

新型陶瓷屏蔽套材料对屏蔽式永磁同步电机 电磁热性能的影响研究

苗绪世, 李明*, 伦淑娴

(渤海大学 控制科学与工程学院, 辽宁 锦州 121210)

Study on the Effect of New Ceramic Shielding Can Material on the Electromagnetic Thermal Properties of Canned Permanent Magnet Synchronous Motor

MIAO Xushi, LI Ming*, LUN Shuxian

(College of Control Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121210, China)

Abstract: [Objective] Canned permanent magnet synchronous motor (CPMSM) is widely used in nuclear power, chemical, and other harsh environments due to the sealing properties of its shielding can. However, eddy current losses in the shielding can lead to significant temperature rise, adversely affecting motor performance. To mitigate these losses and thermal effects while enhancing electromagnetic performance and thermal stability, this paper systematically investigates the electromagnetic-thermal coupling effects of shielding can materials, with a focus on exploring the application potential of non-metallic ceramic materials in canned motors. [Methods] In this study, a CPMSM with rated power of 1.5 kW and a speed of 9 000 r/min was selected as the research object, and a two-dimensional finite element model was constructed, and the shielding can of three materials with different physical properties, were compared and analyzed by using the two-way coupling iterative algorithm of electromagnetic field and temperature field. The effects of physical properties of shielding can materials on the induced electromotive force, air gap magnetic density, loss, torque and efficiency of motors were studied, and their temperature distribution characteristics were deeply analyzed. [Results] The research results demonstrated that when silicon nitride (Si_3N_4) material was used as the motor shielding sleeve, its insulating properties effectively suppressed eddy current

losses, improved motor efficiency and output torque, and increased the fundamental amplitude of the induced electromotive force by more than 11%. Compared to SUS316 and SUS430 materials, Si_3N_4 ensured more uniform temperature distribution and lower thermal rise in motors. Notably, permanent magnet temperatures were reduced by 30% when using Si_3N_4 as the shielding material compared to SUS316. [Conclusion] As a new high-performance shielding can material, Si_3N_4 has excellent characteristics such as electrical insulation, non-magnetism and high thermal conductivity. It can effectively suppress eddy current, optimize electromagnetic characteristics and enhance the thermal stability of motor. It has an important application prospect in the design of efficient, reliable and low loss motor.

Key words: canned permanent magnet synchronous motor; electromagnetic-thermal coupling effects; eddy current loss; silicon nitride

摘要:【目的】屏蔽式永磁同步电机(CPMSM)因屏蔽套的密封性,被广泛应用于核电、化工等恶劣环境。但屏蔽套的涡流损耗会导致电机温升,影响性能。为降低损耗与温升,本文系统研究了非金属陶瓷屏蔽材料的电磁热耦合效应,探索其应用潜力。【方法】本研究以一台额定功率 1.5 kW、转速 9 000 r/min 的 CPMSM 为研究对象,构建二维有限元模型,采用电磁场与温度场的双向耦合迭代算法,对三种不同物理性质材料的屏蔽套进行对比分析。研究了屏蔽套材料物理特性对电机感应电动势、气隙磁密、损耗、转矩及效率的影响,并深入分析了其温度分布特性。【结果】研究结果表明,氮化硅(Si_3N_4)材料作为电机屏蔽套时,凭借其绝缘性特征,有效抑制了涡流损

基金项目: 国家自然科学基金项目(62473061);辽宁省教育厅一般项目(LJ212410167024)

National Natural Science Foundation of China(62473061);
General Project of Liaoning Provincial Department of Education
(LJ212410167024)

耗,提高了电机效率与输出转矩,且感应电动势基波幅值提升超过11%。与SUS316和SUS430材料相比, Si_3N_4 使电机的温度分布更加均匀、温升更低,永磁体温度相比采用SUS316作为屏蔽套材料时降低了30%。【结论】 Si_3N_4 作为新型高性能屏蔽套材料,兼具电绝缘性、非磁性、高热导率等优异特性,能有效抑制涡流损耗、优化电磁特性并增强电机热稳定性,在高效、可靠、低损耗电机设计中具有重要应用前景。

关键词: 屏蔽式永磁同步电机;电磁热耦合效应;涡流损耗;氮化硅

0 引言

随着稀土永磁材料的不断发展,永磁电机因运行可靠性、较高的效率以及灵活的形状和尺寸等优势^[1]在各行业中得到了广泛关注。屏蔽电机和屏蔽泵驱动器广泛应用于核能、化工等需要无泄漏输送危险液体的领域^[2-4]。

屏蔽电机中,交变磁场在金属屏蔽套上产生涡流,导致效率显著降低^[5]并改变磁场分布^[6]。研究屏蔽套对电磁特性和温度场的影响至关重要,常用经验公式和有限元法分析涡流损耗^[7-8]。

