

可再生能源零废未来：

风电、光伏回收产业发展研究

Zero-Waste Future of Renewable Energy:

a study on the development of recycling industry for wind and solar energy



联合撰写

朱 硕 绿色和平创新业务负责人

李嘉童 绿色和平气候与能源项目主任

风电篇：

李 丹 中国循环经济协会可再生能源专业委员会执行秘书长

王卫权 中国能源研究会能源与环境专业委员会秘书长

马丽芳 中国循环经济协会可再生能源专业委员会政策研究部主管

光伏篇：

苗 青 零碳研究院理事长

吴翠姑 零碳研究院副院长

王彤彤 零碳研究院交流合作中心副主任

田惠林 零碳研究院技术研究中心副主任

鸣谢以下人员对于此报告的贡献：袁瑛、王赫、王蕴琪、王祎阳

此外，感谢以下人员对本报告提出的宝贵意见和建议：（按姓氏首字母排序）

风电篇：

梁万良 全球风能理事会中国区主任

王晓东 北京金风科创风电设备有限公司，风电产业集团研发中心机械设计专家/高工

于可利 中国物资再生协会秘书长

张金峰 北京鉴衡认证中心有限公司风能事业部副总经理

赵建立 浙江运达风电股份有限公司叶片专家/工程师

光伏篇：

刘景洋 中国环境科学研究院研发中心主任

吕 芳 中国绿色供应链联盟光伏专委会秘书长

宋登元 光伏材料与技术国家重点实验室主任，中国绿色供应链联盟光伏专委会副主任，一道新能首席技术官

肖鹏军 晶科能源高级研究员

著作权及免责声明

本报告由绿色和平和中华环保联合会基于在北京取得的临时活动备案共同发布。

本报告中提及的企业仅作为研究示例，并不代表绿色和平对相关企业进行批评或推荐。本报告中的引用的信息来源于已公开的资料，除标明引用的内容以外，报告内所有内容（包括文字、数据、图表）的著作权及其他知识产权归绿色和平所有。如需引用本报告中的数据及图表，请注明出处。标明由绿色和平拍摄的照片必须取得绿色和平授权后方可使用。

本报告为基于有限时间内公开可得信息研究产出的成果。如本报告中相关环境信息存在与真实信息不符的情况，欢迎与我们沟通联系：greenpeace.cn@greenpeace.org。由于信息获取渠道的局限性，绿色和平、中华环保联合会不对报告中所涉信息的及时性、准确性和完整性作任何担保。

本报告资料收集时间为2022年3月1日至2022年5月30日，研究期间之外，各信息平台上公开的环境信息如有被更改或增加的信息不被包括在此研究结果分析中。本报告仅用于政策参考、信息共享和环保公益目的，不作为公众及任何第三方的投资或决策的参考，绿色和平亦不承担因此而引发的相关责任。



目录

序言	1	第二章 光伏篇	26
摘要	5	1. 中国光伏产业回收现状及展望	27
第一章 风电篇	8	1.1 中国光伏产业发展历程	27
1. 中国风电产业回收现状及展望	9	1.2 中国光伏产业规模现状	27
1.1 中国风电产业发展历程	9	1.3 光伏组件预期退役规模	27
1.2 中国风电产业规模现状	9	1.4 光伏组件主流回收方式	27
1.3 风电机组退役规模预期	11	1.5 光伏组件回收市场估值	29
1.4 风机叶片回收主流方式	11	2. 不当处置对社会环境的影响	30
1.5 风机材料回收市场估值	12	2.1 产生碳排放	30
2. 不当处置对社会环境的影响	13	2.2 造成资源浪费	31
2.1 产生碳排放	13	2.3 污染环境	31
2.2 造成资源浪费	14	3. 不当处置对光伏行业的影响	32
2.3 污染环境	16	3.1 产业层面	32
3. 不当处置对风电行业的影响	16	3.2 企业层面	32
3.1 产业层面	16	4. 中国光伏回收的机遇与挑战	33
3.2 企业层面	16	4.1 机遇	33
4. 中国风电回收的机遇与挑战	16	4.2 挑战	33
4.1 机遇	17	5. 国内外政策及市场的解决方案	34
4.2 挑战	17	5.1 相关政策对回收市场的引导	34
5. 国内外政策及市场的解决方案	18	5.2 国内外回收市场的创新案例	37
5.1 相关政策对回收市场的引导	18	6. 结语建议	39
5.2 国内外回收市场的创新案例	20	参考文献	41
6. 结语建议	25		

