

纳米磁性功能复合材料的综述

张继松

西南应用磁学研究所, 四川绵阳 621000

摘要: 本文对纳米磁性功能复合材料的研发、特性、分类及应用作了较为详细的介绍, 其目的是以此引起人们对纳米磁性功能复合材料开发研究的重视。

关键词: 纳米磁性复合材料, 研发概况, 特性, 应用

1 前言

材料的复合化是材料发展的必然趋势之一, 复合材料已成为 21 世纪最重要、最有发展潜力的领域。以高分子材料为基体与磁性功能体复合而成的一类功能材料, 被称为磁性功能复合材料。纳米磁性功能复合材料则一般由非磁性绝缘体和分散在它内部的磁性纳米颗粒组成。它是分散相尺度至少有一维小于 100nm 的磁性复合材料。纳米颗粒具有单畴结构和矫顽力很高的特性, 其小尺寸效应和与基体的高浓度界面以及基体的绝缘性, 使得纳米磁性功能复合材料表现出许多优异的物理和化学性能, 且具有断裂强度高、韧性好、耐高温等特性。

2 研发概况

二十多年前, 有研究者设想, 将稀土硬磁性材料与软磁性材料结合起来形成交换耦合纳米复合磁体, 可望获得比纯稀土磁体更强的磁性能, 并能较大幅度地降低稀土金属用量, 来制备比现有稀土永磁材料更强但是成本更低的纳米复合永磁材料。但其主要挑战是需要纳米尺度上对软相的尺寸(等于或小于 10 纳米)、分布和含量以及硬相的晶体取向进行同时控制, 其艰难程度被认为是一个“工程噩梦”。1988 年日本在已研制出具有铁基非晶体材料的高饱和磁化强度及钴基非晶体材料的优良高频特性纳米级软磁材料的基础上, 提出了一个创新的纳米晶复合交换耦合巨磁能积永磁材料的设想。由于软磁材料的饱和磁化强度 M_s 高但矫顽力 H_c 小, 而永磁材料 H_c 大 M_s 小, 如能将这两种材料复合在一起, 通过相界之间的交换耦合, 在纳米范围内复合而成一种新型永磁材料。这类永磁材料磁能积的理论值可达 $10^6/\text{m}^3$ 。同年, 荷兰菲利普研究室 Coehoorn

等用融体快淬法制备了 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{77}\text{B}_{18.5}$ 合金非晶薄带, 经晶化处理后得到了 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 晶粒和软磁相 Fe_3B 晶粒之间的强烈交换耦合作用, 导致高剩磁和高磁能积现象, 并呈现单一铁磁性相特征。1991 年德国科学家 Kneller 及其同事 Hawig 在电工学会汇刊上发表了纳米复合永磁材料的第一篇理论文章, 从原理上阐述了发展这种新永磁材料是可能的, 并且粗略估计了制备这种新材料的微观组织参数。1993 年 4 月, Skomski 和 Coer 在斯德哥尔摩召开的国际磁学讨论会议上发表了题为“取向排列的双相磁体的成核场及磁能积——向 $1\text{mJ}/\text{m}^3$ 的磁体进军”的文章, 此后又接连发表了几篇这方面的文章。1995 年日本住友特殊金属公司制作的 $\text{Fe}_3\text{B}/\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 纳米复合永磁体 SPRAX-1 上市。2002 年 11 月 28 日出版的英国《自然》杂志报道了 5 位在美华人学者在二元纳米颗粒材料中, 巧妙地利用具有硬磁性和软磁性的 FePt 和 Fe_3O_4 纳米颗粒进行有序自组装, 然后通过控制烧结将其转化为具有“交换—耦合型”的纳米复合物。通过调整纳米颗粒的大小和成分以及控制自组装过程, 这种纳米复合材料的交换耦合得到优化, 从而得到了具有磁能积为 20.1MGoe 的纳米复合永磁材料, 高出各向同性无耦合单相 FePt 磁能积的理论极限值 (13MGoe)59%。这种材料的磁能积比相应的永磁材料的磁能积的理论值要高出 50%。《自然》杂志称这一研究成果是应用物理学领域的重大进展。2003 年中国沈阳材料科学国家(联合)实验室、中国科学院金属研究所张志东研究员的研究小组制备出了纳米复合稀土永磁块体和薄膜材料, 该研究小组在大块各向异性纳米晶热压/热变形磁体的制备、纳米复合软磁材料的结构—功能一体化、各向异性纳米复合永磁薄膜材料的制备以及交换耦合研究、磁体

