

循环经济视角下沙戈荒地区退役风光发电设备回收的技术策略

秦霞¹, 刘汉², 张峰³, 贾志欣⁴, 李豪祥², 立民³, 凡群平², 张水洞^{5*}, 张立群⁶

(1. 华南理工大学知识产权信息服务中心 / 图书馆, 广州 510641; 2. 金属材料强度全国重点实验室, 西安 710049;
3. 内蒙古电力勘测设计院有限责任公司, 呼和浩特 010020; 4. 华南理工大学材料科学与工程学院, 广州 510641;
5. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510641; 6. 西安交通大学, 西安 710049)

摘要: 我国沙漠、戈壁、荒漠(沙戈荒)地区持续扩大风光基地装机规模, 大量风光发电设备处于高温、强风沙、昼夜大温差等极端工况的长期侵蚀并逐步进入集中退役周期; 区域内地域辽阔、场站离散、水资源匮乏、生态脆弱等特殊条件导致传统的集中式回收工艺难以适配, 亟需构建全链条闭环回收体系集成与长效运行机制。本文论述了退役风光发电设备回收价值, 梳理了以退役风光设备循环应用实践、产业与区域循环模式构建、循环经济法律制度体系完善为代表的退役风光发电设备回收进展; 在概述沙戈荒地区风光发电设备建设情况的基础上, 从光伏设备的关键失效机制、风电设备的关键损伤机制等方面提炼了沙戈荒地区风光发电设备的工况特征, 进一步结合退役风光发电设备拆解特性并采用循环经济视角辨识了沙戈荒地区开展设备回收的挑战性。考虑循环经济减量化、再利用、资源化的基本特点并面向沙戈荒地区的特殊工况, 提出了退役风光发电设备回收关键技术体系, 涵盖沙戈荒环境适配专用前置预处理技术、高值资源化核心分离提纯技术、大型风电整机拆解与轻量化回收技术、退役附属危废无害化处置技术、再生材料本地化协同消纳配套技术。建议支持沙戈荒地区退役风光发电设备回收科技攻关, 制定沙戈荒地区风光设备回收差异化政策与标准, 开展沙戈荒地区退役风光发电设备回收产业布局, 探索形成兼顾经济效益、荒漠生态安全的完整循环实施路径。

关键词: 沙戈荒地区; 风光基地; 退役光伏; 退役风机; 循环经济; 再利用; 资源化

中图分类号: TK09; X705 **文献标识码:** A

Circular Economy-Oriented Technical Strategies for Recycling of Decommissioned Wind and Photovoltaic Power Generation Equipment in Desert, Gobi, and Desertified Regions

Qin Xia¹, Liu Han², Zhang Feng³, Jia Zhixin⁴, Li Haoxiang², Li Min³,
Fan Qunping², Zhang Shuidong^{5*}, Zhang Liqun⁶

(1. Intellectual Property Information Service Center/Library, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;
2. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an 710049, China; 3. Inner Mongolia Electric Power Survey and Design Institute Co., Ltd., Hohhot 010020, China; 4. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 5. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 6. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: China has been expanding the installed capacity of large-scale wind and photovoltaic power bases across its desert, Gobi,

收稿日期: 2026-05-18; 修回日期: 2026-09-02

通讯作者: *张水洞, 华南理工大学机械与汽车工程学院教授, 研究方向为高分子材料绿色阻燃、加工新原理和新方法; E-mail: starch@scut.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“内蒙古退役新能源装备回收利用战略研究”(2025-DFZD-55)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

and desertified (“Sha–Ge–Huang”) regions. However, a large proportion of wind and photovoltaic power generation equipment deployed in these areas has been exposed to prolonged extreme environmental conditions, including high temperatures, severe sand and wind erosion, and substantial diurnal temperature fluctuations, and is gradually entering a large-scale decommissioning phase. Owing to the distinctive regional characteristics, such as vast geographical coverage, highly dispersed power stations, severe water scarcity, and fragile ecosystems, conventional centralized recycling approaches are difficult to adapt to these scenarios. Therefore, the establishment of an integrated full-chain closed-loop recycling system coupled with a sustainable long-term operation mechanism is urgently required. This study examines the recycling value of decommissioned wind and photovoltaic power generation equipment and reviews recent advances in this field, including practical applications of circular utilization pathways, development of industrial and regional circular economy models, and improvement in regulatory frameworks supporting circular economy implementation. Based on an overview of the deployment and development status of wind and photovoltaic power facilities in China’s Sha–Ge–Huang regions, the operational characteristics of renewable energy equipment under these harsh environmental conditions are summarized from the perspectives of key failure mechanisms in photovoltaic components and critical degradation mechanisms in wind power systems. Furthermore, by integrating the dismantling characteristics of decommissioned wind and photovoltaic equipment with a circular economy perspective, the major challenges associated with equipment recycling in Sha–Ge–Huang regions are identified. Considering the core principles of the circular economy, namely reduction, reuse, and resource recovery, and addressing the unique environmental constraints of Sha–Ge–Huang regions, this study proposes a comprehensive technological framework for the recycling of decommissioned wind and photovoltaic power generation equipment. The proposed framework incorporates several key technologies, including environment-adapted pretreatment technologies specifically designed for desert conditions, advanced separation and purification technologies for high-value resource recovery, dismantling and lightweight recycling technologies for large-scale wind turbine systems, harmless treatment technologies for retired hazardous auxiliary materials, and localized collaborative utilization technologies for recycled materials. To facilitate the sustainable development of renewable energy recycling in Sha–Ge–Huang regions, it is recommended to strengthen scientific and technological innovation in key recycling technologies, establish differentiated policies and technical standards tailored to regional characteristics, and promote industrial deployment. These efforts will contribute to the development of a comprehensive circular implementation pathway that simultaneously supports economic benefits and long-term desert ecosystem security.

Keywords: desert, Gobi, and desertified regions; wind and photovoltaic power bases; decommissioned photovoltaic modules; decommissioned wind turbines; circular economy; reuse; resource recovery

一、前言

沙戈荒地区是我国北方干旱和极干旱区沙漠、戈壁、荒漠三类地貌单元的集合统称，是大型风光基地集中连片布局的复合地貌载体，具有远离产业集聚区、陆路运输半径大、生态承载力脆弱、就地资源化配套产业匮乏、野外运维条件恶劣的共性特征。沙戈荒风光基地是我国新能源“西电东送”的核心载体，主要分布于内蒙古、新疆、甘肃、青海、宁夏等省份^[1]。《以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点的大型风电光伏基地规划布局方案》（2022年）提出，2030年沙戈荒风光规划总装机规模为 4.55×10^8 kW，其中内蒙古自治区的规划装机近 2.84×10^8 kW。目前，“十四五”时期首批沙戈荒风光基地建设完成，行业重心开始转向风光装备的全生命周期管控，关键环节包括跨区域消纳、场站运维、机组技改迭代、退役设备资源化回收^[2-3]。退役风光装备主要源于2015年前建成的零散老旧风电场，部分因风沙、紫外辐射提前失效的设备，尚未形成规模化退役体量；2022年后投建的沙戈荒基地

仍有较长周期的设计寿命，短期内大规模退役压力较小。因此，行业具有现阶段处置压力平缓、中长期退役需求集中释放的发展特征^[4-5]。

沙戈荒基地风光发电设备长期暴露于极端高温、强沙尘暴、昼夜大幅温差耦合环境，材料与结构持续遭受复合侵蚀，老化衰减速度显著高于内陆场站^[6]。沙戈荒地区具有地域辽阔、场站点位分散、水资源极度匮乏、生态系统抗扰能力薄弱等突出特征。若对退役光伏组件、风机叶片、金属构件等装备采取粗放堆放、简单填埋等处置方式，不仅可能导致银、铜、硅、稀土等关键金属大量流失，而且会使重金属、含氟有机物等污染物渗入土壤和地下水，诱发不可逆的荒漠生态污染，进而阻碍关键矿产自主保供、“双碳”目标协同推进^[7-8]。《“十四五”循环经济发展规划》（2021年）要求，强化光伏组件、风电装备等新能源固废的回收利用。在此背景下，统筹并平衡设备退役处置、资源循环再生、荒漠生态保护，构建适配沙戈荒独特地域与气候条件的退役风光设备循环经济回收路径，成为西北地区新能源基地产业可持续发展、区域生态安全

