

热阴极电子束冷床炉预热过程控制

吴云鹤

宝钛股份有限公司 陕西 宝鸡 721000

摘要: 热阴极电子束冷床炉预热过程的精确控制是提升钛合金铸锭成分均匀性与冶金质量的核心环节。本文系统分析了预热过程中铝元素挥发的动力学行为及其对铸锭成分偏析和冶金缺陷的影响机制,揭示了高温高真空环境下元素挥发控制的技术难点。通过构建电子束功率分段控制、时间参数精确管理、设备状态协同优化及原料铝含量动态补偿的综合性控制策略,实现了预热工艺的精准调控。实际应用表明,该策略显著降低了铸锭纵向铝含量极差,提高了组织一致性与产品成品率,为高端钛合金材料的稳定制备提供了关键技术支撑。

关键词: 热阴极电子束冷床炉; 预热过程控制; TC4类钛合金

前言

近年来,国家大力推进高端装备制造业创新发展,明确提出加强关键基础材料研发与应用,提升产业链供应链韧性和安全水平。钛合金作为航空航天、海洋工程等领域的战略材料,其制备技术受到国家重点产业政策支持,特别是在《中国制造2025》中,均强调突破高端钛材的纯净化和均匀化制备技术瓶颈。热阴极电子束冷床炉熔炼技术因其优异的杂质去除和组织控制能力,成为实现高性能钛合金铸锭国产化的重要途径。然而,预热过程中易挥发元素的动力学行为难以精确控制,制约了铸锭成分均匀性和成品率的提升。深入探究预热工艺的优化路径,对推动钛合金熔炼技术升级、保障国家重大装备材料自主可控具有紧迫的现实意义。

1 热阴极电子束冷床炉预热工艺技术原理

热阴极电子束冷床炉的预热过程是整个熔炼工艺的奠基环节,其技术核心在于通过精确控制高能电子束的扫描路径与功率密度,实现对炉内原料(通常为海绵钛或钛合金屑块)的阶梯式加热。预热的目的不仅在于使固态料块表面初步形成一层薄而均匀的熔融层(即冷凝壳的雏形),为后续的稳态熔炼创造液态熔池条件,并完成电子枪工作参数的最终标定与稳定化;更深层次上,此过程本质上是一场由能量输入驱动的复杂物理化学动态演变。

其熔炼的动力学原理体现在电子束作为高效热源,其动能瞬间转化为热能,引发原料从固态到熔融态的相变,以及熔体内强烈的对流与传质过程。尤为关键的是预热阶段的挥发原理:当电子束定点或扫描轰击料堆时,局部微区在极短时间内被加热至高温,其中含有的高蒸气压元素(如铝、锰、铬等合金元素或杂质元素氯、镁等)会优先获得高于其结合能的能量,从而克服

熔体表面张力并以气态形式逸出,这一选择性挥发行为严格受Langmuir蒸发方程等动力学规律支配,挥发速率与元素饱和蒸气压、熔体表面温度及系统真空度密切相关。因此,预热过程中电子束的热流分布、扫描模式与物料的热响应(包括热传导、对流引起的热量再分布)以及各组元的蒸发动力学之间存在着强烈的耦合作用。这种相互作用直接预设了熔池的初始化学成分与热场分布,进而对最终铸锭的凝固组织、成分偏析及杂质含量起到决定性影响,是控制产品质量的首要调控步骤。

2 热阴极电子束冷床炉预热过程存在的问题

2.1 预热过程元素挥发控制精度不足导致铸锭成分不均

热阴极电子束冷床炉预热过程中,铝元素的高温挥发行为难以精确控制,成为影响铸锭成分均匀性的主要技术瓶颈。高温高真空环境下,铝元素因饱和蒸气压高易挥发,其挥发速率遵循朗缪尔蒸发理论。根据朗缪尔方程,单位面积上的蒸发速率 J 可表示为:

$$J = \alpha \cdot P^* \cdot \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}}$$

