

DOI: 10.19666/j.rlfed.202508069

# 清洁化发展下废风电齿轮油回收方式探讨

赵 晶, 王洪亮, 侯 波, 刘向辉, 刘 展, 张思索, 布雨薇,  
湛晨宇, 李子菡, 何发泉  
(国能龙源环保有限公司, 北京 100039)

**[摘 要]** 近年来, 风电累计装机容量的快速扩增带动了风电运维市场需求持续攀升, 风电齿轮油是运维中不可或缺的重要组成部分。因废风电齿轮油含有重金属、降解添加剂等有害成分, 被归类为危险废物, 其高效资源化与无害化处理对实现风电行业清洁化发展至关重要。首先, 基于风电齿轮油的特性与组成, 阐述了其在运行过程中因外来污染、高温高压氧化及添加剂降解等原因导致的运动黏度、倾点、水分、颗粒污染度、酸值及元素 (Fe、P、S 等) 等典型性能指标变化规律和原因; 系统梳理了当前废矿物油再生工艺的最新研究进展, 涵盖预处理及分子蒸馏、溶剂萃取、加氢精制等主流技术路线, 并分析了上述方法在延长废风电齿轮油寿命及回收再生上的可行性及局限性, 如处理效率低、深度不足以及规模化应用受限等问题; 最后, 从产业层面、技术层面、全链条管理方面探讨了以合成型风电齿轮油为代表的高价值废油未来的发展方向, 强调构建分级分类回收体系、开发绿色高效再生工艺与全生命周期管理将是实现风电行业循环经济的关键路径。

**[关 键 词]** 风电运维; 齿轮油; 废油再生

**[引用本文格式]** 赵晶, 王洪亮, 侯波, 等. 清洁化发展下废风电齿轮油回收方式探讨[J]. 热力发电, 2026, 55(1): 30-38.  
ZHAO Jing, WANG Hongliang, HOU Bo, et al. Discussions on clean regeneration of waste lubricating oil for wind turbine gearboxes[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(1): 30-38.

## Discussions on clean regeneration of waste lubricating oil for wind turbine gearboxes

ZHAO Jing, WANG Hongliang, HOU Bo, LIU Xianghui, LIU Zhan, ZHANG Sisuo, BU Yuwei,  
ZHAN Chenyu, LI Zihan, HE Faquan  
(China Energy Longyuan Environmental Protection Co., Ltd., Beijing 100039, China)

**Abstract:** The rapid expansion of the cumulative installed capacity of wind power in recent years has driven the continuous growth of market demand for wind power operation and maintenance (O&M). Lubricating oil for wind turbine gearboxes is an indispensable and crucial component in O&M. The waste lubricating oil for wind turbine gearboxes is classified as hazardous waste due to its harmful components such as heavy metals and degraded additives. Its efficient recycling and harmless treatment are crucial for achieving clean development in the wind power industry. Firstly, based on the characteristics and composition of waste lubricating oil, the variation laws and underlying causes of typical performance indicators during operating are expounded, including kinematic viscosity, pour point, moisture content, particle contamination level, acid value, and elements (e.g. Fe, P, and S). These variations are primarily induced by factors such as external contamination, oxidation at high temperatures and pressures, and additive degradation. On this basis, the latest research progress in current waste mineral oil regeneration processes is systematically summarized, covering mainstream technical routes such as pretreatment, molecular distillation, solvent extraction, and hydrofining. Furthermore, the feasibility and limitations of the aforementioned methods in extending the service life of waste lubricating oil and realizing its recovery and

收稿日期: 2025-08-31 修回日期: 2025-09-06 接受日期: 2025-09-16 网络首发日期: 2025-10-24

基金项目: 国家能源集团科技创新项目 (GJNY-24-27-2)

Supported by: Science and Technology Innovation Program of CHN ENERGY (GJNY-24-27-2)

第一作者简介: 赵晶 (1994), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为风电润滑油配方研发及废油再生技术, 20049844@ceic.com.

通信作者简介: 何发泉 (1970), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为新能源固废无害化处置资源化回收, 17240111@ceic.com.

regeneration are analyzed. The identified limitations include issues such as low treatment efficiency, insufficient processing depth, and restricted application. Finally, the future development directions of high-value waste oils represented by synthetic lubricating oil for wind turbine gearboxes are discussed from the perspectives of industrial development, technological advancement and life management. It emphasizes that establishing a classified recycling system, developing green and efficient regeneration processes, and implementing life management will be the key pathways to realizing a circular economy in the wind power industry.

**Key words:** wind power operation and maintenance; gear oil; waste oil regeneration

近十余年来,中国新能源产业平稳快速增长。经过 40 多年发展,我国已形成相对完整的风电产业链,截至 2025 年 6 月,全国风电累计装机容量 5.73 亿千瓦,同比增长 22.7%,占全国发电装机容量比重 15.7%,稳居全球第一<sup>[1]</sup>。风电累计装机容量的快速扩增带动了风电运维市场需求持续攀升。风电润滑油以在接触界面形成油膜的方式减少风电机组各部件间的摩擦,同时还兼具冷却、清洁、密封等辅助功能,是运维中不可或缺的重要组成部分。风电齿轮油润滑部位如图 1 所示。风机实际运行过程中,由于润滑不良引起的风机故障占比近 1/3,风电润滑油品质好坏及润滑系统维护和保养对风机在极端环境下长期稳定运行至关重要。

双馈风机润滑油的主要润滑部位包括主齿轮箱(增速器)、偏航和变桨驱动减速器、液压系统等。其中,主齿轮箱、偏航和变桨驱动减速器是风电机组的主要部件,使用齿轮油进行润滑(图 1);液压

系统进行液压制动和变桨控制,使用液压油进行润滑。某风电场机组润滑油用量统计如表 1 所示。主齿轮箱是风电机组的关键部件,用于将低风轮转速增速至原先的几十倍后传动给发电机,一旦出现问题将导致长时间停机。主齿轮箱的齿轮油用量约占整个风机用油的 3/4 以上,是用量最大的风电润滑油<sup>[2]</sup>。

