

低温高速永磁电机硅钢片铁心电磁性能变化机理研究

董传友¹, 杨志飞¹, 戈宝军¹, 王越¹, 李广林²

(1. 哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 首钢智新电磁材料研发(北京)有限公司, 河北 迁安 064404)

摘要: 由于低温泵用高速电机工作在低温环境中, 探究低温环境对构件材料性能的影响、低温条件对电机特性的作用机理以及形成统一的选材原则已经成为该类电机亟待解决的问题。采用实验法在常温(25 °C)和低温(-196 °C)条件下对不同系列的冷轧无取向硅钢片的电磁性能进行了研究, 分析了低温环境与频率对硅钢片电磁性能的影响情况。基于实测数据并采用有限元法计算了电机定子铁耗, 得到了电机采用不同系列硅钢片的定子铁耗分布以及变化情况。为了探究低温环境下采用不同系列硅钢片时电机定子铁耗变化幅度不同的原因, 采用低温冲击法对硅钢片的矫顽力进行测量, 验证了有限元计算所得规律的正确性。探明低温条件对硅钢片电磁性能的影响机理, 提出低温高速高频电机铁心材料的选材建议, 为低温工作环境下低温电机铁心材料选材提供理论借鉴与参考。

关键词: 低温高速永磁电机; 硅钢片; 磁性测量; 损耗特性; 低温冲击

DOI: 10.15938/j.emc.2024.09.009

中图分类号: TM355

文献标志码: A

文章编号: 1007-449X(2024)09-0095-11

Research on mechanism of electromagnetic performance changes in silicon steel core of low temperature high speed permanent magnet motors

DONG Chuanyou¹, YANG Zhifei¹, GE Baojun¹, WANG Yue¹, LI Guanglin²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. Shougang Zhixin Electromagnetic Materials Research and Development (Beijing) Co., Ltd., Qian'an 064404, China)

Abstract: Due to the use of high-speed motors in low-temperature environments for low-temperature pumps, exploring the impact of low-temperature environments on component material properties, investigating the mechanism of low-temperature conditions on motor characteristics, and forming unified material selection principles have become urgent issues for this type of motor. Experimental methods were used to study the electromagnetic properties of different series of cold-rolled non oriented silicon steel sheets under normal temperature (25 °C) and low temperature (-196 °C) conditions, and the influence of low temperature environment and frequency on the electromagnetic properties of silicon steel sheets were analyzed. Based on measured data and using finite element method, the stator iron loss of the motor was calculated, and the distribution and variation of stator iron loss of the motor using different series of silicon

收稿日期: 2023-09-19

基金项目: 军民融合专项(JMRH2018XM03)

作者简介: 董传友(1980—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为大型电机设计、电磁、流体、温度等多物理场理论研究;

杨志飞(1995—), 男, 博士研究生, 研究方向为极端环境永磁电机的设计与关键材料电磁性能分析;

戈宝军(1960—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为大型机电能量转换装置的基础理论与运行;

王越(1990—), 男, 博士研究生, 研究方向为永磁电机设计及多物理场研究;

李广林(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电工钢材料及其应用技术。

通信作者: 杨志飞

steel sheets were obtained. In order to explore the reasons for the different changes in stator iron loss of motors when using different series of silicon steel sheets in low-temperature environments, the low-temperature impact method was used to measure the coercivity of silicon steel sheets, and correctness of the law obtained from finite element calculations was verified. The mechanism of the influence of low-temperature conditions on the electromagnetic properties of silicon steel sheets has been explored, and suggestions for the selection of low-temperature, high-speed, and high-frequency motor core materials have been proposed, providing theoretical reference and guidance for the selection of low-temperature motor core materials in low-temperature working environments.

Keywords: low temperature and high speed permanent magnet motor; silicon steel sheet; magnetic properties measurement; loss characteristics; low temperature impact

0 引言

低温高速电机是低温潜液泵的核心部件^[1]。低温电机主要分为异步电机和永磁同步电机,由于异步电机的功率因数较低,运行效率不高,近年来永磁同步电机具备清洁、高效的显著优势,成为了低温电机的研究发展趋势。低温电机工作在深冷环境中,电机铁心材料在低温环境下的性能势必会发生改变,从而影响电机的运行效率。由于高速永磁电机的频率与转速较高,电机铁心损耗较大,铁心材料在低温环境下性能的变化导致损耗受到的影响也会更加显著,且目前低温电机尚未形成统一的选材原则。因此,明确铁心材料在低温环境中的电磁性能及其变化规律,对低温电机的材料选择和优化设计具有重要意义^[2-3]。

在关于电机材料低温性能及低温电机研究方面,国内外学者做了大量有价值的研究工作。文献[2]分析了低温冲击前后永磁体的磁性能变化,结果表明永磁体的磁性略有恶化。文献[3-4]根据铜和铝在不同温度下的电阻率数据,给出电阻关于温度的拟合函数,研究了永磁体剩磁随温度的变化关系。文献[5-6]测量了钕铁硼和钕钴的低温性能,结果显示钕铁硼在液氮中浸泡后剩磁测量结果呈现无规律变化,而钕钴在低温环境下的剩磁比室温时略高。得到了钕钴永磁体更适用于低温电机的结论。文献[7]对国内外学者关于低温电机导磁材料、导体材料、绝缘及永磁材料的低温特性研究结果进行了调研与总结。文献[8-10]测量了在低温环境下的不同牌号硅钢片的磁性能,发现部分硅钢片的低温损耗较常温环境差别不大,另一部分硅钢片的低温损耗略高于常温损耗。文献[11]研究了两种硅钢片分别在低温和常温下磁化曲线的情况,

给出了硅钢片磁滞损耗的计算结果,最终在两种硅钢片中给出了选材参考。文献[12]分别对硅钢片和两种不同牌号的非晶合金进行了测试和比较,采用冲击检流法测量铁心材料的基本磁化曲线,采用共地三电压法测量各式样在工频下的铁损和激磁功率,结果表明硅钢片与非晶合金的饱和磁感应强度与损耗较常温时略有增加。文献[13]为了研究压应力对电机铁心材料的影响,研制了一种新型的磁性能测量系统,在材料上施加压应力的同时测量其磁性能,分析应力与磁性能之间的相关性,并通过有限元分析验证了该测量系统的准确性。文献[14]测量和分析了铁氧体、纳米晶和非晶合金3种磁性材料的磁性能和损耗特性,给出了这3种材料的适用场景的参考建议。文献[15]针对高频范围内测量时样品温度上升对测量结果的影响进行了研究,分析发现温升与测试时间、励磁信号强度和频率呈正相关。

