

高速表贴式永磁电机转子护套过盈装配工艺研究

谭波

(湖南湘电力有限公司 湖南 湘潭 411100)

摘要: 针对一种高速表贴式永磁电机转子, 研究了护套过盈装配工艺, 讨论制造过程中的关键工艺, 包括永磁体装配, 护套缠绕成型, 护套冷压过盈等, 冷压过程, 将转子铁心放置于支撑环上, 支撑环为槽齿结构, 避让开转子铁心, 与永磁体和槽楔面接触, 保证冷压过程永磁体和斜楔不发生相对运动, 为从事永磁电机设计和制造的相关人员参考。

关键词: 永磁电机; 电磁性能; 永磁转子

0 引言

表贴式高速永磁电机转子通过护套与永磁体间的过盈配合给永磁体施加一定的预压力, 借助该预压力来补偿永磁体高速旋转的离心力产生的拉应力, 从而保证永磁转子的安全运行。护套保护措施主要有两种: 一种是采用高强度的非导磁金属护套; 另一种是采用高强度复合材料如碳纤维护套。与采用非导磁金属护套相比, 碳纤维护套具有更高的强度重量比, 不产生高频涡流损耗, 具有很高的机械和电磁性能。因此, 碳纤维护套在永磁体的保护中有着广阔的应用前景。碳纤维护套缠绕提供的压紧力有限, 比较适合离心力小的转子, 对于大体积、高转速的转子而言, 仅靠纤维张力提供压紧力来抵消高速旋转的离心力还比较困难。本文提出了一种采用护套过盈的表贴式高速永磁体电机结构, 并进行工艺研究, 以满足实际的生产制造需求。

1 高速表贴式永磁电机的转子结构

本文所设计的高速表贴式永磁电机转子结构(见图 1), 其内部结构当中转子主要是由棱锥形转子铁心、斜楔、永磁体、碳纤维护套和端板五部分组成。永磁体呈瓦片状粘贴于斜楔上, 碳纤维护套在永磁体外表面缠绕好后, 采取冷压方式将斜楔压入转子铁心, 挤压永磁体向外并迫使碳纤维护套产生过盈量。通过碳纤维护套和永磁体之间的过盈配合给永磁体施加一定的预压力。借助该预压力补偿永磁体在高速旋转过程中产生的拉应力, 从而保证永磁转子的安全运行。

2 关键工艺分析

针对这种护套过盈转子装配, 其关键工艺主要有:

(1) 为了使护套过盈, 需将永磁体从转子铁心外部压装至铁心上, 因此需设计工艺铁心将转子铁心延伸, 永磁体预装在工艺铁心上, 待碳纤维缠绕后再进行压装;

(2) 永磁体在碳纤维绑扎前与转子铁心之间并无固定

的铰接形式, 因此需要设计专用的工装进行固定, 其固定型式需与碳纤维绑扎方案结合;

(3) 永磁体转子的碳纤维缠绕;

(4) 护套冷压过程需保证永磁体不会碎裂;

工艺流程: 永磁体装配→护套缠绕成型→护套冷压过盈。

3 工艺研究

3.1 永磁体装配

3.1.1 工艺铁心的制备

为了满足压装后永磁体过盈需求, 需预先根据过盈量设计长度匹配的工艺铁心, 本文中提到的转子按过盈 2mm 计算, 槽底斜度为 1:100, 故所需工艺铁心长度为 200mm。把准备好的工艺铁心内圆安装至转子铁心上, 设计拉紧螺杆及定位销, 通过轴向通风孔将转子铁心与工艺铁心固定成一个整体。将整体铁心按照磁钢安装槽斜度加工斜面, 保证槽型及斜度一致。

3.1.2 永磁体的装配

使用专用装配工装, 在转子铁心上套装一个圆形底板, 底板可以绕转子铁心 360° 旋转, 在底板上靠近转子铁心附近安装一个支架, 支架上安装一个通过螺纹调节径向位置的机械臂, 机械臂上设计有夹持永磁体的机械夹持装置。装配时, 将永磁体放入夹持装置上, 通过夹持装置上带互成锥度的侧壁将永磁体固定, 沿径向将机械手连同永磁体装至转子上的磁钢槽内。旋转永磁体装配工装底板, 可以实现周向永磁体的装配。

