

硅钢连续退火炉炉底辊材质演化及未来趋势展望

胡惠东

宝山钢铁股份有限公司硅钢事业部, 上海

收稿日期: 2025年12月1日; 录用日期: 2026年1月29日; 发布日期: 2026年2月6日

摘要

炉底辊是硅钢连续退火炉中的关键核心部件, 其性能直接关系到生产线的稳定运行、硅钢产品的表面质量和成品率。本文主要对比分析了耐热合金辊、石英陶瓷辊和碳化硅结合氮化硅陶瓷辊等主流炉底辊类型的材质特性、应用表现及优缺点。结果表明, 碳化硅结合氮化硅陶瓷材质炉底辊在高温稳定性、抗结瘤性和表面质量维护方面具有显著优势, 以此为基础的梯度功能材料应用、辊体结构优化、表面功能性涂层及智能化与状态监控等是未来高牌号硅钢连续退火炉炉底辊的重要发展方向。

关键词

连续退火炉炉底辊, 耐热合金, 石英陶瓷, 碳化硅结合氮化硅复合陶瓷

Evolution and Future Trends of Bottom Roller Materials in Silicon Steel Continuous Annealing Furnace

Huidong Hu

Silicon Steel Division, Baoshan Iron and Steel Co., Ltd., Shanghai

Received: December 1, 2025; accepted: January 29, 2026; published: February 6, 2026

Abstract

The furnace bottom roller is a key core component in the continuous annealing furnace for silicon steel, and its performance directly affects the stable operation of the production line, the surface quality and yield of silicon steel products. This article mainly compares and analyzes the material

characteristics, application performance, advantages and disadvantages of mainstream furnace bottom rollers such as heat-resistant alloy rollers, quartz ceramic rollers, and silicon carbide combined with silicon nitride ceramic rollers. The results indicate that the combination of silicon carbide and silicon nitride ceramic material for furnace bottom rollers has significant advantages in high temperature stability, anti nodule properties, and surface quality maintenance. Based on this, the application of gradient functional materials, roller structure optimization, surface functional coatings, and intelligent and state monitoring are important development directions for the furnace bottom rollers of high-grade silicon steel continuous annealing furnaces in the future.

Keywords

Bottom Roller in Continuous Annealing Furnace, Heat-Resistant Alloy, Quartz Ceramics, SiC-Si₃N₄ Ceramics

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

硅钢, 硅钢被誉为钢铁工业的“皇冠明珠”, 广泛应用于电力设施设备、电子仪器、新能源汽车等工业领域。其生产工艺复杂, 过程控制难度大, 技术壁垒极高, 其中连续退火是核心工序之一。退火炉内需要经历高温(最高可达 1150℃)、特定气氛(如 N₂、H₂ 混合气)和长时间的热处理, 以实现脱碳、再结晶和晶粒长大, 最终达到特定的金相结构和力学性能。在连续热处理炉内的严苛工况下, 炉底辊不仅要承受带钢的重量和传输张力, 自身还需具备优异的高温强度、抗蠕变性、抗氧化性以及和硅钢材料极低的反应性。炉底辊的缺陷和失效, 特别是表面“结瘤”(即产生粘结物和氧化皮), 会划伤极其敏感的硅钢带表面, 导致产品降级或报废, 甚至造成断带事故, 损失巨大[1]-[5]。因此, 炉底辊材质的选择至关重要。本文对主流的几种炉底辊类型进行深入对比分析, 为设备选型和技术升级提供参考。

2. 炉底辊主要材质类型及综合对比分析

2.1. 耐热合金炉底辊

这是早期和应用最广泛的炉底辊类型, 通常采用高镍铬基的耐热高温合金[1] [2], 如 RA330 (即 12Cr16Ni35)、RA253MA (主要成分: 碳 0.05%~0.1%、硫 ≤0.03%、硅 1.40%~2.00%、铬 20%~22%、镍 10%~12%、氮 0.14%~0.20%、铈 0.03%~0.08%)、Inconel 601 (主要成分: 镍 58%~63%、铬 21%~25%、铁余量, 碳含量 ≤0.1%)等。

