DOI：10.19666/j.rlfd.202505009

光伏组件油性积尘环保清洗剂实验研究

邓绪铭[1]，文慧峰[1]，张　恒[1]，张　磊[2]
（1. 西安热工研究院有限公司，陕西　西安　710054；
2. 华能湖南岳阳发电有限责任公司，湖南　岳阳　414002）

［摘　　要］油性积尘覆盖光伏组件表面会严重降低发电效率，然而现有清洗剂对油性积尘清洗效果差，易污染环境和腐蚀组件。通过 XRF、XRD 和灼烧法分析油性积尘成分，其有机物质量分数高达 17.52%导致黏附性高，以 A 类环保组分为原料，经四因素三水平正交实验优化复配制得油性积尘环保清洗剂，经连续活性污泥法、浸泡实验验证降　解和腐蚀性能。结果表明：10 g/m^2 的油性积尘可使光伏组件最大输出功率降低 30.28%，清洗剂稀释 30 倍时对油性积尘清洁率达到 99.84%，其化学需氧量为 3 000 mg/L 的清洗废水生物降解性超 90.41%；在粮油厂屋顶的实际应用中，可实现 79.4%的发电效率恢复率及 5.6 ℃的表面温度提升，清洗剂成本仅 0.5 元/m^{2}且无腐蚀，效果较市售清洗剂更优。该油性积尘环保清洗剂可对覆盖油性积尘的光伏组件实现高效环保清洗，对保障光伏电站运行、提高发电效率具有积极意义。

［关　键　词］光伏组件；环保清洗剂；油性积尘

［引用本文格式］邓绪铭，文慧峰，张恒，等. 光伏组件油性积尘环保清洗剂实验研究[J]. 热力发电，2026，55(4)：148-155.
DENG Xuming，WEN Huifeng，ZHANG Heng，et al. Experimental research on environmentally friendly cleaning agents for oily dust on photovoltaic modules[J]. Thermal Power Generation，2026，55(4)：148-155.

Experimental research on environmentally friendly cleaning agents for oily dust on photovoltaic modules

DENG Xuming[1], WEN Huifeng[1], ZHANG Heng[1], ZHANG Lei[2]
(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
2. Huaneng Hunan Yueyang Power Generation Co., Ltd., Yueyang 414002, China)

Abstract: The oily dust on photovoltaic (PV) modules significantly reduces power generation efficiency, but conventional cleaning agents suffer from poor cleaning performance, cause environmental pollution, and bring component corrosion risks. This study analyzed the dust composition via XRF, XRD, and ignition methods, revealing that organic matters with a mass fraction of 17.52% cause high adhesiveness. An eco-friendly cleaning agent was developed by optimizing the formulation via a four-factor three-level orthogonal experiment using Class A eco-friendly components. Its degradation and corrosion properties were verified through the continuous activated sludge method and immersion experiments. The results showed 10 g/m^2 oily dust could reduce the PV module power by 30.28%, while the cleaning agent achieved a cleaning efficiency of 99.84% at 30-fold dilution. The cleaning wastewater with a COD of 3 000 mg/L achieved a biodegradability of over 90.41%. Field application on oil plant rooftops restored 79.4% power efficiency and raised surface temperature by 5.6 ℃. Costing only 0.5 yuan per square meter and causing no corrosion to PV modules, the proposed cleaning agent outperforms commercial alternatives. It enables efficient and eco-friendly cleaning, ensuring stable operation of PV power stations and improving power generation efficiency.

Key words: photovoltaic modules; environmentally friendly cleaning agents; oily dust

光伏电站在实际运行过程中面临诸多挑战，其中光伏组件表面不断累积的污染物问题尤为突出[1]。积尘会降低光伏组件透光率，引发遮挡效应、温度效应、腐蚀效应及磨损效应等，影响发电效率

收 稿 日 期：2025-05-07　修 回 日 期：2025-06-09　接 受 日 期：2025-06-12
基 金 项 目：中国华能集团有限公司总部科技项目（HNKJ22-H29）
Supported by：Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ22-H29)
第一作者简介：邓绪铭（1998），男，硕士，助理工程师，主要研究方向为热力设备的腐蚀与防腐及化学清洗技术，dengxuming@tpri.com.cn。

与组件寿命[2-3]。近年来，我国兴建屋顶分布式光伏数量众多[4]。从家庭住户到制造厂，各种工况下运行的光伏组件中，油性积尘[5]是涉及油脂物料区域屋顶光伏电站的常见积尘类型，常规清洗剂（如草酸、碳酸钠等）难以机械去除。油性积尘聚合了多种污染物，它较强的黏附性来自生产过程中挥发的有机物、颗粒物[6-8]，其中仅含量较低的有机碳及离子组分就会大幅降低透射率[9-10]。光伏板日间表面温度较高，会加速油脂、脂肪酸等有机物老化[11]，进一步发生交联、吸附，形成黏性膜，加速积尘增厚，降低发电效率。

目前，国内外对顽固油性积尘的清洗剂研究集中在天然表面活性物质提取[12-13]、表面活性剂的复配组合[14-16]上。曾维才[17]对西北煤矿地区光伏电站面板上沉积的煤焦油进行分析，确定其成分为多种芳香烃化合物，制备以脂肪醇聚氧乙烯醚、十二烷基磺酸盐为主的水基型表面活性剂，实现了对煤焦油积尘的高效清洁。陶源[18]对浓缩型防雾玻璃清洗剂进行了研制及性能研究，确定了其最优配方组合，制备了生物降解性好的表面活性剂 APG0810 等为主表面活性剂，并筛选出聚醚改性聚硅氧烷作为防雾成分，实现了良好的清洗及防雾效果。郑岩[19]采用润湿和铺展性能优异的脂肪酸甲酯乙氧基化物和伯烷基磺酸钠复配，对玻璃表面难去除的虫胶实现了最佳清洗效果。靳迪等[20]聚焦海上漂浮式光伏清洁运维，开发了以生姜提取物、蓖麻油为主适用于盐碱、微生物及油污的环保清洗剂。因此，针对性地选配清洗剂成分，能解决油性积尘清理难的问题，从而开发出适应性强的高效环保清洗剂[21]。

