

拉矫机弯曲单元工作辊力学分析及长寿命研究

任学平¹, 马 龙^{1,2}

(1. 内蒙古科技大学 机械工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 包钢薄板坯连铸连轧厂, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 拉矫机是连续热镀锌生产中重要的镀后处理设备, 但其频繁出现的掉辊现象造成镀锌板板面划伤和断带停线事故, 严重影响了其功能的发挥和生产线的稳定运行。在了解其结构组成的基础上, 通过力学分析, 发现掉辊现象是工作辊辊端支撑轴承在轴向力的作用下失效磨损所致。利用逆推法求得了轴向力, 并结合 Workbench 摩擦生热分析, 采用推力轴承的合理选用、辊系装配质量的提高、拉矫工艺参数的优化、伸长率和温度反馈信号的获取等多种针对性办法, 不但解决了拉矫机弯曲单元的频繁更换的问题, 而且阻止了掉辊现象的发生, 保证了生产线的连续稳定运行, 达到了降本增效的目的。

关键词: 拉矫机; 弯曲单元工作辊; 辊端支撑轴承; 磨损; 摩擦生热; 长寿化措施

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.06.026

中图分类号: TG333.17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 06-0186-07

Mechanical analysis and research on long life of work roll in bending unit for tension leveler

Ren Xueping¹, Ma Long^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;
2. Compact Strip Production Plant Baotou, Baotou 014010, China)

Abstract: The tension leveler is an important post-plating treatment equipment in continuous hot-dip galvanizing production, but its frequent roll-off phenomenon causes scratch of galvanized sheet surface and accidents of broken belt and line stop, which seriously affects the performance of its function and the stable operation of production line. Therefore, on the basis of understanding its structural composition, through mechanical analysis, it was found that the work roll end support bearing failed and worn under the action of axial force which caused the roll-off phenomenon, and the axial force was obtained by the inverse method. Then, combined with the frictional heat generation analysis of Workbench, the appropriate selection of thrust bearings, the improvement of roll assembly quality, the optimization of tension leveling process parameters, the acquisition of elongation and temperature feedback signals and so on were adopted. A variety of targeted methods not only solved the frequent replacement problem of the bending unit for tension leveler, but also prevented the occurrence of roll-off phenomenon, ensured the continuous and stable operation of production line, and achieved the purpose of reducing costs and increasing efficiency.

Key words: tension leveller; bending unit work roll; roll end support bearing; wear; frictional heat generation; longevity measures

拉矫机是连续热镀锌生产中重要的镀后处理设备, 在消除带钢边浪、中浪、瓢曲, 改善薄板板形等方面起到了不可替代的作用^[1]。包钢薄板坯连铸连轧厂镀锌机组拉矫机弯曲单元辊端支撑轴承频繁损坏, 约占弯曲单元更换原因的 80%。通过对拉矫机弯曲单元工作辊进行力学分析, 采用多种针对性

方法使拉矫机弯曲单元辊端支撑轴承频繁损坏的现象明显减少, 而且即使出现磨损, 也会在人机界面 (Human Machine Interface, HMI) 上显示报警, 不会再发生掉辊而没有征兆的事故。

1 拉矫机结构组成

拉矫机的结构包含 3 部分: 第 1 部分为张紧辊组, 用于满足其工艺段所需的张力; 第 2 部分为拉矫机本体, 由喷淋系统、两组弯曲单元和一组矫直单元构成, 即“湿式两弯一矫”, 实现带钢的弯曲矫直^[2]; 第 3 部分为挤干辊和烘干机, 用于保证带

收稿日期: 2021-04-25; 修订日期: 2021-07-28

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金资助项目 (2019LH05008)

作者简介: 任学平 (1963-), 男, 博士, 教授

E-mail: rxp@imust.cn

通信作者: 马 龙 (1985-), 男, 硕士, 机械工程师, 镀锌工技师

E-mail: 15947025479@163.com

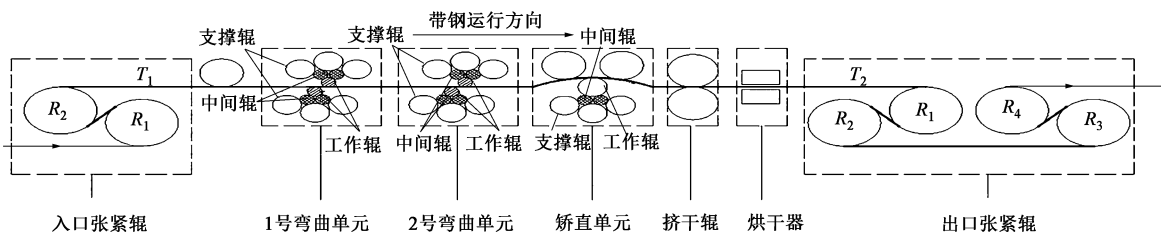


图1 湿式两弯一矫式拉矫机结构简图

Fig. 1 Structure diagram of wet two-bend and one-straightening type tension leveler

