

小型表贴式永磁电机不同护套性能差异仿真分析

孔思琪^{1,2,3}, 陈进华^{1*}, 仇一鸣², 张 驰¹

(1.中国科学院 宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201; 2.宁波菲仕技术股份有限公司, 浙江 宁波 315800;
3.宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 提出采用玻璃纤维取代碳纤维用于小型表贴式永磁电机护套的方案, 为此对一款实际生产中额定功率为 11 kW、额定转速为 $6\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的小型表贴式永磁电机转子的保护工艺进行了研究. 基于有限元法, 采用 Ansys 软件分别对玻璃纤维无纬带和碳纤维 2 种护套材料进行转子结构强度和温度场仿真. 结果表明, 碳纤维护套的保护效果优于玻璃纤维护套, 但玻璃纤维护套的散热性好于碳纤维护套, 2 种护套均能保证测试电机的结构安全. 基于以上结果并考虑材料成本和工艺难易程度, 认为采用玻璃纤维护套性价比更高.

关键词: 表贴式永磁电机; 玻璃纤维无纬带; 碳纤维

中图分类号: TM341

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2022) 04-0040-06

永磁电机具有体积小、重量轻、效率高、功率因数大、控制特性好等优点, 相比其他传统电机, 两者在结构上有很大差别, 永磁电机的应用范围越来越广. 磁钢可以承受很大的压力($>1\,000\text{ MPa}$), 但承受的拉力小于 80 MPa , 在离心力作用下磁钢易碎裂, 因此需要在磁钢外围加装一个保护套, 以抵消旋转时产生的离心力^[1]. 高强度的复合材料具有质量轻、涡流损耗小等特点^[2]. 目前小型表贴式永磁电机在实际生产中通常采用碳纤维护套, 但碳纤维价格较高且工艺复杂.

当前对碳纤维护套的研究成果颇丰, 如文献[3-6]针对表贴式永磁电机转子强度设计开展了系列研究. 文献[7]建立了转子应力分析模型, 对比了 4 种不同护套材料对永磁体应力分布的影响. 文献[8]分别采用解析法和有限元法分析了表贴式高速永磁电机的转子强度, 针对碳纤维护套提出了通过在护套内层缠绕各向同性的玻璃纤维来降低护套弯曲应力. 文献[9]建立了转子等效应力解析模型, 基于理论分析得出满足应力要求的最佳过盈量. 文献[10-12]分别从碳纤维的厚度、过盈量以及温度场等对转子强度进行了研究. 文献[13-14]

介绍了玻璃纤维无纬带的绑扎工艺, 对电机转子用无纬带绑扎的可靠性展开了研究, 通过理论公式分析了无纬带本身的可靠性, 但未对永磁体进行强度分析. 文献[15]研究表明, 车用内置式永磁电机转子表面绑扎玻璃纤维无纬带能提高转子强度、减少绕组端部漏磁, 可有效改善电机的电气性能、降低成本、简化加工制造工艺. 但对玻璃纤维无纬带用于永磁体保护套的研究鲜见报道.

本文提出使用玻璃纤维取代碳纤维用于小型表贴式永磁电机护套的设想. 由于目前市面上没有用玻璃纤维无纬带作为转子保护套的表贴式永磁电机, 因此缺少碳纤维护套和玻璃纤维护套在转子强度、永磁体保护、电机温升等方面的比较. 为此, 对一款实际生产中额定功率为 11 kW、额定转速为 $6\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的小型表贴式永磁电机转子保护工艺进行了研究, 采用有限元法研究 2 种护套的性能差异, 以期为实际生产中降低小型表贴式永磁电机生产成本、获得更高效益提供参考.

1 不同绑扎工艺的特点

表贴式永磁电机磁钢一般都用高强度、耐高温

收稿日期: 2021-07-06.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51807194); 宁波市“科技创新 2025”重大专项(2019B10077); 宁波市自然科学基金(2019A610115).

