

新型非晶合金电机研究现状

高崑, 宋祚轩

海军工程大学电气工程学院, 武汉 430033

摘要: 非晶合金是一种新型金属材料。此类材料的电机和变压器类电气设备, 以其功率密度高、输出转矩大、适用频率高等诸多优势, 正在逐渐补充或替代制作这类电磁机械设备所使用的传统硅钢类材料。目前已商业化应用于制造变压器铁芯、电感铁芯等器件, 但在电机应用中还存在诸多问题。本文综述了非晶合金材料的发展进程, 阐述了非晶合金电机的研究现状, 总结了非晶合金电机应用发展的难点以及关键技术, 指出了非晶合金电机未来的发展方向, 为非晶合金电机的后续研发提供一定的参考。

关键词: 新型软磁, 非晶合金, 永磁电机, 高效电机

0 引言

为提高电机效率, 降低损耗, 一般采用降低铁芯磁通密度或使用低损耗的铁芯材料代替传统的硅钢片的方法。目前常用的磁芯材料是高饱和磁感取向硅钢和磁感强度略低一些的无取向硅钢, 但其铁芯损耗相对较大, 特别时频率升高时, 铁芯损耗显著增加。为降低损耗, 研发出了新的厚度约为 0.05~0.15mm 的高硅含量的超薄硅钢, 可显著降低高频铁芯的高频损耗, 但其成形较为困难且生产工艺复杂, 国内产能较小, 每年仍需大量进口。由于我国电力紧张, 取向硅钢严重不足, 在短时间内尚不能生产高效节能的磁畴细化取向硅钢, 加之“节能降耗指标”的要求越来越严, 因而发展新型软磁材料电机, 尤其是以非晶态合金为代表的高效节能电机, 从根本上解决现有各类辅机电机、推进电机噪声大、功率密度低、适用频段窄、转速约束条件复杂、输出转矩低等问题, 具有重要的现实意义。

1 非晶合金概述

非晶态金属合金是 70 年代问世的一个新型材料领域。它的制备技术完全不同于传统的方法, 采用了冷却速度大约为每秒 100 万度的超急冷凝固技术, 从钢液到薄带成品一次成型, 比一般冷轧金属薄带制造工艺减少了许多中间工序。由于超急冷凝固, 合金凝固时原子来不及有序排列结晶, 得到的固态合金是长程无序结构, 没有晶态合金的晶粒、晶界存在, 因此称之为非晶合金。这种非晶合金具

有许多独特的性能, 如优异的磁性、耐蚀性、耐磨性、高的强度、硬度和韧性, 高的电阻率和机电耦合性能等。由于它的性能优异、工艺简单, 从 80 年代开始成为国内外材料科学界的研究开发重点。目前美、日、德国已具有完善的生产规模, 并且大量的非晶合金产品逐渐取代硅钢和坡莫合金及铁氧体涌向市场。

非晶合金材料按组成成分可以分为铁基非晶合金、铁镍基非晶合金、钴基非晶合金和纳米(超微晶)软磁合金四大类。在目前常用的四种非晶合金软磁材料中, 铁基非晶合金与其他三种相比, 其磁性更强(饱和磁感应强度达 1.4~1.7T)、磁导率、激磁电流和铁损等软磁性能均优于传统硅钢, 价格便宜, 节能效果显著。其性能特征是饱和磁感强度 B_s 为 1.56T, 低于硅钢的 1.8~2.1T, 但其矫顽力 H_c 远小于硅钢, 磁导率显著大于硅钢, 这使其铁芯损耗远小于硅钢。此外, 工业化生产的铁基非晶合金带材的单片厚度很薄, 仅有 0.03mm, 为传统 0.35mm 冷轧硅钢片带材的 1/11, 且其电阻率约为 $130\mu\Omega/\text{cm}$, 是传统冷轧硅钢片的 3 倍。由于电机铁心叠片的涡流损耗与叠片厚度平方成正比, 与叠片电阻率成反比, 采用非晶合金材料替代传统冷轧硅钢片材料制作电机铁心可有效降低电机的铁耗, 提高效率。研究表明, 在 400Hz 以下, 铁基非晶态合金的损耗仅为取向硅钢的 1/3~1/5, 用其替代传统硅钢制造配电变压器, 可使配电变压器的空载损耗降低 70%~80%。由于铁损与工作频率的指数项成正比, 在频率大于 400Hz 的中高频范围, 即中高速电机铁芯中, 降

耗效果更为明显。铁基非晶合金是一种性能优异的软磁材料,目前已商业化应用于制造变压器铁芯、电感铁芯等器件。因此,软磁非晶合金多以铁基非晶合金作为代表类型开展研究工作,而且铁基非晶合金受到越来越多研究人员的青睐。

