

## 新能源汽车电工钢二十辊轧机轧制工艺技术研发

刘 松<sup>1,2</sup>, 徐利璞<sup>1,2</sup>, 刘云飞<sup>1,2</sup>, 魏志毅<sup>1,2</sup>, 黄 煜<sup>1,2</sup>, 计 江<sup>1,2</sup>, 刘江林<sup>3</sup>, 柳 宇<sup>4</sup>

(1. 中国重型机械研究院股份公司, 陕西 西安 710018; 2. 金属成形技术与重型装备全国重点实验室, 陕西 西安 710018;  
3. 太原理工大学 机械工程学院, 山西 太原 030024; 4. 西安理工大学 计算机科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 针对电工钢的材料属性和二十辊轧机的设备特性, 研发了二十辊轧机在线监测工艺技术及其板厚与板形控制技术。断带预警系统、巡边测厚系统和精确准停控制系统等在线监测工艺技术为电工钢产品整体品质的提升提供了硬件基础, 极大降低了边裂和断带风险, 并显著提升了成材率。综合运用预控 AGC、监控 AGC 和秒流量 AGC 的板厚控制技术与控制策略和核心算法更先进的板形控制技术, 不仅为电工钢规模化生产提供了软件保障, 而且对其板形和板厚等核心技术指标完成了有效控制。通过软硬件的协同作用, 本轧制工艺技术使带材精度和同板差得到有效控制, 厚度精度达 $\pm 1 \mu\text{m}$ , 板形精度达 5 I。电工钢的成材率和生产效率得以提升, 而且其磁性增强、铁损降低, 满足了新能源汽车的需求。

**关键词:** 新能源汽车; 电工钢; 二十辊轧机; 在线监测; 板形控制

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.02.015

**中图分类号:** TG335.5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2025) 02-0115-10

## Research and development on rolling process technology of twenty-roller rolling mill for electrical steel in new energy vehicle

Liu Song<sup>1,2</sup>, Xu Lipu<sup>1,2</sup>, Liu Yunfei<sup>1,2</sup>, Wei Zhiyi<sup>1,2</sup>, Huang Yu<sup>1,2</sup>, Ji Jiang<sup>1,2</sup>, Liu Jianglin<sup>3</sup>, Liu Yu<sup>4</sup>

(1. China National Heavy Machinery Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710018, China;

2. National Key Laboratory of Metal Forming Technology and Heavy Equipment, Xi'an 710018, China;

3. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

4. School of Computer Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** For the material properties of electrical steel and the equipment characteristics of a twenty-roller rolling mill, an online monitoring process technology for twenty-roller rolling mill and its plate thickness and shape control technology was researched and developed. Online monitoring process technologies including breakage warning system, edge inspection and thickness measurement system, and precise stopping system provided a hardware foundation for improving the overall quality of electrical steel products, which greatly reduced the risk of edge cracking and breakage, and significantly improved the yield rate. Comprehensive application of plate thickness control technologies including pre-control AGC, monitoring AGC and second flow AGC, as well as plate shape control technologies with more advanced control strategies and core algorithms, not only provided software support for the large-scale production of electrical steel, but also effectively controlled the core technical indicators such as plate shape and thickness. Through synergistic effect of software and hardware, this rolling process technology effectively controlled accuracy of strip and the same plate difference, with a thickness accuracy of  $\pm 1 \mu\text{m}$  and a plate shape accuracy of 5 I. Thus, the yield rate and production efficiency of electrical steel were improved, and its magnetic strength was enhanced and iron loss was reduced, meeting the needs of new energy vehicles.

**Key words:** new energy vehicle; electrical steel; twenty roller rolling mill; online monitoring; shape control

新能源汽车是我国实现“双碳”目标的重要抓

手, 不仅对低碳环保具有重要的贡献, 还全面推动了整个消费产业链的向好发展<sup>[1-9]</sup>。全面发展新能源汽车是影响国计民生的重大战略之一, 我国计划于 2025 年前将新能源汽车的产销数量普及至 25% 以上。实际上, 目前国内新能源汽车的渗透率已超过燃油车并成为未来的主流车型之一<sup>[10-22]</sup>。

电机、电池和电控是新能源汽车的三大核心技术。电机的大扭矩、高转速和反复冲击的基本工况

**收稿日期:** 2024-09-03; **修订日期:** 2024-12-08

**基金项目:** 陕西省技术创新引导专项 (2024QY-SZX-08); 国家自然科学基金面上项目 (52075359)

**作者简介:** 刘 松 (1984-), 男, 硕士, 高级工程师

**E-mail:** liuslius0351@163.com

**通信作者:** 柳 宇 (1989-), 女, 硕士

**E-mail:** liuyu@xaut.edu.cn

对其材料的电磁特性和力学性能要求极高。新能源汽车用电工钢的硬核指标为“高磁感 (High Magnetic Induction)、高频低铁损 (High-frequency Low-iron Loss)、高强度 (High Strength)”, 简称 H3 技术<sup>[23-29]</sup>。而诸如刀片电池和车载主板等核心零部件还对表面质量和同板差等技术指标有着严格的要求。

各大车企对新能源汽车电工钢的材料性能、几何精度和电磁特性的要求愈加严苛, 而其核心轧制工艺技术被国外所垄断, 因此, 我国对于新能源车用电工钢长期面临着高价进口和技术封锁的不利局面<sup>[30-44]</sup>。攻克电工钢核心轧制工艺, 弥补国内在该领域的空白, 推动钢铁产业的全面发展, 掌握该项“卡脖子”技术, 已成为刻不容缓的历史使命。

## 1 二十辊轧机在线监测工艺技术

因应用场景的特殊性, 电工钢的电磁特性是衡量其产品品质的核心关键指标之一<sup>[45-50]</sup>。实践证明, 通过降低带材的厚度可以极大地降低产品的铁损并取得良好的磁性。二十辊轧机因极高的辊系刚度和极小的工作辊辊径, 是生产薄带的首选装备, 相应的设备布局如图 1 所示。

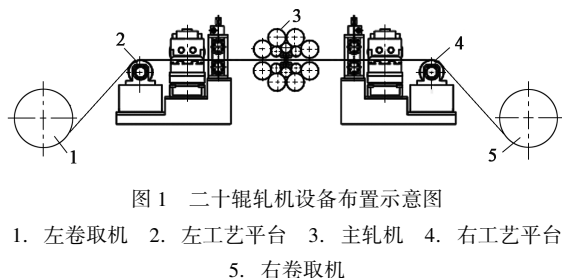


图 1 二十辊轧机设备布置示意图

1. 左卷取机 2. 左工艺平台 3. 主轧机 4. 右工艺平台  
5. 右卷取机

Fig. 1 Schematic diagram of equipment layout for twenty-roller rolling mill

该机组采用对称布置, 左右工艺平台和左右卷取机关于主轧机呈对称布置, 且结构形式和设备参数均相同, 因此, 操作人员可根据生产需要在左右任意一侧上卸卷。原料带卷可在任一卷取机开卷, 经过主轧机后在另一卷取机上卷取, 进行可逆轧制, 轧制完成后根据轧制工艺的设计, 可在任一卷取机上卸卷。其中, 左右工艺平台对带材的张力、厚度和速度等核心参数实施测量, 并为二十辊轧机在线监测工艺技术提供原始数据。

