

# 基于碳化硅绝缘材料提升电机性能的研究

成凯瑞<sup>1</sup>, 安辉<sup>1,2</sup>, 陆艳君<sup>3</sup>, 田玉宝<sup>4</sup>, 邓文宇<sup>2</sup>, 安跃军<sup>1\*</sup>

(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 沈阳中北通磁科技股份有限公司, 辽宁 沈阳 110159;

3. 沈阳芯源微电子设备股份有限公司, 辽宁 沈阳 110168;

4. 沈阳工业大学 后勤集团, 辽宁 沈阳 110870)

## Research on Improving Motor Performance Based on Silicon Carbide Insulation Material

Cheng Kairui<sup>1</sup>, An Hui<sup>1,2</sup>, Lu Yanjun<sup>3</sup>, Tian Yubao<sup>4</sup>, Deng Wenyu<sup>2</sup>, An Yuejun<sup>1\*</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Shenyang General Magnetic Co., Ltd, Shenyang 110159, China;

3. KINGSEMI Co., Ltd., Shenyang 110168, China;

4. Logistics Group, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** [Objective] To address the issues of the poor thermal conductivity in traditional organic insulating materials, which restricts heat dissipation and performance of motors under overload conditions, this study replaced traditional slot insulation paper with high-thermal-conductivity silicon carbide (SiC) insulating varnish for performance enhancement of motors. [Methods] Taking a 1.1 kW asynchronous motor as the test case, a three-dimensional temperature field simulation model was firstly established. Subsequently, thermal analyses were performed via simulation for motors employing standard slot insulation paper and the SiC-based insulating varnish, respectively. Finally, an experimental platform was constructed to measure and compare key performance parameters—including temperature rise, current, and efficiency—of both motor configurations under loads ranging from the rated condition to 1.5-fold load. [Results] Experimental and simulation results indicated that motors utilizing SiC-based high-thermal-conductivity insulating varnish exhibited lower steady-state temperature rises and operating currents compared to traditional insulated

motors, while also boasting higher efficiency. Notably, under a 1.5-fold load condition, traditional insulated motors reached a temperature of 150 °C, triggering an overtemperature shutdown, whereas SiC insulated motors remained stable at 135 °C with ample safety margin. This solution proves effective in reducing operational temperature rise and enhancing reliability, rendering it particularly suitable for high-overload applications and scenarios where thermal sensitivity is a critical concern. [Conclusion] The application of SiC high-thermal-conductivity insulating material in stator slot insulation can significantly improve heat dissipation, suppress winding temperature rise, and thereby enhance motor efficiency and overload capacity. This solution can effectively reduce temperature rise and improve reliability, making it particularly suitable for high-overload and heat-sensitive motor applications.

**Key words:** silicon carbide insulation; performance improvement; temperature field analysis; overload capability

**摘要:** [目的] 针对传统有机绝缘材料导热性能差, 导致电机在过载工况下散热性能差的问题, 本文以高导热的碳化硅 (SiC) 绝缘漆替代传统槽绝缘纸, 以提升电机的性能。[方法] 以一台 1.1 kW 的异步电机为例。首先, 建立其三维温度场仿真模型; 其次, 对采用普通槽绝缘纸和 SiC 槽绝缘漆的电机进行热仿真分析; 最后, 搭建试验平

基金项目: 辽宁省“揭榜挂帅”科技计划项目 (2023JH1/11100010)

Liaoning Province Open Bidding for Selecting the Best Candidates Science and Technology Program Project (2023JH1/11100010)

台,测试两种电机在额定至 1.5 倍负载范围内的温升、电流、效率等性能参数。【结果】试验与仿真表明,采用 SiC 高导热绝缘漆的电机,其绕组的稳态温升、运行电流均全面低于传统绝缘电机,效率更高。尤其在 1.5 倍过载工况下,传统绝缘电机温度升至 150 °C 超限停机, SiC 绝缘电机则稳定于 135 °C,并有充足的安全余量。【结论】SiC 高导热绝缘材料应用于定子槽绝缘,可显著改善散热,抑制绕组温升,进而提升电机效率与过载能力。该方案能有效降低温升并提升可靠性,特别适用于高过载及对热敏感的电机应用场景。

**关键词:** 碳化硅绝缘;提升性能;温度场分析;过载能力

## 0 引言

随着电动汽车、航空航天伺服系统及高端工业装备对驱动电机功率密度、可靠性及高温环境适应性的要求日益严苛<sup>[1]</sup>,电机常需在高温条件下承受周期性或持续性过载运行<sup>[2]</sup>。在此类极端工况下,电机内部损耗,尤其是定子绕组的铜耗急剧增加,产生的大量热量若无法及时导出,将导致绕组与铁心温度快速上升<sup>[3-5]</sup>。这不仅会加速绝缘材料的热老化,威胁运行安全,更会因绕组电阻随温度升高而增大,引发“温升增高→电阻增大→铜耗增加→温升进一步增高”的热-电耦合恶性循环,严重制约电机的性能输出边界与使用寿命<sup>[6]</sup>。

电机内部的散热路径复杂,定子槽绝缘层是热量从发热源(绕组)传导定子铁心的关键中介。目前广泛采用的聚酯、聚酰亚胺等有机绝缘材料<sup>[7-8]</sup>,其电气性能虽满足要求,但导热系数普遍在 0.2 W/(m·K)左右,在槽内形成了显著的“热屏障”,成为电机散热系统中最薄弱的环节之一<sup>[9-11]</sup>。然而,在现有的电机仿真研究中,针对该薄层结构的精细化表征往往被简化处理。究其原因,一是工艺上传统浸渍漆因强度限制难以独立成膜,使纸-漆复合结构成为长期默认的物理前提;二是数值计算上,槽绝缘薄层与厘米级铁心间的跨尺度差异极易引发网格畸变与计算不收敛,这是在仿真中建立真实绝缘层几何模型的难点。因此,从材料层面入手,提升槽绝缘本身的导热能力,是打破该散热瓶颈、从根本上增强电机高温过载性能的直接且有效的技术途径。

