

高频低损耗的 Fe/亚微米 FeNi 软磁复合材料

何思哲¹, 王俊舟¹, 张勇¹, 费嘉维¹, 吴爱民¹,
陈意峰², 李强², 周晟³, 黄昊¹

(1. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁省能源材料及器件重点实验室, 大连 116024; 2. 广东风华高新科技股份有限公司, 肇庆 526199; 3. 明新软磁科技(江苏)有限公司, 昆山 215300)

摘要: 高功率电力电子设备的应用对功率电感的高频电感性能和能量效率提出了更高的要求, 迫切需要开发高频低损耗的软磁材料。为降低软磁复合材料的涡流损耗, 获得高频低损耗、大功率的一体成型电感, 通过等离子体炬制备了高纯度亚微米 FeNi 颗粒, 并采用简化的有限元模型探讨了亚微米 FeNi 颗粒对软磁复合材料涡流损耗的影响。本工作制备了含不同质量分数亚微米 FeNi 颗粒的 Fe/亚微米 FeNi 软磁复合材料, 重点讨论了亚微米 FeNi 颗粒对软磁复合材料及一体成型电感性能的影响。结果表明: 与纯羰基铁粉制备的软磁复合材料相比, 当亚微米 FeNi 颗粒质量分数为 30% 时, 环形磁芯代表损耗的磁导率虚部 μ'' 由 1.57 降至 1.36, 降低了 13.4%; 一体成型电感在 10 MHz 条件下的品质因数 Q 由 13 升至 20, 提高了 53.8%, 并且自谐振频率提高了 12.7%, 饱和电流由 2.148 A 升至 2.352 A。通过提高材料内阻和减小涡流流动区域的尺寸, 亚微米 FeNi 颗粒能有效降低涡流损耗, 提高软磁复合材料的高频磁导率稳定性。复合亚微米 FeNi 颗粒有望低成本、大规模地获得高频低损耗、综合性能良好的一体成型电感。

关键词: 软磁复合材料; 一体成型电感; 亚微米 FeNi 颗粒; 涡流; 品质因数

中图分类号: TB333 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2024)08-0871-08

Fe/Submicron FeNi Soft Magnetic Composites with High Working Frequency and Low Loss

HE Sizhe¹, WANG Junzhou¹, ZHANG Yong¹, FEI Jiawei¹, WU Aimin¹,
CHEN Yifeng², LI Qiang², ZHOU Sheng³, HUANG Hao¹

(1. Key Laboratory of Energy Materials and Devices (Liaoning Province), School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Guangdong Fenghua Advanced Technology Holding Co., Ltd., Zhaoqing 526199, China; 3. Mingxin Soft Magnetic Technology (Jiangsu) Co., Ltd., Kunshan 215300, China)

Abstract: Application of high-power electronic equipment requires inductors with greater high-frequency performance and higher energy efficiency than ever, and thus it is urgent to develop new soft magnetic composites to meet these requirements. To reduce the eddy current loss of soft magnetic composites and obtain molded inductors with high working frequency, low loss and high power, high purity submicron FeNi particles were

收稿日期: 2023-12-29; 收到修改稿日期: 2024-03-20; 网络出版日期: 2024-03-30

基金项目: 新型电子元器件关键材料与工艺国家重点实验室开放基金(风华-2024-0064)

Open Fund of State Key Laboratory of Key Materials and Technologies for New Electronic Components (Fenghua-2024-0064)

作者简介: 何思哲(1999-), 男, 硕士研究生. E-mail: HSZ124@mail.dlut.edu.cn

HE Sizhe (1999-), male, Master candidate. E-mail: HSZ124@mail.dlut.edu.cn

通信作者: 黄昊, 教授. E-mail: huanghao@dlut.edu.cn

HUANG Hao, professor. E-mail: huanghao@dlut.edu.cn

prepared by plasma torch, and effect of these particles on eddy current loss of soft magnetic composites was examined by simplified finite element model. Soft magnetic composites and molded inductors were prepared by mixing carbonyl iron powder and submicron FeNi particles with different mass fractions. The influence of submicron FeNi particles on the properties of soft magnetic composites and molded inductors is analyzed emphatically. With 30% of mass fraction of submicron FeNi particles, the imaginary part of permeability (μ'') of the ring core decreases from 1.57 to 1.36 (reduced by 13.4%), compared with that of the soft magnetic composite made by only pure carbonyl iron powder. The quality factor Q of the molded inductors at 10 MHz increases from 13 to 20 (increased by 53.8%), while the self-resonance frequency increases by 12.7% and the saturation current increases from 2.148 A to 2.352 A. Submicron FeNi particles can effectively reduce eddy current loss and improve stability of the high frequency permeability of soft magnetic composites by increasing the internal resistance of materials and reducing the size of eddy current flow region. Therefore, this study demonstrates that compounding submicron FeNi particles is a promising method to obtain molded inductors with high frequency, low loss, and good comprehensive performance at low cost on a large scale.

Key words: soft magnetic composite; molded inductor; submicron FeNi particle; eddy current; quality factor

软磁复合材料(Soft Magnetic Composite, SMC), 又称磁粉芯, 是软磁粉体经绝缘包覆之后, 在高压下压制而成的复合材料, 由于其具有易于机械成型、高磁导率和低损耗等特性, 已成为功率电感元器件中的关键材料^[1-2]。从电力电子领域应用的角度来看, 第三代宽禁带半导体的发展推动着电力电子器件功率的提升, 这对电感元件提出了更高的要求。随着功率电感向着高频、大电流和小型化方向发展, 也要求 SMC 在高工作频率下服役时具有损耗低、直流偏置特性好等特点^[3-5]。SMC 可以根据不同的应用场景需求定制性能, 适合大规模制造, 更具工业化前景。因此, SMC 开始在工业上得到大量应用^[6]。当两种或两种以上的软磁粉体混合压制形成 SMC 时, 可以通过改变软磁粉体的种类和添加比例来控制 SMC 的电磁特性^[7-9]。近年来, SMC 中软磁粉体种类和配比的研究吸引了研究人员和电感生产厂商越来越多的关注。

