

2022年

# 中国风电、光伏回收行业概览：“报废潮”来袭，如何打通绿色产业链的最后一公里？

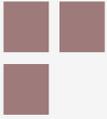
2022 China Wind Power, Photovoltaic Recycling Industry

2022年中国風力発電、太陽光発電のリサイクル産業  
(摘要版)

报告标签：光伏组件、风机叶片、复合材料、玻璃纤维

撰写人：郭嘉咏

报告提供的任何内容（包括但不限于数据、文字、图表、图像等）均系头豹研究院独有的高度机密性文件（在报告中另行标明出处者除外）。未经头豹研究院事先书面许可，任何人不得以任何方式擅自复制、再造、传播、出版、引用、改编、汇编本报告内容，若有违反上述约定的行为发生，头豹研究院保留采取法律措施、追究相关人员责任的权利。头豹研究院开展的所有商业活动均使用“头豹研究院”或“头豹”的商号、商标，头豹研究院无任何前述名称之外的其他分支机构，也未授权或聘用其他任何第三方代表头豹研究院开展商业活动。



## 观点摘要

根据全球能源互联网发展合作组织发布的《中国 2060年前碳中和研究报告》测算，2035年中国光伏和风电装机量分别达到15亿千瓦和11亿千瓦。与此同时，每年退役的光伏和风电装机量将达到1.1亿千瓦/年和0.7亿千瓦/年，对应产生报废光伏组件、废弃风机叶片分别约105万吨和100万吨。

面对即将到来的光伏组件报废浪潮，国内外已形成多条可行的光伏组件回收技术路线。但现阶段中国回收规模较小，未形成相应的产业链。要实现高效、低能耗、低成本回收，争取更大的市场竞争力，除了研发先进的工艺和装备，国家有关部门和行业有关机构在政策上的支持对光伏组件回收行业前期实现产业化发展至关重要。

随着未来风能产业的快速发展，复合材料风电叶片大量应用带动了复合材料行业的发展，同时也带来了可持续发展的环境污染问题。如何有效地对未来退役风电叶片进行回收利用，减小环境污染，是面临的巨大考验，同时也是巨大的机遇，具有广阔的市场前景。

### ✓ 光伏回收行业以可再生能源为基础，向未来过渡

对光伏组件进行合理的回收利用，既有利于节约资源，减少对原生资源的开采，又可以带来可观的经济回报。光伏组件回收技术除了要注重产品的再利用价值，更需注重处理过程中污染物和碳的排放，并提出应从全生命周期实现光伏组件的减量化、资源化和无害化发展。

### ✓ 加快制备可持续发展的新型叶片，回收利用退役叶片

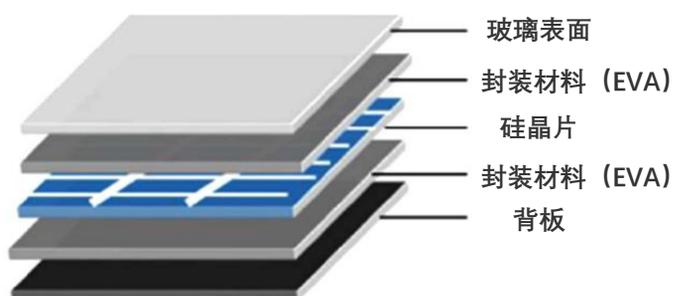
随着风电产业快速增长，风电叶片的应用和需求越来越大，这些叶片退役后给环境带来的污染不容忽视，与中国倡导的可持续发展的宗旨是违背的。国外对目前普遍采用的热固性树脂基复合材料退役叶片多采取堆积的方式处理，占用大量的土地资源，也对当地的环境造成极大的污染。因此，需要风电叶片开发和应用者提前做好研究工作，一方面加快研制新型环保材料步伐，制备可持续发展的新型叶片，另一方面针对现役或未来很长一段时间热固性树脂基复合材料进行回收利用。