近年来,通过在高分子基体中填充高导热陶瓷填料(如 ALN、BN、SiC)制备复合绝缘材料成为

研究热点<sup>[12-16]</sup>。碳化硅(SiC)因其优异的耐高温性、高导热率和良好的绝缘性<sup>[17-19]</sup>,在电机绝缘领域展现出独特潜力。然而,现有研究多集中于材料本身性能的优化或整机温升的宏观对比,尚缺乏针对槽绝缘这一特定结构,系统研究其对电机在持续过载工况下综合性能(如温升、效率)的影响的仿真与试验验证。事实上,忽略对绝缘层结构的单独建模会掩盖其作为散热“热瓶颈”的物理本质,导致温升预测有偏差,且难以准确评估单一材料改性对打破局部热障的具体贡献。

基于此,本文以一台 1.1 kW 三相异步电机为研究对象,采用高导热 SiC 复合绝缘漆,其导热系数为 20~60 W/(m·K),代替传统槽绝缘纸,通过三维温度场仿真对比分析其在额定至 1.5 倍过载范围内的稳态温升、电流及效率等关键性能,并用试验加以验证。

## 1 电机模型及槽绝缘方案

### 1.1 电机模型及主要参数

本文以一台额定功率 1.1 kW、额定转速 2 875 r/min 的异步电动机为例,进行不同槽绝缘材料的仿真及试验研究。并据此确定电机本体结构参数,其电机仿真模型如图 1 所示,主要性能参数见表 1。



图 1 电机模型

Fig. 1 The motor model

### 1.2 槽绝缘结构与材料特性对比

由于电机定子槽内包含大量漆包线、浸渍漆以及空气,若采用全物理细节建模,不仅会引发“网格爆炸”导致计算无法收敛,还会因网格畸变产生严重的数值误差。为此,本文建立了图 2 所示的槽绝缘结构等效模型。

基于该模型,对其进行如下仿真设置。几何与网格处理:将槽绝缘层建立为独立的 3D 薄层实体。

为克服厚径比过大的计算难题,对其进行局部网格加密,确保在厚度方向上分布多层单元,以精确模拟热梯度的非线性传导。材料与边界赋值:绝缘层物性参数严格依据表 2 设定。针对 SiC 涂层的物理特性,在仿真中将其与槽壁接触面设定为连续传热边界,从而在模型层面真实还原由于取消绝缘纸而消除了界面接触热阻的物理过程。

表 1 异步电机的主要参数

Tab. 1 Main parameters of the asynchronous motor

参数名称	参数值
额定功率/kW	1.1
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	2 875
额定电压/V	380
额定电流/A	2.4
定子外径/mm	120
定子内径/mm	67
转子外径/mm	66.4
效率/%	80.1
功率因数	0.83
绝缘等级	F 级

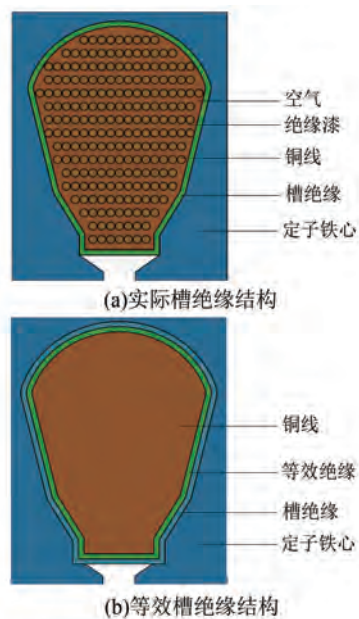


图 2 槽绝缘结构

Fig. 2 Slot insulation structure

针对图 2 中实际绕组与等效绕组存在的几何截面积偏差,为了将该偏差控制在工程允许范围内并确保仿真严谨性,本文在仿真中遵循了总损耗功率守恒原则。虽然等效建模导致绕组区域的

几何体积与实际体积有一定差异,但本文通过重新计算生热密度,确保施加于等效实体的总发热功率与实际导线损耗相等。由于电机稳态温升主要取决于总发热量与散热路径的综合热阻,这种基于能量守恒的补偿机制消除了几何形状简化带来的偏差,确保了仿真结果的物理真实性。

本文采用 SiC 绝缘漆来替代传统绝缘纸的方案。两组电机均采用相同的常规环氧漆进行浸渍定型,唯一变量为槽绝缘屏障材料。主要涉及到的材料的特性参数见表 2。

表 2 材料的特性参数对比

Tab. 2 Comparison of material properties

性能指标	环氧/聚氨酯漆	传统绝缘纸	SiC 绝缘漆
导热系数/ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	0.18~0.25	0.12~0.15	20~60
击穿强度/ (kV·mm <sup>-1</sup> )	18~22	20~30	17.5
绝缘等级	F 级	H 级	H 级及以上
机械韧性	较低	高	高
界面热阻	中等	极高	极低

常规绝缘漆由于导热率极低且硬度不足以在嵌线工艺中保护线圈,因此无法脱离绝缘纸独立工作。相比之下,本文研制的 SiC 复合漆具备超高导热率与高硬度特性,能独立承担机械保护与电气隔离功能。通过以漆代纸的结构重构,消除了传统方案中绝缘纸带来的高热阻及界面气隙。

