

# 表贴式永磁电机碳纤维护套转子强度及过盈量分析

杨振中, 许欣, 段宗玉, 石江, 韦在凤  
(中车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412000)

**摘要:** 针对表贴式永磁电机转子在高速高温状态下转子强度计算问题, 提出了考虑磁钢分块结构的转子模型。基于厚壁圆筒理论推导了转子强度计算的解析解, 分别计算出碳纤维护套及磁钢的切向应力和径向应力; 基于有限元法分析了多种工况下的转子强度, 在高速及高温工况下转子所受应力均会增加; 对比解析分析结果表明, 有限元法及解析法均能准确计算碳纤维护套应力, 而磁钢却受到边缘效应的影响, 磁钢边缘应力增大, 解析分析难以进行精准计算; 基于有限元法分析护套与磁钢过盈量, 优化了转子结构, 提出了过盈量的最优范围。

**关键词:** 表贴式永磁电机; 碳纤维护套; 分块式磁钢; 强度分析; 边缘效应

**中图分类号:** TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)10-0006-08

## Rotor Strength and Interference Analysis of Surface-Mounted Permanent Magnet Motor with Carbon Fiber Sleeve Rotor

YANG Zhenzhong, XU Xin, DUAN Zongyu, SHI Jiang, WEI Zai Feng  
(CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China)

**Abstract:** In view of the analysis of rotor strength of surface-mounted permanent magnet motor in high-speed and high-temperature condition, a rotor model considering magnetic steel with block structure was proposed. Based on the theory of thick-walled cylinder, the analytical solution was derived. The tangential and radial stresses of carbon fiber sleeve and magnetic steel were respectively calculated. Based on finite element method, the rotor strength under various working conditions was analyzed. The stress on the rotor would increase under both high-speed and high-temperature conditions. Compared with the analytical analysis results, it showed that the finite element method and the analytical method could accurately calculate the stress of the carbon fiber sleeve, while the magnetic steel stress would be affected by the edge effect, so that the analytical analysis could not perform accurate calculations. The interference amount between the sheath and the magnetic steel was analyzed by the finite element method, based on which the rotor structure was optimized and the optimal range of the interference amount was given.

**Key words:** surface-mounted permanent magnet motor; carbon fiber sleeve; magnetic steel with block structure; strength analysis; edge effect

## 0 引言

表贴式高速永磁电机具有体积小、结构简单、转速高、功率密度大等特点, 在高速电机领域的应用日益广泛<sup>[1]</sup>。永磁电机普遍应用的永磁材料钕

铁硼具备较强的抗压强度及较小的抗拉强度。永磁转子高速旋转产生巨大离心力, 磁钢难以承受产生的拉应力, 必须在永磁体外表面包裹一层具备一定预紧力的高强度非导磁护套<sup>[2-3]</sup>。在表贴式高速永磁电机领域, 非导磁护套的应用主要有

作者简介: 杨振中(1971—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为轨道交通牵引电机、高速永磁电机。

许欣(1991—), 男, 工程师, 研究方向为轨道交通牵引电机。

两大类:(1)高强度非导磁金属护套,如钛合金护套;(2)高强度复合材料护套,如碳纤维护套。相比金属护套,碳纤维护套的强度质量比更大<sup>[4-5]</sup>,在表贴式高速永磁电机领域应用广泛。

表贴式永磁转子通过护套与磁钢过盈产生的预紧力,补偿磁钢高速旋转的离心力。转子结构的优化及护套过盈量的选取,可以通过转子的强度分析来确定。对比国内外学者已进行的相关研究:Kenny等<sup>[6-7]</sup>采用有限元法分析高速永磁电机的转子强度;张超等<sup>[8-9]</sup>研究非导磁金属护套永磁转子的强度解析公式;Borisavljevic<sup>[10]</sup>推导了表贴式转子护套变形及径向、切向力的解析解,并提出过盈配合下的边界条件;陈亮亮等<sup>[11-12]</sup>推导了高速热态永磁转子的强度解析解,并采用有限元法分析了1台表贴式高速永磁电机的转子强度;吴震宇等<sup>[13]</sup>采用有限元法基于多物理场耦合优化转子设计;宫能平等<sup>[14-15]</sup>用3D实体单元分析计算了飞轮储能复合材料转子工作时的应力分布。学者们针对表贴式永磁电机在多个领域进行了大量研究,为表贴式永磁转子的设计与发展提供了巨大的技术支撑。但是现有研究均将表贴式转子磁钢视为完整的厚壁圆筒进行分析,而忽视了在实际制作中,磁钢为分块式结构。本文基于解析法和有限元法,综合考虑转子热态高速运转状态下发生的转子膨胀及离心力引起的弹性变形,提出了一种有效分析碳纤维护套与分块式磁钢强度及装配过盈量的方法。