## ■ 精华摘要

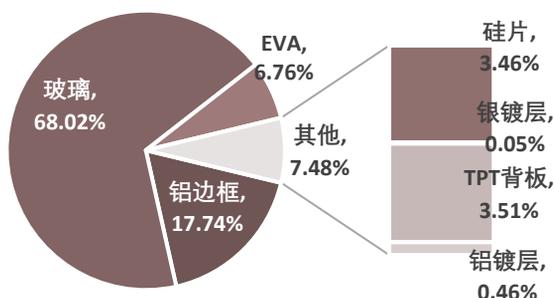
晶体硅光伏组件可分为五个部分：金属外框、钢化玻璃、晶体硅片、背板、EVA从可回收价值来看，硅、玻璃、铜、银和铝的可回收价值较高

### 晶体硅光伏组件构成与可回收价值

晶体硅光伏组件的基本组成图



晶体硅光伏组件的物质重量占比



晶体硅光伏组件的物质重量分布



注：抗反射层质量较小，可忽略不计

晶体硅光伏组件构成材料可回收价值

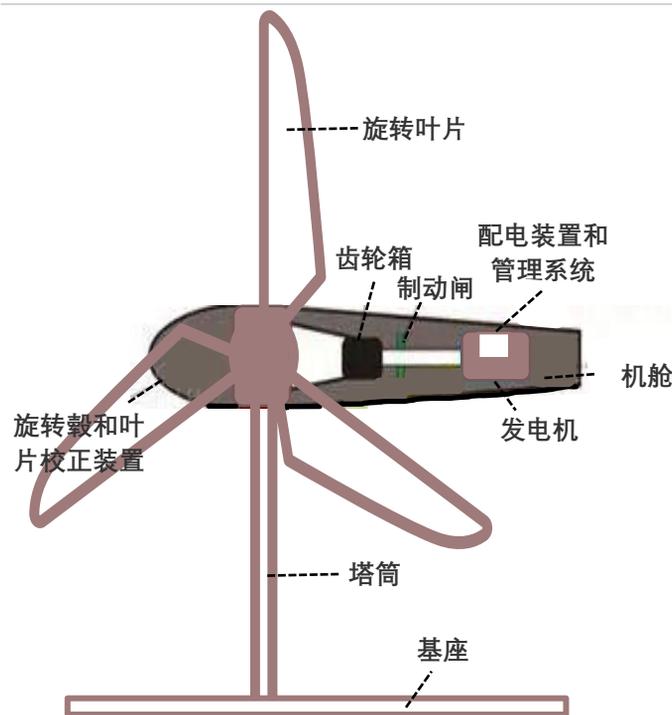
材料	相对经济价值	可回收价值（数量与价值积）
硅	高	高
玻璃	低	高
有机物	低	低
铜	高	高
银	高	高
铝	中	高
硼	-	低
磷	-	低
锡	-	低
铅	-	低

- 晶体硅光伏组件一般分为单晶硅光伏组件和多晶硅光伏组件，其中单晶硅光伏组件的技术最成熟，转换效率最高。两种光伏组件的主要结构是相同的，可分为五个部分：金属外框、钢化玻璃、晶体硅片、背板、EVA。
- 从光伏组件的结构及各部件的重量比例可看出，玻璃占整个组件质量的68%，铝边框占比超过17%，硅片占比3.46%，三者占比超过88%。从晶体硅光伏组件构成材料可回收价值来看，硅、玻璃、铜、银和铝的可回收价值较高。
- 组件中含有大量潜在的可重复利用资源。铝框架、银网格线、锡铜线和玻璃经加工可获得工业产品，晶体硅面板中的钢、镓、锗、碲等稀有金属可回收用于新设备的生产。因此，对光伏组件进行合理的回收利用，既有利于节约资源，减少对原生资源的开采，又可以带来可观的经济回报。

