

高速开关磁阻电机用纳米晶定子铁心 磁特性研究*

李立军^{1,2}, 卢志超^{1,2}, 李 准², 吴晓荣², 高 昇², 李德仁²

(1. 钢铁研究总院, 北京 100081;

2. 中国钢研科技集团有限公司 安泰科技股份有限公司, 北京 100094)

摘 要: 以 1 台 4/2 极结构高速开关磁阻电机(SRM)为研究对象, 研究纳米晶铁心磁特性及其对电机性能的影响。将采用叠块切割法制备的纳米晶定子铁心与传统硅钢冲片铁心做对比测试。搭建电机测试系统, 对分别装配两种定子铁心电机的静态特性和负载运行性能做对比分析。结果表明: 纳米晶合金铁心具有高磁导率、低矫顽力及低损耗特性, 在 1 kHz、1 T 条件下, 其损耗仅为 35W300 硅钢铁心的 1/20; 纳米晶合金铁心提高了 SRM 在铁心不饱和区的相电感峰值, 并在转速 25 000 r/min 负载运行下显著降低了电机温升和输入功率。研究结果可为高效、高速 SRM 设计提供参考。

关键词: 纳米晶铁心; 高速电机; 铁耗; 相电感; 磁链

中图分类号: TM 352 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)01-0088-06

Magnetic Characteristics of Nanocrystalline Alloy Stator Core for High Speed Switched Reluctance Motor*

LI Lijun^{1,2}, LU Zhichao^{1,2}, LI Zhun², WU Xiaorong², GAO Sheng², LI Deren²

(1. Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China;

2. Advanced Technology and Materials Co., Ltd., China Iron and Steel Research Institute Group, Beijing 100094, China)

Abstract: With a 4/2 geometry high-speed switched reluctance motor (SRM), the magnetic properties of nanocrystalline stator core and their effects on the motor were analyzed. First, the stator core fabricated by wire-electrode cutting was tested and compared with the silicon steel core. Then, the motors were tested in static and running in load modes. Results indicated that the nanocrystalline core had higher magnetic permeability, smaller coercivity and lower core loss, with only 1/20 of 35W300 silicon steel core loss under the excitation conditions of 1 kHz and 1 T. The motor with nanocrystalline stator core had higher phase inductance, in comparison with the silicon steel core motor, and both core loss and input power of which were reduced at a speed of 25 000 r/min and the same output power. Results could be used for the optimization and performance improvement of high speed SRM.

Key words: nanocrystalline core; high speed motor; core loss; phase inductance; flux linkage

0 引 言

高速电机具有功率密度大、动态响应快、传动效率高等特点^[1], 在精密加工、新能源以及航空航天等领域的应用越来越广泛。然而, 高速电机铁

心内磁通变化频率提高会导致铁心损耗急剧增大, 寻求高性能、低损耗的铁磁材料成为促进高速电机性能提升和技术变革的重要方向^[2]。

非晶态合金是诞生于 20 世纪 60 年代的新型软磁材料, 特殊的长程无序原子结构使其具有高

* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0300502)

作者简介: 李立军(1982—), 博士, 高级工程师, 研究方向为非晶软磁材料开发及其在电机中的应用。

磁导率、低损耗等优良磁特性。1982 年,美国实现铁基非晶带材连续化的生产并随后将其大规模地应用于配电变压器铁心,可降低变压器空载损耗 70% 以上^[3]。1988 年,日本学者 Yoshizawa^[4]在非晶合金基础上通过晶化处理开发出纳米晶软磁合金,此种合金较铁基非晶有更高的磁导率、更小的矫顽力及更低的磁滞损耗,并且成本低廉,可代替钴基非晶合金应用于高频电力电子和电子信息领域,成为非晶态合金研发的一个新方向。