钢表面无水,避免打滑,如图1所示,其中, R_1 为张紧辊1号辊, R_2 为张紧辊2号辊, R_3 为张紧辊3号辊, R_4 为张紧辊4号辊, T_1 为拉矫机入口侧张力, T_2 为拉矫机出口侧张力。

拉矫机本体由喷淋系统、上下2套弯曲单元、1套抗横弯单元和3个转向辊组成。喷淋系统由5组7个喷嘴的喷淋集管组成,用于清洗、润滑和冷却单元。每个单元为三重式6辊结构,即包含1个工作辊、2个中间辊和3个支撑辊,其中支撑辊由3列7个辊身长度为150 mm的短支撑辊呈扇形排列而成。上弯曲单元由液压缸驱动升降来调节啮合度,下弯曲单元通过轮齿电机-螺旋丝杠驱动升降来调节啮合度。矫直单元由矫直辊系和2个固定转向辊组成,也是通过轮齿电机-螺旋丝杠驱动升降来调节啮合度,如图2所示。

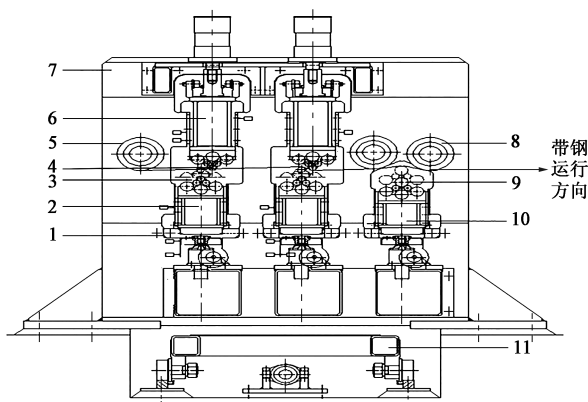


图2 拉矫机装配图

1. 升降机构 2. 下弯曲辊座 3. 下弯曲辊 4. 上弯曲辊
5. 导入辊 6. 上弯曲辊座 7. 牌坊 8. 上矫直辊
9. 下矫直辊 10. 下矫直辊座 11. 换辊小车

Fig. 2 Assembly diagram of tension leveler

2 拉矫机弯曲辊盒工作辊的力学分析

2.1 拉矫机复杂工况和存在的问题

镀锌生产线的规格厚度为0.25~2.50 mm,宽度

为960~1540 mm,牌号有SGCC、SGC490、DX51D+Z、CS-B等,受炉区产能的限制和考虑工艺要求,目前最大产速为 $125 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,而工作辊和中间辊的辊径为 $\Phi 40 \text{ mm}$,计算得其转速可达 $995 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。假如辊系装配的质量差,喷淋系统喷嘴的流量减小,带钢板形不良和带钢表面携带锌渣、氧化物、杂质等,均会对工作辊产生很大影响,进而影响中间辊。工作辊表面的磨损形貌如图3a和图3b所示,带钢板面拉矫痕如图3c所示,其中,图3b所示“缺肉”是从投产到目前见过的最为严重的一次磨损。工作辊的磨损均会反映到板面上,检查站会及时反馈给拉矫操作工,及时更换拉矫单元即可。

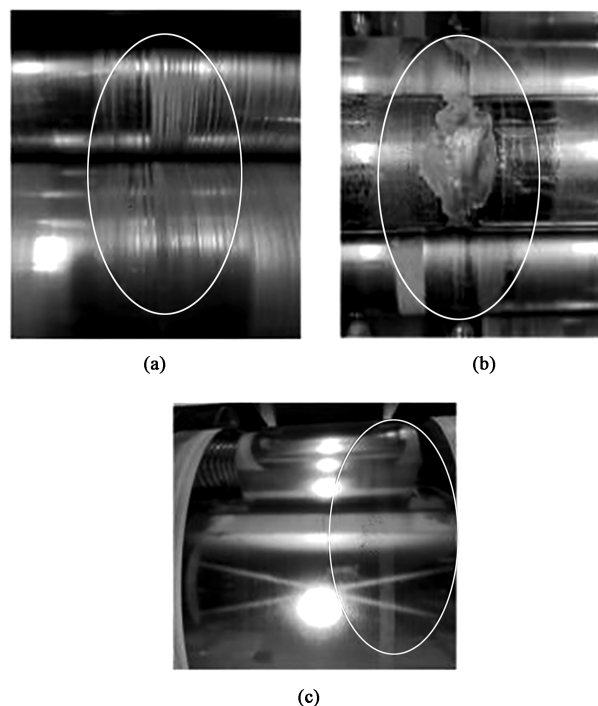
图3 工作辊磨损形貌和带钢板面拉矫痕
(a) 磨损 (b) 缺肉 (c) 拉矫痕

