

DOI: 10.19666/j.rlfid.202301007

风电齿轮油中水分测定方法研究

冯丽苹, 尹文波, 龙国军, 王娟, 刘永洛, 王笑微, 谢佳林, 安毅坤,
朱春红, 陈愿媛, 孙世俊
(西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘要] 通过对现有油中水分检测方法原理和齿轮油的组分及其水分监督需求的分析, 发现现有方法均无法准确快速检测齿轮油中的水分。以风电用新齿轮油和运行齿轮油为研究对象, 通过条件选择性试验、结果准确性研究和精密度测定, 给出了可准确快速检测齿轮油中水分的方法。该方法采用卡氏加热炉和卡尔费休库仑法水分分析仪联用, 以压缩氮气或空气为载体气, 载气经分子筛干燥后, 通过套筒气针进出密闭的含有 1 g 油样和 1 mL 正庚烷测量瓶, 在 150 °C 下加热测量瓶分离、转移油样中水分, 使其进入卡尔费休水分分析仪中进行检测。该方法标定结果与外加水的理论值的偏差在 ±5% 以内, 精密度的重复性不超过 $0.70x^{0.604}$ mg/kg, 再现性不超过 $0.64x^{0.714}$ mg/kg。

[关键词] 风电; 齿轮油; 水分; 测定

[引用本文格式] 冯丽苹, 尹文波, 龙国军, 等. 风电齿轮油中水分测定方法研究[J]. 热力发电, 2023, 52(8): 156-161.
FENG Liping, YIN Wenbo, LONG Guojun, et al. Study on the determination method of water content in wind turbine gear oil[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(8): 156-161.

Study on the determination method of water content in wind turbine gear oil

FENG Liping, YIN Wenbo, LONG Guojun, WANG Juan, LIU Yongluo, WANG Xiaowei,
XIE Jialin, AN Yikun, ZHU Chunhong, CHEN Yuanyuan, SUN Shijun
(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: Through the analysis of the principle of the existing methods for determination the water content in oil and the components of gear oil, as well as monitoring needs of water content in gear oil, it is found that the existing methods can not accurately and quickly detect the water content in gear oil. the new gear oil and running gear oil for wind power was selected as experiment object, through study of selection of test conditions and the accuracy of the results, it is found a method that can accurately and quickly detect the water content in the gear oil. This method is a combination of the Karl Fischer coulometry water analyzer and the heating furnace. With compressed nitrogen or air as the carrier gas, after the carrier gas is dried through the molecular sieve, it cross the sealed test bottle containing 1g oil sample and 1mL n-heptane by the sleeve air needle, Heat the bottle at 150 °C, and transfer the water in the oil sample to enter the Karl Fischer water analyzer for detection.

Key words: wind turbine; gear oil; water content; determination

在全球应对气候变化的大背景下, 减少碳排放已成为各国共识。作为碳排放主要来源之一, 2020 年电力和热力生产过程产生了全球接近 40% 的碳排放^[1], 发展可再生能源、提高清洁电力供应比例, 已经成为实现碳中和的有效手段。风电作为可再生能源的

重要利用形式, 近年来全球范围内的装机容量稳步快速增长。据国际能源署 (IEA) 统计, 全球风电装机占电力总装机比例已从 2010 年的 3.5% 增加到 2020 年的接近 10%, 到 2030 年预计这一比例将稳步增加至 14.4%^[2]。风力发电进入了快速发展的轨

收稿日期: 2023-01-11

基金项目: 2021 年度西安热工研究院有限公司行业及团体标准研究与编制 (HNBZ21-H001)

Supported by: 2021 Xi'an Thermal Engineering Research Institute Co., Ltd. Industry and Group Standard Research and Preparation (HNBZ21-H001)

第一作者简介: 冯丽苹 (1975), 女, 正高级工程师, 主要研究方向为电力用油 (气) 技术, fengliping@tpri.com.cn.

