

## 时空约束的变厚度控制模型及应用

孙涛, 纪良鑫, 杨先理, 胡贤磊

(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:** 在冷轧差厚板(TRB)带材轧制过程中,厚度呈现出周期性、连续性和多段变化的特点,针对厚度难以精确控制的问题,提出密集采点、逐点调控的厚度控制策略.为防止控制系统产生振荡,提出了基于时间和空间约束的变厚度控制(VGC)模型,成功在变厚度冷轧机控制系统中实现应用.通过现场实测数据分析,使用变厚度控制模型前,等厚区厚度波动相对稳定,过渡区的厚度偏差较大,趋厚轧制时呈正偏差,趋薄轧制时呈负偏差.使用变厚度控制模型后,能够快速有效地调整过渡区的厚度偏差,确保TRB的厚度偏差在 $\pm 0.025$  mm以内,优于现有汽车行业TRB标准.

**关键词:** 差厚板;变厚度控制;自动厚度控制;轻量化;冷轧

中图分类号: TG 335.5 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)03-0046-06

## Time and Space Constrained Variable Gauge Control Model and Application

SUN Tao, JI Liang-xin, YANG Xian-li, HU Xian-lei

(State Key Laboratory Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: JI Liang-xin, E-mail: neu\_jlx@163.com)

**Abstract:** During the rolling process of tailor rolled blank (TRB) cold-rolled strips, the gauge exhibits characteristics of periodic, continuous, and multi-stage variations. To address the difficulty in achieving precise gauge control, a control strategy of dense sampling and point by point regulation is proposed. To prevent oscillation in the control system, a variable gauge control (VGC) model based on time and space constraints is developed and successfully implemented in the control system of a variable gauge cold rolling mill. On-site data analysis shows that prior to the use of VGC model, the gauge fluctuations in the equal gauge zone are relatively stable, while the transitional zones exhibited significant gauge deviations, with positive deviations during upwards rolling and negative deviations during downwards rolling. After using VGC model, the system demonstrates rapid and effective adjustment capabilities for gauge deviations in the transitional zones, ensuring that the gauge deviations of TRB are within  $\pm 0.025$  mm, better than the existing TRB standards in the automotive industry.

**Key words:** tailor rolled blank; variable gauge control; automatic gauge control; lightweight; cold rolling

随着节能减排的要求越来越高,汽车轻量化成为汽车主机厂的重要控制目标,轧制差厚板的应用是实现汽车轻量化重要发展之路<sup>[1-2]</sup>.轧制差厚板简称差厚板(TRB),是一种冷轧变厚度板材,厚度范围为0.5~3.0 mm<sup>[3]</sup>,具有节材减重、组织性能均匀、成本低、吸能好等优点<sup>[4]</sup>,目前主要用于汽车安全结构件领域.与传统结构件相比,使

用TRB可以实现车辆自质量降低10%~40%<sup>[5]</sup>.

Kopp等<sup>[6-8]</sup>率先进行了TRB轧制与成型的前期开发.德国慕贝尔(Mubea)公司将该项技术引进,随后成为全球首家成功实现TRB规模化生产的企业<sup>[9-10]</sup>.TRB零件已被广泛应用于宝马、奥迪、沃尔沃等知名品牌的车型中<sup>[11]</sup>.刘相华等<sup>[12-16]</sup>对TRB基础理论和制造技术进行研究,实现了汽

车用冷轧差厚板的国产化。

厚度精度是衡量 TRB 生产质量的重要指标。等厚度钢板的厚度控制模型已经非常成熟, TRB 为变厚度板材, 其相应的控制算法和等厚度控制过程有很大差异, 常规的厚度控制算法无法直接应用于 TRB 的轧制过程。为此需要针对 TRB 轧制过程, 开发对应的变厚度控制(VGC)模型。

## 1 TRB 轧机控制系统

TRB 采用柔性轧制技术, 轧机的可编程逻辑

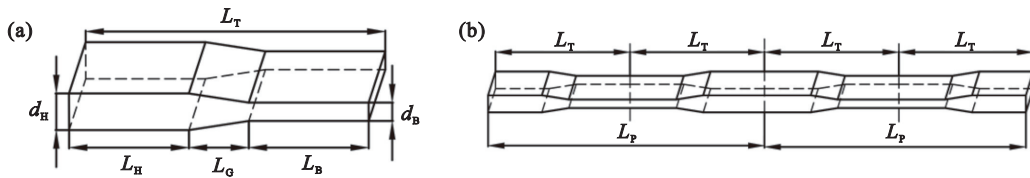


图1 单块 TRB 和 PLP 带材示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single TRB and PLP strip