Fig. 3 Wear morphology of work rolls and tension correction marks on surface of strip steel plate

(a) Wear (b) Misrun (c) Tension correction marks

突发频率高、危害性最大的为辊端支撑轴承的磨损,会导致工作辊或中间辊从单元脱落。图 4a 为辊端支撑轴承的磨损情况;图 4b 中 A 处和 B 处分别为脱落的上辊子导致的尺寸为 $1.5\text{ mm} \times 1250\text{ mm}$ 的带钢传动侧的大边浪和板面划伤,会使成品卷为塔型卷和划伤卷,从而直接导致废品或非计划成品的产生,给企业带来巨大的损失,也给拉矫操作工增加了劳动强度和心理负担。如何减轻和解决支撑轴承磨损成为一个急需解决的问题。

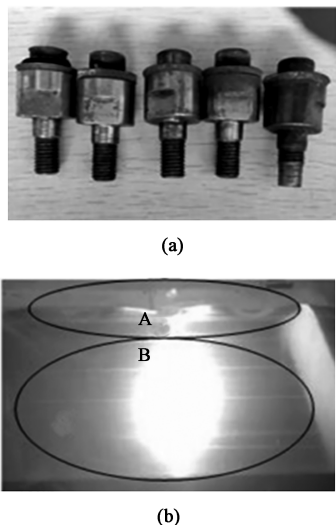


图 4 磨损的轴头和脱落的上辊子给带钢表面造成的影响

(a) 磨损轴头 (b) 板面缺陷

Fig. 4 Worn shaft heads and effect of fallen rollers on surface of strip steel

(a) Worn shaft heads (b) Board defects

2.2 拉矫机工作辊的受力情况

以拉矫机上弯曲单元工作辊为例,对其进行受力分析,如图 5 所示。工作辊在零误差运行状态下,会处于水平状态,如果带钢板形良好,带钢反作用于工作辊的作用力仅有竖直方向上的分力 f_1 ,不存在轴向的分力 f_3 或 f_4 。

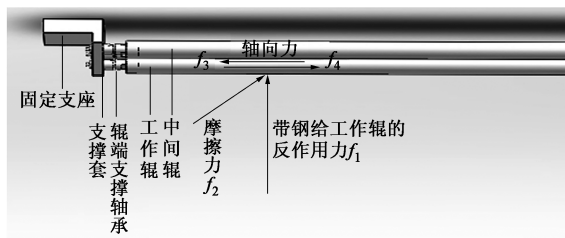


图 5 弯曲单元工作辊的受力示意图

Fig. 5 Schematic diagram of force on work roll for bending unit

但实际生产中,复杂的工况下工作辊不会完全处于水平状态,因为带钢或多或少地存在着浪形、瓢曲等缺陷,当拉矫机单元装配不合理或投入使用

时间过长时,均会发现拉矫机单元内辊系在水平方向或垂直方向倾斜,造成辊系横向不平行,如果单元内辊系水平度偏差过大,即产生了轴向力,如果辊端支撑轴承一侧承受的轴向力超过其承载能力,即会使其内部的微型推力轴承失效^[3],进而使微型深沟球轴承失效,导致辊端支撑轴承产生卡阻或抱死现象,并且磨损产生的热量在短时间内无法散失,烧损辊端支撑轴承在所难免^[4],同时使另一侧支撑轴松脱,而设备出于对焊缝的保护,焊缝临近时拉矫机自动微开,从而导致发生掉辊现象。

2.3 拉矫机工作辊最大轴向力的逆推法求解

在拉矫机复杂的工况下,求解工作辊轴向力是个难点。本文采用逆向求解法:原工作辊辊端支撑轴承的推力轴承为 BA6 (SKF),尺寸为 $6\text{ mm} \times 14\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,额定动载荷为 1780 N 。为了确定轴承尺寸,往往要根据轴承的负荷性质、轴承寿命^[5]及可靠性要求等分别进行计算。

(1) 球轴承的额定寿命可按式 (1) 计算得到:

$$L_{10} = (C/P)^\varepsilon \quad (1)$$

式中: L_{10} 为基本额定寿命,百万转; C 为基本额定动载荷, N; P 为当量动负荷, N; ε 为寿命指数,球轴承的寿命指数 $\varepsilon=3$ 。

