

稀土元素替代对钕铁硼磁钢磁性能影响的配方设计

张 敏 陈彦江 李晓艳

内蒙古千山重工有限公司 内蒙古包头 014010

摘 要：钕铁硼磁钢因高性能广泛应用于多领域，但其依赖的钕、镨等稀土元素资源稀缺且价格波动大，制约产业发展，稀土元素替代成为解决该问题的关键路径。当前研究多关注单一稀土元素替代对磁性能的影响，缺乏多元素协同替代机理分析，且配方设计中性能优化与工艺适配结合不足。文章剖析稀土元素替代钕铁硼磁钢的作用机理，明确配方设计原则与参数，探究替代对磁性能的影响规律，提出配方优化方法，为开发高性能、低成本的稀土替代型钕铁硼磁钢提供理论支撑，助力推动钕铁硼磁钢产业可持续发展。

关键词：稀土元素替代；钕铁硼磁钢；磁性能；配方设计；作用机理；配方优化

引言

钕铁硼磁钢作为高性能永磁材料，在新能源、电子信息等领域应用广泛，但其核心原料钕、镨等稀土元素资源稀缺且价格波动大，制约产业可持续发展。通过低丰度稀土元素替代高丰度稀缺稀土，成为平衡磁钢性能与成本、保障供应链稳定的关键路径。当前研究多聚焦单一稀土元素替代对磁性能的影响，缺乏对多元素协同替代机理的系统分析，且配方设计中性能优化与工艺适配的结合不足，难以直接指导实际生产。基于此，本文围绕稀土元素替代展开研究，剖析其对钕铁硼磁钢磁性能的作用机理，探索科学的配方设计与优化方法，为开发高性能、低成本的稀土替代型钕铁硼磁钢提供理论支撑。

一、稀土元素替代钕铁硼磁钢的作用机理分析

（一）替代稀土元素与基体的晶体结构作用关系

钕铁硼磁钢具有特定的晶体结构，其磁性能与晶体结构的完整性、对称性密切相关。替代稀土元素进入钕铁硼基体后，会与基体中的钕、铁等原子发生晶格占位作用——部分替代元素会占据钕原子的晶格位置，而部分则可能嵌入晶格间隙。这种占位行为会改变晶体的晶格常数，进而影响晶格间的结合能与原子排列有序度。若替代元素的原子半径与钕原子差异较小，能较好适配原有晶格结构，可减少晶格畸变；若原子半径差异较大，则易引发晶格缺陷，如位错、空位等。这些晶体结构层面的变化，会直接影响磁钢内部磁矩的排列方向与耦合强度，成为后续磁性能变化的结构基础^[1]。

（二）替代元素对磁畴结构与磁交换作用的影响

磁畴结构的分布与运动状态是决定钕铁硼磁钢磁性能的核心因素，而替代稀土元素会通过改变磁畴特性影响磁性能。一方面，替代元素会改变磁钢内部的磁晶各向异性场——不同替代元素的原子磁矩与电子云分布存在差异，进入基体后会调整局部磁矩的取向难度，进而影响磁畴壁的移动阻力；另一方面，替代元素会作用于磁交换作用，即通过改变原子间的电子交换相互作用强度，影响磁畴内部磁矩的平行排列程度。当替代元素增强磁交换作用时，磁畴内磁矩排列更整齐，有助于提升磁钢的剩磁；若削弱磁交换作用，则可能导致磁畴易发生偏转，降低磁性能稳定性，这些变化共同构成替代元素影响磁性能的微观机制^[2]。

（三）不同稀土元素替代的协同效应与竞争机制

当多种稀土元素共同替代钕铁硼磁钢中的稀缺稀土时，会呈现协同效应与竞争机制，共同决定磁钢的最终性能。协同效应体现在不同替代元素的优势互补——例如，某类替代元素可提升磁钢的矫顽力，而另一类可维持较高的剩磁，二者共同作用时能实现磁性能的综合优化，避免单一元素替代导致的性能短板。竞争机制则源于替代元素在晶格占位、电子作用上的相互干扰——不同替代元素对晶格位置的争夺，可能导致部分元素无法有效发挥作用；同时，它们对磁晶各向异性场、磁交换作用的影响方向若相反，会相互削弱效果，甚至引发磁性能下降。明确这种协同与竞争的作用边界，是实现多元素高效替代、保障磁钢性能的关键前提。

