研究与开发

冷连轧机工作辊窜辊设定及辊形优化

秦大伟[1]，王奎越[1,3]，赵健[2]，王奉鹏[2]，张岩[1]
（1. 鞍钢集团北京研究院有限公司，北京 102200；2. 鞍钢股份有限公司硅钢事业部，
辽宁 鞍山 114009；3. 东北大学，辽宁 沈阳 110819）

摘要： 边降控制精度是衡量高端冷轧产品核心竞争力的关键指标，边降缺陷不仅会降低产品成材率，还会显著劣化下游加工性能。围绕冷连轧机边降控制关键技术与辊形优化开展研究，全面分析热轧原料边降特征、辊形设计与窜辊控制的协同机理，形成覆盖原料特征、辊形设计和补偿控制的全要素边降控制解决方案。基于工作辊窜辊设备工作原理，推导工作辊窜辊位置、窜辊量和窜辊插入量等关键参数的计算方法。基于边降产生机理，利用边降仪检测数据，分析轧制过程带钢边部厚度衰减特性，建立各轧制道次的带钢边部衰减系数模型，推导各机架边部补偿辊缝计算方法。建立基于原料边降特征和带钢边部衰减特性的辊形辅助设计和连轧机边降预测方法。开发边降控制与辊形设计辅助决策软件，为冷轧边降控制工艺优化提供理论和技术支撑。

关键词： 连轧机；边降控制；辊形设计；边部衰减
中图分类号： TG333 **文献标志码：** A **文章编号：** 1006-4613(2026)04-0046-07
DOI：10.3969/j.issn.1006-4613. 2026. 04. 006

Shift Setting and Profile Optimization of Work Rolls in Tandem Cold Rolling Mills

QIN Dawei[1], WANG Kuiyue[1,3], ZHAO Jian[2], WANG Fengpeng[2], ZHANG Yan[1]
(1. Ansteel Group Beijing Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China;
2. Silicon Steel Busniness Division of Angang Steel Co., Ltd., Anshan 114009, Liaoning, China;
3. Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: Edge drop control accuracy is a key indicator that determines the core competitiveness of high-end cold-rolled products. Edge drop defects not only reduce product yield but also significantly deteriorate the downstream processing performance. Key edge drop control technologies and roll profile optimization for tandem cold rolling mills were investigated. The synergistic mechanisms among edge drop characteristics of hot-rolled raw materials, roll profile design, and roll shift control were comprehensively analyzed. A full-factor edge drop control solution covering raw material characteristics, roll profile design, and compensation control was formulated. Based on the working principle of the work roll shift device, the calculation methods for key parameters such as work roll shift position, shift amount, and shift insertion amount were derived. Based on the generation mechanism of edge drop, thickness attenuation characteristics at strip edges were analyzed by using measured data obtained from edge drop gauges. Edge attenuation coefficient models for each rolling pass were established, and the calculation methods for the edge compensation roll gap of each stand

基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFB3304800)

秦大伟，博士，正高级工程师，2021年毕业于燕山大学冶金机械专业。E-mail: 94216477@qq.com

were further deduced. An auxiliary roll profile design method and a tandem mill edge drop prediction method were both developed on the basis of the edge drop characteristics of hot-rolled raw materials and the edge attenuation characteristics of rolled strip. Finally, auxiliary decision-making software for edge drop control and roll profile design was developed, which provided theoretical foundation and technical support for the process optimization of cold rolling edge drop control in cold rolling production.

Key words: tandem rolling mill; edge drop control; roll profile design; edge attenuation

当前，我国钢铁工业已迈入高质量发展新阶段，行业正从规模扩张转向结构优化，提升高端钢铁产品供给能力已成为践行这一发展方向的必然要求。随着下游制造业快速升级，冷轧板带作为新能源汽车、高端家电、高效节能电机等战略性产业的关键原材料，其质量要求已达到前所未有的高度。新能源汽车对车身轻量化和安全性的极致追求，要求汽车外板具备极高的冲压成型性与尺寸稳定性；高效节能电机的推广应用，则对核心材料高牌号无取向硅钢的磁性能提出严苛标准，而这些性能要求都与带钢厚度均匀性密切相关。边降（边部减薄）作为冷轧带钢最突出的厚度缺陷，直接影响产品尺寸精度与下游加工适配性，尤其在汽车板、家电板、无取向硅钢等高端产品应用中，边降缺陷将引发下游加工的冲压开裂、磁性能衰减等问题，直接影响企业在高端市场的产品竞争力。边降缺陷带来的负面影响贯穿生产、加工、市场竞争全链条。为消除边降对后续加工的影响，必须在生产过程对带钢两侧进行切边处理，若边降控制精度不足，将直接导致切边量增大而降低产品成材率，造成资源和能源浪费。传统依赖平辊轧制或单一工艺调整的边降控制手段，难以应对多规格带钢轧制、多机架协同调控及边降与板形耦合影响等复杂挑战。

