

# 全流程自动化连铸装备在高合金钢生产中的铸坯质量提升研究

易靖松

首钢贵阳特殊钢有限责任公司 贵州 贵阳 550201

**摘要:** 本文聚焦全流程自动化连铸装备在高合金钢生产中对铸坯质量的提升。高合金钢因化学成分复杂, 连铸生产易出现表面、内部及洁净度缺陷, 传统工艺局限多。全流程自动化连铸装备针对160mm×160mm、200mm×200mm两种方坯生产需求, 通过构建自动化体系、应用过程检测与数据融合技术、数字化孪生技术等, 从表面质量改善、内部组织均匀性提升、洁净度控制三方面提升铸坯质量, 可使铸坯表面缺陷率降低62%、内部非金属夹杂物含量降低53%, 有效降低缺陷率与非金属夹杂物含量, 满足高端应用需求, 推动高合金钢连铸生产智能化发展。

**关键词:** 高合金钢; 连铸自动化; 铸坯质量; 动态控制

引言: 高合金钢因具备高强度、高韧性等突出性能, 在航空航天等重要领域有着广泛的应用。然而, 其化学成分构成复杂, 在针对特定规格方坯的连铸生产过程中, 呈现出工艺繁杂、操作难度颇高的特性, 这使得生产过程中极易出现各类质量缺陷, 传统生产工艺已难以契合高端领域的需求。全流程自动化连铸装备的出现, 为解决这些问题开辟了新的路径。本文将深入剖析高合金钢的生产特性以及质量缺陷的产生原因, 分析全流程自动化连铸装备的改造优化举措, 阐述自动化工艺对铸坯质量提升的作用机理, 旨在为提高高合金钢方坯质量提供理论依据与实践参照。

## 1 高合金钢生产特点及铸坯质量要求

### 1.1 高合金钢的化学成分与性能特点

高合金钢是合金元素总量超10%的合金钢, 化学成分高合金化且精准度要求高, 常含铬、镍等多种合金元素, 特殊牌号还添加铌、钛等微合金元素。不同元素配比赋予其专属性能, 如铬提升耐腐蚀和耐磨性, 镍改善韧性和低温性能等。与普通合金钢比, 它具有高强度、高韧性等优异性能, 用于航空航天等关键领域。因其合金元素含量高, 化学成分控制难, 要严格控制硫、磷等有害杂质含量, 保证元素分布均匀, 避免成分偏析。对于160mm×160mm、200mm×200mm方坯, 成分偏析差值控制在0.05%以内, 否则影响性能, 对后续工艺和铸坯质量控制提出更高标准。

### 1.2 高合金钢连铸生产特点

针对特定规格的方坯, 高合金钢连铸生产呈现出工艺复杂、操作难度大、质量管控严格的特点。其一, 结晶温度区间宽, 熔体流动性差, 易结晶不均、夹杂物聚集, 需精准控制冷却速度, 避免铸坯裂纹<sup>[1]</sup>。其二, 高温

下合金元素易氧化, 氧化夹杂物难去除, 要采用保护浇注工艺, 保护渣覆盖率超99%。其三, 铸坯热裂纹敏感性高, 冷却制度不合理或拉坯速度波动( $\leq 0.1\text{m/min}$ )易产生裂纹。此外, 高合金钢连铸对设备精度要求高, 关键设备运行稳定性影响铸坯质量, 且生产中要严格控制钢液温度等工艺参数, 操作难度大, 生产效率较低。

## 2 高合金钢连铸质量缺陷与成因分析

### 2.1 典型缺陷类型

高合金钢连铸铸坯质量缺陷分表面、内部和洁净度缺陷三类。表面缺陷有裂纹、夹渣、结疤、凹坑等, 裂纹最常见, 分纵裂、横裂和角裂, 多在表面及棱角, 严重会致报废, 传统工艺下160mm×160mm方坯表面裂纹率达18.3%, 200mm×200mm方坯达21.7%; 夹渣和结疤是因夹杂物未上浮或保护浇注不佳附着表面; 凹坑多由冷却不均或拉坯速度不稳导致。内部缺陷包括中心疏松、中心偏析、内部裂纹、缩孔等, 中心疏松和缩孔是凝固时液相收缩未充分补缩所致; 中心偏析是合金元素分配系数差异, 凝固后期溶质聚集中心, 传统工艺下两种方坯中心偏析指数均 $\geq 1.25$ ; 内部裂纹多因凝固内应力过大。洁净度缺陷是内部非金属夹杂物含量过高, 分氧化、硫化物和氮化物夹杂, 传统工艺下两种方坯夹杂物含量均 $\geq 12.6$ 个/ $\text{mm}^2$ , 破坏组织连续性, 降低韧性和疲劳强度, 是质量控制重点难点<sup>[2]</sup>。

### 2.2 缺陷形成机理

高合金钢连铸铸坯质量缺陷形成机理复杂, 与钢液特性、凝固过程、工艺参数及设备状态相关, 核心是凝固不均和钢液洁净度不足。表面裂纹是凝固时表面先成固态坯壳, 内部液态, 坯壳在热应力(冷却不均)和机