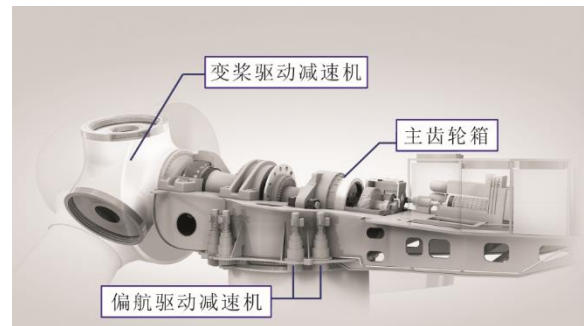


图 1 风电齿轮油润滑部位  
Fig.1 Lubrication locations for wind turbine gear oil

表 1 某风电场机组润滑油用量统计  
Tab.1 Statistics of lubricating oil consumption for a wind turbine system

机组负荷/MW	部件名称	油品型号	设备容量/L	清洗用量/L
1.5	主齿轮箱	320 号	260.0	200
	偏航、变桨减速器	150 号、220 号	61.0	15
	液压站	32 号	20.0	5
2.0	主齿轮箱	320 号	400.0	300
	偏航、变桨减速器	150 号、220 号	61.0	15
	液压站	32 号	20.0	5
3.0	主齿轮箱	320 号	650.0	500
	偏航、变桨减速器	150 号、220 号	61.0	15
	液压站	32 号	20.0	5
6.0	主齿轮箱	320 号	720.0	720
	偏航、变桨减速器	150 号、220 号	145.2	30
	液压站	32 号	20.0	5

## 1 风电齿轮油介绍

风机造价高且风电场大多处于野外偏远地区,设备易受极热、极寒、沙尘和盐碱地等环境影响,维护成本极高。为确保风机长期稳定运行,对风电

润滑油尤其是风电齿轮油的品质要求极高: 1) 抗微点蚀性能强,在机组低速高负荷运行条件下可有效预防齿轮啮合面产生微小疲劳裂纹及材料转移,延长齿轮箱寿命; 2) 具备极压抗磨保护,可应对重载荷和无规律变相载荷工况,保障轴承和齿轮在频繁

启停的工况下不发生擦伤胶合；3) 高低温性能优异，可适应风电场极端温差环境（-40~50℃），确保低温流动性和高温稳定性；4) 使用寿命长，降低机组维护频次，保障运维人员生命安全<sup>[3]</sup>。

为满足上述要求，风电齿轮油一般选用以合成基础油和高性能添加剂为原料的润滑油产品<sup>[4]</sup>。其中，合成基础油一般为聚 $\alpha$ -烯烃（PAO），相比矿物油，具有更好的黏温性能、更高的化学稳定性和极压性能，是生产高档润滑油脂的重要原料，可以替代传统的石化炼制基础油，延长润滑油的使用寿命3~5倍，提高燃料经济性，大幅降低石油产品消耗被广泛应用，被美国石油协会单独列为IV类基础油<sup>[5]</sup>。传统PAO由长链 $\alpha$ -烯烃在 $\text{BF}_3$ 或 $\text{AlCl}_3$ 等强路易斯酸催化剂催化下进行齐聚，并经过蒸馏、加氢等工艺获得氢化 $\alpha$ -烯烃低聚体，被称为cPAO<sup>[6-7]</sup>。但 $\text{BF}_3$ 生产工艺对装置的防腐性能、安全性和密封性等要求较高，尤其对后处理及排放要求极其严苛，且聚合产物链结构的规整性存在欠缺。通过茂金属催化体系合成不同黏度等级的PAO是近些年来PAO合成的发展方向之一，为区别于传统cPAO，这种新的PAO被称为mPAO，其在催化反应活性、工艺条件等方面都优于cPAO，使用环境更加广泛<sup>[8-9]</sup>。

但是，生产PAO基础油的主要核心技术被国外垄断，无论是高性能催化剂，还是聚合工艺及关键设备，均缺乏同等质量的国产替代产品，主要依赖

进口。因此，风电齿轮油成为风电产业链中唯一没有完全实现国产化的环节，属于典型的高端垄断细分产业。目前，市场上通常以美孚、壳牌、嘉实多等进口润滑油品牌为主要采购对象，成品油产品售价在8万~10万元/t。一般1台1.5MW风电机组单次采购及更换主齿轮箱润滑油的费用约在3万~4万元，占到总换油费用的70%以上<sup>[10]</sup>。随着风电产业的蓬勃发展，国内润滑油企业开始重视国产风电齿轮油产品开发，中石化长城润滑油、中石油昆仑润滑油等少数供应商开始生产风电齿轮油，但国内市场占有率不到5%。

## 2 风电齿轮油劣化过程

齿轮油在长期运行过程中通常会因为污染和老化而发生变质，严重影响油品的物理和化学性质，进而影响齿轮箱的使用寿命而带来安全隐患。一般4~7年风电主齿轮箱润滑油就会进行1次更换。通过监测及分析油品指标，如酸值、黏度、颗粒污染度等（表2）关键指标的动态变化，以确定是否达到换油条件，从而保障设备安全运行，减少不必要停机<sup>[11]</sup>。《风力发电机组润滑剂运行检测规程》（NB/T 10111—2018）详细规定了在运行风电机组油品取样、检测的技术要求及警戒值，主齿轮箱运行油常规指标包括：运动黏度、颗粒污染度、酸值、水分含量、元素含量等，为每年必检项目，风电运营商也会依据实际情况调整监测频次。

表2 废风电齿轮油理化指标分析  
Tab.2 Analysis of physicochemical indicators of waste wind turbine gear oil

