

• 轧钢自动化 •

doi:10.13228/j.boyuan.issn1003-9996.20130268

1850mm 冷连轧机 AGC 算法及控制策略研究

宋浩源¹, 陈光¹, 陈甚超¹, 乔建军¹, 王超²

(1. 北京首钢冷轧薄板有限公司, 北京 101304;
2. 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 以首钢顺义冷轧薄板有限公司 1850mm 冷连轧机为研究对象, 根据 AGC 控制基本原理, 给出了 AGC 系统中前馈 AGC、监控 AGC 及秒流量 AGC 的算法。同时, 分析研究了 AGC 系统的控制策略, 给出了前部机架常规秒流量、扩展秒流量控制模式和后部机架 A、B、C3 种控制模式的控制方式及特点。应用效果表明, 采用前部机架扩展秒流量模式结合后部机架模式 C 控制, 成品厚度精度满足现场生产要求。

关键词: 冷连轧; 算法; 控制策略; 自动厚度控制(AGC); 秒流量控制

文献标志码: A **文章编号:** 1003-9996(2014)04-0061-06

Research on algorithm and strategy of AGC system for 1850mm tandem cold mill

SONG Hao-yuan¹, CHEN Guang¹, CHEN Shen-chao¹, QIAO Jian-jun¹, WANG Chao²

(1. Beijing Shougang Cold Rolling Co., Ltd., Beijing 101304, China;
2. The State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Based on the fundamental of automatic gauge control, the algorithms of feed forward AGC, monitor AGC and mass flow AGC are presented for Shougang Shunyi 1850mm tandem cold mill. Meanwhile, the strategy of AGC system is detailed studied. The control methods and characteristics are presented for the control modes of foreside stands included conventional mass flow control and advanced mass flow control, and the three gauge control modes of rear stand included A, B and C. The application result indicates that the accuracy of thickness of product satisfies the requirement of the practical production with the combination of modes advanced mass flow control of foreside stands and C of rear stand.

Key words: tandem cold rolling; algorithm; control strategy; automatic gauge control(AGC); mass flow control

厚度指标是冷轧产品的一个重要指标, 其在很大程度上依赖于厚度自动控制 AGC 系统(Automatic Gauge Control)的控制精度。北京首钢冷轧薄板有限公司 1850mm 冷连轧机采用六辊 CVC 轧机, 机械部分由德国 SMS-Demag 公司提供, 电气控制部分由 SIEMENS 公司提供, 产品厚度 0.2~2.5mm。本文以此产线实际情况为基础, 对其 AGC 系统进行分析研究。

1 AGC 控制原理

弹性-塑性曲线($P-h$ 图)是自动厚度控制的基本曲线, 弹性-塑性曲线的交点为轧制点, 见图 1。

当出现厚度偏差时, 可依据弹性-塑性曲线定量调节机架辊缝, 以消除厚度偏差^[1]。

20 世纪 90 年代激光测速仪的应用, 可以精

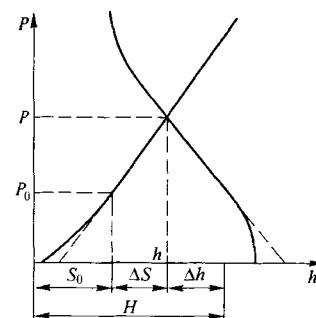


图 1 弹塑性曲线($P-h$ 图)

Fig. 1 Mill elasticity and plasticity curve ($P-h$ curve)