序言

将绿色进行到底 ——“风中舞者”如何完美谢幕

武钢

新疆金风科技股份有限公司 董事长



风电是最为绿色经济的发电形式之一，在推动全球清洁能源转型、减少二氧化碳排放、应对气候变化危机等方面发挥着重要作用。在风电大规模发展的同时，受限于风电机组20年的设计寿命，处置退役风机成为全球风电面临的共同课题。

绿色和平PowerLab《可再生能源零废未来：风电、光伏回收产业发展研究》这本报告的撰写正当其时，报告较为详尽地分析了当前中国风电产业风机回收现状，以及风电机组退役后回收不当给社会和风电行业所带来的危害，并提出了中国风电机组回收现阶段面临的机遇和挑战。报告还收集和总结了当前全球在风机回收领域所做的许多有效尝试，以案例的形式展现最前沿的风机回收技术和解决方案，具有重要的参考价值。

根据国际能源署的报告，到2050年，实现快速的能源转型，打造实现净零排放的能源系统，将有近90%的发电来自可再生能源，风能和太阳能光伏发电合计占近70%。

近年来全球风电快速发展，2021年，全球新增风电装机93.6GW，是历史上第二高的一年。中国是全球最大的风电市场，2021年陆上风电新增30.7GW，约占全球新增装机的三分之一。海上风电方面，中国海上风电2021年增量占全球的80%，同时也是全球海上风电累计装机最多的国家。

但是，在越来越多的风机在陆地和海洋上起舞，产生绿色电力时，同样也有许多的“风中舞者”正面临如何谢幕的问题。尤其是那些随着时间的演进，已达到设计寿命的风电机组规模正快速增大。

以中国为例，报告数据显示预计到2030年，每年退役风机规模将达到10GW左右；2030-2035年间，累计退役风机规模将超过100GW；2036-2040年间，累计退役风机规模将达到150GW。

风机退役有可能带来大量待回收材料，这些退役的材料中所含有的铜、钢、水泥、碳纤维/玻璃纤维等物质仍然具备很高的回收价值。如何在不对环境产生危害的基础上，对退役风机进行高效回收再利用，已经成为产业可持续发展最重要的一环。

