

文章编号 1004-924X(2016)11-2761-08

小型非晶三相感应电机铁芯的性能

官宁宁¹, 高春甫¹, 李熹平^{1,2*}

(1. 浙江师范大学 工学院, 浙江 金华 321004;

2. 浙江大学 流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310028)

摘要:以常见的小型三相异步电机为研究对象,建立了三相异步电机模型,并用铁基非晶材料和硅钢材料分别制作了异步电机的定子铁芯,研究了非晶铁芯与硅钢铁芯的性能和特点。采用软磁交流测试系统对两种材料制成的铁芯进行了交流损耗和矫顽力的测试,测试结果显示:在相同的频率和磁感应强度下,非晶铁芯损耗仅为传统硅钢铁芯损耗的 1/3 左右,而其剩磁仅为传统铁芯剩磁的 1/4,表明非晶铁芯的损耗和矫顽力远小于硅钢铁芯的损耗和矫顽力,且工作频率越高,二者数据差别越大,说明非晶材料较硅钢材料具有更优异的软磁性。建立了三相异步电机的有限元分析模型,对非晶合金铁芯电机和传统硅钢铁芯电机进行了有限元求解。结果显示,采用非晶定子铁芯的电机比传统采用硅钢定子铁芯的电机更加高效节能。该研究成果为深入开展铁基非晶材料在异步电机中的应用提供了参考。

关键词:三相感应电机;非晶铁芯;硅钢铁芯;有限元分析;交流损耗;矫顽力

中图分类号:TM35 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162411.2761

Performance of stator iron core for amorphous three-phase induction motor

GONG Ning-ning¹, GAO Chun-fu¹, LI Xi-ping^{1,2*}

(1. College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China;

2. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control,
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

* Corresponding author, E-mail: lxp2010@zjnu.cn

Abstract: By taking common three-phase asynchronous motors for objective, a motor model was established, and the stator iron cores of the asynchronous motor was prepared by the Fe-based amorphous alloy and silicon steel, respectively. The performance and characteristics of stator iron cores made of Fe-based amorphous alloy and silicon steel were researched. Then, the alternating current losses and coercive forces of two kinds of iron cores were also tested by a soft magnetic testing system. Test results show that the alternating current loss of the amorphous core is only 1/3 that of the traditional silicon steel core, and its residual magnetism is only 1/4 that of the traditional one under the same frequency and magnetic induction intensity. These data indicate that the alternating current loss and coercive force from the former are far less than that of the latter and the higher the working frequency is, the greater the difference between the two data is, showing that amorphous material has more excellent soft magnetic characteristics than silicon steel materials. Moreover, a

收稿日期:2016-06-10;修订日期:2016-07-20.

基金项目:中国博士后基金面上资助项目(No. 2012M511359);中国博士后基金特别资助项目(No. 2014T70579)

finite element analysis model for the three-phase induction motor was established, and the characteristics of the motors made of two different materials were calculated. Results show that the characteristics and efficiency of the motor with the amorphous alloy core are much better than that of the motor with the silicon steel core. These results presented have important significance for the further study of the amorphous motors.

Key words: three-phase induction motor; amorphous core; silicon steel core; finite element analysis; iron loss; coercive force

