

硅铝酸钠包覆剂对FeNi复合磁粉芯性能的影响

鲍康馨, 王 力, 孙 旗, 蹇汉杰, 鲁书潮, 赵利明, 冒爱琴, 郑翠红

Effect of sodium silicaluminate on the properties of FeNi composite magnetic core

BAO Kangxin, WANG Li, SUN Qi, JIAN Hanjie, LU Shuchao, ZHAO Liming, MAO Aiqin, and ZHENG Cuihong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2024060015>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低损耗磁粉芯制备技术及应用

Preparation technology and application of low loss magnetic powder cores

粉末冶金技术. 2024, 42(5): 510-515

热处理对Fe6.5%Si磁粉芯性能的影响

Influence of heat treatment on performance of Fe6.5%Si magnetic powder core

粉末冶金技术. 2024, 42(2): 177-183

水雾化制备FeSiCr软磁粉末磁性能研究

Study on magnetic properties of FeSiCr soft magnetic powders prepared by water atomization

粉末冶金技术. 2021, 39(4): 345-349

硼含量对镓掺杂烧结钕铁硼微观结构及磁性能的影响

Effect of boron content on the microstructure and magnetic properties of Ga-doped sintered NdFeB magnets

粉末冶金技术. 2022, 40(3): 204-210

气水组合雾化制备不同粒径FeSiBCrC非晶合金粉末及性能研究

Preparation and properties of FeSiBCrC amorphous alloy powders by air-water combination atomization with different particle sizes

粉末冶金技术. 2024, 42(6): 638-644

磷、碳质量分数对粉末冶金高锰无磁钢组织与性能的影响

Effect of phosphorus and carbon mass fractions on microstructure and properties of PM high manganese non-magnetic steels

粉末冶金技术. 2024, 42(5): 464-470



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

硅铝酸钠包覆剂对 FeNi 复合磁粉芯性能的影响

鲍康馨¹⁾, 王 力¹⁾, 孙 旗¹⁾, 蹇汉杰¹⁾, 鲁书潮¹⁾, 赵利明²⁾,
冒爱琴¹⁾, 郑翠红¹⁾✉

1) 安徽工业大学材料科学与工程学院, 马鞍山 243002 2) 马鞍山新康达磁业股份有限公司, 马鞍山 243002

✉通信作者, E-mail: zhch@ahut.edu.cn

摘 要 由气雾化法制得的 Fe-50%Ni 磁粉 (FeNi, 质量分数) 经磷化处理, 采用硅铝酸钠溶胶对其表面进行包覆, 最终通过压制成形和氮气热处理得到金属复合磁粉芯, 研究了包覆剂对 FeNi 复合磁粉芯性能的影响。结果表明, FeNi 磁粉表面形成了均匀的硅铝酸钠纳米颗粒绝缘包覆层, 随着硅铝酸钠添加量的增加, 复合磁粉芯的密度和有效磁导率逐渐降低。适量添加硅铝酸钠能够显著降低磁粉芯功率损耗。当硅铝酸钠质量分数为 0.5% 时, 复合磁粉芯的有效磁导率达到最大值 (122.4), 在 100 Oe 直流磁化磁场下直流叠加特性为 49.3%, 在 50 kHz 和 100 mT 测试条件下, 其功率损耗为 $168.2 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。与使用硅树脂包覆剂相比, 采用硅铝酸钠凝胶包覆制得的复合磁粉芯展现出更好的磁导率频率稳定性, 并且功率损耗得以降低。

关键词 软磁材料; FeNi; 复合磁粉芯; 磁性能; 磁损耗

分类号 TM271.2; TF125

Effect of sodium silicaluminate on the properties of FeNi composite magnetic core

BAO Kangxin¹⁾, WANG Li¹⁾, SUN Qi¹⁾, JIAN Hanjie¹⁾, LU Shuchao¹⁾, ZHAO Liming²⁾,
MAO Aiqin¹⁾, ZHENG Cuihong¹⁾✉

1) School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China

2) Ma'anshan New Conda Magnetic Industrial Co., Ltd., Ma'anshan 243002, China

✉Corresponding author, E-mail: zhch@ahut.edu.cn

ABSTRACT The Fe-50%Ni magnetic powders (FeNi, mass fraction) derived from gas atomization first underwent the phosphatizing process, then were coated with the sodium aluminosilicate sol. Eventually, the metal composite magnetic cores were prepared through compacting process and nitrogen heat treatment by using the surface modified magnetic powders. The effect of coating agents on the properties of FeNi composite magnetic cores was studied. The results show that a uniform insulating coating layer of sodium silicaluminate nanoparticles is formed on the surface of FeNi magnetic powders, and the density and effective permeability of the composite magnetic powder cores decrease gradually with the increase of sodium silicaluminate addition. Proper addition of sodium silicaluminate can significantly reduce the power loss of magnetic cores. When the mass fraction of sodium silicaluminate is 0.5%, the effective permeability of the composite magnetic cores reaches the maximum value (122.4), and the DC superposition characteristic is 49.3% under the 100 Oe DC magnetization field. The power loss is $168.2 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-3}$ under the test conditions of 50 kHz and 100 mT.

收稿日期: 2024-06-20

DOI: 10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2024060015; <https://pmt.ustb.edu.cn>

Compared with the silicone coating agent, the composite magnetic cores coated with sodium aluminate silicate gel show the better permeability frequency stability, and the power loss is reduced.