(a)—单块 TRB; (b)—PLP 带材。

TRB 轧制过程的设备包括具有高响应液压辊缝控制的四辊轧机系统、开卷机和卷取机。检测仪表包括高精度测厚仪、高响应的测速编码器(计算出入口带钢长度, 用于 PLP 带材的精确控制)、多个高精度的压力传感器等。生产 PLP 带材的轧机示意图如图 2 所示。

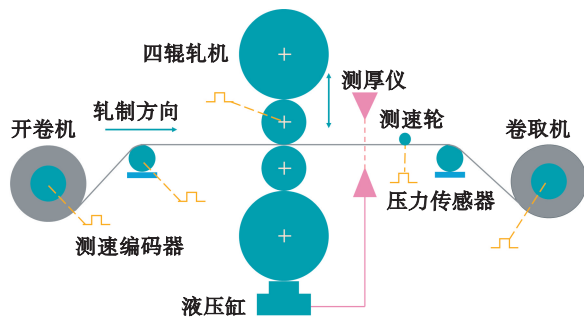


图2 生产 PLP 带材的轧机示意图

Fig. 2 Schematic diagram of PLP strip production mill

## 2 时空约束的 VGC 模型

周期变厚度带材一般包括 1 个或多个等厚区以及对应的过渡区。在轧制过程中, 同一等厚区的各个位置具有相同的的名义厚度, 连接 2 个等厚区的过渡区名义厚度线性变化。基于时空约束的 VGC 模型的核心思想在于密集采点、逐点调控。首先根据测厚仪测量的实际厚度与对应点名义

控制器(PLC)控制系统按设定轮廓尺寸动态变辊缝轧制出厚度不同的带材<sup>[17]</sup>。如图 1 所示, 单块 TRB 总长度为  $L_T$ , 其中包括厚度为  $d_H$ 、长度为  $L_H$  的厚区, 厚度为  $d_B$ 、长度为  $L_B$  的薄区, 两者之间则通过长度为  $L_G$  的过渡区平滑连接。为了实现连续生产和提高收得率的目的, 采用连续周期性轧制策略, 即 TRB 是以首尾尾首的方式连接, 组成 1 个轧制周期  $L_p$ , 多个周期形成连续的周期变厚度(PLP)带材, 后续再根据定尺要求进行横切, 得到单块 TRB<sup>[18]</sup>。

厚度之间的差异, 计算出厚度偏差。考虑在时间轴上的连续性, 进行时间约束, 即利用在 3 个(或更多)相邻周期内同一位置的厚度偏差, 计算出时间约束 VGC 调整量。然后考虑相邻点之间的连续性进行空间约束, 即通过同一周期中相邻 3 个点(或更多)的时间约束 VGC 调整量, 计算出中间点的 VGC 调整量。以此来弥补 TRB 轧制时产生的厚度偏差。

图 3 是时空约束的 VGC 模型, 其中包括过渡区起点和终点的平滑处理、厚度偏差  $\Delta d_{i,j}$  限幅控制、时间约束、空间约束和 VGC 调整量  $A_{i,j}$  限幅控制等, 其中  $i$  为空间变量, 表示 PLP 带材单个周期内第  $i$  个点;  $j$  为时间变量, 表示经过测厚仪 PLP 带材第  $j$  周期;  $\Delta d_{i,j}$  为经过测厚仪第  $j$  周期第  $i$  点的厚度偏差;  $A_{i,j}$  为经过测厚仪第  $j$  周期第  $i$  点的时空约束 VGC 调整量, 简称 VGC 调整量;  $A'_{i,j}$  为经过测厚仪第  $j$  周期第  $i$  点的时间约束 VGC 调整量。

1) 特征点轧制参数设定。PLP 带材单个周期内的起点、终点和过渡区的拐点称为特征点。针对 PLP 带材单个周期尺寸, 输入各特征点的关键参数, 包括辊缝、名义厚度、出口张力、入口张力、名义长度、轧制速度和允许厚度偏差。在 PLP 带材轧制过程中, 准确设定每个特征点的辊缝大小。正确的辊缝设定可以确保轧件的出口厚度尽可能接近名义厚度, 同时减少 VGC 调整的时间, 从而降低带材浪费率。

