

冷轧硅钢连续退火炉碳套辊结瘤机理及耐磨熔覆结构设计

赵富光 王艳艳 吕 静 甘绍壮

安钢集团冷轧有限责任公司 河南 安阳 455000

摘 要: 冷轧硅钢连续退火炉碳套辊长期在高温还原性气氛工况下服役, 极易出现表面结瘤与磨损失效问题, 严重影响硅钢成品表面质量与产线生产效率。本文系统研究碳套辊结瘤形貌特征与形成机理, 分析工艺、设备及材质对结瘤生长的影响规律, 针对性设计Ni基梯度复合耐磨熔覆结构并完成参数优化。试验表明, 该结构可显著提升辊面耐磨抗结瘤性能, 延长服役周期, 具备良好的工程应用价值。

关键词: 冷轧硅钢连续退火炉; 碳套辊结瘤机理; 耐磨熔覆结构设计

引言: 连续退火工艺是冷轧硅钢生产的核心工序, 碳套辊作为炉内关键承载与传动部件, 其表面状态直接决定带钢退火质量。高温热循环、带钢粉尘粘附及复杂炉内气氛耦合作用下, 辊面易生成致密结瘤并伴随磨损剥落, 引发粘钢、压痕等质量缺陷。现有防控手段存在时效短、防护性能单一等弊端。为此本文开展结瘤机理分析与熔覆结构优化设计, 为长效防护技术升级提供理论与实践依据。

1 冷轧硅钢连退炉碳套辊服役特性及结瘤特征分析

1.1 连续退火炉及碳套辊设备工艺参数

(1) 连退炉整体结构、分区工况及保护气氛参数。连退炉沿带钢运行方向依次划分为预热段、加热段、均热段、缓冷段、快冷段及过时效段, 各分区温度呈梯度分布, 炉内通入 N_2-H_2 混合保护气氛, H_2 体积分数控制在5%~10%, 露点不高于-40℃, 以确保带钢表面清洁并防止氧化。(2) 碳套辊结构参数、材质特性及服役环境。碳套辊由芯轴、碳套及两端挡环组成, 碳套材质以等静压石墨或碳-碳复合材料为主, 具有优良的耐热震性和高温自润滑性能。服役环境温度为800~1050℃, 承受带钢张力及热循环载荷, 炉辊表面线速度可达150m/min以上。(3) 硅钢退火生产工艺对炉辊表面状态的要求。为满足硅钢表面质量及磁性能要求, 炉辊表面应保持较高的光洁度与圆度, 粗糙度 Ra 一般控制在0.8~1.6 μm , 且表面无氧化皮、裂纹及严重磨损缺陷, 以确保带钢运行平稳、受热均匀。

1.2 碳套辊结瘤形貌、成分及类型特征

(1) 现场结瘤试样采集与宏观、微观形貌表征。选取服役不同周期的碳套辊, 在其表面结瘤密集区域截取试样。宏观观察显示结瘤呈点状、片状或不规则团絮状

分布, 微观SEM形貌表明结瘤物与碳套基体界面清晰, 局部可见熔融铺展及嵌入特征。(2) 结瘤物元素成分、物相组成检测分析。EDS能谱分析表明结瘤物主要含Fe、O、Si、Mn、Al等元素, XRD物相鉴定其主相为 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 及铁橄榄石(Fe_2SiO_4)等氧化物, 同时检测到少量 Al_2O_3 、MnO等复合氧化物相^[1]。(3) 粘附型、反应型两类结瘤的特征差异与分布规律。粘附型结瘤以机械镶嵌和物理粘附为主, 呈疏松多孔状, 多分布于辊面中部磨损轻微区域; 反应型结瘤则因 SiO_2 与碳套基体发生固相反应生成SiC及CO气体, 结构致密且与基体结合牢固, 多出现在温度较高、张力波动频繁的加热段和均热段。