KEY WORDS soft magnetic materials; FeNi; composite magnetic cores; magnetic properties; magnetic loss

软磁磁粉芯 (soft magnetic powder cores, SMPCs) 具备低损耗和高磁感应强度的优异特性, 对外加磁场变化的响应十分迅速, 是一种极为理想的合金材料。与传统磁性材料 (如硅钢片和铁氧体材料) 相比, 软磁磁粉芯展现出独特的三维磁性, 具有较高的电阻率和磁导率, 同时保持较低的损耗, 这些优势使其在传感器、通讯设备、电子设备等领域得到广泛应用^[1-3]。

在软磁磁粉芯中, Fe-50%Ni (FeNi, 质量分数) 磁粉芯因具有磁导率高、饱和磁通密度大、应用频率宽、直流叠加性能高等特点, 也被称为 High flux 磁粉芯, 主要被应用于高功率、高直流偏置或高频交流器件的制造, 如开关调节电感器、噪音滤波器等^[4]。由于铁镍材料较软, 磁粉在成形过程中极易变形, 导致绝缘层破损, 从而使功率损耗急剧上升。为确保磁粉成形过程中绝缘层不受损坏, 可以增加绝缘包覆剂的厚度, 但这会引起铁镍磁粉芯磁导率下降, 因此, 为了提高磁粉芯磁导率, 业界通常采用大粒径铁镍磁粉, 通过降低颗粒比表面积来减少绝缘剂的添加量^[5]。然而, 随着颗粒尺寸增大, 金属磁粉芯功率损耗也随之增加。目前, 市场上铁镍磁粉芯 (磁导率约为 125) 功率损耗大于 $200 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-3}$ (测试条件: 50 kHz、100 mT)。

为了进一步降低高磁导率磁粉芯功率损耗, 本文选用磷化处理工艺和硅铝酸钠包覆工艺对铁镍磁粉进行处理, 制备低损耗的 FeNi 复合磁粉芯, 研究硅铝酸钠溶胶包覆层对 FeNi 复合磁粉芯磁性能的影响。磷酸盐绝缘层具有耐高温、绝缘性好、厚度薄等特点^[6-8], 可以提高磁粉芯的磁导率, 降低复合磁粉芯功率损耗。但若仅使用磷酸对磁粉进行包覆, 在压制成形过程中, 由于 FeNi 磁粉颗粒变形大, 导致磷酸盐包覆层破损, 磁粉直接接触导电, 磁粉芯涡流损耗急剧增大, 出现磁粉芯“烧穿”现象。在磷酸盐包覆层表面再包覆一定的硅铝酸钠溶胶, 形成均匀的多层纳米颗粒绝缘层, 具有电阻率高、粘结性强和可塑性好的特点。在绝缘磁粉成形过程中, 多层硅铝酸钠纳米颗粒可以包裹 FeNi 磁粉因形变产生的新表面, 保护绝缘层的完整性, 消除单层磷酸盐绝缘层在压制成形中易破损的缺点,

减少绝缘剂的添加量, 显著降低功率损耗。

1 实验材料及方法

1.1 实验原料

实验原料包括 FeNi 磁粉 (马鞍山新康达磁业有限公司), 磷酸二氢铝 (上海瑞楚生物科技有限公司) 和硬脂酸锌 (天津金汇太亚化学试剂有限公司); 硅铝酸钠溶胶为自制。

1.2 样品制备

将 FeNi 磁粉与质量分数为 0.6% 的磷酸二氢铝溶液均匀混合, 80 °C 下机械搅拌干燥, 得到磷化后磁粉 (记为 P@FeNi); 将硅铝酸钠溶胶按磁粉质量的 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0% 分别与 P@FeNi 磁粉混合均匀, 在 80 °C 下机械搅拌干燥, 得到磁粉样品编号依次为: “SP1@FeNi”、“SP2@FeNi”、“SP3@FeNi”和“SP4@FeNi”; 将上述磁粉与脱模剂硬脂酸钠混合, 在常温下压制 270 型环状磁粉芯, 压力为 2090 MPa, 成品内外径分别为 14.7 mm、26.9 mm, 高度为 11.1 mm; 压制成形后的样品, 在氮气气氛下热处理 1 h, 处理温度为 680 °C。

1.3 材料表征

使用数显卡尺测量压制后磁粉芯的高度。利用 SYB216 型 B-H 功率分析仪测量不同频率下成品磁粉芯的功率损耗, 测试频率为 10~150 kHz, 磁场强度为 100 mT。在磁粉芯样品上缠绕铜线圈, 使用 Microtest 63770 型 LCR 电桥在 500 mV 条件下测定磁粉芯在不同频率 (1~1000 kHz) 下的电感值 (L)、品质因素 (Q) 以及不同外加直流磁化磁场条件 (20~200 Oe) 下的直流叠加特性, 并利用测得的电感值计算得到磁粉芯的有效磁导率 (μ_e)。通过 LS 13320 型激光衍射粒度分析仪分析原始磁粉的粒度分布。采用 NANO SEM430 型场发射扫描电子显微镜 (field emission scanning electron microscopy, FESEM) 观察磁粉微观形貌, 同时用配套的能谱仪 (energy disperse spectroscopy, EDS) 进行包覆磁粉的元素分析。使用赛默飞世尔 D8ADVANCE 型 X 射线衍射仪 (X-ray diffraction, XRD) 分析样品的物相组成, 扫描范围为 $10^\circ \sim 80^\circ$ 。利用 Micro Sense 公司的 EZ7 型振动样

品磁强计 (VSM) 测量磁粉芯在磁场强度为 $-20000 \sim 20000$ Oe 条件下的磁滞回线。通过赛默飞世尔公司的 ARLAdvant'X Intellipower™ 3600 型扫描型 X-射线荧光光谱仪测试包覆后粉末的成分及含量。

2 结果与分析

2.1 原料 FeNi 磁粉的粒径分析

原料 FeNi 磁粉经 200 目筛分后粒径小于 $74 \mu\text{m}$, 其粒径分布如图 1 所示。由图 1 可见, FeNi 磁粉的 D_{50} 为 $38.41 \mu\text{m}$, 粗颗粒粒径 (D_{90}) 为 $67.9 \mu\text{m}$, 粒径分布曲线呈正态分布。