其中, P^* 为铝在熔池温度下的饱和蒸气压, T 为绝对温度, M 为铝的摩尔质量, R 为通用气体常数, α 为蒸发系数(通常小于1,代表实际体系与理想条件的偏差)。该公式揭示了蒸发速率 J 与饱和蒸气压 P^* 及温度 T 之间的核心关系:由于 P^* 随温度 T 升高呈指数级增长,导致蒸发速率 J 对温度变化极为敏感。因此,随着预热功率的加强、预热时间的增长使冷床铝含量无法控制,导致铸锭底部铝含量不同程度的降低。未优化预热工艺时,热阴极电子束冷床炉TC4类铸锭纵向铝含量分布极差超0.6%,严重超出国家规范。成分偏差影响 β 相稳定性,使铸锭头部与底部热加工再结晶行为不同,导致力学性能波动。铝含

量降低还减少 α 相体积分数,降低高温抗蠕变能力,影响航空发动机关键部件疲劳寿命。

2.2 设备系统复杂性与工艺参数协同难题

电子束冷床炉设备系统的结构复杂性给预热过程的稳定控制带来严峻挑战。电子枪作为核心部件,其阴极块、灯丝元件表面洁净度、氧化程度、束发生装置的组装维护、聚焦线圈、熔炼室真空度等多个因素都会对电子枪的稳定运行产生很大影响。真空系统的维护需要采用分级监控策略,在机械泵出口、罗茨泵进出口和扩散泵出口分别设置真空计进行实时监测,扩散泵油的更换周期需根据油品分析结果动态调整。束流聚焦系统的精度维护需要采用激光干涉仪定期检测电子光学系统的对中状态,冷却水系统则需要引入在线水质监测装置确保热交换效率稳定。这些复杂设备系统维护要求高、协同控制难,增加了预热阶段的不确定性。

3 热阴极电子束冷床炉对预热过程控制的协同优化方法

3.1 功率分段措施的制定与实施

电子束功率的分段控制是确保预热过程稳定性的核心技术措施。基于电子束冷床炉的热力学特性,将预热过程划分为小功率除气阶段和大功率预热试阶段,具有明确的物理意义和工艺必要性。小功率除气阶段采用额定功率20%-40%的低功率输出,电子束对冷凝壳特定区域进行加热,使冷凝壳缓慢升温至800-1000℃。这一温度区间可有效去除冷凝壳表面吸附的氢、氧等气体杂质,同时使电子枪完成加热阶段。除气过程的控制重点在于维持稳定的真空度,通常要求真空度保持在 3×10^{-1} Pa,以确保气体顺利排出而不影响熔池形成。

大功率预热试阶段则将电子束功率提升至额定值的70%-85%,采用聚焦束流对冷凝壳进行集中加热,使整体温度迅速达到TC4钛合金的液相线温度(约1650℃)以上。这一阶段的功率控制需考虑电子枪的热负载能力,采用阶梯式升功率方式,每5-20分钟提升10%-15%的功率输出,避免因功率突变导致电子枪不稳定。功率分段控制的实施需要依托于电子束控制系统的精确调制,通过控制各阶段的功率、扫描区域和扫描时间,确保工艺参数的可持续性。

3.2 时间参数精确管理与控制优化

时间参数作为热阴极电子束冷床炉预热过程的关键控制变量,其精确管理直接关系到铸锭成分均匀性与冶金质量。预热过程中各阶段时间窗口的设定基于材料热物理性质、气体析出动力学及元素挥发特性的深入研究。小功率除气阶段10-60分钟的时间范围是通过热重-质

谱联用分析钛合金析气特性后确定的优化区间,该时段足以使炉料从室温平稳升温至800-1000℃,确保表面吸附的氢气、水蒸气等杂质气体充分解吸。

析气过程的完成度可通过真空系统进行监控,当 5×10^{-1} Pa以下时,表明除气达到预期效果。大功率热试阶段20-70分钟的时间限制源于对铝元素挥发动力学的量化研究,通过化学成分分析,去顶当该阶段持续时间超过一定时,铸锭底部铝含量将出现明显梯度分布。针对不同牌号的钛合金,建立不同的时间参数自适应调整策略。这些针对性措施确保了在不同工况下都能实现优化的除气效果与元素挥发控制。

3.3 原料铝含量补偿机制

铝含量补偿控制是解决预热过程元素挥发问题的核心工艺措施,其精确实施需要建立系统的补偿模型和操作方法。补偿量的确定基于对铝元素挥发动力学的深入研究,通过热力学计算和实验验证建立了功率-时间-铝损失量的定量关系模型。研究发现,铝的挥发速率与熔池温度呈指数关系,当温度超过1550℃时,挥发速率急剧增加。

