

DOI: 10.19666/j.rlfed.202503039

磷酸酯抗燃油国产化技术研发及 工业应用示范

王娟¹, 高占阳¹, 杨大锚², 梁永吉², 龙国军¹, 王笑微¹,
冯丽苹¹, 谢佳林¹, 刘钊¹, 张晋玮¹, 文乐²

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;
2.华能铜川照金煤电有限公司, 陕西 铜川 727100)

[摘要] 磷酸酯抗燃油作为汽轮机调速系统液压工作介质, 对汽轮机正常运转起着至关重要的作用。目前, 国内发电机组汽轮机调速系统用磷酸酯抗燃油被进口产品垄断, 为打破电力行业高度依赖进口抗燃油的局面, 需开展磷酸酯抗燃油国产化研制及应用工作。通过对不同种类国产三芳基磷酸酯性能评价分析, 确定适用于国产抗燃油研发的三-(二甲基苯基)磷酸酯; 采用氧化和吸附工艺对国产三-(二甲基苯基)磷酸酯进行精制处理, 显著提升了三-(二甲基苯基)磷酸酯稳定性能, 研制出高性能磷酸酯抗燃油基础油; 通过多种添加剂研究, 确定添加剂复配方案, 得到满足《电厂用磷酸酯抗燃油运行维护导则》(DL/T 571—2014)中新油要求的高性能磷酸酯抗燃油; 国产抗燃油静态和动态模拟老化实验研究表明, 国产磷酸酯抗燃油抗老化性能优于市售抗燃油; 国产磷酸酯抗燃油在发电机组开展1年的工业示范应用期间, 油质长期处于新油水平, 发电机组调速系统运行正常。

[关键词] 三芳基磷酸酯; 基础油; 添加剂; 动态模拟; 国产化; 工业应用

[引用本文格式] 王娟, 高占阳, 杨大锚, 等. 磷酸酯抗燃油国产化技术研发及工业应用示范[J]. 热力发电, 2025, 54(12): 142-149. WANG Juan, GAO Zhanyang, YANG Damao, et al. Research and development and industrial application demonstration of the localization technology of phosphate ester fire-resistant fluids[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(12): 142-149.

Research and development and industrial application demonstration of the localization technology of phosphate ester fire-resistant fluids

WANG Juan¹, GAO Zhanyang¹, YANG Damao², LIANG Yongji², LONG Guojun¹, WANG Xiaowei¹,
FENG Liping¹, XIE Jialin¹, LIU Zhao¹, ZHANG Jinwei¹, WEN Le²

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
2. Huaneng Tongchuan Zhaojin Coal Power Co., Ltd., Tongchuan 727100, China)

Abstract: Phosphate ester fire-resistant fluids, serving as hydraulic working medium for the speed regulation system of steam turbines, play a crucial role in the normal operation of steam turbines. Currently, imported products dominate the phosphate ester fire-resistant fluids market for the speed regulation system of steam turbines in domestic power generation units. To break the power industry's high dependence on imported fire-resistant fluids, it is imperative to develop domestic phosphate ester fire-resistant fluids through independent research and application. Through performance evaluation of various domestic tri-aryl phosphate esters, tri-(dimethylphenyl) phosphate was identified as the optimal choice for domestic fire-resistant fluid development. Via oxidation and adsorption refining processes, the stability of the domestic tri-(dimethylphenyl) phosphate was significantly enhanced, resulting in the successful development of high-performance phosphate ester fire-resistant base oil. After the research on various additives, an optimized additive formulation was established, ultimately producing high-performance phosphate ester fire-resistant fluid that meets the new fluid requirements specified in *Guide for*

收稿日期: 2025-03-09

基金项目: 中国华能集团有限公司科技项目 (HNKJ23-H22)

Supported by: Science and Technology Project of Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ23-H22)

第一作者简介: 王娟 (1982), 女, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为电力用油分析检测及油质再生处理技术, wangjuan@tpri.com.cn.

通信作者简介: 高占阳 (1993), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为电力用油分析检测及油质再生处理技术, gaozhanyang@tpri.com.cn.

Operation and Maintenance of Phosphate Ester Fire-resistant Fluid Used in Power Plant (DL/T 571—2014). Static and dynamic simulated aging tests demonstrated that the domestic phosphate ester fire-resistant fluid exhibits superior anti-aging performance compared to the commercially available alternatives. Following one year of industrial demonstration in power generation units, the fluid maintained new-oil quality standards throughout the application period, with the turbine governing system operating normally.

