

# 热轧中宽带钢凸度控制模型开发与应用

龚殿尧<sup>1</sup>, 徐建忠<sup>1</sup>, 宋向荣<sup>2</sup>, 余四清<sup>2</sup>  
(1. 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; 2. 北京金自天正智能控制股份有限公司, 北京 100070)

**摘 要:** 以国内某热轧带钢厂的新建项目为背景, 分析了影响热轧中宽带钢凸度的主要因素, 介绍了凸度预设定模型、工作辊热凸度和磨损计算模型及凸度和平直度反馈控制模型的主要功能及架构; 针对典型产品的轧制过程设计了精轧机组工作辊的正弦辊形曲线。根据某产品轧制过程的工程记录数据, 绘制了精轧机组的比例凸度分配曲线, 结合多功能仪实测数据分析了模型的控制效果, 带钢出口凸度保持在  $(40 \pm 20) \mu\text{m}$  的比例占带钢全长的 100%, 平直度为  $(0 \pm 10) \text{I}$  的比例占带钢全长的 98% 以上。  
**关 键 词:** 热轧带钢; 凸度; 数学模型; 辊形曲线; 现场应用  
**中图分类号:** TG 333.71      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2017)04-0512-05

## Developing and Application of Crown Control Model for Medium Breadth Hot Rolled Strip

GONG Dian-yao<sup>1</sup>, XU Jian-zhong<sup>1</sup>, SONG Xiang-rong<sup>2</sup>, YU Si-qing<sup>2</sup>  
(1. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;  
2. Beijing Aritime Intelligent Control Co., Ltd., Beijing 100070, China. Corresponding author: XU Jian-zhong, professor, E-mail: xujz@ral.neu.edu.cn)

**Abstract:** Taking a certain new built medium breadth hot rolled strip mill as the objection, the principal influencing factors of strip center crown were analyzed. It was presented the predictive model of strip crown, the calculating model of thermal crown and wear and the model of the feedback control for center crown and flatness. In the rolling process of the typical products, the SIN curves of 7-standed work rolls barrel were designed. According to the measured data of strip rolled in site, it was plotted the relative crown profile under the condition of even force distribution and the distribution curve of relative crown of strip in finishing mill. Measured data obtained by multi-functional profile and shape meter showed that 100 percent of the finishing crown of strip was located in the range of  $(40 \pm 20) \mu\text{m}$  and the flatness of 0 I with the tolerance of  $\pm 10 \text{ I}$  was more than 98 percent along strip length.  
**Key words:** hot rolled strip; crown; mathematic model; work roll curve; application in site

凸度是带钢中心厚度与边部参考点厚度的差值, 凸度和平直度是带钢板形质量的两个重要量化指标。对于热轧带钢, 考虑到边部减薄和因轧辊磨损而引起的“边鼓”的影响, 一般可取距离边部 40 mm 处作为参考点, 此时的带钢中心厚度与参考点处的厚度之差称为 C40。近年来, 由于钢铁行业形势趋于严峻, 下游用户对于产品质量的要求不断提高, 凸度作为外形尺寸的重要指标日益受到重视。自从二十世纪六十年代弯辊用于板形控制以来, 板形的控制水平得到持续提高, CVC, PC 轧机等具有弯辊、窜辊功能或轧辊交叉功能的各种新型的轧机得到了大量使用, CVC, SMART - Crown, 正弦曲线等辊形曲线也取得了良好的应用效果<sup>[1-4]</sup>。由于板形控制过程的复杂性, 多数数学模型都对物理过程进行了简化, 比如分割梁模型、简支梁模型、有限元法模型<sup>[5]</sup>、影响函数法模型及条元法模型<sup>[6]</sup>, 以及采用上述方法基于理论和经验构建的经验模型。与热轧生产线上的轧制

力、轧制力矩等参数的数学模型不同,目前仍没有能够在各轧线上通用的板形模型. 本文作者所在的轧制技术及连轧自动化国家重点实验室开发了一套采用影响函数法确定基本参数、理论与经验相结合的板凸度和平直度控制模型,与北京金自天正智能控制股份有限公司合作,在中宽带钢热轧生产现场得到了应用,取得了良好的应用效果.

