

# 应用六西格玛方法提高硅钢厚度精度

戴秀东 邱华东

(山西太钢不锈钢股份有限公司 山西 太原 030003)

**摘要:** 六西格玛是一套经过实践证明的适合解决或持续提升企业现场复杂质量问题的系统性方法。本文通过六西格玛改进 DMAIC 流程,分析了影响硅钢厚度精度的关键因子,应用六西格玛分析方法,并与专业分析和改进相互融合,通过对压力计算方法、共享内存分区及辊缝参数调优等改进方法,成功解决了严重影响冷轧工序生产和质量稳定的厚度问题,有效提升了硅钢厚度精度。实践证明,应用六西格玛方法解决质量问题是一种非常行之有效的方法。

**关键词:** 六西格玛; 厚度; 轧制压力; 过程能力

## 1 定义

### 1.1 背景

六西格玛自 20 世纪 80 年代诞生以来,现在已演变成为一套行之有效的解决问题和提高组织绩效的系统的方法论,在具体实施质量改进的过程中,一般采用 DMAIC 方式,即界定、测量、分析、改进、控制五个阶段。其解决问题的过程,实质上是解一个  $Y=f(x)$  的方程,其中 Y 指所要解决的问题, x 指引起问题的因子, f 就是 Y 与 x 之间的关系。本文阐述了如何运用六西格玛方法针对硅钢厚度精度进行改进。

针对硅钢厚度精度进行改进主要基于内部顾客驱动,太钢冷轧硅钢厂对上工序生产的热轧硅钢厚度精度抱怨严重,硅钢各钢种的厚度问题对冷轧工序的生产和质量造成严重影响。太钢新开发出的新能源汽车用硅钢,工艺设计要求新能源汽车硅钢热轧厚度要在 2.2mm 以下,方可满足电磁性能要求,而目前新能源汽车硅钢厚度只能达到 2.4mm,硅钢厚度问题成为制约新能源汽车硅钢电磁性能提升的主要瓶颈环节。

太钢热轧工序的硅钢厚度主要存在以下问题:

① 头部厚度大幅波动影响冷轧轧速,从而影响生产效率(见图 1)。

② 厚度超厚问题明显,如图 2 所示:

### 1.2 问题 Y 的定义及缺陷形式

问题 Y 的定义:硅钢厚度精度为目标厚度  $\pm 50 \mu\text{m}$  内的比例。

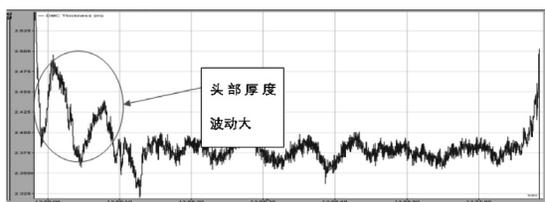


图 1 硅钢厚度波动

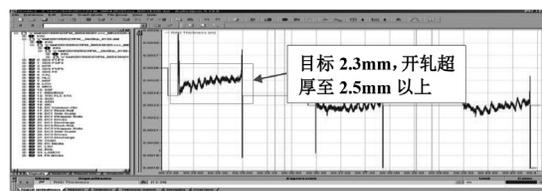


图 2 硅钢超厚问题

$$\text{厚度精度} = \frac{\pm 50 \mu\text{m 厚度范围内的带钢长度}}{\text{带钢总长度}} \times 100\%$$

厚度精度为行业内通用指标,为更加便于分析,采用厚度偏差作为等价指标进行分析改进:

厚度偏差 = 实际厚度 - 目标厚度 (单位:  $\mu\text{m}$ , 后续简称  $\mu$ )

Y 的缺陷形式有两种:

缺陷 1. 厚度偏差大于  $50 \mu$ ;

