

# 油冷电机用绝缘材料耐油可靠性研究

韦晨<sup>1,2</sup>, 孙宇<sup>1,2</sup>, 蒋熙<sup>1,2</sup>, 刘发远<sup>1,2</sup>, 王文龙<sup>1,2</sup>, 武红敏<sup>1,2</sup>, 陈俞蕙<sup>1,2</sup>

(1. 桂林赛盟检测技术有限公司, 广西 桂林 541004;

2. 桂林电器科学研究院有限公司, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 本文通过对油冷电机用浸渍树脂、漆包扁线、芳纶纸开展耐油可靠性研究,探索绝缘材料在高温条件下与自动变速箱油(ATF)长时间接触后的性能变化情况。结果表明:绝缘材料在耐油试验中受ATF中水分影响较大,水和空气促进ATF热氧老化产生的酸性物质会加速材料水解。在2000 h高温耐油试验后,两款浸渍树脂、漆包扁线D和两款芳纶纸耐油性优异,表现出良好的可靠性。

**关键词:** 油冷电机;绝缘材料;ATF;可靠性

**中图分类号:** TM215 **DOI:**10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.02.008

## Research on oil resistance reliability of insulating materials for oil-cooled motors

WEI Chen<sup>1,2</sup>, SUN Yu<sup>1,2</sup>, JIANG Xi<sup>1,2</sup>, LIU Fayuan<sup>1,2</sup>,

WANG Wenlong<sup>1,2</sup>, WU Hongmin<sup>1,2</sup>, CHEN Yuhui<sup>1,2</sup>

(1. Guilin CEMT Technology Co., Ltd., Guilin 541004, China;

2. Guilin Electrical Equipment Scientific Research Institute Co., Ltd., Guilin 541004, China)

**Abstract:** In this paper, the oil resistance reliability of impregnated resin, enameled flat wire, and aramid fiber paper for oil-cooled motors was studied, and the performance changes of insulating materials after long-term contact with automatic transmission fluid (ATF) under high temperature conditions were investigated. The results show that the insulating materials are greatly affected by the moisture in ATF in the oil resistance test, water and air can promote the hot oxygen ageing of ATF to generate acidic substances, which can accelerate the hydrolysis of material. After conducting high-temperature oil resistance test for 2000 h, the two impregnating resins, enameled flat wire D and two aramid papers show excellent oil resistance and good reliability.

**Key words:** oil cooled motor; insulating materials; automatic transmission fluid (ATF); reliability

## 0 引言

随着“双碳”目标的提出,电动汽车得到迅猛发展,成为我国实现“碳达峰、碳中和”的重要支撑<sup>[1]</sup>。驱动电机作为电力驱动系统的核心,为电动汽车提供驱动动力,决定了电动汽车的综合性能<sup>[2-3]</sup>。近年来,通过优化驱动电机的热管理方式,集成油冷电驱系统以其结构紧凑、低成本、高效率已经成为各大电动汽车厂商主推的产品之一<sup>[4]</sup>。油冷电机主要的液体介质是自动变速箱油(automatic transmission fluid, ATF),由基础润滑油和各种添加剂组成,用于为系统降温、防止变速箱内器件磨损、保证系统操作的顺畅性等<sup>[5]</sup>。

**基金项目:** 桂林电器科学研究院有限公司技术创新基金项目(21729)。

电机绝缘是驱动系统的薄弱环节之一,绝大多数电机的损坏是由电机绕组的绝缘失效引起的<sup>[6-8]</sup>。浸渍树脂、漆包线、槽绝缘作为电机绕组的三大主绝缘材料,其性能的优劣会直接影响汽车电机的运行和使用寿命<sup>[9-10]</sup>。在采用油冷电机技术的电驱系统设计中,驱动电机和ATF高度集成在一起,对电机用绝缘材料的评估既需考虑传统的热、电、环境等因素,也要考虑材料与ATF的兼容性。因此充分评估油冷电机绝缘材料与ATF的兼容性是电驱系统设计开发的重要环节。目前业内对电机绝缘材料和ATF的研究多采用密闭的不锈钢罐体<sup>[5,11]</sup>,而电动汽车驱动电机以及电机控制器为防止冷凝现象和呼吸效应,常用的技术手段是安装防水透气阀<sup>[12]</sup>。驱动电机运行过程中由于ATF本身水分及工作环境“吸水”,油品可能受潮。基于上述原因,有必要