耐热合金炉底辊的优点包括: 1) 机械性能好: 具有优良的室温和高温度强度、韧性, 能够承受较大的冲击和弯曲应力, 加工制造和焊接修复相对容易。2) 技术成熟: 制造工艺、安装和维护流程可标准化, 采购、更换和维护成本可控。相对的, 镍铬基耐热合金也存在较为明显的缺点: 1) **易氧化结瘤**: 在高温高氢环境下, 合金表面生成的 Cr₂O₃ 保护膜会易被氢还原破坏(如图 1、图 2), 导致内部 Fe、Ni、Cr 等元素暴露, 从而挥发或氧化, 形成疏松的氧化皮, 即表层形成结瘤。这些结瘤物脱落后会粘结在带钢表面, 造成表面缺陷。2) **高温蠕变**: 在长期高温和载荷作用下, 金属辊会发生蠕变变形, 导致辊身弯曲, 影响带钢稳定通行, 严重时炉底辊无法正常运行, 需停炉更换。**寿命较短**: 在高温段(如均热段), 其有效服役寿命通常仅为 3~6 个月, 更换频繁, 影响作业率。

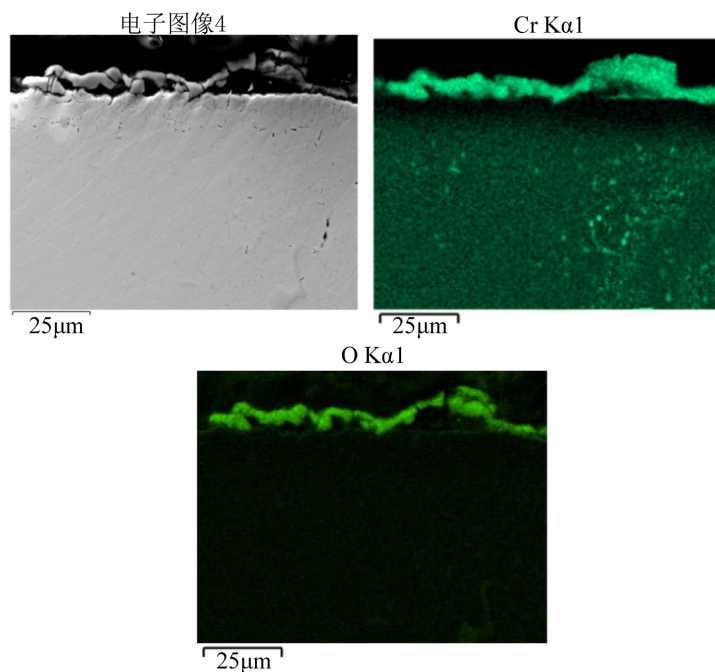


Figure 1. Morphology of the Cr_2O_3 oxide layer in the normal part of the furnace hearth roller made of RA330 material
图 1. RA330 材质炉底辊正常部位 Cr_2O_3 氧化层形貌

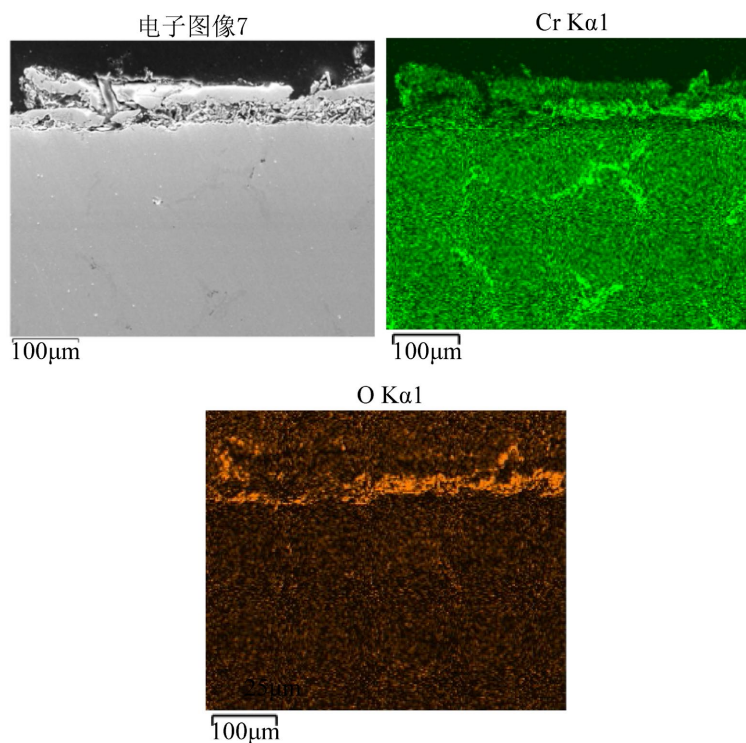
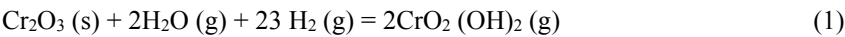