屏蔽式电机的研究已在多个方面取得进展。文献[9-10]提出新型移相式结构以消除屏蔽套感应电势;文献[11]推导了损耗计算式;文献[12]通过有限元法分析了涡流问题,同时指出温度场问题并非单向求解,温度变化会同时影响电机损耗、材料导热系数和散热系数^[13]。文献[14-15]提出双向耦合算法;文献[16-18]提出迭代法,更精确预测温度场和电磁场。

为了进一步提高电机温度计算准确性,文献[19]用叠加法分离环流和涡流损耗。屏蔽套材料需满足高强度^[20]、耐腐蚀^[21]、高电阻率、低磁导率^[22]和良好导热性^[23]。文献[24]分析了非金属玄武岩材料的应用潜力,发现其低电导率可有效减小涡流损耗。

以上文献主要聚焦于屏蔽套涡流效应及其能量损耗对电机电磁场和温度场的影响,但对材料特性与电机综合性能关系的系统性研究不足,特别是对不导磁不导电陶瓷材料的应用探索较少。基于此,本文以一台1.5 kW、9 000 r/min的屏蔽式永磁同步电机(Canned Permanent Magnet Synchronous Motor, CPMSM)为例,采用电磁场-温

度场双向耦合迭代算法,对比分析了SUS316、SUS430与氮化硅(Silicon Nitride, Si_3N_4)陶瓷三种屏蔽套材料对电机电磁性能、温度场分布及不同负载下损耗效率的影响。本研究为电机设计提供了参考,对保证电机高效可靠运行具有重要意义。

1 磁热耦合数学模型

1.1 电磁场计算模型

有限元法通过将连续的电磁场域离散化为有限个单元,利用变分原理或加权残差法建立单元方程,最终形成全局方程组求解电磁场分布。根据有限元法对电机电磁场建立数学模型^[25],如式(1)所示:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_m \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho_m \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_s + \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} \\ A_z|_{\Gamma} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: A_z 为磁动势; ρ_m 为磁阻率; σ 为电导率; J_s 为电流密度; Γ 为外边界。

1.2 温度场计算模型

电机三维热传导模型如式(2)所示^[26]:

$$\begin{cases} K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q = c\gamma \frac{\partial T}{\partial \tau} \\ K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_1} = 0 \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_2} = \alpha(T - T_e) \end{cases} \quad (2)$$

式中: T 为温度; q 为热源密度; c 为比热容; γ 为密度; τ 为时间; S_1 为电机绝热边界面; S_2 为电机散热边界面; T_e 为 S_2 周围介质的温度; α 为 S_2 的散热系数; K 为 S_1 和 S_2 的法向导热系数; K_x 、 K_y 、 K_z 分别为电机各介质在 x 、 y 、 z 方向的导热系数。

当 $\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0$,说明温度趋于稳定,可求解得到三维稳态温度场的数学模型。

1.3 温度场对电磁物性参数的影响

1.3.1 温度对铜耗的影响

电机铜耗的计算如式(3)所示:

$$P_{\text{Cu}} = mI^2 R(t) \quad (3)$$

式中: m 为绕组相数; I 为电流有效值; $R(t)$ 为 t 时刻每相绕组的电阻值。

由于永磁同步电机的功率密度高,其在工作过程中温升较快,会引起绕组阻值增加,进而影响

电机的电磁性能,导致电机稳定运行时的温度发生变化。通过迭代运算得到一个稳定数据,温度与绕组阻值的关系如式(4)所示^[13]:

$$R_{T_1}=R_{T_0}[1+\alpha(T_1-T_0)] \tag{4}$$

式中: T_0 为电机初始温度; T_1 为电机工作时的绕组温度; α 为电阻随温度变化的温度系数; R_{T_0} 、 R_{T_1} 分别为温度在 T_0 、 T_1 时的绕组阻值。

1.3.2 温度对永磁体涡流损耗的影响

温度对永磁体涡流损耗的具体影响如式(5)所示^[17]:

$$\begin{cases} B_{rT_1} = \left(1 - \frac{IL}{100}\right) \left[1 + (T_1 - T_0) \frac{\alpha_{B_r}}{100}\right] B_{rT_0} \\ H_{cT_1} = \left(1 - \frac{IL}{100}\right) \left[1 + (T_1 - T_0) \frac{\alpha_{H_c}}{100}\right] H_{cT_0} \end{cases} \tag{5}$$

式中: B_{rT_0} 、 B_{rT_1} 分别为温度在 T_0 、 T_1 时的剩余磁感应强度; α_{B_r} 为剩余磁感应强度随温度变化的温度系数; H_{cT_0} 、 H_{cT_1} 分别为温度在 T_0 、 T_1 时的计算矫顽力; α_{H_c} 为计算矫顽力随温度变化的温度系数; IL 为剩余磁感应强度的不可逆损失率。

1.3.3 温度对屏蔽套损耗的影响

屏蔽套是永磁电机中用于保护永磁体免受环境腐蚀或机械冲击的关键部件,通常由导电材料制成。由于其导电特性会导致交变磁场中产生涡流,进而产生屏蔽套损耗。根据经验公式法得到定子屏蔽套涡流损耗的计算式为^[17]

$$P_{can} = \frac{0.5 \cdot K_s \cdot B_g^2 \cdot n^2 \cdot L \cdot D^3 \cdot t}{\rho} \times 10^{-14} \tag{6}$$

