

冷连轧机组负向前滑问题分析及解决策略研究

徐耀东¹, 杨 尚¹, 付 超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:冷连轧机组是冷轧板带高速生产的关键设备,在硬质冷轧基板生产过程中易出现前滑负值现象。文章针对此问题进行研究,探究负向前滑的形成机理及工艺参数影响关系,并基于出口厚度、前后张力和摩擦系数的影响规律,提出了冷连轧机组负前滑改善策略。经实验验证,该策略能够有效地改善前滑负值现象,迫使轧机恢复至常规状态。

关键词:冷连轧;负向前滑;轧制稳定性

中图分类号: TG335. 12

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2026)03-0052-03

Analysis on Problem of Forward Slip Backward for Tandem Cold Mill and Research on Solving Strategies

Xu Yaodong¹, Yang Shang¹, Fu Chao¹, 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: Tandem cold mill is the key equipment for high speed production of cold rolled plate and strip, the negative values of forward slip are prone to occur in production process of cold rolled hard substrate. In this paper, the problem is studied by exploring the formation mechanisms of forward slip backward and influence relations of process parameters as well as the improvement strategies are proposed based on the influencing rules of exit thickness, tension at entry and exit and friction coefficients. The experiment proved that negative values of forward slip could be effectively improved with the strategies so that the mill is forced to return to normal state.

Key words: tandem cold rolling; forward slip backward; rolling stability

冷连轧机组是板带钢冷轧高速生产的重要设施,其生产连续性、生产稳定性直接决定着设备产能产量,更直接影响冷轧厂的产值^[1]。作为冷轧工艺的核心,冷连轧机组各个机架通过分别执行总压下

率的各阶分量,以各机架压下叠加的形式来促使冷轧基料由原料厚度逐步达到目标厚度,进而满足下游工序及下游客户的需求。在冷连轧机组各个机架执行轧制任务的过程中,板带微元体因压延变形而

呈现出与轧辊辊速不配位的现象,并依据此规律在轧制区出入口侧分别形成前滑区与后滑区^[2,3]。由此,冷轧自动化控制体系也进一步衍生出前滑值计算模型与后滑值控制模型,二者受冷连轧机组的高度连续性影响,参与到 AGC 和 ASC 控制机制中。关于前滑值,相关学者开展了大量研究,多集中于打滑措施的改善策略^[4]、打滑预测模型^[5]。以上研究为前滑值的计算与分析奠定了基础,但前滑现象受到金属流动状态、板带表面质量、轧辊状态、乳化液状态等多因素的联合影响,在如锌铝镁基板冷轧过程中,极易出现“负前滑”现象,严重影响生产,而此类问题的研究又鲜有报道。因此,本文针对上述问题,以锌铝镁基板为研究对象,剖析其冷连轧过程中的负向前滑特性,并基于此给出相应的解决策略。

1 前滑值计算分析方法

冷轧生产过程中,轧件的压延变形多以带长方形的伸长来体现,由此造成轧制区入口侧和出口侧存在轧件速度与轧辊速度不相等的现象。其中,轧件出口速度一般大于轧辊转速,并构成“前滑”趋势。由此也产生了前滑值的定义,具体可描述为机架出口带钢速度与轧辊线速度之差和轧辊线速度的比值,其计算公式见公式(1)。

$$f_s = \frac{v_s - v_r}{v_r} \times 100\% = \frac{R}{h} \phi^2 \quad (1)$$

式中: v_s 为机架出口带钢速度, m/s; v_r 为轧辊线速度, m/s; R 为工作辊半径, mm; h 为机架出口带钢厚度, mm; ϕ 为中性角, mm; f_s 为前滑值。