Figure 2. The morphology of the damaged Cr_2O_3 oxide layer on the surface of the furnace hearth roller made of RA330
图 2. RA330 材质炉底辊表面 Cr_2O_3 氧化层破损的形貌

从图 1 和图 2 可以看出，正常情况下，耐热合金材质炉底辊表面覆盖有一薄层(厚度 $< 30\ \mu\text{m}$)致密的 Cr_2O_3 层，可保护基体免受进一步的氧化和磨损，但是在强还原气氛下，氧化层出现反应破损(见式 1)，

表面复合氧化层变得疏松且厚度显著增加(>100 μm), 基体内部被迅速侵蚀, 晶界也出现了异化, 这将很快造成剥落和破损, 进而导致炉底辊失效。



耐热合金材质炉底辊广泛应用于早期硅钢生产线, 如武钢、鞍钢从新日铁引进的硅钢生产线初期均采用此类炉辊, 现仅用于炉温较低的预热段(<900℃)等区域。

2.2. 石英陶瓷炉底辊(SiO₂)

石英陶瓷炉底辊主要由高纯度石英砂熔融制成, 属于非晶态二氧化硅材料, 总的来讲, 是在耐热合金材质之后出现的第二代炉底辊[1]-[3]。

石英陶瓷炉底辊的优点包括: 1) **极高的热稳定性**: 热膨胀系数极低(约 $0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), 在急冷急热条件下不易开裂, 抗热震性能极佳。2) **表面光洁度高**: 材质致密, 表面可加工得非常光滑, 不易粘附杂质, 能有效减少与带钢的粘连, 减轻结瘤倾向。3) **化学稳定性好**: 石英不与 H₂、N₂ 等保护气氛发生反应, 从根源上避免了因自身氧化造成的结瘤。但是石英陶瓷也有其固有的缺点: 1) **机械强度低**: 脆性大, 抗机械冲击和弯曲强度远低于金属辊, 对安装精度和运行平稳性要求极高, 易因应力集中而断裂。2) **高温析晶**: 在 900℃ 以上长期使用, 非晶态石英会逐渐析晶方石英, 导致材料脆化, 强度急剧下降, 最终失效。3) **对碱金属敏感**: 硅钢表面的残留碱液(清洗段带来)会与偏酸性的石英陶瓷发生反应, 产生腐蚀效果, 快速破坏其表面光洁度, 加速其老化失效。

基于石英陶瓷耐高温的特定, 以该材质为基础的炉底辊曾是高温段(800~1050℃)替代耐热合金辊的主流选择, 但在运行过程中出现的设备精度、析晶反应等都影响其服役周期, 且更优材料不断的出现, 石英陶瓷炉底辊大规模应用的尝试很快结束。

2.3. 碳化硅结合氮化硅复合陶瓷辊(SiC-Si₃N₄)

