

# 取向硅钢生产工艺研究进展

马庆元

河南安钢南方电磁新材料科技有限责任公司 河南 安阳 455000

**摘 要:** 本文系统梳理取向硅钢传统全流程生产工艺, 阐述冶炼连铸、热轧常化、冷轧退火各工序的核心原理与工艺控制要点。重点剖析薄带连铸短流程、低温渗氮改性、智能绿色生产等新型工艺的技术优势与现存缺陷, 总结当前生产中织构不均、抑制剂调控不稳、高端量产成本偏高的核心问题, 并从工艺精准调控、新型抑制剂研发、智能化绿色化升级等方面展望行业未来发展趋势。

**关键词:** 取向硅钢; 生产工艺; 研究进展

**引言:** 取向硅钢是输变电、新能源电机领域的核心软磁材料, 磁性能优劣直接决定电力设备能效与运行稳定性。传统生产工艺流程繁琐、能耗较高, 且磁性能稳定性易受工业化生产参数波动影响。为适配双碳战略与高端电力装备发展需求, 行业持续推进工艺革新。本文立足传统生产体系, 汇总新型工艺研究成果, 分析现存技术瓶颈, 为取向硅钢高质、高效、绿色量产提供技术参考与发展思路。

## 1 取向硅钢传统全流程生产工艺及原理

### 1.1 冶炼与连铸工艺

(1) 原料预处理中, Si (约 3.0%-3.4%) 提高电阻率降低铁损, Al (约 0.02%-0.04%) 与 N 结合形成 AlN 抑制剂, Mn (约 0.05%-0.12%) 改善热加工性并促进 MnS 析出。杂质元素如 C、S、O、N 需严格控制, C 过高增大磁时效, S 和 O 形成粗大夹杂物抑制初次再结晶, N 过量导致 AlN 粗化失去抑制效果。(2) 转炉冶炼后经 RH 真空精炼, 深脱碳至  $\leq 0.003\%$ 、脱硫至  $\leq 0.005\%$ , 并通过钙处理将夹杂物变性为低熔点铝酸钙, 促进上浮去除。真空脱气处理将气体含量控制在较低水平, 为后续抑制剂均匀析出提供高纯净度基体<sup>[1]</sup>。(3) 连铸采用电磁搅拌技术, 通过旋转磁场破碎柱状晶、促进等轴晶区扩大, 使铸坯晶粒均匀细化; 同时优化二冷区冷却制度, 控制冷却强度以避免裂纹和偏析缺陷, 确保铸坯内部质量。

### 1.2 热轧与常化工序

(1) 热轧终轧温度控制在 850-950℃, 道次压下率依次递减, 粗轧大压下破碎铸态组织, 精轧小压下调控板形, 累计压下率  $\geq 90\%$  可充分细化晶粒并形成初始 {110} < 001 > 织构组分。(2) 高温常化 (1100-1150℃保温)

使 AlN、MnS 抑制剂重新固溶后在晶界和位错处弥散析出, 形成细小质点钉扎晶界, 有效抑制初次再结晶晶粒异常长大, 为二次再结晶储备足够驱动力。(3) 缓冷方式促进抑制剂充分析出, 但质点略粗化; 淬火快冷使抑制剂过饱和保留, 后续退火时析出更细小弥散, 抑制力强, 但工艺控制难度大, 需根据成品磁性能需求适配冷却方案。

### 1.3 冷轧与退火工艺

(1) 多道次冷轧采用逐渐增大的压下率制度, 总压下率  $\geq 85\%$ , 通过位错增殖和亚结构形成实现晶粒显著细化, 同时使 {110} < 001 > 取向晶粒沿轧向择优转动, 为后续高斯织构发展提供组织准备。(2) 中间退火 (750-850℃) 通过回复和再结晶消除冷轧应力, 使变形晶粒恢复等轴状, 同时调控初次再结晶晶粒尺寸至 15-25μm, 为高温退火阶段高斯晶粒的择优长大提供均匀的基体组织<sup>[2]</sup>。(3) 高温成品退火 (1150-1200℃) 利用抑制剂钉扎效应抑制普通晶粒生长, 高斯取向晶粒凭借界面能优势吞并周围晶粒实现二次再结晶。MgO 隔离涂层在高温阶段与 SiO<sub>2</sub> 反应形成镁橄榄石层, 保护表面并促进渗氮均匀性, 保障高斯织构精准成型。

