

应用六西格玛方法提高 430 系不锈钢铸坯宽度合格率

邓洪斌 戴秀东 孙仁宝

(山西太钢不锈钢股份有限公司 山西 太原 030003)

摘要: 六西格玛是通过运用质量方法和工具,旨在持续改进组织业务流程,实现顾客满意的管理方法。本文通过应用六西格玛 DMAIC (定义、测量、分析、改进、控制) 改进流程,分析影响 430 系不锈钢铸坯宽度合格率的关键因子,并对冷却强度、中包钢水温度、铸机状态等进行了改进和控制。在原冷却模型基础上,利用奥钢联提供的 VAI Cooling Practice Setup System 模拟软件,开发、设计二次冷却模型。通过建立神经网络数学模型,开发了 430 系铸坯宽度智能控制模型。经过多次现场试验和调试,宽度控制模型逐步得到稳定和完美,最终提升了 430 系不锈钢铸坯宽度合格率。

关键词: 六西格玛; 冷却强度; 中包钢水温度; 铸机状态; 宽度智能控制模型

1 定义

1.1 背景

430 系不锈钢作为铁素体不锈钢中的代表性钢种,具有良好的强度、韧性和可焊性,其耐蚀性能接近于 304 系奥氏体不锈钢,且价格低于 300 系不锈钢。430 系不锈钢性价比高、应用领域宽,广泛应用在洗衣机滚筒、燃气热水器、室内器皿、家具框架、支撑件、洗碗机、洗涤槽、炊具和灶具等领域。

430 系铁素体不锈钢高温强度低、延展性好,从而导致连铸坯宽度尺寸沿铸坯长度方向有较大的变化,超出了后续工序铸坯宽度控制公差要求,给后续的轧制工艺带来了一定困难,导致冷轧卷侧翻控制不稳定,影响冷线成材率。

1.2 问题 Y 的定义及缺陷形式

1.2.1 Y 的定义

$Y=430$ 系不锈钢宽度合格率 = 宽度命中铸坯块数 / 总铸坯块数 $\times 100\%$

1.2.2 缺陷形式

缺陷 1: 铸坯超宽,实际铸坯宽度超过铸坯宽度控制公差上限;

缺陷 2: 铸坯宽负,实际铸坯宽度低于铸坯宽度控制公差下限。

1.3 项目范围——SIPOC 图

SIPOC 图,也称高端程序图,是供方 (supplier)、输入 (input)、过程 (process)、输出 (output)、顾客 (customer) 的第一个英文字母的缩写。运用 SIPOC 图可以确定六西格玛改进的范围,如提高 430 系不锈钢铸坯

宽度合格率主要改进工序为连铸工序。

2 测量

2.1 Y 的测量系统分析

铸坯宽度测宽仪是用于不锈钢热板坯宽度测量的设备,其测量原理采用光学三角测量法。传感器发出一束激光,一个二极管阵列 R 通过聚焦镜片 L 观测到的激光束射到被测物表面 A 点的映象。 $LR7$ 的发射中心与板坯中心在一条直线上,铸坯板坯宽度值 $=L_0-L_1-L_2$ 。

因不锈钢铸坯宽度在测量过程中为全自动化测量,且定期进行校准,故认为不锈钢铸坯宽度测量系统是值得信赖的。

2.2 Y 的过程能力分析

将 Y 的过程能力分析转化为对 430 系铸坯宽度控制公差的过程能力分析,从分析结果可以看到短期过程能力指数 $C_p=0.97$, $C_{pk}=0.90$, 长期过程能力指数 $P_p=0.46$, $P_{pk}=0.43$, 均较低,尤其是长期过程能力指数亟需提高。

2.3 运用鱼骨图原因查找

运用鱼骨图对影响铸坯宽度合格率的因子进行查找,共查找出 20 个影响因子。

2.4 因果矩阵分析 (C&E)

对用鱼骨图查找出的 20 个因子进行因果矩阵 (C&E) 分析,从 20 个因子中筛选出 7 个不良因子,4 项需要快速改进,3 项需重点分析并优化,见表 1。

2.5 失效模式分析

使用失效模式分析 (FMEA),从关键输入中找出影响的各种潜在隐患,估计其后果的严重程度,并根据事

表 1 C&E 矩阵分析汇总表

项目	输入因子	打分	备注
1	冷却强度设计不合理	78	重点分析
2	钢种收缩系数未及时调整	78	快速改进
3	非恒拉速浇注	78	快速改进
4	钢水温度变化大	78	重点分析
5	二冷水跟不上	78	快速改进
6	四班主控工调整方式	90	重点分析
7	热连轧反馈宽度数据不及时	78	快速改进