碳化硅结合氮化硅是以碳化硅颗粒与氮化硅结合相构成的新型陶瓷复合材料, 外文简称 SNBSC。该材料通过硅粉与碳化硅混合坯体在氮气环境下反应烧结制成, 可根据实际用途预制为不同的外形, 因其莫氏硬度高(9 级), 常温抗弯强度高, 在 1650~1750℃ 仍能保持结构稳定, 热膨胀系数小且热导率高, 抗热震性能优异等优点, 已广泛应用于钢铁冶炼、有色金属加工和化工建材领域, 同时也是目前公认的性能最优异、最先进的炉底辊材料, 其典型成分和物相如表 1 所示。

Table 1. Typical composition of silicon carbide combined with silicon nitride composite ceramic furnace bottom roller
表 1. 碳化硅结合氮化硅复合陶瓷炉底辊典型成分

成分	碳化硅(主相)	氮化硅(结合相)	游离硅	其他添加剂
化学式	SiC	Si ₃ N ₄	Si	-
典型比例(wt, %)	60~80	15~35	≤3	≤2

氮化硅结合碳化硅复合陶瓷材料的优点主要包括: 1) 如前所述的极致综合性能, 即同时兼具了陶瓷材料的耐高温性和金属材料的高强度特征, 其高温抗弯强度、莫氏硬度、耐磨性和抗高温蠕变能力在当前的炉底辊材质中是最优的。2) 表面形成极其稳定的 SiC 或 Si₃N₄ 保护膜, 在高温还原性气氛下极其稳定, 几乎完全不反应, 从根本上杜绝了因辊子自身材料挥发导致的结瘤。3) 服役周期长, 在 1200℃ 的苛刻环境下仍能保持性能稳定, 使用寿命可达 2~4 年, 大幅减少停机更换时间, 提高热处理炉作业率。4) 良好的导热性能, 导热率较高, 有助于辊身温度均匀, 减少带钢横向温差, 保证硅钢带的表面质量均匀性。相应的, 由于以氮化硅结合碳化硅制造连续退火炉炉底辊, 需要大尺寸、长辊身整体式烧结技术,

除了模具本身成本高昂，而原材料的配比、混匀，大尺寸辊体成型后的烧结工艺等都属于面临技术难度大、能耗高、成品率稳定性不足等难题，所以，虽然原料直接成本可能低于耐热合金材质，但是综合成本仍相对较高，加上材质本身仍属于陶瓷，在炉内运行过程中，遇上异常撞击和剪切应力冲击的时候，仍可能面临局部碎裂造成失效的情况，要求工艺操作的标准化和精细化程度较高[4] [5]。

从当前情况来看，氮化硅结合碳化硅材质炉底辊已经成为高端硅钢连续退火炉高温段的绝对首选，是生产高牌号无取向硅钢和取向硅钢的必备装备。

2.4. 不同材质炉底辊的对比

结合相关文献和上述结果，将几种炉底辊材质的性能对比如表 2 所示。

Table 2. Comparison of comprehensive performance and cost of hearth rollers made of different materials
表 2. 不同材质炉底辊的综合性能与成本对比

特性指标 \ 类型	耐热合金辊	石英陶瓷辊	碳化硅结合氮化硅陶瓷辊
最高使用温度	≤1150℃ (但易氧化)	≤1050℃	≥1300℃
高温抗折强度 1200℃	50~60 MPa	40~45 MPa	60~65 MPa
抗热震性 1100℃水冷	>20 次	>30 次	>20 次
抗结瘤性	差	优良	极优
使用寿命	短(3~6 个月)	中等(1~2 年)	长(2~4 年以上)
初始成本	低	中	高
维护成本	高(频繁更换)	中	低
主要失效形式	氧化、结瘤、蠕变	脆断、析晶、腐蚀	脆性断裂(少见)

从表 2 的对比中可以看出，碳化硅结合氮化硅陶瓷辊为当前的首选。

3. 连续退火炉用炉底辊的发展趋势展望

随着各行业对硅钢性能(尤其是铁损)要求的不断提升，对退火工艺和装备的精确性、稳定性提出了更高要求。炉底辊的发展预计将呈现以下趋势：

1) 复合陶瓷仍是绝对主流

如前所述，碳化硅结合氮化硅复合陶瓷材料将继续占据高性能炉底辊的主导地位。研发重点在于通过纳米复合技术、新烧结助剂和工艺优化，在保持其优异性能的同时，进一步降低制造成本和提高大尺寸产品的成品率。

