

软磁复合材料研究进阶

Research of soft magnetic composite advanced

陈晖，李红兵

广东大比特资讯广告发展有限公司 广州 510630

摘要：随着电气设备小型化趋势，对各式微型粉芯的需求日益显著。为了研制出体积更小、重量更轻，能效更高的粉芯，开发新型软磁复合材料（SMC）成为当前一个热点。文章综述了 SMC 材料的制备工艺与研究进展、软磁复合材料性能和软磁复合材料应用；并对软磁复合材料在节能减排和新能源起的作用和潜在市场作了展望。

关键词：软磁材料，软磁复合材料，研究进展

中图分类号：TM27 文献标识码：A 文章编号：1606-7517(2015)02-8-117

1 引言

随着电气设备小型化趋势，对各式微型粉芯的需求日益显著。为了研制出体积更小、重量更轻、能效更高的粉芯，开发新型软磁复合材料（Soft Magnetic Composite，SMC）已成为当前一个热点。SMC 材料不仅能有效降低高频、涡流损耗，而且还结合粉末冶金技术的生产优势，在未来几年它将在航空、航天、电子、电工、能源和混合动力汽车、家用电器等领域得到广泛的应用。

本文对近几年来 SMC 材料的制备工艺与研究进展、软磁复合材料性能、软磁复合材料应用作了综述，并对软磁复合材料在节能减排和新能源起的作用和潜在市场作了展望。

2 软磁复合材料

生产铁粉基软磁材料时，为降低涡流损耗有两种常用方法^[1-3]。

(1) 一种是利用合金添加剂来提高材料电阻率，降低涡流损耗，如铁—硅合金（通常含 Si 3%）铁—磷合金（一般含 P 0.45%~0.75%），铁—镍合金（含铁 50%，含镍 50%）等。但这样降低了饱和磁感应强度，而且合金含量在商业使用上还有一定限度。这种方法适合应用于直流或较低频率交流装置。

(2) 另一种方法则是对磁性颗粒进行绝缘包覆处理，这就是软磁复合材料（Soft Magnetic Composite，SMC），其结构如图 1 所示。SMC 材料，有时也称“绝缘包覆铁粉”，是近

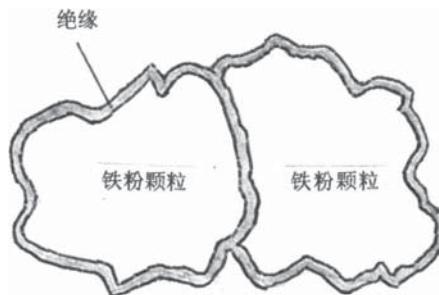


图1 SMC材料结构示意图

年来逐渐发展起来的一种新型铁基粉末软磁材料。它通常选用高纯铁粉的基材，经有机材料和无机材料绝缘包覆处理，利用粉末冶金技术使混合粉末成为各向同性的材料。

利用 SMC 材料生产各类磁芯具有许多突出的优点：

(1) 各向同性。这大大增加了设计自由度，单位重量可获得更大转矩以及更大铜的填充率，实现重量更轻，体积更小的目的。

(2) 利用粉末冶金技术能压制成为最终形状的产品，材料利用率提高，成本损耗降低，产品控制更精确，复杂形状加工能力更强。

此外，SMC 电机还能采用模块式结构，装卸方便，这使材料回收和再利用容易，十分有利于环保。

叠层硅钢片和软磁铁氧体是两类传统的铁芯材料。硅钢片在直流和交流较低频率时，具有高磁通密度和磁导率；但随着频率增加，涡流损耗急剧增加。铁氧体铁芯虽然高频磁性能优良，电阻率大，铁损低；但存在磁通密度低的

缺点。它们均在交流设备小型化过程中均遇到了困难。目前，利用粉末冶金技术生产 SMC 材料已成为当前研究和开发的热点。研究表明，如果 SMC 材料能同时满足高磁导率、高磁感应强度，低铁损的要求，将能弥补叠层硅钢片和铁氧体铁芯中，高频使用时性能的不足（如图 2）。

