

电加热紫外光固化浸漆工艺在新能源汽车电机制造中的应用

刘杰军¹, 陈求索², 魏雄强³, 王浙栋¹, 代广超¹

(1. 卧龙电气驱动集团股份有限公司, 浙江 绍兴 312300;

2. 湖南湘电动力有限公司, 湖南 湘潭 411101; 3. 华域汽车电动系统有限公司, 上海 201323)

摘要: 随着电机制造技术的进步, 电机绝缘技术也在快速发展。根据在电动汽车/混合动力汽车 (EV/HEV) 驱动电机制造领域的工程实践, 从绝缘浸渍漆、工艺、设备 3 方面出发, 介绍了一种适用于散嵌绕组电机的新型绝缘处理技术: 电加热紫外光固化工艺 (E-UV)。通过实际应用, 证实了该技术具有能耗低、生产周期短、绝缘浸渍漆利用率高等特点, 适用于 EV/HEV 驱动电机的批量生产。

关键词: 新能源汽车电机; 电加热紫外光固化; 浸漆工艺; 绝缘浸渍漆

中图分类号: TM 305 文献标志码: B 文章编号: 1673-6540(2021)02-0101-05

doi: 10.12177/emca.2020.188

Application of Electrical Heating Ultraviolet Curing Impregnation Process to New Energy Vehicle Motor Manufacturing

LIU Jiejun¹, CHEN Qiusuo², WEI Xiongqiang³, WANG Zhedong¹, DAI Guangchao¹

(1. Wolong Electric Drive Group Co., Ltd., Shaoxing 312300, China;

2. Xiangtan Electric Power Co., Ltd., Xiangtan 411101, China;

3. HASCO Automotive Electric Drive System Co., Ltd., Shanghai 201323, China)

Abstract: Insulation technology of motor has been developing rapidly along with the improvement of motor manufacturing technology. Based on our engineering experience in the field of electric vehicle/hybrid electric vehicle (EV/HEV) motor manufacturing, a new type of insulation technology, electrical heating ultraviolet curing (E-UV) impregnation process, is introduced from three aspects: insulation material, equipment, and process. This technology is applicable for random windings motor manufacturing. It is demonstrated through practical application that this technology has several advantages such as low energy consumption, short cycle time and high utilization rate of insulation impregnating varnish, etc. It is very suitable for mass production of EV/HEV motors.

Key words: new energy vehicle motor; electrical heating ultraviolet curing; impregnation process; insulation impregnating varnish

0 引言

电加热是一种常用的加热方式, 热量产生于被加热物体本身, 属于内部加热, 热效率很高^[1]。电加热工艺在电机上的应用始于 20 世纪 70 年代末期, 主要应用于大型线棒多胶云母带模压成型、

电机结构件的化压模塑料 (SMC、DMC、4330 等) 压制成型加热以及修理电机的烘潮等, 在浸漆工艺上的应用则比较晚。

2005 年以来, 随着技术的进步, 出现了一种新型的电机绝缘处理工艺——电加热紫外光固化 (E-UV) 沉浸工艺。该技术采用了电加热与紫外

收稿日期: 2020-11-04; 收到修改稿日期: 2020-12-04

作者简介: 刘杰军 (1983—), 男, 高级工程师, 研究方向为汽车驱动电机绝缘、高导热灌封胶、电加热浸漆技术等。

光(UV)固化相结合的技术,将辐射固化技术成功引入电机绝缘处理中,可大幅降低能耗、缩短生产周期、提高绝缘漆利用率^[2]。

维斯塔斯散嵌绕组风电定子采用了电加热工艺(没有UV固化工序)。该定子采用单台定子浸漆方式,无节拍时间要求,电加热固化后即完成电机浸漆,无需再进行后固化,从而提高了能源利用率。中国国内也曾有其他电机生产厂家尝试过电加热工艺,如文献[3]对外径为5.8 m、铁心长0.9 m的风电散嵌绕组定子用普通绝缘漆进行常压浸漆+电加热旋转烘干的方法,通过可控直流电对定子绕组加热,使定子 in 烘焙过程中升温 and 降温时间大为缩短,从而提高生产效率,降低成本。现阶段,E-UV 沉浸工艺技术在外国应用实例较多,但由于进口设备昂贵,前期投入较大,一定程度上限制了该技术的普及应用,国内只有一部分电动汽车/混合动力汽车(EV/HEV)电机生产厂家使用该技术。在工业电机领域,该工艺已经应用于曳引机电机、水泵电机等,其应用范围在逐年扩大。

