

大线规发卡式漆包膜包线圈成型技术

肖连新¹, 顾丽¹, 肖孝轩¹, 沈小冒¹, 李儒彬¹, 解晓磊¹, 裴鸣²

(1. 中车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412001;

2. 常州市普世汽车电动系统有限公司, 江苏 常州 213001)

摘要: 发卡电机因槽满率高、散热好、体积小、性价比高等优势而广泛应用于新能源汽车领域, 但发卡式线圈通常是小线规。与小线规电机相比, 大线规电机功率更大。详细阐述了大线规发卡式漆包膜包线圈的结构及成型难点, 以及针对冲压成型和挤压成型 2 种工艺方法在 U 形成型和端部成型试验验证过程中出现的问题进行了影响分析, 并针对出现的导线破损等质量问题在工艺方法、模具、操作等方面进行了改善, 最终得到了较满意的线圈成型效果。

关键词: 永磁电机; 发卡式线圈; 线圈成型; 绝缘

中图分类号: TM 303.1 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)08-0093-05

doi: 10.12177/emca.2020.067

Winding Forming of Big-Size Enamel-Membrane-Insulated Hair-Pin Winding

XIAO Lianxin¹, GU Li¹, XIAO Xiaoxuan¹, SHEN Xiaomao¹, LI Ruben¹, XIE Xiaolei¹, PEI Ming²

(1. CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China;

2. Changzhou PUCYE-Drive System Co., Ltd., Changzhou 213001, China)

Abstract: Hair-pin motor is widely used in new energy vehicles as it has high slot full rate, good heat dissipation, small volume and good cost performance. But its winding is small-size electromagnetic wire normally. Compared with small-size wire motors, large-size wire motors supply more power. The structure and forming difficulties of the big-size hair-pin enamel-membrane-insulated winding are described in detail, and the problems appearing during the forming process of the U-shaped section and the end by punch-forming and extrusion-forming techniques are analyzed. The forming technique is optimized in terms of process, mould, wire and operation, and satisfactory winding forming results are obtained.

Key words: permanent magnet motor; hair-pin winding; winding forming; insulation

0 引言

发卡式线圈是一种截面为矩形的扁铜线绕组。由发卡式定子线圈(绕组)制成的发卡电机因其槽满率高、绕组端部短的特点而具有功率大、轴向尺寸小、质量轻、散热性好等优点^[1-2], 已越来越多地替代了传统的圆线电机, 并逐步积累设计和运行经验, 目前主要应用于新能源汽车, 设计上以永磁电机为主。国外方面, 当前该类电机的生产技术、设备和专利, 主要由日本、意大利和德

国等发达国家所引领^[3], 如日本电装为丰田第四代普锐斯制造的电机, 雷米(2015年被博格华纳收购)的 HVH250 系列电机(高压发卡定子绕组技术)于 2007 年便应用于通用雪佛兰的 VOLT, 这 2 家公司均为所生产的电机申请了专利。国内方面, 如比亚迪、北京汽车等, 为了实现功率密度的提升, 均已采用了发卡电机, 因此其电机供应商近年来也得到了飞速发展, 如福建艺达电驱动、上海电驱动、长城汽车、深圳汇川、苏州汇川等。发卡电机虽然优势较明显但也有缺点, 简单概括为

收稿日期: 2020-04-14; 收到修改稿日期: 2020-05-27

作者简介: 肖连新(1965—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为轨道交通牵引电机制造技术与管理。

制作工艺复杂、生产设备昂贵、扁线成型困难^[3-4]、环流损耗突出^[3,5-6]等,其中扁线材料及其发卡式线圈成型工艺是现今的技术攻难点,虽然国内汽车零部件供应商陆续发力,推出了自己的扁铜线电机产品^[3],线圈制作工艺日趋成熟,但均是小线规,而针对大线规发卡式线圈的成型技术尚未有相关报道。为此,本文针对大线规发卡式线圈成型的难点,对某型 80 kW 永磁同步电机所采用的比目前新能源汽车常用的线规截面积大了 3~5 倍的发卡式线圈的成型技术进行了研究,更因为导线采用“漆包+膜包”双层绝缘结构,对成型的影响因素更多。