道^[3], 国家能源局发布 2021 年全国电力工业统计数据, 截至 12 月底风电装机容量约 3.3 亿 kW, 同比增长 16.6%。齿轮油主要应用于重负荷齿轮、轴承的润滑, 目前我国共有风机约 20 万台, 在用齿轮油 10 万 t 以上, 对应风机造价约 25 万亿元人民币, 齿轮油费用约 50 亿元人民币。作为风电机组润滑用齿轮油, 其运行状态、使用寿命直接影响风机主齿轮箱乃至整个风电机组运行的安全性和经济性。据统计, 每个风场投产运行 8 年时, 更换风机占比为总风机量的 3%~10%, 依此计算每年更换风机的损失为 100 亿~300 亿元人民币, 齿轮油的使用寿命大多为 5~8 年, 每年更换齿轮油的成本为 5 亿~10 亿元人民币。目前, 文献研究侧重于风机故障诊断^[4-5]和润滑油的再生恢复, 对于风机故障的预防和减缓运行设备中油质劣化速度进行的实质性研究很少。

齿轮油的分子结构及添加剂种类和含量决定了水分在油中具有较大的溶解度, 使其易于被水分污染, 对油品本身和设备产生的危害如下。

1) 影响润滑油膜的形成, 降低油品的润滑性能; 导致亲水性的添加剂在水周围聚集, 破坏添加剂在油中分散成悬浮液的稳定性, 导致添加剂的功能丧失, 并促进油品和添加剂分解为醇和酸, 进一步促进油品劣化, 使油品酸值增加、黏度增大, 产生油泥。水分能够加速油品老化, 当水分与铜或铁共同存在时, 油品的氧化速率上升 120 倍^[6], 加快油品劣化; 一定条件下可使细菌和霉菌在油中繁殖^[7], 这些微生物一方面改变润滑油的成分, 使润滑油的理化性能和使用性能恶化; 另一方面能够形成油泥堵塞输送管路, 并引起油品异味、接触材料腐蚀等^[8]。

2) 齿轮油中的水分会造成油品乳化, 加速齿轮表面的锈蚀, 甚至会在齿轮的微裂纹中产生氢脆化效应, 造成齿轮的疲劳剥落^[9-13]。据统计, 当油中溶解水分(质量分数, 下同)为 0.05%时, 齿轮箱轴承寿命下降约为 58%^[14-15]。在运行过程中, 当有少量的游离或溶解水污染润滑油时, 为设备发生电偶腐蚀提供了离子流, 为腐蚀创造了条件, 腐蚀容易造成点蚀、泄露、部件功能弱化甚至直接破坏, 同时造成氧化铁等磨料向油中释放, 进而加速设备磨损—油品劣化的循环。故水分存在会缩短润滑油的使用周期, 加速设备的磨损, 严重影响设备的使用寿命。

因此, 本文提出了准确检测齿轮油水分的方法, 可减缓齿轮油的劣化, 保证其润滑性能, 减缓

设备磨损, 以期从根本上降低风机的故障频率, 对保障设备运行的安全性和经济性具有重要意义。

1 现有油中水分检测方法

1.1 卡尔费休库仑法

卡尔费休库仑法通过电化学方法测定水分, 采用该方法检测油中水分的国内标准有《石油产品、润滑油和添加剂中水分的测定卡尔费休库仑滴定法》(GB/T 11133—2015)^[16]和《运行中变压器油和汽轮机油水分测定法(库仑法)》(GB/T 7600—2014)^[17]。国外标准有 IEC 60814—1997^[18]、ASTM D 6304—20^[19]。其中, GB/T 7600—2014 和 IEC 60814—1997 内容接近, GB/T 7600—2014 适用于变压器油和汽轮机油中水分的测试, IEC 60814—1997 适用于绝缘油中水分的测试。GB/T 11133—2015 和 ASTM D 6304—20 内容相近, 规定了使用自动滴定仪直接测定石油产品和烃类化合物水含量, 也规定了间接测定样品水分的方法。但因为齿轮油黏度大, 添加剂复杂, 且大部分的硫元素含量较高, 在采用直接滴定法测定齿轮油的水分时, 存在取样困难, 检测过程干扰因素较多, 且极易导致电极污染, 仪器损坏, 测定结果不准的问题; 而在采用间接滴定法测定齿轮油水分时, 操作步骤不明确, 无法准确检测齿轮油的水分, 不能满足目前风力发电用齿轮油水分监督的需求。