根据冷连轧机组的机架间秒流量不变定理,可根据前滑值的预报值来协调轧辊辊速,其计算公式见公式(2)。

$$v_r = \frac{U}{h \cdot (1 + f_s)} \quad (2)$$

式中: U 为机架间秒流量。

基于上述基础模型,包钢 2 030 mm 冷连轧机组所采用的日立控制系统,根据 Bland - Ford 公式,以进行轧机力能参数计算,见公式(3) 至公式(7)。

$$f = \frac{R'}{h} \cdot \phi^2 (\phi \geq 0) \quad (3)$$

$$f = 0 (\phi < 0) \quad (4)$$

$$\phi = \sqrt{\frac{h}{R'}} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot \sin^{-1} \sqrt{r} + \frac{1}{4\alpha\mu} \cdot \sqrt{\frac{h}{R'}} \cdot \right.$$

$$\left. \ln \left(\frac{h}{H} \cdot \frac{1 - \frac{T_b}{K_b}}{1 - \frac{T_f}{K_f}} \right) \right\} \quad (5)$$

$$k_b = k_0 \cdot \left\{ \ln \left(\frac{H_1}{H} \right) + m \right\}^n \quad (6)$$

$$k_f = k_0 \cdot \left\{ \ln \left(\frac{H_1}{h} \right) + m \right\}^n \quad (7)$$

式中: K_b 为机架出口变形抗力, MPa; K_f 为机架入口变形抗力, MPa; T_b 为后单位张力, N/mm; T_f 为前单位张力, N/mm; μ 为摩擦系数; H_1 为原料厚度, mm; H 为机架入口厚度, mm; h 为机架出口厚度, mm; r 为变形率, %; R' 为压扁半径, mm; K_0, m, n 为变形抗力模型参数, α 为咬入角。

2 负向前滑特点分析

针对包钢 2 030 mm 冷连轧机组的实绩生产数据进行分析,生产数据表明,当生产锌铝镁基板时,全机架易发生不同程度的“负前滑”现象,且该现象不随轧制速度而改变,S2 机架的前滑负值为各机架中的最大负值,而出现“负前滑”现象时,S1 机架的前滑值可保持在正值,即处于正常轧制状态。针对这一现象,结合公式(1)至公式(7)可获悉,前滑值关联于带钢入口厚度、出口厚度、变形率、摩擦系数以及张力因子等因素。

在带钢厚度和变形率方面,前滑值可随出口厚度的增大,呈双曲线趋势减小,且减小幅度趋增;变形率对前滑值的影响则相反,后者随前者增加而增加。其原因在于,出口厚度为总压下率与来料厚度的乘积,而变形率又是总压下率的微观表现,故二者间存在反比对应关系。出口厚度愈小、压下率愈高,轧件的变形程度愈大,TD(宽度方向)压缩加速了RD(轧制方向)延展,故前滑增强。

在摩擦系数方面,前滑值随摩擦系数增加而增大。其原因在于,摩擦系数愈大,轧制变形区摩擦力矩愈大。后者作为轧制的驱动力矩,加大了轧制变形区中性角,以增大剪切应力的形式,促进轧件内部微观晶粒滑移、拉长,进而促进延伸、呈现出前滑增大。

在张力因子方面,前滑值随张力因子减小而增大。其原因在于,张力因子愈小,则前张力愈大而后张力愈小。轧制变形区内,前滑区金属受 TD 方向压应力的同时,承受更大的拉应力,更易于变形;后

滑区金属除原 TD 方向压应力外,受朝出口侧拉应力减小,故也起到了促进变形的作用效果。

综上所述,出口厚度、后张力与前滑值呈反比例变化,摩擦系数、前张力与前滑值呈正比例变化。在制定冷连轧工艺过程中,需充分考虑上述因素对前滑的影响,避免出现“负前滑”,从而避免机架打滑和张力的失控发生。