1 引言

电机作为工业生产和日常生活中重要的动力设备,其耗电量也在各种电气设备中位居首位。目前,电机普遍采用硅钢片制作铁芯,磁导率较低,在工作中损耗较大,尤其是当电机在较高的频率下工作时,其损耗会随着转速的升高迅速增加。提高电机的效率,可以在很大程度上节约能源,并减少温室气体的排放^[1-2]。铁基非晶合金是 20 世纪 70 年代问世的一种新型材料,具有优异的磁性、耐蚀性、和较高的电阻率等优点。非晶合金特点是饱和磁感应强度高,磁导率远高于硅钢片,而矫顽力与铁损低于硅钢片。目前,铁基非晶合金已经成功应用于电力/电子工业、军事装备、运动器材、微型机械器件等领域。非晶合金代替传统的硅钢片用于制造电机铁芯,可以提高电机效率,减小电机的体积和重量,提高电机的功率密度,并可使其在更高的频率下工作。由于非晶电机具有的上述优点和巨大潜力,采用非晶合金制作电机的铁芯引起了国内外研究院所和各大企业的高度重视。早在 1992 年, T. A. Lipo^[3]等人就由非晶合金带材直接绕制轴向磁场电机定子铁芯,有效提高了电机的工作效率。Wang^[4]等利用非晶材料设计制作了小型的永磁非晶电机的铁芯,研究发现,在一定条件下,该非晶电机是效率可达到 85% 以上。Kolano^[5]等非晶材料设计了永磁无刷直流电机定子铁芯,研究发现,工作过程中定子铁芯的损耗小于 7 W,远低于传统硅钢材料的损耗。Nosenko^[6]等优化了采用电流加热退火非晶铁芯的方法,有效提高了非晶铁芯的初始磁导率。在国内,钢铁研究总院王立军^[7-10]等人展开了对非晶电机的成形加工、性能测试的研究,研究发现,电机在高速运转下,相同规格的非晶铁芯损耗远低于硅钢电机的铁芯损耗。山东大学高军等^[11-12]系统研究了铁基非晶电机的设计方法,探

讨了非晶合金定子铁芯的成形工艺以及电机整机的测试方法,为非晶电机的理论研究和应用推广奠定了基础。天津理工大学冷建伟^[13]等建立了非晶电机的有限元模型,并对非晶合金电机的瞬态场、涡流场等进行了求解,分析了电机的空载和额定运行时的场量分布、损耗等参数。研究结果表明,与传统的硅钢电机相比,非晶电机的响应速度更快,效率更高。Fan^[14]等借助 Matlab 平台,优化设计了非晶电机的结构参数,相比于传统的电机,非晶电机的体积缩小了 31%,其功率密度提高了 45%。从以上文献可以看出,由于非晶材料优异的磁性能,其在电机行业的应用已逐步得到重视,但针对非晶材料在三相异步电机的应用研究较少。本文以工业应用中常见的小型三相异步电机为研究对象,建立了三相异步电机模型,并用铁基非晶材料和硅钢材料分别制作了异步电机的定子铁芯,对比分析了不同材料制作的电机铁芯的性能特点,并探讨了非晶材料在三相异步电机的应用前景。

2 电机模型制作与性能测试分析

2.1 铁芯模型制作

非晶带材厚度较薄(0.03 mm 左右),且硬度和脆性较高,难以用常规方法成形。为探讨铁基非晶材料在径向电机的应用前景,以工业应用中小型三相异步电机为研究对象,对其铁芯进行加工制作,并对铁芯的铁损和矫顽力进行测试。中小型异步电动机的转子大都是采用鼠笼型铸铝导条转子。转子铁芯在成形过程中要进行铝水浇铸,以形成转子导条和端环。由于铝的熔点为 660 °C 左右,远超出铁基非晶合金材料的晶化温度(550 °C),将非晶材料应用到转子铁芯中存在一定困难。因此,只对电机定子铁芯材料进行改变,即仅利用非晶带材加工制成定子铁芯,并与原硅钢定子铁芯的性能进行对比研究,转子铁芯不