1.3 碳套辊磨损失效形式与耦合缺陷分析

(1) 高温工况下碳套辊磨损失效类型及特征。主要含磨粒磨损(辊面产生犁沟状划痕)、氧化磨损(表层脆化剥落)和疲劳剥落(微裂纹扩展形成片状剥落坑)三种形式。(2) 结瘤与磨损的耦合失效机制。结瘤凸起优先承受压应力, 加剧局部磨损; 磨损产生的磨屑和微裂纹为结瘤提供附着位点, 二者形成“结瘤—磨损—加剧结瘤”正反馈循环, 显著缩短服役寿命。(3) 辊面缺陷诱发硅钢表面质量缺陷机制。结瘤与磨损坑在高温高压接触下, 以机械压印方式产生周期性压痕、划伤及氧化色差, 严重时形成麻坑和粘钢点, 影响涂层附着性与磁性能均匀性。

2 冷轧硅钢连续退火炉碳套辊结瘤形成机理及关键影响因素研究

2.1 碳套辊结瘤核心形成机理

(1) 炉内碳氢化合物高温催化裂解沉积机理。残存轧制油在炉内高温下发生催化裂解反应, 碳氢化合物在碳套辊表面活性位点分解生成游离碳和氢气, 游离碳以

无序石墨态沉积于辊面,构成结瘤初始碳质核心层,为后续颗粒粘附提供基底。(2)硅钢表面氧化产物、粉尘粘附聚集生长机理。硅钢表面生成的 FeO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 等微细氧化颗粒与炉内悬浮粉尘在热泳力和静电力驱动下向辊面迁移,以碳质核心为基底逐层粘附堆积,形成疏松多孔的初始结瘤体。(3)高温气氛、温度场作用下结瘤长大与固化机理。初始结瘤体在长期高温服役中发生烧结致密化, FeO 与 SiO_2 反应生成低熔点铁橄榄石(Fe_2SiO_4)液相填充颗粒间隙,经冷却固化后使结瘤体致密长大并与基体牢固结合。

2.2 工艺参数对结瘤形成的影响规律

(1)退火温度、保温时间对结瘤生成速率的影响。温度升高显著加速裂解及氧化反应速率, 850°C 升至 1050°C 时结瘤速率呈指数增长;结瘤厚度与服役时间近似抛物线关系,前期生长迅速、后期趋于饱和。(2)炉内保护气氛组分、压力参数的影响机制。 H_2 浓度升高增强还原性,可抑制硅钢氧化但加速碳套损耗;微量 H_2O 和 O_2 促进 FeO 生成,为铁橄榄石反应提供必要条件,露点升高则结瘤风险显著增加^[2]。(3)带钢运行张力、运行速度对结瘤粘附的影响。张力增大提升接触压力,增强粉尘向辊面压附驱动力;速度提高增加单位时间残留物带人总量及碰撞频率,二者均有利于结瘤的粘附和生长。

2.3 设备与材质因素对结瘤的影响

(1)碳套辊基体材质、表面粗糙度的影响。高孔隙率材质易嵌入粉尘形成机械锚固点;粗糙度 $R_a < 0.4\mu\text{m}$ 时粘附难度增大, $R_a > 2.0\mu\text{m}$ 时粗糙沟槽为沉积提供有利条件,适度低粗糙度有利于抑制结瘤。(2)炉辊安装精度、运行振动对结瘤分布的影响。安装偏心或不对中引起周期性振动,导致局部接触应力集中并诱发微磨损区,这些区域优先成为结瘤选择性生长的优势位点,造成辊面周向不均匀斑块状分布。(3)设备积灰、残余杂质对结瘤诱导的作用机制。炉底积灰在气流扰动下扬起增加悬浮颗粒浓度;带钢表面残余氯、硫等杂质挥发后与氧化物反应生成低熔点相,显著降低结瘤初始形成温度阈值。

2.4 结瘤失效风险评估与管控难点

(1)不同工况下结瘤生成风险等级划分。依据退火温度、气氛露点、带钢清洁度及服役周期,划分为低风险($< 850^\circ\text{C}$ 、露点 $< -50^\circ\text{C}$)、中风险($850 \sim 950^\circ\text{C}$)、高风险($> 950^\circ\text{C}$ 且清洁度较差)三个等级,便于分级管控^[3]。(2)现有结瘤防控手段的局限性分析。离线打磨周期短、劳动强度大且易损伤辊面;在线刮刀效果有限;调整工艺参数仅能延缓而无法根除结