因永磁体在碳纤维绑扎前与转子铁心之间并无固定, 故必须设计固定装置, 以实现转子的装配及碳纤维绑扎。在设计固定装置时需要考虑轴向定位和径向固定两方面内容, 永磁体装配位置需从距离转子铁心 200mm 的工艺铁心端面作为起始安装位置。径向采用开螺孔的固定环将磁钢径向固定, 每个固定环宽度约为永磁体宽度的 1/2, 安装时相邻两固定环之间预留出碳纤维的绑扎空间。此外, 为实现永磁体与斜楔装配后的压装, 两端工艺压板按照斜楔和永磁体截面形状进行设计, 确保压装过程工艺压板能够将斜楔和永磁体固定牢固。参见图 2。

3.2 护套缠绕成型

3.2.1 选用的纤维与树脂

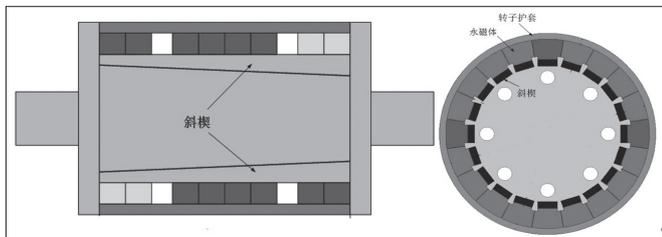


图 1 转子结构示意图

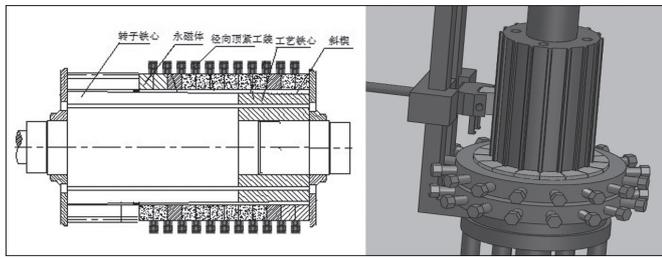


图 2 永磁体装配和固定示意图

3.2.1.1 纤维材料

碳纤维材料的轴向强度和模量较高，密度低、比性能高，无蠕变，非氧化环境下耐超高温，耐疲劳性好，比热及导电性介于非金属和金属之间，热膨胀系数小等特点，碳纤维与传统的玻璃纤维相比，杨氏模量是其 3 倍多；它与凯夫拉纤维相比，杨氏模量是其 2 倍左右，在有机溶剂中的酸碱中不溶不胀，耐蚀性突出。本文所选用的纤维材料选用日本东丽 T700 碳纤维，其基本力学参数如下。

表 1 T700 基本性能参数

牌号	拉伸模量 Gpa	密度 g/cm ³	伸长率 %	热膨胀系数 10-6/°C
T700SC-12000-50C	230	1.80	2.1	-0.38

3.2.1.2 树脂材料

树脂材料的作用是将增强材料粘成整体，并使其固定，在增强体之间传递载荷，并使载荷均匀。在承受载荷时，由于界面相所处的特殊力学和热学环境，复合材料增强体与基体之间存在的界面效应对复合材料性能产生重大影响。本文选用北京化工大学研发的 T700 专用环氧树脂 EW-60D，使得基体和增强体充分发挥各自的优越性能。EW-60D 环氧树脂浇注体基本性能如下。

表 2 EW-60D 基本性能参数

牌号	固化配比 (A: B)	固化 条件	拉伸弹性模 量 (GPa)	热膨胀系数 10-6/°C	玻璃化转变 温度 (°C)
EW-60D	100:36	60°C /13h	2.9	60	120.18

3.2.2 碳纤维缠绕

3.2.2.1 缠绕方案

因转子护套缠绕时永磁体外圆需工装固定，工装安装在两相邻永磁体的中间，间隔一个永磁体宽度安装一个固定工装以便留出缠绕空间。缠绕过程需分两次进行，第一次将碳纤维缠绕在工装之间的永磁体外圆表面，形成环形圈。由于碳纤维固化前的预应力不足以固定永磁体，需要连同工装一起固化。第二次将固化后的工装拆除，缠绕其余部分的碳纤维，直至绑扎厚度达到设计值（见图 3）。

3.2.2.2 树脂材料准备

按配比称取组分树脂 A 和固化剂 B，在 30 ~ 40°C 下混合 15min ~ 20min 至均匀，然后在 45°C 下抽真空脱泡 20min ~ 25min。待纤维烘干整理好后，将混合后的胶液倒入浸胶槽。