## 1 影响凸度的主要因素

带钢凸度实质上是带钢断面形状的量化描述,可以采用四次曲线描述理想的热轧带钢的断面形状,忽略热轧带钢弹性变形的影响,带钢的断面形状可以看作是变形区出口处辊缝截面形状的

映像,因此,所有能够影响变形区出口处辊缝截面形状的因素都是影响带钢凸度的因素. Ginzburg<sup>[7]</sup>结合三维有限元分析结果,将带钢宽度、轧制力、工作辊直径、支撑辊直径、工作辊凸度、支撑辊凸度和工作辊弯辊力列为影响带钢凸度的主要因素. 国内学者也围绕板凸度和平直度的影响因素问题开展了大量的研究工作. 文献[8-10]结合宝钢 2 050 mm 热轧厂的 NBCM 改造项目,采用影响函数法轧辊弹性变形模型研究了热轧带钢在经过精轧机组某机架时各主要因素对产品凸度的影响及在一定条件下各影响因素对凸度影响效果的影响,各影响因素的相互关系如图 1 所示. 这些因素的影响效果不同,在某些条件下,某个影响因素可能会产生较为显著的效果.

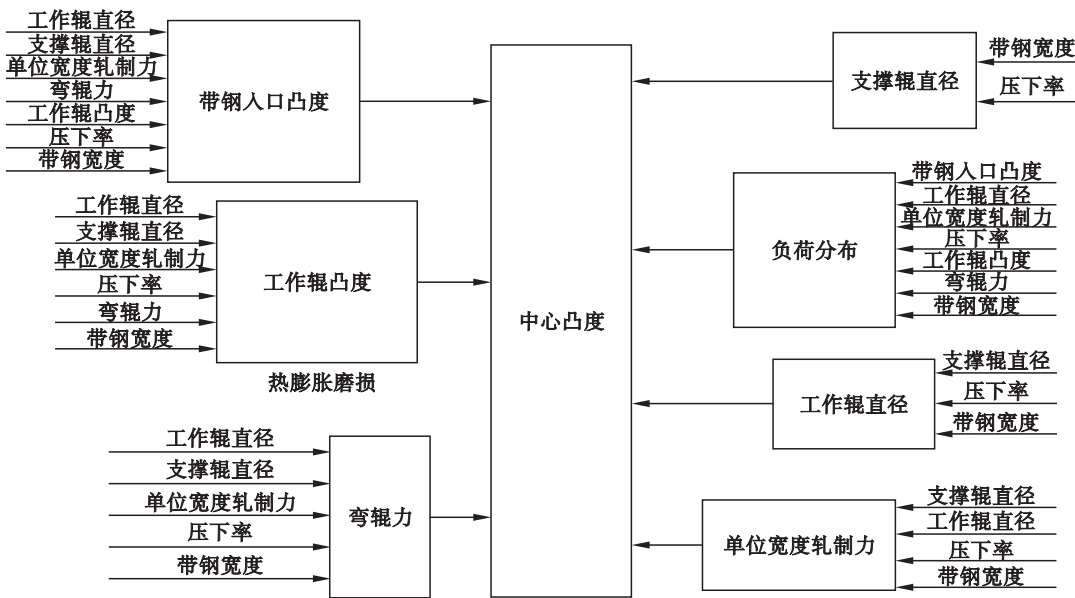


图 1 热轧带钢凸度的影响因素  
Fig. 1 Influencing factors of center crown of hot rolled strip

## 2 带钢凸度的控制模型

带钢凸度控制模型由板形设定模型、反馈控制模型和前馈控制模型组成. 板形设定模型的主要目的是采用数学方法,在负荷分配设定值的基础上,结合设备的板形控制能力和特点,在带钢翘曲度极限范围内完成比例凸度变化量在精轧机组内各机架的分配,并且为了实现该比例凸度变化曲线设定凸度和平直度控制参数的基本值.

对于精轧机组的某个机架,带钢的出口凸度是入口凸度、宽度、轧制力、弯辊力等板凸度影响参数的函数,精轧机组的板凸度是一个随机架变化的连续过程. 采用影响函数法轧辊弹性变形模

型确定板凸度的影响系数,如出口凸度的弯辊力影响系数、单位宽度轧制力影响系数等,将各参数依据其物理性质进行组合,形成如式(1)所示的经验公式:

$$P_k = \sum_{i=1}^{18} (\varphi_i(C_i X)) |_{k=\min}^{\max} \quad (1)$$

式中: $P_k$  为带钢的某机架出口凸度,  $\mu\text{m}$ ;  $C$  为凸度影响系数;  $X$  为凸度影响参数的数值;  $\varphi$  为各影响参数按经验组合的函数;  $k$  为当前计算值是上限或下限的标识符.

当各机架在依据 Shohet 判别式所得出的翘曲极限范围内的比例凸度确认后,根据式(1)逆计算可得到各机架所需的凸度调节机构基本值.