第一作者: 孔思琪(1997-), 男, 浙江杭州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 高速电机设计. E-mail: 1243202951@qq.com

*通信作者: 陈进华(1985-), 男, 江西进贤人, 博士/正高级工程师, 主要研究方向: 永磁电机设计及控制. E-mail: chenjinhua@nimte.ac.cn

黏结剂黏附在转子表面, 呈偏心瓦片状提供径向磁通^[16], 黏结剂涂抹于转轴表面, 本文不考虑涂层厚度对转子强度的影响. 在安装保护套时对磁钢施加一定的静态预压力, 使其在转子运转时抵消部分离心力, 从而保证电机运行的可靠性. 不同材质保护套对电机的气隙大小、散热、涡流损耗以及转子结构强度等会产生不同的影响, 进而影响电机的性能.

1.1 玻璃纤维无纬带绑扎工艺

玻璃纤维无纬带绑扎方法成本低、加工简单、可靠性高、磁钢不易飞脱, 缺点是在电机运行时高温会使丝带发热膨胀, 可能会与定子发生摩擦.

玻璃纤维无纬带绑扎固定是使被绑扎的机器以一定的速度将无纬带紧箍在磁钢外表面, 无纬带接触磁钢面涂抹环氧树脂, 绑扎结束后需要锁紧尾端以防止张力损失. 随后将表面绑好的玻璃纤维无纬带转子送入烤箱, 在 150 ℃ 温度下固化 2 h 或 175 ℃ 温度下固化 1 h, 绑扎固化后的电机转子如图 1 所示.



图1 玻璃纤维无纬带绑扎的电机转子

玻璃纤维无纬带的宽度为 19.1 mm, 推荐应用张力为 2 222.6 N, 最高可以承受温度为 220 ℃. 固化后玻璃纤维无纬带参数为: 厚度 0.29 mm、宽度 1.9 mm、密度 2 760 kg·m⁻³、弹性模量 80 GPa、泊松比 0.22、热膨胀系数 48×10⁻⁵ K⁻¹、抗拉强度 1 400 MPa.

1.2 碳纤维绑扎工艺

碳纤维护套需要碳纤维在高温下烘焙固化得到, 而永磁体在高温下易发生退磁现象, 所以在工艺上采用先将碳纤维烘焙固化成型, 然后用液氮

冷压的方式与转子进行装配^[17]. 本文所用电机过盈量为 0.05 mm, 完成冷压装配后的电机转子如图 2 所示, 碳纤维各项性能参数见表 1.



图2 碳纤维绑扎的电机转子

表1 碳纤维性能参数

参数	切向	径向
密度/(kg·m ⁻³)	1 700	1 700
弹性模量/GPa	150	10
泊松比	0.31	0.02
热膨胀系数/K ⁻¹	-0.74×10 ⁻⁵	32×10 ⁻⁵
最大承受强度/MPa	2 400	100

2 转子强度理论分析

2.1 转子结构参数

表贴式永磁电机转子三维结构如图 3 所示. 转子铁心内外半径分别为 $r_{ri}=43.0$ mm, $r_{ro}=52.5$ mm; 磁钢内外半径分别为 $r_{mi}=52.5$ mm, $r_{mo}=56.1$ mm; 护套内外半径分别为 $r_{hi}=56.1$ mm, $r_{ho}=56.9$ mm.