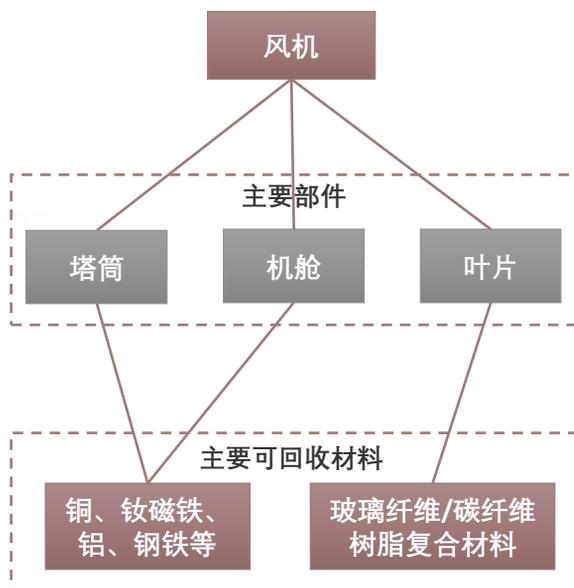
来源：头豹研究院

在风电机组主要材料中，叶片是风力发电机的核心部件之一，约占风机总成本的20%左右，回收利用可以从源头上减少风机叶片生产及回收过程中由于原材料使用所产生的碳排放

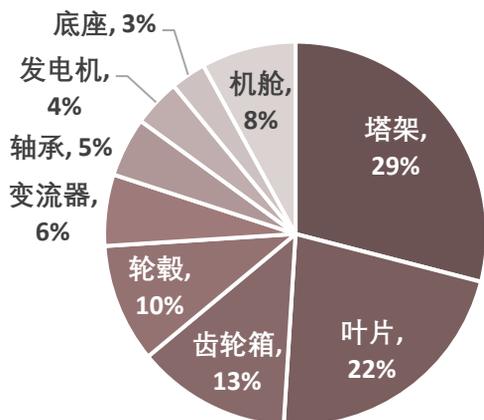
## 风力发电机结构及回收价值



风机主要部件及可回收材料分解示意图



风电整机的结构成本



### 叶片主要材料——玻璃纤维行业产能

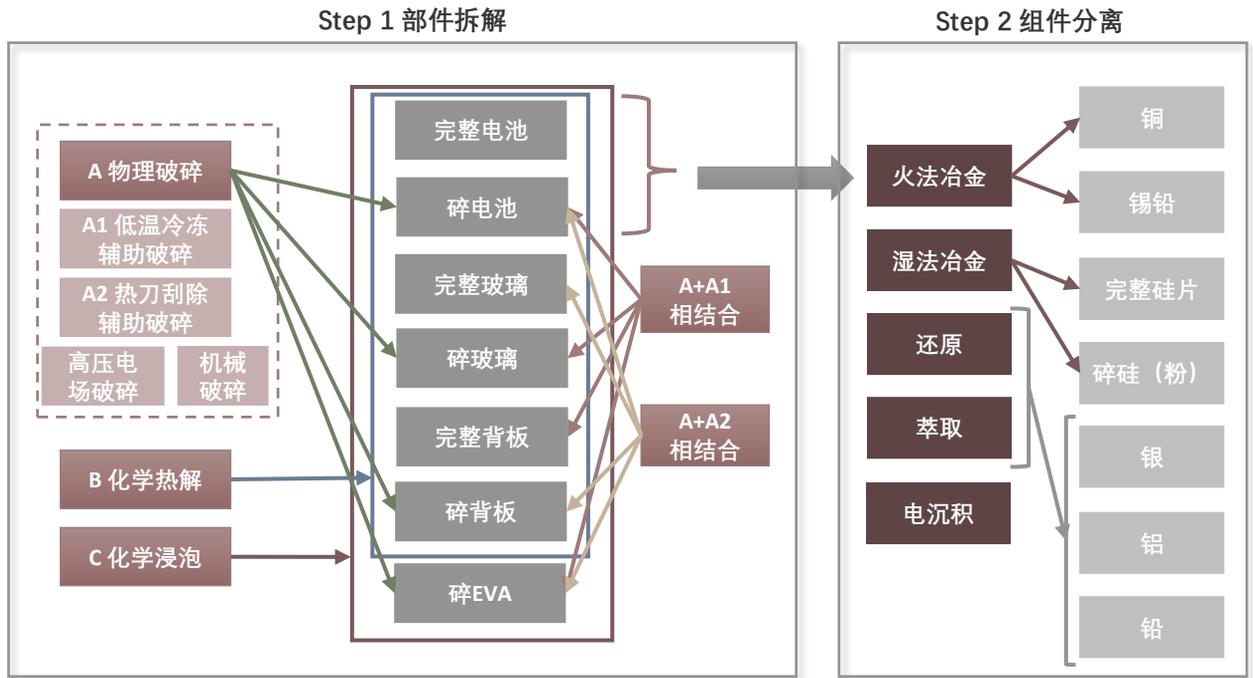


- 风力发电是将风能转化为电能的过程。一个完整的风电场一般由一定规模数量的风电机组和输电系统构成。一个风电机主要由基座、塔筒、机舱、轮毂和叶片构成，各部件之间的连接和旋转都需要用到轴承。其中，塔筒除了提升风机的高度，还同时作为传输线路的通道：内敷设有发电机的电力电缆、控制信号电缆等，塔底有塔门，塔架内分若干层，层间直梯便于人员上下；叶片的设计、材料和工艺决定着风力发电装置的性能和功率；风电机组之间由电缆相互连接，再经变电站升压再连接至电网。
- 叶片是风力发电机的核心部件之一，约占风机总成本的20%左右，它设计的好坏将直接关系到风机的性能以及效益。而叶片制造材料由最初的亚麻布蒙着木板发展至钢材、铝合金，直至目前广泛应用的复合材料：玻璃钢（玻璃纤维增强复合材料）。自南玻院突破池窖法大规模生产玻纤产品的技术后，经过二十余年的发展，目前我国玻纤行业已形成较明显的寡头竞争格局，以中国巨石、泰山玻纤、重庆国际为代表的行业龙头，CR3占国内玻纤产能的70%以上。

来源：头豹研究院

光伏组件的回收方法主要有三种，其中，化学热解法的回收成本最高，为57元/kWp；物理粉碎法的回收成本最低，为34元/kWp，且该方法回收的经济效益最高，为343元/kWp