以贴合电机运行工况的模式,探索油冷电机绝缘材料与ATF长时间接触后的性能变化情况。

本研究在新能源电机用浸渍树脂、漆包扁线和芳纶纸中各挑选两款同类型产品,与ATF开展高温耐油试验,并通过材料性能测试,判断材料的可靠性和耐久性,以期作为电机材料选型提供一定的参考。

## 1 试验

### 1.1 主要试验材料

主要试验材料为浸渍树脂(厂家A和厂家B)、漆包扁线(厂家C和厂家D)、芳纶纸(厂家E和厂家F)、ATF。漆包扁线漆膜厚度约为0.08 mm,芳纶纸厚度为0.25 mm。

### 1.2 耐油试验方法

ATF中添加质量分数为0.2%±0.02%的去离子水,将固体材料浸泡于ATF中,每种固体材料单独放置于不锈钢密封试验罐中,密封罐罐盖上安装汽车电机用防水透气阀,每12 h向密封罐内添加0.08%去离子水。试验选定温度为150℃,试验时间为500、1 000、1 500、2 000 h。

### 1.3 性能测试

采用击穿仪(HT-20/5A型,桂林电器科学研究院有限公司)对漆包扁线、绝缘纸进行击穿电压测试,升压速度为0.5 kV/s;采用击穿仪(HT-50型,桂林电器科学研究院有限公司)对浸渍树脂进行击穿电压测试,升压速度为2.0 kV/s;采用数字局放仪(JFD-2010型,上海杰智电工科技有限公司)对漆包扁线进行局部放电试验,局放量达到100 pC判定为局部放电起始峰值电压;采用高频脉冲试验电源(HF3k-5型,桂林赛盟检测技术有限公司)对漆包扁线进行耐电晕性能试验,脉冲电压峰峰值为3 kV,试验频率为20 kHz,脉冲上升时间为100 ns,试验温度为155℃;采用电子万能试验机(CMT-1503型,珠海市三思泰捷电气设备有限公司)对绝缘纸进行拉伸强度测试,位移速率为100 mm/min;采用数字高阻计(6517B型,吉时利公司)测量浸渍树脂的体积电阻率,直流电压为500 V,电化时间1 min后记录试验结果;采用电子万能试验机(AG-IC型,岛津公司)测量粘结强度,位移速率为10 mm/min。具体测试标准如表1所示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 ATF含水量对试验的影响

通过对相同固体绝缘材料和ATF试样分别在不加水、加水0.2%和加水0.5%三种条件下开展384 h耐油试验,验证ATF不同含水量对固体材料的影响,结果如表2所示。从表2可以看出,固体绝缘

表1 固体材料测试方法

Tab.1 Solid material test methods

材料名称	测试项目	测试方法
浸渍树脂	电气强度	
	体积电阻率	GB/T 15022.2—2017
	粘结强度	
漆包扁线	击穿电压	GB/T 4074.5—2008
	局部放电	GB/T 7354—2018
	耐电晕性能	GB/T 21707—2018
绝缘纸	击穿电压	
	拉伸强度	GB/T 20629.2—2013
	断裂伸长率	

材料的性能受ATF中水分影响较大。相同试验条件下,随着ATF中水分增加,材料劣化加快,一方面是材料本体的水解,另一方面可能是高温条件下,水和空气促进ATF的热氧老化产生酸性物质<sup>[13]</sup>,从而加速材料水解。为了延长材料耐油试验时间,降低水分的影响,本研究选用0.2%±0.02%含水量作为耐油试验中ATF的含水量。

表2 ATF不同含水量下绝缘材料性能保持率

Tab.2 Performance retention rate of insulation materials under different water content of ATF