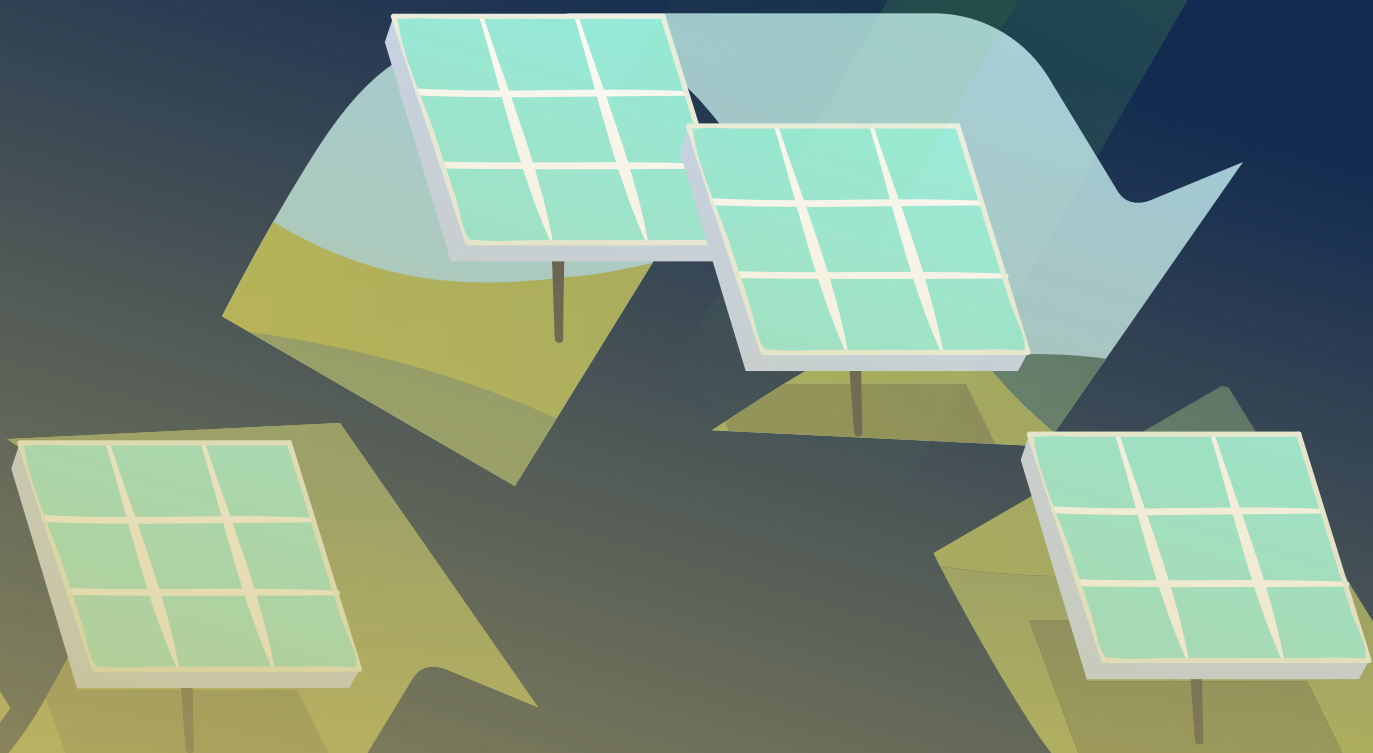
不可否认，当前退役风机回收仍然需要挖掘和研究更成熟且经济的处理方法，尤其是在叶片回收方面。希望借由这本报告，能够进一步引起国家、行业对退役风机回收和再利用工作的重视，通过国家、企业以及产业链上下游协同，探索出退役风机回收再利用的成熟模式，真正将风机的绿色旅程进行到底！

序言

打通光伏绿色产业链的“最后一公里”

苗连生

英利集团 创始人



21世纪20年代，气候变化成为世界语言，全球携手，共同应对气候变化已经成为普遍共识和一致行动。习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上表示，中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。并在国内外重要会议上多次强调该目标落实的重要性。

随着绿色低碳发展成为全球趋势，各国低碳减排政策不断出台，全球光伏发展迅猛，正迎来新一轮发展机遇。作为光伏组件的最大生产国和应用国，2021年我国累计装机量为306GW，全球累计光伏装机量超过940GW，到2022年4月，全球光伏装机容量跨越至“TW时代”。光伏供应链包括了从硅材料提纯、铸锭拉棒、切片、电池和辅材、组件、平衡部件以及系统集成、应用和退役回收。当前，国内外的光伏产业界和环境界将光伏组件的回收处理列为核心关注问题之一。欧盟、美国、日本、法国等国家和地区都已经开始回收试验和示范，退役和废旧光伏组件的回收利用也成为越来越突出的问题，同时也为行业带来了巨大的新机遇。

绿色和平PowerLab《可再生能源零废未来：风电、光伏回收产业发展研究》报告提及了退役光伏组件回收规模的预测，对社会环境的影响分析，以及全面切实的可行性建议，对中国推动碳达峰碳中和，实现资源循环利用具有很大的参考价值。根据报告预测，2025年光伏组件将进入报废的密集期；2030年左右光伏组件将进入报废的高峰；截至2040年，光伏组件的累计报废规模将达到约250GW，回收产业链价值或将超千亿元。大规模的组件退役潮即将到来。

组件回收是光伏产业链上的最后一环，也被视为整个光伏绿色产业链的“最后一公里”。希望供应链上下游企业、科研院所、投资机构以及社会各界力量积极参与，探索切实可行的光伏回收产业商业模式，共建退役光伏组件回收的健康市场，实现光伏组件全生命周期绿色发展，实现资源循环利用，提高资源利用效率、减少环境污染，催生新的经济增长点，推动经济高质量绿色发展，助力双碳目标早日实现。