Key words: tri-aryl phosphate esters; base oil; additives; dynamic simulation; localization; industrial application

汽轮机调速系统是调节汽轮发电机组转速，使其与外界负荷保持平衡的系统，被称为汽轮机神经中枢。磷酸酯抗燃油是发电厂汽轮机调速系统的液压工作介质，可确保汽轮机主蒸汽阀和调节蒸汽阀等快速、可靠、灵敏动作，从而保证汽轮机安全稳定运行^[1-5]。目前，国内发电机组调速系统使用的几乎均为进口磷酸酯抗燃油^[6]，受国际局势等多方面因素影响，使得我国发电企业进口磷酸酯抗燃油的采购风险与日俱增。因此，为打破我国电力行业高度依赖进口抗燃油的局面，实现其自主可控，解决该领域“卡脖子”难题，并降低发电企业运维成本，亟需开展磷酸酯抗燃油国产化研制及示范应用工作。

20 世纪 30 年代，国外开始对磷酸酯抗燃油应用开展相关研究；60 年代至今，磷酸酯抗燃油开始普遍应用至火力或核电等发电机组调速系统；近年来，ICL 以色列化工集团和德国朗盛公司开发出了 Fyrquel 系列和 Turbofluid 系列磷酸酯抗燃油，并迅速占据国内外市场。20 世纪 70 年代，国内开始了针对磷酸酯抗燃油产品的研究。最早由石油化工科学研究院和上海彭浦化工厂联合研制生产并在上海和安徽发电厂的不同机组开展应用性研究。但该磷酸酯抗燃油氯质量分数较高，最高可达到 4 000 mg/kg，造成设备腐蚀，最终未能展开大面积的工业应用。20 世纪 80、90 年代，天津滨海化工厂等单位也研制出了磷酸酯抗燃油，但随着我国高参数、大容量发电机组的不断建设，汽轮机调速系统对磷酸酯抗燃油的性能提出更高要求，国产抗燃油产品因其体积电阻率、氯含量和泡沫特性等关键指标不符合《电厂用磷酸酯抗燃油运行维护导则》标准，无法满足使用要求^[7-10]。目前，国内所有发电机组汽轮机调速系统用油依然被进口抗燃油垄断。

为打破进口磷酸酯抗燃油垄断局面，解决磷酸酯抗燃油研制过程中的关键技术问题，本文对磷酸酯抗燃油原料三芳基磷酸酯进行分析及深度处理得到高性能基础油；并通过开展添加剂研究，确定了添加剂种类和加入比例；将二者复配，获得满足《电厂用磷酸酯抗燃油运行维护导则》(DL/T 571—

2014) 的国产磷酸酯抗燃油；最后，对所制备的磷酸酯抗燃油试样进行动态模拟实验和示范应用研究，全面评估验证抗燃油性能。

1 磷酸酯抗燃油研制

1.1 磷酸酯抗燃油基础油研制

磷酸酯抗燃油是由基础油与少量添加剂复配而成，而基础油是通过三芳基磷酸酯进一步精制处理后得到，因此，磷酸酯抗燃油的性能与其使用的基础油尤其是三芳基磷酸酯的性能直接相关。三芳基磷酸酯因具有毒性低、稳定性好以及阻燃性能优异等特点常作为阻燃剂和增塑剂使用，而且三芳基磷酸酯国内生产厂家众多，产量较大^[11-15]。为充分了解国内三芳基磷酸酯与进口抗燃油的性能差异，本文选取了国内不同生产厂家生产的 3 种三芳基磷酸酯，磷酸酯纯度均为 98%。包括：以三（二甲基苯）基磷酸酯为主要成分的二芳基磷酸酯（简称 TXP），以三（异丙基苯基）磷酸酯为主要成分的二芳基磷酸酯（简称 IPPP）和以二（叔丁基苯基）苯基磷酸酯为主要成分的三芳基磷酸酯（简称 DBPP）按照《电厂用磷酸酯抗燃油运行维护导则》(DL/T 571—2014) 标准开展分析检测。表 1 为三芳基磷酸酯检测结果。

由表 1 检测结果可知：DBPP 空气释放值、IPPP 自燃点和水解安定性均比较差，与《电厂用磷酸酯抗燃油运行维护导则》标准要求有较大差距，不宜用于国产磷酸酯抗燃油的研发；TXP 在 3 种原料中综合性能较为优异，可作为基础油原料，用于磷酸酯抗燃油研制。TXP 较其他种类的二芳基磷酸酯在空气释放值、自燃点以及闪点等指标和抗老化性能方面体现出了优势，但与成品抗燃油相比，其酸值、电阻率尤其是氧化安定性等方面仍有差距，故需进行精制处理，进一步改善其性能。

采用氧化和吸附等工艺对 TXP 进行精制处理。随后对基础油（处理后 TXP）按照 DL/T 571 标准要求进行分析测试，检测结果如表 2 所示。由表 2 可知，处理后 TXP 较处理前酸值、电阻率、水解