2 国内外研究现状

2.1 电感等效电路和电感值频率特性分析

软磁材料的发展和用已经有 100 多年的历史,从 19 世纪末至今软磁材料的发展经历了纯铁、硅钢、坡莫合金、铁氧体、非晶合金、非晶纳米晶及超薄硅钢等材料。

硅钢是一种在纯铁中加入少量的硅(Si)(一般在 4.5% 以下)形成的铁硅系合金。该类铁芯具有的最高饱和磁感应强度值为 20000Gs;由于它们具有较好的磁电性能,易于批量生产,价格便宜,机械应力影响小等优点,在输配电及电力电子行业中获得极为广泛的应用,是软磁材料中产量和使用量最大的材料,在低频、大功率下最为适用。但高频下其损耗急剧增加,一般使用频率不宜超过 400Hz。当前,日本在 0.1mm 以下超薄硅钢的生产研发及制造工艺上始终处于领先地位,2020 年 3 月 5 日入列的采用锂电池供电的 SS-511 潜艇(苍龙级第 11 条潜艇“凤龙号”),其内部电气设备的铁心多采用超薄硅钢或非晶材料,从而使该型潜艇内的整体噪声下降 60% 以上,而其辅助推进电机亦采用了超薄硅钢材料为铁心的电机,其输出转矩相较传统硅钢铁心电机提高了至少 20%。而我国目前只能生产 0.15mm 的薄硅钢,且产能极为有限,只针对诸如脉冲电源、特斯拉变压器等某些特殊应用场合进行少量试用,效果较好。

非晶态软磁材料由于非晶态原子排列短程有序长程无序,大幅降低了材料的各向异性,在结构上有利于获得高的磁导率和较低的矫顽力;且非晶、纳米晶软磁合金制备工艺简单,生产周期短,近些年在工业生产中迅速发展。非晶及纳米晶合金具有众多优异力学、物理化学性能:1) 高强度、高硬度;2) 高弹性变形量;3) 优异的磁学性能;4) 优异的耐蚀性能;5) 高化学活性—氧化还原性能;6) 高催化性能等。优异的物理化学性能使非晶合金在节能和环保领域有很好的应用前景。

我国铁基软磁非晶合金研发与应用研究始于 1976 年,

安泰科技股份有限公司历经 40 余载,先后突破了非晶带材在线自动卷取等技术,形成了带材连续生产的多个核心技术,建成了百吨、千吨、万吨级铁基非晶带材生产线,稳定生产带材宽度已可达 340mm。特别是 2015 年开始,我国非晶合金带材产量显著增加。当年国内非晶带材销量 9.4 万吨:其中安泰科技约 3 万吨,青岛云路约 1.8 万吨,其他国产厂家共计约 6000 吨,日立金属株式会社在华销售量约 4 万吨。2015 年国产带材销量首次占 50% 以上。2016 年,中国非晶带材产能约 14 万吨以上,实际产量约 11.3 万吨,首次超过 10 万吨。2016 国内有 5 家企业年产能达到万吨,其中安泰科技股份有限公司作为国内最大的非晶带材生产商。2019 年,国能产能近 20 万吨,规模化生产非晶合金带材的企业有安泰、云路、兆晶、国能、中岳等企业。我国已成为国际铁基软磁非晶/纳米晶合金带材生产和相关产品制造的大国。这为规模化工业应用软磁非晶合金提供了基础。

目前,软磁非晶/纳米晶合金材料已被大量应用于配电变压器、互感器、电抗器等器件,应用领域涉及电力电源、开关电源、仪器仪表、车载电子、工矿/石油、太阳能等领域,特别是在我国,上述各领域对软磁非晶/纳米晶铁芯的需求量仍在不断增加。同时,我国科技工作者正在针对市场需求,开发高性能软磁非晶/纳米晶合金材料,进一步拓展应用领域,满足高频高效节能电机等高端产品对高性能非晶合金的需求。经过近 10 年的能力,我们已在高性能软磁非晶/纳米晶合金研究中取得了显著进展。例如,最近已在实验室研发出饱和磁感强度大 1.65-1.8T 的非晶合金及纳米晶合金,其饱和磁感强度以接近无取向硅钢。现在正在开展生产工艺性研究,以及开展高性能软磁非晶/纳米晶合金材料相关产品的加工制造核心技术研究,以满足高频、高功率密度、高效非晶合金电机和高技术领域发展的需求。由于非晶合金的铁损比超薄硅钢还要好,这是非晶合金成为高效电机的首选新型材料。

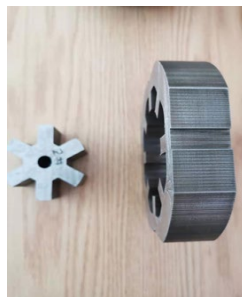
2.2 针对非晶材料开关磁阻电机(SRM)的实验研究现状

开关磁阻电机(Switched Reluctance Motor, SRM)是二十世纪八十年代随着微机控制和电力电子技术迅速发展而崛起的新一代光、机、电一体化调速电机,由 SRM 作为能量转换单元与开关磁阻控制器一起构成的——