非晶、纳米晶带材具有薄、硬、脆等特点,因此,若采用与硅钢电机铁心相同的冲片法加工非晶电机铁心,工艺难度大、生产效率低。随着加工技术和设备的不断进步,叠块切割法成为非晶、纳米晶电机铁心比较成熟的加工方法,即先将带材剪段并叠成方块,再经过定型、热处理及浸漆固化制成块体坯料,最后采用线切割或铣削加工制成电机铁心^[5]。国内外学者陆续将非晶、纳米晶铁心应用到感应电机^[6-7]和永磁电机^[8-9]等机型中,在电机效率提升方面取得了显著效果。例如,2012 年,波兰工业大学 Dems 等^[7]对 1 台具有非晶定子铁心的高速感应电机在最高 200 Hz 供电频率下的效率做了测试及模拟计算,电机铁耗明显降低;2016 年,波兰的 Kolano 等^[9]将激光切割非晶定子铁心应用于 1 台 800 W、最高 60 000 r/min 的永磁直流无刷电机中,电机运行效率在较宽转矩范围内达到 90% 以上;2017 年,日本日立金属公司和丰田公司研究人员将纳米晶合金应用于 3 000 r/min 的永磁同步电机定子铁心,将电机损耗降低了 64%~75%^[10]。

相对于感应电机和永磁电机,开关磁阻电机(SRM)定、转子铁心均为凸极结构,转子无绕组和永磁材料,结构简单,可靠性高,更适合高速运转,已成功应用于电动汽车驱动电机^[11]和家用电器^[12]等领域。但是,SRM 的效率和功率密度仍低于永磁电机。日本东京理科大学研究团队曾尝试用多种新型铁磁材料取代传统硅钢以提升电机性能^[13-14]。2008 年,非晶叠块铁心被应用于 1 台 2.4 kW、8 500 r/min 的 SRM,电机效率较硅钢电机由 88.9% 提升至 95.1%。

可以预测,若将损耗特性更好的纳米晶合金应用于 SRM,可进一步提升其综合性能。SRM 铁心磁通波形为非正弦波且存在严重的局部饱和,

电机的静态电感特性、磁链特性及转矩特性均与电机铁心的磁性能密切相关^[15]。因此,本文系统地研究了纳米晶铁心的磁性能及其对高速 SRM 性能的影响。

1 试验方法

1.1 铁心制备及测试方法

纳米晶铁心选用国产牌号为 1K107 的纳米晶合金带材制备,带厚为 23 μm ,带宽为 80 mm。首先,将带材剪成 80 mm 长的带片,然后叠成 80 mm×80 mm×30 mm 的方形叠块,在氮气环境下进行热处理并保温 90 min;将处理好的叠块浸入环氧树脂浸漆液中浸泡 1 h,然后在固化炉 170 $^{\circ}\text{C}$ 环境中保温 2 h 固化;最后,采用线切割方式在叠块中切出定子铁心,如图 1 所示。

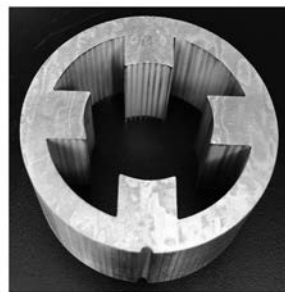


图 1 线切割法制备的纳米晶定子铁心

另外,硅钢铁心选用牌号为 35W300 的无取向冷轧硅钢片,定、转子均采用冲片、叠铆方式制备。

采用 IWATSU 公司的 $B-H$ 测试系统测量定子铁心在不同频率下的磁化性能及损耗特性。按照 IEC 62044 标准测试。

1.2 电机静态测试方法

通过分度盘卡爪夹紧电机转子轴以调整和固定转子极与定子极的相对位置,然后依次对电机在不同转子位置角下的相电感进行测试;采用 Agilent 公司的 E4980A 精密阻抗分析仪测量绕组在不同频率下的等效相电感;采用 EDK 公司的 DPG10 功率电感测试仪用大信号脉冲法测量绕组在不同电流值下的增量电感及电机相电阻。