确测量带钢速度, 从而将秒流量恒定原理引入到自动厚度控制中^[2], 见式(1):

$$v_H B_H H = v_h B_h h \quad (1)$$

考虑到冷连轧带钢宽展极小, 可忽略宽度变

收稿日期: 2013-11-18 收修改稿日期: 2013-11-28

作者简介: 宋浩源(1985—), 男(汉族), 辽宁喀左人, 工程师, 硕士, 主要从事轧机自动化控制方面的研究工作。

（福建）福田市力天量控有限公司
Tel:0594-2695245 2636151 2636152
大力值、轧制力传感器及控制

化,因此依据简化后的式(2)可定量调节电机速度来消除厚差:

$$v_H H = v_h h \quad (2)$$

以上式中: v_H 为入口带钢速度; H 为入口带钢厚度; B_H 为入口带钢宽度; v_h 为出口带钢速度; h 为出口带钢厚度; B_h 为出口带钢宽度。

2 AGC 基本控制算法

2.1 前馈 AGC

前馈 AGC 在轧制过程尚未进行之前,预先检测出来料的厚度偏差,并前馈送给下一机架,在预定时间内调整执行机构,来保证获得所要求的出口带钢厚度。其优点是可提前控制,完全去掉信号检测及机构动作所产生的滞后。

依据 $P-h$ 图可得出对于入口带钢厚度波动 ΔH 相应的辊缝调节量 ΔS_{FFC} :

$$\Delta S_{FFC} = \frac{Q}{K_m} \Delta H \quad (3)$$

式中: ΔS_{FFC} 为前馈 AGC 输出的辊缝调节量; Q 为轧件塑性系数; K_m 为轧机刚度系数; ΔH 为入口带钢厚度偏差。

为确保进入变形区的流量不变,应该同时调整上游机架的速度。依据秒流量相等原理,可得出前馈 AGC 对速度的调节量:

$$(v_H^* + \Delta v_H)(H^* + \Delta H) = v_h^* h^* \quad (4)$$

式中: v_H^* 为入口带钢速度设定值; Δv_H 为入口带钢速度变化量; H^* 为入口带钢厚度设定值; v_h^* 为出口带钢速度设定值; h^* 为出口带钢厚度设定值。

$$\text{由于 } v_H^* H^* = v_h^* h^* \quad (5)$$

故为消除入口带钢厚度偏差 ΔH ,忽略高阶项,得到上游机架前馈调节量为:

$$\Delta v_{FFC, entry-stand} = -\frac{\Delta H}{H^*} v_H^* \quad (6)$$

式中: $\Delta v_{FFC, entry-stand}$ 为前馈 AGC 输出的上游机架速度调节量。

在上游机架的调整过程中,为了维持入口带钢张力,需要对入口 S 辊进行级联调节。

$$\text{由于 } \frac{v_s^*}{v_H^*} = \frac{\Delta v_s}{\Delta v_H} \quad (7)$$

因此,相应的对入口 S 辊的速度调节量为:

$$\Delta v_{FFC, entry-s} = -\frac{\Delta H}{H^*} v_s^* \quad (8)$$

以上式中: v_s^* 为入口 S 辊速度设定值; Δv_s 为入口 S 辊速度的变化量; v_h^* 为出口带钢速度设定

值; Δv_H 为入口带钢速度变化量; $\Delta v_{FFC, entry-s}$ 为前馈 AGC 输出的入口 S 辊速度调节量; H^* 为入口带钢厚度设定值; ΔH 为入口带钢厚度偏差。

2.2 监控 AGC

为消除轧辊磨损、轧辊热膨胀等因素对出口带钢厚度的影响,引入反馈式厚度控制系统,即监控 AGC。由于测厚仪安装位置距机架有一段距离,所测信号为滞后信号,直接进行闭环控制会导致系统不稳定,因此设置 Smith 预估器来根据监控的输出预估其控制的结果^[3]。

依据弹跳方程及 $P-h$ 图可知,为了消除出口带钢厚度偏差 Δh ,需要当前机架位置调节量 ΔS_{MON} 为:

$$\Delta S_{MON} = \left(1 + \frac{Q}{K_m}\right) \Delta h \quad (9)$$

式中: ΔS_{MON} 为监控 AGC 输出的当前机架位置调节量; Q 为轧件塑性系数; K_m 为轧机刚度系数; Δh 为出口带钢厚度偏差。

为确保进入下一机架的流量不变,应该同时调整本机架速度。依据秒流量恒定原理,可得出监控 AGC 对速度的调节量:

$$v_H^* H^* = (v_h^* + \Delta v_h)(h^* + \Delta h) \quad (10)$$

式中: v_H^* 为入口带钢速度设定值; H^* 为入口带钢厚度设定值; v_h^* 为出口带钢速度设定值; Δv_h 为出口带钢速度变化量; h^* 为出口带钢厚度设定值; Δh 为出口带钢厚度偏差。