治理的现实需求。

国际上的相关研究多依托欧盟《废弃电子电气设备指令》(2002年)制度框架,面向内陆平原风光场站,研发通用型热解、湿法浸出分离等技术,配套建立生产者责任延伸(EPR)治理模式。国内相关研究集中在中东部地区常规风电场和光伏电站的拆解提纯、复合材料再生、回收产业政策设计等通用方向,初步探讨了荒漠风机叶片固沙资源化利用思路^[9-10]。然而,针对沙戈荒风光基地细分场景的研究存在明显缺口,具体表现在四个方面:未能分析沙戈荒极端工况下光伏组件、风电机组差异化的材料劣化机理与失效特征,缺乏适配荒漠老化装备的专用回收工艺体系;未能结合沙戈荒场站离散、逆向物流半径大、长途运输成本高昂的空间特征建设分布式差异化回收网络,而现有的集中式处置布局模式难以匹配荒漠地理约束;缺失干旱生态敏感区的节水、低尘、移动式就地预处理成套技术研究,尚未形成闭环产业链;未开展面向沙戈荒生态保护的差异化环境监管规则、区域专属全生命周期评价(LCA)体系、荒漠再生材料标准化管控机制的系统性探究。此外,现有的循环经济落地框架均以普通内陆场站为研究对象,难以直接为沙戈荒大型风光基地提供专项技术与制度支撑^[11]。

本文将循环经济理念引入荒漠退役新能源装备固废治理领域,以沙戈荒风光基地退役设备循环回收为研究对象,探讨传统回收技术、空间布局、管理制度在沙戈荒场景中的适配性不足问题,探索兼顾经济效益、荒漠生态安全的完整循环实施路径。需要指出的是,受制于研究周期而未开展沙漠、戈壁、荒漠分区情景下的量化仿真与差异化工艺参数优化,后续可在所提研究框架下开展单一地貌风光基地的精细化技术适配研究,以补齐分区量化认识短板。

二、退役风光发电设备回收价值与进展

(一) 退役风光发电设备回收价值

1. 战略资源保障与循环经济构建

退役风光发电设备(尤其是光伏组件)富含硅、银、铝、铜等关键矿产资源,具有较高的资源化回收利用价值。通过高效的回收利用,将这些有价值资源重新导入生产制造体系,可缓解国内关键

矿产资源的对外依赖度,同时打破传统的“资源开采—产品制造—使用—废弃处置”线性经济模式,支持构建“资源—产品—再生资源”循环经济体系,适应可持续发展要求。

2. 环境风险防范与生态文明建设

退役风光发电设备若不进行妥善处理,可能造成环境风险。光伏组件中的重金属(如铅、镉,在早期组件、部分类型的薄膜组件中存在)可能随封装材料老化而渗漏,污染土壤和水源。废弃的风机叶片若长期露天堆放,复合材料难以降解且可能释放粉尘,对生态环境、居民健康造成潜在危害;若不进行有效回收,也将产生大量的固废,引发土地资源和环境压力。回收利用退役的风光发电设备,能够显著减少填埋或焚烧的废弃物量,减轻环境负担并保护当地生态。

3. 经济效益提升与产业绿色转型

退役风光发电设备的资源化回收是提升经济效益、驱动产业绿色转型的重要方式。将废弃物转化为可再生资源,既可规避高成本的末端处置,又能以材料精细提取与高值化再利用的形式创造经济收益。再生利用相比原生资源开采能够大幅降低生产环节的能源消耗,取得经济性、资源可持续利用的双重优势。构建回收体系也催生逆向物流、专业化资源化处置等新兴业态及商业模式,驱动绿色分离、高效提纯等关键技术的规模化应用。新能源产业将从“建设—运行—报废”线性模式向全生命周期闭环模式演进,提升绿色韧性与可持续发展能力,取得经济效益、资源效率、生态效益的协同提升。

4. 政策合规与社会责任

回收退役的风光发电设备,在直接产生资源、经济、环境价值之外,将更好执行政策部署并承担社会责任,进而提高回收行为的合法性、可持续性、长远发展潜力。《关于加快构建废弃物循环利用体系的意见》(2024年)将风光退役设备循环利用纳入顶层设计。《“十四五”循环经济发展规划》要求,构建覆盖全社会的资源循环利用体系,鼓励发展再生资源回收利用产业。《智能光伏产业创新发展行动计划(2021—2025年)》提出,推动光伏产业技术创新和绿色发展,以设备更新换代与回收利用为重点。《风电场改造升级和退役管理办法》(2023年)部署了退役风电设备的规范处置方式。

建设高效的回收体系也是新能源企业践行社会责任、实现可持续发展的重要体现。风光发电设备退役后的妥善处理事关环境安全与资源可持续利用，构建完善的回收体系是行业企业承担生态环境保护责任、响应“双碳”目标行动、构建绿色低碳供应链的具体实践。

（二）退役风光发电设备回收进展

1. 退役风光设备循环应用实践

按照循环经济的核心理念，退役风光发电设备的回收与再利用策略从单纯的末端废弃物处理前移至产品设计与研发阶段，落实产品的易拆解性、材料的可回收性、环境友好性。爱尔兰 R3WIND 项目将 Elium 热塑性树脂引入风机叶片制造，发挥材料的可修复性（通过加热可有效修复损伤）而将维修时间缩短 80%，叶片报废后可实现 90% 的综合回收率^[12]。国内有研究提出，风光发电设备的设计应优先考虑模块化结构，尽量减少胶黏剂的使用，优先选用大麻纤维等可降解复合材料，降低设备末端拆解成本并控制环境污染风险^[13-15]。

再制造与升级复用是材料创新之外的重要技术路径。对于仍具有使用性能的老旧机组和叶片，可实施改造复用。退役风电叶片经过简单的切割和喷涂处理可转化为公园座椅、市政景观构件等再生产品，形成“废弃物—再生产品”的短期闭环。老旧风机在经过翻新后，也可重新在小型分布式风场投入使用，合理延长使用寿命^[16]。2026 年，中国华电科工集团有限公司在新疆哈密建成万吨级退役风电叶片循环再利用示范线，形成现场拆解切割减容+集中资源化处理模式^[17]。对于退役风电叶片的末端处理，耦合热解技术具有良好的应用潜力。退役叶片的加工边角料送入热解装置，产生的热解气、焦油作为工业燃料回收利用，降低系统对外部供热的依赖；热解产生的固体残渣可提取为玻璃纤维，实现高附加值的资源化利用^[18]。

在移动式现场拆解方面，国家电投集团远达环保工程有限公司建成万吨级可移动式光伏组件拆解示范装置，支持模块化部署、即插即用、多品牌兼容的选择性无损分离^[19]。在就地预处理和区域集中处置方面，国家电投集团黄河上游水电开发有限责任公司建立了以机械拆除、热切割、选择性分离、热解、湿法提纯工艺为核心的退役光伏组件回收技

术体系，在西宁经济技术开发区建成晶硅光伏组件回收中试线，实现玻璃、铝边框、硅、银等材料的高效回收^[20]。

在产业融合层面，内蒙古自治区霍林河地区构建了“煤—新能源—电—铝”循环经济范式，利用本地风光电力直接为高耗能的电解铝产业供能，配套建设了老旧风光设备就地翻新生产线，显现能源与设备双重循环的协同效应^[21-22]。此外，退役设备中的金属循环再生是资源节约的关键环节。风光设备内富含铜、镍、银、碲等关键金属，在回收后开展高效利用将有效缓解矿产资源的供应压力^[23]。

2. 产业与区域循环模式构建

按照循环经济的核心理念开展产业与区域的协同循环，关键在于构建高效的逆向物流体系。整合产业链上下游的零部件供应商、整机制造商、风电场运营商、回收再利用专业企业等多元主体，建立闭环的物料回流机制；将生产过程中产生的残次品、风电场退役设备中的零部件进行统一回收与再加工，促进资源的有效再循环^[24]。然而，风光资源、风电场集中在西北和华北地区，具有专业化能力和规模化优势的回收企业多分布在东部沿海省份，存在产业空间错配现象，导致退役风光发电设备的运输成本偏高，制约规模化和经济性回收^[25-26]。可依托中国资源循环集团有限公司等重点企业的战略布局，建设跨区域的回收处置基地，以协调退役风光发电设备的跨区域流转，在优化资源配置、打破市场分割局面的基础上促进回收行业的健康发展^[27]。