## 1 表贴式高速永磁电机结构

由图1可以看出,表贴式永磁电机转子通常由转轴、磁钢和护套3部分组成。其中,转轴为实心轴,半径为 $R_s$ ;磁钢为扇形结构,内外径分别为 $R_{mi}$ 、 $R_{mo}$ ,多块磁钢装配可将转轴包裹一圈。因为包裹转轴的磁钢并非完整的环形结构,磁钢与转轴之间不能进行过盈配合,所以利用厌氧胶将磁钢与转子进行胶合。厌氧胶仅涂抹于转轴表面,本文不考虑涂层厚度对转子强度的影响。本文研究的表贴式永磁转子选用碳纤维材料作为护套,碳纤维护套内外径分别为 $R_{ci}$ 、 $R_{co}$ 。碳纤维护套成型,需经高温烘焙固化,而磁钢在高温下易发生退磁现象,因此碳纤维护套采用先成型后装配的制作工艺,用液氮冷压方式进行装配。

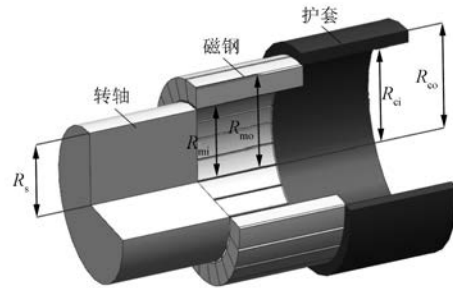


图1 表贴式永磁电机转子尺寸关系图

## 2 转子强度解析分析

### 2.1 碳纤维护套的应力和位移解析分析

碳纤维材料为各向异性材料,根据纤维的编织方向(平面应力学不考虑护套的轴向应力),护套的径向和切向方向的力学性能存在较大差异,切向方向具备更大的弹性模量及泊松比。根据永磁转子装配特性,碳纤维护套与磁钢为过盈配合,护套内壁存在磁钢施加的径向压应力作用。结合复合材料应力学原理,碳纤维护套的平衡微分方程为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \rho\omega^2 r = 0 \quad (1)$$

式中: $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$ ——径向和切向应力;

$\rho$ ——碳纤维密度;

$\omega$ ——角速度。

结合厚壁圆筒理论及复合材料的热应力学定律,碳纤维护套于热态运行状态下的微分方程为

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{\sigma_r}{E_r} - \frac{\nu_\theta \sigma_\theta}{E_\theta} + \beta_r \cdot \Delta T \\ \varepsilon_\theta = \frac{\sigma_\theta}{E_\theta} - \frac{\nu_r \sigma_r}{E_r} + \beta_\theta \cdot \Delta T \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_r$ 、 $\varepsilon_\theta$ ——径向和切向应变;

$E_r$ 、 $E_\theta$ ——碳纤维护套在径向和切向的弹性模量;

$\nu_r$ 、 $\nu_\theta$ ——径向和切向的泊松比;

$\beta_r$ 、 $\beta_\theta$ ——碳纤维径向、切向热膨胀系数;

$\Delta T$ ——护套温度变化。

碳纤维护套的位移 $u$ 与半径 $r$ 的几何关系为

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{du_r}{dr} \\ \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} \end{cases} \quad (3)$$

联立式(1)~式(3),可得碳纤维护套在半径  $r$  处的径向、切向应力为

$$\sigma_r = \frac{E_r}{1 - \nu_r \nu_\theta} \left[ A(k + \nu_\theta) r^{k-1} + B(\nu_\theta - k) r^{-k-1} + \frac{\rho \omega^2 r^2 (1 - \nu_\theta \nu_r) (3 + \nu_\theta)}{E_r (k^2 - 9)} - (\beta_\theta \nu_\theta + \beta_r) \Delta T + \frac{(\beta_r \nu_r + \beta_\theta) k^2 T_{r1} + (\beta_\theta \nu_\theta + \beta_r) (T_{r2} - T_{r1})}{2k} \right] \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E_\theta}{1 - \nu_r \nu_\theta} \left[ A(1 + k \nu_r) r^{k-1} + B(1 - k \nu_\theta) r^{-k-1} + \frac{\rho \omega^2 r^2 (1 - \nu_\theta \nu_r) (3 \nu_r + 1)}{E_r (k^2 - 9)} - (\beta_r \nu_r + \beta_\theta) \Delta T + \frac{(\beta_r \nu_r + \beta_\theta) k^2 + (\beta_\theta \nu_\theta + \beta_r) (T_{\theta 2} - T_{\theta 1})}{2k} \right] \quad (5)$$