联立式(5),监控 AGC 对当前机架的速度调节量为:

$$\Delta v_{MON, exit-stand} = -\frac{\Delta h}{h^*} v_h^* \quad (11)$$

式中: $\Delta v_{MON, exit-stand}$ 为监控 AGC 输出的当前机架速度调节量; Δh 为出口带钢厚度偏差; v_h^* 为出口带钢速度设定值; h^* 为出口带钢厚度设定值。

对当前机架的调整过程中,为了维持入口带钢张力,需要对入口 S 辊进行级联调节。

联立式(7),对入口 S 辊的速度调节量为:

$$\Delta v_{MON, entry-s} = -\frac{\Delta h}{h^*} v_s^* \quad (12)$$

式中: $\Delta v_{MON, entry-s}$ 为监控 AGC 输出的入口 S 辊速度调节量; h^* 为入口带钢厚度设定值; Δh 为入口带钢厚度偏差; Δv_s 为入口 S 辊速度的变化量。

2.3 秒流量 AGC

采用测量仪表对带钢出口厚度进行测量,均



避免不了检测信号具有时间滞后的缺点,使得厚度控制系统采样和控制周期较长。秒流量AGC可实时计算出口带钢厚度,实现了即时对带钢厚度进行控制,且秒流量AGC具有设备和系统简单、安装调整方便和控制精度高的特点,所以在带钢冷连轧机上得到了迅速发展和应用^[4]。

根据变形区流量方程:

$$v_H(H^* + \Delta H) = v_h(h^* + \Delta h) \quad (13)$$

得到:

$$\Delta h = \frac{v_H}{v_h} \times (H^* + \Delta H) - h^* \quad (14)$$

以上式中: v_H 为入口带钢实际速度; H^* 为入口带钢厚度设定值; ΔH 为入口带钢厚度偏差; Δh 为出口带钢厚度偏差; h^* 为出口带钢厚度设定值; v_h 为出口带钢实际速度。

与监控AGC类似,对当前机架压下位置的调节量 ΔS_{MFC} 为:

$$\Delta S_{MFC} = \left(1 + \frac{Q}{K_m}\right) \Delta h \quad (15)$$

相应的,对当前机架的速度调节量为:

$$\Delta v_{MFC, exit-stand} = -\frac{\Delta h}{h^*} v_h^* \quad (16)$$

以上式中: ΔS_{MFC} 为当前机架压下位置的调节量; Q 为轧件塑性系数; K_m 为轧机刚度系数; Δh 为出口带钢厚度偏差; $\Delta v_{MFC, exit-stand}$ 为秒流量AGC输出的当前机架速度调节量; h^* 为出口带钢厚度设定值; v_h^* 出口带钢速度设定值

对入口S辊的速度调节量为:

$$\Delta v_{MFC, entry-s} = -\frac{\Delta h}{h^*} v_s^* \quad (17)$$

式中: $\Delta v_{MFC, entry-s}$ 为秒流量AGC输出的入口S辊速度调节量; h^* 为出口带钢厚度设定值; Δh 为入口带钢厚度偏差; Δv_s 为入口S辊速度的变化量。

3 首钢1850mm冷连轧机AGC系统控制策略

首钢1850mm冷连轧AGC控制方式的选择取决于仪表的配置,1850mm冷轧机的仪表布置如图2所示。

1850mm冷连轧机的厚度控制系统控制结构可分为前部机架厚度控制系统和后部机架厚度控制系统两部分。前部机架包括1#、2#机架,有常规秒流量(CMF)和扩展秒流量(AMF)两种控制模式;后部机架指5#机架,相应地有A、B、C3种

