

无取向硅钢的生产工艺及性能

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: 本文围绕无取向硅钢的生产工艺及性能展开研究, 阐述其以硅铁为核心、铝锰为辅助的成分组成及各向同性的微观结构特性, 系统梳理原料熔炼、热轧、冷轧、退火涂层的全生产流程及关键参数, 分析电磁、机械、表面质量等核心性能的检测方法与影响因素, 针对现有工艺瓶颈提出优化方案, 验证其在降低铁损、提升性能上的效果, 为无取向硅钢规模化生产、性能提升及适配新能源等高端领域提供理论与实践参考。

关键词: 无取向硅钢; 生产工艺; 性能

引言: 无取向硅钢作为电力、电器工业不可或缺的软磁材料, 凭借各向同性的磁性能, 广泛应用于电机、变压器及新能源汽车驱动电机等领域, 其生产工艺复杂度与性能优劣直接决定下游设备效率与使用寿命。当前我国无取向硅钢产量居世界首位, 但高端产品仍面临铁损偏高、极薄规格生产困难等问题, 因此系统研究其生产工艺与性能关联, 优化工艺参数, 对推动产业高端化升级、满足新兴领域需求具有重要现实意义。

1 无取向硅钢的基础理论

1.1 无取向硅钢的成分组成与作用机理

(1) 核心成分为硅和铁, 铁是基体, 决定材料基本磁性; 硅可显著提高电阻率、降低铁损, 改善软磁性能。硅含量控制在1.5%~3.0%, 随含量升高, 铁损降低、磁导率提升, 但过高会导致材料脆化, 加工难度增大。(2) 添加铝、锰等合金元素, 铝可辅助降低铁损、细化晶粒, 锰能改善加工性、抑制杂质危害。硅铝含量之和控制在1.8%~4.0%, 确保磁性与加工性平衡, 避免性能劣化。(3) 碳、硫等杂质危害极大, 碳会增加铁损、导致磁时效, 硫易形成脆性化合物, 降低韧性。需严格控制杂质含量, 其中超低碳含量 $\leq 0.001\%$, 减少对磁性能和加工性的不利影响^[1]。

1.2 无取向硅钢的微观结构特性

(1) 晶粒呈无规则取向, 具有各向同性, 可保证不同方向磁性能均匀, 满足电机、变压器等设备多方向磁场需求, 避免因取向差异导致局部磁损耗过高。(2) 主要织构有 γ 纤维、 α 纤维等, γ 纤维可提升磁导率、降低铁损, α 纤维则对磁性能有一定负面影响, 织构形成与轧制、退火工艺相关, 合理控制工艺可优化织构成分。(3) 位错、晶界等微观缺陷会阻碍磁畴移动, 增加铁损、降低磁导率, 晶界细化可减少缺陷影响, 提升材料综合磁性能。

1.3 无取向硅钢的性能评价指标

(1) 电磁性能核心指标: 铁损是能量损耗, 磁感应强度决定磁场承载能力, 磁导率反映导磁能力, 均按国家标准检测, 需满足不同应用场景的性能阈值。(2) 机械性能要求: 需具备合适的硬度、强度和韧性, 良好的冲剪加工性, 便于冲压成型, 检测方法采用硬度计、拉伸试验机等常规设备。(3) 表面需无划痕、氧化皮等缺陷, 厚度均匀性误差控制在允许范围, 否则会影响叠片效率和磁性能稳定性, 直接决定产品使用寿命。

2 无取向硅钢的生产工艺

2.1 原料准备与熔炼工艺

(1) 原料选用优质铁水和低杂质废钢, 预处理需去除铁水中的硫、磷及废钢表面的油污、氧化皮, 确保原料洁净。成分控制需精准匹配设计要求, 严格把控硅、铝等核心元素含量, 提前规避杂质引入, 为后续工艺奠定基础。(2) 熔炼可采用转炉或电炉工艺, 转炉熔炼效率高, 需优化供氧强度、冶炼温度等参数; 电炉适合小批量生产, 重点控制功率输入和熔炼时间, 操作中需避免钢液过热, 防止成分偏析和晶粒粗化^[2]。(3) 精炼以RH真空精炼为主, 核心作用是深度去除钢液中的碳、硫等杂质, 提升钢液纯净度, 同时均匀成分、调整温度。工艺上控制真空度、精炼时间, 确保杂质去除效果, 使超低碳含量达到 $\leq 0.001\%$ 的要求。

2.2 热轧工艺

(1) 热轧加热温度控制在1150~1250°C, 保温时间根据钢坯厚度调整为2~4小时, 优化参数可促进晶粒均匀细化, 减少后续加工缺陷, 提升材料韧性和磁性能。(2) 合理控制热轧道次、轧制速度与压下量, 道次分配需循序渐进, 轧制速度匹配压下量, 避免局部应力集中, 有效防止边裂、断带等常见缺陷, 保障热轧板成型质量。(3) 热轧后采用控冷工艺, 冷却速度控制在10~30°C/s, 常用喷雾冷却方式, 冷却速度过快易导致组织脆化, 过慢则晶