1 导线及发卡成型难点分析

1.1 导线结构及要求

常用的小线规导线由“铜导体+漆皮层”构成,该研究中的大线规导线为了加强成型时的抗破损能力和提高绝缘层的耐压能力而采用“铜导体+漆皮层+绝缘膜”结构,其截面尺寸为 5.6 mm×3.8 mm/5.93 mm×4.13 mm(铜导体尺寸/加上绝缘层的尺寸),单边漆皮层厚度为 0.089 mm,绝缘膜厚度为 0.076 mm^[1],而常用的没有绝缘膜的小线规导线的截面尺寸约为 3 mm×2 mm,漆皮层厚度为 0.089 mm。当用纯漆包线的小线规制成发卡式线圈时,成型后的漆皮层仍能保持较好状态,但当用纯漆包线的大线规制成发卡式线圈时,由于发卡的折弯处的外围边变形量比小线规大了 2 倍多,故漆皮层容易被拉伸开裂而降低了绝缘能力,耐压试验无法通过,这个结论已通过中车株洲电机有限公司前期大量的试验所验证,本文不再做论述,只针对大线规漆包膜包导线进行研究。

由于扁铜线折弯后绝缘层容易损坏而产生缺口或破面^[3,7],并且发卡电机不像传统扁铜线电机在绕组成型后可以绝缘层修复性包扎处理^[1],同时粗的铜导线具有一定的弹性,弯折后会有一定程度的反弹。因此,要尽量减小弯折时的反弹和绝缘层因损坏而产生缺口的机率,对铜线的质量提出了更高的要求,设计者应充分考虑铜导线的硬度、刚度、延伸率等指标以及漆皮层厚度、绝缘膜叠包率与烧结强度等性能指标。

由于漆包膜包线的成本比纯粹的漆包线高出

了好几倍,行业中均希望能够通过适当增加漆皮层厚度而达到漆包膜包线的绝缘效果和抗破损能力,比如增加漆膜厚度至约 0.12 mm,这需要电磁线制造厂家提升漆包线的质量,电机制造厂家改善成型工艺才能有望实现。

1.2 发卡式线圈结构及其成型难点

与传统扁铜线电机是成型绕组的叠绕组结构不同,发卡电机的绕组是由 n 个发卡式线圈组成的波绕组,目前最多一个定子槽内可插 8 个发卡式线圈^[8],单个发卡式线圈插入定子槽后形成了多个发卡式线圈组合,通过对非鼻部端(出头端)逐层进行扭头和焊接,分别形成 U、V、W 三相,如图 1 所示。

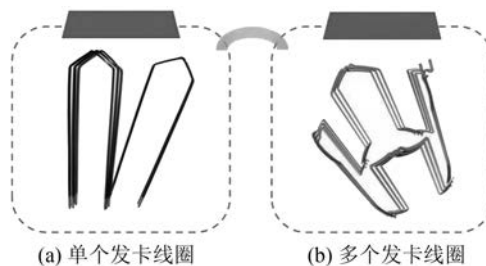


图 1 发卡式线圈结构图

由于发卡式线圈有鼻部急剧折弯的结构特点及需要顺利插入定子槽的要求,因此在发卡成型后必须要求有良好的成型工艺以保证绝缘层不会产生缺口或破面,同时须保证 2 个发卡脚的直线度。这就要求不仅要有好的扁铜导线质量,更需要有好的成型模具和成型工艺。目前国内一些电动汽车行业针对小线规的发卡式线圈成型设备和工艺已经有了较成熟的技术,但针对大线规的成型技术仍是一片空白,因此本研究具有相当大的挑战性。