测试电机静态转矩时,将扭矩传感器一端与电机主轴通过联轴器连接,另一端仍由分度盘卡爪夹紧,对电机某相绕组通入恒定直流电流并测

试其在不同转子位置角下的静态转矩。

1.3 电机负载运行测试方法

将配套的离心风机作为负载与电机装配,通过电机驱动器(含功率变换及控制单元)、编码器调节电机转速。采用 Tektronix 公司 MSO 4104 型示波器检测电机相电流波形及有效值,采用热电偶测量电机定子铁心外表面温度并自动记录温升曲线,采用 Fluke 公司的 NORMA 5000 型功率分析仪测试电机输入功率。

2 结果与讨论

2.1 铁心磁性能

图 2 所示为纳米晶铁心和硅钢铁心在 50 Hz、1 kHz 下的交流磁化曲线。其中,纳米晶铁心在两个频率下的磁化曲线基本重合,其磁导率几乎不受测试频率变化影响。与之相比,硅钢铁心在 50 Hz 和 1 kHz 下的磁化曲线出现偏离,且磁导率随频率升高而下降。另外,纳米晶铁心的饱和磁密值低于硅钢铁心,在 1 kHz、1 000 A/m 条件下,两者的磁通密度分别为 1.11 T 和 1.44 T。

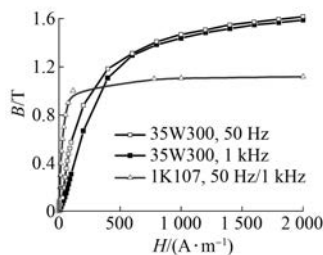


图 2 纳米晶铁心与硅钢铁心 $B-H$ 曲线对比

选取两种铁心在 1.0 T、50 Hz 和 1 kHz 频率下的测试数据并绘制磁滞回线,如图 3 所示。纳米晶铁心磁滞回线呈现为陡、窄的特点,其矫顽力、剩磁远小于硅钢铁心,磁滞回线所包围的面积,即一个磁滞循环内的能量损耗也远小于硅钢铁心。

图 4、图 5 分别为纳米晶铁心和硅钢铁心在不同频率下的损耗曲线。在 1 kHz、1.0 T 条件下,纳米晶铁心损耗值为 5 W/kg,而硅钢铁心损耗值为 100 W/kg,前者仅为后者的 1/20。