分析以上文献发现,很多学者及工程师主要关注电机铁心材料的电磁性能,对于不同温度环境下铁心材料的电磁性能进行了测试。高速电机的铁心材料通常采用的是硅钢片,由于在低温电机中硅钢片的选用尚未形成统一的原则,硅钢片电磁性能受温度及频率的变化机理需要明确,因此有必要对低温环境下硅钢片电磁性能变化的原因进行研究。

本文为了探明低温环境对硅钢片电磁性能的影响机理,以及低温环境下不同系列硅钢片对电机定子铁耗的影响。首先建立低温高速永磁电机的二维模型,铁心材料选用4种不同系列的硅钢片。采用SY-8258 B-H测量仪,对4种硅钢片在常温 and 低温下的电磁性能进行测量,研究其在不同频率以及不同温度时基本磁化曲线与损耗曲线的变化,基于实测数据对电机定子铁耗进行有限元计算。进一步

地分析低温冲击过程中硅钢片矫顽力的变化规律,探究采用不同材料电机定子各部分损耗变化幅度不同的原因,总结硅钢片性能变化机理。提出低温高速高频电机铁心材料的选材原则,从而为低温高速永磁电机的设计优化工作提供理论依据与参考。

1 高速永磁电机模型的建立

1.1 物理模型与基本假设

本文以一台额定转速为 35 000 r/min 的低温高速永磁电机为例,建立高速永磁电机的二维有限元模型如图 1 所示。电机参数如表 1 所示。根据文献[5]的结论,该电机采用钕钴材料作为永磁体^[16]。

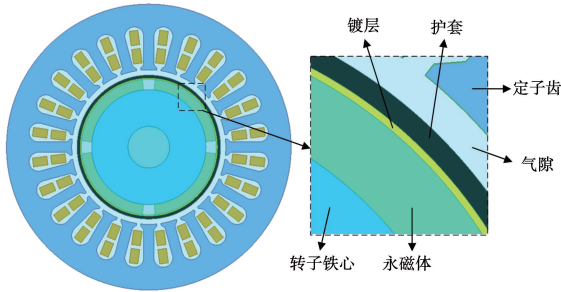


图 1 低温高速永磁电机二维模型

Fig. 1 2D model of low temperature and high speed permanent magnet motor

表 1 低温高速永磁电机参数

Table 1 Parameters of low temperature and high speed permanent magnet motor

参数	数值
额定功率/kW	40
额定转速 $n/(r/min)$	35 000
额定电压/V	380
定子内径/mm	74
定子槽数 Q_1	24
轴向长度/mm	110
气隙长度/mm	2.5
永磁体厚度/mm	5
运行温度/ $^{\circ}C$	-196

为了计算方便,分析时作如下基本假设:

- 1) 忽略电机外部磁场所占分量,假设定子外圆理想磁绝缘;
- 2) 忽略交变磁场在导电材料中的涡流反应;
- 3) 不计除硅钢片外其他电机材料低温下电磁性能的改变;
- 4) 不计位移电流的影响,电机内的电磁场按照

似稳场计算。

1.2 定子铁耗计算模型

为了准确计算电机铁耗,国内外学者已经做了大量有价值的研究,提出了多种铁耗计算的数学模型。目前应用较广的是 Bertotti 铁耗分离模型^[17]为 $P_{Fe} = P_h + P_c + P_e = k_h f B_m^x + k_c f^2 B_m^2 + k_e f^{1.5} B_m^{1.5}$ 。

式中: P_{Fe} 为铁心损耗; P_h 为磁滞损耗; P_c 为涡流损耗; P_e 为附加损耗; B_m 为铁心磁通密度幅值; f 为频率; k_h 、 x 为磁滞损耗系数; k_c 为涡流损耗系数; k_e 为附加损耗系数。

其中损耗系数 k_h 、 x 、 k_c 和 k_e 可由铁心材料的损耗曲线拟合得出。受集肤效应以及磁路饱和等因素的影响,且上述铁耗分离模型假定磁场一维交变,然而电机在实际运行中部分区域中的磁密为二维甚至三维旋转磁化^[18]。因此,可将一个电周期内的磁密各方向分量 B_x 、 B_y 、 B_z 分解为各次谐波,计算一个单元的损耗,再累加各剖分单元的损耗,基于此计算方法可以考虑到旋转磁化的影响,得到更加精确的电机定子铁耗,即:

$$P_h = \sum_{j=1}^m \sum_{v=1}^{\infty} [k_h (B_{xv}^2 + B_{yv}^2 + B_{zv}^2)^{\frac{x}{2}} f_v^x] V_j; \quad (2)$$

$$P_c = \sum_{j=1}^m k_c (B_{xm}^2 + B_{ym}^2 + B_{zm}^2) f_j^2 V_j. \quad (3)$$

式中 B_{xm} 、 B_{ym} 、 B_{zm} 为磁密各分量在一个周期内的最大值。

式(2)与式(3)为计及磁密旋转磁化情况下的磁滞损耗与涡流损耗的计算公式,由于集肤效应对附加损耗分量的影响较小^[19-20],因此本文的电机定子铁耗按照下式进行计算:

$$P_{Fe} = P_h + P_c + P_e = \sum_{j=1}^m \sum_{v=1}^{\infty} [k_h (B_{xv}^2 + B_{yv}^2 + B_{zv}^2)^{\frac{x}{2}} f_v^x] V_j + \sum_{j=1}^m k_c (B_{xm}^2 + B_{ym}^2 + B_{zm}^2) f_j^2 V_j + k_e f^{1.5} B_m^{1.5}. \quad (4)$$

2 硅钢片电磁性能的测量

2.1 测量条件与测试原理

由于硅钢片的导磁性能良好,因此常被用作电机铁心材料。热轧硅钢片的表面质量及精度与冷轧硅钢片相比差距较大^[21-22],因此本文主要研究冷轧硅钢片的电磁性能。

考虑到实验的安全性,本文的低温试验将在液

氮(−196 ℃)中进行。本实验根据国家标准《GB/T 3658—2008 软磁材料交流磁性能环形试样的测量方法》的样品规格要求和操作流程,采用中频薄带系列样品 1(0.15 mm)、去应力退火系列样品 2(0.2 mm)、高效系列样品 3(0.3 mm)以及 50W310 四种不同系列的冷轧硅钢片作为被测试样。使用日本岩崎 Iwatsu SY−8258 测量仪进行测试,分别在常温环境条件(25 ℃)和低温环境条件(−196 ℃)下,测量各试样的磁化曲线和损耗特性曲线。实验装置如图 2 所示。



