

软磁复合材料发展的潜力与应用

Potential and application of soft magnetic composites

李红兵, 陈晖

大比特(香港)资讯出版有限公司, 广州 510660

摘要: 本文介绍了铁基软磁复合材料(SMC)技术, 特性与优点, 具体介绍了为不同应用而研发的SMC产品, 这些应用有如电机, 快速驱动或脉冲变压器及电力电子等。

关键词: 软磁复合材料, 发展, 潜力, 应用

1 引言

通过将铁粉包覆使其具有绝缘颗粒表面, 成功地制造出软磁复合材料(SMC)。SMC材料受益于它的一系列不同性能, 并不在于单个性能水平。利用三维磁路(在铁芯结构所有方向上磁导率不变)的可能性, 开辟了新的前程, 特别是在永磁电机的设计上。设计与制造的SMC制品具有光滑的弯曲部分与很高的表面质量。SMC粉末技术也可用于提高制造的一体化水平, 铁芯与线圈可一次组装, 无需在复杂铁芯结构上绕线。基于SMC构思发现新的设计, 目标是在某些应用上取代叠层硅钢材料, 用于与叠层硅钢材料相结合的特殊部件。

2 软磁复合材料

SMC材料(软磁复合材料)基本上是包覆绝缘层的铁粉颗粒, 见图1所示。

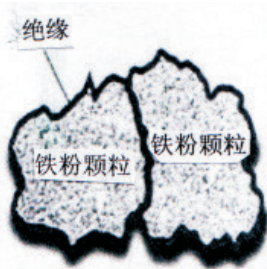


图1 SMC材料示意图

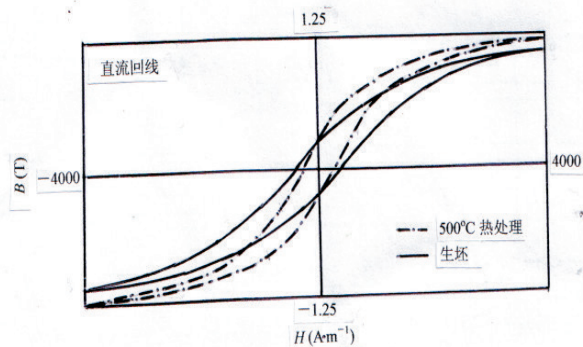
最终部件的电磁与力学性能不仅取决于粉末SMC, 也取决于混合粉, 即添加的润滑剂或润滑剂/粘结剂, 以及工艺, 如冷压或温压。混合粉的种类也支配最高热处理温度。表1示出SMC材料Somaloy 500所用的几种不同的生产途

径。通常的经验法则是, 减少添加剂与提高热处理温度将提高磁性能, 但也导致强度的降低。

表1 SMC材料Somaloy 500的各种工艺

粉末	预混合	工艺	
Somaloy 500	润滑剂: 0.5% Kenolube	800MPa 压制 500°C 固化	
	润滑粘结剂: 0.6% LB1	800MPa 传统压制 275°C 固化	
	润滑粘结剂: 0.6% LB1	800MPa, 250°C 温压 275°C 固化	
	润滑剂+粘结剂: 0.5% Kenolube+0.5%B1	800MPa 压制 275°C 固化	

添加剂数量低, 可使混合粉压制得到高的密度, 这对磁性是有利的。在压制过程中, 颗粒中产生应力, 会损害软磁性能。热处理温度越高则消除应力的程度越高。但关键是, 颗粒间不能发生烧结, 因为涡流损耗会随着频率而迅速增大。Somaloy500粉末的最高推荐固化温度是500°C, 固化30min。图2示出生坯与热处理Somaloy 500试样的



Somaloy 500 + 0.5% 润滑剂, 7.38 g/cm³

图2 SMC热处理磁滞曲线的影响

目前,常用的 SMC 材料有瑞典 Hogan 公司的 Somaloy 500、Somaloy 700,加拿大 Quebec 公司的 Atomet EM-1,海美格磁石技术(深圳)有限公司的 HM-S4。

