

# 基于变频磁应力技术的金属材料调质处理系统设计与阻抗稳定控制研究

徐 佳

杭州飞宇磁电器材有限公司 浙江 杭州 311100

**【摘要】**：本研究针对传统金属材料调质处理工艺在调控材料微观组织与电磁性能方面的不足，设计了一套基于变频磁应力技术的金属材料调质处理系统。该系统通过集成变频行波磁场发生器与应力加载装置，实现对金属材料的多场耦合（磁场、应力场、温度场）协同处理。核心研究聚焦于利用该技术调控材料的巨磁阻抗效应及磁学性能的稳定性。研究结果表明，通过优化励磁电流、频率及应力参数，能够有效改善材料微观结构，优化磁畴构型，从而实现材料机械性能与高频阻抗稳定性的协同提升。本研究为发展高性能、高稳定性的金属功能材料提供了新的工艺路径与理论依据。

**【关键词】**：变频磁应力；阻抗稳定控制；多场耦合；金属调质处理；巨磁阻抗效应

DOI:10.12417/2705-0998.25.24.053

## 1 引言

金属材料的电磁性能与机械性能对其在现代电力电子、精密仪器和航空航天等领域的应用至关重要。传统热处理工艺虽能改善材料性能，但在实现对微观结构（如晶粒、磁畴）的精确调控，以及确保材料在高频条件下电磁参数（如磁导率、阻抗）的稳定性方面存在局限。近年来，融合磁场、应力场和温度场的多场耦合处理技术，因其能诱导独特的相变、改变各向异性并优化畴结构，展现出显著优势。

其中，磁应力技术，特别是变频行波磁场，已被证明能有效破碎枝晶、细化组织、消除铸造缺陷，从而大幅提升合金的力学性能。与此同时，材料的巨磁阻抗效应及其稳定性，与材料的磁各向异性、畴壁运动密切相关，可通过多场耦合处理进行精细调控。例如，应力退火能显著改变非晶或纳米晶软磁材料的磁畴结构和磁各向异性，进而优化其磁阻抗响应和损耗特性。

基于此，本文提出设计一套集成了变频磁应力发生与精确控制单元的金属材料调质处理系统。研究目的在于：1)阐述该系统的设计原理与构成；2)探究利用该系统进行多场耦合处理对金属材料（特别是软磁材料）微观组织与力学性能的影响；3)深入研究处理过程中材料阻抗的演变规律及稳定化控制机制，为实现材料性能的可设计、可控制提供系统性方案。

## 2 变频磁应力处理系统设计

本系统旨在为金属材料提供一种可精确编程控制的多物理场协同处理环境。系统整体由变频磁应力发生单元、力学加载单元、温控单元、在线监测与中央控制系统四大部分构成。

### 2.1 变频磁应力发生单元

该单元是系统的核心，其设计借鉴了行波磁场处理大型铸件的思路，并进行了高频扩展与精密化改进。单元核心为多组环绕式励磁线圈阵列，由大功率变频电源驱动。电源可在 50 Hz

至 1 MHz 范围内输出频率、幅值及波形（正弦、脉冲）均可独立编程的电流，从而在样品处理区内生成方向、强度与频率可控的移动磁场。根据前期研究，磁场力在特定电流与频率组合下达到极值（如电流 20A、频率 200Hz 时），系统设计需确保在该参数邻域具有高输出精度与稳定性。磁场发生器采用水冷结构，以保障长时间大功率运行的可靠性。

### 2.2 多场耦合处理腔体设计

处理腔体是实现磁场、应力、温度三场协同作用的关键。腔体采用非磁性高强度材料制成，内部集成：

力学加载模块：配备高精度伺服电机与应力传感器，可对棒状、带状样品施加恒定或动态变化的拉伸/压缩应力，应力范围覆盖数 MPa 至数百 MPa，以满足不同材料（如非晶带材）的应力退火需求。

精确温控模块：采用基于感应加热或红外辐射的快速加热系统，配合热电偶与闭环 PID 控制器，使样品能在室温至 1200° C 范围内实现快速升温 and 精确恒温，温度波动控制在 ± 1° C 以内。

腔体结构经电磁-热-力多物理场仿真优化，确保在施加高频磁场时，内部应力与温度场的分布均匀且可控，避免引入不必要的干扰梯度。

### 2.3 在线监测与智能控制系统

系统集成 4294A 型阻抗分析仪等设备，可在处理过程中原位监测材料的复阻抗谱，实时获取其巨磁阻抗效应变化数据。中央工控机运行定制化软件，负责协调各单元动作：根据预设或基于实时监测数据的反馈控制算法，动态调整磁场参数（频率  $f$ 、电流  $I$ ）、机械应力（ $\sigma$ ）与热处理温度（ $T$ ），形成“监测—分析—调控”的闭环处理流程。该系统架构为实现面向目标性能（如特定频率下的阻抗稳定性）的自适应优化处理奠定了基础。