缺陷 2. 厚度偏差小于  $-50 \mu$ 。

测量方法:厚度值由 F6 出口凸度仪连续检测厚度,厚度偏差由计算机根据检测值自动计算。

### 1.3 项目范围 -SIPOC 图 (图 3)

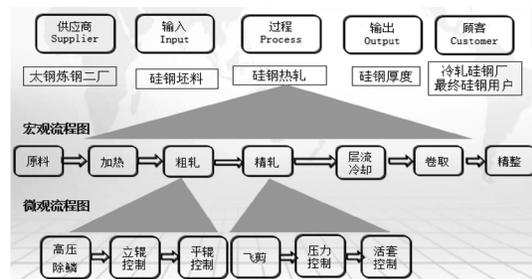


图 3 实施改进的流程图

## 2 测量

### 2.1 Y 的测量系统分析

测量内容:热轧带钢 F6 出口厚度值

测量机器:凸度仪

凸度仪为进口德国设备,其工作原理基于 X 射线穿透原理,当 X 射线穿过物质层,由于物质的吸收和散射作用,其能量被衰减,通过检测控制电流,可测得物质厚度。

校验方式:其在检测每一块钢前均要与标样板进行自动校验,每隔半年要与标准板进行一次离线校验。

分辨率:凸度仪的分辨力为 0.001mm,而厚度在实际应用中只需精确到 0.01mm 即可。

R&R 实验方案:因带钢在测量过程中为全自动化测量,不需人的参与,因而不需再进行再现性分析,只需进行重复性分析即可。又由于无法进行离线测量,应进行破坏性实验。方案为:取硅钢稳定轧制时 27 块钢(分三个单位,每单位 9 块),

每块钢取130米之后的6个点(间隔5米,已经过开平验证,可看作同一样品),进行嵌套方差分析。

结论: P/TV=7.83<10%, 明显分类数 17>5, 测量系统完全满足项目要求。

2.2 Y 的过程能力分析

针对现状数据进行厚度偏差过程能力分析,如图4所示:

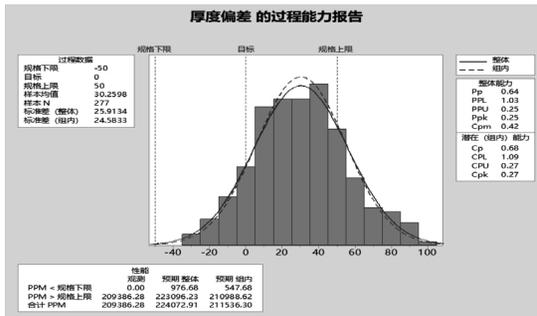


图4 厚度偏差过程能力分析

结论: 数据正态稳定, 厚度偏差均值 +30 μ, Pp 值 0.64, Ppk 值 0.25, Cp 值 0.68, Cpk 值 0.27, 过程能力不能满足项目要求, 改进方向为提高过程能力, 降低厚度偏差。

2.3 运用流程图查找原因

运用微观流程图对原因进行查找, 根据工艺流程分为原料、加热、粗轧、精轧、卷取五个工序, 分别对每个工序进行原因的查找和罗列(表1)。

通过微观流程图分析, 共查找出 24 个输入因子, 下一步将通过 C&E 矩阵对输入因子进行筛选。

2.4 因果矩阵分析(表2)

根据 C&E 矩阵评分值绘制了 Pareto 图进行了因子初步筛选(图5)。

通过做 C&E 矩阵评分值的 Pareto 图, 对 24 个影响厚度精度的输入因子进行分析, 筛选出对结果影响 80% 以上、最密切的 9 个因子为关键输入因子, 再针对 9 个因子进行失效模式分析。

2.5 失效模式分析(表3)

对能立即找到改善方案, 采用快速改善的方式进行改善, 对于因子相对比较复杂, 则在分析阶段通过统计分析来确定表1I(输入)P(过程)O(输出)关系表

输入	流程	输出	输入	流程	输出
板坯厚度	原料工序	y1, y2	温度	加热工序	y1, y2
板坯宽度	原料工序	y1, y2	驻炉时间	加热工序	y1, y2
.....	.....	.....	.....	.....	.....
热膨胀系数	粗轧工序	y1, y2	轧辊材质	精轧工序	y1, y2
模型设定	粗轧工序	y1, y2	零调精度	精轧工序	y1, y2
.....	.....	.....	.....	.....	.....
卷取张力	卷取工序	y1, y2			
电流控制	卷取工序	y1, y2			
.....	.....	.....			