2 研制过程中的难点与突破

2.1 成型工艺方法介绍

目前国外和国内厂家针对小线规发卡式线圈的主要成型工艺有冲压成型、挤压成型、折弯成型 3 种方式^[9]。冲压成型是借助冲床加模具的方式,挤压成型是液压油缸加模具,折弯成型是对六关节机器人进行数控编程而一节一节折弯。本文针对大线规发卡式线圈的成型工艺是参照以上工艺来进行研究的,但由于第 3 种方式的设备依赖

进口,投资巨大,故只以前 2 种方式进行试验研究。

2.2 冲压成型试验出现的问题分析

2.2.1 冲压成型工艺及装备的影响因素

出于成本和进度的考虑,最初是利用现有的冲压设备采取的冲压成型工艺,即将预先剪切成一定长度的大规格漆包膜包线采用冲压设备+模具的方式进行冲压成型,模具包括 U 形成型模和鼻部端成型模,分别完成 U 形和端部 2 个成型过程,冲压成型后的线圈在 U 形的拐弯处即 R 处破损严重,直线边侧面也出现划伤现象,如图 2~图 5 所示经分析,R 处破损的主要原因是设备的瞬间冲击力太大,这是由冲床本身的结构所致。冲压设备的原理是飞轮旋转带动滑块直线往复运动,在模具接触工件的瞬间速度最快,冲压次数为 60 次/min 以上,冲头瞬间冲击速度在 500 mm/s 以上。当在试验过程中调低飞轮转速至 10 次/min 以下时,瞬间冲击力大大降低,得到了较好的效果,R 处的破损现象得到消除。上文提到的直线边划伤则仅仅是与模具的设计和制造有关,是由于模具的表面粗糙度差和存在锐边等现象。

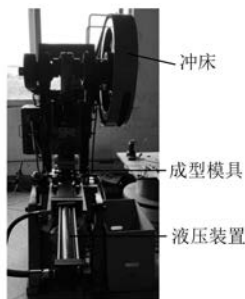


图 2 冲压成型工艺装备



图 3 U 形成型模

2.2.2 模具的影响因素

成型模具的设计与制造质量同样是保证线圈成型质量的关键因素。首先,须保持模具与导线

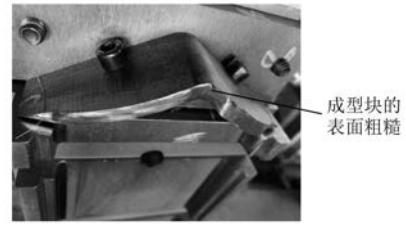


图 4 鼻部端成型模上部模

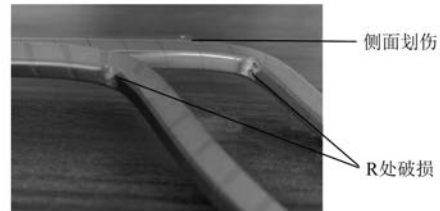


图 5 线圈破损位置

的接触面光滑,是因为粗糙的面摩擦力大,在线圈成型过程中,模具与线圈导线相摩擦容易产生压痕和划伤,严重时会导致薄膜破损^[8],图 4 中现有模具的表面粗糙度值大于 $Ra6.3 \mu\text{m}$ 。故而需对模具进行淬火处理,使其能够在机械加工和抛光后形成光滑表面,应保证模具接触表面的粗糙度值小于 $Ra1.6 \mu\text{m}$ 。其次,模具与导线的接触面不能有锐边现象,否则在模具行进过程中容易拉伤导线,图 5 中的直线边(侧面)出现划伤现象就是因为模具的接触面与导线之间是滑动摩擦且没有经过圆滑处理所致。

2.2.3 导线的影响因素

(1) 薄膜粘接强度的影响。

漆皮层与铜导体以及聚酰亚胺薄膜与漆皮层必须要有足够的粘接强度,是因为导线在弯 U 和鼻部端成型时瞬间变形量很大,如果薄膜接头绕包或烧结不良^[8],薄膜很容易起边。在对比国内 2 家厂家生产的导线时发现,粘接强度好的导线在同样工艺条件下不易产生破损。