对于 SMC 来说, 不仅需要考虑其磁导率是否符合一体成型电感感值的设计需求, 还需要关注复合材料对一体成型电感饱和电流、损耗、截止频率等方面的影响^[10-11]。目前, 将不同电磁性能的软磁粉体复配, 综合几种粉体的优点来获得综合性能更好的 SMC 是调整一体成型电感电磁性能的最常用手段^[7]。羰基铁粉是一体成型电感的常用原材料, 其具有高饱和磁化强度和易成型性, 且粒径通常为 2~5 μm , 这种小粒径能有效抑制 1 MHz 以下频率的颗粒内涡流损耗^[12]。随着电子元器件应用频率向 100 MHz 以上的高频方向发展, 羰基铁粉制作的 SMC 损耗随频率升高逐渐增大, 其高频性能有待进

一步提高^[13]。FeNi 合金具有高居里温度、高磁导率、良好的耐腐蚀性和优异的直流偏置性能。同时, FeNi 合金具备低磁致伸缩系数和接近于零的磁晶各向异性系数, 因此其矫顽力极低, 这使 FeNi 合金具有比电工纯铁更低的磁滞损耗^[14]。根据 SMC 涡流损耗的计算方法可知, 减小粒径将有效降低颗粒内的涡流损耗^[15-16]。但是, 随着颗粒粒径从微米尺度降低至纳米尺度, 颗粒比表面积增大, 颗粒表面氧化加剧, 缺陷和钉扎位点增多将导致软磁性颗粒的饱和磁化强度降低, 矫顽力升高, 软磁性能恶化^[17-18]。亚微米 FeNi 颗粒具有比微米级羰基铁粉更低的涡流损耗, 同时磁性能受颗粒表面缺陷影响更小。将亚微米 FeNi 颗粒与羰基铁粉复配有望获得高频低损耗, 综合性能优异的 SMC。

本工作采用等离子体炬制备了亚微米 FeNi 颗粒, 接着通过有限元法模拟了简化的 SMC 模型中材料种类及颗粒内的涡流分布, 定性分析了亚微米 FeNi 颗粒对 SMC 涡流损耗的影响。进一步地, 将羰基铁粉和不同质量分数的亚微米 FeNi 颗粒均匀混合, 对混合粉体进行绝缘包覆, 成功制备了 Fe/亚微米 FeNi 复合磁粉芯。最后将 Fe/亚微米 FeNi 复合材料压制成一體成型电感, 探究了亚微米 FeNi 颗粒添加量对一体成型电感感值、饱和电流、截止频率和品质因数等关键性能的影响。

1 实验方法

1.1 实验原料

羰基铁粉(Carbonyl Iron Powder, CIP)由巴斯夫

(中国)有限公司提供; 亚微米 FeNi 颗粒通过等离子体炬制备。 γ -氨丙基三乙氧基硅烷(APTES)及环氧树脂由上海麦克林生化科技有限公司提供。

1.2 软磁复合材料样品制备

本实验具体操作步骤如下: (1)将亚微米 FeNi 颗粒和羰基铁粉分别以 0 : 100、30 : 70、70 : 30 和 100 : 0 的质量比共同混合在乙醇中; (2)称取 500 g 混合粉体, 加入质量分数 0.6% 的 APTES 作为偶联剂, 超声 15 min, 用乙醇洗涤 3 次后在 100 °C 真空干燥; (3)将干燥后的粉体与含质量分数 3.0% 环氧树脂的丙酮混合, 连续搅拌直到丙酮完全挥发, 然后在 60 °C 真空干燥箱中干燥 1 h; (4)烘干后的粉料过孔径 74~180 μm 的筛网造粒, 将造粒后的复合材料放入液压机中, 压制为外径 14 mm、内径 8 mm、高 2 mm 的环形磁芯, 成型压力为 600 MPa, 将得到的环形磁芯置于真空干燥箱中以 180 °C 热处理 1 h; (5)不同比例的复合材料经过冷压、绕线、热压、热处理工艺后制成标称感值为 2.2 μH , 尺寸为 2.0 mm \times 1.6 mm \times 1.0 mm 的一体成型电感。

1.3 性能表征

1.3.1 磁粉的结构及性能表征

采用日本岛津公司的 XRD-6000X 型 X 射线衍射仪(X-ray Diffractometer, XRD)来分析软磁粉体的物相结构和结晶性, 扫描衍射角度 $2\theta=20^{\circ}\sim 90^{\circ}$, 扫描速率为 4 ($^{\circ}$) $\cdot\text{min}^{-1}$ 。采用日本电子公司的 JSM-7900F 型超高分辨率场发射扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)来观察粉末样品的形貌和粒径分布。在室温下, 采用 Lake Shore 7404 型振动样品磁强计(Vibrating Sample Magnetometer, VSM), 在 15 kOe 的外加磁场下测量软磁粉体的静态磁性。

1.3.2 软磁复合材料的结构及性能表征

采用安捷伦 E4991B 型射频阻抗分析仪, 在 1 MHz~1 GHz 范围内, 测量绕线环形磁芯及一体成型电感样品的品质因数 Q 、感值 L 。采用稳科 WK3260B 型精密阻抗分析仪测量直流偏置情况下一体成型电感的感值变化。根据阿基米德排水法, 测量复合磁粉芯的压实密度。

1.3.3 软磁复合材料有限元模拟

为研究颗粒粒径对 SMC 涡流损耗的影响, 模拟过程中考虑与磁化过程微观细节相关的磁滞和剩余损耗。根据环氧树脂中嵌入铁磁性颗粒的实际 SMC 微观结构, 建立近似为嵌入立方体介电畴中的球体铁磁夹杂物的周期性模型, 通过研究穿过球体球心的截面, 可将其视为二维模型^[19]。图 1 为模型

