六辊 CVC 冷轧机冷轧硅钢边降机理及极限工况仿真研究

王小平[1], 杨 尚[1], 付 超[1], 杨庭松[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: 冷轧带钢边降直接影响产品宽度精度和边部质量, 在宽规格无取向硅钢及极限压下条件下尤为突出。依托 1 780 mm 六辊 CVC 轧机, 文章建立了轧辊 - 带钢耦合的一体化三维有限元模型, 该模型在几何建模、边部及辊间接触区网格加密、边界约束与摩擦接触设定以及多步载荷增量控制等方面进行了优化, 经与机组实测断面轮廓对比, 仿真结果的 RMSE 为 6.85 μm、MAPE 为 1.26%, 表明模型具有较高的预测精度。系统分析了带钢厚度、宽度、压下率及材料变形抗力对边降形成规律的影响, 厚度增加或压下率升高会显著放大边部横向金属流动, 加剧边降; 增大带钢宽度可减小单位宽度上的横向流动, 在一定程度上减弱边降; 提高变形抗力则有利于抑制边部金属流动, 降低边降及其对压下率的敏感性。在此基础上构建极限工况仿真体系, 考察工作辊弯辊力、中间辊弯辊力及中间辊窜辊量对边降的综合调控能力。结果表明, 工作辊弯辊对边降的调控最为显著, 平均调控功效约为中间辊弯辊的 3.5 倍, 中间辊窜辊在正负极限位置下可实现约 30 μm 的线性调节幅度。通过引入边降调控功效系数, 对不同调控手段的效率与灵敏度进行了量化评价, 可为六辊 CVC 轧机辊形优化设计及宽规格硅钢边降控制工艺制定提供理论依据和工程参考。

关键词: 六辊 CVC 轧机; 边降调控; 有限元仿真; 弯辊; 窜辊

中图分类号: TG334.9 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009 - 5438(2026)01 - 0007 - 09

Simulation Study on Edge Drop Mechanism and Limited Conditions of Cold Rolled Silicon Steel with 6 - high CVC Cold Rolling Mill

Wang Xiaoping[1], *Yang Shang*[1], *Fu Chao*[1], *Yang Tingsong*[2]

(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 edge drop of cold - rolled strip directly affects width accuracy and edge quality of product, it is especially prominent under the conditions of non - oriented silicon steel with wide specification and limited rolling reduction. In the paper, the integrated three - dimensional finite element model coupling with roller - strip steel is established based on the 1 780 mm 6 - high CVC (continuously variable crown) rolling mill. Such aspects as geometric modeling, mesh refine-

收稿日期: 2025 - 10 - 15

作者简介: 王小平(1979 -), 男, 内蒙古包头市人, 硕士, 高级工程师, 现从事冷轧管理工作。

ment at the edge and contact zone between rollers, boundary constraint, friction contact setting and multi – step load incremental control of this model are optimized. Compared with the measured sectional contour of the unit, the RMSE(root mean square error) of simulation result is 6.85 μm and MAPE(mean absolute percentage error) is 1.26%, which indicate that the model is with higher prediction accuracy. The influences of thickness, width and reduction ratio of strip steel as well as deformation resistance of materials on the formation laws of edge drop are systematically analyzed. The transverse metal flow at the edge could be significantly amplified with the increase of thickness or reduction ratio so as to aggravate edge drop; transverse flow at unit width could be reduced by increasing width of strip steel so as to weaken edge drop to some extent; it is beneficial to inhibiting metal flow at the edge to increase deformation resistance so that edge drop and its sensitivity to reduction ratio are reduced. The simulation system of limited conditions is established based on this to investigate the comprehensive abilities of regulation and control of roll bending forces of working roll and intermediate roll as well as amount of roll shifting for intermediate roll to edge drop. The results showed that the effects of working roll bending on edge drop control were the most significant, the average control effect was approximately 3.5 times of that of intermediate roll bending and about 30 μm of linear regulation amplitude could be achieved for intermediate roll shifting at its positive and negative limiting positions. The efficiency and sensibility of different control methods are with quantitative evaluation by introducing the efficacy coefficients of edge drop control, which could provide the theoretical basis and engineering references for optimization design of roll shape for 6 – high CVC rolling mills and formulating the process of edge drop control for silicon steel with wide specification.