3. 循环经济法律制度体系完善

在全球范围内，新能源废弃物循环利用的法律制度体系具有多元化特征。美国主要采用市场驱动的分散治理模式，尚未建立联邦层面的强制性回收法规。欧盟采取相对统一并具有强制性的管理方式，通过《废弃电子电气设备指令》实施统一管控，强制推行 EPR 制度，即将全面禁止风电叶片的填埋处置。我国在新能源废弃物治理方面有所滞后，主要依赖政策文件，而法律层面的刚性约束不足，相关配套细则也处于缺失状态^[28]；正在构建新能源废弃物治理的系统性框架，以确立污染防治底线、构建主体责任体系、规范技术标准、形成法律责任闭环。例如，《中华人民共和国生态环境

法典》清晰界定动力电池生产商的责任、风光电站运营商的处置义务,确立退役风光设备“循环利用优先、无害化处置兜底”的处理原则^[27]。

实施EPR制度是推动循环经济发展的关键措施,要求设备制造商将环境责任延伸至产品生命周期的末端回收环节,在产品设计阶段优先考虑可回收性,承担回收体系的建设与运营成本^[28-29]。欧盟将光伏组件纳入《废弃电子电气设备指令》的强制管理范畴,设定回收再利用率的硬性指标(80%以上)^[30-31]。国内在政策文件层面仅是鼓励推行EPR制度,而强制性的法律条款缺乏,导致企业参与回收的积极性不高。

针对退役风光发电设备回收,我国形成了包括国家标准、行业标准、团体标准、地方标准在内的多级标准架构^[32-38]。然而,钙钛矿光伏、碳纤维风机回收专项标准存在空白,因前沿领域标准滞后于产业升级而致新型风光装备循环工艺规模化落地困难。此外,鉴于循环产业普遍存在初期成本较高的情况,可实施配套的扶持政策,如研发费用加计扣除、绿色低息贷款、专项补贴等,以合理降低行业企业在回收技术改造方面的成本负担^[39]。

三、沙戈荒地区风光发电设备的建设情况与工况特征

(一) 沙戈荒地区风光发电设备的建设情况

2005—2015年建设的沙戈荒风光基地老旧设备将在“十五五”“十六五”时期开始退役,在2040年前后逐步集中退役。分区域看,沙漠基地如库布齐、乌兰布和、腾格里、巴丹吉林等,装机数量和投产时间均相对集中,退役将呈现“低频-高峰”式释放;戈壁区域如河西走廊、柴达木、新疆哈密等,早期项目较多,可能率先出现风机“以大代小”、逆变器替换、组件局部更新需求;荒漠区域设备点位更加分散,回收半径长、生态修复约束强,运输与合规处置成本更高。未来10年内,沙戈荒地区退役仍以早期风电技改、少量提前失效组件替换为主;未来10~20年,随着基地风机接近20年运行节点,退役设备将显著增加,对区域回收网络、拆解能力、再生利用企业布局提出更高要求。受制于沙戈荒地区偏远的地缘特征、高昂的物流成本、特殊的生态约束,传统的就地掩埋或粗放拆解

方式不仅面临严峻的环境风险,更违背循环经济的发展初衷。

沙戈荒地区属于极端干旱大陆性气候区,年均日照时数为3000~3600 h^[1],夏季受地表强辐射影响,设备表面温度普遍超过50℃,深冬极端温度低至-40℃;单日的昼夜温差为30~60℃,高低温交替剧烈,热循环效应显著^[2-3]。沙戈荒风光基地频发沙尘暴、极端高低温、持续性干旱等气象条件,野外环境严苛而使风光发电装备长期承受风沙冲刷、昼夜强温变、缺水运维等载荷的耦合作用。光伏、风机部件对应的材料力学性能、设备结构、内部电气系统均明显区别于内陆场站,加速金属、无机、高分子基材老化失效,制约退役风光装备“回收-再生-再利用”资源化闭环体系的落地实施,这类工程难题引发国内外的广泛关注。

沙戈荒地区的相关省份开始探索性布局退役风光发电设备回收产业。内蒙古自治区依托鄂尔多斯、包头两个产业节点城市,正在构建“场站拆解+区域集中处理”两级回收网络。甘肃省在酒泉经济技术开发区规划了新能源固废回收产业园,重点服务河西走廊风光基地。青海省依托海南州共和光伏园区,建设了国内首个光伏组件回收示范线。也要注意,相关产业布局仍以单点示范为主,尚未形成覆盖沙戈荒全域的系统化回收网络,与未来10~15年集中退役的规模化需求相比存在较大差距。

(二) 沙戈荒地区风光发电设备的工况特征

1. 沙戈荒地区光伏设备的关键失效机制

沙戈荒地区极端的光热和风沙环境对光伏设备关键组件的可靠性构成严峻挑战。紫外线辐照导致光伏组件封装材料(尤其是乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA))的聚合物主链断裂并形成共轭结构,进而引发封装层黄变、透光率衰减、界面黏结力下降^[4-5]。封装透光性能劣化直接降低了短波光子向硅片内的入射效率,导致电池短路电流减小、组件输出功率持续下降^[6]。沙戈荒地区昼夜温差剧烈,产生热机械应力并叠加玻璃、硅片、焊带、封装材料的热膨胀系数不匹配,长期处于冷热循环状态,热疲劳累积损伤加速电池功率衰减^[7]。风沙是沙戈荒地区光伏系统特有的物理侵蚀因素,高速沙粒对玻璃表面减反射涂层的持续磨蚀导致组件表面呈现

“毛玻璃化”外观，透光率发生不可逆损失。积聚在组件表面的沙尘可能形成局部遮挡，导致组件局部温度显著升高（20~40℃），加速电池片烧蚀和封装材料碳化^[8-10]。高能紫外线、剧烈温差循环、风沙侵蚀的耦合作用显著加速了光伏组件的整体老化进程，故障率约为常规环境下的2.5倍^[40]。根据CMIP6气候模型的预测分析，沙尘暴等极端天气事件可导致光伏单日发电量损失超过14%^[41]。

2. 沙戈荒地区风电设备的关键损伤机制

沙戈荒地区极端高温、剧烈温差、持续性风沙环境的联合作用，对风电机组的关键组件造成多重不可逆损伤，主要体现在传动电气系统、叶片复合材料两方面。

① 极端高温直接威胁传动系统的运行稳定性，齿轮箱内润滑油对温度高度敏感，油温每升高10℃导致使用寿命缩减50%；当齿轮箱温度超过70℃，润滑油黏度急剧下降易致油膜破裂，加剧金属构件之间的直接摩擦和磨损，导致风电机组发电量损失超过5%^[42-43]。发电机绕组绝缘性能随着高温持续作用而劣化，主轴轴承的额定工作温度通常控制在60℃以内，过热会引发主轴热膨胀变形而缩短风电机组服役寿命。风机变流器在散热受阻时，输出性能会随温度升高呈指数级衰减^[44-45]。

② 高温会损伤叶片复合材料的树脂基体和纤维-树脂界面，温度从20℃升至70℃时，叶片复合材料的弯曲强度、弯曲模量分别下降34%、37%，结构稳定性显著削弱^[2]。在60℃/3h的模拟环境下，蒙皮层合板拉伸强度下降23.9%、压缩强度衰减41%，表明高温软化环氧树脂而削弱纤维界面的结合能力^[3]。在-40℃的极端低温环境下，碳纤维拉挤板的拉伸、压缩、弯曲强度虽有小幅提升，但树脂的收缩脆性显著增加；长期的低温和高温循环交替作用会在界面累积应力并持续诱发纤维与树脂的分层脱粘，进而永久性降低叶片的使用寿命^[2]。

风沙侵蚀是沙戈荒地区风机独有的持续性损伤源。

① 叶片前缘是主要受损区域，硬质砂粒的持续撞击会形成叶片表面的砂眼、凹坑、表层剥落，严重工况下兆瓦级风机的年发电量可损失50%^[46]。叶片表面粗糙度的增加导致旋转阻力增大，能量损耗达到22.8%^[47]。叶片损伤演化过程可分为微小砂眼形成、扩张为凹坑、连通形成带状剥落、破坏气动外形等阶段。剥落后产生的台阶流会急剧恶化气动特性，前缘磨损可引发升力系数下降超过50%、阻

力系数提高3~5倍。叶尖线速度更高，磨损速率是叶根的10~20倍^[46-47]。叶片损伤的持续发展可导致基体开裂甚至叶片断裂，引发安全事故并造成重大损失。风电场实测数据显示，机组叶片9个月未清理沙尘，发电功率损失超过50%^[42]。