式中:  $T_{r1}$ 、 $T_{r2}$ 、 $T_{\theta 1}$ 、 $T_{\theta 2}$ ——半径  $r$  的函数。

$$T_{r1} = (\nu_\theta - k) r^{-k-1} \left( \int_{R_{hi}}^r \Delta T \cdot r^k dr \right) - (k + \nu_\theta) r^{k-1} \left( \int_{R_{hi}}^r \Delta T \cdot r^{-k} dr \right) \quad (6)$$

$$T_{r2} = (\nu_\theta + k) r^{k-1} \left[ \int_{R_{hi}}^r r^{-k+1} \cdot \left( \frac{d\Delta T}{dr} \right) dr \right] + (k - \nu_\theta) r^{-k-1} \left[ \int_{R_{hi}}^r r^{k+1} \left( \frac{d\Delta T}{dr} \right) dr \right] \quad (7)$$

$$T_{\theta 1} = (1 - k \nu_r) r^{-k-1} \left( \int_{R_{hi}}^r \Delta T \cdot r^k dr \right) - (1 + k \nu_r) r^{k-1} \left( \int_{R_{hi}}^r \Delta T \cdot r^{-k} dr \right) \quad (8)$$

$$T_{\theta 2} = (1 + k \nu_r) r^{k-1} \left[ \int_{R_{hi}}^r r^{-k+1} \cdot \left( \frac{d\Delta T}{dr} \right) dr \right] + (k \nu_r - 1) r^{-k-1} \left[ \int_{R_{hi}}^r r^{k+1} \left( \frac{d\Delta T}{dr} \right) dr \right] \quad (9)$$

碳纤维护套的等效应力为

$$\sigma_{hMises} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + \sigma_r^2 + \sigma_\theta^2]} \quad (10)$$

碳纤维护套径向应力边界条件为

$$\sigma_r|_{r=R_{hi}} = -p_2 \cdot \sigma_r/r = \sigma_r|_{r=R_{ho}} = 0 \quad (11)$$

令  $\alpha_h = R_{hi}/R_{ho}$ ,代入式(11)计算可得:

$$A = \frac{1}{R_{ho}^{k-1} (k + \nu_\theta) (\alpha_h^{k-1} - \alpha_h^{-k-1})} [\eta_T \alpha_h^{k-1} +$$

$$\frac{\rho \omega^2 R_{ho}^2 (1 - \nu_r \nu_\theta) (3 + \nu_\theta) (\alpha_h^{-k-1} - \alpha_h^2)}{E_r (k^2 - 9)} - \frac{p_2 (1 - \nu_r \nu_\theta)}{E_r} + (\beta_r + \beta_\theta \nu_\theta) \Delta T_{hi}] \quad (12)$$

$$B = \frac{1}{R_{ho}^{-k-1} (\nu_\theta - k) (\alpha_h^{-k-1} - \alpha_h^{k-1})} [\eta_T \alpha_h^{k-1} + \frac{\rho \omega^2 R_{ho}^2 (1 - \nu_r \nu_\theta) (3 + \nu_\theta) (\alpha_h^{k-1} - \alpha_h^2)}{E_r (k^2 - 9)} - \frac{p_2 (1 - \nu_r \nu_\theta)}{E_r} + (\beta_r + \beta_\theta \nu_\theta) \Delta T_{hi}] \quad (13)$$

其中:

$$\eta_T = (\beta_r \mu_r + \beta_\theta) k_2 \frac{K_{T1}}{2k} + \frac{(\beta_\theta \mu_\theta + \beta_r) (K_{T2} - K_{T1} - 2k \Delta T_{ho})}{2k} \quad (14)$$

$$K_{T1} = (\mu_\theta - k) R_{ho}^{-k-1} \left( \int_{R_{hi}}^{R_{ho}} \Delta T \cdot r^k dr \right) - (k + \mu_\theta) R_{ho}^{k-1} \left( \int_{R_{hi}}^{R_{ho}} \Delta T \cdot r^{-k} dr \right) \quad (15)$$

$$K_{T2} = (\mu_\theta + k) R_{ho}^{-k-1} \left[ \int_{R_{hi}}^{R_{ho}} r^{-k+1} \cdot \left( \frac{d\Delta T}{dr} \right) dr \right] + (k - \mu_\theta) R_{ho}^{k-1} \left[ \int_{R_{hi}}^{R_{ho}} r^{k+1} \cdot \left( \frac{d\Delta T}{dr} \right) dr \right] \quad (16)$$