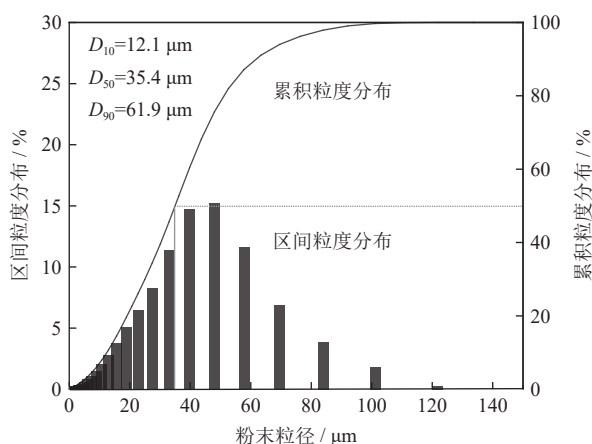


图 1 FeNi 磁粉粒度分布

Fig.1 Particle size distribution of the FeNi powders

2.2 绝缘包覆工艺处理前后 FeNi 磁粉的物相组成

图 2 为绝缘包覆前后的 FeNi 磁粉 X 射线衍射图谱, 显示了 FeNi 磁粉原料、磷化后 FeNi 磁粉 (P@FeNi) 和硅铝酸钠溶胶包覆磷化磁粉 (SP1@FeNi 和 SP4@FeNi) 的物相组成。如图所示, FeNi、 P@FeNi 、 SP1@FeNi 和 SP4@FeNi 在 43.78° 、 50.98° 、 74.90° 存在明显的晶化峰, 晶面指数分别为 (111)、(200)、(220), 为 FeNi 合金的特征峰。 P@FeNi 磁粉出现 FeNi 特征峰, 这是因为颗

粒表面形成的磷化层较薄, 通过 X 射线难以检测^[9]。 SP1@FeNi 磁粉只出现 FeNi 的特征峰, 而 SP4@FeNi 磁粉在 $10^\circ \sim 25^\circ$ 有微弱的峰出现, 说明 FeNi 磁粉表面的硅铝酸钠粒子尺寸小, 硅铝酸钠衍射信号被背底所覆盖^[10]。表 1 为 SP4@FeNi 样品成分。可以看出, 经过磷化和硅铝酸钠复合包覆之后, FeNi 磁粉表面成功生成磷酸盐钝化层以及硅铝酸钠纳米颗粒。

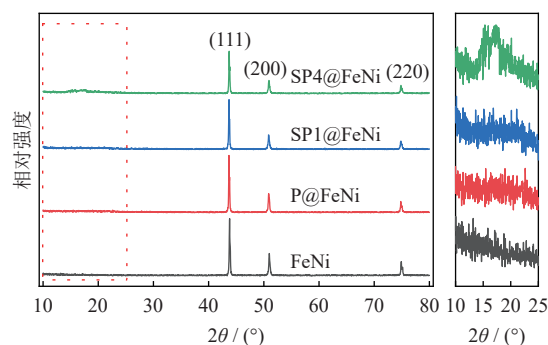


图 2 绝缘包覆前后 FeNi 磁粉 X 射线衍射图谱

Fig.2 X-ray diffraction patterns of the FeNi powders before and after insulation coating

表 1 SP4@FeNi 样品成分 (质量分数)

Table 1 Composition of the SP4@FeNi samples						%
Fe_2O_3	NiO	SiO_2	Na_2O	Al_2O_3	P_2O_5	
46.63	36.53	7.68	4.28	3.11	1.77	

2.3 绝缘包覆工艺对磁粉微观形貌的影响

图 3 显示了绝缘包覆前后 FeNi 磁粉显微形貌。如图 3 (a) 所示, 原料 FeNi 磁粉颗粒为球状, 球体表面较为光滑。经过磷化处理以后, 图 3 (b) 中颗粒表面包覆一层磷化薄膜, 颗粒表面出现少量磷酸盐结晶聚集物, 颗粒与颗粒之间出现粘连现象, 说明经过磷化处理后, 铁镍磁粉包覆一层致密的磷化层。图 3 (c) 显示硅铝酸钠溶胶包覆后, 颗粒表面较为粗糙, 通过区域放大图可见颗粒表面被连续纳米粒子包覆, 说明经过硅铝酸钠包覆以后, 在

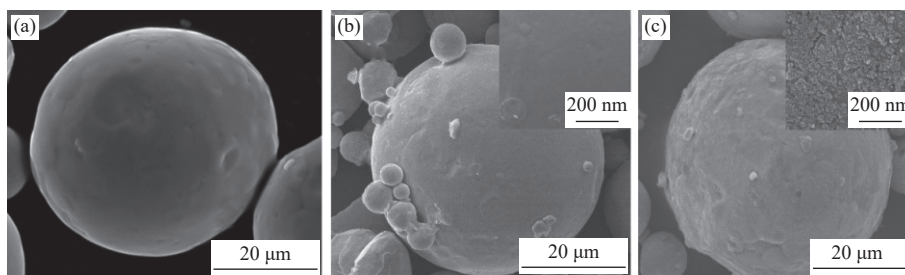


图 3 绝缘前后 FeNi 磁粉显微形貌: (a) FeNi; (b) P@FeNi ; (c) SP4@FeNi

Fig.3 SEM images of the FeNi powders before and after insulations: (a) FeNi; (b) P@FeNi ; (c) SP4@FeNi

