

低毒低挥发环氧改性聚酯浸渍漆在风力发电机上的应用研究

刘济林, 陈红生, 薛长志, 李燕琴

(中车株洲电机有限公司 电气绝缘技术湖南省重点实验室, 湖南 株洲 412000)

摘要:研究了YD319G3环氧改性不饱和聚酯浸渍漆的常规性能、黏度特性、凝胶特性、贮存稳定性以及在某型号直驱永磁同步风力发电机的产品局部模型及产品上的应用情况。结果表明:YD319G3浸渍漆具有低毒、低挥发特性,满足大型风力发电机的VPI绝缘处理工艺要求,浸渍后的模型及产品具有良好的绝缘性能,是一款适用于风力发电机VPI处理的浸渍树脂。

关键词:低毒低挥发浸渍漆;风力发电机;真空压力浸渍;工程化应用

中图分类号:TM215 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)06-0069-05

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.06.011

Application of Low Toxicity and Low Volatile Epoxy Modified Polyester Impregnating Varnish in Wind Turbines

LIU Jilin, CHEN Hongsheng, XUE Changzhi, LI Yanqin

(Hunan Key Laboratory of Electrical Insulation Technology, CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China)

Abstract: The conventional properties, viscosity characteristics, gel characteristics, storage stability of YD319G3 epoxy modified unsaturated polyester impregnating varnish and its application in the partial model product of direct drive permanent magnet synchronous wind turbine generator were studied. The results show that the YD319G3 impregnating varnish has low toxicity and low volatility characteristics, which can meet the requirements of VPI insulation treatment process for large wind turbines, and the impregnated model and product have good insulating properties. It is a suitable impregnating resin for the VPI treatment of wind turbines.

Key words: low toxicity and low volatility impregnating varnish; wind turbine; vacuum pressure impregnation; engineering application

0 引言

以清洁高效可持续为目标的能源技术加速发展正在引发全球能源变革,风力发电作为新兴可再生能源的代表,发展前景广阔。我国在2030年“碳达峰”和2060年“碳中和”目标下,风电产业的快速发展将成为刚性需求。同时在国家环保法规日渐严格的形势下,将污染消灭在源头、消化在制造过

程中的“绿色制造”理念已成为越来越多的制造企业,尤其是担当新兴可再生能源使命的风力发电机制造企业的追求目标。

风电机组的设计寿命通常大于20年,维护难度大、成本高,确保并持续提升风电机组部件的可靠性是工程技术人员关注的重点。对于风电机组的核心部件风力发电机而言,采用真空压力浸渍(VPI)技术进行绝缘处理,赋予电机绝缘系统良好的电气性能和环境适应性,是提升其运行可靠性的重要工程化措施。浸渍漆是打造高可靠电机绝缘系统的关键材料,要求性能可靠、工艺适应性好、安全环保,因此具有低毒、低挥发特性的浸渍漆的应用研究工作方兴未艾^[1-5]。

收稿日期:2021-03-04 修回日期:2021-04-07

作者简介:刘济林(1984-),男(汉族),湖南邵阳人,工程师,主要从事电机、变压器绝缘技术的研发工作;陈红生(1966-),男(汉族),湖南衡阳人,教授级高级工程师,主要从事电机、变压器绝缘技术的研发和管理工作。

基于性能和成本优势,环氧改性不饱和聚酯类浸渍漆在风电领域有广泛的应用业绩^[6-9],其活性稀释剂种类主要有苯乙烯、乙烯基甲苯和丙烯酸酯类。活性稀释剂的挥发性取决于其沸点和蒸汽压,苯乙烯的沸点为146℃,25℃下饱和蒸汽压为666 Pa;乙烯基甲苯的沸点为170℃、25℃下饱和蒸汽压为146 Pa;丙烯酸酯类种类多,以常用的邻苯二甲酸二烯丙酯为例,其沸点为290℃,25℃下的饱和蒸汽压为 1.3×10^{-2} Pa。苯乙烯和乙烯基甲苯类存在易挥发、刺激性强等不足,在浸漆和固化过程中会有大量VOC排放,危及作业人员安全,也让生产企业承受巨大的环保压力。在风力发电机的绝缘处理过程中,采用苯乙烯的浸渍漆VOC排放量可达20%以上,采用乙烯基甲苯的浸渍漆VOC排放量为5%~10%,而采用丙烯酸酯类稀释剂的浸渍漆,具有固化挥发份低、无刺激性气味的优点,大幅降低了VOC排放,可有效减少对环境的污染和对人体健康的影响。

