



一种新型控制方式在森基米尔轧机控制系统中的应用

赵静波 张成辉 刘新 滕永懂

首钢智新迁安电磁材料有限公司, 河北迁安 064400

[摘要] 本文对森基米尔轧机在带钢轧制过程中厚度控制进行了分析, 针对轧制0.35mm及以上规格带钢时采用传统AGC进行控制, 并使用不同的控制组合方式, 厚度控制效果良好, 在轧制0.35mm以下厚度薄规格带钢过程中, 产生了厚度波动问题, 为解决该问题, 使用速度质量流控制方式, 取得了较好的厚度控制效果。

[关键词] AGC控制; 薄规格带钢; 速度质量流控制

Abstract: In this paper, First analysis the Sendzimir cold rolling mills thickness control in strip rolling, the traditional AGC is used to control strip rolling of 0.35 mm and above, and different control combination methods are used. The thickness control effect is good. In the process of rolling steel strip with a thickness of 0.35 mm or less, the thickness fluctuation problem arises. To solve this problem, the method of speed quality flow control is proposed and used for thickness control. and a good thickness control effect is obtained.

Key words: AGC control; Thin gauge strip steel; Speed quality flow control.

前言

随着我国经济的发展, 对于冷轧薄规格带钢的需求越来越大, 据资料显示, 我国目前冷轧带钢生产能力过剩, 但高精产品依然供不应求。作为衡量带钢的重要质量指标, 带钢厚度公差在轧制时的厚度控制精度要求越来越高。从20世纪50年代初以来, 自动厚度控制系统(Automatic Gauge Control AGC)在轧机控制中得到了普遍应用, 并随着轧制要求得到了逐步完善。

森基米尔轧机具有牌坊刚度大、工作辊径小、整体式牌坊的特点, 适用于轧制硬度高的合金材料, 因此, 当一些高硬度带钢进行薄规格轧制时, 随着厚度的逐渐减薄, 需要压下量及轧制过程稳定性要求的逐渐上升, 采用森基米尔轧机进行轧制成为了理想的选择。

1 轧机厚度控制原理

板材轧制过程即是轧件产生塑性变形的过程, 也是轧机由于轧件的反作用力产生弹性变形(即弹跳)的过程, 二者同时作用。轧机在轧件咬入前的理论空载辊缝为 S_0 , 轧件咬入后, 按照Hook定律, 轧机弹性变形值与轧制力成正比, 弹跳值 P/M , 此时轧件厚度如下式所示:

$$h = S_0 + P/M \quad (1)$$

式中, h 为轧机出口侧带钢厚度, S_0 为轧机空载辊缝值, P 为轧制力, M 为轧机弹性模量。

实际轧制过程中, 当压力较小时, 轧机弹性形变及轧件塑性形变和压力之间呈现非线性关系, 且压力愈小, 所引起的变形也愈加难以精确确定, 亦即辊缝的实际零位难以确定。当轧制力大于固定值 P_0 时, 弹性形变及塑性形变与压力之间可近似为线性关系, 为消除这一非线性区域影响, 在实际中当辊径变化偏差达到1.5mm时, 进行辊缝标零(轧制力为 P_0)。在轧制过程中, 轧制力作用于Y轴方向, 带钢厚度变化于X轴方向, 随着轧制力变化, 根据弹性模量 M 和塑性模量 Q 变化曲线, 可以得到带钢出口厚度变化曲线, 即P-H图(图1)。

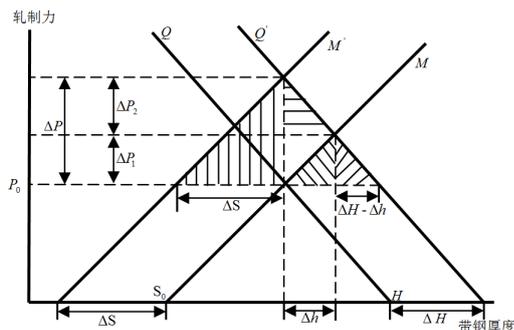


图1 P-H曲线

2 森基米尔轧机AGC控制方式

2.1 影响厚度控制的因素

由于轧制过程的复杂性，影响带钢厚度变化的因素很多，主要包括轧机方面因素和带钢方面因素。轧机方面因素主要包括轧辊热膨胀、轧辊偏心、轧机主电机与驱动辊之间的同轴度、轧机弹性系数等方面。带钢方面因素包括入口厚度变化、乳化液润滑、实际辊缝值、带钢表面油膜变化、带钢张力变化等方面。轧机方面因素主要通过定期进行设备精度的测量来保证。带钢方面因素由于变化具有特定性，与现场轧制工况息息相关，因此在带钢轧制过程中为了保证出口带钢厚度恒定，往往通过将各种控制结合在一起进行使用，最基本的控制方式就是在保证张力恒定的基础上，通过调节压下的厚度控制方式来保证厚度控制精度。