### 1.1 断带预警系统

原料中 Si 元素的加入是带材获得高磁感应强度的关键, 电工钢中 Si 的含量一般在 3% 左右, 然而, Si 元素的加入使得原料的塑性降低和脆性增加, 尤

其易发生边裂而导致断带等恶性事故的发生。因而本轧制技术研发了断带预警系统。

根据最小阻力定律, 可逆轧制过程中沿板带宽度方向的塑性金属变形极易导致产品的边部开裂和张应力骤增, 进而产生断带等恶性生产事故。断带预警系统, 主要用于防止带材边裂情况的发生, 若断带预警系统判断待轧目标带材发生边裂, 则轧机控制系统控制轧机停车。

断带预警系统的基本原理如图 2 所示。设置于带材上方的激光发射器 1 可发射高能激光 2, 高能激光 2 具有很强的扛干扰性, 而且可被安装于带材边部下方的激光接收器 3 所接收, 激光发射器 1 和激光接收器 3 沿机组中心线呈对称关系并形成检测带材的有效通道。带材边部且与机组中心线间距为带宽 0.475~0.500 倍的区域为激光发射器 1 与激光接收器 3 的重点检测范围, 这是因为该区域的带材受到的横向阻力较小并极易由于材料横向流动而产生边部微裂。高能激光 2 被激光接收器 3 检测到即认定为即将发生断带, 此时激光接收器 3 快速响应并将断带前预警讯号传送至相应控制系统, 进而实现轧机的快速停车。该系统的基本原理描述如下: 当裂纹发生时, 由激光发射器 1 发出的高能激光 2 可以快速通过边裂区域, 并被激光接收器 3 接收和检测, 所以, 高能激光 2 被激光接收器 3 接收和检测到即被认定为断带前的报警, 此时生产作业线将以  $-1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  的加速度迅速停车。本系统的高能激光 2 对环境中的粉尘和液滴具有较强的扛干扰性。

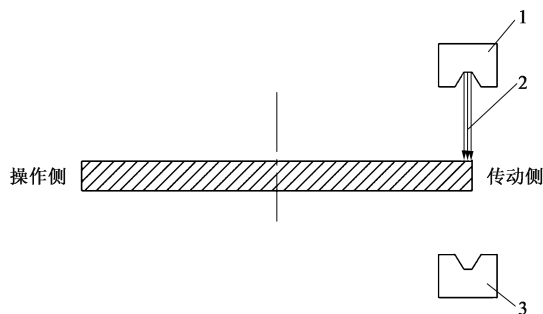


图 2 断带预警系统的检测原理图

1. 激光发射器 2. 高能激光 3. 激光接收器

Fig. 2 Detection principle diagram of breakage warning system

### 1.2 巡边测厚系统

优良的叠片性能是电工钢铁磁特性的保障, 而且有利于后续冲片和绝缘涂层的开展, 因此, 电工钢对产品的同板差要求非常高, 即带材横断面的边降、凸度必须严格控制, 因而本轧制工艺技术研发了巡边测厚系统。

巡边测厚系统, 主要用于检测待轧目标带材的厚度并控制其横向板凸度, 其基本原理如图3所示。其中,  $f$  为巡边测厚系统的移动频率,  $V$  为带材稳态速度,  $h$  为带材厚度。具体地, 设置于待轧带材上方的巡边测厚系统在生产过程中可沿产品的宽度方向循环往复高频检测带材中部与边部的厚度, 并将该实时数据发送至相应的厚控系统, 厚控系统将该产品的实时厚度数据转化为主油缸的伸出或缩回动作, 进而实现产品沿宽度方向的厚度一致, 如此即完成了巡边测厚系统与厚控系统的高精度闭环控制。

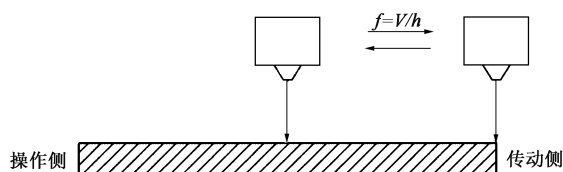


图3 巡边测厚系统的基本原理图

Fig. 3 Basic principle diagram of edge inspection and thickness measurement system

与该系统相配的凸度控制系统的基本原理为: 在轧机宽度方向的 B、C 支承辊组件上设置多个调整机构, 并用以补偿轧制时带材宽度方向的厚度偏差及板形, 如图4所示。在轧机显示面板及操作台上提供数字柱形图, 这些柱形图显示了每个凸度的位置。

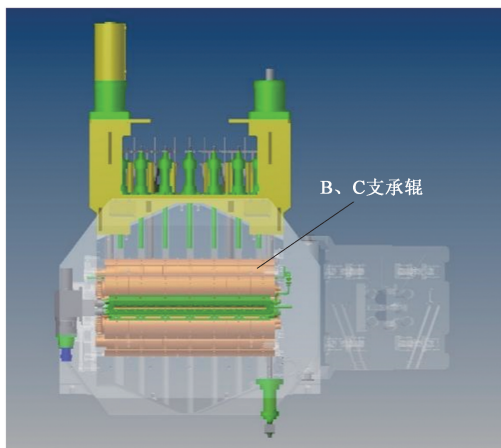


图4 凸度控制系统的基本原理

Fig. 4 Basic principle of convexity control system

巡边测厚系统与相应的凸度控制系统形成高精度闭环控制, 其基本原理如下: 带材厚度波动并被巡边测厚系统检测和发现时, 相应凸度控制系统执行油缸的伸出或缩回以补偿产品的厚度偏差, 同时调整主油缸的伸出量以调整带材凸度。巡边测厚系统配置沿直线高频运动的厚度检测仪, 其检测区域

为带材传动侧与机组中心线之间 (宽度为带宽的 0~0.5 倍)。而且其移动频率  $f$  与带材稳态速度  $V$  呈正相关并与带材厚度  $h$  呈负相关, 如式 (1) 所示。

$$f = V/h \quad (1)$$

### 1.3 精确准停控制系统

为使产品具有良好的磁性, 电工钢在冶炼、浇筑、热轧和酸洗等环节均需特殊处理, 因此, 冷轧工序的成材率对整个工艺流程的效率影响非常大, 因而本轧制工艺技术研发了精确准停控制系统。

精确准停控制系统由带钢圈数计量系统、带钢卷径计量系统以及道次工艺处理系统构成, 如图5所示。且带钢圈数计量系统的出口侧带钢圈数在备料穿带和上料完成后的初始值为零。

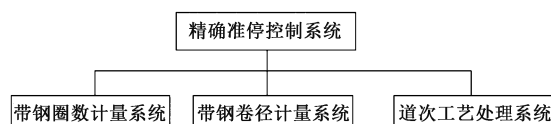


图5 精确准停控制系统架构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of precise stopping system architecture

作为带钢卷径计量系统的主要组成部分, 高精度超声波传感器被布置于生产设备的入口和出口区域, 其精度可达 0.1 mm。带钢卷径计量系统可完成机组入口侧卷径的测量并为设备的精确准停提供数据支持。作为带钢圈数计量系统的重要组成部分, 高分辨率绝对值编码器的分辨率约为 4096, 并被设置于左右卷取机。带钢圈数计量系统将本道次出口侧带钢圈数作为下道次开卷的大致圈数并可完成带钢圈数的测量。道次工艺处理系统读取上道次的出口侧带钢圈数 (由带钢圈数计量系统测得)、本道次的入口侧带钢卷径 (由带钢卷径计量系统测得) 和下一道次的工艺数据 (由轧制工艺表预设), 而且将其下发至相应设备。