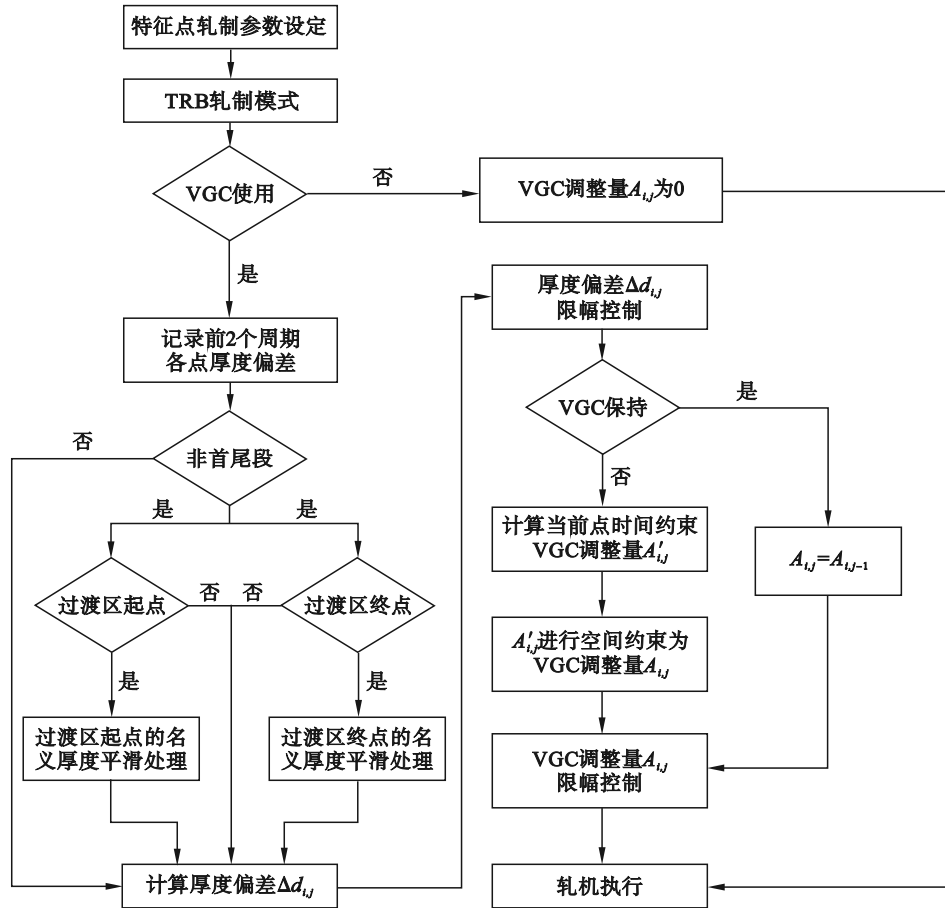


图3 时空约束的VGC模型

Fig. 3 VGC model with time and space constraints

2) 确定 TRB 轧制模式. 在启动变厚度轧制模式时, 多点动态设定的点越多, 过渡区辊缝设定曲线与名义厚度曲线的吻合程度就越高. 在确保精度和液压执行机构能力足够时, 每隔 2~4 mm 增加 1 个设定点.

3) 选择是否使用 VGC. 如果不使用 VGC 模型, 则 VGC 调整量  $A_{i,j}$  将保持为零. 在这种情况下, 轧机仅按照设定的辊缝曲线进行轧制, 若使用 VGC 模型, 计算出各点的 VGC 调整量  $A_{i,j}$ , 然后, 轧机按照设定辊缝和各点的 VGC 调整量  $A_{i,j}$  之和进行动态变辊缝轧制.

4) 拐点平滑处理. 对过渡区的拐点名义厚度进行平滑处理. 根据输入的特征点名义厚度和名义长度, 构建 PLP 带材单个周期轮廓尺寸, 其中过渡区拐点处为明显的棱边结构. 如图 4 所示, 由于轧辊本身具有圆弧面特性, 在变厚度轧制过程中, 变形区出口点会发生偏移. 为避免辊缝在拐点处出现剧烈波动, 在允许厚度偏差范围内, 过渡区和等厚区之间采用圆弧平滑过渡处理.