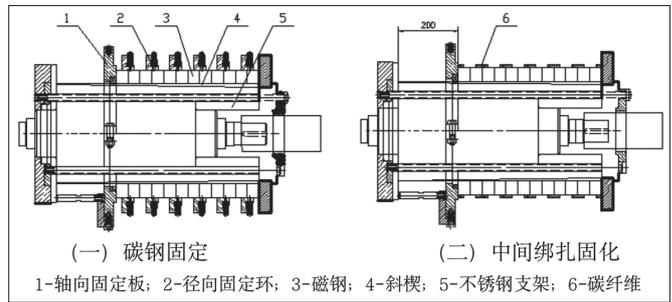


图 3 磁钢固定工装间隙碳纤维缠绕

3.2.2.3 缠绕设备调试

调试缠绕机、张力控制系统及温度湿度控制系统，制定合适的缠绕线型，控制缠绕环境的温度湿度情况。

3.2.2.4 基本缠绕参数设置

由 ANSYS 软件进行有限元分析，在保证过盈量、永磁体旋转承受的拉应力不变的条件下，计算得到 T700 缠绕护套时护套的厚度。已知缠绕碳纤维带宽和单层厚度的情况下，通过计算得到的 T700 的厚度，进而设置缠绕层数。为避免固化过程中局部放热过高造成固化后复合材料材料内部缺陷，考虑采用分层固化的方式进行缠绕。

3.2.2.5 缠绕过程

用丙酮将模具表面清洗干净，调节丝嘴到合适的位置开始缠绕。在缠绕的过程中，设定好缠绕的厚度以及缠绕的层数，保持转子旋转，同时采用加热装置进行预固化。由于在缠绕过程中树脂流动性较大，因此需要在模具表面不停的刮胶，以保证合适的树脂含量，等待缠绕过程结束后，进行固化操作，设定的参数为 60°C /13h，采用旋转固化模式，直至完全凝胶，拆除固定环工装。转子随炉冷却至室温后，在缠绕后的护套表面继续第二次缠绕，设定缠绕厚度及缠绕层数，重复以上过程，待制品完全固化，随炉冷却至室温后，缠绕过程完成。

3.3 护套冷压过盈

冷压过程（见图 4），将转子铁心放置于支撑环上，支撑环为槽齿结构，避让开转子铁心，与永磁体和槽楔面接触，保证冷压过程永磁体和斜楔不发生相对运动。压装时通过压头将油压机的压力作用在转子铁心上，迫使转子铁心向下运动，直至工艺铁心与斜楔完全分离。

护套冷压过盈关键在于如何有效的降低压装时工件的

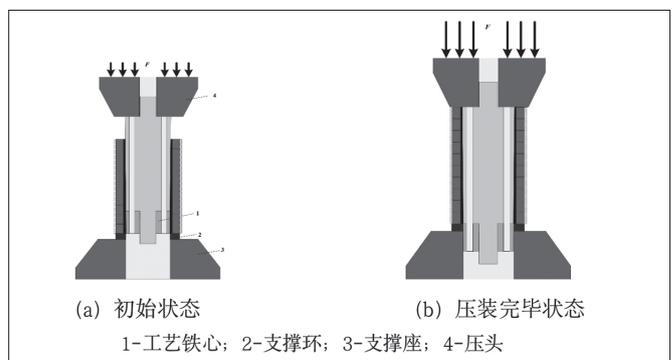


图 4 护套冷压过盈示意图

磨损,为了避免压装过程中出现斜楔磨损或永磁体碎裂的情况,从多个方面进行控制:①铁心与斜楔接触面粗糙度控制在Ra2.0以内;②斜楔表面进行磷化处理;③转子铁心表面喷涂二硫化钼;④压装过程中支撑环、支撑座、压头与铁心始终保证垂直。

4 结语

电机在高速、高效的发展道路上所面临的制造难题越来越多,本文针对高速表贴式永磁电机转子护套过盈装配工艺进行了研究,按照此工艺制造的转子满足了使用需求,为新一代大功率高速永磁电机的研制提供参考。

参考文献:

- [1] 白刚. 现代永磁电机技术的应用分析[J]. 山东工业技术, 2018, (14):27.
- [2] 刘加岭, 刘全新, 杜传明, 阮文阳. 永磁电机的研究现状与发展趋势[J]. 电子技术与软件工程, 2016, (01):249.
- [3] 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):140-145.
- [4] 郑耀武. 电机转子用无纬带绑扎的可靠性分析[J]. 大电机技术, 1989, (3):20-21.
- [5] 孟大伟. 电机制造工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [6] 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).

