

特约专栏

# 颗粒包覆软磁复合材料制备和电磁特性研究进展

杨白, 张蕾, 李嵘峰, 于荣海

(北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 具有大功率、低损耗及高温使用特性的软磁复合材料是目前磁性材料领域研究的一个重要方向。这种材料可以制备特定环境使用的高性能电磁部件, 如高温和高速电机的转子, 在航空航天、电子电工、能源和混合动力汽车等领域有着潜在的应用前景。由于软磁复合材料具有较低的成本和较好的耐蚀性, 有望发展成为实用的新型软磁材料, 弥补传统金属软磁材料和软磁铁氧体使用性能的不足, 一直受到人们的重视并得到了广泛的研究。结合作者所在实验室近几年来在软磁复合材料领域的研究工作, 介绍国内外在金属磁性颗粒包覆软磁复合材料的制备工艺、界面结构和电磁特性及其应用的研究进展。根据研究现状和实际应用的要求, 提出软磁复合材料研究所面临一些问题, 并对这类材料的发展进行展望。

**关键词:** 软磁复合材料; 制备工艺; 界面结构; 电磁特性

**中图分类号:** TM271; TB33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2012)07-0010-06

## Progress on Preparation and Electromagnetic Properties of Soft Magnetic Composite Materials (SMCs) Based on the Coated Metal Magnetic Powders

YANG Bai, ZHANG Lei, LI Rongfeng, YU Ronghai

(School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The soft magnetic composites (SMCs) for high-power, low-loss and high-temperature applications are an important kind of soft magnets and attract much research interest these years. These materials can be prepared into high-performance magnetic devices in special situations, such as high-speed rotors in high-temperature and high-speed electrical machines, which show a latent use in the fields of aerospace, electrician, electron, energy and hybrid cars. Compared with traditional soft magnet such as metal soft magnetic material, the SMCs have the advantages of lower cost and higher corrosion resistance. So the SMCs are considered as another kind of new soft magnet that may cover the shortage of the usability of traditional soft magnet, and receive much attention and extensive research. The recent research progress on preparation methods, interfacial structure, electromagnetic properties and applications of the SMCs based on the coated metal magnetic powders is discussed systematically, and the research work on SMCs in our lab is also introduced briefly in this paper. According to present research situation and the requirements of practical application of SMCs, the challenges in the research of these materials are posed and the development of SMCs is also discussed later.

**Key words:** soft magnetic composite materials (SMCs); preparation methods; interfacial structure; electromagnetic properties

### 1 前言

软磁材料基本用途是在一个较低的外磁场作用下(几奥斯特到几十奥斯特)获得较高的磁感应强度(几千到一万多奥斯特), 利用电磁相互作用, 实现各种功能性转换, 如电能-磁能、磁能-机械能和电能-机械能

等之间的相互转化。软磁材料作为各类电机(如电动机和发电机等)、变压器和磁性元器件等关键材料被应用于现代社会发展的方方面面, 在电力设备、电器设备和电子设备等领域有着极为广泛的应用。

具有大功率、低损耗和高温使用特性的软磁复合材料, 可以用来制造特定环境使用的高性能电磁部件, 如高速电机的转子。在目前飞速发展的航空航天、汽车等现代化工业领域, 有着潜在的应用前景和巨大的经济效益。因此研究和开发新型软磁复合材料, 一直受到磁性材料研究者的重视。

大功率的使用特性, 要求软磁材料具有高饱和磁感

收稿日期: 2012-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51101007); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2010CB934602)