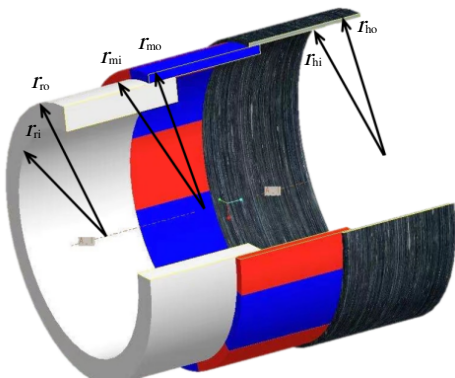


图3 分块表贴式永磁电机转子三维结构

2.2 碳纤维转子强度理论分析

碳纤维护套与永磁体为过盈配合, 碳纤维护套与永磁体受均匀内压作用, 静态压力(P_s)与初始

过盈量(U_s)之间的关系为^[1]:

$$P_s = \frac{U_s}{r_{mo} \left(\frac{(1-\mu_m)(r_{mi}^2 + r_{mo}^2)}{E_m(r_{mo}^2 - r_{mi}^2)} + \frac{(1-\mu_h)(r_{hi}^2 + r_{ho}^2)}{E_h(r_{ho}^2 - r_{hi}^2)} \right)},$$

式中: μ_m 和 μ_h 分别为永磁体和碳纤维护套的泊松比; E_m 和 E_h 分别为永磁体和碳纤维护套的杨氏模量.

当电机在额定工作点运行时, 在离心力的作用下, 永磁体与碳纤维护套发生位移, 过盈量发生变化, 此时永磁体外表面的位移量为^[18]:

$$u_1 = \frac{\rho_m \omega^2 r_{mi}}{8E_m} \left((1-\mu_m)r_{mi}^2 + (3+\mu_m) \cdot (1-\mu_m + 8(1+\mu_m)r_{mi}E_m)r_{mo}^2 \right),$$

式中: u_1 为永磁体外表面位移; ρ_m 为永磁体密度; ω 为电机转速.

碳纤维护套内表面的位移变化为^[17]:

$$u_2 = \frac{\rho_h \omega^2 r_{hi}}{8E_m} \left((1-\mu_h)r_{hi}^2 + (3+\mu_h) \cdot (1-\mu_h + 8(1+\mu_h)r_{hi}E_h)r_{ho}^2 \right),$$

式中: u_2 为碳纤维护套外表面位移; ρ_h 为碳纤维护套密度.

考虑到电机运行温度会造成永磁体与碳纤维护套发生膨胀, 但因永磁体的热膨胀系数极小, 因此因温度变化产生的位移可忽略, 仅需考虑碳纤维护套因温度变化产生的位移即可. 位移公式为:

$$u_3 = r_{mo} \alpha \Delta T,$$

式中: u_3 为碳纤维护套内表面位移; α 为碳纤维护套的热膨胀系数; ΔT 为碳纤维护套的温差.

电机在额定工况下运行时过盈量和压力为:

$$U = U_s - (u_2 - u_1) - u_3, \\ P = \frac{U}{r_{mo} \left(\frac{(1-\mu_m)(r_{mi}^2 + r_{mo}^2)}{E_m(r_{mo}^2 - r_{mi}^2)} + \frac{(1-\mu_h)(r_{hi}^2 + r_{ho}^2)}{E_h(r_{ho}^2 - r_{hi}^2)} \right)},$$

式中: U 为额定运行工况下的过盈量; P 为额定运行工况下永磁体受到的压力.

由文献[18]可得, 永磁体和碳纤维护套所受的径向应力和切向应力为:

$$\begin{cases} \sigma_{mr} = -P \frac{r_{mo}^2}{r_{mo}^2 - r_{mi}^2} (1 - r_{mi}^2 / r^2), \\ \sigma_{m\theta} = -P \frac{r_{mo}^2}{r_{mo}^2 - r_{mi}^2} (1 + r_{mi}^2 / r^2), \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_{hr} = P \frac{r_{ho}^2}{r_{ho}^2 - r_{hi}^2} (1 - r_{hi}^2 / r^2), \\ \sigma_{h\theta} = P \frac{r_{ho}^2}{r_{ho}^2 - r_{hi}^2} (1 + r_{hi}^2 / r^2), \end{cases}$$

式中: σ_{mr} 为永磁体的径向应力; $\sigma_{m\theta}$ 为永磁体的切向应力; σ_{hr} 为碳纤维护套的径向应力; $\sigma_{h\theta}$ 为碳纤维护套的切向应力; r 为不同半径自变量.