摘要



自千禧年初，中国的风电与光伏产业迈入规模化发展快车道，截止至2021年底中国风电累计装机量达328GW，光伏累计装机量达306GW，已连续数年保持世界风电与光伏装机量居首。中国风光产业高速发展二十年，而那些千禧年初期投入使用的风电机组和光伏组件，也即将抵达20到25年设计使用寿命的终点。我们预计，中国风电产业将在2025年迎来第一批大规模退役潮，退役规模将超过1.2GW；紧随其后，在2030年光伏组件报废将进入密集期，2005年左右大幅增长的装机规模将迎来25年的设计使用寿命，预计可回收容量高达17.8GW。

随着中国3060双碳目标的出台，无数目光聚焦可再生能源行业，风电光伏的全生命周期低碳发展更是其中焦点。绿色环保的回收方式，不仅能够为退役的组件赋予新的价值，在创新科技的加持下，前沿的回收方法能够大量减少风光寿命尽头的二氧化碳排放及对环境的负面影响，助力可再生能源行业可持续地高速发展。

绿色和平PowerLab团队始终持续关注中国可再生能源领域的创新与机遇，希望通过本报告的“风电篇”、“光伏篇”分别对中国风电、光伏行业回收的现状、市场预估、规模增长对社会和产业的影响、机遇与挑战、全球创新实践等多维度解读并提供建议，为从业者提供开展回收业务的重要指引，为行业观察者提供判断识别回收市场的参考。

通过对回收市场现状进行调研和分析、对2025-2040年的风电及光伏回收市场进行预测，本报告观察到中国可再生能源行业迫在眉睫的挑战——未来20年内，风电退役累计将达到约280GW，光伏退役组件累计规模将达到约250GW，回收解决方案和支持政策急需完善和激活。

在此基础上，本报告总结了在快速增长规模下回收之所以紧迫且必要的三大关键影响——碳排放问题、资源浪费问题、环境污染问题。高效的回收方式可以大幅度减少焚烧填埋等废弃处置手段带来的大量碳排放和有害物释放，在实现资源循环利用的同时，减少原材料生产所产生的碳排放。以一台

1.5MW的风机为例，如果可以被100%回收，将可以减少约600吨二氧化碳排放，随着回收规模的增长，在2040年累计回收规模达280GW，将可减少约1.13亿吨的碳排放。截至2040年，风电行业将累计产生回收价值超过900亿元的3000万吨废钢，近500亿元的80万吨废铜，同时，难以回收的风机叶片将产生220万吨废弃玻璃纤维，近120万吨废弃树脂和胶，带来对生态环境的污染。同理，1吨废弃光伏组件，在回收利用后可以减少约5.41吨二氧化碳的排放。随着累计回收量的增长，截止至2040年，累计回收量到达约250GW，可以减少约1.08亿吨二氧化碳排放。累计产生回收价值超过1.1千亿元的硅，铜，银，铝，玻璃等。同时报告延伸了上述这些影响反噬可再生能源行业的结果：造成整个产业污名化，影响全产业链低碳发展，影响企业竞争力与声誉。

尽管回收行业有长期遗留和短期新发的问题，我们研究发现了中国可再生能源回收行业具备高速高潜力发展的三大机遇——市场空间规模、产业链丰富度、双碳目标执行力。

鉴于全球诸多国家的政府、企业、协会等正着力探索有效回收方法，为加速风电和光伏回收市场的发展，本报告总结形成了政策导向和市场导向的建议。

风电

政策方向

- 完善固废回收利用体系，加快在包括退役风机叶片在内的固废回收利用网络，全面提高资源利用效率。
- 加强财政税收支持力度，在回收规模相对较小的阶段，利用税收政策及回收专项基金补贴，鼓励回收项目推进，奖励推动产业链实施、或满足绿色供应要求的企业。
- 建立风机回收标准和监管认证体系，出台具备操作性的回收标准和监管政策措施，确保实现全过程环保、实现循环经济、实现高值化利用。

市场方向

- 强化源头治理，鼓励整机制造企业牵头，实施绿色供应链，在风机组的设计、原材料选择环节将全生命周期利用纳入考量。
- 探索商业模式，按照市场发展需求，在龙头企业的带动下，遵循分阶段、分目标的原则开展商业模式的推广，试验不同的商业模式，降低处理和回收成本。
- 加强技术攻关，针对叶片回收技术的难点、对环境友好的替代材料的研发，由行业协会组织相关科研机构、风机制造企业、风电开发企业联合攻关，加强跨行业协作。