## 2 电机多工况性能仿真分析

### 2.1 温度场理论基础

根据传热学的基本理论<sup>[20]</sup>,在直角坐标系下,电机在负载运行时,求解电机的温度场可以用下式描述<sup>[21]</sup>:

$$\begin{cases} K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q = \\ \rho c \frac{\partial T}{\partial t} - K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_1} = 0 \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_2} = \beta(T - T_e) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $K_x$ 、 $K_y$ 、 $K_z$  分别为电机各介质  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的导热系数; $T$  为温度; $q$  为热源密度; $\rho$  为密度; $c$  为比热容; $t$  为时间; $S_1$  为绝热界面; $S_2$  为散热边

界面; $K$ 为 $S_1$ 和 $S_2$ 的法向导热系数; $n$ 为边界法向量; $\beta$ 为 $S_2$ 的传热系数; $T_e$ 为 $S_2$ 周围的介质温度。

本研究的核心在于通过改变定子槽内绝缘材料的导热性来优化式(1)中的导热过程。具体而言,方程中的导热系数 $K$ 在定子槽绝缘区域分别对应传统复合绝缘纸(低导热)与SiC绝缘漆(高导热)。绝缘层导热系数的提升将直接增大该区域的热通量,从而降低绕组区域的最高温度。

此外,为了实现电磁场和温度场的耦合计算,以验证温度降低对电机效率的反馈机制,必须引入铜导体的电阻率温度特性方程<sup>[22]</sup>:

$$\rho_{cu}(T) = \rho_{20} [1 + \alpha(T - 20)] \quad (2)$$

式中: $\rho_{cu}$ 为铜绕组电阻率; $\rho_{20}$ 为20℃时铜的电阻率; $\alpha$ 为电阻温度系数。

式(2)构成了本文仿真模型中电磁损耗计算与温度场分布之间的耦合桥梁。

电机定子铁心和转子铁心通常采用硅钢片叠压而成,片间涂覆绝缘漆以减小涡流损耗。为简化导热分析,通常将相互绝缘的硅钢片层叠结构等效为一种均质的整体材料。该等效材料在导热性能上呈现各向异性:其轴向导热系数 $K_z$ 与径向导热系数 $K_x$ 、 $K_y$ 可根据下式得出<sup>[23]</sup>:

$$\begin{cases} K_x = K_y = \frac{\delta_{Fe} K_1 + \delta_0 K_0}{\delta_{Fe} + \delta_0} = \\ \lambda_{Fe} K_1 + (1 - \lambda_{Fe}) K_0 \\ K_z = \frac{\delta_{Fe} + \delta_0}{\frac{\delta_{Fe}}{K_1} + \frac{\delta_0}{K_0}} = \frac{1}{\frac{\lambda_{Fe}}{K_1} + \frac{1 - \lambda_{Fe}}{K_0}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\delta_{Fe}$ 为硅钢片厚度; $\delta_0$ 为硅钢片绝缘漆的厚度; $K_1$ 为绝缘介质的导热系数; $K_0$ 为硅钢片的导热系数; $\lambda_{Fe}$ 为硅钢片的叠压系数。

针对不同绝缘材料电机的对比研究,为确保对比前提的一致性,本文仿真采用电磁-温度迭代的双向耦合求解策略,具体流程如下。步骤一:恒转矩约束,在电磁场仿真中,设定普通绝缘电机与SiC绝缘电机的目标输出负载转矩均为所需的目标值。步骤二:耦合迭代计算,首先由电磁求解器计算初始损耗并输入热场;热场求解器计算得到稳态温升后,将绕组平均温度反馈至电磁求解器以修正电阻率;电磁求解器自动微调输入电流,

以确保输出转矩严格匹配目标负载。步骤三:收敛判定,重复上述电-热迭代过程,直至绕组温升波动小于1K且转矩达到平衡。

在电机机壳外表面施加综合对流散热系数,以模拟试验中的自扇冷条件。仿真负载工况与试验完全对应,包括额定负载及1.1、1.2、1.3、1.4、1.5倍负载。

## 2.2 温度场仿真结果分析

电机稳态温度是指在单位时间内发热量与散热量达到平衡时电机温度不再随时间发生变化的最终温度值。电机的热量传递过程为定子绕组经绝缘层传至铁心与机壳,依靠风冷与机壳表面散热,转子绕组经转轴传导至外壳散热。根据传热定律与所建立的三相异步电机三维模型,将有限元计算得到的电机各部分损耗与体积的比值,即体积发热率,分别赋值给电机各发热部件。基于电机的实际运行要求,采用风冷方式对其进行冷却。当电机温度为环境实际温度时,得到电机额定及负载运行时绕组的稳态温度分布图。

普通绝缘电机和SiC绝缘电机在额定负载下的绕组温度分布图如图3和图4所示。

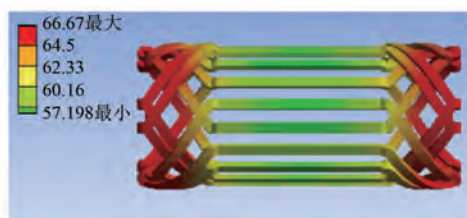


图3 普通绝缘电机在额定负载下的绕组温度分布图

Fig. 3 Temperature distribution diagram of the ordinary insulated motor winding under rated load

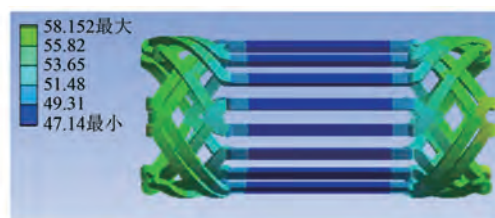


图4 SiC绝缘电机在额定负载下的绕组温度分布图

Fig. 4 Temperature distribution diagram of the SiC insulated motor winding under rated load

由图3和图4可知,绕组最高温度均出现在端部区域,而最低温度则在绕组的有效部分(槽内直线段处)。采用碳化硅绝缘漆作为槽绝缘材

料的电机,其绕组各部位温度均低于使用普通绝缘纸的电机。其中,绕组有效部分的温度降低幅度最为显著,端部温度亦呈现明显下降。这一温差分布的整体改善,主要归因于碳化硅绝缘漆所具有的较高导热性能,其增强了槽内热量向铁心的传导效率,从而优化了绕组的整体散热路径。

