



引用格式:吴深,李杰超,王晓威,等.高频低损耗软磁复合材料的研究进展[J].轻工学报,2020,35(5):61-70.

中图分类号:TB383.1;TM271.2 文献标识码:A

DOI:10.12187/2020.05.009

文章编号:2096-1553(2020)05-0061-10

# 高频低损耗软磁复合材料的研究进展

## Development of high-frequency low-loss soft magnetic composites

吴深<sup>1</sup>,李杰超<sup>1</sup>,王晓威<sup>2</sup>,刘建秀<sup>1</sup>,肖艳秋<sup>1</sup>,王辉<sup>1</sup>,高红霞<sup>1</sup>  
WU Shen<sup>1</sup>,LI Jiechao<sup>1</sup>,WANG Xiaowei<sup>2</sup>,LIU Jianxiu<sup>1</sup>,XIAO Yanqiu<sup>1</sup>,  
WANG Hui<sup>1</sup>,GAO Hongxia<sup>1</sup>

1. 郑州轻工业大学 机电工程学院,河南 郑州 450002;

2. 河南坤华同盛建设工程有限公司,河南 南阳 473000

1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

2. He'nan Kunhua Tongsheng Construction Engineering Co., Ltd., Nanyang 473000, China

### 关键词:

软磁复合材料;绝缘包覆;磁损耗;磁性基体;新型制备技术

### Key words:

soft magnetic composites; insulation coating; magnetic loss; magnetic substrate; new preparation technology

**摘要:**从软磁复合材料的磁性基体设计、绝缘包覆处理和新型制备技术3个方面对软磁复合材料的研究现状进行综述,得出:磁性基体设计时通过对不同特性的磁粉进行性能互补或对基体形态进行控制都可以有效地提高软磁复合材料的密度和磁导率;经绝缘包覆处理可以提高软磁复合材料的电阻率,从而降低其涡流损耗,但是非磁性相绝缘材料的加入会导致复合材料磁导率和饱和磁化强度降低;采用等离子烧结、微波烧结、激光烧结等新型制备技术可以有效改善软磁复合材料的性能。目前软磁复合材料的综合性能已无法满足电子元器件高频化、微型化的发展需求,未来应将研究重点放在优化基体成分设计与粒度配合、开发新的绝缘包覆材料、创新制备工艺、优化制备工艺参数、完善现有理论模型等方面。

收稿日期:2020-05-06

基金项目:河南省科技攻关计划项目(192102210033);郑州轻工业大学博士科研基金资助项目(2014BSJJ022)

作者简介:吴深(1987—),男,河南省周口市人,郑州轻工业大学讲师,博士,主要研究方向为软磁复合材料。

**Abstract:** The research status from magnetic substrate design, insulation coating treatment and new preparation technology were reviewed. It pointed out that the density and resistivity of soft magnetic composites could be effectively improved by using magnetic powders with different characteristics to complement the performance or controlling the morphology of the substrate during the design of the magnetic substrate. The insulation coating treatment could be used to increase the resistivity of the soft magnetic composite to reduce eddy current loss, but the addition of non-magnetic phase insulation materials would lead to a decrease in the magnetic permeability and saturation magnetization of the material. The optimized new preparation technology could effectively improve the performance of soft magnetic composite materials, such as plasma sintering, microwave sintering and laser sintering. The current comprehensive performance of soft magnetic composite materials could not meet the development needs of high frequency and miniaturization of electronic components. The future research directions would be further optimization of substrate component design and particle size coordination, development of new coating materials, innovative preparation processes, optimization of process parameters, and perfection of theoretical models.

## 0 引言

软磁复合材料 SMCs (soft magnetic composites), 又称磁粉芯, 它是将软磁粉体绝缘包覆后, 采用粉末冶金工艺压制所需形状并通过热处理等工艺制备而成, 是一类重要的软磁材料<sup>[1]</sup>. 软磁复合材料具有三维各向同性、涡流损耗较低、频率特性良好、易于机械加工等优点, 其机理为: 1) 与铁氧体相比, 软磁复合材料具有较高的磁通密度, 有利于电子器件小型化; 2) 软磁复合材料在微观结构上由高电阻率绝缘材料包覆铁磁性颗粒组成, 可以有效降低高频下的涡流损耗, 在 kHz 到 MHz 的频率范围内具有很大的应用潜力; 3) 非铁磁性绝缘层会阻碍磁化过程中磁畴壁的移动, 而磁路中的间隙又能提高材料的抗磁饱和能力, 从而使软磁复合材料具有优良的交流偏置特性. 基于软磁复合材料的优异特性, 其在变压器、扼流线圈、传感器、电感器、动力驱动系统电磁部件中的应用较为广泛<sup>[2-4]</sup>. 近年来, 随着电子器件微型化和高频化的快速发展, 要求软磁材料需同时具有较高的磁导率和较低的高频损耗, 而传统的金属软磁材料和铁氧体已无法满足使用要求, 因此软磁复合材料受到了学术界和工业界的广泛关注. 基于此, 本文拟从磁性基体设计、绝缘包

覆处理和制备工艺优化 3 个方面对软磁复合材料的发展现状进行综述, 以期获得综合性能更加优良的新型软磁复合材料及推进其产业化进程提供参考.

