

20 辊森基米尔轧机轧制力模型研究

王彦辉, 郭立伟, 高雷, 陈丹

(北京首钢自动化信息技术有限公司 自动化研究所, 北京 100041)

摘要:介绍了首钢迁钢 20 辊森基米尔轧机单机架平面布置和辊系结构。采用 Bland-Ford-Hill 模型作为 20 辊森基米尔轧机的轧制力模型, 同时对影响轧制力计算精度的两大主要因素轧件的动态变形抗力和摩擦系数进行分析。给出了 20 辊森基米尔轧机轧制力模型的自学习方法和模型参数优化方法, 通过对模型参数的优化, 使轧制力预报的误差范围很好地控制在 5% 以内。

关键词:20 辊森基米尔轧机; 轧制力模型; 自学习; 优化

0 前言

为了能够轧制出满足客户需求的高质量、高品质的硅钢产品, 首钢迁钢公司从日本日立公司引进 3 套具有世界先进水平的单机架森基米尔 20 辊可逆轧机进行取向硅钢和无取向硅钢的轧制。为了能够使这 3 套轧机的性能得到最大程度的发挥, 需对 20 辊森基米尔轧机的控制系统进行分析研究。其中, 20 辊森基米尔轧机的轧制力数学模型是其工艺控制系统的中枢模型, 是其他轧制工艺数学模型计算的基础, 它的预报精度对冷轧钢卷的厚度精度和板形控制至关重要, 是轧制过程顺利进行的决定性因素。

下面就对引进的这 3 套单机架 20 辊森基米尔轧机进行简单介绍, 并对其中控制系统的轧制力数学模型进行分析并对其优化方法进行研究。

1 20 辊森基米尔轧机介绍

20 辊森基米尔轧机是森基米尔博士 1933 年发明的, 是生产硅钢和不锈钢的关键设备^[1]。首钢迁钢公司的 20 辊森基米尔轧机采用的是单机架可逆布置, 主要设备有: 主轧机、开卷机、左卷取机、右卷取机等, 设备平面布置简图如图 1 所示。轧机运行的最高速度为 800 m/min, 能够将 2.3 ~ 2.6 mm 的热轧硅钢原料经过 4 ~ 5 个道次的可逆轧制, 生产出厚度为 0.18 ~ 0.5 mm 的产品, 然后进行后续工序的加工。

20 辊森基米尔轧机辊系按 1—2—3—4 呈塔形布置, 上下对称设置。上下 2 个工作辊分别靠

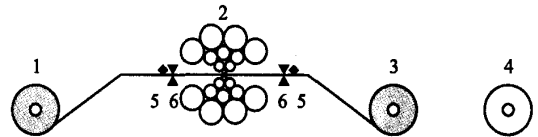


图 1 20 辊森基米尔轧机结构简图

1—左卷取机; 2—主轧机; 3—右卷取机;

4—开卷机; 5—板形仪; 6—x 射线测厚仪

在 2 个第一中间辊上; 上下 2 对第 1 中间辊支撑在 3 个第 2 中间辊上; 而 6 个中间辊则支撑在外层的 8 个固定于机架梅花孔里的 8 个支撑辊上。20 辊轧机辊系结构复杂, 作用在工作辊上的轧制力呈放射状传递到各支撑辊上, 进而传递到机架上^[2,3]。由于 20 辊轧机辊系结构复杂, 轧制力的设定精度对于轧件的质量控制更为重要^[4]。

2 轧制力模型分析与研究

在 20 辊森基米尔轧机的控制系统中轧制力模型采用的是忽略了轧件弹性压缩和弹性回复的 Bland-Ford-Hill 模型^[5]。其中, 轧制力的计算精度依赖于动态变形抗力、摩擦系数的计算精度, 因而对这 2 个因素的计算过程进行分析。

2.1 Bland-Ford-Hill 轧制力模型

Bland-Ford-Hill 轧制力模型计算冷轧轧制力精度较高^[5-6], 是在实际生产中应用最广泛的一种轧制力模型。20 辊森基米尔轧机主要进行冷轧不锈钢和冷轧硅钢的生产, 在这里采用 Bland-Ford-Hill 模型作为 20 辊森基米尔轧机轧制力的计算模型, 具体模型如下:

收稿日期: 2012-03-28; 修改稿收到日期: 2012-05-27

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发工作。

$$P = b \cdot k_p \cdot k \cdot D_p \cdot \sqrt{R' \cdot (H-h)} \cdot z_p \quad (1)$$

$$D_p = 1.08 + 1.79 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{1-\varepsilon} \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{R'}{h}} - 1.02 \cdot \varepsilon \quad (2)$$

$$k = \left(1 - \frac{tb}{kp}\right) \cdot \left(1.05 + 0.1 \cdot \frac{1 - \frac{tf}{kp}}{1 - \frac{tb}{kp}} - 0.15 \cdot \frac{1 - \frac{tb}{kp}}{1 - \frac{tf}{kp}}\right) \quad (3)$$

根据 Hitchcock 弹性力学中 2 个圆柱体弹性压扁的公式推得轧辊的弹性压扁半径公式为:

$$R' = R \times \left[1 + \frac{ch \times P}{b \times (H-h)}\right] \quad (4)$$

上述式中, P 为轧制力, N; b 为轧件的宽度, mm; kp 为轧制过程中轧件的动态变形抗力, N/mm^2 ; k 为张力影响系数; D_p 为轧制过程的平面影响系数; z_p 为轧制力的自学习系数; ε 为轧制过程中轧件的道次压下率; μ 为摩擦系数; tf 为轧件的道次前张力, N; tb 为轧件的道次后张力, N; H 为轧件的入口厚度, mm; h 为轧件的出口厚度, mm; R' 为工作辊的压扁半径, mm; R 为工作辊的半径, mm; ch 在模型当中取常值 0.000 214, 由 $ch = \frac{16 \times (1-\nu^2)}{\pi E}$ 计算得出, mm^2/N ; ν 为泊松常数; E 为轧辊的弹性模量, N/mm^2 。

其中式(1)和式(4)中的轧制力和轧辊的弹性压扁半径相互耦合, 在计算过程中需要进行多次迭代计算, 计算时间比较长, 计算效率相对较低, 在这里对其进行显示化处理^[5-6], 处理后的计算模型如下:

$$P = b \times (a_4 + \sqrt{a_6}) \times z_p \quad (5)$$

$$a_6 = a_4^2 - a_5 \quad (6)$$

$$a_5 = \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2 - r \times (H-h) \times \left(\frac{a_2}{a_3}\right)^2 \quad (7)$$

$$a_4 = \frac{a_1}{a_2} + r \times ch \times \left(\frac{a_3}{a_2}\right)^2 \quad (8)$$

$$a_3 = 1.08 - 1.02 \times \varepsilon \quad (9)$$

$$a_2 = \frac{1}{k_p \times te} - \frac{a_1 \times ch}{H-h} \quad (10)$$

$$a_1 = 1.79 \times \mu \times \varepsilon^{1.5} \times R \quad (11)$$

式中, $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ 为计算过程的中间变量, te 为张力影响系数。

其中在进行简化处理的过程中, 将计算轧制过程中平面影响系数的式(2)分别分解为与压下

相关的式(9)、与轧件的动态变形抗力相关的式(10)、与摩擦系数相关的式(11)进行计算。

2.2 动态变形抗力模型

在钢材冷变形过程中, 变形量较小, 所以在加工硬化的作用下, 随着变形程度的增加变形抗力剧烈增加。根据冷轧过程的特点, 钢的静态变形抗力主要与相应的累积变形程度有关。为了更加精确地计算轧件的变形抗力, 在计算过程中考虑了轧件的变形速率对变形抗力的影响, 计算出轧件的动态变形抗力。计算过程如下:

$$k_p = k \times (1000 \times ramd)^{nk} \quad (12)$$

$$nk = \frac{5}{(K+23)} - 0.046 \quad (13)$$

$$ramd = \frac{1000}{60} \times \frac{2}{(2-\varepsilon)} \times \sqrt{\frac{\varepsilon}{R \times H}} \times v \quad (14)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{h}{H} \quad (15)$$

$$k = l \times (\text{eps} + m)^n \quad (16)$$

$$\text{eps} = \ln\left(\frac{1}{1-srt}\right) \quad (17)$$

$$srt = (1-srtp) \times \left(1 - \frac{H}{H_0}\right) + srtp \times \left(1 - \frac{h}{H_0}\right) \quad (18)$$

式中, k_p 为轧件的动态变形抗力, N/mm^2 ; k 为轧件的变形抗力, N/mm^2 ; R 为工作辊半径, mm; H 为轧件入口厚度, mm; h 为轧件的出口厚度, mm; v 为轧制速度, m/min; l, m, n 为轧件静态变形抗力计算系数; eps 为轧件累积真应变, mm; srt 为轧件本道次的累积平均应变; $srtp$ 为计算应变系数; $ramd, nk$ 为轧件动态变形抗力计算过程的中间变量; K 为轧件的静态变形抗力系数, N/mm^2 ; ε 为轧制过程中轧件的道次压下率; H_0 为钢板的来料厚度, mm。