3 软磁复合材料的优点

(1) Hogan 公司 SMC 材料产品 Somaloy 和烧结软磁相比,最大优点是有很高的电阻率,它是纯铁的 500 到 10^5 倍(见表 2)。

表 2 SMC 材料产品 Somaloy 和烧结软磁的电阻率比较

材料	电阻率($\mu\Omega\text{m}$)
烧结铁	0.1
烧结 Fe+0.45% P	0.2
烧结铁氧体	0.6
Somaloy 500 1P	70
Somaloy 700 1P	400
Somaloy 110 i	10000

(2) SMC 和传统的铁粉芯相比,最大的优点是高的磁导率和低的铁损。

(3) 各硅钢相比,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 3 所示。

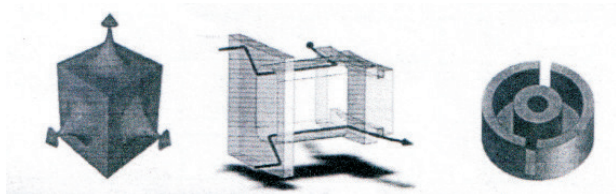


图 3 3D 磁通路线示意图和内置线圈产品图

由于这些特点,它能够通过新布局的 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。

4 SMC 材料发展潜力与局限

4.1 强度

由于 SMC 材料不能烧结,故强度低于叠层硅钢的或烧结的部件。

旋转电机所需强度随转子尺寸与速度而变化。一般来

说:转子齿受旋转的力和定子的磁拉力。定子受同样的磁拉力但不受旋转的力。相对小的马达,不在高速转动,不受很大的力。制造工艺,如绕线或组装,很可能有强度要求。

相对高的横向断裂强度是可以达到的,取决于表 1 所示的生产工艺。用含润滑粘结剂 LB1 混合粉制造的部件,横向断裂强度的 100MPa,而含润滑剂 Kenolube 混合粉所制件的横向断裂强度则约 50MPa。

实际上,与叠层硅钢件相比,粉末制造的这种力学性能是一个优点。回收时,将部件压碎,用磁选即可简便地将铜绕组与铁分开。

4.2 三维磁通与光滑表面

(1) 为成功设计 SMC 部件,必须利用独特的各向同性磁性能。因为磁通的移动在三维是一样的,故可以高度灵活地将材料用到最需要的地方。

例如,叠层硅钢制造的齿块在整个横截面上具有相同的轴向长度。SMC 压制的部件,铁心基板,齿体与齿端有不同的轴向长度。这就意味着易于利用集中磁通设计或腾出绕组的空间。也可用各向同性性能开发具有径向和轴向磁通的全新设计,实际上这是不可能用叠层硅钢来制造的。

(2) 为产生所需磁通,铜绕组必须围绕给定的横截面积绕制。横截面越圆,所需铜绕组越少。用粉末冶金技术可压制多台阶部件,横截面至少是半圆形的。导线体积减少是粉末材料最重要的优点,因为可以达到节省铜,降低绕组的铜损耗(I^2R)。具有部分半圆形横截面的部件用叠层硅钢是难以制造的。

(3) 另一个优点是压制件的平滑表面。

叠层硅钢经常有尖锐的边棱,为保护绕组需要坚韧而厚实的绝缘层。绝缘层占用有价值的空间,起热障作用,降低了热传导率。

4.3 尺寸和精密公差

压机的压力限制压制件的尺寸。达到高的磁性能需要高密度,因而在一些场合有必要将软磁件分成几块。可是,分块常是最终组装的一个优点,因为可以采用简化的绕线法。这可以提高每单位体积铜的填充系数,提高电机性能,因为可降低热阻率和端绕组。

粉末冶金件可以制造,而且具有精密公差。这是很重要的,因为不想加工而且部件间的间隙可提高磁路的磁阻。

4.4 磁导率

与叠层硅钢材料平面方面的性能相比, SMC 材料的相对磁导率要低得多。

图 4 示出 SMC 的 Somaloy500 与 Transil315(3%Si 叠层钢) 磁导率对施加磁化场的变化曲线。叠层硅钢的最大相对磁导率是 Somaloy 的 10 倍之多。在 SMC 部件中, 磁通必须通过像包覆层与孔隙等非磁性材料, 因而降低了试样的磁导率。也因这同样的原因, 故垂直于叠层硅钢片(2 方向) 的磁导率比 Somaloy 为差, 这就意味着粉末部件的主要目标应该是在最大磁导率不甚重要的应用方面。

