

永磁同步电机定子灌封技术

郭乐之*

江苏交科能源科技发展有限公司, 江苏 南京 210019

摘 要： 在电子封装行业，随着电子技术的发展出现了许多新的灌封技术和灌封形式，这些新技术使用的液体环氧封装料（即环氧树脂灌封料）由于具有极高的技术附加值而备受瞩目，许多发达国家非常重视其研究开发。现阶段新能源汽车对电机提出了更高的要求：高功率密度、高扭矩、内部结构紧凑。结合新能源电机发展现状，需要具有高导热性能的导热绝缘材料作为媒介，将电机定子铁芯、定子绕组以及前后端盖灌封成一个整体，从而提升电机热量传递到冷水系统的效率，最终大幅改善电机的散热状况。

关 键 词： 灌封技术；高功率密度；高扭矩；导热绝缘材料

Permanent Magnet Synchronous Motor Stator Filling Technology

Guo Lezhi*

Jiangsu Jiaoke Energy Technology Development Co., Ltd., Jiangsu, Nanjing 210019

Abstract： in the electronic packaging industry, with the development of electronic technology, there are many new encapsulation technology and encapsulation forms, the liquid epoxy encapsulation materials (epoxy encapsulation materials) used in these new technologies have attracted much attention due to their high technical added value, and many developed countries attach great importance to their research and development. At present, new energy vehicles have higher requirements for motor: high power density, high torque, compact internal structure. According to the development of new energy motor, it needs the thermal conductive insulation material with high thermal conductivity as the medium, which encapsulates the stator core, stator windings and the front and back end covers into a whole, thus, the heat transfer efficiency of the motor to the cooling water system can be improved, and the heat dissipation of the motor can be greatly improved.

Key words： encapsulation technology; high power density; high torque; heat conduction and insulation material

现阶段新能源汽车对电机提出了更高的要求：高功率密度、高扭矩、内部结构紧凑，使得电机电磁负荷增大，功率密度提升，单位体积的损耗增大，直接导致电机各部件的温升比普通电机高更多，可靠性、耐久性等性能随之受到影响。若电机内部的热量不能有效排出，会严重的影响电机温升，成为电机功率提升的瓶颈之一，电机内部元件如绝缘器、永磁体等的寿命受高温影响较大，高温将造成永磁体退磁、结构机械强度下降等现象，不仅危害电机的正常运转，严重时会产生安全问题。

为了解决温升问题，电机通常配有冷却散热系统。冷却方式主要有风冷、水冷以及油冷。其中，油冷结构较为复杂，在现有电机中使用较多为风冷以及水冷方式，一般形式为流体冷却机壳或者通过通道使流体直接冷却定转子。结合新能源电机发展现状，需要具有高导热性能的导热绝缘材料作为媒介，将电机定子铁芯、定子绕组以及前后端盖灌封成一个整体，从而提升电机热量传递到冷水系统的效率，最终大幅改善电机的散热状况。

一、行业现有技术的分析

（一）国内现有技术的分析

在电子封装行业，随着电子技术的发展出现了许多新的灌封技术和灌封形式，这些新技术使用的液体环氧封装料（即环氧树脂灌封料）由于具有极高的技术附加值而备受瞩目，许多发达国家非常重视其研究开发。

20世纪90年代初美国的 Dexter 电子材料公司率先开发出双酚环氧-改性咪唑固化体系的液体封装料，沿着这条线路，经过深入

研究开发，美国的 Epoxy 技术公司、日本住友、大日本油墨等许多公司也推出了自己的产品。日本的住友电木公司采用双酚 F 型环氧树脂和芳香胺做固化剂，研制出了一系列的液体封装材料。但是产品的缺点是粘度偏高。中国科学院化学所也对液体环氧封装料进行了研究，在降低灌封胶料粘度方面取得了很好的效果。

目前电机定子用灌封环氧树脂还处在一个不成熟阶段，单纯的实验室材料研发已经不能满足高速发展的电机对灌封材料耐温性、导热性、抗开裂性能的要求。灌封材料与电机共同研发成为新的趋势^[1]。

* 作者简介：郭乐之（1989-4）女，汉，江苏南京，中级工程师，本科。研究方向：机械工程。

（二）主要研究内容

1. 电机定子灌封胶选型

选用环氧树脂绝缘材料作为电机的灌封材料，不仅要求能协助液冷系统加强电机热管理能力，还要求能够使新能源汽车在面对应用环境较为复杂的：低温、震动、爬坡、低速等工况所带来的高低温冲击时，电机仍可保持其可靠性。同时也能提升相同尺寸下电机的设计功率密度，减小电机运行时的噪声。因此需要开发一款具有高导热、耐高低温，流动性好、高抗裂等性能的导热环氧灌封胶，满足电机在各种极限工况下运行要求。同时提升电机灌封的效率及稳定性，满足逐步扩大的电机产能需求。