和溅射纳米薄膜的腐蚀机理及防护工艺研究、磁体的 500 ~ 700℃ 高温氧化行为等方面取得重要进展, 项目指标达到当时报道的最高值。这一成果显示, 由分布很好的非常细晶粒的硬磁相和软磁相组成的多层薄膜, 理论预言纳米复合永磁材料可以获得高的剩磁和高的最大磁能积, 可望成为新一代的稀土永磁材料, 在信息、微型机械、微型电机等领域将有广阔的应用前景。在前期系统研究工作的基础上, 2009 年张志东研究小组与美国内布拉斯加大学林肯分校合作, 又在制备高性能的纳米复合稀土永磁多层薄膜磁体方面取得进展。他们针对纳米复合块体永磁材料的最大磁能积的实验值远低于理论预期值这个问题, 发展了在纳米尺度设计稀土永磁材料的技术, 采用磁控溅射方法制备纳米复合稀土永磁多层薄膜磁体, 通过控制多层薄膜的厚度来控制退火过程中硬磁相和软磁相的晶粒生长和分布。利用高分辨透射电子显微镜对样品进行平面和横截面表征, 表明硬磁相和软磁相的分布均匀。精心设计的多层膜由晶粒尺寸为 40 纳米的硬磁相和连续分布的软磁相组成。从而在多层薄膜中实现了磁性交换耦合和剩磁增强效应, 有效地结合了硬磁相和软磁相的优良磁性, 实现了剩磁增强效应, 在薄膜磁体中获得了最大磁能积 203 kJ/m³。2017 年燕山大学大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室张湘义科研团队采用纳米化途径, 使用较少的稀土金属, 制备出了磁能积超过相应的纯稀土永磁材料的各向异性块体 SmCo/FeCo 纳米复合永磁材料。该材料的磁能积 (28 MGOe) 为当前报道的含高软相分数块体纳米复合磁体的最高值, 超过相应的纯单相稀土永磁材料 (磁能积提高了 58%)。另外, 所制备出材料的磁能积可以与当前商业 SmCo₅ 和 Sm₂Co₁₇ 磁体相媲美, 且少用稀土钐 (Sm) 20 ~ 39 wt%。这优异的性能源于他们实现了对软、硬磁晶粒多个结构参数的同时控制。研究小组先采用机械合金化技术将软磁晶粒均匀分布在 SmCo 非晶基体上来控制软磁相的尺寸、含量和分布; 然后, 采用高压热梯度压缩变形, 利用晶体的应变能各向异性, 使硬磁晶粒在非晶基体中垂直取向生长, 以获得沿易磁化轴对中的柱状硬磁纳米晶体, 从而实现了对软磁和硬磁晶粒结构的的同时控制。另外, 张湘义团队还发现通过改变变形温度可以对硬磁纳米晶的尺寸 (小于 10 纳米) 和形态 (球形、柱状和盘状) 进行调控; 他们通过控制合金熔体结构, 制备出三维类壳/核软、硬异质纳米结构, 其磁能积为当前各向同性永磁材料的最

