中高牌号无取向硅钢热轧稳定性分析与控制*[1]

雷 凯,徐 浩,胡华东,郑小根,向云畔

(山东钢铁集团日照有限公司,山东 日照 276800)

摘 要: 对中高牌号无取向硅钢热连轧过程中板形变差、甩尾、废钢等轧制不稳定性原因进行分析。从稳定性轧制影响机理出发,通过分析轧制相变区、铸坯加热同板温差、粗轧轧制板形、变形抗力模型、轧制速度模型五个方面的影响因素,开发出了加热炉踏步控制策略;计算出了轧制相变点,优化了粗轧轧制道次分配;考虑了所有元素对精轧变形抗力模型的影响以及改变了精轧轧制速度控制方式,提高了中高牌号无取向硅钢的轧制过程稳定性。

关键词: 中高牌号;无取向硅钢;热轧;稳定性

中图分类号: TG161 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009 - 5438(2019)02 - 0044 - 06

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.02.014

Analysis and Control for Hot Rolling Stability of Medium and High Grade Non - oriented Silicon Steel

Lei Kai, Xu Hao, Hu Hua - dong, Zheng Xiao - gen, Xiang Yun - pan

(*Rizhao Co., Ltd. of Shandong Iron & Steel Group Co., Ltd., Rizhao* 276800, *Shandong, China*)

Abstract: The causes for such rolling instabilities of medium and high grade non - oriented silicon steel in the hot continuous rolling process as poor strip shape, drift and scrap steel are analyzed. Starting from the influence mechanisms of stable rolling, the quick open control strategy of reheating furnace is developed by analyzing such five influencing factors as the rolling phase change zone, temperature difference of the same plate by slab reheating, strip shape of rough rolling, deformation resistance and finishing rolling speed models; the rolling phase change point is calculated and the pass distribution of rough rolling is optimized; the stability of medium and high grade non - oriented silicon steel in rolling process is improved by considering the influences of all elements on deformation resistance model of finish rolling and changing the control mode of finish rolling speed.

Key words: medium and high grade; non - oriented silicon steel; hot rolling; stability

中高牌号无取向硅钢的硅含量百分比一般大于1.0%以上,随硅含量的增加可大幅降低无取向硅钢片的铁损,用于电机转子可有效提升电机的效能。某钢厂中高牌号无取向硅钢中 Si + Al 元素百分比含量设计在 1.0% ~4.0% 范围[1],加热温度设计在 1 000 ~1 200 ℃范围。随 Si 和 Al 元素含量以及加热温度的降低,轧制塑性大幅降低,热连轧过程中出现粗、精轧轧制负荷异常波动现象,板形变差,频繁造成堆钢事故,影响生产效率和成品质量。本文从热连轧关键轧制过程的影响因素进行分析,提出了改进措施。

* 收稿日期: 2019 - 02 - 25

作者简介: 雷 凯(1982 -),男,陕西省咸阳市人,工程师,现从事热连轧产品技术质量工作。

1　轧制稳定性影响因素分析

1.1　相变的影响

中高牌号无取向硅钢中 Si 元素百分比含量在 1.5% ~1.8% 之间的钢种，在轧制过程中易发生相变进入 α + γ 两相区轧制，两相区轧制带来变形抗力的陡变和金属体积的变化。生产中发现钢中 Si 百分比含量高、Al 百分比含量较低的钢种相变后对变形抗力的影响较大。为综合确定元素对相区的影响，引入硅的相当量来确定相变区：

$$Sieq = \%Si + a[\%Al] - b[\%Mn] + c[\%P] \quad (1)$$

其中：Sieq 为硅的相当量，a，b，c 分别为对应成分的影响系数，依据经验和检验测量数据回归主要成分对缩小或扩大奥氏体区的影响程度，换算硅的相当量，从相图中确定相变区域。如图 1 所示，对应硅的相当量百分比为 1.60% 时，1 000 ℃ 以下为 α 单相区轧制，1 000 ℃ 以上为 α + γ 两相区轧制；在 1 000 ℃ 左右，硅的相当量百分比为 1.80% 的钢处于单相的铁素体区，硅的相当量百分比为 1.60% 的钢出于 α + γ 两相区。模型对两相取轧制的变形抗力和体积变化预测精度变差。