2.2 森基米尔轧机张力控制方式

森基米尔轧机为单机架可逆轧机，各道次带钢厚度和硬化程度不同，为了保证轧制过程的稳定性，当前国内单机架轧机的控制系统采用了自动电流（Automatic Current Regulator ACR）控制方式，来保证进出口张力恒定。自动电流控制方式通过自动控制系统到传动系统参考输出电流来控制出入口卷取机电机的输出转矩。

$$I_{REF} = I_T + I_{ACC} + I_M \quad (2)$$

式中， I_{REF} 为自动化控制系统的电流参考输出， I_T 为张力电流值， I_{ACC} 为加减速电流值， I_M 为机械损耗电流。

$$I_T = \frac{g}{\xi\phi} \times \frac{D}{2} \times T \times \frac{1}{G_r}$$

其中，

$$I_{ACC} = \frac{GD^2 \cdot N^2}{0.974 \cdot 375 \cdot E \cdot t_{ACC}}$$

I_M 值根据卷取机转速而呈现分段函数，在调试阶段根据现场运行情况通过控制程序实现转速不同时 I_M 电流的分段函数变化。

g 为重力加速度， $\xi\phi$ 为电机扭矩常数， D 为钢卷直径， T 为带钢张力， G_r 为电机齿轮比， GD^2 为机械惯量力矩， N 为电机转速， E 为电机电压， t_{ACC} 为加/减速时间， M 为机械损耗转矩， K_T 为转矩电流系数， ϕ 为磁场弱磁系数。

2.3 森基米尔轧机AGC控制方式

为了消除由于复杂工况导致的带钢厚差变化，根据轧制时的弹塑性曲线，森基米尔轧机辊缝AGC控制手段包括前馈（FF）AGC、反馈（FB）AGC、SMITH AGC、BISRA AGC、秒流量（MF）AGC和加减速（ACC/DEC）AGC控制组成，实际运行中根据道次和各种控制手段的特性，通过一种或者几种控制方法的同时投入来调节有载辊缝，确保带钢厚度控制精度，可以良好的消除各种因素对于带钢厚度控制的影响，森基米尔轧机AGC控制系统框图如图2所示。

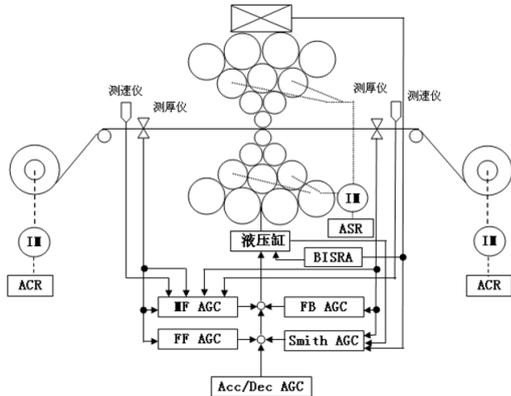


图2 森基米尔轧机AGC控制系统图

AGC控制系统设计的目的是为了消除由于来料厚差、出口厚差、硬度偏差、轧制速度等所造成的成品厚度偏差，通过控制辊缝改变带钢出口厚度，使带钢达到目标厚度。各AGC控制系统对于轧制干扰因素的影响如表1所示。

表1 干扰因素对于各AGC的影响

	来料厚差	出口厚差	硬度偏差	轧制速度	厚差响应
FF AGC	有效	—	—	小	—
FB AGC	—	有效	有效	小	慢
SMITH AGC	—	有效	—	小	快
BISRA AGC	有效	—	有效	小	快
MF AGC	有效	有效	有效	大	快

—代表无效

基于上述AGC控制对于干扰因素的影响，在生产0.35mm以上厚度带钢过程中，结合原料情况、以及轧辊粗糙度、乳化液浓度、乳化液流量、轧辊凸度等因素，对各钢种在不同道次采用了不同的厚度控制组合方式，并在成品道次速度高于45mpm时采用MF AGC和BISRA AGC控制相结合的控制方式，可以得到满意的带钢厚度控制结果。图3为成品道次厚度控制曲线图，图中红色线为出口成品厚度偏差曲线，绿色线为入口厚度偏差曲线，带钢轧制厚度偏差要求值为