颗粒表面形成连续且致密的纳米涂层, 增大了金属磁粉芯的电阻率, 保护内层磷化绝缘层。

图 4 为包覆后磁粉元素分布图。如图所示, 磁

粉表面均匀分布了 Fe、Ni、Si、Al、Na 和 P 元素, 说明颗粒表面形成了均匀的磷酸盐绝缘层和均匀硅铝酸钠包覆层。

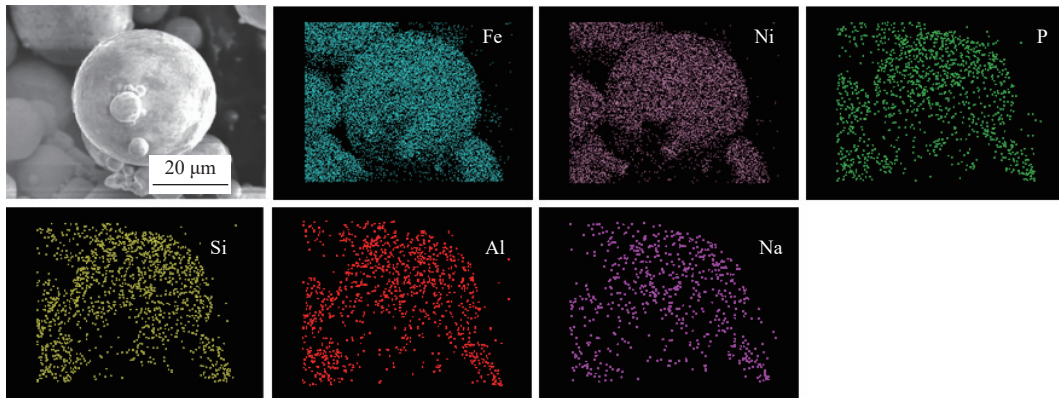


图 4 包覆后 SP4@FeNi 磁粉元素分布图

Fig.4 EDS analysis of the phosphating SP4@FeNi powders coated with sodium silicaluminate

2.4 绝缘包覆工艺对金属磁粉芯磁滞回线的影响

图 5 为添加不同质量分数硅铝酸钠后铁镍磁粉芯的磁滞回线和矫顽力 (H_c)。由图 5 (a) 可以看出, 硅铝酸钠质量分数从 0.5% 增加到 2.0% 时, 绝缘磁粉的饱和磁化强度呈现持续降低的趋势, 在 15000 Oe 的测试磁场下, 磁粉的饱和磁化强度从 $151.8 \text{ emu} \cdot \text{g}^{-1}$ 降低至 $143.2 \text{ emu} \cdot \text{g}^{-1}$, 说明添加的非磁性物质硅铝酸钠降低单位质量的饱和磁化强度。由图 5 (b) 可以看出, 样品的矫顽力随着硅铝酸钠含量增加先增加后减少, 当硅铝酸钠质量分数为 0.5% 时, 其矫顽力最小, 磁滞损耗也应该小。

2.5 绝缘包覆工艺对金属磁粉芯磁性能的影响

图 6 (a) 为磁粉芯有效磁导率 (μ) 与频率 (f) 的关系曲线。由图可见, 磁粉芯在频率 $< 1000 \text{ kHz}$ 稳定较好, 频率在 $10 \text{ kHz} \sim 1000 \text{ kHz}$, 有效磁导率

衰减幅度小于 4.8%, 这表明即使在高频下, 磁粉芯内的涡流仍得到了有效抑制, 磁粉芯的涡流损耗也会因此而降低^[11]。磁粉芯磁导率可用式 (1) 表示^[12]。

$$\mu = \frac{3 + (\mu' - 1)(3 - 3\varphi)}{3 + \varphi(\mu' - 1)} \quad (1)$$

式中: μ' 为复合磁导率实部, 和样品的饱和磁化强度 (M_s) 呈正相关; φ 为磁粉芯中非磁性物质的体积分数。由式 (1) 可知, 想要提高磁粉芯的有效磁导率, 有以下两种方式: 一方面增大复合磁导率实部, 这可以通过提高磁粉的饱和磁化强度达成, 低饱和磁化强度的绝缘剂含量降低能够导致磁粉芯平均饱和磁化强度的提高; 另一方面, 减小磁粉芯中非磁性物质的体积分数, 也就是将磁粉芯中非磁性物质含量降低, 这样既能保证单位体积内磁性物质

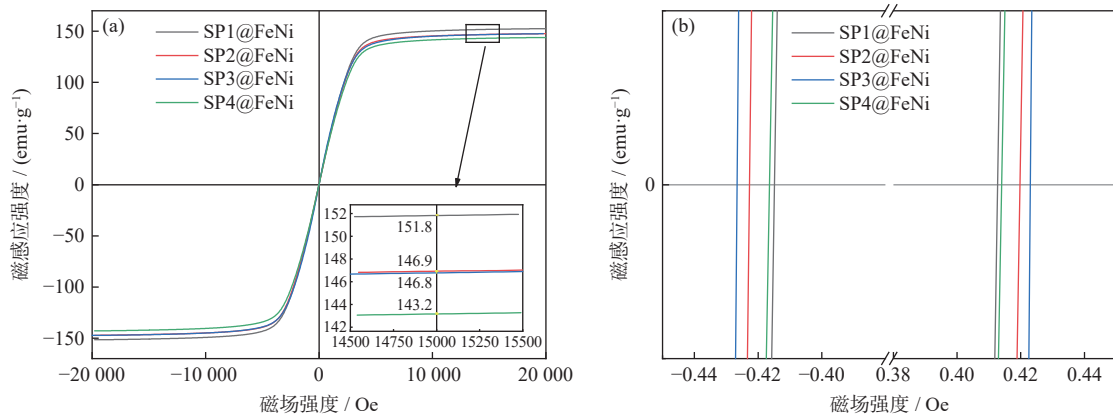


图 5 FeNi 磁粉芯静磁性能: (a) 磁滞回线; (b) 矫顽力

Fig.5 Static magnetic properties of the FeNi magnetic powders: (a) hysteresis loop; (b) coercivity

