

热镀锌连续退火炉炉辊高温变形机理与结构优化

李潇逸 岳伟超

安钢集团冷轧有限责任公司 河南 安阳 455000

摘 要：作为热镀锌连续退火炉的核心输送构件，炉辊长期处于高温、交变载荷的复杂工况中，易产生多种结构性变形，扰乱退火设备运行秩序与生产连续性。本文结合炉辊服役环境、结构形制与材料特性，逐一厘清塑性变形、高温蠕变、热应力翘曲及温度疲劳变形的生成机理，逐层剖析温度场分布、结构参数、材质特性及服役载荷对形变发展的影响逻辑，结合变形诱因搭建多维度结构优化体系，通过辊体、支撑、散热、补强结构的针对性改良，提升炉辊高温服役稳定性，为相关设备结构提质提供理论支撑。

关键词：连续退火炉；炉辊；高温变形；变形机理；结构优化

引言：热镀锌连续退火是冷轧钢材改性与表面精加工的关键工艺，炉辊的工作状态对整条生产线运行质量起到决定性作用。炉辊长期置于密闭高温炉腔内部，持续承受带钢压力、摩擦作用力与自身离心力的叠加影响，复杂工况持续损耗结构性能，诱发各类高温变形问题。结构形变会破坏辊体原有精度，引发带钢输送偏移、设备抖动等故障，干扰生产线连续化运行。厘清炉辊高温变形的内在成因与影响条件，开展针对性结构优化，能够有效改善设备服役状态，保障热镀锌生产稳定开展。

1 热镀锌连续退火炉炉辊工况与结构特性

1.1 炉辊基础结构组成

热镀锌连续退火炉炉辊是炉内带钢输送的核心构件，整体采用模块化组合结构。辊体主体为中空管状结构，是承载带钢、传递运行动力的核心载体。辊体两端配套设置辊轴与连接端头，用于对接炉体固定支架和传动装置，保障辊体平稳运转。辊体外表面铺设专用防护涂层，阻隔炉内复杂介质对基体的侵蚀损伤。配套的限位、支撑构件布置于辊体两端，可约束辊体运转过程中的位移偏差。各结构部件分工明确，组合形成完整的承载与传动体系，能够适配退火炉连续化、常态化的生产运行模式^[1]。中空构型的结构设计，可有效降低辊体自重，减少运转过程中的机械能耗损耗。

1.2 炉辊服役高温环境特征

退火炉内部为密闭高温作业空间，炉辊长期处于恒定高温氛围中。炉内温度维持在 480 ~ 660℃金属退火工艺所需的高温区间，环境温度始终保持高位状态，不会出现大幅波动。炉内存在稳定的温度分层状态，炉腔上

下区域存在 30 ~ 50℃固定温差，辊体不同位置会处于差异化的高温环境。炉内氛围包含多种高温气态介质，会持续作用于辊体表面。高温环境会持续改变辊体结构的内部状态，长期高温熏陶会让辊体结构稳定性逐步发生变化。固定的高温环境条件，是引发炉辊结构形变、性能衰减的重要外部条件。

1.3 炉辊长期服役受力特征

炉辊运行过程中持续承受多种静态与动态载荷作用。带钢自重会对辊体表面形成持续性均匀压力，构成辊体基础静态载荷。带钢高速移动过程中，会与辊体表面产生摩擦作用力，形成周期性动态载荷。辊体自身运转会产生离心力，贯穿设备运行的全过程。辊体两端支撑位置会承受集中支撑力，受力分布与辊体中部存在明显差异。各类载荷长期反复作用于辊体不同位置，会让辊体内部产生持续的应力积累。应力的长期留存与反复叠加，会逐步改变辊体内部结构状态，为高温环境下的结构变形提供力学条件。

1.4 炉辊基材与涂层高温物理特性

炉辊基材选用耐高温合金材质，具备适配高温工况的基础力学性能。高温环境下，基材的刚度、强度会发生规律性衰减，结构稳定状态与常温工况存在明显差异。基材具备固定的热膨胀属性，温度升高会产生规律性的体积与尺寸形变。表层防护涂层拥有独立的高温物理属性，耐高温、抗氧化性能优于合金基材。涂层与基材的热膨胀系数存在固有差值，高温环境下两类材料的形变幅度无法保持统一。两种材料的高温物性差异，会促使辊体内部产生结构性附加应力，制约辊体高温服役稳定性。材料自身的高温特性，是决定炉辊抗变形能力

的核心内在因素。

2 热镀锌退火炉炉辊高温变形类型与产生机制

2.1 炉辊高温塑性变形机制

高温工况会大幅降低合金基材的屈服强度与承载极限,打破材料常温状态下的力学平衡。炉辊持续承接带钢传递的载荷应力,应力数值超出高温状态下材料所能承受的临界范围。金属内部晶粒结构会发生滑移与错位运动,微观结构出现不可逆的形态改变。这类结构变化无法通过温度回落或载荷卸载实现恢复,会留存为永久性结构形变^[2]。炉辊长期处于高温承压状态,微观晶粒的滑移程度会持续加深。塑性变形会逐步累积在辊体中段受力集中区域,改变辊体原始平直结构形态。