Key words: 6 – high CVC rolling mill; edge drop control; finite element simulation; roll bending; roll shifting

冷轧带钢的边降控制直接关系到产品的宽度精度和边部质量,是决定产品成材率和后续加工性能的关键环节[1-2]。在宽规格、高强度钢的生产过程中,边降问题尤为突出,不仅会造成成品边部厚度不足,还可能引发翘曲、裂边等缺陷[3-5]。已有研究表明,带钢厚度、宽度、压下率及材料的变形抗力等对边降形成规律具有显著影响。其中,带钢厚度和压下率的增加通常会加剧边部横向金属流动,加剧边降;而带钢宽度和材料变形抗力在一定程度上能够抑制边降[6]。边降的形成机理主要与金属在轧制过程中横向流动和辊间压应力分布不均有关,尤其在宽规格和极限压下条件下,边部区域更易不均匀变形,从而加大边降风险。六辊 CVC(Continuously Variable Crown)机架因具备工作辊弯辊、中间辊弯辊及中间辊窜辊等多种可调方式,为边降控制提供了灵活的工艺条件[7-9]。但现有研究多集中于常规工况下的边降规律,针对宽规格带钢和极限压下条件的系统研究仍较为缺乏[10-11]。同时,不同调控手段在边降控制中的作用效率存在差异,如何建立可量化的评价指标,以便于工艺优化和设备能力评估,仍是一个亟待解决的问题。

基于此,本文依托 1 780 mm 六辊 CVC 轧机,结合有限元数值模拟与实际数据,系统分析了极限工况下边降的形成机理及调控规律,并提出边降调控功效的定量评价方法。研究结果可为带钢宽度精度提高及辊形优化设计提供理论依据和技术支撑。

1 六辊 CVC 轧机辊系 – 轧件耦合模型构建

基于六辊 CVC 机架的结构特性与轧辊 – 带钢相互作用原理,并结合某 1 780 mm 冷轧连轧产线的设备参数与工艺条件,建立了辊系 – 轧件耦合有限元模型。该模型采用隐式动态求解方式,能够同时考虑轧辊的弹性压扁效应与带钢横向塑性流动特征,为后续边降调控规律的研究提供了理论计算基础。

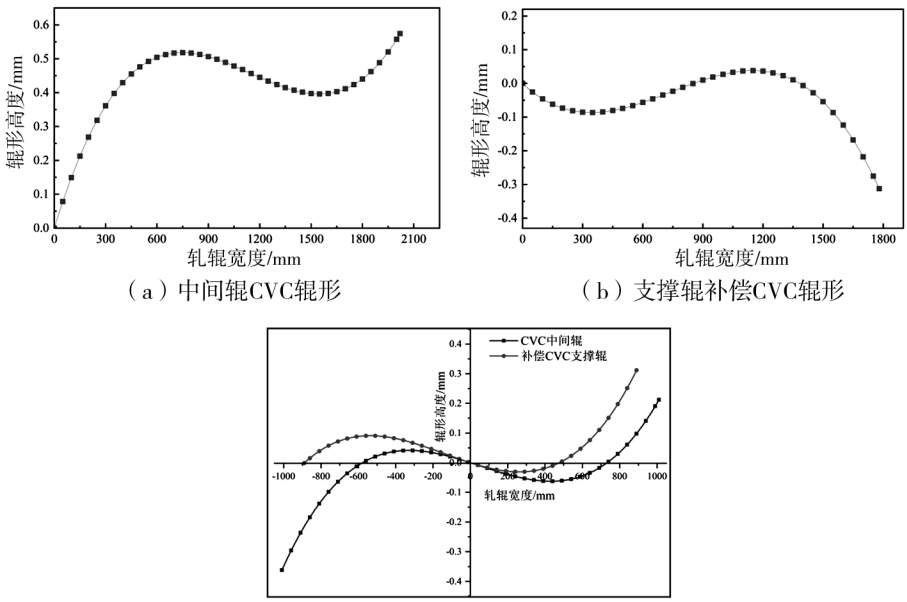
1.1 轧辊 – 带钢特性与参数选取

轧辊的几何尺寸和磨削曲线是建立有限元模型的前提条件。本文根据实际数据确定了各类轧辊的辊身与辊颈尺寸,如表 1 所示。为了便于载荷施加与提高计算收敛性,建模时将轧辊轴承座受力点等效至辊端面中心点。

表 1 六辊 CVC 轧机辊系主要几何参数 mm

名称	辊身直径	辊颈直径	辊身长度	辊颈长度
工作辊	445	350	1 780	575
中间辊	536	410	2 020	485
支撑辊	1 350	750	1 780	670

在辊形配置方面,工作辊采用平辊辊形,中间辊采用三次 CVC 曲线,支撑辊则匹配补偿系数为 1 的 CVC 补偿辊形。中间辊与支撑辊的磨削曲线如图 1(a)与(b)所示;零窜辊位置下的配合关系见图 1(c)。



（a）中间辊CVC辊形　　（b）支撑辊补偿CVC辊形

（c）辊形的配合

图 1　中间辊与支撑辊磨削辊形示意图

本文所涉及的轧制钢种以无取向硅钢为主，其中 50W600 占比约 80%。图 2 给出了三种典型牌号硅钢（50W1000、50W800、50W600）的应力－应变曲线，反映了不同牌号材料在轧制过程中的变形抗力差异。