(2) 薄膜叠包方向的影响。

薄膜叠包后会存在搭接线,沿导线的一个方向均匀排列,当导线被弯 U 后,左右两边的搭接方向便相反,在成型时,反向的一侧 R 处由于逆向移动而容易被摩擦力将搭接线处带动而产生位移,最终导致挤压起边而破损,逆向一侧的 R 处比顺向一侧的破损程度更严重。

2.2.4 成型变形的影响因素

(1) U形成型时变形的影响。

由于该研究中的大线规截面积是常规线规的3倍以上,成型时在转角R处的变形量非常大,故薄膜随变形产生的位移量也大,薄膜破损的可能性也大。从受力仿真效果可以看出,在R处和鼻部均受到了较大的力。当摩擦系数设定为0.08,挤压速度为18 mm/s(液压驱动时的速度)时,线圈成型会比较顺利,如图6所示。当摩擦系数设置为0.3,挤压速度仍为18 mm/s时,线圈突变处(R处和鼻部)严重变形,从而导致薄膜破损,并且继续施加挤压力后导线发生了断裂,如图7所示。这充分说明了模具表面质量的重要性。

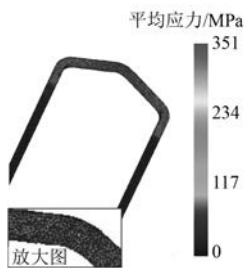


图6 线圈成型仿真图($\mu_k=0.08, v=18 \text{ mm/s}$)



图7 线圈成型仿真图($\mu_k=0.3, v=18 \text{ mm/s}$)

(2) 鼻部端再成型时变形的影响。

在U形成型后,鼻部端需要进行第2次成型,在鼻部端成型时会再次将导线向前拉伸,而此时的U形模具正在将导线紧紧夹住,产生的摩擦力更大,从而导致薄膜进一步产生位移而加剧破损,在试验验证过程中能够很明显看出这种现象。

2.3 问题解决及效果

2.3.1 优化成型工艺方法

将用于鼻部成型的冲压设备改为自制的液压装置,如图8所示。即将原来的冲压成型工艺变成了挤压成型工艺,这样,成型过程中便没有了瞬

间冲击力,实现了缓慢进给,挤压速度由原来冲压的500 mm/s以上变为了20 mm/s以内,避免了因导线的瞬间冲击变形而损伤薄膜。

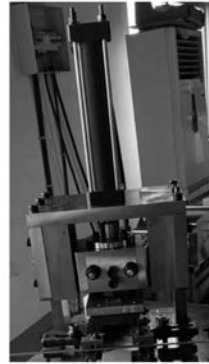
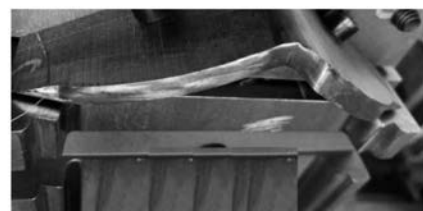


图8 自制的液压装置

2.3.2 模具改善

模具的接触面表面粗糙和存在锐边将是成型过程中划伤导线薄膜的致命点,为此,重新设计制作了一套新模具,将U形模具两侧的滑动摩擦接触点(图3)均变为滚动摩擦,减少了产生锐边的可能性,同时对模具部件进行热处理,使表面硬度达到HRC50以上,使之能通过机械加工和打磨抛光来提升表面质量。模具改进前后对比如图9所示。从图9(b)可以看出,接触面的表面粗糙度已降低,实际已降到了 $Ra1.6 \mu\text{m}$ 以下。



(a) 改进前



(b) 改进后

图9 模具改进前后对比

2.3.3 导线改善

提供试制用导线的国内2个厂家分别就前期成型出现的问题在电磁线刚度和薄膜烧结强度等

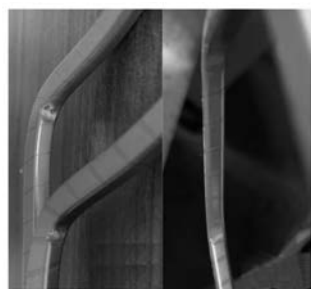
方面进行了有效改进,其中湖南株洲某生产厂家的电磁线试制效果比之前有明显的改善效果。刚度方面改善主要是导线的硬度要适中,硬度太高则延伸率差,不易成型;硬度太低则成型后容易反弹,给后续的插线造成困难。烧结强度的改善主要是提高薄膜与漆皮层的附着力,可以有效避免导线因在挤压变形过程中的摩擦力所产生的起边和破损。