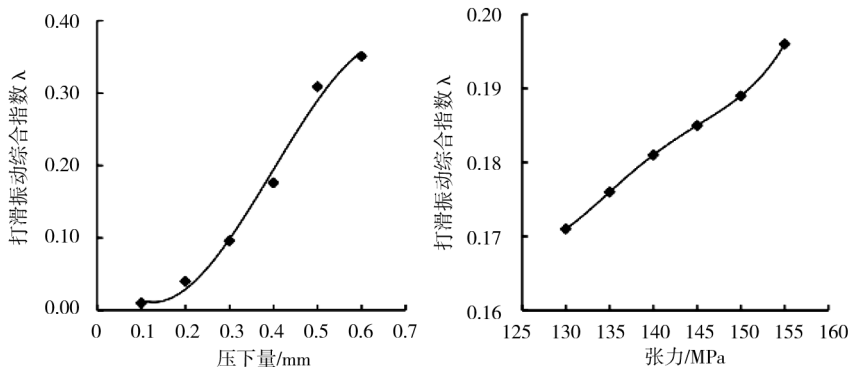


图 1 不同压下量和张力对打滑振动影响

因此轧制策略采用加大前置机架前张力,减小后置机架后张力,来减小 S1 机架负荷。通过实验对比,将前置机架前张力加大 5%,将后置机架后张力减小 4%时,S1 机架负荷分配下降 2%,此时达到功率平衡状态,在此条件下稳定轧制吨数会增加 100~200 t。

(2) 3[#] 酸槽的酸浓度由 125 mol/L 降至 115 mol/L,缓蚀剂添加比由 0.6‰提升至 0.8‰,达到降低酸洗后板面粗糙度目的,酸洗后板面平均粗糙度由 2.08 μm 降低到 1.65 μm。通过酸洗前粗糙度对比分析,在降低板面粗糙度后稳定轧制吨数会增加 200 t~300 t。

(3) 轧辊原始粗糙度对轧制过程辊缝润滑状态起到重要作用。轧辊表面经过打磨后,轧辊表面形成一定的粗糙度,喷射在轧辊与带钢接触变形区的乳化液会优先存储在轧辊夹带进入“凹坑”中,当填充完凹坑后,才会在带材与轧辊接触面形成一定的隔离油膜。在乳化液喷射流量一定的情况下,轧辊原始表面粗糙度受辊缝间的油膜厚度影响,引起摩擦系数的改变,最终影响轧机的稳定性,导致打滑振动的发生。将 S2 工作辊粗糙度由 0.7 μm 提升至与 S1 机架相同粗糙度的 1.2 μm 后进行对比分析,轧机数据稳定,在此条件下稳定轧制吨数会再次增

3 负前滑改善策略及应用效果

(1) 轧制过程中轧机的打滑及振动与各个机架前后张力和进出口厚度密切相关,轧制规程的设定是否合理对轧机振动有着重要的影响。为了定量分析压下量以及张力对打滑和振动的影响,计算出表征轧机打滑与振动的打滑因子值以及振动系数值,见图 1。

加 300 t 左右。

(4) 在上述措施执行后继续开展镀铬工作辊上机试验,分别将镀铬辊装配在 S1 机架、S2 机架、S1~S2 机架进行上机试验,S2 机架使用镀铬工作辊后可提升稳定轧制吨数效果最优,而 S1~S2 机架共同使用镀铬工作辊并没有在 S2 基础上有进一步提升,最终选定镀铬辊配制在 S2 机架,全面提升轧辊抗磨能力。普通工作辊与镀铬工作辊对比效果见表 1。

表 1 普通工作辊与镀铬工作辊对比表

轧辊类型	轧制量/t	下线轧辊粗糙度/μm
S1 普通工作辊	1 300~1 500	0.1~0.2
S2 普通工作辊	1 300~1 500	0.1~0.2
S1 镀铬工作辊	3 000~3 500	0.2~0.3
S2 镀铬工作辊	5 000~5 500	0.2~0.3