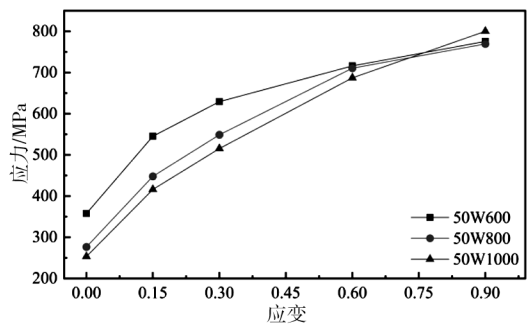


图 2　三种无取向硅钢的应力－应变曲线

为了同时刻画轧辊的弹性压扁与带钢的弹性恢复过程，模型为轧辊和带钢分别赋予了弹性模量和泊松比，具体参数见表 2。

表 2　轧辊与带钢材料参数

名称	弹性模量/MPa	泊松比
轧辊	210 000	0.3
轧件	207 000	0.362

1.2　建模与网格优化策略

根据上述几何尺寸与材料参数，在 Abaqus 中绘制各部件的草图并进行三维建模，形成全辊系装配模型，如图 3 所示。该模型涵盖上下工作辊、中间辊及支撑辊，能够全面描述辊间相互作用及带钢的塑性变形行为。

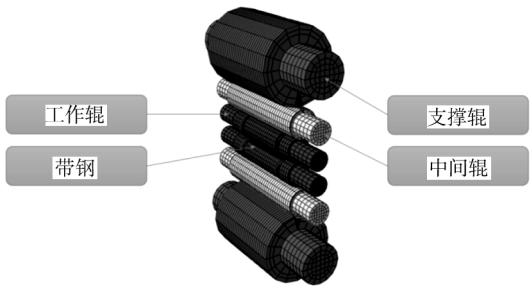


图 3　六辊 CVC 轧机有限元整体装配模型

为了兼顾计算效率与边部精度，模型采用 C3D8R 八节点缩减积分单元。在辊－辊、辊－带钢接触区域进行了局部加密，特别是带钢边部与工作辊对应区域设置了加密带，其宽度取 150 mm。该数值参考了带钢横向塑性流动的主要影响区域，能够覆盖边降形成的加密带，同时避免全局过度加密导致的计算负担。局部网格的分布见图 4，边缘区域的单元得到细化。

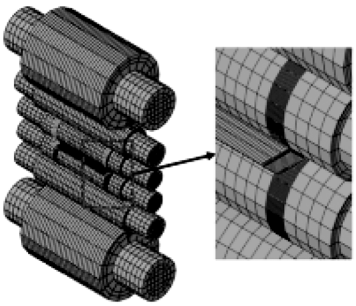


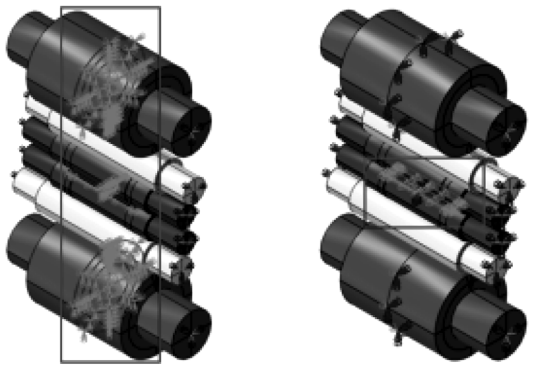
图 4 网格划分及局部加密示意

在分析步设置上,考虑到轧制过程中的非线性接触与多阶段载荷特征,模型采用分步加载方式,主要包括初始压下接触、弯辊力与张力叠加以及轧辊转动等工况。具体的分析步划分及最小增量步设置如表 3 所示,在大压下与转动阶段设置了极小的最小增量步,以增强收敛的稳定性。

表 3 分析步划分与最小增量步设置

编号	名称	步骤	几何非线性	最小增量步
1	Initial	初始化		
2	Small press	小压下接触	是	10^{-5}
3	Large press	大压下接触	是	10^{-10}
4	Add bend	施加弯辊力	是	10^{-5}
5	Add tension	施加张力	是	10^{-5}
6	Add rotate	施加转动	是	10^{-20}

在接触设定方面,支撑辊 - 中间辊及中间辊 - 工作辊之间采用硬接触,不考虑摩擦;工作辊与带钢之间采用罚函数法定义切向接触,摩擦系数取 0.05。在载荷施加中,通过参考点实现辊端与带钢端部的耦合约束,以简化计算过程。边界条件如图 5 所示,带钢中心面与支撑辊中心面对齐以避免横向偏移,同时限制带钢前后端面在厚度方向上的位移,避免非真实的漂移现象。