的示意图。模型包括直径 $D_1=5\text{ }\mu\text{m}$ 的 Fe 颗粒, 直径 $D_2=1\text{ }\mu\text{m}$ 的 FeNi 合金颗粒以及把颗粒相互隔绝的绝缘基体, 颗粒间距 $L_0=0.2\text{ }\mu\text{m}$ 。表 1 列出了材料的典型特征。为提高求解器的稳定性, 在对整体结果影响较小的情况下, 将绝缘基体的电导率人工设置为 0.1 $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ 。施加垂直于 SMC 模型的均匀时谐背景磁场, 根据实际软磁粉体处于线性磁导率阶段时对应的磁场, 将背景磁场设置为 $B_0=50\text{ mT}$, 假设磁导率为常数, 即 Fe 颗粒和 FeNi 颗粒中的饱和效应可忽略不计。

2 结果与讨论

2.1 软磁粉体的表征及性能分析

采用 XRD 详细研究了羰基铁粉和亚微米 FeNi 颗粒的结构, 羰基铁粉和亚微米 FeNi 颗粒的 XRD 谱图如图 2 所示。与 JCPDS 标准卡片相比, 在 $2\theta=44.7^{\circ}$ 、 65.1° 和 82.4° 处的特征衍射峰对应于 bcc 结构的 $\alpha\text{-Fe}$ (JCPDS No.06-0696)的(110), (200)和(211)晶面; 在 $2\theta=43.7^{\circ}$ 、 51.2° 和 74.8° 处的特征衍射峰对应于 fcc 结构的 $\gamma\text{-FeNi}$ (JCPDS No.47-1417)

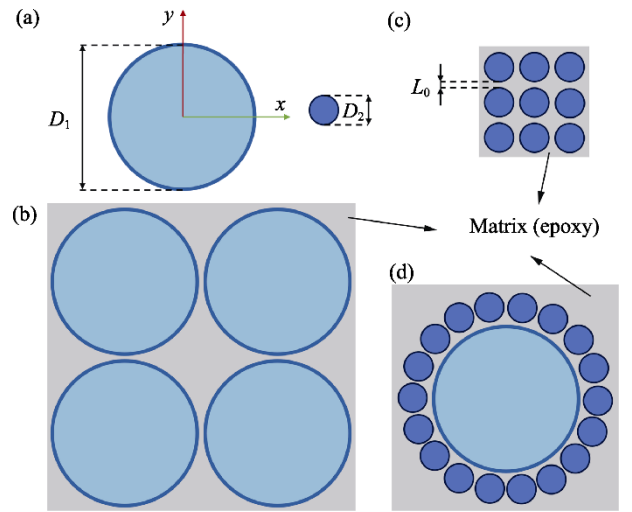


图 1 SMC 微观结构模型示意图
Fig. 1 Schematic diagram of microstructure model of SMC
(a) Geometric size of Fe and submicron FeNi particles; (b) SMC model of micron Fe powder; (c) SMC model of submicron FeNi particles; (d) SMC model after mixing Fe and submicron FeNi particles

表 1 SMC 模型的材料属性			
Table 1 Material properties of SMC model			
Material	Conductivity/ ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	Relative permeability	Relative permittivity
Iron	1.12×10^7	4000	1
FeNi alloy	1.70×10^6	8000	1
Matrix	0.1	1	9

的(222)、(400)和(440)晶面。亚微米 FeNi 颗粒的 XRD 谱图衍射峰峰形尖锐, 无杂峰, 说明结晶度良好, 没有杂相生成, 粉体的纯度高。

图 3 为羰基铁粉和亚微米 FeNi 颗粒的 SEM 照片。由于购买的羰基铁粉经过 SiO₂ 包覆, 所以表面较为粗糙(图 3(a))。直流电弧等离子体蒸发法制备的亚微米 FeNi 颗粒为球形, 表面光滑(图 3(b))。羰基铁粉及亚微米 FeNi 颗粒的详细粒径分布如表 2 所示。从粒径分布来看, 羰基铁粉的中值粒径(d_{50})为 3.7 μm , 亚微米 FeNi 颗粒的中值粒径为 668 nm。亚微米 FeNi 颗粒能与羰基铁粉很好地级配, 压制后其分布于羰基铁粉的间隙内, 提高了 SMC 的压实密度。

图 4 为羰基铁粉和亚微米 FeNi 颗粒的静态磁滞回线。羰基铁粉的饱和磁化强度为 $214.7 \text{ A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$, 矫顽力为 $658 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$, 具有良好的软磁特性。亚微米 FeNi 颗粒的饱和磁化强度为 $147.2 \text{ A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$, 矫顽

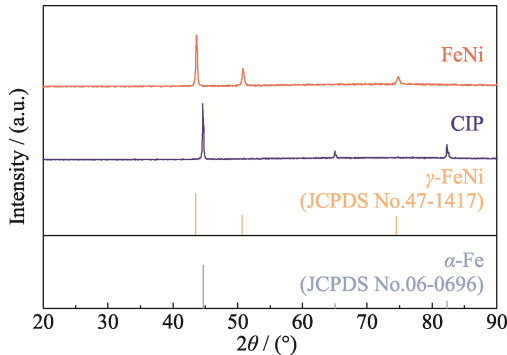


图 2 羰基铁粉(CIP)和亚微米 FeNi 颗粒的 XRD 谱图
Fig. 2 XRD patterns of carbonyl iron powder (CIP) and submicron FeNi particles

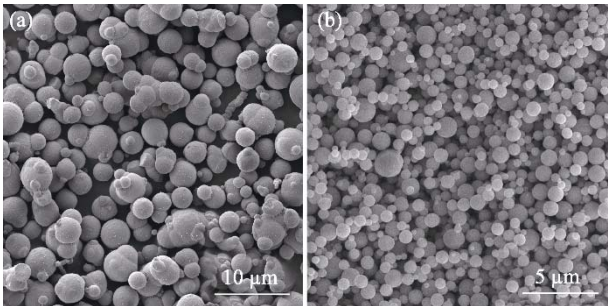


图 3 两种粉体的 SEM 照片
Fig. 3 SEM images of two powders
(a) CIP; (b) Submicron FeNi particles

