

无刷直流电机转子磁瓦表贴固定工艺研究

谢帆, 胡荣耀, 郑士林, 鲁浩

[威灵(芜湖)电机制造有限公司, 安徽 芜湖 241000]

摘要: 针对无刷直流电机固定磁瓦的胶黏剂固化时间长的问题, 分析计算磁瓦受力获得胶黏剂的最小粘接强度, 开发验证热固胶, 以实现磁瓦的快速固定。通过高温、低温、高温高湿、冷热冲击、高温及时试验验证了胶黏剂完全固化后的稳定性。结果表明, 固定磁瓦所需的最小粘接强度为 5.81 MPa, AC451 胶水在 60 °C/20 min 的条件下粘接强度为 15.6 MPa, 可实现磁瓦的完全固定。动平衡检测后随平衡泥室温固化 5 h, 胶水的粘接强度达到 22.2 MPa, 满足各项型式试验, 且安全、可靠, 具有广泛的工业应用前景。

关键词: 无刷直流电机; 转子; 磁瓦; 固定工艺; 型式试验

中图分类号: TM 305 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)01-0102-04

doi: 10.12177/emca.2019.121

Surface Fixing Technology of Brushless DC Motor Rotor Magnetic Tile

XIE Fan, HU Rongyao, ZHENG Shilin, LU Hao

[Welling (Wuhu) Motor Manufacturing Co., Ltd., Wuhu 241000, China]

Abstract: Aiming at the problem of long solidification time of adhesive for fixing the magnetic tile of brushless DC motor (BLDCM), the minimum bonding strength of the adhesive is obtained by analyzing and calculating the stress of the magnetic tile, and the rapid fixing of the magnetic tile is realized by developing and verifying the thermosetting adhesive. The stability of adhesive after complete solidification is verified by high temperature test, low temperature test, high temperature and humidity test, thermal shock test, and high temperature timely test. The results show that the minimum bonding strength of fixed magnetic tile is 5.81 MPa, and the bonding strength of AC451 glue is 15.6 MPa at 60 °C/20 min, confirming that the complete fixation of magnetic tile is realized. After dynamic balance test, the glue solidifies at room temperature for 5 h, and its bonding strength reaches 22.2 MPa, which meets the requirements of all type tests. It is safe and reliable, and has wide industrial application prospects.

Key words: brushless DC motor (BLDCM); rotor; magnetic tile; fixing technology; type test

0 引言

随着国家能效升级, 无刷直流电机 (BLDCM) 因具有效率高、噪声低、可靠性高、体积小等优点, 正在逐步取代交流电机, 广泛应用于空调行业。BLDCM 的转子由轴、转子铁心、永磁体组成。永磁体按安装方式可分为表贴磁铁 (SPM) 转子和内嵌磁铁 (IPM) 转子。SPM 转子常见的固定工艺包括无纬带绑扎^[1]、磁钢套固定^[2]、胶黏剂粘接固

定、螺钉固定和槽楔固定^[3-4]。胶黏剂固定磁铁结构简单, 容易生产, 普遍应用于空调用 BLDCM 转子, 相关文献对粘接工艺的研究重点普遍放在胶黏剂的安全性和可靠性上, 对快速固化工艺在工业生产上的应用介绍较少^[5-6]。现阶段威灵公司生产工艺为点胶-胶水初固 (室温 5 min)-胶水全固 (室温 12 h)-动平衡检测-平衡泥全固 (室温 5 h), 生产周期久, 周转库存大, 因此胶水快速固化成为新的工艺要求之一。本文主要针对胶水快

收稿日期: 2019-09-24; 收到修改稿日期: 2019-11-01

作者简介: 谢帆 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为空调用电机制造工艺。

干工艺进行可行性研究。快干工艺为点胶-胶水初固(20 min)-动平衡检测-胶水、平衡泥全固(室温 5 h)。

1 试验过程

1.1 试样制备

试验材料采用厚度为 0.68 mm 的不锈钢片,试样加工成 100 mm×25 mm,标准试样的搭接长度为 12.5±0.5 mm,使用专用胶枪将 A/B 胶混合均匀后涂抹于搭接区,并利用工具夹固定,如图 1 所示。