2. 电机定子灌封技术及相关工艺研究

根据现有永磁同步电机的结构特点，即高槽满率，同时端部尺寸非常短，必须采用特定的灌封工艺，针对电机设计相应的灌封模具，以保证环氧树脂灌封胶能够对电机定子进行理想的灌封，达到预期目的。

（三）实施方案与技术路线

1. 对环氧树脂灌封胶的具体性能参数进行对比、筛选。包括温度、粘度、导热系数、绝缘性能及其他性能。

（1）电机内部绝缘材料为220（R）级，即电机在极限工况下温度会超过200℃，环氧树脂必须能在200℃下长期工作，不发生形变、老化。

电机运行环境温度为-40℃至60℃，必须高低温冲击下不发生开裂，不与定子或绕组脱落。

（2）因电机槽满率高（超过90%），灌封环氧树脂必须（可以是高温下）粘度小（<4000cps），流淌性好，填满绕组绝缘线间隙，尽量采用真空灌封技术，避免出现气泡。

（3）灌封胶固化后导热系数应在1.1~1.4 W/(m·K)范围内。

（4）定子及绕组浸漆后再进行灌封，会影响定子的热传导，故用环氧树脂灌封胶取代绝缘漆绝缘作用，因此灌封胶绝缘要求击穿电压>15kV/mm，绝缘测试漏电流<10mA@2100V。

（5）考虑电机生产周期，灌封胶固化时间不应过长，应小于4h。

（6）灌封胶在电机不同温度下不得有较大形变，低收缩率 & 热膨胀系数 CTE < 30ppm/K。

2. 针对不同型号的电机电，设计灌封所用模具工装，包括上端盖、模芯、下端盖，确保电机灌封一致性，脱模简易性，且不影响灌封后电机装配。

3. 对灌封后电机进行定子绝缘测试，电机性能测试，电机温度试验，电机抗震实验等。重点进行最高温度测试，高低温冲击试验。

二、电机定子灌封技术

（一）灌封胶选型

根据计划灌封的电机电结构，工作温度以及结构形式等要求，对环氧树脂灌封胶提出以下性能要求并规定相应的指标。

调研市场上各品牌型号的环氧树脂，最终选择亨斯曼CW30334/30335胶水对电机定子进行灌封。

灌封前根据胶水的参数，对电机进行温度场仿真，初步模拟灌封后电机温升情况。

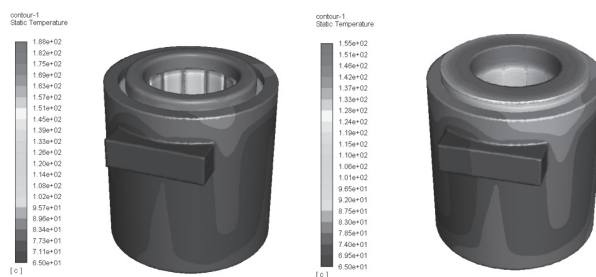


图 2.2-1 灌封前后电机定子温度分布

由仿真结果可以看出，电机定子灌封前，绕组端部最高温度达到188℃，进行环氧树脂灌封后，温升下降，绕组端部最高温度只有155℃。定子真空灌封对电机温升的控制效果明显。

（二）电机定子真空灌封

1. 灌封模具设计

选取现有产品 P50 永磁同步电机进行灌封测试。根据 P50 电机定子，设计真空灌封所需要的模具。

电机定子灌封在真空条件下进行，灌封胶在真空控制箱中通过插入模芯底部的注胶管灌封进入定子底部，模芯底部开有灌封胶引导槽。灌封时电机定子固定在灌封装置中，灌封装置中的密封系统将定子与灌封装置之间通过密封系统形成厚度均匀一致的环氧树脂胶灌封腔体。具体如下所述：