1.2 蒸馏法

蒸馏法是将含水油样与不溶于水的有机溶剂混合, 随后一并加入蒸馏仪分离出水分。采用该方法的国内标准为《石油产品水分测定法》(GB/T 260—2016)^[20], 适用于石油产品、焦油及其衍生产产品, 水分的测定范围为不大于 25%。该标准方法测定过程是将被测定样和与水不相溶的溶剂共同加热回流, 溶剂可将试样中的水携带出来, 不断冷凝下来的溶剂和水在接收器中分离开, 水沉积在带刻度的接收器中进行计算, 溶剂流回蒸馏瓶中。采用该方法测定齿轮油水分时, 每个样品 2 次平行试验需要样品 200 g, 石油馏分溶剂 200 mL, 测定用时 1 天。

风力发电机及火电厂磨煤机用齿轮油新油水分测定采用该标准方法时, 该标准规定试样水分小于 0.03%时, 结果报告为“痕迹”, 无法给出准确数值。故用该方法进行齿轮油水分测定时, 需要样品和有机溶剂数量大、耗时长、成本高、准确度差, 不能满足目前风力发电在用齿轮油监督的需求。

1.3 其他检测方法

另外,油品水分测定目前还有色谱法^[21]、介电常数法^[22-23]、红外光谱法^[24-25]、《润滑油水分定性试验法》(SHT 0257—1992(2004))^[26]。但是齿轮油具有黏度大、组分复杂,会导致色谱柱快速污染。齿轮油中含有大量的极性添加剂和金属磨粒,这些均会对上述方法中的水分吸收峰、介电常数等电参数造成明显影响,进而对水分检测结果造成严重干扰。故现有方法均无法准确快速检测齿轮油的水分,需制定适用于齿轮油中水分的测定方法。

2 试验内容

本文采用卡氏加热炉和卡尔费休库仑法水分分析仪联用(简称联用法)测定齿轮油中水分。该方法将处于密闭体系中的齿轮油样品和正庚烷的混合液保持在一定温度下,连续不断地通入干燥载气,将样品中的水分汽化并转移到卡尔费休库仑法水分分析仪的滴定池中,该水分和滴定池阳极生成的碘按 1:1 的质量比发生卡尔费休反应,直至滴定池中水分完全反应,依据法拉第定律,计算出样品中的水分。试验对象为风力发电机组常用的新齿轮油和运行齿轮油。

将卡式加热炉与水分分析仪连接后,调整仪器至备用状态,其中干燥剂为分子筛,载气为空气或氮气,水分分析仪的滴定终点电解速度应不大于 0.15 $\mu\text{g/s}$ 且可保持 1 min。将一定质量的齿轮油置入测量瓶中,在不同条件下测试油样中的水分,研究齿轮油中水分测定的测试条件及结果准确性。

3 结果及分析

3.1 载气选择试验

因载气直接参与齿轮油水分的测定过程,在测定过程中,水分分析仪测定样品转移出水分的同时,亦检测载气中的水分(样品水分计算过程中该部分水分已扣除)。为避免载气湿度大,加快电解液的失效速度,影响测定结果,本文样品水分测试过程中,载气的干燥程度可满足水分分析仪滴定终点电解速度不大于 0.15 $\mu\text{g/s}$ 且可保持 1 min。

分别选用空气和氮气为载气,在除温度外其他条件相同的情况下,对 4 个齿轮油样品进行了水分测定,测定结果见表 1。在除流量外其他条件相同的情况下,对 3 个齿轮油样品进行了水分测定,测定结果如图 1 所示。