序号	检测指标	变化趋势	原因	影响
1	运动黏度	↑或↓	因设备异常磨损产生的剪切作用、水分稀释、不同黏度的油品混用、油品使用时间较长后劣化等	黏度下降会导致油膜变薄，摩擦副直接接触后发生异常磨损；黏度上升会导致油膜变厚，散热困难
2	倾点	↑	油品氧化、降解后生成的复杂产物	低温启动时无足够润滑油膜保护，导致设备磨损
3	水分	↑	油品未储存在阴凉干燥处，齿轮箱呼吸孔、干燥剂和旁路过滤器未更换（若安装）等	易造成油品乳化，影响油膜形成，降低油膜强度；加速齿面锈蚀和油品氧化；润滑油添加剂水解失效
4	颗粒污染度	↑	齿面磨损、胶合、点蚀、断齿等磨损颗粒（4~6 $\mu\text{m}$ ），外来沙尘等污染物（Si元素异常）	磨损颗粒存在时，一方面是良好催化剂，会加速油品氧化速度，继而生成油泥、漆膜和酸性物质；另一方面，对齿面造成异常磨损，降低齿轮平稳性和寿命
5	酸值	↑	运行过程中，长期受高温、极压、空气、水分等影响，形成的降解（如氧化物）产物中存在酸性组分	反映油品氧化变质程度，对摩擦副表面造成腐蚀
6	元素含量	磨损元素（Fe、Cu）↑ 添加剂元素（P、S）↓	磨损元素高，油膜变薄、酸值组分腐蚀金属表面等导致齿轮箱齿面、轴承出现点蚀、疲劳剥落等异常磨损现象	磨损元素高会加速磨损、齿轮箱故障；添加剂含量低，失去极压性、抗磨性，加速齿轮箱磨损
7	泡沫特性	↓	抗泡剂被大量消耗或被风机过滤系统截留	齿轮油泡沫多，溢流、油位信号不准，润滑不良

风电齿轮油劣化的原因主要有两方面：1) 物理因素，外来水分、灰尘的进入及齿面轴承磨损产生的金属微颗粒，会引起油液清洁度降低及油品乳化现象发生，是造成风电齿轮油失效的主要原因；2) 化学反应，一方面因油品中的添加剂分解或失效，生成含 S、含 P 的腐蚀性盐，使油品性能下降，另一方面在高温、极压、空气、水分等影响下，磨损产生的 Fe、Cu 离子催化效应使油品中的烃类物质氧化速率提高 2~3 倍，无抗氧化剂保护的基础油开始出现自身的氧化裂解反应，具体表现为先形成醛、酮、醇及羧酸等初级氧化产物，接着产物之间发生缩聚、交联反应继而形成大分子不溶物油泥、漆膜和胶质等，最终导致油品颜色变暗，黏度增加，酸值增大<sup>[12-14]</sup>。

为延长风电齿轮油的寿命，降低换油频次和废油处置成本，一些风电机组上加装了在线精过滤系统。在线精过滤系统由高效玻璃纤维预过滤系统及脱水膜等组件构成，精度通常为 10~50 μm，可二次过滤颗粒污染物、大分子降解产物及部分游离水、乳化水及溶解水，且过滤效果显著，水分降比达到 80% 以上，粒径大于 4、6、12 μm 的颗粒物降比均达到 90%，将换油周期由 3~5 年延长至 5~7 年<sup>[15]</sup>。

### 3 废矿物油回收再生技术现状

石油资源在我国属于战略稀缺性资源，废润滑油作为一种兼具环境风险与资源价值的危险废物，其中 75%~90% 为可回收的基础油组分，通过再生技术可转化为 I 类/II 类基础油或燃料油，其能耗比原油炼制节约 50%~80%，碳排放可减少 58% 以上<sup>[16]</sup>。此外，1 t 废润滑油再生可节省约 2~3 t 原油，但再生基础油价格较原油炼制低 30%，因此其回收利用一直是实现“双碳”目标与循环经济的重要环节。

国内废润滑油回收成规模的主要以废矿物油为主，相比风电齿轮油，其再生处置路线较为成熟。《废矿物油类润滑油处理处置方法》(GB/T 41961—2022) 明确规定了废矿物油再生处理的工艺流程和技术方法。2024 年《废矿物油回收与再生利用导则》(GB/T 17145—2024) 在《废润滑油回收与再生利用技术导则》(GB/T 17145—1997) 的基础上将废润滑油扩充为废矿物油，具体为废机油、废液压油、废齿轮油、废变压器油、废溶剂油等 10 余种矿物油<sup>[17]</sup>，进一步将预处理工艺后的精制工艺限定为蒸馏、溶剂精制、加氢精制等几种工艺或组合形式<sup>[18-21]</sup>，此

外还支持分子蒸馏等新型连续操作技术。

#### 3.1 预处理工艺

预处理工艺包括沉降、过滤、离心和絮凝等常见的分离工艺，利用废油中杂质密度存在一定差异除去废油中大颗粒、水分和稳定存在的胶体微粒，适用于使用时间不长、变质程度不明显的废油或作为精制工艺的前处理步骤，可提高后续的再生工艺及设备的处理效率<sup>[22]</sup>。

#### 3.2 精制工艺

##### 3.2.1 分子蒸馏工艺

分子蒸馏又称短程蒸馏技术，主要利用不同物质分子运动平均自由程的差异实现分离，具体实施时一般为多级分子蒸馏器串联进行馏分切割，从而得到不同黏度的润滑油基础油、汽柴油，并将废润滑油中的劣化轻组分和重组分分离出来<sup>[23-24]</sup>。相比传统常减压蒸馏，分子蒸馏可以实现高效传质传热，具有条件温和、蒸馏时间短、分离效率高的优点，避免了长沸程下局部过热导致的油品炭化、聚合、裂解问题。

周松锐等<sup>[25]</sup>采用一级薄膜蒸发加二级分子蒸馏再生废润滑油工艺，可将柴油轻组分及润滑油馏分分别蒸馏出来，同时脱除含胶质、沥青质和重质芳烃等物质，工艺流程简单，再生后的润滑油可达到新油基础油的技术指标。尹英遂等<sup>[26]</sup>开发的分子蒸馏窄分技术，为 370~450 °C、450~500 °C、500~540 °C 3 级分子蒸馏器串联，在真空度 ≤5 Pa 条件下，产品达到 MVI 100、MVI 250、MVI 350 基础油指标，回收率高达 92.1%。目前，分子蒸馏窄分技术已在 3 万 t/a 废油再生厂成功进行了工业化应用。

但单纯的分子蒸馏技术存在很难脱除极性氧化组分，改善色度、酸值等问题，常与白土吸附、溶剂萃取、加氢精制等深度净化工艺一起使用，才能得到符合指标的润滑油基础油。

##### 3.2.2 溶剂萃取工艺

溶剂萃取工艺通过溶剂选择性溶解废油中的非理想组分（如胶质、沥青、氧化产物等），实现基础油再生，具有操作条件温和、能耗较低的特点，回收率在 70% 左右，再生产品为 I 类润滑油基础油 100 SN、150 SN、250 SN，是目前工业化应用最广泛的再炼制工艺之一<sup>[27]</sup>。为了降低硫酸-白土工艺中的硫酸用量，最早选用丙烷为溶剂萃取剂，但考虑到易燃易爆性，目前工业上应用最广泛的是糠醛