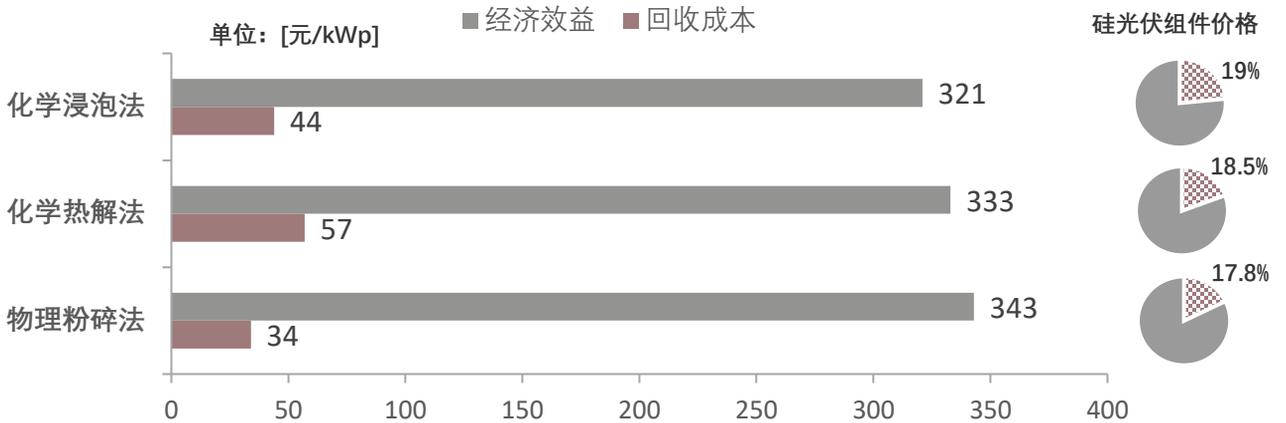
## 光伏组件的回收处理流程



- 物理破碎法主要是依靠物理手段，将层压件粉碎成较小的颗粒，分拣出玻璃颗粒和焊带后，把剩余部分再进行研磨，通过静电等分离法分离出金属、背板、EVA或POE等的颗粒。但是物理破碎法不能100%分离出所有材料，分离出的金属颗粒、背板颗粒、EVA颗粒或POE颗粒等均会含有其他材料的杂质，导致获得的材料的纯度不高，此方法仅可获得17.4%金属回收率。
- 化学热解法分为低温热处理法和高温热处理法。低温热处理法是利用EVA或POE经过加热后会逐渐软化的特点，通过加热层压件来软化其中的EVA或POE，实现层压件中前玻璃、太阳电池及背板（或背玻璃）的分离。虽然低温热处理法较为简单、实用，但存在EVA或POE的去除不够彻底、玻璃和太阳电池的表面常有少量残留的情况。高温热处理法是利用EVA或POE在高温下会逐渐分解的特点从而去除EVA或POE。采用这两种处理方法时EVA或POE的去除率均已达到99%以上，并已被一些企业应用在实际处理过程中。同时，虽然采用高温热处理法可使EVA或POE的去除率达到99%以上，但仍会残留一些有机物。
- 化学浸泡法是利用EVA或POE在化学溶剂中会氧化和分解的特点，通过在化学溶剂中浸泡层压件来实现层压件的分离。使用化学浸泡法时，硅的回收和再利用一般可以达到90%以上，且该方法能够得到完整的硅片。同时，废液还需进一步处理，且工艺过程如果控制不当，会造成EVA或POE过度膨胀，从而挤碎太阳电池，因此大规模应用具有一定的难度。

来源：头豹研究院

废旧晶体硅光伏组件的各种回收方法的回收成本（以1kWp晶体硅光伏组件的回收为例）和经济效益



\*注：以晶体硅光伏组件的价格1800元/kWp为例进行经济效益的计算

- 根据相关调研，以1kWp晶体硅光伏组件的回收为例进行分析。分别采用化学热解法、化学浸泡法和物理粉碎法这三种回收方法，计算不同方法耗费的电能、试剂及衍生污染物的处理费用（已去除设备折旧、人工成本等费用），估算的回收成本如下：热处理法的回收成本为57元/kWp，化学溶解法的回收成本为44元/kWp，物理分离法的回收成本为34元/kWp。
- 以晶体硅光伏组件的价格1,800元/kWp为例，针对废旧晶体硅光伏组件的各种回收方法的经济效益如下：化学热解法回收的经济效益为333元/kWp，占晶体硅光伏组件价格的18.5%；化学浸泡法回收的经济效益为321元/kWp，占晶体硅光伏组件价格的17.8%；物理粉碎法回收的经济效益为343元/kWp，占晶体硅光伏组件价格的19%。
- 采用主流处理方式后，废旧晶体硅光伏组件回收的经济效益较高。因此，目前废旧晶体硅光伏组件回收还不能够实现较大收益的主要原因并不是主流处理方式具体过程中的成本过高，而是由于废旧光伏组件的回收还未形成相应的产业链，导致废旧光伏组件在拆卸运输、拆解等各个环节的成本依旧巨大。

