

无取向硅钢连续退火工艺参数对磁性能的影响研究

甘绍壮 吕 静 赵富光

安钢集团冷轧有限责任公司 河南 安阳 455000

摘 要：无取向硅钢连续退火工艺中的温度、冷却速率与保护气氛参数通过调控晶粒尺寸、织构演变及析出物分布等微观结构特征，显著影响铁损与磁感应强度等关键磁性能指标，其多参数耦合作用机制呈现非线性特征。研究构建响应面与机器学习融合的动态映射模型，揭示工艺参数间协同效应，实现对晶粒均匀性、织构强度与残余应变释放时序的定量描述。基于 GB/T2521-2023 标准，建立多目标优化框架，明确铁损最小化与磁感应强度最大化之间的工艺协同区间，支撑不同牌号硅钢的工艺窗口精准界定。该模型具备良好的可迁移性与适应性，为连续退火过程的闭环调控提供理论基础。研究成果可应用于高效电机用硅钢材料的工艺设计与质量控制，推动制造过程向智能化与标准化发展。

关键词：无取向硅钢；连续退火工艺参数；磁性能；影响

引言

无取向硅钢作为电力电子设备中核心的软磁材料，其磁性能直接决定电机与变压器的能量转换效率。连续退火工艺作为决定材料微观组织演化的关键环节，对晶粒尺寸、织构类型及析出物分布具有显著调控作用。退火温度、冷却速率与保护气氛成分等参数的协同作用，深刻影响铁损与磁感应强度等核心性能指标。现有研究揭示，退火温度通过调控再结晶驱动力，进而影响晶粒尺寸分布与织构演变路径。冷却速率则通过改变相变动力学行为，调节残余应力水平与晶界迁移速率。保护气氛成分，特别是氢气还原能力与氮气保护效果，对表面氧化层厚度及析出物形貌具有决定性影响。这些参数并非孤立作用，而是通过复杂的非线性耦合机制共同决定最终磁性能表现。

磁性能的优化依赖于工艺参数与微观结构之间的精准映射关系。晶粒尺寸的均匀性影响磁畴壁移动阻力，织构演变特别是 Cube 织构占比，决定磁导率的各向同性水平。析出物作为第二相粒子，可有效钉扎晶界，抑制晶粒异常长大。当前研究重点已从单一参数优化转向多参数协同调控机制探索。通过构建工艺-结构-性能的多尺度关联模型，结合正交实验设计与机器学习算法，可实现对铁损与磁感应强度的非线性预测与多目标协同优化。该研究框架为 GB/T2521-2023 标准下不同牌号硅钢的工艺窗口界定提供了理论支撑。

1 连续退火工艺参数体系与磁性能调控机制

连续退火作为无取向硅钢制备中的关键热处理工

序，其工艺参数的精确调控直接影响材料的微观结构演化路径与最终磁性能表现。该过程涉及多物理场耦合作用，参数间存在显著非线性交互效应。深入解析退火温度、冷却速率与保护气氛等核心参数对晶粒尺寸、织构类型及析出物分布的影响机制，是实现磁性能精准调控的前提。研究需超越传统单因素分析框架，转向多参数协同作用机制的系统性探索。

1.1 工艺参数作用范畴

退火温度通过调控再结晶驱动力，显著影响晶粒形核与长大动力学过程。温度过低时，驱动力不足导致再结晶不充分，晶粒细小且均匀性差；温度过高则引发晶粒异常长大，削弱磁性能一致性。温度梯度与保温时间共同决定晶界迁移速率，进而影响后续磁畴壁移动阻力。冷却速率作为影响相变动力学的关键变量，控制奥氏体向铁素体转变的速率与路径。快速冷却可抑制碳化物析出，减少残余应力积累，但过快冷却可能引入热应力导致局部畸变。慢速冷却则有利于应力释放，但易形成粗大析出物，降低材料软化效果。保护气氛成分决定材料表面氧化还原平衡状态。氢气具有强还原性，可有效清除氧化层并抑制新氧化物生成，同时控制碳化物析出形貌与分布，避免晶界偏析。气氛中微量水汽或氧气含量波动可能引发表面缺陷，进而影响后续磁性能表现^[1]。

1.2 磁性能指标体系

铁损（P15/50）是衡量材料能量耗散能力的核心指标，综合反映涡流损耗与磁滞损耗的叠加效应。其值越

低,表示材料在交变磁场下能量损失越小,适用于高效率电力设备。磁感应强度(B50)反映材料在特定磁场强度下被磁化的程度,其高值意味着材料具备更强的导磁能力,对提升电机与变压器效率具有关键意义。磁各向异性则表征材料在不同取向下的磁性能差异程度。理想无取向硅钢应具备高度各向同性,以保证在复杂磁场环境下的性能稳定性。三者之间存在内在权衡关系:提升B50常伴随铁损升高,而降低铁损往往以牺牲B50为代价,因此需通过工艺调控实现多目标协同优化。