以趋薄轧制为例, 过渡区平滑处理如图 5 所示. 过渡区起点和终点平滑处理分别见式(1)

和式(2).

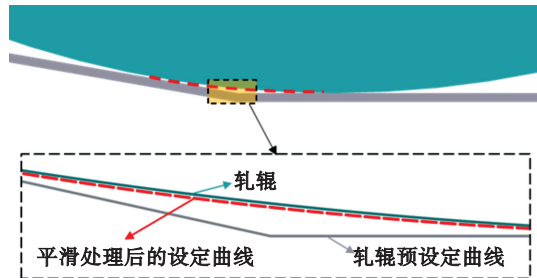


图4 圆弧平滑过渡处理

Fig. 4 Smooth transition processing with arcs

$$d_{aim,i,j} = (m_1, m_2, m_3, m_4) \begin{bmatrix} d_{aim,i-1,j} \\ d_{aim,i,j} \\ d_{aim,i+1,j} \\ d_{aim,i+2,j} \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$d_{aim,i,j} = (n_1, n_2, n_3, n_4) \begin{bmatrix} d_{aim,i-2,j} \\ d_{aim,i-1,j} \\ d_{aim,i,j} \\ d_{aim,i+1,j} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式中:  $d_{aim,i,j}$  为经过测厚仪第  $j$  周期第  $i$  个点的名义厚度;  $m_1 \sim m_4$  为过渡区起点平滑处理的权重因子;  $n_1 \sim n_4$  为过渡区终点平滑处理的权重因子.

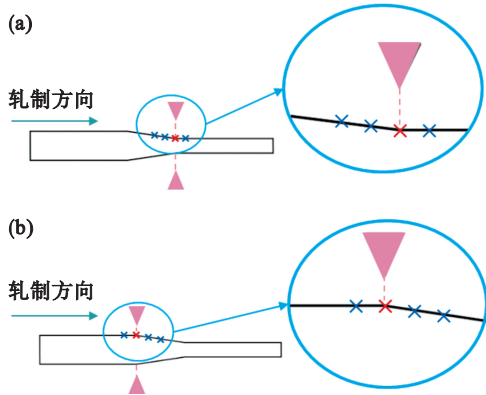


图5 过渡区起点和终点的平滑处理  
Fig. 5 Smoothing of the start and end points of transition zones  
(a)一过渡区起点; (b)一过渡区终点.

5) 厚度偏差限幅控制. 计算并记录各周期各点的厚度偏差, 并进行限幅约束见式(3).

$$\Delta d_{i,j} = d_{act,i,j} - d_{aim,i,j} \quad (3)$$

式中,  $d_{act,i,j}$  为经过测厚仪第  $j$  周期第  $i$  点的实际厚度.

厚度偏差  $\Delta d_{i,j}$  需要限幅控制, 防止测厚仪测量厚度出现突变, 导致 VGC 调整量增大, 引起厚度出现波动. 限幅控制公式见式(4).

$$\Delta d_{i,j} = \begin{cases} -a, & \Delta d_{i,j} < -a; \\ \Delta d_{i,j}, & -a \leq \Delta d_{i,j} \leq a; \\ a, & \Delta d_{i,j} > a. \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $a$  为最大正向允许偏差值.

6) VGC 保持模式. 如果选择 VGC 保持模式, 前 1 周期各点的 VGC 调整量将传递给当前周期对应点的 VGC 调整量. VGC 保持模式多用于更换下 1 卷相同材质和规格的钢材时使用, 快速补偿调整辊缝, 确保轧件的实际厚度快速达到要求. 此方法不仅节约原材料, 还能减少调整时间, 提高生产效率.

7) 时间约束. 如图 6 所示, 基于厚度偏差来实施时间约束, TRB 轧制过程具有周期变厚度的特性, 这种特性体现在时间上(严格来说是在长度上). 在相邻周期上相同位置的厚度不应该出现剧烈突变, 因此用相邻 3 个周期相同位置的厚度偏差来计算当前位置时间约束 VGC 调整量. 使各周期相同位置的厚度偏差互相约束, 以减小异板差, 提高生产的稳定性和一致性. 时间约束见式(5).

$$A'_{i,j} = C(a_1, a_2, a_3) \begin{bmatrix} \Delta d_{i,j} \\ \Delta d_{i,j-1} \\ \Delta d_{i,j-2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $a_1, a_2, a_3$  为时间约束各权重因子;  $C$  为 VGC 调整系数.