做改变。为降低模型的制作难度,选定的小型三相异步电机的定/转子结构如图 1 所示,其定子和转子的参数如表 1 所示。

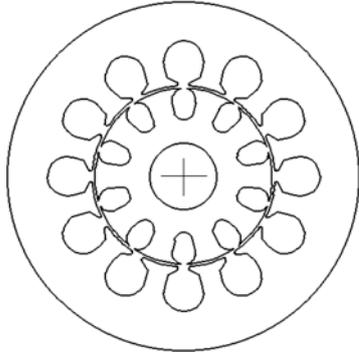


图 1 电机模型截面示意图
Fig. 1 Schematic diagram of motor

表 1 电机铁芯参数

Tab. 1 Core parameters of motor

铁芯	槽数	外径/mm	内径/mm	槽型	长度
定子	12	56	29	梨形槽	56
转子	10	28	11	梨形槽	56

由于非晶带材加工方法的特殊性和复杂性,非晶电机铁芯的加工制作特别是径向非晶电机铁芯的加工制作难度较大。经过前期研究并参考国内外学者的做法^[9,11],图 1 所示的非晶定子铁芯确定的加工制作工艺如图 2 所示。该制作流程解决了非晶定子铁芯热处理固化过程中易受损破碎、层间开裂、黏接应力无法消除而导致性能下降等问题,提升了铁芯的成形效果,利用该方法制作的非晶定子铁芯如图 3(c)所示。为考虑非晶带材层间绝缘剂的存在对其性能的影响,省略图 2 制作流程的第四步和第五步,将非晶带材在真空下进行热处理后直接线切割加工成形,得到如图 3(b)所示的定子铁芯。图 3(a)所示为线切割加工得到的硅钢定子铁芯。使用的硅钢材料单层厚度为 0.5 mm。

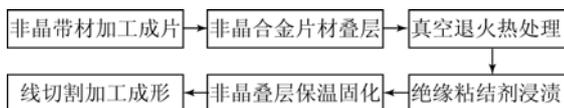


图 2 非晶铁芯制作流程

Fig. 2 Manufacturing process for amorphous core



(a)传统硅钢定子铁芯

(a) Traditional silicon steel stator core



(b)非晶层间无绝缘黏结剂的定子铁芯

(b) Stator iron core without insulating adhesive



(c)非晶层间有绝缘黏结剂的定子铁芯

(c) Stator iron core with insulating adhesive

图 3 加工制作的定子铁芯模型

Fig. 3 Fabricated stator cores

2.2 铁芯软磁性能测试与分析

铁芯损耗是材料在交变磁场下磁化时所消耗的无效电能。铁芯损耗偏高会导致电机定子温升过高或效率降低。为对制作的非晶铁芯和硅钢铁芯模型的性能进行对比研究,对图 3 所示的 3 种模型分别进行了交流磁场下的铁损和矫顽力进行了测试。

2.2.1 测试原理

参照 IEC 标准和 GB 的要求,采用湖南天恒 TD8120 软磁交流记录仪对试样在不同频率下的铁损进行测试,测试原理如图 4 所示。由励磁电源产生正弦波交流电,经过功率放大器后,通过初级线圈(磁化绕组)对测试试样施加交变磁场,初级线圈中的电流变化使样品中的磁通量发生相应的变化。根据电磁感应原理,在次级线圈(测量绕组)中将产生感应电动势,于是在测量回路里将产生瞬间电流,次级线圈感应得到的电流信号通过积分器的处理转变为磁感应强度的数据。利用该设备进行测试的过程中,预先设定磁感应强度数值,然后根据式(1)~(3),计算获得所需要的试样性能参数:

$$e = U_2 / N_2 = U_1 / N_1, \quad (1)$$

$$E_2 = U_2 \approx 4.44 B_{j1} f A_{Fe} N_2, \quad (2)$$

$$p = \frac{P_1}{G_{j1}} = \frac{P_1}{\rho A_{Fe} D_1 + D_{j1}}, \quad (3)$$

式中: N_1 、 N_2 、 U_1 、 U_2 分别为励磁绕组和测量绕组的匝数和端电压; B_{j1} 为定子铁心轭部磁通密度; f 为电源频率; A_{Fe} 为定子铁芯轭部有效横截面积; ρ 为铁芯材料密度; D_1 为定子铁芯外径; D_{j1} 为定子铁芯槽底直径; G_{j1} 为定子铁心轭部重量, P_1 和 p 分别为定子铁芯轭部损耗和比损耗。