高值。有关研究结果分别发表在 2017 年和 2016 年的 Nano Letters 杂志上。

桂林电子科技大学信息材料科学与工程系 2006 年公开了一种硅烷偶联化纳米磁性复合四氧化三铁材料的制备方法, 通过将二价铁盐和三价铁盐溶解于水中, 在惰性气体保护下滴加碱溶液至碱性, 加热搅拌反应制得纳米四氧化三铁颗粒, 在制得的纳米四氧化三铁颗粒中, 加入分散溶剂和硅烷偶联化试剂, 加热搅拌制得硅烷偶联化纳米磁性复合四氧化三铁材料。并将制备硅烷偶联的纳米磁性复合四氧化三铁材料应用于环境持久污染物残留检测技术中。浙江大学宁波理工学院将三价铁盐和二价铁盐的水溶液混合, 然后向混合物中加入含有表面活性剂的碱溶液进行反应得到纳米四氧化三铁粒子, 再将反应所得的纳米四氧化三铁粒子球磨分散到苯乙烯单体中进行本体聚合反应, 得到了纳米四氧化三铁/聚苯乙烯磁性复合材料。2013 年山东建筑大学发明了一种磁性纳米复合吸波材料, 其组分由重量百分比 10 ~ 25% 纳米铁氧体 (Li_{0.15}Zn_{0.7}Fe_{2.15}O₄), 2 ~ 4% 纳米氧化镁, 1 ~ 6% 纳米氧化铝, 1 ~ 4% 纳米氧化钛和余量的不饱和和聚酯组成。这种磁性纳米复合吸波材料吸波材料对 0.1 ~ 12GHz 的电磁波具有较强的吸收特性, 可以应用于不同电磁场的环境下, 防止电磁辐射对人体的危害以及对设备的影响。2014 年, 华中科技大学以亲水基团修饰的 Fe₃O₄ 纳米颗粒为基底, “一步法”合成由全氟辛基和胺基功能化的磁性纳米复合材料, 制备方法简便快速、成本低廉、易于操作。材料对全氟化合物的识别基于氟氟相互作用和静电吸引, 显著提高了其对目标分析物的特异性识别能力和吸附容量; 制备得到的磁性纳米复合材料为核壳结构, 表面吸附赋予了材料快速的吸附动力特征, 加之材料良好的磁响应性, 主要用在环境监测和污染控制领域。2012 年, 南京航空航天大学制备了石墨烯磁性粒子功能复合材料。他们首先采用后续负载的方法, 对微波固相膨胀得到的石墨烯进行化学镀处理, 在其表面沉积上一层分散均匀的镍颗粒, 得到石墨烯/Ni 纳米复合材料。然后采用微波辅助加热还原得到镍尺寸不同的复合材料。微波还原得到的复合材料, 反射损耗最大可以达到 -34.4dB, < -10dB 的有效吸收带宽达 3.9GHz。他们还研究了石墨烯/四氧化三铁纳米复合材料的溶剂热法制备技术。测试结果显示, 尖晶石结构的磁性四氧化三铁粒子均匀分布在石墨烯片上, 粒子平均粒径大概为 50nm。磁

性粒子的加入,有效提高了石墨烯的磁性能。磁性粒子质量分数 70% 的复合材料具有最好的吸波性能,涂层厚度在 24mm 变化时,有效吸收可以覆盖 4.6GHz 的频率范围,最大吸收峰值可以达到 -26.5dB。众所周知,六价铬是环境中普遍存在的一种毒性重金属离子,具有致癌、致畸、难降解和生物累积性等危害,威胁生态环境和人类健康。近年来,利用纳米材料去除六价铬成为环境领域的研究热点,其中磁性碳纳米材料由于易回收和成本低而受到青睐,然而现有方法制备的磁性碳纳米材料具有碳层薄和活性基团缺乏等缺陷,难以发挥其对六价铬的去除潜能,严重制约了该材料的应用。因此,制备可高效去除六价铬的厚碳层、功能化的磁性多孔材料是环境和材料研究领域关注点之一。近日,中国科学院合肥物质科学研究院技术生物与农业工程研究所研究员吴正岩课题组制备出了一种磁性多孔纳米复合材料,其粒径、碳层厚度和活性基团数量可由前驱物质浓度方便调节。该材料具有多孔结构、高比表面积和大量活性基团,可以高效抓取水体中的六价铬,进而将其还原为微毒性的三价铬,并通过磁场将该材料连同铬移出水体。从而有效去除水体中的重金属。

3 磁特性

3.1 不考虑纳米磁性微粒间相互作用

A. 如果该纳米磁性功能复合材料集合体经外场取向,那么其中的单磁微粒(单轴晶体)的易磁化方向就会一致排列,这时介质的磁化特性与单晶体材料相似。当外场与易轴的交角为零度时磁化,则剩磁 $M_r = M_s$,这也是一般磁记录介质所希望的。

B. 如果磁性微粒没有通过外场取向,而是随机在粘合剂中混乱分布,那么介质的磁化过程就与多晶体物质的磁化过程相似。

3.2 考虑纳米磁性微粒间相互作用

纳米磁性功能复合材料中的磁性微粒可以视为一个个分裂的小永磁体,在它们周围产生磁场,微粒之间的相互作用就是通过这样的静磁场进行的。

4 种类及其特征

4.1 根据纳米磁性功能复合材料中纳米微粒组分的属性分类

①氧化物类

氧化物纳米磁性功能复合材料是纳米磁性功能复合材料中最重要的一类。由于该类复合材料中的纳米微粒的表面容易被改性,因此较容易获得物理稳定和化学稳定的纳米复合材料,具有储存、运输和进一步加工等特点。