图 2 实验测试装置

Fig.2 Experimental test device

图 2(a)为本实验构建的低温环境,即将测试样件完全浸泡在液氮罐中;(c)图为样品的绕线情况,初级线圈与次级线圈的绕线匝数均为 30 匝,其中蓝色铜线连接(b)图测试盒中的初级线圈端口,绿色铜线连接次级线圈端口。

磁场强度、磁密以及损耗的测量原理^[14]为:

$$H(t) = \frac{N_1}{L_e} I_1(t); \quad (5)$$

$$B(t) = \frac{1}{N_2 A_e} \int V_2(t) dt; \quad (6)$$

$$P = \frac{N_1}{N_2} \frac{1}{T} \int_0^T I_1(t) V_2(t) dt; \quad (7)$$

$$P_m = \frac{P}{m}. \quad (8)$$

式中: N_1 为初级线圈匝数; N_2 为次级线圈匝数; L_e 为有效磁路长度; A_e 为有效截面积; $I_1(t)$ 为通入初级线圈的电流; $V_2(t)$ 为次级线圈的电压; T 为励磁电流的周期; m 为测试样件的质量。

SY−8258 磁滞回线测量仪的测试精度如表 2 所示。其中,追加误差是指励磁电流或感应电压的

振幅比检测量程小的情况下追加计算的误差。

表 2 测试精度

Table 2 Test accuracy

频率范围/kHz	B_m 的误差/%			
	相对测试值的精度	误差追加系数	追加误差	测试精度
0.01 ~ 1.09	1.50	0.30	0.08	1.6
1.1 ~ 109	1.00	0.20	0.05	1.1

损耗的测试精度为

$$G = \pm [y + z + (x \times \pi/180) \times \tan\theta \times 100]. \quad (9)$$

其中: y 为励磁电流误差, A; z 为感应电压误差, V; x 为相位角误差, (°); θ 为样品的相位角, (°)。

表 3 为本文研究的 4 种硅钢片的尺寸参数,样品 1 为中频薄带系列产品,其特点是在高频下电磁性能优异,样品 2 为去应力退火系列,其特点是退火后铁损低,磁感高,加工性能良好,样品 3 为高效系列产品,其特点是比对应的常规牌号的铁损低,磁感高,50W310 为太钢生产的普通硅钢片。

由于样品 1 ~ 样品 3 在牌号方面涉及保密要求,且本文的目的是探究低温环境下硅钢片电磁性能的变化机理,从而为低温电机的材料选择和优化设计提供参考,并不局限于文中这 4 种硅钢片进行研究与分析。出于以上考虑,样品 1 ~ 样品 3 的详细牌号信息没有在文中表明。

表 3 硅钢片的样品参数

Table 3 Sample parameters of silicon steel sheet

参数	样品 1	样品 2	样品 3	50W310
所属系列	中频薄带	去应力退火	高效	普通
外径/mm	20	20	20	20
内径/mm	16	16	16	16
厚度/mm	7	7	7	7
质量/g	5.216	5.469	5.287	5.801
密度/(g/cm ³)	7.60	7.65	7.65	7.65
叠压系数	0.899	0.914	0.901	0.928
绕线匝数	30	30	30	30

2.2 误差分析

基本磁化曲线的测定需要选择不同的磁场强度对铁磁材料进行反复磁化,进行一次测量的时间约为 5 s 左右,当一次测量结束后立即更改激励条件或者频率,进行下一次测量,即对样品进行快速连续且施加较大励磁条件的测量时,样品表面温度会显

著升高,达到 40 ~ 50 ℃ 左右,如图 3 所示。



图 3 连续测量导致样品温度上升

Fig. 3 Continuous measurement causing the sample temperature to rise

为了研究这种现象是否会导致误差的出现从而影响测量结果的准确性,针对本文所研究的材料分别采用了连续测量和间断测量 2 种方法在常温环境下进行测试,测试结果如图 4 所示。图中纵坐标的数值为磁密幅值 B_m 、剩磁 B_r 、矫顽力 H_c 、损耗 P_m 的数值大小,间断测量的间断时间是以保证每一次测量时样品的温度都恢复至常温即可。

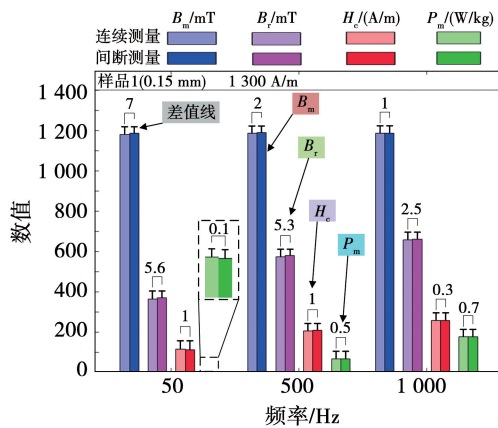


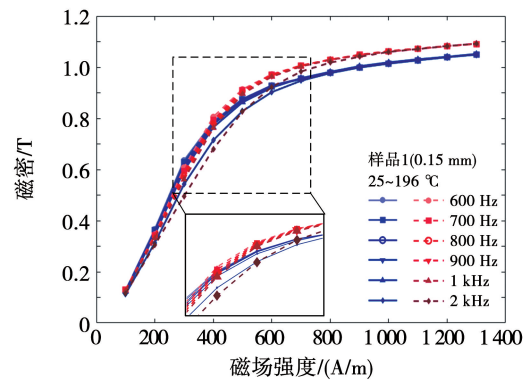
图 4 不同测量方法的结果对比

Fig. 4 Comparison of results of different measurement methods

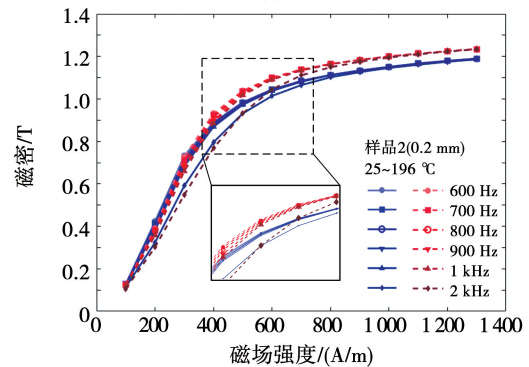
从图 4 可以看出,以样品 1 为例,在 1 300 A/m 的励磁条件下,频率分别在 50、500、1 000 Hz 时,连续测量和间断测量的结果差异很小。对其他测试样件进行了相同条件的测试,测试结果与图 4 一致。由此可知,在本文后续的硅钢片性能测试实验条件下,连续测量不会产生明显的误差,无需等待样品冷却。