作者简介: 杨白, 男, 1979年生, 讲师, 硕士生导师

通讯作者: 于荣海, 男, 1963年生, 教授, 博士生导师

应强度和一定的磁导率, 低损耗则要求材料具有低矫顽力和高电阻率。Fe-Si 软磁合金和 Fe-Co 软磁合金是目前大量使用的大功率软磁材料。作为软磁材料使用的 Fe-Si 合金的 Si 含量一般小于 3.5% (质量分数), 工业上也称电工硅钢, 这种材料具有较高的饱和磁感应强度 ( $B_s = 2.0 \sim 2.1 \text{ T}$ ), 由于硅的添加, 材料的电阻率比纯铁提高几个数量级, 因此, 这种材料被大量应用于变压器和高速电机等大功率使用场合<sup>[1-3]</sup>。电工硅钢一般要通过多次冷轧-退火获得理想结构, 使用状态一般为片状, 必须通过叠加制备成电磁器件。另外, 由于硅的添加, 硅钢片具有较强的脆性, 抗冲击性能和断裂韧性都比较差。Fe-Si 软磁合金不适宜制备小型化和形状复杂的大功率电磁部件。Fe-Co 软磁合金的突出特点是具有高饱和磁感应强度,  $B_s$  高达 2.4 T, 高于目前其他软磁材料相应的值。由于 Fe-Co 合金的电阻率很低, 因此, 在高频场合下, 材料具有很大磁损耗, 一般往合金通过添加适量的 V, 可以适当地提高合金的电阻率, 从而降低磁损耗。Fe-Co 软磁合金具有较强的脆性, 可加工性比较差, 可以通过添加适量的合金元素, 并经过适当的热处理改善 Fe-Co 软磁材料的机械强度和延展性<sup>[4-5]</sup>。此外, 材料中因为含有大量的 Co 元素, Co 属于战略元素, 价格很高, 导致了 Fe-Co 软磁合金的使用成本很高。因此, Fe-Co 软磁合金在大功率、低损耗和大量使用场合不具有实用价值。

由于高性能软磁复合材料具有重要的应用前景, 自 20 世纪 90 年代以来, 各国材料研究者, 不断地开展高性能软磁复合材料基础和应用研究<sup>[6-10]</sup>。国外有关大功率和高温软磁复合材料的研究起源于导弹、火箭、航空航天器的发展对软磁材料的高要求。如航空发动机液阀和电磁阀上使用的软磁材料, 既要具有高磁感应强度、低矫顽力和高电阻率, 还要具有高的温度稳定性以及强的耐蚀性, 因此, 必须寻求具有良好综合性能的软磁复合材料。目前相关的研究主要由日本钢铁工程控股公司<sup>[11]</sup>、瑞典赫格纳斯有限公司 (Höganäs)<sup>[12]</sup>、三菱电机公司<sup>[13]</sup> 以及美国国防部支持的多所大学和研究所主导进行<sup>[14-15]</sup>, 研制出的大功率和高温软磁复合材料, 除了满足军工行业的需求, 也部分应用于混合动力汽车以及民用航天器等高精尖的现代化工业产品之中。目前国内部分高校和研究机构已开展高性能复合软磁材料的研究工作, 并已经取得了相当的进展。本文将结合作者所在实验室近几年来在软磁复合材料领域的研究工作, 介绍国内外研究工作者在颗粒包覆软磁复合材料制备工艺、界面结构和电磁特性的研究进展。根据研究现状和实际应用的要求, 提出软磁复合材料研究所面临一些问

题, 并对这类材料的发展进行展望。

## 2 颗粒包覆软磁复合材料研究进展

### 2.1 金属磁性颗粒-绝缘有机物软磁复合材料

由于高纯铁及铁基合金具有高饱和磁感应强度 (高纯铁的  $B_s = 2.2 \text{ T}$ ), 因此, 复合软磁材料多是以 Fe 或铁基合金软磁粉末为基体, 通过各种复合技术, 在保持高  $B_s$  的情况下, 改善其他方面的磁性能。最早研究的软磁复合材料, 是磁性颗粒-绝缘有机物复合软磁材料, 即在金属或合金软磁颗粒 (Fe、Fe-Ni、Fe-Si-Al 和 Fe-Si-B 合金等) 表面上包覆一层厚度适宜的有机物绝缘层 (如环氧树脂和酚醛树脂等), 形成金属磁性颗粒-绝缘层核壳复合结构, 然后采用粉末冶金工艺制备成致密的高强度块体材料<sup>[9]</sup>。

铁粉芯是常见的一类软磁复合材料。这类材料的制备工艺是将铁粉颗粒 (常用羟基铁粉) 和有机绝缘材料、粘合剂和润滑剂充分混合, 并使铁粉颗粒表面上完整包覆一层有机绝缘层, 采用粉末冶金压实法制备成块状样品<sup>[16]</sup>。表征铁粉芯性能的主要参数包括: 饱和磁感应强度  $B_s$ 、磁导率  $\mu$ 、温度系数  $T_c$  和品质因素  $Q$ 。研究表明, 铁粉颗粒尺寸大小、铁粉的纯度、有机绝缘层的含量或厚度和成形压力等, 对铁粉芯的软磁性能有着重要影响。