▲ MO_x 型化合物 ($x=1.0 \sim 1.33$): FeO 、 MnO 、 EuO 等属于这类化合物。

▲ AB_2O_4 型化合物 ($x=1.33$): 单纯二价尖晶石铁氧体 ($MnFe_2O_4$ 、 Fe_3O_4 、 $CuFe_2O_4$ 等)、多元系尖晶石铁氧体 (Mn/Zn 铁氧体、 M/Fe 铁氧体等)。

▲ $AOnB_2O_3$ 型化合物 ($x=1.33 \sim 1.5$): 磁铁铅矿型铁氧体及其衍生物、 $CaFe_4O_7$ 。

▲ 其它氧化物类: ABO_3 型化合物。

②金属合金类

此类纳米磁性功能复合功能材料,是有两种及两种以上的纳米级金属元素或者是纳米级金属元素与纳米级非金属元素,通过熔化或烧结等适当方法结合在一起的磁性复合材料。众所周知,单一的纳米铁磁金属可以成为很好的磁性材料。但是,应该看到绝大多数的金属磁性材料都是有合金组成的。这是一类新型纳米磁性复合材料,其性质取决于组成复合纳米材料的各元素存在的状态。如果纳米磁性复合材料中没有各自独立相态的元素彼此相互作用共同形成一个相态,那么这种纳米复合材料就不再是组成元素性质的叠加,而是产生了新的性质。

▲ 含铁、镍、钴的纳米磁性功能复合材料: 此类纳米磁性功能复合材料是人们最早研究的纳米磁性材料,并且它们又是一切金属与合金纳米磁性功能材料的基础。

▲ 不含铁、镍、钴的纳米磁性功能复合材料: 一些过渡金属单独存在时显示反铁磁性,但组成合金或化合物后就常常显示出铁磁性。

③其他

除了上述两大类纳米磁性功能复合材料外,按照纳米微粒的属性分类还有其他一些,如氮类和铁酸盐类纳米磁性功能复合材料等。

4.2 根据纳米磁性功能复合材料中的成分组合分类

①无机纳米磁性功能复合材料(包括金属系、铁氧系、复合颗粒膜等);

②纳米磁性高聚物功能复合材料(包括天然高聚物、

人工合成高聚物等)；

③磁流体(包括铁氧系磁流体、金属系磁流体、氮化金属系磁流体等)。

5 应用

纳米磁性功能复合材料是20世纪80年代末90年代初逐步产生、发展、壮大而成为最富有生命力与广阔应用前景的一种新型磁性材料。纳米磁性功能复合材料最先用于宇航工业,后应用于民用工业,如广告制作材料、建筑装修材料、办公文具等。特别是在磁性材料与信息化、自动化等国民经济的方方面面密切相关的当下时代,纳米磁性功能复合材料的新纪元将改变我们的生活、工作方式,使其具有鲜明的个性化和时代特征,让我们的生活具有“磁幻”魅力,它已在微型电机、自动化办公用品、自动控制、扬声器、阻尼器件、磁印刷、生物医学等各个领域得到广泛应用。

5.1 生物、医药领域

纳米磁性功能复合材料近来被广泛研究,其巨大的应用潜力特别是在生物医学、生物工程等领域的应用引起了各国研究者的高度重视,成为生物医学材料研究领域中的一个热门课题。

磁性纳米技术对医学发展具有重要的推动作用,疾病诊断、预防和治疗的实际需求对磁性纳米技术提出了获得更先进的药物传输系统和早期检测与诊断技术的期望,如早期诊断和预警、代谢产物中的生物标志物的发现、及其微量或痕迹量或瞬间的样品量的检测技术,适于大量或批量的实用检测技术平台,载体的效率和容量,靶向、缓释、可控的药物载体,药靶确证和药物筛选,甚至是突变或个体化差异的检测、诊治等。磁性纳米粒子具有小尺效应,良好的磁向导性,生物相容性,生物降解性和活性功能基团等特点。将磁性纳米粒子作为载体制成微球药物制剂注入肿瘤供养动脉后,利用外磁场的诱导,载附抗癌药物的磁微球将被吸附且滞留于肿瘤区域,持续缓慢释放药物,使肿瘤及周围淋巴组织内存在高浓度的化疗药物,而身体其它脏器药物浓度低,从而最大限度的降低药物的毒副作用,有选择性地杀伤或抑制肿瘤细胞。我们知道,癌症、肿瘤手术后要进行放射性辐照,以杀死残存的癌细胞,但与此同时大面积辐照也会使正常细胞受到伤害,尤其是会使对生命极端重要的具有造血功能和免疫系统的骨髓细胞受损害,所以在辐照治疗前将骨髓抽出,辐照后再重新注入,

