

· 经验交流 ·

doi:10.3969/j.issn.1000-7059.2014.05.014

轧制力优化对 20 辊冷轧硅钢厚度精度的影响

王彦辉^{1,2}, 刘海超³, 高 雷^{1,2}, 郭立伟^{1,2}, 李书昌^{1,2}, 谷友侠³

(1. 北京首钢自动化信息技术有限公司 自动化研究所, 北京 100041; 2. 混合流程工业自动化系统及装备技术国家重点实验室首钢分实验室; 3. 首钢股份公司迁安钢铁公司)

摘要: 轧制力是影响冷轧带钢厚度精度的关键因素。为实现高精度的冷轧带钢厚度控制, 通过优化变形抗力模型参数和摩擦系数模型参数提高冷轧轧制力模型计算精度, 并使用指数平滑法的自学习算法保证轧制力精度的稳定性。在首钢股份公司迁安钢铁公司 20 辊森基米尔轧机生产线进行 S12 硅钢钢种轧制力优化试验, 将优化的模型参数应用于 L2 并投入现场生产, 结果表明该优化方法不仅提高了轧制力设定精度, 而且减小了冷轧硅钢的厚度超差长度, 提高了成材率。

关键词: 轧制力; 变形抗力; 摩擦系数; 自学习; 冷轧

文献标志码: B **文章编号:** 1000-7059(2014)05-0068-05

Influence of rolling force optimization on thickness accuracy of 20-high cold-rolling mill of silicon steel

WANG Yan-hui^{1,2}, LIU Hai-chao³, GAO Lei^{1,2}, GUO Li-wei^{1,2}, LI Shu-chang^{1,2}, GU You-xia³

(1. Automation Research Institute, Beijing Shougang Automation & Information Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China; 2. Shougang Branch of State Key Laboratory of Hybrid Process Industry Automation System and Equipment Technology; 3. Shougang Qianan Iron and Steel Company)

Abstract: The rolling force is the key factor which influences the accuracy of cold-rolling strip thickness. To implement high precision control of cold-rolling strip thickness, we optimize the deformation resistance model parameters and friction coefficient model parameters to improve the calculation precision of cold-rolling force model, and use exponential smoothing self-learn algorithm to ensure the stability of rolling force accuracy. In Shougang Qiangang 20-high Sendzimir mill single stand production line, rolling force optimization experiments for S12 silicon steel are conducted. The optimized model parameters are used in L2 on-site production. The results show that the algorithm can not only improve the rolling force setting accuracy, but also reduce the cold-rolling strip gauge deviation length, which improves the yield.

Key words: rolling force; deformation resistance; friction coefficient; self-learn; cold rolling

厚度是冷轧带钢的基本尺寸指标, 是冷轧产品重要的质量指标之一。轧制力模型是决定单

机架冷轧带钢厚度控制精度的核心模型, 对带钢的厚度控制起着决定性作用。20 辊森基米尔轧

收稿日期: 2014-05-20

作者简介: 王彦辉(1985-), 男, 河北鹿泉人, 工程师, 硕士, 主要从事轧制过程自动化研究工作。

机是生产高牌号无取向硅钢和取向硅钢的关键设备^[1-2],它将2~2.6 mm的常化和酸洗过的热轧硅钢原料经过4~6个道次的可逆轧制,轧制成厚度为0.18~0.5 mm的硅钢产品。首钢股份公司迁安钢铁公司(简称迁钢)在2011年从日本日立公司引进3条森基米尔单机架轧机生产线,进行高牌号无取向硅钢和取向硅钢生产。在生产线上投产初期,由于L2过程控制系统的轧制力模型设定精度较低,因此增加了自动厚度控制(AGC)系统的控制调整时间,最终导致带钢的厚度超差长度增加。为此,北京首钢自动化信息技术有限公司(简称首自信)自动化研究所通过分析冷轧轧制力模型和模型参数变化规律,2013年对该单机架冷轧轧制力模型提出优化方案,通过调整优化变形抗力模型参数和摩擦系数模型参数提高轧制力设定精度,同时使用自学习算法保证轧制力设定精度的稳定性。将调整的参数应用于现场生产后,生产结果表明该优化方法能明显减小带钢厚度超差长度。

