

# 电动汽车牵引用水冷异步电机耦合场分析\*

王小飞, 代颖, 罗建, 黄闯  
(上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072)

**摘要:** 基于 Ansys 多物理场仿真分析平台, 对 1 台车用异步电机进行多物理场耦合分析。仿真电机连续运行在额定工况和峰值工况下的温升和热应力, 对电机各部分温度场分布进行深入分析, 预测电机峰值工况的最长允许时间。通过热-结构的有限元仿真分析电机内部结构的热应力分布, 深入分析转子导条端部与端环焊接位置和机壳与铁心过盈配合面的热应力, 校核转子导条端部是否存在开焊的风险, 并通过热仿真和应力分析计算机壳与铁心在最高温升工况下不发生滑移或涨开的过盈配合量取值。

**关键词:** 多物理场; 异步电机; 温度场; 热应力; 过盈配合

中图分类号: TM 343 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)04-0110-06

## Coupled Field Analysis of Water-Cooled Induction Motor for Electric Vehicle\*

WANG Xiaofei, DAI Ying, LUO Jian, HUANG Chuang  
(School of Electrical and Mechanical Engineering and Automation,  
Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Based on Ansys multi-physics simulation platform, a multi-physics coupling analysis of a vehicle asynchronous motor was carried out. The temperature rise and thermal stress of the motor under the rated working conditions and the peak operating conditions were simulated, and the temperature field distribution of each part of the motor was analyzed deeply, and the maximum allowable time of the motor peak condition was predicted. The thermal stress distribution of the internal structure of the rotor was analyzed by finite element simulation of the thermal structure. The thermal stress of the rotor bar and the end ring welding position and the interference surface of the rotor and the core were analyzed. Whether the rotor bar and end ring welding position of the risk of welding, and through the thermal simulation and stress analysis, the value of interference fit that the shell and the core does not occur sliding or rising in the maximum temperature rise conditions.

**Key words:** multi-physics field; asynchronous motor; temperature field; thermal stress; interference fit

## 0 引言

异步电机是电动汽车驱动电机的主要类型之一。其成本低、结构坚固、可靠性高、调速范围宽, 特斯拉电动车 Model S、宝马 Mini-E 及部分新能源客车采用了异步电机作为牵引电机<sup>[1]</sup>。电动汽车牵引用电机电磁负荷大、工作环境恶劣, 对电机的散热设计提出了挑战, 过高的温升不但会破坏

电机的定子绕组绝缘、降低笼型绕组的强度, 还会造成导条断裂<sup>[2-9]</sup>, 还可能导致铁心与机壳的过盈配合由于热膨胀系数不同引起的热应力而出现滑移或涨开现象, 降低电机结构刚度, 引发较大的电磁振动。

本文以 1 台额定功率 40 kW 的车用异步电动机为研究对象, 基于 Ansys Workbench 多物理场仿真平台, 对电机运行在额定工况 (40 kW) 和峰值

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51007050)

作者简介: 王小飞 (1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车牵引用电机设计。

代颖 (1980—), 女, 副教授, 研究方向为电机的振动噪声, 电动汽车牵引用电机设计。

罗建 (1962—), 男, 教授, 博导, 研究方向为电机驱动等多个领域。

工况(80 kW)进行磁-热-结构的多物理场耦合的有限元仿真,分析其热-结构特性。

### 1 电磁场计算

#### 1.1 样机基本参数

对样机进行电磁场仿真,样机参数如表 1 所示,样机如图 1 所示。

表 1 样机参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
相数	3	极对数	2
额定功率/kW	40	额定电压/V	220
峰值功率/kW	80	冷却方式	水冷
定子/转子槽数	36/30	峰值转速/(r·min <sup>-1</sup> )	6 000
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	3 600		

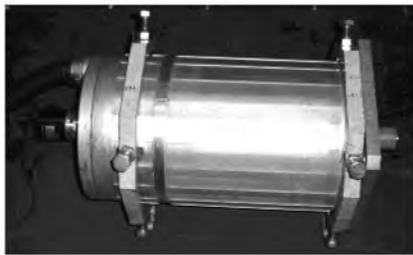


图 1 样机

#### 1.2 损耗计算

对电机进行电磁场仿真,计算导致电机发热的电机运行过程中产生的各种损耗,如式(1)所示<sup>[10]</sup>:

$$P_{\Sigma} = P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe} + P_{fw} + P_{\Delta} \quad (1)$$