$\pm \sigma \mu\text{m}$, 成品厚度完全满足要求。

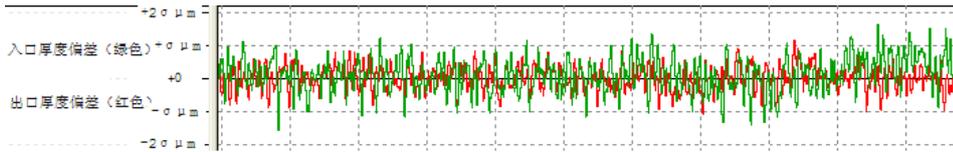


图3 传统 AGC 控制在 0.35mm 及以上规格带钢轧制厚度曲线

3 森基米尔轧机厚度控制方式的改进

3.1 传统AGC控制在0.35mm以下规格带钢轧制中的应用

在采用上述张力-辊缝进行厚度控制的方式下,生产 0.35mm 及以上厚度规格带钢时可以取得良好的控制效果,进行 0.35mm 以下厚度规格带钢生产过程中发现,在带钢宽度大于 1100mm,硬度大于 800t/mm 时,速度大于 400mpm 的情况下,入口厚度偏差稳定的情况下,出口带钢厚度较易出现波动,如图 4 所示。红色线为出口成品厚度偏差曲线,绿色线为入口厚度偏差曲线,带钢轧制厚度偏差要求值为 $\pm \sigma \mu\text{m}$,由于加减速阶段厚度偏差要求值为 $\pm 2\sigma \mu\text{m}$,在即将加减速时厚度产生周期性波动,导致断带和质量事故等异常情况的发生。

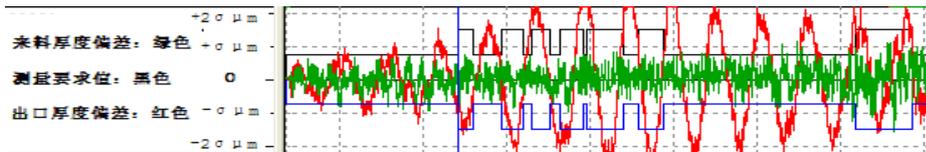


图4 传统 AGC 控制在 0.35mm 以下规格带钢轧制厚度曲线

通过对轧制数据进行分析,实际控制中,辊缝变化 $10 \mu\text{m}$ 时,带钢厚度只能达到 $1 \mu\text{m}$ 左右的变化,说明随着带钢变薄、带钢硬化增加、轧制温度上升、轧辊热膨胀、高温情况下的乳化液润滑等原因导致通过辊缝对带钢厚度进行控制较难达到理想结果。此时轧制 0.35mm 以下厚度带钢高速 AGC 控制时采用 MF+BISRA 的控制手段,入口厚度偏差稳定时,由于辊缝变化和带钢厚度变化呈现非线性关系,导致出口带钢厚度的波动,此时入口速度波动、入口张力产生同频率波动。

3.2 AGC控制方式的改进

在轧制 0.35mm 及其以上规格厚度带钢时,高速情况下 AGC 控制方式为 MF AGC 和 BISRA AGC 两种厚度控制方式。BISRA AGC 控制方式辊缝输出值如式 (3) 所示。

$$\Delta S = -\alpha \cdot \frac{\Delta P}{M} \quad (3)$$

ΔS : 辊缝输出值;

ΔP : 当前轧制力与锁定轧制力偏差值;

M : 轧机弹性模量;

α : BISRA 增益值

MF AGC 控制方式辊缝输出值如式 (4) 所示。

$$\Delta S = -C_{MF} \cdot \frac{M+Q(1-\alpha)}{M} \cdot \Delta h_{MF} - \int g_{mf} \cdot \frac{M+Q(1-\alpha)}{M} \cdot \Delta h_{MF} \cdot d\tau \quad (4)$$

$$\Delta h_{MF} = \frac{V_e}{V_0} \Delta H \quad (5)$$

式中:

Q : 轧件塑性模量;

Δh_{MF} : 秒流量控制出口厚度偏差;

g_{mf} : 积分增益常数;

C_{MF} : 比例增益常数;

V_e : 带钢入口速度;

V_0 : 带钢出口速度;

ΔH : 入口厚度偏差

式 (5) 为秒流量恒定式,轧制过程遵循质量流相等原则,由 (5) 式可得:

$$H \cdot V_e = h_{MF} \cdot V_0 \quad (6)$$

H 为入口厚度值, h_{MF} 为出口厚度值。

根据取向钢轧制过程中的实际数据进行分析,结合秒流量相等原则,由 (6) 式可得:

$$H \cdot \Delta V_e = \Delta h_{MF} \cdot V_0 \quad (7)$$

ΔV_e 为入口速度偏差变化值。

因此当轧制 0.35mm 厚度以下规格带钢轧制时,当厚度变薄、温度上升、速度增加时,辊缝值无法改变出口带钢厚度时,出口厚度偏差产生波动时,由于出入口卷取机采用张力控制,因此入口速度随之产生变化。

为改善轧制 0.35mm 厚度以下规格带钢厚度波动问题,针对上述分析,基于秒流量相等原则,提出通过改善入口速

度的方式来改变出口厚度变化值，此时出入口卷取机使用 ASR 方式进行控制，出入口张力值通过辊缝变化避免张力波动过大，来保证轧制过程的稳定。改善后森基米尔轧机 AGC 控制系统图如图 5 所示。