各机架板形和板凸度控制能力的计算、比例

凸度曲线的确定及板凸度调节机构基本值的计算是较为复杂的过程,其基本结构如图 2 所示.受到仪表的限制,板形的控制功能具有一定的局限性,比如凸度在精轧机组与卷取机建张之前可能因为带钢头部的上下左右摆动而失真,而在建张之后,平直度测量值会因张力的存在而不够准确.因此,板形设定模型的精度对带钢板形质量具有重要的影响,通常会采用自学习的方法来提高板形的设定精度.板形设定模型是带钢凸度控制模型的核心组成部分.

反馈控制模型按照多功能仪实测的凸度和平直度,通过调整各机架的弯辊力来保持带钢凸度和平直度的控制精度.

前馈控制功能根据轧制力和工作辊热凸度的变化调整各机架的弯辊力,当轧制力增大时增加弯辊力,当轧辊热凸度增大时减小弯辊力.

除此之外,为了准确计算辊缝的断面形状,采用轧辊热凸度模型和轧辊磨损模型计算轧辊因热膨胀和磨损而产生的凸度变化.

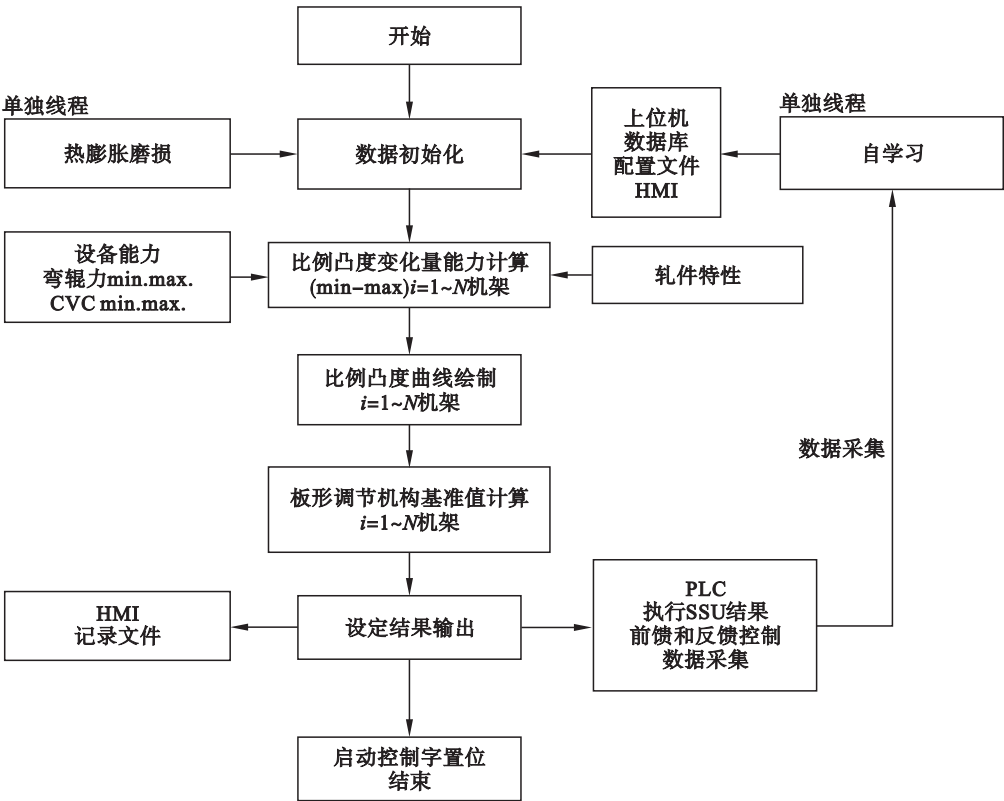


图 2 带钢凸度控制模型的结构及程序流程

Fig. 2 Construction and program flow chart of center crown control model

### 3 现场条件和辊形配置

国内某新建热轧带钢生产线的主要产品为宽度 720 ~ 860 mm、厚度 2.5 ~ 15 mm 的普碳钢带卷.其粗轧机为单机架二辊可逆式,精轧机组前配置有无芯热卷箱、飞剪和精除鳞箱,精轧机组由 7 机架 4 辊轧机组成,工作辊辊身长度为1 200 mm,带有正弯辊 (0 ~ 75 t/侧) 和窜辊机构 (±100 mm).当工作辊采用正弦曲线时,采用周期窜辊的方法分散轧辊磨损.机架间设置有冷却集管,精轧机组后配置有高温计、测厚仪、测宽仪和用于测量板凸度与平直度的 Thermo - Fisher

多功能仪.精轧后的输出辊道上下方设置有层流冷却系统,带卷由地下卷取机卷取.