式中:  $P_{\Sigma}$  ——总损耗;

$P_{Cu1}$  ——定子绕组的铜损;

$P_{Cu2}$  ——转子铜损;

$P_{Fe}$  ——铁心损耗;

$P_{fw}$  ——机械损耗;

$P_{\Delta}$  ——杂散损耗。

其中机械损耗和杂散损耗由经验公式计算得到。损耗的仿真计算结果如表 2 所示。

表 2 各部分损耗 W

损耗参数	铁耗	定子铜耗	转子铜耗
额定功率、额定转速	380.4	1081.8	188.2
峰值功率、峰值转速	291.2	2 266.8	1 053.2

## 2 水冷异步电机的三维瞬态温度场

### 2.1 求解域的模型

本文中的异步电机具有水冷套管结构,采用全封闭式外部冷却系统,无需内部通风。求解电机温度场时,为简化分析,作如下假设:(1)绕组的绝缘漆分布均匀,绕组完全浸涂;(2)电机外壳的冷却效果大致由水套的表面热交换系数表示;(3)忽略辐射散热以及转子与转轴之间的接触热阻;(4)电机各部分损耗不随温度变化而变化。

基于上述假设,电机的求解域模型如图 2 所示。

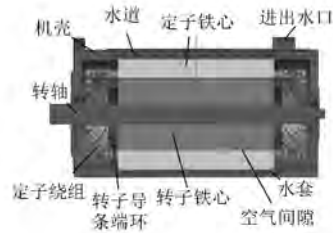


图 2 电机温度场模型

为了简化分析,建立定子绕组等效模型,引入 1 个替代绕组铜线的等效导体和槽内所有绝缘材料的等效绝缘层,如图 3 所示。按参考文献[11-12]可计算得槽绝缘的等效导热系数为 0.26 W/m·K。

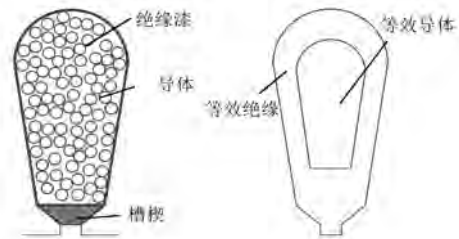


图 3 等效绕组模型

### 2.2 定转子空气间隙的有效热导率

定转子和气隙之间的热传递比较复杂,引入有效热导率表示气隙中流动空气的热交换容量。有效热导率  $\lambda_{ef}$  计算如下<sup>[13]</sup>:

$$\left\{ \begin{aligned} Re_g &= \frac{\omega_r \delta}{v_a} = \frac{\delta}{v_a} \frac{2\pi R_2 n}{60} \\ Re_c &= 41.2 \sqrt{\frac{R_1}{\delta}} \\ \lambda_{ef} &= \lambda_{air} (Re_g < Re_c) \\ \lambda_{ef} &= 0.069 \eta^{-2.9084} \cdot Re_g^{0.46141 \ln(3.33361 \cdot \eta)} (Re_g > Re_c) \end{aligned} \right. \quad (2)$$

其中,  $\eta = R_2/R_1$ 。

式中:  $Re_g$ ——空气间隙的雷诺数;

$\nu_a$ ——空气的运动黏度;

$\omega_r$ ——转子的圆周速度;

$\delta$ ——气隙长度;

$R_2$ ——转子的外半径;

$n$ ——电机转速;

$Re_c$ ——临界雷诺数;