但在较多的情况下癌细胞已扩散到骨髓中,因此在把癌细胞从骨髓液中分离出来是至关重要的,否则将含有癌细胞的骨髓液注回辐照治疗后的骨髓中还会旧病复发。磁性纳米粒子在分离癌细胞和正常细胞方面经动物临床试验已获成功,显示出了引人注目的应用前景。

5.2 磁记录及巨磁电阻中

自1898年磁记录技术发明以来,磁性墨水与磁印刷至今已有一百多年的历史。目前磁记录技术已应用到声音、图像、数据记录中。磁记录原理是利用磁性材料的磁滞性质,当磁性介质被信号磁场磁化后,将保留一定的剩磁值,其值大小与信号强弱成一定的比例关系,这就是信号的写入,用磁头读出磁迹所对应的信号就成为磁记录的再生过程。

纳米颗粒具有单畴结构和矫顽力很高的特性,其小尺寸效应和与基体的高浓度界面以及基体的绝缘性,使得纳米磁性功能复合材料表现出许多优异的物理和化学性能,用它制成的磁记录材料不仅音质、图像和信噪比较好,而且记录密度比 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_4$ 高几十倍。

当代计算机硬盘系统的磁记录密度超过 $1.55\text{Gb}/\text{cm}^2$,在这情况下,感应法读出磁头和普通坡莫合金磁电阻磁头的磁致电阻效应为3%,已不能满足需要,而纳米多层膜系统的巨磁电阻效应高达50%,可以用于信息存储的磁电阻读出磁头,具有相当高的灵敏度和低噪音。目前巨磁电阻效应的读出磁头可将磁盘的记录密度提高到 $1.71\text{Gb}/\text{cm}^2$ 。同时纳米巨磁电阻材料的磁电阻与外磁场间存在近似线性的关系,所以也可以用作新型的磁传感材料。高分子复合纳米材料对可见光具有良好的透射率,对可见光的吸收系数比传统粗晶材料低得多,而且对红外波段的吸收系数至少比传统粗晶材料低3个数量级,磁性比 FeBO_3 和 FeF_3 透明体至少高1个数量级,从而在光磁系统、光磁材料中有着广泛的应用。1988年法国人首先发现了巨磁电阻效应,到1997年巨磁电阻为原理的纳米结构器件已在美国问世,在磁存储、磁记忆和计算机读写磁头将有重要的应用前景。巨磁电阻效应在高技术领域的应用的另一个重要方面是微弱磁场探测器。随着纳米电子学的飞速发展,电子元件的微型化和高度集成化都要求测量系统也要微型化。

5.3 分离处理技术

A. 化工分离

磁性离子交换树脂是水处理领域新开发的一种新型树

脂, 由于其在给水预处理中的良好效果, 成为研究的热点。MIEX(R) 树脂的珠粒粒径和磁性, 是 MIEX(R) 树脂有别于传统树脂的最大特点, 并且这两个特点使此种树脂在给水预处理中得以有效应用。MIEX(R)DOC 工艺对相对分子质量中等和小的有机物有较高的去除率, 与混凝在去除有机物方面具有互补作用, 磁性离子交换树脂能极大改善后续工艺的处理效果。如果使磁性树脂带永磁, 则它会在湍流的剪切力下分散, 在平流的状态下凝聚, 精确设计管道的形状和尺寸, 便可达到回收和循环使用磁性树脂的目的。