## 2.2 磁钢的应力、位移解析分析

磁钢由钕钴材料制成,多块磁钢组合成厚壁套筒结构。磁钢内壁受到转轴外表面的压应力为  $P_1$ ,外壁受到碳纤维护套内表面的压应力为  $P_2$ 。

磁钢的平衡微分方程为

$$\frac{d\sigma_{rm}}{dr} + \frac{\sigma_{rm} - \sigma_{\theta m}}{r} + \rho_m \omega^2 r = 0 \quad (17)$$

式中:  $\varepsilon_{rm}$ 、 $\varepsilon_{\theta m}$ ——磁钢的径向、切向应力;

$\rho_m$ ——钕钴材料的密度。

考虑转子热态运转下的磁钢物理方程为

$$\begin{cases} \varepsilon_{rm} = \frac{1}{E_m} (\sigma_{rm} - \nu_m \sigma_{\theta m}) + \beta_m \Delta T_m \\ \varepsilon_{\theta m} = \frac{1}{E_m} (\sigma_{\theta m} - \nu_m \sigma_{rm}) + \beta_m \Delta T_m \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $E_m$ ——钕钴材料的弹性模量;

$\nu_m$ ——磁钢泊松比;

$\beta_m$ ——磁钢的热膨胀系数;

$\Delta T_m$ ——磁钢温差,是半径  $r$  的函数,  $\Delta T_m =$

$T_m - T$ ;

$T_m$ ——磁钢热态运转下半径  $r$  处的温度。

磁钢几何方程为

$$\begin{cases} \varepsilon_{rm} = \frac{du_m}{dr} \\ \varepsilon_{\theta m} = \frac{u_m}{r} \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $u_m$ ——磁钢的半径  $r$  处的径向位移。

联立式 (18) 和式 (19), 可得:

$$\begin{cases} \sigma_{rm} = \frac{E_m}{1 - \nu_m^2} \left[ \frac{du_m}{dr} + \nu_m \frac{u_m}{r} - (1 + \nu_m) \beta_m \Delta T_m \right] \\ \sigma_{\theta m} = \frac{E_m}{1 - \nu_m^2} \left[ \frac{u_m}{r} + \nu_m \frac{du_m}{dr} - (1 + \nu_m) \beta_m \Delta T_m \right] \end{cases} \quad (20)$$

代入平衡微分方程, 求解可得:

$$u_m(r) = Cr + \frac{D}{r} - \frac{\rho_m \omega^2 (1 - \nu_m^2)}{8E_m} + \frac{\beta_m (1 + \nu_m)}{r} \int_{R_{mi}}^r \Delta T_m \cdot r dr \quad (21)$$

式中:  $C$ 、 $D$ ——该方程的待定系数。

$$\sigma_{rm}(r) = \frac{E_m}{1 - \nu_m^2} \left[ C(1 + \nu_m) - \frac{D(1 - \nu_m)}{r^2} \right] - \frac{\rho_m \omega^2 r^2 (3 + \nu_m)}{8} - \frac{E_m \beta_m}{r^2} \int_{R_{mi}}^r \Delta T_m \cdot r dr \quad (22)$$

$$\sigma_{\theta m}(r) = \frac{E_m}{1 - \nu_m^2} \left[ C(1 + \nu_m) + \frac{D(1 - \nu_m)}{r^2} \right] - E_m \beta_m \Delta T_m - \frac{\rho_m \omega^2 r^2 (3\nu_m + 1)}{8} - \frac{E_m \beta_m}{r^2} \int_{R_{mi}}^r \Delta T_m \cdot r dr \quad (23)$$

磁钢的等效应力为

$$\sigma_{mMises} = \sqrt{\frac{(\sigma_{rm} - \sigma_{\theta m})^2 + \sigma_{rm}^2 + \sigma_{\theta m}^2}{2}} \quad (24)$$

永磁体内、外表面的边界条件为

$$\sigma_{rm} \big|_{r=R_{mi}} = -p_1, \sigma_{rm} \big|_{r=R_{mo}} = -p_2 \quad (25)$$

令  $\alpha_m = R_{mi}/R_{mo}$ , 求解式 (25) 可得:

$$C = \frac{(\nu_m - 1)}{E_m (1 - \alpha_m^{-2})} + \frac{(\nu_m - 1) \beta_m}{(R_{mo}^2 - R_{mi}^2)} \int_{R_{mi}}^{R_{mo}} \Delta T_m \cdot r dr + \frac{P_2(\nu_m - 1)}{E_m (1 - \alpha_m^{-2})} - \frac{\rho_m \omega^2 R_{mo}^2 (1 - \nu_m) (3 + \nu_m) (\alpha^2 + 1)}{8E_m} \quad (26)$$

$$D = \frac{(\nu_m + 1) \beta_m R_{mi}^2}{(R_{mo}^2 - R_{mi}^2)} \int_{R_{mi}}^{R_{mo}} \Delta T_m \cdot r dr + \frac{(P_2 - P_1)(\nu_m + 1)}{E_m (\alpha_m^{-2} + 1)} + \frac{\rho_m \omega^2 R_{mi}^2 R_{mo}^2 (1 + \nu_m) (3 + \nu_m)}{8E_m} \quad (27)$$