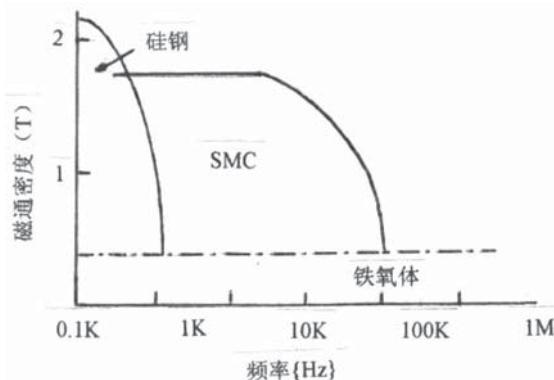


图2 各种软磁材料的最佳频率应用范围

3 软磁复合材料制备工艺与研究进展

3.1 SMC 材料制备工艺

SMC 材料制备工艺步骤^[1-4]：

(1) 原材料选择

以高纯度高压缩性的水雾化铁粉、海绵铁粉或铁基合金化粉末（含 Si、Ni、Al、Co 等元素）为原材料。

(2) 粉末绝缘包覆以及混合过程

使用有机或无机材料绝缘包覆铁粉，添加粘结剂、润滑剂等，使粉末充分混合。

(3) 成型压制

将混合好的粉末倒入刚性模具中进行单轴向压制，压制压力一般在 300~800 MPa（见图 3）。

(4) 热处理

温度一般控制在 400~700 °C 之间。

(5) 表面涂层或喷漆

制品通过喷漆或浸渍涂层来增加材料硬度，提高稳定性。

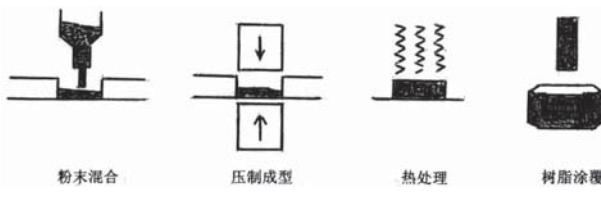


图3 SMC材料生产流程

3.2 铁粉的绝缘包覆技术

目前绝缘包覆主要以有机聚合物和无机氧化物为主。针对不同使用范围，最近几年国内外迅速开发了一系列 SMC 产品及绝缘包覆工艺。目前常用的 SMC 材料主要有：瑞典 Hoganas AB（赫格纳斯）公司的 Permite™75、ABM100.32、Somaloy™500 和 Somaloy™550，加拿大 Quebec 公司的 ATOMET EM-1，FLOMET EM-1 等^[1-5]。

根据绝缘包覆材料的不同，SMC 材料大概可以分为以下几类。

3.2.1 有机绝缘包覆铁粉

采用有机聚合物作为绝缘包覆材料已经商品化。

(1) 20 世纪 90 年代初，人们将有机树脂包覆的铁磁粉末作为铁芯的原材料，用在中频至高频的电磁转化装置中。这类材料是由铁粉和树脂组成，有时还添加少量润滑剂；在压制 - 热处理过程中实现铁粉的绝缘包覆。

(2) 20 世纪末，日本利用酚醛树脂和环氧树脂作为粘结剂，直接生产出压粉磁芯。

2000 年加拿大 Quebec 公司指出，只要运用高纯度、高压缩性的水雾化铁粉，这类铁—树脂 SMC 材料也可应用在较低频率的场合。

2005 年，日本 JFE 公司研发了铁—树脂混合粉末并投入生产，这种 SMC 材料是以粒度约为 100 μm 的纯铁型还原铁粉为基本原料的。

(3) 虽然有机树脂包覆层可以使压坯具有高电阻率，降低涡流损失，但其综合性能却不足以使其取代传统硅钢片在铁芯材料中的地位。a) 由于掺入了大量绝缘树脂，单位体积内磁性颗粒含量降低，直流磁通密度低。b) 另一方面，树脂的性质又限制了坯体的热处理温度。即使采取聚酰亚胺和聚苯并咪唑等高温聚合物来绝缘包覆铁粉，热处理温度仍不能高于 400 °C。c) 此外，由于绝缘包覆层耐热性能差，材料在 200 °C 时机械强度也将显著降低。

(4) 由于早期这种铁—树脂 SMC 具有上述缺点，人们希望找到一种耐热性能好且高温机械强度高有机聚合物来改进材料性能。

日本住友电工 (Sumitomo) 公司开发了新型树脂粘结剂的 SMC 材料“FM-CM”，它在添加少量树脂的前提下，压坯密度高，高频磁性能优良 ($B_{8000}=1.5$ Tesla) 和耐热性高 ($\sigma_{473K}=120$ MPa)。

3.2.2 多组分介电材料包覆铁粉

为了弥补铁—树脂 SMC 材料热处理温度低，高温机械强度低等不足，人们开始尝试将铁粉与多组分介电材料复合，希望在不影响电阻率的前提下，尽可能减少树脂的添加量。

(1) I.Chicinas 等在铁粉和有机聚合物外，还添加少量硅烷和碳酸钙微粉。

(2) 美国近年来，除铁磁粉末，树脂，润滑剂外，这些粉末还加入了一些无机氧化物 (SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 ZrO_2)，碳化物 (AlC、TiC) 以及氮化物 (AIN、TiN) 作为介电材料。也有数项专利涉及用在变压器、电感器以及电机等电气装置中的铁粉芯。