B. 催化剂分离

将纳米级催化剂固载于磁性微球上, 可利用磁分离方便的解决纳米催化剂难以分离和回收的问题。而且如果在反应器外加旋转磁场, 可以使磁性催化剂在磁场的作用下进行旋转, 避免了具有高比表面能的纳米粒子间的团聚。同时, 每个具有磁性的催化剂颗粒在磁场的作用下可在反应体系中进行旋转, 起到搅拌作用, 这样可以增大反应中催化剂间的接触面积, 提高催化效率。另外, 磁微球还可以作为机制与氧化锆、镁铝水滑石等进行自组装, 制备如磁性固体酸等固体催化剂。

C. 矿物分离

磁性液体被磁化后相当于增加磁压力, 在磁性液体中的物体将浮起, 磁性液体的表现密度随着磁场增大而增大。利用此原理可设计出磁性液体比重计。磁性液体对不同密度的物体进行分离, 控制合适的磁场强度可以使低于某密度值的物体上浮, 高于此密度的物体下沉, 原则上可用来矿物分离。

5.4 在隐身技术中

纳米磁性粒子与高分子材料或其他材料复合具有良好的微波吸收特性和宽频带红外吸收性能, 一方面是由于纳米微粒尺寸远小于红外及雷达波波长, 因此纳米材料的透过率比常规材料要强得多, 大大减少了波的反射率; 另一方面纳米材料的表面积比常规材料大 3 ~ 4 个数量级, 使得对电磁波的吸收率大大优于常规材料。

纳米隐身材料大多是以磁性金属纳米材料为主体构成的纳米复合材料。纳米隐身材料具有纳米尺寸效应、界面效应、纳米非均匀性和各向异性等特点, 可在微波频段实现高磁导率、高磁损耗, 达到宽频带强吸收的目的。同时, 在中、远红外频段具备高吸收、低发射率特性。

纳米磁性功能复合材料具有极好的吸波特性, 同时具

有宽频带、兼容好、质量轻和厚度薄等特点, 美国、俄罗斯、法国、德国、日本等都将纳米磁性复合材料作为新一代隐身材料加以研究和探索, 对纳米磁性复合材料的微波电磁谱理论、材料系列、制备方法、性能表征与测量方法等进行了系统研究, 研制出多种不同结构的纳米隐身材料, 取得了实质性进展。

5.5 微型机电及自动控制系统等

纳米复合永磁材料是由具有纳米尺寸晶粒的硬磁相和软硬相的交换耦合作用复合而成, 这种材料通过交换耦合作用实现矫顽力高的硬磁相与剩磁高的软磁相间的磁耦合, 从而提高材料的整体磁性能。纳米复合稀土永磁材料有望在微型机电、机器人、低温火箭固体燃料分离、大功率微波器件和计算机设备等领域得到大量使用。纳米复合磁性材料可开发成各种各样的磁性器件应用于电力电子技术领域, 用作电力互感器、开关电源变压器、滤波器、漏电保护器、互感器及传感器等。

6 展望

目前纯聚合物纳米磁性功能材料研究主要侧重于合成与表征, 有机高分子/无机纳米磁性复合材料的合成和应用正在研究中, 实现工业化的并不多, 因此应加强应用研究, 尽快使其从实验室走向生产。磁性高分子微球的应用比较广泛, 除了对其表征之外, 今后应加强对于磁性高分子微球的磁性起源、结构和性能的关系, 如无机物、聚合物对磁性的贡献, 无机物之间、无机物与聚合物间的磁相互作用的研究。为了满足纳米磁性功能复合材料在光学器件、高密信息存储、微电子学领域的应用, 对纳米微粒进行二维有序排列—分子自组装已引起了各国科学家的关注。尽管我国在纳米复合永磁材料研究领域取得重要进展, 制备出了磁能积超过相应的纯稀土永磁材料的块体纳米复合材料, 但一方面应该尽快使其实现工业化生产, 加强应用研究和推广工作, 获得更大经济效益; 同时, 还需要继续加强高性能研究, 看其是否能成为新一代稀土永磁材料。目前来说, 纳米磁性功能复合材料的应用研究还存在许多难点, 要想实现纳米磁性功能复合材料的广泛应用, 除了需要合成出具有不同性能、适合于不同用途的纳米磁性功能材料外, 还需要对包括纳米电学、纳米生物学、纳米制造技术、纳米显微学等纳米技术的发展进行研究。可喜的是, 对纳米磁性功能复合材料的研究和应用已引起了各国科学

家的兴趣和重视,在我国“高分子磁性材料及磁性原理研究”和“有机/无机纳米复合材料的基础研究”已被列为高分子学科重点研究项目。今后必将有更多的科研人员从事这方面

面的研究,纳米磁性功能复合材料必将为人类的发展做出更大的贡献。

(参考文献省略)

