

单侧浪形与非对称中浪对带钢跑偏的敏感性研究

杨 尚¹, 徐耀东¹, 周志宇¹, 高紫明²

- (1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司稀土钢冷轧板材厂, 内蒙古 包头 014010;
2. 北京科技大学设计研究院有限公司, 北京 100083)

摘 要:带钢在连续退火产线上运行的稳定性直接影响产品表面质量、尺寸精度与产线效率。为揭示单侧浪形与非对称中浪对跑偏敏感性的作用规律,建立了单炉辊动力显式仿真模型,系统评估浪高、波长与浪宽等参数对带钢跑偏的影响。结果表明,在固定位置下,浪高越大,跑偏量越大,且浪高(H)在 4~9 mm 区间敏感性最高;波长越大,跑偏量越小;浪宽越大,跑偏量越小,当浪宽小于 300 mm 时敏感性显著升高。研究结果可为来料板形质量控制与连退跑偏治理提供依据,有助于提高机组运行稳定性与产品质量,并为辊型优化及在线纠偏参数选取提供定量参考。

关键词:连续退火;动态仿真;跑偏敏感性;单侧浪;非对称中浪

中图分类号: TG162. 86

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2026)03-0021-07

Study on Sensitivity of Single Side Wave Shape and Asymmetric Center Wave to Deviation of Strip Steel

Yang Shang¹, Xu Yaodong¹, Zhou Zhiyu¹, Gao Ziming²

- (1. Cold Rolled Rare Earth Steel Plate Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Beijing University of Science and Technology Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: The operation stability of strip steel in production line of continuous annealing directly affects the surface quality, dimensional accuracy and efficiency of production line. In order to reveal the effect laws of single side wave shape and asymmetric center wave on sensitivity to deviation, the explicit simulation model of power for single furnace roller is established to systematically evaluate the effects of such parameters as wave height, wave length and wave width on deviation of strip steel. The results showed that the larger the wave height, the greater the deviation at fixed position and the maximum sensitivity was at wave height (H) of 4~9 mm; the greater the wave length and wave width, the smaller the deviation as well as sensitivity was significantly increased when wave width was below 300 mm. These findings could provide the basis for strip shape quality control of incoming materials and improvement of deviation in continuous annealing as well as quantitative references for roll shape optimization and selecting online corrective parameters, which are helpful to improving the operation stability of unit and product quality.

Key words: continuous annealing; dynamic simulation; sensitivity to deviation; single side wave; asymmetric center wave

收稿日期: 2025-10-15

作者简介: 杨 尚(1990-), 男, 内蒙古乌兰察布市人, 助理工程师, 现从事冷轧技术管理工作。

随着高强钢与薄规格产品在汽车和家电领域广泛应用,连续退火机组对带钢板形与轨迹稳定性的要求显著提升。连续退火产线轧制带钢时线速度平均为 170 m/min 左右,平均张应力约 5 ~ 6 MPa,在连续退火产线高速、高张力、多辊耦合工况下,带钢任何微小的板形不平直或受力不均,都可能在张力与摩擦耦合作用下被放大,最终演化为跑偏^[1],进而引发表面缺陷乃至停机风险^[2]。带钢在连续退火生产线上运行稳定性直接关系到产品表面质量、尺寸精度与产线效率^[3]。其中,来料平直度偏差诱发的横向张应力不均被普遍认为是带钢跑偏的关键触发因素^[4-7],其核心原因在于,带钢浪形的凸起部位与辊面接触应力会局部增大,导致摩擦系数产生差异,进而导致横向张力分布失衡并最终诱发带钢横向偏移,而具体的板形浪形类型(如边浪、肋浪、中浪)、幅值及其在带钢半宽方向上的空间位置^[8],将进一步决定带钢跑偏的强度、持续性及演化路径。现场统计与质检数据表明,在各类跑偏故障中,约有 50% 的跑偏故障是由来料呈现出的中浪与单肋浪特征引发的。与此同时,理论与实测均显示,几何对称性良好的对称浪形通常不会引发显著跑偏^[9-10],而具有明显不对称特征的单侧浪与非对称中浪对跑偏最为敏感^[11]。