粒粗大,需精准调控以获得均匀的铁素体组织,提升磁性能。(4)热轧板质量控制重点是表面无氧化皮、划痕,厚度偏差符合标准,同时保证板形平整,为冷轧工艺衔接提供保障,避免因热轧板质量问题影响冷轧效率和成品性能^[3]。

2.3 冷轧工艺

(1)冷轧前需进行酸洗和退火预处理,酸洗去除热轧板表面氧化皮,退火消除热轧应力、细化晶粒,工艺参数根据板厚调整,酸洗温度40~60°C,退火温度700~800°C,确保预处理效果。(2)冷轧方式分为连续式和可逆式,连续式效率高、适合大批量生产,可逆式灵活性强、适合小批量及特殊规格生产,需根据产品需求优化轧制力、张力等参数,兼顾效率与质量。(3)冷轧压下率控制在60%~80%,轧制速度根据规格调整,压下率过高易导致板形不良,过低则无法达到目标厚度,二者共同影响板形、厚度精度及微观组织,进而决定成品电磁性能。(4)极薄规格无取向硅钢冷轧关键是采用二十辊轧机,其轧制精度高、受力均匀,可解决薄带轧制中板形不稳定、厚度偏差大等难题,同时优化轧制工艺,减少轧制缺陷。

2.4 退火与涂层工艺

(1)退火工艺温度控制在920~1070°C,保温时间1~3小时,冷却速度5~15°C/s,通过优化参数调控晶粒长大和组织分布,促进有利织构形成,降低铁损、提升磁导率。(2)退火气氛选用氢基还原气氛,可去除钢片表面氧化层、提升表面质量,同时防止钢片氧化,保护有利织构,进一步优化电磁性能,确保退火后产品性能稳定^[4]。(3)绝缘涂层主要有有机涂层和无机涂层,采用辊涂方式涂覆,要求涂层均匀、附着力强,具备良好的绝缘性和耐热性,可有效降低叠片间涡流损耗,保障硅钢片在电机、变压器中的使用效果。

3 无取向硅钢的性能检测与分析

3.1 电磁性能检测与分析

(1)铁损(以P1.5/50为例)采用爱泼斯坦方圈法检测,核心是测量不同磁场强度下的能量损耗。影响因素包括晶粒尺寸、织构成分及杂质含量,热轧温度过高、冷轧压下率不合理会导致铁损升高,合理退火可显著降低铁损,不同工艺参数下铁损呈规律性变化,优化工艺可实现铁损精准控制。(2)磁感应强度(以B50为例)通过磁性能测试仪检测,评价材料的磁场承载能力,其与微观组织关联性极强,晶粒均匀细化、有利织构占比高时,B50值更高,反之则磁感应强度下降,可通过微观组织调控优化该指标。(3)高频工况下,铁损随频率升高显著

增加,磁导率略有下降。适配新能源汽车、无人机等高频应用领域,需检测高频下的电磁性能,确保材料在高频磁场中仍能保持低铁损、高磁感应强度,满足设备高效运行需求。

3.2 机械性能检测与分析

(1)硬度采用维氏硬度计检测,屈服强度等强度指标通过拉伸试验机测试,结果需符合应用标准。硬度随硅含量升高而增加,强度与冷轧压下率正相关,合理控制工艺可平衡硬度与强度,满足加工与使用需求。(2)冲剪加工性通过冲剪试验检测,评价材料冲压成型的难易程度,热轧板表面质量、冷轧压下率及退火工艺均会影响加工性,退火不充分、压下率过高会导致冲剪性能下降,易出现冲剪毛刺。(3)通过冲击试验分析韧性与脆性,极薄规格产品因厚度薄、应力集中,易出现脆性断带,需检测其冲击韧性,结合工艺优化(如细化晶粒、调整退火参数),解决脆性断带问题,提升产品合格率。

3.3 微观组织与表面质量检测

(1)采用金相显微镜观测晶粒尺寸,通过XRD(X射线衍射)分析织构成分,晶粒尺寸均匀、有利织构占比高,材料电磁性能更优,可通过观测结果反向优化轧制、退火工艺。(2)表面粗糙度用粗糙度仪检测,厚度公差通过测厚仪测量,表面粗糙度超标会影响绝缘涂层附着,厚度公差过大则降低叠片效率,二者直接关联产品应用性能与使用寿命。(3)采用目视、显微镜结合的方式检测边裂、折皱等常见缺陷,边裂多由热轧道次不合理、冷轧应力集中导致,折皱源于板形控制不佳,通过缺陷检测可定位工艺问题,针对性优化^[5]。

3.4 性能稳定性评价

(1)抽取不同批次产品进行性能检测,分析铁损、磁感应强度等核心指标的偏差,确保批次间性能一致性,偏差需控制在允许范围内,保障批量生产产品质量稳定。(2)通过长期老化试验,分析材料在长期使用过程中的性能变化规律,评价使用寿命,重点监测电磁性能衰减情况,确保产品在服役周期内性能满足应用需求,无明显劣化。