本研究根据岳阳某粮油厂区屋顶光伏组件表面的油性积尘特点，进行具有针对性的清洗剂配制实验，对常覆盖油性积尘的光伏电站的运行维护具有重要意义。

1 实验方案

对光伏组件表面油性积尘实际成分进行分析，并以此为基础选用表面活性剂，通过正交实验法确定复配比例，进一步添加助剂提高性能，最终制得针对性清理光伏组件的油性积尘环保清洗剂。以岳阳某粮油加工厂和某机械厂屋顶光伏电站为例，相同气候条件下同一时间清洗后屋顶光伏电站的积尘情况差异明显。图1为岳阳某粮油加工厂和机械厂屋顶光伏组件的积尘情况。



a) 粮油厂屋顶光伏组件积尘　b) 机械厂屋顶光伏组件积尘

图 1 岳阳某粮油加工厂和机械厂屋顶光伏组件积尘情况
Fig.1 Dust accumulation on photovoltaic modules on the roofs of a grain and oil processing plant and a machinery factory in Yueyang

1.1 实验装置与材料

实验用主要仪器包括：S8 Tiger 波长色散 X 射线荧光光谱仪、Aeris X 射线衍射仪、Axio Virt.A1 金相显微镜、BBA 太阳光模拟器、高温马弗炉、2151 罗氏泡沫仪、电热干燥箱、干燥器、磁力搅拌器、晶科 720HL4-(v)光伏组件。主要试剂包括：表面活性剂、助剂。

1.2 实验方法

1.2.1 油性积尘制备方法

制备油性积尘时，需要针对性地模拟油性积尘成分，以实现针对性的清洗剂配制。油脂加工中脱臭、裂解等工艺会产生各类废气，其中油脂与空气作用被氧化，生成游离脂肪酸和醛类等。模拟时，考虑蜂蜜内含有大量极性的果糖和葡萄糖，易与水分子等形成氢键，可增加积尘的黏性。液体石蜡为饱和烷烃混合物，具有较强的脂溶性和表面附着性，会附着在物体表面或与灰尘颗粒接触后提高成膜效果。猪油的主要成分是甘油三酯，食用调和油的主要成分是不饱和脂肪酸，这与粮油厂产品加工过程中产生挥发性烟气废料中携带的污染物类型基本一致[21]。综上，根据油性积尘成分特性进行配制，质量分数 70%的灰尘、3%的四氧化三铁粉末、2%的蜂蜜、5%的液体石蜡、5%的食用调和油、10%的猪油，该人工油性积尘经灼烧测试后，有机物质量分数在 17%～22%。灰尘取自绿化带的含腐殖质土壤，经(80±2) ℃烘干至恒重后，过五号筛以去除杂质并控制粒径。将各组分按比例混合后充分搅拌均匀，制得人工油污积尘，每次使用前需再次搅拌以确保组分分散均匀，避免沉降影响实验一致性。每次实验油性积尘涂覆量控制在 25 g/m^2 左右。

涂布油性积尘时，将制备好的人工油污积尘用尺均匀地涂覆到载玻片的一侧或光伏组件表面，为提高油性积尘的模拟真实性，将污片在室外阳光暴晒环境下老化 15 天，经测试可达到接近岳阳某粮油厂区光伏组件表面油性积尘的附着力。

1.2.2 清洁性能测试方法

我国现行玻璃清洗剂标准中尚未规定清洗剂性能的测试和评价方法。因此，本文在文献[22-26]基础上采用自定方法，模拟水流浸泡冲洗 5 min 的清洁方式测试清洁率。

基于临界胶束浓度理论[27]，本实验选用的表面活性物质质量浓度在 0.5%～1.0%以上时，其清洁性能随质量浓度升高而降低的速率趋于平缓，表明此时已超过该表面活性物质的临界胶束质量浓度。故选用 2%为活性物质质量浓度作为清洁性能评价质量浓度。具体清洁性能测试方法为：将制备好的覆盖油性积尘的载玻片污面朝上，用细铁丝悬挂于 500 mL 烧杯中 150 mL 刻度线位置；加入 200 mL 稀释后活性物质质量分数为 2%的清洗剂或表面活性剂溶液，溶液保持 25 ℃、200 r/min 下磁力搅拌 5 min，随后取出，并置于 50 ℃下电热恒温箱烘干。根据清洗前、清洗后油污积尘的质量，计算清洁率。

1.2.3 清洗废水生物降解性测试方法

采用连续活性污泥法测试[23-24]清洗废水的生物降解性。1）微生物培养：25 ℃下，向2 L烧杯中加入0.5 L污水处理厂活性污泥以及1.5 L去离子水，间歇曝气12 h，期间添加葡萄糖、蛋白胨、牛肉膏，静置一定时间后，倒出1 L的上清液并补充等量去离子水，重复以上步骤至显微镜下观察到微生物数量显著增多。2）微生物驯化：每天分别添加清洗油性积尘后的清洗废水2、4、6、8、10 mL，5天后每天添加10 mL；每24 h取上清液测化学需氧量（COD），直至测定COD不变为止。3）测试：控制每批处理的清洗废水COD为1 000～3 000 mg/L，测试每降解6 h后的废水COD，计算清洁率。