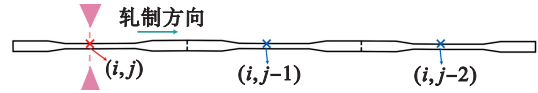


图6 VGC模型的时间约束  
Fig. 6 Time constraint in the VGC model

8) 空间约束. 如图 7 所示, 基于上述时间约束 VGC 调整量来实施空间约束, 在同周期内 TRB 的相邻位置间不发生厚度突变, 因此用同周期相邻位置的时间约束 VGC 调整量来计算当前位置的 VGC 调整量. 将位于测厚仪处点的时间约束 VGC 调整量与其前后相邻 1 点的 VGC 调整量联系起来, 以确保轧制的实际厚度无剧烈波动, 整块板材能够保持光滑平整. 空间约束见式(6).

$$A_{i,j} = (b_1, b_2, b_3) \begin{bmatrix} A_{i+1,j-1} \\ A'_{i,j} + A_{i,j-1} \\ A_{i-1,j} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,  $b_1, b_2, b_3$  为空间约束各权重因子.

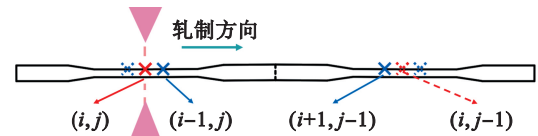


图7 VGC模型的空间约束  
Fig. 7 Space constraint in the VGC model

9) VGC 调整量限幅控制. 防止时空约束后  $A_{i,j}$  过大, 引起同周期内厚度振荡. 限幅控制见式(7).

$$A_{i,j} = \begin{cases} -b, & A_{i,j} < -b; \\ A_{i,j}, & -b \leq A_{i,j} \leq b; \\ b, & A_{i,j} > b. \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $b$  为最大正向允许偏差值.

10) 轧机执行. 轧机根据各点设定的辊缝、长度和 VGC 调整量, 进行动态变辊缝补偿调整, 轧制出满足厚度精度要求的 TRB.

### 3 现场实际应用

根据汽车主机厂现行的标准<sup>[19]</sup>, TRB 厚度的测量点通常位于等厚区距离过渡区拐点 10 mm 处, 且过渡区本身的厚度偏差不在检验范围内. 由于过渡区在实际生产中容易出现厚度超差现象, 采用了更为严格的测量条件, 将测量点设置在等厚区距离拐点 5 mm 处. 将上述时空约束的

VGC模型应用于某TRB可逆四辊冷轧机,轧制出的A,B两款典型产品的厚度偏差在 $\pm 0.025$  mm

以内,全过渡区的厚度偏差在 $\pm 0.05$  mm以内,远高于行业标准,如图8所示.

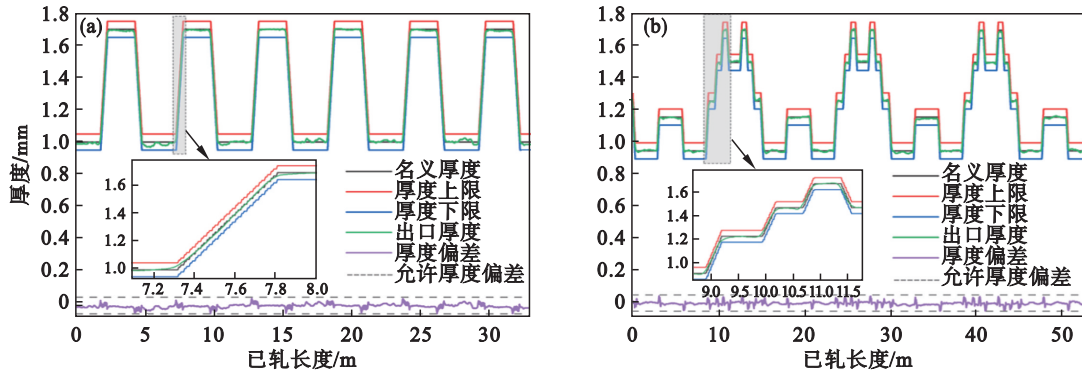


图8 TRB产品厚度偏差

Fig. 8 Thickness deviation of TRB products

(a)—A产品; (b)—B产品.