### 3 转子强度的有限元分析

解析法可详细地计算出表贴式转子在各状态下的应力大小和变形量, 但是计算过程相当复杂, 需要应用到弹塑性应力学、复合材料力学以及热应力学等多学科专业理论。利用有限元法建立表贴式转子的仿真模型, 可快速模拟出转子在各状态下运转的应力及位移情况。

本文研究表贴式电机的额定转速为 20 000 r/min, 转轴与磁钢材料参数及尺寸如表 1 所示。碳纤维材料参数及尺寸如表 2 所示。

表 1 转轴与磁钢材料参数及尺寸

| 材料属性 | 内径 $r_i$ /mm | 外径 $r_o$ /mm | 密度 $\rho$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 弹性模量 $E$ /( $10^{11}$ Pa) | 泊松比 $\nu$ | 热膨胀系数 $\beta$ /( $10^{-6} \text{m} \cdot \text{K}^{-1}$ ) |
|------|--------------|--------------|------------------------------------------------|---------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------|
| 转轴   | 0            | 52.5         | 7 850                                          | 2.1                       | 0.31      | 12.0                                                      |
| 磁钢   | 52.5         | 68.5         | 7 600                                          | 1.6                       | 0.24      | 12.4                                                      |

表 2 碳纤维材料参数及尺寸

| 材料属性 | 内径 $r_i$ /mm | 外径 $r_o$ /mm | 密度 $\rho$ /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 弹性模量 $E$ /( $10^{10}$ Pa) |      | 泊松比 $\nu$ |      | 热膨胀系数 $\beta$ /( $10^{-6} \text{m} \cdot \text{K}^{-1}$ ) |      |
|------|--------------|--------------|------------------------------------------------|---------------------------|------|-----------|------|-----------------------------------------------------------|------|
|      |              |              |                                                | 径向                        | 切向   | 径向        | 切向   | 径向                                                        | 切向   |
| 数值   | 68.5         | 77           | 1 800                                          | 1.0                       | 18.1 | 0.18      | 0.31 | 22.50                                                     | 0.02 |

基于有限元法分析表贴式转子在多种运转状态下的应力、位移变化得出如下结论:(1)静止状态下,碳纤维护套与磁钢过盈配合产生预应力;(2)转子常温高速运转下,增加离心力产生的等效应力;(3)转子高速高温稳定运转,增加转子发热产生的热应力。对比解析法分析高速运行状态下护套及磁钢的应力变化。

### 3.1 碳纤维护套应力及位移分析

#### 3.1.1 碳纤维护套径向应力

碳纤维护套高速高温运转下径向应力分布如图2所示。护套所受径向应力为负值,即护套所受为压应力。最大径向应力为40.39 MPa,远小于碳纤维材料屈服强度;最大应力主要集中在磁钢装配边缘,径向应力随护套半径增大逐渐减小。



图2 碳纤维护套径向应力云图

各工况下碳纤维护套径向应力对比如图3所示。由图3可知,高速高温工况下,护套所受径向应力最大。有限元法与解析法计算结果趋势一致,存在较小的差值。有限元法考虑磁钢分块引起的边缘效应;而解析法将磁钢视为理想的厚壁圆筒结构,对碳纤维护套的影响较小。有限元法与解析法均可准确模拟碳纤维护套所受径向应力情况。

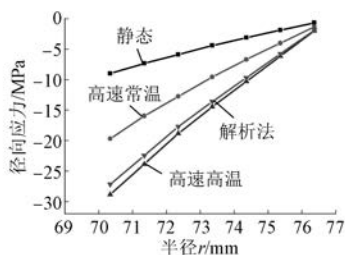


图3 各工况下碳纤维护套径向应力对比

#### 3.1.2 碳纤维护套切向应力

碳纤维护套高速高温运转下切向应力云图分

布如图4所示。护套所受径向应力为正值,切向主要承受拉应力,最大应力为390.66 MPa,远小于碳纤维材料屈服强度,并主要集中在护套端部边缘;切向应力随护套半径增大逐渐减小;高速高温状态下,护套所受径向应力最大。各工况下碳纤维护套切向应力对比如图5所示。