1.2.4 VOCs 测试方法

本实验所用清洗剂组分中，除水外均为有机物，因此可将除水以外的挥发物含量近似等同于挥发性有机物（VOCs）的含量，根据 GB/T 13173—2021《表面活性剂 洗涤剂试验方法》第 15 章中烘箱法进行 VOCs 测试。准备 50 mm×30 mm 的带盖称量瓶并恒重，称取 2.000 g 清洗剂于瓶中，并将称量瓶置于 105℃的烘箱干燥 4 h，随后放入内装变色硅胶的干燥器内干燥 0.5 h 并加盖称重，清洗剂的 VOCs 可根据下式计算：

$$\mathrm{VOCs}=\frac{m_0-m_1-m_{\mathrm{H_2O}}}{2.000}\times 1000 \qquad (1)$$

式中：VOCs 表示挥发性有机物的质量浓度，g/L；m_0 表示烘干前称量瓶和清洗剂总重；m_1 表示烘干后称量瓶和清洗剂总重；$m_{\mathrm{H_2O}}$ 表示根据配制时添加除盐水的百分比计算出 2.000 g 清洗剂中水的质量。

对粮油厂屋顶光伏组件油性积尘及机械厂屋顶光伏组件积尘进行了 XRF、XRD 分析，并进行灼烧减量法测试，结果如表 1、表 2 所示。

2 实验结果及讨论

2.1 油性积尘成分及对光伏发电效率影响

2.1.1 油性积尘成分

对粮油厂屋顶光伏组件油性积尘及机械厂屋顶光伏组件积尘进行了XRF、XRD分析，并进行灼烧减量法测试，结果如表1、表2所示。

表 1 岳阳某粮油厂和某机械厂屋顶光伏积尘元素质量分数
Tab.1 Elemental analysis of the rooftop PV dust in a grain and oil processing plant and a machinery factory in Yueyang

占比排序	粮油厂屋顶光伏积尘		机械厂屋顶光伏积尘	
	元素	w/%	元素	w/%
1	O	61.3	O	54.3
2	Si	24.4	Si	23.2
3	Al	4.0	Fe	8.0
4	Ca	3.9	Al	7.0
5	Fe	2.3	K	1.8
6	K	2.1	Ca	1.6
7	Mg	0.7	Mg	1.0
8	Na	0.3	Na	0.6
9	S	0.3	S	0.2

表 2 岳阳某粮油厂和机械厂屋顶光伏积尘物相质量分数
Tab.2 Phase analysis of rooftop PV dust in a grain and oil factory and a machinery factory in Yueyang

占比排序	粮油厂屋顶光伏积尘		机械厂屋顶光伏积尘	
	物相	w/%	物相	w/%
1	SiO_2	42	SiO_2	38
2	其他	20	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	18
3	$KAlSi_3O_8$	15	其他	15
4	Al_2O_3 SiO_2	8	Al_2O_3 SiO_2	10
5	$CaCO_3$	7	Fe_2O_3	8
6	$CaMg(CO_3)_2$	5	$CaMg(CO_3)_2$	7
7	Fe_3O_4	3	$(Fe,Ti)Fe_2O_4$	4

进一步使用灼烧减量法测得粮油厂和机械厂屋顶光伏积尘有机物质量分数分别为17.52%、6.45%。结合表1和表2可知，同一地区2类工厂屋顶光伏组件表面积尘组成有一定差别。机械厂区屋顶光伏组件表面积尘成分为石英、白云母、红柱石、白云石、钛铁尖晶石、氧化铁，有机物成分仅为6.45%。粮油厂区屋顶光伏组件表面积尘成分为石

英、钾长石、红柱石、方解石、白云石、磁性氧化铁，有机物质量分数高达17.52%。机械厂区屋顶光伏组件积尘含有更多的铁氧化物，这来自厂区内铁屑、铁粉等加工残余物。而粮油厂屋顶光伏组件积尘有机物含量高，需应用具有渗透、乳化、吸附、分散等功能的表面活性剂进行清洗。

2.1.2 油性积尘对光伏发电效率影响

在光伏组件上分别布置密度相同的油性积尘和普通积尘。油性积尘的密度根据老化后从光伏组件上刮下的积尘总量除以面积得到，普通积尘的布灰总量则根据油性积尘的密度乘以光伏组件的面积得到。稳态太阳模拟器条件为 AM 1.5G、1 000 W/m²、25 ℃。使用 *I-V* 曲线测试仪测量光伏组件电流、电压、功率及温度等数据，结果如图 2 所示。

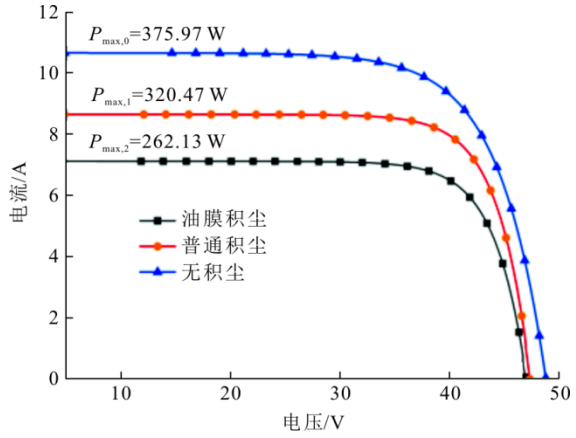
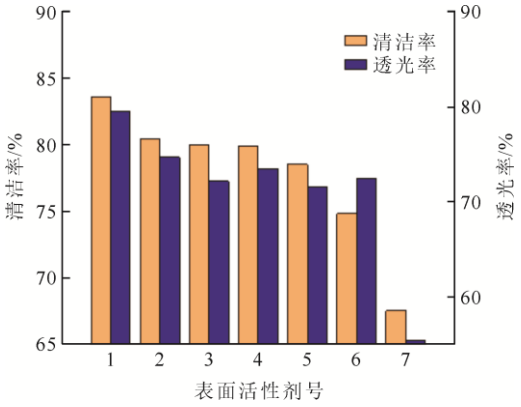


图 2 不同积尘情况下光伏组件 *I-V* 曲线
Fig.2 *I-V* curves of photovoltaic modules under different dust accumulation conditions

