

硅钢产线退火炉炉辊结瘤的成因与处理措施

吕 静 赵富光 甘绍壮

安钢集团冷轧有限责任公司 河南 安阳 455000

摘 要：硅钢退火炉炉辊结瘤问题长期困扰产线稳定运行，结瘤物来源广泛、生成机理复杂，涉及杂质析出、气氛反应与辊体氧化等多重路径。本文围绕炉辊结瘤这一工艺难题，系统剖析了原材料带入杂质、炉内气氛化学反应、辊体材质氧化脱落及带钢表面粉体富集四类物质来源与生成机理，深入探讨了工艺参数波动、炉内环境失稳、设备运行偏差及日常运维失当等诱发因素。在此基础上，梳理了离线溶蚀、在线刮削、表面修复与涂层防护等专项处理技术，并从原料管控、气氛稳定、辊体防护及巡检养护四个层面提出常态化防控措施，为炉辊结瘤治理提供系统性技术参考。

关键词：硅钢退火炉；炉辊结瘤；生成机理；处理技术；常态化防控

引言：硅钢退火炉炉辊结瘤是制约产线连续运行与带钢表面质量的关键工艺障碍。结瘤物由氧化物、碳质残留及辊体脱落碎片等多组分构成，在高温、摩擦与气氛交互作用下逐步烧结硬化，清理难度随运行时间推移而显著上升。当前围绕结瘤成因的研究多聚焦单一因素，对多源物质协同沉积与动态演化过程的关注尚显不足。系统厘清结瘤的物质来源、生成路径与诱发条件，对于制定针对性处理方案与长效防控策略具有现实意义。

1 炉辊结瘤物质来源与生成机理

1.1 原材料带入杂质析出

硅钢原材料在冶炼与连铸过程中不可避免地残留微量非金属夹杂物，如氧化铝、硫化锰及硅酸盐等。这类杂质在室温下以固态形式分散于钢基体内部，外观上难以辨别^[1]。当带钢进入退火炉高温环境后，夹杂物的物理状态与化学活性发生变化。部分低熔点夹杂在高温下软化甚至熔融，随带钢表面的轧制油膜一起向辊面迁移。油膜在高温区裂解后失去对夹杂物的裹挟能力，杂质便以固态微粒的形式直接沉积在炉辊表面。带钢在炉内反复弯折与展平的过程中，夹杂物不断从钢板基体中析出并向辊面聚集，最终在辊面形成以氧化物为主的硬质结瘤核心。

1.2 炉内气氛反应生成沉积物

退火炉内通常充入氮气与氢气的混合保护气体，但炉气中仍含有微量残氧与水蒸气。在高温环境下，残氧与带钢表面的铁、硅元素发生氧化反应，生成氧化铁与氧化硅等气态或半固态产物。这类反应产物在炉辊表面

遇冷后发生冷凝沉积，逐渐在辊面形成一层疏松的氧化沉积物。炉内氢含量过高时，氢气与残留水分反应生成的活性氢原子会加速硅钢表面的氧化进程，使沉积物生成速率明显加快。保护气体的露点波动直接影响炉内氧化性强弱，露点偏高意味着水蒸气含量增大，辊面沉积物的厚度随之上升。

1.3 炉辊本体材质氧化与脱落堆积

炉辊在长期高温运行条件下，辊面合金层会与炉内残氧持续发生氧化反应，生成以铬氧化物和铁氧化物为主的氧化膜。这层氧化膜在带钢与辊面反复摩擦的机械作用下产生局部剥落，剥落碎片混合着带钢表面的氧化物一起黏附在辊面未氧化区域。随着运行时间延长，氧化与剥落交替进行，辊面逐渐形成由多层氧化物碎片堆叠而成的结瘤体。炉辊材质中铬、镍等合金元素的含量高低决定了氧化膜的致密程度与附着力，合金含量偏低的辊面更容易出现大块氧化层脱落，脱落物在辊面滚动摩擦中被反复压实，最终固化为难以清除的硬质结瘤。若为碳套辊，碳套表层石墨基质长期经受高温与带钢摩擦，表层石墨持续粉化脱落；脱落碳粉混合辊面氧化物、带钢表层氧化碎屑，在高温挤压下发生碳热固相反应，加速氧化物烧结黏结。