安定性和氧化安定性指标均得到明显改善。其中，提升 10 余倍，氧化安定性由 0.48 mgKOH/g 降至 0.20 mgKOH/g，基础油稳定性能显著提升。电阻率由 $2.2 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 提升至 $3.3 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

表 1 三芳基磷酸酯检测结果
Tab.1 Test results of triaryl phosphate esters

实验项目	DL/T 571 质量指标	TXP	IPPP	DBPP
外观		透明，无杂质或悬浮物		
颜色	无色或淡黄	淡黄色	无色	淡黄色
密度 (20 °C) / (kg·m ⁻³)	1 130~1 170	1 134	1 125	1 124
运动黏度 (40 °C) / (mm ² ·s ⁻¹)	41.40~50.60	48.29	45.26	44.35
倾点/°C	≤-18	-24	-23	-23
闪点 (开口) /°C	≥240	265	247	255
自燃点/°C	≥530	563	495	535
水分/(mg·L ⁻¹)	≤600	255	232	245
酸值/(mgKOH·g ⁻¹)	≤0.050	0.035	0.048	0.056
氯质量分数/(mg·kg ⁻¹)	≤50	24	20	22
泡沫特性/(mL·mL ⁻¹)				
24.0 °C	≤50/0	10/0	30/0	20/0
93.5 °C	≤10/0	0/0	10/0	10/0
后 24.0 °C	≤50/0	10/0	0/0	0/0
电阻率 (20 °C) / (Ω·cm)	≥ 1.0×10^{10}	2.2×10^{10}	2.0×10^{10}	1.5×10^{10}
空气释放值 (50 °C) /min	≤6.0	0.6	6.5	7.4
水解安定性/(mgKOH·g ⁻¹)	≤0.50	0.10	1.27	0.33
氧化安定性				
酸值/(mgKOH·g ⁻¹)	≤1.50	0.48	1.13	0.95
钢片质量变化/mg	≤1.0	-0.2	+0.4	+0.2
铜片质量变化/mg	≤2.0	-1.2	-0.7	+0.2
颗粒污染度 (SAE AS4059F) /级	≤6	8	9	8

表 2 基础油检测结果
Tab.2 Test results of base oil

实验项目	DL/T 571 质量指标	TXP	基础油
外观		透明，无杂质或悬浮物	
颜色	无色或淡黄	淡黄色	无色
密度 (20 °C) / (kg·m ⁻³)	1 130~1 170	1 134	1 134
运动黏度 (40 °C) / (mm ² ·s ⁻¹)	41.40~50.60	48.29	48.32
倾点/°C	≤-18	-24	-24
闪点 (开口) /°C	≥240	265	269
自燃点/°C	≥530	563	565
水分/(mg·L ⁻¹)	≤600	255	192
酸值/(mgKOH·g ⁻¹)	≤0.050	0.035	0.009
氯质量分数/(mg·kg ⁻¹)	≤50	24	14
泡沫特性/(mL·mL ⁻¹)			
24.0 °C	≤50/0	10/0	0/0
93.5 °C	≤10/0	0/0	0/0
后 24.0 °C	≤50/0	10/0	0/0
电阻率 (20 °C) / (Ω·cm)	≥ 1.0×10^{10}	2.2×10^{10}	3.3×10^{11}
空气释放值 (50 °C) /min	≤6.0	0.6	0.4
水解安定性/(mgKOH·g ⁻¹)	≤0.50	0.10	0.02
氧化安定性			
酸值/(mgKOH·g ⁻¹)	≤1.50	0.48	0.20
钢片质量变化/mg	≤1.0	-0.2	+0.2
铜片质量变化/mg	≤2.0	-1.2	0
颗粒污染度 (SAE AS4059F) /级	≤6	8	5

为进一步评价基础油性能,对基础油按照《磷酸酯抗燃油闭口杯老化测定法》(DL/T 1705—2017)标准要求开展闭口杯老化实验,跟踪检测被老化油样的酸值关键指标。图 1 为老化期间 TXP 和基础油酸值变化趋势。

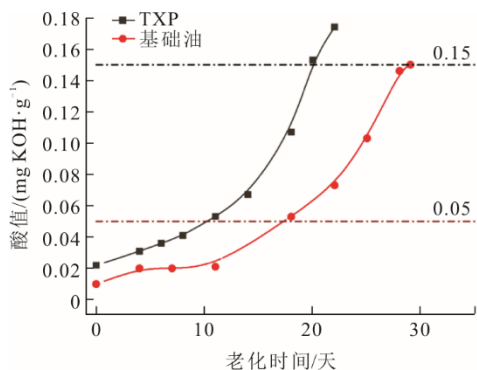


图 1 TXP 和基础油老化期间酸值对比

Fig.1 Comparison of acid values between TXP and base oil during aging

由实验结果可知,随着老化时间的延长, TXP

和基础油酸值均呈现不同程度的劣化。其中, TXP 酸值第 20 天达到 0.15 mgKOH/g, 基础油酸值在第 29 天达到 0.15 mgKOH/g, TXP 酸值劣化速度明显快于基础油。表明基础油抗老化性能明显优于深度处理前的 TXP。