表 2 羰基铁粉及亚微米 FeNi 粉体的粒径分布

Table 2 Particle size distributions of CIP and submicron FeNi particles				
Material	$d_{10}/\mu\text{m}$	$d_{50}/\mu\text{m}$	$d_{90}/\mu\text{m}$	$d_{\text{ave}}/\mu\text{m}$
Carbonyl iron powder	2.6	3.7	4.9	3.9
Submicron FeNi powder	0.390	0.668	0.980	0.645

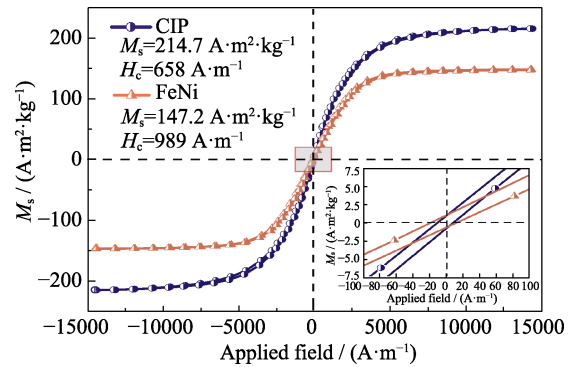


图 4 羰基铁粉和亚微米 FeNi 颗粒的静态磁滞曲线
Fig. 4 Hysteresis loops of CIP and submicron FeNi particles
Inset: enlarged view of the part within the orange box

力为 $989 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ 。亚微米 FeNi 颗粒的饱和磁化强度与 FeNi 合金块体的饱和磁化强度相当, 但由于 FeNi 颗粒的粒径在亚微米级别, 其表面存在大量的缺陷, 造成亚微米 FeNi 颗粒的矫顽力大于大粒径 FeNi 合金块体的矫顽力^[20]。

2.2 软磁复合材料的有限元模拟

本研究分别在 1 和 100 MHz 交变磁场下对微米级 Fe 粉 SMC 模型、亚微米 FeNi 颗粒 SMC 模型以及 Fe/亚微米 FeNi 颗粒复配 SMC 模型进行了有限元模拟。用平面电流分布及电流密度模的变化形象展示了不同频率、不同粒径铁磁体颗粒内的涡流变化情况。如图 5 所示, 由于 SMC 中铁磁性颗粒与绝缘基体之间的电导率差异巨大, 涡流仅在铁磁性颗粒内流动, 颗粒间无明显涡流。在 1 MHz 低频交变磁场下, 涡流沿颗粒半径由内至外线性增大。对于 100 MHz 高频交变磁场, 由于趋肤效应, 涡流只在铁磁颗粒表面层流动。高频时电流密度模更大, 实际材料的涡流损耗更大。从颗粒直径的角度来看, 当粒径减小时, FeNi 颗粒在交变磁场下产生的净电动势更小, 颗粒内产生的涡流被限制在更小的颗粒内, 表现为电流密度模更小。当把亚微米 FeNi 颗粒与微米级 Fe 颗粒混合制成 SMC 时, 涡流主要分布在更大粒径的 Fe 颗粒内部, 这说明涡流损耗主要产生于更大粒径颗粒的内部, 且由于 Fe 颗粒的磁导率受到趋肤效应的显著影响, 只有部分体积被有效利用。而亚微米 FeNi 颗粒由于涡流较小, 能在高频时保持更好的磁导率稳定性^[21]。因此, 将微米级羰基铁粉与亚微米 FeNi 颗粒共混, 获得的 SMC 损耗有望比纯羰基铁粉制作的更低。