## 1 磁性基体设计

作为软磁复合材料的主体组元, 磁性基体对软磁复合材料的性能起到决定性作用: 在降低颗粒磁滞损耗和颗粒内涡流损耗的同时, 保证软磁复合材料具有较高的饱和磁感应强度和磁导率.

### 1.1 基体成分设计

软磁复合材料常用的基体主要是金属软磁磁粉, 根据磁粉微结构的不同可以分为晶态 (Fe、FeSi、FeSiAl、FeNi 等)、非晶 (FeSiBNb、FeCrSiB 等) 和纳米晶 ( $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  等) 3 种类型, 每种磁粉独特的磁性能决定了其应用范围. 其中, 非晶软磁材料由于原子排列长程无序、不存在晶界和磁晶各向异性, 具有电阻率较高和矫顽力较低的特点, 为获得较高的非晶形成能力需加入非磁性元素, 但这会降低软磁材料的饱和磁化强度. 纳米晶软磁材料是将非晶合金热处理后得到的纳米级尺寸的多晶颗粒, 具有较高的电阻率, 但存在磁畴钉扎效应, 从而导致其磁导率较低. 另外, 该

材料制备工艺复杂、成本较高,目前应用较少. 常见软磁材料的性能和特点如表1<sup>[5-7]</sup>所示. 为获得综合性能优异的磁粉,软磁合金的成分设计主要集中在3个方向:加入磁性元素,提高材料的饱和磁化强度;添加引起晶格畸变的合金元素,提高材料的电阻率,降低涡流损耗;加入使磁晶各向异性和磁致伸缩系数同时趋向于零的元素,降低矫顽力.

目前,对单一基体软磁复合材料的研究已较为完善,研究者们将不同类型的金属软磁粉末混合后作为基体,可使不同特性的磁粉性能互补以提升材料的性能. D. H. Liu等<sup>[8]</sup>将纳米Fe粉颗粒与Fe-6.5%Si颗粒(若无特指,百分数均指质量分数,下同)混合后发现,纳米Fe粉颗粒可以有效填充在Fe-6.5%Si颗粒的空隙中,从而提高复合材料的密度;当纳米Fe粉颗粒含量为3%时,软磁复合材料的磁导率提高了24%且具有相对较低的磁损耗.

## 1.2 基体形态设计

粉末的基体形态影响软磁复合材料的压制性能和绝缘包覆性能,通过对基体形态的控制可以有效提高软磁复合材料的性能. 粉末的基体形态主要包括不规则形、球形、椭圆形、片状和纤维状几种类型. 不规则形磁粉一般通过机械破碎法和水雾化法制备,此种形态的磁粉易

于压制,但棱角部分难以被均匀包覆,易导致软磁复合材料的电阻率较低;球形磁粉一般采用气雾化法制备,易于被绝缘包覆,但成型后的软磁复合材料存在较多孔洞间隙,材料的密度和饱和磁感应强度也不高;椭圆形、片状和纤维状磁粉采用球磨、拉拔等特殊工艺制备而成,可以提高软磁复合材料的压制密度和磁导率. 例如, B. V. Neamtu等<sup>[9]</sup>采用Fe纤维替代常规的磁性颗粒,通过水热法包覆SiO<sub>2</sub>绝缘层来制备软磁复合材料. Fe纤维的长度为200~400 mm,厚度为80~120 μm,其形态如图1所示. 利用Fe纤维作为基体,可以降低退磁因子,有利于磁化的进行,从而大幅度提升软磁复合材料的初始磁导率. W. C. Li等<sup>[10]</sup>采用片状磁粉设计了一种层状仿生贝壳结构的FeSiAl软磁复合材料,有效提升了块状软磁复合材料的电阻率,其制备过程如图2所示. 这种仿生贝壳结构的材料在1000 kHz下具有超过600的磁导率,在100 mT磁场下,当测试频率为200 kHz时,其磁损耗仅为1 162.6 kW/m<sup>3</sup>,有望成为匹配宽禁带半导体的高功率软磁材料.

## 2 绝缘包覆处理

软磁粉末基体需要经过绝缘包覆处理来提高复合材料的电阻率以降低涡流的损耗,但是

表1 常见软磁材料的性能和特点<sup>[5-7]</sup>

Table 1 Properties and characteristics of common soft magnetic materials<sup>[5-7]</sup>

类型	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	饱和磁感应强度 $B_s/\text{T}$	有效磁导率 $\mu_e$	损耗 $P_s/(\text{mW} \cdot \text{cm}^{-3})$ (在0.1 T, 50 kHz条件下)	直流偏置/ $\%$ (在磁场强度100 Oe条件下)	特点
Fe	5.0~7.2	2.10	25~100	600~1000	40	价格便宜、饱和磁感应强度较高,加工性好,但电阻率较小,损耗较大
FeSi	7.5	1.60~2.10	25~90	300~600	75	饱和磁感应强度和电阻率较高,但脆性较大
FeSiAl	6.2	0.90~1.10	25~160	200~400	40~50	磁导率较高,电阻率较大,但饱和磁感应强度较低
FeNi	7.6	1.50	60~130	250~350	68	磁导率较高、损耗较低,但成本高
非晶	7.2	1.56	20~90	250~350	50~60	电阻率较高,矫顽力较低,但力学性能和温度稳定性差
纳米晶	7.4	1.25	25~90	200~310	70	饱和磁感应强度较高,矫顽力和损耗较低,但磁导率较低,成本较高