驱动电机是 EV/HEV 核心部件之一,具有高瞬时功率、高功率密度、强耐过载能力及长寿命等特性,选择合适的绝缘处理工艺尤为重要。E-UV 沉浸工艺路线具备挂漆量多、可改善局部放电起始电压(PDIV)、散热性优良等优点。通过对绕组挂漆量的大幅提升,达真空浸漆(VI)的3~4倍,可提高定子整体机械强度和电气强度^[4-5],具有设备能耗低,绝缘漆浪费少,可连续、自动化生产的优点,非常适合 EV/HEV 驱动电机的制造要求。本文针对 E-UV 沉浸工艺在 EV/HEV 电机制造中的应用进行介绍,以期推广其应用。

1 E-UV 工艺路线

对于中心高小于 315 mm 的小型电机,制造商一般引入流水线生产进行大批量生产。为满足流水线生产对节拍时间的要求,在浸漆处理时,一般采用连续沉浸、滚浸以及滴浸技术,这些技术路线已经相当成熟。

EV/HEV 汽车需要长时间地在复杂环境(高低温冲击、振动频繁等)下使用,对浸渍树脂工艺的要求更高。EV/HEV 驱动电机体积小,散热要求高,而且控制器中的逆变器高频脉冲容易引发

绝缘故障,常规浸渍工艺已不能满足其技术要求。而 E-UV 沉浸工艺生产时间短,效率高,能够适应流水线作业,并可以精确控制用漆量和浸漆质量。

E-UV 沉浸工艺的步骤为:电机定子嵌线后接专用电源,通电预热,浸漆,滴漆,电加热预固化,UV 固化,最后送入固化炉进行后固化。该工艺的特点是直接给线圈通电加热,线圈周围的树脂黏度迅速降低,能充分渗入绕组线束间,填充饱满,绕组间的树脂快速达到凝胶状态,从而减少树脂流失,提高线圈的挂漆量。采用 E-UV 沉浸工艺的定子挂漆效果如图 1 所示。

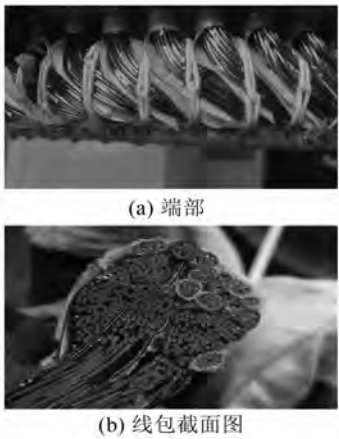


图1 电加热沉浸后线圈端部及线包截面图

从图 1 可以看出,E-UV 沉浸工艺处理的线定子,端部线圈的树脂填充饱满,挂漆充分。该工艺路线与其他浸漆工艺的对比如表 1 所示。

表1 各浸漆工艺方法对比

工艺方法	浸漆对象	浸渍质量	树脂利用率/%
普通沉浸	定子、转子	一般	50
真空沉浸	定子、转子	较好	50
滴浸	转子、定子	很好	90
E-UV 沉浸	定子、转子	优异	95
电加热滴浸	定子、转子	优异	92

2 绝缘材料的选择

绝缘浸渍漆是电机制造中的重要材料之一,也是发展变化较快且对电机制造质量水平影响较大的液体绝缘材料。随着经济和社会的发展,安全、节能、环保型绝缘浸渍树脂成为行业新的关注点,也是绝缘浸渍漆的主要发展方向^[6]。针对不同要求的电机,有不同种类的绝缘浸渍漆,浸漆工