瘤;防护涂层在高温长周期服役下易剥落失效,均缺乏长效解决方案。(3)高温耐磨、抗结瘤一体化防护的技术难点。理想方案需同时满足抗磨损、抗结瘤附着及长期热稳定三重性能,但现有技术难以实现“低表面能防粘附”与“高硬度耐磨损”的协同匹配,涂层与碳套基体热膨胀系数差异导致的热失配问题构成一体化防护的核心瓶颈。

3 冷轧硅钢连续退火炉碳套辊耐磨抗结瘤熔覆结构设计及优化

3.1 熔覆涂层设计目标与选材原则

(1)耐磨、抗结瘤、耐高温的综合性能设计指标。新型熔覆涂层需满足 $800 \sim 1100^\circ\text{C}$ 长期服役要求,具体指标为:高温摩擦系数 ≤ 0.45 , 850°C 磨损率 $\leq 0.5 \times 10^{-6} \text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,结瘤附着面积较无涂层碳套降低60%以上,涂层与基体结合强度 $\geq 50 \text{MPa}$,且抗热震循环(室温 $\rightleftharpoons 1100^\circ\text{C}$)50次后无剥落开裂。(2)高温合金熔覆材料体系筛选(Ni基、Cr基合金)。对比Ni基(Ni-Cr-Si-B)与Cr基(Cr_3C_2 -NiCr)两类体系:Ni基合金润湿性佳、与石墨基体热膨胀匹配较好,适合作为主体熔覆材料;Cr基合金高温硬度高但脆性较大。综合选定Ni基合金为主体系,复合添加 Cr_3C_2 硬质增强相(15%~30%)和h-BN固体润滑相(3%~5%),兼顾耐磨与抗粘附双重要求^[4]。(3)涂层与基体冶金结合合适配性分析。碳套基体为等静压石墨,与金属涂层物性差异显著。通过添加Ti、Si等活性元素,在激光熔覆过程中诱发界面反应生成TiC、SiC梯度碳化物过渡层,实现从碳素基体向金属涂层的成分渐变过渡,缓解热膨胀系数失配带来的界面应力集中,形成可靠的冶金结合界面。

3.2 新型耐磨熔覆结构整体方案设计

(1)单层、梯度复合熔覆结构对比设计。单层结构工艺简单,但因涂层与基体热膨胀系数差异大,高温下界面热应力易致开裂失效。梯度复合结构设计由内向外设三层:底层过渡层(Ni-Cr-Ti, 0.2mm)、中间缓冲层(Ni-Cr-Si-B+10% Cr_3C_2 , 0.5mm)、表层功能层(Ni-Cr-Si-B+25% Cr_3C_2 +5%h-BN, 0.3mm),通过成分渐进过渡消除热应力集中,为优选方案。(2)辊面分区熔覆结构设计。依据碳套辊服役状态差异实施分区熔覆:辊面两端近挡环区域以磨损为主,采用耐磨强化层(厚度1.2mm);辊面中部为结瘤高发区,采用抗结瘤功能层(厚度0.8mm),表层附加微结构。两区域间设置宽度5mm的成分渐变过渡带,确保辊面性能连续过渡^[5]。(3)基于抗沉积、耐磨耗的表面微观结构优化设计。在表层功能层引入激光加工复合微结构,包括蜂窝

状微凹坑（直径 $80\mu\text{m}$ 、深度 $30\mu\text{m}$ 、间距 $150\mu\text{m}$ ）和定向导流微沟槽（宽度 $50\mu\text{m}$ 、深度 $20\mu\text{m}$ 、间距 $300\mu\text{m}$ ）。凹坑可捕获初期结瘤微颗粒避免聚集长大，沟槽引导高温气流冲刷带走沉积物并促进润滑介质驻留，协同降低结瘤粘附和摩擦磨损。