式中: K_s 为屏蔽套损耗系数; B_g 为气隙磁通密度; n 为电机转速; L 为铁心长度; D 为定子内径; t 为屏蔽套厚度; ρ 为屏蔽套材料的电阻率。

1.4 电磁热双向迭代计算方法流程

电机中电磁-热双向迭代计算方法主要用于分析电机在电磁场与温度场之间的耦合效应,其流程图如图 1 所示^[18]。

图 1 中,首先进行初始化与环境预设,设定初始环境温度作为分析的起点;其次,基于初始温度,分析该温度下电机的电磁特性,并计算电机损耗确定生热率,确定电机温度场边界条件及热相关参数,根据损耗计算电机各部件温度。如果电机整体最高温度与上一次计算的温度差

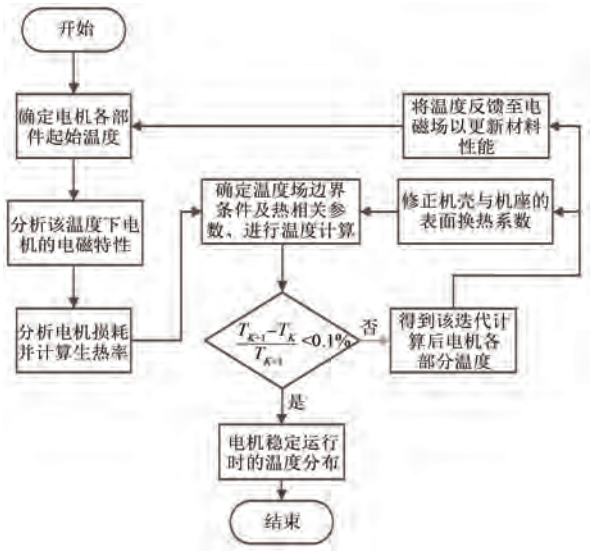


图 1 电磁-热双向迭代流程图

Fig. 1 Flowchart of electromagnetic-thermal bidirectional iterative calculation

值小于阈值则计算结束,否则更新温度数据进行迭代计算。然后,根据电机各部件温度修正机壳与机座表面的换热系数,并更新该温度下电机材料物性参数和热特性参数。最后,重复进行以上步骤直到两次温度小于阈值,得出稳定的电磁场和温度场。

1.5 CPMSM 模型

本文以一台 6 极 9 槽 CPMSM 为研究对象,其主要参数如表 1 所示。利用电磁-热双向迭代法研究电机采用三种不同材料的屏蔽套时,CPMSM 的磁热耦合场以及其性能影响,建立了该电机的二维瞬态有限元模型,如图 2 所示。

表 1 CPMSM 主要参数

Tab. 1 Main parameters of the CPMSM

参数名称	参数值
额定功率/kW	1.5
额定电压/V	200
定子外径/mm	107
定子内径/mm	50.5
气隙长度/mm	0.5
轴向长度/mm	25
额定转速/(r·min ⁻¹)	9 000
槽数	9
永磁体材料	N38UH
屏蔽套厚度/mm	0.5
极对数	3

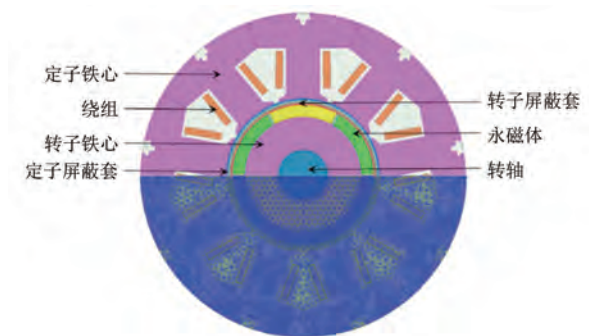


图2 CPMSM 有限元模型

Fig. 2 Finite element model of the CPMSM

2 屏蔽套材料对 CPMSM 电磁性能的影响

基于电磁-热双向迭代法分析了 CPMSM 在采用三种不同材料作为屏蔽套时对电机电磁性能的影响。在三种屏蔽套材料中,SUS316 作为典型的奥氏体不锈钢,具有良好的导电性和非磁性特征,且具备良好的经济性;相比之下,SUS430 作为铁素体不锈钢,呈现铁磁性,虽具有较好的耐腐蚀性和高温稳定性,但其磁特性可能对电机电磁性能产生不利影响; Si_3N_4 作为工程陶瓷材料,兼具非磁性和优异的电绝缘性能,在高温、强腐蚀等恶劣工况下能够实现有效的电磁屏蔽,保障电机运行稳定性,但其制造成本相对较高,在一定程度上限制了工程应用的经济性。三种材料在环境温度为 22 ℃ 时的物性参数如表 2 所示。