3.2.3 无机—有机结合绝缘包覆铁粉

(1) 现已开发成功在磁性粉末表面直接涂覆绝缘膜的技术，其中铁粉颗粒双层涂覆法是在铁粉表面先涂以 10~100 μm 厚的极薄磷酸盐覆盖膜，然后只需添加极少量的树脂，即可在压制和热处理过程中实现树脂的绝缘包覆，最终获得高绝缘性和高磁特性的软磁材料。这项技术不但提高了压坯密度，增强了绝缘包覆层的热稳定性，而且实验证明，磷酸盐涂层对铁粉表面氧化还起到一定抑制作用。

(2) Hoganas AB 公司发明的 SMC 材料“SomaloyTM500”，“SomaloyTM550”及其商业化的磷酸盐绝缘包覆技术代表了国际先进水平。这类材料不仅有效降低涡流损耗，而且具有较好的磁学性能和机械性能。近来很多研究都以 SomaloyTM 系列 SMC 粉末为原料来研究不同制备工艺对 SMC 铁芯各种性能的影响。

这类 SMC 铁芯具有高机械强度、高磁通密度，中低频低铁损的性能；但当频率在 1kHz 时，其铁损是传统叠层硅钢片（片层厚度 0.35mm）的 2~3 倍。

(3) 针对高频应用领域，T.MAEDA 等尝试改进了无机绝缘包覆铁粉与树脂的混合方法。他们在压制之前，先将树脂用湿法涂覆在有无机绝缘层的铁粉上（如图 4）。这种改进不但使热处理温度提高了近 150 $^{\circ}\text{C}$ ，而且在高于 300Hz 使用时，铁损也很低。

(4) 这类无机—有机结合的 SMC 材料热处理温度比单纯有机包覆的材料高；在电阻率不受影响的前提下，它实现减少树脂添加量，提高压坯密度的目的。然而，由于原材料中仍含有有机组分，热处理温度依然受限制。Hoganas

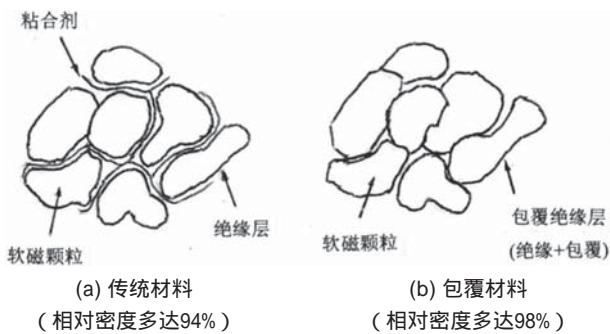


图4 传统手法与新型湿法包覆树脂的SMC材料的结构

AB 公司生产的 SomaloyTM500 的最高推荐热处理温度在 500 $^{\circ}\text{C}$ 范围，否则绝缘性将急剧恶化。

(5) 在中南大学邹联隆等也曾用化学溶液包覆法制造纯铁磁粉芯，其无机绝缘包覆层是含有 Cr、P 等元素的玻璃相结构。绝缘包覆处理后，粉末加入适量硬脂酸锌或硬脂酸钙作润滑剂，模压成型。经测定，这种 SMC 材料包覆层具有很高电阻率，且能耐很高的热处理温度 550 $^{\circ}\text{C}$ ，能够有效地降低损耗。

3.2.4 无机氧化物包覆 SMC 材料

有机物作为绝缘包覆层材料，虽然具有优良的绝缘性能，但它热处理温度不高缺点限制了 SMC 材料性能的进一步提高。

为继续提高热处理温度，以无机氧化物为绝缘包覆材料已成为目前研究重点。

(1) A.Moorhead 等将部分稳定氧化锆微粉与铁粉共混，采用热压工艺在 1200 $^{\circ}\text{C}$ 制造出 SMC 材料，但这种方法成本高，并且难以制造出形状复杂的产品，使得 SMC 作为电极材料的优势大打折扣。同时微细的陶瓷粉不能在铁粉表面形成连续的包覆层，涡流损失将增大。

(2) K.Anand 等研究了以有机金属化合物作前驱体包覆铁粉的途径，但随后的高温热处理使得包覆层疏松，空隙率增大，导致结合强度减弱，使得 SMC 材料力学性能不能符合使用要求。同时空隙率增大也导致磁性能的下降。

(3) Hanejko 等采用以无机层和聚合物层双层包覆方法制备 SMC 材料，但同样无法避免聚合物的分解，因而并不能改善 SMC 材料的综合性能。

(4) 欧共体第五框架计划的 SMC 材料研究项目 (GIRD-CT-2001-00538) 中采用了溶胶—凝胶工艺在铁粉表面涂覆

氧化硅层，类似地工作有 Y.Zhao 等的研究。但试验发现薄的涂层对铁粉的湿润性不佳，而过厚的涂层使 SMC 材料密度下降，磁性能变差。

3.3 压制成型

目前，SMC 材料成型工艺仍以常规压制为主，混合粉末在缓慢速度下单一轴压制成型。在压制过程中，颗粒主要沿压力作用方向移动，发生重排、变形、断裂，以及颗粒表面间的冷焊。颗粒间以及颗粒与模型间的摩擦力阻碍颗粒大量移动，最终发生变形。塑性变形导致加工硬化，从而消弱了在适当压力下颗粒进一步变形的可能性^[1-4]。