光伏

政策方向

- 推出支持性税收政策和专利保护，增加对符合回收标准且具有示范作用的企业和项目的激励性税收政策，对于具有示范作用的新技术及工艺的知识产权予以保护，保证创新主体的利益。
- 建立健全统一的光伏组件回收标准、规范和技术要求。由行业协会与龙头企业共同建立回收标准与流程化规范，建立权威性的产品检测中心进行质量认证和追踪。
- 鼓励和支持多渠道、多形式的光伏组件回收技术国际合作和技术交流。充分利用国际组织、外国政府、行业协会和企业的相关技术经验、渠道、投融资等资源能力，开展光伏组件回收技术和经验交流会，加快本土回收产业化发展进程。

市场方向

- 推动实施绿色供应链，鼓励光伏制造企业在产品设计初期按照可回收理念与标准展开设计，推动龙头企业先行示范。
- 促进上下游合作开拓市场新模式。鼓励光伏组件回收企业、上游光伏制造商、下游

材料循环再利用方通过建立信息互通和对话合作平台，形成规模优势，降低成本。

- 加强跨领域合作，建立光伏组件回收技术发展及产业化基金，将资本引入回收市场，同时组建以市场为导向，产学研结合的清洁能源产业固废资源化团队，通过路演、推荐会、案例库等线上线下形式触达和对接更大资本市场。

风电篇



1. 中国风电产业回收现状及展望

1.1 中国风电产业发展历程

中国对近代风电技术的探索始于上世纪50年代后期¹。上世纪70年代，风电产业在中国正式起步。经过近三十年的努力，到2005年中国的风电产业实现了规模化发展，并自此进入了快速发展时期。中国风电新增和累计装机容量分别于2009年和2010年升至世界首位^{2, 3}，并保持至今，成为全球领先的风电生产和应用大国。

为了更清晰地了解中国风电产业，分析产业发展规模及趋势，本报告按照技术和产业化情况对产业发展历程进行了梳理，其不同发展阶段和特点如下：

探索起步阶段（1986年之前）：中国风电产业在此阶段多开展离网型小型风电机组的研究和试验，用于边远地区农、牧、渔等供电，应用规模和范围小。

迈向规模化阶段（1986-2005年）：此阶段以1986年中国首个示范性风电场山东荣成马兰湾风电场并网为标志。此后通过一系列国家级项目支持，中国风电产业实现了从示范性向规模化、产业化发展的

转变。2004年兆瓦级风机进入市场，开启大容量风机时代；2005年风电装机规模突破1GW。

快速发展阶段（2006-2020年）：此阶段，《可再生能源法》等政策法规在电价、并网等关键方面为可再生能源发展提供了有力支撑，推动了中国风电产业的快速发展，风电机组制造逐步实现了国产化，树立了全球风电产业大国的地位。