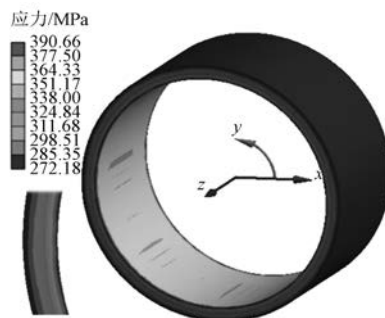


图4 碳纤维护套高速高温运转下切向应力云图

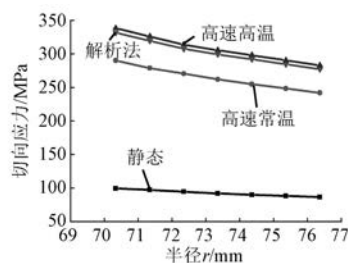


图5 各工况下碳纤维护套切向应力对比

从图5可知,有限元法与解析法计算结果趋势一致,计算结果存在较小的差值,有限元法同时考虑磁钢分块引起的边缘效应,而解析法将磁钢视为理想的厚壁圆筒结构。磁钢分块式结构对碳纤维护套的影响较小。有限元法与解析法均可准确模拟碳纤维护套所受切向应力情况。

### 3.2 磁钢应力及位移分析

磁钢采用钕铁硼材料,属于各向同性材料,抗拉强度为80 MPa,抗压强度为1 050 MPa。由于磁钢的抗压不抗拉性,若磁钢受到较大的离心力作用而无充足的预紧力抵消,则离心力产生的拉应力易引起磁钢破裂的风险,因此,对磁钢在多种运行状态下的应力位移变化进行有限元分析。

#### 3.2.1 磁钢径向应力

磁钢受到的径向应力为负值,径向主要受到压应力,如图6所示。磁钢径向应力最大值为48.6 MPa,主要集中在磁钢装配边缘,最大应力远

小于磁钢的抗压强度,并随半径减小而减小。各工况下磁钢径向应力对比如图 7 所示。对比静态及高速常温状态径向受力分析,可知高速高温状态下磁钢所受径向应力更大。对比有限元法与解析法计算结果,二者趋势一致,但是磁钢分块式结构对磁钢受力影响较大,是由于有限元法同时考虑磁钢分块引起的边缘效应,而解析法将磁钢视为完整的厚壁圆筒,二者的计算结果存在一定的差值。可以得出,在分块式磁钢转子设计时,需考虑磁钢引起的边缘效应,有限元法可更精准计算磁钢所受径向应力。

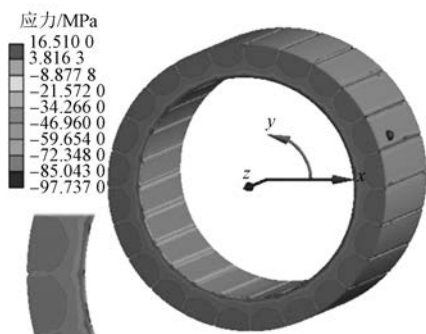


图 6 磁钢径向应力云图

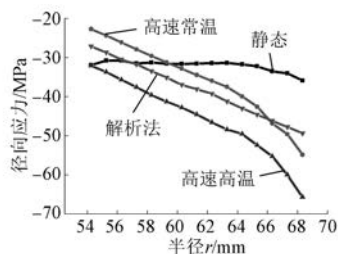


图 7 各工况下磁钢径向应力对比

### 3.2.2 磁钢切向应力

磁钢受到的切向应力较小,最大应力为 58.02 MPa,小于磁钢的屈服强度,最大应力主要集中在磁钢装配边缘,如图 8 所示。由于磁钢接触边缘位移不均,磁钢内部存在少量正应力,亦保持在抗拉抗压强度以内,不会对磁钢造成破坏。各工况下磁钢切向应力对比如图 9 所示。从图 9 可知,高速高温运行状态,磁钢受到的切向应力更大;对比解析法计算结果,与磁钢径向应力情况类似,二者计算结果趋势一致,但是数值大小存在一定的差异。可以得出,在分块式磁钢转子设计时,需考虑磁钢引起的边缘效应,有限元法可更精准

计算磁钢所受切向应力。

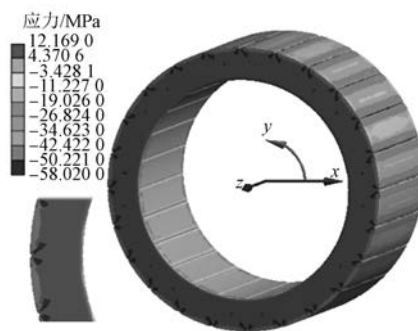


图 8 磁钢切向应力云图

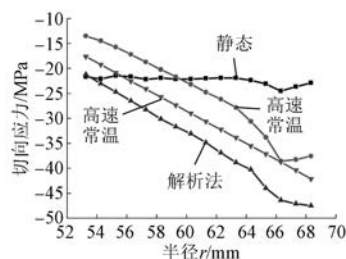


图 9 各工况下磁钢切向应力对比

综上所述,对比解析法计算数据,可以得出:  
(1)有限元法可准确模拟碳纤维表贴式转子护套受力情况,磁钢受力情况与解析法存在一定差异;  
(2)转子在高速、高温状态下,护套及磁钢所受应力将增大;  
(3)分块式磁钢结构的永磁转子,转子磁钢配合面存在边缘效应,磁钢接触边缘径向、切向应力相对较大。