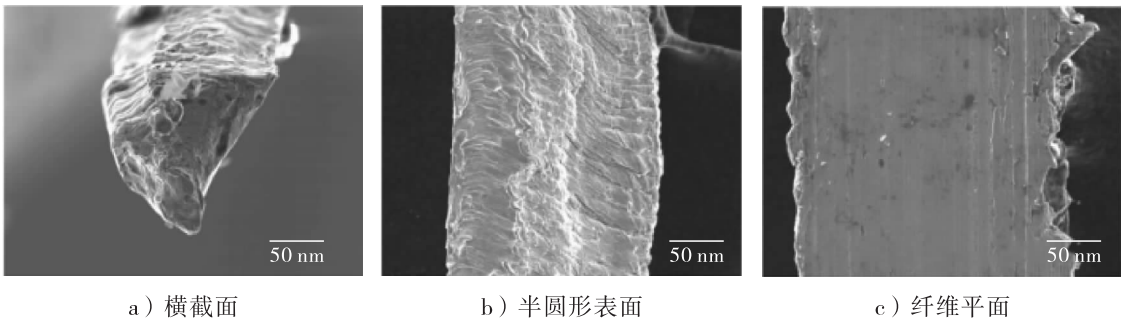


图1 Fe纤维的SEM图<sup>[9]</sup>

Fig.1 SEM images of Fe fibres <sup>[9]</sup>

加入的绝缘材料一般为非磁性相,这会导致复合材料的磁导率和饱和磁化强度降低.因此,绝缘包覆层需尽量满足薄、电阻率高、热稳定性好、与磁粉结合紧密并能完整均匀包覆的要求.根据包覆材料的类型,一般将绝缘包覆分为有机包覆、无机包覆、有机-无机复合包覆和磁性相包覆4种类型.

### 2.1 有机包覆

有机包覆材料大部分为热固性有机物,如环氧树脂、丙烯酸树脂、聚氨酯树脂和它们的混合物<sup>[11-14]</sup>.有机包覆工序简单、包覆均匀且经绝缘包覆后的粉末易于压制成型,但压制成型过程也会导致材料内应力增大,从而使其矫顽力增加.内应力的消除需进行高温退火处理,而

大部分有机物在高温下会发生分解,易导致绝缘包覆层失效,电阻率降低,无法有效地降低复合材料的涡流损耗.图3退火温度对为环氧树脂和酚醛树脂包覆软磁复合材料电阻率的影响.由图3可以看出,两种材料包覆软磁复合材料的电阻率均随着退火温度的升高而逐渐降低<sup>[15]</sup>.

为满足高温热处理的要求,需在有机领域寻找既耐高温又适合作为绝缘包覆剂的新材料.例如,S. Wu等<sup>[16-17]</sup>采用耐高温性能良好的硅酮树脂作为绝缘包覆剂制备铁基软磁复合材料,并研究了硅酮树脂绝缘包覆对铁基软磁复合材料磁性能的影响.结果表明,经绝缘包覆后的复合材料在较高的电阻率和较宽的频率范围内具有良好的频率特性.此外,S. Wu等<sup>[18-19]</sup>还

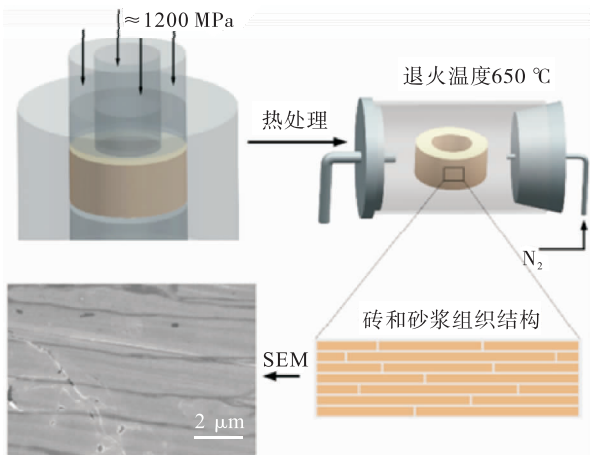


图2 仿生贝壳结构软磁复合材料的制备示意图<sup>[10]</sup>

Fig.2 Schematic diagram of the fabrication route to the nacre-like structure SMCs<sup>[10]</sup>

