

中型风力发电机成型线圈新型热压工艺研究

熊 剑, 冉继强

(成都中车电机有限公司, 四川 成都 610010)

摘 要: 描述了中型电机成型线圈热压工艺的必要性及优势, 阐述了线圈热压工艺流程演变过程和不同类型线圈热压工艺的最优选取方式。通过一种新型热压成型工艺提升产品的工艺性和可靠性。推算热压机压力大小, 并通过有限元分析获取在稳态热和静应力共同作用下直线边形变分布情况, 了解热压机部分参数对线圈受力面尺寸的影响, 为热压工艺参数的选取提供参考依据。

关键词: 中型电机; 线圈; 热压工艺; 热固化胶; 线圈受力面

中图分类号: TM 305 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)02-0082-05

Research on the Hot-Pressing Technology for Formed Coil of Medium-Sized Wind Turbines

XIONG Jian, RAN Jiqiang

(Chengdu CRRC Electric Co., Ltd., Chengdu 610010, China)

Abstract: Necessity and advantages of the hot-pressing technology for formed coil of the medium-sized motors was described. The course of hot-pressing technology and the optimal selection of different types of hot-pressing technology were expounded. The outdated hot-pressing process was changed radically by a new technology of hot-pressing, which could raise product manufacturability and responsibility. According to the data of hot-pressing force and finite element analysis of deformation distribution of linear edges under the combined action of steady thermal and static stress, the influence of some parameters of hot press on the surface of the coils could be obtained. It provided a reference for the selection of hot-pressing process parameters.

Key words: medium-sized motor; coil; hot-pressing technology; thermosetting adhesive; force surface of coil

0 引 言

随着经济的快速发展, 全球能源及环保问题日益凸显。清洁高效的风力发电技术发展迅猛, 尤其是中型风力发电机。中型风力发电机成型线圈热压工艺在电机制造中是最重要的一道工序。热压工艺的重点在于通过胶的固化, 使多匝线圈形成一个整体, 提高直线度, 避免匝间错位, 有效控制线圈截面尺寸, 降低嵌线难度^[1]。

线圈热压过程中的固化胶来自原材料本身自带胶体或制作过程中外加固化胶。成型线圈热压过程中胶体来源方式的选择, 决定了成型线圈热

压工艺的发展方向。若设计时选用含胶量较高的多胶云母带, 在绝缘厚度相同的情况下, 绝缘强度必然比选用少胶云母带低, 不利于减薄绝缘厚度。云母带的胶粘剂含量低, 绝缘经过真空压力浸漆(VPI)处理后, 浸渍树脂能充分渗透, 气隙少, 绝缘层的导热性得到提高。传统热压工艺若选用少胶云母带, 在热压时必须涂刷浸渍漆作为固化介质, 不仅工艺过程繁琐, 作业环境也会受到污染。因此既能选用少胶云母带作为主体绝缘, 又在热压时无须涂刷固化介质的热压方式, 是突破传统热压工艺难点的关键所在。本文所介绍的新型热压工艺将针对传统热压工艺的难点进行改善。

作者简介: 熊 剑(1988—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电机制造及控制。

1 线圈热压工艺概述

中型电机线圈一般由单根或双根电磁线(铜材外表面熔覆一层聚酰亚胺薄膜,再绕包一层聚四氟乙烯薄膜少胶云母带)绕制而成,再经过包保护带、引线头去绝缘、涨型等工序使线圈成型为设计图样要求。将线圈放置在线圈热压机进行热成型^[2]。通过线圈热压机对线圈直线段部位加压加温,使线圈预置的热固化绝缘胶软化并均匀覆盖线圈各匝间层,通过一段时间的保温保压,热固化绝缘胶冷却固化后,线圈直线段各匝间层将粘接固化成一个整体,直线度高,在后期转运及嵌线使用过程中不会出现匝间错位现象,线圈截面尺寸较非热压线圈优势明显^[3]。热压成型工艺过程中温度和压力的变化如图1所示。图2所示为热压成型的成品线圈,其直线度高且一体性好,后期转运及下线过程不易变形。

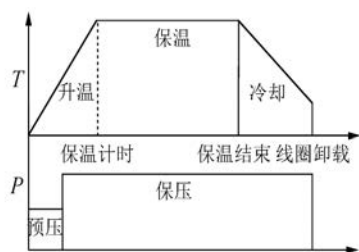


图1 热压成型工艺过程温度和压力示意图



图2 热压成型的成品线圈

线圈热压参数的选取主要遵循以下3点:

- (1) 线圈承受的压力大小取决于线圈的直线段受力面尺寸大小;
- (2) 热压温度对B级绝缘而言以160~170℃为宜,对F级以上绝缘以180~190℃为宜^[4];
- (3) 保温时间一般控制在30 min以上,视线截面尺寸和绝缘厚度而定。

2 线圈热压工艺演变过程

2.1 传统线圈热压工艺一

传统线圈热压工艺一流程如图3所示。在热压成型前,对线圈直线段进行主体绝缘层包扎。为了达到排胶固化的效果,该绝缘层一般为多胶云母带,然后再进行热压成型,最后外包玻璃丝带或聚酯热收缩带保护层。



图3 传统线圈热压工艺一流程

该工艺的优点:(1)无需进行多次白布带的拆除与包扎;(2)无需涂刷热固化胶。

该工艺的缺点:(1)主体绝缘层为多胶云母带,相同绝缘强度时其绝缘层厚度较胶云母带更大,限制了风力发电机设计容量和耐压等级的提升。

2.2 传统线圈热压工艺二

线圈传统热压工艺二流程如图4所示。为使热固化胶更好地渗透进线圈各匝间,需对涨型后的线圈拆除保护带(一般为斜纹白布带)涂刷热固化胶(常用浸渍漆),并再次对线圈包保护带(避免热压过程损伤线圈)后,再进行线圈热压成型。



图4 传统线圈热压工艺二流程

该工艺的优点:主体绝缘层可选用少胶云母带,有利于风力发电机设计容量的提升。

该工艺的缺点:(1)传统线圈热压工艺需在涨型后拆除保护带,待涂刷热固化胶后再次进行保护带包扎,线圈制作期间需经过两次保护带的拆、包过程,工艺性差,浪费大量的人力物力;(2)涂刷的热固化胶一般为黏稠的液态胶,热固化胶在涂刷过程中和涂刷后包保护带时会随重力流淌,易对工作区台位、地面以及进行保护带包扎的作业人员的手部造成污染,不便于操作。

2.3 新型线圈热压工艺

随着绝缘材料技术的发展,发现了新型的环氧类半固态化的热固化胶。这种热固化胶具有良好的工艺性,即半固态化的热固化胶(冷态)-液态

(加热)-固态(冷却)。将该技术运用到需热压成型的线圈的电磁线制作上,将液态固化胶均匀涂刷在电磁线本体聚四氟乙烯薄膜少胶云母带的薄膜层外,通过 150 ℃ 保温保压,胶体将以半固态形式在电磁线的少胶云母带薄膜层均匀覆盖。选用上述经半固态化胶体处理过的电磁线,在线圈热压时,无需涂刷固化胶。由于半固化胶在线圈电磁线表层覆盖均匀,热压胶化时,线圈各匝间无胶体空隙,粘接牢靠。

新型线圈热压工艺流程如图 5 所示。使用电磁线本体绝缘层附着有半固化胶的电磁线,经过梭绕、引线头去绝缘、包保护带、涨型,即可直接进行热压成型,再包对地绝缘。

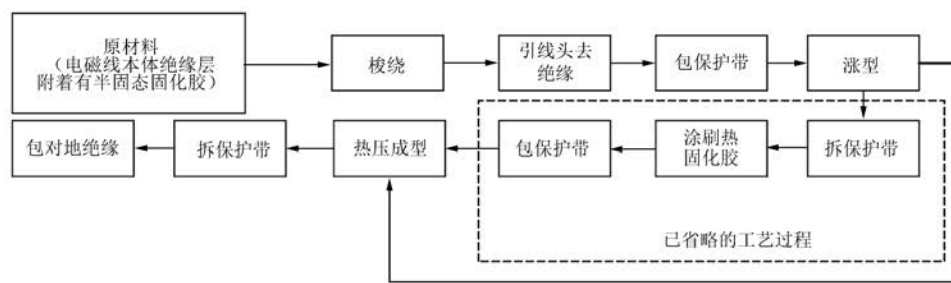


图 5 新形线圈热压工艺流程

该工艺有如下优点:(1)主体绝缘层可选用少胶云母带,降低主体绝缘厚度,有利于电机设计容量和耐压等级提升;(2)半固化胶在电磁线本体绝缘层附着,固化时各匝之间胶体均匀粘接均匀牢固;(3)由于在电磁线本体绝缘层预附着有热固化胶,无需在涨型后对线圈进行热固化胶涂刷,提高了作业现场的洁净度,避免涂刷热固化胶带来的污染;(4)无需在涨型后再次进行拆保护带、涂刷热固化胶、包保护带等操作,简化了工艺流程,缩短了工艺周期,降低了劳动强度。