(a) 支撑辊与带钢纵向截面约束 (b) 带钢前后端面中部约束

图 5 模型边界条件设定示意图

1.3 模型可靠性验证与精度评估

为验证所建模型的可靠性,选取机组生产的 50W1000 无取向硅钢带钢作为对比样本,测量其在 S1 机架出入口的断面轮廓,并同步记录相关工艺参数,结果如表 4 所示。

表 4 模型验证工况参数

入口宽度 /mm	入口厚度 /mm	出口厚度 /mm	轧制力 /kN	中间辊弯辊力 /kN	工作辊弯辊力 /kN	中间辊窜辊量 /mm	前单位张力 /MPa	后单位张力 /MPa
1 250	3.2	2.3	13 530	320	350	78	174	83

在相同工况下运行有限元仿真模型,并将带钢出口断面与实际数据进行对比,结果如图 6 所示。可以看出,两者整体吻合良好,仅在带钢边缘约 5 mm范围内出现一定的厚度骤降,该偏差主要来源于仿真模型中边界条件对横向自由面的约束不足,导致局部横向流动略有放大。去除边部影响后,计算得到仿真结果与实际的均方根误差(RMSE)为 6.85 μm,平均绝对百分比误差(MAPE)为 1.26%。结果表明,所建模型具有较高的精度和可靠性,可满足后续边降调控特性的研究要求。

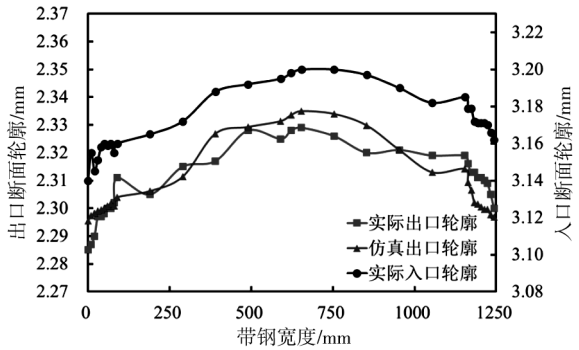


图 6 仿真断面轮廓与实际出入口断面轮廓对比

2　冷轧硅钢边降规律及影响机理研究

硅钢在冷轧过程中易出现边降现象,其形成机制与轧机结构以及带钢自身的弹塑性变形行为密切相关。由于带钢横向端面处于自由状态,边部金属更容易发生横向流动,边降情况尤为显著。此外轧辊在边部与中部的弹性压扁差异,也会进一步加剧厚度不均匀性,从而放大边降效应。

为了定量描述边降,通常采用带钢边部厚度与中部厚度差的平均值作为评价指标,其定义如下:

$$ED = h(i) - h(j) \tag{1}$$

式中:$h(i)$ 为距离带钢两侧边部 i 处的带钢厚度的平均值;$h(j)$ 为距离带钢两侧边部 j 处的带钢厚度的平均值[12]。

通过该指标,可直观反映带钢边部厚度下降程度,为后续分析不同工艺参数对边降影响提供量化依据。

2.1　带钢厚度对边降的影响

为分析带钢厚度对边降的敏感性,在不同压下率条件下,设置带钢厚度为 1.5 mm、2.0 mm、2.5 mm和3.0 mm 共 16 种工况进行有限元仿真,仿真结果如图 7 所示。可以看出在压下率固定的情况下,边降值随带钢厚度增加呈明显上升趋势。当压下率为 0.1 时,边降由 9.8 μm 增至 29.7 μm;而压下率提高到 0.4 时,边降进一步增大至 43.1 μm。这主要是由于厚度增大使带钢金属横向流动能力增强,边部自由流动现象更加显著;同时,随着轧制力增大,使轧辊端部与中部的弹性压扁差异加剧,导致边降随厚度增大而升高。进一步观察带钢横截面厚度分布可以发现,带钢越靠近中部,其相对减薄量越趋近于零。当压下率为 0.2 时,薄规格带钢在距带钢中心最远的边部(约 -625 ~ -600 mm 位置)出现较大厚度变化,但在中心区域(距边部约 -600 mm以内)厚度基本保持稳定。这说明在中部区域,金属横向流动受到边部效应的影响较小,厚度变化趋于平稳。

可见带钢厚度与压下率对边降具有叠加放大效应,在厚规格带钢和高压下率条件下,边部金属横向流动增强,轧辊端部弹性压扁差异放大,导致边降显著加剧;而薄规格带钢或中低压下率条件下,中心区域厚度变化较小,边降整体表现相对稳定。这一规律与边部横向金属流动受厚度与轧制力共同驱动的机理保持一致,为后续边降调控策略提供了量化参考。