开关磁阻电机调速系统 (Switched Reluctance Drive system, SRD), 它具有电机结构简单, 可靠性强, 起动转矩大, 起动电流小, 可四象限运行的优势, 与永磁同步电机相比成本较低, 而且不存在永磁体失磁问题, 与异步电机相比较控制方式灵活简单, 整体系统效率高, 特别是在低速或者轻载运转情况下, 开关磁阻电机效率比异步电机效率高出 10 ~ 30%。已有结果表明开关磁阻电机的众多性能指标达到或者超过了普通的交直流电机, 有极大的优势, 其应用前景十分广泛。

在众多软磁材料中, 非晶软磁合金因其特有的原子无序结构特征使其具有较高的饱和磁感强度 B_s (但仍低于硅钢) 以及优于硅钢的低矫顽力 H_c 、高磁导率和低铁损 P 而备受关注。到目前为止, 非晶软磁合金和基于非晶合金纳米晶化获得的纳米晶合金的饱和磁感强度 B_s 已逐渐接近硅钢合金, 使非晶软磁合金用于制造电机铁芯的潜力突显。更为重要的是频率升高时, 非晶铁芯的铁损随频率增加较为缓慢, 使非晶电机具有更高的效率。同时, 铁损降低会使得温升降低而降低铜损, 可进一步提升非晶电机的效率。在国家重点研发计划和国际自然科学基金委的支持下, 清华大学研究团队已研发出高饱和磁感强度、低矫顽力、高导磁率、低铁损的非晶合金材料。已研发的多个合金系的饱和磁感强度达到 1.7T 以上, 部分合金到达 1.84T, 而矫顽力小于 2~4 A/m, 在 1.75T、1000Hz 的工作条件下, 铁芯损耗小于 12 W/kg。随着以及推进和工艺进一步优化, 非晶合金的软磁性能可望进一步提升, 为工业及国防应用提供高性能候选材料。

目前, 基于非晶合金的 SRM 研究正在推进中, 清华大学研究团队与企业合作已研制出非晶合金开关磁阻电机样机, 初步研究结果表明, 非晶电机具有比硅钢电机更高的效率、更高的输出和更低的损耗。特别是在高频下非晶电机优势明显, 研发的 500W 非晶开关磁阻电机在 7000rpm 的条件下, 效率提高了 7% 以上, 若进一步优化工艺和结构, 可望进一步提升性能和效率。而提高频率可提高输出功率, 或提高功率密度, 减小体积。对于无人机等产品, 减低损耗和提升效率可提升航程或负载, 因此, 非晶合金可望为高功率密度、高频高效电机提供核心支撑。对非晶合金软磁材料的 SRM 与传统硅钢的 SRM 进行实测对比分析。图 1 为实测用非晶合金 SRM 与对比用 SRM 实测电机图片。



(a) 非晶合金定子



(b) 非晶合金 SRM



(c) 传统硅钢 SRM

图 1 实测用非晶合金 SRM 与对比用 SRM

经过初步测试, 可以得出以下主要结论:

- (1) 非晶合金材料优势明显, 转速越高效率越高, 因此特别适用于高速电机的生产;
- (2) 非晶合金材料输出扭矩提升也比较明显;
- (3) 低速下效果不理想, 但通过改变电机设计和控制策略, 比如增加相数, 就可以充分利用非晶的特性, 从而提高低速的输出特性, 这一点将进一步开展验证;
- (4) 本试验对象是 300W 左右的小型开关磁阻电机, 如果用于大功率电机, 效果应该更加明显, 有待于进一步验证。

此外, 结合之前的研究工作可以看出, 铁基非晶合金材料和开关磁阻电机是非常完美的组合。这主要是由于开关磁阻电机定转子形状简单, 更容易加工, 其他类型的电机则结构复杂, 而非晶合金不容易成型、加工。由于开关磁阻电机本身的高速特性就十分优异 (包括但不限于高速控制简单、转子强度高、容易散热、效率高等), 因此非常适合做成高速大功率电机。但是由于非晶合金的工艺性较差, 使加工效率不高, 因此有必要研发非晶合金高效加工技术, 促进高效非晶电机的规模化应用。

2.3 针对非晶合金材料常规电机的理论及实验研究

美国橡树岭国家实验室曾向美国能源部提交研究报告, 指出非晶电机是截至目前唯一一种在效率和功率方面满足 Free CAR 技术指标的电机, 但是由于其生产成本相对较高, 应用场合受到了一定的限制。也有国外的研究非晶合金电机的机构声称非晶合金电机效率比任何传统电机都要高, 而且生产成本与传统电机基本处于同等价位。