在技术层面，国际主流系统装备供应商（如西马克、普锐特）已将高精度边降控制技术作为高端冷轧产线的标准配置，技术成熟度与应用稳定性优势显著。国内方面，以宝武、鞍钢为代表的龙头企业，通过技术引进与自主创新，在边降控制领域取得长足进步；东北大学、北京科技大学等高校也围绕边降形成机理开展深入研究，形成了丰富的理论成果。但对于多数国内钢铁企业而言，边降控制技术的研究与应用仍面临诸多挑战，特别是在轧制高强钢、高牌号硅钢等难变形材料时，现有控制系统难以将边降持续稳定控制在7 μm以内的先进水平；且在新产品试制过程中，工艺参数调试高度依赖工程师经验，耗时较长，造成产能浪费。从市场需求来看，国内现有五机架及以上冷连轧机组约数十套，边降控制技术相对落后，存量机组改造需求迫切，市场潜力巨大。而在增量市场中，新增产能多集中于高端汽车用钢、高牌号无取向硅钢等高附加值产品，高精度边降控制已成为此类产线的核心标配技术，更是实现产品质量目标的关键支撑。在此背景下，行业内围绕冷连轧机边降的形成机理开展了大量研究工作[1-7]，并在此基础上逐步发展出工作辊辊形优化[8-11]、设备功能升级[12-15]及智能控制模型[16-20]等技术方向，但仍存在换产调试周期长、边降控制稳定性不足、边降与平坦度耦合等问题。因此，必须全面考量热轧原料边降特征、辊形设计、工艺参数与控制算法的协同机制，构建覆盖原料边降、辊形设计和辊缝补偿的全要素边降控制解决方案，实现工作辊窜辊准确设定和辊形设计优化，为高端冷轧产品质量提升提供技术保障。

1 边降控制及工作辊窜辊原理

边降是指带钢轧制过程中，受工作辊弹性压扁、边部金属塑性流动差异及辊系变形等因素影响，在带钢边部出现的厚度骤减现象。边降的形成是多因素耦合作用的结果，工作辊弹性压扁会导致边部辊缝大于中部，使金属在边部区域的压下量不足，虽然具有一定的边降补偿作用但作用有限，边部金属因缺乏足够的侧向约束，诱发金属横向塑性流动导致边部减薄；同时，辊系的弯曲变形也会加剧边部辊缝的不均匀性，进一步放大边降效应。边降控制原理是通过主动干预辊缝形态

调控带钢变形规律,使带钢变形均匀、金属流动同步,从而实现边部厚度与中部一致。当前主流技术方案采用带有边部辊形的单锥度工作辊(EDC辊)配合窜辊调节改变带钢边部辊缝开度,实现边降精准控制。

单锥度工作辊的结构设计具有对称性,上工作辊锥形段位于操作侧,下工作辊锥形段位于传动侧,上、下辊锥形段中心对称分布。这种对称设计能够确保轧制过程中带钢两侧的受力均衡,避免因单侧锥度作用导致的带钢跑偏或边降不对称问题。工作辊窜辊原理如图1所示,当前工作辊窜辊位于标定位置,L是平辊段长度,s_{max}是窜辊行程,l锥形段长度,w_0是带钢基准宽度。定义带钢中心方向为窜辊插入量正方向,远离带钢中心方向为窜辊正方向,即操作侧为上工作辊窜辊位置正方向,传动侧为下工作辊窜辊位置正方向,因此窜辊插入量与窜辊方向极性相反。窜辊插入量是带钢覆盖工作辊锥形段的长度,在当前带钢基准宽度条件下窜辊插入量为0。当前上、下工作辊窜辊压缸均处于中间位,定义当前窜辊位置为0,上、下工作辊窜辊量为$s_{max}/2$。工作辊窜辊位置和窜辊量等参数计算必须以参考位置为基准,原系统以窜辊压缸完全缩回状态作为参考位置,并以此状态下最大插入量对应的带钢宽度作为带钢基准宽度,为简化计算将参考位置修改为标定位置,将基准带钢宽度修改为标定位置下的上、下辊平辊段重叠区宽度。