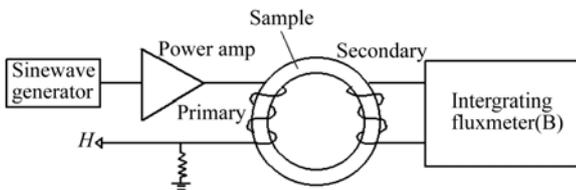
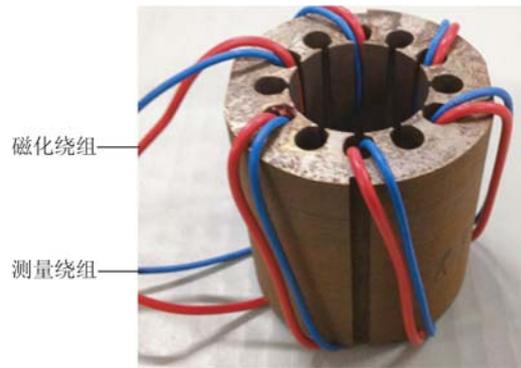


图 4 交流磁性能测试原理

Fig. 4 Testing principle of cores

2.2.2 测试结果与讨论

测试过程中,设定定子铁芯轭部的磁通密度最大为 1.0 T,根据测量仪器的要求,励磁电压 $U_1 \leq 20$ V,由式(1)和式(2)计算,设定励磁线圈 $N_1 = 6$ 匝,测量线圈 $N_2 = 6$ 匝,计算确定数值满足测试要求。按 2.2.1 所述的测试原理将铁芯连接到线路中,并调整各表的量程,供测试的定子铁芯及实验仪器如图 5(a)所示,图 5(b)为测试过程中所使用的仪器。



(a) 供测试的定子铁芯

(a) Stator core for testing



(b) 测试仪器

(b) Test instrument

图 5 供测试的定子铁芯及测试仪器

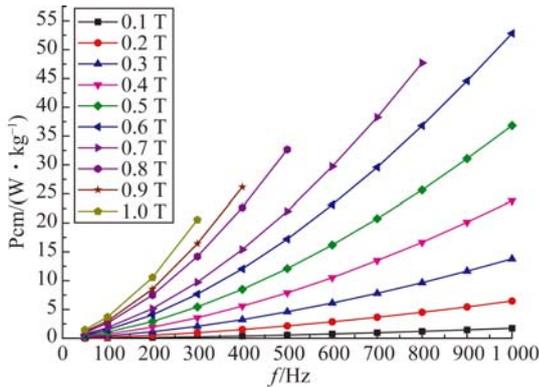
Fig. 5 Tested stator core and the test instrument

(1) 铁损与磁感应强度和频率的关系

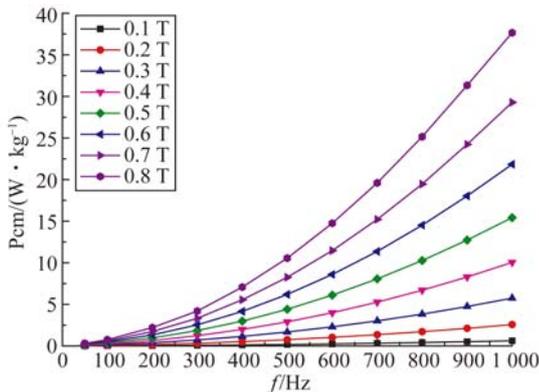
铁芯在交流磁场下的铁损如图 6 所示。

从图 6 可以看成,由于材料本身性质、试样制作及检测设备的影响,随着测试频率和磁感应强度的提高,试样的铁损测试难度加大,导致图中曲线部分数据无法测出。对试样 B 和 C,当磁感应强度超过 0.8 T 时,试样的铁损无法测出。对试样 A,无法测出的参数如 6(a)中空缺的数据点。但从所获得的数据可以看出,3 种试样的铁损均随磁感应强度 B_m 和频率 f 的提高而不断增大。在相同的频率或相同的磁感应强度下,铁芯 B 和铁芯 C 的损耗远小于铁芯 A 的损耗,仅为铁芯 A 损耗的 1/3 左右。而铁芯 C 的损耗小于铁芯 B 的损耗。当频率较低时,铁芯损耗不高,铁芯 C 的节能优势不够明显。例如当频率在 50 Hz,磁感应强度为 0.6 T 时,每 1 kg 铁芯 C 比铁芯 A 节能不到 0.5 W,比铁芯 B 节能 0.05 W 左右。但是随着频率的升高,铁芯损耗迅速增加,铁芯 C 的节能优势越来越显著。例如当频率为 1.0 kHz,磁感应强度为 0.6 T 时,每 1 kg 铁芯 C 比铁芯 A 节能约