非晶合金电机的高效率得益于非晶合金材料的低损耗特性。与传统电机所采用的硅钢片材料相比, 非晶合金材料具有较大的电阻率, 其电阻率一般为 $130\mu\Omega/\text{cm}$, 为传统硅钢片电阻率的 3 倍。在高频磁场中, 大电阻率有效抑制了非晶合金带材的涡流损耗, 此外, 涡流损耗与冲片厚度的平方成正比, 非晶合金带材的单片厚度仅有 0.025mm , 所以非晶合金带材的涡流损耗显著低于冷轧硅钢片。尤其是对于高频电机, 由于频率的升高, 铁心损耗占电机总损耗的比例很高, 使用非晶合金铁心效率提高更加明显 (如图 2 所示)。

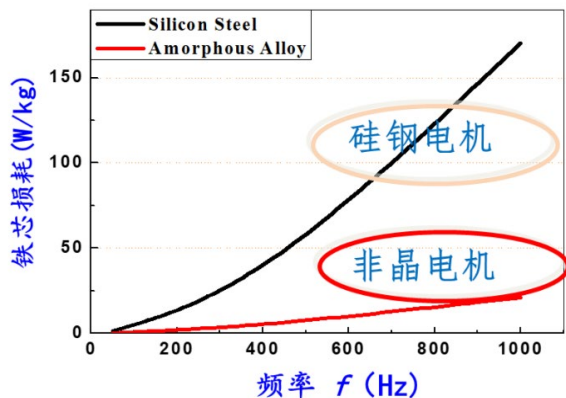


图 2 硅钢 / 非晶定子电机铁芯损耗随频率的变化规律

例如, LE 公司开发的 7kW 、 $2500\text{r}/\text{min}$ 和 24kW 、 $3500\text{r}/\text{min}$ 非晶合金永磁发电机效率比相近功率和转速的常规硅钢片发电机产品高出 1.5% 。2011 年, 中国钢研科技集团及安泰科技股份有限公司李广敏等人分别将非晶与硅钢铁心装配在一台额定功率 5kW 、额定转速 $8000\text{r}/\text{min}$ 的无刷直流电机中进行仿真与测试, 测试结果表明, 当电机定子为非晶合金时, 电机效率可达 88.58% , 硅钢铁心电机的效率为 85.5% , 非晶合金电机的效率提高了 3.08% 。

在相同功率、相同转速情况下, 非晶合金电机的极数和频率可以提高, 可高达上千赫兹以上。而电机的输出功率与频率成正比, 这使得非晶合金电机在高功率密度方面更具竞争力。例如, LE 官方网站的数据显示, LE 的非晶高效发电机的功率密度涵盖了 $0.375\sim 1.765\text{kW}/\text{kg}$ 的范围, 其中 G42L2 型号的非晶合金高效发电机的额定功率为 100kW , 峰值功率高达 150kW , 功率密度最高为 $1.765\text{kW}/\text{kg}$; LE 的非晶高效节能驱动电机的功率密度则覆盖了 $1.404\sim 2.353\text{kW}/\text{kg}$ 的范围, 其中 M42L2 型号的非晶合金驱动电机额定功率 120kW , 峰值功率 200kW , 其功率密度高达 $2.35\text{kW}/\text{kg}$ 。功率密度高意味着同样电机可以节省材料, 降低电机的材料成本和电机的其他损耗。

现代电机发展的显著特点是高效、节能、重量轻、体积小, 在工业设备有限的空间里留给电机的安装空间十分有限, 这就对电机的功率密度提出了很高的要求。非晶合金电机的优异磁特性与电机优化设计的结合使得非晶合金电机的功率密度相对传统电机来说更具优越性。

3 非晶合金电机关键技术难点分析及解决方案

3.1 铁基非晶 / 纳米晶材料关键性能应用技术

铁磁材料在未磁化时, 因其磁偶极子取向呈无序状态而使磁偶极子的矢量和为零, 宏观上不呈现磁性。当施加外场后, 磁偶极子受外场作用而转向外场, 使材料内部磁偶极子呈现定向排列, 从而呈现宏观强磁性。非晶合金因原子呈长程无序排列, 曾被认为不具有宏观磁性。1960 年, Gubanov 通过理论研究认为电子的能带结构主要由原子短程序决定, 即铁磁性是由相邻原子的交换耦合作用产生, 由此预测 Fe 基非晶合金具有铁磁性。这为铁基非晶合金可能具有铁磁性提供了理论基础。