1.4 带钢表面粉体残留物富集黏结

冷轧轧制工序结束后，硅钢带钢表面会残留一定量的轧制粉体与乳液干燥后形成的碳质薄膜。这些粉体与薄膜在进入退火炉后，受高温作用发生脱水、脱碳与烧结反应，转变为黏附性极强的半固态残留物。残留物在带钢与炉辊的接触压力下被挤压至辊面微坑与划痕

处,并在后续带钢的连续通过中不断叠加增厚。粉体中的铁基成分与辊面氧化物发生固相扩散结合,使结瘤与辊面之间形成牢固的冶金结合,单纯依靠机械刮削难以彻底去除。

2 炉辊结瘤形成的诱发因素

2.1 工艺参数波动影响

退火温度设定偏离目标值会直接改变辊面的氧化速率与沉积反应的活跃程度。温度偏高时硅钢表面氧化加剧,生成的氧化物粉末大量脱离板面并附着于辊体,结瘤速度随之加快。退火速率过快则导致带钢在升温阶段表面氧化膜来不及均匀生长便进入高温区,氧化膜碎裂后以微粉形态散落并沉积在辊面^[2]。保护气体中氢氮比例的失调也会影响炉内还原性强弱,还原性不足时辊面氧化倾向增强,结瘤生成的概率明显上升。炉内各温区的温差过大还会造成辊面热应力分布不均,局部高温区域成为结瘤优先萌生的位置。

2.2 炉内环境状态影响

保护气体的露点是衡量炉内水蒸气含量的关键指标,露点偏高意味着水汽浓度增大,辊面发生水氧化反应的几率随之上升。炉内残氧含量即使维持在较低水平,在长时间运行条件下也会在辊面累积形成氧化沉积层。炉内气流分布不均匀会导致局部区域出现气体死角,死角处的氧化性气氛难以被及时置换,辊面在该区域的结瘤速度远高于气流畅通区域。带钢运行过程中产生的碎边与粉料落入炉底后受高温作用发生二次氧化,氧化物随炉气流动上升并在辊面冷凝附着,进一步加剧结瘤程度。

2.3 设备运行状态影响

炉辊长期运转后表面微观形貌发生改变,粗糙度增大使粉体与氧化物更容易在辊面凹槽处滞留并逐渐压实。辊面温度分布不均导致热膨胀量存在差异,局部凸起区域与带钢的接触压力增大,机械摩擦加剧了氧化膜的剥落与再沉积过程。炉辊支撑轴承磨损后辊体出现微量偏心,运行中带钢与辊面的接触状态发生偏移,原本均匀分布的磨损变为局部集中磨损,结瘤在磨损严重区域生长更为迅速。传动系统转速不稳造成带钢在辊面上的滑动距离出现差异,滑动距离较长的区域结瘤倾向更为明显。

2.4 日常运维操作不当影响

炉辊清理周期设定过长会导致结瘤层不断增厚,硬化后的结瘤与辊面结合强度大幅提升,后续清理难度成倍增加。清理过程中刮削力度控制不当容易损伤辊面基

材,受损区域的粗糙度升高反而为新一轮结瘤提供了附着基点。保护气体切换操作不规范会造成炉内气氛短时暴露于空气中,残氧浓度骤然升高使辊面在短时间内生成大量氧化沉积。带钢穿带操作中板面与辊面发生异常刮擦会在辊面留下深痕,深痕成为粉体与氧化物富集的优先位置,加速局部结瘤的形成与发展。