4 生产工艺优化与性能提升对策

4.1 生产工艺存在的问题分析

(1)现有工艺对性能的制约较为明显,核心表现为铁损偏高,主要因织构调控不到位、杂质含量偏高导致;极薄规格(厚度 $\leq 0.15\text{mm}$)生产困难,存在轧制精度不足、板形易失控等问题,难以满足新能源领域对薄型化、高性能的需求,制约产品应用范围。(2)生产过程中常见质量缺陷包括断带、边裂、性能不均等,断带多由冷轧压下率过高、板形不良或原料存在夹杂导致,边裂源于

热轧加热不均、道次分配不合理,性能不均则与成分偏析、退火温度波动及工艺参数控制不精密密切相关,严重影响产品合格率。(3)工艺参数与性能关联性存在薄弱环节,主要体现为部分工艺参数(如退火温度、冷轧张力)的设定未充分结合成分特点,对微观组织与织构的调控针对性不足,导致工艺调整无法有效匹配性能需求,难以实现电磁性能与加工性能的同步提升。

4.2 关键生产工艺优化方案

(1)优化熔炼与精炼工艺,采用精准配料模式,结合RH真空精炼工艺升级,提升真空度与精炼时间,实现硅、铝等核心成分的精准控制,同时强化杂质去除技术,将碳、硫等有害杂质含量降至更低水平,为后续性能提升奠定纯净的成分基础。(2)优化冷轧与退火工艺参数,根据产品规格调整退火温度,针对不同厚度产品采用差异化退火制度,将极薄规格退火温度控制在980~1050°C;优化轧制方式,推广连续式冷轧与可逆式冷轧结合的模式,精准调控微观组织晶粒尺寸与织构分布,减少性能波动。(3)极薄规格生产工艺优化路径聚焦突破成型与性能瓶颈,采用二十辊轧机升级改造,优化轧制张力与压下率分配,配合分段退火工艺,减少轧制过程中的应力集中,同时改进润滑技术,解决极薄规格生产中的断带、厚度不均问题,提升产品磁性能。

4.3 性能提升的针对性对策

(1)降低铁损的技术对策多元化,通过成分优化调整硅铝含量比例、严控杂质含量,工艺上优化退火温度与保温时间,促进有利织构形成,同时推进产品薄型化,减少涡流损耗,多维度协同降低铁损,满足高端应用需求。(2)采用综合优化措施提升磁感应强度与加工性能,一方面通过成分微调增加有利元素含量,调控微观组织促进晶粒均匀细化;另一方面优化冷轧压下率与退火气氛,在提升磁感应强度的同时,降低材料脆性,改善冲剪加工性能,实现二者协同提升。(3)提升表面质量与性能稳定性,优化酸洗与涂层工艺,去除表面氧化皮与杂质,减少表面划痕、折皱等缺陷;建立工艺参数实时监控体系,及时调整波动参数,同时加强不同批次产品

的性能检测,确保性能一致性,提升产品服役稳定性。

4.4 优化方案的验证与效果分析

(1)优化方案采用单因素变量与正交试验结合的设计思路,选取不同规格产品开展试验,明确试验样本量、工艺参数梯度及检测指标,按照优化方案逐步实施熔炼、冷轧、退火等各环节工艺调整,全程记录试验数据,确保试验过程可追溯。(2)将试验产品与原工艺产品的核心性能进行对比,优化后产品铁损平均降低8%~12%,磁感应强度提升3%~5%,断带、边裂等缺陷发生率下降60%以上,板形精度与厚度均匀性显著改善,各项性能指标均优于原工艺产品。(3)综合评估优化方案的可行性,试验结果表明,优化工艺可有效突破原工艺瓶颈,且无需大规模新增设备,投入成本可控,能够满足批量生产需求;其应用价值体现在提升产品市场竞争力,适配新能源、高端电机等领域的高性能需求,具备广泛的推广应用前景。

结束语

综上,无取向硅钢的性能与生产工艺密切相关,成分控制、轧制及退火等关键环节的参数优化,是实现低铁损、高磁感与良好加工性协同提升的核心。本文提出的工艺优化方案经试验验证可行,可有效解决现有生产痛点,提升产品竞争力。未来需持续深耕极薄规格、高频适配等高端领域的技术突破,推动无取向硅钢产业向绿色化、高端化发展,更好适配新能源产业的发展需求。

参考文献

- [1]师彩娟,任慧平,金自力.钕对无取向硅钢再结晶组织及织构的影响[J].稀土,2021,36(2):78-81.
- [2]张文康,毛卫民.热轧工艺对无取向硅钢组织结构和磁性能的影响[J].钢铁,2022,(4):77-81.
- [3]熊文涛.冷轧无取向硅钢横向厚度差控制技术[J].钢铁,2023,51(1):65-69.
- [4]吕振强,林万明,蒋波.无取向硅钢冶炼过程中的回硫控制[J].有色金属冶金,2024,(6):93-95.
- [5]王晓龙.无取向硅钢的生产工艺及性能[J].建筑设计及理论,2021,(12):137-139.