如图9所示,以A产品为例,等厚区厚度偏差基本在 $\pm 0.025$  mm以内,厚度控制精度较高.过渡区的厚度偏差较大一些,但每个过渡区厚度偏差都小于 $\pm 0.05$  mm.在变厚度轧制过程中,提高过渡区的厚度精度是必须要解决的难题.虽然目前的交货标准没有对过渡区厚度提出明确要求,但如果过渡区厚度稳定性不好,势必影响拐点区域的厚度精度以及生产效率.无论是趋薄轧制还是趋厚轧制,过渡区的厚度偏差变大都发生在轧辊垂直动作开始阶段,即轧机由稳态常规轧制转变为非稳态变厚度轧制时刻.

小,使带材轧得更薄.

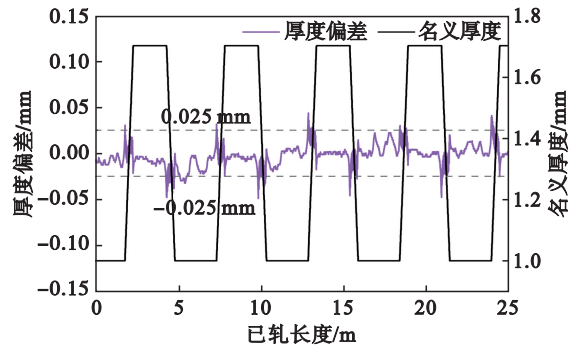


图9 差厚板A产品厚度偏差

Fig. 9 Thickness deviation for product A of TRB

在趋厚轧制时,厚度偏差基本为正值,实际厚度大于名义厚度,原因是当辊缝增大时,带材所受的张应力变小,导致金属的塑性曲线斜率(即轧件的塑性系数)增大,使带材轧得更厚.在趋薄轧制时,情况正好相反,厚度偏差基本呈负值,实际厚度小于名义厚度,这是因为辊缝减小,带材所受的张应力变大,导致轧件的塑性系数减

小,使带材轧得更薄.如图10所示,时空约束VGC模型的控制系

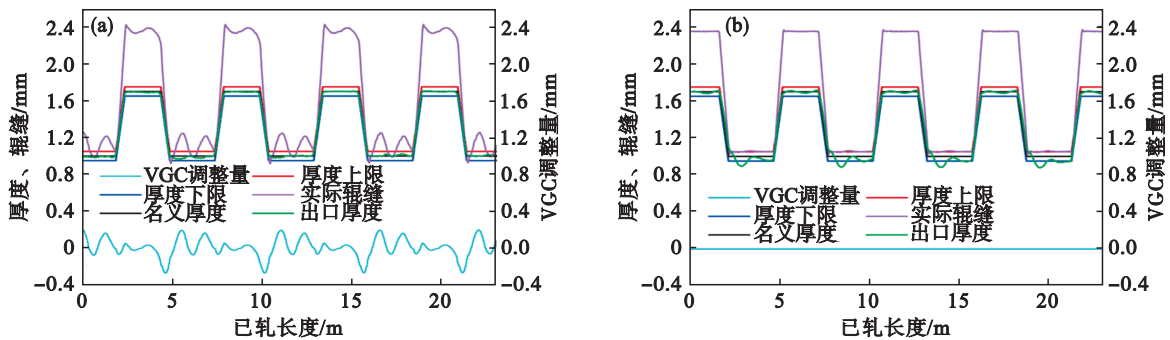


图10 VGC模型的控制系统使用前后的对比

Fig. 10 Comparison before and after VGC model control system usage

(a)—使用VGC; (b)—未使用VGC.

## 4 结 论

1) 根据变厚度轧制的周期性和连续性特点,建立了时空约束的VGC模型,其中包括对过渡区起点和终点名义厚度的平滑过渡处理;先对厚度偏差进行时间约束,得到时间约束VGC调整量,然后对时间约束VGC调整量进行空间约束,得到VGC调整量;最后对厚度偏差和VGC调整量限幅控制。

2) 本文开发的VGC模型用于实际生产,结果表明该模型的使用能够有效抵消其他因素耦合作用引起的厚度偏差,TRB等厚度区厚度偏差为 $\pm 0.025$  mm,过渡区厚度偏差为 $\pm 0.05$  mm,优于行业标准。