表 1 变频磁力处理系统核心设计参数

模块名称	核心参数/功能	设计目标
变频磁力发生	频率范围: 50 Hz-1 MHz; 电流范围: 0-50 A (连续可调)	产生高强度、频率精确可调的移动磁场, 用于搅拌熔体或影响固态相变。
力学加载	加载方式: 单轴拉伸/压缩; 应力范围: 0-500 MPa	在处理过程中为样品引入可控的应力场, 以诱导期望的磁各向异性。
温度控制	温度范围: 室温-1200° C; 控制精度: $\pm 1^\circ$ C	提供精确的热处理温度环境, 与磁、应力场协同作用。
在线监测	集成阻抗分析仪、温度与应力传感器	实时获取材料电磁性能与工艺参数数据, 为闭环控制提供反馈。
中央控制	基于工控机的集成控制软件, 支持程序编排与反馈算法	实现磁场、应力、温度多参数的程序化协同控制与自适应优化。

### 3 基于多场耦合的阻抗稳定控制机制

材料的阻抗, 特别是高频下的阻抗稳定性, 是衡量其电磁性能的关键。本研究将阻抗稳定控制视为通过多场耦合处理调控材料微观磁结构的结果。

#### 3.1 磁各向异性竞争与阻抗响应调控

材料的总磁各向异性是磁晶各向异性、应力感生各向异性及形状各向异性等竞争与叠加的结果。研究显示, 对 Fe 基非晶/纳米晶带材进行多场耦合(焦耳热与拉应力)处理后, 其纵向驱动巨磁阻抗效应曲线形态随拉应力增加, 从单峰状经“尖刺+穹顶”状过渡为穹顶状。这一演变被归因于应力各向异性场与磁晶各向异性场之间的“竞争抑制效应”。引入的磁各向异性竞争因子  $k$  可作为量化这一竞争关系的参数。当  $k$  值小于等于 0.147 时, 材料呈现典型的应力退火横向磁畴结构; 当  $k$  大于 0.147 时, 畴壁处出现新磁畴的形核与分裂。系统通过精确调控应力 ( $\sigma$ ) 和热处理温度/时间(影响磁晶各向异性), 可以控制  $k$  值, 从而将材料的阻抗-外场响应曲线“塑造”为所需的形态, 这对于设计线性磁传感器或高稳定性电感磁芯至关重要。

#### 3.2 涡旋磁结构诱导与高频稳定性

传统软磁复合材料的高频磁导率下降, 主要源于畴壁共振。为实现 GHz 频段的超稳定磁导率, 需要从根本上改变材料的磁化机制。本系统处理的终极目标之一是诱导材料形成单涡旋磁结构。理论、模拟与实验(如洛伦兹透射电镜观察)表明, 当球形 FeSiAl 颗粒尺寸处于特定微米/亚微米范围时, 其最稳定的磁结构为单涡旋态, 该状态几乎消除了畴壁, 磁化过

程主要通过涡旋核的准一致转动完成, 从而将共振频率推至极高频段。系统设计的变频磁场与应力场, 可以在材料热处理(如冷却或退火)过程中, 通过影响原子有序化和内应力释放, 促进这种低能量、拓扑保护的涡旋磁结构的形成与稳定化, 这是实现材料在宽频带内阻抗(或磁导率)高度稳定的微观物理基础。

#### 3.3 缺陷消除与性能协同提升

系统处理亦能显著改善材料的机械性能与微观均质性, 间接促进电磁性能的稳定。例如, 在 ZL205A 合金铸造过程中施加行波磁场, 可有效破碎二次枝晶臂, 拓宽补缩通道, 将孔隙率从 1.71% 大幅降低至 0.22%, 同时使抗拉强度、伸长率和显微硬度得到显著提升。更致密、均质的微观结构减少了作为磁畴钉扎点的缺陷数量, 降低了磁滞损耗和矫顽力, 有利于获得更“软”的磁性能和更稳定的动态响应。因此, 本系统的阻抗稳定控制是宏观性能、微观组织与磁畴结构多重优化协同作用的结果。

### 4 实验方法与结果分析框架

为验证系统效能与上述机制, 可设计系列实验。选用 Fe 基或 Co 基非晶带材(如  $\text{Fe}_{64.8}\text{Co}_{7.2}\text{Nb}_4\text{Si}_{4.8}\text{B}_{19.2}$ )、纳米晶带材或模型合金铸件作为处理对象。