光伏组件在清洁情况下最大输出功率 $P_{max,0}$ 为 375.97 W；积尘密度 10 g/m² 的普通积尘覆盖时，最大输出功率 $P_{max,1}$ 为 320.47 W，相较无积尘时降低了 14.76%；覆盖油性积尘时最大输出功率 $P_{max,2}$ 为 262.13 W，较无积尘时降低了 30.28%。可见，累积同质量的油性积尘降低光伏组件输出的情况更严重。

2.2 清洗剂配方筛选

清洗顽固油性积尘的关键是提高清洗剂溶解油脂的能力。传统碱性除油剂对油脂皂化能力强，但碱性残液会腐蚀玻璃，清洗后玻璃表面的腐蚀小坑会导致盖板表面更容易积累灰尘。同时，为避免腐蚀镀锌支架及改善阳离子表面活性剂与非离子表面活性剂复配性能不佳的情况[24]，采用非离子表面活性剂及两性表面活性剂，调控 pH 值为中性。此外，基于粮油厂区域物料使用的安全环保要求，活性物质应对人体、水体无毒害，因此清洗剂不应添加支链表面活性剂、EDTA 等，应选用《食品安全国家标准 洗涤剂》（GB 14930.1—2022）规定的 A 类清洗剂中的活性成分。各表面活性剂清洁性能如图 3 所示。



1—APG10；2—FMEE；3—吐温 80；4—椰油酰胺丙基甜菜碱；5—C12—C18 乙氧基化辛醇；6—十二烷基二甲基甜菜碱；7—2-吗啉乙磺酸。

图 3 单一表面活性剂清洁性能
Fig.3 Cleaning performance of single-monocomponent surfactants

由图 3 可知，清洗能力排序由高至低依次为烷基糖苷（APG10）、脂肪酸甲酯乙氧基化物（FMEE）、吐温 80、椰油酰胺丙基甜菜碱（CAB）、C12—C18 乙氧基化辛醇、十二烷基二甲基甜菜碱、2-吗啉乙磺酸（MES）。因此，选用前 4 种作为主要活性物质进行复配，并设计四因素三水平正交实验[26]，测得清洁率与发泡能力，参数详见表 3。

表 3 表面活性剂复配正交实验设计
Tab.3 Orthogonal experimental design for surfactant compounding

序号	四因素对应的质量分数（水平）/%				清洁率/%	发泡力 ①V_0/mL
	APG10	FMEE	吐温 80	CAB		
1	4	3	2	4	84.32	288
2	4	5	4	5	84.65	267
3	4	7	5	7	87.57	268
4	6	3	4	7	86.91	279
5	6	5	5	4	90.16	236
6	6	7	2	5	84.92	293
7	8	3	5	5	90.59	289
8	8	5	2	7	89.82	325
9	8	7	4	4	92.50	305
均值 1/%	85.5	87.2	86.3	89.0		
均值 2/%	87.3	88.2	88.0	86.7		
均值 3/%	90.9	88.3	89.4	88.1		
极差/%	5.5	1.1	3.0	2.3		

注：①V_0 表示液流停止后的泡沫体积，采用 2151 罗氏泡沫仪测试，测试温度 40 ℃；均值根据清洁率数据计算。

覆盖 4 种表面活性剂的各水平组合可减少实验量，通过极差可以分析各因素对清洁率的影响权重，极差大的因素为对清洁性能贡献主效应显著的表面活性剂，选取清洁效果优秀的组分。由表 3 可知，复配后的表面活性剂清洁性能提升，发泡性能相近，但实际的清洁率差异较大，故以清洁率为主要考量。4 种表面活性剂根据极差由高至低排列，依次为 APG10（5.5%）、吐温 80（3.0%）、CAB（2.3%）、FMEE（1.1%），故各组分对清洁性能影响程度由高至低依次为 APG10、FMEE、吐温 80、CAB。最后，根据各因素不同水平下清洁率均值最高的水平并组合，得到理论最优配方为质量分数 8%APG10、7%FMEE、5%吐温 80、4%CAB。

进一步对助剂进行筛选。上述表面活性剂分别添加助溶剂、螯合剂、乳化剂、增稠剂、消泡剂、香味剂、防腐剂进行复配，并使用 0.1%～0.5%的柠檬酸钠将清洗剂 pH 值调至 7.0～8.0。各组复配助剂后的油性积尘环保清洗剂清洁性能见表 4 所示。

表 4 复配助剂后油性积尘环保清洗剂清洁性能
Tab.4 Cleaning performance of the eco-friendly cleaning agent with compounded additives

编号	助溶剂	螯合剂	乳化剂	清洁率/%
1	10%A1+10%A2	5%B1	2%C1	96.53
2	10%A1+10%A2	5%B2	2%C1	95.42
3	10%A1+10%A2	5%B2	2%C2	96.16
4	10%A1+10%A2	5%B1	2%C2	98.74
5	15%A1+5%A2	5%B1	2%C1	97.92
6	5%A1+15%A2	5%B1	2%C1	93.35

注：A1—乙醇，A2—丙二醇，B1—DL-苹果酸二钠水合物，B2—葡萄糖酸钠，C1—六聚甘油单月桂酸酯，C2—异十三醇聚氧乙烯醚；所添加其余助剂均为 0.5%羟丙基甲基纤维素钠（增稠剂）、0.1%～0.5%的柠檬酸钠（pH 调节剂）、0.1%聚二甲基硅氧烷（消泡剂）、0.05%D-柠檬烯（香味剂）、0.01%异噻唑啉酮水溶液（防腐剂）。