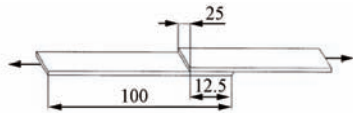


图 1 拉伸剪切强度测试示意图

1.2 试验方法

1.2.1 初固拉伸剪切强度试验

将试样置于 DHG-9145A 高温试验箱,分别在 30、60、80、120 °C 保温 20 min,取出后立刻测试拉伸剪切强度。拉伸试验在 WDW-50E 万能材料试验机上进行,试验参照 GB/T 7124—2008《胶粘剂拉伸剪切强度的测定(刚性材料对刚性材料)》^[7],拉伸力需平行于粘接面且在试样主轴方向上。

1.2.2 全固拉伸剪切强度试验

试样初固后室温下放置 5 h,然后在拉伸试验机测试拉伸剪切强度。拉伸试验在 WDW-50E 万能材料试验机上进行。要求拉伸剪切强度 ≥17.6 MPa(结合生产实践经验得出)。

1.2.3 高温试验

高温试验在 DHG-9145A 高温试验箱中进行,试样初固后室温下放置 5 h,然后经历 150 °C×240 h 高温老化,室温放置 24 h 后测试拉伸剪切强度。要求高温后拉伸剪切强度比高温前至少大 70%。

1.2.4 低温试验

低温试验在 CZ-E-1000E 可编程式高低温试验箱中进行,试样初固后室温下放置 5 h,然后经历 -40 °C×240 h 低温老化,室温放置 24 h 后测试拉伸剪切强度。要求低温后拉伸剪切强度比低温前至少大 70%。

1.2.5 冷热冲击试验

冷热冲击试验在 ZY-3J-80 冷热冲击试验箱

中进行,试样初固后室温下放置 5 h,然后经历 120 °C×2 h~-20 °C×2 h/100 循环冷热冲击老化。室温放置 24 h 后测试拉伸剪切强度。要求冷热冲击后拉伸剪切强度比冷热冲击前至少大 70%。

1.2.6 高温高湿试验

高温高湿试验在 ZY-GDWS-010 可编程式恒温恒湿试验箱中进行。试样初固后室温下放置 5 h,然后经历 85 °C/RH85%×24 h 高温高湿老化,室温放置 24 h 后测试拉伸剪切强度。要求高温高湿后拉伸剪切强度比高温高湿前至少大 70%。

1.2.7 高温及时试验

高温及时试验在 DHG-9145A 高温试验箱中进行,试样初固后室温放置 5 h,然后经历 120 °C×2 h 后,立刻测试拉伸剪切强度。要求高温及时后拉伸剪切强度比高温及时前至少大 25%。

2 结果及分析

2.1 胶黏剂的初固粘接强度

选取 4 款胶水验证 20 min 初固强度。4 款胶水样品均为双组份高性能丙烯酸结构胶,参数如表 1 所示。不同温度下的初固粘接强度如图 2 所示。

表 1 胶水样品主要参数

型号	厂家	颜色	体积比	黏度/(MPa·s)
H162	深圳市竟诚科技有限公司	蓝/浅黄	A:B=10:1	40 000~60 000
AC451	北京铠博新材料技术有限公司	蓝/浅绿	A:B=1:1	3 000~8 000
TSE3071M	烟台泰盛精化科技有限公司	蓝/白	A:B=10:1	30 000~50 000
TSE3013M	烟台泰盛精化科技有限公司	蓝/黄	A:B=1:1	30 000~50 000

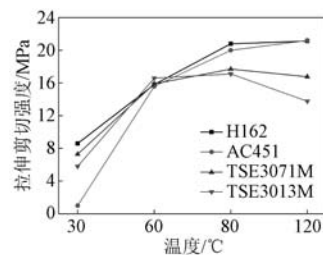


图 2 不同胶水的固化曲线对比

可以看出:(1) H162、TSE3071M、TSE3013M 在 30 °C 保温 20 min 可以达到较高的粘接强度,而

30 ℃下 AC451 的粘接强度低,试样在移动过程中易发生相对位移;(2)4 款胶水的粘接强度均在 60 ℃有一个突变,粘接强度普遍大于 15.6 MPa,可靠性高,可以正常搬运;(3)H162、AC451 的粘接强度随温度升高而不断增大,80 ℃/20 min 的粘接强度即可大于 17.6 MPa;(4)TSE3071M、TSE3013M 的粘接强度随温度的升高先增后减,说明耐高温性能较差。