由表 1 可见,在不同温度下,对不同样品,采

用氮气和空气做载气,均不影响测定结果。这说明空气中虽存在氧气,测试过程中会发生氧化反应,但是不影响油中水分的转移,故测定过程中载气采用空气或氮气。

表 1 载气类别选择试验结果
Tab.1 Results of carrier gas type selection test

样品名称	试验温度/ $^{\circ}\text{C}$	载气类型	水分/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$
样品 1	150	空气	600
		氮气	598
样品 2	150	空气	65
		氮气	65
样品 3	170	空气	141
		氮气	145
样品 4	170	空气	107
		氮气	100

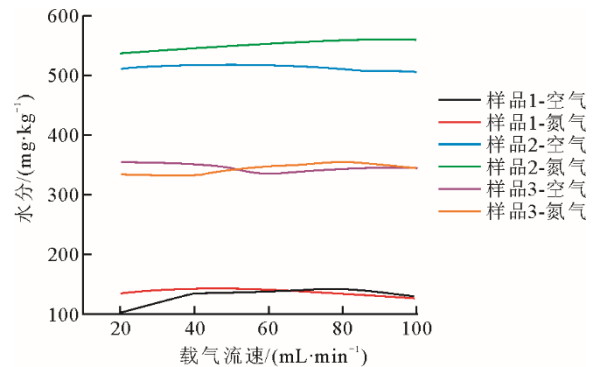


图 1 载气流速对齿轮油水分测定的影响
Fig.1 Influence of carrier gas flow rate on determination of water content in gear oil

由图 1 可见:载气流量在 20 mL/min 时,个别样品测定结果偏低;载气流量在 40~60 mL/min 时,测定结果一致性高。因此,测定过程中载气的流量可选择 40~60 mL/min。

3.2 干燥剂选择试验

本文提出的联用法是通过载气转移水分到水分分析仪的滴定池中,进行样品水分测定。故载气的干燥非常重要,载气越干燥,测定过程中空白越小,越利于保证测定结果的重复性和准确性。

采用变色硅胶为干燥剂时,水分测定过程中水分仪滴定终点的电解速度达不到 0.15 $\mu\text{g/s}$,表明变色硅胶对气体的干燥效果差,不适合做水分测定过程的干燥剂。采用 3A、4A、5A、13X 4 种型号的分子筛做干燥剂时,水分仪滴定终点的电解速度均可达到 0.15 $\mu\text{g/s}$ 以下。对同一样品采用不同型号分子筛做干燥剂时,空白和样品的水分测定结果如图 2 所示。

采用上述分子筛做干燥剂时,压缩空气经干燥

后,水分测定的滴定终点非常易于到 $0.15 \mu\text{g/s}$ 且可保持 1 min ; 且经该分子筛干燥后的气体空白水分测定结果和同一样品水分测定结果均相近,表明上述 4 种分子筛均可作为联用法的干燥剂。

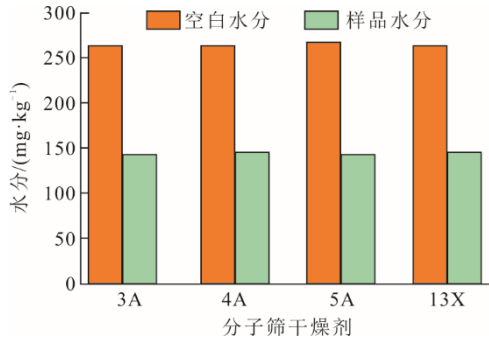


图2 不同分子筛干燥剂对齿轮油水分测定的影响
Fig.2 Effect of different molecular sieve desiccants on determination of water content in gear oil

3.3 水分转移方式选择试验

3.3.1 直接加热转移水分

样品中水分的测定过程是将样品直接处于密闭体系的测量瓶中,保持在一定温度下,连续不断地通入干燥的载气,将样品中的水分转移到水分分析仪的滴定池中,对样品进行水分测定。不同温度下各样品的测定结果如图3所示。由图3可见,通过直接加热法测定齿轮油中水分时,测定结果随温度升高而增大。这是由于合成齿轮油基础油的主要成分为聚 α 烯烃和聚醚,其分子相对比较大,同时含有多种添加剂,对齿轮油中处于不同位置的水分子的迁移影响不同,进而导致从油中汽化转移需要的温度不同。当加热温度升高到 $170 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,载气管路中出现微量齿轮油分解产生的油蒸汽,继续升高温度会导致油品分解产物进入滴定池,污染电极,污染载气管路。故齿轮油水分测定采用直接加热转移水分的方法不可行。