工艺表为上述 3 个系统提供原始数据。其所记录的工艺数据如下: 主机速度  $V_i$ 、出口厚度  $h_i$ 、入口厚度  $H_i$ 、出口张力  $t_i$ 、入口张力  $T_i$ 、左右卷取机的带钢圈数  $n_{左}$  和  $n_{右}$ 、卷筒涨径直径  $D$  以及道次编号  $i$ 。

完成轧前准备后, 令  $n_{出} = n_{右} = 0$ , 即将带钢圈数计量系统的出口侧圈数  $n_{出}$  设定为零。生产过程中该系统的编码器 (出口侧) 转动一圈时,  $n_{出} = n_{右}$ , 并执行 +1 的指令。轧制完一个道次后, 工艺表将记录本道次的出口侧带钢圈数  $n_{出}$  (由带钢圈数计量系统测得), 并将其作为下一道次的生产依据。



第 1 道次完成后,  $n_{\text{右}}$  被工艺表自动记录并令  $n_{\text{左}} = 0$ 。第 2 道次轧制过程中, 编码器 (入口侧) 转动一圈时, 带钢圈数计量系统的入口侧圈数  $n_{\text{入}} = n_{\text{右}}$  并执行 -1 的指令, 而编码器 (出口侧) 转动一圈时,  $n_{\text{出}} = n_{\text{左}}$  执行 +1 的指令。第 2 道次生产过程中,  $n_{\text{右}}$  依次执行 -1 的指令时必须大于 0, 如此可防止厚度超差部分的带钢进入轧机辊缝。其他道次的执行原理与此相似, 不再赘述。

首道次轧制的基本原理如图 6 所示。此时因原料卷的带钢圈数未知, 所以, 将实测的入口侧带钢卷径  $d$  (由带钢卷径计量系统测得) 和带钢的原料厚

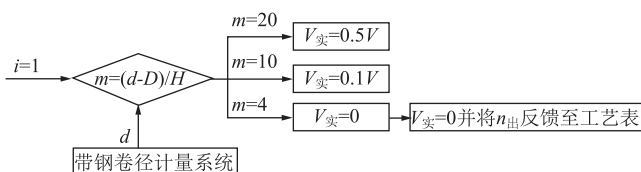


图 6 首道次精确准停控制系统架构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of precise stopping system architecture in the first pass

度  $H$  作为精确准停的判定条件。当入口侧卷径  $d = D + 20H$  时, 主机实际速度  $V_{\text{实}}$  调整为  $0.5V$ ; 入口侧卷径  $d = D + 10H$  时, 主机实际速度调整为  $0.1V$ ; 入口侧卷径  $d = D + 4H$  时, 主机实际速度降为 0。本道次完成后, 第 1 道次出口侧的带钢圈数  $n_{\text{出}} = n_{\text{右}}$ , 被工艺表所记录。

其他道次 (除第 1 道次外) 自动降速的执行过程如下: 以第  $(i-1)$  道次的出口侧带钢圈数  $n_{\text{出}}$  (由带钢圈数计量系统测得) 和第  $i$  道次的入口侧带钢卷径  $d$  (由带钢卷径计量系统测得) 作为精确准停的依据。入口侧带钢圈数  $n_{\text{入}}$  等于  $0.01n_{\text{出}}$  时, 主机实际速度调整为  $0.5V$ ; 入口侧带钢圈数  $n_{\text{入}}$  等于 10 时, 主机实际速度调整为  $0.1V$ ; 入口侧带钢圈数  $n_{\text{入}}$  等于 4 时, 主机实际速度降为 0。

如图 7 所示, 第 2 道次生产时, 带钢圈数计量系统实测的入口侧带钢圈数为  $0.1/\pi d$  时, 生产线将精确准停。除第 1 和第 2 道次外的其他道次生产时, 带钢圈数计量系统实测的入口侧带钢圈数为  $0.1(i-2)/\pi d$  时, 生产线将精确准停, 如图 8 所示。

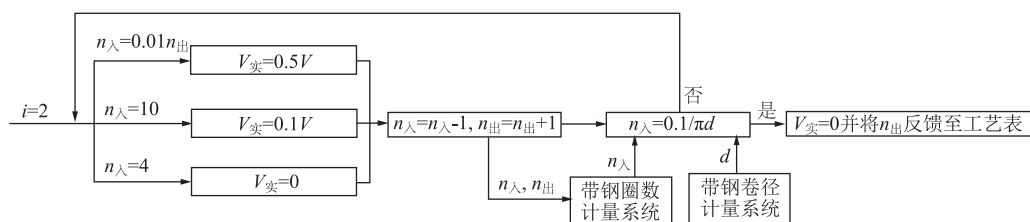


图 7 第 2 道次精确准停控制系统架构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of precise stopping system architecture in the second pass

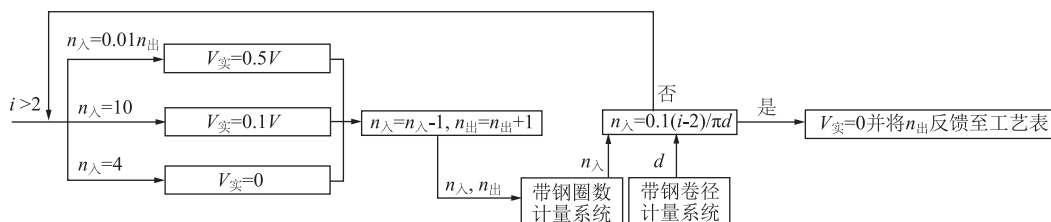


图 8 其他道次精确准停控制系统架构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of precise stopping system architecture in other passes

与现有技术相比, 本轧制工艺技术是将带钢圈数计量系统测得的上道次出口侧带钢圈数和带钢卷径计量系统实测的本道次入口侧带钢卷径作为实现精确准停的重要判断依据, 而且通过对编码器与相应带钢圈数的控制, 保证了停车印迹与辊缝和同侧相邻停车印迹间距距离约为  $0.1 \text{ m}$ 。本技术极大地降低了厚度超差段的长度, 而且大大降低了人工干预的程度, 释放了产能, 并解决了成材率和效率较低的问题。

## 2 电工钢板厚与板形控制技术

基于对易断带、同板差超标和成材率低等问题的分析和解决, 在线监测工艺技术为产品整体品质的提升提供了硬件基础, 继而在电工钢规模化生产过程中对其板形和板厚等核心技术指标完成了系统研究和有效控制。板形和板厚控制的核心算法是提高电工钢成材率和产品品质的软件基础。

## 2.1 板厚控制

综合运用预控 AGC (Automatic Generation Control)、监控 AGC 和秒流量 AGC 等多种技术手段对新能源车电工钢的板厚进行了综合控制, 且控制程序根据实际工况自动选择和执行相应的厚控策略, 因而产品厚差可达  $\pm 1 \mu\text{m}$ 。但为了保证安装调试和异常处理等特殊工况的顺利实施, 设定手动操作辊缝具有更高的优先级。