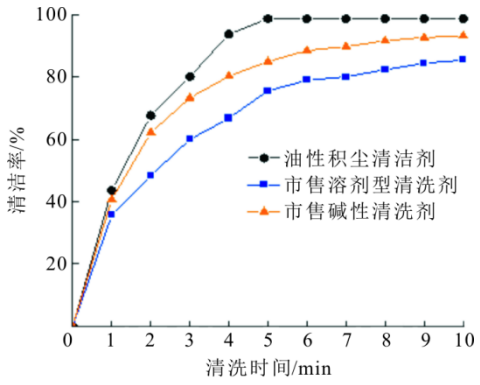
由表 4 可知，复配助剂组 4 可以达到 98.74%的最佳油性积尘清洁率，最终油性积尘环保清洗剂成分按质量分数为 8%APG10、7%FMEE、5%吐温 80、4%椰油酰胺丙基甜菜碱、10%乙醇、10%1,2-丙二醇、5%D,L-苹果酸二钠水合物、2%异十三醇聚氧乙烯醚、0.1%～0.5%的柠檬酸钠、0.5%羟丙基甲基纤维素钠、0.05%D-柠檬烯、0.01%异噻唑啉酮。复配后的油性积尘环保清洗剂兼具耐温性好、与中性清洗体系兼容性强等显著优势。

油性积尘环保清洗剂中作为活性剂的烷基糖苷 APG10 兼具环保性与温和性，生物降解率超 90%，低毒低刺激，且耐硬水能力强，在吐温 80、FMEE 及椰油酰胺丙基甜菜碱的复配下显示出相较仅使用 APG10 和 FMEE 时更强的去污协同效应。清洗剂助剂中极性不同的助溶剂乙醇与丙二醇混合使用，不仅提升了对油性积尘内不同极性油脂的溶解能力，而且增强了清洗剂的防冻性能，有效提高了胶束增溶效率。异十三醇聚氧乙烯醚凭借较强的乳化能力，与其他表面活性剂协同作用，显著提升了对非极性油脂及蜡质的分散效率。该油性积尘环保清洗剂复配体系较文献[17]中用于清洗高有机物含量煤焦油的清洗剂，油脂溶解效果提升，同时避免了烷基磺酸钠等阴离子表面活性剂[19]的使用，降低了清洗剂在硬水中的沉淀倾向。选用 DL-苹果酸二钠盐作为螯合剂，其在中性条件下具有优异的螯合性能，可促进油脂水解及无机污渍溶解，替代了对水体危害较大的 EDTA-Na 盐等螯合剂。

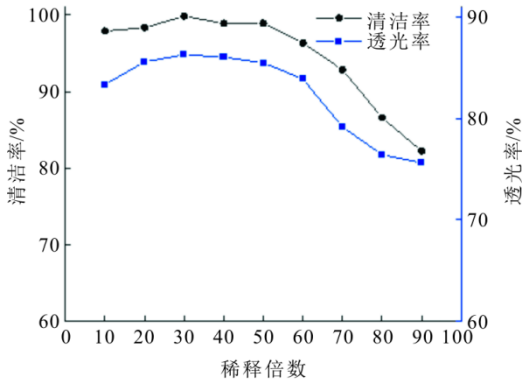
2.3 清洗剂性能

2.3.1 清洗剂清洁性能

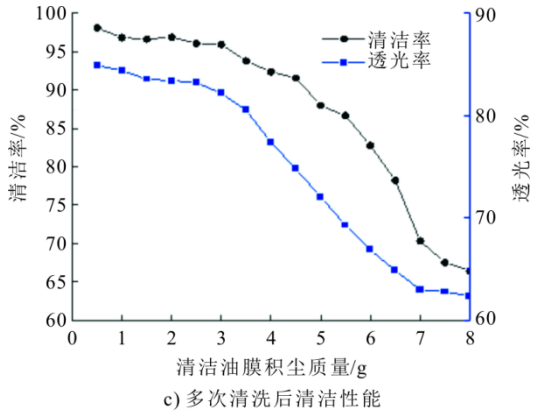
分别对油性积尘环保清洗剂稀释 20 倍时不同清洗时间、稀释倍数、多次清洗的清洁性能进行测试，结果如图 4 所示。



a) 不同清洗时间清洁性能



b) 不同稀释倍数清洁性能



c) 多次清洗后清洁性能

图 4 油性积尘环保清洗剂清洁性能
Fig.4 Cleaning performance of the cleaning agents

由图 4a)可知，该油性积尘环保清洗剂在 5 min 内可实现 98.72%的清洁率，而市售溶剂型清洗剂、市售碱性清洗剂在 10 min 内仅能达到 93.21%及 85.41%的清洁率。由图 4b)可知：清洗剂在稀释 30 倍时可以实现 99.86%的清洁率、84.6%的透光率，达到最佳清洁性能；清洗剂在稀释 70 倍时仍可达到 92.85%的清洁率；继续稀释会导致残留的油性物质含量增加，清洗效果下降。由图 4c)可知，200 mL 稀释 50 倍的清洗剂在油性积尘清洗量为 3 g 时仍有 95.93%的清洁率。

2.3.2 清洗剂 VOCs

根据定义，油性积尘环保清洗剂属于半水基清洗剂，经测试VOCs为255.6 g/L，满足我国强制性标准。

2.3.3 清洗剂 COD

经测试，清洗剂稀释 50 倍后的 COD 为 11 895 mg/L，相比市售溶剂型清洗剂[28]稀释 50 倍后 15 860 mg/L 低 25%。

2.3.4 清洗废水生物降解性

分别选取 COD 为 1 000、2 000、3 000 mg/L 的清洗剂清洗油性积尘后的废水进行生物降解性实验，结果如图 5 所示。由图 5 可知，COD 在 3 000 mg/L 以下的清洗废水在 48 h 内均能达到 90.41%以上的的降解率，表明该油性积尘清洗剂的环境友好性。