$R_1$ ——定子的内半径。

### 2.3 瞬态温度场求解结果

#### 2.3.1 额定工况运行时温度场仿真

环境温度设为 45 °C。选定 40 kW、3 600 r/min 额定工况持续运行工作点,对电机求解域模型进行电磁场与温度场的有限元耦合场仿真,按参考文献[14-16]计算得出水冷机壳水套表面的等效换热系数为 15 508.8 W/(m<sup>2</sup>·K),按参考文献[17]计算得定子绕组端的换热系数为 117.05 W/(m<sup>2</sup>·K)、定子铁心端面的换热系数 77.64 W/(m<sup>2</sup>·K)、转子铁心端面的换热系数 51.61 W/(m<sup>2</sup>·K)、转子端环的换热系数 205.36 W/(m<sup>2</sup>·K)、转轴靠近转子铁芯端面换热系数为 27.32 W/(m<sup>2</sup>·K)。仿真得出电机的温升分布,如图 4、图 5 所示。

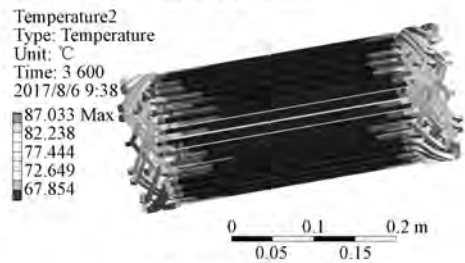
从图 4、图 5 可知,电机在额定工况下持续运行,温升达到稳态时,绕组的温度最高,绕组端部温度明显高于定子槽内绕组,最高温度为 87 °C。结构上定子铁心与机壳直接接触,壳体中的冷却水使定子铁心轭部散热优于齿部,故定子铁心齿部的温度要高于轭部,最高为 65.5 °C。转子部分温度最高出现在端环与转子导条连接处为 56.7 °C。由于机壳水道的原因,机壳温度两端明显高于中部,转轴的热传递使得端盖与轴承连接处温升略高于端盖其他区域,机壳最高温度为 70.8 °C。由仿真结果可知,电机的最大温升在合理范围内,电机在额定运行点可以安全可靠运行。

#### 2.3.2 峰值工况运行时电机温度场仿真

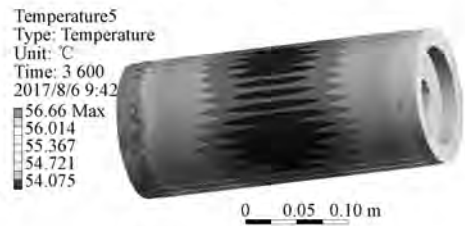
考虑实际电动汽车可能运行的工况,按照额定功率/额定转速工作点,峰值功率/峰值转速工作点两种工况依次进行电机的温度场仿真。电机在额定工况下 60 min 后温升基本达到稳定,峰值工作点的温度场仿真从电机额定工况运行 60 min