2.3 硅钢片的磁化曲线测量

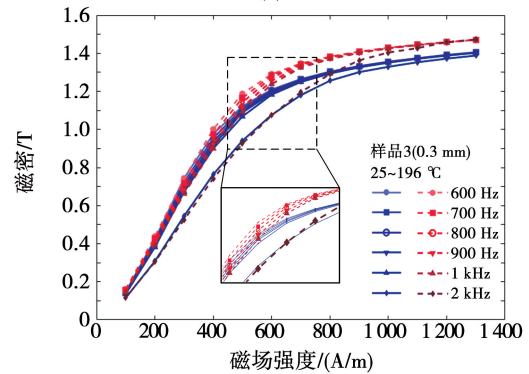
硅钢片分别在常温和低温环境下的基本磁化曲线如图 5 所示。将样件在液氮中完全浸泡 1 小时后开始测量,且测量过程中样件始终浸泡在液氮中。



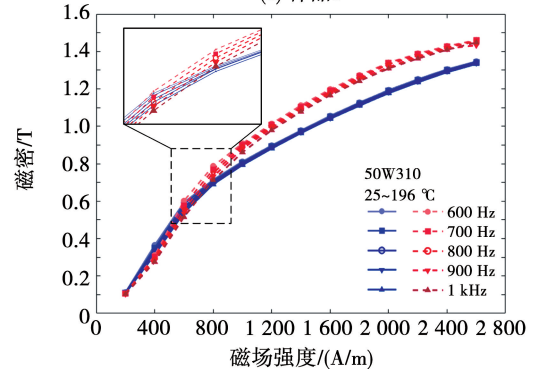
(a) 样品1



(b) 样品2



(c) 样品3



(d) 50W310

图 5 硅钢片的磁化曲线

Fig. 5 Magnetization curve of silicon steel sheet

从图 5 可以看出,在不同频率、相同温度条件下,0.6 ~ 1 kHz 范围内频率的改变对硅钢片的磁化曲线影响很小。为了探究低温环境对硅钢片磁化曲

线的影响,对比相同频率、不同温度下4种材料的基本磁化曲线可以看出,4种硅钢片的低温饱和磁密均大于常温饱和磁密。其中,50W310硅钢片的低温饱和磁密的增加量相对于另外3种硅钢片都要高,但是其所需要施加的磁场强度是另外3种硅钢片的两倍。以上4种系列硅钢片的磁性能在低温下均优于常温状态,这是由于在低温条件下,硅钢片的磁阻降低,因此其导磁性能上升。

2.4 硅钢片的损耗曲线测量

为了探究低温环境对于硅钢片损耗的影响,对比不同温度、频率相同时各材料的损耗情况。同样将样件在液氮中完全浸泡1小时后开始测量,且测量过程中样件始终浸泡在液氮中。各样件在不同温度以及不同频率时的损耗曲线如图6所示。

通过图6可知,4种硅钢片在相同温度环境下,频率越高,损耗越大;在相同频率下,随着温度的降低,损耗逐渐增大。通过比较各材料不同频率下的常温损耗和低温损耗的情况可以看出,频率越高时,温度的变化对损耗的影响越明显,高频低温条件下损耗的增加幅度越来越大。

由于在低温环境下,随着温度的降低,硅钢片的电阻率降低,导致了涡流损耗增大;矫顽力增大,导致了磁滞损耗增大,因此硅钢片铁心损耗增加,而高频条件会使这一影响更加明显。

为了比较4种硅钢片在相同条件下的性能,低温永磁电机通常转速较高,在极数较小的同时频率较大,因此对比了4种硅钢片在频率为1 kHz时的磁化曲线和损耗曲线,结果如图7、图8所示。从图7可以看到,4种材料在低温下的磁密幅值均比常温时要大,样品1、样品2、样品3、50W310的低温磁密幅值分别比常温增大了0.031、0.057、0.069、0.115 T。虽然50W310的低温磁密增加幅度最大,但其达到磁饱和所需要的磁场强度太大,达到磁饱和的速度最慢。样品3达到磁密饱和的速度最快。

从图8可以看出,相比于其他3种材料,50W310的损耗最大。磁密在1 T之前,样品1的损耗最低,在1 T之后,样品3的损耗最低。样品3的损耗随磁密增加的幅度相较于样品1与样品2要小,磁密在1.5 T时,样品3的低温损耗最小。

结合图7与图8可知,在相同温度、频率的条件

下,样品3的导磁性能最优。当磁密在1.5 T以上时,无论是常温还是低温环境,样品3的损耗最小。

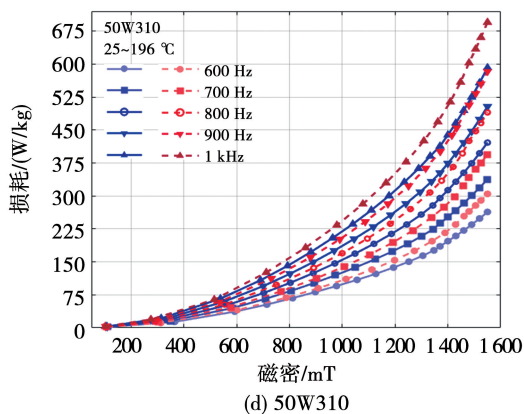
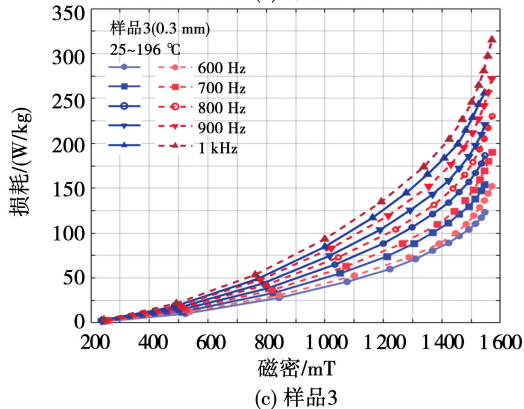
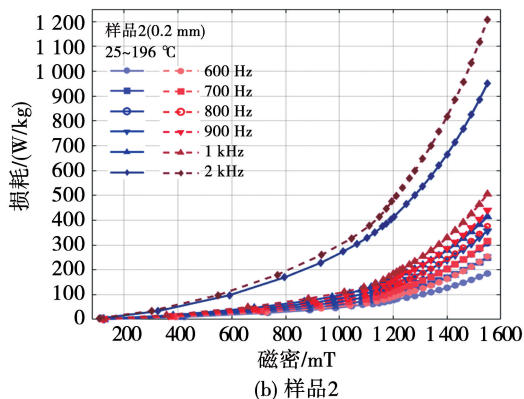
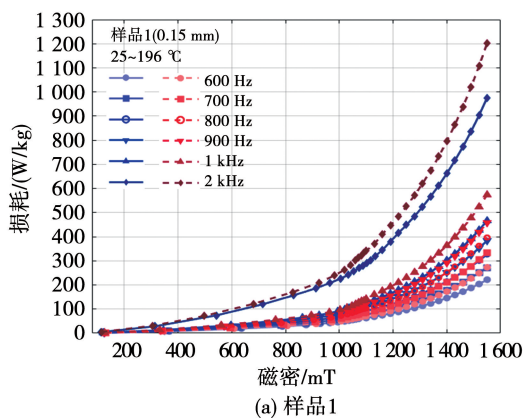