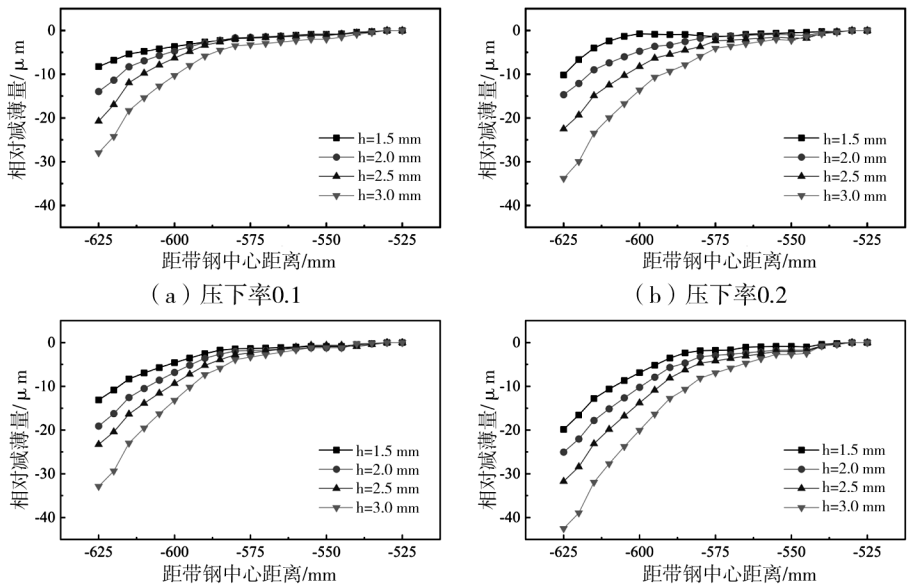


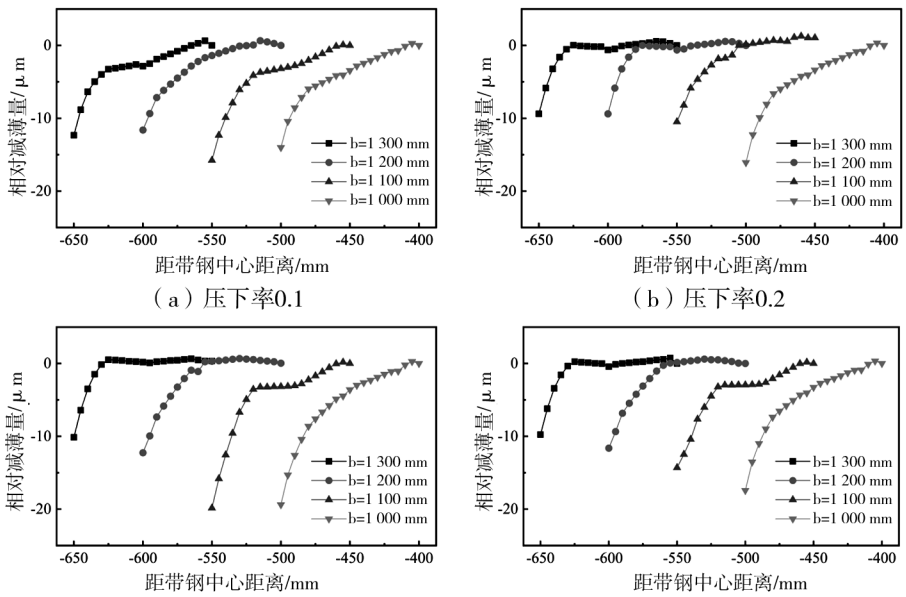
图 7　不同压下率下带钢边降随厚度改变的变化规律

2.2　带钢宽度对边降的影响

为了进一步分析带钢宽度对边降的影响,对不同带钢宽度(1 000 mm、1 100 mm、1 200 mm、1 300 mm)进行有限元仿真,结果如图 8 所示。整体趋势表明,边

降值随带钢宽度增加而逐渐减小。这主要是由于带钢宽度增大后,边部金属横向流动区域扩大,使单位宽度的横向流动量相对减弱,边降值总体呈减小趋势。与厚度和压下率相比,宽度变化对边降值改变的作用较小,但在各工况下均表现出单调、可预期的调控规律。在压下率为 0.1 的工况下,不同宽度的相对减薄量曲线形态相似,在距带钢边部约 20 mm 处出现较剧烈的变化,越向中心区域厚度变化越小,并逐渐趋近于零,但仍保持一定斜率,表明该区域存在较小的厚度梯度。相比之下,当压下率为 0.2、0.3 和 0.4 时,较宽的带钢虽同样在距边部约20 mm 处出现明显的减薄,但之后厚度分布迅速平缓,在距边部 20 mm 以外即基本呈水平线,表明中部厚度更为均匀稳定。