对于不同粉末，压缩性不同，但压坯密度随压制压力增加的变化趋势基本相似。图 5 是一种铁—树脂 SMC 材料压制压力与压坯密度的关系。显然，增大压力，将有利于提高压坯密度。

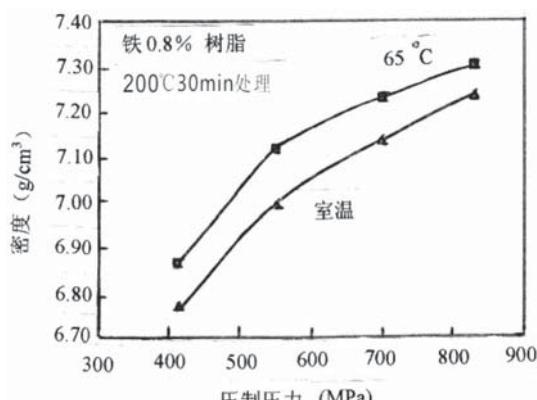


图 5 压制压力与压坯密度的关系

此外，为了进一步提高压坯密度，人们引入了许多粉末冶金新工艺，如温压成型法、二次重复成型、多步成型法，金属模润滑成型法等。虽然这些新工艺新方法比传统压制更能提升坯体密实程度，但目前由于成本太高，并不适合商业化大批量生产。

3.4 热处理

(1) 在压制过程中，提高成型压力将势必导致铁晶粒内部位错密度的大幅增加，产生加工硬化，限制了 SMC 磁性能进一步提高。图 6 中不同绝缘包覆材料的 SMC 在一次加压与循环加压两种条件下，表面硬度均随成型压力增加而增大，而硬度的变化也反映了加工硬化程度。坯体内部大量位错阻碍磁畴运动，使得矫顽力和磁滞损失增加^[1-4]。

对坯体进行热处理可以降低位错密度，通过晶粒的

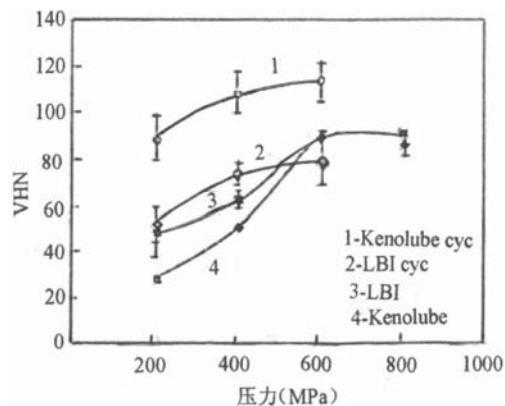
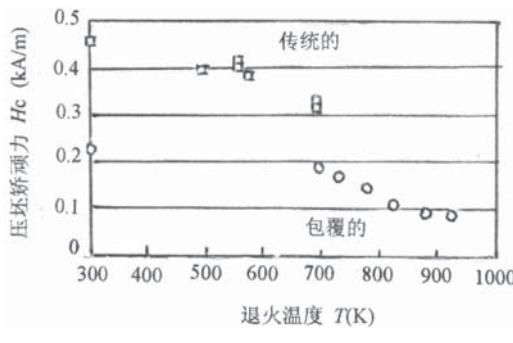


图 6 不同成型压力下 SMC 材料的维氏硬度

再结晶减少位错，从而减小矫顽力，降低磁带损耗。从图 7(a) 中，两种 SMC 材料热处理温度与矫顽力的关系说明，热处理温度越高越能有效地降低矫顽力。I.GILBERT 等指出，在 SMC 材料的制备过程中，对热处理过程的控制比压制过程更重要。