图6 硅钢片的BP曲线

Fig.6 BP curve of silicon steel sheet

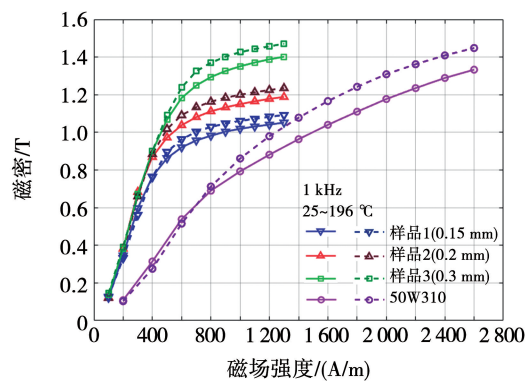


图 7 不同材料磁化曲线的对比

Fig. 7 Comparison of magnetization curves of different materials

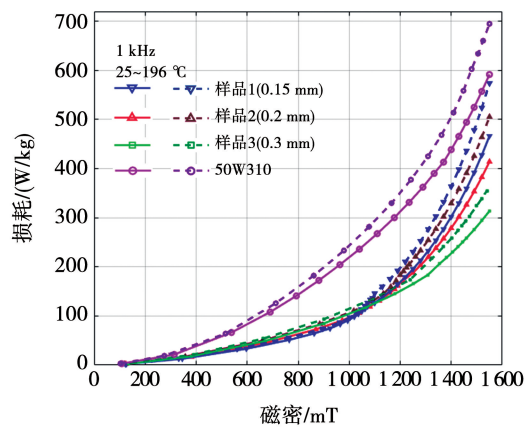


图 8 不同材料 BP 曲线的对比

Fig. 8 Comparison of BP curves of different materials

3 定子铁耗有限元分析

基于上文测量得到的硅钢片分别在常温以及低温环境下的磁化曲线与损耗曲线,将其导入到电机物理模型中,采用有限元法对电机定子铁耗进行仿真计算,计算结果如表 4 所示。

从表 4 中可以看出,采用本文所研究的 4 种不同类型的硅钢片作为铁心材料的电机,其定子铁耗在低温环境下均有所增加,增加的幅度大小如表 5 所示。根据表 5 可知,采用高效系列硅钢片的样品 3 作为铁心材料的电机定子铁耗增加幅度最小,采用 50W310 的电机定子铁耗增加幅度最大。

为了避免高速永磁电机损耗过大导致温升过高,从本文的研究结果来看,将高效系列硅钢片作为电机铁心材料为较优选择。

表 4 定子铁心损耗的计算结果

Table 4 Calculation results of stator core loss

单位:W

项目	损耗	样品 1	样品 2	样品 3	50W310
常温	磁滞	321.5	323.4	380.6	803.6
	涡流	928.1	851.2	657.8	1 113.5
	附加	36.3	25.8	17.2	72.1
	总铁耗	1 285.9	1 202.6	1 055.6	1 989.2
低温	磁滞	362.1	408.8	449.1	1 026.8
	涡流	1 099.4	989.6	733.2	1 275.7
	附加	46.3	31.2	20.6	87.5
	总铁耗	1 508.3	1 429.8	1 202.9	2 391.8

表 5 定子损耗的增加比

Table 5 Increase ratio of stator loss

单位:%

项目	磁滞	涡流	附加	总铁耗
样品 1	12.63	18.46	27.55	17.30
样品 2	26.41	16.26	20.93	18.89
样品 3	18.00	11.46	19.77	13.95
50W310	27.78	14.57	21.36	20.24

但不同系列的硅钢片应用在低温环境下时,其铁耗增加幅度大小各不相同。因此,并探究产生该结果的原因和机理,并对低温电机的铁心材料选材提供参考和借鉴,对于该结果需要进行进一步地探讨和分析。

4 实验数据分析与验证

4.1 低温冲击过程硅钢片矫顽力与损耗的变化

为了探究材料在低温条件下硅钢片损耗变化幅度不同的原因,在 4 种硅钢片均进入磁饱和状态下,研究了在低温冲击过程中硅钢片矫顽力的变化情况。本文提出一种新型的低温冲击过程的实验方法,选取了几个关键时间点与时间段进行了测量,关键时间点是根据材料温度变化的一瞬间进行选取的,如图 9 所示。关键时间点为:测试样件被全部浸泡在液氮前(t_1)、测试样件刚刚完全浸泡在液氮中的一瞬间(t_2)、测试样件脱离液氮环境一瞬间(t_3)。关键时间段为:测试样件在液氮中持续浸泡($t_2 \sim t_3$)、测试样件脱离液氮后静置逐渐恢复常温(t_3 之后)。