来源：中国科学院电工研究所、头豹研究院

废弃叶片复合材料的回收方法有三种，分别为机械回收、热回收和化学回收，其中，热回收法相较于机械回收法对纤维性能影响较小，具有一定前景

## 不同回收方法获得的回收产物的再利用与应用

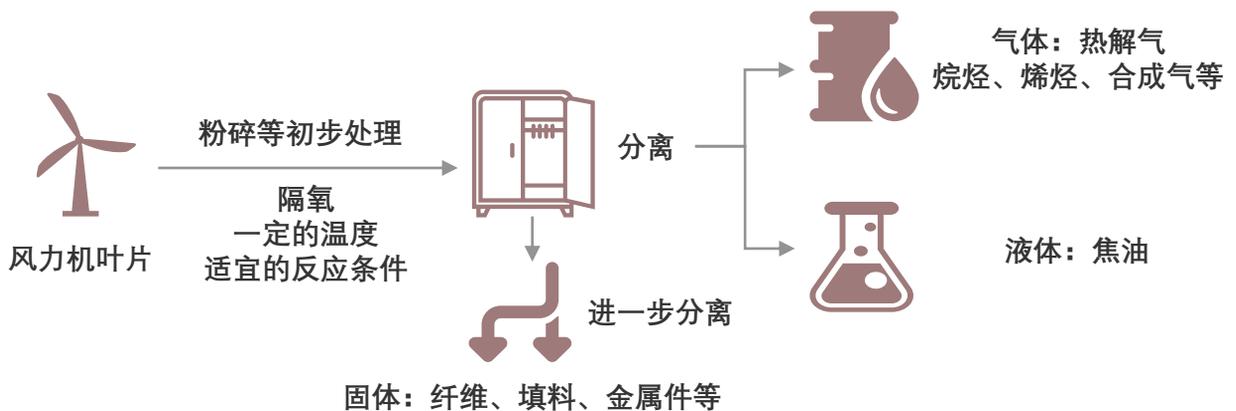
回收方法		再利用与应用	优点	缺点
机械回收		<ul style="list-style-type: none"> <li>不同长度再生纤维增强复合材料</li> <li>CFRP碎块增强混凝土</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>已达到工业规模</li> <li>工艺简单</li> <li>无有害气体</li> <li>成本低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>处理能力弱</li> <li>回收纤维的机械性能损失严重</li> <li>回收物市场价值低</li> </ul>
热回收	热解法	<ul style="list-style-type: none"> <li>有机液体燃料</li> <li>热解气体或油</li> <li>短再生纤维增强复合材料</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>已达到工业规模</li> <li>不使用化学试剂</li> <li>回收纤维的机械性能损失较小</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>碳纤维表面存在沉积碳</li> <li>产生一定有害气体</li> </ul>
	流化床法	<ul style="list-style-type: none"> <li>团状模塑料</li> <li>电磁屏蔽材料</li> <li>高模量复合材料</li> </ul>		
	微波热解法	<ul style="list-style-type: none"> <li>短再生纤维增强复合材料</li> </ul>		
化学回收	超临界流体法	<ul style="list-style-type: none"> <li>短再生纤维增强复合材料</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>处理能力强</li> <li>碳纤维表面没有沉积碳</li> <li>回收纤维的机械性能损失小</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>试剂成本高</li> <li>反应时间长</li> <li>污染严重</li> <li>难以工业化</li> </ul>
	溶剂分解法	<ul style="list-style-type: none"> <li>可燃气体</li> </ul>		