2.3 玻璃纤维转子强度理论分析

使用玻璃纤维无纬带对转子进行绑扎时, 设对绑带施加力为 F , 则 n 匝时切向总拉力玻璃纤维对永磁体的径向压力为:

$$P_b = 2\pi n F,$$

其对永磁体产生的压强为:

$$P_l = P_b / (2\pi r_{mo}) = nF / r_{mo},$$

旋转所产生的离心力对永磁体的压强为^[18]:

$$P_w = (\rho_m(r_{mo}^2 - r_{mi}^2)\omega^2(r_{mo} - r_{mi})) / (4r_{mo}),$$

式中: P_b 为玻璃纤维对永磁体的径向压力; P_l 为永磁体所受压强; P_w 为离心力对永磁体的压强.

永磁体的径向与切向装配应力为:

$$\begin{cases} \sigma_{mr} = -(P_l - P_w) \frac{r_{mo}^2}{r_{mo}^2 - r_{mi}^2} (1 - r_{mi}^2 / r^2), \\ \sigma_{m\theta} = -(P_l - P_w) \frac{r_{mo}^2}{r_{mo}^2 - r_{mi}^2} (1 + r_{mi}^2 / r^2). \end{cases}$$

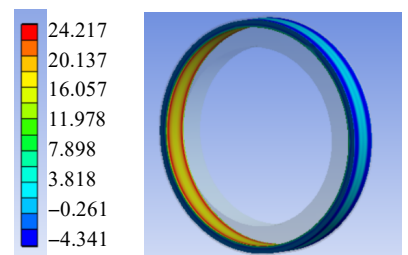
3 有限元验证

在额定工作点 $6000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ (线速度 $35.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 时, 采用 Ansys 软件对所测电机进行结构和温度仿真, 并在最大温度为 100°C 时进行结构强度测试. 根据电机的实际结构、损耗以及传热情况给出相应的边界条件为: (1) 电机转子部分设置旋转速度为 $6000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 模拟实际电机的旋转. (2) 忽略磁钢黏结剂的影响, 将磁钢与转子接触设定为绑定; 磁钢与碳纤维护套为过盈设置, 过盈量为 0.05 mm ; 磁钢与玻璃纤维护套设置为粗糙, 玻璃纤维缠绕张力为 2222.6 N . (3) 在最大工作温度下进行结构仿真时, 电机的定子、转子、绕组和永磁体加载相应温度, 作为相应热源. (4) 温度仿真采用热密度加载方法, 将计算得出的各部分损耗导入电机作为相应的热源, 计算电机各部分的温升.

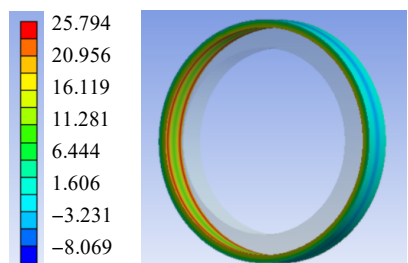
3.1 工作点永磁体应力分析

分别对碳纤维转子和玻璃纤维转子进行有限

元应力计算, 结果如图 4 所示. 从图 4 可见, 碳纤维护套对永磁体的保护更好, 在工作点碳纤维护套下永磁体的最大拉应力略小于玻璃纤维护套, 但两者都远小于极限拉伸强度. 在工作点碳纤维和玻璃纤维护套都可以保证电机的运行强度.