铁粉芯的主要优点在于: 有机绝缘层可以提高铁粉芯的电阻率, 减少涡流损耗, 材料在 1MHz 频率范围内的磁损耗都很低; 材料制备工艺比较简单。由于有机物包覆使得粉末压实后的密度相对较低, 材料的饱和磁感应强度和磁导率都不高; 此外, 有机物的使用温度低, 耐热性和温度稳定性较差, 压制后的块体材料, 在进行去应力退火时的耐热温度低。

在铁粉芯制备工艺中, 将铁粉颗粒换成其他软磁合金颗粒, 可以制备出合金磁粉芯 (如 FeSiAl 磁粉芯<sup>[17-18]</sup>、Fe-Si-B 磁粉芯<sup>[19-21]</sup> 和 Fe-Ni-Mo 磁粉芯<sup>[22-23]</sup> 等)。由于磁粉材料不同, 合金磁粉芯的软磁性能主要受材料内禀磁性能的影响, 但其主要软磁性能参数的变化和影响因数和铁粉芯相类似。金属磁性颗粒-有机物复合软磁材料, 适宜用于直流、低频或常温使用条件下的电磁部件, 不适用于高温和大功率的使用场合<sup>[6, 24]</sup>。

### 2.2 金属磁性颗粒-无机物软磁复合材料

为了改善金属磁性颗粒-有机物软磁复合材料低密度、低磁导率和较差的耐热性和温度稳定性等不足, 国内外研究者开展了金属磁性颗粒 (如 Fe 和 Fe-B 合金等)-无机物 (如 MgO、SiO<sub>2</sub> 和 Fe<sub>3</sub>P 等) 复合软磁材料的研究工作。研究中, 一般采用化学法或物理气相沉积法在

金属磁性颗粒表面包覆纳米级厚度的绝缘或高电阻率无机物壳层, 制备软磁复合磁性颗粒。

Zhao 等人<sup>[25]</sup>先将近球形的铁粉颗粒通过可控形变工艺制备出具有(100)晶粒取向的片状颗粒, 然后采用化学法在其表面上包覆一层非晶的  $\text{SiO}_2$  薄层, 继而采用粉末冶金压实工艺, 对包覆后的片状粉末在 1.1 GPa 的压力下进行压制, 得到致密的  $\text{Fe}/\text{SiO}_2$  软磁复合材料。 $\text{SiO}_2$  薄层使得  $\text{Fe}/\text{SiO}_2$  软磁复合材料的饱和磁化强度  $M_s$  稍有降低, 但是  $\text{SiO}_2$  薄层对片状铁粉电阻率的改善, 极大降低了材料的磁损耗, 而且取向的片状颗粒, 有利于材料磁导率的提高。从材料的磁导率谱可见(如图 1<sup>[25]</sup>所示), 片状  $\text{Fe}/\text{SiO}_2$  粉末经压实后致密的软磁复合材料, 在频率高达 50 MHz 仍具有较高的磁导率。

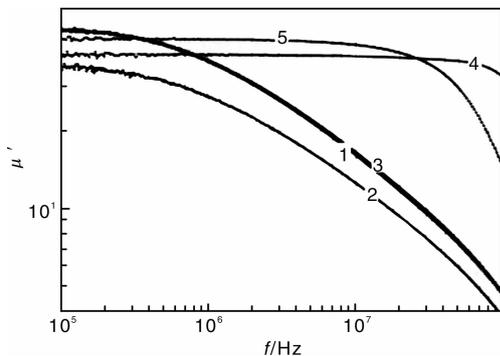


图 1 原始铁粉和处理后铁粉压实后样品的弹性磁导率随频率变化曲线

Fig. 1 Real part of permeability ( $\mu'$ ) versus frequency ( $f$ ) for consolidated samples made of original powders (1), original powders coated with silica (2), submicrometer laminates without coating (3), silica-coated submicrometer laminates (4), and laminated materials subsequently annealed (5)

日本研究人员采用热蒸发法, 在大颗粒铁粉表面上包覆一层纳米级的  $\text{MgO}$  壳层, 制备出  $\text{Fe}/\text{MgO}$  软磁复合颗粒<sup>[26]</sup>。图 2 为  $\text{Fe}/\text{MgO}$  界面结构的 TEM 像<sup>[26]</sup>, 可以看出, 界面处的  $\text{Fe}$  和  $\text{MgO}$  形成非常致密的结合,  $\text{MgO}$  在界面的分布非常均匀。因此, 与化学制备的软磁复合