对于成分一定的钢种，加热温度存在同板和炉间温差，使得粗轧终轧和进入精轧温度在相变点附近波动。对于温度相同，不同炉次的钢化学成分的波动时相变点也随之变化。

一定成分的钢种相变如果发生在精轧，会引起各机架体积变化导致秒流量不匹配[2-3]，出现精轧活套异常抖动而引起废钢。表现为在穿带过程中活套起大套，带钢出 F7 后轧破后废钢。故中高牌号无取向硅钢精轧轧制过程中的负荷分配、变形抗力计算模型的精度对稳定性轧制影响较大，不能使用碳素钢的计算模型。

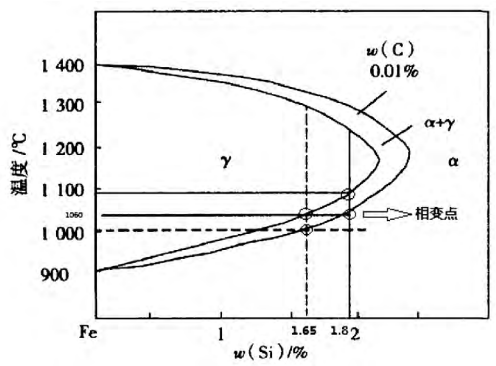


图 1　根据硅当量确定相变区域

1.2　加热温度的影响

为防止钢中有害元素的固溶，中高牌号无取向硅钢要求在较低的加热温度和较短的加热时间内完成板坯加热，随硅含量的增加铸坯的导热系数也随之下降，导致板坯无法均匀烧透，轧制塑性大幅下降。板坯放置在加热炉内活动梁和固定梁上加热时，由于步进梁和活动梁内部水管的冷却作用，使板坯与“水梁”的蘑菇头接触处的局部温度降低 100 ~ 200 ℃，与板坯下表面发生热传导出现“水梁”黑印[4-5]，局部温差可达 30 ℃（如图 2 所示）。后续粗、精轧轧制时温度不均匀可导致带钢的厚度、宽度、终轧温度波动，以及局部落入两相区板形变差，在轧机内的跑偏、甩头、甩尾现象严重。

1.3　轧制速度的影响

精轧机轧制速度一般采用变速模型，保证终轧温度在目标范围内波动下，轧制速度随终轧温度变化[6-7]。中高牌号无取向硅钢热轧工艺特点为低的加热温度，较高的终轧温度，为保证终轧温度轧机速度最高可达 18 m/s，在此速度下轧机控制参数响应速度高，变速模型增加了不稳定性。