和 N-甲基吡咯烷酮 (NMP) [28], 两者的性能参数对比见表 3。

表 3 糠醛和 NMP 萃取剂性能比较  
Tab.3 Performance comparison of furfural and NMP extractant

项目	糠醛	NMP
原料适应性	较好	一般
原料选择性	较好	一般
与水共沸	有	无
溶解能力	一般	较好
剂油比	偏大	偏小
操作温度	偏高	偏低
化学稳定性	一般	较好
生物毒性	偏大	偏小
腐蚀性	偏大	偏小
回收能耗	偏高	偏低
价格	较低	较高

糠醛对原料有很好的适应性、价格低廉且工业上易获得。韩忠义等[29]提出了以糠醛为溶剂的精制工艺, 通过单因素实验和正交实验优化得到最佳工艺参数为: 剂油比 2:1, 精制温度 85 °C, 此时再生油回收率达 85.3%, 黏度指数提升至 126, 残炭量降至 0.083%, 各项指标均接近新油标准。此外, 他们通过气相色谱-质谱联用 (GC-MS) 技术分析发现: 糠醛通过缔合作用吸附极性杂质, 在溶剂回收阶段通过温度调控实现溶剂与杂质的高效分离, 溶剂循环利用率达 92%; 但糠醛溶解度小、剂油比大、溶剂回收能耗高、劣化容易导致设备管道结焦堵塞问题, 阻碍其进一步应用[30]。宋威等[31]提出了轻质烃和糠醛复配的方法, 选用环氧氯丙烷-糠醛复合溶剂体系, 在复配体积比 1:1 的情况下, 可以在 15~35 °C 进行精制, 且溶剂选择性好于单纯的糠醛精制, 再生油品质更好且回收率提高了 3%。郭大光等[32-33]为了验证复合溶剂的效果, 比较了糠醛与 N,N-二甲基甲酰胺、正丁醇复配后的精制效果, 发现回收率达到 91.7%、88.5%, 且颜色、黏温性能均高于单一溶剂糠醛。

NMP 毒性低、挥发性小、稳定性好, 是一种常见的绿色溶剂[27], 且 NMP 在后续溶剂回收过程中不会与水形成共沸物, 因此回收工艺相对简单[34-35], 具体回收工艺流程如图 2[27]所示。苏佩汝等[36]选用了 NMP 作萃取溶剂发现, 溶剂与废润滑油比为 1.8:1.0, 精制温度为 95 °C 时, 再生油的回收率可以达到 64.9%。韩丽君等[37]针对工业废润滑油, 开发出 NMP 和乙醇胺双溶剂体系, 在复配体积比为

95:5, 精制温度为 70 °C 时, 精制油品回收率可达到 89%, 满足 API II 类基础油和工业润滑油指标, 且乙醇胺的价格要远低于 NMP, 有效地降低了操作成本。侯文贵等[38]开发的 NMP 混合溶剂精制工艺, 总产品回收率高达 85%, 但溶剂消耗仅为每吨废油 0.5 kg, 该技术已在山西 5 万 t/a 废润滑油再生装置和唐山 1 万 t/a 废润滑油再生装置成功投产。

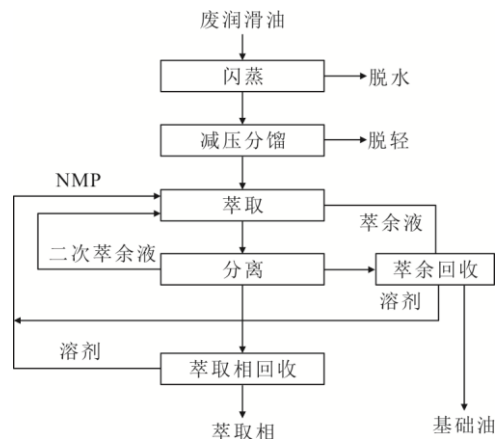


图 2 典型 NMP 溶剂萃取工艺  
Fig.2 Typical NMP solvent extraction process

但溶剂萃取工艺始终存在环境污染和安全隐患, 因此很多研究人员开展了超临界 CO<sub>2</sub> 抽提废润滑油工艺的探索, CO<sub>2</sub> 溶解性好且不易燃, 在常温下就能操作, 对热敏性废油友好。杨鑫等[16]控制萃取温度在 35 °C, 压力 16 MPa, 萃取时间 3 h, 助溶剂正己烷质量分数 10% 时, 可得到 API II 类基础油 HVI 150, 金属元素及添加剂含量均显著减低, 但目前回收率还没达到相对满意的结果。

### 3.2.3 加氢精制工艺

加氢精制通过催化加氢反应脱除 S、N、O 等杂原子及金属杂质, 同时饱和芳烃、修复基础油分子结构, 是目前国际上主流的清洁再生技术, 回收率在 80%~90%, 再生产品为 II 类基础油 100 N、150 N、250 N 及柴油等。但我国废润滑油源头分级不足, 导致废油成分复杂, Fe、Cu、Ca 等金属和氯化物含量偏高, 会沉积在加氢催化剂表面导致失活, 因此直接套用国外加氢工艺会面临加氢单元负荷过高的问题, 需采用一定的手段进行脱除。

常见蒸馏-加氢精制工艺, 是通过真空蒸馏得到的理想馏分在催化剂作用下进行加氢处理。如 KTI 工艺, 采用常压蒸馏、薄膜蒸馏手段脱去水、轻油、气体油和含金属、杂质的塔底油组分 (一般用于生产沥青), 其余组分直接进加氢反应器, 经分

馏后得到轻油及基础油，液体回收率为 83%，但该工艺反应条件和原料苛刻，不适合大规模废油处置<sup>[39]</sup>。HyLube 工艺是一种改进的临氢状态下的蒸馏-加氢工艺，工艺流程如图 3 所示。在蒸馏前将热氢气和废油进行充分混合，再进入闪蒸-蒸馏塔，不仅解决了减压蒸馏工艺易导致管路结焦、堵塞问题，而且通过后置保护反应器的方式脱除金属，省去了预处理过程，适合杂质成分复杂的废矿物油，再生基础油品质能达到 API II 类基础油要求，且回收率能达到 70% 左右，已由德国 Elsteraue/Zeitz 的 Puralube GmbH 成功商业化。