考虑到该轧线为中宽带轧线,带钢的宽度较窄,各机架的轧制力较小,轧辊因轧制负荷而产生的挠曲和弹性压扁较小,精轧机组前配置有热卷箱,有利于轧件的温度保持,且轧制节奏较快.为了保证在满负荷轧制时仍可以获得目标凸度,该精轧机组应采用负凸度工作辊辊形曲线,F1 ~ F4 机架的工作辊半径凸度为 -150 μm; F5、F6 和 F7 机架的工作辊半径凸度分别为 -110, -90 和 -80 μm,其辊形曲线为广泛应用的常规正弦辊形曲线,各机架的正弦曲线半角均为 135°.

4 设定计算实例

典型产品的钢种为 Q235B, 中间坯厚度为 28 mm, 精轧出口目标厚度为 2.95 mm, 目标宽度为 760 mm, 精轧出口速度为 7.2 m/s. 各机架出口厚度和各机架的轧制力设定值如图 3 所示.

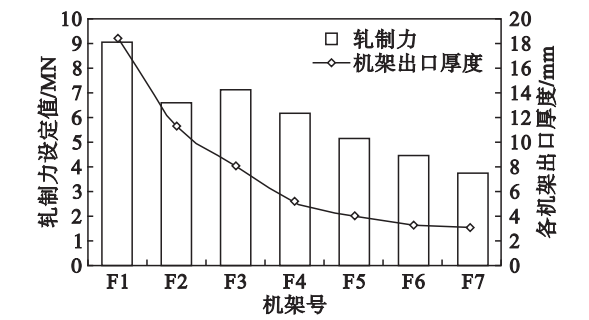


图 3 轧制力设定值和出口厚度设定值  
Fig. 3 Reference values of rolling force and delivery thickness

图 4 为比例凸度极限值与比例凸度曲线. 当比例凸度超出上极限时带钢处于边浪状态; 当比例凸度位于下极限之下时, 带钢为中浪状态. 图 4 的比例凸度曲线处于上下限区域的中间位置, F5 ~ F7 机架基本保持了比例凸度恒定, F1 ~ F4 机架比例凸度缓慢上升, 较好地体现了在精轧机组上游机架改变比例凸度而下游机架通过比例恒定来保持带钢平直的板形设定思想.

各机架的弯辊力设定值如图 5 所示. 该卷带钢的目标凸度为 40  $\mu\text{m}$ , 精轧出口凸度设定值为 40.5  $\mu\text{m}$ , 平直度设定值为 0 I.

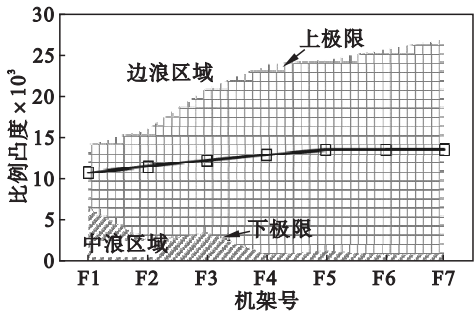


图 4 比例凸度上下限和比例凸度曲线  
Fig. 4 Upper and lower limits and curve of relative crown

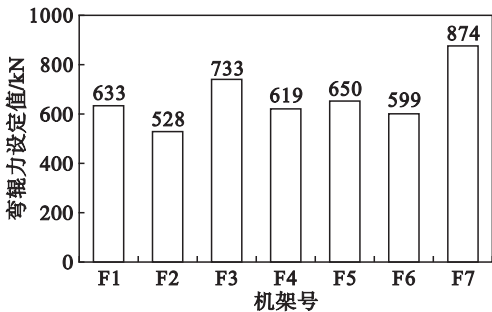


图 5 弯辊力设定值  
Fig. 5 Reference values of bending force

Thermo Fisher 多功能仪实测的带钢凸度和平直度的 PDA 曲线如图 6 所示. 直线 1 和直线 4 之间的区域为带钢凸度控制的有效区域. 可知, 出口目标凸度保持在  $(40 \pm 20) \mu\text{m}$  的比例占带钢全长的 100%, 由于该曲线取自换辊初期, 因此凸度处于目标值之上. 平直度为  $(0 \pm 10) \text{I}$  的比例占带钢全长的 98% 以上, 经技术人员分析, 平直度曲线中个别“尖刺”为受水汽干扰所致. PDA 曲线表明本文所开发的模型具有较高的带钢凸度控制精度.