目前,已在工程中大量应用的非晶合金仍然是用于制造变电变压器铁芯的 FeSiB 铁基软磁非晶合金,在我国的牌号是 1K101,对应的国外牌号是 METGLAS 2605SA1 合金,其饱和磁感强度也仅为 1.56T,远低于硅钢(见表 1、表 2)。若能进一步提高铁基非晶合金的饱和磁感强度,将可减小铁芯尺寸、提高工作磁感强度、降低铁损等意义重大。因此,提高铁基软磁非晶合金的饱和磁感强度很有必要。但提高磁感应强度 B_s ,就需要提高铁磁性元素 Fe 的含量,而提高 Fe 含量,便需要减少非晶化元素 B、Si 等元素含量,这会使合金的非晶形成能力降低,从而使非晶合金制备难度增加。此外,加入一些元素时还需要考虑工业化规模生产时的可行性,因为工业化生产是在大气条件下进行的。因此,需要仔细进行合金设计研究。2006 年, Ogawa 等发明了一种商品名为 HB1 的铁基非晶合金 $Fe_{81.7}Si_2B_{16}C_{0.3}$ 和 $Fe_{82}Si_2B_{14}C$, B_s 分别达 1.64T 和 1.67T。研究发现,相比饱和磁感应强度为 1.56T 的 1K101 非晶合金,这种高 B_s 非晶合金在 50Hz/1.4T 工作磁感条件下的损耗值降低了 15%,即具有更高的 HB1 非晶合金在相同的工作条件下的损耗更低。这一研究结果引起了国内外同行的高度重视。尽管在工业化中仍存在不少问题,但这表明在不添加 Co 等贵金属元素的条件下,仍可进一步提高铁基软磁非晶合金的饱和磁感强度。

2009 年, Makino 等开发出了 Fe-Si-B-P-Cu 体系,该体系在纳米晶化后具有高达约 1.9T 的饱和磁感强度,

可与硅钢相媲美,而且该合金具有高磁导率和较小的矫顽力,因此非常有吸引力。该铁基软磁非晶/纳米晶合金体系被注册为 Nanomet。但该非晶合金形成能力低,纳米晶化过程要求非常严格,至今仍难商业化。尽管如此, HB1 和 Nanomet 的出现极大地鼓励了研究人员,引起了铁基软磁非晶合金的第三次研究热潮,即导致了高 B_s 铁基软磁非晶/纳米晶合金的研究热潮。在这一仍在进行中的研究热潮中,我国学者都积极参与其中,取得了不少重要进展。

虽然铁基软磁非晶/纳米晶合金具有矫顽力低、有效磁导率高、铁损低等优点,与传统软磁材料相比,在众多应用中具有明显的优势,但仍存在很多挑战,需要深入开展研究,以满足工业领域和高新技术发展的要求。目前铁基软磁非晶/纳米晶合金研发和应用面临的主要挑战及研发方向有以下几个方面:

(1) 非晶合金的脆性问题。铁基软磁非晶合金、特别是纳米晶合金存在延性低、脆性大的问题,会影响非晶合金材料的加工,需要深入研究影响其延性的因素,探索提升延性的方法。

(2) 饱和磁感强度 B_s 仍偏低,综合磁学性能仍有待进一步提升。目前,大量使用的 Fe 基软磁非晶合金的饱和磁感强度 B_s 仍明显低于硅钢,仍有进一步提升的必要。目前已出现一些具有较高 B_s 的 Fe 基软磁非晶合金体系,但仍存在一些工艺问题。需要进一步研究新工艺或工艺性更

表 1 典型 Fe 基软磁非晶合金及性能

合金	组成成分 /at. %	B_s/T	$H_c/A \cdot m^{-1}$
2605	$Fe_{80}B_{20}$	1.60	6.37
2605SC	$Fe_{81}B_{13.5}Si_{13.5}C_2$	1.61	4.77
2605SA1/1 K101	$Fe_{78}B_{13}Si_9$	1.56	2.40
2605S3	$Fe_{79}B_{16}Si_{15}$	1.58	7.96
2605Co	$Fe_{67}Co_{18}B_{14}Si_1$	1.75	3.98
Amomet	$Fe_{78}B_{12}Si_{10}$	1.56	4.77

表 2 典型 Fe 基软磁纳米晶合金及性能

合金	组成成分 /at. %	B_s/T	$H_c/A \cdot m^{-1}$	$\mu_c/1kHz$
Finement	$Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$	1.24	0.53	100000
Nanoperm	$Fe_{91}Zr_7B_2$	1.70	7.20	14000
Nanoperm	$Fe_{87}Zr_7B_3Cu$	1.55	3.50	20000
Hitperm	$Fe_{87}Co_{44}Zr_7B_4Cu_1$	1.61	10.00	1800
Nanomet	$Fe_{83.3}Si_4B_8P_3Cu_{0.7}$	1.88	7.00	25000
Nanomet	$Fe_{84.3}Si_4B_8P_3Cu_{0.7}$	1.92	10.00	16000
Silicon Steel	Fe-3.5wt%Si	1.97	41.00	770

好的新合金,使合金具有高饱和磁感强度、低的矫顽力和高的磁导率,即获得具有优异综合软磁性能的铁基软磁非晶合金或纳米晶合金;