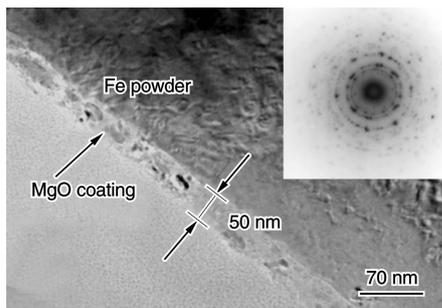


图 2  $\text{Fe}/\text{MgO}$  界面结构的 TEM 像和选区电子衍射(SAED)花样  
Fig. 2 TEM image and SAED pattern of  $\text{Fe}/\text{MgO}$  interface

材料相比, 采用热蒸发法制备的  $\text{Fe}/\text{MgO}$  软磁复合颗粒, 在压实后具有更高的致密度, 块体材料的密度达到理论密度的 95% 以上, 而且软磁复合粉末表面的绝缘性更好。研究表明,  $\text{Fe}/\text{MgO}$  良好的界面结构, 一方面提高了材料的磁导率, 另一方面提高了材料的电阻率, 材料的磁损耗得到降低。

铁粉颗粒-绝缘性氧化物软磁复合材料的不足, 在于非磁性的  $\text{SiO}_2$  或  $\text{MgO}$ , 会导致材料的饱和磁化强度和磁导率都有所降低。瑞典 Höganäs 公司采用磷酸盐作为包覆前驱体, 通过复杂的化学反应, 开发出在  $\text{Fe}$  粉颗粒表面上生成一层厚度可控的  $\text{Fe}_3\text{P}$  包覆层的 Somaloy 系列软磁复合材料产品<sup>[12, 27]</sup>。由于  $\text{Fe}_3\text{P}$  具有磁性,  $\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{P}$  复合材料饱和磁感应强度仍然较高,  $B_s$  接近 2 T, 与铁粉芯相比, 磁导率也得到较大的改善, 具有良好的综合磁特性。由于  $\text{Fe}_3\text{P}$  的电阻率高于纯铁相应的值, 因此,  $\text{Fe}_3\text{P}$  包覆层提高了复合材料的电阻率, 材料的磁损耗得到了一定的降低。但由于  $\text{Fe}_3\text{P}$  包覆层容易氧化, 温度稳定性较差, 高温下容易分解,  $\text{Fe}/\text{Fe}_3\text{P}$  软磁复合材料不适宜在 300 °C 以上的高温条件下使用<sup>[9]</sup>。此外,  $\text{Fe}_3\text{P}$  包覆层通常是采用化学腐蚀法, 在含 P 和 S 的酸性溶液中对金属磁性颗粒表面进行腐蚀而生成, 包覆液对环境污染严重。

目前, 国内部分高校和研究机构已开展高性能软磁复合材料的研究工作, 并已取得相当进展。中南大学采用化学包覆法制备软磁复合磁粉芯, 将液体绝缘液与金属磁性颗粒混合后干燥得到复合磁粉芯, 研究了绝缘介质对复合磁粉芯磁性的影响, 以及磁粉芯的高频软磁性能和温度稳定性<sup>[28]</sup>。哈尔滨工业大学研究了  $\text{Fe}$  粉颗粒表面包覆磷酸盐的实验工艺<sup>[29]</sup>。武汉理工大学开展了纳米  $\text{Fe}/\text{SiO}_2$  核壳结构软磁复合材料的研究工作, 系统研究了核壳结构软磁复合材料的制备工艺以及交流磁性能<sup>[30]</sup>。北京科技大学研究磷酸盐包覆铁粉基软磁复合材料<sup>[31]</sup>和硅酮树脂包覆铁粉软磁材料<sup>[32]</sup>的制备工艺和软磁性能。

为了改善目前软磁复合材料制备过程中, 无机物包覆工艺的不足, 北京航空航天大学于荣海研究组采用控制正硅酸乙酯室温水解沉积工艺, 直接在大粒径的铁粉颗粒表面均匀地包覆一层非晶二氧化硅壳层, 制备出壳层厚度可控, 而且完全绝缘的  $\text{Fe}/\text{SiO}_2$  核壳复合软磁粉末<sup>[33-34]</sup>。