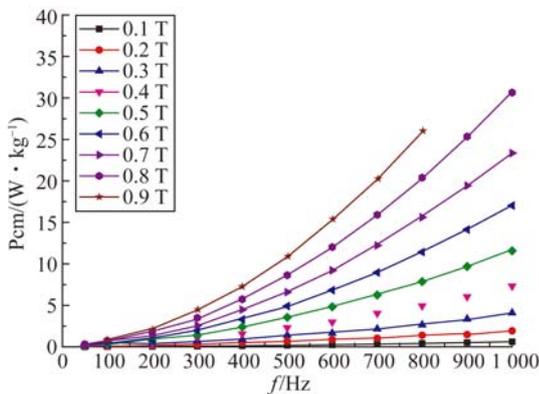
35 W,比铁芯 B 节能约 5 W。由此可见,不同的材料、或相同的材料,不同的制作工艺对铁芯的损耗影响较大。非晶材料的铁芯铁损远低于常规硅钢材料的铁芯铁损,而层间绝缘即用黏结剂固化的非晶铁芯铁损最少,将用该方法制作的铁芯 C 用作高频电机铁芯可以显著降低电机的铁芯损耗,提高电机的效率。



(a)铁芯 A
(a)Core A



(b)铁芯 B
(b)Core B

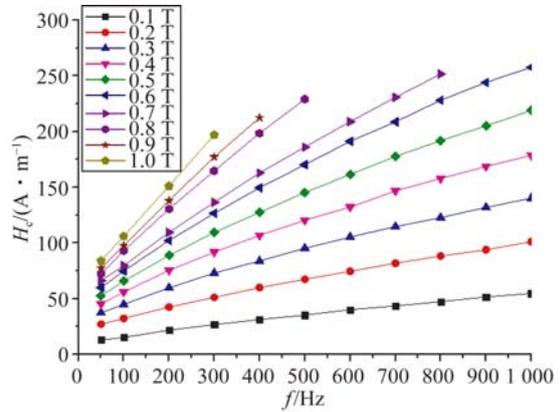


(c)铁芯 C
(c)Core C

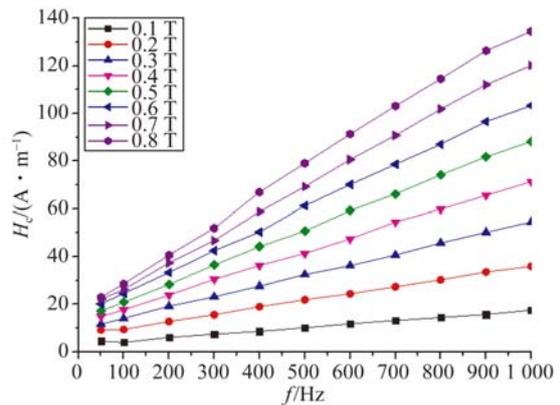
图 6 三种试样在不同磁感应强度和频率下的铁损
Fig. 6 Iron loss of cores in different magnetic induction and frequency

(2) 矫顽力与磁感应强度和频率的关系

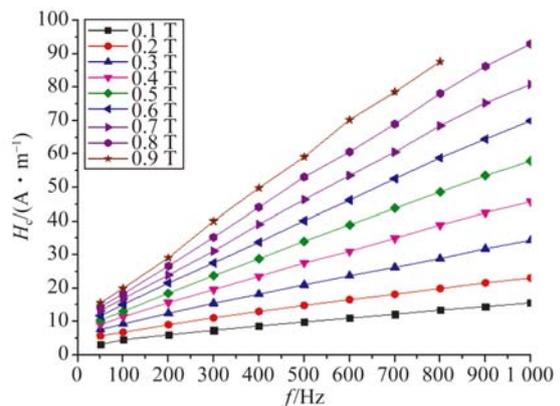
铁芯 A、B、C 在交变磁场下的矫顽力 H_c 。随磁感应强度和频率的变化曲线如图 7 所示。