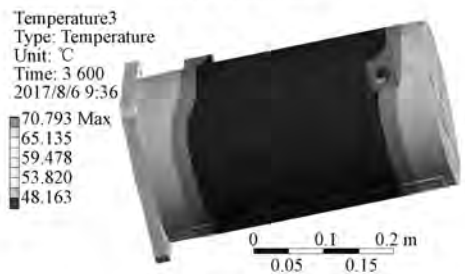
(a) 定子温度云图



(b) 绕组温度云图



(c) 转子温度云图



(d) 机壳温度云图

图 4 额定工况下运行 60 min 时电机各部分温度云图

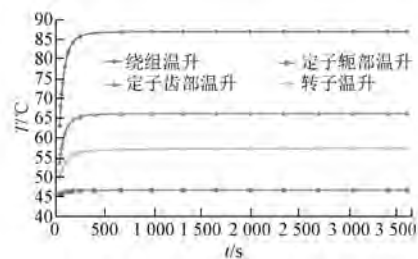


图 5 额定工况下运行 60 min 时电机各部分温度曲线

后开始,按技术指标要求的 60 s,校核电机峰值工作点的温升。

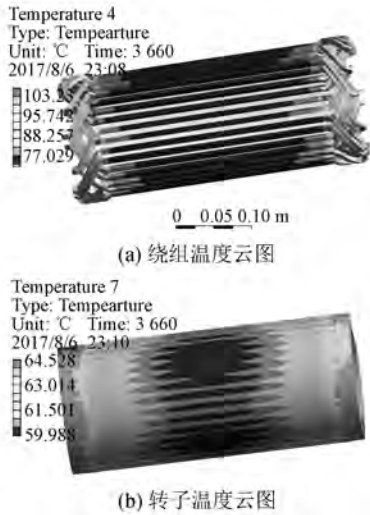


图6 峰值工况运行 60 s 电机温度云图

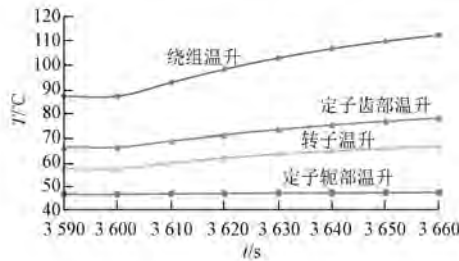


图7 峰值工况运行 60 s 电机各部分温度曲线

由图 6 可知,电机峰值运行 60 s (总时间为 3 660 s)时,电机各部分的温度分布与电机额定工况下温度场分布相似。由图 7 可知电机峰值工况运行时绕组温度上升最快,第 60 s 时,绕组的最高温度为 107 °C,定子铁心的最高温度为 75.4 °C,转子铁心的最高温度为 64.5 °C,机壳的最高温度为 75 °C,均在允许温升限度以内,满足技术指标的要求。

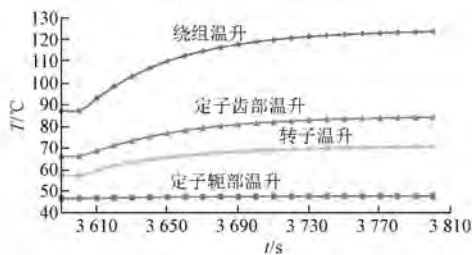


图8 峰值工况运行 200 s 电机温度曲线

为了预测在此工况下电机峰值运行的最长允许时间,让电机继续在峰值工况下运行一段时间。

由图 8 可知当峰值工况下连续运行 200 s (总运行 3 880 s)时,定子齿部最高温度升高到 74 °C,转子最高温度升高到 70 °C,绕组的最高温度达到 123 °C,超过了 E 级绝缘的最高允许温度 (120 °C),接近绕组的最高温升标准 (80 K),所以电机在此环境下额定工况运行一段时间后,峰值工况的运行时间不宜超过 200 s,否则易导致绕组绝缘损坏,影响电机运行的安全性和可靠性。

### 3 三维热应力场的仿真研究

温度变化产生的热应力会导致电机结构发生形变,在电机的薄弱结构部位较大的热应力可能导致电机结构出现问题。车用水冷异步电机,转子导条端部与端环的焊接部位和电机定子铁心与机壳的过盈配合面由于材料热膨胀系数不同在接合面产生的热应力可能会导致导条开焊或过盈配合面涨开,产生安全隐患。

在温度场分析的基础上,借助相关弹性力学知识,进行热应力分析。力学弹性塑性问题可以根据系统最小势能的位移来解决:

$$\Pi = U + \Omega \quad (3)$$

式中:  $\Pi$ ——系统总势能;

$U$ ——系统内部应力变形势能;

$\Omega$ ——系统因外力作用而获得的势能。

对于电机热应力分析,可以认为其变形远小于本身的几何尺寸。故静力学方程<sup>[18]</sup>如下:

$$\begin{cases} \left( \sum_1^n \int_V B^T DB dV \right) \delta = \sum_1^n \int_V B^T D \varepsilon_0 dV \\ \varepsilon_0 = \Delta T [\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z, 0, 0, 0]^T \\ \sigma = D(B\delta - \varepsilon_0) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $n$ ——元素的数量;

$\delta$ ——节点位移矢量矩阵;

$D$ ——弹性刚度矩阵;

$B$ ——基于单元形状函数的应变-位移矩阵;

$\varepsilon_0$ ——热应变矢量矩阵;

$\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ —— $x, y, z$  方向上的材料热膨胀系数;

$\Delta T$ ——温升值;