针对上述问题,本文聚焦于带钢浪形与辊型几何匹配下的带钢跑偏机理,建立了连退入口的单个炉辊的带钢动态显式仿真模型。围绕单侧浪及非对称中浪,系统评估带钢浪形的浪高(H)、波长(L)、浪宽(B)及半宽位置对跑偏量与跑偏敏感性的影响规律,明确高敏感区与关键控制参数。研究结果可为来料板形质量控制、辊型与在线纠偏参数调整提

供参考,进而提高连退机组运行稳定性与产品质量。

1 单炉辊动态仿真模型

1.1 模型的建立

基于连退产线带钢跑偏机理,本文建立了连退入口的单个炉辊的带钢动态显式仿真模型,如图 1 所示。模型采用右手坐标系, x 轴为厚度方向, y 轴为运行方向, z 轴为宽度方向。



图 1 带钢炉辊有限元模型

考虑到带钢在加热段前段最易发生跑偏,模型选取加热段入口处的炉辊辊型作为研究对象,辊型如图 2 所示。所用炉辊为单锥度辊,几何参数为总长度 $L_r = 1\,950\text{ mm}$,辊径 $D_r = 900\text{ mm}$,名义平直段 $SL = 500\text{ mm}$,名义单侧锥段 $TL = 725\text{ mm}$,凸度 $c = 3.5\text{ mm}$ 。实际结构中,平直段与锥段之间设置有圆弧过渡段,半径 $R = 12.08\text{ m}$ 。修正后的有效尺寸为平直段 $SL = 450\text{ mm}$,单侧锥段 $TL = 700\text{ mm}$ 。同时,利用带钢与炉辊接触的跑偏机理,在不考虑辊型时变的前提下,炉辊在模型中按解析刚体处理。该类模型基于解析数学方法定义几何形状与运动规律,能够精确描述辊面的平滑过渡,且由于其不依赖有限元网格进行离散,相比于离散刚体(Discrete Rigid)具有更高的接触计算精度与数值稳定性。

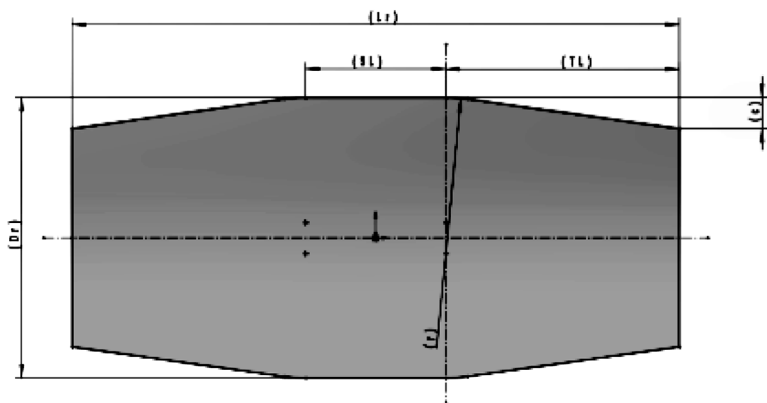


图 2 炉辊结构示意图

带钢模型截面图如图3所示,整体划分为三部分:与炉辊接触的BC段、非接触的前段AB段以及非接触的后段CD段,其中AB段定义为带钢头部。模型启动后,CD段将逐步与炉辊发生接触。依据前人研究,为使模型运行前后保持带钢横向张应力分布的一致性与均匀性,AB段与CD段的长度 L_{AB} 与 L_{CD} 需满足如下关系:

$$\begin{cases} L_{AB} > 3D_r \\ L_{CD} - L_t > 3D_r \end{cases} \quad (1)$$

式中: L_t 为模型运行时间内带钢运行的长度; D_r 为炉辊直径。

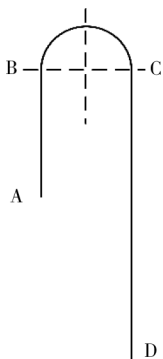


图3 带钢模型截面图

综合考虑工况设定与计算效率,模型总运行时间取2 s,其中炉辊先匀加速1 s后转入匀速阶段。据此确定带钢非接触段长度:AB段为3 m,CD段为9 m。选取在实际生产中具有典型易跑偏特性的规格作为研究对象,选取带钢宽度为1 200 mm,厚度为1 mm。

考虑到模型对应连退入口处带钢温度波动较小,材料密度取常温钢的典型值 $\rho = 7.85 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$ 。弹性模量 E 反映材料抵抗弹性变形的能力,且对温度较为敏感,本文依据式(2)计算带钢弹性模量。

$$E = 208\,639.8 - 0.21 \times T^2 \quad (2)$$

结合现场数据,加热段入口处带钢温度约为200 ℃,据此取 $E = 200\,000 \text{ MPa}$,泊松比 $\nu = 0.22$ 。根据机组来料统计,约60%跑偏带钢钢种为SPCC,依据200 ℃力学性能试验数据,屈服强度取200 MPa。

带钢仅AB段不与炉辊接触,BC、CD段需跨越炉辊并承担接触与摩擦,故BC、CD段网格取30 mm,AB段网格取60 mm,如图4所示。带钢采用壳单元建模,单元类型为四节点四边形,含转动自

由度的S4R;炉辊建为解析刚体,无需材料与网格。炉辊目标角速度 $n = 6.28 \text{ rad/s}$,并采用幅值函数先匀加速1 s至目标值后恒速1 s,以兼顾数值稳定性与收敛性。

跑偏量的提取主要在炉辊匀速阶段进行,读取单位时间内带钢中心节点在宽度方向的位移作为评价指标。在匀速阶段炉辊角速度与带钢线速度已处于稳定状态,系统不再受到加速过程产生的惯性与瞬态接触/摩擦波动的干扰,接触压力与张力分布趋于稳定,可有效避免速度变化对横向位移的影响,从而使测得的带钢跑偏量更能反映板形与辊型耦合所致的本征偏移规律,提高不同浪形参数跑偏敏感性的准确性。

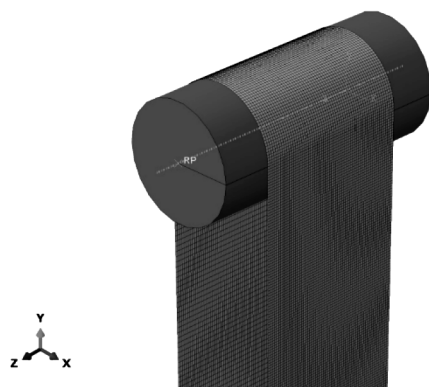


图4 带钢网格区域划分

在载荷施加方面,壳单元采用线载荷表示带钢张力,线载荷与作用长度的乘积对应带钢边部总张力。依据实际工况确定载荷幅值,且前张力通常大于后张力,前段带钢的平均张应力取6 MPa,后段取5 MPa。

1.2 模型验证

为验证模型在运行过程中的精度与结果可靠性,需先引入板形浪形因素,再读取对应的跑偏量。为此,首先依据冷轧来料的板形缺陷特征构造待施加的浪形。常见的冷轧板形缺陷较多,按其在带钢宽度方向的分布区域可归类为边浪、肋浪与中浪。