表 2 三种材料物性参数对比

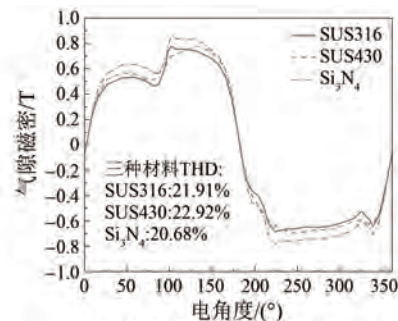
Tab. 2 Comparison of physical parameters of three materials

屏蔽套材料	SUS316	SUS430	Si_3N_4
相对磁导率	1.0~1.05	200~600	1.0
电阻率/ $(\mu\Omega\cdot\text{m})$	0.75	0.75	10^{14}
热导率/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K})$	15	25	90
电阻率温升系数/ $(^\circ\text{C}^{-1})$	0.001	0.000 6	—

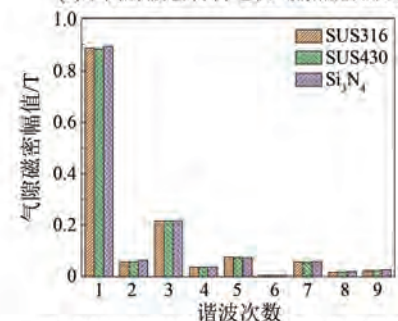
2.1 不同屏蔽套材料对电机气隙磁密的影响

不同屏蔽套材料对电机气隙磁密的影响如图 3 所示。

由图 3(a)可知,采用 Si_3N_4 作为屏蔽套材料时,气隙磁密幅值较大;从谐波总畸变率 (Total Harmonic Distortion, THD) 的角度分析, Si_3N_4 屏



(a)不同屏蔽套材料电机气隙磁密曲线



(b)不同屏蔽套材料电机气隙磁密谐波含量

图3 不同屏蔽套材料对电机气隙磁密的影响

Fig. 3 Influence of different shielding can materials on air-gap magnetic flux density in motors

蔽套表现出最优的电磁性能,其 THD 仅为 20.68%,表明屏蔽套材料采用 Si_3N_4 时对气隙磁密波形的畸变抑制效果最佳。由图 3(b)可知,当屏蔽套采用 Si_3N_4 时,计算出的气隙磁密基波幅值相较于 SUS316 时增加 13.2%,相较于 SUS430 时增加 8.6%。

2.2 不同屏蔽套材料对电机感应电动势的影响

不同屏蔽套材料对电机感应电动势的影响如图 4 所示。

由图 4(a)可知, Si_3N_4 作为屏蔽套材料时对应的空载感应电动势幅值最高,SUS430 次之,SUS316 最低。这是由于低电阻率材料因感应电流强而增强屏蔽效应,削弱气隙磁场,降低感应电动势; Si_3N_4 因绝缘性不产生涡流,磁场传递完整,感应电动势较高。由图 4(b)可知,当屏蔽套材料采用 Si_3N_4 时,其空载感应电动势基波幅值比采用 SUS316 时增加了 14%,比采用 SUS430 时增加了 11.3%。

2.3 不同屏蔽套材料对电机各部分损耗及效率的影响

对一台额定功率为 1.5 kW 的 CPMSM 进行分析,当其在额定负载下运行时,电机各部分损耗

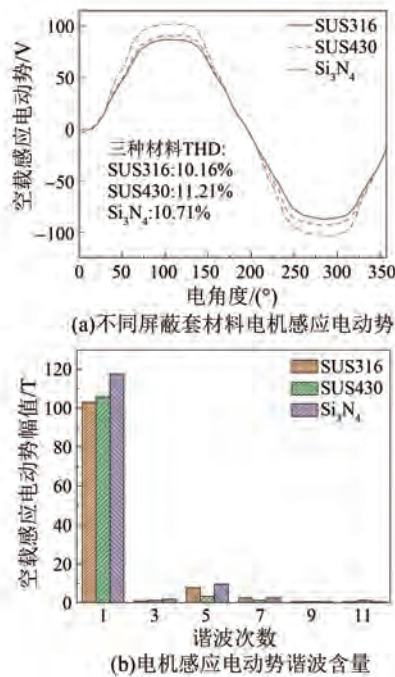


图 4 不同屏蔽套材料对电机感应电动势的影响
Fig. 4 Influence of different shielding can materials on induced electromotive force in motors

以及效率影响如表 3 所示。

表 3 不同屏蔽套材料电机各部分损耗
Tab. 3 Loss components of the motor with different shielding can materials

屏蔽套材料	SUS316	SUS430	Si ₃ N ₄
定子铁耗/W	32.79	20.63	32.79
绕组铜耗/W	43.07	43.07	43.07
永磁体涡流损耗/W	6.53	2.28	6.53
定子屏蔽套涡流损耗/W	462.32	580.15	0
转子屏蔽套涡流损耗/W	13.21	13.22	5.98
总损耗/W	557.92	659.35	88.40