3.3 熔覆结构工艺参数仿真优化

（1）熔覆温度、扫描速度、送粉量参数仿真分析。建立激光熔覆热-流-固耦合模型，对激光功率 $2\sim 5\text{kW}$ 、扫描速度 $3\sim 15\text{mm/s}$ 、送粉量 $8\sim 25\text{g/min}$ 进行正交仿真。结果表明峰值温度 $1350\sim 1500^\circ\text{C}$ 时界面反应充分且基体热损伤最小；扫描速度 $8\sim 12\text{mm/s}$ 、送粉量 18g/min 条件下稀释率低于 8% ，涂层平整致密，为最优工艺窗口。（2）涂层残余应力、致密性仿真与结构优化。采用ANSYS热-力耦合分析，模拟冷却过程温度梯度及残余应力分布。梯度复合结构界面最大拉应力 185MPa 降至 92MPa ，降幅达 50.3% ；进一步优化三层厚度比例为 $1.0:2.5:1.5$ 时应力分布最均匀，涂层气孔率仿真值 $\leq 1.2\%$ ，致密性满足服役要求。（3）高温工况下涂层耐磨、抗粘附性能模拟验证。基于Archard磨损模型与颗粒粘附动力学，模拟 $800\sim 1050^\circ\text{C}$ 下磨损深度与结瘤沉积速率演变。仿真显示优化涂层在 1000°C 连续运行 720h 后磨损深度仅 0.08mm ，结瘤覆盖率较无涂层碳套降低 68.5% ，预测耐磨寿命达普通碳套辊的 2.6 倍。

3.4 熔覆结构性能测试与效果分析

（1）熔覆涂层力学性能、耐磨性能试验测试。梯度涂层断面硬度呈梯度分布：表层 $\text{HV}_{0.025}850\sim 920$ ，过渡层 $\text{HV}_{0.025}520\sim 600$ 。 900°C 高温摩擦磨损试验（载荷 50N ，对磨 Si_3N_4 ）显示，优化涂层摩擦系数 $0.38\sim 0.42$ ，磨损率 $0.38\times 10^{-6}\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ ，较碳套基体（ $3.8\times 10^{-6}\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ ）提升一个数量级。（2）高温抗结瘤、抗粘附

性能对比试验。将涂层试样与无涂层碳套试样置于连退炉模拟环境（ 1000°C 、 $\text{H}_25\%+\text{N}_2$ 平衡气、持续通入氧化物粉尘）运行 500h 。涂层试样单位面积结瘤附着量 4.6g/m^2 ，结瘤呈离散微小颗粒；无涂层试样附着量 15.8g/m^2 ，结瘤呈连续片状致密烧结层，抗结瘤效果提升约 70.9% 。

（3）优化后熔覆结构的工程应用效果预判。基于试验数据推算，应用梯度复合熔覆结构后碳套辊平均服役周期由现行约 45 天延长至 $110\sim 120$ 天，单辊全寿命修磨次数由 $6\sim 8$ 次减至 $2\sim 3$ 次，单条产线年节约辊耗及修磨成本 $85\sim 120$ 万元；带钢结瘤缺陷降级率预计由 2.3% 降至 0.8% 以下，综合经济效益显著。

结束语

本文完整揭示了碳套辊结瘤生成、固化长大及磨损失效的耦合作用机制，完成了耐磨抗结瘤一体化梯度熔覆结构的设计、仿真优化与性能验证。优化后的熔覆涂层有效解决了传统涂层热失配、耐磨与抗粘附性能难以协同的技术难题，可大幅降低辊耗与产品缺陷率。后续可进一步适配多工况参数优化工艺，推动该防护技术在硅钢退火产线的广泛应用。

参考文献

- [1]于浩淼,汤小超,王磊.硅钢退火炉炉辊炭套结瘤机理研究及解决对策[J].电工钢,2024,6(5):36-42.
- [2]万伟斌.冷轧硅钢连续退火炉碳套辊结瘤成因及防控技术研究[J].工程技术,2025,11(12):198-201.
- [3]孙帅,许铭.退火炉炉辊结瘤的原因与解决措施[J].金属世界,2022,13(2):56-60.
- [4]尹开波.连续退火机组碳套辊结瘤原因分析及查找方法[J].冶金动力,2022,27(2):78-81.
- [5]张宇,李建军,王晨旭.硅钢退火炉辊激光熔覆耐磨抗结瘤涂层性能研究[J].热加工工艺,2023,52(18):92-96.