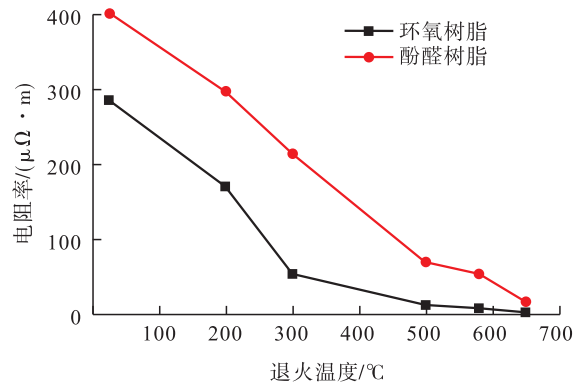


图3 退火温度对环氧树脂和酚醛树脂包覆软磁复合材料电阻率的影响<sup>[15]</sup>

Fig.3 Effect of annealing temperature on resistivity of resin-coated soft magnetic composites with epoxy resin and phenolic resin<sup>[15]</sup>

利用化学气相沉积法在铁粉表面成功包覆厚度为 300 nm 左右的 parylene C 薄膜,该膜摩擦系数较低且具有自润滑特性,与环氧树脂包覆的复合材料相比,在 800 MPa 时该复合材料的压制密度提高了 17.02%,具体的包覆过程如图 4 所示.

### 2.2 无机包覆

由于有机包覆受热处理温度的限制,耐高温的无机包覆逐步成为研究重点.目前,常用的无机包覆材料有磷酸盐、氧化物和低熔点玻璃.对于使用磷酸盐包覆的软磁复合材料,当退火温度高于 500 °C 时,磷酸盐包覆层中的 P 元素和 O 元素发生扩散破坏磷化层结构,复合材料的电阻率 (< 10 μm) 急剧下降,导致高频下材料的涡流损耗增加<sup>[20]</sup>.磷酸盐包覆在一定程度上提高了复合材料的热处理温度,但尚未解决绝缘层电阻率随热处理温度升高而急剧下降的问题.以 MgO<sup>[21]</sup>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>[22]</sup> 和 SiO<sub>2</sub><sup>[23]</sup> 为代表的氧化物用作绝缘包覆材料时,这些包覆材料具有较高的耐热特性,在不显著提高涡流损耗的前提下可以有效地去除内应力. J. W. Zheng 等<sup>[24]</sup> 采用水热法制备了 Li-Al-O 包覆的铁基软磁复合材料,研究发现,当将 Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 添加到

Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 溶液中时,最初形成的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 包覆层转化为含有几种 Li-Al 混合物的层状氧化物;与包覆 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的软磁复合材料相比,包覆 Li-Al-O 的 SMCs 在 100 ~ 300 kHz 高频范围内表现出更低的磁损耗,且具有更高、更稳定的有效磁导率.

由于金属氧化物与基体粉末的热膨胀系数差别较大,高温环境下在材料内部会产生较高的内应力, W. Ding 等<sup>[25]</sup> 和 F. Hu 等<sup>[26]</sup> 采用低熔点玻璃作为包覆材料,较好地解决了这一问题.在添加了树脂的 SMCs 中,流体树脂会在压制过程中填充到金属颗粒之间的空隙中,不同金属颗粒之间的接触点变为欧姆接触;而在压制过程中,玻璃颗粒的运动不明显,高温热处理时软化成薄片的玻璃颗粒仍然分布在金属颗粒之间,从而切断了不同颗粒之间的涡流.带有树脂和玻璃的 SMCs 金属颗粒结构如图 5 所示.涡流被限制在一个单独的区域中,从而降低了涡流损耗.此外,低熔点玻璃既充当绝缘体又充当粘合剂,金属颗粒在冷却过程中通过软化薄片而紧密结合,从而提高了 SMCs 的机械强度.

### 2.3 磁性相包覆

由于磁稀释效应,非磁性相绝缘材料的加

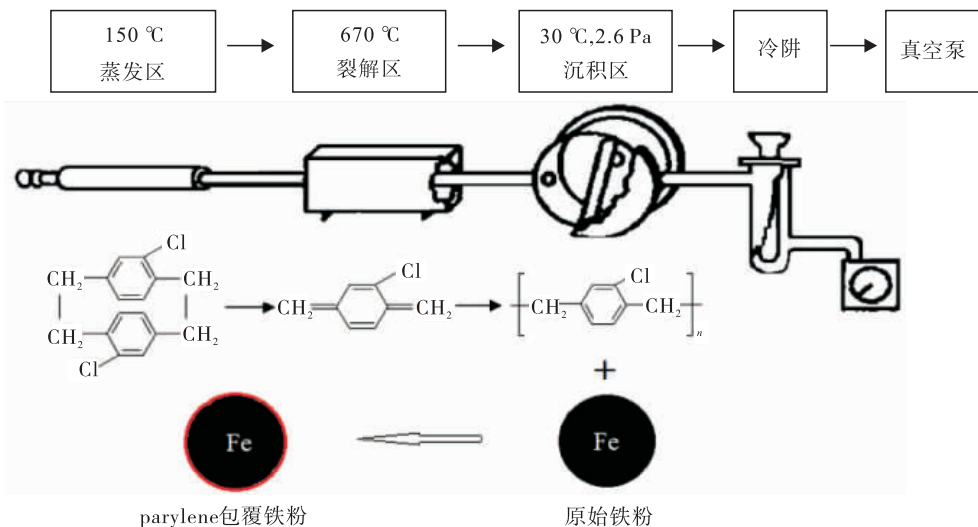


图 4 化学气相沉积法包覆 parylene C 薄膜流程图<sup>[18-19]</sup>

Fig. 4 Diagram of chemical vapor deposition polymerization of parylene C<sup>[18-19]</sup>