图 6 所示为新型线圈热压工艺现场图示。热



图 6 线圈热压作业现场

压装备台面干净,无涂刷固化胶带来的污染。图 7 所示为热压成型后,待拆白布带进行对地绝缘包扎的半成品线圈,白布带洁净无污染,作业环境得到有效改善。



图 7 热压后的半成品线圈

2.4 并绕线圈新型热压工艺

当线圈电磁线宽厚比(电磁线截面长边与短边的比值)较大时,线圈直线段与斜线段过渡的 4 个拐角在成型时,圆弧内侧增厚鼓包现象将不可避免,线圈成型难度大。常将线圈改为双根并绕形式,以解决这一工艺难题。但线圈窄边接触面

积小,除去电磁线的圆角接触面进一步减小,仅靠电磁线本体绝缘层附着的半固化胶很难使线圈并绕层间粘接在一起,需在并绕层间增加胶量,保证其粘接固化效果。通过半固化胶片的使用能解决该工艺难题。

并绕线圈新型热压整体工艺流程与第 2.3 节

中的非并绕线圈热压工艺基本一致,如图 8 所示。唯一的区别在于,为增加并绕层间的胶量,在线圈梭绕成型时,须往线圈直线段并绕层间放入一片热固化胶片,胶片被两列并绕层完全夹持住,如图 9 所示。在热压后胶片软化,将在并绕层间进行充分的填充,保证线圈的一体性。

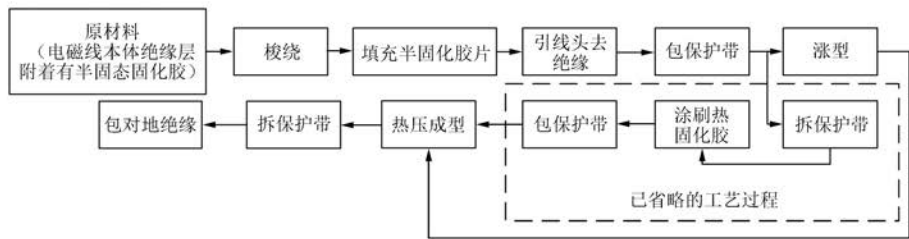


图 8 并绕线圈新型热压工艺流程

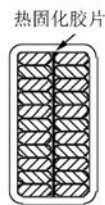


图 9 半固化胶片装配位置示意图

该工艺的优点:(1)并绕层填充饱满,粘接牢固;(2)具有非并绕线圈热压工艺的所有优势。

2.5 线圈热压工艺对比分析

以某公司现有 3WF651 型 2.5 MW 线圈制作过程为例,以单支线圈制作工艺用时作对比。表 1 所示为工艺过程及用时对照。表 2 所示为 4 种工艺方法的工艺性优劣对比。

通过上述几种类型的线圈热压工艺对比可以看出,新型成型线圈热压工艺优势明显:(1)在线圈制作工艺用时上,较传统热压工艺用时减少了 20% 左右;(2)在电机设计选型时可使用少胶云母带,相同绝缘厚度时耐压等级更高,有利于提升电机设计容量和耐压等级;(3)无需涂刷固化胶,有利于作业环境的改善;(4)新型成型线圈热压工艺半固化胶均匀附着在电磁线本体绝缘层,固化时各匝之间胶体粘接均匀牢固。因此该新型热压工艺是目前成型线圈热压工艺的最优方案,同时在并绕层间放置热固化胶片,又解决了并绕线圈热压固化成型时,并绕层固化不良的技术难点。

表 1 3WF651 型 2.5 MW 线圈制作过程

工艺方法	工艺用时			
	传统热压 工艺一	传统热压 工艺二	新型线圈 热压工艺	并绕线圈新 型热压工艺
梭绕	1.5	1.5	1.5	2 (添加半固化胶片)
引线头去绝缘	1	1	1	1
包保护带	5	5	5	5
涨型	1	1	1	1
拆保护带	4	4	—	—
涂刷固化胶	—	3	—	—
包主体多 胶绝缘层	5	—	—	—
包保护带	—	5	—	—
热压成型	30	30	30	30
拆保护带	4	4	4	4
包对地绝缘	10	15	15	15
总工艺用时	61.5	69.5	57.5	58