试样	试验项目	不加水	加水0.2%	加水0.5%
浸渍树脂A+ATF	电气强度	111.8%	100.3%	81.6%
浸渍树脂B+ATF	电气强度	104.3%	100.0%	试样碎裂
漆包线C+ATF	击穿电压	95.5%	88.5%	52.3%
漆包线D+ATF	击穿电压	98.6%	93.1%	63.2%
	击穿电压	131.8%	123.5%	114.1%
绝缘纸E+ATF	拉伸强度(纵向)	99.0%	92.7%	74.8%
	拉伸强度(横向)	98.7%	92.9%	75.6%
	伸长率(纵向)	67.2%	32.8%	18.1%
	伸长率(横向)	53.2%	32.2%	21.3%

### 2.2 防水透气阀对ATF中含水量的影响

试验用密封罐上安装了防水透气阀来平衡内外压差,如图1所示。随着温度的升高,罐体内部的水分会汽化为水蒸气,增压后的水蒸气可能会通过透气阀排至大气中。因此我们对带透气阀的密封罐中ATF在高温环境下的含水量保持情况进行验证,油品初始含水量为0.2%左右,依据GB/T 6324.8—2014,在150℃下每2 h采用卡尔费休法测试油品含水量,得出水分含量随时间的变化情况如表3所示。

从表3可以看出,装有透气阀的密封容器无法保证水分的稳定性,油品的含水量随着时间的延长逐渐降低,所以需要定期添加水分以维持内部含水量。经验证,以容积约为2 L的密封罐为例,使试验



图1 密封罐上防水透气阀示意图

Fig.1 Schematic diagram of waterproof and air permeable valve on sealed tank

表3 ATF中含水量随时间变化情况

Tab.3 Changes in water content of ATF with time

时间/h	油品含水量/%
0	0.210 1
2	0.179 6
4	0.168 2
6	0.154 8
8	0.147 4
10	0.130 9
12	0.121 1
14	0.106 1

用ATF初始含水量为0.2%±0.02%，注入量为密封罐容积的75%，ATF在带透气阀的密封罐中经150℃高温处理12h后其含水量降至约0.12%，若每12h加入0.08%的水分，则可使油品含水量保持在0.2%±0.02%，如表4所示。因此，在耐油试验中每12h向密封罐中添加0.08%去离子水以维持罐体内部水分含量。

表4 ATF中加水后含水量验证结果

Tab.4 Verification results of water content after adding water in ATF

时间/h	含水量/%	
	加水前	加水后
0	0.192 3	—
12	0.118 9	0.195 1
24	0.120 8	0.190 3
36	0.116 7	0.192 4
48	0.119 3	0.193 6
60	0.117 7	0.191 7

### 2.3 固体绝缘材料性能分析

#### 2.3.1 浸渍树脂

##### (1) 电气强度

耐油试验不同时间后，浸渍树脂A和B的电气

强度试验结果如图2所示。从图2可以看出，耐油试验2000h后，树脂A的电气强度由初始的23.8kV/mm升高到25.3kV/mm，树脂B的电气强度由初始的23.1kV/mm下降至22.1kV/mm。两款树脂均为聚酯亚胺浸渍树脂，具有高耐热性、耐腐蚀性等优点，与ATF表现出良好的兼容性，树脂A的耐油性优于树脂B。

