

连续退火炉辐射管支撑件高温疲劳失效及结构改进

岳伟超 李潇逸

安钢集团冷轧有限责任公司 河南 安阳 455000

摘 要: 针对连续退火炉辐射管支撑件高温疲劳失效频发问题, 本文结合高温疲劳基础理论, 通过宏观微观形貌检测、数据统计及有限元仿真, 明确构件应力集中、热膨胀受限、疲劳蠕变耦合损伤是核心失效诱因。据此开展结构优化设计, 改进圆角结构、约束形式与支撑布局。工程实践表明, 改进结构显著降低应力水平、延长服役寿命, 大幅减少停机损耗, 具备良好的工程应用与经济价值。

关键词: 连续退火炉; 辐射管支撑件; 高温疲劳失效; 结构改进

引言: 辐射管支撑件是连续退火炉的核心承载部件, 长期在750~950℃高温、热循环交变载荷工况下服役, 易出现疲劳开裂、变形失效等问题, 直接影响退火炉运行稳定性与带钢生产质量, 增加设备运维成本。为解决该工程难题, 本文结合失效特征与力学机理, 系统剖析支撑件失效根源, 开展结构优化改进与仿真验证, 旨在提升构件高温服役性能, 为同类设备结构优化与故障治理提供技术参考。

1 连续退火炉辐射管支撑件工作原理及失效基础理论

1.1 连续退火炉辐射管系统结构组成

(1) 辐射管整体采用U形或W形布置形式, 沿炉宽方向多层排列安装, 通过炉壳法兰与外部燃烧系统连接, 管内燃气燃烧加热管壁, 以辐射传热方式将热量传递至炉内带钢。辐射管两端设膨胀节补偿热伸长, 安装时预留定向膨胀间隙。(2) 支撑件采用托辊式或固定滑块式结构。托辊式支撑允许辐射管沿轴向自由膨胀并减少摩擦阻力; 固定滑块式通过点接触或线接触承托辐射管自重, 约束径向位移。支撑件承受辐射管重力载荷及热膨胀产生的摩擦力, 载荷随温度升高呈非线性增加。(3) 退火炉工作温度范围为750~950℃, 炉内气氛为 N_2 和 H_2 混合保护气体, 露点控制在-40℃以下, 带钢运行速度与各区段温度按退火工艺曲线精确调控, 辐射管表面热流密度约为80~120kW/m^{2[1]}。

1.2 高温疲劳失效核心基础理论

(1) 高温疲劳指材料在高温环境下承受交变载荷时, 损伤累积导致断裂的过程, 按载荷形式分为低周热疲劳和高周机械疲劳, 失效特征表现为表面多源裂纹、断口呈疲劳辉纹伴氧化产物附着。(2) 蠕变与疲劳耦合损伤机理为: 拉伸保载期间蠕变孔洞在晶界形核长大, 与疲劳位错滑移损伤相互叠加, 总损伤量偏离线性累积规则, 交互作用因子随保载时间延长而增大, 加速裂纹

早期萌生。(3) 热应力循环作用下, 构件表层受约束热应变产生循环塑性变形, 驻留滑移带优先在表面应力集中处形成, 位错塞积引起局部应力集中超过临界值时启裂, 裂纹沿晶界或滑移带扩展, 扩展速率受氧化加速效应显著提高。

1.3 支撑件常用材料高温力学性能

(1) 支撑件常用ZG40Cr25Ni20或Inconel600系列耐热合金, 室温抗拉强度不低于450MPa, 屈服强度不低于200MPa, 高温持久强度在900℃/100h条件下不低于30MPa。(2) 650℃以上环境中材料疲劳强度较室温下降40%~60%, 蠕变速率随温度升高呈指数增长, 持久强度随服役时间延长明显降低, 残余寿命评估需综合考虑Larson-Miller参数。(3) 高温氧化生成 Cr_2O_3 氧化膜, 膜层在热循环中反复开裂剥落造成金属持续损耗; 热腐蚀由气氛中残余 O_2 、 H_2O 与硫化物共同作用, 腐蚀坑底部应力集中显著, 成为疲劳裂纹优先萌生位置, 大幅缩短支撑件使用寿命。

2 连续退火炉辐射管支撑件高温疲劳失效分析与仿真研究

2.1 支撑件失效宏观与微观特征分析

(1) 失效支撑件宏观形貌显示接触区域存在明显压坑与磨蚀沟槽, 裂纹多起源于接触带边缘及支座固定端焊缝附近, 托辊体表面可见多条平行于轴向的主裂纹及分支网状裂纹, 部分失效件整体弯曲变形量达2.8mm, 氧化皮呈鳞片状剥落, 剥落区金属基体呈暗灰色。(2) 采用扫描电子显微镜对断口进行逐区检测, 裂纹源区呈现多源萌生特征, 源区位于表面氧化凹坑及微动磨损划痕底部, 断口扩展区可见清晰疲劳辉纹, 辉纹间距在0.5~1.5μm范围内呈渐进增大趋势; 瞬断区以沿晶脆性断裂为主, 局部可见韧窝与穿晶解理混合形貌, 结合能谱分析检测到断口表面富集O、Cr、Ni等元素, 判定失效形