2.2 电机结构参数

高速 SRM 设计为两相 4/2 极结构,定、转子之间为不均匀气隙,如图 6 所示。电机采用短时

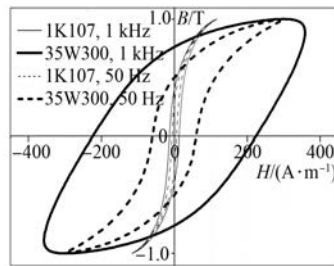


图 3 纳米晶铁心与硅钢铁心磁滞回线对比

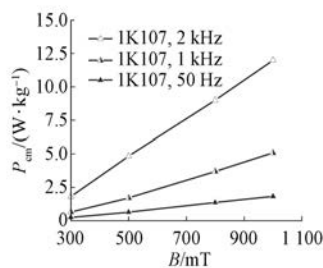


图 4 纳米晶铁心损耗测试曲线

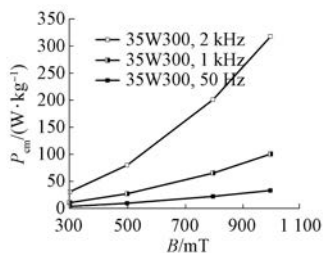


图 5 硅钢铁心损耗曲线

工作制,驱动器采用单相交流 220 V 供电。当转速为 25 000 r/min 时,定子绕组的脉冲频率为 833 Hz。电机主要结构参数如表 1 所示。

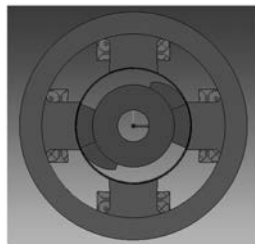


图 6 SRM 结构

分别将相同结构的纳米晶定子铁心和硅钢定子铁心装配为纳米晶电机 (NCM) 和硅钢电机 (SIM),两种电机转子均采用硅钢铁心。

表 1 电机结构参数

参数名称	参数值	mm
定子外径	72	
定子轭厚	7	
转子外径	36.5	
转子轭厚	5	
气隙长度	0.25	
铁心长度	30	

2.3 电机静态特性

图 7 所示为采用精密 LCR 测试仪测得的电机等效相电感曲线族,测试频率分别为 50 Hz、1 kHz 和 2 kHz,定义相电感最小对应的转子位置角为 0°。由于电机转子具有不均匀气隙,电机的相电感在 108°转子角位置处达到峰值,此时定、转子极完全对齐,气隙最小,磁路的有效截面积最大。在 1 kHz 条件下,纳米晶电机的相电感峰值高出硅钢电机 53%,分别为 13.6 mH 和 8.99 mH。

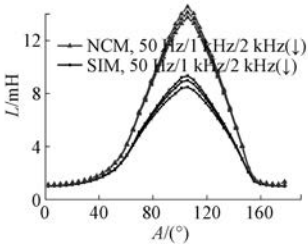


图 7 纳米晶电机与硅钢电机相电感曲线

选取电机转子极与定子极在完全对齐、半对齐、开始对齐及完全不对齐 4 个位置下测得的电感-电流曲线数据,绘制出其磁链-电流曲线如图 8 所示。4 个位置分别对应转子位置角为 108°、90°、45°和 0°,曲线上某点的斜率即为该点所处电流值下实测的增量电感值。

可以看出,当转子极处在 0°和 45°位置角时,定、转子极气隙较大,相电感较小且基本不受铁心材料磁性能影响;当转子处在 90°和 108°位置角时,定、转子气隙较小,相电感值较大。在相电流较小区域(小于 5 A),两种电机铁心均处于不饱和状态,纳米晶电机的曲线斜率略大于硅钢电机;但当相电流较大时,由于纳米晶铁心饱和磁密值较小,电机的饱和磁链值明显小于硅钢电机。

图 9 所示为两种电机某相绕组在 5 A 和 10 A

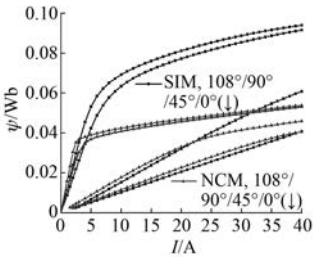


图 8 纳米晶电机与硅钢电机磁链-电流曲线对比

恒定电流激励下测得的电机静态转矩曲线。由于电机转子的不均匀气隙结构,两种电机均在 63°转子位置角时达到静态转矩最大值。结合图 8 分析,纳米晶电机静态转矩在小电流区(5 A)基本与硅钢电机一致,但在大电流区(10 A),纳米晶铁心已进入饱和状态,其静态转矩明显小于硅钢电机。

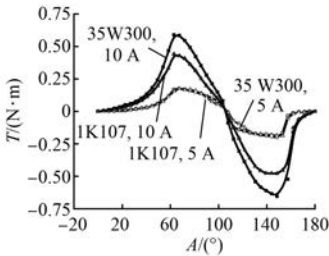


图 9 纳米晶电机与硅钢电机静态转矩对比

为分析铁心磁特性对电机特性的影响,采用 SRM 线性模型对电机内部的基本电磁关系和基本特性进行定性分析。

在线性模型中,忽略磁路饱和及电机磁场边缘扩散效应,SRM 的功率平衡方程和电磁转矩方程分别由式(1)、式(2)描述:

$$U_s i = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L i^2 \right) + i^2 \frac{dL}{d\theta} \omega_r \tag{1}$$

$$T(\theta, i) = \frac{i^2}{2} \frac{dL}{d\theta} \tag{2}$$

式(1)、式(2)表明,当 SRM 相绕组通电时,若不计绕组损耗,输入功率($U_s i$)一部分用于增加绕组储能($Li^2/2$),另一部分则转换为机械功率输出。可以看出,电机的机械功率和电磁转矩均与其相电感对转子位置角的变化率($dL/d\theta$)成正比关系。因此在图 7 所示结果中,纳米晶电机铁心相电感值较硅钢电机有显著提升,且在高频激励

下电感衰减要小于硅钢电机,此特性更有利于纳米晶电机在高频、高速下电机转矩的提升。

对于 SRM 定、转子及气隙组成的有效磁路,其相电感 L 与绕组匝数 N 、气隙磁阻 R_g 和铁心磁阻 R_c 有关:

$$L = \frac{N^2}{R_g + R_c} = \frac{\mu_0 A_c N^2}{l_g + \frac{l_c}{\mu_{rc}}} \tag{3}$$

参照式(3),铁心磁阻可由磁路截面积 A_c 、气隙长度 l_g 、磁芯长度 l_c 以及磁芯的相对磁导率 μ_{rc} 计算。可以看出,在结构参数相同的条件下,纳米晶铁心磁导率较大是电机相电感峰值提升的主要原因。

2.4 电机负载运行特性

图 10 所示为纳米晶电机在 25 000 r/min 负载运行时的相电流波形。硅钢电机的相电流波形相似,仅在导通时间和电流峰值上略有差别。

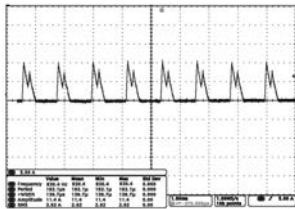


图 10 纳米晶电机在 25 000 r/min 工况下的相电流波形

忽略电机及负载风机装配误差,忽略风摩阻,可认为电机在相同转速下具有相同的轴功率输出。因此,电机输入功率 P_1 、电机轴功率 P_F 、铜耗 W_R 和铁耗 W_C 的关系如式(4)所示,其中铜耗 W_R 由相电流 I_p 及相电阻 R 按式(5)计算得出:

$$P_1 = P_F + W_R + W_C \tag{4}$$

$$W_R = I_p^2 \times R \times 2 \tag{5}$$

表 2 所示为两种电机负载运行时的测试参数及铜耗计算值。可以看出,在相同转速、相同输出功率的工况下,纳米晶电机相电流的峰值和有效值略低于硅钢电机,其计算铜耗值略低于硅钢电机(约低 5 W),但纳米晶电机的输入功率较硅钢电机明显降低(约 56 W)。由此可估算,纳米晶电机的铁心损耗较硅钢电机降低约 51 W。

铁心损耗和绕组电阻损耗所产生的热量是造成电机温升的主要原因。图 11 所示为采用热电

表 2 电机负载运行测试参数

参数名称	硅钢电机	纳米晶电机
相绕组电阻/ Ω	0.71	0.64
转速/($r \cdot \min^{-1}$)	25 000	25 000
相电流频率/Hz	833	833
相电流峰值/A	13.10	11.40
相电流有效值/A	3.32	2.92
铜耗计算值/W	15.65	10.91
输入功率测试值/W	311	255

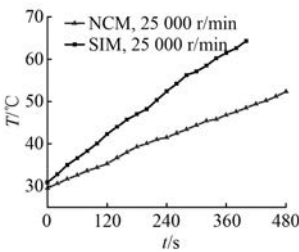


图 11 两种电机负载运行时的铁心温升曲线

偶测量电机定子铁心外表面的温升曲线。可以看出,在 25 000 r/min 负载运行条件下,纳米晶电机铁心温升曲线斜率显著低于硅钢电机,在第 360 s 时两者温度由室温分别升至 47 ℃ 和 62 ℃。温升测试曲线对比结果与电机输入功率测试值及电机损耗计算值基本吻合。可见,在高速、高频工况下,纳米晶铁心的低损耗特性可明显降低电机温升,提升电机效率。