表2 影响一次不合格率因子筛选(C&E矩阵)

rating of importance (1-10) 序号	过程	主要输出值 所有输入值	8 厚度 偏差	8 厚度 偏差	合计
1	原料工序	板坯厚度	1	1	16
2	原料工序	板坯宽度	3	3	48
.....	.....	.....	.....	.....	.....

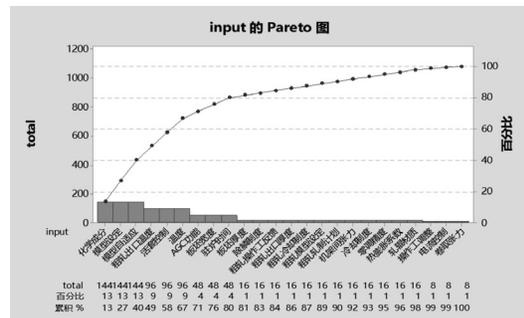


图5 因果矩阵后的 Pareto 图

主要根因并加以改善。

3 分析阶段

3.1 因子验证 -X1~X3

x: X1- 板坯宽度, X2- 化学成分, X3- 粗轧出口温度

X: 轧制压力

Y: 厚度偏差

目的: 通过回归分析验证 X1、X2、X3 是否对 X- 轧制压力有显著影响, 从而验证是否对 Y 有显著影响。

工具: 回归分析

结论: 回归 p 值 =0.00<0.05, R-sq=99.04%, 回归模型有效, 板坯宽度、粗轧出口温度及化学成分 C、Si、Mn、P、Al、Ti、N 对 Y 影响显著, 化学成分 Cr、Ni、S、Cu 对 Y 影响不显著。

3.2 因子验证 -X4

X4: 加热炉炉号

X: 轧制压力

Y: 厚度偏差

目的: 限定温度、成分等其它条件基本相同的情况下, 通过方差分析验证 X4 是否对 X- 轧制压力有显著影响, 从而验证是否对 y 有显著影响。

工具: 单因子方差分析

表3 失效模式分析

序号	关键因子输入	潜在失效模式	潜在失效后果	严重度	潜在失效原因	频度	现行过程控制	不可探测度	RPN
X1	板坯宽度	板坯超宽	成品超薄	6	上料时测量不准确	5	测宽仪测量	3	90
					模型设定未考虑板宽	6	按设定数据执行	3	108
		板坯宽负	成品超厚	6	上料时测量不准确	5	测宽仪测量	3	90
					模型设定未考虑板宽	6	按设定数据执行	3	108
X2	化学成分	成分波动对厚度造成影响	成品超薄或超薄	6	实际成分与名义不符	2	抽测	7	84
					模型设定未考虑化学成分影响	6	按设定数据执行	3	108
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

表4 根因表

通过 FMEA 分析, 分析筛选出 13 项根本原因(表4):			
输出	因子编号	重要因子(C&E矩阵筛选)	分析因子
y1, y2	X1	化学成分	化学成分
y1, y2	X2	模型设定	硬度计算
.....	.....	.....	.....

结论：四个炉号的数据均正态，基本稳定。四个加热炉方差相等，0#炉方差小均较低，1#炉方差大均值高，运用 Welch 检验进一步验证四个加热炉是否对轧制压力有显著影响。通过 Welch 检验分析，加炉炉号对轧制压力有显著影响，是 Y 的显著影响因子。

3.3 因子验证 -X5

X5：混轧方式

Y：厚度偏差

目的：验证混轧方式与正常方式厚度偏差是否有显著差异，确认混轧方式是否对 Y 有显著影响。

工具：双 T 检验

结论：P-Value = 0.008 < 0.05，拒绝原假设，混轧方式对 Y 有显著影响。

3.4 因子验证 -X6 (精轧速度控制)