(a) 碳纤维护套永磁体最大拉应力(单位: MPa)

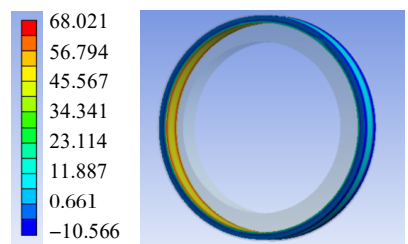


(b) 玻璃纤维护套永磁体最大拉应力(单位: MPa)

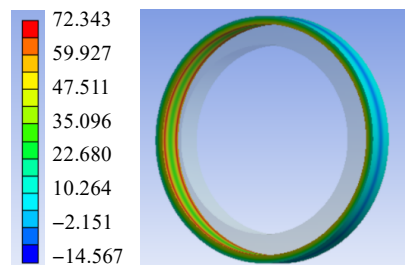
图 4 2 种护套在 $6000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时永磁体最大拉应力

3.2 最大工作温度时永磁体应力分析

从图 5 可知, 在最大工作温度时碳纤维护套依旧可较好保护永磁体的结构强度, 而玻璃纤维护套已接近拉伸极限, 但仍在保护范围内.



(a) 碳纤维护套永磁体最大拉应力(单位: MPa)



(b) 玻璃纤维护套永磁体最大拉应力(单位: MPa)

图 5 2 种护套在 $6000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时永磁体最大拉应力

从图 6 和图 7 可见, 2 种护套在 $6000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 工况下, 永磁体切向、径向和最大拉应力与温度近乎

线性关系. 相同工况下, 在碳纤维护套保护下永磁体切向、径向和最大拉应力均比玻璃纤维护套保护下小, 表明碳纤维护套的保护更可靠. 但实验结果表明, 2 种护套都能保证永磁体不被破坏.

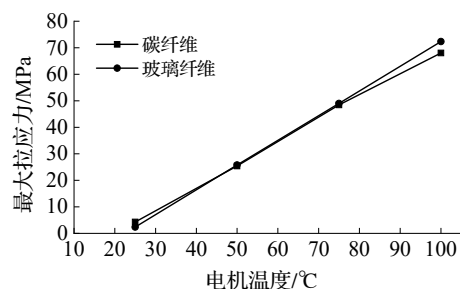


图 6 2 种护套永磁体最大拉应力随温度的变化

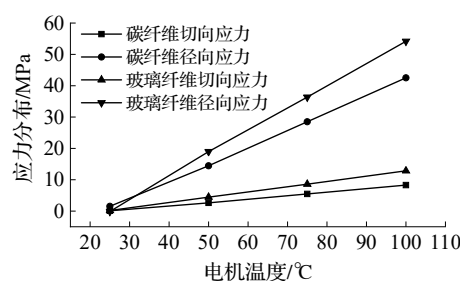
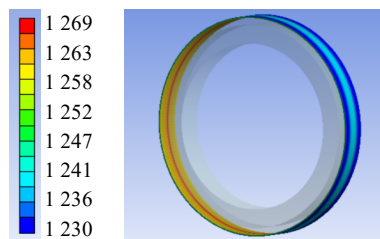


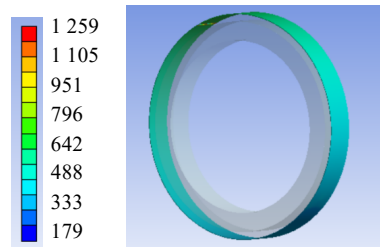
图 7 2 种护套永磁体的应力分布

3.3 护套的强度验证

从图 8 和图 9 可知, 碳纤维护套的最大拉应力随温度变化较剧烈, 而玻璃纤维护套相对平和, 两者都随温度呈线性变化. 碳纤维护套的抗拉伸强度为 2400 MPa , 远大于极限工况下所受的拉应力, 玻璃纤维护套为 1400 MPa , 在最大温度点时接近最大抗拉极限, 但可保证永磁体结构强度.