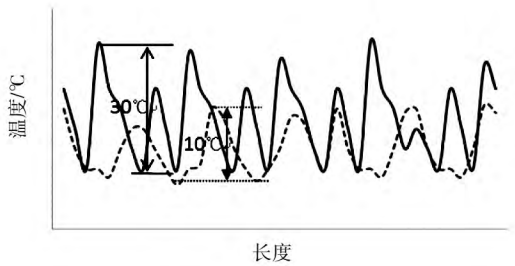


图 2　改进前、后活板坯同板温差情况

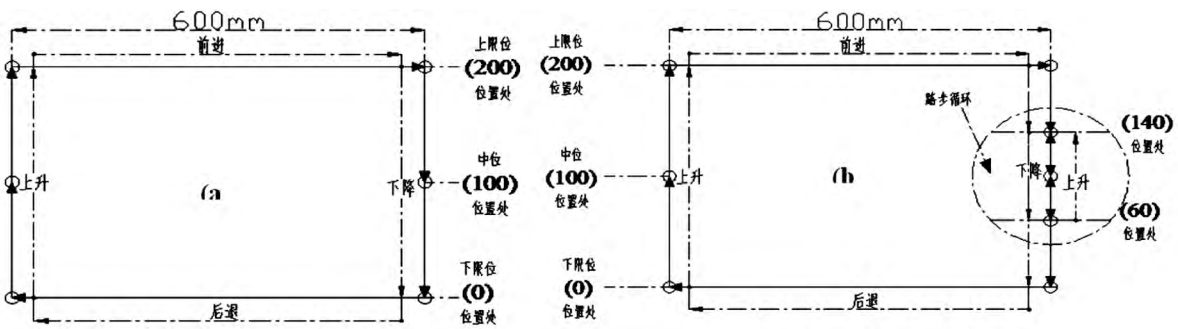
2　稳定性改进措施

2.1　板坯均匀性改进

解决钢坯“水梁”黑印问题，需对水梁的踏步功能进行优化以减少与水梁的接触时间。对活动梁搬运板坯的动作进行分析，搬运板坯过程分两种状态：①活动梁处于前进极限位置，活动梁从上限200 mm 下降到 140 mm 处直接保持，此时活动梁支撑钢坯，固定梁脱离钢坯，其接触面被有效加热。②活动梁继续行走回到原点再上升至 60 mm，此时固定梁支撑钢坯，活动梁脱离钢坯其接触面被有效加热。当同一座加热炉内前后坯间的抽钢间距时间小于设定踏步保持时间时，以上两种状态交替进行，前一块钢

坯接通激光在 140 mm 处被抽出，那么下一块钢坯接通激光后则在 60 mm 等待抽钢，这样循环往复。当同一座炉内前后坯间的抽钢间距时间大于设定踏步保持时间时，活动梁将按设定值在前进极限位置进行 140～60 mm 两种状态交替保持即踏步，如图 3 所示。当步进梁在进行自动踏步时，使钢坯与活动梁、固定梁进行交替接触，由此板坯与固定梁、活动梁接触的部位可进行交替加热，一定程度上能缓解板坯与“水梁”接触产生的“水梁”黑印，在均衡节奏轧制时能够实现 10 ℃以内的温差。

改进同板温差后，一是保证轧制过程中轧制力全长波动稳定，钢板通长变形均匀，宽度、厚度以及楔形控制均匀稳定，三项指标的合格率较改进前可提高 6% 以上。二是加热同板温差缩小到 10 ℃以内，可保证通过小幅度的调整加热温度目标，以及粗、精轧的轧制道次等措施有效避开两相区轧制。如同板温差大于 30 ℃以上，为保证产品的性能要求，就无法通过大幅度的调整加热工艺满足稳定性要求。



（a）改进前　　（b）改进后

图 3　改进前、后活动梁行走周期示意图

2.2　粗轧板形改进

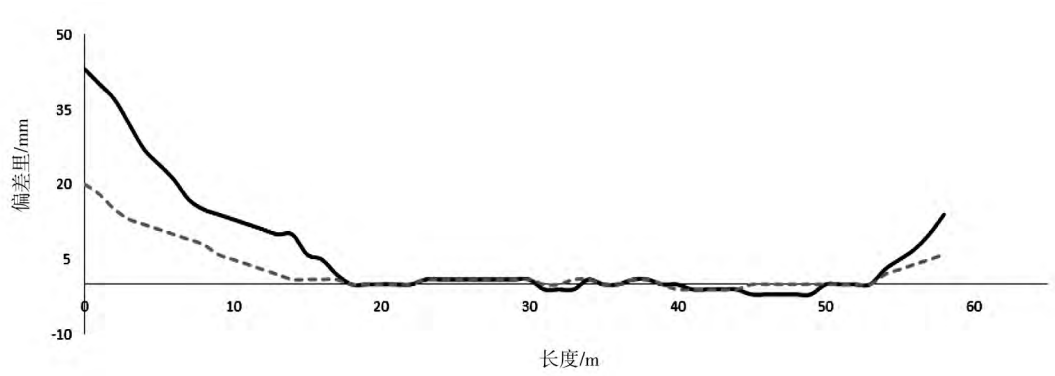
如 1.1 和 1.2 所述，中高牌号无取向硅钢加热温度低导致轧制负荷偏大，轧机的刚度难以保持板形的平直；粗轧末道次相变和“水梁”黑印的影响集中体现，板坯局部温度不均匀会发生局部相变，轧制负荷也发生陡变；两种原因引起粗轧中间坯头尾镰刀严重，超过 30 mm 的镰刀弯进入精轧后会产生单边浪以及撞击导板卡钢。