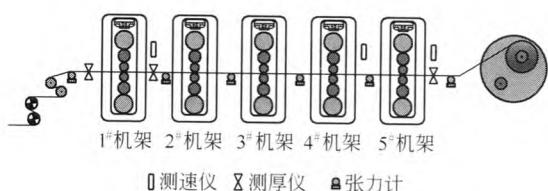


图2 首钢1850mm冷连轧机仪表布置

Fig. 2 Sensor configuration of 1850mm tandem cold mill of shougang

厚度控制模式。前部机架厚度控制的主要目的是基本上消除来料厚度95%以上的厚差,减少由于轧辊偏心造成的厚度周期波动;后部机架厚度控制的主要目的是根据成品测厚信息进行成品厚度精度的最终控制。

3.1 前部机架控制系统

3.1.1 常规秒流量控制

常规秒流量控制(Conventional Mass Flow Control),简称CMF,是应用于1#、2#机架的一种厚度控制模式,见图3。在CMF中,入口S辊电机采用间接张力控制,以保证轧机入口张力恒定;1#、2#机架间张力控制器的输出作为附加给定值,作用于2#机架的辊缝,保证机架间张力的恒定。CMF下厚度控制环节如下:

(1) 1#机架的前馈AGC(FFC₁)、监控AGC(MON₁)和秒流量AGC(MFC₁),分别作用于1#机架的辊缝,用以消除来料厚差引起的轧后厚差和提高1#机架后带钢的厚度精度;

(2) 2#机架的前馈AGC(FFC₂),作用于2#机架辊缝和1#机架的电机速度,以消除1#机架后带钢厚度偏差对2#机架后带钢厚度精度的影响;

(3) 根据FFC₁、MON₁、MFC₁调节1#机架的辊缝变化值和根据FFC₂调节1#机架电机速度变化值,对入口S辊电机进行加速度补偿调节,避免轧机入口张力波动。

3.1.2 扩展秒流量控制

扩展秒流量(Advanced Mass Flow Control),简称AMF,见图4(图中各符号代表的物理量与图3中的一致)。AMF与CMF的最大区别是:将秒流量恒定原理扩展到入口S辊,它将S辊看作是零压下量的“零机架”^[5]。AMF中,轧机入口张力不再由S辊电机控制,而改为采用调节1#机架辊缝的方式来控制;控制的调解量作用到入口S辊的速度控制环上,通过速度调节对厚度进行补偿。相比于CMF,AMF

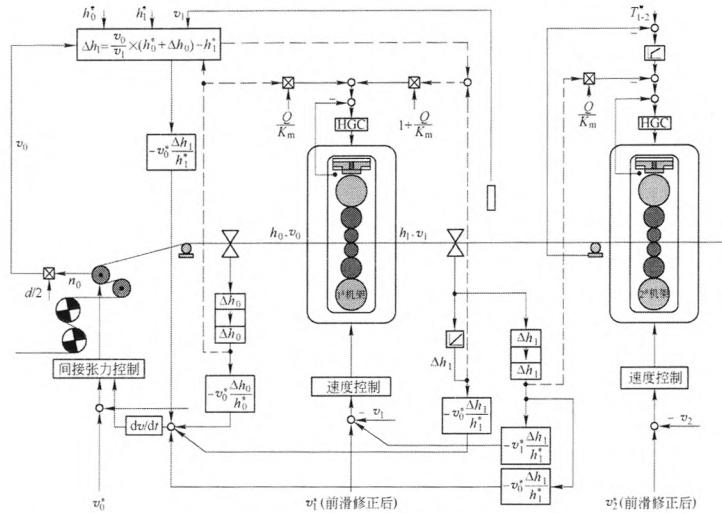
大力值、轧制力传感器及其控制
 (福建)莆田市大力天量控有限公司
 Tel:0594-2695245 2636151 2636152

中 S 轧电机控制方式由间接张力控制改为速度控制。AMF 下厚度控制环节如下：

(1) 1# 机架的前馈 AGC(FFC₁)、监控 AGC(MON₁)和秒流量 AGC(MFC₁)，分别作用于 1# 机架的辊缝和入口 S 轧电机速度，用以消除来料厚差引