式为高温氧化加速下的热机械疲劳断裂。(3)对近三年四个连续退火机组共158件失效支撑件进行统计分析,炉膛中部高温区失效占比64.5%,入口及出口低温区合计占比不足20%;托辊式支撑平均服役寿命约13.5个月,固定滑块式为22个月;每年6至9月高温季节失效频次较全年均值高出约28%,反映出环境温度升高导致炉壳散热恶化进而加剧支撑件热载荷^[2]。

2.2 支撑件失效诱因分析

(1)支撑件服役温度范围为750~950℃,接触区实测最高温度达935℃,单次启停形成约480℃热循环幅值,升温段瞬时升温速率约8℃/min产生显著热冲击效应;炉膛沿长度方向约20℃/m温度梯度引起支撑件各部位热膨胀不一致产生附加热应力;带钢运行及燃烧系统脉动引起辐射管微幅振动通过接触面传递,叠加接触摩擦形成约14MPa交变剪切应力。(2)支撑座过渡圆角半径仅R4,应力集中系数估算达3.5,远超结构抗疲劳设计推荐值;托辊采用双侧固定座约束方式,未设置轴向滑动补偿机构,辐射管约18mm热伸长量受到刚性限制,产生约85MPa附加轴向热压应力,与主应力叠加后局部应力大幅超过材料高温屈服限值^[3]。(3)退火炉年均启停次数约40次,频繁温度波动导致材料反复承受非稳态热循环;设备安装过程中支撑件轴线与辐射管轴线平行度偏差实测最大达7mm/m,接触载荷有效分布宽度降至设计值的55%,局部接触应力峰值超标约45%,加速接触区域过早萌生疲劳裂纹。

2.3 支撑件高温应力有限元仿真建模

(1)依据支撑件实际几何尺寸建立三维实体模型,对螺纹孔、密封槽等非承载特征进行简化,保留圆弧过渡、配合面等关键结构;接触对采用面对面柔-柔接触算法,切向摩擦系数取0.3~0.4,法向采用硬接触无穿透模型;温度边界依据炉膛K型热电偶实测温度经径向插值施加于模型表面,约束端按实际装配方式施加位移边界条件。(2)ZG40Cr25Ni20高温材料参数依据试验数据分段线性输入,涵盖室温至1050℃范围内弹性模量、泊松比、屈服强度、抗拉强度及热膨胀系数;蠕变本构采用Norton-Bailey方程,蠕变系数及指数随温度分段赋值;载荷工况包括结构自重、辐射管传递的接触压力以及典型退火工艺曲线对应的非稳态温度场,采用热-力顺序耦合求解策略。(3)网格采用十节点四面体单元(C3D10),接触区局部加密至最小尺寸0.4mm,总单元数约48万;通过三套不同密度网格对比计算,最大等效应力偏差小于3%确认网格收敛性;以试验模态测试前两阶固有频率为参照,仿真值与实测值偏差分别6.2%和

7.8%,验证模型具备工程有效性。

2.4 仿真结果与失效机理验证

(1)稳态高温条件下支撑件最大Mises等效应力位于接触区次表层和支座过渡圆角根部,分别为68MPa和85MPa,均超过900℃下材料持久极限约46MPa,局部峰值应力区域面积约8mm²,与疲劳裂纹实际萌生范围一致;最大累积等效蠕变应变集中固定端内侧,与宏观弯曲变形取向吻合。(2)温度循环工况下接触区应力在16~78MPa范围内呈周期性交变,等效应力幅约62MPa,平均应力随循环周次增加呈松弛趋势,经200次热循环后下降约16%;单个热循环中拉伸保载阶段蠕变应变占总非弹性应变比例约34%~42%,疲劳-蠕变交互参数接近损伤累积非线性区边界^[4]。(3)仿真高应力集中区域与实际失效开裂位置具有一一对应关系,应力峰值核心区与裂纹源位置偏差小于2mm;综合断口特征与仿真结果,判定核心失效机理为热循环应力主导的疲劳裂纹萌生于接触表面微动损伤区,蠕变孔洞在晶界形核长大加速裂纹扩展阶段,二者耦合作用决定支撑件最终失效寿命,应力集中系数过高及接触载荷偏置为关键加速因素。

3 连续退火炉辐射管支撑件结构改进与性能验证

3.1 结构改进设计原则与方案思路

(1)改进设计遵循三项核心原则:一是降低局部应力集中,将所有承载部位过渡圆角放大至合理范围;二是充分适配高温热变形,为辐射管热膨胀预留定向滑动空间;三是提升结构整体稳定性,确保支撑件在长期高温服役条件下保持可靠的承载能力与尺寸精度。(2)针对原有双侧固定约束导致热膨胀受阻、过渡圆角半径过小引发应力集中、支点布局不合理造成接触载荷偏置等核心缺陷,提出以“释放热位移、平滑传力路径、均衡接触应力”为主线的系统性优化思路。(3)初步设计三套改进方案:方案一为增大过渡圆角半径并增设应力释放槽;方案二将双侧固定约束改为一端固定一端滑动,释放轴向热位移;方案三在保持托辊形式基础上优化支点数量与位置,改善接触载荷分布均匀性。