本研究对采用丙烯酸酯类活性稀释剂的YD319G3环氧改性聚酯体系浸渍漆的基本性能和指导工程化应用的几个关键指标进行研究,开展基于某直驱永磁风力发电机的产品局部模型评估及产品绝缘性能测试,探讨该浸渍漆在直驱永磁风电领域应用的可行性。

1 试验

1.1 浸渍漆

试验用浸渍漆由浙江博菲电气股份有限公司生产,型号为YD319G3。

1.2 主要仪器

QS37型高精度高压电容电桥、PC68型数字高阻计,上海精密科学仪器有限公司;HT-10/50型电气击穿测试仪,桂林电器科学研究院有限公司;GELNORM型凝胶时间仪,瑞士GEL Instrument AG公司;VPI真空压力浸渍设备,沈阳维科真空设备有限公司;Fluke 1550C型绝缘电阻测试仪,美国Fluke公司;5 kV介损自动测试仪、150 kV微机控制全自动交流击穿耐压试验仪,上海浦东申高电容器有限公司。

1.3 试验方法

浸渍漆常规性能检测按GB/T 15022.2—2017《电气绝缘用树脂基活性复合物 第2部分 试验方法》要求进行;黏温特性:采用涂-4#杯测定不同温度

下浸渍漆的黏度;凝胶特性:按GB/T 15022.2—2017测试不同温度下浸渍漆的凝胶时间;贮存稳定性:将浸渍漆置于棕色密闭容器中,在不同温度下贮存后,定期在(23±2)℃下检测黏度。

2 浸渍漆性能测试结果

2.1 常规性能

试验用YD319G3浸渍漆由不饱和聚酯树脂、环氧树脂、丙烯酸酯类稀释剂、助剂等构成,其主要常规性能测试结果如表1所示。

表1 YD319G3浸渍漆常规性能
Tab.1 Conventional properties of YD319G3 impregnating varnish

项目	指标值	YD319G3实测结果	
外观	淡黄色至棕色透明液体、无机械杂质	淡黄色透明液体、无机械杂质	
闪点/℃	>110	>110	
黏度(涂-4#杯法,23℃)/s	100~150	115	
固化挥发份(10 g, 160℃/2 h,鼓风)/%	≤2	0.9	
吸水率(固化后)/%	≤0.5	0.05	
凝胶时间(130℃)/min	3~8	5.1	
贮存稳定性(开口法,60℃/96 h)/倍	≤0.5	0.16	
螺旋线圈粘接强度/N	常态 180℃	≥130 ≥18	170 32.8
体积电阻率/(Ω·m)	23℃ 浸水24 h 180℃	≥ 1×10^{13} ≥ 1×10^{12} ≥ 1×10^9	1.8×10^{14} 1.3×10^{14} 1.0×10^{10}
电气强度/(MV/m)	23℃ 浸水24 h 180℃	≥22 ≥20 ≥18	23.6 22.2 20.8
介质损耗因数	常态 180℃	≤ 1.0×10^{-2} ≤ 5.0×10^{-2}	4.05×10^{-3} 4.51×10^{-2}

由表1可以看出,以高沸点、低饱和蒸汽压的丙烯酸酯类作为活性稀释剂的YD319G3环氧改性聚酯体系浸渍漆,具有固化挥发份低的特点,同时具

备良好的力学性能、电气绝缘性能和开口贮存稳定性,各项性能均符合技术指标要求。

除挥发性外,毒性是评价浸渍漆环保性能的另一重要指标。按照 GB/T 21603—2008《化学品急性经口毒性试验方法》对 YD319G3 浸渍漆开展大鼠经口急性毒性试验,根据宁波出入境检验检疫局检验检疫技术中心检测报告,采用霍恩氏法测定浸渍漆的经口 $LD_{50} > 2\ 300\ \text{mg/kg}$,根据卫生部《化学品毒性鉴定技术规范》中工业毒物急性毒性分级标准,当经口 $LD_{50} > 500\ \text{mg/kg}$ 时,毒性级别属于低毒,因此判定该浸渍漆毒性级别属于低毒。

