

# 磁悬浮电机转子加强环设计及工艺研究

张旭坡 李勇 肖军 邓智泉

(南京航空航天大学材料科学与技术学院,南京 210016)

**文 摘** 针对某型号磁悬浮永磁电机转子磁环胶接强度不能满足工作要求的问题,提出采用 M46J/L1000 复合材料缠绕加强环的保护设计方案,根据工艺实验结果,利用有限元分析软件 MSC Patran/Nastran 对该结构进行应力和形变分析,并确定了合适的成形工艺参数,完成了转子加强环试验件的制作。结果表明:M46J/L1000 复合材料体系满足材料组分要求,缠绕复合材料加强环结构满足磁悬浮电机转子在 72 000 r/min 高速转动时强度和变形要求。

**关键词** 磁悬浮电机,复合材料,纤维缠绕,有限元分析

## Study on Design and Process of Rotor Strengthen Ring in Magnetic Levitation Motor

Zhang Xupo Li Yong Xiao Jun Deng Zhiquan

(College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016)

**Abstract** To increase the joint strength of the rotor and the magnetic ring in the magnetic levitation motor, a strengthen ring is introduced by M46J/L1000 carbon fiber reinforced epoxy composite wounded on the bearing. Finite element analysis software MSC Patran/Nastran is used to analyze the stress and deformation of the structure based on the data of process test, and appropriate process parameters are obtained. Finally, strengthen ring is completed by means of filament winding. Experimental results show that M46J/L1000 composite satisfies the requirements of the composition of material, and the composite structure of strengthen ring also satisfies the requirements of strength and deformation of the rotor in the magnetic levitation motor when it is rotating at a high speed of 72 000 r/min.

**Key words** Magnetic levitation motor, Composite, Filament winding, Finite element analysis

### 1 引言

磁悬浮电机是利用电力电子技术和计算机控制技术使其同时具备驱动和悬浮功能的一种新型电机,在高速电机领域具有重要的应用价值,对于提高航空航天器的工作性能具有极其重要的意义。近年来,瑞士和日本在这方面已经取得了迅速发展,并申请了多项专利。国内目前也有南京航空航天大学、浙江大学等多家单位加入了磁悬浮电机的研究行

列<sup>[1~5]</sup>。这种电机在高速运转条件下,转子的保护设计尤其重要。如某型号磁悬浮永磁电机中胶接在转子轴上的磁环在高速运行条件下,由于磁环的胶接强度远小于离心力,胶接面易发生破坏。文献[6]中对转子磁环的应力和应变问题进行了数值分析,但未提出有效的加强方法。

根据转子的结构特点和工作状态,本文提出了采用树脂基复合材料缠绕加强环的解决方案。选用

收稿日期:2005-10-08;修回日期:2005-11-28

基金项目:国家自然科学基金项目(50377012)

作者简介:张旭坡,1982年出生,硕士,主要从事复合材料成形工艺及设备的研究工作

高强度高模量碳纤维 M46J 增强环氧 L1000 复合材料体系,结合工艺实验结果,采用有限元分析软件 MSC Patran/Nastran 分析加强环的应力和形变,确定了合适的成形工艺参数,最后完成转子加强环试件的制作。

## 2 加强环设计

### 2.1 转子结构

磁悬浮电机利用磁力实现转子在定子腔中的无接触悬浮转动。转子中心轴上固定永磁钢环提供磁力,磁环由多块环形的磁钢组合而成,并与中心轴通过胶接方式固定,其结构剖面如图 1 所示。在电机的工作状态下,转子磁环受到高速旋转所产生的离心力作用,磁环胶接面所受剪切破坏应力可以达到 80 MPa,大于磁环间的胶接强度,胶结面极易发生破坏。加强环的作用是约束磁环,所受径向力远远大于轴向力,属于单向受力构件。因此,本文选择高强度高模量碳纤维增强树脂基复合材料制造加强环,工艺采用环向缠绕成形,能充分发挥纤维的强度。