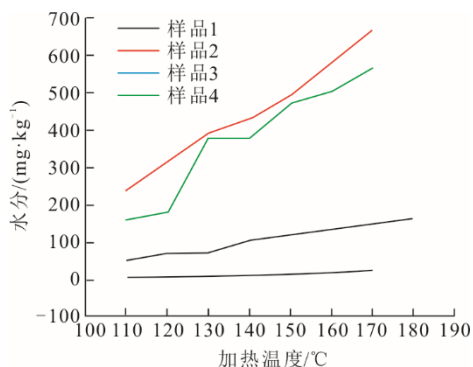


图3 水分转移加热温度对齿轮油水分测定的影响
Fig.3 Influence of water transfer heating temperature on determination of water content in gear oil

3.3.2 加热结合添加辅助溶剂转移水分

通过添加辅助溶剂改变水分子的存在状态,破坏基础油分子和添加剂对水分子迁移的影响,使油样中的水分在油品分解温度之下实现完全转移。该方法是向处于密闭体系中 1 g 样品不加辅助溶剂或分别添加 1 mL 乙醇、石油醚、正庚烷后,保持在 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 下,连续不断地通入干燥的载气,将样品中的水分转移到水分分析仪的滴定池中,对样品进行水分测定。测定结果如图4所示。由图4可见,相比于直接加热转移齿轮油中水分,添加 3 种辅助溶剂后,从油样中转移出的水分均有明显升高。该现象说明在 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 下加热转移油中水分时,添加辅助溶剂后,降低或消除了齿轮油和添加剂对水分在油中迁移的影响,使水分易于从油中逸出。但是 3 种辅助溶剂的测定结果不一致,需要进一步确认测定结果的准确性。

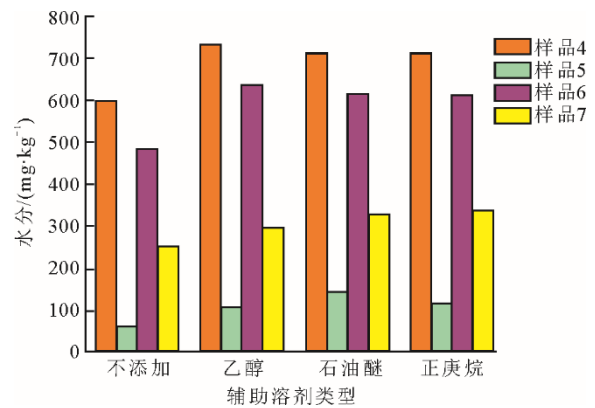


图4 辅助溶剂对齿轮油水分测定的影响
Fig.4 Influence of auxiliary solvents on determination of water content in gear oil

3.4 结果准确性测定

通过外标法进行标定和判断,测定过程:对同一齿轮油样品称取 2 份约 1 g (精确至 0.0001 g) 的试样分别置入 2 个测量瓶中,并记录其质量 m_1 和 m_2 ; 然后向 2 个测量瓶中分别加入辅助溶剂,另外向油样质量为 m_2 的测量瓶中加入 $0.5 \mu\text{L}$ 的蒸馏水,快速密封 2 个测量瓶,在一定温度下加热并转移试样中的水分。测定 2 个测量瓶中样品的水分后,通过差减法得到外加水的测定结果,测定结果与标准值 $498.5 \mu\text{g}$ (实验室测试温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 水的密度为 0.997044 g/cm^3 , $0.5 \mu\text{L}$ 的蒸馏水的质量应为 $498.5 \mu\text{g}$) 比较计算其相对偏差。另外,为考察加入辅助溶剂数量对测定结果的影响,同时对同一种溶剂,进行了 3 个加入量的测定,测定结果如图5所