- [7] Yon J. M., Mellor P. H., Wrobel R., et al. Analysis of Semipermeable Containment Sleeve Technology for High-Speed Permanent Magnet Machines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(3).
- [8] Yon, J.M., Mellor, P.H., Wrobel, R., Booker, J.D. and Burrow, S.G. (2010) A Semi-Permeable Containment Sleeve for High-Speed PM Machines[J]. 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Brighton, 19-21 April 2010, 1-6.
- [9] David Gerada, Abdeslam Mebarki, Neil L. Brown, et al. High-Speed Electrical Machines: Technologies, Trends, and Developments[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6).
- [10] Alberto Tenconi, Silvio Vaschetto, Alessandro Vigliani. Electrical Machines for High-Speed Applications: Design Considerations and Tradeoffs[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6).

作者简介: 谭波(1986.9-), 男, 汉族, 本科, 工程师, 研究方向: 电气工程及其自动化。

(上接第53页)

机械制造与机电一体化技术融合的进行中,必须注重绿色发展理念在其中的渗透,兼顾科技发展和环境保护,将绿色发展理念落实到设备更新升级制造,并明确绿色发展的方向,从生产工艺、科学技术等方向入手,提高两者融合的针对性。

2.5 切实优化在数控生产技术上的运用

纵观我国机械制造行业智能化发展的实际情况,可知相较于其他发达国家我国尚处于发展初期,无论是设备还是工艺,都需要改善和优化,而在此过程中必须注重机电一体化技术在其中的合理运用。机械制造行业在发展进程中,要深刻认识到数控技术对自身发展的影响,在生产制造中有效落实该技术,提高数据信息的处理效率,为促进智能化机械制造行业发展作出积极贡献。另外,可以有效结合数控技术和计算机技术,有效发挥统计、绘制等功能的价值,将这些技术和机电一体化技术等有效结合起来,实现对各个生产阶段的精细化管理。

3 智能化机械制造的未来发展前景

在当前社会经济发展形势下,科学技术发展水平显著提升,机械制造在未来发展进程中,智能化属于发展趋势。智能化与机电一体化技术的有效融合,有利于实现机械制造行业微型化、智慧化的发展趋势,且在实际发展过程中,将会有更多先进技术在其中得到有效运用,让机械制造行业的科技水平得以显著提升。例如,在当前机械制造行业中,卫星机电一体化技术得到有效运用,并在实践运用中展现出节约能源的优势,符合我国绿色环保的发展理念,为智能化

控制等功能的实现发挥积极作用。人工智能属于现代工业的必然发展道路,现在不少工作岗位将逐渐被人工智能取代,人工操作的岗位明显减少,数控技术得到进一步发展,这些都属于机械制造业的发展趋势。

4 结语

本文在探讨机械制造中的智能化和机电一体化技术融合时,秉承理论与实践相结合的理念,通过分析以上问题可知,在信息时代下,两者的有效融合对机械制造业发展具有积极影响,属于机械制造业的主流发展方向,必须予以高度关注,且实现两者的有效融合有利于提高机械制造业生产效率及质量。为此,必须注重现代科技的研发和运用,结合实际情况合理引进现代化设备,围绕如何提高生产力和智能水平进行深入研究。

参考文献:

- [1] 边金田. 智能控制在机电一体化系统中的应用[J]. 电子世界, 2020(18):150-151.
- [2] 阎学文. 试论机电一体化在煤矿开采领域的发展[J]. 当代化工研究, 2020, (11):9-10.
- [3] 曹国英. 机电一体化技术在汽车制动系统中的应用探讨[J]. 内燃机与配件, 2020, (09):256-257.
- [4] 门佳红. 机电一体化应用中的电机控制与保护路径分析[J]. 科技经济导刊, 2020, 28(08):63+56.

作者简介: 蒋晓(1987.03-) 汉族, 女, 河南济源人, 硕士研究生, 助教, 研究方向: 机械工程。