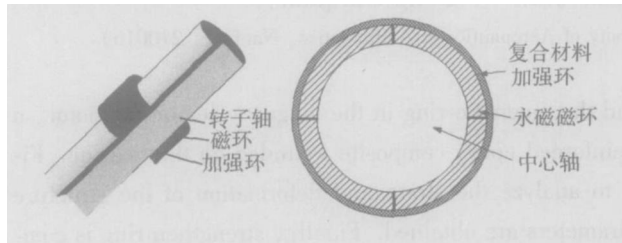


图 1 磁悬浮电机转子结构示意图及剖面图

Fig 1 Sketch and cutaway view of magnetic levitation motor rotor structure

### 2.2 加强环材料要求

对于树脂基复合材料制品来说,关键之一是要选择合适的增强材料和基体材料。根据磁悬浮电机转子的工作要求,它们需满足以下要求:

(1)强度,在磁轴承以极限转速 72 000 r/min 工作状态下,保证磁环在离心力作用下不发生破坏;

(2)刚度,工作状态下,磁环不产生大的径向变形,以保证转子外表面与定子内表面保持 0.5 mm 的气隙;

(3)固化温度,树脂固化温度必须低于磁钢材料的居里点温度(120 °C),如果固化温度超过该居里点温度,会削弱磁钢的磁性;

(4)工艺性,树脂黏度和凝胶时间等参数要满足高模量碳纤维缠绕工艺要求。

### 2.3 原材料性能

选用的增强材料为 M46J - 12K 碳纤维,由日本 Toray 公司开发生产,其主要性能见表 1。

表 1 M46J 碳纤维的性能

/MPa	$E/GPa$	/%	$\rho/g \cdot cm^{-3}$	$\rho/g \cdot cm^{-3}$
3763	433	0.9	445	1.84

基体材料选用法国 Bakelite 公司生产的 L1000 - VE5194/H 环氧树脂体系,其中 VE5194/H 为固化剂。L1000 树脂 25 °C 下黏度为  $(1.2 \pm 0.2) Pa \cdot s$ ,树脂与固化剂的配比为 100/30,室温下适用期为 10 h。L1000 - VE5194/H 环氧树脂浇注体的物理性能见表 2。

表 2 L1000 - VE5194/H 环氧树脂浇注体物理性能

$\rho/g \cdot cm^{-3}$	$\sigma_t/MPa$	$E_L/GPa$	/%	$T_g/^\circ C$	吸水率/% (24h, 23 °C)
1.135	65.4	3.16	9.0	80	0.13

### 2.4 NOL 环性能测试

为了获得 M46J/L1000 复合材料环的拉伸强度,加工 NOL 环并测试它的力学性能。NOL 环试样根据 GB 2578—89,采用圆筒切环法制作,拉伸测试方法采用 GB 1458—88。M46J/L1000 复合材料 NOL 环拉伸测试结果见表 3。

表 3 M46J/L1000 复合材料 NOL 环力学性能

项目	$\sigma_t/MPa$	$E_L/GPa$	/%
测试值	2262	378.8	0.71
离散系数 $C_V$ /%	3.0	2.6	5.7

在测试中,试样均为脆性断裂,属于有效断裂模式,并且所有测试项目的离散系数均小于 6.0%,具有较小的离散性。从 NOL 环拉伸测试结果来看,M46J/L1000 复合材料具有高的拉伸强度和模量及低的断裂延伸率,适合选择作为加强环成形材料。

### 3 有限元分析

当磁悬浮电机转子在极限转速状态下工作时,加强环所承受的应力是最大的。为了获得此时加强环的应力分布和形变情况,应用有限元分析软件 MSC Patran/Nastran 对加强环进行有限元分析和模拟<sup>[7-9]</sup>。假设转子以极限转速 72 000 r/min 匀速转动,磁环受到恒定的离心力作用,此时由于加强环的

约束作用,加强环内壁会受到均匀分布的径向压力作用,该工况可以等效为压力容器筒身段的受力分析,经计算知,压力为 80 MPa。加强环建模时采用复合材料壳单元,在内压作用下处于承拉状态,内径 = 60 mm、厚度  $d = 2$  mm、宽度  $L = 36$  mm,为了减少计算量,沿轴向对称面截取一半进行分析,并约定中截面处于轴向约束状态。加强环有限元分析模型如图 2 所示,模型共划分为 96 个单元、240 个节点。复合材料的力学性能数据采用 NOL 环力学性能测试结果。