## 4 碳纤维护套过盈量分析

碳纤维护套过盈量的分析主要考虑 2 个指标:转子在高速运转和静态环境下,磁钢的最大应力  $\sigma_{\max} < \text{许用应力} [\sigma]$ ;磁钢与转轴不发生分离,即护套的最大位移量(内壁)  $u_{\text{Ri}}$ -磁钢最大位移量(内壁)  $u_{\text{mRi}} < \text{装配过盈量 } \delta$ 。

对转子过盈量取 0.1 ~ 0.3 mm 进行模拟。图 10 所示为护套在高速运转下的位移云图。图 11 所示为磁钢在高速运转下的位移云图。图 12 为各过盈量下,磁钢的内壁位移变化。图 13 所示为碳纤维护套等效应力云图。图 14 所示为磁钢等效应力云图。图 15 所示为护套及磁钢等效应力随过盈量变化图。

根据对图 10 ~ 图 15 分析可知:当过盈量在

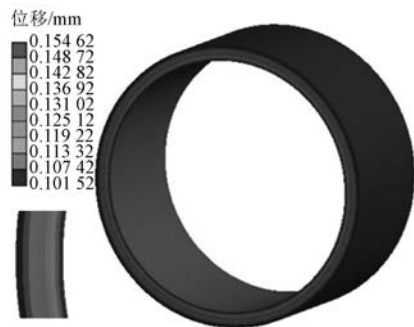


图 10 碳纤维护套位移云图

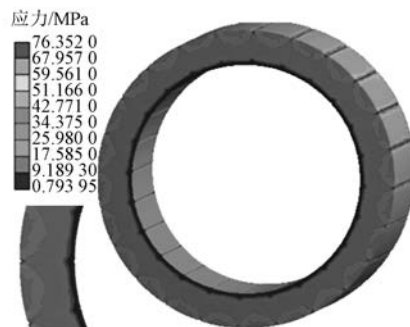


图 14 磁钢等效应力云图

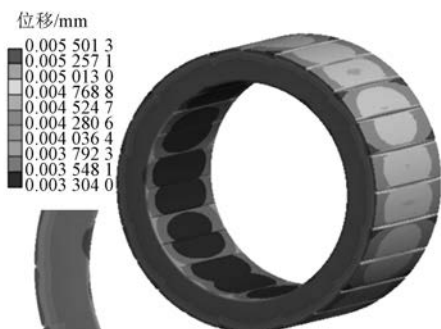


图 11 磁钢位移云图

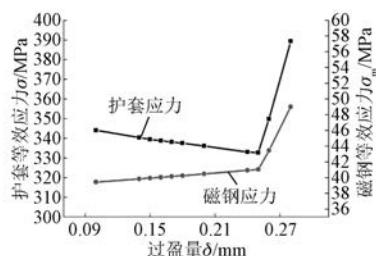


图 15 护套及磁钢等效应力随过盈量变化图

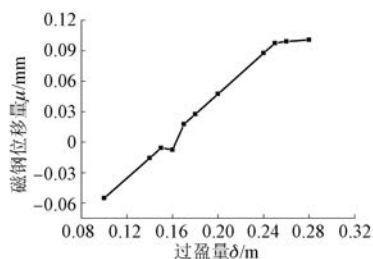


图 12 磁钢内壁位移随过盈量变化图

0.17 mm 以内时,磁钢位移为负值,磁钢高速旋转产生的离心力较大,离心力产生内壁压应力大于碳纤维护套过盈产生的外壁压应力,磁钢与转轴

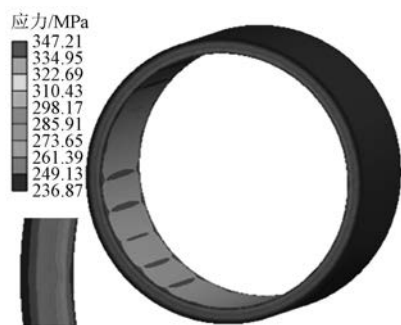


图 13 碳纤维护套等效应力云图

发生分离;当过盈量大于等于 0.17 mm 时,磁钢外壁压应力大于内壁压应力,磁钢与转轴紧密贴合,转子能够顺利运转;当过盈量大于 0.25 mm 时,护套及磁钢的等效应力将急剧增加,为了避免磁钢所受应力大于屈服强度,可设定过盈量上限为应力急剧上升的起点。