（1）定子构成：一体式灌封电机定子由定子铁心9、线圈绕组5、水冷机壳7、绝缘材料8和环氧树脂胶体4共五部分组成；

（2）定子装配方式：定子铁心9，水冷机壳7通过热套方式过盈连接，线圈绕组5嵌绕在定子铁心9的齿上，绝缘材料8固定在定子铁心槽内，并固定线圈绕组5。

（3）灌封装置与定子连接方式：电机定子与灌封装置通过螺栓11、垫圈10固定。灌封装置由顶模1、底模12、模芯13、密封系统一2、密封系统二6、注胶管3组成。顶模1通过螺栓11、垫圈10、密封系统二6与机壳前端固定并密封，底模12通过固定螺栓11、垫圈10、密封系统二6与水冷机壳后端固定并密封；模芯13的前后端与顶模1、底模12、密封系统一2固定并密封。环氧树脂胶4通过注胶管3灌封到定子内部，注胶管3放置在模芯13的中心孔内，注胶管3下端管口与底模12内表面接触，上端管口与灌封设备出胶口连接。

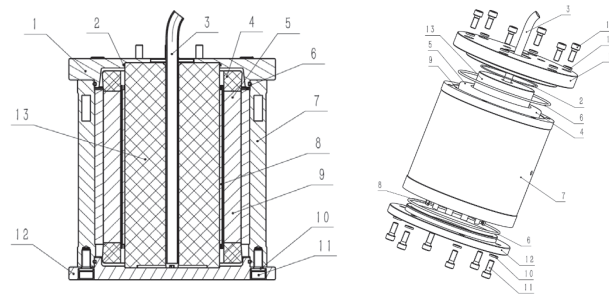


图 2.2-2 P50 电机定子灌封模具组装示意图

2. 定子灌封

定子灌封流程主要可以分为三个环节，即模具安装后的真空预热、环氧树脂胶水灌注、灌封后高温固化。

灌封设备分为两个部分，左侧为真空箱，确保电机定子处在真空状态，右侧为预热及搅拌装置，对 A/B 两种组分胶水进行加热、脱泡，精确导出预定体积的胶水，同时降低胶水粘度，提升胶水的

流动性，使灌封胶能够完全浸渍定子绕组线包的间隙，进而使定子绕组与铁芯以及机壳形成一个整体，提升定子部分的热传导效率。

电机定子与灌封装置通过螺栓 11、垫圈 10 固定；密封系统一 2、密封系统二 6 与顶模 1、底模 12、模芯 13 组成密封腔体，置于真空控制箱中预加 -1mbra 压力；

注胶系统将环氧树脂胶注入注胶管 3 并进入模芯 13 底部；灌封胶通过模芯 13 底部的胶水引导槽进入底模 12 的腔体中，在真空条件下灌封胶由密封腔体底部到顶部，由模芯中心向模芯周围均匀填充至线圈绕组 5 的电磁线间隙和顶模 1 的腔体中。

定子真空灌封完成后，将灌封装置置于烘箱 90℃和 130℃温度下分别烘干 2 小时待定子中的环氧树脂灌封胶充分固化；固化后

拆除灌封装置，定子灌封即完成，定子铁芯、绕组和机壳形成一个完整部件，绕组端部高度合适，同时端面光滑，定子内腔无多余胶水。

(三) 电机测试

电机定子灌封完成后，按照电机和装配工艺流程，将电机定子与电机其他部件组装完成，上测试台架进行测试，重点验证灌封后电机的温升情况以及各项性能指标是否合格。

从测试结果可以看到，80℃进水，额定转速工况条件下，灌封后 P50 电机温升得到了大幅度改善，灌封前定子端部温度 190℃，槽内温度 180℃，灌封后定子端部温度 160℃，槽内温度 150℃。电机整体温升下降 30℃左右。

表 2.3-1 灌封后电机性能参数

电机型号	P50-R-A-20030023				旋变角度	4	
实验日期	2020/10/27		实验人员		/		
转速（rpm）	轴上转矩（N·m）	相电流有效值（A）	母线电流（A）	母线电压（V）	输出功率（kW）	输入功率（kW）	效率（%）
Spd(rpm)	TN(N·m)	Iacrms(A)	Idc(A)	Vdc(V)	PO(kW)	PI(kW)	h(%)
2400	65.943	57.1	34.1	539.5	16.57206283	18.39695	93.83384%
2400	84.621	72.7	43.3	539.5	21.26601047	23.36035	94.82775%
2400	101.44	87.6	52.0	539.5	25.49277487	28.054	94.65664%
2400	117.30	102.5	60.7	539.5	29.47853403	32.74765	93.76797%
2400	134.31	117.4	69.2	539.5	33.75329843	37.3334	94.17756%
2400	150.13	132.3	77.7	539.5	37.72900524	41.91915	93.75440%
2400	161	143	83.6	539.5	40.46073298	45.1022	93.44687%