## 2 取向硅钢新型生产工艺研究进展

### 2.1 短流程制备工艺技术

(1) 薄带连铸一体化工艺基于双辊铸轧原理, 将液态钢水直接注入由两个反向旋转水冷铸辊构成的熔池中, 经快速凝固 (冷却速率达  $10^2$ - $10^4$ ℃/s) 与轻微轧制变形, 一次性产出厚度为 2-5mm 的薄带坯。该技术将传统流程中连铸、粗轧、热连轧等十余道工序整合为单一工序, 产线长度由传统 800m 以上缩减至 200m 以内, 吨钢综合能耗降低约 45%-55%, 同时因超快速凝固显著抑制元素偏析, 铸

带组织均匀性优于传统厚板坯。(2)短流程下抑制剂析出动力学发生根本改变:AlN因凝固速率极快( $>100^{\circ}\text{C/s}$ ),其析出被大幅延迟,需依赖后续常化或渗氮处理进行补偿性析出调控;Nb(C,N)具有低固溶度积和慢扩散特性,在铸轧过程中即开始以10-30nm尺寸弥散析出,热稳定性优异。调控方法包括:调整铸辊转速(30-60m/min)控制凝固前沿温度梯度,优化铸带出辊后在线冷却速率以调控析出驱动力,并配合短时高温均热使AlN在有利温度窗口(1050-1100 $^{\circ}\text{C}$ )充分析出,从而建立适合薄带的抑制剂体系<sup>[3]</sup>。(3)现存问题突出表现在:铸带厚度波动( $\pm 0.2\text{-}0.4\text{mm}$ )导致冷轧负荷频繁调整,高速铸轧时熔池液面扰动易引入表面微裂纹(发生率约3%-5%),且因凝固-变形耦合作用使带坯残余应力分布复杂,磁性能批次间波动较传统工艺高6%-10%。优化方向聚焦于:开发电磁制动与液面闭环联控系统以稳定熔池流动,引入在线热矫直单元缓解残余应力,以及建立基于数字孪生的短流程专用工艺数据库,通过数据驱动方式实现铸轧参数与最终磁性能的关联优化。

## 2.2 低温渗氮改性工艺

(1)低温渗氮工艺在退火炉内特定温区(750-950 $^{\circ}\text{C}$ )通入 $\text{NH}_3$ 气氛, $\text{NH}_3$ 分子在带钢表面催化分解为活性[N]原子和 $\text{H}_2$ ,[N]沿晶界和位错向内扩散。渗入的氮元素一方面与基体中Al结合形成弥散的(Al,Si)N质点,补充因冷却快而不足的抑制剂数量,使抑制力峰值提升约30%;另一方面,固溶氮降低层错能,促进冷轧变形时剪切带形成,为高斯晶核提供更多形核位点,从而强化初次再结晶组织中高斯组分的占比。(2)渗氮温度对渗层深度和化合物形态影响显著:温度低于800 $^{\circ}\text{C}$ 时,[N]扩散系数低( $<10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$ ),渗氮效率不足,磁感 $B_8$ 难以突破1.90T;温度高于950 $^{\circ}\text{C}$ 时,析出相快速粗化至50nm以上,抑制力急剧下降。适宜温度区间为830-900 $^{\circ}\text{C}$ 。渗氮时间以90-150s为佳,过短则补氮量不足,过长导致表层氮过饱和形成空洞缺陷。气氛中 $\text{NH}_3$ 比例控制在8%-12%时,表层氮浓度达0.008%-0.012%最优范围,此时高斯晶粒取向角偏差可控制在 $3^{\circ}$ 以内,磁感与铁损综合性能最佳<sup>[4]</sup>。(3)工业化应用方面,低温渗氮技术已在国内多条高磁感取向硅钢产线实现稳定量产,产品磁感 $B_8$ 稳定在1.92-1.95T,铁损 $P_{1.7/50}$ 低至0.85-0.95W/kg。技术迭代脉络清晰:第一代采用恒温恒湿渗氮模式,第二代引入分段式温度-气氛协同控制以实现厚度方向氮浓度梯度优化,目前第三代开发了基于激光氮势在线传感器的闭环调控系统,渗氮量控制精度提升至 $\pm 0.0015\%$ ,渗氮周期由初期的240s缩短至