先风险数确定主要改进方向。失效模式分析（FMEA）见表 2。

3 分析阶段

3.1 分析阶段实施计划

针对进入 A 阶段的 4 项因子，首先制定了 A 阶段工作计划及各项因子对 430 系铸坯宽度合格率的具体影响关系。A 阶段的实施计划见表 3。

3.2 班组操作对铸坯宽度控制的影响分析

为验证班组操作与 430 系铸坯宽度合格率的相关性，进行卡方检验。检验结果 P 值为 0，小于 0.05，表明班组控制水平是影响铸坯宽度的显著因子。下一步将通过规范、统计四班操作，持续提升班组控制水平。

3.3 中包钢水温度对铸坯宽度控制的影响分析

为验证不同炉次钢水温度变化量（中包钢水温度稳定性）与 430 系铸坯宽度合格率的关系，进行卡方检验。检验结果 P 值为 0，小于 0.05，表明不同炉次钢水温度变化量（中包钢水温度稳定性）是影响铸坯宽度的显著因子。下一步将持续提升中包钢水温度控制水平，为 430 系铸坯宽度稳定控制创造良好的条件。

表 2 失效模式分析汇总表

序号	工序 / 输入	潜在失效模式	潜在失效影响	严重度	潜在要因	发生率	当前控制方法	探测难度	RPN
1	冷却强度设计不合理	浇注过程中，受温度、成分影响，冷却强度调整不及时	冷却国强，铸坯宽负；冷却过弱，铸坯超宽	8	及时关注实际宽度并做出及时调整	6	合理设计冷却水量	4	192
2	钢种收缩系数未及时调整	调整保护渣后，系数调整不及时	430C 保护渣铸坯超宽，813D 保护渣铸坯宽负	6	更换保护渣必须考虑当前收缩系数	6	及时调整系数，必要时通过拉速补偿	2	72
3	非恒拉速浇注	节奏紧导致降速，温度高导致降速	铸坯楔形大	8	及时与前部沟通，确保到位率以及温度命中率	1	降速铸坯切废	2	16
4	钢水温度变化大	当炉温度变化大	宽度高超宽，温度低宽负	6	控制出钢温度	8	与 LF 及时沟通温度控制情况	4	192
5	二冷水跟不上	二冷水设计大，实际设备能力不够	冷却弱，宽度波动大	8	冷却弱	2	二冷水改造	6	96
6	四班主控工调整方式	不同主控工调整冷却强度手法不一致	四班宽度合格率偏差大	8	使用模型替代人工	8	规范四班控制手法	5	320
7	热连轧反馈宽度数据不及时	反馈不及时，无法及时调整连铸参数	批量性宽度不合	8	与热连轧沟通	2	与热连轧沟通	1	16

表 3 A 阶段实施计划

阶段	任务
1	班组操作对铸坯宽度控制的影响分析
2	中包钢水温度对铸坯宽度控制的影响分析
3	铸机状态对铸坯宽度控制的影响分析
4	冷却强度对铸坯宽度控制的影响分析

3.4 铸机状态对铸坯宽度控制的影响分析

为验证铸机状态（结晶器液位波动控制水平）与 430 系铸坯宽度合格率的相关性，进行卡方检验。检验结果 P 值为 0，小于 0.05，表明铸机状态（结晶器液位波动控制水平）是影响铸坯宽度的显著因子。下一步将通过持续提升铸机功能精度和铸机状态稳定性，为 430 系铸坯宽度稳定控制创造良好的设备条件。

3.5 冷却强度对铸坯宽度控制的影响分析

为验证冷却强度与 430 系铸坯宽度合格率的相关性，进行卡方检验。检验结果 P 值为 0，小于 0.05，表明冷却强度是影响铸坯宽度的显著因子。下一步将通过优化 430 系冷却强度，提高 430 系铸坯宽度控制稳定性。

4 改善阶段

4.1 优化 430 系冷却强度

图为 430 系不锈钢铸坯凝固示意图，由图可知，430 系不锈钢铸坯宽度变化趋势主要分为 3 部分，具体如下：

（1）结晶器收缩阶段：受结晶器铜板冷却影响，铸坯四侧形成一定厚度的坯壳，铸坯宽度处于收缩阶段，但铸坯收缩量整体较小。

（2）铸坯宽度延展阶段：铸坯中尚未凝固的钢水会对已凝固的坯壳产生静压力的作用而产生膨胀效应。铁素体不锈钢具有高温强度低、凝固结晶速度快、柱状晶发达等特点，由于其高温强度低，坯壳离开结晶器后不