3 结 语

本文通过试验方法对比分析了纳米晶铁心磁特性及其对高速 SRM 性能的影响。结果表明:与硅钢铁心相比,纳米晶铁心磁导率较高且在高频下基本不变,可提高 SRM 在高频激励下等效相电感峰值,从而有利于电机在高速、高频工况下转矩提升;纳米晶铁心具有低矫顽力和低损耗特性,在 1 kHz、1 T 条件下,其损耗仅为硅钢铁心(35W300)损耗的 1/20,可显著降低高速电机铁耗及温升,从而提升电机效率。然而,纳米晶铁心的饱和磁密较低,降低了电机在磁饱和区的磁链值和静态转矩值,从而影响电机最大输出功率。本文研究结果可为纳米晶高速电机的设计提供参考。

【参考文献】

- [1] 张凤阁, 杜光辉, 王天煜, 等. 高速电机发展与设计综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7): 1.
- [2] ANDREAS K, ALDO B, ANDREA C. Soft magnetic material status and trends in electric machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(3): 2405.
- [3] LI D R, ZHANG L, LI G M, et al. Reducing the core loss of amorphous cores for distribution transformers [J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2012, 22(3): 244.
- [4] YOSHIZAWA Y, OGUMA S, YAMAUCHI K. New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure[J]. Journal of Applied Physics, 1988, 64(10): 6044.
- [5] 李山红, 卢志超, 李德仁, 等. 高速电机用非晶合金定子铁心的损耗特性研究[J]. 微特电机, 2009, 37(6): 24.
- [6] 王倩营, 李春茂, 卢俊文, 等. 非晶电机机械性能与电磁特性的数值分析[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(3): 13.
- [7] DEMS M, KOMEZA K. Finite element and analytical calculations of no-load core losses in energy-saving induction motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(7): 2934.
- [8] 张超, 朱建国, 佟文明, 等. 基于裂比的非晶合金永磁电机设计技术[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(8): 48.
- [9] KOLANO R, BURIAN A K, KRYKOWSKI K, et al. Amorphous soft magnetic core for the stator of the high-speed PMLDC motor with half-open slots[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(6): 2003005.
- [10] DENIS K, INOUE M, FUJISAKI K, et al. Iron loss reduction in permanent magnet synchronous motor by using stator core made of nanocrystalline magnetic material[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(11): 8110006.
- [11] KIYOTA K, KAKISHIMA T, CHIBA A. Comparison of test result and design stage prediction of switched reluctance motor competitive with 60-kW rare-earth PM motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(10): 5712.
- [12] HIEU P T, LEE D H, AHN J W. Design of a high speed 4/2 switched reluctance motor for blender application[C] // IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific, 2017.
- [13] CHIBA A, HAYASHI H, NAKAMURA K, et al. Test results of an SRM made from a layered block of heat-treated amorphous alloys[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2008, 44(3): 699.
- [14] HAYASHI H, NAKAMURA K, CHIBA A, et al. Efficiency improvements of switched reluctance motors with high-quality iron steel and enhanced conductor slot fill[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(4): 819.
- [15] 吴红星. 开关磁阻电机系统理论与控制技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

收稿日期: 2018-08-20

(上接第 87 页)

- [18] DU Y, XIAO F, HUA W, et al. Comparison of flux-switching PM motors with different winding configurations using magnetic gearing principle [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(5): 8201908.
- [19] 徐姐, 林明耀, 付兴贺, 等. 混合励磁轴向磁场磁通切换型永磁电机静态特性[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 58.

收稿日期: 2018-08-20