1 冷轧轧制力模型分析

轧制力是20 辊森基米尔冷轧机辊缝设定和AGC厚度控制系统进行调节的主要依据^[3],也是决定冷轧带钢质量的关键因素。冷轧实际生产中普遍采用的轧制力模型有斯通模型和Bland-Ford-Hill模型^[3-6],该20 辊森基米尔轧机的L2系统采用Bland-Ford-Hill轧制力模型进行设定计算。在该系统应用中,忽略了占轧制力比例非常小的弹性区轧制力计算,以降低计算难度,适宜在线控制;模型计算中采用简化的Hitchcock公式计算工作辊压扁半径,与实际情况比较接近。该L2系统中应用的轧制力模型如式(1)所示。

$$P = bk_p t_e D_p \sqrt{R'(H-h)} \quad (1)$$

其中, $t_e = 1.05(1 - t_b/k_p) + 0.1(1 - t_f/k_p) -$

$$0.15 \frac{(1 - t_b/k_p)^2}{1 - t_f/k_p}$$

$$D_p = 1.08 + 1.79\varepsilon \sqrt{1 - \varepsilon\mu} \sqrt{R'/h} - 1.02\varepsilon$$

$$R' = R \left[1 + \frac{c_h P}{b(H-h)} \right]$$

上述式中, b 为带钢宽度; k_p 为动态变形抗力; t_e 为张力系数; D_p 为应力状态系数; R' 为工作辊压扁半径; H 为入口厚度; h 为出口厚度; t_b 为单位后张力; t_f 为单位前张力; ε 为道次压下率; μ 为摩擦系数; R 为工作辊半径; c_h 为常值0.000 214, 由 $c_h = \frac{16 \times (1 - \nu^2)}{\pi E}$ 计算, 其中 ν 为泊松数, E 为工作辊弹性模量。

由式(1)可以看出,在Bland-Ford-Hill模型中,轧制力的计算精度依赖于变形抗力和摩擦系数的计算精度^[3,6]。

1.1 变形抗力模型

变形抗力首先取决于钢种,其次与冷轧带钢变形程度等密切相关^[4,7]。钢种确定的情况下,冷轧变形抗力随变形程度的增加而快速增加,主要与累计变形程度有关。为了提高计算的准确性,我们在普遍采用的静态变形抗力模型的基础上考虑了轧制速度对变形抗力的影响,如式(2)所示。

$$k_p = k \times (1\,000 \times \eta)^{\frac{5}{k+23} - 0.046} \quad (2)$$

其中, $k = l \times (\sum \varepsilon + m)^n$

$$\eta = \frac{1\,000}{60} \times \frac{2}{2 - (H-h)/H} \times \sqrt{\frac{H-h}{R \times H^2}} \times v$$

上述式中, k 为静态变形抗力; l, m, n 为静态变形抗力计算系数; $\sum \varepsilon$ 为累计变形量; η 为速度影响系数; v 为轧制速度。

1.2 摩擦系数模型

轧制过程中,工作辊的粗糙度和轧制速度对摩擦系数有重要影响^[8],同时,带钢的变形程度也对摩擦系数的计算产生影响,综合考虑以上影响因素,摩擦系数模型采用如下形式:

$$\mu = \mu_0 \times \left(\mu_1 + \frac{\mu_2}{\mu_3 + v} + \mu_4 \times \varepsilon \right) \times \left(\frac{1}{1 + \mu_5 \times n_r} \right) \quad (3)$$

式中, $\mu_0 \sim \mu_5$ 为摩擦系数模型系数,其中 μ_0 为由带钢粗糙度确定的基本摩擦系数,在基本摩擦系数的基础上, $\mu_1 \sim \mu_3$ 为轧制速度修正系数, μ_4 为变形程度修正系数, μ_5 为轧制钢卷数修正系

数; n_r 为工作辊轧制的钢卷数。

在 20 辊森吉米尔轧机 L2 系统中使用的变形抗力模型参数由带钢的拉伸试验结果计算得出,摩擦系数模型参数根据以往其他同型号轧机经验确定,这都与迁钢使用的 20 辊森吉米尔轧机的实际工况有一定差别,因此需要针对具体的轧机确定特定的轧制力模型参数。