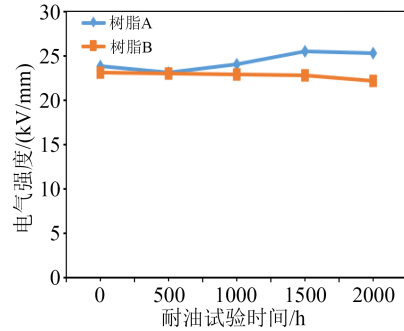


图2 浸渍树脂电气强度

Fig.2 Electric strength of impregnating resin

##### (2) 体积电阻率

两款浸渍树脂的体积电阻率测试结果如图3所示。从图3可以看出，耐油试验2000h后，树脂A的体积电阻率由初始值 $7.8 \times 10^{13} \Omega \cdot m$ 降至 $3.6 \times 10^{13} \Omega \cdot m$ ，性能保持率为46%；树脂B的体积电阻率由初始值 $6.3 \times 10^{13} \Omega \cdot m$ 降至 $1.8 \times 10^{13} \Omega \cdot m$ ，性能保持率为29%。两款浸渍树脂体积电阻率在试验中出现明显波动，上升下降趋势总体相近，可能由于体积电阻率的测试易受多方面因素影响，再现性低，不同周期测试无法保证测试环境及影响因素完全一致导致。但在1000h后能看出二者变化趋势的不同走向，树脂A仍有上升，树脂B出现明显降幅，从体积电阻率性能保持情况来看，树脂A的耐油性优于树脂B。

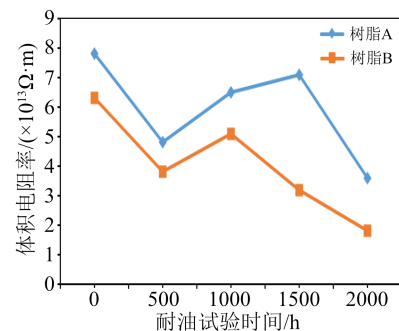


图3 浸渍树脂体积电阻率

Fig.3 Volume resistivity of impregnating resin

##### (3) 粘结强度

两款浸渍树脂的粘结强度试验结果如图4所示。从图4可以看出，耐油试验2000h后，树脂A的粘结强度由初始的206N下降到136N，树脂B的

粘结强度由初始的 241 N 下降到 128 N。树脂 B 的初始粘结强度略高于树脂 A,耐油试验 2 000 h 后树脂 B 的粘结强度低于树脂 A,由此可见,树脂 A 粘结强度性能保持更好,表现出更优异的耐 ATF 油性能。

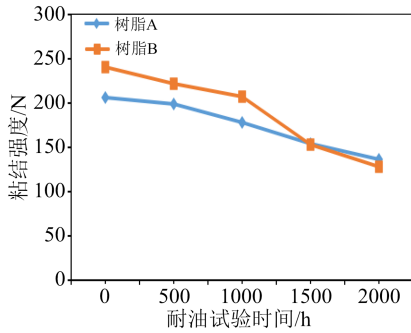


图4 浸渍树脂粘结强度

Fig.4 Bonding strength of impregnating resin

### 2.3.2 漆包扁线

#### (1) 击穿电压

耐油试验不同时间后,漆包扁线 C 和 D 的击穿电压测试结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,扁线 C 的初始击穿电压为 12.8 kV,在试验 1 000 h 后击穿电压迅速降至 2.4 kV,1 500 h 后漆膜出现开裂脱落现象(见图 6),已失去绝缘性能。扁线 D 从初始到试验 2 000 h,击穿电压由 13.1 kV 降至 10.5 kV,试验 1 000 h 时击穿电压略微升高,出现轻微波动,整体呈缓慢下降趋势,2 000 h 后击穿电压保持在初始值的 80%,体现出较好的耐油性能。

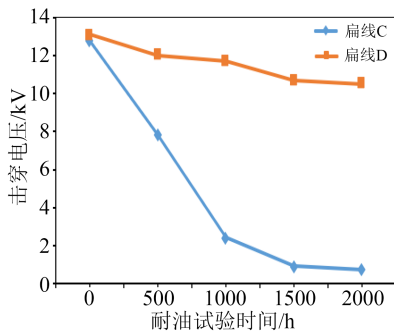


图5 漆包扁线击穿电压

Fig.5 Breakdown voltage of enameled rectangular wire

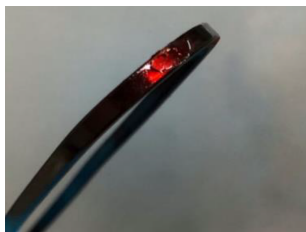


图6 扁线 C 耐油测试 1 500 h 后漆膜开裂

Fig.6 Enameled rectangular wire C cracks after 1 500 h of oil resistance test

#### (2) 局部放电起始峰值电压

两款漆包扁线的局部放电起始峰值电压测试结果如图 7 所示。从图 7 可以看出,与击穿电压测试结果类似,扁线 C 在试验 1 000 h 后局部放电起始峰值电压由初始的 1.77 kV 下降到 1.53 kV,试验 1 500 h 后无法进行试验。扁线 D 的局部放电起始峰值电压呈逐渐下降趋势,变化不大,基本维持在 1.70~1.84 kV,性能保持率大于 90%,体现出较好的耐油性。