为表征板带材相对于水平基准面的贴近程度,冷轧板形理论中通常采用平直度 I (单位:IU)作为指标。 I 值越大,说明带钢的浪形缺陷越明显。其计算公式为:

$$I = \frac{\pi^2}{4} \times \left(\frac{H}{L} \right)^2 \times 10^5 \quad (3)$$

式中: I 为平直度指数,表征浪形缺陷程度; H 为浪

高,mm; L 为波长,mm。

为在模型中施加浪形,需要先给出其数学表达式。带钢在长度与宽度方向上的形状起伏可近似为余弦型,因此分别沿带钢长度方向 y 与宽度方向 z 构造余弦挠曲函数,用以描述浪形分布,在带钢上建立浪形的挠曲函数为:

$$w(y,z) = A \times (\cos(\pi y/l) + 1) \times \left(\frac{1}{2}\left(1 \pm \cos\left(\frac{k_w \pi z}{B}\right)\right)\right)^n \tag{4}$$

式中: A 为挠曲幅值系数,mm; l 为轧制方向特征长度(决定波长),mm; B 为浪宽,mm; n 为宽度方向包络阶次(决定宽度),无量纲; k_w 为宽度方向波数系数,无量纲。

在构建好浪形的数学模型后,由于无法在 ABAQUS 图形界面直接施加初始浪形,需要转而通过 INP 输入文件进行修改。在模型中对带钢施加完全对称的中浪后,完成计算并读取跑偏参考点坐标。其宽度方向坐标 z 始终保持与初始位置一致,表明从运行开始到结束均未发生宽度方向的跑偏。由此可见,在施加完全对称浪形条件下,带钢不会产生跑偏,这与实际规律相符,也侧证了模型的精度与可靠性。

2 单侧浪形对带钢跑偏的敏感性研究

2.1 不同单侧浪浪高的影响

炉辊辊型分为三段,平直段、锥段和两者之间采用的圆弧过渡为了便于表述,后续该过渡区域简称圆弧段。

连退来料的带钢宽度约为 1 200 mm,厚度约为 1.0 mm,因此本文统一采用规格为 1 200 mm × 1 mm 的带钢。在浪形参数确定上,需在合理范围内选取浪宽、浪高及波长,其中平直度 I (浪高与波长之比) 也应控制在合适区间。本文选取合适的浪形波长 L 与浪宽 B ,比较不同浪高的单侧浪形在带钢半宽方向上、不同浪形中心位置时引起的跑偏量。综合平直度要求与现场实测的浪形波长,对应的 I 值落在 0 ~ 100 以内,四类仿真对象的浪形参数如表 1 示。

表 1 单侧浪浪高的四类仿真对象

波长 L /mm	浪宽 B /mm	浪高 H /mm	平直度 I /IU
400	300	2	6.17
		4	24.67
		6	55.52
		8	98.70

图 5 给出了四组不同初始浪高的单侧浪形在带钢半宽方向不同位置处的跑偏量结果。为便于分析,对跑偏结果进行了区域划分,如图 6 所示。随着浪形中心由带钢中心向带钢边部移动,可将分布特征概括为 5 个区域。Ⅰ区:带钢浪形基本全部位于炉辊的平直段;Ⅱ区:浪形主要位于平直段,部分进入圆弧段与锥段,且位于锥段的比例逐步增加;Ⅲ区:浪形中心落在圆弧段内,在该区间内,落在平直段的比例先略高于锥段,然后与锥段相当,最后低于锥段;Ⅳ区:浪形以落在锥段为主,少部分位于平直段且占比逐渐降低;Ⅴ区:浪形完全位于锥段。