120s,生产效率翻倍。

## 2.3 智能与绿色生产工艺

(1)工艺智能控制方面,依托工业互联网平台集成多源传感数据(温度、压力、张力、气氛浓度等),采用随机森林回归模型实现热轧终轧温度预测误差 $\leq \pm 4^{\circ}\text{C}$ ,利用长短期记忆网络对退火炉各区功率进行动态寻优,能耗降低约8%;同时开发基于卷积神经网络的表面缺陷识别系统,对边裂、划伤、氧化皮压入等缺陷的在线检出率达95%以上,误报率低于3%,有效支撑了产品质量的实时预判与工艺参数的自适应调整。(2)低碳节能工艺集成成效显著:RH精炼采用干式机械真空泵替代传统蒸汽喷射泵,抽气效率提升同时节约蒸汽消耗约100kg/t钢;高温退火炉采用蓄热式燃烧技术,将排烟温度由800 $^{\circ}\text{C}$ 降至150 $^{\circ}\text{C}$ 以下,余热回收效率达68%,吨钢天然气消耗降低15%;冷轧工序应用超级电容储能回馈装置,制动电能回收率超60%,综合吨钢电耗由原420kWh降至370kWh。(3)废弃物资源化利用方面,酸洗废液(含HCl和 $\text{FeCl}_2$ )经喷雾焙烧法处理,回收再生盐酸浓度达18%以上循环回用,副产氧化铁粉纯度99.3%,用于制备软磁铁氧体或颜料;热轧氧化铁皮经多级磁选-还原焙烧-超细球磨工艺,制得还原铁粉(粒径 $\leq 45\mu\text{m}$ )用于粉末冶金;退火烟气经选择性催化还原脱硝与石灰石-石膏法脱硫后, $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 排放浓度分别低于35mg/ $\text{Nm}^3$ 和50mg/ $\text{Nm}^3$ ,副产脱硫石膏用于水泥缓凝剂,全厂固废综合利用率已达87%,实现资源-环境协同优化。

## 3 取向硅钢生产现存工艺问题与发展趋势展望

### 3.1 当前生产工艺核心问题

(1)规模化生产中组织均匀性控制困难突出,主要体现在高斯晶粒取向偏差角波动范围大( $\pm 3^{\circ}\text{-}5^{\circ}$ ),板宽方向不同位置组织组分差异显著,导致同批次产品磁感 $B_8$ 波动达0.03-0.05T。根本原因在于热轧板厚向温度梯度不均引起变形组织分布失稳,加之冷轧过程边部与中部应变状态不同,最终二次再结晶时高斯晶粒择优生长条件不一致,局部出现组织“漫散化”现象。(2)抑制剂调控稳定性不足是制约磁性能提升的关键瓶颈。传统AlN+MnS复合体系中,MnS在高温常化阶段易偏聚于晶界并快速粗化(60min保温尺寸由20nm增至80nm),AlN析出对冷却速率极为敏感,工业化大生产条件下冷却速率波动( $\pm 0.5^{\circ}\text{C/s}$ )即可引发析出数量密度偏差超20%,抑制力时强时弱导致二次再结晶不完善或异常晶粒过度长大。(3)高端产品量产成本居高不下:0.18mm级高磁感取向硅钢全流程良品率仅65%-72%,高温退火

周期长达 7-10 天能耗巨大, 渗氮和 MgO 涂层工序因表面质量控制严苛导致额外报废率约 8%, 综合吨钢生产成本较常规无取向硅钢高出 3-4 倍, 严重制约了下游高端变压器领域的广泛应用。