## 5 结 语

(1) 本文通过解析法及有限元法的双重计算,分析了碳纤维表贴式永磁电机转子的受力情况。对表贴式永磁电机转子在静态、高速常温及高速高温运转下,碳纤维护套和磁钢的径向、切向应力进行有限元分析,对表贴式永磁电机转子结构设计具有指导意义。

(2) 分块磁钢接触边缘、护套及磁钢所受应力最大。在转子设计中优化磁钢结构,减少磁钢分块数量,避免磁钢产生边缘效应,损伤转子结构。

(3) 高速高温对转子强度存在较大影响。在转子结构设计中,应对转子高速高温运转工况下的受力情况进行校核,确保碳纤维护套及磁钢所受应力小于各自材料的屈服应力。

(4) 碳纤维护套及磁钢的装配过盈量可通过有限元法进行模拟,当过盈量大于一定值  $a$  时,碳纤维

及磁钢所受应力将急剧增加;当其过盈量小于一定值  $b$  时,高速高温运转将使磁钢与转轴分离,磁钢开始打滑,因此,过盈量可以取  $a \sim b$  范围之内。

### 【参考文献】

- [1] 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.
- [2] KRACK M, SECANELL M, MERTINY P. Cost optimization of hybrid composite flywheel rotors for energy storage [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2010, 41(5): 779.
- [3] ZWYSSIG C, KOLAR J W, THALER W, et al. Design of a 100 W, 500 000 rpm permanent-magnet generator for mesoscale gas turbines [C] // Fourtieth IAS Annual Meeting Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005.
- [4] 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(增刊1): 195.
- [5] SCHNEIDER T, BINDER A. Design and evaluation of a 60 000 rpm permanent magnet bearingless high speed motor [C] // 2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2007.
- [6] KENNY B H, KASCAK P E, JANSEN R, et al. Control of a high-speed flywheel system for energy storage in space applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(4): 1029.

- [7] HONG D K, WOO B C, KOO D H. Rotordynamics of 120 000 r/min 15 kW ultra high speed motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(6): 2831.
- [8] 张超,朱建国,韩雪岩.高速表贴式永磁电机转子强度分析[J].中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4719.
- [9] 王继强,王凤翔,鲍文博,等.高速永磁电机转子设计与强度分析[J].中国电机工程学报, 2005, 25(15): 140.
- [10] BORISAVLJEVIC A, POLINDER H, FERREIRA J A. On the speed limits of permanent-magnet machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(1): 220.
- [11] 陈亮亮,祝长生,王萌.碳纤维护套高速永磁电机热态转子强度[J].浙江大学学报(工学版), 2015, 49(1): 162.
- [12] 王保俊,毕刘新,陈亮亮,等.碳纤维绑扎表贴式高速永磁电机转子强度分析[J].浙江大学学报(工学版), 2013, 47(12): 2101.
- [13] 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.
- [14] 官能平,夏源明,毛天祥.复合材料飞轮的三维应力分析[J].复合材料学报, 2002, 19(1): 113.
- [15] 李松松.碳纤维复合材料高速转子的力学特性研究及其储能密度优化[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003.

收稿日期: 2019-06-05

(上接第5页)

- [7] CLARK R E, SMITH D S, MELLOR P H, et al. Design optimization of moving-magnet actuators for reciprocating electromechanical systems [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(6): 3746.
- [8] 赵镜红,张晓锋,张俊洪,等.径向充磁圆筒永磁直线同步电机磁场分析[J].上海交通大学学报, 2010, 44(7): 989.
- [9] TRUMPER D L, KIM W, WILLIAMS M E. Design and analysis framework for linear permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(2): 371.
- [10] 王淑红,熊光煜.永磁直线同步电动机气隙磁场及磁阻力分析[J].煤炭学报, 2006, 31(6): 824.
- [11] MAHMOUDI A, RAHIM N A, PING H W. Axial-flux permanent-magnet motor design for electric vehicle direct drive using sizing equation and finite element

analysis [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2012, 122: 467.

- [12] TERATA M, FUJII N. Permanent magnet linear synchronous motor with high air-gap flux density for transportation [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2012, 39: 997.
- [13] TOMCZUK B, SCHRODER G, WAINDOK A. Finite-element analysis of the magnetic field and electromechanical parameters calculation for a slotted permanent magnet tubular linear motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(7): 3229.
- [14] ZHU Z Q, HOWE D. Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet DC motors, part III: Effect of stators slotting [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(1): 143.

收稿日期: 2019-06-11