上述结果表明,扩大带钢宽度有助于降低单位宽度上的横向流动,从而在一定程度上抑制边降;且在较高压下率条件下,宽度增大对中部厚度均匀性的改善更为显著。这些规律可作为在实际轧制中通过调整带宽与压下率组合以优化边部厚度分布的参考依据。



(a) 压下率0.1 (b) 压下率0.2

(c) 压下率0.3 (d) 压下率0.4

图 8 不同压下率下带钢边降随宽度改变的变化规律

2.3 压下率对边降的影响

考虑到各机架压下率分布差异,上游机架约为 0.3,末机架约为 0.05,设置压下率为 0.05、0.1、0.2、0.3 四组工况进行有限元仿真。如图 9 所示,边降总体上随压下率增加而增大,且在带钢宽度较小时增幅更加明显。这一规律与轧制力增强导致边部横向金属流动加剧密切相关。当带钢宽度较窄时,边部金属流动受限区域缩小,横向流动集中效应增强,使边降对压下率的敏感性进一步提高。从不同宽度的相对减薄量曲线来看,带钢较宽时,各压下率对应曲线整体趋势较为接近,局部甚至出现交叉现象,说明宽规格带钢对压下率变化的响应较为缓和,中部区域厚度分布受压下率影响有限。而当带钢宽度减小至 1 100 mm 乃至 1 000 mm 时,不同压下率下的曲线区分明显,低压下率时,相对减薄量变化较缓和,曲线平稳;而在高压下率时,曲线斜率较大,减薄量变化显著,边部厚度差异突出。

由此可见,压下率升高会放大边降效应,其影响程度随带钢宽度而变化,宽规格带钢相对减薄量曲线差异较小,窄规格带钢相对减薄量曲线变化明显。这一规律揭示了压下率与带钢宽度在边降形成中的耦合作用,对于不同规格带钢的工艺参数优化具有参考意义。

2.4 变形抗力对边降的影响

不同牌号钢材在屈服强度上存在差异,在相同压下率条件下的变形抗力表现也明显不同。为考察这一因素对边降的作用,设置屈服强度分别为 200 MPa、400 MPa 和 600 MPa 进行有限元仿真。如

图 10 所示，随着变形抗力的提高，边降整体呈减小趋势。在压下率 0.4 时，边降由 200 MPa 时的 16.2 μm降低至600 MPa 时的 6.1 μm，表明高强度钢因抗变形能力更强，有效抑制了金属横向流动，从而减小边降值。不同压下率下的相对减薄量曲线分布对比发现，当压下率为 0.1 时，三种强度钢的相对减薄量曲线在局部区域存在一定重叠，变化趋势基本一致，说明低压下率条件下强度差异对横向流动的影响不明显。而随着压下率逐步升高，不同强度钢的相对减薄量曲线分化更加明显，低强度钢曲线斜率大，相对减薄量较大；中等强度钢处于中间状态；高强度钢曲线平缓，相对减薄量变化最小。