起的轧后厚差和提高 1# 机架后带钢的厚度精度；

(2) 2# 机架的前馈 AGC(FFC₂)，作用于 2# 机架辊缝、1# 机架的电机速度和入口 S 轧电机速度，以消除 1# 机架后带钢厚度偏差对 2# 机架后带钢厚度精度的影响。



h_0, h_1 — 入口、1# 机架带钢厚度实际值; h_0^*, h_1^* — 入口、1# 机架带钢厚度设定值; $\Delta h_0, \Delta h_1$ — 入口、1# 机架后带钢厚度偏差值; $v_0 \sim v_2$ — 入口 S 轧至 2# 机架带钢速度实际值; $v_0^* \sim v_2^*$ — 入口 S 轧至 2# 机架带钢速度设定值; T_{0-1}^* — 入口 S 轧和 1# 机架间张力设定值; T_{1-2}^* — 1#、2# 机架间张力设定值; Q — 轧件塑性系数; K_m — 轧机刚度系数; n_0 — 入口 S 轧 2# 辊转速; d — 入口 S 轧 2# 辊直径。

图 3 常规秒流量 AGC 系统框图

Fig. 3 The schematic diagram of conventional mass flow control

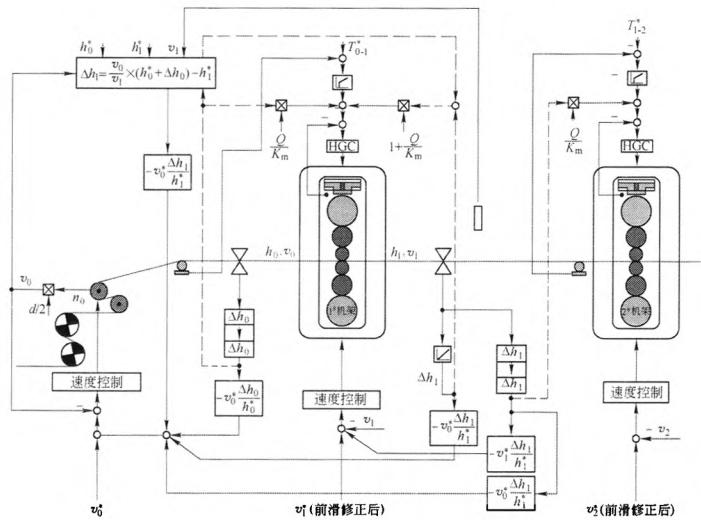


图 4 扩展秒流量 AGC 系统框图

Fig. 4 The schematic diagram of advanced mass flow control

由于在 AMF 控制模式中，入口 S 轧作为零压下的“零机架”，所以精确调节 S 轧电动机的速度，可以有效提高 1# 机架后带钢厚度精度；而在 CMF 控制模式中，入口 S 轧电动机的主要作

用是保持轧机入口张力的恒定，对比而言，不如 AMF 控制快速和精确。首钢 1850mm 冷连轧机在轧钢全过程均采用 AMF 的前部机架控制模式。

3.2 后部机架控制系统

经过1#、2#机架的AGC控制后没能补偿的厚度偏差将由5#机架的AGC进行消除,其有A、B、C3种厚度控制模式可供选择。

(1)模式A,又称压下模式,主要适用于轧制材质较软且厚的带钢,见图5。5#机架监控AGC的控制量在控制其压下的同时,附加于本机架的速度控制环。监控AGC对出口带钢厚度偏差测算后反馈调节5#机架的压下和轧制速度,对出口厚度超差的带钢进行控制。在控制过程中,4#、5#机架间的带钢张力需保持恒定,该张力控制是通过调整末机架的压下位置来实现,5#机架后的带钢张力控制是通过卷取机的张力控制环来完成。