2.3.4 操作改善

在上述硬件方面改进之后,操作方法的改善也能取得较好的效果。一方面,每次成型前对模具接触表面喷洒油雾,能有效降低挤压过程中的摩擦力;另一方面,在线圈U形成型后、鼻部端成型前将U形模往后退约1 mm,使线圈鼻部与模具间留有一定量的间隙,以便当鼻部端成型模具往下挤压时,导线处于自由状态,能减少导线被挤压在U形模具的型腔中而承受大的摩擦力,不易被挤伤。但操作过程中发现,液压装置条件下要控制U形模具精准往后退的操作比较难,可在后续采用伺服电机数字化控制的方式。

2.3.5 改善效果

通过上述各改善措施的实施,成型效果得到了明显改善,R处及鼻部无明显破损,只有较轻微的压痕,如图10所示。用2 000 V的电压采用钢珠法耐压击穿试验方法^[1]进行20 s的检测也无击穿现象,而改进前当采用同样的试验条件时,接通电源的瞬间便在R处出现击穿现象。



(a) 改进前 (b) 改进后

图10 改进前后的成型效果

3 结 语

通过对大线规发卡式漆包膜包线圈成型难点的分析以及针对成型过程出现的问题而进行有效的改进,得出以下结论:

(1) 由于大线规发卡式线圈的导线比目前常用的发卡式线圈的导线截面要大了3~5倍,成型难度会大好几倍。

(2) 采用冲压方式无法满足大线规发卡式线圈的无破损成型要求。

(3) 采用挤压方式可以实现大线规发卡式线圈的成型,但必须对导线品质、模具的表面质量、操作方法等方面进行有效控制。

(4) 经查阅,无挤压变形的折弯方式,比如机器人折弯是解决大线规发卡式线圈成型时绝缘破损的有效途径,但设备的投资大,生产效率暂无公开数据可查。

(5) 针对大线规发卡式线圈的导线,只采取漆包的绝缘结构形式,其成本将远低于漆包膜包的双层绝缘结构,但适中的漆皮层厚度的确定和解决漆皮层破损的成型工艺是目前最大的难题。

【参 考 文 献】

- [1] 张军,肖倩,孟庆阔. 新能源汽车驱动电机发展现状及趋势分析[J]. 汽车工业研究,2018(6): 43.
- [2] 李冬敏,杨思明. 特殊用途无刷同步发电机线圈成型工艺及应用[J]. 机械研究与应用,2015,28(5): 74.
- [3] 丁荣军,刘侃. 新能源汽车电机驱动系统关键技术展望[J]. 中国工程科学,2019,21(3): 56.
- [4] 张兴全,陈兴华. 采用扁铜线汽车发电机定子线圈结构:CN201120104458.3[P]. 2011-09-28.
- [5] FUJITA M, KABATA Y, TOKUMASU T, et al. Circulating currents in stator coils of large turbine generators and loss reduction[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2009,45(2): 685.
- [6] LIANG Y, WU L, BIAN X, et al. Influence of void transposition structure on the leakage magnetic field and circulation current loss of stator bars in water-cooled turbo-generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2016,63(6): 3389.
- [7] 凌翠平,韦在凤. 定子绕圈制作中的绝缘损伤问题解决[J]. 电机与控制应用,2014,41(5): 65.
- [8] WATANABE A, HAGA M, HASHIMOTO S. Motor having a cage wave stator winding:US20120217836A1 [P]. 2012-08-30.
- [9] 熊剑,冉继强. 中型风力发电机成型线圈新型热压工艺研究[J]. 电机与控制应用,2019,46(2): 82.