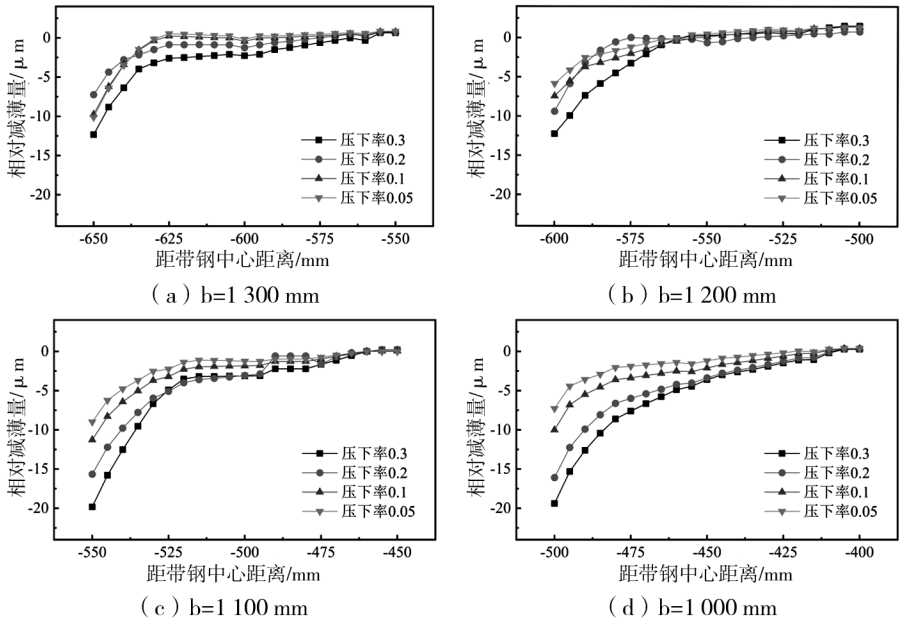


图 9　不同宽度下带钢边降随压下率改变的变化规律

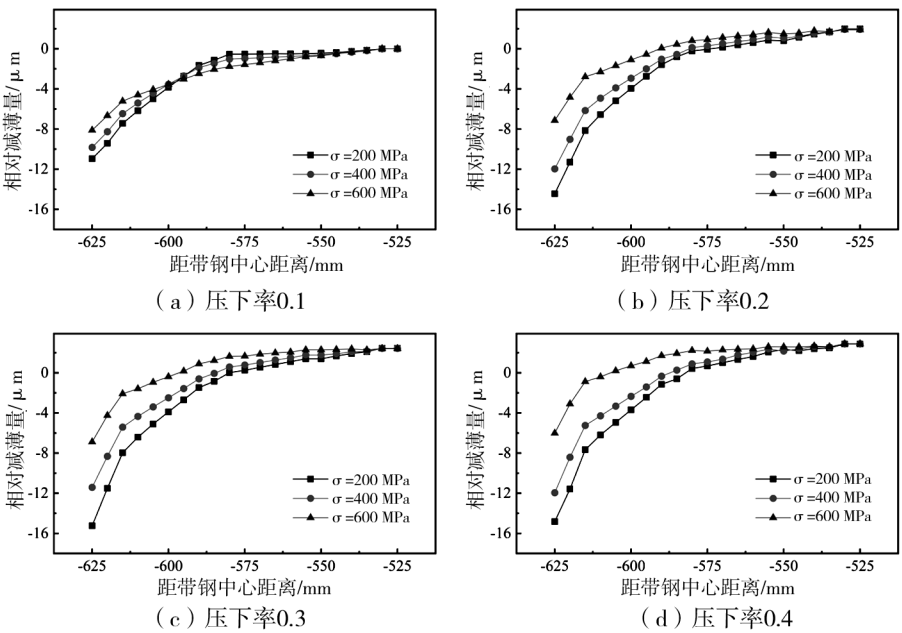


图 10　不同压下率下带钢边降随变形抗力改变的变化规律

变形抗力越高,边部横向金属流动受到约束越显著,边降对压下率的敏感性也随之减弱。这一规律表明,高强度钢在实际轧制过程中具有抑制边降优势,而低强度钢则需要通过其他工艺参数调控来补偿其横向流动带来的不利影响。

3 极限工况下六辊 CVC 轧机边降调控特性分析

为全面评估六辊 CVC 轧机在极限工况条件下的调控能力,基于辊系 - 轧件一体化有限元模型,开展系统仿真研究。通过多种弯辊力与中间辊窜辊量的组合工况,定量分析轧机对带钢断面形状及边降的调控范围,并引入调控功效系数,用于评价各类调控手段的作用效率。

3.1 极限工况设定与仿真体系构建

依据六辊 CVC 轧机的设备极限参数,中间辊窜辊量(S_i)、中间辊弯辊力(F_i)及工作辊弯辊力(F_W)分别取最小值、零位及最大值,组合形成多工况仿真体系,如表 5 所示。

表 5 各调控手段极限范围及对应编号

项目	最小值(1)	中间值(2)	最大值(3)
中间辊窜辊量/mm	-120	0	120
中间辊弯辊力/kN	-450	0	650
工作辊弯辊力/kN	-450	0	650

交叉组合共得到 27 种工况,涵盖了轧机在不同弯辊力与窜辊量组合下的全部可能状态。仿真模型选取 50W600 无取向硅钢,带钢规格为 1 250 mm × 2.75 mm,轧制力设为典型值 13 720 kN。建立的工况体系能够全面反映轧机在极限工况条件下的调控能力,并保证不同控制手段的耦合作用能够得到全面评估。

3.2 边降调控特性分析

为了减小模型边部自由度对计算结果的影响,选取 i = 100 mm、j = 15 mm 代入(1)式。仿真结果如图 11 所示,当中间辊弯辊力从 -45 kN 增加至 65 kN时,边降平均降低约 15.9 μm;而工作辊弯辊力变化对边降的影响更为显著,平均变化幅度达到 39.2 μm;中间辊窜辊量对边降呈近似线性调节,正负极限位对应的边降变化约为 32 μm。结果表明,工作辊直接作用于带钢表面,对边降的调控最为显著,中间辊窜辊次之,中间辊弯辊对边降的调控效果相对最弱。