(3) 缺乏高效的非晶合金加工技术。非晶合金/纳米晶合金因硬度高、较脆,加工较困难,加工效率不高。需要深入研究影响软磁非晶/纳米晶合金加工性能的因素,探索提高加工效率和保证加工质量的技术方法;

(4) 开发满足不同需求的软磁非晶/纳米晶合金体系。不同工业产品对软磁非晶合金磁学性能的要求存在很大差异,需要针对不同应用领域、不同产品,开发满足不同产品需要的多种软磁非晶/纳米晶合金体系。

3.2 非晶合金电机振动噪声技术

非晶合金带材的磁滞伸缩系数是硅钢片的几倍,而且非晶合金材料对应力敏感,为了保证磁性能,压紧力不宜过大,铁心叠压系数低,相对比较松散,因此,非晶合金电机的振动噪声较传统硅钢片电机要大。非晶合金在变压器上的应用已经比较成熟,欧洲电力部门曾对非晶合金变压器和硅钢片变压器的噪声比较进行了试验。结果显示,非晶变压器的声级比同类规格的硅钢片变压器高6~8dB。非晶合金电机虽然没有相关的数据公布,但是可以预见其噪声要高于相同规格的硅钢片电机。因此,后期的研究也将重点围绕振动噪声问题开展,目前可以从以下几个方面进行考虑:

(1) 定子铁芯的设计(包括成型、加工等工艺)

通常情况下,电机铁芯的设计包括铁芯有效长度和主要尺寸比(有效长度和极距之比)、主要尺寸值、气隙、定转子槽配合、槽形及槽尺寸的确定。为了增强设计方案的可行性和试验的对比性,铁芯的有效长度、主要尺寸比、主要尺寸值、气隙、定转子槽配合都选择与现有的硅钢电机的相同。因此,该部分研究主要包括定子槽形的选择和槽尺寸的确定。即利用现有的铁基非晶合金条带,设计出满足给定磁密、低涡流损耗、具有一定机械强度的定子铁芯。

(2) 定子铁芯的成形工艺研究

非晶合金与传统的硅钢片相比,较脆且厚度也仅有硅钢片的十分之一,如果采用传统的制造硅钢片铁芯的冲压工艺,是无法制造出满足要求的非晶定子铁芯的。而且在制造铁芯之前先要将材料剪切成具有一定尺寸的非晶片,并对材料进行退火热处理,以改善材料的磁性能和消除材

料内部的残余应力。除此之外,还需选择合适的粘结剂来实现电机定子铁芯的成形和层间绝缘。因此,该部分研究主要包括铁基非晶带材的剪切、材料的退火热处理以及定子的成形和切割工艺。需要综合考虑加工成本、叠片率、现有的实验条件等因素来选择合适的加工工艺。

(3) 非晶电机测试方法

针对研制的铁基非晶高效三相异步电机,选择需要测量的物理量、参数、性能和合适的测试方法,然后进行电机基本物理量和参数的测试并在电机型式试验台上进行型式试验,测试相关的性能。

基于某公司提供的非晶合金 Metglas2605SA1 的相关参数,将其与硅钢 D23_50 的性能指标比较如表 3 所示,两者的磁化曲线如图 3 所示。由表 3 和图 3 可看出,非晶合金 Metglas2605SA1 具有矫顽力小、电阻率高、厚度薄等优点,虽然其饱和磁感低于硅钢,但有效磁导率远远高于硅钢,这对于作为电机的铁心材料非常有优势。但是其硬度高且极其脆,厚度仅为 0.03mm,对机械应力非常敏感,制造加工难度加大。

表 3 非晶合金 Metglas2605SA1
与硅钢 D23_50 性能比较

性能指标	Metglas2605SA1	硅钢 D23_50
饱和磁感 /T	1.56-1.80	2.07
矫顽力 / (A · m ⁻¹)	4	30
磁致伸缩系数 / × 10 ⁻⁶	26	
电阻率 (μΩ · cm)	130	45
密度 (g · cm ⁻³)	7.18	7.82
叠片系数	0.8	0.95
晶化温度 / °C	520-530	
居里温度 / °C	415	746
抗拉强度 /MPa	1500	343
维氏硬度 /HV	900	181
厚度 /mm	0.03	0.5

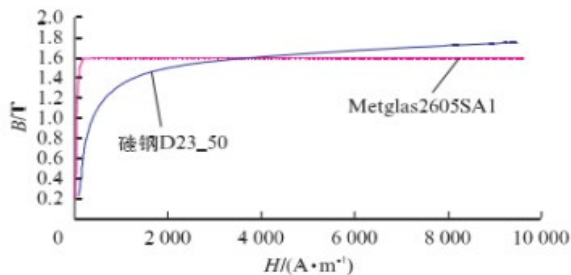


图 3 非晶合金 Metglas2605SA1
与硅钢 D23_50 的磁化曲线图

(4) 降低振动噪声的机理分析、先进工艺研究及降噪措施

电机的振动噪声源主要分为:电磁振动噪声源、机械振动噪声源和空气动力振动噪声源。电机电磁振动噪声又分为电磁力和铁心的磁致伸缩效应引起的。在已有的研究成果中,许多学者都忽略了磁致伸缩效应,着重研究电磁力引起的电机振动噪声。近年来,随着实验测试技术的不断发展,工程应用问题精细化研究的逐步深入,以及有限元计算的不断完善,尤其是多物理场耦合计算的逐步发展,磁致伸缩效应对电机电磁振动的影响逐步受到重视。一些学者对磁致伸缩引起的电机振动噪声开展了相关的研究工作。