2.2 炉辊高温蠕变变形机制

高温环境持续作用于炉辊基材,金属材料会产生缓慢且持续的蠕变行为。恒定高温与固定载荷的长期作用,会让金属晶粒边界出现缓慢滑移。晶粒内部会产生细微空洞与位错增殖,微观缺陷随运行时长不断累积。形变发展速度相对平缓,不会在短时间内显现明显变化。设备长期连续运行的工况,会让蠕变形变不断累加。形变程度会随服役时长逐步加剧,最终造成辊体轴向弯曲、径向尺寸改变等宏观问题,破坏炉辊整体结构精度。

2.3 炉辊热应力诱发翘曲变形机制

退火炉内部温度场分布存在不均匀特征,炉辊不同区域受热程度存在差异。辊体表层与内部、中段与两端会形成 25~45℃ 稳定温度梯度。不同区域的材料热膨胀幅度存在区别,膨胀进程相互约束限制。约束作用会在材料内部生成附加热应力,热应力分布呈现区域化差异,局部热应力峰值可达 85MPa 以上。局部热应力数值超过材料抗形变阈值后,辊体结构会发生弯曲翘曲。这类变形完全依托温度梯度产生,是高温环境下结构受热不均引发的典型形变问题。

2.4 炉辊交变温度下疲劳变形机制

热镀锌生产线的启停操作、工艺参数调整,都会让炉辊所处环境温度出现反复升降变化。温度升高阶段,辊体金属结构发生热膨胀。温度降低阶段,金属结构收缩复位。反复的膨胀收缩循环,会让辊体内部应力状态不断更迭转换。长期循环作用会损伤金属微观组织结构,细微裂纹从应力集中位置逐步萌生、拓展。微观损伤层层累积后,会引发不可逆的宏观疲劳变形。变形多集中在辊体轴头、辊身过渡段等应力集中区域,破坏辊体结构均匀性。频繁的温度交变工况

会持续加剧结构损伤,逐步削弱炉辊结构稳定性,缩短炉辊整体服役周期。

3 炉辊高温变形核心影响因素分析

3.1 温度场分布对炉辊变形的影响

热镀锌连续退火炉内部温度场具备非均匀分布特征,炉腔内部不同区域的热能密度存在明显区别。炉辊横跨炉腔整体空间,辊体各区段接收的热能辐射量存在差异。辊体中心区域长期处于炉腔高温核心区,受热强度更高且受热时间更久。辊体两端靠近炉壁与密封结构,散热条件更好,整体温度水平相对偏低。这种全域性的温度差异会在辊体内部形成稳定梯度,驱动不同位置产生差异化热膨胀行为^[3]。膨胀过程受到材料内部结构约束,原生热应力会持续积聚。温度场的不均匀程度会直接改变应力积累量级,加剧辊体弯曲与形变趋势。温度场的动态波动也会打乱材料内部结构平衡,加速微观缺陷的生成与扩展。

3.2 炉辊自身结构参数对变形的影响

炉辊整体结构参数直接决定自身刚度与高温承载能力,是调控变形程度的关键结构性条件。辊体壁厚、辊身长度、轴头结构尺寸等参数,都会改变辊体整体的力学承载特性。壁厚数值会影响辊体蓄热能力与结构刚度,厚度不足会削弱高温抗变形能力。辊身长度越大,辊体跨距对应的抗弯性能越弱,高温环境下更易产生弯曲形变。辊体中空结构的孔径设计,会改变材料截面受力分布,影响内部应力传导规律。端部支撑结构的尺寸与构型,会改变受力支撑点位的分布形式,让辊体应力集中区域发生偏移。各类结构参数的匹配程度,决定炉辊在高温工况下的结构稳定性。

3.3 炉辊材质性能对高温变形的影响

炉辊基材与表面涂层的材料属性,从本质上决定炉辊耐受高温形变的基础能力。不同合金基材的高温强度、热膨胀系数、抗蠕变性能存在明显区别。高温环境下,材质耐高温强度不足会导致微观晶粒极易发生位错滑移,催生塑性变形。材质热膨胀系数偏大时,温度变化引发的尺寸形变幅度会显著提升,增大热应力产生概率。材料抗蠕变性能较差的炉辊,长期高温承压过程中会持续产生不可逆形变。表层防护涂层的耐高温与热稳定性能,也会影响辊体整体受热状态。涂层性能衰减会让基材直接暴露于高温介质中,弱化炉辊整体的抗变形性能。

3.4 服役载荷状态对炉辊变形的影响

退火炉连续生产过程中,炉辊需要长期承接带钢传

递的各类载荷。载荷大小、作用时长与分布形式，都会对炉辊形变产生直接影响。稳定的静态载荷会让辊体内部保持长期应力积累，诱发缓慢的蠕变变形。动态交变载荷会持续扰动辊体内部应力状态，加重微观结构的疲劳损伤。载荷集中于辊体局部区域时，该区域应力密度会大幅提升，超出材料高温承载极限后就会产生永久性形变。长期不间断的服役模式，会让载荷带来的结构损伤持续叠加。载荷工况的稳定性与合理性，直接关联炉辊高温变形的发展速度与形变程度。