艺也各不相同。适用于 E-UV 沉浸工艺的绝缘浸渍漆需要满足如下要求: (1) 低挥发, 不含苯乙烯、乙烯基甲苯等易挥发成分; (2) 饱和蒸汽压低, 闪点高, 利于安全生产; (3) 适用于 E-UV 沉浸工艺, 低温下黏度高, 随温度的升高黏度下降快, 60~80 ℃时黏度降低到能充分填充绕组线束间的程度, 升温至胶凝温度后固化快, 挂漆饱满, 可节约电能, 提高生产效率; (4) UV 固化快, UV 照射后电机绕组外表面和铁心外表面的树脂可快速

固化, 迅速封住槽内树脂, 减少树脂流失, 保证挂漆量; (5) 浸渍漆在浸漆槽内的热稳定性好, 便于长期存储使用; (6) 浸渍漆应具备二次固化能力。

绝缘材料厂家一般选用不饱和聚酯亚胺树脂作为该工艺专用绝缘漆, 该树脂在加热浸渍温度下具有良好的稳定性, 能低温快速固化, 固化挥发分极低, 闪点高, 无火灾及爆炸危险, 能够满足通电加热浸渍工艺要求^[7]。不饱和聚酯亚胺的技术参数如表 2 所示。

表 2 不饱和聚酯亚胺技术参数

主要性能	参数值	测试标准
外观	淡黄色澄清液体	目测
黏度(23 ℃)/(mPa·s)	1 800~2 400	Brookfield
凝胶时间(100 ℃)/min	8~15	Gelnorm
固化中挥发分含量/%	≤2	GB/T 15022.2—2007
耐热指数/℃	≥180	UL 1446
相对介电常数(23 ℃, 50 Hz~1 MHz)	3~5	IEC 60455-2
介质损耗因数(23 ℃, 50 Hz~1 MHz)	≤0.02	IEC 60455-2
黏结强度(扭绞线圈, 23 ℃)/N	≥220	IEC 61033
黏结强度(扭绞线圈, 155 ℃)/N	≥50	IEC 61033
黏结强度(扭绞线圈, 180 ℃)/N	≥30	IEC 61033

3 生产设备的选择和应用

3.1 E-UV 沉浸设备控温原理

E-UV 沉浸浸漆设备的关键是精准控制线圈的温度, 使其满足工艺参数要求, 基本加热原理为电阻加热法, 即 $P=I^2R$ 。现有的国外设备采用测量铜线电阻推算线圈平均温度的方法来控制整个生产过程, 基本推算过程如下。

已知线圈的电阻值随温度的变化而变化, 而温度的变化对电阻值的影响是通过电阻温度系数衡量的。电阻温度系数的定义为

$$\alpha_R = \frac{dR}{RdT} \quad (1)$$

式中: α_R 为电阻温度系数; R 为电阻; T 为温度。

金属电阻的电阻值一般随温度的上升而增大, 可表示为

$$R_T = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3 + L) \quad (2)$$

式中: R_T 和 R_0 分别为 T 和 0 ℃时的电阻值; α 、 β 、 γ 为电阻的温度系数; L 为常数。

对于纯金属, 在温度变化范围不大时, 电阻值

和温度的关系可近似为线性, 即:

$$R_T = R_0(1 + \alpha T) \quad (3)$$

设 $k=1/\alpha$, 则有 $R_T/R_0=1+T/k$, 整理即得:

$$T = (R_T/R_0 - 1)k \quad (4)$$

对于铜材来说, 0 ℃时的温度系数倒数 $k=234.5$, 线圈温度值可用下式表示:

$$T = R_T/R_0 \times 234.5 - 234.5 \quad (5)$$

从式(5)可以得出, 在电加热过程中, 线圈的温度反馈可通过实时的电压电流反馈测量值进行推算^[8]。

3.2 首台 E-UV 沉浸设备的应用

E-UV 专用设备自动化程度较高, 制造技术掌握在国外少数几家企业手中, 设备价格昂贵^[9]。为此, 卧龙 EV 电机事业本部积极寻找本土化的解决方案, 力图使 E-UV 固化浸漆设备国产化。