非晶合金材料的主要缺陷之一就是磁致伸缩系数较大,由此引起非晶合金永磁电机振动噪声增大。目前国内外学者在研究磁致伸缩引起的电机振动时,普遍采用的计算方法为有限元法。对于磁致伸缩引起的电机振动解析计算方法,尚未见公开文献资料。可以从磁致伸缩引起电机定子铁心振动原理出发,基于压磁方程和牛顿第二定律建立磁致伸缩引起的电机定子铁心振动解析模型。在分析模型的基础上,从电机设计、材料配置、减振降噪措施等方面入手,解决非晶电机的振动及噪声问题。此外,若采用纳米晶合金,则磁致伸缩会很小,也可望显著降低磁致伸缩的影响。

3.3 非晶合金电机制造成本

非晶材料相对于传统电机的缺点也是显而易见,这也是导致此类电机始终没有大范围推广的主要原因。其中之一就是生产成本问题。传统硅钢片电机定转子叠片通常采用冲床进行冲压成型,随着冲压技术的逐渐成熟,传统硅钢片电机定转子叠片的加工费用也越来越低。非晶合金材料虽然具有优异的电磁特性,但是其薄、脆、硬的物理特性导致非晶合金材料冲压加工困难,冲模磨损快,工艺成本增加。

4 总结与展望

由于软磁材料优异的磁性能和使用性能,可靠性更高,环境适应性更强,适用频率范围更广,可以更广泛应用于航空、航天等高科技领域。因此发展具有高饱和磁感应强度、高磁导率、低矫顽力、低铁损的优异软磁材料非晶合金已成为当下以及未来磁性材料发展的重要目标之一。基于此,新型软磁非晶合金材料电机技术受到了国内外的一致追捧,并逐步将应用拓展国防科技等重大领域。本文综述了非晶合金材料以及非晶合金材料在电机中的工作原理、研究现

状和主要应用构型,并根据其发展需求对关键技术难点进行了分析,现将需要进一步解决的关键技术梳理如下:

(1) 非晶合金的脆性问题。非晶合金材料对应力非常敏感,因此优异性能的非晶合金铁心对其加工工艺提出了非常严格的要求在非晶合金电机的研发过程中必须重视非晶合金铁心的加工工艺,力争在成本允许的情况下降低非晶合金电机铁心损耗,充分发挥非晶合金电机的性能优势;

(2) 进一步提升饱和磁感强度 B_s 。需要进一步研究新工艺或工艺性更好的新合金,使合金具有高饱和磁感强度、低的矫顽力和高的磁导率,即获得具有优异综合软磁性能的铁基软磁非晶合金或纳米晶合金;

(3) 高效的非晶合金加工技术。需要深入研究影响软磁非晶/纳米晶合金加工性能的因素,探索提高加工效率和保证加工质量的技术方法同时也可以降低生产成本,有利于推广;

(4) 开发满足不同需求的软磁非晶/纳米晶合金体系。需要针对不同应用领域、不同产品,开发满足不同产品需要的多种软磁非晶/纳米晶合金体系;

(5) 降低电机的振动噪声。非晶合金电机的振动噪声较传统硅钢片电机要大。后期的研究可以重点从1)定子铁芯的设计(包括成型、加工等工艺)2)定子铁芯的成形工艺研究3)非晶电机测试方法4)降低振动噪声的机理分析、先进工艺研究及降噪措施等方面进行研究分析。

参考文献

- [1] 王倩莹,卢俊文,蒋书贤.非晶合金电机的研究综述[J].机电传动,2014(03):10-13.
- [2] 张静,李莉,贾志伟,庞树芳,张海利,游清雷,杨平,蒋奇武.不同工艺下取向硅钢超薄带中Goss织构取向分析[J].材料热处理学报,2020,41(10):80-85.
- [3] 韩雪岩,佟文明,唐任远.非晶合金在电机中的应用[J].电工电能新技术,2014,33(12):46-52.
- [4] 吴晓丹,张华.新基建:非晶合金材料产业的新机遇[J].电器工业,2020(05):11-13.
- [5] 陈国钧,涂国超,吕玮.非晶纳米晶软磁材料在高效电机中的应用[J].磁性材料及器件,2012,43(02):1-5+71.
- [6] 吴越虹.非晶合金高速开关磁阻电机电磁及振动特性研究[D].