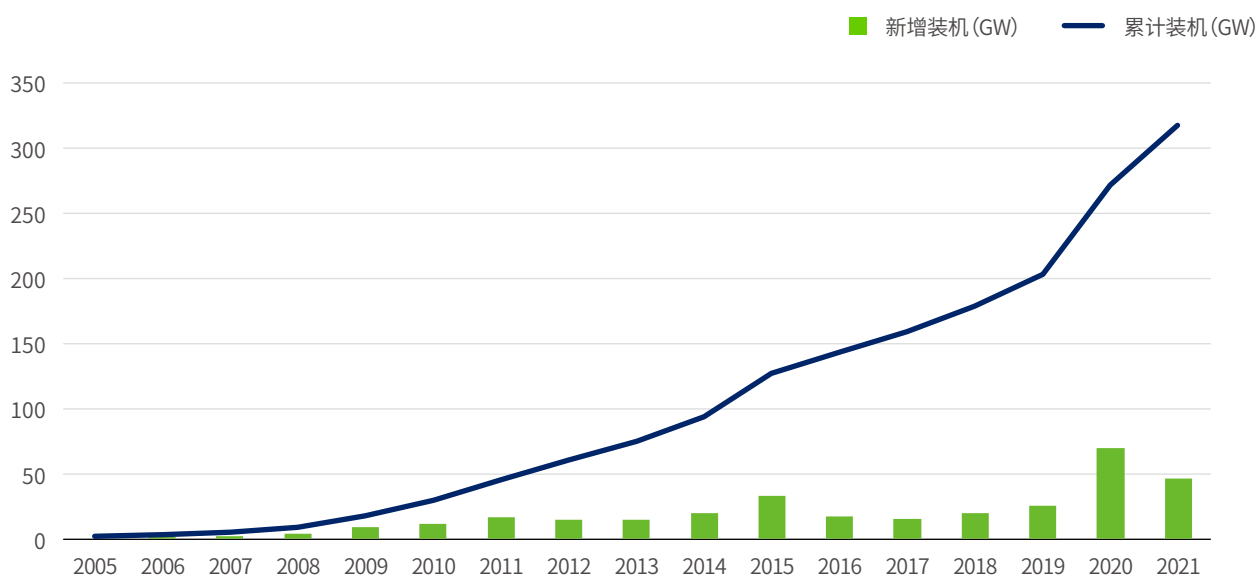
高比例发展阶段（2021年之后）：随着国家碳达峰碳中和目标的提出，以风电、光伏为代表的可再生能源是实现此目标的关键领域之一，中国风电产业进入了不断扩大规模、实现高比例发展的新阶段。

1.2 中国风电产业规模现状

风电产业的规模化发展，使得风电为我国乃至全球的能源转型和应对气候变化做出了重大贡献。截至2021年底，中国风电并网装机容量达到328GW⁴，占全国总发电装机容量的13.8%，连续12年稳居全球首位。

根据统计⁵，截至2021年底，中国风电累计装机超过17万台，累计装机的风电机组平均单机容量2025kW，当年新增机组平均单机容量达到3114kW。

2005-2021年中国风电新增和累计装机容量情况 | 图1





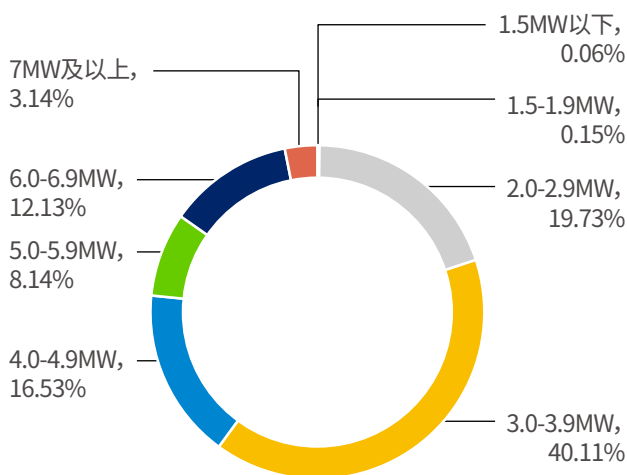
其中，2.0-2.9兆瓦风电机组占比最高，占累计装机容量47.3%，是市场的主力机型；3MW及以上风电机组所占市场份额不断增长，占新增容量的八成以上。

随着大功率风电机组的不断增长，风轮直径也相应不断增大。2020年中国风电装机中的平均风轮直径达到136米，陆上风机风轮直径最大达到166米。其中140米及以上风轮直径占比显著增长，达到63.8%。此前的2016-2019年，平均风轮直径为100-

130米，2015年及之前平均风轮直径则小于100米。

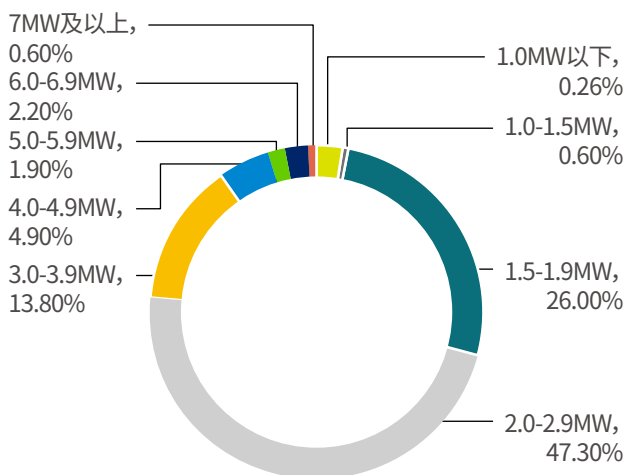
伴随着风电产业规模的扩大以及机组大型化发展的趋势，机组的相关部件，包括风机塔筒、机舱罩、叶片等的尺寸和原材料用量也相应增加，将带来越来越大的回收市场空间。其中，风电叶片机组及配套设施中所使用的复合材料是最难回收处理的部分，未来退役后需要处理的废弃物规模越大，相应的回收难度也越大。