卧龙公司首台电机定子 E-UV 沉浸设备的核心技术是采用单点测温反馈法, 达到控制定子预热、沉浸、凝胶、UV 固化各工艺阶段温度的目的, 确保定子的整个浸渍过程可控。在此过程中根据绝缘浸渍漆工艺特性和定子相间阻值, 采用

程序设置加热温度曲线,并通过功率整流控制模块对“低压大电流”交流电源的输出电流进行整流控制。其中,绕组预埋测温传感器实时反馈,所采集的数据经优化后,在可编程逻辑控制器(PLC)里生成的加工程序即为定子浸渍工艺温度曲线。该设备可根据定子规格的不同而采取不同的加工工艺程序。为满足 3 min/台的生产节拍要求,采用一次最多可同时浸渍 10 台定子的设计,设备从 8 工位增加到 10 工位,初步满足了整个电机产线的绝缘处理要求。

该浸漆设备在初步满足量产要求的同时,运行中也遇到了较多问题。其不足主要体现在以下 5 个方面。

(1) 由于采用单点热电偶反馈方式控温,电流数据采集时随机性较强,比较难于控制,无法精准控制挂漆量。测温点稍有位置偏差,加热程序即有较大不同。

(2) 挂漆量对绝缘漆的温度比较敏感。随着生产持续进行,浸漆缸内树脂温度上升,挂漆量随之增加。

(3) 为满足 3 min/台的生产节拍,采用 10 工位设计,导致浸漆槽缸体较大,由于绝缘漆数量多、黏度高,及时冷却相对困难。

(4) 浸漆时采用挂钩式托盘,托盘表面容易挂漆,且随着生产的进行,托盘表面树脂不断积累,导致绝缘漆浪费较大,托盘清理困难且频次高。托盘定位销粘漆变厚之后内圆尺寸变小,机器人抓取时易导致铁心翘片。

(5) 设备采用的是针对三相交流变压器的初级电压进行的自整定控制,各工位电流值有较大差异,导致每批定子挂漆量不一致。

3.3 第 2 台浸漆设备方案

为解决以上问题,第 2 台设备选择了测量线圈电阻推算线圈平均温度的方法来控制温度,从源头杜绝了漆温对挂漆量的影响。

第 2 条产线浸漆设备特点如下:(1)采用夹爪抓取工件,取消托盘,减少树脂浪费;(2)整条产线采用转盘式,主机配备可靠的换向装置保证定子在全周期工作中保持线圈不断电,全周期温度可控;(3)浸漆缸采用分体式设计,以提高绝缘浸渍漆冷却效率;(4)设备测控采用工业控制计算机+PLC 控制,在不同工艺阶段采用针对性的

控制策略,即在浸漆阶段智能实时改变电源参数,在凝胶、固化阶段采用高精度控制技术,精确实时控温;(5)通过工序优化,节拍时间可缩短为 1.92 min/台。

该套设备目前在装配调试阶段,即将投入产线使用。设备示意图如图 2 所示。

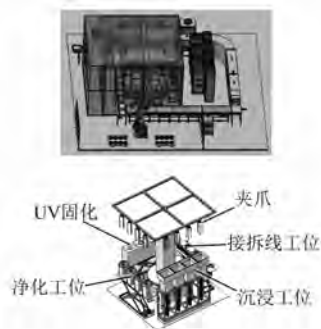


图 2 转盘式 16 工位 E-UV 浸漆机

3.4 工艺应用实例

E-UV 浸渍工艺已有大量的试验及推广经验,例如:外径约 200 mm 的线定子(铜线电阻几十毫欧)使用该工艺,测得挂漆量为使用 VI 工艺的定子挂漆量的 4~5 倍;外径约 300 mm 的线定子使用电加热工艺进行试验,测得挂漆量为使用 VI 工艺的定子挂漆量的 3~4 倍,定子平均温升降低了 10 K 左右;铜线电阻约 1 Ω 的工业电机,采用直流电加热方式,挂漆量增加 3~4 倍;浸漆前 PDIV 约为 800 V 的定子,浸漆后 PDIV 值、局部放电熄灭电压(PDEV)等参数如表 3 所示。

