

结晶器振动参数对铸坯表面质量影响

李明新

(唐钢国际工程技术有限公司, 河北 唐山 063000)

摘要 连铸坯表面质量直接决定产品合格率与生产效率, 结晶器振动参数是调控该质量的核心因素, 为消解参数匹配失当诱发的振痕、裂纹等缺陷, 针对 250 mm×280 mm 大方坯、覆盖高中低碳钢, 依托控制变量法布设多组振动参数试验, 整合热酸洗、超声波探伤等评价手段, 高碳钢适配正弦振动(频率 137~147 min⁻¹、NSR37%), 中低碳钢选用非正弦振动(偏斜率 0.1), 对应轧材探伤合格率可提升至 93.61%, 该参数优化方案旨在为连铸生产提质增效提供参考。

关键词 结晶器振动参数; 铸坯表面质量; 参数优化; 连铸生产; 缺陷控制

中图分类号: TG23

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.002

0 引言

结晶器振动作为连铸生产核心环节, 其参数直接影响铸坯脱模、润滑效果及表面缺陷生成。当前高效连铸对铸坯质量诉求持续攀升, 振动参数与钢种、拉速适配度不足, 常引发振痕加剧、裂纹等问题。立足绿色高效发展理念, 精准调控振幅、频率、负滑率等参数, 结合不同钢种凝固特性优化振动形式, 可从根源改善铸坯表面质量。依托试验数据揭示参数影响机理, 建立分钢种参数适配体系, 为连铸工艺优化提供实践指导。

1 结晶器振动原理及主要振动参数

1.1 结晶器振动的基本原理

结晶器振动通过周期性往复运动协调铸坯脱模与润滑作用, 为铸坯稳定凝固提供保障。振动过程中结晶器与凝固坯壳产生相对运动, 负滑脱阶段结晶器下振速度高于拉坯速度, 对坯壳施加压应力, 促进拉裂部位愈合并抑制振痕加剧; 正滑脱阶段结晶器上振速度低于拉坯速度, 形成的负压有利于保护渣流入间隙, 形成均匀液态渣膜, 降低坯壳与结晶器壁摩擦阻力, 规避粘连漏钢^[1]。正弦振动依托偏心轮驱动, 运动平稳、设备磨损小; 非正弦振动通过波形偏斜率调节运动轨迹, 控制负滑脱与正滑脱时间, 更适配高拉速生产, 两种振动形式可兼顾坯壳愈合、脱模效率与表面质量。

1.2 主要振动参数及其物理意义

振幅是结晶器振动的最大位移幅度, 直接决定液面波动程度与坯壳受力状态。针对 250 mm×280 mm 大方坯, 合理振幅可有效控制液面波动, 降低坯壳拉裂

风险, 并在高频率配合下将振痕深度控制在理想范围, 其取值需与铸坯断面相匹配, 大方坯生产中通常依据振程与拉速的比例关系设定^[2]。振动频率是单位时间内的振动周期数, 与拉速密切相关, 其计算公式为 $f=C_3+C_4 \times V_c$, 其中 C_3 为振频常数、 C_4 为振频系数。低碳钢拉速 2.0 m/min 时, 频率 150 min⁻¹ 配合 ± 4.0 mm 振幅可优化表面质量。负滑率包括速度负滑脱率(NS) 和时间负滑脱率(NSR), NS 一般取 30%~40%, NSR 在 37% 左右可保证有效脱模, 高碳钢中将 NSR 由 39% 调整至 37% 后, 铸坯表面裂纹明显消除, 轧材探伤合格率显著提升。

2 试验条件与研究方法

2.1 连铸机及工艺条件

试验采用 250 mm×280 mm 断面大方坯连铸机, 结晶器振动系统由镗目厂家提供, 采用电液伺服驱动模式, 其核心驱动装置结构如图 1 所示, 包含伺服电机、差动调节装置及振动发生装置, 可实现正弦与非正弦两种振动形式切换, 振幅调节范围 0~10 mm, 振动频率 0~400 c.p.m, 偏斜率 0~40%, 满足多工艺参数组合试验需求。在连铸过程中, 钢水经中间包通过浸入式水口注入结晶器, 结晶器有效长度 700 mm, 二冷区采用喷淋冷却方式, 冷却水量根据钢种调整。试验涵盖高碳钢(含 C 量 > 0.55%)、中碳钢(0.25 < C < 0.55%)、低碳钢(C < 0.25%) 三类钢种, 高碳钢工艺拉速 0.62 m/min, 中碳钢 0.70 m/min, 低碳钢 0.74 m/min, 保护渣选用适配各钢种的低黏度类型, 黏度控制在 0.15±0.05 Pa·s, 确保振动过程中润滑效果稳定。