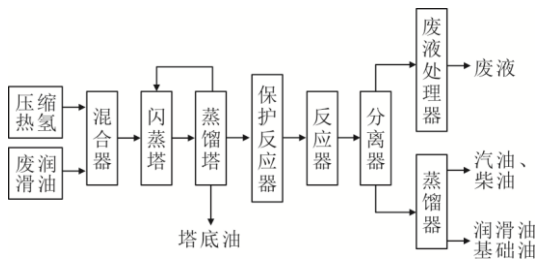


图 3 HyLube 工艺流程  
Fig.3 HyLube process flow

预处理脱金属-加氢精制工艺也是一种主要的处理手段。美国菲利普石油公司开发的 PROP 工艺引入磷酸氢二胺水溶液的化学脱金属方式代替蒸馏操作，在脱金属的同时完成了脱水、脱轻操作，简化了工艺流程。柴永明等<sup>[40]</sup>开发的“浆态床临氢预处理-固定床加氢精制”组合加氢工艺，在预处理阶段采用自硫化油溶性过渡金属催化剂 (Ni/Mo/Co/Fe)，在反应温度 390 °C，氢分压 8 MPa 条件下，实现金属和非金属杂原子去除率 99.4%，氯脱除率 99.3%，液体回收率高于 98%，基础油回收率 78%。此外，杨海玉等<sup>[41-42]</sup>从分子结构层面揭示了热解脱金属的机理，分别以十二烷基苯磺酸钙、二烷基二硫代磷酸锌为模型化合物，通过一系列的亲核取代反应和分子内消除反应使得 Ca、Zn、P 元素以多焦磷酸锌和 ZnO、CaO 和 CaSO<sub>4</sub> 的形式从油中脱除，基于此开发的连续热解脱金属工艺，金属去除率达 99.2%，为后续加氢提供了优质原料。

#### 4 废风电齿轮油回收可行性分析

风机齿轮油为合成型润滑油，结构单一，具有良好的化学稳定性，即使经长期使用后劣化程度仍较低。蒲宸光等<sup>[43]</sup>对 5 年期满齿轮油的指标监测表明：黏度变化率最大仅为 0.97%，远低于警戒值 ±10%；酸值增加趋势较小，未有明显的氧化变质指

征；水分含量及 Fe 元素含量均在指标范围内。若以表 1 所述单台风电机组单周期耗齿轮油新油和清洗油量为基准，5 年为 1 次更换周期进行计算，预计到 2025 年底全国将产生 2.7 万吨废风电润滑油。针对废风电齿轮油，目前面临现状包括：1) 风电润滑市场长期被国外品牌垄断，国内风电运营企业面临新油采购成本高与废油处置费用上升的双重压力；2) 废合成油与废矿物油掺混处置，降低了合成油价值；3) 针对废风电齿轮油的专用再生技术研究仍处于起步阶段，国内尚处于技术开发初期，国外亦未见成熟技术报道，难以满足风电行业对废油资源化、清洁化处置的需求。但无论是原料端提升新油品质，还是使用端加强过程润滑管理，废油再生都是收效最为直观的手段，也是近年风电厂商、运营商关注的重点。废油多为清洁度、Fe 含量及水分异常，因此国内现阶段的再生工艺多为预处理及物理再生工艺。

#### 4.1 现场延寿工艺

现场延寿工艺通过简单预处理工艺进行现场废油处置，延长废风电齿轮油的使用寿命，避免废油运输过程中的环境风险。

王娟等<sup>[44-45]</sup>开发了一种现场再生处理系统，包括真空脱水系统、磁性过滤系统、再生系统、过滤系统、添加剂自动补加系统、油质在线监测系统，其中再生系统装有强极性介孔吸附剂，可有效除去油品中溶解性老化产物及添加剂组分，降低油品酸值，改善油品的泡沫特性，提高油品性能。

杨东翔等<sup>[46]</sup>开发了一套“多级过滤-蒸馏”在线回收系统(图 4)，该系统首先通过初级过滤器去除废润滑油中的大颗粒固体杂质；随后将油液加热至 70~160 °C 并投入化学药剂以去除氧化物；再经中间过滤器和树脂过滤器脱除金属离子，接着采用合金超滤膜精滤；最后通过真空蒸馏塔以脱除水分和轻组分；再生后的油品经补充添加剂调和后，直接回输至风机齿轮箱润滑油箱，实现在线循环使用。

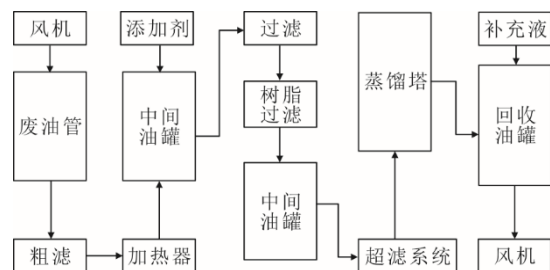


图 4 在线回收系统工艺流程  
Fig.4 Process flow of the on-line recycling system

## 4.2 物理再生工艺

王可可等<sup>[47]</sup>创新性地发明“絮凝破乳-颗粒过滤-油水分离”3段式工艺,废齿轮油先进入絮凝破乳化过滤池进行反应,再经特殊处理后的过滤网拦截团聚大颗粒,然后借助自身重力,通过多级组件实现油水分相,完成净化再生,最终水分质量分数由处理前的 $97.3 \times 10^{-6}$ 降低至 $24.7 \times 10^{-6}$ 。

施仲扬等<sup>[48]</sup>开发了“热沉降-絮凝-吸附”物理组合再生工艺,先通过热沉降去除风电废润滑油中的水分和大颗粒机械杂质,再采用壳聚糖- $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 二次絮凝脱除胶体微粒与酸性物质,最后经硅胶接触吸附脱色,处理后再生油的回收率约为60%,酸值由 $0.258 \text{ mgKOH/g}$ 降低至 $0.006 \text{ mgKOH/g}$ ,机械杂质由3.625%降至0.032%,透光率由7.31%提升至59.76%,油品外观显著改善,接近新油标准。