在粗轧最后一道次或精轧后段有效地避开两相区轧制是保证轧制稳定性的关键。不同加热炉、不同钢坯成分在生产工艺上存在差别，经过分析以硅的相当量为基础，对部分级别钢种，按成分分出相变敏感钢种，分别规范控制温度的目标和上下限，可有效地避开两相区轧制。

对现有钢种的成分体系和温度制度按照是否在两相区轧制进行分类，依据所分的类别，针对性的避开在两相区的轧制，固定每类别的粗轧轧制道次和除鳞水的使用，辅助以减小中间坯厚度，均衡道次压下量，制定出一套粗轧道次及除磷制度控制规范（如表 1 所示），可控制粗轧头尾镰刀弯在 20 mm 以内，优化前后粗轧板形控制情况如图 4 所示。

表 1　中高牌号粗轧道次及除磷制度控制规范

分类	中间坯厚		R1 道次		R2 道次		除鳞制度	
	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
系列 1	35	33	3		3		4	RSB R2－3
系列 2	35	32	3	1	3	5	4	RSB R2－3
系列 3	35	33	3	1	3	5	5	RSB R2－3 R2－5



(a) 实线 – 优化前,头部最大偏差约 40 mm,尾部偏差约 20 mm; (b) 虚线 – 优化后,全长偏差在 20 mm 以内

图 4　优化前后粗轧板形控制情况

由于中高牌号无取向硅钢不同的成分体系和过程温度设置对应不同的成品性能,表 1 中所列举的系列 1 至系列 3 的钢种分类为考虑硅的相当含量和过程温度工艺设置,在粗轧后段轧制有效避开两相区,其粗轧中间坯设置考虑降低精轧轧制负荷; 粗轧 R1、R2 道次优化和除鳞的不同分配考虑了过程温降量,有效避开末道次两相区。例如系列 1 类别,所规定的成分和加热温度以及粗、精轧终轧温度已保证了其在各阶段都为铁素体区轧制,故粗轧轧制道次无需调整。

2.3　精轧负荷分配模型改进

普碳钢一般模型采用的负荷分配为能耗分配法[8-9],即先确定各机架能耗百分比,然后利用能耗模型计算各机架出口厚度,此方法可以满足绝大多数普碳钢需求,对于中高牌号无取向硅钢的分配方法需综合考虑大生产实际经验以提高计算精度。先按经验确定合适的轧制力分配比值,然后从负荷分配初值开始计算轧制力和轧制力比值,如果轧制力比值与目标比值的偏差超过预定范围,则进行调整负荷分配比的迭代计算,直到实现轧制力分配比合理化。采用二级模型对中高牌号无取向硅钢的负荷分配进行控制,主要考虑因素有: F1 – F3 的轧制力、相变点、F4 的辊缝值、F6 和 F7 的板形控制等。具体设计为: F1 – F3 头部轧制力小于 2 500 t、F4 辊缝设定值大于 4 mm,F6 和 F7 的弯辊力控制在 200 t 以内,反复检验后确定了 F1 – F7 的轧制力比值为: 1∶0.92∶0.83∶0.72∶0.61∶0.53∶0.5。二级模型依此为基础对不同钢种系列进行调整,常用系列负荷分配如表 2 所示。

表 2　常用高牌号无取向硅钢负荷分配比值

机架	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
系列 1	1	0.9	0.8	0.55	0.45	0.35	0.3
系列 2	1	0.9	0.8	0.6	0.55	0.45	0.4

优化前的负荷分配机械的考虑了前段机架的负荷能力,使得轧机后段机架负荷分配偏大,整体机架轧制力分配不均匀,后段控制平直度的能力下降。通过对经验值的回归,使得各机架的功率分配合理以及各机架轧制力的分配均匀,前段机架大压下量保证比列凸度控制稳定,后段机架小压下量保证了板形平直度的控制稳定。

2.4　精轧变形抗力模型改进

变形抗力是金属在一定变形温度、变形速度和变形程度条件下的屈服极限[10]。在热变形中,变形抗力是金属的化学成分、变形温度、变形速度和变形程度的函数[11-12]。

$$\sigma_s = f(\omega_B, \varepsilon, \bar{\varepsilon}, T) \tag{2}$$

式中: σ_s 为变形抗力,MPa; ω_B 为金属的化学成分(质量分数),%; ε 为变形程度,压下率; $\bar{\varepsilon}$ 为变形速度,s^{-1}; T 为变形温度,℃。