2.2 黏温特性

浸渍漆的流动性及渗透性直接影响 VPI 处理绝缘结构的电性能、力学性能,黏度是表征浸渍漆流动性及渗透性的主要指标,通常随温度变化而改变。

YD319G3 浸渍漆的黏度-温度关系曲线如图 1 所示。从图 1 可以看出,随着温度的升高,浸渍漆的黏度快速下降,当温度高于 35℃ 以后,黏度下降趋势变缓。在电机 VPI 绝缘处理过程中,工件温度通常在 50℃ 左右,工件周围浸渍漆温度会上升至 25~40℃,在该温度范围内,浸渍漆具有良好的黏温特性,有利于浸渍漆渗透到云母带及其他绝缘材料中,确保被浸渍产品的整体一致性。

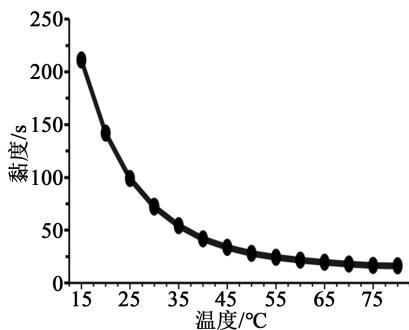


图1 浸渍漆的黏度-温度关系曲线
Fig.1 Viscosity-temperature curve of impregnating varnish

2.3 凝胶特性

凝胶时间是浸渍漆固化过程的关键指标,过短的凝胶时间会影响浸渍漆的贮存稳定性,而过长的凝胶时间又会增加漆在烘焙期间尤其是烘焙初期的流失,导致绝缘结构填充不饱满,漆膜偏薄,影响绝缘系统的整体性能。YD319G3 浸渍漆在不同温度下的凝胶时间如图 2 所示。

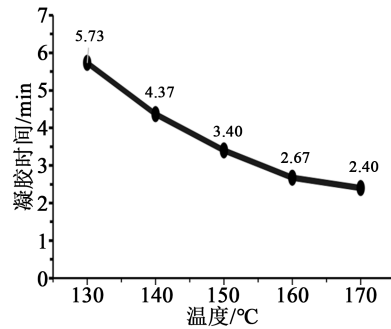


图2 浸渍漆的凝胶时间-温度关系曲线
Fig.2 Gel time-temperature curve of impregnating varnish

从图 2 可以看出,随着温度的升高,浸渍漆的凝胶时间大幅缩短,具有良好的凝胶特性。在高温段凝胶响应时间短而在低温段凝胶响应时间长,符合化学反应的一般原理,说明该树脂体系的化学交联反应在高温段对温度的敏感性高于在低温段对温度的敏感性,在工程化应用过程中,可采用高温进炉以缩短凝胶时间来达到减少浸渍漆的流失和提高挂漆量的目的。

2.4 贮存稳定性

浸渍漆的贮存稳定性是至关重要的工艺指标,尤其是在大型风力发电机的绝缘处理中,通常需要数十吨漆才能满足 VPI 浸漆需要,这对浸渍漆的贮存稳定性提出了更高的要求。对初始黏度一致的浸渍漆分别在 23、40、60℃ 下进行长期贮存试验后的黏度变化趋势如图 3 所示。从图 3 可见,贮存温度越高,浸渍漆的黏度增长越快。

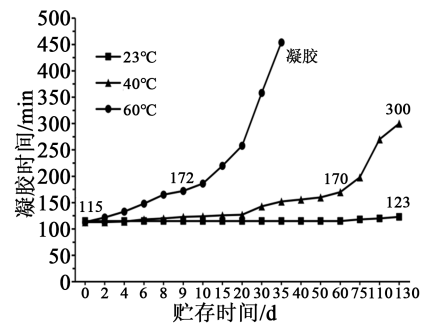


图3 不同温度下贮存的浸渍漆黏度变化曲线
Fig.3 Viscosity change curves of impregnating varnish storing at different temperatures

通常采用黏度增长倍数达到 0.5 倍的时间作为衡量贮存稳定性好坏的指标。YD319G3 浸渍漆在 23℃ 条件下贮存时,其黏度增长十分缓慢,贮存 135 天后,黏度仅增长 0.07 倍,而 VPI 储存罐中浸渍漆的