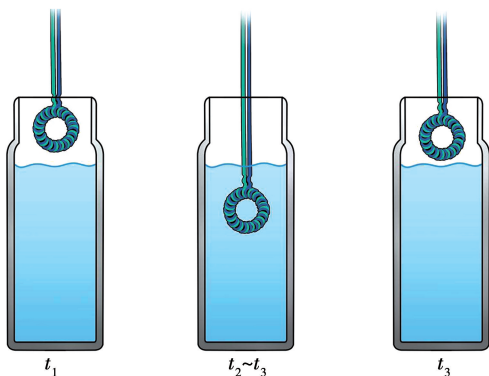


图9 不同时刻下样件的位置

Fig. 9 Position of sample at different times

由于将样品从液氮中拿出后其温度恢复的速度较快,所以2个时间段的测量次数与时间不同。在 $t_2 \sim t_3$ 时间段中,每隔5分钟测量一次,一共测量10组数据; t_3 之后每隔3分钟测量一次,一共测量5组数据。测量结果如图10所示。

从图10可以看出,4种材料在放入液氮的一瞬间(t_2)矫顽力突然增大。在液氮中持续浸泡过程中,矫顽力未发生明显的变化。从液氮中拿出的一瞬间(t_3),矫顽力突然降低,并且随着时间逐渐回复到进入液氮之前的情况。

对比不同频率下硅钢片矫顽力的变化情况能够看出,频率越高,硅钢片受到低温冲击的影响越明显,变化幅度越大,变化率也越大。由此可以看出,4种硅钢片矫顽力对温度及频率的变化较为敏感。

在1 kHz频率下,硅钢片的损耗和矫顽力的变化情况如表6所示。从表6中可以看出,50W310从 t_1 至 t_2 时刻的矫顽力变化幅度最大,因此其在低温环境下的损耗增加情况最明显。

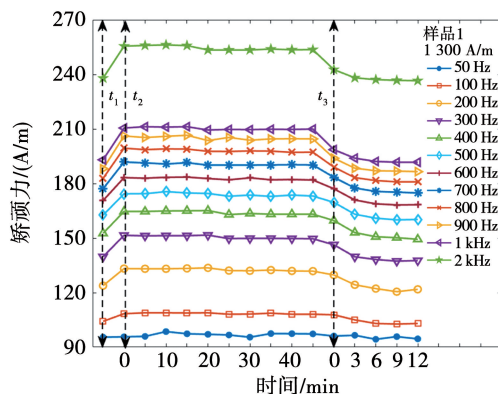
表6 硅钢片的损耗与矫顽力变化情况

Table 6 Changes of loss and coercivity of silicon steel sheet

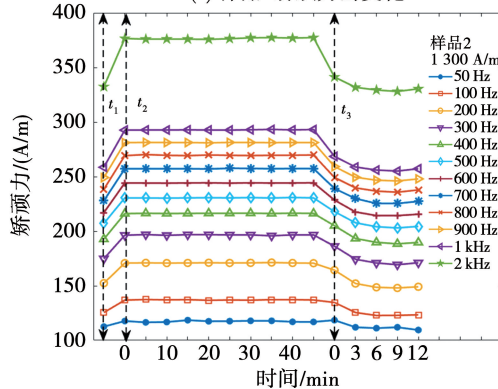
参数	温度	样品1	样品2	样品3	50W310
损耗	常温/(W/kg)	493.2	428.1	327.4	574.6
	低温/(W/kg)	579.3	505.4	358.2	694.9
	增幅/%	17.46	18.06	9.42	20.94
矫顽力	常温/(A/m)	194.3	258.3	338.6	649.8
	低温/(A/m)	209.5	292.1	380.6	794.8
	增幅/%	7.82	13.09	12.40	22.31

观察表6的样品1纵列可以看到,样品1的矫顽力增加幅度最小,但其损耗增加幅度却并不是最

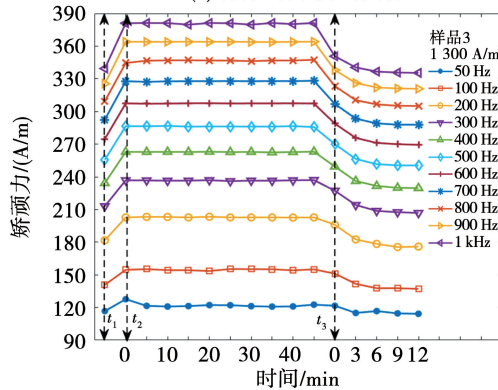
小的,这是因为样品1的磁滞损耗增加幅度相对较小,而其涡流损耗增加幅度较大。



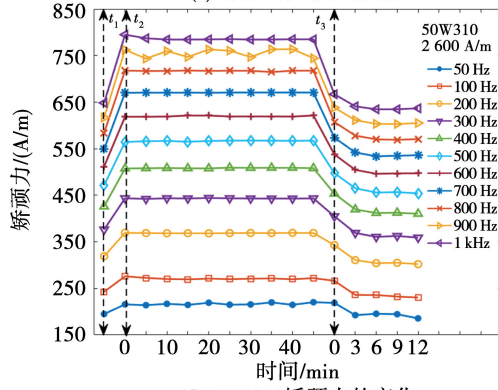
(a) 样品1矫顽力的变化



(b) 样品2矫顽力的变化



(c) 样品3矫顽力的变化



(d) 50W310矫顽力的变化

图10 硅钢片低温冲击性能变化

Fig. 10 Change of low temperature impact property of silicon steel sheet

将表5与表6进行对比可以看出,虽然样品3的低温损耗增加幅度最小,但当电机采用样品3作为铁心材料时,其低温磁滞损耗增加幅度并不是最小的;当采用样品1作为铁心材料时,低温磁滞损耗增加幅度最小,而电机定子铁耗的增加幅度却比样品3要大。根据表6可知,这是由于样品1在低温环境下矫顽力增加幅度最小,所以由矫顽力影响的磁滞损耗增幅也就最小。由此能够看出,低温冲击实验结果验证了有限元计算所得规律的合理性。

影响硅钢片损耗体现在矫顽力与电导率的变化上。硅钢片的损耗主要可分为磁滞损耗、涡流损耗与附加损耗,其中磁滞损耗与涡流损耗的占比较大。磁滞损耗是硅钢片在磁化过程中磁畴的运动引起的损耗,在磁化过程中一部分电磁能量会转换成热能表现出来;涡流损耗是由于硅钢片为导电材料,在磁化过程中硅钢片内存在电流和感应电势,称为涡流,涡流损耗同样会转化为热能的形式表现出来,因此在2.2节误差分析中发现,测量过程中测试样件表面的温度会升高。

结合上文硅钢片基本磁化曲线的测量结果可知,硅钢片在低温环境下的磁密增大,因此在去磁过程中,所需要施加的反向磁场强度也就越大,即表现为矫顽力增大,因此硅钢片的磁滞损耗增加;同时,随着温度的降低,硅钢片的电阻率降低,电导率增大,从而导致涡流损耗增大,因此在低温环境下硅钢片的铁心损耗增加。