(2) 对恒速转动的球轴承,额定寿命用工作时数表示为:

$$L_{10h} = (10^6/60n) \cdot (C/P)^\varepsilon \quad (2)$$

式中: L_{10h} 为以小时数表示的基本额定寿命, h; n 为工作转速, $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 。

当轴向力为 500 N 时,计算寿命 $= [10^6/(60 \times 995)] \times (1780/500)^3 \approx 755\text{ h} \approx 31.45\text{ 天}$; 当轴向力为 1000 N 时,计算寿命 $= [10^6/(60 \times 995)] \times (1780/1000)^3 \approx 94\text{ h} \approx 3.9\text{ 天}$; 当轴向力为 1500 N 时,计算寿命 $= [10^6/(60 \times 995)] \times (1780/1500)^3 \approx 28\text{ h} \approx 1.16\text{ 天}$ 。

根据现场跟踪 1.2 mm 以上带钢的记录可知,在拉矫机精度正常的情况下,轴承均可使用 32 天以上,同时,该轴向力仅在 1.2 mm 以上的厚带钢上出现, $0.25 \sim 1.20\text{ mm}$ 之间的带钢不存在这么大的轴向力。所以,实际的轴向力不可能大于 500 N 。

2.4 摩擦生热 Workbench 分析

2.4.1 热传导有限元方程

辊端支撑轴承磨损过程中的热传导分析忽略了热辐射以及支撑套表面和周围环境的热交换^[6]。根据能量守恒定律,辊端支撑轴承磨损瞬态传热过程中的差分方程为:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + \mathbf{v}^T \mathbf{L} T \right) + \mathbf{L}^T \mathbf{q} = \dot{q} \quad (3)$$

式中: $T=T(x, y, z, t)$, 为温度随时间 t 的变化函数; τ 为变量矩阵; \mathbf{v} 为能量流动快慢的速率矢量; \mathbf{L} 为温度梯度的方向矢量, 即 x 、 y 、 z 方向的温度梯度; ρ 为物体的密度; c 为比热, 表示某种物质单位质量热的生成热; \mathbf{q} 为热流密度。

根据热传导 Fourier 定律有:

$$\mathbf{q} = -\mathbf{D} \mathbf{L} T \quad (4)$$

式中: \mathbf{D} 为导热系数矩阵; 负号表示热流量的流向与温度降低的方向相反。

将式 (4) 代入式 (3) 中得到一般的热传导方程为:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V}_x \frac{\partial T}{\partial x} + \mathbf{V}_y \frac{\partial T}{\partial y} + \mathbf{V}_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

式中: \mathbf{V}_x 、 \mathbf{V}_y 、 \mathbf{V}_z 为 x 、 y 、 z 方向温度梯度的单位向量; λ_x 、 λ_y 、 λ_z 为沿 x 、 y 、 z 方向的材料导热系数。

2.4.2 有限元分析模型的建立

辊端支撑轴承磨损可分为两个阶段: 第1阶段为支撑轴与挡块的磨损, 第2阶段为支撑轴与挡块和辊端支撑轴承端面与支撑套端面的同时磨损。辊端支撑轴承的装配图见图6, 辊端支撑轴承第1阶段的磨损力学模型见图7, 辊端支撑轴承第2阶段的磨损力学模型见图8。

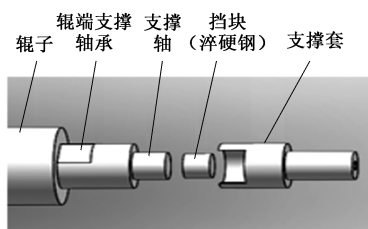


图6 辊端支撑轴承的装配图

Fig. 6 Assembly diagram of roll end support bearing

由图7和图8可知, 辊端支撑轴承在转矩 M' 和轴向力 F'_1 的作用下, 支撑轴端面 A 与挡块端面 A' 率先磨损, 而辊端支撑轴承端面 B 与支撑套端面 B' 不发生磨损, 其中 F_1 为轴向力 F'_1 的反作用力。随着磨损的深入, 会同时发生支撑轴端面 A 与挡块端面 A' 和辊端支撑轴承端面 B 与支撑套端面 B' 磨损, 转矩仍为 M' , 轴向力 F'_1 转化为轴向力 F'_2 和轴向力 F'_3 , 其中 F_2 为轴向力 F'_2 的反作用力, F_3 为轴向力 F'_3 的反作用力。而当辊端支撑轴承端面 B 与支撑套端面