高纯铁粉颗粒和表面包覆铁粉的 SEM 像如图 3<sup>[34]</sup>所示, 可以看出, 正硅酸乙酯水解后形成的包覆层均匀和完整地附着在铁粉颗粒表面上。从致密块体样品断面的 SEM 像, 可以观察得到  $\text{SiO}_2$  包覆层的厚度约为 100 ~

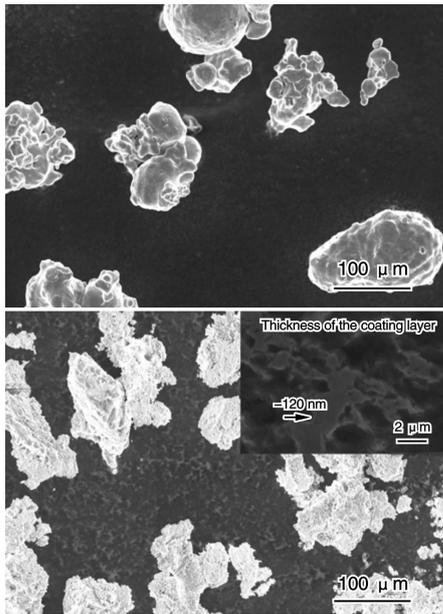


图 3 高纯铁粉(a)和表面包覆铁粉(b)的 SEM 像  
Fig. 3 SEM images of pure iron powders (a) and SiO<sub>2</sub>-coated iron powders (b)

300 nm。SiO<sub>2</sub> 包覆层具有优良的绝缘性，可以降低材料在交流磁场中的磁损耗。与瑞典 Höganäs 公司生产的 Somaloy 系列软磁复合材料产品相比，Fe/SiO<sub>2</sub> 复合软磁材料具有更低的磁损耗(如图 4<sup>[34]</sup>所示)，而且具有良

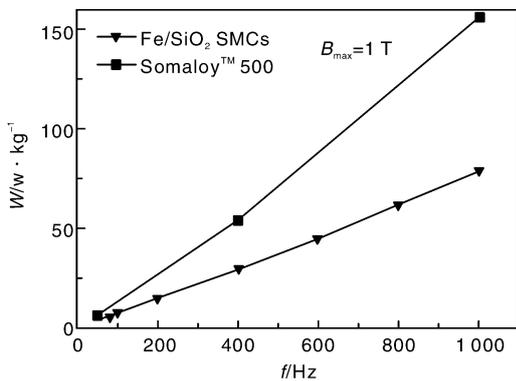


图 4 Fe/SiO<sub>2</sub> 和 Somaloy<sup>TM</sup> 500 软磁复合材料在外场为 1 T 时的总磁损耗 W 随频率 f 变化曲线  
Fig. 4 Magnetic loss versus frequency for compacted Fe/SiO<sub>2</sub> SMCs and Somaloy<sup>TM</sup> 500

好的频率特性(如图 5<sup>[34]</sup>所示)。在磁感应强度为 1 T 和频率为 50 Hz 时的磁损耗为 3.5 W/kg，低于硅钢相应的值，也低于 Fe/Fe<sub>3</sub>P 复合软磁材料相应的值。Fe/SiO<sub>2</sub> 复合软磁材料的饱和磁感应强度高达 18.2 kG，接近目前大量使用的大功率软磁材料硅钢的值。对具有理想界面结构的核壳复合软磁粉末，采用粉末压实成型工艺制备出高密度、高电阻率和高饱和磁感应强度的复合磁粉

芯，适用于大功率和高频的使用场合。

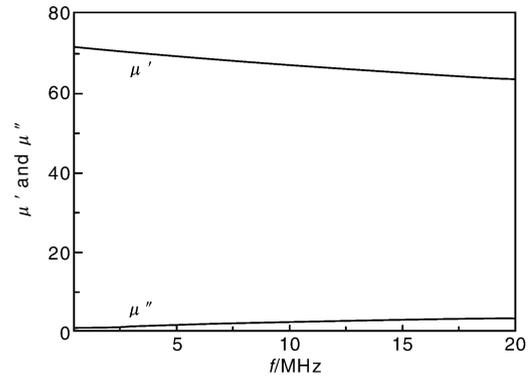


图 5 Fe/SiO<sub>2</sub> 软磁复合材料的磁导率谱  
Fig. 5 Complex permeability spectra of compacted Fe/SiO<sub>2</sub>