2) 材料复合与结构优化

① 梯度功能材料应用：开发金属内芯与陶瓷外覆层的复合辊，兼顾金属的韧性(抗冲击)和陶瓷的表面性能(抗结瘤)，其核心在于解决陶瓷与辊芯金属的物理性质协同作用问题，所述梯度功能材料包括 Ni/ZrO₂ 或 NiCrAlY/YSZ，优点是相容性好，是热喷涂领域的经典组合，或 FeCrAlY/Al₂O₃，可与作为辊芯的不锈钢基体结合更好，过渡层中可加入固体润滑相如 h-BN (高温下稳定)，以进一步提升自润滑和防粘性能。

② 空心轻量化结构：优化辊体结构设计，采用空心薄壁设计，减少重量和热容量，提高升温响应速度，利于节能和温度控制。

③ 内部水冷轴 + 外部可更换耐热辊套的结构设计: 此结构设计可保护主轴和轴承, 降低蠕变风险, 并允许辊套采用更抗结瘤但可能强度稍低的材料。其对密封技术的高要求是推广的关键。

3) 表面功能性涂层技术

即使在 SiC-Si₃N₄ 复合陶瓷陶瓷辊基础上, 也可探索更极致的表面涂层(如 CVD、PVD 沉积超光滑耐磨涂层), 使表面性能更进一步, 达到“永不结瘤”的理想状态[6]。

4) 智能化与状态监控

开发集成嵌入式传感器的智能炉底辊, 实时监测辊子内部的应力、温度分布和振动状态, 实现预测性维护, 避免突发性断裂事故, 提升生产线智能化水平, 在碳化硅结合氮化硅材质为主的高炉冷却壁镶砖中, 已初步应用了智能监控技术[7] [8]。

4. 结论

硅钢连续退火炉炉底辊材质的演化是性能、成本、寿命和应用效果等综合平衡并不断优化过程:

1) 耐热合金辊因其固有缺陷, 将逐渐退出高温段市场, 仅用于低温区域。

2) 石英陶瓷辊具有良好的抗热震性和抗结瘤性, 但机械强度即不耐碱性腐蚀等短板限制了其进一步发展。

3) 碳化硅结合氮化硅复合陶瓷辊以其卓越的高温力学性能、绝佳的抗结瘤性和超长的使用寿命, 已成为生产高品质硅钢的必然选择, 虽然初始投资高, 但其带来的成品率提升、故障率下降和产能增加, 使其全生命周期的经济效益显著。

当前和可预见的未来, 炉底辊技术将继续朝着高性能陶瓷化、复合轻量化和智能化的方向发展, 以满足硅钢工业对更高效率、更高质量和更低成本的持续追求。

参考文献

- [1] 廖世堡. 辊底式连续退火炉炉底辊设计探讨[J]. 特殊钢, 1990(2): 19-24
- [2] 顾虹. 辊底式连续退火炉自动控制系统设计与实现[D]. [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- [3] 杨超. 辊底式热处理炉炉底辊损坏形式及对策分析[J]. 黑龙江冶金, 2021, 41(4): 27-28.
- [4] 马洪浩. 辊底式无氧化炉炉底辊结瘤去除的研究与实践[J]. 南钢科技与管理, 2017(2): 41-44.
- [5] 李庆胜. 电工钢退火炉陶瓷辊结瘤原因分析及改进措施[J]. 宝钢技术, 2004(3): 12-15.
- [6] 卢国起, 阎殿然. 连续退火炉炉底辊涂层的研究进展[J]. 热加工工艺, 2007(7): 68-70.
- [7] 唐建方. 高炉冷却壁智能检漏监测[J]. 冶金自动化, 2022, 46(S1): 114-116.
- [8] 吴俐俊, 孙国平, 陆祖安. 热面局部高温下高炉冷却壁智能监测试验研究[J]. 钢铁, 2011, 46(5): 11-14.