作者简介: 李明新(1988-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 钢铁冶金。

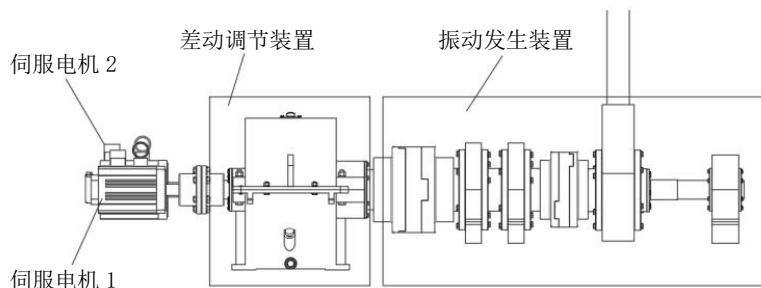


图 1 结晶器非正弦振动伺服驱动装置结构示意图

2.2 振动参数设置及试验方案

试验采用控制变量法, 依托振动参数设计理论, 围绕振幅、振动频率、负滑率、波形偏斜率四大核心参数构建多组试验方案。高碳钢采用正弦振动模式, 设置两组参数方案, 原工艺参数为 $C1=6$ 、 $C2=0$ 、 $C3=170$ 、 $C4=-15$ 、 $P=0.1$, 试验参数调整为 $C1=5.2$ 、 $C2=0$ 、 $C3=60$ 、 $C4=124$ 、 $P=0$ 。中碳钢和低碳钢采用非正弦振动模式, 各设置三组方案, 原工艺参数 $C1=6$ 、 $C2=0$ 、 $C3=210$ 、 $C4=-15$ 、 $P=0.15$, 试验参数 1 为 $C1=5.2$ 、 $C2=0$ 、 $C3=60$ 、 $C4=124$ 、 $P=0$, 试验参数 2 为 $C1=5.2$ 、 $C2=0$ 、 $C3=60$ 、 $C4=124$ 、 $P=0.1$ 。每组方案下连续浇注并截取 350 mm 长铸坯试样, 改变拉速与振动参数的匹配关系, 探究不同工艺条件下参数优化方向, 所有试验在相同浇注温度、冷却强度及保护渣加入量条件下开展, 保障变量单一性。

2.3 铸坯表面质量评价方法

铸坯表面质量评价采用宏观观察与微观检测相结合的方式, 对截取的 350 mm 长试样进行热酸洗处理, 去除表面氧化皮后借助高分辨率工业相机拍摄铸坯四个面的表面形貌, 测量振痕宽度、深度及间距, 统计角部横向裂纹、振沟等缺陷的数量及尺寸^[3]。针对浅皮下裂纹缺陷采用线切割方式对铸坯进行纵向剖分, 打磨抛光后观察皮下 2~5 mm 范围内的缺陷分布情况, 将试验铸坯进行轧制加工, 采用超声波探伤技术检测轧材黑皮表面缺陷, 统计一次合格率, 量化振动参数对最终产品质量的影响, 建立振痕深度、裂纹发生率、探伤合格率与振动参数的关联模型, 综合评价不同参数组合的优劣, 为参数优化提供量化依据。

3 结晶器振动参数对铸坯表面质量的影响

3.1 振幅对铸坯表面质量的影响

振幅改变结晶器液面波动幅度和坯壳受力状态, 直接影响铸坯表面平滑度与裂纹发生率, 较小振幅能有效抑制液面波动, 减少钢液卷渣风险, 让坯壳凝固过程更稳定, 铸坯表面振痕更浅且均匀, 同时降低坯壳拉裂可能性, 尤其适配高频率振动组合。针对 250 mm×