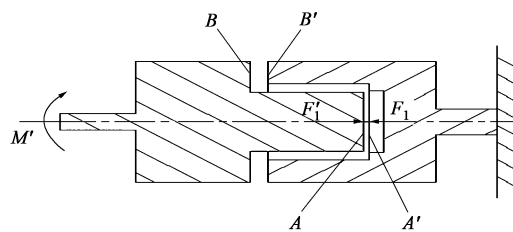


图7 辊端支撑轴承第1阶段磨损力学模型

Fig. 7 Mechanics model of the first stage wear for roll end support bearing

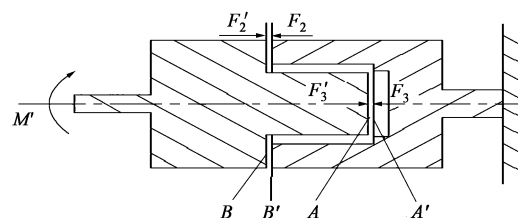


图8 辊端支撑轴承第2阶段磨损力学模型

Fig. 8 Mechanics model of the second stage wear for roll end support bearing

B' 发生磨损时, 支撑套的温度为研究的重点。为了减少仿真运算时间, 据圣维南原理^[7], 选取辊端支撑轴承和支撑套的部分作为研究对象, 并进行网格划分, 采用热力耦合 SOLID226 单元, 如图9所示。

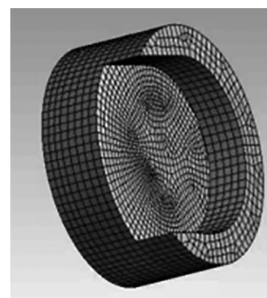


图9 Workbench 摩擦分析模型

Fig. 9 Workbench friction analysis model

网格为 15929 个, 节点为 18144 个, 网格质量的平均值为 0.8843, 理想值为 1, 一般平均值大于 0.6 以上的网格的质量可以接受。网格纵横比的平均值为 1.5923, 理想值为 1。网格雅可比比率的平均值为 1.1831, 理想值为 1。检查网格的各项指标, 网格完全符合条件。

2.4.3 摩擦传热过程中的参数设置

模型中支撑套和辊端支撑轴均采用 316 不锈钢, 316 不锈钢采用双线性等向强化材料本构模型, 实际工况下材料的热物性参数随温度变化有小幅的变化, 此处认为热物性为常数, 其主要性能参数见表 1。

表 1 316 不锈钢的特性参数

参数	数值
导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)	16.3
弹性模量/MPa	206
屈服强度/MPa	310
热膨胀系数/(×10 ⁻⁶ K ⁻¹)	16
比热 c/(J·(kg·K) ⁻¹)	502
泊松比 ν	0.3
密度 ρ /(kg·m ⁻³)	8030
摩擦因数 μ	0.15
环境温度 T/℃	20

2.4.4 滑动摩擦温度的仿真结果和分析

在工作辊转速为 406 r·min⁻¹（对应生产线最低速度为 51 m·min⁻¹）、载荷为 25 N 的情况下，利用 Workbench 对辊端支撑轴承端面 B 与支撑套端面 B' 的磨损生热进行分析，此为瞬态过程，分析时仅可用瞬态动力学分析模块，因此，分析过程中多处使用 APDL 的功能。图 10 为仿真所得支撑套端面 B' 的温度云图。

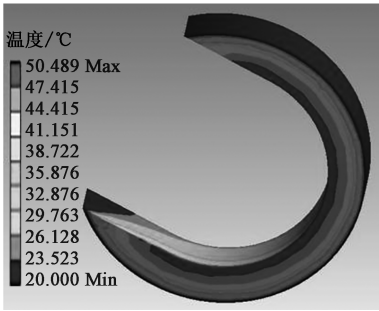


图 10 支撑套端面温度分布图

Fig. 10 Temperature distribution diagram on end surface of support sleeve

由图 10 可知，在载荷为 25 N、转速为 406 r·min⁻¹ 时，历时 3.2 s 即旋转了 22 圈，支撑套端面的最高温度可达到 50.489 ℃，与现场测温枪所测得的 55.000 ℃ 很接近，说明此次仿真是有参考

价值的，同时，也说明了只要辊端支撑轴承发生卡阻或抱死，在最低转速、较小载荷的情况下，同样会在短时间内发生快速磨损，支撑套的温度会迅速上升，为在支撑套上增设磁力热电偶、实现保护性自动控制创造了条件。

3 辊端支撑轴承频繁损坏的解决方法

3.1 合适推力轴承的选用

镀锌为连续生产线，辊盒需满足在线连续使用 3 个月，其工作辊的最大轴向力不超过 500 N。根据辊端轴承现在的结构尺寸，可采用最适合的推力轴承 BA8（SKF），其尺寸为 8 mm×19 mm×7 m，额定动载荷为 3190 N。这样其承载能力可达到原有承载能力的 3.19/1.78≈1.79 倍，寿命为原有寿命的 1.79³≈5.74 倍。