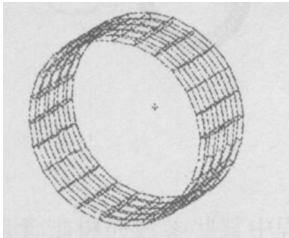
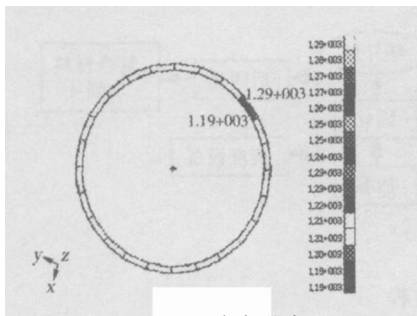


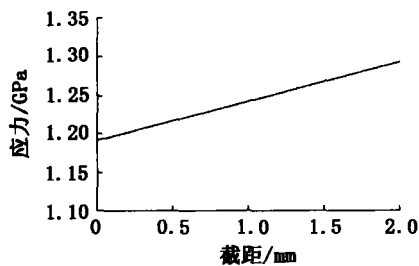
图 2 有限元模型  
Fig 2 Mesh of FEM

### 3.1 应力分析结果

图 3 为加强环沿厚度方向上的应力分布和分析曲线。



(a) 应力分布



(b) 分析曲线

图 3 加强环应力分布和分析曲线

Fig 3 Stress distribution and stress graph of magnetic ring

可以看出,复合材料环所受应力从内表面到外表面逐渐增大,呈线性变化,最小应力为 1.19 GPa,最大应力为 1.29 GPa。根据复合材料的结构设计

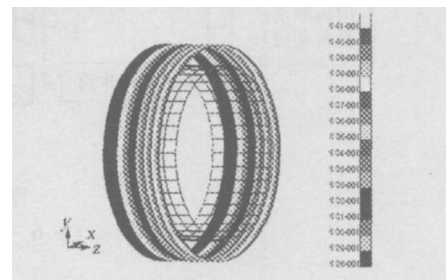
原则,对于该碳纤维增强复合材料,选择材料安全系数为 1.5,因此设计方案中选用的复合材料环向应力许用值为 1.94 GPa,由 NOL 环测试结果可知,M46J/L1000 复合材料体系的拉伸强度可达 2.262 GPa,表明选择该材料体系是满足加强环对于材料强度的要求。

### 3.2 形变分析结果

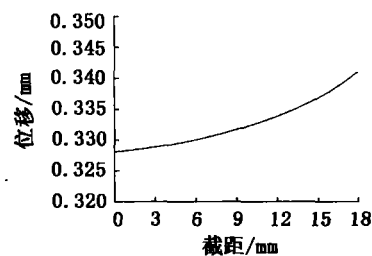
图 4 为加强环形变分布和分析曲线。

如图 4(a)所示,加强环的外径发生了尺寸变化,内侧网格环显示加强环静态时外表面的位置,外环显示工作状态下形变后的外表面位置。由于边界条件设置的原因,靠近中截面处只表现径向膨胀形变;而从中截面到外缘面,复合材料层在发生径向膨胀形变的同时也表现轴向收缩形变,径向膨胀形变量恒定,轴向收缩形变随与中截面的距离增大而愈加明显,这种现象表现了复合材料的变形耦合效应。

从图 4(b)中可以看出,加强环的形变分布是非线性的,中截面处表现出来的径向形变量为 0.328 mm,而最外缘达到最大整体变形量为 0.341 mm。总体来说,由于加强环径向膨胀形变量小于加强环与定子间的静态气隙 (0.5 mm),因此该材料体系满足对于材料的刚度要求。



(a) 形变分布



(b) 分析曲线

图 4 加强环形变分布和分析曲线

Fig 4 Deformation distribution and deformation graph of magnetic ring

## 4 缠绕工艺及分析

### 4.1 实验设备

缠绕设备如图 5 所示。动力装置利用通用仪表车床改装,外加变频无级调速系统以实现缠绕模具的无级变速。浸胶系统采用浸胶槽,并加装刮胶装

置以控制树脂含量。纤维张力控制采用磁粉离合器型张力控制系统,张力大小通过调整磁粉离合器的直流输入电压进行调节。固化时通过红外灯烘烤的方式提供固化温度,并利用贴片热电偶测温仪测量复合材料表面温度以实现实时温度控制。