1.2 添加剂配方

磷酸酯抗燃油在运行过程中,受环境影响会发生一定程度的水解和氧化,导致油样酸值升高、电阻率下降和油泥析出。为抑制以上反应的发生,需加入一定量的油品添加剂^[16-19]。通过对抗氧化剂、抗水解剂、金属钝化剂和辅助剂等多种添加剂研究,确定了添加剂复合配方和加入剂量。基础油和添加剂复配后得到国产磷酸酯抗燃油。对国产磷酸酯抗燃油进行全分析检测,结果如表 3 所示。由表 3 可知,添加剂复配后得到的国产磷酸酯抗燃油性能指标完全满足《电厂用磷酸酯抗燃油运行维护导则》标准。

表 3 国产磷酸酯抗燃油检测结果

Tab.3 Test results of domestic phosphate ester fire-resistant oil

实验项目	DL/T 571 质量指标	磷酸酯抗燃油
外观	透明,无杂质或悬浮物	
颜色	无色或淡黄	无色
密度(20℃)/(kg·m ⁻³)	1 130.0~1 170.0	1 134.0
运动黏度(40℃)/(mm ² ·s ⁻¹)	41.40~50.60	48.48
倾点/℃	≤-18	-24
闪点(开口)/℃	≥240	270
自燃点/℃	≥530	563
水分/(mg·L ⁻¹)	≤600	212
酸值/(mgKOH·g ⁻¹)	≤0.050	0.013
氯质量分数/(mg·kg ⁻¹)	≤50	13
泡沫特性/(mL·mL ⁻¹)	24.0℃	≤50/0
	93.5℃	≤10/0
	后 24.0℃	≤50/0
电阻率(20℃)/(Ω·cm)	≥1.0×10 ¹⁰	5.6×10 ¹¹
空气释放值(50℃)/min	≤6.0	0.6
水解安定性/(mgKOH·g ⁻¹)	≤0.50	0.02
氧化安定性	酸值/(mgKOH·g ⁻¹)	≤1.50
	钢片质量变化/mg	≤1.0
	铜片质量变化/mg	≤2.0
颗粒污染度(SAE AS4059F)/级	≤6	1

2 磷酸酯抗燃油性能评价

2.1 磷酸酯抗燃油静态老化实验

为进一步评价国产抗燃油性能,对国产抗燃油和 2 种市售抗燃油(1 号、2 号)进行闭口杯老化实

验,具体实验条件参照 DL/T 1705—2017 标准要求。实验期间跟踪检测抗燃油酸值,国产抗燃油和市售抗燃油老化期间酸值对比如图 2 所示。由老化实验结果可知,随着老化时间的延长,国产抗燃油与 1 号和 2 号市售抗燃油酸值均逐渐增加。2 号市售

抗燃油酸值在第 52 天达到 0.15 mgKOH/g, 1 号市售抗燃油酸值在第 57 天达到 0.15 mgKOH/g, 国产抗燃油酸值在第 67 天达到 0.15 mgKOH/g。国产抗燃油酸值劣化速度明显慢于 1 号和 2 号市售抗燃油, 稳定性能优异。

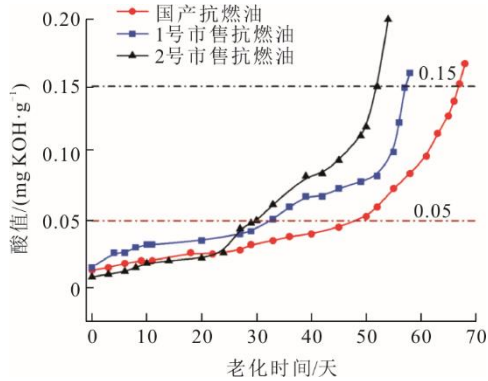


图 2 国产抗燃油和 1 号、2 号市售抗燃油老化期间酸值
Fig.2 The acid values of domestic and two commercial available fire-resistant fuels (No.1 and No.2) during aging