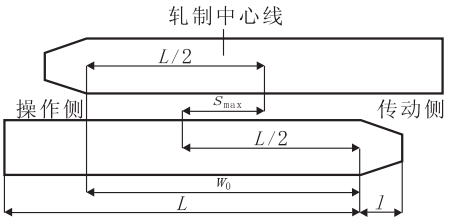


图1 工作辊窜辊原理

Fig. 1 Principle of Work Roll Shift

首先根据带钢基准宽度计算不同带钢宽度和窜辊插入量设定条件下的窜辊量,然后进行窜辊位置设定计算。带钢基准宽度为:

$$w_0 = L - s_{max} \tag{1}$$

式中,w_0为带钢基准宽度,mm;L为平辊段长度,mm;s_{max}为工作辊窜辊行程,mm。

以标定位置为参考,根据带钢实际宽度、平辊段长度、锥形段长度及窜辊插入量设定值等参数,计算工作辊窜辊设定值:

$$s = (w - w_0)/2 - c = (w - L + s_{max})/2 - c \tag{2}$$

式中,s为窜辊位置设定值,$s \in (-s_{max}/2, s_{max}/2)$,mm;$w$为带钢实际宽度,mm;$c$为窜辊插入量设定值,mm。

根据s取值范围,可以计算不同宽度带钢的插入量设定值范围是$[(w-L)/2, (w-L)/2 + s_{max}]$。

以典型工况为例,L=1 400 mm,l=150 mm,w=1 000 mm,c=50 mm,按照当前带钢宽度和插入量设定,计算窜辊量为-100 mm,即上辊向传动侧、下辊向操作侧各窜动100 mm。工作辊窜辊前、后位置关系如图2所示,图中虚线是工作辊标定位的初始位置,实线是工作辊窜辊后的位置。

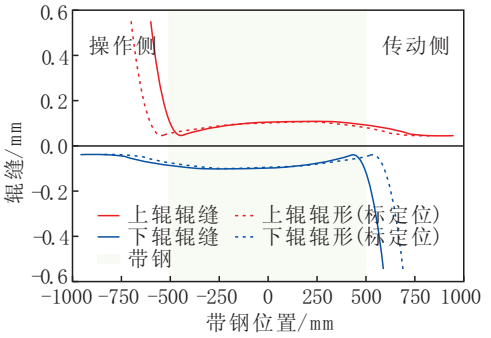


图2 工作辊窜辊前、后位置关系

Fig. 2 Position Relationship of Work Rolls before and after Roll Shift

2 边降及边部厚度衰减分析

带钢边降特征及边部厚度衰减特性分析是边部辊缝补偿、辊形设计和窜辊调控的核心依据。不同热轧原料的边降特征存在显著差异,轧制过程中各道次的边部厚度衰减规律也各不相同,只有精准捕捉这些特征,才能实现边降的精准控制。通过采集现场边降检测数据,提取原料及成品带钢的边降特征,分析轧制过程中的边部厚度衰减特性,据此构建了边部厚度衰减模型,为优化边降控制提供了理论支撑。

2.1 边降特征

边降仪是边降控制中的关键检测仪表,其检测精度和稳定性直接决定边降控制效果。边降仪配备多个高精度检测探头,能够对带钢横向厚度减薄情况进行多点连续测量,检测分辨率可达0.1 μm,满足高端冷轧产品的边降检测需求。在

连轧机入口侧与出口侧分别配置边降仪，形成全流程检测闭环。入口边降仪用于测量原料带钢的横向厚度轮廓，为后续各机架轧制工艺参数预设定提供基础数据；出口边降仪用于测量成品带钢厚度轮廓，为工作辊窜辊动态调整提供依据。边降仪检测探头按功能可划分为传动侧边部区、中部区、操作侧边部区三个独立测量单元，遵循边部加密、中部基准、动态适配原则。中部区位置保持固定，并以连轧机轧制中心线为对中基准，通过机械定位销与坐标标定双重约束，确保其与轧制中心线严格对中，避免设备移位引起的对中偏差。检测探头沿中心线两侧对称分布，所有探头到中心线的距离固定，测量带钢中部区域的厚度，同时支撑带钢横向厚度对称性判断。两侧边部区则以带钢实际边沿为相对0点，区别于中部区的固定位置设计，边部区可通过伺服驱动系统随带钢宽度变化实现整体平移。为精准捕捉边部减薄特征，边部区探头采用高密度排布，重点覆盖带钢边沿向内5~150 mm的边部区域，该区域是边降缺陷的主要产生区域。所有探头到边部区0点的距离参数固定，不受带钢宽度变化影响，确保不同规格带钢边降指标计算一致。同时边降仪还具备动态寻边功能，可实现带钢跑偏检测，带钢进入边部检测区域后，触发伺服驱动系统平移寻边，系统同步记录两侧边部区在基准坐标系中的位置坐标，由此可精确解算带钢实际跑偏量，为带钢对中控制提供依据。

