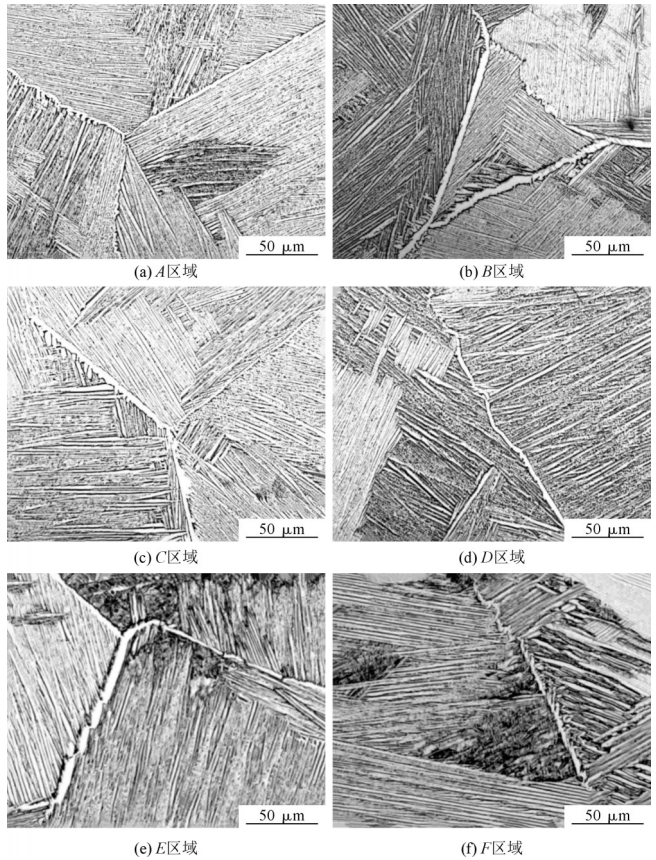


图7 管坯横截面上不同位置的微观组织

Fig.7 Microstructure of cross section of billet at different positions

为探究熔铸的TA18钛合金化学成分的均匀性,对熔铸的管坯沿着横截面的周向和径向进行化学成分测试,结果见表7。可以看出,在管坯横截面的周向和径向上各点元素含量差别较小,所以管坯横截面的周向和径向的元素分布均匀。对比表1和表7可知,直接熔铸出的管坯的各元素的化学成分比例均在合理的范围内。因此,熔铸的管坯的化学成分分布均匀且化学成

表7 管坯化学成分测量结果

Tab.7 Measured chemical composition of pipe billet									%
编号	w_B								
	Ti	Al	V	Fe	C	N	O	H	
1	95.436 1	2.04	2.43	0.020	0.008	0.003	0.062	0.000 9	
2	95.306 1	2.15	2.43	0.021	0.009	0.004	0.079	0.000 9	
3	95.337 1	2.09	2.46	0.020	0.010	0.006	0.076	0.000 9	
4	95.333 6	2.12	2.45	0.019	0.010	0.003	0.064	0.000 4	
5	95.344 4	2.12	2.44	0.020	0.009	0.002	0.064	0.000 6	
6	95.365 3	2.06	2.48	0.021	0.009	0.002	0.062	0.000 7	
7	95.275 5	2.16	2.47	0.021	0.008	0.003	0.062	0.000 5	
8	95.256 5	2.21	2.43	0.023	0.010	0.003	0.067	0.000 5	
9	95.289 4	2.14	2.48	0.021	0.008	0.002	0.059	0.000 6	
均值	95.331 4	2.12	2.45	0.021	0.008	0.003	0.066	0.000 6	

分含量合格。

3 结 论

(1)随浇注温度和拉坯速度增大以及冷却强度减小,熔池和糊状区的宽度逐渐增大,平均晶粒尺寸逐渐增大,管坯整体的等效应力逐渐减小。相对于拉坯速度和冷却强度,浇注温度对熔池形貌的影响最大。

(2)随浇注温度增大,等轴晶和柱状晶占比逐渐增加,表面细晶占比逐渐减小。随拉坯速度增大,等轴晶占比逐渐减少,柱状晶占比逐渐增加。随冷却强度的增大,等轴晶占比逐渐减小,表面细晶占比逐渐增大。