由于化学成分、变形速度和组织状态对变形抗力的影响很复杂,很难搞清楚它们之间的定量关系,

所以的理论公式还未建立，一般材料的都是通过变形抗力实验而得[6-7]。

一般控制模型中只考虑C、Mn两种元素的影响[13]，对于中高牌号无取向硅钢为提高变形抗力预报精度，需要考虑所有元素的影响，故新建了变形抗力模型如下：

$$\sigma_s = Y \cdot a_0 \exp\left(a_1 T + a_2\left(\frac{\varepsilon}{10}\right)^{(a_3 T + a_4)}\left[a^6\left(\frac{\varepsilon}{0.4}\right)a^5 - (a^6 - 1)\left(\frac{\varepsilon}{0.4}\right)\right]\right) \quad (3)$$

式中：σ_s 为变形抗力，Y 为各元素含量修正因子。

$$Y = m_0 + m_1\mathrm{Si} + m_2\mathrm{Mn} + m_3\mathrm{Cu} + m_4\mathrm{Ni} + \left(m_5\mathrm{Nb} + m_6\mathrm{N}^{b_1}\right) + m_7\mathrm{V} + m_8\mathrm{Ti} + m_9\mathrm{Al} + m_{10}\mathrm{B} + \left(m_{11}\mathrm{C} - m_{12}\mathrm{C}^{b_1}\right) + m_{13}\mathrm{P} \quad (4)$$

式中：a_0、a_1、a_2、a_3、a_4、a_5、a_6 为模型参数，依钢种不同而异。

在新建的变形抗力模型中包含了C、Si、Mn、Cu、Ni、Nb、P、Ti等14种主要元素含量的影响，通过对不同成分中高牌号无取向硅钢进行生产数据收集、筛选、分析、数学处理，然后利用专业分析工具对参数 a_0、a_1、a_2、a_3、a_4、a_5、a_6 进行回归，建立了变形抗力模型公式。

新的变形抗力模型全面的考虑全元素对变形抗力的影响，采用新的模型计算出的各机架的轧制力预报偏差可控制在5%以内，保证了辊缝设定准确，带来机架间金属秒流量控制稳定，表现为活套波动减少。

2.5 精轧轧制速度模型改进

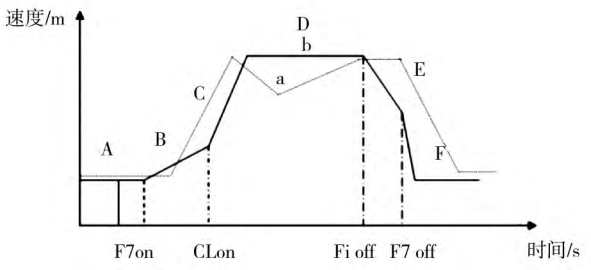
将精轧变速轧制模式改为恒速轧制模型，如图5所示。根据不同钢种成分系列对FT7目标温度离线模拟与调试，设置加速度1、加速度2、卷取咬入速度和最高速度经验参数，如表3所示。

表3 轧制速度优化表

钢种	加速度1 /(m·s^{-2})	加速度2 /(m·s^{-2})	卷取咬入速度 /(m·s^{-2})	最高速度 /(m·s^{-1})
1系列	0.20	0.28	10.2	13.6
2系列	0.25	0.29	10.9	14.3

在轧制尾期精轧速度控制一般以当前速度抛钢，对恒速轧制而言较大的抛钢速度容易导致甩尾、断尾，为此，首先根据操作经验确定不同规格的带钢抛钢时合理的抛钢速度，抛钢速度保证操作人员有足够的时间对尾部的异常情况进行处理；其次在一级机确定合适的抛钢减速率，抛钢减速率不影响设备的正常运行；最后根据实际轧制速度、目标抛钢速度和减速率计算出减速点，保证在F7抛钢时达到目标抛钢速度，如图5所示，E点之后为带钢的减速区域，在F7 off之前，F7降到抛钢速度，到F点带钢离开最后机架时，轧机速度立即降到后续带钢穿带速度。