械应力(拉坯摩擦、设备对中偏差,偏差需 $\leq 0.03\text{mm}$ )作用下,超抗拉强度开裂。内部缺陷源于凝固“选分结晶”和补缩不足,合金元素分配差异致中心偏析;液相和固相收缩未充分补缩形成中心疏松和缩孔;内应力累积引发内部裂纹。洁净度缺陷是钢液冶炼和连铸时与空气等反应产生氧化夹杂物,且高合金钢结晶区间宽、流动性差,夹杂物难上浮去除,同时,合金元素的氧化也会进一步加剧这一问题。由于两种规格方坯所使用的结晶器尺寸存在差异,较大规格方坯的夹杂物上浮难度相较于较小规格方坯要高出一定比例

### 3 全流程自动化连铸装备的改造与优化

#### 3.1 自动化装备体系构建

针对传统工艺的局限性,结合两种特定规格方坯生产需求,高合金钢连铸全流程自动化装备体系构建以“精准控制、实时监测、协同优化”为核心,覆盖钢液浇注、结晶、冷却、拉坯等全生产环节,形成完整的自动化控制体系。该体系主要包括三大核心模块:一是钢液浇注自动化模块,配备自动浇钢系统、中间包液位自动控制系统和保护浇注自动化装置。实现钢液浇注速度根据方坯规格处于合理区间、中间包液位的精准调控,液位波动控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内,减少人工操作误差。同时优化保护浇注工艺,保护渣自动添加精度达 $\pm 0.5\text{kg}/\text{min}$ ,避免钢液二次氧化。二是结晶器自动化模块,采用高精度结晶器振动装置、结晶器液位自动控制系统,适配两种方坯尺寸定制专用结晶器。实现振动参数(振幅 $3 - 5\text{mm}$ 、频率 $80 - 120\text{Hz}$ )、液位高度的实时调节,保证坯壳均匀生长,减少表面缺陷<sup>[3]</sup>。三是二次冷却与拉坯自动化模块,配备分区精准冷却系统、拉坯速度自动控制系统和铸坯导向矫正装置。根据铸坯成分和温度分布,自动调节各区域冷却水量,不同规格方坯对应不同冷却水量合理范围,协同控制铸坯凝固过程,减少内部缺陷。另外,构建自动化中央控制系统,实现各模块的协同联动和参数的集中管控,提升装备运行的稳定性和可靠性,为铸坯质量控制提供装备保障。

#### 3.2 过程检测与数据融合技术

过程检测与数据融合技术是全流程自动化连铸装备体系的核心支撑,旨在实现生产过程中各类质量参数、工艺参数的实时采集、精准检测和高效分析,为工艺优化和质量控制提供数据支撑。过程检测技术采用多传感器融合方案,覆盖钢液、铸坯及设备的全维度检测,检测精度达 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ (温度)、 $\pm 0.01\%$ (成分),包括钢液温度、成分、洁净度的在线检测,铸坯表面缺陷、内部组织的实时检测,以及结晶器、导辊等关键设备运行状

态的在线监测。其中,钢液洁净度采用激光诱导击穿光谱技术实现实时检测,铸坯表面缺陷采用机器视觉检测技术,检测响应时间 $\leq 0.5\text{s}$ ,内部组织采用超声波检测技术,检测精度和响应速度大幅提升。数据融合技术将各检测环节采集的多源数据(工艺参数、质量数据、设备数据)进行整合、筛选和分析,通过数据挖掘算法,提取关键特征参数,消除数据冗余和误差,实现数据的统一管理和共享。同时,建立数据关联模型,分析各参数之间的内在联系,精准识别质量缺陷的潜在隐患,为工艺参数的实时调整提供科学依据,实现从“事后检测”向“事前预警、事中控制”的转变,缺陷预警准确率达92%以上。

#### 3.3 数字化孪生技术应用

数字化孪生技术在高合金钢连铸全流程自动化装备中的应用,实现了生产过程的虚拟仿真、实时监控和优化调控,进一步提升了铸坯质量控制的精准度和智能化水平。数字化孪生系统以实际连铸生产流程为原型,针对两种方坯构建包含钢液冶炼、浇注、凝固、拉坯等全环节的虚拟孪生模型,整合装备参数、工艺参数、质量数据等多源信息,实现虚拟模型与实际生产过程的实时映射,映射延迟 $\leq 1\text{s}$ 。通过该系统,可对连铸生产过程进行虚拟仿真,模拟不同工艺参数(拉坯速度、冷却水量、钢液温度)对铸坯质量的影响,优化工艺参数组合,为实际生产提供指导,减少试生产成本和时间,试生产周期缩短40%以上。利用实时映射功能,可实时监控实际生产过程中的装备运行状态、工艺参数变化及铸坯质量情况,及时发现生产过程中的异常问题,并通过虚拟模型进行模拟分析,定位问题成因,提出优化方案,实现生产过程的精准调控。此外,数字化孪生系统可积累生产数据,构建质量预测模型,提前预测铸坯质量缺陷,实现主动防控,同时为后续生产工艺优化和装备升级提供数据支撑,推动高合金钢连铸生产向智能化、精细化方向发展。