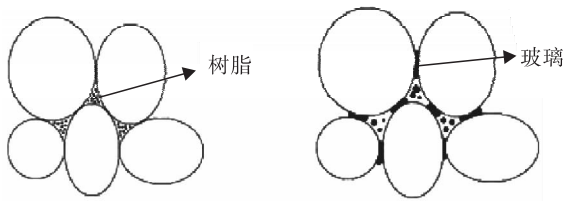


图5 带有树脂和玻璃的

SMCs 金属颗粒结构示意图<sup>[26]</sup>

Fig.5 Schematic diagram of metallic particles configuration of SMCs with resin and glass<sup>[26]</sup>

入不可避免地会导致软磁复合材料的饱和磁化强度和磁导率降低. 据悉, 仅有 5% 的非磁性材料包覆层就可导致软磁复合材料的磁导率降低超过 75%<sup>[27]</sup>. 为了抑制磁性稀释的影响, 研究者使用铁磁材料作为包覆材料, 利用其高绝缘性来增强复合材料的软磁性能.  $Fe_3O_4$  的原位包覆<sup>[28-30]</sup> 为软磁复合材料提供了一个减少磁稀释作用的有效途径, 但是,  $Fe_3O_4$  在 450 °C 温度下会分解, 使得软磁复合材料的内部应力无法完全释放. W. C. Li 等<sup>[31]</sup> 通过离子掺杂的方式在  $Fe@Fe_3O_4$  表面成功制备出  $Fe@$  复合铁氧体软磁复合材料, 改善了  $Fe_3O_4$  的热稳定性和绝缘性, 复合磁性相包覆层形成过程如图 6 所示. 在 5000 A/m、50 Hz 的条件下, 该类复合材料的饱和磁感应强度保持在 1.32 T, 最大磁导率为 625.14; 而在 50 Hz、1.3 T 的条件下, 软磁复合材料的磁损耗仅为 10.02 W/kg.

### 2.4 有机-无机复合包覆

有机包覆不能进行高温退火处理以充分

释放压制过程中产生的内应力, 而单纯的无机包覆形成的绝缘层脆性较大, 无法获得较高的压制密度. 为提高软磁复合材料的性能, 有机-无机复合包覆备受关注, 其综合了有机和无机包覆材料的优势, 如较高的电阻率、良好的温度稳定性和理想的压制性能. A. H. Taghvaei 等<sup>[32]</sup> 首先通过湿化学法在铁粉上形成一层磷酸铁薄层, 然后将质量分数为 0.7% 的酚醛树脂包覆在磷化粉末表面, 与仅用磷酸盐处理的粉末相比, 经有机-无机复合包覆所制得的软磁复合材料损耗因子减少了约 85%. K. L. Li 等<sup>[33]</sup> 选择磷酸盐和有机树脂作为绝缘层, 制备了具有多层包覆结构的铁粉基软磁复合材料, 包覆后粉末的形态如图 7 所示. 研究表明, 经过工艺优化制备的软磁复合材料具有较高的相对密度 (93.7%) 和电阻率 ( $2.23 \times 10^{11} \mu\Omega \cdot m$ )、稳定的磁导率 (在 5 ~ 1000 kHz 的频率范围内)、较高的品质因数 (700 kHz 时为 44.8) 和相对较低的磁损耗 (100 kHz 时为  $159.0 \text{ kW/m}^3$ ).

当前对绝缘包覆材料的研究已较为完善, 但由于绝缘包覆处理很大程度上决定了复合材料的密度、磁导率、电阻率、涡流损耗和机械强度, 因此绝缘剂的加入量、包覆层厚度、包覆的均匀程度、包覆层与基体的结合效果仍是制备软磁复合材料过程中需重点关注的问题. 此外, 软磁复合材料绝缘包覆的方法大多仍处于实验室研究的阶段, 开发高效的制备方法以满足产业化需求, 将是软磁复合材料研究领域努

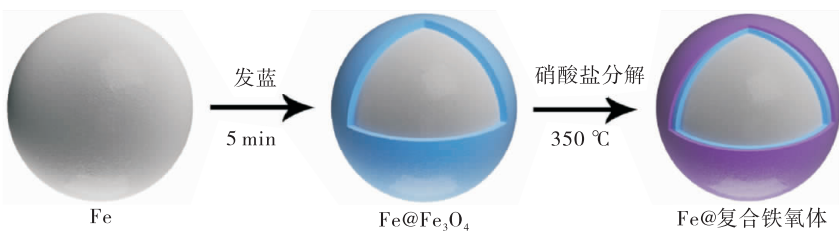


图6 复合磁性相包覆层形成过程示意图<sup>[31]</sup>

Fig.6 Schematic diagram of the evolution of the composite-Ferrite coating layer<sup>[31]</sup>