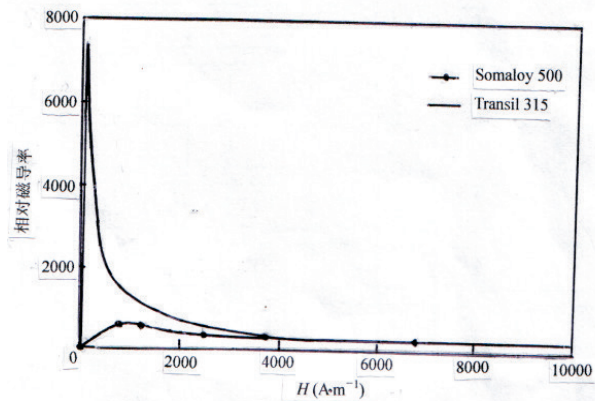


图 4 SMC 的 Somaloy 500 与 Transil 315(叠层钢) 的相对磁导率

在永磁电机中, 永磁体可以看作是有效气隙。磁路磁导率由有效气隙支配, 因此较磁材料的磁导率不太重要。另一类最大磁导率不太重要的电机是交直流两用马达。这些电机是很强的电与磁驱动, 因而最大磁导率不太重要, 因为这出现在弱场中。强场中的磁感应强度或磁导率仍然是很重要的, 不过叠层硅钢与相对高密度 SMC 部件在强场中的差别是不大的。

感应电机具有很小的气隙, 需要高磁导率以保持低的磁化电流。软磁材料的磁阻会影响磁路磁导率, 因此感应电机是用粉末制取部件最困难的机型之一。重新设计软磁部件仍能得到一些好处。进一步设计开发以及提高磁导率的新材料会大大改进电机性能。

4.5 磁感应强度

磁饱和取决于材料本身的纯度与密度。在较弱的磁场中, 磁感应强度也取决于显微结构(磁导率), 如图 5 所看到的, 磁场越强, 磁饱和程度变得越重要。可是, 大多数电机低于磁饱和运行, 且由于磁导率较低, 故 SMC 部件的磁感强度是较低的。在设计时可在关键区域用较多的铁心材料来加以补偿。

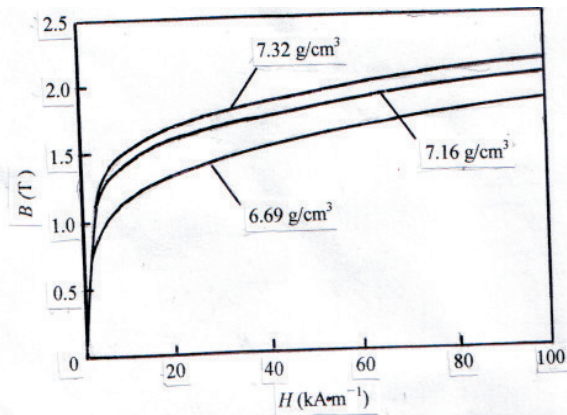


图 5 不同密度 SMC 的 Somaloy 500 的典型 B-H 曲线

4.6 损耗

在电机中有绕组的铜损耗 (I^2R) 和软磁材料中的铁损耗。软磁材料中损耗包括磁滞损耗(直流损耗)与交变磁场引起的涡流损耗。

与 SMC 材料相比, 大部分叠层硅钢材料有较低的磁滞损耗与较高的涡流损耗。磁滞损耗随频率线性增大, 而涡流损耗和频率有平方关系。这就意味着在某一频率要出现交叉, 给出 SMC 优势。交叉点取决于混合粉末, 当然也取决于叠层硅钢类型与叠层部件的制造参数。

冲压与机加工后材料中产生应力, 增大磁滞损耗。在绝缘层中由于毛刺或不完整性的层间接触增大了涡流损耗。但是在大多数电机感兴趣的 50Hz 到数百 Hz 频率范围, 一般来说, SMC 部件的损耗是较高的, 尽管此差别比材料数据直接对比要小得多。