$\sigma$ ——应力矢量。

根据建立的数学模型,利用 Ansys Workbench 把峰值工况运行 60 s (总运行 3 660 s)的温度场

直接载荷到热应力场进行仿真分析。

### 3.1 转子导条热应力场

电机转子导条的热应力仿真结果如图 9 所示。由图 9 可以看出热应力最大值出现在转子导条与端环连接的位置,最大值为 31 MPa。图 10 所示为转子导条各部分热应力的轴向分布,在整体分布上同一截面导条底部热应力最大、顶部次之、中部最小,也可发现转子导条与端环连接处的热应力明显要比其他位置大。图 11 所示为导条由于热应力产生的径向位移分布图,可以看出导条顶部的径向位移比导条底部的径向位移大,导条径向形变的最大值也出现在端环与导条连接处(即导条端部),为 38 μm。综上可得转子导条与端环连接处是转子导条最容易断裂的位置。

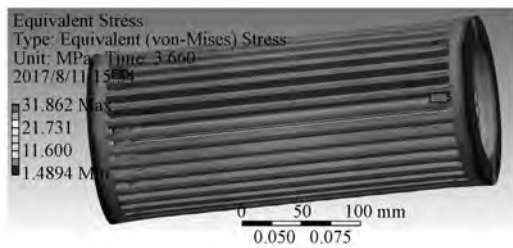


图 9 转子导条热应力云图

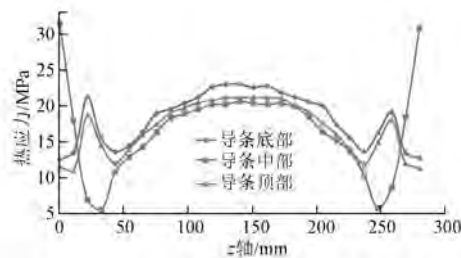


图 10 转子导条热应力轴向分布曲线

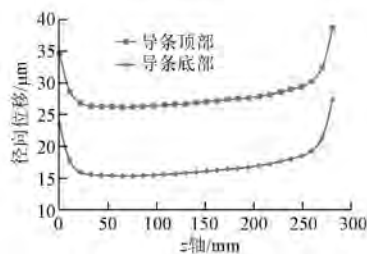


图 11 导条径向位移曲线

导条与端环的连接是焊接,按局部无损检测最低标准,焊接接头强度与母材强度之比为0.8,

可得焊接接头处能承受的屈服强度为105 MPa,故此工况运行下导条与端环连接处的焊接接头不会开焊,电机可安全运行。

### 3.2 铁心与机壳过盈配合面量的选取

机壳与铁心过盈配合面的热应力如图 12、图 13 所示。由图 12、图 13 可以看出过盈配合面热应力轴向分布不均,但同一截面相差不大,热应力最大处在端部,为 32 MPa。



图 12 过盈配合面热应力云图

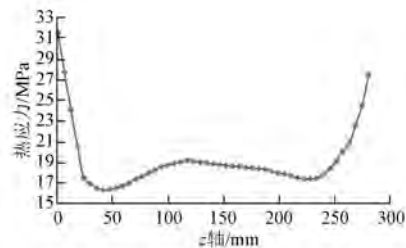


图 13 过盈配合面热应力轴向分布曲线

为避免机壳与铁心之间出现滑移或涨开现象,需要合理选择过盈配合量的大小,以保证接触面的过盈应力大于热应力。配合面的过盈应力可采用式(5)进行近似计算:

$$\begin{cases} \sigma_r = -b^2 P(1 - a^2/r^2)/(b^2 - a^2) \\ \sigma_\theta = -b^2 P(1 + a^2/r^2)/(b^2 - a^2) \\ P = E\delta(c^2 - b^2)(b^2 - a^2)/[2b^3(c^2 - a^2)] \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_r$ ——径向应力;  
 $b$ ——被包容件外壁半径;  
 $P$ ——内壁(或外壁)压力;  
 $a$ ——被包容件内壁半径;  
 $r$ ——过盈配合面半径;  
 $\sigma_\theta$ ——切向应力;  
 $E$ ——材料的弹性模量;  
 $\delta$ ——有效过盈量;