(2) 另一方面，热处理过程又会影响 SMC 材料电学性能，如图 7(b) 所示。温度升高至中温，电阻率会随表面碳



(a) 压坯矫顽力

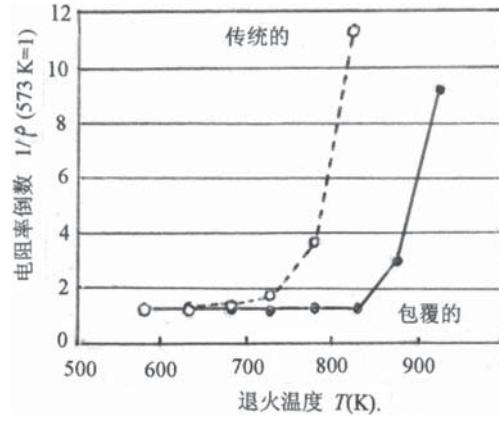


图 7 两种 SMC 材料矫顽力、电阻率与退火温度的关系

元素向颗粒内扩散而下降，这时如果能合理控制氧化程度，表面的氧化层会阻止杂质扩散，保持材料的电阻率稳定。继续升高热处理温度，当超过绝缘层耐热极限时，电阻率骤降，这将引起涡流损失剧增。除了绝缘包覆层耐热能力除了受包覆材料性质决定外，铁粉表面氧化带来的体积变化又会促使绝缘包覆层在高温失效。所以，如何控制表面氧化程度成为热处理中一个重要课题，人们希望颗粒表面的氧化层既能稳定甚至增加电阻率，又不破坏绝缘包覆层。

(3) 有研究指出，为了能显著改善材料磁性能必须使热处理温度高于 500^oC。但这都是以绝缘包覆层的热稳定性为前提的。只有颗粒表面绝缘层完好，才能保证材料具有高电阻率。在不影响涡流损耗的前提下，进一步通过提高热处理温度来降低 SMC 铁芯总损耗才可行。

4 软磁复合材料性能

4.1 影响软磁复合材料性能的因素

SMC 材料为电气设备设计和制造带来巨大改进，但这种材料在性能方面存在磁导率低，磁滞损耗大，机械强度低等不足。影响 SMC 材料性能的因素主要有两个方面^[1~4]：

(1) 原材料性质。比如铁粉的化学组成、颗粒形状、粒度分布、绝缘包覆材料的性质及包覆工艺，粘结剂与润滑剂的性质与添加量等等，这些都是决定 SMC 材料性能好坏的前提。

(2) 制备铁粉芯工艺流程中的加工条件。比如成型压力，加压模式（单一压制 / 循环加压，常温压制 / 温压）；退火时炉内气氛，退火温度，保持时间等等，这些都会不同程度影响 SMC 压坯密度和结构，电学性能，磁学性能，决定 SMC 电机是否能满足使用要求。

SMC 材料的具体性能参数随原料组成和加工过程条件变化而变化，其变化趋势见表 1。

4.2 软磁复合材料性能

4.2.1 压坯密度

(1) 压坯密度是决定 SMC 铁芯性能优劣的一个重要参数。区别于第一代粉末冶金烧结软磁材料，SMC 材料由于包覆层耐热性能有限，在生产过程中没有烧结过程。这就对压制过程提出了更高的要求，即需要达到更高致密化程度。由于目前生产条件有限，在原材料一定的情况下，要想提高压坯密度主要还是通过进一步增大成型压力来实现^[1~4]。

表 1 材料性能参数随原材料组成和加工过程变化趋势

项目					
	增大材料直径	添加润滑剂	添加树脂	增加压制压力	热处理
磁导率					
最大磁通密度					
矫顽力	—	—			
电阻率					
热导率					
机械强度				或 a	

注 :a 添加树脂粘结剂 200^oC 时机械强度随树脂恶化而降低；未添加粘结剂和润滑剂的材料，强度随温度升高而单调增加。

(2) 在铁—树脂 SMC 材料中，为了保证压坯高密度，混合粉里树脂和润滑剂含量都必须尽可能少。

E.Enescu 等通过实验证实，树脂用量愈少，坯体密度愈高，但此时电阻率较低；反之，坯体密度低，而机械强度和高频性能都得到了改善。为此，人们一直都在寻找能尽量减少树脂和润滑剂添加量，却又保证较高电阻率和机械性能的方法。

Jack Hamill 等在 2001 年欧洲粉末冶金会议上提出，可以使铁粉表面氧化来增加电阻率；他们还将铁粉—树脂复合材料与 Na—Fe—B 永磁材料结合来解决上述问题的方法。

4.2.2 磁学性能

(1) 与硬磁材料相比，软磁材料具有易磁化，易消磁的特点，即具有高磁导率，高饱和磁感应强度，低剩磁和低矫顽力等。如果在电机等电磁转换装置中使用软磁特性优良的材料，就可实现高能效的目的。提高 SMC 材料磁性能的核心在于通过提高压坯密度来增加磁感应强度；通过控制原材料性质，包覆层性质及制造工艺来降低磁性部件总损耗，即降低涡流损耗和磁滞损耗^[1,3]。

(2) 增加压坯密度，可以有效提高材料磁性能。从图 8 的 B-H 曲线可以看出，密度越大，材料磁化越容易。由于密度增加，坯体内气隙体积减小，材料磁导率自然也就提高。如图 9 所示，压坯密度增加还有利于提高材料磁感应性能，由于铁的理论密度是 7.87g/cm³，所以通过提高密度以改善磁性能仍有空间。