4.2 低温冲击前后硅钢片磁化曲线与损耗曲线研究

为了进一步研究硅钢片在液氮中长时间浸泡后再取出恢复至常温时,其磁化曲线与损耗曲线是否发生了不可逆改变,将在液氮中浸泡2小时后的测试样件取出并在常温环境下静置24小时,再次测量其磁化曲线与损耗曲线,与未浸泡之前的常温磁化曲线与损耗曲线作对比,如图11所示。

从图11可以看出,以样品2为例,其在液氮浸泡前和浸泡后的磁化曲线和损耗曲线基本一致,其性能未发生不可逆的变化。对其余材料进行了同样的测试和对比,结果均为未发生不可逆改变。由此可知,对同一个测试样件进行低温试验时,从低温环境中取出,该样件的性能没有发生不可逆变化,可以对该样件进行其他试验,该结果验证了本文低温实验方法的合理性。

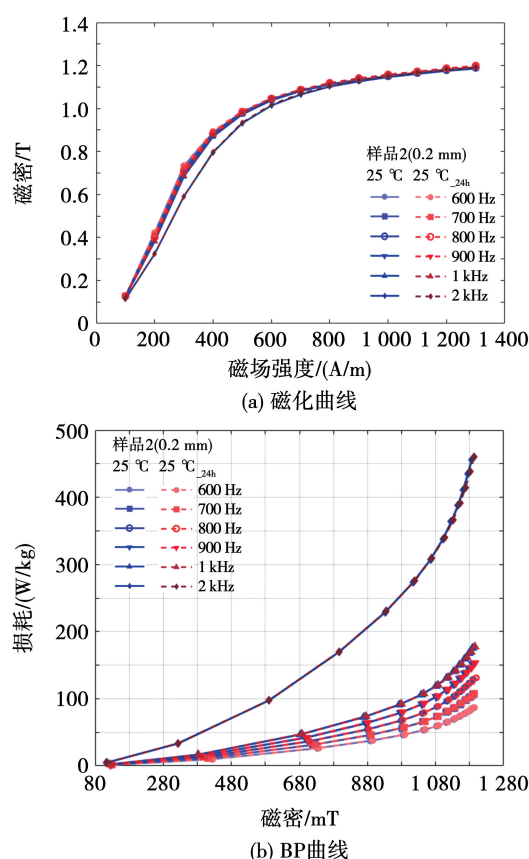


图11 样品2低温冲击前后性能变化

Fig. 11 Performance changes of sample 2 before and after low temperature impact

5 硅钢片低温电磁性能变化机理

由上文可知,硅钢片在低温条件下的饱和磁密增加,低温磁性能均优于常温磁性能。这是由于在低温条件下,硅钢片的磁阻降低,磁导率增大,因此其导磁性能上升。硅钢片在1 kHz 频率下相对磁导率随温度的变化情况如图12所示。

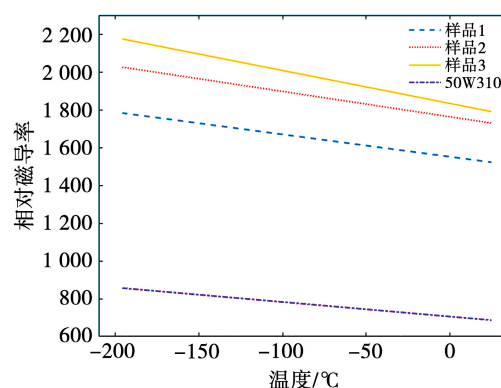


图12 硅钢片相对磁导率随温度的变化

Fig. 12 Change of relative permeability of silicon steel sheet with temperature

从图12中可以看出,硅钢片的在低温环境下的相对磁导率增大,其中,所测量的硅钢片磁导率为线性磁导率。

比较硅钢片分别在常温和低温条件下的损耗可以看出,频率越高时,温度的变化对损耗的影响越明显,高频低温条件下损耗的增加幅度越来越大。这是由于在低温环境下,随着温度的降低,硅钢片的电阻率降低,导致了涡流损耗增大;矫顽力增大,导致了磁滞损耗增大,因此硅钢片铁心损耗增加,而高频条件会使该影响更加显著。

磁滞损耗正比于交变磁场的频率 f 、磁滞回线的面积和铁磁材料的体积 V ,磁滞回线的面积正比于饱和磁密 B_m 的 n 次方, n 为施泰因梅茨系数, n 的值取决于材料,对于一般硅钢片, n 取1.6~2.3。磁滞损耗可表示为

$$p_h = C_h f B_m^n V. \quad (10)$$

式中 C_h 为取决于材料性质的常数。

当磁滞损耗系数 C_h 、频率 f 、体积 V 一定时,低温条件下硅钢片饱和磁密 B_m 的增加,导致了材料在去磁过程中,所需要施加的反向磁场强度也就越大,即矫顽力增大,铁磁材料的磁滞回线与坐标轴所围成的面积增大,所以磁滞损耗增加。

涡流在铁心中所引起的电阻损耗称为涡流损耗 p_e ,可表示为

$$p_e = C_e \Delta^2 f^2 B_m^2 V. \quad (11)$$

式中: C_e 为涡流损耗系数,反比与材料的电阻率; Δ 为硅钢片厚度。

当硅钢片厚度 Δ 、频率 f 、体积 V 一定时,随着温度的降低,材料的电阻率降低,涡流损耗系数 C_e 增大,且饱和磁密 B_m 增加,因此涡流损耗增大。

6 结 论

本文采用一台 $B-H$ 测量仪测量得到了硅钢片的磁化曲线和损耗特性,采用有限元法计算了电机定子铁耗,通过实验分析并探究了不同频率、温度下测试样品的电磁特性变化规律,揭示了硅钢片在低温条件下的电磁性能变化机理,主要结论如下:

1) 高速永磁电机的定子铁耗在低温环境下增加,由于中频薄带硅钢片的低温矫顽力增幅最小,因此其磁滞损耗增幅最小;采用高效系列硅钢片作为铁心材料时定子铁耗增加幅度最小。

2) 硅钢片在低温环境下的导磁性能变优,但低

温损耗较常温时均增大。这是由于在低温条件下,硅钢片的磁阻降低,磁导率增大,因此其导磁性能上升;硅钢片的电阻率降低,导致了涡流损耗增大;硅钢片的矫顽力增大,导致了磁滞损耗增大,因此硅钢片铁心损耗增加。高频会使该影响更加显著。