结果表明,S1、S2 使用普通轧辊时,轧制量较低,最大只能达到 1 500 t,轧辊粗糙度衰减较为严重,只有 S1 使用镀铬轧辊时,轧制量小幅提升,最大轧制量达到 3 500 t,轧辊粗糙度衰减量较小,S2 使用镀铬轧辊时,轧制量大幅提升,最大轧制量达到 5 500 t,S2 架使用镀铬使用效果最好。冷连轧机组负前滑改善策略的实施能够对 2030 机组的前滑负

(下转第 69 页)

降。

4.3 设备维护效率

吹扫回油操作全程仅需 10 min,且在停机准备时段完成,不占用标准换辊工时,不影响轧机生产节奏;操作流程简单,操作人员可快速掌握;同时后期维护工作量小、故障率低,设备整体运维便捷性显著提高。

4.4 现场作业环境

轴承座拆卸过程中无润滑油外泄,轧辊装配区域地面、设备表面无油泥堆积,作业环境整洁规范;符合冶金行业安全标准化、绿色工厂建设与职业健康安全管理要求,为操作人员提供安全、清洁的作业环境。

4.5 技术推广价值

本次改造以极小的投入实现了节油、降本、增效、环保、安全的多重效益,充分体现了技术创新对生产现场痛点问题的解决能力与赋能作用。该技术方案适配性强、改造简便、效果稳定、可靠性高,可广泛应用于冶金行业各类集中稀油润滑的冷轧机、连轧机、轧机轴承座的润滑系统,具有极高的工程推广

价值。

5 结论

本文通过对包钢五机架六辊冷轧机轴承集中稀油润滑系统运行原理、循环流程与换辊工况的系统分析,明确停机换辊时高粘度润滑油自流回油速度慢、轴承座残油无法及时回收外泄是油耗过高、浪费严重的核心原因,为技术改造提供了精准的理论依据。

本次实践充分证明,立足现有设备资源、聚焦生产现场痛点、开展微改造与精创新,能够以最小投入实现最大效益,有效破解生产瓶颈、提升设备运行效率、推动绿色制造与节能减排,对冶金冷轧行业同类设备优化改造具有重要的参考价值与示范作用。

参 考 文 献

[1] 陈方舟. 浅谈油耗统计与分析在机械成本控制中的应用[J]. 城市建设,2013,8(1):6-9.
[2] 宋新华. 论工程机械的集中润滑[J]. 中小企业管理与科技,2010,16(1):5-10.

(上接第 54 页)

值现象进行改善,有效地将各机架前滑值恢复为正值,促使轧机恢复至正常轧制状态。

4 结论

本文针对冷连轧机组轧制硬质冷轧基料易出现的“负前滑”现象进行分析,从前滑值计算模型出发,分析各参数对前滑值的影响规律。结果表明,出口厚度、后张力与前滑值呈反比例变化,摩擦系数、前张力与前滑值呈正比例变化。针对于此,本文对 2030 冷轧机组进行轧制工艺优化,经实验表明冷连轧机组负前滑改善策略能够对前滑负值现象进行改善,迫使轧机恢复至常规状态。

参 考 文 献

[1] 张结刚,吴泽交,吴高亮,等. 宽规格五机架冷

连轧机组硅钢高精度断面控制技术研究[J]. 轧钢,2015,32(5):36-39,53.
[2] 任忠凯,王涛,王跃林,等. 极薄带轧制变形区接触轮廓及接触压力分析[J]. 钢铁,2018,53(12):62-68.
[3] 孙权,陈建钧,潘红良. 板材轧制过程变形区应力分布简化计算模型[J]. 应用力学学报,2018,35(5):1139-1145,1192.
[4] 施剑睿,孙文权,陈禄祯,等. 基于极限静摩擦力矩的轧机打滑预测模型[J]. 钢铁,2021,56(9):96-101.
[5] 贾志伟,李元华,张海利,等. 以控制打滑为目标取向硅钢可逆轧制工艺优化[J]. 轧钢,2020,37(1):42-44.