3.2 辊端支撑轴承尺寸和结构的优化

原先使用的推力轴承为 BA6（SKF），尺寸为 6 mm×14 mm×5 mm，其支撑轴端面为圆形（图 11a）。优化后变为承载能力为其 1.79 倍的 BA8（SKF）推力轴承，从而大大提高了辊端支撑轴承承载轴向力的能力。同时，为了保护 and 延长支撑轴表面的磨损，在支撑轴圆形端面中心增加一颗淬硬钢材料的钢球，使其端面“面”接触磨损变为“点”接触磨损，这样大大延长了支撑轴的使用寿命，但是使用中发现在淬硬钢材料的挡块表面有淬硬钢材料的钢球旋转摩擦留下的不规则锥形坑（图 11b），这样磨损后产生的不同心的接触力 F_n （图 11b）将会产生径向分力，使得深沟球轴承的磨损加重，导致最终辊端支撑轴承仍易破坏。轴向力是无法避免的，但是产生的径向力是可以避免的，将淬硬钢挡块改为陶瓷挡块（图 11c）后即解决了这个问题，即使钢球磨损了，也不会留下锥形坑。

3.3 辊系装配质量的提高

辊系的装配质量受到单元辊系内各辊子之间安

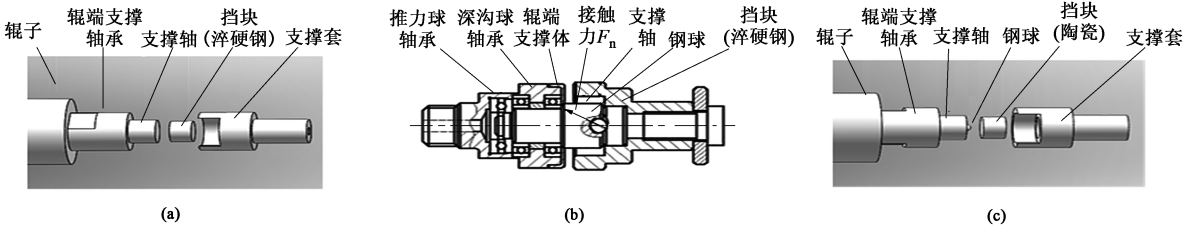


图 11 工作辊、中间辊辊端支撑轴承结构图

(a) 优化前立体图 (b) 优化中剖面图 (c) 优化后立体图

Fig. 11 Structure diagrams of roll end support bearing for work roll and middle roll

(a) 3D view before optimization (b) Sectional view during optimization (c) 3D view after optimization

装精度的影响^[8]，所以，必须对单元内的辊系进行水平方向和垂直方向的校正检测，保证辊系内各辊子的水平度与机组的中心线相互垂直。使得辊系内辊子间的水平度偏差不大于 $0.02\text{ mm}\cdot\text{m}^{-1}$ ，间隙在 0.5 mm 以下。

3.4 拉矫工艺参数的优化

目前，生产线拉矫机控制采用伸长率控制，生产CQ、DQ钢种，屈服强度控制为 $220\sim 350\text{ MPa}$ 。根据性能要求，拉矫机不同规格的工艺参数设定如表2所示^[9]。由表2可知：在拉矫机伸长率的控制模式下，辊盒啮合度和拉矫张力成反比关系。在能满足不同规格带钢伸长率的情况下，尽量减少拉矫机处的张力和增大拉矫处的啮合度。

表2 拉矫机不同规格的工艺参数

Table 2 Process parameters of different specifications for tension leveler				
带钢厚度/ mm	伸长率/ %	啮合度/mm		抗横弯值/ mm
		1号弯曲单元	2号弯曲单元	
<0.6	0.6~0.7	17~20	13~15	20~24
0.6~1.5	0.5~0.6	15~17	12~13	24~26
1.5~2.5	0.4~0.5	14~15	11~12	26~30

拉矫机伸长率的生产控制采用二级给定参数，当出现板形不良或拉矫痕缺陷时，可在适当范围内调整工艺参数。同时，要求喷淋系统的水流量为 $5\sim 8\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ，压力为 0.5 MPa ，这样可以清洗、润滑和冷却拉矫机工作辊，减轻拉矫机工作辊和辊端轴承的磨损。

3.5 伸长率反馈信号的获取

包钢薄板坯连铸连轧厂拉矫机的自动控制系统自身带有一套PDA自动诊断控制分析系统，可以实现在线记录拉矫机运行过程中的技术数据，主要包括伸长率^[10]和啮合度随时间运行的情况（图12）。