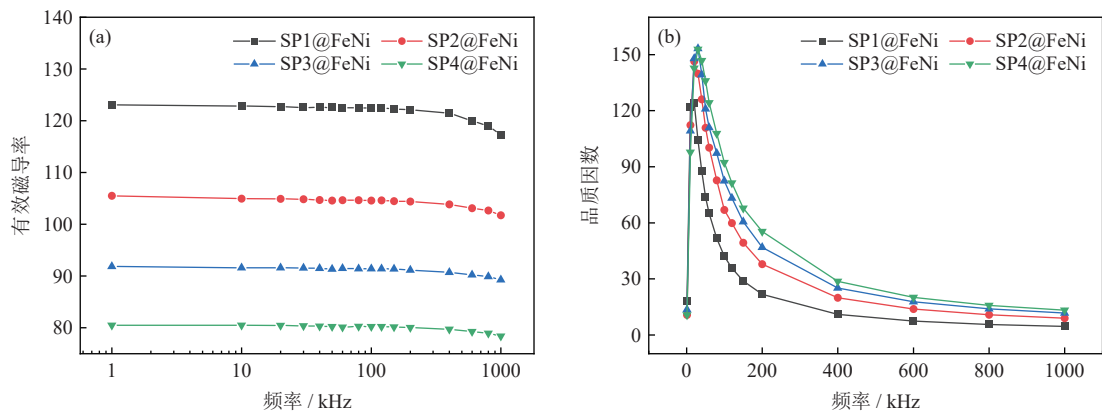


图 6 FeNi 复合磁粉芯的磁学性能: (a) 有效磁导率; (b) 品质因素

Fig.6 Magnetic properties of the FeNi composite magnetic cores: (a) permeability; (b) mass factor

含量，又能减少磁粉芯内部的气隙，降低孔隙率，从而提高磁粉芯的有效磁导率。随着硅铝酸钠添加量的增加，复合磁粉芯的有效磁导率不断降低，从硅铝酸钠质量分数为 0.5% 时的 122.4 减少至 2.0% 的 80.2，磁粉芯密度也从 $7.58\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 下降至 $7.48\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，如表 2 所示。当磁粉芯中非磁性物质体积分数较小时，其内部气隙也少，使得在磁化过程中磁畴壁的运动受到的阻力较小，有效退磁场小，同时磁粉芯的密度会较高，其有效磁导率也较高。

表 2 FeNi 复合磁粉芯密度

Table 2 Density of the FeNi composite magnetic powder cores		
样品	硅铝酸钠质量分数 / %	密度, $\rho / (\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
SP1@ FeNi	0.5	7.58
SP2@FeNi	1.0	7.55
SP3@FeNi	1.5	7.49
SP4@FeNi	2.0	7.48

利用品质因数 (Q) 综合衡量金属磁粉芯的性能，如式 (2) 所示^[13]。

$$Q = \frac{\pi f \mu_0 H^2 \mu}{P_{cv}} \quad (2)$$

式中: μ_0 为真空磁导率, μ 为磁粉芯的有效磁导率, f 为测试频率, H 为测量磁场, P_{cv} 为磁粉芯的功率损耗。由式 (2) 可知, 在磁场不变的情况下, 品质因数与测试频率、有效磁导率呈正相关, 与功率损耗的关系则相反, 随着频率的不断加, 功率损耗中涡流损耗逐渐占据主导地位, 在高频下也可以认为品质因数与磁粉芯涡流损耗成反比^[14]。图 6 (b) 为复合磁粉芯品质因数与频率的关系。从图中可以看出, 磁粉芯的品质因数随频率的增加先上升后下降, 由于测定磁场和磁粉芯的有效磁导

率基本不变, 在低频下, 磁粉芯的功率损耗很低, 增加幅度较小, 对品质因数影响较小, 此时随着频率的增加而增大; 在高频下, 由于涡流损耗与频率的平方成正相关, 高频下功率损耗的增加速率远快于频率, 此时品质因数又随频率的增加而下降。

为了衡量磁粉芯抵抗外部磁场变化的能力, 对磁粉芯的直流叠加性能进行了测试, 直流叠加特性与磁粉芯磁化到饱和的时间呈正相关^[15]。图 7 为不同硅铝酸钠添加量的复合磁粉芯的直流叠加特性 (磁导率分数, 即在 100 kHz 下, 对磁粉芯施加一定量的电流, 得到施加电流前后的电感, 将前后电感通过式 (1) 转换为磁导率, 将通过电流后的磁导率除以通电流前的磁导率得到的比值) 和外加磁场强度之间的关系。由图 7 可知, 复合磁粉芯的直流叠加特性随外加磁场强度的增大而逐渐减小, 当外加磁场为 100 Oe 时, SP1@FeNi 样品的直流叠加特性为 49.3%。复合磁粉芯主要成分为金属磁粉、

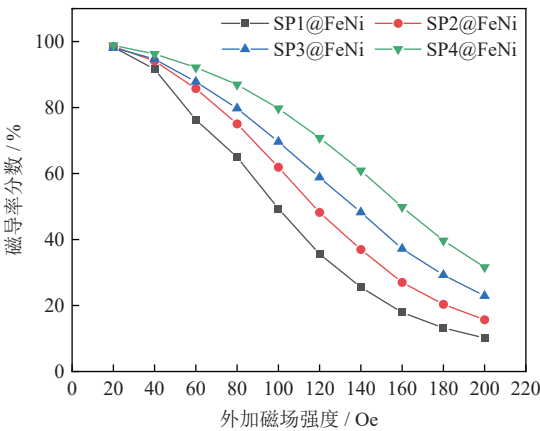


图 7 FeNi 复合磁粉芯的直流叠加特性和外加磁场强度关系
Fig.7 DC bias of the FeNi magnetic powder cores with the magnetization field strength