由表 3 可知,当电机定子屏蔽套材料采用 Si₃N₄ 时,电机总损耗相较于 SUS316 降低了 84.15%、相较于 SUS430 降低了 86.59%。这主要是因为 Si₃N₄ 作为一种陶瓷材料,具有绝缘性,并且具有很高的磁阻率,在电机运行时定子屏蔽套区域不会感应出涡流,既而不会产生涡流损耗。

不同定子屏蔽套材料对电机效率的影响如图 5 所示。由图 5 可知,当屏蔽套材料采用 Si₃N₄、SUS316 和 SUS430 时,随着负载率的增加,电机效率呈增加趋势。

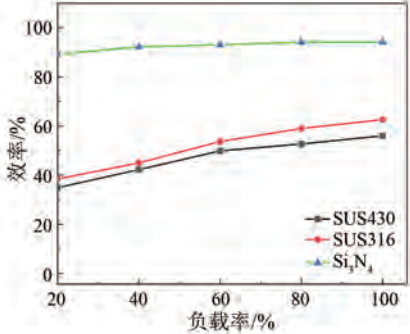


图 5 不同定子屏蔽套材料对电机效率的影响
Fig. 5 Influence of different stator shielding can materials on motor efficiency

2.4 不同屏蔽套材料对电机转矩的影响

当电机采用三种屏蔽套材料时通入相同的驱动电流,电机转矩如图 6 所示。由图 6 可知,当定子屏蔽套材料采用 Si₃N₄ 时,电机在稳定运行时转矩平均值为 1.63 N·m,相比另外两种材料有较高转矩。

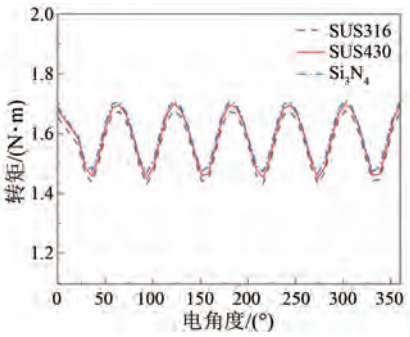


图 6 三种定子屏蔽套材料下电机转矩
Fig. 6 Motor torque under three different stator shielding can materials

3 屏蔽套材料对 CPMSM 温度场的影响

根据电磁场计算结果,可进一步分析电机各部分温度。电机定子与转子内部各部件之间的热量传递主要以热传导为主^[27],机壳表面则通过对流换热进行散热,而辐射换热对电机温度场的影响较小^[28],可忽略不计。在有限元分析软件 Ansys Workbench 中,边界条件设置采用等效模型对电机进行整体分析,损耗数据则基于满负载工况(即输出转矩为 1.6 N·m)输入。电机采用水冷散热,机壳内设有螺旋型水道。水冷系统的入口边界条件设为速度入口,入口流速为 2.5 m/s;出

口边界条件设为压力出口,出口压力为 1 个标准大气压。CPMSM 温度场三维模型如图 7 所示。

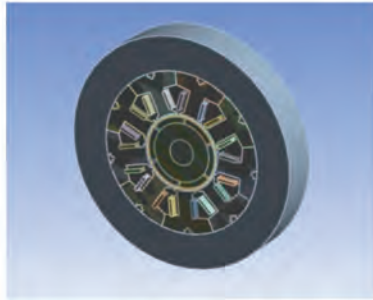


图 7 CPMSM 温度场三维模型

Fig. 7 3D model of CPMSM temperature field

电机各部件的损耗作为热源,根据计算结果赋值至各相应部件,假设各部件内热源在体积上均匀分布。利用 Ansys Workbench 进行稳态温度场分析,研究了三种定子屏蔽套材料下的电机温度场。

采用三种不同屏蔽套材料时,电机的整体温度场分布如图 8 所示。电机各部件在运行过程中产生的功率损耗构成内部热源,所产生的热量由传热机制从热源区域向散热区域传递^[29],并最终通过散热路径向外界环境排出,从而建立起电机内部的稳态温度分布。

由图 8 可知,当电机定子屏蔽套采用 Si_3N_4 时,电机整体温度场中的最高温度显著低于其他两种材料。这是因为 Si_3N_4 作为非导电陶瓷材料,在交变磁场作用下不会产生涡流损耗,从而有效减少了定子屏蔽套的热量产生,使得电机总损耗下降,电机整体温度相应降低。

采用三种不同屏蔽套材料,电机进行磁热双向耦合温度场计算时,随着迭代次数增加,电机整体最高温度的变化情况如表 4 所示。

表 4 迭代过程中电机最高温度

Tab. 4 The maximum temperature of the motor during the iteration process

迭代次数	迭代过程中电机最高温度/℃		
	SUS316	SUS430	Si_3N_4
1	125.61	140.2	95.307
2	135.307	152.41	98.188
3	136.188	155.41	102.019
4	137.019	154.27	102.38
5	137.6	154.8	-