图12中，a处为薄带钢，在给定啮合度时达到设定的伸长率；b处为焊缝临近时，拉矫机自动微开时对应的啮合度和伸长率；c处表示由薄带钢变为厚带钢时，伸长率突然下降；d处表示1号弯曲单元的啮合度加大后，伸长率达到了设定要求。受此启发，在HMI画面上设计了一个伸长率反馈信号（图13），假如伸长率小于 0.2% （工艺要求伸长率的最低下限），伸长率反馈信号会由白色变为红色，这时红色信号告知操作工啮合度不够（原因可能为 $2.3\sim 2.5\text{ mm}$ 厚的带钢或辊子有磨损等），需加大啮合系数^[11]。

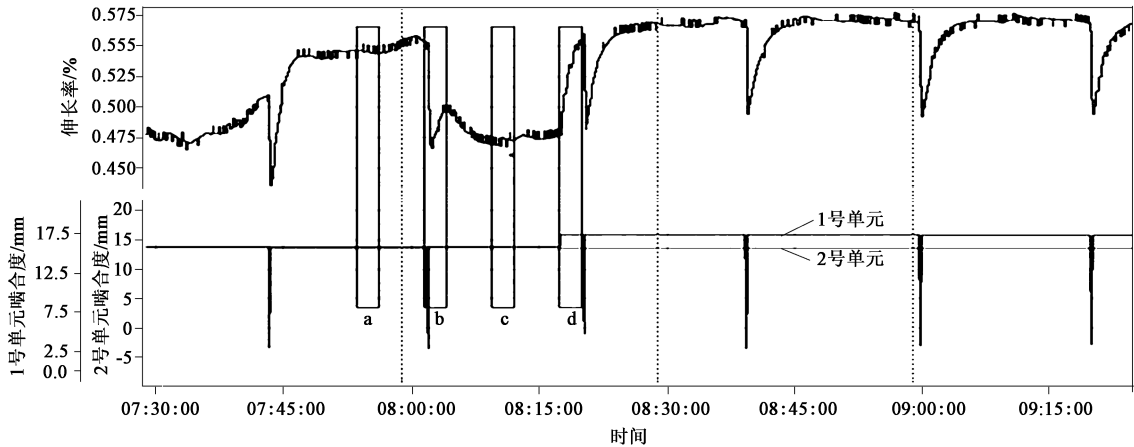


图12 拉矫机的PDA曲线
Fig. 12 PDA curves of tension leveler

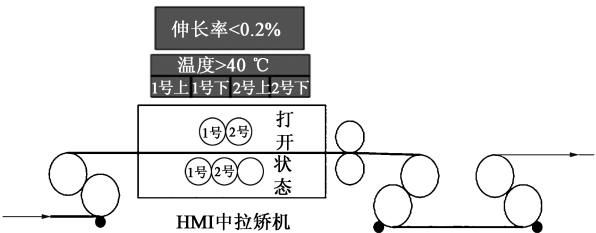


图13 全线HMI中的拉矫机
Fig. 13 Tension leveler in full line of HMI

3.6 温度反馈信号的获取

辊端支撑轴承的温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右，磨损时温度会急剧上升至 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上，为了监控辊端支撑轴承的情况，在支撑套上增设了磁力热电偶^[12-13]。将磁力热电偶的测温端吸附在支撑套上，让其采集毫伏温度信号，再通过变送器和PLC模拟量输入模板，PLC会根据设定的温度作出判断，如果某个支撑套的温度大于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，HMI上对应的温度反馈信号就会由白色

变成红色, 对应单元自动打开, 告知操作工辊端支撑轴承磨损严重, 需及时检查更换, 否则会发生掉辊事故。这一措施真正做到了防止掉辊事故的发生。

4 效果评价

通过以上研究, 本文对解决措施实施前后每月对应新装辊盒中的辊端支撑轴承和工作辊的使用寿命进行了统计, 结果如图 14 所示。

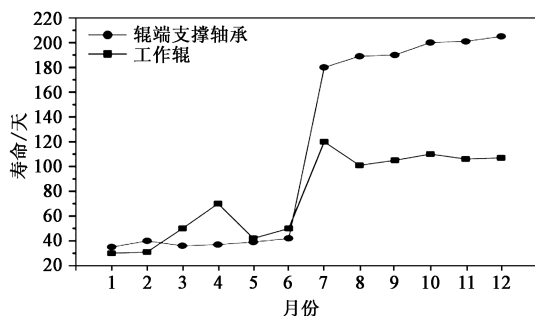


图 14 拉矫机优化前后的使用寿命

Fig. 14 Useful life of tension leveler before and after optimization

从图 14 中可知: 6 月之前, 未实施解决措施, 辊端轴承的平均使用寿命为 38 天, 工作辊的平均使用寿命为 45 天; 实施解决措施之后, 辊端轴承的平均使用寿命为 194 天, 工作辊的平均使用寿命为 108 天。每个弯曲单元每天的平均过钢量为 1167 吨, 经计算, 每个弯曲单元的平均过钢总量由原来的 4.43 万吨变为现在的 12.6 万吨, 从而实现了工作辊和中间辊使用寿命的延长, 减轻了拉矫机操作工的劳动强度和心理负担, 也消除了拉矫机频繁出现的掉辊现象而造成的镀锌板板面划伤和断带停线事故。