利用平辊轧制模式下入口、出口边降仪检测数据，并将其归一化处理，采用DBSCAN密度聚类算法提取边降特征。图3为原料和成品带钢横向厚度偏差轮廓，边部0~20%范围为骤降区，厚度呈陡降特征；边部20%~40%范围为过渡区，厚度变化趋缓但仍存在不同程度的减薄。边部20%附近出现局部突起的猫耳缺陷。原料与成品曲线均呈现两侧边降不对称特征，且操作侧边降数值大于传动侧，原料和成品曲线的中心区域均向传动侧偏移，且计算的偏移距离（X_1、X_2）一致，这一现象表明热轧过程存在轧制中心跑偏，而冷轧过程无跑偏但冷轧无法完全消除原料不对称缺陷。此外，成品曲线边部骤降区长度和边降幅度都较原料显著增大，表明冷轧过程会加剧带钢边部厚度衰减，使边降范围进一步扩大。

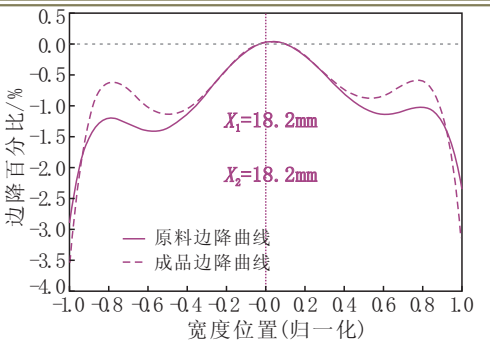


图3 带钢横向厚度偏差轮廓

Fig. 3 Transverse Thickness Deviation Profile of Steel Strip

2.2 边部厚度衰减特性

为进一步研究骤降区带钢边部厚度衰减特性，利用平辊轧制模式的边降检测数据，提取边部150 mm范围数据并将其转换为百分比，将通道号与带钢横向位置映射变换，以150 mm位置作为检测基准点进行数据对齐，拟合带钢位置坐标系下原料和成品带钢边降方程。带钢边降曲线符合指数规律，带钢边降拟合方程为：

$$E_d(x)= k\mathrm{e}^{-x/a} \tag{3}$$

式中，$E_d(x)$为带钢边降；k为边降幅值系数；a为边降长度系数。

在平辊轧制模式下，由于未对边部辊缝实施补偿措施，金属横向流动显著加剧，边部金属向外侧延展扩散，导致边部厚度随轧制道次的增加而持续衰减。假设边部厚度衰减与压下量权重之间呈线性关系，按照各道次压下量对原料和成品带钢边降衰减方程进行线性插值并差分，计算各道次轧制边降方程，第n道次轧制边降为：

$$E_{d_sn}(x)= E_{d_n}(x)- E_{d_n-1}(x) \tag{4}$$

式中，$E_{d_sn}(x)$为第n道次轧制边降，mm；$E_{d_n}(x)$为第n道次出口带钢边降，mm；$E_{d_n-1}(x)$为第$n-1$道次出口带钢边降，mm。

利用机组在平辊轧制模式下带钢边降检测的历史数据，拟合带钢边降和各道次轧制边降方程系数，各道次压下量权重分别设置为50%、40%、30%、20%、10%，带钢边降和轧制边降方程系数如表1所示。

由表1可知，随着轧制道次的增加，带钢边降幅值系数k的绝对值逐渐增大，表明边部厚度衰减程度不断加剧；带钢边降长度系数a的变化相对较小，整体呈现缓慢增大趋势，说明边降影响范围逐渐扩

大。由于边降长度系数变化较小,为简化模型计算,令a=10,构建带钢边降衰减简化模型,将带钢边降变换为单变量描述,第n道次轧制边降可表示为:

$$E_{d_sn}(x)=k_n e^{-x/a_n} \quad (5)$$

式中,k_n为第n道次轧制边降幅值系数。

通过表1可以看出,轧制边降长度系数变化较小(9~12 mm),为简化模型计算,令a_n=11,将轧制边降变换为单变量描述,第n道次轧制边降可表示为:

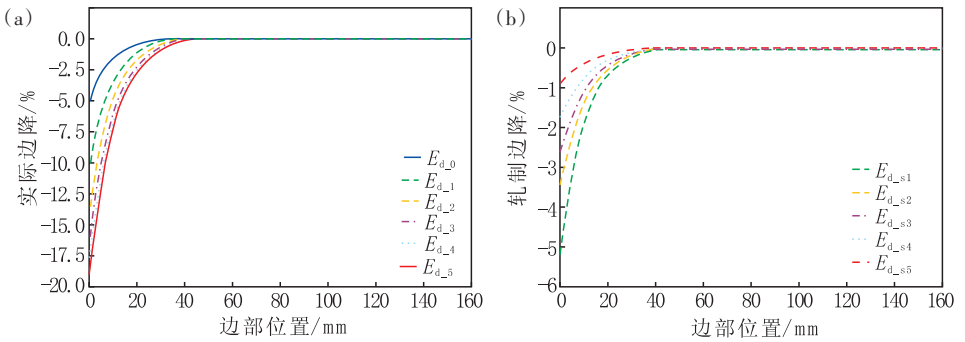
$$E_{d_sn}(x)=k_n e^{-x/11} \quad (6)$$

图4为轧制过程带钢边降和各道次轧制边降骤降区边降演变,由图4可以看出各道次边部厚度衰减的叠加效应,以及边降随带钢横向位置的变化规律,为后续边部补偿辊缝计算提供支撑。