示。由图 5 可见, 同一样品不同温度下, 乙醇和石油醚作为辅助溶剂时, 外加水测定结果一致性差, 且偏差出现在不同方向。正庚烷作为辅助溶剂时, 外加水测定结果随着温度升高, 偏差逐渐减小, 在 150 °C 下, 测定结果的相对偏差最小。这表明采用正庚烷作为辅助溶剂可改变齿轮油中水分的迁移形式, 使齿轮油中外加的水分在 150 °C 时可被完全转移, 且测试过程中干扰小。

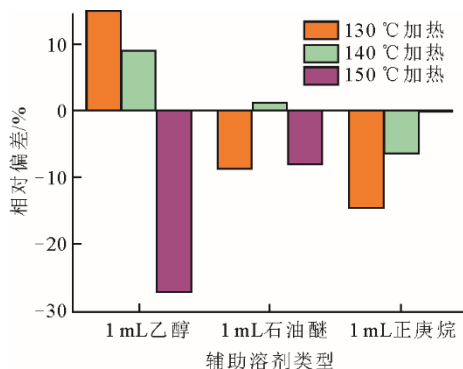


图 5 不同辅助溶剂在不同温度下外标法的偏差
Fig.5 Deviation of external standard method for different auxiliary solvents at different temperatures

3.5 油样中水分转移程度测定

为检测试验条件下油样中水分汽化转移的完全程度, 选取水分不同的油样, 在分别添加正庚烷溶剂稀释和直接加热的条件下进行了外加水分的标定测定, 试验过程同 3.3 节, 加热转移水分的温度为 150 °C, 添加的正庚烷体积分别为 0、1 mL, 测试结果如图 6 所示。

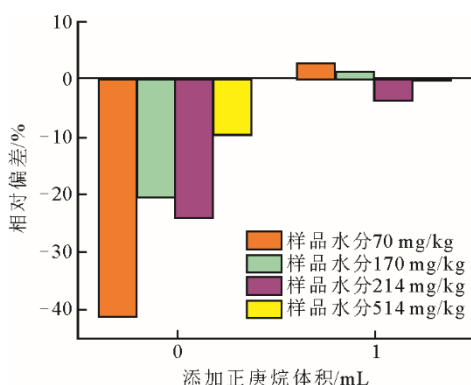


图 6 不同水分油样在添加助溶剂下外标法的偏差
Fig.6 Deviation of external standard method for oil samples of different water contents with or without adding cosolvent

由图 6 可见, 当不添加辅助溶剂正庚烷, 直接加热对外加 0.5 μL 的水进行标定时, 所采用的油样的水分越低, 标定结果与外加水的理论值的偏差越大。这是由于合成齿轮油基础油的主要成分为聚 α -烯烃和

聚醚, 分子量高, 黏度大, 另外添加剂众多, 其中含有强极性物质, 会影响水分迁移, 导致部分水分在该温度下不能被汽化和转移。对于同类样品, 同一测试条件下夹带水(不能被转移的水)总量相近, 如果油样本身的水分低, 所夹带水的含量低, 外加水分增加油样的水分后, 有一部分水分会转化为夹带水; 油样本身的水分越高, 油样中夹带水的含量高, 通过外加水分增加油样的水分时, 转化为夹带水的量越少。添加辅助溶剂正庚烷后, 相同条件下对外加 0.5 μL 的水进行标定时, 无论所采用的油样水分高低, 标定结果与外加水的理论值的偏差均在 ±5% 内。2 组数据结果表明, 在该试验条件下, 通过添加 1 mL 正庚烷辅助溶剂, 可使油样中的夹带水被释放, 油样中的水分可实现全部转移。

3.6 方法精密度测定

依据《石油产品试验方法精密度数据确定法》(GB/T 6683—1997), 用 14 个样品在 5 个实验室内, 按联用法进行了 2 次重复测定, 将全部测定结果汇总、验算, 判断方差的一致性, 对界外值和界外实验室进行检验, 并对所接受的测量值进行统计计算, 得到该方法的重复性为不超过 $0.70x^{0.604}$ mg/kg, 再现性为不超过 $0.64x^{0.714}$ mg/kg, 其中 x 为 2 个试样结果的平均值。