2021年中国风电市场各单机容量机组 | 图2
新增装机占比



数据来源: CWEA

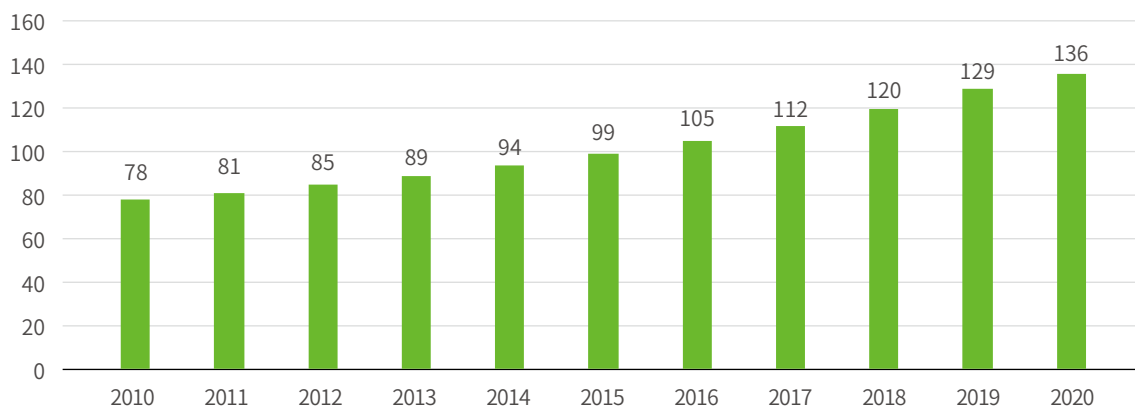
截至2021年中国风电市场各单机容量机组 | 图3
累计装机占比



数据来源: CWEA

2010-2020年中国新增风电机组叶轮直径变化 | 图4

单位:米



数据来源: CWEA

1.3 风电机组退役规模预期

风机退役受到政策、市场、技术水平等因素较大，如果支持政策到位，技术成熟，则会加速风机退役，扩大待回收规模。若无政策激励，缺乏成熟可靠的技术，则会放缓退役速度。本研究采用寿命平行推移方法预测退役规模，按照风电机组设计使用寿命20年计算，则2005年投运的风电机组，将在2025年退役，其余年份以此类推。参考中国风电产业发展历程，预计到“十四五”末（2025年），中国将迎来第一批大规模退役风电机组，届时运行时长超过20年的老旧风电场规模将超过1.2GW。

随后，每年退役的机组将逐步增加，预计到“十五五”末期（2030年），年退役风机规模将达到10GW左右；2030-2035年间，累计退役风机规模将超过100GW；2036-2040年间，累计退役风机规模将达到150GW。

1.4 风机叶片回收主流方式

在风机叶片回收工艺方面，相比于欧美等国家的叶片回收方式，中国仍处在起步阶段，回收工艺和技术等方面较为简单。目前较为主流的方式包括了物理

回收法、热回收法和化学回收法。

物理回收法

一种是将叶片进行拆解，将材料进行重复利用，用于市政建设等领域；第二种是将废弃复合材料进行一定机械处理（切割、破碎、粉碎）后，通过分选分离，获得单一的玻璃纤维或碳纤维树脂复合材料，应用于不同领域以实现二次利用，如建筑材料的添加物，增强材料性能等。