(a)铁芯 A
(a)Core A



(b)铁芯 B
(b)Core B



(c)铁芯 C
(c)Core C

图 7 三种试样在不同磁感应强度和频率下的矫顽力
Fig. 7 Coercive force of cores in different magnetic induction and frequency

矫顽力的产生与反磁化过程中畴壁移动和畴矩转动的不可逆变化有关,其大小取决于不可逆壁移和畴转的临界磁场和临界能量。由图 7 可见,3 种铁芯试样的矫顽力均随着磁感应强度和频率的提高而逐渐增大。在相同的频率或相同的磁感应强度下,铁芯 B 和铁芯 C 的剩磁远小于铁芯 A 的剩磁。其中,铁芯 B 的剩磁仅为铁芯 A 剩磁的 1/3 左右。而铁芯 C 的剩磁为铁芯 A 剩磁的 1/4 左右。当频率在 50 Hz,磁感应强度 0.6 T 时,铁芯 A 的剩磁为 59.83 A/m,铁芯 B 的剩磁为 20.18 A/m,铁芯 C 的剩磁为 11.79 A/m;随着频率的升高,铁芯剩磁迅速增加,3 种铁芯的剩磁相差越来越大。当频率为 1.0 kHz、磁感应强度为 0.6 T 时,铁芯 A 的剩磁为 257.76 A/m,铁芯 B 的剩磁为 103.31 A/m,铁芯 C 的剩磁仅为 69.97 A/m。剩磁较小,表明磁滞回线狭窄且包围的面积较小,磁滞损耗也较小,因此,在输入功率一定的前提下,由于减小了电机损耗,可进一步提高电机的效率。

3 非晶电机和传统电机的仿真性能研究与结果分析

由测得的数据结果可知,相比于传统的硅钢铁芯,采用铁基非晶材料制作的铁芯,其性能优势十分明显。为验证采用非晶定子铁芯装配制作的电机整机的性能特点,采用有限元仿真的方法分别对传统的硅钢电机和非晶电机的性能进行分析研究。

3.1 有限元模型建立

图 1 所示的电机模型为对称结构,为降低分析成本,进行有限元分析时选取一半结构作为研究对象。用四面体单元对模型进行离散,得到如图 8 所示的有限元模型,共获得 6 786 个网格单元。



图 8 划分网格的有限元模型

Fig. 8 Finite element model

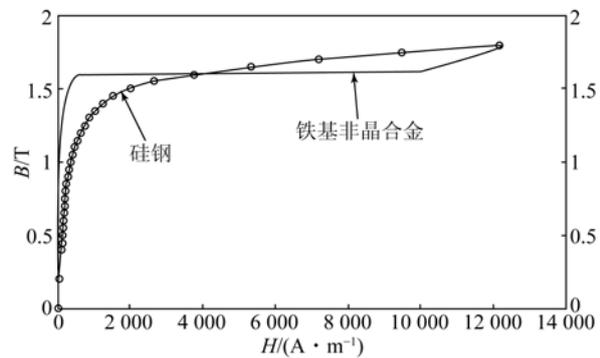


图 9 硅钢与铁基非晶材料的 B-H 曲线图

Fig. 9 B-H curves for silicon and Fe-based amorphous alloy

电机的定子绕组采用三相 60°相带,定子绕组线规为直径 0.53 mm 铜线,单股,每槽为 54 匝,单层绕组,采用星型接法。图 9 所示为铁基非晶合金与硅钢的 B-H 曲线图,可见铁基非晶合金的磁导率较高,而饱和磁感应强度又较硅钢材料低,可在较低的磁场强度下就达到饱和磁感应强度。铁基非晶合金的涡流损耗系数 $K_e = 5.27$,磁滞损耗系数 $K_h = 111.11$,附加损耗系数 $K_c = 0.89$ 。同时,在进行有限元分析时,确定的电机参数如表 2 所示。