(a) 碳纤维护套最大拉应力(单位: MPa)



(b) 玻璃纤维护套最大拉应力(单位: MPa)

图 8 2 种护套在 $6000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时最大拉应力

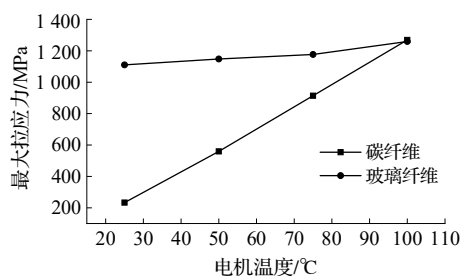


图9 2种护套在 $6000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时最大拉应力随温度的变化

3.4 不同护套散热差异

不同护套材料对电机的散热性能产生不同影响. 从2种护套电机温度场仿真结果(图10和图11)可知, 更换玻璃纤维护套后电机散热性能略有提升. 测试电机使用永磁体的最高退磁温度为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, 更换护套产生的温度场变化对性能无影响.

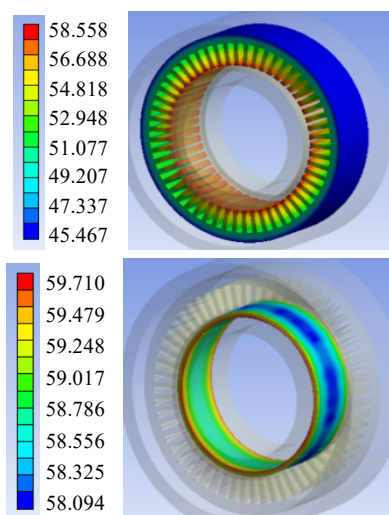


图10 碳纤维护套工作点时定子和永磁体的温度(单位: $^{\circ}\text{C}$)

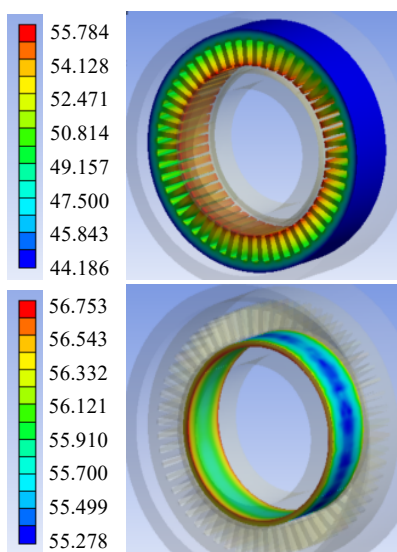


图11 玻璃纤维护套工作点时定子和永磁体的温度(单位: $^{\circ}\text{C}$)

从图12可见, 永磁体的温度随电机转速的增大而上升, 且在玻璃纤维护套下永磁体的温升比碳纤维护套小, 但差距不大, 这可为其他类型的电机提供参考.

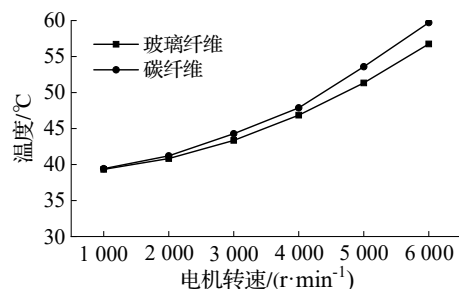


图12 2种护套下永磁体温度随转速的变化

4 结论

(1)对碳纤维护套和玻璃纤维护套电机的2个工作点和最大工作温度进行了结构仿真, 碳纤维护套对永磁体的保护均优于玻璃纤维, 但玻璃纤维护套足够保证所测电机的结构安全.

(2)本文中电机使用玻璃纤维护套测试时仅缠绕1层, 其对永磁体的保护略差于碳纤维, 在实际生产中, 可缠绕2层以获得更可靠的保护, 并增强玻璃纤维护套本身的强度.

(3)玻璃纤维护套的散热性能略好于碳纤维护套, 这可为其他电机的散热提供参考.

(4)在实际生产中, 碳纤维护套的性能溢出, 因此选择结构强度足够、成本较低、加工简单的玻璃纤维护套能获得更好的效益.