(2)模式B,又称极限张力模式,主要是适用于轧制材质硬而薄的带钢,见图6(图中各符号代表的物理量与图5中的一致)。在轧制过程中,由于轧件的塑性系数较大,调节压下位置增大轧制力影响的是轧辊的压扁程度,而不是带钢的压下量。模式B对带钢厚度的控制主要通过末机架的速度调整完成。此模式允许4#、5#机架间的带钢张力在一定范围内变化而不做控制,当带钢张力超出极限时调整压下位置使张力回到极限范围内。如果机架间带钢的张力超出极限且出口带钢厚度还存在偏差,则投入辊缝控制手段来消除厚差。同时二级系统会重新计算负荷分配,将5#机架恢复到正常控制模式下。

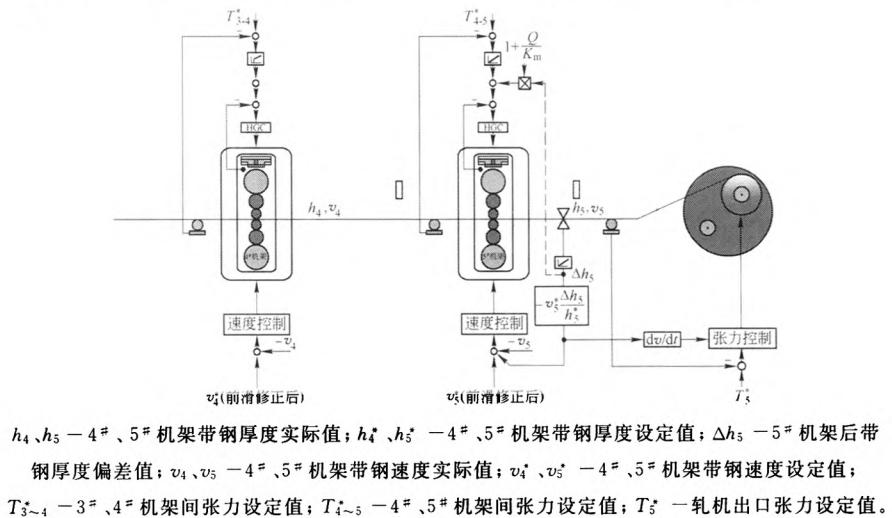


图5 模式A厚度控制系统框图

Fig. 5 The schematic diagram of mode A

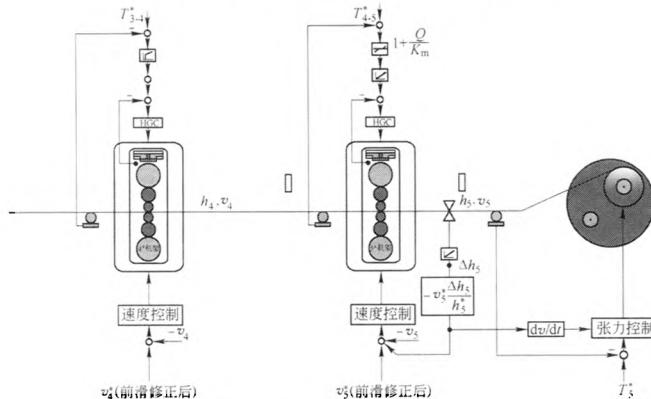


图6 模式B厚度控制系统框图

Fig. 6 The schematic diagram of mode B

(3)模式C,又称平整模式,即认为前4机架已经满足带钢的压下量以及厚度控制的需要,把5#机架作为平整机,见图7(图中各符号代表的物

理量与图5中的一致)。由于5#机架压下机构采用恒轧制力控制方式,并无厚度控制能力,如果在末机架的出口测量到厚度偏差信号,则需要反馈

(福建)莆田市力天量控有限公司
Tel:0594-2695245 2636151 2636152

到 4# 机架, 调整 4# 机架压下位置, 同时调整 4#、5# 机架的速度, 以消除出口带钢的厚度偏差。

后部机架 AGC 的 3 种控制模式各有其特点, 模式 A 和 B 易于发挥生产能力, 而模式 C 易于控制板

形。由于首钢带钢板形异议呈现上升的趋势, 所以 1850mm 冷连轧机在后部机架 AGC 模式的选择上, 优先选择模式 C, 以保证带钢具有良好的板形。

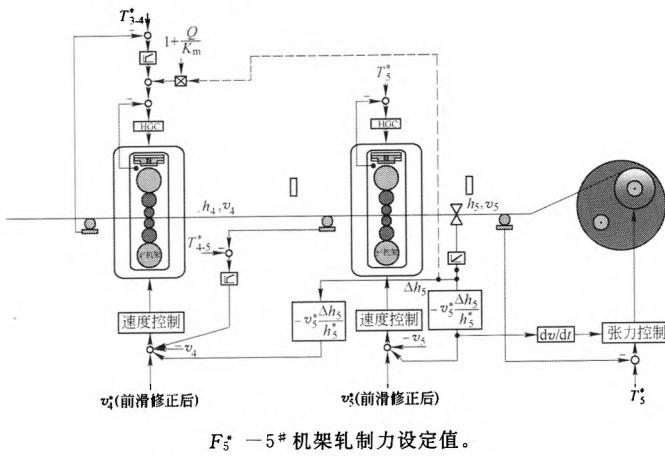


图 7 模式 C 厚度控制系统框图

Fig. 7 The schematic diagram of mode C

4 实际应用效果