3) 等厚区厚度偏差为 $\pm 0.025$  mm,精度高.过渡区的厚度偏差较大.趋厚轧制时呈正偏差,是因为当辊缝增大时,带材所受的张应力变小,导致轧件的塑性系数增大,使得带材轧得更厚;趋薄轧制时呈负偏差,是因为当辊缝减小时,带材所受的张应力变大,导致轧件的塑性系数减小,使得带材轧得更薄。

### 参考文献:

- [1] Meyer A, Wietbrock B, Hirt G. Increasing of the drawing depth using tailor rolled blanks-numerical and experimental analysis [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48(5): 522-531.
- [2] Du J T, Huang C, Chen C Z, et al. Optimization to control parameters on rolling of tailor rolling blanks by orthogonal test [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 80/81: 546-550.
- [3] 刘相华,高琼,苏晨,等.变厚度轧制理论与应用的新进展[J].*轧钢*, 2012, 29(3): 1-7.  
(Liu Xiang-hua, Gao Qiong, Su Chen, et al. New progress of theory and application in variable gauge rolling [J]. *Steel Rolling*, 2012, 29(3): 1-7.)
- [4] Liu X H, Zhi Y, Yu H L. Rolling technology with reducing resources in China [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2010, 25(1/2/3): 161-166.
- [5] 陈丽娟,韩斌,杨奕,等.差厚板轧制技术及其应用[J].*轧钢*, 2013, 30(5): 39-43.  
(Chen Li-juan, Han Bin, Yang Yi, et al. The rolling technologies and applications of tailor rolled blanks [J]. *Steel Rolling*, 2013, 30(5): 39-43.)
- [6] Kopp R, Böhlke P. A new rolling process for strips with a defined cross section [J]. *CIRP Annals*, 2003, 52(1): 197-200.
- [7] Kopp R, Wiedner C, Meyer A. Flexibly rolled sheet metal and its use in sheet metal forming [J]. *Advanced Materials Research*, 2005, 6/7/8: 81-92.
- [8] Van Putten K, Urban M, Kopp R. Computer aided product optimization of high-pressure sheet metal formed tailor rolled blanks [J]. *Steel Research International*, 2005, 76(12): 897-904.
- [9] Kopp R, Wiedner C, Meyer A. Flexible rolling for load-adapted blanks [J]. *International Sheet Metal Review*, 2005, 7(4): 20, 22-24.
- [10] Engler O, Schäfer C, Brinkman H J, et al. Flexible rolling of aluminium alloy sheet-process optimization and control of materials properties [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 229: 139-148.
- [11] Rana R, Singh S B. Automotive steels: design, metallurgy, processing and applications [M]. Duxford: Elsevier, 2017.
- [12] Liu X H, Zhao Q L, Liu L Z. Recent development on theory and application of variable gauge rolling, a review [J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2014, 27(3): 483-493.
- [13] Wang S, Wang X G, Liu X H, et al. Experiment and simulation of variable thickness rolling for 3D-profiled blank [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 290: 116971.
- [14] Zhang G J, Liu X H, Hu X L, et al. Horizontal velocity of variable gauge rolling: theory and finite elements simulation [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2013, 20(10): 10-16.
- [15] Wang J, Hu X L, Feng X. Study on an analytical model of asymmetrical and symmetrical tailor rolled blank rolling [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 132(9): 5153-5169.
- [16] Hu X L, Ke D W, Zhi Y, et al. Effect of two steps overaging on mechanical properties of tailor rolled blank of dual phase steel [J]. *Metals*, 2021, 11(5): 792-805.
- [17] Ryabkov N, Jackel F, Van Putten K, et al. Production of blanks with thickness transitions in longitudinal and lateral direction through 3D-strip profile rolling [J]. *International Journal of Material Forming*, 2008, 1(1): 391-394.
- [18] Huang C, Gan Y, Du J T, et al. Shape rolling simulation of tailor rolled blanks based on deform-3D [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 101/102: 897-900.
- [19] 中国汽车工程学会.汽车用轧制差厚板通用要求: T/CSAE 59—2017 [S].北京:中国汽车工程学会,2017.  
(China Society of Automotive Engineers. Materials Committee of SAE-China. Guide of tailor rolled blank for automotive: T/CSAE 59—2017 [S]. Beijing: China Society of Automotive Engineers, 2017.)