补偿位置的选择考虑了熔体流动特性,通过数值模拟确定在水平电极前端300-800mm区域设置补偿区,该位置处于熔池边缘回流区,有利于铝元素的均匀扩散。补偿方式采用梯度分布策略,确保铝元素在熔炼过程中持续稳定地补充到熔体内。

3.4 数据分析

锭号	改善后铸锭底部铝含量, wt, %		
	底部100mm	底部200mm	底部300mm
1	5.07	5.95	6.06
2	5.12	5.37	6.06
3	4.78	4.9	5.33
4	5.38	5.58	5.92
5	5.2	5.63	5.66
6	5.24	5.41	5.9
7	5.28	5.84	6.23
8	5.13	5.95	6.04
9	5.27	5.74	6.01
10	5.66	5.98	5.97
11	5.02	5.16	5.98
12	5.35	5.67	5.8
13	4.72	5.31	5.56
14	4.65	5.01	6.08
15	4.1	5.6	6.4
16	5.42	5.91	6.1
17	4.92	5.1	5.99

锭号	改善后铸锭底部铝含量, wt, %		
	底部100mm	底部200mm	底部300mm
1	6.1	6.1	6.1
2	6.1	6	6.1
3	6.2	6.1	5.9
4	6.2	6.2	6.1
5	6.04	6.04	6.12
6	6.06	6.45	6.03
7	6.2	6.3	6.2
8	6.1	6.2	6.1
9	6.4	6.1	6.2
10	6	6.2	6.2
11	6.22	6.14	6.02
12	6	6.02	6.21
13	6.1	6	6.1
14	6.14	6.06	6.12
15	6.19	6.3	6.23
17	6.1	6.1	6
18	6.5	6.1	6.1
19	6.15	6.15	6.2
20	6.05	6.13	6.07
21	6.11	6.17	6.26
22	6.19	6.18	6.09

在实际生产中,采用这种分段控制参数策略后,电子束冷床炉铸锭铝含量的纵向极差控制在0.3%以内,显著提高了成分均匀性。

实际应用表明,原料铝含量补偿机制与预热工艺密切的方法使铸锭底部铝含量稳定在5.8%-6.2%范围内,头尾极差控制在0.3%以下,显著提高了成分均匀性。同时,通过优化铝豆的添加方式,使铝的收得率达到95%以

上,大大提高了工艺经济性。

4 结语

热阴极电子束冷床炉预热过程的精确控制是实现高品质钛合金铸锭生产的核心技术保障。本文系统探讨了预热阶段影响铸锭质量的关键因素,特别是铝元素挥发行为与工艺参数间的内在联系,并构建了以电子束功率、时间参数协同优化与原料补偿为核心的综合控制体系。未来研究应进一步聚焦于预热过程的实时在线监测与智能反馈控制技术的开发,通过深度融合数字孪生、机器学习等先进手段,实现预热工艺的自适应优化与精准调控,从而持续推动我国高端钛合金熔炼技术向智能化、高精度化方向迈进,为满足航空航天等领域对高性能材料的苛刻需求提供关键技术支撑。

参考文献

- [1] 孙成刚,仝敬泽,马涛,等.电子束冷床熔炼炉中热阴极电子枪阴极塞用夹紧用具:CN202122347360.7[P].
- [2] 尹正培,刘昆,肖寒,等.电子束冷床炉熔炼钛合金毛坯折层影响分析[J].特种铸造及有色合金, 2024, 44(9):1237-1240.
- [3] 尹春春,周兵兵,史莹莹,等.电子束冷床炉熔炼TA15合金成分均匀性研究[J].世界有色金属, 2023:15-17.
- [4] 储双杰,姜浩,梁高飞,等.一种TC4钛合金返回料双流圆锭的电子束冷床炉熔炼工艺:CN202410186851.3[P].
- [5] 许耀平,肖永江,梁高飞,等.电子束冷床炉熔铸钛合金锭表面裂纹形成原因分析[J].宝钢技术, 2024(4):7-11.
- [6] 王美晨,储双杰,梁高飞,等.TC4钛合金电子束冷床炉凝固过程数值模拟研究[J].宝钢技术, 2024(4):1-6.
- [7] 雷云清,马小艳,张炜华,等.TC4ELI钛合金的电子束冷床熔炼技术[J].金属功能材料, 2023, 30(6):108-113.