5 为不同应用而研发的 SMC 产品

5.1 为电机应用而开发的 SMC 产品

用于电机的硅钢材料是整个粉末冶金烧结材料的几倍, 因此在电机上应用金属粉末对粉末冶金 (PM) 产业是一个很有吸引力的领域。长期以来, 电机设计和制造是基于硅钢材料二维磁能能量。用 SMC 材料直接取代硅钢材料往往很难显示其性能或成本优势。虽然有例外, 如高频电机, 那里直接置换材料可能有降低铁损和提高效率。然而, 成功的关键是在利用材料的三维磁通特性。

5.1.1 材料的三维磁通特性

设计师运用新的拓扑形状结构、线圈绕组和装配方案是可以达到的, 如更好的性能, 减少大小和重量, 降低生

产成本，减少零部件。

3D 设计可用于很多电机拓扑结构。比如 3D 设计的通用电机能明显减少铜线用量以降低生产成本。尽管如此，SMC 还是很难在通用电机上广泛应用，因为这些电机工作频率较低，它们用的是厚而低成本的硅钢，而这些电机对磁性材料的要求是高的磁导率，而 SMC 的磁导率明显低于硅钢。

然而高效率永磁电机快速发展趋势，为 SMC 材料提供了很好的应用前景。配以合理的控制器，永磁电机可以在很宽的频率范围工作。由于永磁很大的磁阻，电机对软磁材料磁导率的要求不高。

例（1）无刷直流电机

例如，SMC 成功的用于一个重新设计的无刷直流电机（涡旋压缩机用的），其结果是显著减小电机的体积。在这个例子中，仅仅只有重新设计定子，如进一步改进控制器和转子，那么电机就更能显示出用 SMC 的优越性。图 6 是定子设计图。



图 6 无刷直流电机定子设计图

例（2）轴向磁通马达

一个利用 SMC 的电机拓扑结构是轴向磁通马达，作为高性能牵引电机它已成功地被用在英国汽车工程项目中，图 7 示出 Oxford University（剑桥大学）设计的 SMC 轴向磁通马达。表 3 中，列出了一些电机特性。



图 7 轴向磁通马达

表 3 轴向磁通马达的一些电机特性

扭矩	130 Nm
转速	3600 r/min
功率	50 kW
频率	300 Hz
重量	11 kg

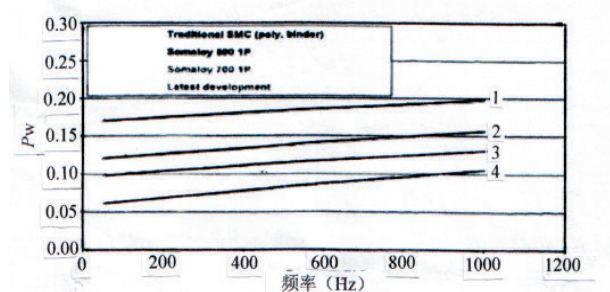
5.1.2 提高 SMC 材料性能

综上所述，SMC 在电机技术应用的优势在很大程度上取决于设计。然而提高 SMC 材料性能自然直接增加 SMC 技术优势。

（1）减少磁滞铁损

和硅钢片相比，SMC 的磁滞铁损大，但涡流铁损小。因此，为了提高 SMC 在电机应用中竞争力，减少磁滞铁损是很重要的。

十多年前 SMC 的 Somaloy 500 1P 引入到市场，它的磁滞铁损比传统的铁粉芯低约 30%，几年前 Somaloy 700 1P 投入市场，它磁滞铁损比 Somaloy 500 降低约 10%。最新研发的 Somaloy 700 5P 材料的磁滞铁损比传统的铁粉芯低约 60%，如图 8 所示。



- 1-Traditional SMC(Poly binder)
- 2-Somaloy 500 1P
- 3-Somaloy 700 1P
- 4-Latest development

图 8 SMC 铁损 / 周与频率的特性

（2）改善 B-H 曲线

除了铁损，另一重要的材料特性是 B-H 曲线。幸运的是，B-H 特性也有所改善，这意味着使电机有更大扭矩和 / 或低铜损。图 9 示出 SMC 材料 B-H 曲线。