表 3 采用 E-UV 工艺后电机 PDIV、PDEV 等参数值

样品编号	PDIV/V	PDEV/V	局部放电量/pC
1	1 080	910	20~70
2	1 060	880	29.65
3	980	790	10.36
4	1 060	780	24.05
5	1 050	790	22.04
6	1 110	900	103.87

对不同型号的定子进行工艺参数调整,并对槽内进行剖切检查,发现铜线之间的间隙填充饱满,填充率均接近 100%。实际效果如图 3 和图 4 所示。



图3 某型号定子浸漆后剖切图



图4 某型号定子 E-UV 沉浸后端部线包放大图

4 结 语

本文介绍了 E-UV 沉浸工艺在 EV/HEV 电机制造上的应用。随着技术的发展,电加热工艺是否能应用于中大型电机成型绕组真空压力浸漆(VPI)后固化,以提高能源利用率,还需要工艺及设备人员不断地试验探索。目前设想的工艺路线是整浸 VPI 之后,接线通电加热并旋转烘焙,同时 UV 固化,迅速封住绝缘漆,尽量减少绝缘漆流失,然后关闭 UV 灯,停止旋转,继续通电加热固化树脂,直至绝缘电阻稳定为止。单根线棒 VPI 通电加热相对容易实施(类似于模压结构)。此工艺路线关键在于通电电流对升温速率的控制,

以防止树脂反应过快或过慢导致不可预期的后果,同时要考虑通电加热时电机各部位线圈的温差影响(通电加热计算的是线圈平均温度),并对设备做相应的改造:基于绝缘漆稳定性及成本考虑,可以仅采用电加热取代烘箱加热的方式基于已有设备做相应改造。此外,绝缘漆生产厂家也需要配合工艺及设备厂家进行配方优化,以适应成型绕组 VPI 绝缘处理工艺的要求。

【参 考 文 献】

- [1] 郭廷杰. 推广低温辐射加热节电新技术[J]. 能源研究与利用, 1992(1): 46.
- [2] 杨杰. 可调距式电加热紫外固化设备研究[J]. 机械工程与自动化, 2010(2): 103.
- [3] 缪建良. 大直径电机定子散嵌绕组浸漆烘干工艺研究[J]. 防爆电机, 2012(4): 34.
- [4] 于金霞, 佟德成, 吴银龙. 低压电机绕组挂漆量工艺研究[J]. 防爆电机, 2010(4): 39.
- [5] 尹默, 张文波. 光敏固化剂/紫外线辅助照射提高绕组挂漆量方法探讨[J]. 绝缘材料, 2013(2): 75.
- [6] 张桦. 绝缘浸渍树脂现状和发展方向[J]. 电机技术, 2006(1): 3.
- [7] 郭胜智, 袁世臻, 夏宇, 等. 电机散嵌绕组专用改性聚酯亚胺浸渍树脂的研究[J]. 绝缘材料, 2012(6): 9.
- [8] 翁斌, 李洁, 顾伟光. 基于 FPGA 实现的一种电加热浸漆控制方法[J]. 装备机械, 2013(2): 25.
- [9] 马林泉, 周成, 黄苏融, 等. 电动汽车驱动电机用绝缘材料现状与发展趋势[J]. 电器工业, 2020(4): 52.

〔期刊简介〕

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月 10 日出版,国内外公开发刊,邮发

代号 4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,在全国科技期刊界拥有广泛的知名度,是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。