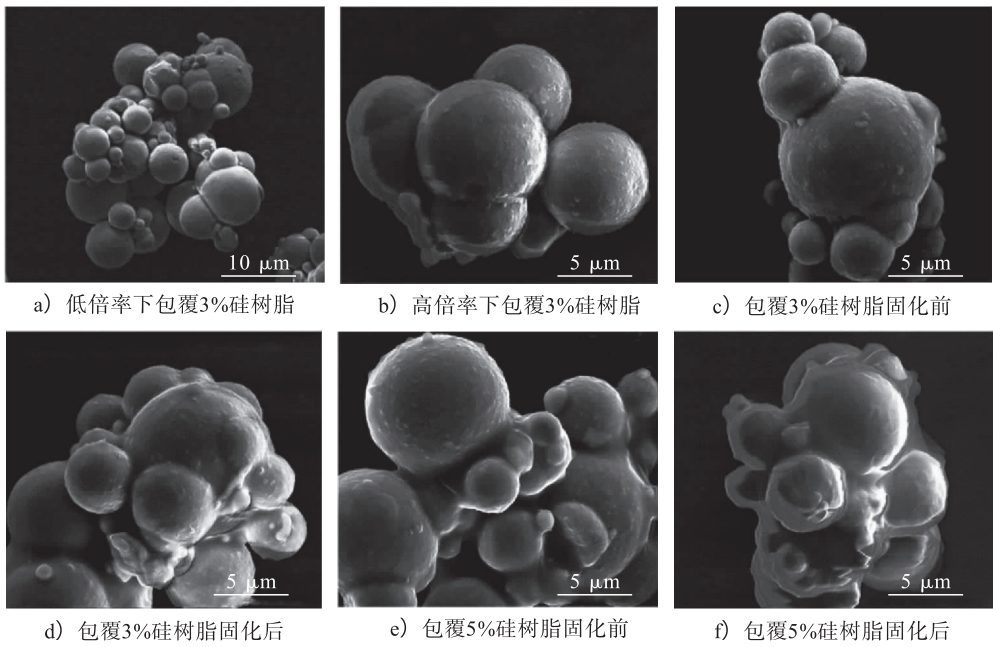


图 7 磷酸-树脂复合包覆后粉末的 SEM 图<sup>[33]</sup>

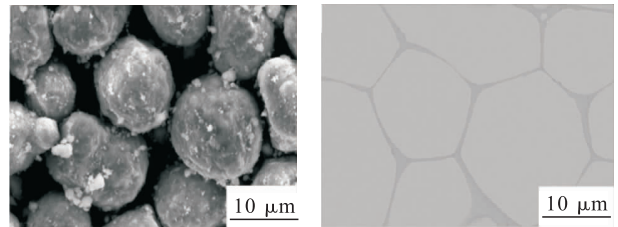
Fig. 7 SEM images of particles after phosphating and resin coating

力的方向.

### 3 新型制备技术

软磁复合材料的制备过程包含粉末基体选择、绝缘包覆、成型、热处理等过程,通过制备工艺优化可以提升软磁复合材料的性能.近年来,涌现了一些新型制备技术,如等离子烧结 (SPS)、微波烧结、激光烧结等.

SPS 是一种在粉末颗粒间直接通入脉冲电流进行加热烧结的方法,在合成材料制备方面具有烧结温度低和烧结快速的优点,利用 SPS 技术可以避免非晶合金的结晶,可用于制备多种较大尺寸的非晶金属材料. Z. K. Zhao 等<sup>[34]</sup>采用 SPS 技术,在 487 °C 的条件下制备了  $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{10}\text{P}_5/\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  非晶复合材料,其结构如图 8 所示. 该非晶复合材料具有微孔结构和较高的电阻率,这可能是由于  $\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  纳米粒子的尖端效应促进了间隙中的局部放电和等离子体的产生,并且放电能量形成了瞬时的局部高温,从而在较低的烧结温度下完成了  $\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  粒子的局部烧结和致密



a) 烧结前 b) 烧结后

图 8  $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{10}\text{P}_5/\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  复合材料的 SEM 图<sup>[34]</sup>

Fig. 8 SEM image of the  $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{10}\text{P}_5/\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$  composites<sup>[34]</sup>

化;同时,局部高温会刺激相邻的间隙放电,从而促进新放电路径的连续形成,最终完成无定形复合材料的烧结和致密化.