二、稀土元素替代钕铁硼磁钢的配方设计原则与参数

(一) 替代稀土元素的种类选择与比例确定原则

替代稀土元素的种类选择需在磁性能保留与资源经济性之间找到最佳平衡：既要优先筛选与钕、镝原子半径接近、电子构型适配度高的稀土元素，确保其能顺利且稳定地融入钕铁硼磁钢的晶体主相结构，避免因原子尺寸差异过大或电子作用不匹配导致晶格结构紊乱；又要通过这种结构相容性减少晶格畸变程度，进而降低对磁钢内部磁交换作用的破坏，最大程度保留原始磁钢的优异磁性能，为后续配方优化奠定基础。同时需考量元素自身磁特性，选择具有较强磁矩且能与铁原子形成有效磁耦合的种类，避免因元素特性差异导致磁性能大幅衰减。比例确定需遵循“梯度替代”原则，以磁性能关键指标为基准，从低比例替代开始逐步调整，平衡磁性能保留率与替代成本优势，同时关注替代比例对晶体结构完整性的影响，避免因比例过高引发第二相析出，确保磁钢内部微观结构稳定，为后续性能优化奠定基础。

(二) 配方设计中磁性能优化的关键参数设定

配方设计需围绕剩磁、矫顽力、磁能积三大核心磁性能指标设定关键参数。针对剩磁优化，重点设定稀土元素总含量参数，确保其在维持晶体结构所需最低占比基础上，最大程度提升磁畴排列有序性；矫顽力优化则需设定替代元素与基体的界面结合能参数，通过调控元素间相互作用增强磁畴反转阻力；磁能积优化需关联稀土元素分布均匀性参数，避免因元素偏聚导致局部磁性能薄弱区域。此外，需结合钕铁硼磁钢磁性能的内在关联特性，同步设定各关键参数的协同阈值，明确不同参数调整的边界范围，确保剩磁、矫顽力、磁能积相关参数间相互适配、协同作用，避免因单一参数过度调整打破性能平衡，引发其他指标大幅波动或失衡，最终形成多指标联动、协同优化的系统化参数体系^[3]。

(三) 配方稳定性与工艺适配性的平衡设计

配方稳定性设计需关注稀土元素在磁钢制备全流程中的化学稳定性，避免高温烧结、热处理等工艺环节中替代元素与其他组分发生异常化学反应，生成非磁性相影响磁性能。同时需考量配方在长期使用环境下的性能稳定性，通过调控元素配比提升磁钢抗腐蚀、抗高温老化能力。工艺适配性设计则需结合现有制备工艺特点，设定与熔炼、制粉、烧结等工序适配的配方参数，例如调整元素配比以适配特定烧结温度区间，避免因配方与

工艺不匹配导致磁钢致密性不足或晶粒异常长大。通过稳定性与工艺适配性的双向平衡，确保配方既能满足磁性能要求，又能兼容工业化生产流程，具备实际应用可行性。

三、稀土元素替代对钕铁硼磁钢磁性能的影响规律

(一) 替代元素对剩磁与矫顽力的影响特征

剩磁与矫顽力是衡量钕铁硼磁钢磁性能的核心指标，其变化与替代稀土元素的原子结构及化学特性紧密相关。当采用镧、铈等轻稀土元素替代部分钕时，因轻稀土原子半径与钕存在差异，会轻微改变磁钢主相晶体结构的对称性，导致磁畴排列有序度下降，进而使剩磁呈现缓慢降低趋势；而采用钐、铕等重稀土元素替代时，重稀土原子易富集于晶界处，形成高磁各向异性的晶界相，阻碍磁畴反转，显著提升矫顽力，但过量替代会因重稀土与基体的磁耦合作用减弱，反而导致剩磁降幅扩大。不同替代元素对两项指标的影响方向与程度存在差异，需结合磁钢应用场景对性能的需求，选择适配的替代元素类型。

(二) 替代比例与磁能积的关联性分析

磁能积作为反映磁钢整体磁性能的综合指标，其变化与稀土元素替代比例呈现显著的关联性。在低比例替代阶段，替代元素少量融入主相，对磁畴运动的阻碍作用较弱，磁钢的剩磁与矫顽力下降幅度较小，磁能积可维持在接近原始水平；随着替代比例提升，替代元素在主相中的固溶量增加，主相磁矩与磁各向异性场同步变化，若剩磁下降速率快于矫顽力提升速率，磁能积会进入快速下降区间；当替代比例超过临界值时，主相结构易出现畸变，晶界相分布不均，导致磁畴难以稳定排列，磁能积大幅衰减。这种关联性并非线性关系，而是受替代元素种类、基体成分等因素共同调控，呈现特定的变化曲线特征^[4]。

(三) 温度稳定性与稀土元素替代的耦合影响

钕铁硼磁钢的温度稳定性直接决定其在高温环境下的应用适配性，而稀土元素替代会通过改变磁钢的磁热特性，与温度稳定性形成耦合影响。未替代的钕铁硼磁钢在高温下易因磁畴热运动加剧导致磁性能衰减，而引入特定替代元素可改善这一问题：例如铕、镝等重稀土元素替代后，晶界相的热稳定性提升，能抑制高温下磁畴反转的能量阈值，减缓矫顽力随温度的下降速率；但轻稀土元素替代可能降低主相的居里温度，使磁钢在相同高温条件下的磁矩损失增加，温度稳定性反而下降。