3.2 支撑件具体结构改进设计

(1)将支撑座与托辊连接处过渡圆角由原R4增大至R18,托辊体直径由φ80mm增至φ95mm,接触承载面宽度增加10mm;在托辊两端应力集中区域加工环形应力释放槽,槽深3mm、槽底圆角R4,有效截断主应力传递路径,使理论应力集中系数由3.5降至1.9。(2)将原双侧固定铰座改进为一端固定铰支、一端滑动支承结构,滑动支承座设置长35mm腰形导向孔配合限位挡块,完全释放辐射管约18mm轴向热伸长;固定端连接螺栓更换为

带碟形弹簧组件的高温预紧螺栓, 碟簧采用Inconel718材质, 补偿热态预紧力松弛, 保持连接持久可靠。(3) 增设中间辅助支承辊形成三点均布支承体系, 相邻支承跨距由原600mm优化为400mm+400mm; 支座底板厚度由20mm增至32mm, 两侧对称增设厚度14mm三角形加强筋板, 筋板间距120mm, 显著提升支座抗弯截面模量, 改善接触压力分布均匀性^[5]。

3.3 改进后结构有限元仿真性能对比分析

(1) 改进后结构在相同稳态高温条件下最大Mises等效应力由原85MPa降至47MPa, 降幅达44.7%, 应力峰值低于900℃材料持久极限46MPa约2.2%, 安全裕度由负转正; 应力集中区域由支座根部迁移至接触区次表层, 应力场分布趋于均匀。(2) 温度循环工况下改进结构疲劳寿命仿真值由原约1400次热循环提升至4600次, 增幅约229%; 损伤累积速率由原每循环0.071%降至0.022%, 蠕变应变贡献率由38%降至20%, 疲劳-蠕变交互作用显著削弱, 损伤模式由耦合损伤转为以疲劳损伤为主导。

(3) 结构刚度对比验证显示, 改进后托辊最大变形量由原2.8mm降至1.0mm, 降低64.3%; 支座转角变形减小54%, 接触压力不均匀系数由0.45改善至0.16, 改进结构一阶固有频率提升32%, 热态稳定性与抗振性能显著增强。

3.4 工程应用效果与经济性分析

(1) 改进结构试制完成后选定3号连续退火机组进行现场安装验证, 严格管控支撑件与辐射管同轴度偏差小于1mm/m, 滑动端预留间隙按实测热膨胀量精确调整; 试运行阶段升温速率控制在6℃/min以内, 经72小时热态考核确认结构运行平稳、无异响及卡阻后投入正常生产。(2) 经过12个月实际服役跟踪, 改进后支撑件接触

面无明显裂纹萌生, 表面氧化膜完整连续, 未发生任何断裂失效事件; 同周期内失效数量由原17件降至0件, 辐射管轴线偏移量减少67%, 预计服役寿命由原14个月延长至42个月以上, 失效抑制效果显著。(3) 经济性分析表明, 单套改进支撑件制造成本较原结构增加约23%, 但年更换数量由原12件降至3件, 年备件采购费用下降约62%; 非计划停机时间由年均48小时降至6小时, 减少带钢降级损失约78万元/年, 综合年经济效益约98万元, 投资回收期约5个月, 具有显著推广应用价值。

结束语

本文完成了辐射管支撑件高温疲劳失效机理分析与结构优化改进, 有效解决了原结构应力集中、热位移受限、载荷分布不均等核心问题。改进后构件应力水平、变形量大幅降低, 疲劳寿命显著提升, 现场应用效果优异, 经济效益突出。研究明确了高温工况下疲劳-蠕变耦合失效规律, 可为热处理高温承载构件的结构设计、故障防控及性能升级提供可靠的工程借鉴与理论支撑。

参考文献

- [1]徐家强,李明明.连续退火炉W型辐射管破损机理及结构优化研究[J].冶金能源,2024,43(01):41-44.
- [2]王磊,张军,刘瑞.退火炉辐射管支撑结构热疲劳失效分析与改进[J].工业炉,2024,46(03):56-60.
- [3]陈宇,赵鑫.高温炉管支撑约束结构应力缺陷及延寿技术研究[J].机械强度,2023,45(06):142-147.
- [4]李超,王明远.310S不锈钢辐射管高温热疲劳损伤及结构优化[J].热处理技术与装备,2025,46(02):33-38.
- [5]周浩.连续退火炉辐射管振动疲劳耦合失效及支撑改造[J].冶金设备,2024,15(04):45-48.