### 3.2 关键工艺优化策略

(1) 精准化参数闭环调控。建立覆盖全流程的数字工艺模型, 以磁性能为目标反向推演最优参数区间。热轧出口多点测温反馈调节冷却水; 冷轧基于入口板形实时计算各道次张力分布; 退火炉氧氮传感器联动保护气氛, 实现“感知-识别-执行”秒级响应。(2) 新型复合抑制剂。采用  $\text{AlN}+\text{MnS}+\text{Nb}(\text{C},\text{N})+\text{Sn}$  多元素协同。 $\text{Nb}(\text{C},\text{N})$  粗化温度  $>1100^{\circ}\text{C}$ , 高温维持钉扎;  $\text{Sn}$  偏析降低晶界能, 延缓  $\text{MnS}$  粗化约 40%。优化配比 ( $\text{Nb}/\text{Ti}\approx 3:1$ ,  $\text{Sn}0.03\%-0.06\%$ ) 使有效温区拓宽至  $750-1150^{\circ}\text{C}$ , 抑制力衰减速率降低 50% 以上<sup>[5]</sup>。(3) 工序耦合优化。打通“薄带连铸-低温渗氮-高温退火”衔接: 铸轧出口增设在线感应均热, 组织一致性提升 30%; 渗氮量依据冷轧板晶粒尺寸动态调整 (晶粒越细补氮越高), 实现自适应匹配; 退火采用梯度叠放, 改善气氛流动与温均性。综合良品率提升 8-12 个百分点。

### 3.3 行业技术发展趋势展望

(1) 高性能化持续引领工艺迭代, 超高磁感 ( $B_8 \geq 1.98\text{T}$ ) 级产品要求高斯取向偏差角压缩至  $\leq 2^{\circ}$ , 超低铁损 ( $P_{1.7/50} \leq 0.75\text{W/kg}$ ) 需实现厚度减薄至  $0.15-0.18\text{mm}$  并配合纳米级抑制剂均匀分布, 未来将趋向于超薄规格 ( $\leq 0.10\text{mm}$ ) 高频用取向硅钢开发, 满足新能源汽车驱动电机高频化需求。(2) 智能化集成趋势日益明朗, 全流程数字孪生平台将实现从钢水成分到成品磁性能的虚拟制造推演, 无人行车自动装卸、AI 视觉表面质检、自适应退火决策系统等模块已进入产线验证阶段。未来 3-5 年内, 预计建成首批“黑灯工厂”示范产线, 操作岗位减

少 60% 以上, 工艺调优周期从天级压缩至小时级。(3) 绿色低碳化发展聚焦于深度节能与循环经济: 电弧炉 + 薄带铸轧短流程工艺渗透率预计 2030 年达 30% 以上, 吨钢碳排放较传统流程降低 60%; 全氢罩式退火替代部分氮氢混合气氛可节省保护气消耗 25%; 废钢高比例回用 ( $\geq 50\%$ ) 配合绿电供电, 产线可再生能源占比力争达到 40%。此外, 含铬 MgO 涂层替代方案和无铬绝缘涂层的研发已进入中试阶段, 旨在彻底消除重金属污染风险, 实现全生命周期环境友好。

### 结束语

综上, 取向硅钢生产工艺已从传统长流程加工, 逐步向短流程、低温改性、智能低碳方向迭代升级。目前行业仍面临织构均匀性差、抑制剂稳定性不足、高端产品量产成本高的难题。未来需依托数字孪生、多元素复合抑制剂、工序耦合优化等技术, 推进产品高性能、产线智能化、生产绿色化发展, 进一步突破技术壁垒, 降低生产成本, 助力高端硅钢产业规模化普及与电力行业低碳升级。

### 参考文献

- [1] 张鹏, 张文豪, 张欣, 等. 薄规格硅钢生产技术的进展 [J]. 电工钢, 2025, 27(03): 71-78.
- [2] 李泽超, 郭飞虎, 时朋召, 等. 低温 HiB 钢全流程组织、织构演变及成品磁性能 [J]. 安徽工业大学学报 (自然科学版), 2024, 41(04): 432-440.
- [3] 夏强强, 李莉娟, 刘立华, 等. 取向电工钢生产技术的进步与发展 [J]. 钢铁, 2024, 59(06): 78-86.
- [4] 黎先浩, 孟小涛, 赵鹏飞, 等. 取向硅钢铸坯凝固结构调控工艺研究 [J]. 钢铁研究学报, 2023, 35(08): 62-69.
- [5] 陈宇, 杨平, 李志超. 取向硅钢冷轧工艺与织构精准调控研究进展 [J]. 材料工程, 2022, 50(09): 107-110.