(3)熔铸TA18钛合金管坯优化后的工艺参数是浇注温度为1850℃,传热系数为3000 W/(m²·℃),拉坯速度为30 mm/min。根据优化的工艺参数,成功熔铸出 $\phi 200\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ (壁厚) $\times 300\text{ mm}$ TA18钛合金管坯,熔铸的管坯的力学性能、微观组织和化学成分在周向和径向上分布均匀,平均硬度(HRB)为88.6,平均屈服强度为601 MPa,平均抗拉强度为732 MPa。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 郑超,朱秀荣,王军,等.装甲钛合金的研究与应用现状[J].钛工业进展,2020,37(4):41-48.
- [3] NAJAFIZADEH M, YAZDI S, BOZORG M, et al. Classification and applications of titanium and its alloys: A review [J]. Journal of Alloys and Compounds Communications, 2024, 3: 100 019.
- [4] 杨欢,杨晓康,杜晨,等.钛及钛合金真空熔炼技术研究进展[J].世界有色金属,2019(8):1-4,6.
- [5] 王梓骄,贾雷,苗庆东,等.舰船用钛合金制备技术的研究进展[J].中国冶金,2024,34(6):14-25.
- [6] 李坤,徐志锋,张守银,等.钛合金砂型铸造工艺研究进展[J].特种铸造及有色合金,2023,43(12):1598-1606.
- [7] 李明宇,杨树峰,刘威,等.真空自耗熔炼钛合金的偏析缺陷及控制研究进展[J].中国冶金,2023,33(9):1-10,18.
- [8] 冯寅楠,闫鹏,贾国斌.电子束冷床熔炼的应用现状[J].中国材料进展,2020,39(4):295-303.
- [9] GAO L, HUANG H G, KRATZSCH C, et al. Numerical study of aluminum segregation during electron beam cold hearth melting for large-scale Ti-6Al-4V alloy slab ingots [J]. Int. J. Heat. Mass. Transf., 2020, 147: 118 976.
- [10] LIU Q L, JIANG P, AN F P. Design of crucible size of electron beam cold gearth melting for ultra-long and ultra-thin TC4 ingot [J]. Rare Metal Mat. Eng., 2020, 49(5): 1 476-1 482.
- [11] MA C, CAO W, LIU B H, et al. Simulation prediction of CP-Ti slab ingot solidification structure based on the CAFE method [J]. Int. Commun. Heat. Mass. Transf., 2024, 159: 108 155.
- [12] 雷文光,于兰兰,毛小南,等.电子束冷床熔炼TC4钛合金连铸凝固过程数值模拟[J].中国有色金属学报,2010,20(S1):

381-386.

- [13] 雷文光,于兰兰,毛小南,等.电子束冷床熔炼TC4钛合金铸锭凝固过程有限元模拟[J].铸造,2010,59(9):912-916.
- [14] 张浩泽,余堃,钟海,等.铸坯斜轧穿孔制备大口径TA31钛合金无缝管材[J].兵器材料科学与工程,2022,45(3):35-41.
- [15] 熊汉城,黄海广,李志敏,等.退火温度对大口径TC4合金无缝管组织与性能的影响[J].金属热处理,2019,44(12):107-111.
- [16] 李永林,袁红军,朱宝辉,等.TA18钛合金斜轧管坯组织与性能研究[J].钛工业进展,2014,31(5):23-27.
- [17] 吴聪.TA18钛合金管材三维自由温热弯曲成形机理及工艺优化研究[D].南京:南京航空航天大学,2022.
- [18] 姚燕.TA18钛合金热剪切弯曲变形过程微观组织演变规律研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [19] 李志明,尹延国,方小亮,等.铜钢双金属熔铸过程水冷传热系数的反求及应用[J].热加工工艺,2023,52(24):32-37.
- [20] 沈韶峰,陈忠平,赵栋楠,等.浇注系统模拟优化对铜合金组织的影响[J].有色金属加工,2020,49(5):37-40.
- [21] 王献.电子束冷床炉熔铸TC4钛合金铸锭凝固过程数值模拟研究[D].昆明:昆明理工大学,2020.
- [22] 李伟淑,田智星,钱巍,等.Ti-3Al-2.5V钛合金精密铸造浇注系统优化研究[J].精密成形工程,2018,10(3):154-162.

(编辑:刘晨辉)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国60年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺1001大厦10楼

邮编:430015

电话:027-85358206,85486024,

85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