贮存温度通常在20℃以下,满足长期贮存要求。浸渍漆在使用时被预热的工件加热后的温度通常在25~40℃,在40℃下YD319G3浸渍漆贮存60天后黏度增长了0.5倍,在60℃下贮存9天后黏度增长了0.5倍,表明YD319G3浸渍漆具有良好的贮存和使用稳定性,可满足较宽温度域的贮存和使用工艺条件。在实际生产应用过程中,随着浸渍漆的消耗会补充新漆到贮存罐中,还可以进一步延缓使用过程中浸渍漆的黏度增长。

3 产品局部模型评估

VPI处理的目的是实现绝缘结构的整体性,提高绕组的电气性能和机械强度,赋予绝缘系统承受复杂环境因子侵蚀的能力。陈红生等^[10]通过开展多周期“冷热冲击+浸水+振动”和“盐雾+湿热+振动”环境试验,确认基于YD319G3浸渍漆的绝缘结构模型具有良好的耐特殊环境性能。

试验室模型与大型风力发电机产品在尺寸、热容等方面均存在较大差异,故采用与某型直驱风力发电机产品轴向长度一致、横向包含一个完整冲片的铁心结构、完整产品线圈的局部模型,开展YD319G3浸渍漆在直驱风力发电机领域的工程化应用适应性评估。

3.1 模型结构

某型号直驱风力发电机产品的局部模型主要由线圈、铁心及固定槽楔等构成。线圈采用FM-FYB-50/155型电磁线绕制而成,对地绝缘为玻璃布补强云母带,槽绝缘为聚芳酰胺纤维纸-聚酯薄膜-聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料,模型装配后整体用YD319G3浸渍漆VPI处理,表面喷涂氟碳表面漆。共制备A、B 2件局部模型,每个模型采用6根线圈,其中局部模型A参与评估试验,局部模型B用于击穿电压对比。

3.2 评估试验流程

局部模型的评估试验流程及要求详见图4。

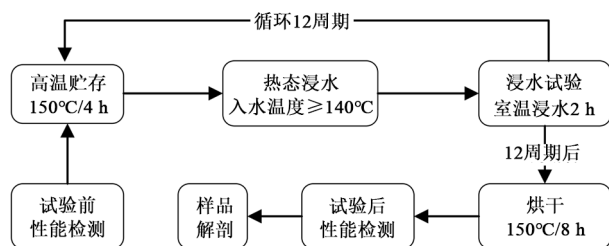


图4 局部模型评估试验流程

Fig.4 Evaluation test process of model structure

3.3 性能测试

性能测试前,局部模型在恒温恒湿环境下静置6 h,以消除环境温、湿度对测试结果的影响。按GB/T 20160—2006《旋转电机绝缘电阻测试》要求,测量局部模型在1 kV直流电压下的常态绝缘电阻和吸收比;按GB/T 34665—2017《电机线圈/绕组绝缘介质损耗因数测量方法》要求,测量局部模型在2.5 kV下的介质损耗因数;按GB/T 22715—2016《旋转交流电机定子成型线圈耐冲击电压水平》中4.4的试验要求进行工频试验,在局部模型上施加15 kV电压,持续时间为10 min;按GB/T 1408.1—2016《绝缘材料电气强度试验方法 第1部分:工频下试验》要求,在空气环境下(未浸入油槽中)测试局部模型的击穿电压,升压速率为500 V/s。

3.4 检测结果

局部模型A在评估试验前后的电气绝缘性能检测结果如表2~3所示,用于击穿电压平行对比、未参与评估试验的局部模型B击穿电压检测结果如表3所示。

表2 绝缘电阻及介质损耗因数测试结果

Tab.2 Test results of insulation resistance and dielectric loss factor

线圈编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	
绝缘电阻 /GΩ	试验前 R_{15s}	120	113	112	112	137	109
	试验前 R_{60s}	374	343	356	375	402	374
	吸收比	3.12	3.04	3.18	3.35	2.93	3.43
	试验后 R_{15s}	130	95.4	123	126	130	119
	试验后 R_{60s}	391	281	368	373	374	349
	吸收比	3.01	2.95	2.99	2.96	2.88	2.93
常态介质损耗因数 (2.5kV)/%	试验前	1.09	1.08	1.08	1.07	1.11	1.08
	试验后	1.08	1.52	0.93	0.91	0.99	0.94

表3 初始和剩余击穿电压

Tab.3 Initial and residual breakdown voltages (单位:kV)