表1 带钢边降和轧制边降方程系数

Table 1 Equation Coefficients of Inherent Strip Edge Drop and Rolling-induced Edge Drop

模型	k值	a值
E_{d_0}	-5.397	8.576
E_{d_1}	-10.841	9.074
E_{d_2}	-14.471	9.406
E_{d_3}	-17.192	9.655
E_{d_4}	-19.007	9.821
E_{d_5}	-19.914	9.904
E_{d_s1}	-5.451	9.567
E_{d_s2}	-3.642	10.392
E_{d_s3}	-2.736	10.967
E_{d_s4}	-1.826	11.376
E_{d_s5}	-0.914	11.621



(a) 第n道次出口带钢边降;(b) 第n道次轧制边降

图4 骤降区边降演变

Fig. 4 Evolution of Edge Drop in the Steep Zone

3 工作辊窜辊优化

3.1 边部补偿辊缝计算

边部补偿辊缝计算是实现边降精准控制的核心环节,其核心思路是以平辊模式下的边降特征作为初始值,以前馈厚度控制思想为基础,以补偿原料边降和本道次轧制边降为目标,结合机架刚度、材料塑性等参数,计算各道次的边部补偿辊缝初始值,通过补偿辊缝的精准调控抵消边部厚度衰减。第n机架边部补偿辊缝的计算公式:

$$\Delta H_n(x)=-\frac{K_M}{K_Q}\left[\mu_n\Delta h_0(x)+E_{d_sn}(x)\right] \quad (7)$$

式中,$\Delta H_n(x)$为第n机架边部补偿辊缝,mm;K_M为第n机架刚度系数;K_Q为第n道次原料塑性系数;μ_n为第n道次原料边降补偿系数;$\Delta h_0(x)$为轧机入口边降,mm;$E_{d_sn}(x)$为第n道次轧制边降,mm。

3.2 辊形优化

EDC辊形设计的核心目标是通过工作辊边部的特殊轮廓设计,实现轧制过程的边部变接触功能,从而有效补偿带钢边降。传统EDC辊形多采用二次曲线或正弦曲线,其廓形通常由设备制造商在出厂时预设,产线现场难以根据实际工况进行自主优化。受热带钢原料边降差异的影响,固定辊形往往存在工况适配性不足的问题。为此,基于特定产线的边部厚度衰减规律与轧制边降模型,对工作辊辊形进行优化设计,以提升其对原料特征及轧制变形行为的匹配度。EDC辊形的关键设计参数包括锥长l、锥深h、辊端安全

裕量l_g及有效辊形长度l_t。锥形段通常由直线段和曲线段构成，直线段为安全裕量段，曲线段为有效辊形段，二者采用相切连接以确保平滑过渡。直线段长度通常取40~50 mm，其作用是避免带钢边部与工作辊辊端直接接触，防止辊端磨损及带钢边部划伤；曲线段长度与带钢边降区宽度相对应，是实现边部厚度补偿的核心区域。辊形设计需要兼顾适配性、调节性和耐用性原则，辊形曲线需与原料边降和轧制边降特征高度契合，确保补偿辊缝的精准性，辊形参数需与工作辊窜辊调节范围相匹配，为不同规格带钢的边降补偿提供足够的调节空间，同时要考虑工作辊的磨损特性，避免局部应力集中导致辊形快速失效。

基于前文建立的带钢边降和轧制边降模型设计辊形曲线，设置锥长为l=150 mm，其中辊端安全裕量l_g=50 mm，有效辊形长度l_t=100 mm。按照各机架边部补偿辊缝最大值和典型轧制厚度计算锥深，1、2、3机架辊形锥深分别设置为−0.35 mm、−0.25 mm、−0.15 mm。辊形优化如图5所示，与现有平方曲线对比，指数曲线更加符合带钢边降特征。指数衰减辊形曲线与辊身圆柱段呈渐近相切关系，理论上无限接近而不相交，无法在严格几何意义上自然相切。实际轧辊磨削时，在偏差小于磨削允许公差处截断并与辊身圆柱段光滑连接，在轧辊制造精度范围内可视为平滑过渡。指数衰减模型能够直观表征带钢边部厚度随边部距离增大而趋于平缓的物理衰减规律，且具有明确的衰减常数，较多项式等纯几何拟合形式更利于辊形设计与工艺调控。