(3) 铁粉作为主要原料之一，其颗粒尺寸、形状、化学组成、杂质含量等都会显著影响 SMC 产品磁性能。比如硫、磷等杂质通过钉扎效应使位错难以移动和消除，影响磁畴的运动，导致矫顽力显著增加。此外，在粉末生产与

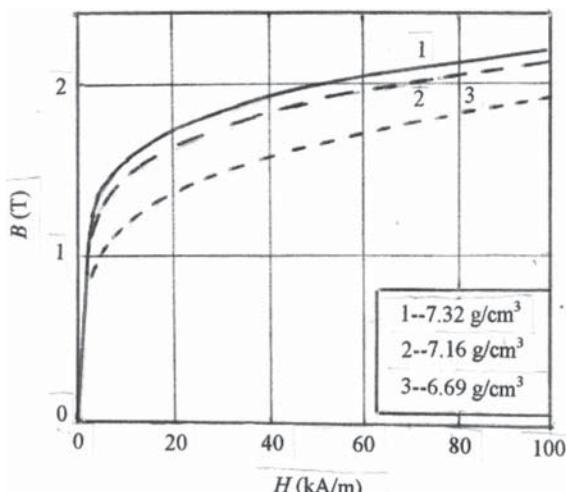


图8 不同压力下Somaloy500的磁化曲线

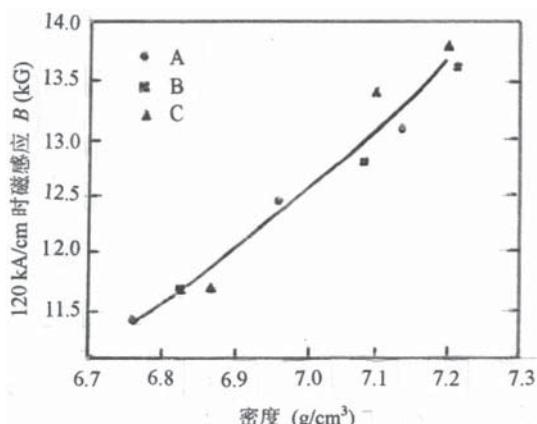


图9 三种SMCs不同密度时的磁感应强度

压制过程中，材料内部产生大量残余应力，导致矫顽力增大，磁滞损耗增加。而 SMC 材料压坯内存在大量气隙和缺陷也使材料磁导率降低。为了部分恢复材料磁性能，在生产中通常采用降低 SMC 材料绝缘层厚度，增加压坯密度，对坯体进行热处理等手段。

4.2.3 铁损与机械性能

(1) 铁芯总损耗

铁芯损耗 (W) 主要由磁滞损耗 (W_h) 和涡流损耗 (W_e) 组成：^[1-4]

$$W = W_h + W_e = k_1 B^{1.6} f + k_2 B^2 t^2 f^2 / \rho \quad (1)$$

式中： k_1, k_2 - 系数， f - 频率， ρ - 铁芯相对电阻， B - 磁通密度， t - 铁芯片层厚度。

磁滞损耗 (W_h) 与材料的组成，结构等性质有关，受频率影响较小；涡流损耗 (W_e) 与频率的二次方成正比，与材

料的相对电阻率成反比。所以为了降低高频涡流损耗，就必须增大材料电阻率。

(2) 机械强度

SMC 材料机械强度低是其主要缺点之一。当用作高速转子或在高频领域使用时，材料必须具有足够的机械强度。在过去的研究中，一般用横向断裂强度来衡量压坯机性能。

铁—树脂—SMC 材料的机械性能主要与树脂类型及添加量有关。一般采用热固性树脂，含量高，机械性能较好；但由于树脂本身耐热性差，随着温度升高，强度将显著降低。在交流设备中，高频运转的部件常会遇到发热的问题，所以选择具有一定高温机械强度的绝缘包覆材料非常必要。另外，在 SMC 制品生产过程中，还可通过表面涂层或喷漆等手段来增加制品机械性能^[1-4]。

5 软磁复合材料应用

5.1 软磁复合材料的优点

(1) Moganos 公司 SMC 材料产品 Somaly 和烧结软磁相比，最大的优点是很高的电阻率，它是纯铁的 500 到 10^5 倍^[6]，(见表 2)。

表 2 SMC 材料产品 Somaly 和烧结软磁的电阻率比较

材料	电阻率(μm)
烧结铁	0.1
烧结Fe+0.45%P	0.2
烧结铁氧体	0.6
Somaloy 5001P	70
Somaloy 7001P	400
Somaloy 110i	10000