### 2.1.1 预控 AGC

预控 AGC 主要根据来料厚度偏差进行辊缝控制, 用以消除入口厚度偏差对出口厚度偏差的影响。相应的计算公式如式 (2) 所示。控制原理如图 9 所示, 其中,  $V_{\lambda}$  为入口速度,  $H$  为带钢的原料厚度,  $dv/dt$  为加速度。

$$\Delta S = \Delta h_{\text{出}} \frac{M+K}{K} = \Delta h_{\lambda} \frac{M}{M+K} \times \frac{M+K}{K} = \Delta h_{\lambda} \frac{M}{K} \quad (2)$$

式中:  $\Delta S$  为控制输出量, mm;  $K$  为弹性模量, MPa;  $M$  为塑性模量, MPa;  $\Delta h_{\lambda}$  为入口侧厚度偏差, mm;  $\Delta h_{\text{出}}$  为出口侧厚度偏差, mm。

APC 为自动位置控制。

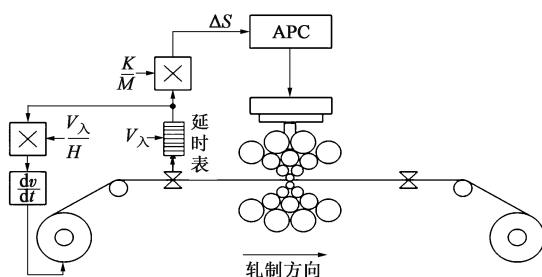


图 9 预控 AGC 控制原理图

Fig. 9 Control principle diagram of pre-control AGC

### 2.1.2 监控 AGC

监控 AGC 是根据出口带材厚度偏差进行厚度控制辊缝, 对于轧辊热变形累积等情况可有效补偿。相应的计算公式如式 (3) 所示。

$$\Delta S = \sum C_3 \frac{K+M(1-\alpha)}{K} \left( \frac{V_{\text{实}}}{V_M} C_2 + C_1 \right) \Delta h_{\text{出}} \quad (3)$$

式中:  $V_M$  为最大轧制速度,  $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ ;  $\alpha$  为比萨拉增益;  $C_1$  为积分时间常数 (固定项);  $C_2$  为积分时间常数 (变化项);  $C_3$  为总增益。

监控 AGC 增益根据轧机速度变化而变化, 相应的控制原理如图 10 所示, 其中,  $V_{\text{出}}$  为出口速度;  $h'$  为最终道次出口厚度。

### 2.1.3 秒流量 AGC

秒流量 AGC 的投入可将入口、出口带材的厚度

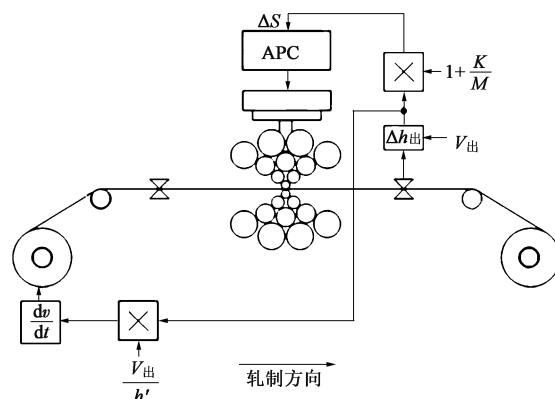


图 10 监控 AGC 控制原理图

Fig. 10 Control principle diagram of monitoring AGC

尽快调整至达标的公差带内, 因此, 该控制模式对监测系统反馈的数据准确性也是最高的。秒流量 AGC 根据轧制带材质量不变原理 (即流入轧机的带材体积与流出轧机的带材体积相等) 来测量并控制轧机辊缝以及出口带材厚度。计算结果如式 (4) 所示:

$$V_{\lambda} \times h_{\lambda} = V_{\text{出}} \times h_{\text{出}} \quad (4)$$

式中:  $h_{\lambda}$  为入口厚度设定值;  $h_{\text{出}}$  为出口厚度设定值。

相应的控制原理如图 11 所示。

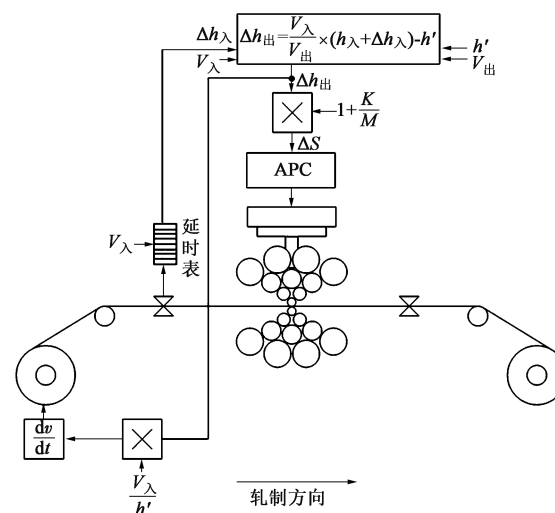


图 11 秒流量 AGC 控制原理图

Fig. 11 Control principle diagram of second flow AGC

## 2.2 板形控制

适用于新能源车电工钢的二十辊轧机板形控制技术的基本思路为: 通过建立凸度控制机构和一中间辊在线横移机构的影响矩阵, 而且求解该影响矩阵并使板形偏差与各执行机构所能够消除的板形偏差的累积平方差最小, 使得电工钢的板形精度为 5 I。

相应轧制工艺技术的板形控制策略为: 二十辊

轧机有 9 个板形调控执行机构, 包括 7 个凸度控制机构, 上、下第 1 中间辊轴向窜辊。各执行机构的效率系数曲线之间形式相似又各不相同。自动板形控制系统根据各执行机构效率系数建立影响矩阵, 通过求解影响矩阵, 获得消除板形偏差所需各执行机构的输出量。建立影响矩阵所需的效率系数需要在调试时收集各调节手段动作时准确确定。该效率系数根据板形反馈的宽向区段数量  $l$ , 以及控制手段数  $m'$  可以组成一个  $l \times m'$  的影响矩阵 **Coef**。板形控制影响矩阵 **Coef** 中的各元素 (即影响因子) 表示各个板形控制手段对带钢宽向各区段板形的影响效率, 是对板形调节效果的直接描述。

板形反馈控制算法的核心策略是使板形偏差与各执行机构所能够消除的板形偏差的累积平方差最小。

#### (1) 有效板形测量区段计算

计算板形检测仪区段的带钢边部覆盖率, 如式

(5) 所示。

$$\text{cover\_ratio}[a] = \{b/2 - [\text{fabs}(\text{smx\_g}[a]) - \text{smd\_g}[a]/2.0]\} / \text{smd\_g}[a] \quad (5)$$

式中:  $\text{cover\_ratio}[a]$  为第  $a$  区段的带钢边部覆盖率;  $b$  为带钢宽度;  $\text{smx\_g}[a]$  为第  $a$  区段中心点轴向坐标值 (以板形辊中心为坐标原点);  $\text{smd\_g}[a]$  为第  $a$  区段轴向宽度;  $\text{fabs}()$  为求解相关项绝对值的函数。