② 风沙侵入机舱后会造成齿轮箱、发电机、电气控制系统的分层磨损和电气故障。齿轮箱损伤分为轻度（擦伤）、中度（点蚀、剥落）、重度（大面积点蚀、轴承严重破损），伴随异响和剧烈振动^[43]。沙尘混入润滑脂会使轴承L10寿命缩短35%、换油周期减半，传动系统振动超标概率达到15%^[44-45]。积尘会使开关、电磁铁芯等电气设备故障率提高3~5倍，增加风电机组停机次数并提高运维成本^[48]。风沙冲刷机舱外表面，若伴随盐分沉积会加速金属壳体腐蚀^[49]。轮毂变桨轴承、密封结构缺少防护，沙粒侵入滚道会产生磨料磨损，进而增加变桨运动阻力、缩短轴承寿命^[50-51]。

③ 风沙冲刷塔筒导致防护涂层剥落，加速钢结构腐蚀和疲劳裂纹萌生扩展^[52-53]；高腐蚀性环境下的风电塔筒年均腐蚀速率约为0.15~0.3mm，显著增加防腐运维成本^[54]。

④ 风沙侵蚀会对风电场箱式变电站、集电线路等配套设备造成安全隐患。箱式变电站的散热系统易积尘，高压端子表面形成导电泥膜且在受潮后易引发沿面放电甚至短路击穿；沙尘堆积会降低散热效率40%，加速绝缘纸老化并大幅缩短箱式变电站的寿命^[55]。集电线路复合绝缘子遭受风沙冲蚀磨损，在强沙尘暴天气下损伤加剧，导致线路故障概率明显提升^[56-57]。

3. 沙戈荒地区风光发电设备退役拆解回收的挑战与制约

沙戈荒地区恶劣的自然环境对退役风光设备的全链条拆解、回收处置带来了直接挑战，主要体现在拆解难度增加、资源化利用受限、配套设施匮乏、综合成本攀升等方面。

① 沙戈荒地区特有的不均匀积沙分布，导致光伏组件的不同区块老化程度差异明显，加大场站进行分批次运维、分区退役拆解的甄别难度与实施成本^[58]。设备长期暴露于风沙侵蚀，风机叶片、光伏组件表面附着厚层沙垢，机舱与塔筒内部混杂沙尘及锈蚀碎屑，因而在正式退役拆解前需要增设干式脱沙、除锈等专项预处理工序，延长作业时间并提高操作复杂度^[59]。

② 风机叶片复合材料在风沙冲蚀、昼夜温差循环作用下易产生分层、破损等结构缺陷。在叶片破碎再生过程

中, 这些结构缺陷导致杂质掺入比例大幅提升, 直接降低玻璃纤维、树脂等再生原料的纯度, 明显削减设备资源化回收的经济效益^[58]。③沙戈荒地区的高温干旱环境导致储能舱外壳锈蚀、电解液渗漏风险提高, 又因区域水资源匮乏而无法采用常规水洗工艺, 仅能采用干式防爆清理而致作业效率受限^[60-61]。沙戈荒新能源基地普遍远离城镇, 周边缺乏专业的危废集中拆解处置场地, 配套处置资源严重不足^[59]。④风机叶片、塔筒等大型构件体积庞大, 荒漠区域道路承载能力有限, 远距离运输成本高昂, 专业化拆解设备难以进场进行规模化、标准化作业, 导致拆解作业集约化程度偏低^[62-64]。风沙环境下退役风光发电设备是高风险污染源, 若管控措施缺失或处置不当, 易形成多环节耦合污染灾害链, 因而拆解全流程需配套防风抑尘、分区暂存等专项防护体系, 进一步加大设施投入^[65]。实际上, 高成本、低效率的拆解环节成为制约沙戈荒地区退役风光发电设备回收整体经济性的核心瓶颈。

四、循环经济视角下沙戈荒地区退役风光发电设备回收的挑战性

(一) 通用回收流程与沙戈荒地区的物料特性不匹配

在基于常规内陆场站工况或普适性管理框架的既有循环经济模式/通用回收流程中, 退役光伏组件贵金属提纯以强酸湿法浸出为核心工艺, 光伏封装胶膜、风电叶片复合材料解离普遍采用550℃以上高温热解技术。然而, 沙戈荒地区光伏、风电退役构件表面普遍附着沙尘与盐碱沉积物, 现有通用工艺缺乏针对性的前置处理工序, 易造成设备磨损、物料二次污染, 降低后续回收提纯精度。沙戈荒风电场叶片长期受昼夜温差交变、风沙冲蚀, 出现树脂氧化脆化、纤维-树脂界面脱粘、较多微裂纹等结构性预损伤。相较于内陆, 沙戈荒地区的预损伤叶片对高温热解高度敏感, 常规热解工况会加剧微缺陷扩展与纤维热损伤, 造成再生玻璃纤维、碳纤维强度分别衰减40%~50%^[66]、30%以上^[67], 从而显著降低纤维资源化价值。此外, 风沙磨蚀氧化后的轴承、齿轮箱等金属构件也不适配常规的还原冶炼工艺。因此, 内陆通用回收处理方法难以适配沙戈荒地区退役光伏、风电物料的特殊劣化特性,

需要针对性开发低温、干法、低水耗的回收技术体系, 优化树脂解聚工艺与催化体系, 保障沙戈荒地区退役新能源设备的高效高值回收。

(二) 集中式回收网络与沙戈荒地区的离散场站布局冲突

既有的逆向物流体系(如零部件厂商-整机厂-回收企业联动)和东部沿海地区的回收基地布局都存在一定的局限性, 突出体现在退役设备需要通过公路网络才能相对经济地汇集至区域处置中心。然而, 沙戈荒场站大多位于无人区, 运输半径是东部地区的3~5倍, 大部件跨省运输还受到道路承载能力的限制。未来10年, 风光设备退役量以早期技术改造、少量故障替换为主, 呈现低频率、广分布的特征; 在西部地区主要城市、东部沿海城市建设固定式回收基地, 将面临较长的闲置期而致产能空转, 在远期退役高峰来临时又会因退役设备分散、大部件运输受道路承载能力限制而难以经济地汇集至基地, 导致产能同样无法充分释放。沙漠风光基地未来退役量将呈现脉冲式集中和低频释放, 戈壁和荒漠区域则更加分散, 这种空间与时间的双重差异导致单一集中处置模式效率偏低。因此, 集中式回收网络无法有效处置沙戈荒地区离散的风光发电退役设备, 需要发展对应的回收基地布局。

(三) 普适性政策框架与沙戈荒地区的生态保护需求存在差异

欧盟的EPR制度、《废弃电子电气设备指令》核心是明确责任主体与回收率指标, 但未针对生态敏感区设置差异化管控要求, 凸显普适性政策框架的局限性。我国EPR制度推行面临现实困境, 在沙戈荒地区风光发电设备回收场景下被进一步放大, 导致普适性制度难以防范该区域的生态破坏风险, 体现出沙戈荒地区生态保护需求与普适性政策的差异性。

从行业监管看, 我国风光设备EPR专项政策不够完善, 跨部门监管协同存在壁垒, 不足以支撑沙戈荒地区风光发电设备的全生命周期管控。从权责界定看, 风光设备产业链长、参与主体多元, 开发商、制造商、运营商权责边界模糊, 部分早期设备还存在责任主体缺位的问题。从技术支撑看, 国内风光发电设备回收标准滞后, 缺少沙戈荒地区专用

技术规范，尤其是荒漠场景下的回收与污染物防控技术尚不成熟。从商业模式看，风光发电设备回收行业盈利空间狭窄，EPR制度实施与市场化回收衔接缺乏成熟经验，回收企业可持续运营面临一定的困难。

沙戈荒地区生态脆弱，地表扰动后的恢复速度极慢，退役风光发电设备携带的高风险污染物在强风干旱条件下扩散更快、影响更广。现有的普适性EPR制度并未适配该场景，有加剧沙戈荒地区生态风险的可能性。需要以环境安全阈值为刚性约束，考虑我国EPR制度落地的障碍性因素，设计沙戈荒地区的差异化EPR实施方案以及配套的监测应急规范，推动EPR制度优化适配沙戈荒场景。

五、循环经济视角下沙戈荒地区退役风光发电设备回收关键技术

考虑循环经济减量化、再利用、资源化的基本特点，面向沙戈荒地区高温强风沙、站点空间离散、生态环境脆弱、运输成本高昂等特殊工况，提出了退役风光发电设备回收关键技术体系；基于循环经济全生命周期闭环管理理念并耦合相应技术单元，构建了沙戈荒地区退役风光设备三级轴辐式回收体系，将技术可行性、空间可达性、经济可持续性统一于闭环框架（见图1）。在空间上，按照分散收集、集中处理、就近消纳进行布局：百兆瓦级场站