2.3 软磁复合材料的表征及性能分析

图 6 为含不同质量分数亚微米 FeNi 颗粒 SMC 的横截面 SEM 照片。可以看出所有粉末在压制和热处理后仍保留均匀连续的树脂绝缘层, 绝缘层的厚

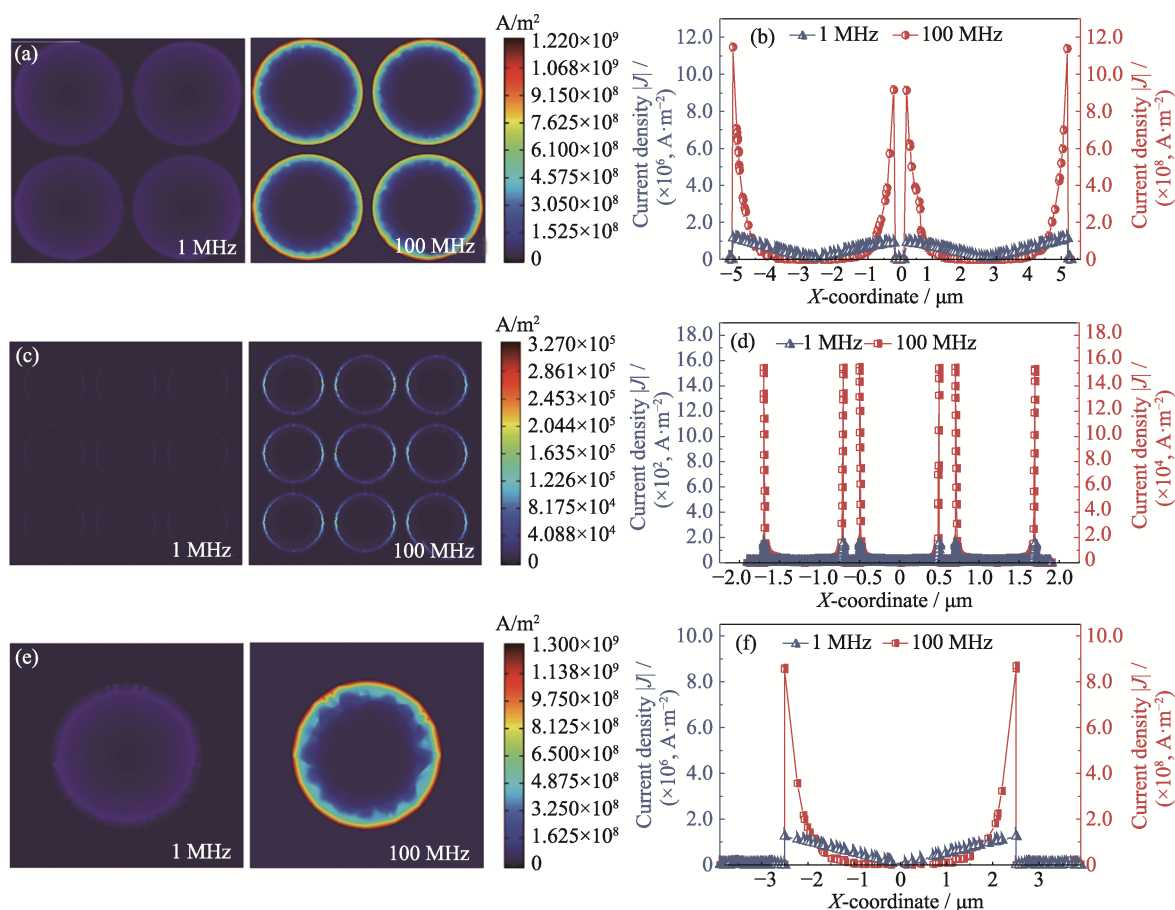


图 5 1 和 100 MHz 下 SMC 微结构中的涡流分布及电流密度模型

Fig. 5 Eddy current distribution and current density $|J|$ in SMC microstructure at 1 and 100 MHz
(a, b) SMC model of micron Fe powder; (c, d) SMC model of submicron FeNi particles; (e, f) SMC model after mixing Fe and submicron FeNi particles; Colorful figures are available on website

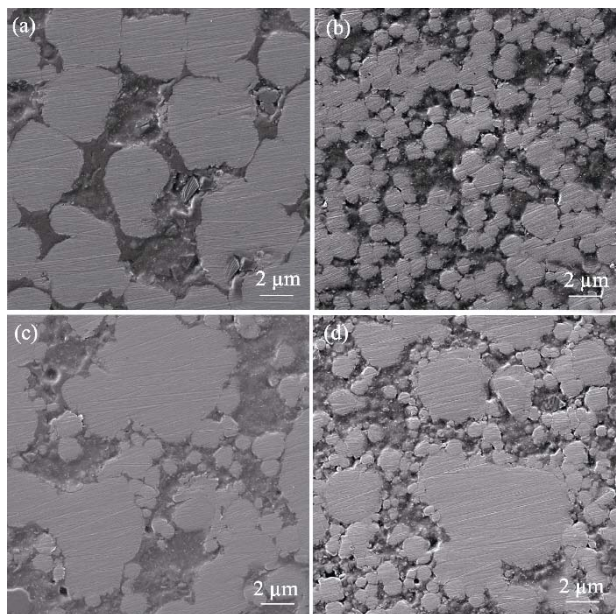


图 6 不同亚微米 FeNi 颗粒含量的 SMCs 的横截面 SEM 照片

Fig. 6 Cross-section SEM images of SMCs with different contents of submicron FeNi particles
(a) 0; (b) 100%; (c) 30% (in mass); (d) 70% (in mass)

度在几十纳米至几微米之间。从图 6(c, d)中可以看出, 亚微米 FeNi 颗粒均匀分布在微米级羰基铁粉之间的孔隙中, 随着亚微米 FeNi 颗粒的质量分数增加, 羰基铁粉之间的间距增大, 羰基铁粉相互接触的面积减小, 颗粒间的导电面积减小, 这有助于提高 SMC 的电阻率。

亚微米 FeNi 颗粒含量对 SMC 压实密度的影响如图 7 所示。Fe/亚微米 FeNi 软磁复合材料的压实密度随着亚微米 FeNi 颗粒含量的增大先升高后下降, 当仅为亚微米 FeNi 颗粒时, SMC 的压实密度下降至与纯羰基铁粉制作的磁芯相当。当加入质量分数 30%亚微米 FeNi 颗粒时, 复合磁芯的压实密度 (6.797 g/cm^3) 比羰基铁粉磁芯 (6.560 g/cm^3) 高 3.6%, 这主要是由于亚微米 FeNi 颗粒填充到羰基铁粉之间的孔隙中, 降低了 Fe/亚微米 FeNi 软磁复合材料的孔隙率, 从而增加了压实密度。当全部为羰基铁粉或亚微米 FeNi 颗粒时, 颗粒之间没有良好的粒径级配, 因此二者的孔隙率相当, 压实密度相近。

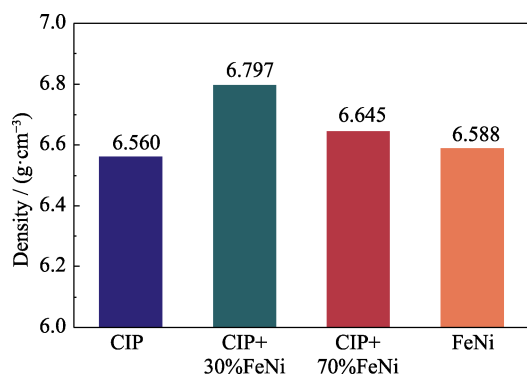


图 7 不同亚微米 FeNi 颗粒含量的 SMCs 的压实密度

Fig. 7 Compaction density of SMCs with different contents of FeNi submicron particles