较之变速模型，恒速轧制速度模型有效的减少速度波动对轧制的影响，带钢在穿带后，根据经验确定最高轧制速度，然后通过两段加速稳定实现其加速到最高轧制速度，其后保证此速度恒速轧制，使轧制速度不随温度变化；抛钢时，变速轧制的精轧最大轧制速度达到15 m/s左右，恒速轧制确定不同规格的带钢在抛钢时合适的抛钢速度，这些参数在轧制策略加以设定，一般在10～13 m/s之间，有效的减少了高速抛钢带来的不稳定性。



a 优化前：变速模型；b 优化后：恒速轧制模型

图5 优化前、后精轧模型

3 结论

采取上述措施后，中高牌号无取向硅钢的轧制稳定性明显提高，废钢量大幅减少，综合成材率达到96.5%；凸度、楔形、平直度综合合格率达到95%以上，为下工序提供了稳定的产品，得出以下结论。

(1) 以硅的相当量为基础，按成份计算相变温度点，制定工艺温度控制规范，在粗轧最后一道次或精轧前段有效地避开两相区轧制。

(2) 根据加热炉内前后钢坯间的抽钢间距与设定踏步保持时间的不同关系，改进活动梁的行走周期，减少了“水梁”黑印，同板温差控制在10 ℃以内。

(3) 均衡分配粗轧每道次压下量，并减小中间

坯厚度。根据不同的硅的相当含量和温度工艺制度，制定了一套粗轧道次及除磷制度控制规范，粗轧中间坯镰刀弯控制在 20 mm 以内。

(4) 优化精轧模型。负荷分配由能耗分配法改为经验值分配法；考虑全元素的影响系数，新建变形抗力模型，通过现场数据回归分析，得出一套经验参数，提高变形抗力预报精度；轧制速度由变速模型改为恒速模型，可改善抛钢稳定性。

参 考 文 献

[1] 何忠治，赵宇. 电工钢 [M]. 北京：冶金工业出版社出版社，2012.

[2] 付文鹏，谢向群，张 雄. 热轧活套精度对轧制稳定性的影响分析 [J]. 梅山科技，2016，(1)：55.

[3] 沈训良. 热轧带钢轧制过程的稳定性探讨 [J]. 冶金丛刊，2001，05(004)：10.

[4] 高立荣. 消除加热炉水管黑印的新方法 [J]. 唐山师范学院学报，2009，31(5)：53.

[5] 张朝晖，郑楠，刘安民，等. 钢坯加热过程中黑印产生原因及改善措施的分析研究 [J]. 热加工工艺，2013，42(11)：123.

[6] 杨节. 轧制过程数学模型 [M]. 北京：冶金工业出版社，1993.

[7] V. B. 金兹伯格. 板带高精度轧制理论与实践 [M]. 北京：冶金工业出版社，2000.

[8] 徐光，张丕军. 金属低温变形理论与技术 [M]. 北京：冶金工业出版社，2007.

[9] 费静，李文斌，杨春雨，等. 热连轧精轧设定模型及其优化方法研究 [J]. 鞍钢技术，2010(01)：50.

[10] 梁桂平，白星，李落星，等. AM80 - xSr - yCa 镁合金高温压缩变形行为 [J]. 塑性工程学报，2010，(01)：100.

[11] 王国栋. 板形控制和板形理论 [M]. 北京：冶金工业出版社出版，1981.

[12] 王国栋，吴国良等译. 板带轧制理论和实践 [M]. 北京：中国铁道出版社，1990.

[13] 左军，赵孝章，常军，等. 超低碳 IF 钢变形抗力研究及工业应用 [J]. 轧钢，2010，27(4)：14.

(上接第 32 页)

参 考 文 献

[1] 鲍威，陈亮，郭慧婷，等. 生命周期评价方法在绿色设计产品中的应用 [J]. 标准科学，2016，(S1)：22 - 25.

[2] 刘涛，刘颖昊. 钢铁产品生命周期评价研究现状及意义 [J]. 冶金经济与管理，2009，(5)：25 - 28.