设置一级移动预处理站，压缩待外运固废体积并减少外运频次；区域地理中心设置二级资源化中心，开展深加工；县域产业基地设置三级消纳节点，对接本地需求并破解逆向物流成本难题。在管控上，以LCA、数字化溯源双轨保障环境效益，建立数字护照追溯平台，打通再生材料供应链信任壁垒，落实技术可行性。在经济上，推动高值材料产业内循环、能源-材料共生，将碳减排量开发为碳资产，激励下游需求并保障经济可持续性。

（一）沙戈荒环境适配专用前置预处理技术

沙戈荒地区强紫外、大温差、风沙侵蚀易引发风光发电设备的不可逆损耗，场站布局分散导致设备跨区域转运的经济效益偏低。可针对性发展专用前置预处理技术，以现场减容、抑尘节水、无损初分、危废原位封存为核心目标，形成移动式就地预处理成套技术方案。① 集装箱式模块化移动拆解预处理装备，将破碎、重力筛分、负压除尘单元集成至标准集装箱载体，可快速部署至荒漠风光场站进行就地减容，从源头削减大件设备长途运输体量与物流成本；配套全封闭负压集尘系统，抑制硅粉、玻璃微粉、玻璃纤维无组织逸散，防范荒漠土壤与大气粉尘污染。② 冻融-机械耦合分层解离预处理工艺，依托沙戈荒地区昼夜温差超过30℃的天然环境条件，辅以人工低温控温冻融处理，利用玻璃、硅片、高分子背板热膨胀系数差异来诱导界面

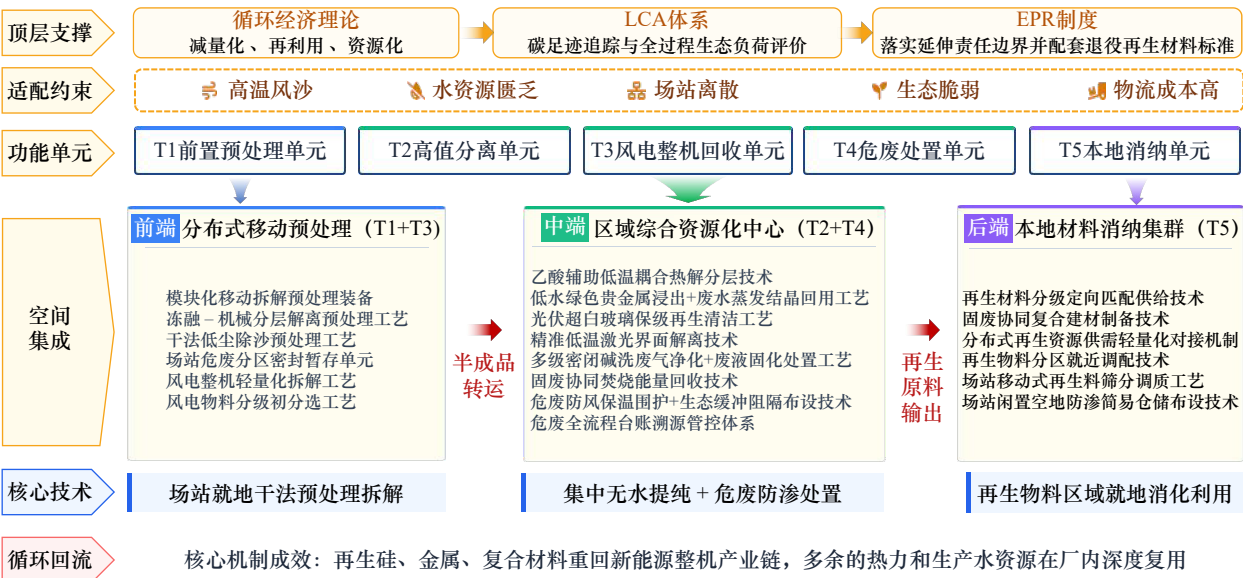


图1 沙戈荒地区退役风光发电设备回收的空间集成架构与全闭环工艺路径

开裂，初步分离光伏组件背板、玻璃、电池片，降低后续热解工序能耗，规避含氟背板高温热解释放氟化氢有毒气体的环境风险。③ 反映区域水资源约束的干法低尘除沙预处理工艺，采用高压干风吹扫结合微量低毒生物物质溶剂喷淋复合除沙方案，规避传统的水洗除灰模式，可同步清除塔筒、叶片表面致密积尘层，降低后端回收设备磨料磨损损耗。④ 危废分区密封暂存预处理单元，针对退役齿轮润滑油、铅酸储能电池等危险废弃物，配置防风沙防渗密闭集装箱进行分区存储，通过防渗垫层、扬尘阻隔围挡杜绝露天堆存引发的重金属渗滤、挥发性有机物扬散，降低荒漠区域水土生态破坏风险。

（二）高值资源化核心分离提纯技术

采取循环经济的高值再生、梯次利用导向，针对光伏组件硅、银、铝、超白玻璃等高价值组分，开发适配沙戈荒地区干旱少水和冬季极寒环境的低能耗、低污染分离提纯工艺。① 国内开展的有机酸预溶胀耦合低温热解的基础研究证实，乙酸预处理可降低树脂分解温度、缓解再生玻璃纤维和晶硅的热损伤。据此重点攻关针对沙戈荒地区的乙酸溶剂高效循环回收工艺、耐沙尘宽温域运行的低温热解反应器，以适配沙戈荒地区冬季低温、多风沙的极端环境，逐步实施小试、千克—百千克级放大试验，补齐工程化技术短板。② 低水绿色湿法贵金属提取技术，支持开发氨水—双氧水常温无氮氧化物浸出体系、甜菜碱盐酸盐深共晶溶剂选择性提银工艺，用于淘汰高硝酸体系高排水浸出工艺。溶剂具有20批次以上的循环复用能力，废水产出量较传统工艺下降70%，配套小型模块化蒸发结晶装置，实现工艺废水场内闭环回用和零外排。③ 光伏超白玻璃保级再生清洁工艺，在热解脱胶后采用微量热碱喷淋协同机械抛光技术去除玻璃表面残碳、磨损减反射涂层，应用再生玻璃、区域火电厂粉煤灰联合制备泡沫玻璃建材，实现大宗低值固废的就地资源化。④ 精准低温激光界面解离技术，调控激光扫描功率与瞬时温度峰值不超过190℃，在不引发EVA胶膜热解产气的前提下实施硅片无损伤剥离，在实验室小试条件下再生晶硅的硼、磷等杂质含量控制在0.1 ppm级别，对应纯度达到6N太阳能级标准，可

直接回流至区域光伏组件制造产业链，实现高值材料的闭环回用。

（三）大型风电整机拆解与轻量化回收技术

定向解决场站离散约束属于分布式移动预处理站点的核心作业工序，用于解决荒漠区域风机大件的远距离转运难题。风电整机包括纤维增强树脂基叶片、齿轮箱润滑油、塔筒钢结构、机舱电气模块等异质物料，其中环氧树脂热固性交联结构的高效回收是循环经济应用的核心堵点。考虑沙戈荒地区连片风光基地集中退役特征，采用“物理破碎减量+热解/化学解聚高值提质+金属/油品闭环回用”的梯级组合回收架构，聚焦轻量化回收需求，支持差异化的资源化利用。以移动式物理切割破碎为核心工艺开展叶片回收，实施现场减容、粉尘密闭收集，契合轻量化回收的减量需求。将普通玻璃纤维叶片破碎粉料就近供给建材企业进行降级消纳；对于含碳纤维的高价值叶片，转运至基地集中资源化中心，采用热解或催化化学解聚分离纤维与树脂（长纤维经改性后回用于零部件再制造，短纤维作为建材填料）。这两类高值化工艺依托沙戈荒地区的低成本绿电、短途转运、低价土地优势，合理对冲成本并保障经济可行性。对于环氧树脂，通过定向催化解聚生成双酚A等单体，将纯度提高至90%以上并直接用于本地的环氧树脂再生产。对于废润滑油，采用全密闭精馏—加氢精制工艺，增设风沙过滤单元并依托基地富余的光伏电力供热，再生基础油就地回用于风电场运维。对于塔筒钢结构，按照腐蚀程度分类修复或熔炼再生。机舱电气模块先分级拆解，铜、铝型材直接回用，电路板送入湿法单元回收稀贵金属。最终实现风电整机的全组分梯次资源化、轻量化减量、就近闭环利用。