由式 (5) 可知, 如果计算覆盖率大于有效测量区段最小覆盖率设定值, 则  $a$  区段有效; 否则, 为无效区段。

#### (2) 板形反馈控制基本函数

板形反馈控制是使板形偏差通过各执行机构消除并趋于最小的过程。其基本函数如式 (6)、式 (7) 和式 (8) 所示。

$$J^{\text{FBC}} = f(\Delta ASU_1^{\text{FBC}}, \Delta ASU_2^{\text{FBC}}, \dots, \Delta ASU_7^{\text{FBC}}, \Delta SHIFT_{\text{upper}}^{\text{FBC}}, \Delta SHIFT_{\text{down}}^{\text{FBC}}) = \sum_{p=1}^l \text{weight}_p^{\text{FBC}} (e_p^{\text{FBC}} - \sum_{q=1}^{m'} R_q^{\text{FBC}} \times \text{Coef}_{pq})^2 + \sum_{q=1}^{m'} \alpha_q^{\text{FBC}} \times (R_q^{\text{FBC}})^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

$$R_{m'}^{\text{FBC}} = [\Delta ASU_1^{\text{FBC}}, \Delta ASU_2^{\text{FBC}}, \dots, \Delta ASU_7^{\text{FBC}}, \Delta SHIFT_{\text{upper}}^{\text{FBC}}, \Delta SHIFT_{\text{down}}^{\text{FBC}}] \quad (7)$$

$$\text{Coef}_{l \times m'} = \begin{bmatrix} \text{Coef}_{1\_ \Delta ASU_1^{\text{FBC}}} & \text{Coef}_{1\_ \Delta ASU_2^{\text{FBC}}} & \cdots & \text{Coef}_{1\_ \Delta ASU_7^{\text{FBC}}} & \text{Coef}_{1\_ \Delta SHIFT_{\text{upper}}^{\text{FBC}}} & \text{Coef}_{1\_ \Delta SHIFT_{\text{down}}^{\text{FBC}}} \\ \text{Coef}_{2\_ \Delta ASU_1^{\text{FBC}}} & \text{Coef}_{2\_ \Delta ASU_2^{\text{FBC}}} & \cdots & \text{Coef}_{2\_ \Delta ASU_7^{\text{FBC}}} & \text{Coef}_{2\_ \Delta SHIFT_{\text{upper}}^{\text{FBC}}} & \text{Coef}_{2\_ \Delta SHIFT_{\text{down}}^{\text{FBC}}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{Coef}_{l\_ \Delta ASU_1^{\text{FBC}}} & \text{Coef}_{l\_ \Delta ASU_2^{\text{FBC}}} & \cdots & \text{Coef}_{l\_ \Delta ASU_7^{\text{FBC}}} & \text{Coef}_{l\_ \Delta SHIFT_{\text{upper}}^{\text{FBC}}} & \text{Coef}_{l\_ \Delta SHIFT_{\text{down}}^{\text{FBC}}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $J^{\text{FBC}}$  为板形反馈控制的评价函数;  $\Delta ASU_1^{\text{FBC}} \sim \Delta ASU_7^{\text{FBC}}$  为 7 个 ASU 板形调控手段;  $\Delta SHIFT_{\text{upper}}^{\text{FBC}}$ 、 $\Delta SHIFT_{\text{down}}^{\text{FBC}}$  分别为上、下中间辊窜辊调控手段;  $\text{weight}_p^{\text{FBC}}$  为带钢宽向第  $p$  区段板形权重系数, 用于校正板形仪区段宽窄及覆盖率,  $p=1, \dots, l$ ;  $e_p^{\text{FBC}}$  为带钢宽向第  $p$  区段反馈板形偏差 (当前道次轧机出口实测板形与目标板形之差);  $R_q^{\text{FBC}}$  为待求的第  $q$  调节手段的反馈调节量,  $q=1, \dots, m'$ ;  $\text{Coef}_{pq}$  为第  $q$  调节手段对带钢宽向第  $p$  区段板形影响因子, 由计算机二级控制系统 L2 设定;  $\alpha_q^{\text{FBC}}$  为第  $q$  调节手段罚函数系数, 当发现特定板形缺陷后, 用于平衡各执行机构的动作;  $R_{m'}^{\text{FBC}}$  为调节手段的反馈调节量。

使对该板形缺陷调控最有效的执行机构输出权重加大, 其余执行机构调控输出减弱, 但各种执行机构仍然协同动作。

#### (3) 板形反馈控制输出

当前控制周期 (第  $r$  个控制周期, 对应时刻为  $rT^{\text{FBC}}$ ) 的板形反馈控制输出如式 (9) ~ 式 (13) 所示。

$$\Delta ASU_1^{\text{FBC}}(rT^{\text{FBC}}) = \text{gain}_{ASU_1}^{\text{FBC}} \times \Delta ASU_1^{\text{FBC}} \quad (9)$$

$$\Delta ASU_2^{\text{FBC}}(rT^{\text{FBC}}) = \text{gain}_{ASU_2}^{\text{FBC}} \times \Delta ASU_2^{\text{FBC}} \quad (10)$$

$\vdots$

$$\Delta ASU_7^{\text{FBC}}(rT^{\text{FBC}}) = \text{gain}_{ASU_7}^{\text{FBC}} \times \Delta ASU_7^{\text{FBC}} \quad (11)$$

$$\Delta SHIFT_{\text{upper}}^{\text{FBC}}(rT^{\text{FBC}}) = \text{gain}_{SHIFT_{\text{upper}}}^{\text{FBC}} \times \Delta SHIFT_{\text{upper}}^{\text{FBC}} \quad (12)$$

$$\Delta SHIFT_{\text{down}}^{\text{FBC}}(rT^{\text{FBC}}) = \text{gain}_{SHIFT_{\text{down}}}^{\text{FBC}} \times \Delta SHIFT_{\text{down}}^{\text{FBC}} \quad (13)$$

式中:  $T^{\text{FBC}}$  为板形反馈控制执行周期;  $\text{gain}^{\text{FBC}}$  为各板形调节机构反馈控制输出增益。

板形反馈控制执行周期  $T^{\text{FBC}}$  确定的基本原则

为：轧机轧制速度越高，板形反馈控制执行周期越短，即  $T^{\text{FBC}}$  取值越小；轧机轧制速度越低，板形反馈控制执行周期越长，即  $T^{\text{FBC}}$  取值越大。各板形调节机构反馈控制输出增益  $\text{gain}^{\text{FBC}}$  确定的基本原则为：反馈板形偏差越大，板形反馈控制输出增益越大，即  $\text{gain}^{\text{FBC}}$  取值越大；反馈板形偏差越小，板形反馈控制输出增益越小，即  $\text{gain}^{\text{FBC}}$  取值越小。

### 3 二十辊轧机电工钢轧制应用实践及效果分析

根据二十辊轧机在线监测工艺的技术需求和适用于电工钢的板厚与板形控制的设备要求，研制了与之相匹配的二十辊轧机轧制装备，并将其应用于生产实际，相关的核心设备参数如表 1 所示。

表 1 二十辊轧机核心设备参数  
Table 1 Core equipment parameters for twenty-roller rolling mill