2.3 摩擦系数模型

冷轧时轧辊和轧件接触面上的摩擦系数对冷轧生产的影响很大, 它主要与工艺润滑剂的性能有直接关系。另外, 轧制速度、轧辊表面粗糙度、轧辊轧制的带钢长度、压下量等因素的变化均会引起摩擦系数的变化。

$$\mu = \mu_0 \times \left(\mu_1 + \frac{\mu_2}{\mu_3 + V_0} + \mu_4 \times \varepsilon\right) \times \left(\frac{1}{1 + \mu_5 \times nr}\right) \quad (19)$$

式中, μ 为基本模型计算的摩擦系数; V_0 为当前轧

制过程中轧制速度, m/min ; ε 为当前轧制道次的压下率; nr 为当前使用的工作辊轧制的钢卷数; $\mu_0, \mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5$ 为计算摩擦系数模型当中的系数。

2.4 张力影响系数模型

冷轧生产过程是在一定前张力和后张力的作用下实现的,在轧制力计算过程中,前后张力通过对轧件的变形抗力的影响进而影响轧制力的计算。

$$te = 1.05 \times \left(1 - \frac{t_b}{sk}\right) + 0.1 \times \left(1 - \frac{t_f}{sk}\right) - 0.15 \times \frac{\left(1 - \frac{t_b}{sk}\right)^2}{\left(1 - \frac{t_f}{sk}\right)} \quad (20)$$

式中, te 为张力影响系数; t_b 为轧件的单位后张力, N/mm^2 ; t_f 为轧件的出口单位张力, N/mm^2 ; sk 为轧件的动态变形抗力, N/mm^2 。

3 模型参数优化

对于 20 辊轧机轧制力模型优化的方法有如下两种:自学习系数在线自学习和根据现场数据模型参数离线优化。

3.1 轧制力自学习

由于所采用的 Bland-Ford-Hill 轧制力模型是在一定假设条件下建立的,计算的结果跟实际的情况会有一些的差距,因而采用自学习的方法对轧制力结果进行修正。在当前钢卷轧制结束以后采用的是指数平滑的自学习方法计算新的自学习系数,使其能够更准确地修正计算的轧制力,以用于下一个钢卷的计算^[5-7]。具体的计算步骤如下:

(1) 根据现场采集的实际数据(包括原料厚度、带钢的道次出入口厚度、带钢宽度、轧辊半径、前后张力等数据)在自学习系数取 1 时,调用 Bland-Ford-Hill 轧制力模型计算轧制力 P_1 ;

(2) 由现场采集的实际轧制力 P_2 与轧制力 P_1 相除计算出新的自学习系数 zp_2 ;

(3) 使用当前钢卷使用的自学习系数 zp_1 和实际值反算的自学习系数 zp_2 采用指数平滑法,如式(21)计算新的自学习系数 zp ^[5]。

$$zp = (1 - \Delta) \times zp_1 + \Delta \times zp_2 \quad (21)$$

式中, Δ 为增益系数,在这里取 0.5。

3.2 轧制力模型系数优化

轧制过程非常复杂,很难通过模拟实验的方法对轧制模型当中的模型参数进行优化,只能通

过采用现场数据,离线对其进行优化。在使用的轧制力模型当中可以进行优化的参数有:变形抗力计算模型当中的 l, m, n 和摩擦系数计算模型当中的 $\mu_0, \mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5$ 。可以通过调整模型当中的这些参数,使模型计算的轧制力与轧制过程中的实际轧制力的吻合程度更高。具体的优化方法如下:

(1) 从现场采集大量的同一钢种在轧制过程中实际的原料厚度、带钢的道次出入口厚度、带钢宽度、轧辊半径、前后张力、轧制速度、轧制力等数据。

(2) 对采集的每一组数据,使用前面介绍的轧制力模型在自学习系数为 1 的情况下,计算每一组的轧制力。

(3) 计算每一组数据中的实际轧制力与计算的轧制力的比值,即在模型当中应当使用的自学习系数。

(4) 调整变形抗力计算模型当中的 l, m, n 和摩擦系数计算模型当中的 $\mu_0, \mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5$, 并重复步骤 2 和 3, 对所有的带钢实际数据计算应当使用的自学习系数。