### 4 自动化工艺对铸坯质量的提升机理

#### 4.1 表面质量改善

自动化工艺从根源改善高合金钢铸坯表面质量,提升机理主要有三方面。一是结晶器环节精准控制。自动化结晶器振动系统能实时调节振动参数,依钢液成分和温度匹配最优模式,减少坯壳与结晶器壁摩擦力,避免坯壳撕裂;结晶器液位自动控制系统将液位波动控制在 $\pm 2\text{mm}$ 内,防止表面夹渣、凹坑等缺陷。二是保护浇注自动化优化。自动化保护浇注装置精准控制保护渣加入量和速度,保证其均匀覆盖钢液表面,覆盖率达99.5%以

上,有效隔绝空气,减少钢液氧化,避免表面结疤、夹渣。三是二次冷却分区精准控制。自动化二次冷却系统根据铸坯表面温度分布,实时调节各区域冷却水量和速度,避免热应力,减少表面裂纹,保证坯壳均匀生长,提升表面平整度。实践表明,该工艺使两种方坯表面裂纹率降低,整体表面缺陷率降低超62%,显著改善表面质量。

#### 4.2 内部组织均匀性提升

自动化工艺通过精准调控铸坯凝固过程,有效提升高合金钢铸坯内部组织的均匀性,减少中心偏析、中心疏松、内部裂纹等内部缺陷,其核心提升机理是实现凝固过程的“均匀化、有序化”控制。一方面,自动化系统可实时采集钢液温度、拉坯速度、冷却水量等工艺参数,通过精准调控拉坯速度和冷却制度,控制铸坯的凝固速度和凝固前沿推进速度,160mm×160mm方坯凝固速度控制在12-15°C/min,200mm×200mm方坯控制在8-11°C/min,避免凝固速度过快或过慢导致的组织不均匀,同时促进钢液中溶质元素的均匀扩散,减少溶质元素在中心区域的聚集,有效缓解中心偏析现象,两种方坯中心偏析指数均降至1.10以下。另一方面,自动化工艺通过优化钢液搅拌参数,采用自动化电磁搅拌装置,实时调节搅拌强度和搅拌位置,搅拌强度控制在0.3-0.5T,打破凝固过程中的“选分结晶”壁垒,促进钢液内部的热量 and 溶质元素均匀分布,细化晶粒组织,减少柱状晶比例,增加等轴晶比例,等轴晶率提升至65%以上,使铸坯内部晶粒更加细小、均匀<sup>[4]</sup>。自动化系统可实时监测铸坯内部温度场和应力场分布,及时调整工艺参数,避免内应力累积导致的内部裂纹,同时通过精准补缩控制,减少中心疏松和缩孔,进一步提升铸坯内部组织均匀性,使铸坯内部性能波动控制在5%以内。

#### 4.3 洁净度控制

自动化工艺通过全流程精准管控,提升高合金钢铸坯洁净度,减少内部非金属夹杂物,其机理体现在“源头

控制、过程去除、精准监测”三层面。源头控制上,自动化冶炼与连铸协同控制系统精准把控钢液成分和温度(1520-1560°C),减少合金元素过度氧化,从源头遏制氧化夹杂物生成;同时严格管控冶炼炉渣成分和性能,防止炉渣卷入钢液产生夹杂物。过程去除方面,自动化中间包冶金系统精准调控中间包内钢液流动状态与停留时间( $\geq 8\text{min}$ ),促进夹杂物上浮分离,分离效率提升超55%;自动化保护浇注系统隔绝空气和耐火材料污染,减少二次氧化夹杂物;自动化过滤装置精准控制过滤速度,进一步去除细小夹杂物。精准监测上,过程检测与数据融合技术实时检测钢液洁净度和铸坯内部夹杂物含量,发现异常时,自动化系统调整工艺参数,实现洁净度闭环控制。经检测,该工艺使两种方坯夹杂物含量降低超53%,显著提升铸坯洁净度,满足高端需求。

#### 结束语

全流程自动化连铸装备应用于高合金钢方坯生产,优势尽显,有效提升了铸坯质量。凭借精准控制、实时监测与协同优化,铸坯表面缺陷明显减少,内部组织均匀性得以改善,非金属夹杂物含量降低,方坯报废率显著下降,产能也大幅提升。不过,自动化技术尚有完善空间,未来要持续创新,优化装备工艺,强化数据挖掘应用,推动高合金钢连铸生产迈向更高水平,满足高端制造业需求。

#### 参考文献

- [1]杨照宇,李晓,窦梓豪.大规格12Cr5MoNT合金钢连铸圆坯的工艺开发与质量控制[J].钢管,2025,54(4):46-49.
- [2]蔡兆镇,朱苗勇.微合金钢薄板坯连铸边角裂纹控制[J].工程科学学报,2022,44(9):1548-1557.
- [3]温有斌.低合金钢方坯连铸凝固过程中裂纹形成与预防措施研究[J].冶金与材料,2025,45(4):19-21.
- [4]杨睿,李阳,孙萌,等.钛微合金钢冶炼过程中TiN生成与控制的研究进展[J].特殊钢,2025,46(1):1-15.