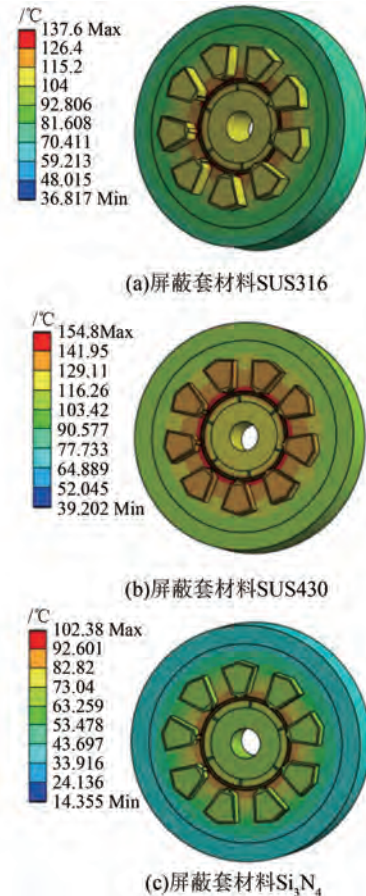


图 8 CPMSM 整体温度分布

Fig. 8 Overall temperature distribution of the CPMSM

由表 4 可知,当屏蔽套材料采用 SUS316 或 SUS430 时,经 5 次迭代达到温度收敛;采用 Si_3N_4 时,仅需 4 次迭代即可收敛,从而得到最终温度计算结果。

采用三种屏蔽套材料时电机永磁体的温度分布云图如图 9 所示。由图 9 可知,最高温度集中在靠近定子槽口的中部位置,主要由于该部位距离定子屏蔽套和定子槽口较近,散热条件较差^[30]。当电机屏蔽套材料采用 Si_3N_4 时,永磁体温升相较于 SUS316 降低了 30%,相较于 SUS430 降低了 38%。

槽绝缘的温度分布云图如图 10 所示,槽绝缘内部装有定子绕组,外部与定子铁心连接。由图 10 可知,采用 Si_3N_4 作为屏蔽套材料时,电机槽绝缘温度相对较低。

4 结语

本文以一台 1.5 kW 的 CPMSM 为例,利用电

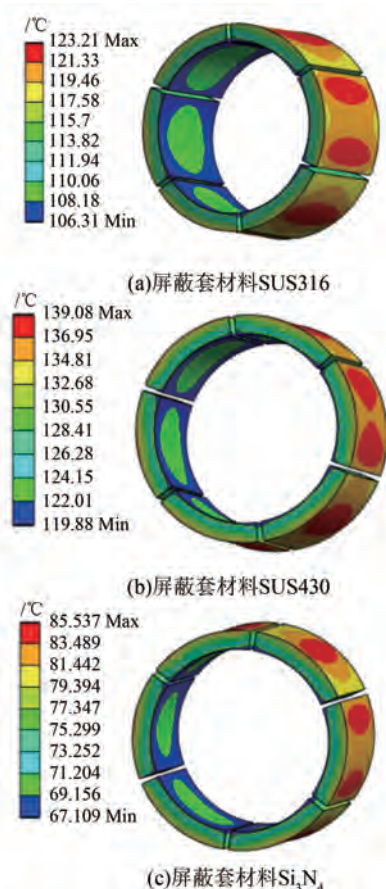


图 9 电机永磁体温度分布

Fig. 9 Temperature distribution of permanent magnet of the motor

磁热双向迭代的方法分析了三种不同物性参数屏蔽套材料对电机性能的影响,建立了电机三维模型,利用有限元软件对电磁场和三维温度场进行分析,得出如下结论。

(1) 当电机屏蔽套材料分别采用 SUS316、SUS430、 Si_3N_4 时,通过电磁热双向迭代法进行电磁场分析可以得出,采用 Si_3N_4 时,电机不存在定子屏蔽套涡流损耗,与传统的 SUS316 和 SUS430 材料相比,采用 Si_3N_4 屏蔽套的电机总损耗减少,效率最高,且感应电动势基波幅值提升超过 11%,转矩输出提升 5% 以上。

(2) 通过电磁热双向迭代法来对电机温度场进行计算,可以看出屏蔽套采用 Si_3N_4 时相较于 SUS316、SUS430 两种材料整体温度较低,永磁体温升相较于传统的 SUS316、SUS430 材料分别降低了 30%、38%,整体温度分布更加均匀。