4 结 语

风电系统用齿轮油由于添加剂成分复杂, 且大部分含有较高含量的硫元素, 采用卡尔费休库仑法直接测定其水分时, 伴有干扰测试结果的副反应发生, 同时极易造成电极污染, 致使获得的测定结果不准确, 也易于导致卡尔费休库仑法水分测定仪的电极损坏。另外, 由于齿轮油使用过程中不可避免会有磨损金属进入, 及齿轮油复杂的组分含量和现存水分测试方法原理的局限性, 使目前的油中水分检测方法均不适用于风电系统用齿轮油。

本文提出采用联用法检测齿轮油中水分, 并通过研究给出了联用法的试验条件、准确度和精密度, 获得了可准确测定齿轮油中水分的测定方法。联用法是以压缩氮气或空气为载气, 载气经分子筛干燥后, 通过套筒气针进出密闭的含有 1 g 油样和 1 mL 正庚烷测量瓶, 在 150 °C 下加热测量瓶分离、转移油样中水分, 使其进入卡尔费休水分分析仪中进行检测。联用法的标定结果与外加水的理论值的偏差在 ±5% 内, 精密度的重复性为不超过 $0.70x^{0.604}$ mg/kg, 再现性为不超过 $0.64x^{0.714}$ mg/kg。

[参考文献]