物理再生技术也得到相关企业实践验证,明阳集团华阳长青公司采用连续化絮凝-沉降-蒸馏集成工艺,在沉降罐内增设分隔板推动油液连续沉降分离,于蒸馏塔内布置加热管破坏油膜并强化传热均匀性,实现再生流程连续化运行,预计再生油使用寿命可达5年,无需化学反应,进一步降低能耗及污染物排放<sup>[49]</sup>。

## 4.3 化学再生工艺

龚海峰等<sup>[50]</sup>开发了“预处理-分子蒸馏-加氢精制”组合再生工艺(图5),先热沉降(20~30℃、48~96h)与减压蒸馏(60~80℃、0.02~0.55MPa)脱水、脱轻和杂质,再经单级分子蒸馏(180~250℃、20~40Pa)获得粗基础油,最后采用Ni基加氢催化剂在氢气氛围下进行加氢提质(250~450℃、2.5~8.0MPa、3~12h)处理后再生基础油性能显著提升,酸值由 $0.58 \text{ mgKOH/g}$ 降至 $0.005 \sim 0.0064 \text{ mgKOH/g}$ ,40℃,运动黏度由 $43.48 \text{ mm}^2/\text{s}$ 降至 $14.23 \sim 15.16 \text{ mm}^2/\text{s}$ ,色度与S、N含量也大幅降低,再生油各项指标接近新油标准。

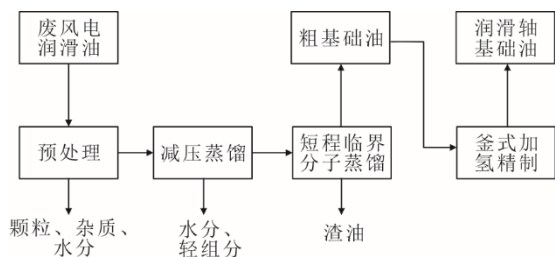


图5 预处理-分子蒸馏-加氢精制工艺

Fig.5 The pretreatment-molecular distillation-hydrorefining process flow

## 5 结 语

目前,国内合成型废油的规模有限,国家尚未出台针对性的回收标准与政策,具体实施过程中主要依照HW08类危险废物进行统一处置。此外,风电齿轮油回收领域的技术重点集中于物理再生与延寿工艺,该类方法对风电齿轮油的处理效率有限,处理深度不足,制约了其大规模工程推广及应用。未来,随着合成型润滑油使用量的增长,政策构建、产业布局与核心技术研发仍是需要深入探索的关键方向。

产业层面,以合成风电齿轮油为代表的高价值废油未来5年可按“分级再生”产业生态布局。针对劣化程度较低的废油,经物理再生后回用至风机,可实现现场延寿;中等劣化程度的废油通过蒸馏-溶剂精制/加氢工艺工艺改善,用于生产高端再生基础油;低值废油经脱金属处理后可转为清洁燃料使用。

技术层面,建议重点关注清洁化的绿色再生工艺,如超临界萃取、膜分离及加氢精制工艺,获得高质量的再生基础油产品;同步开发便携的在线再生装置,用于劣化程度较低的油品延寿,从而适应风场散点分布的特点,降低运输成本。

全链条管理方面,从原料端提升新油品质(如推广使用性能更好的mPAO基础油,延长质保期)或开发可降解的风机齿轮油产品。使用端要强化油液监测并安装旁路过滤系统,延缓物理因素导致的油品变质。回收端推进物理-化学协同再生工艺,改善再生油品质,从而构建“新油-使用-再生”全生命周期模式。

## [参 考 文 献]

- [1] 国家能源局. 2025年上半年可再生能源并网运行情况[R/OL]. (2018-08-29) [2025-07-31]. <https://www.nea.gov.cn/20250731/36b5b3b74d344325bb67f38b8e943c18/c.html>. National Energy Administration. Update on grid integration of renewable energy in the first half of 2025[R/OL]. (2018-08-29) [2025-07-31]. <https://www.nea.gov.cn/20250731/36b5b3b74d344325bb67f38b8e943c18/c.html>.
- [2] 张美琼,柯友胜,张霞玲,等. 矿物油组分生产风电齿轮油的可行性分析[J]. 润滑油,2018(5): 19-23. ZHANG Meiqiong, KE Yousheng, ZHANG Xialing, et al. Feasibility analysis on mineral oil used in gear oil for wind power[J]. Lubricating Oil, 2018(5): 19-23.
- [3] 陈惠卿. 风电齿轮油供应商调查[J]. 合成润滑材料, 2017(2): 26-31. CHEN Huiqing. Survey of wind turbine gear oil suppliers[J]. Synthetic Lubricants, 2017(2): 26-31.