2.3.5 清洗剂实际使用效果

在相同条件下，应用清洗剂及水清洗岳阳某粮油厂屋顶光伏组件表面的实际效果如图 6 所示。由图 6 可知，水和市售清洗剂无法完全去除光伏组件表面的油性积尘，而油性积尘环保清洗剂则溶解油脂效果优良，清洗效果极佳。

在该屋顶光伏系统中，选取同一箱式变压器下运行工况一致的 2 台逆变器，每组均包括 536 个光伏组件。连续 3 日记录后台逆变器的日发电量，同时采集单个光伏组件的日峰值功率并换算至标准测试条件（standard test conditions，STC）下的数值，且于每日 12:00 测量光伏组件表面平均温度。实测得到油性积尘清洗前后的运行数据如表 5 所示。

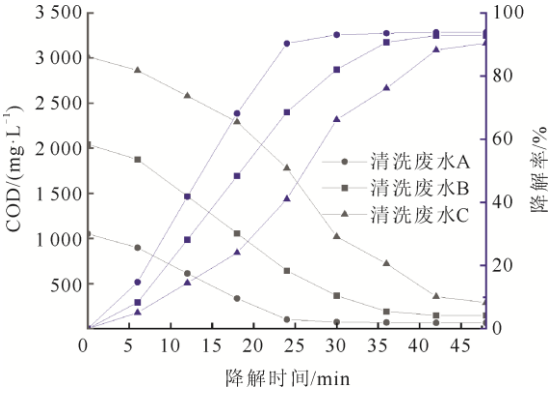


图 5 清洗废水的生物降解性实验结果
Fig.5 Biodegradability experiment of the cleaning wastewater

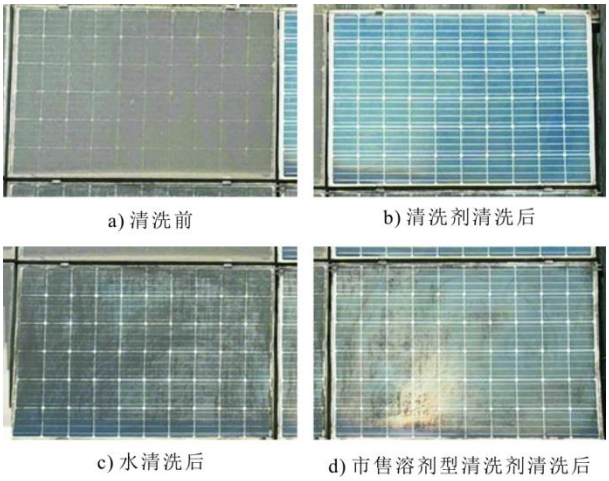

a) 清洗前　b) 清洗剂清洗后
c) 水清洗后　d) 市售溶剂型清洗剂清洗后

图 6 清洗效果对比实验
Fig.6 Comparative experiment on cleaning effect

表 5 光伏组件清洗前后运行数据
Tab.5 Operating data of photovoltaic modules before and after cleaning

项目	逆变器组	发电量/(kW·h)	单组件峰值标准条件下功率/W	发电效率恢复率/%	表面温度/℃	温度提高/℃
Day1	洁净	655.2	224.6	77.9	62.7	5.9
	脏污	210.5	46.8		56.8	
Day2	洁净	439.7	226.9	79.0	59.6	5.3
	脏污	134.7	46.1		54.3	
Day3	洁净	693.1	233.1	81.2	62.9	5.7
	脏污	209.0	51.3		57.2	
平均	洁净	596.0	228.2	79.4	61.7	5.6
	脏污	184.7	51.4		56.1	

注：该粮油厂区采用晶科能源生产的 JKM275M-60 光伏组件，在 1 000 W/m² 的辐照度下峰值功率为 275 W。

发电效率恢复率根据下式计算：

$$\eta_{\mathrm{rec}}=\frac{P_1-P_0}{P_{\mathrm{STC}}-P_0} \tag{2}$$

式中：η_{rec} 表示发电效率恢复率；P_0 表示未清洁时光伏组件发电效率；P_1 表示清洁后光伏组件发电效率；P_{STC} 表示 25 ℃、1 000 W/m^2 标准情况下光伏组件的标称功率。

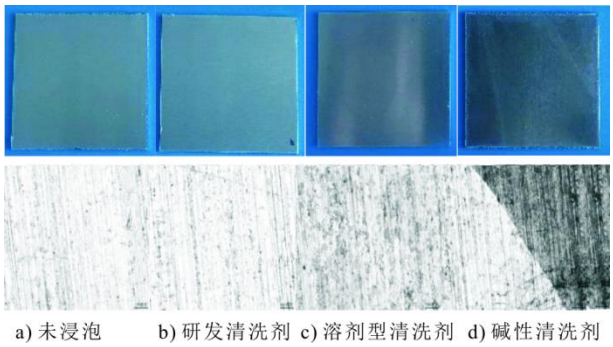
由表 5 可知，光伏组件清洗后可实现平均 79.4% 的发电效率恢复率，表面温度平均提高 5.6 ℃，表明清洗剂对油性积尘清洁效果优异。

2.3.6 清洗剂成本分析

清洗剂的经济可行性亦为关键考量因素。根据市价计算，每升清洗剂中各组分价格分别为：APG105.8 元/L，FMEE 1.8 元/L，吐温 80 1.0 元/L，CAB 0.4 元/L，乙醇 0.6 元/L，1,2-丙二醇 0.8 元/L，D,L-苹果酸二钠水合物 1.4 元/L，异十三醇聚氧乙烯醚 0.3 元/L，羟丙基甲基纤维素钠 0.1 元/L，其他助剂 0.1 元/L。因此，清洗剂成本仅为 12.3 元/L，相较市面清洗剂同样具有经济性。结合图 4c)的重复清洗实验可知，200 mL 质量分数 2%的自制清洗剂清洗油性积尘的清洗量为 3 g 以上，因此，对于油性积尘密度为 30 g/m^2 的光伏组件，清洗剂成本仅需 0.5 元/m^2。