此外，替代比例的变化会进一步调节这种耦合效应，需通过精准控制替代方案，实现磁性能与温度稳定性的协同优化。

四、稀土元素替代钕铁硼磁钢配方的优化方法

(一) 基于磁性能目标的配方正交优化策略

基于磁性能目标的配方正交优化策略，以明确的磁性能指标（如剩磁、矫顽力、磁能积）为导向，通过正交试验设计构建多因素、多水平的试验方案。该策略先筛选影响磁性能的关键变量，包括替代稀土元素种类、替代比例及其他合金元素添加量，再按照正交表设计试验组合，避免全面试验的繁琐性。试验过程中，对不同配方样品的磁性能进行精准测试，结合极差分析与方差分析，量化各变量对磁性能的影响程度，确定关键变量的最优水平区间。同时，针对正交优化得出的初步配方方案，设计多组验证试验并制备对应磁钢样品，通过精准测试样品的剩磁、矫顽力、磁能积等核心指标，对比实际性能与目标性能的偏差，反向修正替代元素种类、比例及合金添加量等参数。最终在确保完全满足预设磁性能目标的前提下，确定替代元素与钕铁硼基体元素的最佳配比，为配方初步优化提供高效、可靠且可落地的技术路径^[5]。

(二) 多稀土元素协同替代的配方迭代方法

多稀土元素协同替代的配方迭代方法，针对单一元素替代难以兼顾多磁性能指标的问题，通过多轮迭代逐步优化配方组合。首轮迭代以两种或多种稀土元素为替代组分，根据前期机理分析设定初始配比范围，制备样品并测试磁性能，筛选出具有协同效应的元素组合；第二轮迭代聚焦该组合的配比调整，细化比例梯度，重点分析元素间协同作用对磁性能短板的弥补效果；后续迭代则结合工艺适配性测试，在保证磁性能达标的同时，优化配方以适配现有制备工艺。每轮迭代后均建立性能-配方关联数据库，通过数据对比分析总结规律，为下一轮迭代提供方向，最终获得兼具优异磁性能与工艺兼容性的协同替代配方。

(三) 配方性能预测模型的构建与应用

配方性能预测模型的构建以大量试验数据与理论机理为基础，通过机器学习算法或数理统计方法，建立替代元素种类、配比与磁性能指标间的映射关系。模型构建时，先对历史试验数据进行预处理，剔除异常值并标

准化，再选择合适的模型架构（如回归模型、神经网络模型），以配方参数为输入、磁性能数据为输出进行训练与验证，不断调整模型参数提升预测精度。模型应用阶段，可根据设定的磁性能目标反向推导适配的配方参数，减少盲目试验；同时，能模拟不同配方在极端条件（如高温、磁场变化）下的性能变化趋势，提前预判配方的环境适应性，为配方优化提供前瞻性指导，大幅缩短研发周期，降低试验成本。

结语

本研究围绕稀土元素替代对钕铁硼磁钢磁性能的影响及配方设计展开，系统剖析了替代元素与基体的晶体结构作用关系、对磁畴与磁交换作用的影响，以及多元素替代的协同与竞争机制，明确了替代元素种类、比例与磁性能指标间的关联规律，进而提出基于磁性能目标的正交优化、多元素协同迭代、性能预测模型构建等配方优化方法，为稀土替代型钕铁硼磁钢研发提供了理论与技术支持。研究仍存在一定局限，如未深入探索极端环境下替代配方的长效稳定性，且对不同制备工艺下配方参数的动态调整研究不足。未来可进一步结合先进表征技术与多物理场模拟，深化替代机理研究，同时加强配方与工业化生产工艺的适配性探索，推动高性能、低成本稀土替代型钕铁硼磁钢在更多领域的规模化应用。

参考文献

- [1]朱青,汪维杰,倪浩瀚,等.一种提高钕铁硼磁钢磁性能的晶界扩散方法:CN202210875256.1[P].CN115188578B[2025-09-20].
- [2]郑少琪.烧结钕铁硼磁钢压制工艺数值分析与参数优化研究[D].福建理工大学,2024.
- [3]周建明,何行其.一种提高钕铁硼薄片磁钢磁性能一致性的方法:CN201610566835.2[P].CN106229138A[2025-09-20].
- [4]葛海军,邓言方,陈天涯,等.一种含铈的钕铁硼磁钢及其制备方法:CN202010221185.4[P].CN111341515A[2025-09-20].
- [5]易鹏鹏,胡小杰,林最伟,等.一种调控烧结钕铁硼磁性能的方法.2018[2025-09-20].