X6：精轧速度控制

Y：厚度偏差

目的：增加速度自调整功能，验证增加速度自调整功能后是否对 Y 有显著影响。

工具：双 T 检验

结论：双 T 检验分析结果 P-Value = 0.026 < 0.05，拒绝原假设，增加速度自调整功能对厚度偏差有显著影响。

4 改善阶段

4.1 改进轧制压力计算方法

4.1.1 改进方法

采用热连轧所使用的 BP 神经网络，首先建立单独的硅钢压力系数修正网络，再从网络训练的输入因子、关联序、关联度三个方面进行改进。

① 建立单独的硅钢网络

重新建立七机架轧制压力网络结构及参数控制，与其它网络实现分类控制。

② 根据回归分析结果，重新确定硅钢网络输入因子，并调整硅钢网络输入因子的优先级和关联度。

③ 运用梯度下降法，持续训练网络，得出轧制压力最优计算值。

4.1.2 改进效果验证

目的：验证轧制压力计算精度改进是否对厚度偏差产生影响。

验证方法：改进后与改进前厚度偏差双 T 检验。

结论：双 T 检验结果 P-Value = 0.004 < 0.05，拒绝原假设，改进轧制压力计算精度对厚度偏差有显著影响，厚度偏差由 13.9 μ 降至 5.3 μ。

4.2 采用共享内存分区法，消除不同加热炉对轧制压力的影响

4.2.1 改进方法

采用共享内存分区的方法，建立区分四座加热炉的四个短遗传共享内存区域，同时在预计算程序中采用区分炉号继承的方法，以消除不同加热炉对设定精度的影响。

4.2.2 改进效果验证

目的：验证共享内存分区方法改进是否对厚度偏差产生影响。

验证方法：改进后与改进前厚度偏差双 T 检验。

结论：改进前后方差相等，标准差由 17.74 降为 9.47，厚度偏差波动明显降低，均值由 5.3 μ 降为 -5.2 μ 均值偏下限。

4.3 运用调优运算，寻优辊缝补偿因子，消除混轧方式对厚度偏差的影响

4.3.1 改进方法

增加钢种切换时的辊缝补偿功能，并总结统计规律，确定最优的补偿系数。其中辊缝补偿参数的确定采用了现场调优的方法，如图 (6) 所示：

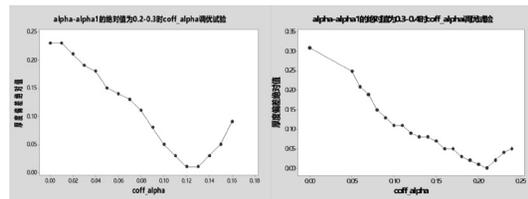


图 6 辊缝补偿参数调优试验

4.3.2 改进效果验证

目的：验证增加辊缝补偿功能后厚度偏差是否明显改进。

验证方法：改进后与改进前厚度偏差双 T 检验。

结论：P-Value = 0.004 < 0.05，拒绝原假设，增加辊缝补偿功能对厚度偏差有显著影响，厚度偏差由 -5.21 μ 增加为 0.15。

4.4 改进效果

改进阶段完成后，厚度偏差均值 1.06，Cp 值 1.74，Cpk 值 1.70，过程能力充足，厚度精度由 80.1% 提升至 92.9% 以上，完成 ≥92% 项目目标。

5 控制阶段

制定控制计划表、开展过程管控、对关键 x 实施 SPC 控制，对 Y 进行 SPC 监控。项目组针对粗轧出口温度、厚度偏差 SPC 控制点编写了 SPC 控制点岗位作业指导书，由技术部门下发，整个过程稳定受控，符合控制要求。

6 结语

本项目应用六西格玛统计和分析方法，结合大量的专业分析，成功解决了长期困扰冷轧生产的硅钢热轧厚度问题，基于顾客需求，最终使问题得到系统性解决，获得顾客满意，从而支持企业战略目标的实现。该项目解决问题的方法和思路，也为同类质量难点问题的解决供了借鉴。

参考文献：

[1] 何桢. 六西格玛管理 [M]. 北京：中国人民大学出版社，2018.  
 [2] 马逢时，周，刘传冰. 六西格玛管理统计指南 [M]. 北京：中国人民大学出版社，2018.  
 [3] 杨文士. 全面质量管理基本知识 [M]. 北京：中国科学技术出版社，1996.

作者简介：戴秀东，女 (1971.10-)，本科，高级工程师，研究方向：质量方法、工具在生产实际中的运用。