

# 冷轧硅钢板退火工艺、设备和机械性能关联研究

赵富光

安钢集团冷轧有限责任公司 河南 安阳 455000

**摘要:**为明确冷轧硅钢板退火工艺、设备性能与带钢机械性能的内在关联,本文系统研究退火生产工艺体系与核心设备特性,分析温度、时间、气氛等工艺参数对机械性能的影响机制,探讨设备性能与工艺参数的匹配设计及对带钢质量的综合作用。通过构建工艺-设备-性能耦合关联模型,揭示三者协同与波动传导规律。研究表明,设备性能精准匹配工艺参数是保障带钢机械性能稳定的关键,为退火工艺优化与设备改进提供量化依据,对提升硅钢产品质量具有重要实践价值。

**关键词:**冷轧硅钢板;退火工艺;机械性能;带钢质量;关联

引言:冷轧硅钢板广泛应用于电力、电子等领域,其机械性能与磁性能直接决定产品适配性,而退火工艺是调控上述性能的核心环节。当前工业生产中,退火工艺、设备性能与带钢质量的匹配失衡问题时有发生,导致产品性能波动大、合格率受限。基于此,本文围绕退火工艺与机械性能的关联展开研究,聚焦工艺-设备-性能的联动逻辑,旨在分析各要素间的作用规律,提出精准匹配方案,为解决工业生产痛点、提升硅钢生产技术水平提供理论与实践支撑。

## 1 冷轧硅钢板退火生产工艺与核心设备基础

### 1.1 冷轧硅钢板退火生产工艺

冷轧硅钢板退火生产工艺的核心目标是消除冷轧过程中产生的加工硬化,优化材料微观结构,进而提升带钢机械性能与磁性能。(1)连续退火工艺以高效连续化生产为显著特征,通过开卷、加热、保温、冷却、卷取等一体化流程实现带钢退火处理,其工艺核心在于各阶段温度、气氛及张力的精准协同控制,能够适配大规模、高节奏的工业生产需求,保障带钢性能的均匀一致性。(2)罩式退火工艺则以批次处理为主要形式,通过密封罩体营造特定的退火气氛,实现带钢的缓慢加热与冷却,该工艺更适用于对性能均匀性要求较高的特殊规格硅钢板加工,其核心优势在于可通过调整保温时间与气氛组分,针对性优化带钢的微观组织,满足不同应用场景下的性能需求。

### 1.2 退火核心设备结构与性能特性

退火核心设备是保障工艺实施与带钢质量的关键载体,主要由退火炉、温控系统与气氛系统构成协同工作体系。(1)退火炉作为核心加热单元,其结构设计需满足温度均匀性与热效率要求,炉体密封性能直接影响气氛稳定性与能源消耗,不同工艺对应的炉体结构存在差

异,连续退火炉多采用卧式连续通道结构,罩式退火炉则以密封罩体与炉台组合形式为主。(2)温控系统承担温度精准调控职责,通过温度传感器、执行器与控制系统的协同作用,实现加热、保温、冷却各阶段的温度精准控制,其温控精度与响应速度直接决定带钢微观组织演变的一致性。(3)气氛系统负责为退火过程提供惰性或还原性保护气氛,避免带钢表面氧化,其核心性能体现在气氛组分控制精度与流量稳定性上,系统需具备完善的气体净化、混合与循环功能,确保气氛在炉内均匀分布,为带钢性能优化提供稳定环境。

### 1.3 工艺-设备-带钢质量的联动关系基础

工艺、设备与带钢质量之间存在紧密的联动制约关系,构成冷轧硅钢板退火生产的核心逻辑链。工艺参数为退火过程提供技术标准,其合理性直接依赖设备性能的支撑,设备的结构设计 with 性能极限决定了工艺参数的可调范围与控制精度。设备性能的波动会直接导致工艺实施偏差,进而影响带钢微观组织的演变过程,最终体现在带钢机械性能、表面质量等关键指标上。带钢质量的需求则反向驱动工艺参数的优化与设备性能的提升,不同质量等级的带钢对工艺精度、设备稳定性提出差异化要求。三者的联动核心在于“设备保障工艺落地,工艺决定质量输出,质量反馈优化方向”,只有实现三者的精准匹配与协同优化,才能稳定生产出符合要求的冷轧硅钢板产品,这也是后续工艺优化与设备改进的核心出发点<sup>[1]</sup>。

## 2 退火工艺参数对硅钢机械性能的影响机制

### 2.1 温度影响

退火温度是调控硅钢微观组织演变进而影响机械性能的核心参数,不同温度区间作用机制差异显著。(1)低温退火( $< 800^{\circ}\text{C}$ ):硅钢内部仅发生部分回复,位

错密度适度降低并实现晶粒细化,可提升材料强度,但温度过低或保温不足易导致韧性提升不足,造成强韧失衡。(2)高温退火( $> 1000^{\circ}\text{C}$ ):能有效促进完全再结晶,显著消除冷轧位错缺陷,使晶粒重新形核长大,大幅提升塑性并优化晶体取向、提高磁导率,为硅钢兼具优良机械与磁性能奠定微观基础。温度精准控制直接决定组织演变充分性,进而影响机械性能稳定性。