（四）退役附属危废无害化处置技术

按照循环经济的末端减害、就近处置原则，建立适配沙戈荒生态脆弱区的危废无害化处理单元，以解决偏远场站危废外运处置成本高、污染物扩散风险大的问题。针对热解工序产生的含氟废气，配套多级密闭碱洗净化系统，以充分吸收并降解氟化氢、挥发性有机物。工艺产生的少量酸性废液经中和沉淀、膜过滤、蒸发结晶多级处理后进行场内循

环利用。重金属固化滤渣转运至区域合规荒漠危废填埋场进行稳定封存，阻断重金属渗漏风险。热解炭渣、废弃塑料等不可直接再生残余物用于焚烧供热，促进能量闭环回收，减少固废堆存占地。所有末端处置单元均配套防风、防尘、保温围护结构，以适配沙戈荒地区的极端气候条件并保障全年稳定运行。结合沙戈荒地区土地辽阔、人口密度极低的地域特征，优化危废转运路线，缩短场内转运距离，进一步降低危废转运过程中扬尘、泄漏等环境扰动。构建末端危废处置全过程台账溯源能力，完整记录危废产生量、处理流程、残渣转运去向，适应生态环境监管与循环经济全生命周期溯源管控要求。在处置单元外围布设原生草本固沙植被缓冲带，形成物理隔离屏障，从空间层面隔绝处置区域与周边荒漠原生生态系统，降低长期运营对本地脆弱水土环境的潜在扰动。

（五）再生材料本地化协同消纳配套技术

按照循环经济的短链循环理念，构建沙戈荒地区再生材料就地消纳体系，规避再生物料跨区域长距离运输带来的碳排放与物流成本增量。高纯度再生硅、电解银定向供应区域内的风光基地配套光伏制造企业，促进关键材料的产业内闭环；再生玻璃纤维、提纯光伏废玻璃、热解固体残渣与本地粉煤灰协同制备泡沫玻璃、塑木复合材料等建材产品；再生润滑油、再生铝材、再生钢材直接供应风电场运维、塔筒防腐施工等本地产业，形成“基地回收—本地消纳”的短循环模式，提升回收体系的经济可行性。针对沙戈荒风光场站布局零散、点位分散、产业集聚度低的基本特征，建立轻量化分布式再生材料供需对接机制，破除零散场站物料供需信息壁垒，盘活区域内碎片化再生资源。根据各场站产出的再生材料品类、产量，推行分区就近调配模式，对接周边县域的建材加工、风电运维小微企业，适配区域分散化资源特征。针对零散回收物料批次杂、品相不均的问题，配置小型移动式分选预处理设备，就地开展再生材料筛分、调质加工，降低分散物料归集转运损耗。发挥荒漠地域低价土地优势，在各个风光场站边角空地布设简易防渗仓储点位，替代集中式仓储园区，以节约基建投资、规避长途归集能耗。

六、沙戈荒地区风光发电设备回收发展建议

（一）支持沙戈荒地区退役风光设备回收科技攻关

聚焦极端环境适配性技术瓶颈，加大科技攻关支持力度，提高沙戈荒地区退役风光设备回收综合能力。研发移动式、模块化、低水耗的就地预处理装备，集成干法除沙、负压抑尘、冻融分层等功能，支持退役设备在场站端减容80%以上，降低长途运输负荷。攻关低温低能耗高值分离技术，开发乙酸辅助热解（ $\leq 350^{\circ}\text{C}$ ）、深共晶溶剂选择性提银、激光界面解离（ $\leq 190^{\circ}\text{C}$ ）等绿色工艺，保持再生晶硅、玻璃纤维、银粉等材料性能不退化。构建风电整机成套回收技术链，增强环氧树脂化学解聚、废弃润滑油密闭再生、塔筒防腐翻新等关键环节技术水平，提高风电整机再制造率。建立沙戈荒地区LCA数据库，量化不同回收路径的碳足迹与资源收益，支撑技术路线动态优化。支持高校、科研院所、龙头企业联合攻关，推动技术成果在内蒙古、甘肃、新疆等省份的代表性基地开展工程化验证。

（二）制定沙戈荒地区风光设备回收差异化政策与标准

加快制定“沙戈荒退役光伏组件干法预处理技术规范”“风电叶片低温热解产物质量控制标准”“再生硅、再生玻璃纤维在西北建材中应用技术规程”等沙戈荒地区风光发电设备回收专用技术标准，填补现行国标体系的空白。强化我国EPR制度执行，对沙戈荒地区项目实行回收保证金制度，要求开发商在并网前按装机容量预缴回收准备金，再由省级平台统一监管使用。对采用可回收设计、再生材料的新建项目，给予绿色信贷贴息、用地指标倾斜等政策性激励。建立跨省协同监管机制，可依托重点企业建设全国统一的退役设备数字化溯源平台，保障从拆解、运输到再生利用全过程的可追踪与可核查。

（三）开展沙戈荒地区退役风光设备回收产业布局

建议管理部门将沙戈荒地区风光退役设备回收纳入《西部地区鼓励类产业目录》，支持在呼和浩特、银川、乌鲁木齐等西部地区枢纽城市建设风光装备再制造产业园。合理集聚预处理、材料提纯、

再生制造等上下游企业,形成并壮大区域循环产业集群。激励本地的火电、电解铝、建材企业与回收中心协同,将再生玻璃、热解残渣用于泡沫玻璃、路基材料生产,将再生润滑油回用于风电场运维。支持龙头企业开展“以旧换新”试点,对提前退役的老旧机组提供回收补贴与技改支持,推动“以大代小”升级与资源循环的同步实施。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: May 18, 2026; **Revised date:** September 2, 2026

Corresponding author: Zhang Shuidong is a professor from the School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology. His major research fields include green flame retardancy and novel processing principles for polymers. E-mail: starch@scut.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on the Recycling of Retired New Energy Equipment in Inner Mongolia” (2025-DFZD-55)

参考文献

- [1] 肖玲娟,蒋海波,刘长栋.我国沙戈荒区域新能源外送基地经济性分析[J].煤质技术,2023,38(1):21-26.
Xiao L J, Jiang H B, Liu C D. Economic analysis of the new energy export base in the Gobi and desert areas of China[J]. Coal Quality Technology, 2023, 38(1): 21-26.
- [2] 慕沐.为新能源“沙戈荒”基地点亮“智慧”光——专家解读中国沙戈荒新能源建设的全球示范价值[J].中国石油企业,2025(5):54-57.
Mu M. Light up the “wisdom” light for the new energy “shagehuang” base: Experts interpret the global demonstration value of China’s shagehuang new energy construction[J]. China Petroleum Enterprise, 2025 (5): 54-57.
- [3] 张启亮.新能源政策对光伏、风电建设的影响分析[C]//人工智能与经济工程发展学术研讨会,2025:875-878.
Zhang Q L. Analysis on the influence of new energy policy on photovoltaic and wind power construction[C]//Academic Seminar on Artificial Intelligence and Economic Engineering Development, 2025: 875-878.
- [4] 徐进.我国风电未来发展的十大看点[J].能源,2025(5):52-57.
Xu J. Ten highlights of the future development of wind power in China[J]. Energy, 2025 (5): 52-57.
- [5] 司俊龙,艾琳,邱辰.2023年中国风电发展现状与展望[J].水力发电,2024,50(12):1-4,17.
Si J L, Ai L, Qiu C. Status and prospect of China’s wind power development in 2023[J]. Water Power, 2024, 50(12): 1-4, 17.
- [6] 潘尘.沙戈荒风电基地技术风险传导机制研究——基于甘肃北部多场耦合效应分析[J].风能,2025(9):66-72.
Pan C. Study on technology risk transmission mechanism of shagehuang wind power base—Based on the analysis of multi-field coupling effect in Northern Gansu Province[J]. Wind Energy, 2025(9): 66-72.
- [7] 张嘉琪,王鹏,张强,等.基于全生命周期的风光发电行业可持续发展问题及政策建议[J].环境保护,2025,53(16):50-54.
Zhang J Q, Wang P, Zhang Q, et al. Sustainability challenges and policy recommendations for wind-solar power industry based on full life cycle assessment[J]. Environmental Protection, 2025, 53 (16): 50-54.
- [8] 徐上.退役潮将至,新能源设备处置何以破局?[J].环境经济,2026(8):12-17.
Xu S. The wave of decommissioning is approaching, how can new energy equipment disposal break the situation?[J]. Environmental Economy, 2026(8): 12-17.
- [9] 苏勇.退役风电光伏设备的危害与回收[J].生态经济,2024,40(1):5-8.
Su Y. Hazards and recycling of decommissioned wind power and photovoltaic equipment[J]. Ecological Economy, 2024, 40 (1): 5-8.
- [10] 张思索,王洪亮,刘向辉,等.退役风光设备资源化利用标准体系构建[J].热力发电,2026,55(1):11-19.
Zhang S S, Wang H L, Liu X H, et al. Constructing a standardization system for resource utilization of decommissioned wind and photovoltaic equipment[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55 (1): 11-19.
- [11] 高兴强.沙漠新能源基地项目开发存在的问题及政策建议[J].太阳能,2025(2):16-23.
Gao X Q. Problems and policy recommendations in the development of desert new energy base projects[J]. Solar Energy, 2025 (2): 16-23.
- [12] 燕春晖.爱尔兰启动R3WIND项目:推动风电叶片循环经济发展[J].石油炼制与化工,2025,56(7):194.
Yan C H. Ireland launches R3WIND project: Promoting circular economy development of wind turbine blades[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2025, 56(7): 194.
- [13] 张效林,杨梦豪,曹靖,等.退役风电叶片资源化利用技术研究进展[J].复合材料学报,2024,41(3):1192-1203.
Zhang X L, Yang M H, Cao J, et al. Research progress of decommissioned wind power blade resource utilization technology[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(3): 1192-1203.
- [14] Pender K, Bacharoudis K, Romoli F, et al. Feasibility of natural fibre usage for wind turbine blade components: A structural and environmental assessment[J]. Sustainability, 2024, 16(13): 5533.
- [15] Mishnaevsky L J, Jafarpour M, Krüger J, et al. A new concept of sustainable wind turbine blades: Bio-inspired design with engineered adhesives[J]. Biomimetics, 2023, 8(6): 448.
- [16] 张柏林.废旧风力发电机叶片资源化利用研究进展[J].工程科学学报,2023,45(1):112-124.
Zhang B L. Progress in resource utilization of waste wind turbine blades[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45 (1): 112-124.
- [17] 华电哈密1万吨退役风电叶片循环再利用项目正式投产[EB/OL]. (2025-12-24)[2026-08-11]. <https://www.ceeia.com/HYZL/d/202512/56cf92f834f34e3aac09dee79d129c15.html>.
The Huadian Hami 10 000 t retired wind turbine blade recycling project has officially started production[EB/OL]. (2025-