- 机械回收是以粉碎后的废旧复合材料为原料进行二次利用的方法，对于风电叶片等大型复合材料，其体积较大，必须先进行预切割再进行粉碎。机械回收有两种方式：一种是将废物分解或研磨成细粉；另一种是将废物进行破碎。通过这两种方式获得的再生材料主要用作水泥、混凝土等的填料、增强材料或原料。机械回收法成本低、工艺简单，广泛用于纤维增强聚合物（FRP）复合材料的回收。但通过这种方法获得的大多数回收产物价值很低，而且纤维在回收过程中受损严重，无法获得长纤维。
- 热回收法主要包括热解法、流化床法和微波热解法。热解法是通过使用加热的惰性气体将复合材料中的树脂基体分解成有机小分子来回收纤维的方法。热解法即是在500-900℃下热分解碳纤维复合材料（CFRP），再生碳纤维（rCF）相比于原生碳纤维（vCF）的强度损失为10%。该方法具有良好的回收效果，适用于受污染的复合材料废弃物，是目前实现商业运行的回收方法。流化床回收过程使用空气作为流化床反应器中的流化气体，通过高温空气热流分解复合材料基体得到纤维材料，并可充分利用回收过程中产生的热量。采用流化床方法可以回收清洁的纤维，但难以获得连续纤维，再生纤维的机械性能相对较低。微波热解法通过微波辐射分解复合材料中的树脂基体。树脂通过CF吸收微波能量进行内部加热，这可以更快地分解树脂，减少整体处理时间并且比其他热分解技术所需设备更少。作为一项新开发的技术，微波热解法具有清洁环保的优点，是一种从CFRP中回收CF的易于控制且高效的技术。

来源：头豹研究院

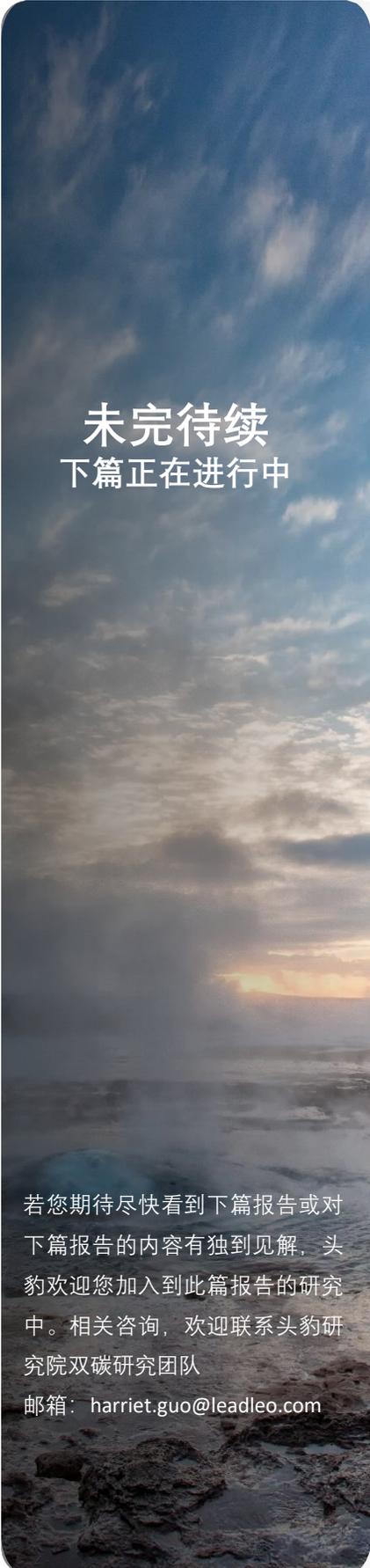
- 化学回收是使用化学改性或分解将废物制成其他可回收材料的方法。与机械回收相比，这种回收热固性复合材料的方法难度大、成本高，但回收效果更好。化学回收方法主要包括超临界流体法和溶剂分解法。超临界流体是指流体的温度和压力超过其固有临界温度和临界压力的特殊状态。超临界流体的优异溶解性和传质特性可用于分解或降解聚合物废物，并获得气体、液体和固体产物。超临界流体法主要使用水或醇作为分解介质。临界流体技术作为一种新型的回收方法，具有回收工艺清洁无污染，再生纤维表面清洁、性能优良等优点。但超临界条件要求更加严格，大多数超临界流体要求高温高压，对反应设备要求高、成本高、安全系数低。超临界流体技术回收热固性树脂复合材料仍处于实验室阶段。溶剂分解法对纤维和树脂的回收具有更好的效果，但是大多数使用的溶剂都是有毒的并且价格较高，这降低了该方法的可持续性。在超临界流体之前，化学回收仅限于使用腐蚀性化学品（如硝酸）进行低温溶剂分解。溶剂对环境有毒，对人体有害。因此，该过程需要更好的反应介质以减少其对环境的影响。
- 与机械回收法相比，采用热回收法和化学回收法得到的纤维可以保持更长的长度和更少的损伤，因此热回收法和化学回收法具有更广泛的应用。化学回收法中不同的复合材料需要特定的溶剂，因此该方法暂时不具有普适性；目前已达到工业规模的是机械回收法和热回收法。尽管各种方法在回收时都对叶片材料尺寸有要求，回收得到的纤维长度也有一定限制，但热回收法相较于机械回收法对纤维性能影响较小，故热回收法是具有一定前景的回收方式。