上接140页

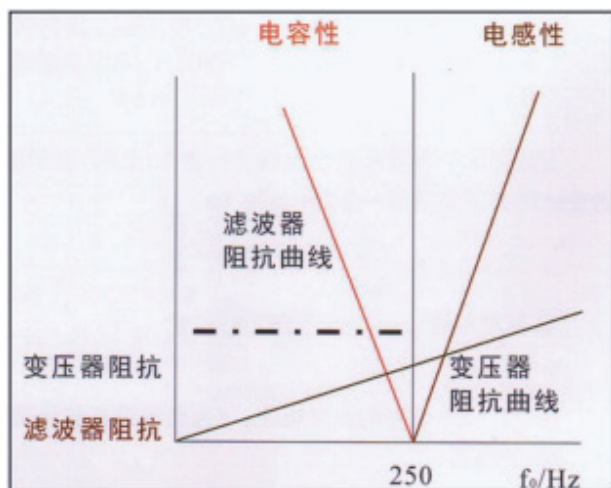


图4 为无源滤波装置技术特征曲线

由此无源滤波装置应由钢板制成的柜壳内,每台滤波装置还包括一台电磁接触器、热继电器、电抗器、电容器。通常无源滤波装置应与主配电柜经熔断器的馈线相连接。故无源滤波装置适用于造纸、轮胎、化纤、纺织、薄膜、电池、石化等行业。

* 功能特点 结构简单、成本低廉、运行可靠性较高;

上接145页

较好的铁心材料,这样开合式电流互感器的励磁电流会相对恒定,从而将励磁电流提取注入到二次负载,即而达到消灭误差,从而达到补偿的目的。(见图11)

6.2 外部注入励磁电流法

励磁电流不能完全消除,那么可以从外部提供电路来提供励磁电流,从而使互感器没有误差,从而达到补偿目的。

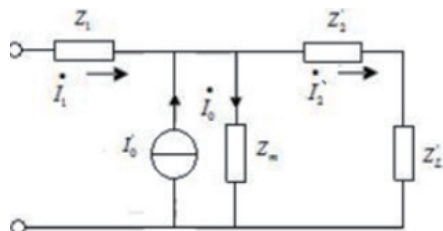


图12 外部提供励磁电流法

当然有源补偿法还涉及到安全及性价比,作者仅做个初步探讨,具体实践还需要大家去开拓、发展。

无源滤波装置在提供滤波时同时可以提供无功功率补偿;可吸收负载产生该次谐波电流达80%以上;提高功率因子的同时,降低损耗节省电费;提高变压器、电缆、马达等用电设备的使用寿命;避免PLC等电子控制组件因谐波畸变产生误动作;有效避免电力系统与电容器产生谐振现象。

3 后话

从上分析已清楚确认现在的输入滤波器是开关电源成功通行EMC的必要因素。而对其稳定性与可靠性,需注意以下二点:其一是,在使用简单易用的公式就可以在各自基础上计算出输入滤波器的相关器件参数。如果将滤波器和开关控制器的阻抗也考虑在公式里,既可以避免振荡,也可以确保开关控制器自身控制的稳定性;其二是,安装要求选择滤波器的各个参数给滤波器优化技术的设计打下了基础,若再配合适当的EMC测试技术和方法,开发人员就可以有目的地设计出他需要的开关电源或开关控制器,而且在必要的地方,还可以对滤波器本身进行调整。

7 开合式电流互感器及电子式互感器的发展

作者在《开合式电流互感器的应用及其发展》中提到过,开合式电流互感器未来的发展方向:1、小型化;2、一致化;3、数字网络化。有人肯定要反驳,开合式电流互感器未必有未来,因为现在国家要搞智能电网,需要使用电子式电流互感器,普通的开合式电流互感器要被淘汰,其实不然,电子式电流互感器也许代表的是未来,如果作为保护用,在一定的范围内是可以的,但如果用作测量、计量用,那么它的准确级还远远不达标,这也是电子式电流互感器(无论是有源型还是无源型)未来发展急需解决的问题。

所以在未来补偿技术不断提高、磁性材料不断发展的情况下,开合式电流互感器的准确级只会越来越高,使用也会越来越广泛。