280 mm 大方坯, 振幅从原工艺较大值调整为适配值时, 铸坯角部振沟超深问题得到明显改善, 裂纹深度从 15 mm 以上降至无明显可见裂纹。振幅并非越小越好, 振幅不足会导致保护渣卷入量减少, 润滑效果下降, 坯壳与结晶器壁摩擦阻力增大, 反而引发粘连或浅皮下裂纹。不同钢种对振幅适配性存在差异, 高碳钢采用正弦振动时振幅需精准匹配拉速 0.62 m/min, 中低碳钢采用非正弦振动时振幅与波形偏斜率协同调整, 结合各自凝固特性与工艺需求, 才能实现表面质量最优。

3.2 振动频率对铸坯表面质量的影响

振动频率与振痕间距及坯壳愈合效率密切相关, 需遵循与拉速的动态匹配规律。高频率振动配合小振幅是改善铸坯表面质量的关键, 频率升高可细化振痕间距、减小振痕深度, 并缩短负滑脱时间, 避免振痕过度加深, 尤其适用于高拉速生产。低碳钢在拉速 2.0 m/min 时, 频率 150 min^{-1} 可将振痕深度控制在理想范围; 当频率低于 130 min^{-1} 时, 负滑脱时间变化陡峭, 振痕明显加深, 而频率高于 240 min^{-1} 后, 设备冲击负荷增大。高碳钢在拉速 0.62 m/min 条件下, 将频率调整至 $137 \sim 147 \text{ min}^{-1}$, 可消除表面振纹重叠并显著提升探伤合格率。频率应通过公式 $f=C3+C4 \times Vc$ 精确计算, 并与钢种特性和设备承载能力协同匹配, 避免频率过高或过低引发新的表面缺陷。

3.3 负滑率对铸坯表面质量的影响

负滑率是平衡脱模效果与铸坯表面质量的核心参数, 其取值直接影响坯壳愈合程度与振痕深度。速度负滑脱率控制在 30%~40% 时, 结晶器下振最大速度与拉坯速度差值适宜, 既可提供足够压应力促进坯壳拉裂部位愈合, 又能避免振痕加深。时间负滑脱率 (NSR) 的影响更为显著, 高碳钢中将 NSR 由 39% 调整至 37%, 并配合负滑脱时间 0.16~0.18 s, 可使角部横向裂纹消除; 中碳钢在 NSR 约 37% 时表面振痕最为规整, NSR 超过 41% 振痕加深, 低于 36% 则脱模效果减弱, 易出现粘连。负滑率还与铸坯断面尺寸相关, 大方坯需适当提高负滑脱时间至 0.14~0.20 s, 小断面铸坯则应

控制负滑率在较低水平,以避免振痕过度积累。

3.4 振动参数综合影响分析

铸坯表面质量并非由单一参数决定,而是振幅、频率、负滑率及振动形式协同作用的结果,参数组合需遵循“高频率、小振幅、合理负滑率”的原则。高碳钢采用正弦振动,搭配适宜振幅、频率 $137 \sim 147 \text{ min}^{-1}$ 、NSR 37%,表面探伤合格率由58.6%提升至93.61%。中低碳钢采用非正弦振动,波形偏斜率0.1、振幅 $\pm 4.0 \text{ mm}$ 、

频率 150 min^{-1} ,可同时满足脱模与润滑需求,使振痕深度和裂纹发生率显著降低。拉速作为重要关联因素,与振动参数形成动态匹配关系,拉速提高时需适当降低频率、增大振幅和非正弦振动因子,确保负滑脱时间稳定在 $0.16 \sim 0.18 \text{ s}$ 、正滑脱时间大于 0.24 s ,维持保护渣消耗与坯壳愈合的动态平衡。不合理的参数组合易引发连锁缺陷,参数协同优化后铸坯表面质量指标显著改善,具体对比结果如表1所示。