微波烧结是一种过程化的热处理技术,微波加热与传统加热的根本区别在于将热能传递到材料的方式不同.与传统的烧结材料相比,微波烧结制得的复合材料的微观结构、物理和机械性能均得到了改善. R. Bures 等<sup>[35]</sup>基于微波烧结技术制备了  $\text{Fe}/\text{MgO}$  软磁复合材料,并研究了其显微组织的形成机制、磁性和机械性能.结果表明,当  $\text{MgO}$  的质量分数为 5% 时,经过微

波烧结的软磁复合材料矫顽力从 460 A/m 降低至 290 A/m。

激光烧结集成了 CAD 技术、数控技术和激光加工技术,可迅速制造出任意复杂形状的三维实体零件。为了降低软磁复合材料的涡流损耗,B. Kocsis 等<sup>[36]</sup>基于 3D 打印技术,利用激光烧结制备了具有层状结构的 FeSi 合金,其微观组织见图 9。通过 3D 打印技术可以控制材料的微观结构,制备出被高电阻率层隔离的厚度为 20  $\mu\text{m}$  的铁磁层,有效降低了颗粒间的涡流损耗,这是传统的粉末冶金方法无法做到的。另外,经激光致密化烧结后,复合材料的密度和强度都会得到大幅度的提升。

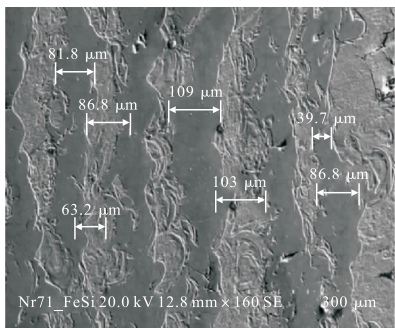


图 9 层状结构 FeSi 合金的微观组织<sup>[36]</sup>

Fig. 9 Microstructure of FeSi alloy with layered structure<sup>[36]</sup>

作为新型的烧结致密化技术,SPS、微波烧结和激光烧结都是基于快速烧结与活化烧结的有机结合。将这些新技术应用于软磁复合材料的制备,可以实现对软磁复合材料内部微观结构的精确控制。软磁复合材料的微观结构对其性能的影响具有多样性和复杂性,目前对微观结构、软磁性能与制备工艺参数之间相互关系的认识还不够深入,有待进一步的研究。

## 4 结语

本文从软磁复合材料的磁性基体设计、绝缘包覆处理和新型制备技术 3 个方面对软磁复合材料的研究现状进行了综述,指出了磁性基

体设计时,可通过对不同特性的磁粉进行性能互补或对基体形态进行控制,提高软复合材料的密度和磁导率;经过绝缘包覆处理,可以提高软复合材料的电阻率,降低其涡流损耗,但是非磁性相绝缘材料的加入也会导致材料的磁导率和饱和磁化强度降低;采用等离子烧结、微波烧结、激光烧结等新型制备技术可以有效改善软复合材料的性能。

随着科技的进步和电子元器件高频化、微型化的发展需求,软复合材料需要具备低磁损耗和高磁导率的特点,这就需要对软磁基体金属材料做进一步的优化设计,不断深入寻找新的绝缘包覆材料,同时对现有制造工艺进行改良,开发出综合性能更加优良的新型软复合材料。欲进一步提升软复合材料的性能,以下问题应重点关注:1) 优化基体成分设计与粒度配合,研发满足高磁导率、低矫顽力、高饱和磁感应强度要求的粉末金属基体;2) 开发新的绝缘包覆材料,重点寻找耐高温、压制性能良好的新材料;3) 创新制备工艺,不断将新型的制备技术应用在软复合材料的开发上;4) 优化制备工艺参数,考虑制备软复合材料的成本,探寻影响磁性能和力学性能的关键因素,综合权衡以确定最优工艺方案;5) 基于软复合材料的复杂结构,创新或完善现有理论模型来指导材料的制备,促进产业化的进程。

## 参考文献:

- [1] SHOKROLLAHI H, JANGHORBAN K. Soft magnetic composites material[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 189: 1.
- [2] PERIGO E A, WEIDENFELLER B, KOLLAR P, et al. Past, present and future of soft magnetic composites[J]. Applied Physics Reviews, 2018, 5(3): 031301.
- [3] GUTFLEISCH O, WILLARD M A, BRÜCK E, et al. Magnetic materials and devices for the