(2) Somaloy 和传统的铁粉心相比，最大的优点是高的磁导率和低缺损。

(3) 和硅钢相比，最大优点三维(3D)磁路和高频下的低铁损，换句话说频率稳定性好，使用频率范围广。

(4) 它还有粉末冶金工艺提供的三维 3D 成型技术，部件精度高，平滑表面和达到 95~98% 以上的材料利用率。如图 10 所示。

由于这些特点，它能通过新布局的 3D 磁通路线，较小的绕组线圈体积和内部装置构件，使我们的产品结构紧凑和降低重量。

它能提供具有快速瞬态响应，快速、精确的驱动和大

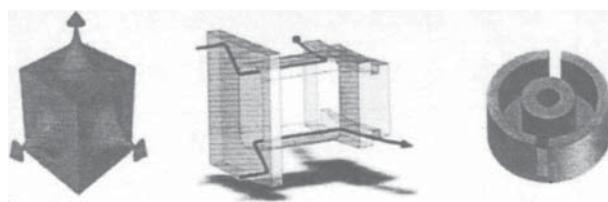


图10 3D磁通路线示意图和内置线圈产品图

力矩的高性能产品。它还能通过降低铜和永磁体的成本，简化组装和降低系统成本来降低产品的最终成本。

5.2 软磁复合材料应用

5.2.1 MAC 材料应用于电机

MAC 材料生产具有复杂形状和磁路，或在较高频率下工作的电机更具有绝对优势。这些电机包括：直交流两用电机、爪极电机、横向磁场电机、轴向磁场电机、交流换向电机、同步电机、异步电机等^[1~2,6~8]。

在汽车行业内，电动机正朝着体积更小、重量更轻的趋势发展。

日本 Aisin Seiki 公司提出了极为紧凑小巧的设计方案，已将新型 SMC 材料制造的 ABS 油泵制动伺服电动机投入生产，电动机的长度比以前要短 36%，重量轻 17%。这是用 SMC 材料生产的电动机首次被应用于日本汽车制造行业中，开辟了 SMC 材料应用的新领域（见图 11）。

此外，德国 Robert Bosch、Vacuumsh meltze，瑞士 Asea Brown Boveri，加拿大 Quebec，瑞典 Hoganas，日本 Sumitomo，美国 Burgeas Norton，Hoeganaes 等公司都正在大力进行 SMC 材料和电机的研发。

5.2.2 应用于快速驱动和脉冲变压器

SMC 材料作为快速切换器的磁性部件，已经被用于柴油发动机的燃油喷射器。该技术正在扩散到其他燃料，如



图11 SMC材料生产的电动机（前）与硅钢电机的比较

汽油 / 液化石油，天然气等^[1~2,6]。

Bosch 公司的共轨柴油喷射系统，该产品的激励器采用了 SMC 材料复杂的成型技术。a) 高密度的 SMC 铁芯，可生产较大的作用力及精确的高速阀动。b) 快速瞬态响应，SMC 技术非常适用于快速切换的制动器。c) SMC 材料的高饱和可获得高驱动力。

在汽车发动机的点火系统中，SMC 被用作脉冲变压器的铁芯，能提高燃料的利用率和降低废气的排放。

5.2.3 可用于电子产品

SMC 材料采用无机绝缘镀层，使热处理温度超过 500℃，最新的研发 SMC 材料其热处理温度可高达 650℃，这些产品具有较低的铁损。

另外，无机绝缘镀层很薄 10~100nm，基粉具有很好的压缩性，SMC 材料密度可达到 7.5g/cm³，这种软磁粉芯的饱和磁通密度比传统软磁粉芯更高。可用于各种电子产品^[1~2,6]。

除电机外，SMC 材料还可以广泛应用于工频至高频的变压器、传感器、扼流圈、噪音过滤器、燃油喷射器等装置中。

6 软磁复合材料在节能减排和新能源起的作用和潜在市场

6.1 使用永磁直流电机代替固定分相电容式交流电机

现代经济的主要能源消耗之一是用于电机，例如电机用掉了美国国内生产用电量的 63%~70%，占美国电能消耗量的 23%。而许多电机的效率是甚至还不到 50%，所以提高电机的效率是行之有效的节能措施。另一方面电机的软磁材料的用量超过 800 万 t^[6]。

提高电机的效率一个例子是通过使用永磁直流(PMDC) 电机代替固定分相电容式(PSC) 交流电机。高性能铁基软磁复合材料特别适合于永磁直流电机。独特的 SMC 材料，独特的设计理念和简单的生产成本和工艺的有机结合，使该电机具有重量轻小，更高的效率(> 88%)，高性能(扭矩大)，节省昂贵材料(永磁、铜材)等优点(见图 12)。

6.2 使用变频器

另一种提高电机效率的办法是使用变频器(VFD)。使用变频器将 115V 或 230V 的单相输入电压转换为频率从

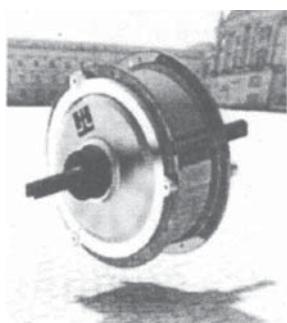


图12 Hoganas设计的永磁直流(PMDC)电机

0~120Hz 可调的 230V 三相输出，作为三相电机的电源。据美国能源部估计，使用 VFD 来控制速率，所节省的能源将高达电机总耗电量的 18%。在电扇、鼓风机以及抽吸应用中。VFD 可以节省大量的能源^[5]。