### 2.3 金属磁性颗粒 - 高电阻率纤维软磁复合材料

日本研究人员以高纯 Fe 粉和 C 粉为原料，采用球磨和氢退火工艺制备出 Fe-Fe<sub>3</sub>C(C) 基体纤维复合软磁材料，C 纤维极大提高了材料的电阻率，降低了材料的磁损耗，从而提高了材料的高频使用性能，在交流场合使用频率高达 26 GHz；但是，C 纤维也使得 Fe-Fe<sub>3</sub>C(C) 复合颗粒压实后，块状样品的密度降低，材料的磁导率极低<sup>[35]</sup>。北京航空航天大学于荣海研究组也较早开展了 FeCo-连续纤维(W, B 和 C 纤维)软磁复合材料的研究，该复合软磁材料具有良好的软磁性能：矫顽力在 159.2 A/m(2.0 Oe)左右，饱和磁化强度大于 2 T<sup>[36]</sup>。基体 - 纤维软磁复合材料的界面问题限制了材料的制备和实际应用。基体 - 纤维之间具有较低结合强度和较差的温度稳定性和抗氧化性；同时由于纤维的密度低，使得块体材料的压实密度不高，饱和磁感应强度和磁导率也低，因此，目前的基体 - 纤维软磁复合材料在软磁器件上的应用，有待进一步改善。

### 3 结 语

尽管目前所研究的一些颗粒包覆软磁复合材料，在一定程度上弥补了传统金属软磁材料和铁氧体软磁材料磁性性能上不足，具有重要的研究价值和潜在的应用前景，但是目前的研究结果与实际应用要求相差甚远。目前研究中存在的问题，主要有如下几个方面：(1)在降低软磁复合材料磁损耗的同时，难以保持较高的饱和磁感强度，并改善材料的磁导率；(2)缺少对软磁复合材料的高温性能和温度稳定性系统性研究；(3)软磁复合材料力学性能与磁性能相互关系有待进一步研究。针对上述问题，为了促进软磁复合材料研究和应用的发展，首先要改善或探索高效、简单且环保的材料制备工艺，获得高性能软磁复合材料。结合实验结果，通过理论研