普通绝缘电机和 SiC 绝缘电机在 1.4 倍负载下的绕组温度分布图如图 5 和图 6 所示。

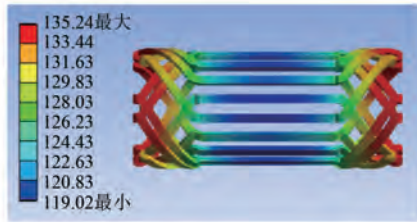


图 5 普通绝缘电机在 1.4 倍负载下的绕组温度分布图

Fig. 5 Temperature distribution diagram of the ordinary insulated motor winding under 1.4-fold load

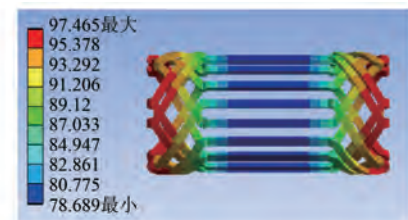


图 6 SiC 绝缘电机在 1.4 倍负载下的绕组温度分布图

Fig. 6 Temperature distribution diagram of the SiC insulated motor winding under 1.4-fold load

由图 5 和图 6 可知,随着电机运行至 1.4 倍额定负载,碳化硅绝缘漆降低绕组温升趋势进一步扩大。绕组有效部分与端部的降温效果相比额定负载时均更为突出。这表明,在高负载、高发热条件下,碳化硅材料的高导热特性对改善绕组散热、抑制热点温升的作用愈发显著。

普通绝缘电机和 SiC 绝缘电机在 1.5 倍负载下的绕组温度分布图如图 7 和图 8 所示。

由图 7 和图 8 可知,在 1.5 倍极限负载下,两种电机达到热稳态时差异显著。普通绝缘电机绕组端部在达到热稳态时温度为 166.73 °C,已超出其绝缘等级的允许上限。而碳化硅绝缘电机绕组端部在 119.05 °C 时达到稳态。这不仅验证了碳化硅绝缘漆在提升散热能力方面的核心作用,更关键的是,其直接扩展了电机的安全工作区。

由上述分析可知,使用碳化硅绝缘漆的电机

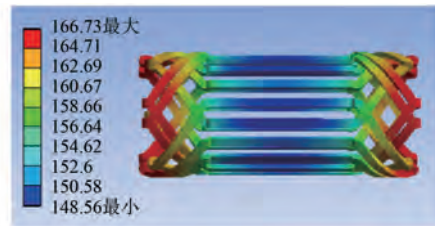


图 7 普通绝缘电机在 1.5 倍负载下的绕组温度分布图

Fig. 7 Temperature distribution diagram of the ordinary insulated motor winding under 1.5-fold load

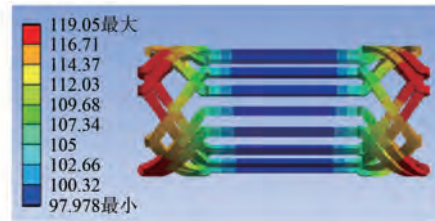


图 8 SiC 绝缘电机在 1.5 倍负载下的绕组温度分布图

Fig. 8 Temperature distribution diagram of the SiC insulated motor winding under 1.5-fold load