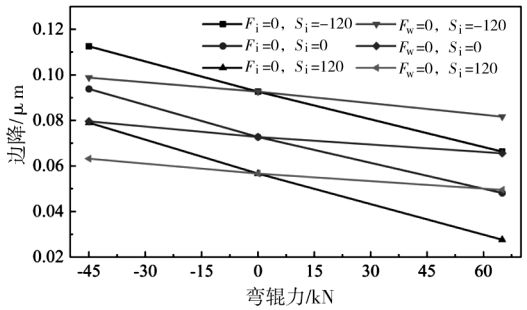


图 11 不同弯辊力时带钢边降变化

3.3 弯辊力与窜辊量的调控功效评估

为进一步定量评价不同调控手段对带钢边降的作用效果,引入边降调控功效系数 K。中间辊弯辊力对带钢的边降调控系数 K_i 可以表示为:

$$K_i = \frac{\Delta ED}{\Delta F_i} \tag{2}$$

式中:ΔF_i 为中间辊弯辊力改变量,kN;ΔED 为相应的边降改变量,μm。

工作辊弯辊力对带钢的边降调控系数 K_W 可以表示为:

$$K_W = \frac{\Delta ED}{\Delta F_W} \tag{3}$$

式中:ΔF_W 为工作辊弯辊力改变量,kN。

计算结果见表 6,其中 S 表示中间辊窜辊位置。可以看出,在各窜辊位置下,工作辊弯辊力边降调控系数 K_W 平均为中间辊弯辊力调控系数 K_i 的约 3.5 倍,说明工作辊弯辊对边降的调控作用最为显著。而 K_W 与 K_i 随窜辊位置的变化并未表现出明显规律性。比较可得工作辊弯辊力在边降控制中占主导作用,中间辊窜辊量次之,而中间辊弯辊力的效果相对最弱。由此可见,工作辊辊形优化是提高边降调控能力的关键途径,结合合理的中间辊窜辊预设策略,也能够进一步增强轧机的整体调控能力。

表 6 弯辊力对带钢的边降调控系数 μm/kN

项目	K_i		K_W	
	-45 ~ 0 kN	0 ~ 65 kN	-45 ~ 0 kN	0 ~ 65 kN
S = -120 mm	-13.75	-16.92	-44.25	-40.52
S = 0 mm	-15.27	-10.95	-47.00	-37.78
S = 120 mm	-14.55	-10.98	-49.68	-44.74

4 结论

(1)基于 1 780 mm 六辊 CVC 轧机,建立了轧

辊－带钢耦合的一体化有限元模型，仿真结果与实际断面轮廓的吻合度较高，均方根误差与平均绝对百分比误差均处于可接受范围，表明该模型能够准确反映轧制过程中带钢断面的变化特征，为边降调控规律研究提供了坚实基础。

（2）厚度增加或压下率升高均会显著加剧边降；宽度增大会在一定程度上减弱边降；而较高的材料变形抗力能够有效抑制横向金属流动，从而降低边降。这些规律为工艺参数的优化和不同钢种的轧制策略选择提供了理论依据。

（3）在极限工况条件下，工作辊弯辊力对边降的作用最为显著，其调控功效约为中间辊弯辊力的 3.5 倍；中间辊窜辊量的作用次之；而单独依靠中间辊弯辊的调控效果相对有限。不同窜辊位置下边降调控系数虽无明显规律性，但合理利用工作辊弯辊力并结合中间辊窜辊策略，仍可有效提升整体的边降控制能力。

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] 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.

[3] Li L，Xie H，Zhang T，et al. Understanding the regulation ability of roll bending on strip shape in a CVC－6 tandem cold mill using a 3D multiple stand FE model[J]. Journal of Manufacturing Processes，2023，101：1013－1031.

[4] 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.

[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.

[6] Wang P，Yan Z，Li X，et al. Edge drop control of cold rolled silicon steel strip based on model predictive control[J]. Journal of Manufacturing Processes，2022，82：88－95.

[7] 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.

[8] Zhao J，Sun J N，Wu T，et al. Design of intermediate roll contour and analysis of regulation ability on strip shape of 18－High mill[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2024，131(12)：6139－6151.

[9] 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.

[10] 王宏峰，郑帅帅，杨庭松，等. 基于全流程形状与性能遗传影响的高强钢冷轧板形板厚控制研究[J]. 塑性工程学报，2025，32(2)：76－85.

[11] Servin R，Calderon I，Arreola A S，et al. Analysis of Edge Drop on Strip Due to Bending and Elastic Deformation of Back up Rolls in a Four－High Cold Mill[J]. Metals，2024，14(2)：181.

[12] 张勇，苏学艺，李邦波，等. 冷轧无取向硅钢边缘降与原料关系研究及控制[J]. 金属世界，2021(5)：62－66.