新型陶瓷材料作为电机屏蔽套使用时对电机

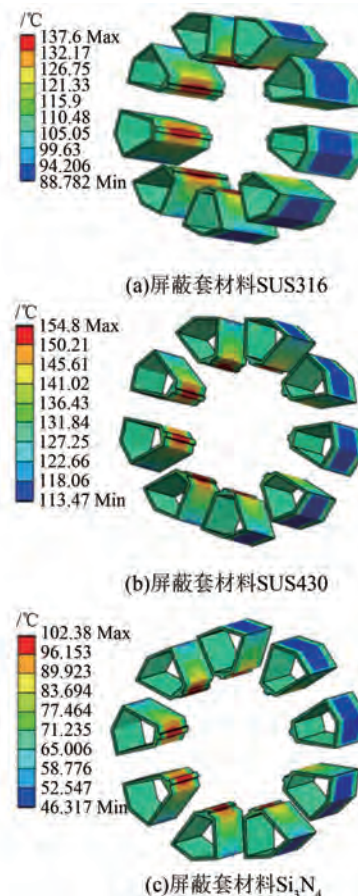


图 10 电机槽绝缘温度分布

Fig. 10 Temperature distribution of stator insulation of the motor

性能有着显著的提高,但同时存在一些问题,主要是加工难度较大,尤其是在精密尺寸和形状上,需要更高的技术要求和成本。其次是陶瓷材料与金属部件的连接和固定可能存在困难,需要专门的技术来确保可靠的接合。

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

苗绪世、李明进行了方案设计、内容总结与论文撰写,苗绪世进行了试验研究,苗绪世、李明和伦淑娴参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary and

paper writing were carried out by Miao Xushi and Li Ming. The experiment was conducted by Miao Xushi. The manuscript was revised by Miao Xushi, Li Ming and Lun Shuxian. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 田士强, 安辉, 陆艳君, 等. 真空泵用反凸极永磁同步电机设计与性能分析[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(5): 72-80.
TIAN S Q, AN H, LU Y J, et al. Design and performance analysis of negative salient pole permanent magnet synchronous motor for vacuum pump [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(5): 72-80.
- [2] DU L X, LIU X P, FU J S, et al. Design and optimization of reverse salient permanent magnet synchronous motor based on controllable leakage flux [J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2021, 5(2): 163-173.
- [3] 秦雪飞, 沈建新, Nilssen Robert, 等. 高速永磁同步电机在多物理场和变流器约束下的设计[J]. 电工技术学报, 2022, 37(7): 1618-1633.
QIN X F, SHEN J X, NILSSEN R, et al. Design of high-speed PMSM considering multi-physics fields and power converter constraints [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1618-1633.
- [4] 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): 111-121.
DONG C Y, JIN P F, YANG Z H, 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): 111-121.
- [5] 张文校, 胡岩, 曹力, 等. 高速永磁屏蔽电机摩擦损耗分析与计算[J]. 电工技术学报, 2023, 38(12): 3122-3129.
ZHANG W X, HU Y, CAO L, et al. Analysis and calculation of friction loss of high-speed permanent magnetic shielding motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(12): 3122-3129.

- [6] 褚赛. 屏蔽式永磁电机的屏蔽套效应及涡流分析[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
CHU S. Analysis of can effect and eddy current of canned permanent magnet motor [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [7] 周明荣. 永磁屏蔽电泵电磁场有限元分析及其屏蔽套涡流损耗计算[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2004.
ZHOU M R. Analyzing the permanent magnet canned motor pump electromagnetic by finite element method and the eddy-current loss of the liners [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2004.
- [8] 侯云鹤, 程祥, 张炳义. 基于槽极比选择的切向永磁同步电机永磁体涡流损耗抑制措施[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(5): 100-110.
HOU Y H, CHENG X, ZHANG B Y. Measures to suppress eddy current loss in permanent magnets of tangential permanent magnet synchronous motors based on slot-pole ratio selection [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(5): 100-110.
- [9] 张强. 新型移相式屏蔽电动机定子屏蔽套涡流与热应力研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
ZHANG Q. Study of eddy losses and thermal stress on canned can in canned motor with new phase-shifted structure [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2015.
- [10] 安跃军, 张强, 李文瑞, 等. 新型移相式屏蔽电动机屏蔽套涡流与温升分析[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(6): 50-54.
AN Y J, ZHANG Q, LI W R, et al. Eddy losses and temperature rise on canned can in canned motor with new phase-shifted structure [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(6): 50-54.
- [11] GAO L L, WANG S M, LI J G. Research on end structure losses and its suppression method of high-speed canned induction motor [J]. IEEE Access, 2023, 11: 49913-49923.
- [12] 王智超, 陆道纲, 李臻, 等. 小型压水堆屏蔽泵的屏蔽套涡流计算方法及应用[J]. 核科学与工程, 2024, 44(4): 832-837.
WANG Z C, LU D G, LI Z, et al. Calculation method and application of can eddy loss of the canned pump of small pressurized water reactor [J]. Nuclear Science and Engineering, 2024, 44(4): 832-837.
- [13] 安跃军, 张振厚, 张强, 等. 干式涡旋真空泵用特