## 2.2 时间影响

保温时间通过调控再结晶完成度,对硅钢机械性能产生阶段性影响。(1)短时退火:再结晶不充分,残留部分加工硬化组织,可提升硬度,但塑性储备减少,脆性风险增加,影响后续加工适配性。(2)长时退火:为完全再结晶提供保障,促使晶粒尺寸分布均匀,有效消除加工硬化缺陷,材料强度略有下降但韧性显著提升,实现强韧平衡,同时优化内部应力状态,减少性能波动。保温时间需与温度协同匹配,避免过长或过短导致性能偏离目标。

## 2.3 气氛控制

退火气氛通过调控硅钢表面状态与内部成分演变间接影响机械性能。(1)氢氮混合气氛:可有效抑制表面氧化,促进表面脱碳,减少碳化物析出,提升表面质量与组织纯净度,降低应力集中风险,间接保障机械性能均匀性。(2)渗氮处理:通过气氛调控形成氮化物抑制剂,阻碍晶粒长大实现细化,提升材料高温稳定性,减少高温性能衰减。气氛组分的精准配比与稳定性控制是作用有效发挥的关键,直接影响机械性能的一致性与可靠性<sup>[2]</sup>。

# 3 退火设备性能与工艺参数的匹配设计

## 3.1 设备核心单元

退火设备核心单元的性能参数需与工艺要求精准匹配,确保各阶段工艺参数稳定落地,为硅钢性能优化提供硬件保障。(1)辐射管加热段:采用多段分区控温设计,通过分段独立温控模块实现温度梯度的精准调控,可根据不同退火工艺的温度曲线需求,灵活调整各分区加热功率,保障带钢在加热过程中温度梯度符合工艺设定,避免局部温度偏差导致的组织演变不均。(2)均热段:配置高精度电加热带,具备 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 的恒温维持能力,能够为带钢再结晶过程提供稳定的温度环境,确保晶粒在均热阶段均匀长大,减少晶粒尺寸差异对机械性能的影响,同时保障带钢横向、纵向性能的一致性。(3)冷却系统:采用脉冲喷雾冷却与间接冷却管协同设计,冷却速率可实现 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 的精准可控,能够根据工艺要求的冷却曲线灵活调整冷却强度,有效避免快速冷却产生的热

应力,降低带钢开裂风险,同时保障冷却过程中组织转变的稳定性。(4)气氛调控单元:具备宽范围露点控制能力,露点调节范围覆盖 $-50\sim 95^{\circ}\text{C}$ ,可根据工艺对气氛湿度的要求精准调控;同时配备渗氮浓度精准调节模块,能够依据渗氮工艺需求精确控制气氛中氮含量,确保气氛组分稳定匹配工艺要求,保障表面质量与内部组织优化效果。

## 3.2 智能控制系统

智能控制系统作为设备与工艺的联动核心,通过精准监测与动态调控,实现设备性能与工艺参数的实时匹配,提升退火过程的稳定性与可控性。(1)退火数学模型:基于硅钢退火过程的热传导与组织演变规律构建,能够实时采集带钢实际温度数据,与工艺设定温度曲线进行对比分析,通过模型算法动态调整炉温、空燃比等关键设备参数,确保带钢温度始终贴合工艺要求,同时实现能源消耗与工艺效果的平衡。(2)全流程监控模块:构建多维度监测体系,实时追踪碳套辊运行状态、炉内氧含量、气氛组分、带钢张力等20余项关键指标,通过数据实时传输与分析,实现退火全流程的状态可视化。当监测指标出现偏离工艺阈值的情况时,系统可自动触发预警机制,并根据预设方案启动应急调控措施,及时修正设备运行参数,避免异常工况对带钢质量造成影响,同时为设备维护与工艺优化提供数据支撑,保障设备性能与工艺参数的长期匹配稳定性<sup>[3]</sup>。

# 4 退火工艺对硅钢带钢质量的综合影响

## 4.1 表面质量

退火工艺通过配套设备设计与气氛调控,直接影响硅钢带钢表面质量,减少表面缺陷的产生。(1)退火炉密封设计:采用高精度密封结构控制炉内氧含量,确保氧含量 $\leq 2.0\%$ ,从源头抑制带钢表面氧化反应,减少氧化皮生成。氧化皮的减少可避免后续处理中氧化皮脱落形成的表面凹坑缺陷,同时提升带钢表面光洁度,保障表面组织的均匀性。(2)气浮输送系统应用:以气浮输送替代传统炉底辊输送方式,消除炉底辊运行过程中辊面结瘤、磨损等问题对带钢表面的划伤风险。气浮输送通过气流支撑带钢实现无接触传输,减少带钢表面与输送部件的机械摩擦,进一步提升表面质量的稳定性,为后续加工环节提供良好的表面基础。