（3）提高机械强度

另外一个很重要的特性是机械强度，由于 SMC 材料强度较低而限制它的许多潜在应用。Somaloy 700 3P 在这方面取得了显著的进步，并且磁导率也有了进一步的提高。表 4 列出了为电机应用而开发的 Somaloy 产品的主要性能。

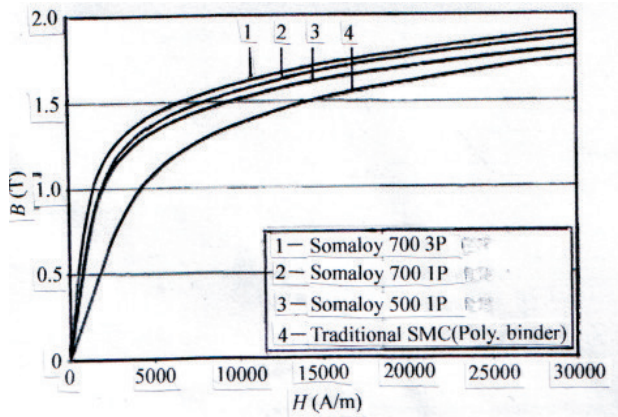


图9 SMC材料产品的B-H曲线

表4 为电机(50~1000Hz)应用而开发的SMC材料产品

材料	电阻率 ($\mu\Omega\text{m}$)	TRS MPa	B 10kA/ m(T)	μ_{\max}	铁芯损耗1T(W/kg)		
					100Hz	400Hz	1kHz
Somaloy 700 1P	400	40	1.56	540	10	44	131
Somaloy 700 3P	200	125	1.61	750	10	46	137
Somaloy 700 5P	1000	60	1.57	600	6	32	104

注(1) Somaly 700 1P: 部件生产工艺简单, 适合50Hz到几百Hz的电机。

注(2) Somaly 700 3P: 高强度和高磁导。

注(3) Somaly 700 5P: 低铁损。

例(1) 油泵电动机

在汽车行业内, 电动机正朝着更小更轻的趋势发展。包括: 在低耗油量与给消费者提供更多功能选项之间建立稳定的平衡。

日本的 Aisin Seiki 公司提出了极为紧凑小巧的设计方案。图 10 示出汽车刹车系统中驱动油泵电动机。

基于 SMC 的 Somaloy 的电动机能提供相同的可比性能, 而长度比以前要短 36%, 重量轻 17%。Somaloy 技术, 以其一贯之自由理念推行 3 维设计, 通过采用下列措施, 生产更为紧凑轻便的电动机。

由于 SMC 材料具有的一些特性, 将其应用于汽车马达制造中有以下一些优点:

a) 可使面向磁铁的区域面积增加, 从而提高了 8% 的磁能量。

b) 提高铜绕组缠绕效率, 减少使用铜线的长度。



图10 SMC电动机(前)与硅钢电机的比较

c) 由于消除了磁芯锋利的边角, 可使铜线圈缠绕更为紧凑。

d) SMC 磁芯可被制成复杂的形状, 能减少马达中零部件的总数。

e) 控制铜绕组线圈电源的整流器已与整个设计方案融为一体。

例(2) 高速微型制冷机

电动机具有单独的预缠绕齿状物, 并具有内置式安装部件, 以便装配如图 11 所示高速微型制冷机。

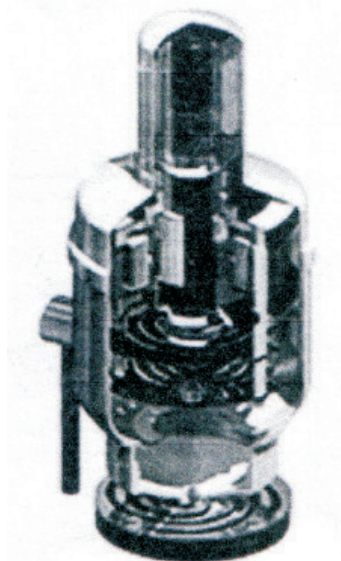


图11 高速微型制冷机

此设计运用了一些重要的 SMC 性能。3 维磁通性能及精美的光洁度可确保绕组线圈具有较高的封装密度及良好的导热性。

5.2 为快速驱动和脉冲变压器而开发的 SMC 产品

(1) 柴油喷射器

SMC 作为快速切换器的磁性部件，已经被用于柴油发动机的燃料喷射器。并且该技术正在扩散到其他燃料，如汽油，液化石油气，天然气等。Bosh 的共轨柴油喷射系统（如图 12 所示）就是一个例子，该产品的激励器采用了 SMC 复杂的成品技术。



图 12 Bush 共轨柴油喷射系统

SMC 材料制造的燃气共轨具有高电感量和低损耗的优点，是应用于燃气共轨电磁控制系统中最理想软磁部件。

燃气共轨技术，可以大大提高燃气汽车和摩托车的工作性能和使用寿命。

高密度的 SMC 铁芯，可产生较大的作用力及精确的高速阀动。因为它的快速瞬态响应，SMC 技术非常适合用于快速切换的制动器。它的高磁饱和意味着可获得高驱动力。与其他技术相比，SMC 由于其良好的性价比使其成为这类应用的首选。

(2) 脉冲变压器铁芯

在汽车发动机的点火系统中，SMC 被用作脉冲变压器铁芯（见图 13）。这种技术能提高燃料的利用率和降低废



图 13 SMC 被用于点火系统

气的排放。

这些应用需要结合软磁材料具有高的磁饱和，较高的磁导率和合理的电阻率等优良性能和粉末冶金成型技术，图 14 比较了在这些应用中最常用 SMC 的 Somaloy 500 1P，最新开发的 Somaloy 1000 3P 和传统铁粉芯的 B-H 曲线。由图可见，Somaloy 在磁感应强度，磁导率等优势是显而易见。这些材料的主要性能列于表 5。

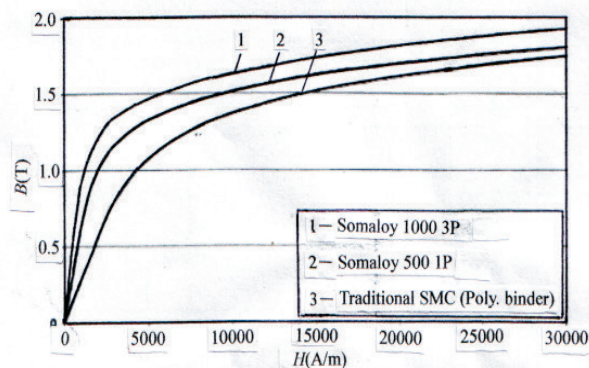


图 14 可用于快速驱动和脉冲变压器 SMC 的材料产品和 B-H 曲线

表 5 可用于快速驱动和脉冲变压器

SMC 的材料产品的主要特性

材料	电阻率 $\mu\Omega\text{m}$	TRS MPa	B		μ_{\max}
			4kA/ m(T)	10kA/ m(T)	
Somaloy 500 1P	70	50	1.26	1.51	500
Somaloy 700 1P	400	40	1.31	1.56	540
Somaloy 700 3P	200	125	1.37	1.61	750
Somaloy 1000 3P	70	140	1.42	1.63	

5.3 为电机应用而开发的 SMC 产品

金属软磁粉芯由于其独特的性能，和铁氧体软磁一起，作为电感，一直被广泛的用于电子产品。当今社会，高精度、高灵敏度和大容量、小型化是对各种电子产品提出的总要求和发展方向，这也是对广泛应用于各种电子产品中的软磁材料提出的要求和方向。

(1) 金属软磁粉芯，尤其是纯铁基软磁，由于其很高的饱和磁通密度和良好稳定性，在小型化方面可以充分发挥其优势。但是，其较大的铁损又往往成为限制其应用的因素。纯铁基软磁的铁损主要来自磁滞铁损，很主要的一个原因是铁粉芯压制时产生的内应力。消除内应力而降低磁滞铁损的最有效的办法是热处理。