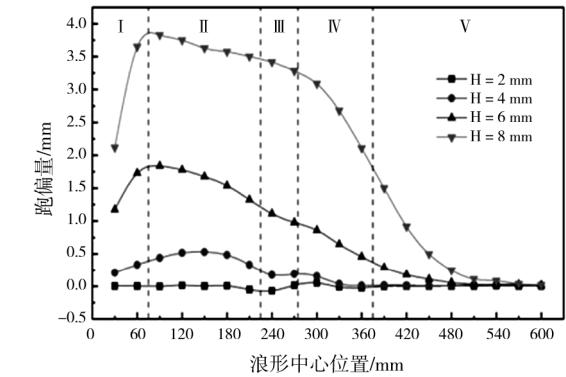


图 5 不同初始浪高的横向跑偏对比

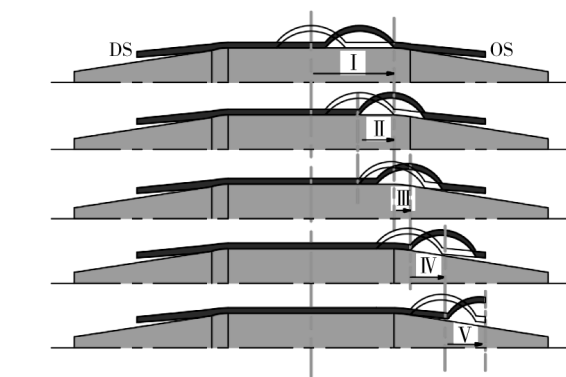


图 6 浪形横向区域划分示意图

如图 5 所示,浪形在带钢半宽方向的不同位置会显著影响跑偏量。为便于比较各区域内不同浪高的变化幅度,对跑偏量进行线性拟合,并以拟合曲线的一阶导数表征跑偏敏感性,如图 7 所示。综合两图可得:单侧浪由带钢中心向边部移动时,其与炉辊平直段-圆弧段-锥段的接触包络由近对称逐步转为非对称,横向接触压力与摩擦剪应力随之形成并

且其梯度同时增强,尤其在进入圆弧段与锥段的过渡区(Ⅲ—Ⅳ区),由于接触几何突变和包络偏置,横向不平衡力与附加弯扭耦合力矩显著放大,表现为跑偏敏感性上升。当浪形进一步进入Ⅴ区后,接触边界趋于稳定,梯度减弱,跑偏响应随之降低。浪高越大(如 H 为 6 mm、8 mm),局部曲率与法向压强越高,摩擦驱动力被放大,因而在各区均获得更大的偏移与更高的敏感性;而 $H = 2$ mm 时起伏较小,接触与张力场扰动有限,仅在Ⅲ、Ⅳ区的出现轻微趋势变化。

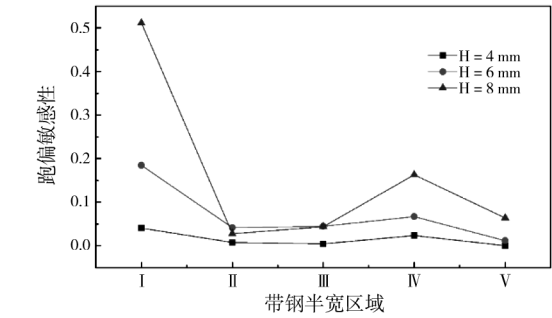


图 7 区域内不同浪高的跑偏敏感性

2.2 不同单侧浪波长的影响

前述研究表明,高平直度(I 值大)与低平直度(I 值小)的浪形在跑偏敏感性上差异显著。考虑到实际生产中平直度差的带钢通常不进入连退炉,本文选取 I 值较小的工况开展单侧浪波长分析。在浪高 $H = 4$ mm 条件下,波长 L 为 400 mm、600 mm、800 mm 的浪形较为平缓,故将这三类波长作为仿真对象,浪形参数如表 2 所示。

表 2 单侧浪波长的三类仿真对象			
浪高 H /mm	浪宽 B /mm	波长 L /mm	平直度 I/IU
4	300	400	24.67
		600	10.97
		800	6.17

图 8 显示了不同初始波长的单侧浪形在带钢半宽方向不同位置处的跑偏量。可见三组仿真对象在半宽方向上的跑偏变化趋势基本一致。为便于分析,对结果进行了区域划分,其分区方式与图 6 基本一致,区别在于在Ⅰ区内,浪形主要位于平直段,少部分进入圆弧段。如此划分的优势在于Ⅰ区内偏移量均呈上升趋势,便于对不同波长工况进行一致性