2 轧制力模型优化

轧制力模型优化包含两部分内容:轧制力参数优化试验和轧制力自学习。

2.1 轧制力参数优化试验

首自信自动化研究所根据轧制过程的实际数据找到变形抗力参数变化对轧制力的影响规律(图 1)和轧制力随摩擦系数模型参数的变化规律(图 2),在此基础上提出通过调整和优化变形抗力模型参数 l, n 和摩擦系数模型参数 $\mu_1 \sim$

μ_3 , 提高轧制力计算模型精度的方案^[9-10](调整 m, μ_4 和 μ_5 并没有明显的变化规律,因此不做优化)。参数优化步骤如下:

(1) 存储轧制过程的实际数据(原料厚度、宽度、道次入口厚度、道次出口厚度、轧制速度、工作辊半径、前张力、后张力等数据),将存储的实际过程数据代入轧制力模型进行轧制力计算;

(2) 分析实际过程数据计算的轧制力与实际轧制力之间的偏差;

(3) 根据轧制力偏差、轧制力随变形抗力参数的变化规律和摩擦系数随摩擦系数模型参数的变化规律,逐步调整 l, n 和 $\mu_1 \sim \mu_3$ (其中, l 的变化步长是 1, n 的变化步长是 0.01, $\mu_1 \sim \mu_3$ 的变化步长是 1),使模型计算的轧制力与实际轧制力的偏差最小,以此时的 l, n 和 $\mu_1 \sim \mu_3$ 作为最终的模型参数。

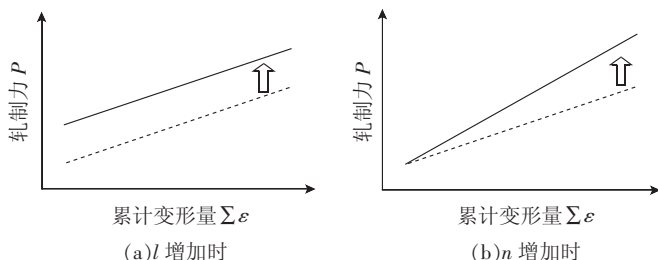


图 1 变形抗力参数变化规律

Fig. 1 Variation law of deformation resistance parameters

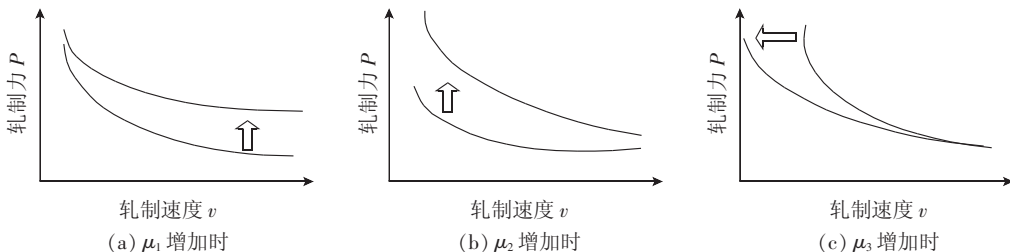


图 2 摩擦系数模型参数变化规律

Fig. 2 Variation law of friction coefficient model parameters

2.2 轧制力自学习

为了保证 20 辊森吉米尔轧机轧制力设定精度的稳定性,在轧制力参数优化的基础上,引进自学习算法对轧制力计算进一步优化以保证轧制力设定精度的稳定性,即在式(1)计算的轧制力基础上乘以自学习系数 z_p 。 z_p 按照指数平滑