5 结语

根据镀锌机组拉矫机弯曲单元工作辊的力学分析, 采用多种针对性解决办法后, 不但延长了拉矫机弯曲单元的运行寿命, 而且重点解决了拉矫机经常出现的掉辊事故, 稳定了生产, 实现了降本增效, 提高了产品的质量和产量, 提高了市场竞争力。

参考文献:

- [1] 李九玲. 带钢连续热镀锌 [M]. 第四版. 北京: 冶金工业出版社, 2019.
Li J L. Continuous Hot-dip Galvanizing of Strip Steel [M]. 4th Edition. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2019.
- [2] 孟宪跃, 张洪锐, 霍洪波. 拉伸弯曲矫直机在铝带精整中的应用研究 [J]. 机械设计与制造, 2014, (5): 173-175.
Meng X Y, Zhang H R, Huo H B. A brief analysis of tension-leveling line used for aluminum strip sizing [J]. Machinery Design & Manufacture, 2014, (5): 173-175.
- [3] 刘春浩, 王晓枫, 张锡昌, 等. 微型轴承的失效模式及其对策 [J]. 轴承, 2002, (12): 28-31.
Liu C H, Wang X F, Zhang X C, et al. Failure mode and its countermeasure for miniature bearing [J]. Bearing, 2002, (12): 28-31.
- [4] 李生存, 陈景辉, 王浩宇. 拉矫机工作辊异常磨损和轴头烧损的对策 [J]. 中国冶金, 2018, 28 (10): 51-56.
Li S C, Chen J H, Wang H Y. Countermeasures for inordinate wearing and axle neck burning of work roll in tension leveler [J]. China Metallurgy, 2018, 28 (10): 51-56.
- [5] 张小丽, 王保建, 马猛, 等. 滚动轴承寿命预测综述 [J]. 机械设计与制造, 2015, (10): 221-224.
Zhang X L, Wang B J, Ma M, et al. A review of life prediction for roller bearing [J]. Machinery Design & Manufacture, 2015, (10): 221-224.
- [6] 甘信滨. 滑动摩擦温度场及传热过程熵产生分析 [D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
Gan X B. The Analysis of Sliding Friction Temperature Field and Entropy Production of Thermal Transfer Process [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [7] 宋少云, 尹芳. 有限元网格划分中的圣维南原理及其应用 [J]. 机械设计与制造, 2012, (8): 63-65.
Song S Y, Yin F. Saint vaint principle of meshing in finite element method and its application [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012, (8): 63-65.
- [8] 宋全斌, 马林, 刘维. 提高重卷拉矫辊寿命的优化 [J]. 重型机械, 2016, (4): 70-73.
Song Q B, Ma L, Liu W. Measures for improving the service life of recoiling pulling-straightening roller [J]. Heavy Machinery, 2016, (4): 70-73.
- [9] 马龙, 任学平, 高照. 镀锌机组拉矫机辊端支撑轴承磨损分析和对策 [J]. 重型机械, 2021, (6): 63-67.
Ma L, Ren X P, Gao Z. Analysis and countermeasures for wear of roll end support bearings of tension leveler in galvanizing line [J]. Heavy Machinery, 2021, (6): 63-67.
- [10] 倪泽娅. 酸洗机组拉矫机的国产化开发与研究 [J]. 机械设计与制造, 2015, (5): 119-121, 126.
Ni Z Y. Design and research of tension leveller [J]. Machinery Design & Manufacture, 2015, (5): 119-121, 126.
- [11] 李九玲, 许秀飞, 李守华. 带钢连续热镀锌生产问答 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
Li J L, Xu X F, Li S H. Questions and Answers on Continuous Hot-dip Galvanizing of Strip Steel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.
- [12] 范晶晶, 汪木兰, 左健民, 等. 高速切削温度的二维热传导模型建立及求解 [J]. 机械设计与制造, 2014, (1): 84-87.
Fan J J, Wang M L, Zuo J M, et al. 2-D heat conduction model of high-speed cutting temperature and its solution [J]. Machinery Design & Manufacture, 2014, (1): 84-87.
- [13] 朱红霞, 沈兴全. 金属切削温度测量方法的研究 [J]. 煤矿机械, 2014, 35 (1): 96-98.
Zhu H X, Shen X Q. Research on measurement methods of metal cutting temperature [J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35 (1): 96-98.