2.3.7 清洗剂腐蚀性验证

使用油性积尘清洗剂、市售溶剂型及碱性清洗剂，分别对铝合金板和镀锌钢板进行 3 h 浸泡处理，通过外观观察与金相分析评估腐蚀情况，测试结果如图 7、图 8 所示。

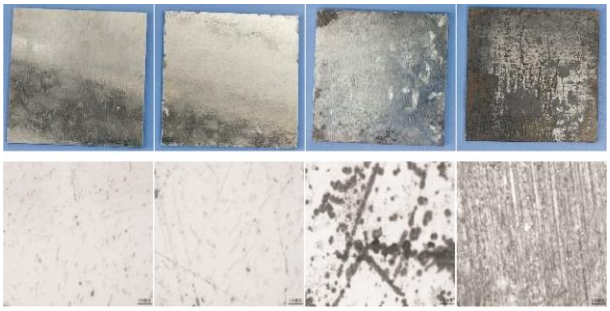


a) 未浸泡 b) 研发清洗剂 c) 溶剂型清洗剂 d) 碱性清洗剂

图 7 清洗剂对铝合金板腐蚀性实验

Fig.7 Corrosion experiment of the cleaning agent on aluminum alloy plates

由图 7、图 8 可知，油性积尘清洗剂对铝合金板和镀锌钢板在浸泡一定时间内几乎没有腐蚀，而溶剂型清洗剂、碱性清洗剂均与其表面发生了反应，故该油性积尘环保清洗剂在光伏组件清洗过程中不会对铝合金边框及镀锌支架产生影响。



a) 未浸泡 b) 研发清洗剂 c) 溶剂型清洗剂 d) 碱性清洗剂

图 8 清洗剂对镀锌钢板腐蚀性实验

Fig.8 Corrosion experiment of the cleaning agent on galvanized steel sheets

3 结 论

1）在油性积尘 10 g/m^2 的情况下光伏组件最大输出功率可降低 30.28%。相比同等质量的普通积尘对光伏组件负面影响更大。

针对粮油厂屋顶光伏组件表面油性积尘中高达 17.52%的有机物及灰尘无机颗粒的复合污染的积尘进行模拟制备，并研制出了一种适用于该类油性积尘的油性积尘环保清洗剂。清洗剂选用环境友好、人体友善的 A 类清洗剂成分，能够实现稀释 30 倍时 99.86%的光伏组件油性积尘清洁率，清洗剂成本仅 0.5 元/m^2 且无腐蚀。

清洗废水生物降解性良好，使用连续活性污泥法测得，COD 在 3 000 mg/L 以下的清洗油性积尘后的废水在 48 h 内生物降解性超 90.41%，表明清洗剂具有环境友好的特性。

4）油性积尘环保清洗剂在粮油加工厂屋顶光伏的实际应用中，能针对性地除去水及市售清洗剂难以去除的油性积尘，并实现 79.4%的发电效率恢复率及 5.6 ℃的表面温度提升，清洗效果极佳。

[参 考 文 献]

[1] 曾侨飞, 李斌, 李新福, 等. 基于相似日的光伏组件积灰损失预测[J]. 热力发电, 2024, 53(6): 21-29.
ZENG Qiaofei, LI Bin, LI Xinfu, et al. Prediction of dust accumulation loss in photovoltaic modules based on similar days[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(6): 21-29.

[2] 陈宇翔, 崔凝, 李斌, 等. 积灰性质对光伏组件输出性能影响研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(1): 11-19.
CHEN Yuxiang, CUI Ning, LI Bin, et al. Study on the influence of dust accumulation properties on the output performance of photovoltaic modules[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(1): 11-19.

[3] 牛海明, 崔青汝, 刘厚旭. 积灰对光伏电池板输出特性影响研究[J]. 热力发电, 2021, 50(2): 110-117.
NIU Haiming, CUI Qingru, LIU Houxu. Study on the influence of dust accumulation on the output characteristics of photovoltaic panels[J]. Thermal Power