交变磁场下复合材料复数磁导率随频率的变化如图 8 所示。从图 8(a)中可见, 亚微米 FeNi 颗粒的磁导率明显低于羰基铁粉。这是因为与大颗粒相比, 小颗粒复合材料中的缺陷和钉扎点数量更多, 随着颗粒粒径减小, 颗粒内的可活动畴壁数量减少^[22]。在 1~10 MHz 的频率范围内, 所有样品都具有良好的磁导率-频率稳定性, 这说明磁性粉体颗粒内及颗粒间产生的涡流较小, 该频率范围内涡流产生的反向磁场无法明显削弱施加的磁场, 因此磁导率实部无明显降低。磁导率虚部 μ'' 代表了磁性材料在外磁场磁化作用下的损耗, 不同质量分数亚微米 FeNi 颗粒 SMC 的磁导率虚部随频率的变化如图 8(b) 所示。粒径越小, 样品的损耗越低。低频时 4 种样品的损耗相近, 随着交变磁场频率增大, 羰基铁粉的损耗明显增大, 而加入的亚微米 FeNi 颗粒抑制了损耗增大的趋势。电感中总铁芯损耗是磁滞损耗、涡流损耗和剩余损耗之和, 涡流损耗 P_e 表示为 $P_e = CB^2 f^2 d^2 / \rho$, 其中 C 是比例常数, B 是磁通密度, f 是交变磁场的频率, ρ 是颗粒的电阻率, d 是颗粒尺寸^[23-24]。涡流损耗是磁性器件在高频服役时需

要关注的重点。粒径越小, 复合材料的体电阻率越大, 颗粒间的涡流损耗越低。同时, 根据有限元模拟的结果, 粒径越小, 磁性颗粒内的电流密度越小, 高频时亚微米颗粒内的涡流损耗较微米级颗粒更小。将亚微米 FeNi 颗粒与微米级羰基铁粉复配能有效降低 SMC 在高频时的涡流损耗。

为对比亚微米 FeNi 颗粒添加量对一体成型电感性能的影响, 将含不同质量分数亚微米 FeNi 颗粒的 SMC 制成 2016102R2 型一体成型电感, 其中 201610 表明一体成型电感的尺寸大小为 2.0 mm×1.6 mm×1.0 mm, 2R2 指该型号一体成型电感的标称感值为 2.2 μH 。图 9(a, b)为该型号一体成型电感的截面照片。

直流偏置特性是一体成型电感使用过程中的一项重要性能, 不同亚微米 FeNi 颗粒添加量的一体成型电感的直流偏置性能如图 9(c)所示。随着施加的直流电流增大, 直流偏置场增加, 电感逐渐饱和, 所有样品的感值均呈现非线性的下降趋势。直流偏置性能与有效磁导率 μ_{eff} 的变化呈负相关^[9,25], 因此纯羰基铁粉制作的一体成型电感感值随直流电流增大下降最为明显。随着亚微米 FeNi 颗粒含量增大, 相应电感的感值下降速率呈降低趋势, 纯亚微米 FeNi 颗粒制成的电感拥有最佳的直流偏置性能。饱和电流 I_{sat} 指在电感中流过引起电感感值下降到特定值的直流电流^[26], 本工作规定为电感感值下降 20%时的电流。电感的饱和电流大小与感值大小呈负相关^[27], 不同亚微米 FeNi 颗粒添加量的一体成型电感的饱和电流如图 9(d)所示。随着亚微米 FeNi 颗粒含量增大, 电感感值虽有所降低, 但电感的饱和电流逐渐上升。添加质量分数 30%亚微米 FeNi 颗粒的一体成型电感在满足感值要求的情况下, 饱和电流较羰基铁粉制作的电感提高了 9.5%。

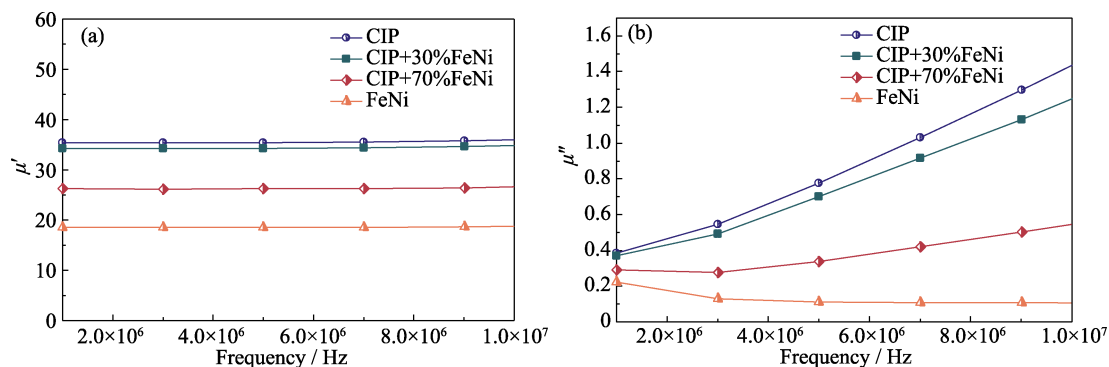


图 8 不同亚微米 FeNi 颗粒含量的 SMCs 的复数磁导率

Fig. 8 Complex permeability of SMCs with different contents of submicron FeNi particles

(a) Real part of permeability, μ' ; (b) Imaginary part of permeability, μ''