分析与比较。

综合图 8、图 9 可得,在Ⅰ区,浪形主要作用于平直段,带钢长度方向张力基本稳定,但因波峰偏离对称中心产生的几何偏置,会在两侧产生不等的摩擦导向力与弯扭耦合力矩,导致跑偏量随位置单调增大且敏感性较高;进入Ⅱ区后,浪形部分跨入圆弧/锥段,接触刚度和法向压强分布由均匀转为偏置,虽然整体跑偏量开始减小,但梯度仍然较大,故敏感性依然较高;在Ⅲ区,平直段—圆弧段—锥段的几何曲率与包络变化叠加,使横向张应力更集中,位置每向外偏移都会带来更强的不平衡横向力,表现为跑偏量再度上升;进一步进入Ⅳ区与Ⅴ区,浪形主要或完全落在锥段,接触边界趋于稳定,横向应力梯度被削弱,跑偏量与敏感性显著下降。

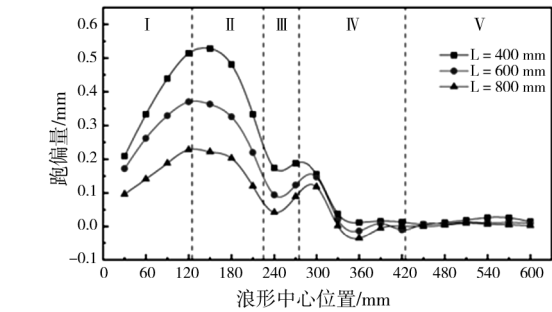


图 8 不同初始波长的横向跑偏对比

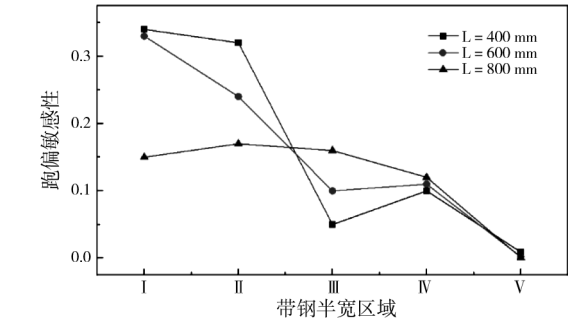


图 9 区域内不同波长的跑偏敏感性

3 非对称中浪对带钢跑偏的敏感性研究

3.1 非对称中浪浪高

选取合适的波长 L 与浪宽 B , 在偏离带钢中心 60 mm 处施加非对称中浪,计算并对比不同浪高下的带钢跑偏量。模型中带钢规格仍为 1 200 mm × 1 mm,其他工况参数与前文一致。考虑到平直度 I

的合理取值范围为 0 ~ 100, 波长变化会影响可选浪高范围。为便于分析, 选取三组波长进行计算, 见表 3。

表 3 非对称中浪浪高的三类仿真对象

浪宽 B /mm	波长 L /mm	浪高 H 取值 范围 /mm	平直度 I 变化 范围 /mm
300	400	1 ~ 8	0 ~ 100
	600	1 ~ 12	
	800	1 ~ 16	

图 10 展示了三组不同波长的非对称中浪在不同浪高下的带钢跑偏量。结果表明: 在固定浪形中心位置下, 随浪高增加, 跑偏量增大; 当浪高较小时, 基本不发生跑偏。在相同浪高下, 波长越大, 跑偏量越小, 与 2.2 节结论一致。