表 2 仿真电机参数

Tab. 2 Parameters of the motor for simulation

额定电压	额定输出功率/W	极数	额定转速	额定频率/Hz	负载形式	叠压系数	工作温度
380	1 200	2	11 900	400	恒功率负载	0.9	75

3.2 仿真结果分析

根据建立的电机模型和设定的参数条件,将两种材料的电机分别进行有限元仿真分析,得到如下结果。

(1) 两种电机损耗比较

电机的损耗主要包括铜损、铁损、杂散损耗、风磨损耗等。有限元计算后得到的两种电机的各项损耗如表 3 所示。可以看出,非晶定子和转子铜损都有所降低,其中非晶定子铁芯损耗比硅钢铁芯损耗降低显著,由 100.7 W 降为 19.7 W,降幅为 80.4%。其原因主要是非晶合金的矫顽力和剩磁均远小于冷轧硅钢片导致。而且非晶合金的磁导率约为硅钢的 10 倍,其厚度又仅为硅钢的

1/10。在有限元分析计算中表现为定子铁损的等效电阻 R_c 增大约 2 倍,铁损等效电流 I_c 减小近 2 倍,而铁芯损耗 $P_{Fe} = I_c^2 \cdot R_c$,因此导致铁基非晶电机的铁芯损耗明显降低。

表 3 两种电机的各项损耗比较

Tab. 3 Loss comparison between the two motors

电机损耗/W	硅钢电机	非晶电机	变化率/%
定子铜损耗	142.9	128.0	10.40
转子铜损耗	54.5	54.0	0.9
铁芯损耗	100.7	19.7	80.4
杂散损耗	24	24	0
风磨损耗	140.2	140.3	0
总损耗	462.2	365.9	20.8
效率/%	72.2	76.6	6.1
功率因数	0.60	0.60	0
转矩	0.50	0.50	0

两种电机的效率均随着转速的提高逐渐增大,当到达额定转速时,非晶电机的效率约为 76.6%,而硅钢电机的效率约为 72.2%,非晶电机的效率比硅钢电机的效率高 4.4%。针对采用的电机模型,非晶电机的效率比传统电机的效率提升并不明显,主要是因为本文的电机模型功率较小,转速较低,转子铁芯仍然采用硅钢材料导致。若将大功率、高转速的电机铁芯均采用铁基非晶材料制作,其效率会提升更大。从表 3 还可得知,两种电机的转矩和功率因数基本一致。由于转矩和功率因数主要取决于电机的磁通量和电机的绕组,而在有限元分析时,只改变了定子铁芯

材料的参数和叠片系数,其它参数并未变化,因此,转矩和功率因数基本保持一致。

4 结 论

针对非晶材料的性能特点,以小型三相异步电机为研究对象,分别采用硅钢材料和铁基非晶材料加工制作了电机的定子铁芯。对加工后的铁芯模型进行了交流损耗测试和矫顽力测试。测试结果表明:在相同的频率和磁感应强度下,非晶铁芯损耗仅为传统硅钢铁芯损耗的 1/3 左右,而其剩磁仅为传统铁芯 1/4,非晶铁芯的损耗和矫顽力远小于硅钢铁芯的损耗和矫顽力,且工作频率越高,二者数据差别越大,说明非晶材料较硅钢材料具有更优异的软磁性能,因此,采用非晶铁芯制作高频电机铁芯可以显著降低电机的铁芯损耗,提高电机的效率。采用黏结剂浸渍过的非晶铁芯损耗和矫顽力小于无黏结剂的非晶铁芯的损耗和矫顽力,说明正确的浸渍和绝缘方式有助于降低铁芯损耗,进一步提高电机的效率。

利用有限元计算对非晶电机和硅钢电机的性能进行仿真,发现非晶电机的铁芯损耗远低于硅钢电机的铁芯损耗,进一步验证了利用非晶材料制作电机的性能优势。额定输出功率下,针对本文采用的电机模型,非晶电机的效率比传统电机提高约 4.4%,主要是因为本文的电机模型功率较小,转速较低,转子铁芯仍然采用硅钢材料导致。利用非晶材料制作异步电机仍然存在一定问题,需要对电机的结构进行优化设计,对非晶铁芯的成形方式进一步深入研究。本文的研究结果对非晶材料在径向电机的应用研究具有指导意义。