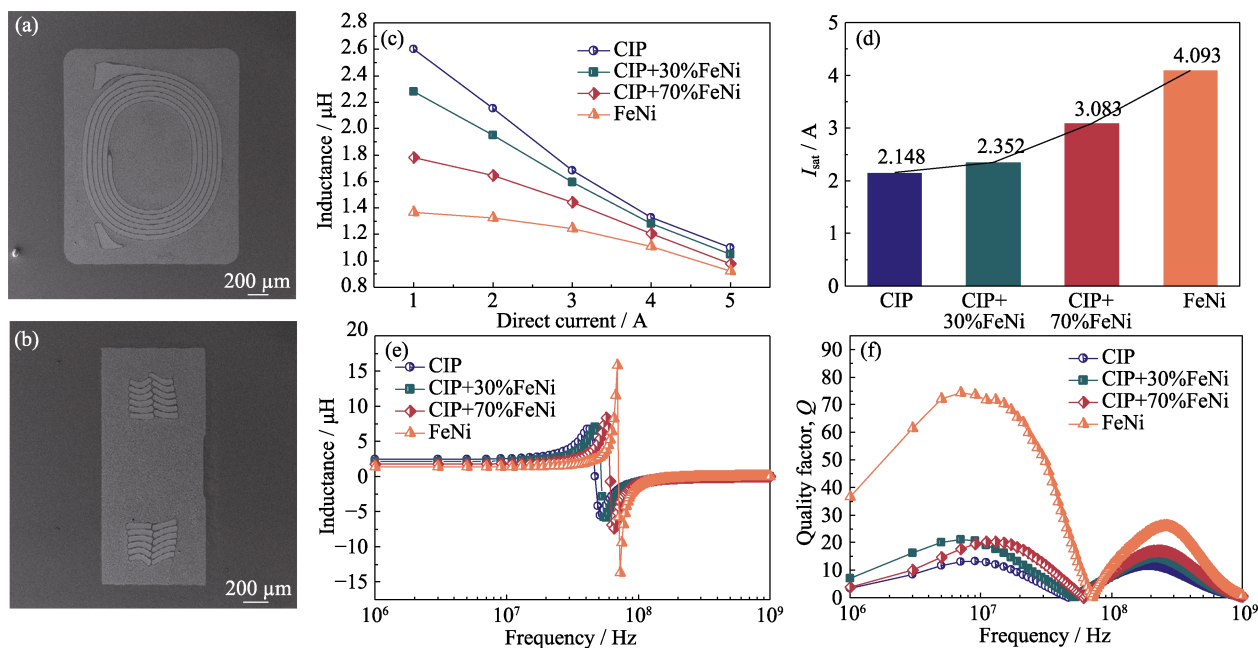


图 9 一体成型电感的结构及性能

Fig. 9 Structure and performance of molded inductor

(a, b) Cross-sectional views of molded inductor; (c) Direct current bias performance; (d) Saturation current; (e) Inductance-frequency curves and (f) quality factor-frequency curves of molded inductors with different contents of submicron FeNi particles

图 9(e) 为一体化成型电感在 1 MHz~1 GHz 范围内的感值-频率曲线。从图 9(e) 中可以看到, 相同线圈匝数和磁芯面积下, 电感感值的变化规律同复合材料有效磁导率的变化规律一致, 即电感感值随着亚微米 FeNi 颗粒含量增加而降低。纯羰基铁粉制作的电感和含质量分数 30% 亚微米 FeNi 颗粒的电感在 1 MHz 时的感值分别为 2.49 和 2.24 μH , 这种复合材料制作的一体成型电感完全满足设计的感值标准。值得注意的是随着亚微米 FeNi 颗粒含量增大, 复合材料中的涡流更小, 同一频率下趋肤效应对磁性材料磁导率的影响更小, 一体成型电感感值峰值对应的频率, 即截止频率向高频移动^[28]。这表明加入亚微米 FeNi 颗粒提高了一体成型电感的有效工作频率。

图 9(f) 为一体化成型电感的品质因数-频率曲线。品质因数 Q 是衡量电感器件在特定频率下能量储存能力与能量损耗的重要参数, 定义为电感在某一频率的交变电流下工作时, 电感所呈现的感抗和电感直流电阻的比值^[29]。 Q 值代表在使用过程中电感储存能量与消耗能量的比值, Q 值越高, 其工作时能量损耗越少, 效率越高。通过对比 4 个样品的品质因数-频率曲线可以看出, 在不同频率下, 羰基铁粉制成的电感 Q 值最低, 大部分能量以发热的形式耗散, 亚微米 FeNi 颗粒的加入使电感的 Q 值明显升高, 纯亚微米 FeNi 颗粒制成的电感 Q 值最高。电感 Q 值升高说明加入亚微米 FeNi 颗粒降低了电感工作时的

总功率损耗。FeNi 合金中的 Ni 元素提高了材料电阻率, 而涡流损耗与材料电阻率成反比, 因此加入亚微米 FeNi 颗粒降低了 SMC 在高频下的颗粒间涡流损耗; 另一方面, 当磁性颗粒的粒径降至亚微米级别时, 颗粒内的涡流将小于微米级颗粒, 因此涡流损耗降低^[28, 30-31]。 Q 值为零的点对应的频率为电感的自谐振频率, 功率电感的工作频率通常小于自谐振频率, 图中可以看到随着亚微米 FeNi 颗粒含量增大, 电感自谐振频率增大, 含质量分数 30% 亚微米 FeNi 颗粒的电感的自谐振频率为 5.3×10^7 Hz, 较纯羰基铁粉电感的自谐振频率 (4.7×10^7 Hz) 提高了 12.7%。

3 结论

1) 有限元模拟结果显示亚微米 FeNi 颗粒能有效降低 SMC 中的涡流, 从而有利于 SMC 降低损耗, 保持高频磁导率稳定。

2) 在羰基铁粉中复配亚微米 FeNi 颗粒能有效降低损耗。在 10 MHz 的交变磁场下, 含质量分数 30% 亚微米 FeNi 颗粒的 SMC 与纯羰基铁粉制成的 SMC 相比, μ'' 降低了 13.4%, 一体成型电感的 Q 值提高了 53.8%。

3) 亚微米 FeNi 颗粒通过抑制粒内及粒间涡流提高了一体成型电感的截止频率。较纯羰基铁粉制作的电感, 添加质量分数 30% 亚微米 FeNi 颗粒的一体成型电感在满足感值要求的情况下, 其自谐振频率

从 4.7×10^7 Hz 升至 5.3×10^7 Hz, 提高了 12.7%。

4) 羰基铁粉复配质量分数 30% 的亚微米 FeNi 颗粒制成的一体成型电感的饱和电流从 2.148 A 增大至 2.352 A, 提升了 9.4%, 加入亚微米 FeNi 颗粒提高了 SMC 的直流偏置性能。

结果表明, 将亚微米 FeNi 颗粒与微米级羰基铁粉复配不仅能降低损耗, 还可以进一步提高压实密度、直流偏置、截止频率, 是简单、低成本实现器件高频低损耗, 提高综合性能的有效方法。本工作为 Fe/亚微米 FeNi 软磁复合材料在一體成型电感中的工业化应用提供了有针对性的建议。