绕组温升均低于普通绝缘电机,并且随着负载越大,降温效果越明显。

图 9 为普通绝缘电机和 SiC 绝缘电机的电机绕组温升随负载变化的对比曲线。图 9 的曲线证明了高导热材料在提升电机过载散热能力方面发挥了关键作用。

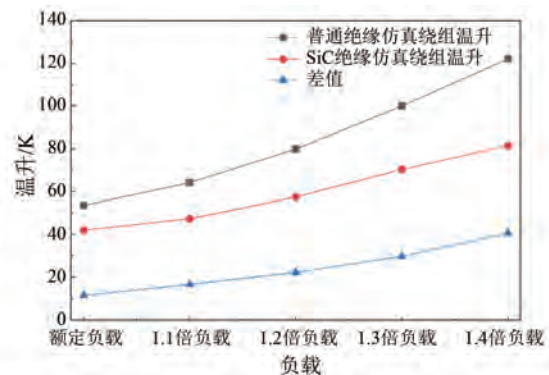


图 9 不同负载下的绕组温升对比

Fig. 9 Comparison of winding temperature rise under different loads

### 2.3 性能参数仿真结果分析

图 10 为普通绝缘电机和 SiC 绝缘电机的电流随负载变化的对比曲线。图 11 为普通绝缘电机和 SiC 绝缘电机的电机效率随负载变化的对比曲线。

由图 10 和图 11 可知,采用碳化硅高导热绝

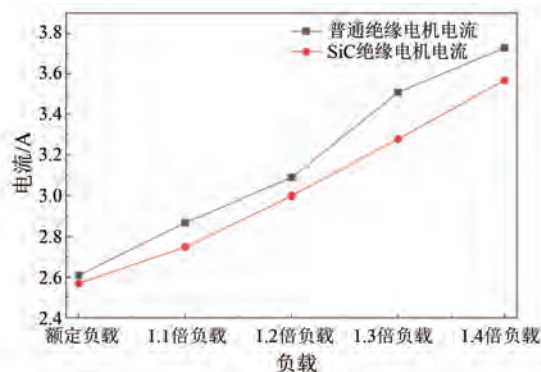


图 10 不同负载下的电流对比

Fig. 10 Comparison of current under different loads

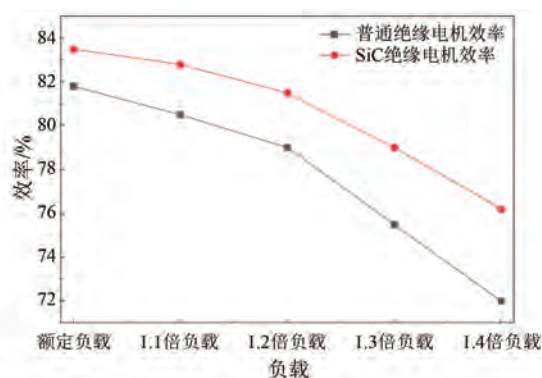


图 11 不同负载下的效率对比

Fig. 11 Comparison of efficiency under different loads

缘漆的电机,在不同负载下的仿真电流均低于传统绝缘电机,效率则均高于传统绝缘电机。在1.4倍负载工况下, SiC 绝缘电机的输入电流降低了约4.3%,效率提升了约5.8%。需要特别说明的是,这种电流的降低并非人为设定的初始条件,而是高导热材料带来的电-热正反馈增益效果。其物理机制为: SiC 材料较低的热阻首先打破了槽内散热瓶颈,将绕组热量快速导出,显著降低了绕组温度;根据电阻温度系数效应,铜绕组电阻随温度降低而减小;在输出转矩恒定的前提下,电阻的减小使得电机维持相同电磁转矩所需的输入电流下降,进而降低了铜耗。因此, SiC 绝缘电机较低的温升是材料本身的高导热性与系统效率提升共同作用而带来的低损耗结果。

### 3 样机试验结果与分析

#### 3.1 样机试验

基于研究需求,搭建了如图12所示的样机试验平台。平台主体包括:(1)加载与测功系统,采

用高精度涡流测功机对电机施加负载并实时测量输出转矩与转速;(2)电机性能参数测量系统,使用功率分析仪同步采集输入侧三相电压、电流、功率等性能参数;(3)温度场监测系统,在样机的定子绕组端部、定子铁心轭部及机壳关键位置预埋了高精度 PT100 铂热电阻传感器。

试验流程如下:进行阶梯负载温升试验,依次在额定转矩及1.1、1.2、1.3、1.4、1.5倍额定负载下,都分别从电机冷却状态加载至目标值3.65、4.00、4.38、4.75、5.12、5.48 N·m 持续运行,直至达到热稳定状态。其判断标准为:在30 min之内,定子绕组的温升变化不超过1 K<sup>[26]</sup>。在试验过程中记录全过程数据,最终通过后处理计算各负载下的稳态温升、电流及电机效率等关键指标。

本次试验是将普通的绝缘纸换成碳化硅绝缘漆,此碳化硅绝缘漆需要搅拌均匀之后浸涂到定子槽内,需放烘箱80℃烘烤15~30 min,然后在烘箱210℃烘烤1 h使其快速固化。浸涂上碳化硅绝缘漆之后的电机如图13所示。

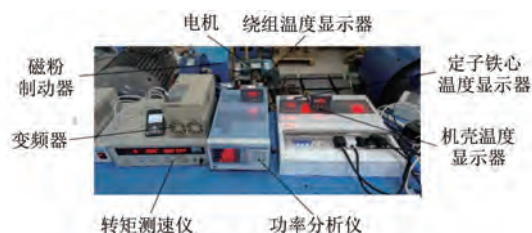


图 12 电机过载能力测试平台

Fig. 12 Motor overload capacity test platform



图 13 浸涂 SiC 绝缘漆后的电机

Fig. 13 The motor after dip-coating with SiC insulating varnish

#### 3.2 试验结果与分析

##### 3.2.1 稳态温度对比

根据阶梯负载温升试验数据,传统绝缘电机和 SiC 绝缘电机在不同负载下的绕组稳态时的温度见表3,其对应的稳态温升对比曲线如图14所示。

表 3 两种绝缘电机绕组稳态温度对比

**Tab. 3 Comparison of steady-state temperatures in two types of insulated motor windings** °C

负载倍数	普通电机绕组温度	SiC 电机绕组温度
1 倍	69	61
1.1 倍	81	65
1.2 倍	96	76
1.3 倍	125	90
1.4 倍	146	112
1.5 倍	150(仅 36 min)	135

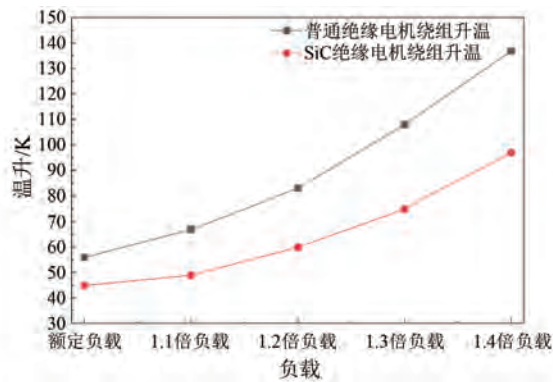


图 14 不同负载下的绕组温升对比

Fig. 14 Comparison of winding temperature rise under different loads

由表 3 可见,在 1.5 倍负载下,普通绝缘电机绕组端部温度在电机运行 36 min 时就达到了 150 °C,已经接近 F 级绝缘等级允许的极限温度,继续运行有导致电机绝缘烧毁的风险。碳化硅绝缘电机在 1.5 倍负载下,电机绕组端部可稳定在 135 °C。这充分证明,碳化硅绝缘技术显著增强了电机在极限负载下的热稳定性和持续运行能力。

由表 3 和图 14 可知,在所有测试负载点,碳化硅绝缘电机的绕组稳态温升均显著低于普通绝缘电机。温升降幅随负载增加而扩大。采用导热系数 20 W/(m·K) 的 SiC 槽绝缘,可使电机在 1.4 倍过载下绕组稳态温升下降约 29.2%。