样品	个别值	平均值	
		平均值	保持率/%
局部模型B	27.49 26.48 27.99 30.81 30.66 26.92 28.39	—	—
局部模型A	26.53 25.42 23.91 25.17 22.95 25.57 24.93	87.81	—

从表2~3可知,基于YD319G3浸渍漆的局部模型在经过评估试验考核后:绝缘电阻值较试验前无数量级变化,绝缘电阻保持率大于50%,吸收比大于2;常态介质损耗因数与评估试验前性能水平接近,仅个别线圈略有上升;击穿电压略有下降,相较于未参与评估试验的局部模型B的击穿电压平均值,局部模型A的击穿电压平均值保持率大于85%。

以上试验结果表明,按产品工艺路线制备的局部模型A在经过12周期的“高温贮存-热态浸水-室温浸水”的评估试验后,绝缘结构的整体性未受到破坏,绝缘性能仍保持较高水平。

4 YD319G3浸渍漆在风力发电机上的工程化应用

某直驱风力发电机基本技术要求为:绝缘等级:F级;额定电压:720V;主绝缘:玻璃布补强云母带;冷却方式:IC27;绝缘处理:VPI浸漆并旋转烘焙。

采用YD319G3浸渍漆进行VPI处理的某型直驱风力发电机定子产品,常态下其绝缘电阻均在1000MΩ以上,2.5kV下的常态介质损耗因数小于1.5%,浸漆后定子整体浸水2h的浸水试验通过率为100%,表明经YD319G3浸渍漆VPI绝缘处理后,风力发电机定子绝缘结构整体致密,性能良好,具备优异的防水抗潮能力。

5 结论

(1)基于丙烯酸酯活性稀释剂的YD319G3环氧改性不饱和聚酯体系浸渍漆具有低固化挥发份、低毒,良好的力学性能、电气性能特点,其黏温特性、凝胶特性和贮存稳定性满足大型风力发电机的VPI

绝缘处理工艺要求。

(2)采用YD319G3浸渍漆VPI绝缘处理的产品局部模型在经过12周期“高温贮存-热态浸水-室温浸水”的评估试验后,模型的绝缘结构整体致密性好,其绝缘电阻、介质损耗因数及击穿电压等综合绝缘性能指标均保持较好水平,表现出良好的耐温度变化、耐涉水环境等性能。

(3)采用YD319G3浸渍漆VPI绝缘处理的某直驱永磁风力发电机定子电气绝缘性能符合设计和产品交付要求,具备良好的防水抗潮能力,表明该浸渍漆满足大型风力发电机产品绝缘处理及生产应用要求。

参考文献:

- [1] 陈红生,李强军,刘刚.国内外环保型真空压力浸渍树脂的发展现状与趋势[J].绝缘材料,2011,44(2):39-42.
- [2] 邢国华,陈磊,李强军,等.低挥发聚酯亚胺无溶剂浸渍树脂的研究[J].绝缘材料,2013,46(3):1-3,20.
- [3] 裴海帆,洪晓斌,李强军,等.特殊环境下环保型聚酯亚胺浸渍漆的测试评价[J].绝缘材料,2016,49(12):66-69.
- [4] 王亚飞,程浩,王晓梅,等.无气味低挥发环保绝缘漆的制备与性能[J].绝缘材料,2018,51(6):32-34.
- [5] 梁巧灵,陈红生,梁西川,等.环保型环氧改性聚酯浸渍漆在干式变压器上的应用研究[J].绝缘材料,2019,52(9):13-17.
- [6] 薛长志,陈红生,杨杰,等.TJ13-3聚酯亚胺无溶剂浸渍漆在风力发电机上的应用[J].绝缘材料,2010,43(1):34-36.
- [7] 祝晚华,陈求索,孙璞,等.耐热绝缘浸渍漆的研究进展及发展趋势[J].绝缘材料,2011,44(4):24-27.
- [8] 薛长志,刘济林,李燕琴.VPI绝缘系统耐特殊环境性能研究[J].绝缘材料,2020,53(12):59-62.
- [9] 李强军,姜其斌,陈红生,等.1.5MW直驱式风力发电机绝缘系统的研究[J].绝缘材料,2009,42(3):10-13.
- [10] 陈红生,刘济林,薛长志,等.环保型浸渍漆及绝缘结构的环境适应性研究[J].绝缘材料,2020,53(6):12-16.