1.3 微观结构演化路径

晶粒尺寸的调控直接决定磁畴壁移动的阻力大小。晶粒过细则晶界密度增加,导致磁畴壁移动受阻;晶粒过粗则易形成磁畴结构不均,引发局部磁滞损耗上升。晶粒尺寸的分布均匀性对铁损与B50的稳定性具有决定性影响。织构演变是影响磁导率各向同性的关键因素。Cube织构占比越高,磁化方向与晶粒主轴越一致,磁性能各向同性越强。然而,Cube织构的形成依赖于精确的再结晶与晶粒生长路径控制。析出物分布对晶粒长大行为具有显著钉扎效应。细小、弥散分布的析出物可有效抑制晶粒异常长大,维持晶粒尺寸均匀性;若析出物粗大或聚集,则易引发局部晶粒长大,造成磁性能波动。析出物的种类、尺寸与分布形态受退火温度与冷却速率共同影响,需通过气氛成分调控实现最佳控制^[2]。

2 多参数耦合作用机制与动态映射模型

在无取向硅钢连续退火过程中,工艺参数并非孤立作用,其协同效应深刻影响微观结构演化路径与最终磁性能表现。温度、冷却速率与气氛成分三者构成核心调控变量,其交互作用机制复杂,需从多尺度视角揭示其内在关联规律。现有研究已表明,单一参数优化难以实现铁损与磁感应强度的协同提升,必须建立系统性调控框架以应对非线性耦合挑战。该框架的构建需融合实验表征与建模分析,实现从工艺输入到性能输出的可预测性映射。

2.1 温度-冷却速率耦合效应

高温退火阶段有利于再结晶形核过程的启动,提高晶界迁移驱动力,从而促进晶粒均匀长大。然而,过高的退火温度易导致晶粒粗化现象加剧,尤其在长时保温条件下,晶粒尺寸分布趋于非均匀,形成局部粗大区域,削弱材料整体磁性能一致性。同时,冷却速率对晶粒长大的终止时机具有决定性影响。快速冷却可抑制晶粒进一步生长,维持细小晶粒结构,但可能阻碍有利织构(如Goss织构)的形成,降低磁各向异性补偿效率。

冷却速率的降低则有利于织构取向的充分发展,提升磁感应强度,但伴随残余应力积累的风险增加。二者协同调控可实现晶粒尺寸控制与织构强度之间的动态平衡,从而优化综合磁性能。

2.2 气氛成分调控机制

保护气氛中氢气分压的调节直接决定材料表面还原程度,高氢分压可有效去除氧化层,提升表面清洁度,降低界面缺陷密度,进而改善晶界迁移能力。然而,过高的氢分压可能引发氢致脆化风险,特别是在高应变区域,易诱发微裂纹形成,影响材料力学稳定性。氮气作为惰性保护气,能有效抑制氧化反应发生,维持材料表面完整性,但其较低的热导率导致炉内传热效率下降,影响温度场均匀性,进而影响晶粒生长的同步性。此外,气氛中的水蒸气分压对氧化层形貌具有调控作用,适度湿度可形成致密氧化物层,抑制原子扩散,而过高湿度则导致氧化层疏松,削弱其保护作用。因此,气氛成分的动态调节必须兼顾还原性、稳定性与传热性能的综合平衡。

2.3 工艺-结构-性能映射模型

建立基于实验数据的响应面模型,可定量描述退火时间与冷却速率对晶粒尺寸与织构取向的非线性影响。该模型揭示了织构强度与铁损之间存在显著负相关关系,即织构越强,铁损越低,但此关系并非线性,其峰值效应存在于特定区间内。同时,残余应变的释放过程与晶粒长大过程需在时间维度上实现匹配,过早释放会导致晶界不稳定性,延迟释放则抑制晶粒发育,两者失配将引发局部应力集中^[3]。通过时间序列分析可识别出关键时序节点,为工艺窗口设定提供依据。该映射模型为后续多目标优化提供了基础支撑。

2.4 模型构建方法论

采用正交实验设计方法,可在有限实验次数下实现对多参数空间的高效采样,避免传统全因子实验带来的高成本与低效率问题。基于采集数据,引入支持向量机与随机森林等机器学习算法,构建非线性预测模型,显著提升对复杂工艺-性能关系的拟合能力。该类模型可捕捉隐性交互效应,弥补传统回归方法的局限性。进一步地,结合遗传算法对多目标函数进行优化,可实现铁损最小化与磁感应强度最大化的协同求解,得到全局近优解。该方法论体系不仅提高了模型泛化能力,也为工艺参数的在线调整与闭环控制提供了理论工具。