### 3.2.2 电流与效率对比

根据阶梯负载温升试验数据,传统绝缘电机和 SiC 绝缘电机在不同负载下的电机性能参数如图 15 与图 16 所示。由图 15 和图 16 可知,随着负载升高,上述两种电机的输入电流均相应增大,但采用 SiC 绝缘的电机在不同负载点均表现出略低的电流值。在效率方面, SiC 绝缘电机在全部

负载范围内均保持效率优势。

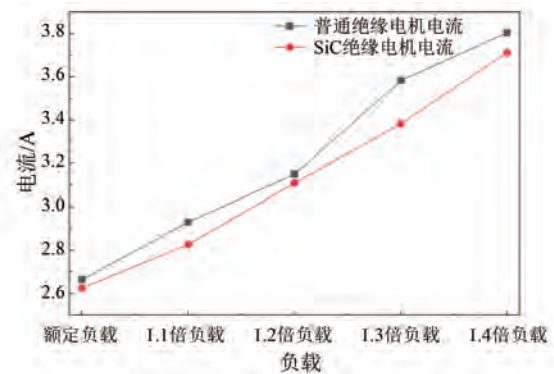


图 15 不同负载下的电流对比

Fig. 15 Comparison of current under different loads

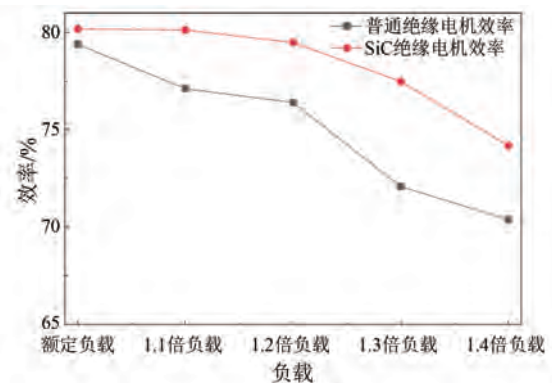


图 16 不同负载下的效率对比

Fig. 16 Efficiency comparison under different loads

以上试验结果表明,采用 SiC 绝缘漆的电机随着负载的增加效率有明显的提升。这表明,仅通过升级槽绝缘材料,即可在不改变原有电机设计的情况下,有效拓展其过载能力。

### 3.2.3 稳态温升的仿真与试验对比分析

将前述仿真得到的绕组稳态温升数据与样机试验结果进行对比,如图 17 所示。

由图 17 可知,仿真结果准确地复现了两种绝缘方案下,温升随负载增加的变化趋势,特别是在 1.5 倍极限负载这一关键工况下,模型有效区分了两种方案的性能差异。传统绝缘电机绕组端部温度过高,并且未达稳态,无法持续运行;而 SiC 绝缘电机达到稳态时的温度显著低于普通绝缘电机的,能够保持稳定运行。仿真与试验值在绝对量级上吻合良好,绕组温升在各负载点的误差基本控制在 ±10% 以内。这充分验证了所建立的三维热仿真模型及其参数设置,特别是 SiC 绝缘高导热系数取值的有效性与可靠性,表明该模

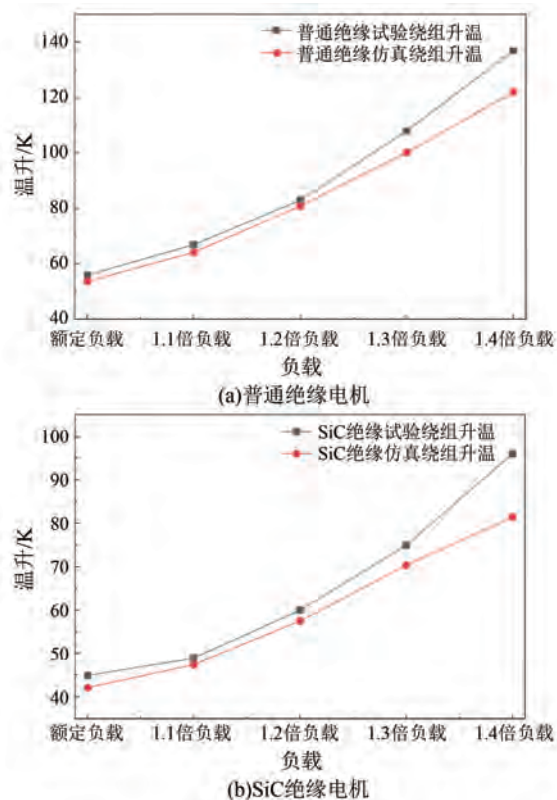


图 17 两种电机在不同负载下样机试验与仿真分析的绕组温升对比

Fig. 17 Comparison of winding temperature rise between experimental and simulated of two types of motors under different loads

型可准确用于评估与预测电机在极端过载条件下的热性能。

### 3.2.4 电流和效率的仿真与试验对比分析

将前述仿真得到的电流和效率数据与样机试验结果进行对比,如图 18 和图 19 所示。

由图 18 和图 19 可知,仿真结果准确地再现了电流与效率随负载变化的规律,与样机试验数据具有良好的一致性。仿真与试验值在整体上吻合度高,不同负载点的偏差基本维持在 $\pm 5\%$ 的范围内。

## 4 结语

上述研究表明, SiC 绝缘材料可以改善电机性能,就本文所研究的样机而言,额定效率提升了 0.99%, 电流降低了 1.5%, 节电 0.6%。性能指标提升幅度随负载率增加而增大,在 1.4 倍负载下,效率提升了 5.4%, 电流降低了 2.4%, 节电 3.5%。