2.2 磷酸酯抗燃油动态模拟实验

为评价磷酸酯抗燃油在动态循环条件下稳定性能, 设计并制作抗燃油实验台架^[20-21]。动态模拟实验台架设计如图 3 所示。该台架可模拟电厂用抗燃油的实际运行工况, 提供稳定的高循环流量、高压等运行条件, 并能够提供高温等加速油品劣化的运行环境, 用以在短时间内快速评定磷酸酯抗燃油的关键性能指标。为模拟电厂抗燃油系统运行工况, 同时加快国产抗燃油老化速度, 达到快速评价国产抗燃油试样性能的效果, 设定动态模拟实验的压力为 14.5 MPa, 该压力为发电机组液压调速系统运行压力; 实验温度为 80 °C, 高于电厂抗燃油系统运行温度 (发电机组液压调速系统运行温度一般为 35~50 °C), 该温度可加速抗燃油老化。放置铜丝催化剂, 铜丝用量为 DL/T 1705—2017 标准规定用量的 2 倍, 该用量可进一步显著加速抗燃油老化, 短时间内准确评价抗燃油稳定性能。实验开始前, 用国产和市售抗燃油新油冲洗至颗粒度不大于

5 级, 注入符合 DL/T 571—2014 标准要求的国产和市售抗燃油新油, 开始动态模拟实验。

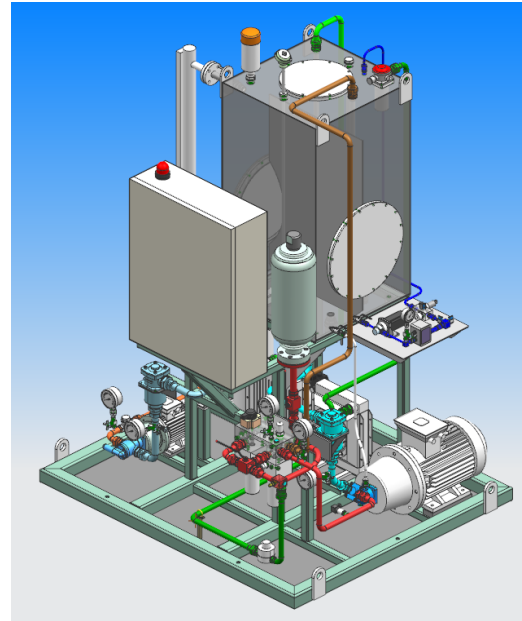


图 3 动态模拟实验台架设计
Fig.3 Design diagram of dynamic simulation test bench

动态模拟实验期间, 对国产抗燃油、1 号和 2 号市售抗燃油酸值、泡沫特性和空气释放值等指标进行跟踪检测, 检测结果如图 4 和表 4 所示。

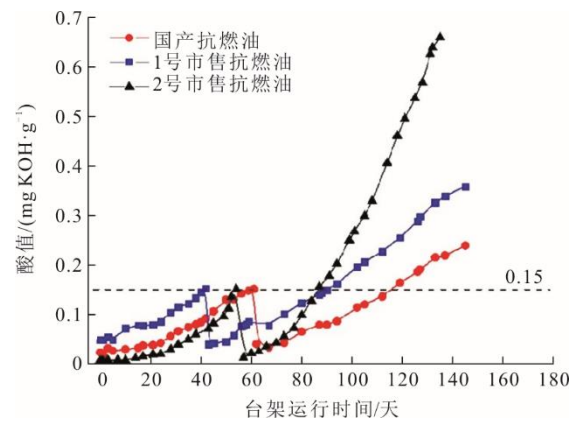


图 4 动态模拟实验期间国产和市售抗燃油酸值变化趋势
Fig.4 Comparison of acid value of domestic and commercial available fire-resistant fuels during dynamic simulation test

表 4 动态模拟实验期间国产抗燃油泡沫特性和空气释放值

Tab.4 Foam characteristics and air release values of domestic fire-resistant fuel during dynamic simulation test

项目	新油	第 31 天	第 59 天	第 90 天	第 120 天	
空气释放值 (50 °C) /min	0.4	0.9	0.7	0.8	0.7	
泡沫特性/(mL·mL ⁻¹)	24.0 °C	10/0	20/0	25/0	20/0	20/0
	93.5 °C	0/0	10/0	0/0	10/0	0/0
	后 24.0 °C	10/0	25/0	25/0	20/0	20/0