哈尔滨工业大学, 2019.

[7] 姚可夫. 高饱和磁感强度铁基软磁非晶合金研究进展 [A]. 中国金属学会. 第十二届中国钢铁年会论文集——大会特邀报告 & 分会场特邀报告 [C]. 中国金属学会: 中国金属学会, 2019:1.

[8] 于灏琛. 基于非晶合金材料的永磁电机设计 [J]. 电子元件与信息技术, 2020, 4(05):17-18.

[9] 丁华平, 龚攀, 姚可夫, 邓磊, 金俊松, 王新云. 非晶合金零件成形技术研究进展 [J]. 材料导报, 2020, 34(03):139-147.

[10] 朱佳瑶, 孙超, 钱文文, 朱尧平, 邹仕豪, 姚喜贵. 非晶合金定子电机性能分析与设计 [J]. 轻工科技, 2019, 35(05):59-60.

[11] Zhu Longfei, Tong Wenming, Han Xueyan, et al. Iron loss research of amorphous alloy motor by considering the

influences of solidifying and annealing on stator core. 2017, 36(6):1612-1622.

[12] Qin Ting Chen, Xi Ping Li, Shuang Wang, et al. Study on Performances of Amorphous Three-Phase Asynchronous Motor. 2016, 4089:542-547.

[13] 朱健, 曹君慈, 刘瑞芳, 丁宇行. 电动汽车用永磁同步电机铁心采用非晶合金与硅钢的性能比较 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(S2):352-358.

[14] Kolano R, Krykowski K, Kolano-Burian A, et al. Amorphous Soft Magnetic Materials for the Stator of a Novel High-Speed PMLDC Motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(4):1367-1371.

上接139页

组使用的铜线材质提出新的挑战；在高频率开关电源上，如何在成本和性能之间取舍也是考验设计能力的难题。

CODACA 在大电流电感领域开发了大量不同封装尺寸和结构的产品 (Fig.10)，具有非常大的产品线优势，这一切和扁线工艺的提升离不开关系。传统的圆铜线在窗口利用率 (window utilization) 方面显得捉襟见肘，同时因为 AC 响应的趋肤效应和涡流损耗的问题，使得它在大电流应用上常常浪费很多绕线空间而无法实现更高的功率密度也即最优化空间电流容纳率。扁平铜线能够比较好的解决这些问题，但是扁平铜线的加工绕制过程中会遇到比如弯角的机械强度问题，绝缘层的保证问题，以及加工绕制的机床磨具设计问题等。

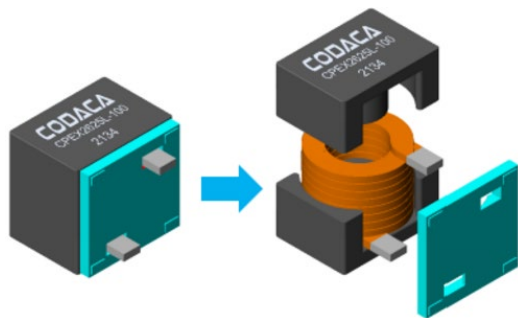


Fig.10 CODACA 大电流产品 CPEX2825 系列

在这样的产品设计上，绕线的难度比磁芯的选择更考验制造商的工程技术能力。但这还不是全部：在以铁氧体

(Ferrite) 为磁芯的电感产品系列上，因为材质内部本身是经过 1300 多度高温烧结 (sintering) 而成，无法填充分布式气隙，因此不能承受较高的峰值电流；为了使电感能够获得更高的饱和电流 (I_{sat}) 常常需要在加工组装过程中人为制造气隙，也即常说的“磨气隙”或者结构气隙。那么就会出现至少 2 个相当具有智慧挑战性的工程问题：气隙开在什么位置和开出多少气隙满足饱和电流的要求，并且能够做到最低的损耗。很明显，这个问题已经不再是磁芯单独的问题，而是完全要从产品的总体性能来考虑的问题。线圈绕组与气隙的相对位置决定了耦合系数，这会使得气隙的有效率产生变化，而另外一方面，因为气隙内的磁通是自由穿透铜线绕组的，在涡流损耗方面又会产生明显的差别，如何衡量，是需要累积相当多的工程设计经验的，限于篇幅，此处就不再一一拓展了。

综述

诚如以上这些细节的观察 (这里只是罗列了一少部分的问题)，电感的设计虽然对磁芯的要求始终放在重要的位置，但是在实际的工程问题上，磁芯仅仅只是各种参考要素的一部分。为了设计实用的储能型电感，也即实现足够的饱和电流同时又能兼顾最低的损耗，往往更需要的是对磁芯更严谨的测试测量方法以及依据磁芯材质而设计的线圈绕组结构。