(5) 直至所有的自学习系数落在 0.9 ~ 1.1 之间并且使轧制力的自学习系数尽可能地靠近 1 时,停止对变形抗力计算模型当中的 l, m, n 和摩擦系数计算模型当中的 $\mu_0, \mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5$ 值的调整,如图 2 所示。

图 2 显示了调试的结果,显示了随着压下率的变化和轧制速度的变化自学习系数的分布规律,以及轧制力自学习系数的分布符合标准正态分布。

3.3 轧制力模型优化应用实例

表 1 显示了模型优化前和模型优化后在自学习系数为 1 时,模型计算的轧制力、实际轧制力、计算的自学习系数、偏差值的对比。

表 1 轧制力优化前后对比表

道次	优化前			优化后		
	计算值/ kN	实际值/ kN	偏差/ %	计算值/ kN	实际值/ kN	偏差/ %
1	4 310	4 600	6.3	4 490	4 450	0.8
2	4 570	4 190	9.1	4 570	4 560	0.18
3	4 170	3 850	8.2	4 260	4 200	1.4
4	4 240	3 900	8.5	3 850	3 780	1.6
5	3 820	3 420	11.6	3 380	3 390	0.01

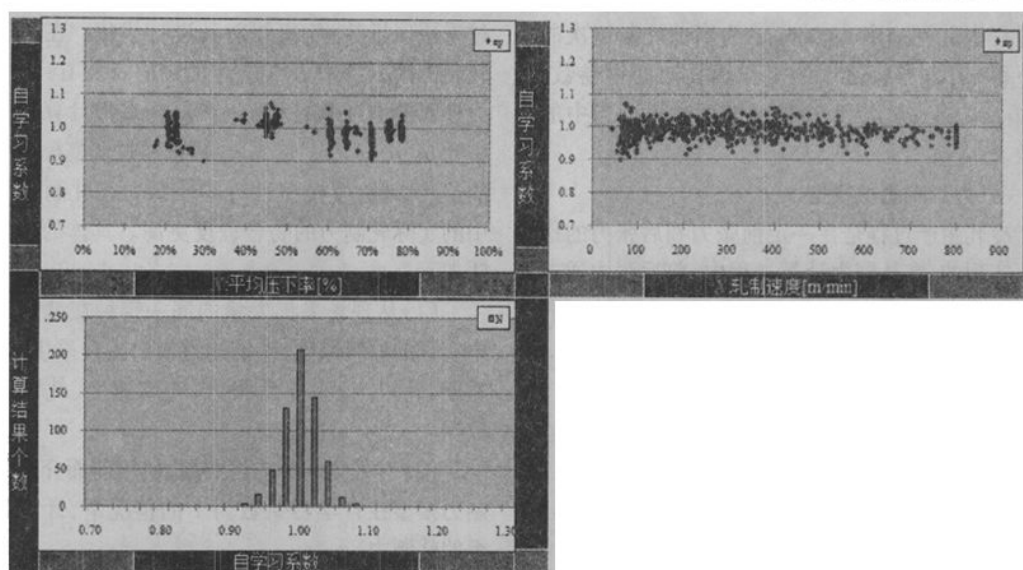


图2 模型优化效果图

从表中可以看出,在轧制力模型参数优化前后,轧制力的预报精度有了大幅度提高,所有道次的轧制力的预报偏差都在2%以内,甚至在最后1个道次,预报偏差只有0.01%。

4 总结

本文介绍了单机架可逆20辊森基米尔轧机的平面布置,给出了计算20辊森基米尔轧机的轧制力模型,并对模型进行了分析。给出了轧制力模型当中摩擦系数、变形抗力等重要因素的计算方法。采用指数平滑法对20辊森基米尔轧机的轧制力模型进行自学习。给出了20辊森基米尔轧机模型参数的优化方法,并将参数优化前后进行了对比。实践证明该轧制力模型可以给出非常精确的20辊森基米尔轧机的轧制力设定值。同时,给出的模型优化方法和自学习方法,使得该模型在复杂工况条件下具有较强的适应能力。

参考文献:

- [1]潘纯久. 20 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]李慧芳, 郭花. 20 辊森吉米尔轧机辊系结构分析[J]. 应用技术, 1999(1): 60-61.
- [3]王彦廷. ZR-33WF-18"20 辊森吉米尔轧机技术[J]. 冶金设备, 2000(5): 34-38.
- [4]方胜年. 森吉米尔 20 辊轧机的新技术[J]. 电工钢, 2002(2): 16-17.
- [5]刘相华, 胡贤磊, 杜林秀, 等. 轧制参数计算模型及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [6]杨节. 轧制过程数学模型[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [7]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.

[编辑: 谢红]