进一步对各工况的跑偏曲线取一阶导数以表征跑偏敏感性, 见图 11。可见三组不同波长下的敏感性均呈近似正弦式变化趋势, 并在 H 为 4 ~ 9 mm 区间达到最大, 即跑偏趋势变化最为显著。当浪高由小增至中等时, 局部曲率与附加弯矩显著上升, 恰好使带钢与炉辊由近对称接触跨入非对称接触, 波峰在平直段 - 圆弧段 - 锥段之间发生更频繁的跨区迁移, 接触包络对圆弧段的偏置最为明显, 从而在横向上形成最大的法向压强梯度与摩擦导向力增益, 此时摩擦极限随压强同步抬升, 细小的位移偏置与张力微扰更易被放大, 并与横向张应力及弯扭耦合合力矩叠加, 导致跑偏量对浪高变化敏感性达到最大; 当 H 小于 4 mm 时, 曲率与压强不足以打破近对称接触, 横向力差小, 敏感性低; 当 H 大于 9 mm 时, 接触进入局部饱和与滑移更稳定的状态, 边界变化对横向力的影响减弱, 虽绝对跑偏量继续增大, 但跑偏敏感性反而下降。

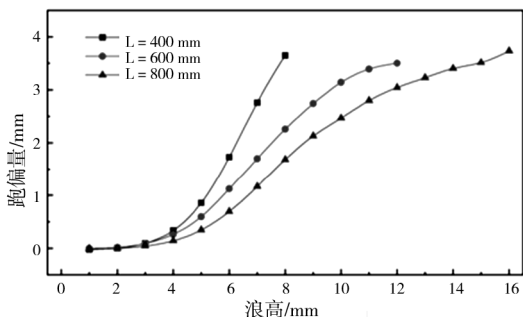


图 10 非对称中浪浪高的带钢跑偏量对比

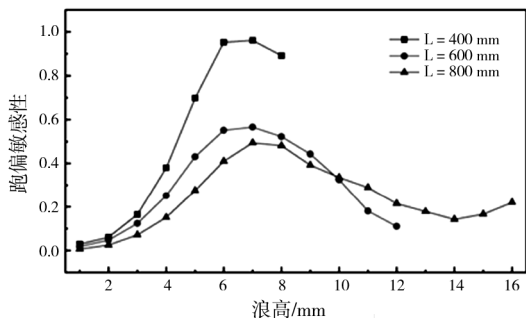


图 11 非对称中浪浪高的跑偏敏感性

3.2 非对称中浪浪宽

前文已分析了不同波长与浪高对跑偏规律的影响, 现进一步研究非对称中浪在不同浪宽下的表现。选取常见波长 $L = 400$ mm, 根据 2.1 节的结果, $H = 2$ mm 时跑偏量与趋势相对较小, 故本文选取 H 为 4 mm、6 mm、8 mm 三组浪高进行对比。考虑带钢宽度为 1 200 mm, 非对称中浪的浪宽不宜过大, 取浪宽范围为 180 ~ 660 mm。

图 12 显示了三组非对称中浪在不同浪宽下的跑偏量对比。可见在固定浪形中心位置下, 浪宽增大时, 跑偏量逐步减小; 其中在 B 为 180 ~ 300 mm 区间内变化最为显著, 表现为较高的跑偏敏感性。在浪形位置与浪宽一定时, 浪高越大, 跑偏量越大, 该结论与 2.2 节一致。

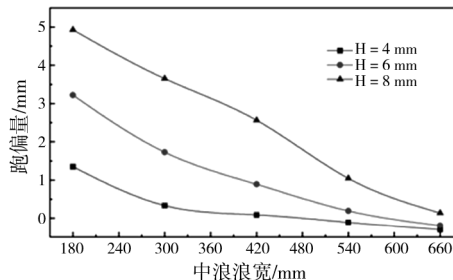


图 12 称中浪浪宽的带钢跑偏量对比

4 结论

(1) 基于连退跑偏机理, 构建了带钢牌号为 SPCC、屈服强度为 200 MPa、厚度规格为 1 mm、炉辊直径为 900 mm 且仿真张力区间设定在 5 ~ 6 MPa 等关键参数的连退入口单炉辊带钢炉辊一体化三维动力显式模型。采用 INP 施加余弦型挠曲函数, 验