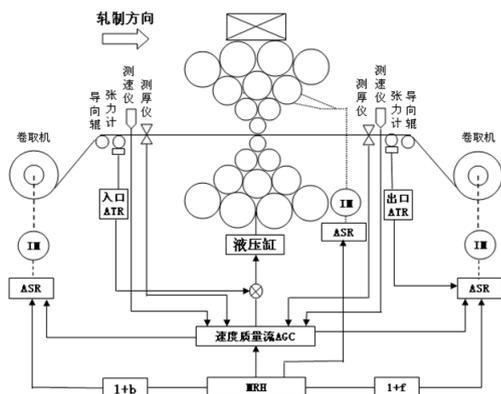


图 5 改进后的轧机 AGC 控制系统图

通过使用速度质量流 AGC 控制，出入口卷取机采用 ASR 控制方式进行速度控制，卷取机速度通过轧线速度匹配 MRH 进行参考速度给出，同时根据速度质量流 AGC 控制进行参考速度的实时修正，从而保证主轧机和出入口卷取机速度相匹配。出口成品厚度偏差通过速度质量流控制方法，根据公式 (7)，通过调整入口速度值 ΔV_e ，来进行出口厚度调整，保证出口厚度值的恒定，入口张力值根据入口张力计 ATR 控制，经过进行 AGC 厚度控制方式的改进后，轧制厚度曲线如图 6 所示。图中红色线为出口成品厚度偏差曲线，绿色线为入口厚度偏差曲线，带钢轧制厚度偏差要求值为 $\pm \sigma \mu\text{m}$ ，控制效果优于 0.35mm 厚度及其以上规格带钢。

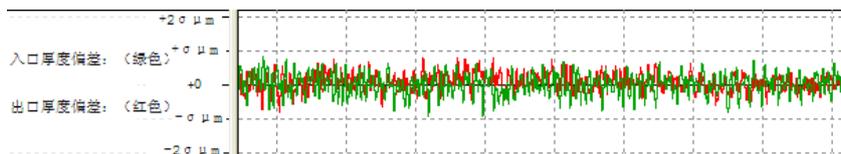


图 6 速度质量流 AGC 在 0.35mm 以下规格带钢轧制厚度曲线

通过在轧制 0.35mm 厚度以下规格带钢轧制时，厚度控制方式的优化，采用了速度质量流 AGC 控制方式，解决了 0.35mm 厚度以下薄规格带钢高速轧制时的厚度偏差过大、厚度周期震荡的问题，成品厚度控制优于 0.35mm 及其以上厚度规格带钢的控制效果。

4 结论

通过对森基米尔轧机在采用传统 AGC 控制情况下，轧制 0.35mm 厚度及其以上规格带钢与 0.35mm 厚度以下薄规格带钢在轧制过程中的厚度控制情况进行了对比，针对 0.35mm 厚度以下薄规格带钢成品厚度控制波动情况，提出了采用新型厚度控制方式速度质量流控制，解决了 0.35mm 厚度以下规格带钢厚度波动问题，通过控制曲线可以看出，相对于传统 AGC 控制，在同样要求成品厚度偏差值为 $\pm \sigma \mu\text{m}$ 的情况下，可以取得更好的控制效果，从而实现不采用传统的 FF、FB、BISRA、MF、SMITH、ACC/DEC AGC 进行带钢轧制，而是采用了一种新型的厚度控制方式，达到了良好的控制效果，为冷轧带钢厚度控制提出了一种新型的控制思路。

[参考文献]

- [1] YU Hai-liang, LIU Xiang-hua, WANG Chao, Park Hae-doo. Analysis of Roll Gap Pressure in Sendzimir Mill by FEM[J]. ScienceDirect, 2006, 9:30-33.
- [2] Gunawardene G W D M, Grimble M J, Thomson A. Static Model for Sendzimir Cold-Rolling Mill[J]. Met Technol 1981, 8(7):274.
- [3] 孙杰, 张殿华, 曾玉清, 程平文, 李旭. 单机架可逆轧机自动控制系统 [J], 冶金自动化, 2008, 1(32):45-48
- [4] 潘纯久编著. 二十辊轧机及高精度冷轧钢带生产 [M]. 北京: 冶金工业出版社. 2003. 9
- [5] 赵静波, 滕永懂, 王建, 龚磊等. 森基米尔轧机在硅钢轧制中的厚度控制分析及改进 [J]. 中国科技博览, 2016, 10(21):92-93.

作者简介: 赵静波 (1982-), 男, 满族, 内蒙古喀喇沁旗人, 硕士研究生学历, 电气控制高级工程师, 研究方向为冶金自动化控制和冶金智能控制应用。