(2) 传统铁粉芯的绝缘镀层很难承受高于 300℃ 以上

的热处理。Hoganas (赫格纳斯) 的 SMC 技术, 由于其独特的无机绝缘镀层, 使 Somaloy 1P 产品的热处理温度超过 500℃, 最新研发的 Somaloy 700 5P 材料其热处理温度可高到 650℃。这样这些产品就具有较低的铁损。

(3) 由于无机绝缘镀层很薄 (10~100nm), 基粉又具有很好的压缩性, 由 SMC 制成的软磁粉芯密度可达到 7.5g/cm³。这样, 这种软磁粉芯的饱和磁通密度比传统软磁粉芯更高。

(4) 硅钢虽然有高的饱和磁通密度和低的磁滞损耗, 但电子产品的高频, 就必须降低硅钢片的厚度, 这就使其成本大幅上涨, 同时其过高的磁导率也限制了它在电子产品上的应用。

图 15 比较了可用于电子产品的软磁材料的一些性能, 表 6 列出了可用于电子产品的三种 Somaloy 产品的主要性能参数。

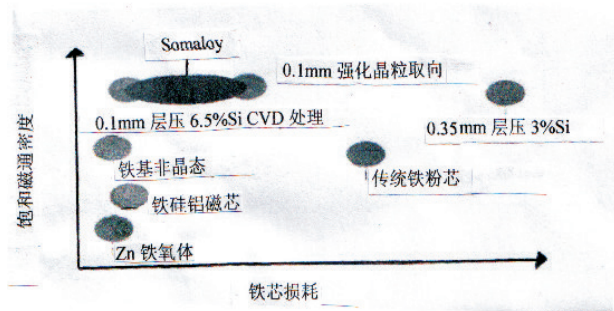


图 15 Somaloy 和其他软磁材料的比较

表 6 可用于电子产品 SMC 的三种 Somaloy 产品的主要性能参数

材料	电阻率 ($\mu \Omega \text{m}$)	B 10kA/ m(T)	铁芯损耗(W/kg)		
			1T/100Hz	0.1T/10kHz	0.1T/k30Hz
Somaloy 110i 1P	7600	1.33	15	26	85
Somaloy 130i 1P	8000	1.43	12	27	110
Somaloy 5P	>10000	1.48	8	18	65

注 (1) Somaloy 110i 1P : 适用于 5~100kHz。

注 (2) Somaloy 130i 1P : 适用于 1~20kHz。

注 (3) Somaloy 5P : 适用于 1~100kHz。

6 结语

(1) 国家科技部 2016 年 2 月 17 日公布了《国家重点支持的新材料高新技术领域》，其中新材料高新技术领域：(一) 金属材料项：“7 电工、微电子和光电子新材料制备与应用技术”重点支持“新型马达定子 SMC 软磁粉芯、SMD 贴装电感软磁粉芯制备技术”。

由于软磁复合材料 (SMC) 在电动马达上的应用市场广阔, 该领域的研究开发主要集中在软磁材料的结构设计 with 优化、生产与工艺控制, 疲劳性能研究等。

(2) 在小型复杂磁路结构中使用叠层铁芯具有相当的难度, 甚至是不可能实现的, 采用整钢结构则会遇到涡流损耗大的问题。而 SMC 的一次模压成型, 磁性能和热性能的各向同性特点使得设计人员可以克服许多采用叠层铁芯所遇到的约束。目前, 微电机和小功率电机被广泛应用于汽车、机器人、办公和家庭自动化设备, 年需求量很大, SMC 在这些领域的应用可能产生巨大的经济效益。

参考文献

- [1] 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, Vol.17, No.4, 2010, p.50~54
- [2] 刘颖, Andrew Peter Baker, 翁履谦. 软磁复合材料研究进展. 中国科技论文在线. <http://www.docin.com/p-1125560348.html>
- [3] 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>
- [4] Pennander Lars-Dlov, Jack alan. 铁粉软磁复合材料开发及其在电机上的应用. 金属功能材料, Vol.9, No.3, June 2002, P.19~25
- [5] 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, Vol.34, No.11 2006 年第 11 期, P.1~3, 8
- [6] 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 年 11 月, P.46~51