图 8 为成品厚度情况, 其轧制条件为: 钢种 DC01, 来料规格 2.3mm × 1205mm, 成品规格 0.39mm × 1205mm, 采用前部机架 AMF 模式结

合后部机架模式 C 进行控制, 经 5 道次轧制后, 成品带钢最大厚差升速时为 0.95%, 匀速时为 0.64%, 降速时为 0.95%。

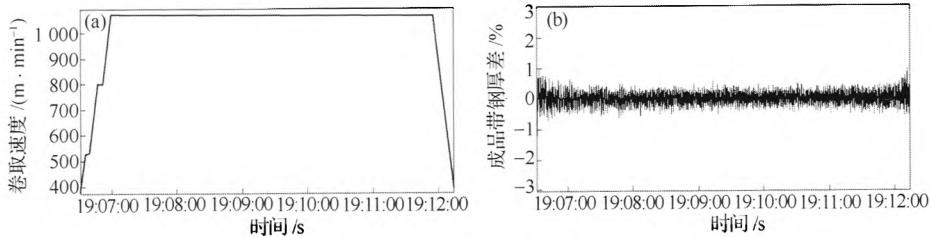


图 8 成品厚度情况

Fig. 8 Thickness error of finished product

表 1 为主要自动化厂商的以上轧制条件下的厚度保证值情况。可以看出, 该套 AGC 系统整体运行稳定, 厚度控制精度高, 满足现场生产要求。

表 1 主要自动化厂商厚度保证值

Table 1 Gauge performance guarantees of main automatic manufactures

厂商	厚度保证值/mm	
	升降速	匀速
MITSUBISHI	±1.7	±1.0
SIEMENS	±1.8	±1.2

5 结论

(1) 本文从前馈 AGC、监控 AGC 和秒流量 AGC 的控制算法以及控制策略两个方面对首钢顺义冷轧 1850mm 冷连轧机的 AGC 系统进行了分析研究。

(2) 从现场生产实际出发, 1850mm 冷连轧机优先采用前部机架 AMF 模式结合后部机架模式 C 方式控制。

(3) 应用效果表明, 该套 AGC 系统整体运行稳定, 厚度控制精度高, 满足现场生产要求。

参考文献:

- [1] 孙一康. 带钢冷连轧计算机系统控制 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [2] 肖至勇. 基于激光测速仪的秒流量控制 AGC [J]. 宝钢技术, 2004(1): 17.
- [3] Smith O J M. Closed control of loops with dead time [J]. Chemical Engineering Progress, 1957, 53(5): 217.
- [4] 王国栋, 刘相华, 王军生. 冷连轧厚度自动控制 [J]. 轧钢, 2003, 20(3): 38.
- [5] 朱义国. 宝钢 1420 轧机 AGC 系统分析 [J]. 宝钢技术, 2005 (增刊): 24.