碳化硅绝缘材料可以改善电机的散热能力,样机试验表明,在 1.5 倍负载下, SiC 绝缘电机的

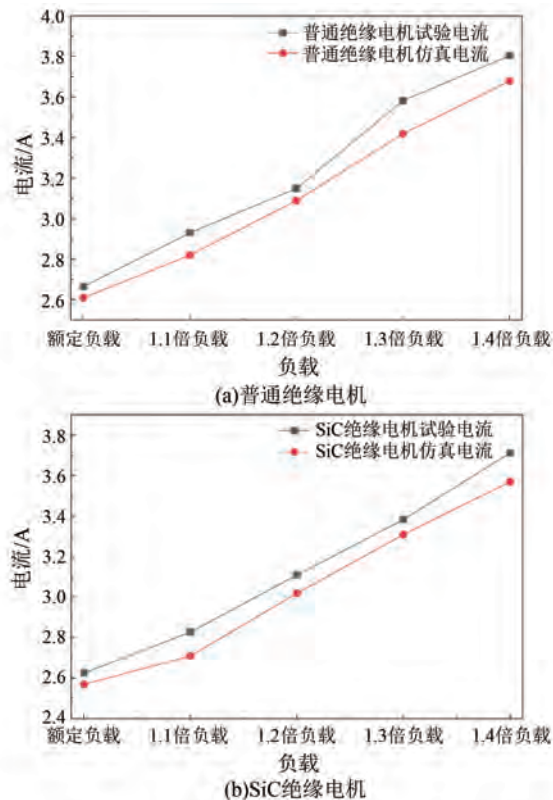


图 18 两种电机在不同负载下样机试验与仿真分析的电流对比

Fig. 18 Comparison of current between experimental and simulated of two types of motors under different loads

绕组温度最大降低了 10%。负载从 1.4 倍提升到 1.5 倍时,热过载能力提升了 7%。

仿真分析结果与样机试验数据有很好的 consistency,证明了本文所采用分析方法的有效性,为后续 SiC 绝缘材料的电机设计和开发提供了参考。

### 利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

### 作者贡献

成凯瑞主导全文工作,安辉进行论文结构的确定,陆艳君提供测试条件,田玉宝和邓文字协助试验测试,安跃军进行论文工作指导。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

Cheng Kairui led the overall work, An Hui determined the structure of the paper, Lu Yanjun

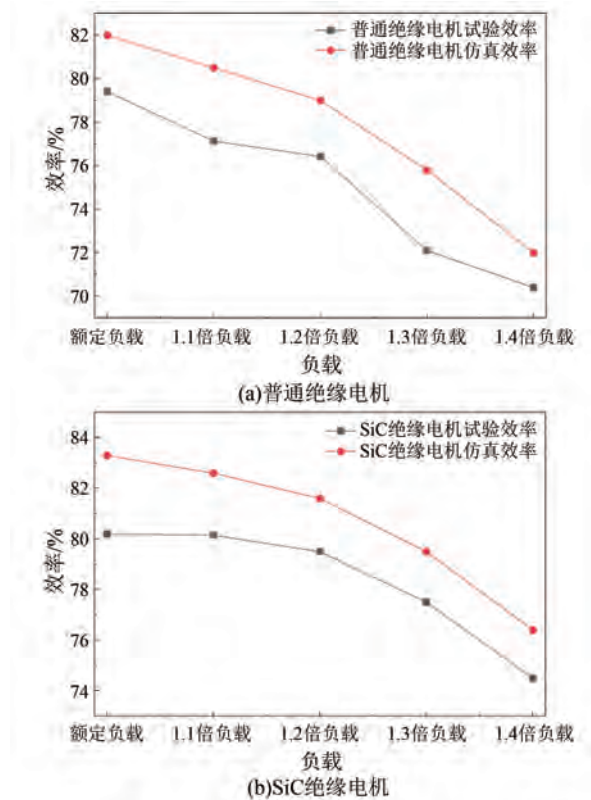


图 19 两种电机在不同负载下样机试验与仿真分析的效率对比

Fig. 19 Comparison of efficiency between experimental and simulated of two types of motors under different loads

provided testing conditions, Tian Yubao and Deng Wenyu assisted in experimental testing, and An Yuejun provided guidance for the paper work. All authors have read and agreed to submit the final manuscript.

## 参考文献

- [ 1 ] 梁得亮, 褚帅君, 贾少锋. 高温高速永磁电机关键技术研究综述[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(10): 31-48.
- Liang D L, Chu S J, Jia S F. Overview of research on key technology of high-temperature and high-speed permanent magnet machine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(10): 31-48.
- [ 2 ] 毕晓舜, 安跃军, 杨维国, 等. 真空干泵用屏蔽电机温度场仿真分析与试验[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(5): 64-69.
- Bi X S, An Y J, Yang W G, et al. Simulation and experiment of temperature field of canned motor for vacuum dry pump [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(5): 64-69.
- [ 3 ] Feng Z P, Hao Y N, Song Y H, et al. Thermally conductive high-voltage insulation composites with outstanding comprehensive properties through particle grading design [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2024; 269378242.
- [ 4 ] 刘文雪, 卞万康, 虞鑫海. 高导热环氧树脂复合材料的研究及其在电机上的应用[J]. 微特电机, 2022, 50(1): 51-56.
- Liu W X, Bian W K, Yu X H. Study on high thermal conductivity epoxy resin composite and its application in motor [J]. Small & Special Electrical Machines, 2022, 50(1): 51-56.
- [ 5 ] Huynh T A, Hsieh m F. Improvement of traction motor performance for electric vehicles using conductors with insulation of high thermal conductivity considering cooling methods [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(2): 1-5.
- [ 6 ] 李贵衡, 张健, 黄少坡, 等. 基于 Wiener 过程的电机主绝缘材料寿命预测方法[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(11): 40-47.
- Li G H, Zhang J, Huang S P, et al. Life prediction method of motor ground-wall insulation material based on Wiener process [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(11): 40-47.
- [ 7 ] 杨松, 王健, 宋桂霞, 等. 高导热少胶云母带在 H 级高压交流电机上的应用研究[J]. 绝缘材料, 2021, 54(2): 43-48.
- Yang S, Wang J, Song G X, et al. Application of dry mica tape with high thermal conductivity in H-class high voltage ac motor [J]. Insulating Materials, 2021, 54(2): 43-48.
- [ 8 ] 陈明华, 孟宏远, 李誉, 等. 聚合物基导热绝缘复合材料研究与应用进展[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6895-6914.
- Chen M H, Meng H Y, Li Y, et al. Research and application progress of polymer-based thermal-conductive electric-insulating composite materials [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6895-6914.
- [ 9 ] 潘红梅, 董群锋, 杨立峰, 等. 本征导热型绝缘液晶环氧树脂的研究进展[J]. 涂料工业, 2024, 54(6): 82-88.
- Pan H M, Dong Q F, Yang L F, et al. Research progress of intrinsic thermal conductive insulating