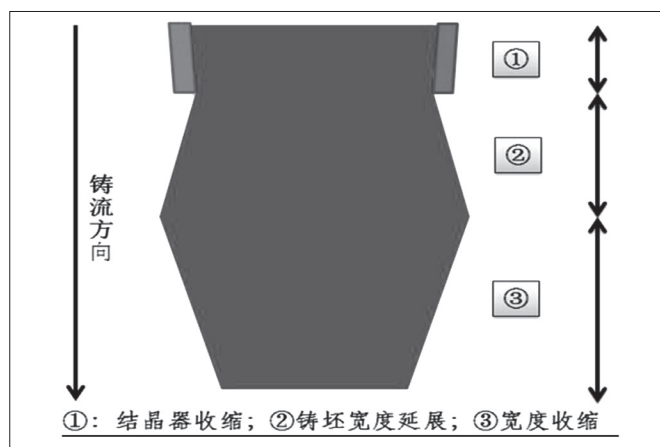


图 430 系铸坯宽度变化趋势图

能抵抗其所受到的钢水静压强，从而使铸坯在钢水静压力的作用下发生变形，进而使最终的板坯宽度增加，即产生了由铸坯膨胀所引起的宽度变化。

(3) 铸坯宽度收缩阶段：沿着铸流方向，铸坯坯壳厚度逐渐增加，铸坯强度不断增加，可以抵抗钢水静压力。铸坯宽度变化趋势由前期的铸坯膨胀所引起的宽度变化转变为铸坯冷却收缩引起的宽度变化。

因此，通过优化 430 系冷却强度，降低由铸坯膨胀引起的宽度变化量，对提高铸坯宽度稳定性至关重要。

在原冷却模型基础上，利用奥钢联提供的 VAI Cooling Practice Setup System 模拟软件，开发、设计二次冷却模型，即 TS-Fer-T-SY。相比原冷却模型：TS-Fer-T-SY 冷却模型的 1 区至 5 区的水量由 3017L/min 提高至 3693L/min，提高约 22.5%；二冷总水量由 4212 L/min 提高至 4889L/min，提高约 16.0%。

4.2 开发 430 系铸坯宽度智能控制模型

430 系铸坯宽度智能控制模型的设计思路分为以下 4 个部分：

(1) 利用大数据平台分析铸坯宽度主要的影响因素、采集主要影响因素数据后，对数据进行过滤、归一化；

(2) 建立神经网络数学模型，结合归一化后的数据，对模型进行训练，得到准确率较为理想的模型参数；

(3) 将模型应用于在线预测模块，预测得到每个二冷区的冷却参数和铸坯宽度；

(4) 将预测值在页面进行展示，结合铸坯宽度要求，综合决定二冷参数是否需要优化。

4.3 提升铸坯宽度控制水平

利用班前和班后时间针对 430 系不锈钢铸坯宽度控制注意事项开展专题培训，培训后进行考试，不断提升主控工岗位技能和宽度控制水平。

4.4 提升铸机功能精度

为持续提升连铸机设备功能精度，确保铸机状态持

续稳定，主要开展如下工作：

(1) 建立不锈钢机组 430 系液位波动 SPC 控制点，实时监控液位波动变化趋势；

(2) 根据铸机精度状态动态调整 430 系排产机组，确保 430 系浇铸状态稳定。

4.5 提升钢水温度命中率

为持续提升 430 系中包钢水温度控制水平，降低炉次间钢水温度差异，为 430 系铸坯宽度控制创造良好的浇铸条件，主要开展以下工作：

(1) 根据季节、钢包周转状态及机组差异，细化 LF 炉走钢温度要求，提高中包钢水温度命中率；

(2) 规范 LF 炉操作，增加送电 ≤ 2 次的指标，降低送电操作对钢水成分的影响；

(3) 连铸工序开展提速试验，缩短单炉浇铸时间，减少中包钢水温降。

通过上述措施的实施，430 系中包钢水温度命中率得到有效提升，为铸坯宽度控制创造了稳定的浇铸钢水条件。

5 控制阶段

制定控制计划表、开展过程管控、对关键影响因子 x 实施 SPC 控制，对结果 Y 进行 SPC 监控。通过应用六西格玛管理方法和工具，使 430 系铸坯宽度合格率提升为 89.7%，得到有效改进。

6 结语

本项目应用六西格玛管理的方法和工具，使 430 系铸坯宽度合格率有显著提升。提升 430 系铸坯宽度控制水平是改善 430 系不锈钢卷板侧翻控制、提高全线成材率的关键环节。通过应用六西格玛方法，找到了影响 430 系铸坯宽度控制的关键因素，为提升其他 400 系不锈钢品种的宽度控制提供了可借鉴之处，在行业内具有广泛的推广应用价值。

参考文献：

- [1] 何桢. 六西格玛管理 (第三版) [M]. 北京：中国人民大学出版社，2014.
- [2] 马逢时，周晔，刘传冰. 六西格玛管理统计指南——MINTAB 使用指导 (第 3 版) [M]. 北京：中国人民大学出版社，2018.

作者简介：邓洪斌 (1976.12-) 男，汉族，四川阆中人，硕士，工程师，研究方向：质量方法、工具在生产实际中的应用。