由图 4 可知,随着动态模拟实验的进行,国产抗燃油、1 号和 2 号市售抗燃油酸值均有不同程度增加。当循环至第 42 天时,1 号市售抗燃油酸值为 0.152 mg KOH/g,2 号市售抗燃油酸值为 0.067 mg KOH/g,国产抗燃油酸值为 0.092 mg KOH/g。此时,1 号抗燃油酸值已超过 DL/T 571—2014 标准要求的运行抗燃油指标,对 1 号市售抗燃油再生处理 24 h,其酸值降至 0.040 mg KOH/g。当循环至第 54 天时,2 号市售抗燃油酸值为 0.151 mgKOH/g,对其再生处理 24 h,酸值降至 0.013 mgKOH/g。当动态模拟试验进行至第 61 天时,国产抗燃油酸值为 0.151 mgKOH/g,对其再生处理 24 h 后,国产抗燃油酸值降至 0.030 mgKOH/g。随着实验台架运行时间继续延长,2 号市售抗燃油酸值增长速度明显加快,在台架运行 73 天时,其酸值已超过国产抗燃油;在台架运行 87 天时,其酸值超过 1 号市售抗燃油。当台架运行 120 天时,2 号市售抗燃油酸值已达到 0.496 mgKOH/g,此时国产抗燃油酸值为 0.164 mgKOH/g,1 号市售抗燃油酸值为 0.255 mgKOH/g。

由表 4 可知,动态模拟实验期间国产抗燃油泡沫特性和空气释放值与新油基本一致,未发生明显变化。由动态模拟实验结果可知,国产抗燃油劣化速度低于 1 号和 2 号市售抗燃油;且实验期间,国产抗燃油泡沫特性和空气释放值均符合标准要求。

3 磷酸酯抗燃油工业应用示范

为进一步评价国产磷酸酯抗燃油在实际运行环境下的应用情况,开展了国产磷酸酯抗燃油在发电机组的示范应用研究。示范机组为 A 电厂 600 MW 机组,汽轮机控制系统用油采用高压抗燃油,运行压力为 11.2 MPa,额定流量为 150 L/min。

根据示范应用计划,2023 年 10 月到 11 月在 A 电厂开展国产磷酸酯抗燃油更换工作。经油系统冲洗、油箱清理、系统滤芯更换、静态试验、注入工作油以及油动机动作等过程,完成国产磷酸酯抗燃油更换。随后进入冷态油循环过程,循环期间按照 DL/T 571—2014 标准检测,油质指标合格,机组启动。机组启动后,对油样进行连续跟踪检测,具体检测结果如图 5 所示。由图 5 可知,在示范应用过程中,磷酸酯抗燃油酸值始终保持在 0.04 mgKOH/g 以下,远低于标准要求的 0.15 mgKOH/g。该结果表明,国产磷酸酯抗燃油在运行过程中油质稳定,未发生

劣化,抗氧化和抗水解性能优异。

磷酸酯抗燃油运行过程中,会发生一定程度劣化,导致油样电阻率降低。较低的电阻率易导致伺服阀发生电化学腐蚀,对设备安全稳定运行构成威胁。因此,需及时关注油样运行过程中电阻率变化。图 6 为国产磷酸酯抗燃油在 A 电厂机组运行期间的电阻率变化情况。由图 6 可知,国产磷酸酯抗燃油体积电阻率变化具有一定波动性,但电阻率值始终保持在 $1.0 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 之上,远超标准要求的新油电阻率值 $1.0 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$,能够有效避免油样对系统精密部件的电化学腐蚀。

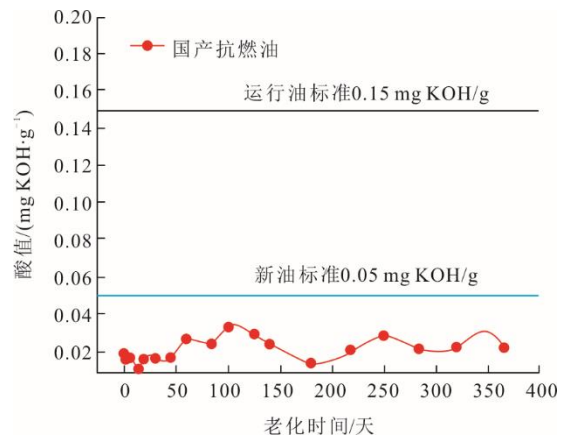


图 5 A 电厂机组示范应用期间国产抗燃油酸值变化
Fig.5 Change of acid value of domestic fire-resistant fuels during the demonstration application of unit A

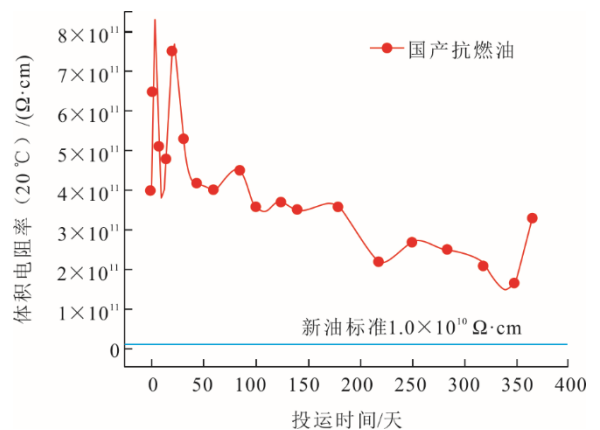


图 6 示范应用期间国产抗燃油电阻率变化
Fig.6 Change of electrical resistivity of domestic fire-resistant fuels during demonstration application