3 炉辊结瘤的专项处理技术与方法

3.1 离线清理处理方式

炉辊从退火炉中抽出后送入专用清洗工位,采用碱性清洗液浸泡的方式对辊面结瘤层进行溶蚀剥离。清洗液中氢氧化钠与碳酸钠的配比需根据结瘤成分的酸碱特性进行调整,酸性氧化物为主的结瘤偏向使用酸性清洗液,碱性氧化物为主的结瘤则以碱性体系处理为主。浸泡温度控制在 60~80℃之间,过低则反应速率不足,过高则可能损伤辊面基材^[3]。浸泡时间根据结瘤厚度在 2~6 小时范围内灵活调整,薄层结瘤经短时浸泡即可软化脱落,厚层结瘤则需延长浸泡周期并辅以人工刷洗。浸泡结束后使用高压水枪对辊面进行冲洗,水压控制在 15~20MPa,将软化后的结瘤残体彻底清除。离线清理的优势在于操作空间充裕,清理工具选择多样,能够针对不同硬度与厚度的结瘤层匹配最优清除方案。针对碳套辊不可采用强碱性、高温酸洗体系,需更换中性弱有机清洗溶剂,浸泡温度下调至 40~50℃,规避酸碱腐蚀、高温氧化破坏碳套石墨基体;高压冲洗水压降至 8~12MPa,搭配软质尼龙毛刷轻柔清理,防止碳套表层石墨结构剥落损伤。

3.2 在线原位处理方式

带钢不断料的条件下,利用炉辊运转间隙对辊面结瘤实施机械刮削。专用刮削刀具安装在炉辊入口侧与出口侧的固定支架上,刀具角度与辊面呈一定倾斜,刮削时将结瘤层以薄片状剥离。刮削深度需严格控制在 0.1~0.3mm 的加工余量范围内,超出余量会导致辊径减小并影响带钢板形。在线处理的时间窗口有限,通常在换卷或减速阶段集中实施,单次刮削量不宜过大,避免辊面温度骤降引发带钢翘曲。刮削产生的碎屑需通过炉内吸尘系统及时排出,防止碎屑二次沉积在辊面。

3.3 炉辊表面修复处理工艺

结瘤清除后辊面往往存在不同程度的划痕与凹坑,需通过研磨与抛光工序恢复辊面的平整度与粗糙度。研磨采用由粗到细的砂轮逐级打磨,粗磨阶段去除深层损伤,精磨阶段将表面粗糙度控制在 $Ra \leq 0.8\mu m$ 的范围内。抛光阶段使用细粒度研磨膏对辊面进行镜面处理,

使辊面光洁度满足带钢表面质量要求。对于局部损伤较深、研磨无法完全恢复的区域,采用堆焊修复后再研磨的方式处理,堆焊材料的成分需与辊体基材保持一致,避免因材质差异导致新的结瘤萌生点。

3.4 结瘤后续固化清理配套操作

结瘤清除与表面修复完成后,需对辊面施加防护涂层以延缓下一轮结瘤的生成。涂层材料通常选用耐高温陶瓷涂料或金属氧化物复合涂层,喷涂前辊面需经过脱脂与粗化处理以增强涂层附着力。涂层厚度控制在 30~50 μm 级别,过厚会导致涂层在高温下开裂脱落,过薄则防护周期过短。涂层固化后需进行 200~300 $^{\circ}\text{C}$ 低温烘烤处理,使涂层与辊面形成稳定的结合层。配套操作中还包括对炉辊运行数据的持续跟踪,记录结瘤清理周期与涂层磨损状态,为下一次清理时机的判定提供数据支撑。涂层附着力测试应采用拉拔法进行,附着力不低于 15MPa 方可判定合格。同时,建议每运行 200 小时对涂层厚度进行一次抽样检测,厚度衰减超过 20% 时应安排补涂作业,确保防护效果的连续性。