- [4] YU L H, LEE C H, KRENG V B. The application of fuzzy delphi method and fuzzy AHP in lubricant regenerative technology selection[J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(1): 419-425.
- [5] JESSICA P, MARIA E R, BESSER, et al. A comprehensive review of sustainable approaches for synthetic lubricant components[J]. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 2023, 16(1): 2185547-2185575.
- [6] FERDINAND RWP W, WASIUCIONEK M, HUTTNER G, et al. Ansa-metallocene derivatives: VII. synthesis and crystal structure of a chiral ansa-zirconocene derivative with ethylene-bridged tetrahydroindenyl ligands[J]. *Journal of Organometallic Chemistry*, 1985, 288(1): 63-67.
- [7] YURY V K, SCHWAB FREDERICK C. Post-oligomerization of alpha-olefin oligomers: a route to single-component and multicomponent synthetic lubricating oils[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 111(1): 273-280.
- [8] 李浩, 盛晓明, 杨瑞晗, 等. 风力发电润滑油技术与市场[J]. *山东化工*, 2025(2): 89-91.  
LI Hao, SHENG Xiaoming, YANG Ruihan, et al. Technological progress and market outlook for gear lubricating oil of wind driven generator[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2025(2): 89-91.
- [9] BHAWNA S, VERMA A, KUKRETY A, et al. Effective polymerization of linear higher alpha olefins from refinery stream for lubricant application[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2023, 63(6): 1691-1701.
- [10] 韩雪, 张文慧, 高杨, 等. 风电机组齿轮箱润滑油使用寿命影响因素及延寿策略[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2024(24): 16-18.  
HAN Xue, ZHANG Wenhui, GAO Yang, et al. Factors affecting service life of wind turbine gearbox lubricating oil and strategies for life extension[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality Journal*, 2024(24): 16-18.
- [11] 杜静宇, 曹治, 任鑫, 等. 风电机组齿轮箱润滑油指标分析及国产化研究[J]. *热力发电*, 2025, 54(4): 42-50.  
DU Jingyu, CAO Zhi, REN Xin, et al. Indicator analysis and localization research of lubricating oil for wind turbine gearbox[J]. *Thermal Power Generation*, 2025, 54(4): 42-50.
- [12] 赖右福, 王可可, 吕小林, 等. 风电用油劣化原因分析及维护[J]. *设备管理与维修*, 2023(24): 78-80.  
LAI Youfu, WANG Keke, LYU Xiaolin, et al. Degradation cause analysis and maintenance for wind turbine oils[J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2023(24): 78-80.
- [13] 胡志红, 张秀丽, 宋鹏, 等. 风电齿轮箱润滑油污染物及油中磨粒状态分析[J]. *润滑与密封*, 2018(1): 92-97.  
HU Zhihong, ZHANG Xiuli, SONG Peng, et al. The analysis of contamination and abrasive state in wind gear oil[J]. *Lubrication Engineering*, 2018(1): 92-97.
- [14] 唐金伟, 李焯峰, 刘永洛, 等. 聚 $\alpha$ -烯烃齿轮油老化趋势及其再生处理研究[J]. *风能*, 2017(10): 74-77.  
TANG Jinwei, LI Yefeng, LIU Yongluo, et al. Research on aging trends and regeneration treatment of polyalphaolef in gear oils[J]. *Wind Energy*, 2017(10): 74-77.
- [15] 张文, 陈雷, 李蛟, 等. 风电机组齿轮箱润滑油的精过滤技术[J]. *中国设备工程*, 2019(9): 228-231.  
ZHANG Wen, CHEN Lei, LI Jiao, et al. Precision filtration technology for wind turbine gearbox lubricating oil[J]. *China Plant Engineering*, 2019(9): 228-231.
- [16] 杨鑫, 许红, 胡卫勋, 等. 基于超临界 CO<sub>2</sub> 萃取再生废润滑油[J]. *化工进展*, 2023(10): 5399-5405.  
YANG Xin, XU Hong, HU Weixun, et al. Regeneration of waste lubricating oil based on supercritical CO<sub>2</sub> extraction[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023(10): 5399-5405.
- [17] 废矿物油回收与再生利用导则: GB/T 17145—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024: 3.  
Guidelines for recycling of used mineral oil: GB/T 17145 — 2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024: 3.
- [18] ANTONINA K, MÁKI A P, MURZIN D Y. Technology for re-refining used lube oils applied in Europe: a review[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2013, 88(10): 1780-1793.
- [19] UFUK V. Waste mineral oils re-refining with physicochemical methods[J]. *Turkish Journal of Engineering*, 2020, 4(2): 62-69.
- [20] BOADU K O, JOEL O F, ESSUMANG D K, et al. A review of methods for removal of contaminants in used lubricating oil[J]. *Chemical Science International Journal*, 2019, 26(4): 1-11.
- [21] MOTSHUMI J D, MUZENDA E, PILUSA T J, et al. A comparison of waste lubricating oil treatment techniques[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Environment, Agriculture and Food Sciences. 2013: 25-26.
- [22] 王莉, 韩健, 杨超, 等. 废润滑油再生技术浅析[J]. *润滑油*, 2020(1): 13-20.  
WANG Li, HAN Jian, YANG Chao, et al. A brief analysis of the regeneration technology on waste lubricating oil[J]. *Lubricating Oil*, 2020(1): 13-20.
- [23] LISAN G, NOBEL C E, LONGSHORE L, et al. Life cycle carbon footprint of re-refined versus base oil that is not re-refined[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2014, 2(2): 158-164.
- [24] WANG S R, GU Y L, LIU Q, et al. Separation of bio-oil by molecular distillation[J]. *Fuel Processing Technology*, 2009, 90(5): 738-745.
- [25] 周松锐, 尹英遂, 王媛媛, 等. 短程蒸馏技术在废润滑油再生工艺中的应用[J]. *化工进展*, 2006(11): 1371-1374.  
ZHOU Songrui, YIN Yingsui, WANG Yuanyuan, et al. Application study of regeneration of waste lubricating oil with short-path distillating technology[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2006(11): 1371-1374.
- [26] 尹英遂, 冯明, 黄卫星. 废润滑油再生分子蒸馏窄分技术应用研究[J]. *现代化工*, 2010(2): 66-69.  
YIN Yingsui, FENG Ming, HUANG Weixing. Application of molecular distillation narrow fraction technology in waste lubricating oil regeneration[J]. *Modern Chemical Industry*, 2010(2): 66-69.
- [27] PINHEIRO C T, QUINA M J, GANDO-FERREIRA L M. New methodology of solvent selection for the regeneration of waste lubricant oil using greenness criteria[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(5): 6820-6828.
- [28] 倪璇, 孙然, 王德慧, 等. 溶剂法废润滑油再生工艺的研究进展[J]. *应用化工*, 2018(8): 1782-1785.  
NI Xuan, SUN Ran, WANG Dehui, et al. The research progress of waste lubricating oil regeneration process by solvent method[J]. *Applied Chemical Industry*, 2018(8): 1782-1785.