此外,应用期间油样泡沫特性和空气释放值等指标基本保持稳定,未发生明显变化,未见油泥析出。截至目前,国产磷酸酯抗燃油已在 A 电厂应用超过 1 年时间,油质仍处于新油水平,抗氧化和抗水解性能优异,各项指标保持稳定,完全满足发电

机组调速系统使用要求。

4 结 论

本文通过磷酸酯抗燃油基础油和添加剂研究,研制出符合 DL/T 571《电厂用磷酸酯抗燃油运行维护导则》标准要求的国产磷酸酯抗燃油,完成静态和动态模拟性能评价,成功在发电机组开展了示范应用。

1) 对 IPPP、DBPP 和 TXP 等不同种类的国产市售三芳基磷酸酯进行性能评价,确定适用于国产抗燃油研发的 TXP。对 TXP 进一步精制处理,得到磷酸酯抗燃油基础油。经检测油样酸值、体积电阻率尤其是氧化安定性等关键指标得到明显改善。

2) 研究了抗氧化剂、抗水解剂、金属钝化剂和辅助剂等多种添加剂,确定了添加剂复合配方和加入剂量。添加剂与基础油复配后得到满足 DL/T 571《电厂用磷酸酯抗燃油运行维护导则》标准要求的国产磷酸酯抗燃油。

3) 对国产磷酸酯抗燃油开展静态老化和动态模拟实验,结果表明国产磷酸酯抗燃油劣化速度慢于市售磷酸酯抗燃油,抗老化性能优异。

4) 对国产磷酸酯抗燃油在 A 电厂等机组开展工业示范应用研究,应用期间油质长期处于新油水平,发电机组调速系统运行正常。

[参 考 文 献]

- [1] 李冰天,王强,张军科,等.考虑阀门管理函数的汽轮机调速系统稳定性分析[J].热力发电,2021,50(2):150-156.
LI Bingtian, WANG Qiang, ZHANG Junke, et al. Stability analysis for turbine speed control system considering valve management function[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2): 150-156.
- [2] 张小科,王景钢,郭辉,等.汽轮机调速系统异常引发机组负荷波动的分析及处理[J].电站系统工程,2023,39(2):57-59.
ZHANG Xiaoke, WANG Jinggang, GUO Hui, et al. Analysis and treatment of load fluctuation caused by abnormal steam turbine governing system[J]. Power System Engineering, 2023, 39(2): 57-59.
- [3] 王金毅.汽轮机调速系统失控原因与处理措施[J].机械管理开发,2021,36(8):316-317.
WANG Jinyi. Reasons and countermeasures of turbine speed governing system out of control[J]. Mechanical Management and Development, 2021, 36(8): 316-317.
- [4] 于海航.抗燃油油质对汽轮机调速系统的影响及处理方法[J].技术与市场,2020,27(6):94-95.
YU Haihang. Influence of fire resistant oil resistance on steam turbine speed control system and treatment methods[J]. Technology and Market, 2020, 27(6): 94-95.
- [5] 王金萍.330 MW 汽轮机调节保安系统故障及实例分