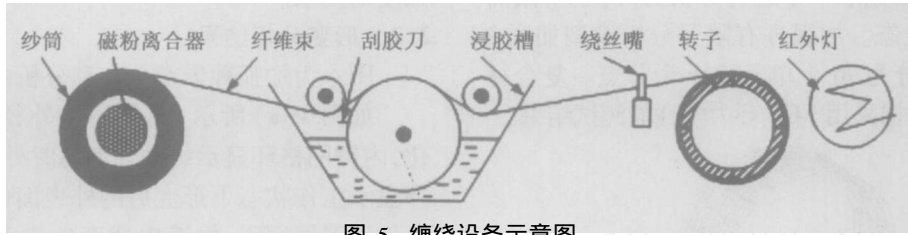


图 5 缠绕设备示意图

Fig 5 Sketch of winding machine

### 4.2 工艺参数的确定

加强环采用湿法缠绕成形,工艺流程如图 6 所示。湿法缠绕成形集浸渍、缠绕于一体,减少了对纤维的损伤,大大提高工艺效率,但湿法缠绕一步成形

使得缠绕过程中某些参数如树脂含量、缠绕张力等的可控制性降低,为此对湿法缠绕成形工艺进行探索研究。

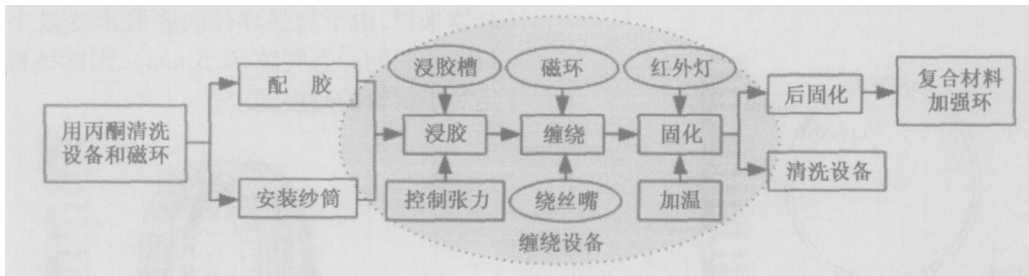


图 6 加强环缠绕工艺流程

Fig 6 Winding process of magnetic ring

#### 4.2.1 树脂含量

树脂含量的变化及分布对制品的性能影响很大,特别是从强度角度看,树脂含量过高会使制品的复合强度降低,树脂含量过低;孔隙率增加,使制品的致密性、耐老化性能及剪切强度下降,同时也影响纤维强度的发挥。此外树脂含量过大的变化会引起不均匀的应力分布,并在某些区域引起破坏,因此必须严格控制树脂含量。在缠绕过程中,其影响因素主要包括胶液黏度、浸胶方式、缠绕速度等。

##### (1) 浸胶方式

在缠绕工艺中,浸胶方式主要有两种:下浸胶和上浸胶。其中,下浸胶适用于低黏度树脂和较高的缠绕速度,而上浸胶多用于树脂黏度较高的情况。

经过测量,L1000-VE5194/H环氧树脂体系的黏度为  $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,对于湿法缠绕来说是偏高的,因此采用上浸胶方式,并利用刮胶刀调节纤维束的浸胶量。

##### (2) 缠绕速度

缠绕速度直接影响到生产率,但是若缠绕速度过快,纤维浸胶时间受到限制,势必造成浸胶不足;另外缠绕速度过快,不易实现对其他工艺参数的实时控制,造成纱片宽度不均匀、缠绕张力不稳定等,影响制品质量。经过试验探索,在缠绕速度为  $60 \text{ mm/s}$  的条件下,树脂的质量分数控制在  $(30 \pm 3)\%$ 。