参数	数值
产品品种	取向硅钢和无取向硅钢等
成品规格/mm	0.17~0.85
钢卷内径/mm	Φ510
钢卷外径/mm	Φ1050~Φ2100
钢卷宽度/mm	750~1300
最大卷重（不包括套筒）/kg	25000
最高主机速度/(m·min <sup>-1</sup> )	800
背衬辊规格/mm	Φ406.4
工作辊规格/mm	Φ80
最大轧制压力/MN	13.6
主电机功率/kW	4500
最大卷取张力/kN	107
卷取机电机功率/kW	2800

通过与该二十辊轧机轧制装备的有机结合，断带预警系统、巡边测厚系统和精确准停控制系统等在线监测工艺技术的现场应用效果为：成品道次轧制长度为 5086 m，同板差公差范围内长度为 5074 m，公差内占比为 99.7%，稳态段停车印迹与辊缝和同侧相邻停车印迹的间距均约为 0.1 m，且无断带和产品边裂等问题发生。

通过预控 AGC、监控 AGC 和秒流量 AGC 的等

板厚控制技术和小辊径高刚度二十辊轧机装备的协同发挥作用，成材率得以保证的同时稳态轧制阶段的产品厚度偏差精度控制在  $\pm 1\ \mu\text{m}$ ，相应的厚度偏差曲线如图 12 所示。

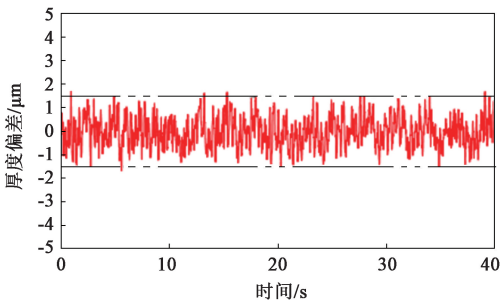


图 12 厚度偏差曲线  
Fig. 12 Thickness difference curve

通过板形控制算法的创新和板形调整机构的快速响应以及板形检测仪表的高精密检测精度，优化后电工钢生产现场的稳速段板形精度大幅提高，相应的板形控制曲线如图 13 所示。

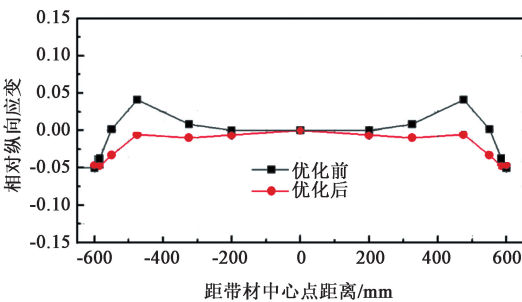


图 13 板形曲线  
Fig. 13 Flatness curves

分析可知，新能源汽车电工钢二十辊轧机轧制工艺技术及其轧制装备在一定程度上解决了困扰硅钢生产的瓶颈并取得了良好的工程应用效果。

### 4 结论

- (1) 研发了断带预警系统，断带前可紧急发布预警信号并以  $-1.5\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  的加速度紧急停车，降低了硅钢轧制过程中的边裂和断带问题，极大地提高了整个工艺系统的稳定性。
- (2) 开发了巡边测厚系统，并与凸度控制系统成闭环控制，对带材的厚度和板形完成实时调整，极大地提高了产品精度并降低了带材的同板差，并且使其铁磁特性进一步提高。
- (3) 研发了精确准停控制系统，停车印迹与辊



缝和同侧相邻停车印迹的间距均约为 0.1 m, 提高了工艺控制技术的生产效率和成材率, 使得电工钢生产的工艺流程更为高效。

(4) 综合运用预控 AGC、监控 AGC 和秒流量 AGC 等板厚控制手段, 而且程序自动执行板厚控制算法的投入情况, 产品厚度偏差可达  $\pm 1 \mu\text{m}$ 。

(5) 通过建立凸度控制机构和一中间辊在线横移机构的影响矩阵, 而且求解该影响矩阵并使板形偏差与各执行机构所能够消除的板形偏差的累积平方差最小, 使得电工钢的板形精度为 5 I。

#### 参考文献:

- [1] 张寿荣, 陈卓, 胡守天. 从能源发展谈我国电工钢产业战略思路 [J]. 电工钢, 2019, 1 (1): 1-4.  
Zhang S R, Chen Z, Hu S T. Discussion on the strategic development of electrical steel industry from the perspective of energy development in China [J]. Electrical Steel, 2019, 1 (1): 1-4.
- [2] 胡艳平. 新能源汽车用电工钢供需现状及未来 [J]. 冶金管理, 2024 (3): 17-21.  
Hu Y P. Supply and demand status and future of electrical steel for new energy vehicles [J]. China Steel Focus, 2024 (3): 17-21.
- [3] 曹建国, 宋纯宁, 孙磊, 等. 新一代高技术宽带钢冷轧机电工钢高精度板形控制研究进展 [J]. 塑性工程学报, 2024, 31 (4): 131-142.  
Cao J G, Song C N, Sun L, et al. Research progress on high precision profile contour and flatness control of electrical steel for new generation of high-tech wide strip rolling mills [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31 (4): 131-142.
- [4] 张凤泉, 张维林, 孙文权. 我国冷轧硅钢近 10 年发展现状及方向研究 [J]. 电工钢, 2024, 6 (4): 1-8.  
Zhang F Q, Zhang W L, Sun W Q. Current status and development direction of electrical steel in China [J]. Electrical Steel, 2024, 6 (4): 1-8.
- [5] 曹建国, 宋纯宁, 孙磊, 等. 新一代高技术冷连轧机电工钢同板差板形控制研究进展与创新发展趋势 [A]. 中国金属学会. 第十四届中国钢铁年会论文集 [C]. 重庆, 2023.  
Cao J G, Song C N, Sun L, et al. Research progress and innovative development trends of transverse thickness difference for shape control of electric steel in the new-generation high-tech tandem cold rolling mills [A]. The Chinese Society for Metals. Proceedings of the 14th China Iron and Steel Annual Conference [C]. Chongqing, 2023.
- [6] 刘宏民, 于华鑫, 王东城, 等. 冷轧带钢板形测控前沿技术的创新方略 [J]. 钢铁, 2023, 58 (4): 77-86.  
Liu H M, Yu H X, Wang D C, et al. Innovative strategy on frontier flatness measurement and control technology of cold strip steel rolling [J]. Iron and Steel, 2023, 58 (4): 77-86.
- [7] 储双杰, 汤文杰, 梁高飞, 等. 吉帕钢冷轧板形及厚度精度控制技术研究 [J]. 轧钢, 2022, 39 (2): 51-56.  
Chu S J, Tang W J, Liang G F, et al. Research on flatness and thickness accuracy control of cold rolled  $\times$  GPa steel sheet [J]. Steel Rolling, 2022, 39 (2): 51-56.
- [8] 曹建国, 江军, 邱澜, 等. 新一代高技术宽带钢冷轧机全机组一体化板形控制 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2019, 50 (7): 1584-1591.  
Cao J G, Jiang J, Qiu L, et al. High precision integrated profile and flatness control for new-generation high-tech wide strip cold rolling mills [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50 (7): 1584-1591.
- [9] 李旭, 金树仁, 王鹏飞, 等. 冷轧板形控制技术的研究现状及展望 [J]. 中国冶金, 2024, 34 (7): 21-30.  
Li X, Jin S R, Wang P F, et al. Research status and perspectives for cold rolling flatness control technology [J]. China Metallurgy, 2024, 34 (7): 21-30.
- [10] 何小丽, 王崇. 冷轧机组闭环板形控制策略研究 [J]. 冶金自动化, 2018, 42 (2): 44-48.  
He X L, Wang C. Study on closed-loop shape control strategy of cold rolling [J]. Metallurgical Industry Automation, 2018, 42 (2): 44-48.
- [11] 黄彦峰, 孟文华, 孙立峰. 二十辊碳钢薄带冷轧机轧制工艺 [J]. 一重技术, 2016 (1): 5-8.  
Huang Y F, Meng W H, Sun L F. Rolling process of 20-H thin carbon steel strip mills [J]. CFHI Technology, 2016 (1): 5-8.
- [12] 武佳蕾. 冷轧电工钢森吉米尔轧机研究进展 [J]. 冶金设备, 2014 (S1): 72-73, 49.  
Wu J L. Development in research of Sendzimir mill for cold rolling electrical steel [J]. Metallurgical Equipment, 2014 (S1): 72-73, 49.
- [13] 李广林, 陈凌峰, 张广治, 等. 冷轧硅钢板形与横向厚度控制的分析 [J]. 中国冶金, 2015, 25 (4): 24-27.  
Li G L, Chen L F, Zhang G Z, et al. Analysis of the shape and transverse thickness control of cold-rolled silicon steel [J]. China Metallurgy, 2015, 25 (4): 24-27.
- [14] Lee S H, Lee K H, Ko D C, et al. Development of three-dimensional strip profile model for thin-foil cold rolling [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6: 1-13.
- [15] Yang L P, Jiang Z Y, Zhang Y S, et al. High precision recognition and adjustment of complicated shape details in fine cold rolling process of ultra-thin wide strip [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 35: 508-516.
- [16] 陈卓. 2019 年我国高性能电工钢生产能力与需求研究 [J]. 电工钢, 2020, 2 (1): 1-8.  
Chen Z. Research on production capacity and demand of high performance electrical steel in China [J]. Electrical Steel, 2020, 2 (1): 1-8.
- [17] Fu M W, Wang J L, Korsunsky A M. A review of geometrical and microstructural size effects in micro-scale deformation processing of metallic alloy components [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 109: 94-125.
- [18] 蒋宗耀, 吕韬, 宁晓宇. 铬系特种合金全流程生产工艺 [J].