表1 振动参数优化前后铸坯质量对比表

钢种	评价指标	原参数状态	优化后状态	提升 / 改善幅度
高碳钢	轧材黑皮表面探伤合格率	58.60%	93.61%	提升 35.01%
高碳钢	角部裂纹深度 (mm)	> 15	无明显可见裂纹	完全消除
中碳钢	振痕深度 (mm)	较深 (无量化值)	较浅 (无量化值)	显著变浅
低碳钢	浅皮下裂纹发生率	较高 (无量化值)	较低 (无量化值)	明显降低

4 振动参数影响机理分析及工程应用

4.1 振动参数影响铸坯表面质量的机理分析

振动参数通过调控结晶器与坯壳的相对运动、润滑条件及坯壳受力状态,从微观层面影响铸坯表面缺陷的形成与演化。振幅直接决定液面波动强度,适宜小振幅可避免钢液剧烈翻腾,减少卷渣与皮下夹杂,降低坯壳交变应力以抑制裂纹萌生;振幅过大则加剧液面波动,导致坯壳凝固不均,振沟加深并形成应力集中,最终发展为横向裂纹^[4]。振动频率通过改变负滑脱时间和振痕形成周期起效,高频率振动可缩短负滑脱时间、减浅振痕,并促进保护渣均匀分布形成致密渣膜,降低摩擦阻力;低频率则易导致振痕过深和润滑失效。负滑率用于平衡脱模与坯壳愈合,合理取值可促进拉裂部位愈合并避免振痕加深^[5]。非正弦振动通过偏斜率调整运动轨迹,延长正滑脱时间、缩短负滑脱时间,从而减轻振痕并抑制缺陷产生。

4.2 工程应用与参数优化建议

基于试验结果与机理分析,工程应用中需针对不同钢种、铸坯断面和拉速,建立振动参数的精准匹配体系。高碳钢优先采用正弦振动模式,推荐拉速 0.62 m/min 、频率 $137 \sim 147 \text{ min}^{-1}$ 、负滑脱时间 $0.16 \sim 0.18 \text{ s}$ 、NSR 37%,以保证坯壳愈合与表面平滑。中碳钢和低碳钢采用非正弦振动,拉速分别为 0.70 m/min 和 0.74 m/min ,选用 $C1=5.2$ 、 $C2=0$ 、 $C3=60$ 、 $C4=124$ 的基础参数,中碳钢偏斜率取0.1,低碳钢配合振幅 $\pm 4.0 \text{ mm}$ 、频率 150 min^{-1} 。参数优化需遵循动态调整原则,拉速每提升 0.1 m/min ,频率降低 $5 \sim 10 \text{ min}^{-1}$ 、振幅增大 $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ 、非正弦振动因子增加 $0.02 \sim 0.03$,维持负滑

脱时间 $0.14 \sim 0.20 \text{ s}$ 。生产中应通过热酸洗和超声波探伤监测质量,当探伤合格率低于90%时优先调整负滑率和频率;针对 $250 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$ 大方坯,应重点优化角部振动参数,并配合二冷强度调整,实现表面缺陷有效控制。

5 结束语

结晶器振动参数的合理匹配是保障铸坯表面质量的关键。振幅、频率、负滑率及振动形式的协同优化,能有效抑制振痕、裂纹等缺陷,精准适配不同钢种的凝固特性。高碳钢适配正弦振动,中低碳钢采用非正弦振动,结合拉速动态调整参数,可显著提升铸坯表面平整度与探伤合格率。相关机理分析与工程优化建议,为连铸生产提供了精准的参数适配方案,对推动连铸工艺提质增效、降低生产成本具有重要的实践价值,也为高效连铸技术发展提供了有力支撑。

参考文献:

- [1] 郭银涛,贾丽慧.常规板坯低碳钢高拉速连铸用结晶器振动的分析与应用[J].连铸,2025,44(03):114-122.
- [2] 吴晨光.新型连铸结晶器振动驱动装置的研究[D].秦皇岛:燕山大学,2024.
- [3] 张坤.连铸结晶器振动参数控制系统开发[D].沈阳:东北大学,2022.
- [4] 王海达,陈列,董贵文,等.结晶器振动参数对连铸坯表面质量的影响[J].特钢技术,2022,28(01):15-18.
- [5] 刘建洋.连铸结晶器振动工艺参数比较与分析[J].铸造技术,2021,42(11):976-978.