法进行计算。

$$z_p = (1 - \Delta)z'_p + z_{pa}\Delta \quad (4)$$

其中, $z_{pa} = \frac{P_{act}}{P_{cal}}$

上述式中, z_p 为新的自学习系数; z'_p 为当前的自学习系数; z_{pa} 为由实际过程数据反算的自学习系

数; Δ 为平滑系数; P_{act} 为轧制力实际值; P_{cal} 为由实际工艺参数计算出的轧制力。

3 优化效果

为了降低优化方案的风险性,先取小批量的钢卷进行试验,在此以首钢迁钢 20 辊森基米尔轧机轧制 S12 无取向硅钢的优化试验为例说明优化方法和效果(轧制其他钢种时可以采用相同方法进行优化)。S12 钢种由 2.3 mm 的原料经过 5 个道次的轧制,轧成 0.35 mm 的成品。在同一批次轧制的 53 卷 S12 钢卷中,将前 33 卷作为试验前钢卷按未优化前的模型进行轧制,存储轧制过程实际数据计算轧制力偏差,根据模型参数调整规律进行模型参数优化调整。调整出的新模型参数投入到 20 辊森基米尔轧机的过程控制系统中,进行余下 20 卷带钢轧制试验,并存储轧制过程数据。根据存储的 53 卷带钢实际过程数据,统计分析优化前后轧制力精度和厚度超差长度。

优化前后的变形抗力模型参数和摩擦系数模型参数如表 1~2 所示。在 20 辊森基米尔轧机的过程系统中,同一台轧机所有道次的摩擦系数相同。

表 1 优化前后变形抗力模型参数对比
Table 1 Comparison of deformation resistance model parameters before and after optimization

项目	l	m	n
优化前	120	0.01	0.19
优化后	122	0.01	0.18

表 2 优化前后摩擦系数模型参数对比
Table 2 Comparison of friction coefficient model parameters before and after optimization

项目	μ_0	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5
优化前	1	2.5	4	200	0	0
优化后	1	2.7	5	200	0	0

3.1 轧制力设定计算精度对比

采用以下算法评估轧制力设定计算精度:

$$D_p = (P_{\text{cal}} - P_{\text{act}}) / P_{\text{act}} \times 100\%$$

式中, D_p 为轧制力相对偏差。 D_p 的绝对值越小,说明轧制力数学模型设定精度越高。以下对 S12 钢种钢卷头部(头部 50 m)、尾部(尾部 30 m)、中部(除去头部和尾部的中间部分)3 个部位优化前后轧制力精度情况进行对比说明,见图 3~5。可以看出,通过轧制力优化,可以将带钢的轧制力偏差从 14% 以内减小到 6% 以内,有效提高了轧制力设定精度。