4 热镀锌连续退火炉炉辊结构优化策略

4.1 炉辊辊体整体结构优化

炉辊整体结构优化以提升高温刚度、弱化形变趋势为核心目标，通过合理化调整结构参数改善高温服役性能。结合退火炉实际工况适配优化辊体中空截面尺寸，合理配比壁厚与孔径参数，在提升截面抗弯性能的同时控制辊体蓄热总量。优化辊身长度设计，结合炉腔跨度规划合理辊体跨距，缓解大跨距结构在高温环境下的弯曲变形问题。规整辊体外轮廓形态，保障辊身表面均匀平整，实现带钢载荷均匀分布，规避局部应力集中缺陷。统一辊体截面规格，保证辊身各区域刚度均衡，削弱温度梯度引发的差异化形变。精细化的整体结构设计，可从根源提升炉辊适配高温、高负荷工况的基础性能，稳定炉体长期运行的结构精度^[4]。

4.2 炉辊端部支撑结构优化

端部支撑结构是承载辊体载荷、传递结构应力的重要部位，结构形式对炉辊整体稳定性影响显著。优化支撑结构的布局形式，调整支撑点位的受力范围，分散辊体两端的集中应力。改良支撑结构的截面构型，提升端部结构整体刚度，降低高温环境下支撑部位的形变概率。优化轴头与支撑构件的衔接形式，缩减衔接缝隙带来的受力不均问题，保证辊体运转过程中受力均匀。强化支撑结构的抗温变形能力，适配炉体高温环境，避免支撑构件形变引发辊体偏移、弯曲等问题。合理的端部结构改良可以有效约束辊体形变幅度，减少因支撑体系缺陷产生的次生结构变形。

4.3 炉辊散热与均温结构优化

温度分布不均是诱发炉辊热变形的核心诱因，均温与散热结构优化可有效弱化温度梯度带来的负面影响。在辊体内部增设适配的散热构造，引导辊体内部热量均匀传导，缩减辊身中心与两端的温度差值。优化辊体表面热传导结构，提升表层散热效率，削弱局部高温积聚

现象。规整炉辊受热与散热结构布局，让辊体整体处于相对均衡的温度环境，减少差异化热膨胀行为。改良结构通风与换热条件，提升炉辊温度自适应调节能力，缓解炉腔温度波动对辊体结构的冲击。均温与散热结构的完善，能够稳定辊体温度状态，大幅降低热应力诱发的翘曲、弯曲等变形问题。

4.4 炉辊抗变形补强结构优化

针对炉辊高温蠕变、疲劳变形等问题，可通过增设补强结构提升辊体抗形变能力。在辊体应力集中的中段区域设置补强构件，提升核心受力区域的结构强度与刚度，抵抗长期载荷与高温带来的形变损伤。优化补强结构的铺设方式，保证补强构件与辊体基体紧密结合，实现应力高效传导与分散。选用适配高温工况的补强结构形式，规避补强构件自身高温失效问题，维持长期稳定的补强效果。结合炉辊变形规律针对性布置补强结构，聚焦易变形区域进行结构强化，弥补原始结构的性能短板^[5]。补强结构的合理设计可以持续提升炉辊高温服役稳定性，延缓各类不可逆变形的发展进程。

结束语

热镀锌退火炉炉辊的高温形变问题由工况条件、结构设计及材料特性多重因素共同引发，各类变形机制相互关联、共同影响炉辊服役精度。针对炉辊塑性、蠕变、热应力翘曲及温度疲劳变形的产生特点，通过调整辊体整体构型、优化端部支撑形式、均衡辊体温度分布、增设局部补强结构等方式，可全面改善炉辊高温受力与受热状态，有效抑制不可逆形变的持续发展，切实增强炉辊高温工况下的结构强度与运行稳定性，为退火炉炉辊结构改良与长效稳定服役提供可靠的理论参考。

参考文献

- [1] 王德顺, 王建涛. 带钢连续热镀锌机组退火炉工艺和设备及技术发展趋势 [J]. 工业炉, 2025, 47(5): 13-16.
- [2] 金琳, 孙抗, 黄宾, 等. 热镀锌退火炉感应加热器的应用与实践 [J]. 山西冶金, 2025, 48(1): 185-187.
- [3] 刘睿平, 姚养库, 俞洪杰, 等. 连续热镀锌线卧式NOF退火炉边部脱锌问题成因分析及改进 [J]. 山西冶金, 2025, 48(6): 154-156, 159.
- [4] 李庆刚, 梅锐东, 毛然, 等. 热镀锌机组退火炉烧嘴空燃比调整与故障分析 [J]. 金属世界, 2025(2): 62-65.
- [5] 吴德东. 镀锌线薄板生产中退火炉加热控制技术 [J]. 世界有色金属, 2025(15): 43-45.