#### 4.2.2 缠绕张力

纤维是连续地逐层缠绕到磁环上的。在缠绕张

力作用下,后缠上去的纤维势必对先缠上去的纤维层产生径向压力,迫使其在径向产生压缩变形,从而使内层纤维变松。若采用恒定的缠绕张力,将会使纤维层呈现内松外紧状态,使内层纤维的初应力产生很大差异,导致纤维不能同时承载,因而大大降低制品强度和疲劳性能。同时,张力的大小对缠绕制品的树脂质量分数或纤维体积分数也有一定的影响。加强环缠绕中采用张力逐层递减的方法。通过缠绕过程的实时检测发现,对磁粉离合器输入电压 0.1 V 层的递减调整,可以实现缠绕张力在  $(10 \pm 1) \text{ N}$  的输出控制。

通过实验初步确定的湿法缠绕成形工艺参数,见表 4。

表 4 加强环缠绕成形工艺参数

Tab 4 Winding process parameters of magnetic ring

浸胶方式	缠绕速度 $/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	缠绕张力 $/\text{N}$	纱片宽度 $/\text{mm}$	缠绕层数
上浸胶	60	$10 \pm 1$	1.125	5

#### 4.2.3 固化制度

固化制度是保证复合材料充分固化的重要条件,直接影响到制品的物理力学性能。固化制度包括加热的温度范围、升温速度、恒温温度及时间、降温冷却等。根据 L1000 - VE5194/H 环氧树脂体系的工艺特性,确定固化制度为:

固化,  $60 (2 \text{ h}) + 70 (2 \text{ h})$ , 红外灯旋转加热;后固化,  $70 (2 \text{ h})$ , 烘箱加热。

#### 4.3 加强环成形

按照试验确定的工艺参数,完成了加强环试验件缠绕成形。经过试车检验,在服役期限内,转子加强环能够保证磁悬浮电机转子在额定转速下正常工作,最高转速下也未发生破坏,在强度及保证气隙等方面均满足使用要求,达到了工程设计要求。

#### 5 结论

(1)采用 M46J/L1000 碳纤维增强环氧复合材料缠绕磁悬浮电机转子加强环的方案,解决了转子磁钢在高速旋转状态下连接强度不能满足工作要求

的问题,为磁悬浮转子磁钢的连接提供了一种简便有效的解决方法。

(2)通过选材设计和工艺优化试验得到最佳的缠绕工艺参数,缠绕 NOL 环进行性能测试获得力学性能参数,采用有限元方法对磁悬浮电机转子加强环结构进行分析,复合材料加强环结构完全满足磁悬浮电机转子在  $72\,000 \text{ r/min}$  高速转动时强度和变形要求。

(3)碳纤维增强复合材料应用到高速磁悬浮电机构件,能够有效提高航空航天器的工作性能,并为纤维缠绕工艺提供了一个新的应用领域。

#### 参考文献

- 1 朱秋,邓智泉,严仰光.无轴承电机的原理及研究现状.微电机,2000;33(6):29~31
- 2 谢宝昌,任承德,王庆文.磁悬浮电机及其应用的发展趋势.微电机,1999;32(6):28~30
- 3 Chiba A, Power D T, Rahman M A. Characteristics of a bearingless induction motor. IEEE Trans Magnetics, 1991; 27(6): 5 199~5 201
- 4 Okada Y, Dejima K. Levitation and torque control of internal permanent magnet type bearingless motor. Transactions on Control Systems Technology, 1996; 4(5): 565~571
- 5 Wang F, Xu L. Calculation and measurement of radial and axial force for a bearingless PMDC motor. IEEE IAS, 2000; 28(4): 249~252
- 6 周国富,程昌钧.主动磁悬浮轴承中磁环的变形与受力分析.上海大学学报,2002;8(3):278~282
- 7 孟志华,王继辉,冯武.飞轮转子弹性设计的有限元数值模拟与分析.武汉理工大学学报,2004;26(11):74~76
- 8 Cai Z, Gutowski T. Winding and consolidation analysis for cylindrical composite structures. Journal of Composite Materials, 1992; 26(9): 1 374~1 399
- 9 Sung Kyu Ha, Ding-jin Kim, Tae-Sung. Optimum design of multiring composite flywheel rotor using a modified generalized plane strain assumption. International Journal of Mechanical Sciences, 2001; 43(9): 993~1 007

(编辑 李洪泉)