3 工艺优化路径与标准适配性研究

基于GB/T2521-2023标准要求,构建闭环调控体系

实现工艺窗口精准界定,是提升无取向硅钢综合磁性能的关键路径。该体系以牌号分级为逻辑起点,依托磁性指标与工艺参数的映射关系,实现从终端性能反向推导工艺参数的可行性。通过系统识别不同牌号对铁损与磁感应强度的差异化需求,可建立面向多目标优化的工艺设计框架,为后续动态调控提供理论支撑。

3.1 牌号分级反向推导

35W300 牌号的设定以铁损最小化为核心目标,其性能表现高度依赖于晶粒尺寸的均匀性与织构取向的抑制能力。在连续退火过程中,退火温度的微小波动会显著影响晶粒长大速率,进而改变磁畴壁迁移阻力。因此,需通过工艺参数的精细化调控,确保晶粒在特定区间内稳定生长,避免晶界偏析与析出物聚集^[4]。50W470 牌号则更强调 B50 值的提升,其性能优势源于高密度的 (110) 织构取向与低缺陷密度的晶粒内部结构。实现该性能目标需控制冷却速率与气氛氢分压的协同作用,以抑制非磁性相析出并促进有利织构演化。建立磁性能指标与退火温度、冷却速率、氢气浓度等关键参数之间的定量转换关系,是实现牌号分级优化的基础。该关系不仅反映单一参数影响,更揭示了多因素耦合效应的非线性特征,为后续多目标优化提供输入依据。

3.2 多目标优化策略

铁损最小化与 B50 最大化的协同优化面临参数空间的强非线性与多解性挑战。在实际生产中,提高退火温度有助于晶粒长大,从而降低铁损,但过高的温度会导致织构弱化,削弱磁感性能。冷却速率的调节同样存在类似矛盾:缓慢冷却有利于织构发展,但可能引发二次析出,增加磁滞损耗。因此,需识别二者之间的协同区间,通过响应面法或数值模拟方法,构建性能-参数映射模型,识别最优参数组合区域。该区域并非固定点,而是在不同牌号与材料成分下动态变化。为保障工艺窗口的稳定性,需引入容差设计方法,对关键参数设定允许波动范围,以应对设备老化、气源波动等不确定性因素。该容差设计结合统计过程控制 (SPC) 理念,可有效抑制质量波动,提升批量生产的一致性与可靠性^[5]。

3.3 动态调控技术实现

在线监测系统是实现闭环控制的物理基础。通过集成红外测温、气体成分分析与 X 射线衍射实时检测装

置,可获取退火过程中温度场、气氛环境与晶格取向的动态信息。这些数据经预处理后,输入实时反馈控制算法,实现对加热功率、冷却速率与氢气流量的动态调节。算法设计需融合经典 PID 控制与基于机器学习的预测模型,以应对系统延迟与非线性特性。自适应调整机制则进一步提升系统鲁棒性,当检测到性能偏离目标值时,系统能自动识别偏差来源,并调整参数组合以恢复最优状态。该机制不仅适用于单一工况,也可通过参数库扩展支持多牌号切换,显著提升产线柔性。

结束语

系统研究揭示了退火温度、冷却速率与保护气氛协同作用下,晶粒尺寸、织构演变及析出物分布等微观结构特征对铁损与磁感应强度的非线性影响机制,结果表明三者存在显著交互效应,且其耦合关系可通过响应面与机器学习模型实现定量映射。研究构建的“温度-冷却-气氛”三元协同调控框架,突破了传统单因素优化范式,有效实现了铁损最小化与 B50 最大化的多目标协同,为 GB/T2521-2023 标准下不同牌号硅钢的工艺窗口精准界定提供了理论依据。尽管当前模型基于特定材料体系与实验条件,其外部效度仍受限于材料成分与设备差异,未来应进一步融合在线监测与自适应控制技术,拓展至多成分、多工况场景,推动连续退火工艺向智能化、标准化方向演进。

参考文献

- [1] 王海军,牛宇豪,乔家龙,等.退火工艺对无取向硅钢晶粒尺寸和织构强度的影响[J].金属热处理,2023,48(12):44-55.
- [2] 谯德高,赵小龙,狄彦军,等.退火工艺对平整轧制后 50W800 无取向硅钢磁性能的影响[J].金属热处理,2022,47(11):117-121.
- [3] 刘开心,刘亚猛,李艳国,等.Fe-2.3Si 无取向硅钢连续退火过程中的组织演变与再结晶动力学[J].材料热处理学报,2025,46(01):72-80.
- [4] 李奎,安士忠,李邦振,等.行星式球磨工艺参数对 SmCo₅ 粉体磁性能的影响研究[J].功能材料,2024,55(02):2224-2229.
- [5] 李宗维,李涛,韩强,等.连续退火工艺对稀土 50W470 无取向硅钢组织、织构及磁性能的影响[J].内蒙古科技大学学报,2023,42(04):327-331.