非磁性的包覆剂以及磁粉间的孔隙, 硅铝酸钠添加量减少, 非磁相含量下降, 削弱阻碍磁畴转动和畴壁位移的钉扎作用, 导致 SP1@FeNi 磁粉芯磁化到饱和的速率加快。

图 8 为绝缘后 FeNi 磁粉芯随频率变化的功率损耗 (P_{cv})。从图中可以看出, 随着偏铝酸钠包覆量的增加, 功率损耗逐渐增大, 在 50 kHz 频率下从 $168.2 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-3}$ 增加到 $184.9 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。磁粉芯功率损耗可分为磁滞损耗 (P_h)、涡流损耗 (P_e) 以及剩余损耗 (P_r)。磁滞损耗为磁性材料在磁化过程中因为磁滞现象而产生的损耗, 与材料的矫顽力有很大关系, 其数值与材料磁滞回线的面积相等; 涡流损耗则是由于磁化过程中在磁粉芯内部产生的涡流引发的损耗; 剩余损耗与磁化弛豫效应有关, 主要来自于铁磁共振, 在低频下, 剩余损耗可以忽略不计。因此, 磁粉芯功率损耗可以表示为式 (3) [16-17]。

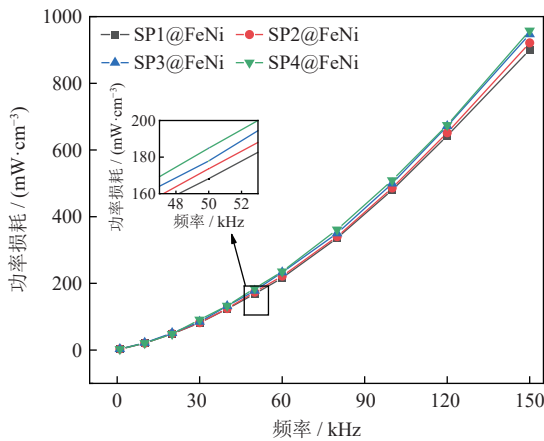
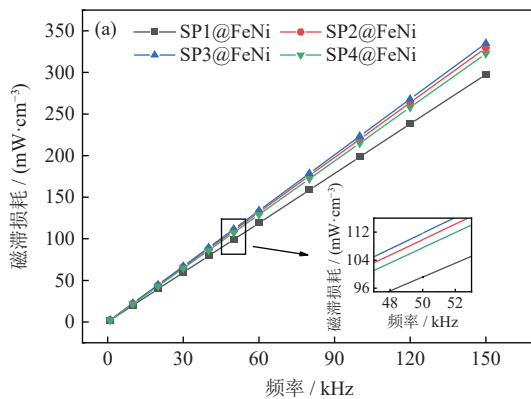


图 8 FeNi 复合磁粉芯的功率损耗

Fig.8 Power loss of the FeNi composite magnetic cores



$$P_{cv} = P_h + P_e = k_h B^2 d^2 f + \frac{k_e B d^2}{\rho} f^2 \quad (3)$$

式中: f 为测试频率, k_h 为 P_h 系数, k_e 为 P_e 系数, d 为磁粉的平均直径, ρ 为磁粉的电阻率, B 为磁通密度。由式 (3) 可知, 磁滞损耗与测试频率成正比, 而涡流损耗与测试频率的平方成正比, 随着频率的增加, 涡流损耗会急剧增加, 逐渐占据功率损耗的主导地位, 而磁滞损耗的占比会逐渐降低。

根据式 (3) 对不同硅铝酸钠添加量的磁粉芯的功率损耗进行分离, 分离结果如图 9。由图 9 可看出, 随着硅铝酸钠质量分数的增加, 磁粉芯的磁滞损耗先增大后减小, 这与图 5 (b) 中矫顽力的变化规律一致, 而涡流损耗变化则不明显。由式 (3) 可知, 磁滞损耗主要与磁通密度、频率和相互绝缘的颗粒尺寸有关。在相同频率下, 样品的磁通密度基本相同, 而绝缘剂添加量增加表明颗粒表面绝缘膜厚度更厚, 导致其矫顽力增加 (图 5), 磁滞损耗也增加 [18]。涡流损耗随硅铝酸钠添加量增加呈现先减小后增大的变化趋势, 但变化幅度小。硅铝酸钠溶胶在干燥和热处理后会在表面形成无机纳米颗粒绝缘层, 增大了磁粉芯的电阻率, 降低涡流损耗, 但是随着硅铝酸钠质量分数从 1.0% 增加到 2.0%, 碱性的硅铝酸钠溶胶会腐蚀内部酸性绝缘层, 对绝缘层的完整性有消极作用, 导致涡流损耗增加。

图 10 对比了采用不同包覆剂制备的金属复合磁粉芯性能, 其中 SP4@FeNi 采用硅铝酸钠溶胶作为包覆剂, SG@FeNi 采用硅树脂作为包覆剂。由图 10 (a) 可见, 采用硅树脂包覆的复合磁粉芯出现颗粒粘黏、二次造粒现象, 这是由硅树脂作为有机高分子聚合物, 可以将小颗粒聚合在大颗粒表面。

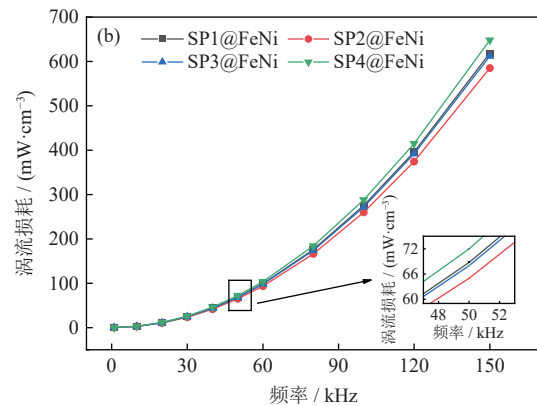


图 9 FeNi 复合磁粉芯磁滞损耗 (a) 和涡流损耗 (b)