$c$ ——包容件的外壁半径。

由式(5)计算径向过盈应力等于热应力时的有效过盈量为 0.018 mm, 计算 0.018 mm 过盈量对应的切向过盈应力为 88.49 MPa, 远大于过盈配合面的切向热应力。

机壳与铁心的过盈配合不需要传递扭矩, 为保证配合安全可靠, 过盈配合的过盈量往往取值很小, 机壳与铁心在过盈配合接触面处于弹性范围。按第四强度理论, 过盈配合不产生塑性变形所容许的最大过盈量计算公式:

$$\delta_{\max} = p_{\max} d_f \left( \frac{C_a}{E_a} + \frac{C_i}{E_i} \right) \quad (6)$$

式中:  $p_{\max}$ ——过盈配合联接件不产生塑性变形容许最大结合压力的最小值;

$d_f$ ——过盈配合面直径;

$E_a$ ——被包容件弹性模量;

$E_i$ ——包容件弹性模量;

$C_a$ ——被包容件系数;

$C_i$ ——包容件系数。

由式(6)计算得出使机壳不发生塑性变形的最大过盈量为 0.22 mm。

综上所述, 保证电机在额定工况下连续运行 60 min 后, 又在峰值工况下运行 60 s 的情况下定子结构热态刚度不发生较大改变的最小过盈量为 0.018 mm, 使机壳不发生塑性变形的最大过盈量为 0.22 mm。

## 4 结 语

本文基于 Ansys 多物理场仿真平台对 1 台额定功率 40 kW 的车用异步电机进行多物理场耦合的有限元仿真, 分析了电机连续运行在额定功率和峰值功率两种热负荷工况时电机结构部件的温升和热应力, 校核了电机绕组绝缘的安全性, 预测了电机峰值工况的最长允许时间。通过有限元仿真分析了电机转子导条端部焊点和机壳与定子铁心过盈配合面的热应力, 校核了电机转子端部导条焊点是否存在开焊问题, 计算了保证电机在最高温升工况下过盈配合面不发生滑移或涨开的过盈配合量取值。

## 【参 考 文 献】

[1] EHSANI M, YIMIN G, EGAY S. 现代电动汽车混

合动力电动汽车和燃料电池车: 基本原理, 理论和设计[M]. 倪光正, 倪培宏, 熊素铭, 译. 北京: 机械工业出版社, 2008.

- [2] LIU Y J, LEE Y S, JUNG H K, et al. 3D thermal stress analysis of the rotor of an induction motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(4): 1394-1397.
- [3] MROZ J. Temperature field of a double squirrel-cage motor during start up[J]. IEEE proceedings: Electric Power Applications, 2005, 152(6): 1531-1538.
- [4] 钱荣超. 复合笼条感应电动机三维热应力场与起动性能计算与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2012.
- [5] 王艳武, 杨立, 陈翱, 等. 异步电机转子三维温度场及热应力场研究[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(6): 27-32.
- [6] BANGURA J F, DEMERDASH N A. Diagnosis and characterization of effects of broken bars and connectors in squirrel-cage induction motor by time-stepping coupled finite element state space modeling approach[J]. IEEE Trans Energy Convers, 1999, 14(4): 1167-1176.
- [7] 谢颖, 王泽, 单雪婷, 等. 基于多场量的笼型感应电机三维瞬态磁热固耦合计算分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 3076-3084.
- [8] 汤蕴缪, 梁艳萍. 电机电磁场的分析与计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [9] 赵博, 张洪亮. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [10] LIU R, ZHENG P, XIE D, et al. Research on the high power density electromagnetic propeller[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 355-358.
- [11] XYPTRAS J, HATZIATHANASSIOU V. Thermal analysis of an electrical machine taking into account the iron losses and the deep-bar effect[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(4): 996-1003.
- [12] 翁荣周. 传热学的有限元方法[M]. 广州: 暨南大学出版社, 2000.
- [13] LI W L, LI S F, XIE Y, et al. Stator-rotor coupled thermal field numerical calculation of induction motors and correlated factors sensitivity analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(24): 85-91.