3) 硅钢片的矫顽力对温度变化较为敏感,其低温损耗增加幅度由矫顽力以及电导率决定。低温冲击前后硅钢片的电磁性能均未发生不可逆改变。

4) 由于低温环境下硅钢片的导磁性能增加,在结构工艺设计方面可以对电机的尺寸参数进行进一步地优化,如小型、轻量化设计。

基于以上结论,低温高速电机铁心材料为硅钢片时,选材可按如下原则进行参考:应优先选择低矫顽力、低电导率的硅钢片作为低温电机铁心材料。

参 考 文 献:

- [1] 艾程柳, 黄元峰, 王海峰, 等. 潜液式 LNG 泵低温电机及其关键技术的发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2396.
AI Chengliu, HUANG Yuanfeng, WANG Haifeng, et al. Development of the cryogenic electrical motor for the submerged liquid natural gas pump and its key technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2396.
- [2] DLUGIEWICZ L, KOLOWROTKIEWICZ J, SZELAG W, et al. Permanent magnet synchronous motor to drive propellant pump [C]//International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, June 20 - 22, 2012, Sorrento, Italy. 2012: 822.
- [3] 艾程柳, 黄元峰, 王海峰, 等. 潜液式液化天然气泵用变频低温异步电机的关键参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5317.
AI Chengliu, HUANG Yuanfeng, WANG Haifeng, et al. Important parameters design of inverter-driven cryogenic induction motor for submerged liquid natural gas pump [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5317.
- [4] 戈宝军, 刘海涛, 王立坤, 等. LNG 泵用低温高速永磁电机三维电磁场与涡流损耗的分析计算[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 634.
GE Baojun, LIU Haitao, WANG Likun, et al. Analysis and calculation of three-dimensional electromagnetic field and eddy current loss of cryogenic high-speed permanent magnet motor applied for LNG pump [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 634.
- [5] ZHENG L, WU T X, ACHARYA D, et al. Design of a superhigh-speed cryogenic permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(10): 3823.
- [6] GUO C, HUANG S, WANG J, et al. Research of cryogenic permanent magnet synchronous motor for submerged liquefied natural

- gas pump[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(4): 2030.
- [7] 涂进, 艾程柳, 廖勇熙. 潜液式液化天然气泵用低温电机材料特性综述[J]. 微特电机, 2016, 44(1): 87.
TU Jin, AI Chengliu, LIAO Yongxi. Summary for material properties of cryogenic induction motor for submerged liquid natural gas pump[J]. Small & Special Electrical Machines, 2016, 44(1): 87.
- [8] PRONTO A G, NEVES M V, RODRIGUES A L. Measurement and separation of magnetic losses at room and cryogenic temperature for three types of steels used in HTS transformers[J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2011, 24(1): 981.
- [9] MIYAGI D, OTOME D, NAKANO M, et al. Measurement of magnetic properties of nonoriented electrical steel sheet at liquid nitrogen temperature using single sheet tester[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2010, 46(2): 314.
- [10] MIYAMOTO M, MATSUO T, NAKAMURA T. Measurement of vector hysteretic property of silicon steel sheets at liquid nitrogen temperature [J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2011, 87(9): 111.
- [11] BOGDANOV I, KOZUB S, SHCHERBAKOV P, et al. Study of electrical steel magnetic properties for fast cycling magnets of SIS100 and SIS300 rings[C]//Proceedings of EPAC 2004, July 5-9, 2004, Lucerne, Switzerland. 2004: 1741.
- [12] 陈敏, 丘明, 肖立业, 等. 铁芯材料在低温下的磁性能的研究[J]. 电工电能新技术, 2003, 22(1): 35.
CHEN Min, QIU Ming, XIAO Liye, et al. Research on the magnetic properties of iron core materials at low temperatures[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2003, 22(1): 35.
- [13] DING X, REN S, XIONG Y, et al. 2-D magnetic properties measurement system for electrical steel sheets considering laminated direction mechanical stress [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2017, 53(10): 1.
- [14] YANG M, LI Y, YANG Q, et al. Magnetic properties measurement and analysis of high frequency core materials considering temperature effect[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(4): 1.
- [15] 陈霞萍, 车声雷, 刘东, 等. 功耗测试过程中功率铁氧体磁芯的温升及其影响因素[J]. 磁性材料及器件, 2015, 46(3): 21.
CHEN Xiaping, CHE Shenglei, LIU Dong, et al. Temperature rise and its influencing factors in the core loss measurement of power ferrites[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2015, 46(3): 21.
- [16] 董传友, 金鹏飞, 杨子豪, 等. 低温高速永磁电机转子屏蔽套的设计及强度分析[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(7): 111.
DONG Chuanyou, JIN Pengfei, YANG Zihao, et al. Design and strength analysis of rotor shielding sleeve of low temperature and high speed permanent magnet motor[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(7): 111.
- [17] BERTOTTI G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 1988, 24(1): 621.
- [18] ZHANG F, DU G, WANG T, et al. Electromagnetic design and loss calculations of a 1.12 MW high-speed permanent-magnet motor for compressor applications[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(1): 132.
- [19] ZHAO H, RAGUSA C, BARRIERE O, et al. Magnetic loss versus frequency in non-oriented steel sheets and its prediction: minor loops, PWM, and the limits of the analytical approach[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2017, 53(11): 1.
- [20] 孙鹤, 李永建, 刘欢, 等. 非正弦激励下纳米晶铁心损耗的计算方法与实验验证[J]. 电工技术学报, 2022, 37(4): 827.
SUN He, LI Yongjian, LIU Huan, et al. The calculation method of nanocrystalline core loss under non-sinusoidal excitation and experimental verification[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(4): 827.
- [21] 程耀楠, 张先鹏, 张广鑫, 等. 高速电主轴冷却技术研究及应用探讨[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2022, 27(3): 1.
CHENG Yaonan, ZHANG Xianpeng, ZHANG Guangxin, et al. Study and application of cooling technology for high speed motorized spindle[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2022, 27(3): 1.
- [22] 孙宇亮, 王九崇, 朱浩铭, 等. 有取向硅钢片开关磁阻电机研究[J]. 大电机技术, 2024(3): 57.
SUN Yuliang, WANG Jiuchong, ZHU Haoming, et al. Application of oriented silicon steel sheet in switched reluctance motor[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2024(3): 57.

(编辑:刘琳琳)