表 2 工艺性对比

工艺性 改善	工艺方法			
	传统热压 工艺一	传统热压 工艺二	新型线圈 热压工艺	并绕线圈新 型热压工艺
工艺用时/min	61.5	69.5	57.5	58
是否有助于 提高电机设计 容量和耐压等级	△	▲	▲	▲
是否有助于 改善作业环境	▲	△	▲	▲
胶体是否覆盖均匀、 粘接牢固	△	△	▲	▲

注:▲表示有利于提高该项性能,△表示不利于提高该项性能。

2.6 热压压力选取及有限元简要分析

根据线圈直线边热压工艺要求,线圈受到与水平方向成 $\alpha(45^\circ)$ 角度向下的力 F 的作用发生挤压形变。热压时受力情况如图10所示。通过铜材的最小屈服点,推算热压机对应的施加的最大压力。

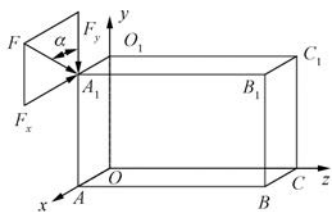


图10 受力分析图

$$\sigma = \frac{F_s}{S} = \frac{F \times g \times \frac{\sqrt{2}}{2}}{\min\{(AB \times AA_1), (A_1B_1 \times A_1O_1)\}} \Rightarrow$$

$$F \leq \frac{\sqrt{2} \sigma_{\min} \times \min\{(AB \times AA_1), (A_1B_1 \times A_1O_1)\}}{g}$$

式中： σ ——铜材的屈服强度，70~90 MPa^[5]，在计算最大压力时选最小值70 MPa；

S ——线圈受力面面积，mm²；

F_s ——对应面受力面受到的压力，kN。

以某公司制作的3WF651定子线圈为例，选取压力 $F=29.4$ kN、180℃热稳态工况，建立热稳态和静力学分析模型，选取直线边为分析对象。按图10所示的受力示意图施加载荷。分析结果如图11~图13所示。图11为整个直线边施加180℃热稳态载荷；图12为 $ABCO$ 、 OCC_1O_1 面施加固定约束，在 ABB_1A_1 、 $A_1B_1C_1O_1$ 面施加静力载荷；图13为在力-热条件下 y 方向变形云图。

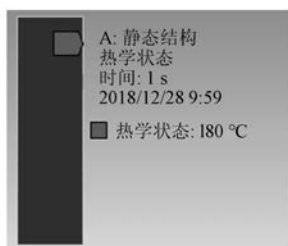


图11 180℃热稳态加载

从图13可以看出，在热稳态和静力学作用下， y 方向最大变形值为0.048 mm。在稳态热和

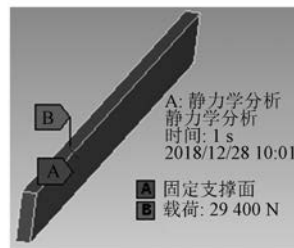


图12 稳态热和静应力加载模型



图13 y 方向变形

静应力共同作用下，线圈直线边沿受力方向变形量很小。实际热压工艺应用也表明，能够有效保证线圈直线边的直线度及线圈截面尺寸要求。

3 结 语

目前某公司已将新型线圈热压工艺运用于多款直驱永磁风力发电机线圈制作中，在实际运用中得到有效验证。该方法胶体均匀、固化粘接牢固，较传统热压工艺更简便、效率更高。降低主体绝缘厚度，有利于电机设计容量和耐压等级提升，是现阶段最为高效和可靠的工艺方法。

【参考文献】

- [1] 机械电子工业部教育司.线圈绝缘工艺学[M].北京:机械工业出版社,1991.
- [2] 孙伟明,周连杰.成型线圈热压型机的设计[J].防爆电机,2002(2): 27.
- [3] 梁锐,宁苏辉,杨珍珠.万家寨泵用同步电动机磁极线圈制造工艺研究[J].大电机技术,2001(2): 26.
- [4] 丁海娟,张新宇.电机成型线圈热压成型工艺与装备[J].机械工程师,2008(6): 38.
- [5] 范钦珊.工程力学[M].北京:高等教育出版社,2013.

收稿日期: 2018-12-06