- [1] IEA. World energy outlook 2021[R/OL]. (2021-10-1) [2021-12-14]. <https://prod.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>.
- [2] 夏婷, 张木梓, 陈杨, 等. 全球低风速风电发展现状与展望[J]. 水力发电, 2022, 48(6): 105-108.
XIA Ting, ZHANG Muzi, CHEN Yang, et al. Current status quo and future of global low wind speed power[J]. Water Power, 2022, 48(6): 105-108.
- [3] 秦永军. 新能源风力发电技术及其发展趋势分析[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(19): 162-165.
QIN Yongjun. New energy wind power generation technology and its development trend analysis[J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(19): 162-165.
- [4] 耿珊. 油液监测在风机故障诊断中的应用[J]. 甘肃科技, 2020, 36(11): 50-54.
GENG Shan. Application of oil monitoring in fan fault diagnosis[J]. Gansu Science and Technology, 2020, 36(11): 50-54.
- [5] 蒋劳, 刘有志, 韩卫. 润滑油光谱分析在风机故障诊断中的应用[J]. 通用机械, 2012(11): 66-68.
JIANG Lao, LIU Zhiwei, HAN Wei. Application of lubricating oil spectrum analysis in fan fault diagnosis[J]. General Machinery, 2012, (11): 66-68.
- [6] 张志勇, 阿茹娜, 郭江源, 等. 风力发电机组齿轮油常见问题分析[J]. 设备管理与维修, 2018(21): 148-151.
ZHANG Zhiyong, A Runa, GUO Jiangyuan, et al. Analysis on common problems of gear oil for wind turbine generator[J]. Plant Maintenance Engineering, 2018(21): 148-151.
- [7] NEEDELMAN W M, BARRIS M A, LAVALLEE G L. Contamination control for wind turbine gearboxes[J]. Power Engineering-Barrington then Tulsa, 2009, 113(11): 112-120.
- [8] 杨宏伟, 杨士亮, 郭力, 等. 润滑油中微生物的污染及防治[J]. 合成润滑材料, 2013, 40(2): 32-35.
YANG Hongwei, YANG Shiliang, GUO Li, et al. Pollution and preventive treatment of microbes in lubricants[J]. Synthetic Lubricants, 2013, 40(2): 32-35.
- [9] 周亚斌, 马国梁, 张继勇. 在用润滑油水污染问题研究[J]. 润滑油, 2017, 32(2): 36-39.
ZHOU Yabin, MA Guoliang, ZHANG Jiyong. Study of water contamination issue in service oil[J]. Lubricating Oil, 2017, 32(2): 36-39.
- [10] 彭显才, 费逸伟, 郭峰, 等. 金属磨粒对航空发动机润滑油氧化安定性的影响探究[J]. 山东化工, 2016, 45(18): 44-46.
PENG Xiancai, FEI Yiwei, GUO Feng, et al. An inquiry into influence of metal debris on thermal oxidative stability of aircraft engine lubricating oil[J]. Shandong Chemical Industry, 2016, 45(18): 44-46.
- [11] CANTLEY R E. The effect of water in lubricating oil on bearing fatigue life[J]. ASLE Transactions, 1977, 20(3): 244-248.
- [12] GRUNBERG L, SCOTT D. The acceleration of pitting failure by water in the lubricant[J]. Institute of Petroleum, 1958, 44: 406-410.
- [13] SCHATZBERG P, FELSEN I M. Effects of water and oxygen during rolling contact lubrication[J]. Wear, 1968, 12(5): 331-342.
- [14] SHENG S W. Monitoring of wind turbine gearbox condition through oil and wear debris analysis: a full-scale testing perspective[J]. Tribology Transactions, 2016, 59(1): 149-162.
- [15] WALLACE J J R. Improving gearbox reliability[J]. Renewable Energy Focus, 2009, 10(2): 22-24.
- [16] 石油产品、润滑油和添加剂中水含量的测定卡尔费休库仑滴定法: GB/T 11133—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
Standard test method for determination of water in petroleum products, lubricating oils, and additives—Coulometric Karl Fischer titration method: GB/T 11133—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [17] 运行中变压器油和汽轮机油水分测定法(库仑法): GB/T 7600—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
Determination of water content in transformer oils and turbine oils in service by coulometric method: GB/T 7600—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [18] Insulating liquids—Oil-impregnated paper and pressboard—Determination of water by automatic coulometric Karl Fischer titration: IEC 60814—1997[S]. Geneva: IEC Central Office, 1997.
- [19] Standard test method for determination of water in petroleum products, lubricating oils, and additives by coulometric Karl Fischer titration: ASTM D 6304—16[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2020.
- [20] 石油产品水分测定法: GB/T 260—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
Test method for water in petroleum products—Distillation method: GB/T 260—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [21] 运行中变压器油、汽轮机油水分测定法(气相色谱法): GB/T 7601—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
Determination of water content for transformer and turbine oils in service by gas chromatographic method: GB/T 7601—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [22] 唐金伟, 李焯峰, 刘永洛, 等. 基于介电常数法的汽轮机油质量监测[J]. 热力发电, 2015, 44(5): 50-54.
TANG Jinwei, LI Yefeng, LIU Yongluo, et al. Dielectric constant method based monitoring method for turbine oil quality[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(5): 50-54.
- [23] 龚佩, 刘祥萱, 郭磊, 等. 基于介电常数法的润滑油水分快速分析[J]. 润滑与密封, 2011, 36(11): 97-99.
GONG Pei, LIU Xiangxuan, GUO Lei, et al. Rapid analysis of water content in lubricant oil based on the dielectric constant[J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(11): 97-99.
- [24] 王远远, 赖祥生, 郑玉萍, 等. 应用红外光谱法监测绝缘油中水分[J]. 福建电力与电工, 2004, 24(2): 24-25.
WANG Yuanyuan, LAI Xiangsheng, ZHENG Yuping, et al. Monitoring moisture content in insulating oil by infrared spectroscopy[J]. Fujian Electric Power and Electrician, 2004, 24(2): 24-25.
- [25] 焦昭杰, 张贤明, 梁新元, 等. 近红外光谱法快速测定油品中水分[J]. 光谱实验室, 2011, 28(6): 3120-3124.
JIAO Zhaojie, ZHANG Xianming, LIANG Xinyuan, et al. Fast determination of water content in oil by near infrared spectroscopy[J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2011, 28(6): 3120-3124.
- [26] 润滑油水分定性试验法: SH/T 0257—1992(2004)[S]. 北京: 中国石化出版社, 1992.
Qualitative test method for water content of lubricating oils: SH/T 0257—1992(2004)[S]. Beijing: China Petrochemical Press, 1992.

(责任编辑 杨嘉蕾)