4 炉辊结瘤的常态化防控管控措施

4.1 原材料质量管控优化

严控硅钢原料生产全流程工艺精度,依托冶炼工艺改良手段削减钢基内部各类非金属夹杂物质蓄积量,弱化高温加工环节杂质析出的基础条件。完善原料入厂质量筛查体系,聚焦钢材基体洁净度把控,严格管控各类易诱发辊面结瘤的氧化夹杂与硫化夹杂,从源头削弱退火工序沉积物生成潜质^[4]。规范冷轧生产流程管控,改良轧制介质适配体系,减少带钢表层微细粉体与乳化液残留附着,规避高温环境下残留物料烧结固化黏附于炉辊表面。优化冷轧成型工艺状态,改善硅钢带钢表层致密性与平整性,减少板面脱落碎屑物质,从物料源头阻断炉辊结瘤的滋生路径。同时应建立原材料夹杂物等级与结瘤倾向的对应数据库,对高风险批次实施针对性退火工艺调整,如降低退火温度上限或缩短高温段停留时间,从工艺端补偿原料洁净度的不足。

4.2 炉内工况稳定管控

构建稳定的炉内气氛调控体系,维持保护气体组分配比的均衡状态,保障炉内还原氛围稳定可控,有效抑制带钢与炉辊表层的氧化反应进程。落实炉内水汽与残余氧成分的动态监测工作,稳定炉气露点状态,弱化高温水环境下的氧化反应强度,减少各类氧化沉积物料的持续生成。优化炉体内部风道布局与气流组织模式,消除炉内局部气流停滞区域,实现炉内气氛均匀置换,规避局部区域氧化物料持续堆积聚集。常态化开展炉内积

尘与落料清理作业,清除炉体底部积存的带钢碎边与微细粉料,防止物料二次氧化后随气流飘散附着于炉辊表层,持续维持炉内洁净稳定的生产工况。

4.3 炉辊设备防护优化

完善炉辊选材与适配标准,优先选用高温抗氧化性能优良、合金组分配比科学的炉辊基材,提升辊面原生氧化膜的致密性与结构稳定性,降低氧化膜脱落引发的结瘤风险。持续维护炉辊表层防护体系,根据辊面运行损耗状态及时修复受损防护涂层,长效保持辊面耐高温与抗物料附着能力。细化炉辊配套设备养护标准,定期校准支撑轴承与传动结构的运行精度,规避设备磨损引发的辊体偏心运行问题,杜绝带钢与辊面局部集中摩擦磨损。保障炉辊整体运行受力均匀,维持辊面摩擦状态稳定,减少氧化碎屑堆积压实的成型条件。

4.4 日常巡检与定期养护管控

建立标准化的炉体设备巡检养护机制,常态化观测炉辊表层微观形貌与运行工况,精准捕捉辊面微细沉积物料与初期结瘤迹象,在松散物料完成烧结硬化前完成清理处置。结合产线连续运行负荷与炉辊损耗规律,科学规划辊面清理养护周期,避免微细物料长期累积形成稳固结瘤结构。细化退火工序各类操作规范,标准化气体切换与带钢穿带作业流程,规避不规范操作造成的炉内气氛波动与辊面机械划痕损伤。

结束语

炉辊结瘤的形成是杂质析出、气氛氧化、辊体剥落与粉体烧结等多重因素叠加作用的产物,单一手段难以根治。从离线溶蚀到在线刮削,从表面研磨到涂层防护,处理技术需匹配结瘤的物质组成与硬化程度分层施策。原料洁净度把控、炉内气氛稳定、辊体选材优化与精细化巡检养护构成了防控体系的四根支柱,缺一不可。唯有将源头阻断、过程抑制与末端治理贯通衔接,才能维持炉辊表面长期处于平稳可控的运行状态,为硅钢产品表面质量提供坚实保障。

参考文献

- [1] 郭晓松,冯海涛.硅钢产线退火炉炉辊结瘤的成因与处理措施[J].包钢科技,2023,49(1):65-69.
- [2] 张红波,俞学成,吴耐,等.无取向硅钢退火炉炉辊结瘤研究与控制[J].电工钢,2024,6(6):36-42.
- [3] 曹小彬,侯莉庆,周伟文.硅钢退火炉高温钢丝炉辊的研究及实践[J].冶金动力,2024(5):83-86.
- [4] 祝建国,张兴,玄立颖,等.冷轧硅钢退火表面白线缺陷的机理研究[J].电工钢,2025,7(3):51-55.