- 析[J].电站系统工程,2021,37(6):41-44.
WANG Jinping. Failure and case analysis of 330 MW steam turbine regulation security system[J]. Power System Engineering, 2021, 37(6): 41-44.
- [6] 唐志斌.汽轮机进口抗燃油的维护和保养探讨[J].科技资讯,2013(11):123.
TANG Zhibin. Discussion on maintenance of imported fuel resistance at turbine[J]. Science and Technology Information, 2013(11): 123.
- [7] 杨道武,汪红梅,李宇春,等.国产 ZR-881 型抗燃油与两种进口抗燃油热稳定性的对比研究[J].热力发电,2003(12):57-59.
YANG Daowu, WANG Hongmei, LI Yuchun, et al. Comparative study on thermal stability of domestic ZR-881 fire resistant oil and two imported resistant oils[J]. Thermal Power Generation, 2003(12): 57-59.
- [8] 杨德萍.国产 ZR-881 抗燃油在现场的应用和试验[J].山东电力技术,1994(2):71-76.
YANG Deping. Application and test of ZR-881 fire resistant oil[J]. Shandong Electric Power Technology, 1994(2): 71-76.
- [9] 何绍洪,左朝禄.进口亚临界机组液压调速系统用油国产化[J].四川电力技术,2001(4):34-35.
HE Shaohong, ZUO Chaolu. Domestic production of oil for the hydraulic speed regulation system of imported subcritical units[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2001(4): 34-35.
- [10] 刘永洛.磷酸酯抗燃油在我国发电厂的应用[J].润滑油,2006,21(5):9-13.
LIU Yongluo. The application of phosphate ester hydraulic fluid in Chinese power industry[J]. Lubricating Oil, 2006, 21(5): 9-13.
- [11] 王文举,朱永国,于鲁汕.三芳基磷酸酯阻燃剂的合成[J].化学世界,1999(3):20-22.
WANG Wenju, ZHU Yongguo, YU Lushan. Synthesis of flame retardant triarylphosphate[J]. Chemical World, 1999(3): 20-22.
- [12] 吴文迎,吴凡,王兴龙,等.有机磷系阻燃剂的研究现状及展望[J].山东化工,2022,51(18):87-89.
WU Yiyang, WU Fan, WANG Xinglong, et al. Research status and prospect of phosphorus flame retardants[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(18): 87-89.
- [13] 李娜娜,姜国伟,周光远,等.有机磷类阻燃剂的合成及应用进展[J].应用化学,2016,33(6):611-623.
LI Nana, JIANG Guowei, ZHOU Guangyuan, et al. Synthesis and application progress of organic phosphorus-containing flame retardants[J]. Applied Chemistry, 2016, 33(6): 611-623.
- [14] 姜丹蕾,宋健,张庆,等.四-(2,6-二甲苯基)间苯二酚双磷酸酯的合成[J].石油化工,2010,39(5):542-547.
JIANG Danlei, SONG Jian, ZHANG Qing, et al. Synthesis of tetrakis-(2, 6-Xylyl) resorcinol bisphosphate[J]. Petrochemical Technology, 2010, 39(5): 542-547.
- [15] 龚小红,黄艳刚,乐道进.2,2'-亚甲基-双(4,6-二叔丁基苯基)磷酸酯制备新工艺[J].化学与生物工程,2012,29(2):62-63.
GONG Xiaohong, HUANG Yangang, YUE Daojin. New preparation process of 2, 2'-methylene-bis (4,6-di-tert-butylphenyl) phosphate[J]. Chemical & Bioengineering, 2012, 29(2): 62-63.
- [16] 汪红梅.磷酸酯抗燃油劣化机理的研究[J].长沙电力

- 学院学报(自然科学版), 2003, 18(3): 81-82.
WANG Hongmei. Study of the degradation mechanisms of phosphates ester fire-resistant hydraulic oil[J]. Journal of Changsha University of Electric Power (Natural Science), 2003, 18(3): 81-82.
- [17] 张贤明, 袁健, 陈彬, 等. 磷酸酯抗燃油劣化机理及脱水净化技术研究[J]. 科学与技术, 2012, 35(1): 129-133.
ZHANG Xianming, YUAN Jian, CHEN Bin, et al. Cause of quality degradation and dehydration purification technology of phosphate ester fire-resistant oil[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(1): 129-133.
- [18] 薛来, 张萍, 杨延, 等. 用抗水解剂预防抗燃油酸值上升[J]. 华东电力, 1999(12): 46-47.
XUE Lai, ZHANG Ping, YANG Yan, et al. Use anti-hydrolysing agent to prevent acid value increase in fire-resistant hydraulic fluid[J]. East China Electric Power, 1999(12): 46-47.
- [19] 汪红梅, 肖维学, 钱晖. 磷酸酯抗燃油抗氧化剂的研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2007(1): 84-87.
WANG Hongmei, XIAO Weixue, QIAN Hui, et al. Effects of anti oxidant upon the quality of phosphate ester fire-resistant hydraulic fluid[J]. Journal of Changsha University of Electric Power (Natural Science), 2007(1): 84-87.
- [20] 张文通, 马超, 胡琳芳, 等. 大型电力机组汽轮机磷酸酯抗燃油老化性能台架试验研究[J]. 润滑与密封, 2019, 44(10): 156-160.
ZHANG Wentong, MA Chao, HU Linfang, et al. Experimental study on aging resistance of phosphate ester fire-resistant oil of steam turbine[J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(10): 156-160.
- [21] 靳江波, 王笑微, 蒋朦, 等. 运行温度对磷酸酯抗燃油热氧化安定性的影响[J]. 热力发电, 2017, 46(3): 77-81.
JIN Jiangbo, WANG Xiaowei, JIANG Meng, et al. Effect of running temperature on thermal oxidation stability of phosphate ester fire-resistant oil[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(3): 77-81.

(责任编辑 杨嘉蕾)