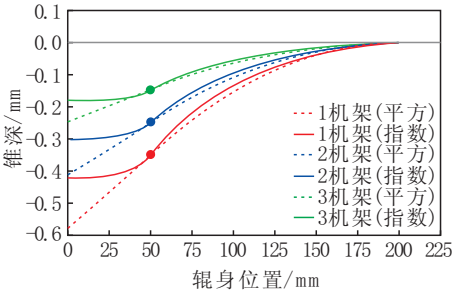


图5 辊形优化

Fig. 5 Optimization of Roll Profile

3.3 窜辊插入量设定优化

窜辊插入量是连接辊形设计与边降补偿的关键参数，通过调整窜辊插入量可改变有效辊形与带钢边部的覆盖长度，进而实现补偿辊缝的动态调节。将辊身位置坐标系下的辊形曲线变换至带钢位置坐标系，建立窜辊插入量与补偿辊缝的关联方程，为窜辊插入量的精准设定提供理论依据。假设初始状态下有效辊形起始位置与带钢边沿对齐，带钢位置坐标系下，工作辊窜辊生成的边部补偿辊缝$\Delta H_n(x)$可表示为：

$$\Delta H_n(x) = k_n e^{-(x-c)/a} \tag{8}$$

式中，k_n和a是辊形设计常数，分别表征边降补偿强度与衰减速率；c为待优化的窜辊插入量，mm。以目标边降对应的补偿辊缝曲线为拟合基准，将基于工作辊辊形曲线生成的边部补偿辊缝作为可调函数，通过调节窜辊量c使生成的补偿辊缝曲线在最小二乘意义上接近目标辊缝，构造一维优化模型。由于模型仅含单一决策变量c，可通过对目标函数求导并令导数为0，计算最优窜辊量c^*的显式解析解：

$$c^* = a \cdot \ln\left(\frac{\sum_i y_i \cdot e^{-x_i/a}}{k_n \cdot \sum_i e^{-2x_i/a}}\right) \tag{9}$$

式中，y_i是边部补偿辊缝目标值，mm；x_i是边部位置坐标，mm。

4 应用效果

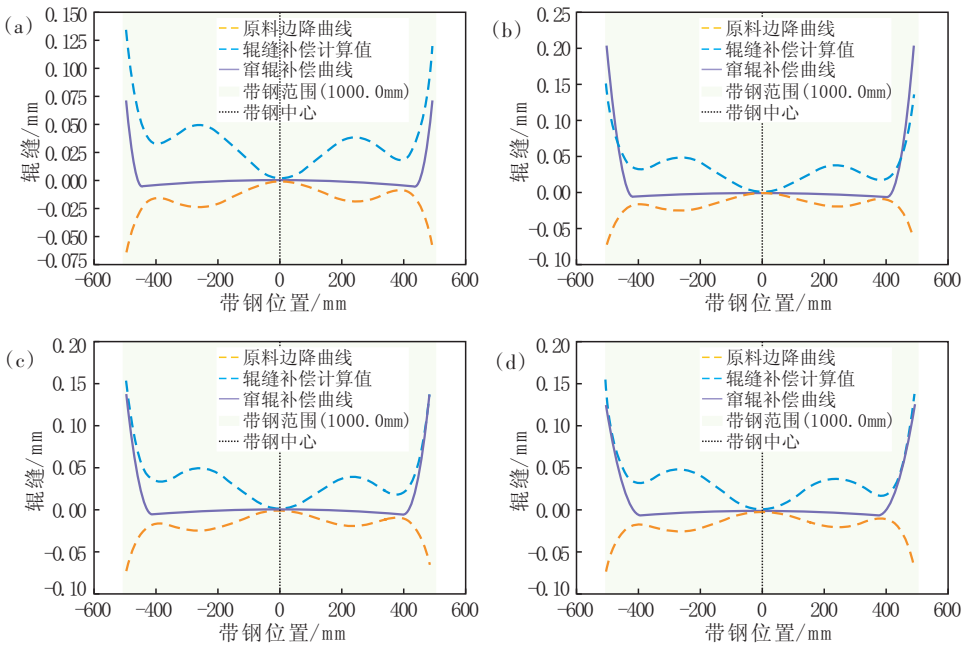
采用上述边部补偿辊缝计算方法、EDC辊形设计及窜辊插入量设定策略，开发边降控制与辊形设计辅助决策软件。该软件具备原料边降分析、辊形参数计算、窜辊设定优化、补偿效果仿真等功能，界面能够直观显示不同辊形和窜辊插入量的边部辊缝补偿效果，为生产人员提供可视化的决策支持。以1机架为例，按照前文典型工况和相同原料边降条件下，设置不同锥深和插入量，分析边部辊缝预测及补偿效果。辊形和窜辊协同仿真参数如表2所示。