究揭示软磁复合材料交流磁特性产生机制。探讨改善软磁复合材料制备工艺、界面结构和提高与性能相关的技术和物理问题。

### 参考文献 References

- [1] Rajmohan N, Szpunar J A, Hayakawa Y. A Role of Fractions of Mobile Grain Boundaries in Secondary Recrystallization of Fe-Si Steels[J]. *Acta Materialia*, 1999 (47): 2 999 - 3 008.
- [2] LoBue M, Sasso C, Basso V, et al. Power Losses and Magnetization Process in Fe-Si Non-Oriented Steels under Tensile and Compressive Stress[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2000 (215/216): 124 - 126.
- [3] Fischer O, Schneider J. Influence of Deformation Process on the Improvement of Non-Oriented Electrical Steel[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2003 (254 - 255): 302 - 306.
- [4] Chen C W. Metallurgy and Magnetic Properties of an Fe-Co-V Alloy [J]. *Journal of Applied Physics*, 1961 (32): 348S - 355S.
- [5] Kawahara K. Effect of Additive Elements on Cold Workability in FeCo alloys[J]. *Journal of Materials Science*, 1983 (18): 1 709 - 1 718.
- [6] Paterson J H, Devine R. Complex Permeability of Soft Magnetic Ferrite/Polyester Resin Composites at Frequencies Above 1 MHz [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1999 (196/197): 394 - 396.
- [7] Hultman L O, Jack A G. Soft Magnetic Composites-Materials and Applications[J]. *Electric Machines and Drives Conference, IEEE International*, 2003 (1): 516 - 522.
- [8] Enescu E, Lungu P, Marinescu S, et al. The Effect of Processing Conditions on Magnetic and Electric Properties of Composite Materials Used in Nonconventional Magnetic Circuits[J]. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2006 (8): 745 - 748.
- [9] Shokrollahi H, Janghorban K. Soft Magnetic Composite Materials (SMCs) [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007 (189): 1 - 12.
- [10] Hamler A, Gorican V, Sustarsic B, et al. The Use of Soft Magnetic Composite Materials in Synchronous Electric Motor [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2006 (304): e816 - e819.
- [11] Sadahiro K, Gotoh S, Uenosono S. *Soft Magnetic Materials of JFE Steel Group* [EB/OL]. (2005 - 10 - 01) [2012 - 05 - 24]. <http://www.jfe-steel.co.jp/en/research/report/006/02.html>
- [12] Andersson O, Hofecker P. *Advances in Soft Magnetic Composites-Materials and Applications* [EB/OL]. (2009 - 07 - 01) [2012 - 05 - 24]. <http://www.hoganas.com/en/News-Center/Published-Articles/Advances-in-Soft-Magnetic-Composites---Materials-and-Applications/>
- [13] Tanaka H, Nakanishi T. *Hybrid Accelerator Using an FFAG Injection Scheme* [EB/OL]. (2004 - 10 - 18) [2012 - 05 - 24]. [http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/c04/data/CYC2004\\_papers/19C6.pdf](http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/c04/data/CYC2004_papers/19C6.pdf)
- [14] Fingers R T, Kozlowski G. *Microstructure and Magnetic Properties of Fe-Co alloys* [J]. *Journal of Applied Physics*, 1997 (81): 4 110 - 4 111.
- [15] Fingers R T, Coate J E, Dowling N E. Creep Deformation of a Soft Magnetic Iron-cobalt Alloy [J]. *Journal of Applied Physics*, 1999 (85): 6 037 - 6 039.
- [16] Wohlfarth E P. *Ferromagnetic Materials-A Handbook on the Properties of Magnetically Ordered Substances* (铁磁材料 - 磁有序物质特性手册, 卷 II) [M]. Translated by Liu Zengmin et al (刘增民等译). Beijing: Electronic Industry Press, 1993: 51 - 52.
- [17] Yanagimoto K, Majima K, Sunada S, et al. Effect of Si and Al Content on Core Loss in Fe-Si-Al Powder Cores [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2004 (40): 1 691 - 1 693.
- [18] Zhao Shuisheng (赵永生), Long Yi (龙毅), Ye Rongchang (叶荣昌), et al. 绝缘剂用量对 FeSiAl 磁粉芯性能的影响 [C]//Editorial Board of This Proceeding. *The Sixth China National Conference on Functional Materials and Applications* (第六届中国功能材料及其应用学术会议论文集). Chongqing: Journal of Functional Materials, 2007: 1 007 - 1 009.
- [19] Qian Kunming (钱坤明), Ji Song (纪松), Wu Min (吴敏), et al. 绝缘剂材料对纳米晶软磁合金磁粉芯性能的影响 [J]. *Metallic Functional Materials* (金属功能材料), 2004, 11 (5): 10 - 12.
- [20] Kim Y B, Jang D H, Seok H K, et al. Fabrication of Fe-Si-B Based Amorphous Powder Cores by Cold Pressing and Their Magnetic Properties [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007(449/451): 389 - 393.
- [21] Wang Hongxia (王红霞), Tang Shuhuan (唐书环), Cui Jiayi (崔嘉义), et al. Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub>非晶粉末的钝化工艺对其磁粉芯性能的影响 [J]. *Metallic Functional Materials* (金属功能材料), 2010, 17 (2): 8 - 11.
- [22] Füzér J, Kollár P, Olekšáková D, et al. AC Magnetic Properties of the Bulk Fe-Ni and Fe-Ni-Mo Soft Magnetic Alloys Prepared by Warm Compaction [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009 (483): 557 - 559.
- [23] Wang Junqin (汪俊琴). 粉末颗粒对 Fe-Ni-Mo 磁粉芯性能的影响 [J]. *Powder Metallurgy Industry* (粉末冶金工业), 1998, 8 (4): 26 - 29.
- [24] Dobrzański L A, Drak M, Ziębowicz B. Materials with Specific Magnetic Properties [J]. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2006 (17): 37 - 40.
- [25] Zhao Y W, Zhang X K, Xiao J Q. Submicrometer Laminated Fe/SiO<sub>2</sub> Soft Magnetic Composites—An Effective Route to Materials for High-Frequency Applications [J]. *Advanced Materials*, 2005 (17): 915 - 918.
- [26] Uozumi G, Watanabe M, Nakayama R, et al. Properties of Soft Magnetic Composite with Evaporated MgO Insulation Coating for Low Iron Loss [J]. *Materials Science Forum*, 2007 (534 -