- 种电机温度场仿真与实验[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(8): 48-52.
- AN Y J, ZHANG Z H, ZHANG Q, et al. Temperature field simulation and experiment of special motor for dry scroll vacuum pump [J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(8): 48-52.
- [14] 宋聪. 基于耦合场的永磁伺服电机温升计算研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
- SONG C. Research and calculation of temperature rise of permanent magnet servo motor based on coupling field [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.
- [15] 于添昊, 李明, 伦淑娴. 屏蔽套材料对屏蔽式永磁同步电机电磁场和温度场的影响研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(4): 90-101.
- YU T H, LI M, LUN S X. Study on the influence of can sleeve material on the electromagnetic field and temperature field of canned permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(4): 90-101.
- [16] 穆海琦, 周舒昊, 于添昊, 等. 真空泵用屏蔽式永磁同步电机电磁场-温度场互相迭代计算方法[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(2): 113-122.
- MU H Q, ZHOU S H, YU T H, et al. Electromagnetic field-temperature field iterative calculation method of canned permanent magnet synchronous motor for vacuum pump [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(2): 113-122.
- [17] 朱高嘉, 朱英浩, 朱建国, 等. 永磁电机温度场的改进有限公式迭代算法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 136-144.
- ZHU G J, ZHU Y H, ZHU J G, et al. A modified thermal rewind model of permanent magnet motors based on finite formulation method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(16): 136-144.
- [18] 王玉彬, 林洋. 基于电磁热双向耦合的内置式永磁同步电机温度场等效模型及温度场分析[J/OL]. 电工技术学报, 2025-7-17. <https://link.cnki.net/doi/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.241947>.
- WANG Y B, LIN Y. Equivalent model of temperature field and temperature field analysis of interior permanent magnet synchronous motor based on electromagnetic-thermal bidirectional coupling [J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025-7-17. <https://link.cnki.net/doi/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.241947>.
- [19] GAO L L, LIU H, NIU Q. Analytical model for no load magnetic field, can losses, and temperature of permanent magnet canned motor [J]. IEEE Access, 2023, 11: 74816-74827.
- [20] 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.
- [21] 徐垚智. LNG 泵用低温高速永磁电机转子涡流损耗与强度研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.
- XU Y Z. Research on rotor eddy current loss and stress of cryogenic high-speed permanent magnet motor for liquefied natural gas pump [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021.
- [22] 高莲莲. 兆瓦级双屏蔽感应电动机屏蔽套电磁与热问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.
- GAO L L. Research on problems of electromagnetic and thermal for cans in megawatt double canned induction motors [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2018.
- [23] 李伟, 江晓波, 孙鲁, 等. 带有不同屏蔽层结构的高速永磁电机转子涡流损耗分析与实验验证[J]. 现代机械, 2022, (3): 39-43+57.
- LI W, JIANG X B, SUN L, et al. Analysis and experimental verification of rotor eddy current loss in high-speed PMSM with different shielding structures [J]. Modern Machinery, 2022, (3): 39-43+57.
- [24] QIU H, LIU Z, XIONG B, et al. Influence of sleeve material and sleeve composite structure on performance of high-speed permanent magnet starter-generator for micro-gas turbine [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2022, 17(4): 2275-2284.
- [25] LI M, AN Y J, ZHANG Z H, et al. Effect of time harmonic current considering load condition on performance of canned induction motor [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and

- Mechanics, 2021, 66(3): 369-385.
- [26] 曹力, 胡岩, 卓亮. 高速永磁屏蔽电机损耗分析与温升研究[J]. 微电机, 2021, 54(4): 11-15+31.
- CAO L, HU Y, ZHUO L. Study on loss analysis and temperature rise of high-speed permanent magnet canned motor [J]. Micromotors, 2021, 54(4): 11-15+31.
- [27] 朱高嘉, 朱英浩, 佟文明, 等. 基于流固耦合的高速永磁电机冷却结构分析与改进[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(12): 1-7.
- ZHU G J, ZHU Y H, TONG W M, et al. Analysis and enhancement of cooling system of high-speed permanent magnet motor based on computational fluid dynamics [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(12): 1-7.
- [28] 张乐, 蓝益鹏. 六相横向磁场磁通切换直线磁悬浮电机温度场有限元分析[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(9): 80-89.
- ZHANG L, LAN Y P. Finite element analysis of the temperature field of a six-phase transverse magnetic field flux switching linear magnetic suspension motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(9): 80-89.
- [29] 孙煜昊, 蓝益鹏. 磁通切换磁悬浮直线电机热分析及冷却系统设计[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(1): 84-93.
- SUN Y H, LAN Y P. Thermal analysis and cooling system design of flux switching magnetic suspension linear motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(1): 84-93.
- [30] 马鑫, 郑庆华, 周挺, 等. 电动滚筒用永磁外转子电机水冷系统的设计与分析[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(9): 8-13+27.
- MA X, ZHENG Q H, ZHOU T, et al. Design and analysis of water cooling system for permanent magnet outer rotor motor used in electric drum [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(9): 8-13+27.
-
- 收稿日期:2025-07-21
收到修改稿日期:2025-09-06
作者简介:
苗绪世(2001-),男,硕士研究生,研究方向为特种电机设计及多物理场研究,2024008020@bhu.edu.cn;
*通信作者:李明(1987-),男,博士,副教授,研究方向为特种电机设计及控制技术,liming1@qymail.bhu.edu.cn。