- [29] 韩忠义, 金月昶. 无酸法回收车用废润滑油的工艺研究[J]. 当代化工, 2015(5): 1165-1168.  
HAN Zhongyi, JIN Yuechang. Study on the recovery technology of used lubricating oil of vehicle with acid-free method[J]. Contemporary Chemical Industry, 2015(5): 1165-1168.
- [30] WHISMAN M L, GOETZINGER J W, COTTON F O. Method for reclaiming waste lubricating oils[J]. BETC/ERDA, 1977, 24(2): 32-37.
- [31] 宋巍. 润滑油双溶剂精制的实验成果[J]. 化工设计, 2004(5): 11-18.  
SONG Wei. Experimental study on dual-solvent refining of lubricating oil[J]. Chemical Engineering Design, 2004(5): 11-18.
- [32] 王利芳, 郭大光, 任雅琳. 溶剂辅助糠醛精制废润滑油[J]. 化工进展, 2011(2): 402-406.  
WANG Lifang, GUO Daguang, REN Yalin. Production of lubricating oil from waste lubricating oil by co-solvent assisted furfural purification[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2011(2): 402-406.
- [33] 赵琳, 闫锋, 郭大光, 等. 新型复合溶剂回收废润滑油工艺探究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2013(2): 27-31.  
ZHAO Lin, YAN Feng, GUO Daguang, et al. New mixed solvent of waste lubricant regeneration research process[J]. Journal of Liaoning Petrochemical University, 2013(2): 27-31.
- [34] JIANG J C, AN Z X, LI M X, et al. Comparison of ribavirin degradation in the UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/PDS systems: Reaction mechanism, operational parameter and toxicity evaluation[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(1): 109193-109203.
- [35] SUN Q Y, FAN Y J, YANG J, et al. Role of trace TEMPO as electron shuttle in enhancing chloroquine phosphate elimination in UV-LED-driven persulfate activation process[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10(6): 108641-108653.
- [36] 苏佩汝, 李明, 张晓娜, 等. 废润滑油 NMP 精制工艺参数的研究[J]. 甘肃科技纵横, 2019(2): 40-43.  
SU Peiru, LI Ming, ZHANG Xiaona, et al. Study on process parameters of NMP refining for waste lubricating oil[J]. Gansu Science and Technology Horizontal, 2019(2): 40-43.
- [37] 韩丽君, 任雅琳, 吴桐, 等. 工业废润滑油再生工艺的研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2010(4): 11-14.  
HAN Lijun, REN Yalin, WU Tong, et al. Recycling process of industrial waste lubricating oil[J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2010(4): 11-14.
- [38] 侯文贵, 刘国成. 废润滑油再生技术的研究进展[J]. 材料导报, 2018(增刊 2): 254-256.  
HOU Wengui, LIU Guocheng. Advances in waste lubricating oil regeneration techniques[J]. Materials Review, 2018(Suppl.2): 254-256.
- [39] ALI M F, RAHMAN F, HAMDAN A J. Techno-economic evaluation of waste lube oil rerefining[J]. International Journal of Production Economics, 1996, 42(3): 263-273.
- [40] 刘宾, 柴永明, 刘晨光, 等. 一种废润滑油加氢循环利用方法: ZL202011257524.0[P]. 2022-04-26[2025-08-29].  
LIU Bin, CHAI Yongming, LIU Chenguang, et al. A hydrotreating recycling process for waste lubricating oil: ZL 202011257524.0[P]. 2022-04-26[2025-08-29].
- [41] JIANG Z X, CHU Q Y, YANG H Y, et al. Kinetic model for removing phosphorus and zinc from waste lubricating oil by pyrolysis[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 148: 980-991.
- [42] YANG H Y, ZHANG M X, CHU Q Y, et al. Pyrolysis process and mechanism for calcium elimination of used lubricating oil[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2022, 165: 105540-105552.
- [43] 蒲宸光, 周康, 于海. 风电齿轮油运行状态分析[J]. 合成润滑材料, 2024(4): 22-25.  
PU Chenguang, ZHOU Kang, YU Hai. Analysis of the wind power gear oil during operation[J]. Synthetic Lubricants, 2024(4): 22-25.
- [44] 王娟, 付龙飞, 李焯峰, 等. 风力发电机齿轮润滑油现场再生处理系统及方法: ZL201910610947.7[P]. 2024-01-23[2025-08-29].  
WANG Juan, FU Longfei, LI Yefeng, et al. On-site regeneration system and method for wind turbine gearbox lubricating oil: ZL201910610947.7[P]. 2024-01-23[2025-08-29].
- [45] 唐金伟, 王娟, 李焯峰, 等. 风电齿轮油再生处理用强极性介孔吸附剂及其制备方法: ZL201710570477.7[P]. 2020-03-31[2025-08-29].  
TANG Jinwei, WANG Juan, LI Yefeng, et al. Strongly polar mesoporous adsorbent for wind turbine gear oil regeneration and preparation method: ZL201710570477.7[P]. 2020-03-31[2025-08-29].
- [46] 杨东祥, 凌海, 徐健, 等. 一种风力发电齿轮箱润滑油在线回收系统: ZL 201810862651.X[P]. 2018-12-18 [2025-08-29].  
YANG Dongxiang, LING Hai, XU Jian, et al. Online reclamation system for wind turbine gearbox lubricating oil: ZL201810862651.X[P]. 2018-12-18 [2025-08-29].
- [47] 王可可, 牛犇, 王明明, 等. 一种风机齿轮油净化再生设备及再生方法: ZL202410447671.6[P]. 2024-07-16 [2025-08-29].  
WANG Keke, NIU BEN, WANG Mingming, et al. Purification and regeneration apparatus and method of wind turbine gear oil: ZL202410447671.6[P]. 2024-07-16 [2025-08-29].
- [48] 施仲扬. 絮凝-吸附法再生风电废润滑油实验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018: 55-56.  
SHI Zhongyang. Experimental study on the regeneration of wind power waste lubricating oil by flocculation - adsorption method[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018: 55-56.
- [49] 魏浩栋, 马娇娜, 马捷, 等. 一种废润滑油再生处理设备: ZL202021741111.5[P]. 2021-05-28 [2025-08-29].  
WEI Haodong, MA Jiaona, MA Jie, et al. Regeneration system for waste lubricating oil: ZL201810862651.X[P]. 2018-12-18 [2025-08-29].
- [50] 龚海峰, 焦昭杰, 陈爽, 等. 一种废风电润滑油加氢催化剂及其在废风电润滑油再生基础油中的应用: ZL202420413364.6[P]. 2024-06-28 [2025-08-29].  
GONG Haifeng, JIAO Zhaojing, CHEN Shuang, et al. Hydrotreating catalyst for waste wind turbine lubricating oil and application in regenerating base oil: ZL202420413364.6[P]. 2024-06-28 [2025-08-29].

(责任编辑 杨嘉蕾)