2.2 SPM 转子磁瓦受力分析

2.2.1 电机运行

电机高速运行时,磁瓦主要受转矩产生的反作用力、转子高速旋转产生的离心力、磁瓦的径向电磁力以及自身的重力。相对于转矩反作用力和离心力,磁瓦电磁力和重力很小,通常可以忽略不计^[8]。磁瓦受力分析如图 3 所示。其中, F_1 为离心力,方向为径向朝外; F_2 为转矩的反作用力,方向与转子运行方向相反,相切于转子外圆。

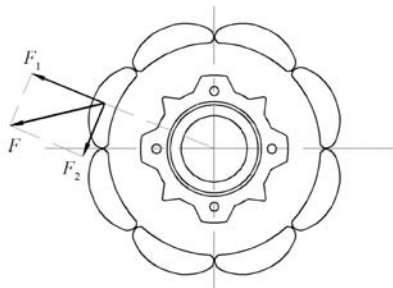


图3 磁瓦受力分析

F_1 的计算公式^[9]为

$$F_1 = mr\omega^2 = mr\left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2 \quad (1)$$

式中: m 为磁瓦重量; r 为磁瓦粘接半径; ω 为转子角速度; n 为转子的转速。

F_2 的计算公式为

$$F_2 = \frac{T}{pr} = \frac{9\,550P/n}{pr} \quad (2)$$

式中: T 为电机运行转矩; p 为电机极数; P 为电机输出功率。

可得:

$$F = \sqrt{(F_1^2 + F_2^2)} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4)$$

式中: F 为合力; σ 为粘接强度; A 为磁瓦粘接

面积。

电机的起动转矩约为运行转矩的 1.3 倍。正常运行时的转速最高,因此在起动与运行的交点,磁瓦受力最大。以威灵公司一款盘管机型为例,正常运行时,磁瓦质量为 0.017 75 kg,粘接半径为 0.026 93 m,转速为 1 340 r/min,电机输出功率为 60 W,电机极数为 8,粘接面积为 304 mm²,计算得出:最大受力 $F_{\max} = \sqrt{[F_1^2 + (1.3 \times F_2)^2]} = \sqrt{[9.4^2 + (1.3 \times 2.0)^2]} = 9.8$ N;最小粘接强度

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{A} = \frac{9.8}{304} = 0.032 \text{ MPa}。$$

2.2.2 转子动平衡检测

在动平衡检测过程中,转子由皮带带动进行同步运动,转速为 1 250 r/min,且磁瓦还未充磁,主要承受离心力,不受转矩反作用力、电磁力、自身重力作用,对磁瓦粘接强度的要求更低。计算

得出: $F \approx F_1 = 8.2$ N;最小粘接强度 $\sigma = \frac{F}{A} =$

$$\frac{8.2}{304} = 0.027 \text{ MPa}。$$

2.2.3 转子入轴

BLDCM 在转子生产制造过程中,根据机型差异,分为先入轴后贴磁瓦和先贴磁瓦后入轴 2 种,后者对胶水初固粘接强度的要求更高。转子组件贴磁瓦后,在入轴的过程中,最大铆压力约为 30 kN,磁瓦易受到振动脱落。试验验证胶水粘接强度 ≥ 5.81 MPa,入轴时磁瓦不会脱落,因此,胶水的最小粘结强度为 5.81 MPa。

2.3 胶黏剂的全固性能

综合考虑粘接可靠性和节能降本,初固条件定为 60 ℃保温 20 min,然后在室温放置 5 h 后进行各项试验,对比 H162、AC451 2 款胶水的性能,如表 2 所示。胶层断面的微观形貌如图 4 所示。从图 4 可以看出,H162 的全固强度高于 AC451,二者断口形貌差异较大,H162 为胶层与试样的界面处断裂,断面凹凸不平,而 AC451 为胶层沿拉伸方向断开,断面相对平整^[10]。但 AC451 的型式试验表现较好,粘结强度保持率均在 70% 以上,而 H162 在高温试验和冷热冲击试验中粘接强度衰减严重,说明 H162 耐高温性能相对较差。