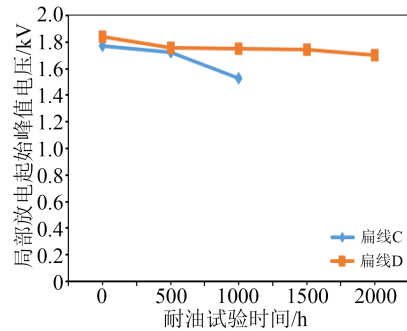


图7 漆包扁线局部放电起始峰值电压

Fig.7 Partial discharge inception peak voltage of enameled rectangular wire

#### (3) 耐电晕性能

耐油试验不同时间后漆包扁线的耐电晕性能测试结果如表 5 所示。从表 5 可以看出,扁线 C 在耐油试验 500 h 后耐电晕性能出现显著升高,这是由于漆包线浸没在 ATF 中,其外部附着了一层油膜,提高了产生电晕的电压值;但是在耐油试验 1 000 h 后由于漆膜破坏耐电晕寿命迅速下降。而扁线 D 耐电晕性能优异,初始和耐油试验后耐电晕寿命始终大于 12 000 min。

表5 漆包扁线高温耐试验油后耐电晕性能  
Tab.5 Corona resistance of enameled rectangular wire after oil resistance test

耐油试验时间/h	耐电晕寿命/min	
	漆包扁线 C	漆包扁线 D
0	3 634	>12 000
500	7 113	>12 000
1 000	232	>12 000
1 500	19	>12 000
2 000	0	>12 000

### 2.3.3 芳纶纸

#### (1) 击穿电压

耐油试验不同时间后,芳纶纸 E 和 F 的击穿电压试验结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,两款芳纶纸的初始击穿电压约为 8 kV,耐油试验 500 h 后,二者击穿电压均出现明显升高,这是由于芳纶纸浸泡于 ATF 中吸油饱和后形成油纸绝缘系统,电气性

能得到显著提升。试验 2 000 h 后两款芳纶纸的击穿电压略微下降,芳纶纸 E 降幅更为明显,但都维持在 12 kV 以上,二者均表现出较好的耐油性能。

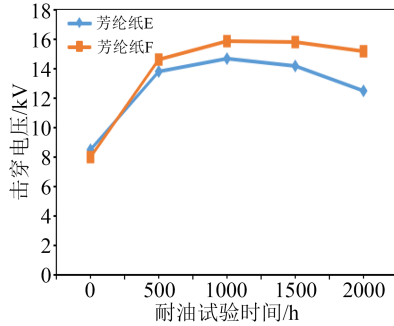


图8 芳纶纸击穿电压

Fig.8 Breakdown voltage of aramid paper

### (2) 拉伸强度

两款芳纶纸的拉伸强度如图9所示。从图9可以看出,芳纶纸E纵向、芳纶纸E横向、芳纶纸F纵向、芳纶纸F横向拉伸强度初始值分别为28.5、16.1、32.5、12.2 N/mm,耐油试验2 000 h后芳纶纸E纵向、芳纶纸E横向、芳纶纸F纵向、芳纶纸F横向拉伸强度保持率分别为71.9%、76.4%、77.8%、65.4%。从拉伸强度保持率来看,两款芳纶纸的耐油性能相当。