Fig.9 Hysteresis loss (a) and eddy current loss (b) of the FeNi composite magnetic cores

此外采用硅树脂包覆的复合磁粉芯有效磁导率小于采用硅铝酸钠溶胶包覆的磁粉芯, 一方面硅树脂的体积密度小于硅铝酸钠, 另一方面硅树脂包覆后通过二次造粒, 形成更大尺寸的颗粒, 这会导致磁粉芯内出现大量孔隙, 而磁性物质占比下降, 导致复合磁粉芯的密度减小。SG@FeNi 复合磁粉芯有效磁导率的频率稳定性较差, 在高频下降明显。与此同时, SG@FeNi 复合磁粉芯功率损耗增加, 这是

由于硅树脂经过热处理后会在表面形成碳层, 这会导致外层绝缘膜电阻率下降, 复合磁粉芯涡流损耗和功率损耗增加。在低磁场强度下, 两种磁粉芯直流叠加性能无明显差别, 但当磁场强度大于 140 Oe, SG@FeNi 复合磁粉芯直流叠加特性小于 SG@FeNi。可能是因为硅树脂作为包覆粘结剂的复合磁粉芯密度下降, 饱和磁化强度随之减小, 导致复合磁粉芯由磁化到饱和的速率加快, 直流叠加性能下降。

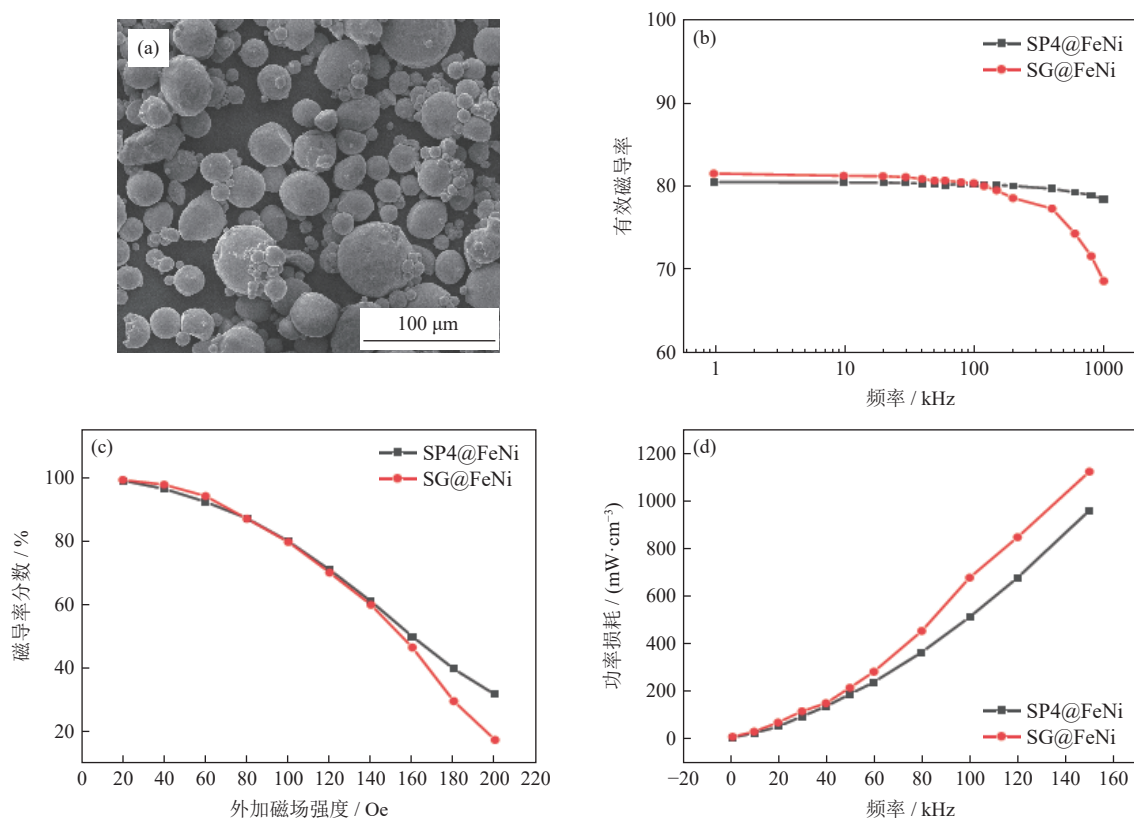


图 10 SG@FeNi 和 SP4@FeNi 金属复合磁粉芯性能: (a) SG@FeNi 显微形貌; (b) 有效磁导率; (c) 直流叠加特性; (d) 功率损耗

Fig.10 Properties of SG@FeNi and SP4@FeNi composite magnetic cores: (a) SEM image of SG@FeNi; (b) effective permeability; (c) DC bias; (d) power loss

综上所述, 与硅树脂包覆剂相比, 硅铝酸钠溶胶作为磁粉包覆剂, 复合磁粉芯磁导率频率稳定性高, 品质因素和直流叠加特性高, 功率损耗降低。

3 结论

(1) 磷化处理后磁粉表面具有非晶绝缘层, 经过硅铝酸钠绝缘处理后, 磁粉表面被多层纳米粒子包覆, 硅铝酸钠纳米粒子分布均匀。

(2) 随着硅铝酸钠质量分数的增加, 复合磁粉芯的有效磁导率和密度不断降低, 功率损耗不断上升。当添加硅铝酸钠质量分数为 0.5% 时, 复合

磁粉芯综合磁性能最佳。在 100 kHz 测试频率下, 有效磁导率最大, 为 122.4; 在 100 Oe 直流磁化磁场下, 直流叠加特性为 49.3%; 在 50 kHz 和 100 mT 测试条件下, 功率损耗最低, 为 168.2 mW·cm⁻³。