根据 ARC Advisory Group 的数据，在 2012 年小功率 VFD 的全球市场总值到 110 亿美元。

变频器需要有高性能软磁材料制造的电感器，其工作频率在 kHz 到数十 kHz。十年内这种应用需要将超过每年 20 万 t。

6.3 直流变压器（直流直流变换器）

汽车是二氧化碳排放的一个主要来源。电动汽车或电油混合动力汽车是降低汽车二氧化碳排放的有效途径。电动汽车或电油混合动力汽车都需要直流变压器（直流直流转换器），这种直流变压器需要高性能的电感器（见图 13）^[6]。

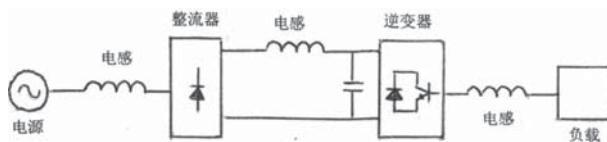


图13 EV或HEV的直流变压器

每辆汽车的这种电感器需要 1kg 以上的高性能软磁材料。其工作频率在 10~50kHz，磁性材料必须具备高的磁感应强度和低的铁损的特点。估计这种应用到 2020 年需要高性能软磁材料达 10 万 t 以上。

6.4 可再生能源

2040~2050 年全球可再生能源将成为主要的能源之一。风能作为一种天然能源，蕴藏量丰富，永不枯竭，清洁无污染，可开发利用而受到青睐。最近五年世界风力涡轮发电机市场平均每年以 30% 多的速度增长，风能在发电中已经开始占据

越来越重要的作用。太阳能以其储量的“无限性”、存在的普遍性、开发利用的清洁性等优势，是理想的替代能源^[6]。

风能或太阳能，这些分布或发电集成到电网中，需要高质量的电力电子产品来保证质量，如图 14 所示。

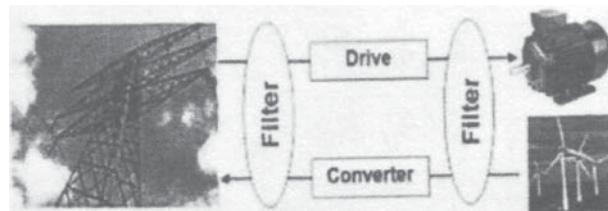


图14 风力发电电源滤波系统

这些电力电子产品都需要电感器。太阳能发电的电源滤波系统到 2020 年需要 10~30 万 t 高性能软磁材料，其工作频率在 10~50kHz。软磁材料在这样的频率范围内必须具有低能耗低噪声的优点。

2009 年风力发电电源滤波系统的软磁材料用量达 6000t，估计到 2015 年的用量将达到 15000t。这种应用的工作频率在 2~10kHz。

最后指出，无论 是粉末的生产，还是铁粉芯的生产，其能耗都是很低的。粉末冶金工艺还具 95% 以上的材料利用率，以及产品回收时的铜铁很容易分离等特点都符合节能减排和环境保护的要求。

参考文献

- [1] 杨白, 张蕾, 李嵘峰, 于荣海. 颗粒包覆软磁复合材料制备和电磁特性研究进展. 中国材料进展. V01、31, No. 7, Jul、2012 年, p. 10~15
- [2] <http://docin.com/p-112560348.html>
- [3] 田建军, 崔建民, 袁勇, 张德金, 李霆, 于永亮. 绝缘铁粉基软磁复合材料的研究进展. 金属功能材料, V01.17, No. 4, 2010, p. 50~54
- [4] 杨钰婷, 张深根, 田建军, 崔建民, 袁勇. 磷酸包覆铁粉基软磁复合材料的制备和性能研究. 功能材料, 2010 年论文集, 249~251 页
- [5] 刘菲菲, BAKER. A. P., 翁履谦, 宋申华. 铁粉基软磁复合材料绝缘包覆层的研究. 材料开发与应用. 第 22 卷第 5 期, 11~15 页, 2007 年 10 月
- [6] 叶舟, 王昊. 高性能铁基软磁复合材料(SMC)在低碳经济中的应用. <http://www.doc88.com/p-296946342390.html>
- [7] 黄允凯, 朱建国, 胡虔生. 软磁复合材料在电机中的应用. 微特电机, 2006 年 11 期, P. 1~3, 8
- [8] 窦一平, 郭有光, 朱建国. 软磁复合材料在电机中的应用. 电工技术学报. Vol. 22, No. 11, 2007, 46~51