参考文献:

- [1] 周涛. 永磁同步电机调速系统的自抗扰控制[J]. 光学精密工程, 2016, 24(3): 582-589.
ZHOU T. Active disturbance rejection control of speed governing system for PMSM [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(3): 582-589. (in Chinese)
- [2] 李洪文, 邓永停, 王建立. 永磁同步电机速度控制器的全数字化集成[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 1105-1113.
LI H W, DENG Y T, WANG J L. Digital integra-

- tion of PMSM speed controller based on FPGA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 1105-1113. (in Chinese)
- [3] JNNSENC C, PROFUMO F, LIPO T A. A low-loss permanent-magnet brushless DC motor utilizing tape wound amorphous iron [J]. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1992, 28(3): 646-651.
- [4] WANG Z, ENOMOTO Y, ITO M, et al.. Development of a permanent magnet motor utilizing amorphous wound cores [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, 46(2): 570-573.

- [5] KOLANO R, KRYKOWSKI K, KOLANO-BURIAN A, *et al.*. Amorphous soft magnetic materials for the stator of a novel high-speed PMSBLDC motor [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49(4): 1367-1371.
- [6] NOSENKO A, MIKA T, RUDENKO O, *et al.*. Soft magnetic properties of nanocrystalline Fe₇₃B₇Si₁₆Nb₃Cu₁ alloy after rapid heating under tensile stress [J]. *Nanoscale research letters*, 2015, 10(1): 1-8.
- [7] 王立军, 张广强, 李山红, 等. 铁基非晶合金应用于电机铁芯的优势及前景[J]. *金属功能材料*, 2010, 17(5): 58-62
WANG L J, ZHANG G Q, LI S H, *et al.*. Advantages and prospects of Fe-based amorphous alloy materials applied in motor iron core [J]. *Metallic Functional Materials*, 2010, 17(5): 58-62(in Chinese)
- [8] ERTUGRUL N, HASEGAWA R, SOONG W L, *et al.*. A novel tapered rotating electrical machine topology utilizing cut amorphous magnetic material [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, 51(7): 1-6.
- [9] LI L J, LI S H, LI G M, *et al.*. Design and performance prediction of switched reluctance motor with amorphous cores [J]. *Materials Research Innovations*, 2015, 19(sup3): S28-S32.
- [10] KIM H, AN S Y. Nano-scale inter-lamellar structure of metal powder composites for high performance power inductor and motor applications [J]. *Journal of Magnetics*, 2015, 20(2): 138-147.
- [11] 茹海. 铁基非晶高效三相异步电机研究[D]. 济南: 山东大学, 2012
RU H. *Research on Iron-based Amorphous Alloy High Efficient Three-phase Asynchronous Motor* [D]. Jinan: Shandong University, 2012. (in Chinese)
- [12] 张红. Y2-632-4 型非晶电机研究及非晶铁心卷绕装置设计[D]. 济南: 山东大学, 2013.
ZHANG H. *Research of Y2-632-4 Type Amorphous Motor and Design of Amorphous Core Winding Device* [D]. Jinan: Shandong University, 2012. (in Chinese)
- [13] 刘婷. 非晶合金电机的有限元分析及控制研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2012.
LIU T. *Research on Finite Element Analysis and Control of Amorphous Alloy Motor* [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [14] FAN T, LI Q, WEN X. Development of a high power density motor made of amorphous alloy cores [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(9): 4510-4518.

作者简介:



宫宁宁(1981—),女,山东莱西人,硕士,2008年于大连理工大学获得硕士学位,主要从事先进材料成形及非晶金属材料方面的研究。E-mail: gnn@zjnu.cn



李熹平(1981—),男,山东平度人,副教授,硕士生导师,2010年于山东大学获得博士学位,主要从事先进材料成形与模具技术方面的研究。E-mail: lxp2010@zjnu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)