- 12-24)[2026-08-11]. <https://www.ceeia.com/HYZL/d/202512/56cf92f834f34e3aac09dee79d129c15.html>.
- [18] AlGhamdi A, Ali I, Naqvi S R. Mild two-step thermochemical recovery of clean glass fibers from wind-blade GFRP[J]. *Polymers*, 2025, 17(24):3344.
- [19] 远达环保退役光伏组件回收关键技术获评达国际领先水平[EB/OL]. (2026-05-29)[2026-08-15]. https://www.spic.com.cn/xtdt1/202605/t20260529_327942.html.
Yuanda Environmental's key technology for recycling retired photovoltaic modules has been rated as internationally leading[EB/OL]. (2026-05-29)[2026-08-15]. https://www.spic.com.cn/xtdt1/202605/t20260529_327942.html.
- [20] 晶硅光伏组件回收利用技术研究项目通过验收[EB/OL]. (2023-07-11)[2026-08-15]. <http://finance.people.com.cn/n1/2023/0711/c1004-40032879.html>.
The research project on the recycling technology of crystalline silicon photovoltaic modules has passed the acceptance[EB/OL]. (2023-07-11)[2026-08-15]. <http://finance.people.com.cn/n1/2023/0711/c1004-40032879.html>.
- [21] 杨苗苗. “沙戈荒”储能挑战重重[J]. *中国能源观察*, 2025(12): 46-49.
Yang M M. “Shagehuang” energy storage challenges are numerous[J]. *China Energy Observation*, 2025(12):46-49.
- [22] 董梓童, 苏南. “沙戈荒”风光光伏基地开发需走“高定”路线[N]. *中国能源报*, 2023-08-07(7).
Dong Z T, Su N. The development of “shagehuang” wind power and photovoltaic base needs to follow the “high-definition” route[N]. *China Energy News*, 2023-08-07(7).
- [23] International Renewable Energy Agency. End-of-life management in the circular economy: Solar photovoltaic panels[R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2026.
- [24] 李勃森, 胡锦桥, 喻斌恺, 等. 极端条件下电化学储能材料及器件关键问题及应用挑战[J]. *电力科技与环保*, 2025, 41(3): 426-436.
Li B S, Hu J Q, Yu B K, et al. Key issues and application challenges of electrochemical energy storage materials and devices under extreme conditions[J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2025, 41(3):426-436.
- [25] 林瞳, 张荣耀, 代涛, 等. 中国风机大宗金属与稀土金属在用存量、空间分异及城市矿山潜力[J]. *中国矿业*, 2026, 35(5): 352-365.
Lin T, Zhang R Y, Dai T, et al. In-use stocks, spatial differentiation, and urban mining potential of bulk and rare earth metals in China's wind turbines[J]. *China Mining Magazine*, 2026, 35(5): 352-365.
- [26] 马红欣. 风机叶片运输专用装置的结构设计[J]. *机械工程与自动化*, 2024, 53(2):85-87.
Ma H X. Structure design of special device for fan blade transportation[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2024, 53(2): 85-87.
- [27] 贾超, 周翠颖, 葛泉波, 等. 沙戈荒新能源基地沙尘暴致灾风险预警评估综述[J/OL]. *中国电机工程学报*, 2026-03-30. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20260328.1412.002>.
Jia C, Zhou C Y, Ge Q B, et al. Summary of risk early warning assessment of sandstorm in Shagehuang new energy base [J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 2026-03-30. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20260328.1412.002>.
- [28] 吕君, 逢亚南, 常昕媛. WEEE制造商责任延伸制度实施的美日比较及其启示[J]. *华东师范大学学报(哲学社会科学版)*, 2014, 46(2):131-137, 156.
Lyu J, Pang Y N, Chang X Y. Comparative research on WEEE extended producer responsibility between America and Japan and its implication[J]. *Journal of East China Normal University (Humanities and Social Sciences)*, 2014, 46(2): 131-137, 156.
- [29] 游少雄, 羊森林, 钟贤和. 复合材料风电叶片分段组装技术发展现状[J]. *江西建材*, 2019(9):10-12, 14.
You S X, Yang S L, Zhong X H. Development status of segmented assembly technology of composite wind power blade[J]. *Jiangxi Building Materials*, 2019(9): 10-12, 14.
- [30] 庞昇, 张琛, 黄伟峰. 废弃光伏组件循环利用综述[J]. *绿色矿山*, 2025, 12(2):78-86.
Pang S, Zhang C, Huang W F. Review on recycling and utilization of waste photovoltaic modules[J]. *Green Mines*, 2025, 12(2): 78-86.
- [31] Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)[EB/OL]. (2012-07-24)[2026-08-15]. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/19/oj/eng/pdf>.
- [32] GB/T 45195—2024 风能发电系统 风力发电机组废弃纤维复合材料回收方法[S].
GB/T 45195—2024 Wind energy generation systems—Recycling method of waste fiber composites for wind turbines[S].
- [33] T/CRRA 9906—2023 风力发电设备拆除、回收利用及处置环境管理规范[S].
T/CRRA 9906—2023 Environmental management standards for the dismantling, recycling and disposal of wind power equipment[S].
- [34] T/CRRA 9907—2023 光伏发电设备拆除、回收利用及处置环境管理规范[S].
T/CRRA 9907—2023 Environmental management standards for the dismantling, recycling and disposal of photovoltaic power generation equipment[S].
- [35] DB63/T 2388—2024 废光伏组件和废风电机组叶片利用处置污染控制技术导则[S].
DB63/T 2388—2024 Technical guidelines for pollution control in the utilisation and disposal of waste photovoltaic modules and waste wind turbine blades[S].
- [36] T/CRRA 2404—2026 风力发电设备回用企业评价规范[S].
T/CRRA 2404—2026 Wind power equipment reuse enterprise evaluation specification[S].
- [37] NB/T 11723—2024 陆上风电场工程改造拆除与循环利用设计导则[S].
NB/T 11723—2024 Design guidelines for renovation, dismantling and recycling of onshore wind farm projects[S].
- [38] DB13/T 6251—2025 退役风电机组利用处置污染控制技术规范[S].
DB13/T 6251—2025 Technical specification for pollution control of decommissioned wind turbine utilization and disposal[S].