(3) 与有机硅树脂包覆相比, 使用无机的硅铝酸钠溶胶进行包覆, 磁粉芯有效磁导率频率稳定性和直流叠加特性百分比提高, 功率损耗降低。

参考文献

- [1] Lü S Y, Kuang C J, Wang L, et al. Preparation and properties of Fe-Si-B-Cr-C amorphous alloy powders by air-water combination

- atomization with different particle sizes. *Powder Metall Technol*, 2024, 42(6): 638
(吕世雅, 况春江, 王磊, 等. 气水组合雾化制备不同粒径 Fe-Si-B-Cr-C 非晶合金粉末及性能研究. 粉末冶金技术, 2024, 42(6): 638)
- [2] Wang R, Huang H, Li K, et al. Design and evolution of Fe-Si-Al soft magnetic composites doped with carbonyl iron powders: Overcoming the restrictive relation between permeability and core loss. *Ceram Int*, 2024, 50(10): 17861
- [3] Qiu Y, He Y H, Wang Y F, et al. Influence of heat treatment on performance of Fe-6.5%Si magnetic powder core. *Powder Metall Technol*, 2024, 42(2): 177
(邱玥, 贺弋海, 王义富, 等. 热处理对 Fe-6.5%Si 磁粉芯性能的影响. 粉末冶金技术, 2024, 42(2): 177)
- [4] Zhang G, Shi G, Yuan W, et al. Magnetic properties of iron-based soft magnetic composites prepared via phytic acid surface treatment. *Ceram Int*, 2021, 47(7): 8795
- [5] Wang Y N, Jiang Z B, Ji J, et al. *Preparation Method of Iron-Based Amorphous Magnetic Powder Cores with Ultra-High Magnetic Permeability*: China Patent, CN103730224B. 2016-07-06
(王亚娜, 江志滨, 纪杰, 等. 具有超高磁导率的铁基非晶磁粉芯的制备方法: 中国专利, CN103730224B. 2016-07-06)
- [6] Lu H, Dong Y Q, Liu X C, et al. Enhanced magnetic properties of FeSiAl soft magnetic composites prepared by utilizing phosphate: PSA as insulating layer. *J Mater Sci Mater Electron*, 2022, 33(13): 10131
- [7] Xie D Z, Lin K H, Lin S T. Effects of processed parameters on the magnetic performance of a powder magnetic core. *J Magn Magn Mater*, 2014, 353: 34
- [8] Lin K, Xiong Y D, Yan M, et al. Investigation of coating process of Fe-Si-Al powder core. *Rare Met Mater Eng*, 2014, 43(5): 1262
(林坤, 熊亚东, 严密, 等. 铁硅铝磁粉芯的绝缘包覆研究. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(5): 1262)
- [9] Hsiang H I, Fan L F, Hung J J. Phosphoric acid addition effect on the microstructure and magnetic properties of iron-based soft magnetic composites. *J Magn Magn Mater*, 2018, 447(2): 1
- [10] Chen D, Li K, Yu H, et al. Effects of secondary particle size distribution on the magnetic properties of carbonyl iron powder cores. *J Magn Magn Mater*, 2020, 497: 166062
- [11] Xu T T, Zhang B W, Guan W W, et al. The influence of fine powder on the magnetic properties of aerosolized iron silicon aluminum soft magnetic powder cores. *J Funct Mater*, 2020, 51(9): 9098
(徐涛涛, 张博玮, 关婉婉, 等. 细粉对气雾化铁硅铝软磁粉芯性能的影响. 功能材料, 2020, 51(9): 9098)
- [12] Liu D H, Liu X, Wang J. The influence of Fe nanoparticles on microstructure and magnetic properties of Fe-6.5wt%Si soft magnetic composites. *J Alloys Compd*, 2020, 835: 1
- [13] Lu C W, Lu Z C, Sun K, et al. Magnetic properties of amorphous $\text{Fe}_{74}\text{Al}_4\text{Sn}_2\text{P}_{10}\text{C}_2\text{B}_4\text{Si}_4$ powder prepared by water atomization and powder core made from it. *J Phys*, 2006(5): 2553
(陆曹卫, 卢志超, 孙克, 等. 水雾化制备 $\text{Fe}_{74}\text{Al}_4\text{Sn}_2\text{P}_{10}\text{C}_2\text{B}_4\text{Si}_4$ 非晶合金粉末及其磁粉芯性能研究. 物理学报, 2006(5): 2553)
- [14] Feng D. *A Dictionary of Solid State Physics*. Beijing: Higher Education Press, 1995
(冯端. 固体物理学大辞典. 北京: 高等教育出版社, 1995)
- [15] Xia C, Peng Y D, Yi X W, et al. Improved magnetic properties of FeSiCr amorphous soft magnetic composites by adding carbonyl iron powder. *J Non-Cryst Solids*, 2021, 559: 120673
- [16] Gu M Y, Zheng W, Li Z Z, et al. Effect of annealing process on magnetic properties of $\text{Fe}_{80}\text{Co}_3\text{Si}_3\text{B}_{10}\text{P}_1\text{C}_3$ amorphous alloy magnetic cores. *J Mater Sci Mater Electron*, 2023, 34(18): 1396
- [17] Zhu S J, Duan F, Feng S J, et al. Highly efficient inorganic-coated FeSiAl/biotite soft magnetic composites. *J Mater Res Technol*, 2022, 21: 3617
- [18] Liu Y P, Shi K, Shi K M, et al. Soft magnetic powder core and sintered soft magnetic materials: the structure, property, characteristic and applications. *J Magn Mater Dev*, 2022, 53(4): 112
(刘亚丕, 石康, 石凯鸣, 等. 软磁磁粉芯和烧结软磁材料: 结构, 性能, 特点和应用. 磁性材料及器件, 2022, 53(4): 112)