从表中测试数据可知，灌封后电机的各项性能指标均合格。

三、工程应用与推广

P50 永磁同步驱动电机是我司目前已定型批量化生产的一款产品，由于电机功率密度高，在某些特定工况下，电机温升超过 200℃，电机内的绝缘漆、永磁体等的寿命受高温影响较大，因此在定子灌封技术取得突破后，我们对该产品进行了批量的灌封处理。

为了满足现阶段的电机产能，制作了一批灌封所用的模具。现阶段已经能够基本满足 P50 电机的批量化灌封需求，解决了批量化产品的温升问题。

四、总结与展望

(一) 总结

随着电机技术的进步，对电机性能的要求越来越高，电机的整体发展趋势是更高的功率密度，更小的体积重量，这就对电机的制造工艺带来很大的挑战与困难。而新能源汽车整车对驱动电机的要求更加严格，为了满足这样的需求，解决电机的温升等一系列问题，灌封技术的进一步优化和持续改进是未来研究的重点方向。

本项目在永磁同步电机的定子灌封方面进行了初步探索，在对电机定子进行环氧树脂真空灌封的基础上，对电机的温升进行了有效的控制。项目成果有望推广的其他各类型号的电机产品中去，为改善电机温升，进一步提升电机的能量密度和性能指标提出了一个有效的思路与实际方法。

(二) 展望

结合本项目的成果，对于电机的定子灌封技术，还有以下几点值得进一步的探索与发掘。

(1) 灌封胶的性能提升。目前采用的灌封胶是环氧树脂材料，该材料导热系数 1.2W/m.K 左右，如果能够进一步的提升材料的导热系数，或者能够找到其他性能更加优异的灌封材料，那么灌封技术对电机的温升控制将会有很大幅度的提升。

(2) 灌封工艺的优化。目前使用的灌封设备还比较简陋，真空度的保持以及对胶水的处理还不够理想。将来对设备进行升级，能够有效的提升定子真空灌封的效果，从而优化电机的性能。同样的，现行灌封工艺以及模具也还存在一定的不足，需要进一步优化。

参考文献：

[1] 一体式灌封驱动电机定子、灌封成型装置及其灌封方法。专利号 ZL202210738042.X；授权号：CN114825691B。

[2] 导热灌封胶在电机上的应用；王有川、赵安然、李强军、吴江权、冯江华；中车株洲电力机车研究所有限公司；工程技术Ⅱ辑。

[3] 汽车电机定子灌封工艺质量控制与检验；张明辉；精进百思特电动（上海）有限公司；工程技术Ⅱ辑。

[4] 飞轮储能电机定子灌封的设计与应用；竺东杰；武汉扬华电气股份有限公司；工程技术Ⅱ辑。

[5] 永磁电机转子灌封工艺研究；张雄、马耀明；包头长安永磁电机有限公司；工程技术Ⅱ辑；农业科技。

[6] 填料对电机用轻量化导热灌封胶性能的影响；庞文健、李福中、付子恩、徐健明；广州市白云化工实业有限公司；工程技术Ⅰ辑、工程技术Ⅱ辑。

[7] 风电电机槽口用环氧灌封胶的热性能研究；程雪松；太原工业学院；工程技术Ⅰ辑、工程技术Ⅱ辑。

[8] 永磁电机转子灌封工艺；孟凡胜、丛鹏泉、何大亮、毕远见、王铁柱、孙羽、郭海涛；中国第一汽车集团有限公司、富奥汽车零部件股份有限公司传动轴分公司；工程技术Ⅱ辑。

[9] 基于灌封材料的永磁同步电动机热管理策略研究；李想、郭志平；内蒙古工业大学机械工程学院；工程技术Ⅱ辑。

[10] 高导热耐高温环氧灌封树脂在低压电机上的应用研究；史开华刘冠芳牛玉龙马红亮雷平振；中车永济电机有限公司；工程技术Ⅰ辑、工程技术Ⅱ辑。

[11] 新能源汽车灌封电机温度特性研究；董江东、许时杰、于冰、唐小春；中车株洲电机有限公司湖南省新能源电机工程技术研究中心；工程技术Ⅱ辑。

[12] 基于新能源汽车电机的灌封胶研究；宋真玉；陕西工业职业技术学院汽车工程学院；工程技术Ⅰ辑；工程技术Ⅱ辑。

[13] 高导热低黏度新能源汽车用灌封胶的制备及性能研究；杨李懿、郭国明、李利坤、黄静；浙江荣泰科技企业有限公司；工程技术Ⅱ辑。