表2 辊形和窜辊协同仿真参数

Table 2 Synergistic Simulation Parameters of Roll Profile and Roll Shift

工况	锥深/mm	工作辊插入量/mm	弯辊/%	中间辊插入量/mm
小插入量欠补偿	0.6	60	30	−20
大插入量过补偿	0.6	90	30	−20
参数优化匹配	0.4	90	30	−20
宽范围补偿	0.2	120	30	−20

在固定弯辊(30%)和中间辊窜辊(-20 mm)条件下,不同工作辊锥深与窜辊插入量组合的协同仿真结果如图6所示。设置锥深0.6 mm、插入量60 mm时(见图6(a)),补偿辊缝低于目标辊缝,呈现欠补偿特征;保持锥深不变,将插入量提升至90 mm时(见图6(b)),补偿辊缝大于目标辊缝,呈现过补偿特征;保持插入量90 mm,将锥深减小至0.4 mm时(见图6(c)),补偿辊缝与目标辊缝高度重合,实现了锥深与插入量的最优匹配;进一步采用小锥深+大行程策略,将锥深降至0.2 mm、插入量提升至120 mm时(见图6(d)),补偿精度基本不变,拓宽了补偿范围。上述结果表明,工作辊辊形设计与窜辊插入量的协同调控能够实现边部骤降区辊缝准确补偿。通过减小锥深,同时增大窜辊插入量,能够有效拓宽边部辊缝补偿范围,但过渡区仍然存在补偿不足。上述仿真试验是在固定弯辊及中间辊窜辊条件下进行的,在实际生产中,弯辊与中间辊窜辊是调控辊缝凸度的核心手段,对边降控制具有显著影响。当前的研究尚未将弯辊和中间辊窜辊的影响纳入仿真模型,因此在应对复杂边降特征时存在一定局限。



(a) 小插入量欠补偿工况;(b) 大插入量过补偿工况;(c) 参数优化匹配工况;(d) 宽范围补偿工况

图6 不同工作辊锥深与窜辊插入量组合的协同仿真

Fig. 6 Synergistic Simulation of Different Work Roll Taper Depth and Roll Shift Insertion Amount

5 结论

(1) 建立"原料边降—道次衰减—辊缝补偿—辊形设计—工作辊窜辊设定"的全要素关联模型,突破传统单一工艺调整难以应对多规格、多机架协同调控的技术瓶颈,实现了边降控制各环节的深度协同。

(2) 通过边降数据分析,揭示带钢边部厚度指数衰减规律,构建各轧制道次边部衰减模型,推导各机架边部补偿辊缝计算方法,利用历史生产数据优化模型系数,形成"检测—建模—补偿—优化"的完整技术闭环。

(3) 优化设计指数型EDC辊形,相比传统平方曲线辊形,更加适配带钢边降的指数衰减特征。建立窜辊插入量与补偿辊缝的关联方程及约束条件,实现了窜辊插入量的准确计算。

(4) 开发边降控制与辊形设计辅助决策软件,能够直观展示不同原料边降特征、辊形参数及窜辊插入量条件下的边部辊缝补偿效果,可辅助生产人员快速优化辊形设计和工作辊窜辊设定,为边降控制提供技术支撑。

(5) 本文主要验证了辊形与窜辊的基础匹配关系,为进一步挖掘多变量协同调控潜力,后续研究将把弯辊与中间辊窜辊的耦合影响纳入仿真模

(下转第62页)

趋势，鼓风动能逐步优化，综合焦炭负荷逐渐恢复至正常生产水平，充分表明高炉炉况已实现稳定顺行。避免了炉缸冻结处理中常见的风口灌渣、破损等问题，实现一次开炉出铁成功。该实践为高炉非计划重负荷闷炉及炉缸冻结的处理提供了参考。

4 结语

针对鞍钢5#高炉非计划闷炉31 d 3 h后的恢复，采取了如下措施，停炉期间通过对炉缸及炉体水温、水量的精准控制，结合风口堵泥和压水渣的精准布料形成有效的隔绝层，最大限度减少了炉内热量损失，避免了炉缸完全冻结；开炉料的总焦比控制在1 000 kg/t；开炉前集中送风实现热量集中供应，采用铁口与风口提前烧氧贯通措施，确保高炉安全恢复炉况，避免了炉缸冻结处理中常见的风口灌渣、破损等问题。开炉后45 h风口全开，5 d达产，高炉利用系数稳定在2.0 t/(m³·d)，物理热大于1 450 ℃，实现一次开炉出铁成功。该实践为高炉非计划重负荷闷炉及炉缸冻结的处理提供了参考。