- [39] 李珊珊, 罗良文. 循环经济试点政策对企业绿色转型的影响及路径优化[J]. 资源科学, 2025, 47(9): 1869-1883.
- Li S S, Luo L W. Effectiveness of circular economy pilot policies in promoting green transformation of enterprises and their pathway optimization[J]. Resources Science, 2025, 47(9): 1869-1883.
- [40] Dhimish M, Vieira R, Poulsen P B. Reliability analysis of residential photovoltaic systems across five climatic zones: Performance, degradation, and fault trends[J]. Energies, 2025, 18(23): 6125.
- [41] Gan Y, Zhang Z, Li Z Y, et al. Central Asia photovoltaic potential: Dust impacts and suitability optimization[J]. Renewable Energy, 2026, 263: 125463.
- [42] 毕凯轩, 陈星, 崔皓, 等. 中国沙戈荒地区未来极端天气对风能 and 太阳能的影响[C]//第36届中国气象学会年会, 2025: 103-105.
- Bi K X, Chen X, Cui H, et al. Impact of future extreme weather on wind and solar energy in the shagehuang region of China[C]//The 36th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society, 2025: 103-105.
- [43] 刘家慧. 风电机组齿轮箱高温问题处理分析[J]. 科技创新导报, 2019, 16(13): 134-135.
- Liu J H. Analysis on the treatment of high temperature problems in the gearbox of wind turbines[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2019, 16(13): 134-135.
- [44] 赵万东. 风电机组齿轮箱高温问题处理分析[J]. 电子技术, 2023, 52(10): 236-237.
- Zhao W D. Analysis on the treatment of high temperature problems in the gearbox of wind turbines[J]. Electronic Technology, 2023, 52(10): 236-237.
- [45] Zhao K, Chen J, Gao M Z, et al. Research of extreme service temperature on the bending behavior of composites for wind turbine blades[J]. Fibers and Polymers, 2024, 25(7): 2733-2740.
- [46] 郝宇辰. 荒漠风电叶片风沙冲蚀损伤演化与发电损失量化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2023.
- Hao Y C. Study on the evolution of sand erosion damage to desert wind turbine blades and the quantification of power generation loss[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2023.
- [47] 梁恩培, 马高生, 李晔, 等. 沙尘环境对风力机关键零部件力学特性影响综述[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53(3): 133-145.
- Liang E P, Ma G S, Li Y, et al. Summary of the impact of aeolian sand environment on key parts of wind turbine[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2023, 53(3): 133-145.
- [48] Thornton P, Moffitt S L, Schelhas L T, et al. Dependence of adhesion on degradation mechanisms of ethylene co-vinyl acetate encapsulants over the lifetime of photovoltaic modules[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2022, 244: 111818.
- [49] 李佳宁. 风电机组主轴承高温抑制研究分析[J]. 今日制造与升级, 2025(12): 127-130.
- Li J N. Research and analysis on high temperature suppression of main shaft bearing of wind turbine[J]. Manufacture & Upgrading Today, 2025(12): 127-130.
- [50] 李鑫, 张晓雷, 张敬祎, 等. 沙戈荒环境对风电设施的腐蚀规律及防护方法研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(12): 163-172.
- Li X, Zhang X L, Zhang J Y, et al. Trend of corrosion and prevention methods of the dust environment on wind power facilities[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(12): 163-172.
- [51] Kelly J, Vogel C, Willden R. Impact and mitigation of blade surface roughness effects on wind turbine performance[J]. Wind Energy, 2022, 25(4): 660-677.
- [52] 李德顺, 王成泽, 李银然, 等. 叶片前缘磨损形貌特征对风力机翼型气动性能的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 269-275.
- Li D S, Wang C Z, Li Y R, et al. Influence of blade leading edge erosion features on aerodynamic characteristics of wind turbine airfoil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(22): 269-275.
- [53] Han W, Kim J, Kim B. Effects of contamination and erosion at the leading edge of blade tip airfoils on the annual energy production of wind turbines[J]. Renewable Energy, 2018, 115: 817-823.
- [54] 李理, 范玉鹏, 常志明, 等. 海洋风电机组防腐技术进展[J]. 分布式能源, 2021, 6(5): 51-58.
- Li L, Fan Y P, Chang Z M, et al. Research progress of anti-corrosion technology for offshore wind turbines[J]. Distributed Energy, 2021, 6(5): 51-58.
- [55] Khalfallah M G, Koliub A M. Effect of dust on the performance of wind turbines[J]. Desalination, 2007, 209(1/2/3): 209-220.
- [56] 王圆, 刘静, 梁培沛. 风电机组齿轮箱磨损案例分析[J]. 设备管理与维修, 2020(1): 146-147.
- Wang Y, Liu J, Liang P P. Wind turbine gearbox wear case analysis[J]. Plant Maintenance Engineering, 2020(1): 146-147.
- [57] 石三平, 丰超, 薛彩华, 等. 风电机组风沙侵蚀分析与防沙措施研究[J]. 中国新技术新产品, 2026(11): 122-124.
- Shi S P, Feng C, Xue C H, et al. Analysis of wind-blown sand erosion of wind turbine and research on sand prevention measures[J]. New Technology & New Products of China, 2026(11): 122-124.
- [58] 冯凯, 张优云, 朱永生. 沙尘和低气压对发动机轴承性能的耦合影响[J]. 润滑与密封, 2007, 32(4): 72-75.
- Feng K, Zhang Y Y, Zhu Y S. Study of the coupling influent of sand & dust and low environment pressure on the bearings in internal combustion engine[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(4): 72-75.
- [59] 孟丹, 陈正洪, 许杨, 等. 极端天气对风电开发全过程的影响及应对策略[J]. 南方能源建设, 2025, 12(2): 1-14.
- Meng D, Chen Z H, Xu Y, et al. The impact of extreme weather on the entire process of wind power development and response strategies[J]. Southern Energy Construction, 2025, 12(2): 1-14.
- [60] 李智. 风电转盘轴承密封圈粘接及安装工艺分析[J]. 金属加工(冷加工), 2014(15): 30-31.
- Li Z. Bonding and installation process analysis of bearing sealing ring of wind turbine turntable[J]. MW Metal Cutting, 2014(15): 30-31.
- [61] 武林侠. 风电机组机械润滑隐患风险分析及改造研究[C]//第五届中国风电后市场专题研讨会, 2018: 279-283.
- Wu L X. Risk analysis and transformation research on hidden dangers in mechanical lubrication of wind turbines[C]//The 5th China Wind Power Aftermarket Seminar, 2018: 279-283.

- [62] 彭儒,张贤惠. 新型抗风沙涂料在风电塔筒上的应用[J]. 上海涂料,2019,57(3):20-22.
Peng R, Zhang X H. Application of new anti-sandstorm coatings on wind tower cylinder[J]. Shanghai Coatings, 2019, 57(3): 20-22.
- [63] 李凯杰,李新梅. 基于正交试验研究影响塔筒磨损率的主要因素[J]. 热加工工艺,2013,42(20):59-60.
Li K J, Li X M. Main factors affecting wear rate of tower based on orthogonal experiment[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(20): 59-60.
- [64] 郝负洪,邢永明,冯玉江,等. 钢结构表面涂层材料抗风沙冲蚀力学性能研究[J]. 建筑材料学报,2013,16(6):1092-1096.
Hao Y H, Xing Y M, Feng Y J, et al. Research on anti-erosion mechanical properties of steel structure coating[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(6): 1092-1096.
- [65] 王炳忠,张旭,王瑞良. 风沙环境下风力机全生命周期环境损伤与污染演化规律[J]. 中国沙漠,2022,42(4):202-212.
Wang B Z, Zhang X, Wang R L. Environmental damage and pollution evolution patterns of wind turbines throughout their entire lifecycle in wind-sand environments[J]. China desert, 2022, 42(4): 202-212.
- [66] 嵯冠麟,崔运磊,李伟,等. 废弃风电叶片长度对回收产物及玻璃纤维的影响[J]. 洁净煤技术,2025,31(S2):944-950.
Zhuo G L, Cui Y L, Li W, et al. Effect of waste wind turbine blade length on recycled products and glass fiber[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(S2): 944-950.
- [67] 王大程,廖丽坤,钟俊俊,等. 热解法回收T300J碳纤维强度保留率影响因素研究[J]. 合成纤维工业,2023,46(3):39-44.
Wang D C, Liao L K, Zhong J J, et al. Influential factors on strength retention of recycled T300J carbon fiber by pyrolysis[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2023, 46(3): 39-44.