参考文献:

- [1] SHOKROLLAHI H, JANGHORBAN K. Soft magnetic composite materials (SMCs). *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, **189**(1/2/3): 1.
- [2] PÉRIGO E A, WEIDENFELLER B, KOLLÁR P, *et al.* Past, present, and future of soft magnetic composites. *Applied Physics Reviews*, 2018, **5**(3): 031301.
- [3] SILVEYRA J M, FERRARA E, HUBER D L, *et al.* Soft magnetic materials for a sustainable and electrified world. *Science*, 2018, **362**(6413): eaao0195.
- [4] LEARY A M, OHODNICKI P R, MCHENRY M E. Soft magnetic materials in high-frequency, high-power conversion applications. *JOM*, 2012, **64**(7): 772.
- [5] 吴深, 李杰超, 管英杰, 等. 软磁复合材料制备工艺的研究进展. *电子元件与材料*, 2022, **41**(3): 221.
- [6] ZHAO R L, HUANG J J, YANG Y, *et al.* The influence of FeNi nanoparticles on the microstructures and soft magnetic properties of FeSi soft magnetic composites. *Advanced Powder Technology*, 2022, **33**(8): 103663.
- [7] LIU J Q, DONG Y N, WANG P, *et al.* Improved high-frequency magnetic properties of FeSiBCCr amorphous soft magnetic composites by adding carbonyl iron powders. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2023, **605**: 122166.
- [8] 池强, 谢磊, 常良, 等. 羰基铁粉/FeSiBCCr 复合非晶磁粉芯的性能. *材料导报*, 2021, **35**(10): 10023.
- [9] ZHANG Y, CHI Q, CHANG L, *et al.* Novel Fe-based amorphous compound powder cores with enhanced DC bias performance by adding FeCo alloy powder. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, **507**: 166840.
- [10] 汪洋. 大功率新型一体成型电感器设计及应用前景分析. *电子元件与信息技术*, 2020, **4**(1): 1.
- [11] 黄家毅, 唐建伟, 龚志良, 等. 大功率金属粉芯模压电感设计与验证. *电子元件与信息技术*, 2022, **6**(11): 43.
- [12] SUGIMURA K, MIYAJIMA Y, SONEHARA M, *et al.* Formation of high electrical-resistivity thin surface layer on carbonyl-iron powder (CIP) and thermal stability of nanocrystalline structure and vortex magnetic structure of CIP. *AIP Advances*, 2016, **6**(5): 055932.
- [13] JIN X W, LI T, JIA Z L, *et al.* Over 100 MHz cut-off frequency mechanism of Fe-Si soft magnetic composites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, **556**: 169366.
- [14] YIN L F, WEI D H, LEI N, *et al.* Magnetocrystalline anisotropy in permalloy revisited. *Physical Review Letters*, 2006, **97**(6): 067203.
- [15] ZHANG H, WANG K, HUANG Y D, *et al.* The excess loss analysis of an easy-plane FeSiAl@SiO₂ soft magnetic composite with high permeability. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2023, **588**: 171471.
- [16] KOLLÁR P, BIRČÁKOVÁ Z, FÜZER J, *et al.* Power loss separation in Fe-based composite materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2013, **327**: 146.
- [17] GANGOPADHYAY S, HADJIPANAYIS G C, DALE B, *et al.* Magnetic properties of ultrafine iron particles. *Physical Review B*, 1992, **45**(17): 9778.
- [18] LIU D H, LIU X, WANG J, *et al.* The influence of Fe nanoparticles on microstructure and magnetic properties of Fe-6.5wt%Si soft magnetic composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, **835**: 155215.
- [19] REN X T, CORCOLLE R, DANIEL L. A 2D finite element study on the role of material properties on eddy current losses in soft magnetic composites. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2016, **73**(2): 20902.
- [20] KIM E S, HAFTLANG F, AHN S Y, *et al.* Effects of processing parameters and heat treatment on the microstructure and magnetic properties of the *in-situ* synthesized Fe-Ni permalloy produced using direct energy deposition. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, **907**: 164415.
- [21] WU L Z, DING J, JIANG H B, *et al.* High frequency complex permeability of iron particles in a nonmagnetic matrix. *Journal of Applied Physics*, 2006, **99**(8): 83905.
- [22] ANHALT M. Systematic investigation of particle size dependence of magnetic properties in soft magnetic composites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008, **320**(14): e366.
- [23] BERTOTTI G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1988, **24**(1): 621.
- [24] WANG J H, SONG S Q, SUN H B, *et al.* Insulation layer design for soft magnetic composites by synthetically comparing their magnetic properties and coating process parameters. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, **519**: 167496.
- [25] HUAN L, TANG X L, SU H, *et al.* Effects of SnO₂ on DC-bias superposition characteristic of the low-temperature-fired NiCuZn ferrites. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014, **50**(11): 2006104.
- [26] 龚志良, 黄家毅, 舒恺, 等. 各类高频电感电气参数及其电路应用的论述和探讨. *电子元件与信息技术*, 2022, **6**(8): 69.
- [27] HE J, YUAN H, NIE M, *et al.* Soft magnetic materials for power inductors: state of art and future development. *Materials Today Electronics*, 2023, **6**: 100066.
- [28] LI T, WANG Y, SHI H G, *et al.* Impact of skin effect on permeability of permalloy films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, **545**: 168750.
- [29] BARTOLI M, REATTI A, KAZIMIERCZUK M K. Modelling Iron-powder Inductors at High Frequencies. Denver: Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1994.
- [30] HUANG Y D, ZHANG H, SHANG R X, *et al.* Improved magnetic properties in amorphous FeSiBCr soft magnetic composites with easy-plane anisotropy for high-frequency applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2023, **56**(6): 065004.
- [31] HSU Y, FONTANA R, WILLIAMS M, *et al.* High frequency high field permeability of patterned Ni₈₀Fe₂₀ and Ni₄₅Fe₅₅ thin films. *Journal of Applied Physics*, 2001, **89**(11): 6808.