- 铁合金, 2022, 53 (1): 11-14.
- Jiang Z Y, Lyu T, Ning X Y. Whole process production technology of chromium series special alloy [J]. Ferro-alloys, 2022, 53 (1): 11-14.
- [19] 舒泽腾, 滑小杰, 白璐, 等. 硅钢冷轧断带原因分析和工艺改进 [J]. 电工钢, 2024, 6 (2): 17-22.
- Shu Z T, Hua X J, Bai L, et al. Cause analysis and process improvement of cold-rolled broken strip of silicon steel [J]. Electrical Steel, 2024, 6 (2): 17-22.
- [20] 刘松, 李俊辉, 刘云飞, 等. 特种合金极薄带轧制工艺与技术装备的研制 [J]. 机械工程学报, 2024, 60 (4): 357-368.
- Liu S, Li J H, Liu Y F, et al. Research on rolling process and technical equipment of special alloy strip with ultra-thin thickness [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60 (4): 357-368.
- [21] 马晓宝. 硅钢板带轧制横向厚差综合控制技术研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- Ma X B. Research on Comprehensive Control Technology for Cross-section Thickness Difference of Silicon Steel Strip Rolling [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
- [22] 马鹏宇. 冷轧硅钢边部减薄的有限元仿真 [D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2016.
- Ma P Y. Edge Drop of Finite Element Simulation in Cold Rolled Silicon-steel [D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2016.
- [23] 刘松, 计江, 苏旭涛, 等. 双卷筒回转式卷取机自主研发与应用实践 [J]. 重型机械, 2018 (6): 8-11.
- Liu S, Ji J, Su X T, et al. Self-development and application practice of rotary coiler with double reels [J]. Heavy Machinery, 2018 (6): 8-11.
- [24] 刘相华, 汤德林. 一种生产金属薄带及极薄带的多功能轧机 [P]. 中国: CN102989765A, 2013-03-27.
- Liu X H, Tang D L. A multifunction mill for manufacturing metal thin strip and ultra thin strip [P]. China, CN102989765A, 2013-03-27.
- [25] 任忠凯, 郭雄伟, 范婉婉, 等. 精密极薄带轧制理论研究进展及展望 [J]. 机械工程学报, 2020, 56 (12): 73-84.
- Ren Z K, Guo X W, Fan W W, et al. Research progress and prospects of precision ultra-thin strip rolling theory [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56 (12): 73-84.
- [26] 潘纯久. 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.
- Pan C J. Twenty-high Rolling Mill and High-precision Cold-rolled Steel Strip Production [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003.
- [27] 刘松, 窦锋, 王悦晗, 等. 楚江新材 600 mm 铜带强力粗轧机组新技术 [J]. 重型机械, 2020 (2): 17-20.
- Liu S, Dou F, Wang Y H, et al. New technology of 600 mm copper strip strong roughing mill in Truchum [J]. Heavy Machinery, 2020 (2): 17-20.
- [28] 于九明, 贾广风, 朱泉. 异步轧制极薄带材的变形特点及“步弹性塞”性原理 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 1982, 3 (3): 17-27.
- Yu J M, Jia G F, Zhu Q. The deformation characteristics in cross shear cold rolling of ultra-thin strip and the theory of “elastic stopper” [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 1982, 3 (3): 17-27.
- [29] 朱航飞. 压延铜箔生产现状介绍与分析 [J]. 有色金属加工, 2014 (4): 4-6.
- Zhu H F. Rolled copper foil: Presentation and analysis of current production [J]. Nonferrous Metals Processing, 2014 (4): 4-6.
- [30] 刘松, 计江, 徐利璞, 等. 带材拉伸弯曲矫直机系统能量的研究 [J]. 重型机械, 2021 (5): 63-68.
- Liu S, Ji J, Xu L P, et al. System energy research on strip tension leveler [J]. Heavy Machinery, 2021 (5): 63-68.
- [31] 刘骁, 付伦, 芦跃峰, 等. 薄带材轧制的最小可轧厚度理论及数值模拟 [J]. 钢铁, 2021, 56 (11): 87-95.
- Liu X, Fu L, Lu Y F, et al. Theory and numerical simulation of minimum rolling thickness for thin strip rolling [J]. Iron and Steel, 2021, 56 (11): 87-95.
- [32] 赵启林, 刘相华. 极薄带最小可轧厚度研究新进展 [J]. 轧钢, 2018, 35 (2): 1-5.
- Zhao Q L, Liu X H. Prospect for possible minimum foil thickness by rolling [J]. Steel Rolling, 2018, 35 (2): 1-5.
- [33] 刘松, 窦锋, 贺琪, 等. 泰钢 950 mm HC 轧机改造 [J]. 重型机械, 2018 (2): 85-88.
- Liu S, Dou F, He Q, et al. Reformation of 950 mm HC rolling mill for Taishan steel [J]. Heavy Machinery, 2018 (2): 85-88.
- [34] 王崇涛, 方康玲. 森吉米尔轧机的板形控制 [J]. 轧钢, 2005 (4): 14-16, 23.
- Wang C T, Fang K L. Shape control on Sendzimir mill [J]. Steel Rolling, 2005 (4): 14-16, 23.
- [35] 张岩, 邵富群, 王军生, 等. 灰色预测模型在冷轧动态张力控制中的应用 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2011, 32 (5): 614-617.
- Zhang Y, Shao F Q, Wang J S, et al. Using a gray predictive model for controlling dynamic tension during cold rolling [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2011, 32 (5): 614-617.
- [36] 陈梦, 陈戈. 太钢不锈钢冷轧厂开卷机全数字间接恒张力控制系统的设计 [J]. 冶金自动化, 2004 (3): 44-46.
- Chen M, Chen G. Design of all digital indirect constant tension control system for coiler in stainless steel cold rolling mill of Taiyuan iron and steel Co Ltd [J]. Metallurgical Industry Automation, 2004 (3): 44-46.
- [37] 赵启林, 刘相华. 极薄带最小可轧厚度研究新进展 [J]. 轧钢, 2018, 35 (2): 1-5.
- Zhao Q L, Liu X H. Prospect for possible minimum foil thickness by rolling [J]. Steel Rolling, 2018, 35 (2): 1-5.
- [38] 周曦, 王崇涛, 徐键, 等. 森吉米尔轧机秒流量 AGC 的改进与应用 [J]. 武钢技术, 2014, 52 (5): 48-52.
- Zhou X, Wang C T, Xu J, et al. The modification and application of Sendzimir mill mass flow AGC system [J]. Wisco Technology, 2014, 52 (5): 48-52.
- [39] 王立萍, 胡素影. 冶金设备及自动化 [M]. 北京: 冶金工业