## 4.2 板形控制

退火工艺中的冷却与温度、张力调控,是保障硅钢带钢板形精度的关键环节,有效减少板形缺陷。(1)脉冲喷雾冷却与张力闭环控制:采用脉冲喷雾冷却方式配合张力闭环调控系统,将张力波动控制在 $\pm 5\%$ 以内,可有

效缓解冷却过程中带钢不同区域的温度差异,减少热应力不均导致的边浪、瓢曲等板形缺陷。张力的精准控制能够平衡带钢在退火过程中的受力状态,避免局部应力集中引发的塑性变形,保障带钢横向与纵向的板形一致性。(2)红外测温仪实时监测:通过红外测温仪对轧制区温度进行实时监测,将温度波动控制在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 范围内,及时掌握带钢温度分布状态。温度的稳定控制可避免因局部热膨胀不均导致的板形畸变,确保带钢在退火全过程中温度与受力状态的均衡,提升板形控制精度。

### 4.3 磁性能提升

退火工艺通过调控微观组织与化学成分,显著提升硅钢带钢的磁性能,优化能效表现。(1)高温退火织构优化:高温退火过程能够促进硅钢内部Goss织构的形成与发展,该织构的优化可使带钢磁导率提升30%~50%,同时降低铁损20%~30%。Goss织构的定向排列能够减少磁畴转动阻力,提升磁通量密度,增强磁性能的稳定性,满足电力、电子等领域对硅钢磁性能的高要求。(2)脱碳处理调控:通过退火气氛与温度协同实现脱碳处理,将带钢中碳含量控制在 $< 0.01\%$ 的低水平,减少碳元素在晶格中的固溶与碳化物析出。碳含量的降低可有效减少磁滞损耗,提升带钢的能效等级,同时优化磁性能的均匀性,减少磁性能波动,进一步提升硅钢产品的核心使用性能。

## 5 退火工艺-设备性能-带钢机械性能的耦合关联机制

### 5.1 多工艺参数与设备性能的协同作用机制

退火工艺与设备性能的协同是保障带钢机械性能的核心前提,两者形成相互支撑的联动体系。(1)多工艺参数的协同依赖设备性能兜底,温度、保温时间、冷却速率等工艺参数的精准实施,需依托加热、温控、冷却等设备单元的性能匹配,设备的控温精度、时序稳定性等直接决定工艺参数的落地效果。(2)工艺参数反过来限定设备运行边界,不同工艺组合对设备的功率输出、调节响应速度等提出差异化要求,只有实现工艺参数与设备性能的动态适配,才能推动带钢微观组织朝着优化机械性能的方向演变。

### 5.2 设备性能波动对工艺-性能关联的影响规律

设备性能波动会打破工艺与带钢机械性能的稳定关

联,形成连锁影响。(1)核心设备单元性能波动直接导致工艺参数偏离设定值,如加热设备功率漂移引发温度偏差、冷却系统故障导致冷却速率异常,进而干扰再结晶进程与晶粒演变状态。(2)设备性能波动的影响具有传导性,会使工艺-性能的关联规律发生偏移,原本适配的工艺参数因设备波动无法实现预期性能,甚至引发带钢脆性增加、强度不足等问题,且波动幅度与性能偏差呈正相关趋势。

### 5.3 工艺-设备-性能耦合关联模型构建

耦合关联模型的构建需基于三者的内在逻辑,实现量化表征与精准预测。(1)模型以工艺参数、设备性能参数为输入变量,带钢机械性能指标为输出变量,整合温度传导、组织演变等基础规律,明确各参数间的权重关系与交互效应。(2)通过引入设备性能波动修正系数,提升模型适用性,可精准映射不同工艺-设备组合下的性能输出,为工艺优化与设备调试提供量化依据,实现三者的动态匹配与协同优化,保障带钢机械性能的稳定性<sup>[4]</sup>。

结束语:本文系统分析了冷轧硅钢板退火工艺、设备性能与带钢机械性能的耦合关联规律,明确了工艺参数调控机制与设备匹配核心要求,构建的关联模型为生产优化提供了有效工具。研究成果已初步解决工艺与设备适配不足导致的性能波动问题,对提升硅钢产品质量稳定性、降低生产成本具有显著实践意义。未来可进一步拓展研究场景,结合智能监测技术优化模型精度,探索极端工况下的工艺-设备匹配方案,为硅钢生产技术的持续升级提供更全面的支撑。

### 参考文献

- [1]刘鹏.冷轧和中间退火对含Y取向硅钢组织及析出相的影响[D].河北:河北科技大学,2024,3(01):12-13.
- [2]郭函,玄东坡,徐宁,等.退火时间对冷轧1.0%Si无取向硅钢组织和织构的影响[J].金属热处理,2025,50(1):224-229.
- [3]王士嘉.冷轧前晶粒尺寸对不同硅含量无取向硅钢组织、织构和性能的影响[D].山西:太原理工大学,2023,4(02):11-12.
- [4]孙敏.冷轧硅钢六辊可逆轧机板形与退火线跑偏关联性分析[J].电工钢,2022,4(3):34-38.