证结果表明在完全对称中浪下宽度向位移为零、无跑偏,吻合理论与现场规律,证明模型可靠。

(2)单侧浪方面,随着浪形中心由带钢中心向边部迁移,当浪形中心偏移量超过带钢半宽的 38% 时,接触包络由平直段主导逐步过渡到圆弧/锥段主导,在过渡区域因几何与包络偏置叠加导致横向力与力矩梯度显著增强,跑偏敏感性升高,进一步进入锥段后边界趋稳,敏感性回落;在固定位置下,浪高增大使跑偏加剧,波长与浪宽增大则有助于抑制跑偏。

(3)非对称中浪方面,在固定位置下跑偏随浪高增加而增强,而随波长和浪宽增加而减弱;敏感性随浪高变化呈先升后降,其上升阶段对应接触由近对称跨入非对称,跨区迁移更频繁并导致法向压强与摩擦导向力增益叠加,下降阶段则与接触趋于局部饱和、滑移更稳定相关。

(4)研究结果可为来料板形把控、优化炉辊平直段与锥段的过渡圆角半径/长度、优化炉辊平直段与锥段的过渡圆角半径/长度以及张力与纠偏参数调整提供理论支撑,同时表明通过控制浪高、拉长波长、增大浪宽并优化辊型过渡,可有效降低跑偏量及其敏感性,从而显著提高连退机组的运行稳定性与产品质量。

参 考 文 献

[1] 沈新玉,宫峰,裴洪涛,等. 宽幅冷轧带钢连退跑偏影响因素的定量分析研究[J]. 轧钢, 2021,38(4):44-49.

[2] 谷田,王海涛,王麒,等. 酸轧机组高强钢跑偏断带问题控制技术研究[J]. 轧钢,2022,39(1):78-83.

[3] 刘亚星,方永,滕华湘,等. 带钢退火关键工艺与产品质量综合控制技术概述[J]. 轧钢, 2022,39(4):27-34.

[4] 白振华,李秀军,李建中,等. 超薄宽幅高品质冷轧板带工业化生产关键技术概述[J]. 轧钢,2021,38(3):1-8.

[5] 任伟超,高梦路,王道金,等. 立式退火炉张力设定模型及应用[J]. 轧钢, 2020,37(1):71-75.

[6] 李明,陈世恒. 连续退火炉区带钢跑偏原因分析与控制[J]. 轧钢,2018,35(5):88-90.

[7] 孙康,李冠雄,王道金,等. 连续退火炉张力波动控制研究[J]. 山西冶金, 2023,46(9):130-132.

[8] 姚维明. 论立式退火炉内纠偏的应用[J]. 模具制造,2025,25(9):168-170,173.

[9] 汪红兵,皇甫少骏. 立式退火炉纠偏系统应用技术分析[J]. 冶金动力,2024(4):82-84.

[10] 李东辉. 镀锌线退火炉带钢跑偏停车分析和处理研究[J]. 山西冶金, 2023,46(10):275-277.

[11] 刘顺明,李冠雄,任秋红,等. 宽幅带钢初始板形及跑偏机理研究[J]. 轧钢,2018,35(3):49-51.

(上接第 4 页)

了生产成本。后续可进一步研究不同钢种的适配参数,开发智能化的板形与速度自适应控制系统,实现更高水平的精准控制。

参 考 文 献

[1] 王青龙,孙杰,王振华,等. UCM 轧机板形调控机构对轧制压力分布影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),2018,39(3):345-350.

[2] 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.

[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] 黄庆学. 高品质钢铁板带轧制关键装备与技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2023,59(20):34-63.

[5] 张勃洋,卢兴福,张立元,等. 冷轧极薄带钢复杂板形翘曲变形行为研究[J]. 机械工程学报,2018,54(12):184-192.