#### 4.1 实验设计

实施多组对照实验: A 组(仅热处理)、B 组(热处理+恒定磁场)、C 组(热处理+变频磁场)、D 组(热处理+应力)、E 组(热处理+变频磁场+应力)。系统性地改变关键变量: 磁场频率 ( $f$ : 50 Hz, 200 Hz, 1 kHz, 100 kHz)、电流强度 ( $I$ )、退火温度 ( $T_a$ )、外加应力 ( $\sigma$ ) 及保温时间。使用 X 射线衍射仪、透射电子显微镜分析处理后样品的相组成与微观结构; 利用振动样品磁强计测量静态磁性能(饱和磁化强度  $M_s$ , 矫顽力  $H_c$ ); 通过阻抗分析仪在宽频带(1 kHz-1 GHz)内测量样品的阻抗谱及巨磁阻抗效应曲线。

#### 4.2 预期结果分析

预期将观察到:

(1) 力学与微观组织: 经多场耦合处理(如 E 组)的样品, 其致密度、晶粒/枝晶细化程度应优于其他组, 力学性能(强度、韧性)同步提升。

(2) 磁性能优化: 在优化的多场参数下, 样品的矫顽力  $H_c$  显著降低, 磁滞回线呈现更“扁平的”线性特征。对于特定成分的软磁材料, 有望获得接近 2 A/m 的超低矫顽力。

(3) 阻抗稳定性控制: 多场耦合处理的样品, 其巨磁阻抗效应曲线可能呈现从单峰向穹顶状的规律性转变。更重要的是, 在更高频段(如百 MHz 至 GHz), 其有效磁导率或阻抗幅值的频率稳定性将显著优于传统处理样品, 表现出“超稳定”

特性。可通过分析阻抗实部与虚部随频率的变化曲线，以及磁导率频谱来量化这种稳定性。

表 2 不同处理条件下典型 Fe 基软磁材料预期性能对比\*

处理条件	矫顽力 H <sub>c</sub> (A/m)	最大磁阻 抗比 Δ Z/Z (%)	1MHz 下有效磁导率 μ <sub>eff</sub>	孔隙率/缺陷密度	主要磁结构特征
传统退火 (A 组)	~90	中等	较高, 但随频率下降快	较高	多畴, 存在畴壁
应力退火 (D 组)	~10-50	较高	有所改善	较低	横向磁畴, 各向异性明显
变频磁应力处理(E 组)	~2-30	高, 且峰形可控	高且频谱平坦	很低	趋向单涡旋或均匀转动

## 5 结论与展望

本研究设计并论证了一种基于变频磁应力技术的金属材料多场耦合调质处理系统。该系统通过集成变频磁场、精确应力加载与温度控制，能够实现对金属材料处理过程的精密编程与闭环调控。研究表明，利用该系统进行多场协同处理，不仅能通过细化组织、消除缺陷来提升材料的宏观力学性能，更能通过调控磁各向异性竞争和诱导稳定的涡旋磁结构等微观机制，实现对材料巨磁阻抗效应和高频电磁性能的主动设计与稳定化控制。

该技术的创新性在于将变频磁场的动态能量输入与静态应力场、温度场相结合，为开发兼具优异机械性能和高频电磁稳定性的下一代金属功能材料（如超低损耗纳米晶磁芯、高性能非晶传感器、高强韧电磁合金等）提供了强有力的工具。未来工作将聚焦于：1）建立更完善的多场耦合工艺参数与材料最终性能之间的定量预测模型；2）探索该系统在更多合金体系（如高熵合金、形状记忆合金）中的应用潜力；3）进一步开发基于人工智能的实时监测与自适应工艺优化系统，最终实现材料性能的“按需定制”。

## 参考文献:

- [1] 张建强,秦彦军,方峥,等.多场耦合 Fe 基合金巨磁阻抗效应调控机制[J].物理学报,2022,71(23):375-383.
- [2] 谢小华.脉冲磁场和机械振动作用下细化 K4169 高温合金晶粒的研究[D].江西:南昌航空大学,2014.
- [3] 陆轩昂,王卓,王丽梅,等.低温应力退火 Fe 基合金薄带巨磁阻抗特性的研究[J].功能材料,2020,51(3):3102-3107.
- [4] 姚可夫,施凌翔,陈双琴,等.铁基软磁非晶/纳米晶合金研究进展及应用前景[J].物理学报,2018,67(1):1-9.
- [5] 周健,孟利,杨富尧,等.非晶/纳米晶软磁合金的各向异性[J].智能电网,2016,4(4):367-373.
- [6] 成龙.永磁螺旋模式磁场作用下 Sn--3.5wt.%Pb 合金定向凝固过程的研究[D].中国科学院大学,2021.