参考文献

[1] 周传典. 高炉炼铁生产技术手册[M]. 北京：冶金工业出版社，2003：454-457.
[2] 王海风，李建军，张勇. 首钢2500 m³高炉长期闷炉保温与快速恢复实践[J]. 炼铁，2021，40(3)：28-31.
[3] 朱仁良，金觉生. 宝钢4高炉开炉快速高产实践[J]. 炼铁，2012，22(4)：36-39.
[4] 张立国，范振夫，刘宝奎，等. 鞍钢4号高炉优化生产实践[J]. 中国冶金，2020，30(5)：65-69.
[5] 梁利生. 宝钢湛江钢铁1号高炉开炉及生产操作实践[J]. 中国冶金，2016，26(9)：71-75.
[6] 姜庆喜，范振夫，刘和，等. 鞍钢2580 m³高炉大修开炉达产实践[J]. 鞍钢技术，2018(4)：48-51.
[7] 赵志星，杨利彬，吴华杰. 河钢集团某2000 m³高炉非计划重负荷闷炉恢复技术[J]. 钢铁，2022，57(S1)：189-194.
[8] 刘磊，高军，李刚. 2500 m³高炉炉缸冻结恢复生产实践[J]. 中国冶金，2021，31(6)：90-94.
[9] 张洪雷，马治国，马果丰. 大型高炉长期休风闷炉保温技术优化. 炼铁，2020，39(2)：48-51.

（编辑　许营）
修回日期：2026-01-10

（上接第52页）

型，以实现对带钢边降更精细、更稳健的控制。

参考文献

[1] 冯夏维，王晓晨，杨荃，等. 六辊轧机工作辊辊形边降调控能力分析[J]. 机械工程学报，2019，55(12)：83-90.
[2] 杨光辉，张高尚，张杰，等. 2180mm超宽六辊CVC冷轧机SMS-EDC边降控制特性[J]. 钢铁，2018，53(5)：52-61.
[3] 轩康乐，余伟，唐伟，等. 六辊冷连轧机带钢边降控制性能仿真研究[J]. 轧钢，2017，34(6)：33-37，41.
[4] 崔亚亚，白振华，崔熙颖，等. 六辊轧机冷轧过程边部减薄预报模型[J]. 钢铁，2018，53(1)：46-53，78.
[5] 王晓晨，冯夏维，徐冬，等. 薄带冷连轧工作辊窜辊边降调控功效[J]. 工程科学学报，2020，42(2)：242-248.
[6] 宋君，李富强，贾增本，等. UCMW轧机边部减薄形成机理分析及预测[J/OL]. 材料与冶金学报，(2024-11-05)[2026-07-15]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1473.TF.20241104.1622.002.html.
[7] 张海东，王英春，马炜师，等. 六辊冷轧机的带钢板形参数及辊间接触压力研究[J]. 金属世界，2022(5)：75-82.
[8] 彭良贵，周一林，陈亚飞，等. HC冷轧机凸度工作辊使用制度[J]. 中国冶金，2023，33(3)：144-150.
[9] 季业益，陆宝山，关集俱，等. 冷连轧机新型锥形工作辊设计[J]. 锻压技术，2020，45(10)：117-123.
[10] 沈新玉，胡柯，李宏洲，等. UCM冷连轧机边降控制工作辊辊形优化[J]. 中国冶金，2019，29(11)：55-60.
[11] 张建雷，陈卫，陆佳栋，等. UCM轧机工作辊辊形设计及应用[J]. 钢铁，2022，57(8)：123-131.
[12] 姜南，何国赛，陈猛，等. 全机架高速钢轧辊轧制无取向硅钢的应用研究[J]. 电工钢，2021，3(6)：40-46.
[13] 李硕，于洋，宋浩源，等. 基于凸度转移理念的冷轧支撑辊辊型设计[J]. 中国冶金，2023，33(9)：112-117.
[14] 张建雷，岳重祥，毛观伟，等. 冷连轧边降控制多机架工作辊端部辊形研究[J]. 钢铁研究学报，2023，35(11)：1375-1383.
[15] 张海东，王景聪，贾大朋，等. 高牌号硅钢UCMW冷连轧机辊径组合与辊形方案[J]. 中国冶金，2025，35(1)：87-100.
[16] 李俊洪，李军，邓菡，等. 无取向电工钢边部减薄控制技术研究[J]. 钢铁，2011，46(1)：49-51，59.
[17] 宋君，刘宝权，吴萌，等. 1500mm五机架冷连轧边部减薄控制系统开发与应用[J]. 鞍钢技术，2016(3)：23-27，58.
[18] 张岩，高健，吴鲲魁，等. 单锥度辊冷轧机边部减薄控制应用研究[J]. 冶金自动化，2016，40(1)：45-49.
[19] 杨忠杰，岳军，侯瑞强，等. 冷轧硅钢EVC辊形设计及边降控制模型研究与应用[J]. 冶金自动化，2020，44(1)：60-66.
[20] 张岩，吴鲲魁，孙瑞琪，等. 基于无模型预估算法的电工钢边部减薄滞后控制系统[J]. 冶金自动化，2020，44(6)：70-76.

（编辑　许营）
修回日期：2026-07-15