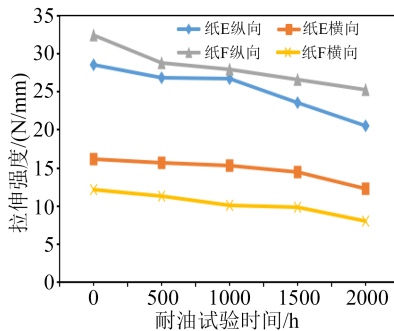


图9 芳纶纸拉伸强度

Fig.9 Tensile strength of aramid paper

### (3) 断裂伸长率

两款芳纶纸的断裂伸长率测试结果如图10所示。从图10可以看出,芳纶纸的断裂伸长率在耐油试验500 h后均出现明显降幅,500 h后下降趋势放缓,二者性能变化趋势相当,最终芳纶纸E纵向、芳纶纸E横向、芳纶纸F纵向、芳纶纸F横向断裂伸长率保持率分别为18.1%、19.3%、31.6%、27.7%,结合拉伸强度的结果来看,耐油试验后,芳纶纸F的拉伸性能总体优于芳纶纸E。

## 3 结论

(1) 浸渍树脂、漆包扁线和芳纶纸受ATF中水分含量影响较大,高温条件下水和空气促进ATF热氧化产生的酸性物质会加速材料水解。

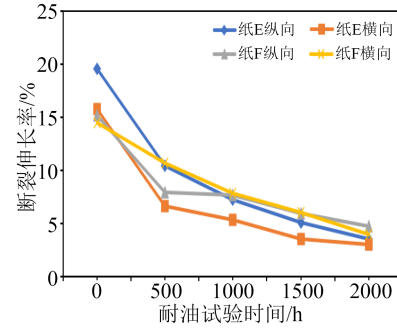


图10 芳纶纸断裂伸长率

Fig.10 Elongation at break of aramid paper

(2) 两款浸渍树脂、漆包扁线D和两款芳纶纸与ATF油进行高温试验2 000 h后,表现出优异的耐油性能,材料性能较为可靠;漆包扁线C在耐油试验1 500 h漆膜脱落开裂,性能劣化明显,可靠性不佳。

(3) 对所选材料进行2 000 h的高温耐油试验后,通过对材料电气性能和力学性能检测分析,对比出同类型材料耐油性优劣,浸渍树脂A优于浸渍树脂B,漆包扁线D优于漆包扁线C,芳纶纸F优于芳纶纸E,可为油冷电机用绝缘材料选型提供一定的参考。

## 参考文献:

- 胡泽春,宋永华,徐智威,等.电动汽车接入电网的影响与利用[J].中国电机工程学报,2012,32(4):1-6.
- 温传新,王培欣,花为.电动汽车驱动系统的研究现状与发展趋势[J].微电机,2019,52(10):103-108.
- 孙悦超.电动汽车驱动方式及未来发展[J].电机与控制应用,2016,43(11):98-102.
- 陈广林,周文,陈寄贵,等.纯电动汽车集成电驱系统油冷方案的研究与应用[J].新能源汽车,2020,15:8-9,28.
- 巩智利,李强军,张晓晶,等.电动汽车电机用绝缘材料与变速箱油相容性研究[J].绝缘材料,2022,55(6):45-50.
- 胡伟,温旭辉,刘钧.电动汽车电机驱动系统寿命模型[J].电机与控制学报,2008,12(6):670-673.
- 徐芳,李永让,夏宇,等.一种耐变速箱油H级槽绝缘材料的研制[J].绝缘材料,2018,51(11):39-42,47.
- 汝晓燕,李鹏辉.异步电动机绕组损坏的原因及处理方法[J].时代报告,2017(16):253.
- 周成,季泽伟,夏宇,等.电动汽车电机用耐ATF油绝缘材料及系统的研究[J].绝缘材料,2018,51(2):12-16,22.
- 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):52-57.
- 魏雄强,刘全胜,曹元.新能源汽车驱动电机用浸渍树脂综合评价探索[J].绝缘材料,2022,55(7):50-55.
- 高素欣,罗玉淋,言艳毛.电机控制器用防水透气阀的计算机选型方法[J].客车技术与研究,2016,6(6):36-38.
- 简斌.自动变速箱油失效分析[J].石化技术,2019(11):53,183.

收稿日期:2022-10-26;修回日期:2022-12-22。

作者简介:韦晨(1987-),女(侗族),广西桂林人,工程师,主要从事电气用绝缘材料性能测试、绝缘材料相容性的研究。