表 2 胶水性能对比

测试项目	H162		AC451	
	测试值	保持率/%	测试值	保持率/%
全固强度	25.1	—	22.2	—
高温试验	10.1	40.2	17.7	79.9
低温试验	18.6	74.1	20.0	90.1
冷热冲击试验	12.3	49.0	18.2	82.0
高温高湿试验	15.8	62.9	15.6	70.3
高温及时试验	21.2	84.5	21.4	96.4

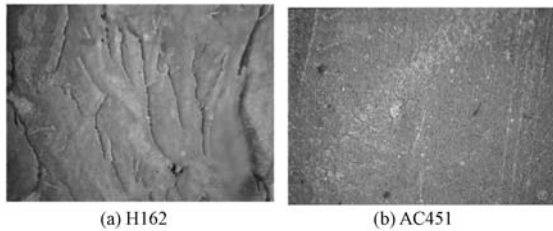


图 4 胶层断面的微观形貌

3 热态转子对动平衡检测的影响

转子高速转动时受材质不均匀、加工或装配工艺误差、不均匀磨损等因素影响,转子质心与旋转中心线不重合,导致不平衡。转子不平衡是造成转子振动过大以及产生噪声的主要原因之一,直接影响电机的工作性能和使用寿命。威灵公司要求转子不平衡量 <800 , $60\text{ }^{\circ}\text{C}/20\text{ min}$ 初固后进行动平衡检测,室温 5 h 后再次进行动平衡检测,测试数据如表 3 所示。

表 3 固化前后动平衡检测数据

60 °C/20 min 初固		室温 5 h 全固		前后差异	
左侧	右侧	左侧	右侧	左侧	右侧
473.3	596.2	246.5	396.7	226.8	199.5
787.3	355.4	498.9	227.2	228.4	128.2
109.0	374.1	362.6	612.3	253.6	238.2
374.2	253.2	691.7	451.6	317.5	198.4
256.9	240.9	193.9	142.8	63.0	98.1

由表 3 可以看出,快干工艺平衡泥固化前后设备检测值最大变动量 317.5。量产工艺平衡泥固化前后设备检测值最大变动量 380 左右,说明 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温对动平衡检测工序无明显影响。

4 结 语

理论计算结合试验研究表明,采用 AC451 热固胶在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}/20\text{ min}$ 初固后可进行动平衡检测,胶水随平衡泥在室温下固化 5 h 可达到全固强度,满足各项型式试验,快干工艺验证可行。该工艺大大提高了生产效率,减小了库存占地面积,且热固胶的耐高温老化性能明显优于常温固化胶,可靠性高。但是,快干工艺需增加磁瓦拍平烘干机的烘干时间,需对烘干设备进行改造,并增加冷却风道以优化平衡泥的固化环境。另外,AC451 热固胶加热后刺激性气味较重,现阶段通过密闭环境烘干+抽气改善,开发低气味胶水将是未来的一个研究方向。

【参考文献】

- [1] 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): 63.
- [2] 杨振中,许欣,段宗玉,等.表贴式永磁电机碳纤维护套转子强度及过盈量分析[J].电机与控制应用,2019,46(10): 6.
- [3] 张婷,张晓燕,张航.永磁电机表贴式磁钢固定工艺分析[J].河南科技,2017(11): 96.
- [4] 刘平宙,张汉允,方丹.磁钢固定工艺对永磁同步电机输出转矩的影响[J].电机技术,2012(5): 11.
- [5] 张乐,张广成,任联锋,等.航天器电子产品用环氧胶粘剂粘接工艺研究[J].中国胶粘剂,2019,28(9): 24.
- [6] WEI J, LI J, HU C, et al. Investigation of the adhesive bonding technology for the insulator structure of EAST neutral beam injector [J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(7): 073504.
- [7] 李易,夏浩,陈勇,等.电机磁钢粘接用低气味第 2 代丙烯酸酯结构胶的研制[J].中国胶粘剂,2015,24(6): 44.
- [8] 林凤卿.高速永磁电动机转子磁钢表贴固定方式的分析与研究[J].新技术新工艺,2018(4): 64.
- [9] 郑虎.EPS 永磁同步电动机转子磁铁粘结疲劳试验研究[J].微特电机,2014,42(8): 39.
- [10] 杨强,袁明康,李明珍,等.环氧树脂钢铅钢粘接工艺优化程度评价方法[J].材料科学与工艺,2007,15(6): 839.