### 废弃风电叶片热解回收工艺



- 在复合材料的各种热回收方法中，热解法近年来已发展到工业水平。同时，热解所产生的高热值液体和气体可以被收集并用作不同制造步骤的燃料或二次资源。为消除聚合物热解后纤维表面形成的热解炭层，还需要对热解后的产物进行氧化。通过优化工艺参数，可以实现机械性能损失最小化。

来源：头豹研究院



未完待续  
下篇正在进行中

若您期待尽快看到下篇报告或对下篇报告的内容有独到见解，头豹欢迎您加入到此篇报告的研究中。相关咨询，欢迎联系头豹研究院双碳研究团队

邮箱：[harriet.guo@leadleo.com](mailto:harriet.guo@leadleo.com)

## 完整版研究报告阅读渠道：

- 登录[www.leadleo.com](http://www.leadleo.com)，搜索《2022年中国风电、光伏回收行业概览：“报废潮”来袭，如何打通绿色产业链的最后一公里？》

## 了解其他系列课题，登陆头豹研究院官网搜索查阅：

- 《2022年中国地热能行业概览：未来清洁能源重要地位，能源结构转型的新方向》
- 《2021年中国光伏产业发展白皮书：产业链全方位剖析及洞察》
- 《2022年中国光伏胶膜行业概览：光伏产业链中的优质细分赛道》

## 头豹研究院简介

- ◆ 头豹是中国领先的原创行企研究内容平台和新型企业服务提供商。围绕“协助企业加速资本价值的挖掘、提升、传播”这一核心目标，头豹打造了一系列产品及解决方案，包括：**报告/数据库服务、行企研报定制服务、微估值及微尽调自动化产品、财务顾问服务、PR及IR服务**，以及其他以企业为基础，利用大数据、区块链和人工智能等技术，围绕产业焦点、热点问题，基于丰富案例和海量数据，通过开放合作的增长咨询服务等
- ◆ 头豹致力于以优质商业资源共享研究平台，汇集各界智慧，推动产业健康、有序、可持续发展



备注：数据截止2022.6

## 四大核心服务

### 企业服务

为企业提供**定制化报告服务、管理咨询、战略调整**等服务

### 行业排名、展会宣传

行业峰会策划、**奖项评选、行业白皮书**等服务

### 云研究院服务

提供**行业分析师外派驻场服务**，平台数据库、报告库及内部研究团队提供技术支持服务

### 园区规划、产业规划

地方**产业规划、园区企业孵化**服务

# 报告阅读渠道

头豹官网 —— [www.leadleo.com](http://www.leadleo.com) 阅读更多报告

头豹APP/小程序 —— 搜索“头豹”手机可便捷阅读研报

头豹交流群 —— 可添加企业微信13080197867，身份认证后邀您进群

详情咨询



客服电话

400-072-5588



上海

王先生：13611634866

李女士：13061967127



深圳

李先生：13080197867

李女士：18049912451



南京

杨先生：13120628075

唐先生：18014813521