Generation, 2021, 50(2): 110-117.
[4] 许建峰, 曹庆仁. 中国分布式光伏并网发电现状及应用研究[J]. 能源与节能, 2020(6): 45-48.
XU Jianfeng, CAO Qingren. Research on the status and application of distributed photovoltaic grid-connected power generation in China[J]. Energy and Energy Conservation, 2020(6): 45-48.
[5] 孙会宁, 张建, 石建屏. 表面活性剂去污原理分析及研究[J]. 山西化工, 2018, 38(5): 96-98.
SUN Huining, ZHANG Jian, SHI Jianping. Analysis and research on the principle of surfactant decontamination[J]. Shanxi Chemical Industry, 2018, 38(5): 96-98.
[6] MIQDAM T C, HUSSEIN A K, SULAFA I I, et al. Photovoltaic panel type influence on the performance degradation due to dust accumulation[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 928(2): 022092.
[7] YOTHAM A, POGREBNAYA T, KICHONGE B. Effect of industrial dust deposition on photovoltaic module performance: experimental measurements in the tropical region[J]. International Journal of Photoenergy, 2019(1): 10.
[8] 冯健, 牛海明. 空气质量监测数据驱动的光伏发电多尺度功率预测方法[J]. 热力发电, 2020, 49(6): 69-76.
FENG Jian, NIU Haiming. Multi-scale forecasting of photovoltaic power based on monitoring data for air quality[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(6): 69-76.
[9] BERGIN M H, GHOROI C, DIXIT D, et al. Large reductions in solar energy production due to dust and particulate air pollution[J]. Environmental Science & Technology Letters, 2017, 4(8): 339-344.
[10] 刘诺航, 葛宝珠, 王自发. 颗粒物沉降对光伏资源影响的模型研究进展[J]. 气候与环境研究, 2024, 29(3): 365-376.
LIU Nuohang, GE Baozhu, WANG Zifa. Advances in modeling the impact of particle deposition on photovoltaic power generation[J]. Climate and Environmental Research, 2024, 29(3): 365-376.
[11] ZHANG S K, LI C, GUO X J, et al. Kinetic analysis of bio-oil aging by using pattern search method[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(4): 1487-1494.
[12] JANSEN L M, BAKKER P C D, VENBRUX N, et al. Synthesis and performance of bio-based amphoteric surfactants[J]. Chemistry, 2024, 30(38): e202400986.
[13] NATHÁLIA M P, ROCHA E S, FAB ÍOLA C G A, et al. Formulation of a biodegradable detergent for cleaning oily residues generated during industrial processes[J]. Journal of Surfactants and Detergents, 2020, 23(6): 1111-1123.
[14] RATAN S, ANIRUDDHA P, ATANU R, et al. Properties and applications of amphoteric surfactant: a concise review[J]. Journal of Surfactants and Detergents, 2021, 24(5): 709-730.
[15] 刘泽晖, 陈蔚燕. 非离子表面活性剂复配体系泡沫性的研究[J]. 现代化工, 2022, 42(增刊 2): 329-331.
LIU Zehui, CHEN Weiyan. Study on foam property of non-ionic surfactant compound system[J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42(Suppl.2): 329-331.
[16] 纪发达, 纪冬冬, 樊昕. 一种环保型金属清洗剂的制备及性能研究[J]. 精细石油化工, 2023, 40(6): 51-55.
JI Fada, JI Dongdong, FAN Xin. Preparation and performance study of an environmentally friendly metal cleaner[J]. Speciality Petrochemicals, 2023, 40(6): 51-55.
[17] 曾维才, 宗嵩, 陈志勇, 等. 西北煤矿地区光伏场站面板清洗剂的研发与应用[J]. 能源研究与管理, 2023, 15(1): 147-152.
ZENG Weicai, ZONG Song, CHEN Zhiyong, et al. Development and application of panel cleaning agents for photovoltaic stations in northwestern coal mine areas[J]. Energy Research and Management, 2023, 15(1): 147-152.
[18] 陶源, 张威, 王丰收. 浓缩型玻璃清洗剂的研制及其性能研究[J]. 化学试剂, 2019, 41(11): 1145-1149.
TAO Yuan, ZHANG Wei, WANG Fengshou. Preparation and performance study of concentrated glass cleaning agents[J]. Chemical Reagents, 2019, 41(11): 1145-1149.
[19] 郑岩. 润湿与铺展型除虫胶玻璃水配方的优化[J]. 四川化工, 2023, 26(1): 15-17.
ZHENG Yan. Optimization of the formula for wetting and spreading type insect glue removing glass water[J]. Sichuan Chemical Industry, 2023, 26(1): 15-17.
[20] 靳迪, 经秋霞, 郝润朴, 等. 环境友好型清洗剂在海上漂浮式光伏清洁运维中的应用[J]. 清洗世界, 2025, 41(3): 113-115.
JIN Di, JING Qiuxia, HAO Runpu, et al. Application of environmentally friendly cleaning agents in the cleaning and maintenance of offshore floating photovoltaics[J]. Cleaning World, 2025, 41(3): 113-115.
[21] 洪志宏. 油脂加工企业恶臭污染环境影响浅析[J]. 化学工程与装备, 2020(8): 259-265.
HONG Zhihong. Analysis of environmental impact of malodorous pollution in oil and fat processing enterprises[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2020(8): 259-265.
[22] 于利丽. 环境友好型玻璃清洁剂的制备及性能研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2020: 3.
YU Lili. Preparation and performance study of environmentally friendly glass cleaner[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2020: 3.
[23] 刘英, 王万绪, 杜志平, 等. 连续活性污泥法降解壬基酚聚氧乙烯醚废水的研究[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(6): 47-50.
LIU Ying, WANG Wanxu, DU Zhiping, et al. Study on the degradation of nonylphenol ethoxylate wastewater by continuous activated sludge method[J]. Environmental Pollution and Control, 2010, 32(6): 47-50.
[24] 兰书焕, 陈杨武, 贺玉龙, 等. 光伏产业清洗剂废水低温生物处理[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(3): 388-392.
LAN Shuhuan, CHEN Yangwu, HE Yulong, et al. Low temperature biological treatment of photovoltaic industrial detergent wastewater[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2016, 22(3): 388-392.
[25] 李高峰, 李立国. 阳离子表面活性剂在工业清洗中的应用研究[J]. 中国洗涤用品工业, 2022(4): 64-70.
LI Gaofeng, LI Liguo. Study of cationic surfactant applied in industrial cleaning[J]. China Cleaning Industry, 2022(4): 64-70.
[26] 冯侠. 一种实用型多功能高效环保切水清洗剂的制备及其性能评价[J]. 清洗世界, 2022, 38(4): 29-32.
FENG Xia. Preparation and performance evaluation of a practical multifunctional efficient environmental friendly water-cutting cleaner[J]. Cleaning World, 2022, 38(4): 29-32.
[27] 蔡小雪, 王莉娜, 汤小芹. 表面活性剂泡沫性能与浓度相关性研究[J]. 中国洗涤用品工业, 2024(10): 60-69.
CAI Xiaoxue, WANG Lina, TANG Xiaoqin. Research on the correlation between surfactant foaming performance and concentration[J]. China Cleaning Industry, 2024(10): 60-69.
[28] 董亚娟, 许英宗, 谢鑫. COD 和电导率对环保清洗剂配方的指导[J]. 内燃机与配件, 2018(6): 214-216.
DONG Yajuan, XU Yingzong, XIE Xin. Guidance of COD and electrical conductivity for the formulation of environmental cleaning agent[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2018(6): 214-216.

（责任编辑　杨嘉蕾）