参考文献:

- [1] 钟志贤, 廖家蒙. 永磁电机转子中永磁体与护套的过盈量分析[J]. 装备制造技术, 2016(5):5-7.
- [2] 张超, 朱建国, 佟文明, 等. 高速内置式永磁转子强度分析与设计[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(12):43-50.
- [3] 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):1-18.
- [4] Fang H Y, Qu R H, Li J, et al. Rotor design for high-speed high-power permanent-magnet synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(4):3411-3419.
- [5] 李鸿梅, 张洪信, 赵清海, 等. 表贴式永磁同步电机永磁体护套动力特性研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2020, 35(4):17-22.
- [6] Yang L, Zhu Z Q, Shuang B, et al. Adaptive threshold

- correction strategy for sensorless high-speed brushless DC drives considering zero-crossing-point deviation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5246-5257.
- [7] Ahn J H, Han C, Kim C W, et al. Rotor design of high-speed permanent magnet synchronous motors considering rotor magnet and sleeve materials[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(3): 1-4.
- [8] 张凤阁, 杜光辉, 王天煜, 等. 高速永磁电机转子不同保护措施强度分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(S1):195-202.
- [9] Xu H, Geng H P, Lin H, et al. Rotor design and analysis of a high speed permanent magnet synchronous motor for cryogenic centrifugal pump[C]//2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Tianjin, China. 2019:1756-1760.
- [10] 吴震宇, 曲荣海, 李健, 等. 表贴式高速永磁电机多场耦合转子设计[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(2):98-103; 111.
- [11] 刘威, 陈进华, 崔志琴, 等. 高速永磁电机碳纤维护套转子综合特性研究[J]. 微特电机, 2017, 45(12):1-4; 13.
- [12] 李振平, 占彦. 高速永磁同步电机的转子结构强度分析研究[J]. 机电工程, 2016, 33(7):900-903.
- [13] 郝清亮, 朱少林, 杨德望. 中小型表面式永磁电机的制造工艺[J]. 电机与控制应用, 2010, 37(12):63-65.
- [14] 杨青. 电机绕线转子铁心表面无纬带的绑扎[J]. 电机与控制应用, 2011, 38(10):47-50.
- [15] 王晓远, 高鹏, 赵玉双. 电动汽车用高功率密度电机关键技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6):53-59.
- [16] 鲍晓华, 刘佳伟, 孙跃, 等. 低速大转矩永磁直驱电机研究综述与展望[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6):1148-1160.
- [17] 万援, 崔淑梅, 吴绍朋, 等. 扁平大功率高速永磁同步电机的护套设计及其强度优化[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1):55-63.
- [18] 杨振中, 许欣, 段宗玉, 等. 表贴式永磁电机碳纤维护套转子强度及过盈量分析[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(10):6-13.

Simulation analysis on performance difference of two types of sheaths for small surface-mounted permanent magnet motor

KONG Siqi^{1,2,3}, CHEN Jinhua^{1*}, QIU Yiming², ZHANG Chi¹

(1.Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China;

2.Ningbo Feishi Technology Co., Ltd., Ningbo 315800, China;

3.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Aiming at using glass fiber to replace carbon fiber for the small surface-mounted permanent magnet motor, this paper takes a practical small surface-mounted permanent magnet motor, with a rated power of 11 kW and a rated speed of $6\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, as an example to study the rotor protection process. Based on the finite element method, the strength and temperature field of the rotor structure with both glass fiber weftless tape and carbon fiber sheath materials are simulated by Ansys. The simulation results show that the protection effect of carbon fiber sheath is better than that of glass fiber sheath, and the heat dissipation of glass fiber sheath is better than that of carbon fiber sheath. Both types of sheath can ensure the structural safety of the tested motor. Considering the above results as well as the differences in material cost and process difficulty, it is concluded that the glass fiber sheath has better cost performance in that it can reduce material cost and simplify production process.

Key words: surface-mounted permanent magnet motor; glass fiber weftless tape; carbon fibre

(责任编辑 史小丽)