- 出版社, 2011.
- Wang L P, Hu S Y. Metallurgical Equipment and Automation [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.
- [40] 戴杰涛, 张清东, 黄河. 薄带钢轧制过程中工作辊辊端压靠研究 [J]. 钢铁, 2010, 45 (7): 57-61.
- Dai J T, Zhang Q D, Huang H. Study on roll end forced-contract in rolling process of thin strip [J]. Iron and Steel, 2010, 45 (7): 57-61.
- [41] Chen S D, Liu X H, Liu L Z. Effects of grain size and heterogeneity on the mechanical behavior of foil rolling [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2015, 100: 226-236.
- [42] Chen S D, Liu X H, Liu L Z. Grain statistics effect on deformation behavior in asymmetric rolling of pure copper foil by crystal plasticity finite element model [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25 (10): 3370-3380.
- [43] Xiao H, Ren Z K, Liu X. New mechanism describing the limiting producible thickness in ultra-thin strip rolling [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 133: 788-793.
- [44] 韩建超, 侯洁, 郭雄伟, 等. 极薄带轧制板形解析模型与实验研究 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (4): 85-92.
- Han J C, Hou J, Guo X W, et al. Analytical model and experimental study on ultra-thin strip rolling shape [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (4): 85-92.
- [45] 刘成荣. 减少低碳钢板薄带材冷轧断带事故的方法 [J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58 (5): 172-174.
- Liu C R. Method to reduce the accident of cold rolling strip breaking of low carbon steel [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2022, 58 (5): 172-174.
- [46] 陈保胜, 舒航. 带材收放卷张力控制系统研究 [J]. 现代机械, 2022, 232 (6): 64-68.
- Chen B S, Shu H. Research on tension control system of strip reeling mechanism [J]. Modern Machinery, 2022, 232 (6): 64-68.
- [47] 张清东, 张勃洋, 李瑞, 等. 钢板微观表面质量控制理论与技术研究进展 [J]. 机械工程学报, 2016, 52 (10): 32-45.
- Zhang Q D, Zhang B Y, Li R, et al. Advances in theory and technology for microscopic surface quality control of steel strip [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (10): 32-45.
- [48] 刘松, 黄庆学, 周存龙, 等. 带钢拉伸弯曲矫直机压弯模型的研究 [J]. 太原科技大学学报, 2012, 33 (6): 448-451.
- Liu S, Huang Q X, Zhou C L, et al. Study on bending model of strip tension leveler [J]. Journal of Taiyuan University of Science Technology, 2012, 33 (6): 448-451.
- [49] 周健, 郭斌, 单德彬. 铜箔抗拉强度及延伸率的尺寸效应研究 [J]. 材料科学与工艺, 2010, 18 (4): 445-449.
- Zhou J, Guo B, Shan D B. Research of size effects on tensile strength and elongation of copper foil [J]. Materials Science and Technology, 2010, 18 (4): 445-449.
- [50] 董湘怀, 王倩, 章海明, 等. 微成形中尺寸效应研究的进展 [J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43 (2): 115-130.
- Dong X H, Wang Q, Zhang H M, et al. Progress in size effect of micro-forming [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2013, 43 (2): 115-130.
- +++++
- (上接第 102 页)
- Ma H. Damage Evolution and Ductile Fracture Prediction in Power Spinning of Pure Titanium and Titanium Alloys [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [12] Li C, Shuang Y H, Chen J X, et al. Research on the impact of mandrels in titanium tubes during tube continuous rolling [J]. Materials Research Express, 2023, 10 (8): 086512.
- [13] 雷亮. 连轧无缝钢管轧制力计算模型研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2004.
- Lei L. Research on Rolling Force Calculation Model for Continuous Rolling of Seamless Steel Tube [D]. Changsha: Central South University, 2004.
- [14] 肖成. 无缝钢管连轧过程建模与轧制规程优化 [D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- Xiao C. Modeling and Rolling Schedule Optimization of Seamless Steel Tube Rolling Process [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [15] 周研. 小直径无缝钢管短流程连轧特征与关键技术研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2016.
- Zhou Y. Key Technology and Characteristics Study of the Continual Mandrel Rolling Compact Process for Producing Minor Diameter Seamless Steel Tubes [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2016.
- [16] 汤涛, 邹树梁. 无缝钢管连轧过程数值模拟及参数优化 [J]. 钢铁研究学报, 2012, 24 (11): 6-10.
- Tang T, Zou S L. Numerical simulation and parameter optimization for tandem rolling process of seamless steel tube [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2012, 24 (11): 6-10.
- [17] 赵志毅, 董凯, 余勇, 等. 全浮动芯棒连轧机组轧制力测试与研究 [J]. 钢管, 2006 (4): 1-5.
- Zhao Z Y, Dong K, Yu Y, et al. Measurement of and study on rolling forces of full-floating mandrel mill [J]. Steel Pipe, 2006 (4): 1-5.
- [18] 代佳, 双远华, 苟毓俊, 等. 压下率对 AZ31B 镁合金管材纵连轧力能参数的影响 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (11): 86-89.
- Dai J, Shuang Y H, Gou Y J, et al. Effect of reduction rate on force-energy parameters of AZ31B magnesium alloy tube during continual mandrel rolling process [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (11): 86-89.
- [19] 代佳. 镁合金管材纵连轧工艺及实验研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2020.
- Dai J. Experimental Study on Longitudinal Continuous Rolling Technology of Magnesium Alloy Pipe [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2020.