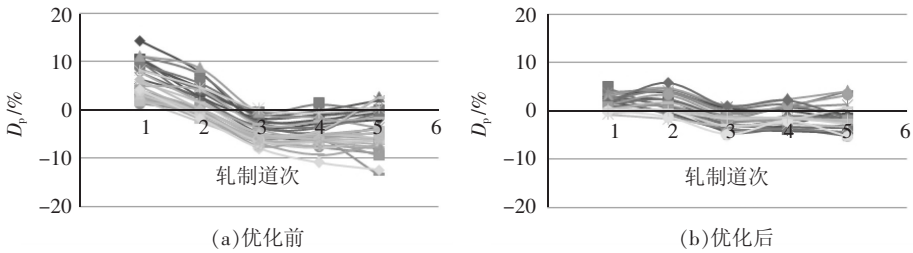


图 3 优化前后带钢头部 D_p 对比

Fig. 3 Comparison of strip head D_p before and after optimization

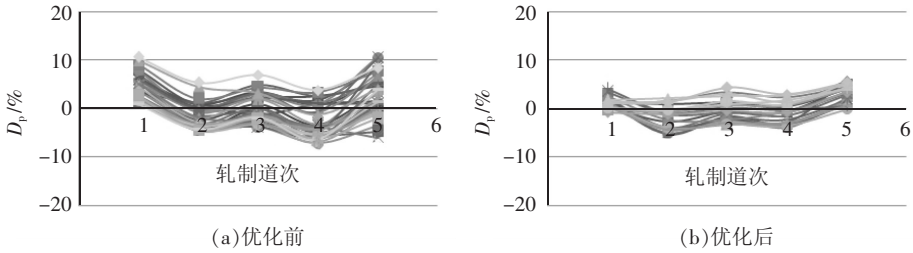


图 4 优化前后带钢尾部轧制力 D_p 对比

Fig. 4 Comparison of strip tail D_p before and after optimization

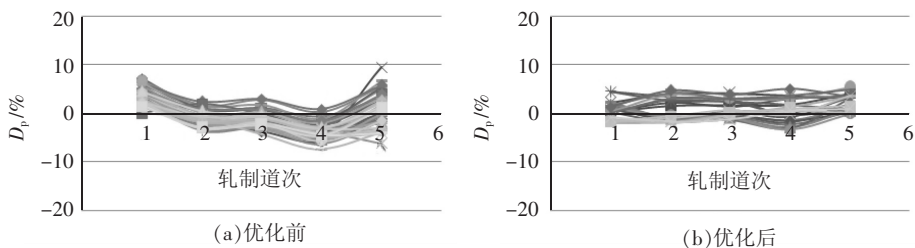


图5 优化前后带钢中部轧制力 D_p 对比

Fig.5 Comparison of strip middle D_p before and after optimization

3.2 带钢纵向厚度超差长度对比

以 $3\text{ }\mu\text{m}$ 为评价指标,根据存储的实际厚度数据统计轧制力优化前 33 卷带钢和优化后 20 卷带钢的轧制产品头部(头部 50 m)、尾部(尾部 30 m)和中部(除去头部和尾部的中间部分)的厚度超差长度平均值,各值均明显减小,其中头部由 19.23 m 减小到 10.73 m,中部由 5.52 m 减小到 0.81 m,尾部由 8.24 m 减小到 4.14 m。因此可以将这次优化试验的参数直接应用于二级系统进行 20 辊森基米尔轧机生产。优化结果投入 L2 系统以来,S12 钢种的轧制力偏差一直保持在 6% 以内。

4 结束语

通过对本次试验对比分析结果可知,优化后带钢的轧制力精度得到提高,带钢的厚度超差长度有效减小,将试验优化参数投入现场系统以来,轧制力偏差至今保持在 6% 以内,因此通过该优化方法能够达到提高带钢厚度控制精度和成材率的目的。对于其他的钢种和冷轧带钢生产线,可以采用相同的办法进行优化。该优化方法主要根据人工经验对轧制力偏差进行调整,简单方便,便于操作。

参考文献:

- [1] 潘纯久. 二十辊轧机及高精度冷轧带钢生产[M]. 北京:冶金工业出版社,2007.
- [2] 孙一康,童朝南,彭开香. 冷轧生产自动化技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.
- [3] 丁修堃,张殿华,王贞祥,等. 高精度板带钢厚度控制的理论与实践[M]. 北京:冶金工业出版社,2009.
- [4] 刘相华,胡贤磊,杜林秀. 轧制参数计算模型及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [5] 杨一. 轧制过程数学模型[M]. 北京:冶金工业出版社,1993.
- [6] 孙一康. 冷热轧板带轧机的模型与控制[M]. 北京:冶金工业出版社,2010.
- [7] 王飞,刘顺心. 冷轧变形抗力模型研究[J]. 冶金自动化,2014,38(1):60-62.
- [8] 王生朝,欧玲. 冷轧铝板摩擦系数模型建立[J]. 金属材料与冶金工程,2007,35(11):34-36.
- [9] 白金兰,王军生,王国栋,等. 提高冷轧过程控制轧制力模型的设定精度[J]. 钢铁研究学报,2006,18(3):21-25.
- [10] 王东成,彭艳,刘宏民,等. 冷轧带钢平整机高精度高速度轧制力模型开发[J]. 塑性工程学报,2008,15(2):172-174. [编辑:薛朵]

(上接第 57 页)

参考文献:

- [1] 西门子服务团队. SIMOVERT MASTERDRIVES 矢量控制使用大全[EB/OL]. (2012-11-29). <http://www.ad.siemens.com.cn/download/docMessage.aspx?ID=6900&loginID=&srno=&sendtime=>.

- [2] 西门子服务团队. DriveMonitor 使用简介[EB/OL]. (2006-09-05). <http://www.ad.siemens.com.cn/download/docMessage.aspx?ID=1263&loginID=&srno=&sendtime=>.
- [3] 维基百科. 树莓派[EB/OL]. (2014-02-29). <http://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%A0%91%E8%8E%93%E6%B4%BE>. [编辑:薛朵]