- 21st century: Stronger, lighter, and more energy efficient [J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(7):821.
- [4] CHEN Z H, LIU X S, KAN X C, et al. Phosphate coatings evolution study and effects of ultrasonic on soft magnetic properties of FeSiAl by aqueous phosphoric acid solution passivation [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 783:434.
- [5] 吴琛, 严密. 金属软磁复合材料研究进展[J]. *中国材料进展*, 2018, 37(8):582.
- [6] 刘君昌, 梅云辉, 陆国权. 电力电子中高频软磁材料的研究进展[J]. *材料工程*, 2017, 45(5):127.
- [7] 赵占奎, 邓娜, 咎朝, 等. 高性能软磁材料研究进展[J]. *长春工业大学学报(自然科学版)*, 2012, 33(5):521.
- [8] 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 [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 835:155215.
- [9] NEAMTU B V, BELEA A, POPA F, et al. Properties of soft magnetic composites based on Fe fibres coated with SiO<sub>2</sub> by hydrothermal method [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 826:154222.
- [10] LI W C, CAI H W, KANG Y, et al. High permeability and low loss bioinspired soft magnetic composites with nacre-like structure for high frequency applications [J]. *Acta Materialia*, 2019, 167:267.
- [11] HEMMATI I, MADAAH H R, KIANVASH A. The correlations between processing parameters and magnetic properties of an iron-resin soft magnetic composite [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2006, 305:147.
- [12] MADEA T, TOYODA H, IGARASHI N, et al. Development of super low iron-loss P/M soft magnetic material [J]. *SEI Tech Rev*, 2005, 60:3.
- [13] SLUSAREK B, JANKOWSKI B, SOKALSKI K, et al. Characteristics of powerloss in soft magnetic composites a key for designing the best values of technological parameters [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 581:699.
- [14] KOLLAR P, BIRCAKOVA Z, FÜZER J, et al. Power loss separation in Fe-based composite materials [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2013, 327:146.
- [15] 周帮. 非晶/无机氧化物复合磁粉芯的制备及其软磁性能研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2019.
- [16] WU S, SUN A Z, ZHAI F Z, et al. Annealing effects on magnetic properties of silicone-coated iron-based soft magnetic composites [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, 324:818.
- [17] WU S, FAN J L, LIU J X, et al. Synthesis and magnetic properties of soft magnetic composites based on silicone resin-coated iron powders [J]. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2018, 31:587.
- [18] WU S, SUN A Z, LU Z W, et al. Fabrication and properties of iron-based soft magnetic composites coated with parylene via chemical vapor deposition polymerization [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2015, 153:359.
- [19] WU S, PAN S L, LIU J X, et al. Effect of compaction parameters on the magnetic and corrosive properties of soft magnetic composites with parylene insulation [J]. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2019, 32:4033.
- [20] LUO D H, WU C, YAN M. Incorporation of the Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and SiO<sub>2</sub> nanoparticles in epoxy-modified silicone resin as the coating for soft magnetic composites with enhanced performance [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic materials*, 2018, 452:5.
- [21] TAGHVAEI A H, EBRAHIMI A, GHAFARI M, et al. Magnetic properties of iron-based soft

- magnetic composites with MgO coating obtained by sol-gel method [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, 322: 808.
- [22] YAGHTIN M, TAGHVAEI T H, HASHEMI B, et al. Effect of heat treatment on magnetic properties of iron-based soft magnetic composites with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> insulation coating produced by sol-gel method [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 581: 293.
- [23] WU S, SUN A Z, LU Z W, et al. Magnetic properties of iron-based soft magnetic composites with SiO<sub>2</sub> coating obtained by reverse microemulsion method [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, 381: 451.
- [24] ZHENG J W, ZHENG H D, LEI J, et al. Structure and magnetic properties of Fe-based soft magnetic composites with an Li-Al-O insulation layer obtained by hydrothermal synthesis [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 816: 152617.
- [25] DING W, JIANG L T, LIAO Y Q, et al. Effect of iron particle size and volume fraction on the magnetic properties of Fe/silicate glass soft magnetic composites [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, 378: 232.
- [26] HU F, NI J L, FENG S J, et al. Low melting glass as adhesive and insulating agent for soft magnetic composites: Case in FeSi powder core [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 501: 166480.
- [27] PITTINI-YAMADA Y, PERIGO E A, HAZAN Y D, et al. Permeability of hybrid soft magnetic composites [J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(11): 4291.
- [28] LI W C, WANG Z, YING Y, et al. In-situ formation of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and ZrO<sub>2</sub> coated Fe-based soft magnetic composites by hydrothermal method [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(3): 3864.
- [29] XIE Y, YAN P, YAN B. Enhanced soft magnetic properties of iron-based powder cores with Coexistence of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-MnZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles [J]. *Metals*, 2018, 8(9): 702.
- [30] YANG B, LI X, YANG X, et al. Chemical synthesis of Fe/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> core-shell composites with enhanced soft magnetic performances [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, 428: 6.
- [31] LI W C, PU Y Y, YING Y, et al. Magnetic properties and related mechanisms of iron-based soft magnetic composites with high thermal stability in situ composite ferrite coating [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 829: 154533.
- [32] TAGHVAEI A H, SHOKROLLAHI H, JANGHORBAN K. Magnetic and structural properties of iron phosphate-phenolic soft magnetic composites [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2009, 321: 3926.
- [33] LI K L, CHENG D N, YU H Y, et al. Process optimization and magnetic properties of soft magnetic composite cores based on phosphated and mixed resin coated Fe powders [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 501: 166455.
- [34] ZHAO Z K, SUN Y T, WANG M G, et al. Interfacial behavior of Fe<sub>76</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>10</sub>P<sub>5</sub>/Zn<sub>0.5</sub>Ni<sub>0.5</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> amorphous soft magnetic composite during spark plasma sintering process [J]. *Progress in Natural Science (Materials International)*, 2016, 26(1): 85.
- [35] BUREŠ R, FÁBEROVÁ M, KOLLÁR P, et al. Microwave sintered Fe/MgO soft magnetic composite [J]. *Acta Physica Polonica A*, 2017, 31(4): 780.
- [36] KOCSIS B, FEKETE I, VARGA L K. Metallographic and magnetic analysis of direct laser sintered soft magnetic composites [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 501: 166425.