(下转第 121 页)

续表 6

序号	$\tan\delta\%$ 155 °C	等级	厚度/mm	击穿电压/kV	等级	电气场强/(kV · mm <sup>-1</sup> )	等级	
2 号	5-1	8.52	一等	2.38	73.1	合格	30.7	优等
	5-2	7.68	优等	2.36	70.4	合格	29.8	一等
	5-3	9.12	一等	2.35	71.2	合格	30.3	优等
	5-4	10.3	一等	2.38	67.7	合格	28.4	一等
	5-5	7.65	优等	2.36	71.4	合格	30.3	优等
	5-6	8.24	一等	2.35	74.2	合格	31.6	优等

从表 5、表 6 中数据可看出,在所测试的项目中,环氧酸酐及 1 号树脂浸渍的线圈电气性能相当,所有指标均能达到行业优等品标准,而 2 号树脂浸渍的线圈,某几项要稍差一些,只能达到一等品标准。

### 2.7 线圈电老化测试数据对比

所有线圈在施加 2 倍额定电压的高压电下,均超过 1 200 h 未引起线圈绝缘失效,说明 3 种树脂所浸渍的线圈均能满足风电电机及高压电机的绝缘要求。

## 3 结 语

通过对 3 种树脂的性能测试对比,可得出如下结论:(1) 常规性能中,1 号树脂相对挥发份较低,热态下的介质损耗因数也较优,树脂储存稳定性较好,优于环氧酸酐树脂及 2 号树脂;(2) 耐热性上,3 种树脂相差不大,不过 1 号树脂的玻璃化温度较为适中;(3) 在线圈的测试中,环氧酸酐及 1 号树脂电性能相当,个别数据二者稍有差距,而 2 号树脂浸渍的线圈电性能普遍次于环氧酸酐及 1 号树脂。从综合使用工艺来看,1 号树脂最适于

风电电机及高压电机的绝缘处理,可替代环氧酸酐浸渍树脂。

### 【参 考 文 献】

- [ 1 ] 夏宇,王文,陶纯初,等.JF-9955 环氧酸酐常温浸渍 VPI 树脂及其在风力发电机上的应用[ C ] // 全国风力发电技术协作网第五届年会论文集,成都,2011: 257-267.
- [ 2 ] 夏宇,毛继业,陶纯初,等.JF-9955 环保型环氧酸酐 VPI 树脂的性能与应用研究[ C ] // 全国绝缘材料与绝缘技术专题研讨会,2010: 34-40.
- [ 3 ] ZEN C P, XIA Y. Epoxy - anhydride VPI resin with low viscosity and application in 5 MW permanent magnet synchronous wind - driven generators [ C ] // Electrical Insulation Conference, Annapolis, Maryland, 5 to 8 June, 2011: 141-145.
- [ 4 ] 张光蓉.大型高压电动机和发动机绝缘系统的进展[ J ].东方电机,2001(1): 125-128.
- [ 5 ] 漆临生,梁智明,何海洋,等.国产环氧酸酐无溶剂浸渍树脂应用研究[ C ] // 中国电工技术学会学术年会论文集,2011: 327-336.

收稿日期: 2018 -01 -05

(上接第 115 页)

- [ 14 ] STATON D, BOGLIETTI A, CAVAGNINO A. Solving the more difficult aspects of electric motor thermal analysis [ C ] // IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003 IEMDC '03, 2003: 747-755.
- [ 15 ] STATON D A, CAVAGNINO A. Convection heat transfer and flow calculations suitable for electric machines thermal models [ J ]. IEEE Transactions on

Industrial Electronics, 2008, 55(10): 3509-3516.

- [ 16 ] 郁岚,卫运钢,杜雅琴,等.热工基础及流体力学[ M ].北京:中国电力出版社,2006.
- [ 17 ] 黄国治,傅丰礼.中国旋转电机设计手册[ M ].北京:中国电力出版社,2007.
- [ 18 ] COOK R D. Finite element modeling for stress analysis [ M ]. New York: John Wiley & Sons, 1995.

收稿日期: 2017 -08 -20