- liquid crystal epoxy resin [J]. *Paint & Coatings Industry*, 2024, 54(6): 82-88.
- [10] Li R, Yang X, Li J, et al. Review on polymer composites with high thermal conductivity and low dielectric properties for electronic packaging [J]. *Materials Today Physics*, 2022, 22: 100594.
- [11] 梁良. 电场诱导下大电机主绝缘用高导热 h-BN/EP 复合材料性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024.
- Liang L. Research on properties of high thermal conductivity h-BN/EP composites for main insulation of large generators by electric field induction [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2024.
- [12] 付强, 李浩明, 彭磊, 等. 填充型导热绝缘硅橡胶复合材料的性能研究[J]. *绝缘材料*, 2024, 57(9): 1-14.
- Fu Q, Li H M, Peng L, et al. Research progress on filled thermal conductive and electrically insulating silicone rubber composites[J]. *Insulating Materials*, 2024, 57(9): 1-14.
- [13] Duyen Do N B, Imenes K, Aasmundtveit K E, et al. Thermally conductive polymer composites with hexagonal boron nitride for medical device thermal management [C]//2023 24th European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition. Cambridge, UK: IEEE, 2023: 1-8.
- [14] He Y F, Kuang F X, Che Z X, et al. Achieving high out-of-plane thermal conductivity for boron nitride nano sheets/epoxy composite films by magnetic orientation[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, 157: 106933.
- [15] Tao K K, Sun G H, Feng C C, et al. Structural design and research progress of thermally conductive polyimide film-a review [J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2023, 44(13): 2300060.
- [16] 王有川, 赵安然, 李强军, 等. 导热灌封胶在电机上的应用[J]. *绝缘材料*, 2020, 53(8): 44-49.
- Wang Y C, Zhao A R, Li Q J, et al. Application of thermal conductive potting adhesive in motor [J]. *Insulating Materials*, 2020, 53(8): 44-49.
- [17] 刘正帅. 高温高压法合成金刚石/碳化硅复合材料及优化导热性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- Liu Z S. Study on thermal conductivity of diamond/silicon carbide composites with large particle size and high proportion of diamond prepared by HPHT [D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [18] 王海龙. 表面功能化碳化硅制备高导热弹性体复合材料[D]. 北京: 北京石油化工学院, 2023.
- Wang H L. Surface functionalization of sic for preparation of high thermally conductive elastomer composites [D]. Beijing: Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2023.
- [19] 姚健. 氮化硅-碳化硅/聚合物复合材料的制备及导热性能[D]. 海口: 海南大学, 2022.
- Yao J. Preparation and thermal conductivity of silicon nitride-silicon carbide/polymer composites [D]. Haikou: Hainan University, 2022.
- [20] 李金龙, 安辉, 陆艳君, 等. 真空干泵用两种驱动电机热特性对比分析[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(6): 66-70.
- Li J L, An H, Lu Y J, et al. Comparative analysis of thermal characteristics of two kinds of drive motors for vacuum dry pump[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(6): 66-70.
- [21] 韩世琦, 安辉, 陆艳君, 等. 电动汽车驱动电机绕组端部喷淋冷却温度场分析[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(6): 52-58.
- Han S Q, An H, Lu Y J, et al. Temperature field analysis of winding end spray cooling of electric vehicle drive motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(6): 52-58.
- [22] 马鹤林, 安辉, 陆艳君, 等. 深井泵用永磁同步潜水电机性能分析与成本计算[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(4): 82-89.
- Ma H L, An H, Lu Y J, et al. Performance analysis and cost calculation of permanent magnet synchronous submersible motor for deep well pumps[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(4): 82-89.
- [23] 方鑫. 电机温度场计算的多场耦合模型参数研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2021.
- Fang X. Study on parameters of multi field coupling model for temperature field calculation of motor [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2021.
- [24] Du G, Xu W, Zhu J, et al. Power loss and thermal analysis for high-power high-speed permanent magnet machines [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(4): 2722-2733.
- [25] 江华峰. 定子鼠笼低压多相电机效率优化设计与温度场分析[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2024.

- Jiang H H. Efficiency optimization design and temperature field analysis of stator cage low-voltage multiphase motors [D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2024. <https://link.cnki.net/urlid/44.1522.th.20250917.1410.002>.
- [26] 刘文秀. 永磁同步电机损耗计算及温度场分析综述[J/OL]. 机电工程技术, 1-11 [2025-12-22]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1522.th.20250917.1410.002>.
- Liu W X. Overview of loss calculation and temperature field analysis of permanent magnet synchronous motor[J/OL]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 1-11 [2025-12-22].
- 收稿日期:2026-01-04  
收到修改稿日期:2026-02-13  
作者简介:  
成凯瑞(1998—),男,硕士研究生,研究方向为特种电机设计及其控制,497010085@qq.com;  
\* 通信作者:安跃军(1962—),男,博士,教授,研究方向为特种电机及其控制,anyj\_dq@sut.edu.cn。