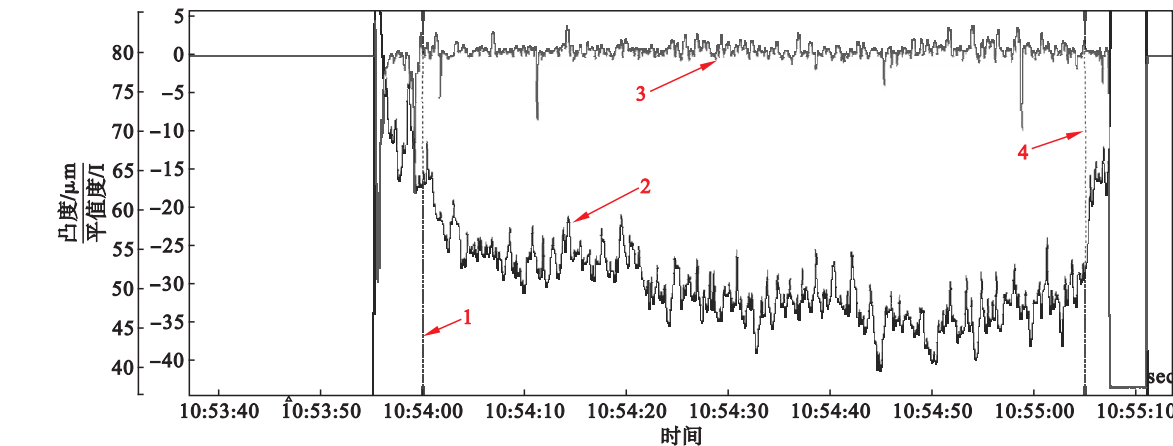


图 6 板凸度和平直度实测曲线  
Fig. 6 Measured values of crown and flatness  
1—穿带结束后弯辊力设定值由基础自动化开始执行的时间; 2—带钢凸度 C40 的实测值;  
3—平直度的实测值; 4—末架抛钢阶段开始时间.

5 结 论

考虑影响热轧带钢凸度的主要因素,结合中宽带钢生产的实际情况,构建了包括设定模型、反馈模型、热凸度与磨损计算模型在内的板凸度控制模型. 多功能仪实测数据表明,带钢出口凸度保持在 $(40 \pm 20) \mu\text{m}$ 的比例占带钢全长的100%,平直度为 $(0 \pm 10) \text{I}$ 的比例占带钢全长的98%以上. 所开发的凸度控制模型具有较高的控制精度.

参考文献:

[ 1 ] 赵旭亮. 热轧带钢板形控制技术的研究与应用[ D ]. 沈阳: 东北大学, 2009.  
( Zhao Xu-liang. Study and application on strip shape control [ D ]. Shenyang: Northeastern University, 2009. )  
[ 2 ] Li H B, Zhang J, Cao J G, et al. Analysis of crown control characteristics for smart crown work roll [ J ]. *Advanced Materials Research*, 2010, 156/157 ( 10 ): 1261 – 1265.  
[ 3 ] Guo Z F, Sun X Y, Wang Q, et al. Simulation of shape control for CVC hot strip rolling [ J ]. *Procedia Engineering*,

2011, 15 : 1166 – 1170.  
[ 4 ] Guo Z F, Hu J H, Sun X Y. Study on roll wear model for hot strip mill [ J ]. *Advanced Materials Research*, 2012, 535/536/537 ( 6 ): 697 – 703.  
[ 5 ] Linghu K, Jiang Z, Zhao J, et al. 3D FEM analysis of strip shape during multi-pass rolling in a 6-high CVC cold rolling mill [ J ]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 74 ( 9/10/11/12 ): 1733 – 1745.  
[ 6 ] Peng Y, Chu Y P, Liu H M. Shape discrimination analysis of rolled strip based on strip element method [ J ]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2004, 11 ( 1 ): 29 – 32.  
[ 7 ] Ginzburg V B. High-quality steel rolling—theory and practice [ M ]. New York: Marcel Dekker Inc. , 1994: 451 – 477.  
[ 8 ] Xu J Z, Gong D Y, Zhang W C, et al. Model building of the initial crown effect rate in 4-high mill [ J ]. *Journal of Material Science & Technology*, 2005, 21 ( 2 ): 165 – 169.  
[ 9 ] Di H S, Xu J Z, Gong D Y, et al. Effect of load distribution on strip crown in hot strip rolling [ J ]. *Journal of Material Science & Technology*, 2004, 20 ( 3 ): 330 – 334.  
[ 10 ] Xu J Z, Gong D Y, Liu X H, et al. Model building of backup roller diameter effect rate in 4-high mill [ J ]. *Journal of Material Science & Technology*, 2004, 22 ( 4 ): 454 – 456.