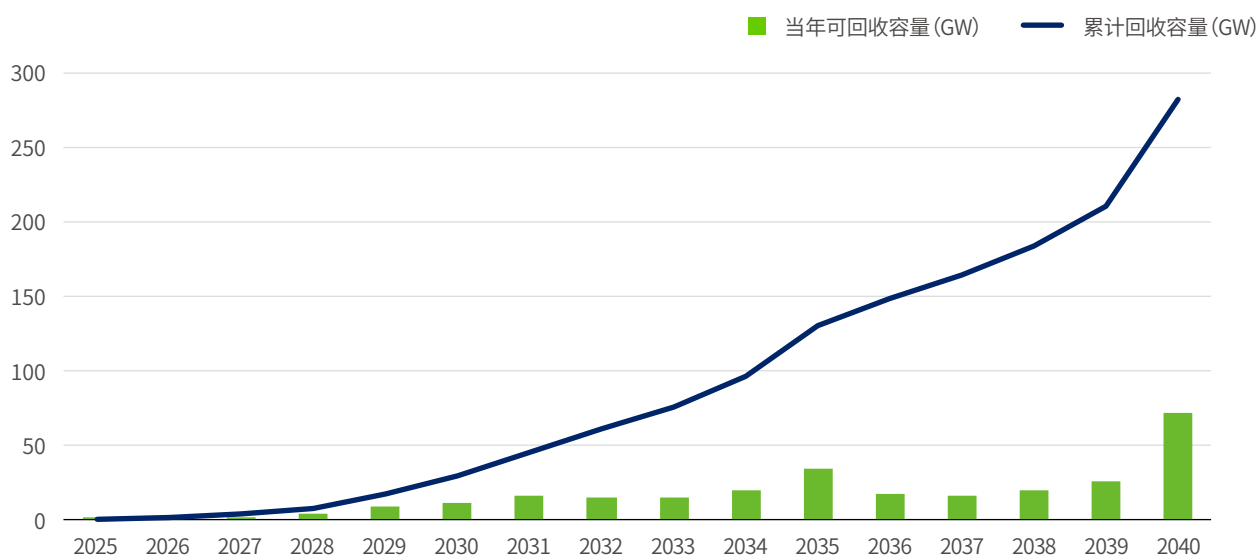
热回收法

由于复合材料中的树脂具有一定的热值，因此可将风机叶片复合材料与燃煤等燃料掺混燃烧，回收利用所产生的热量，燃烧后的灰渣可以作为工业固废利用。也可以掺混水泥原料，进入水泥窑焚烧，焚烧后的残渣用于制作水泥，水泥性能几乎无影响。

化学回收法

主要分为超临界流体法与溶剂溶解法。采用此类方法可以保留纤维材料的大部分拉伸强度，但具有侵蚀性的危险化学品对反应设备有限制，安全系数较低，处在实验室阶段。

2025-2040年风电机组退役容量预测 | 图5





1.5 风机材料回收市场估值

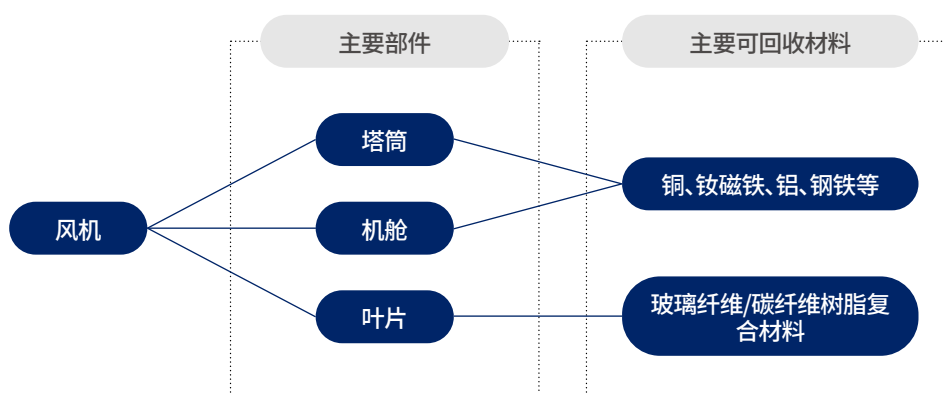
从风电机组和配套设施的主要材料构成看，风机的机舱、塔筒、叶片等部件包括了铜、钢、水泥、碳纤维/玻璃纤维等材料，在风机退役后均具有回收价值。以下对钢、铜和叶片的回收价值进行估算，需要说明的是，这里估算的仅是其回收价值，并没有考虑废旧风机拆解费用以及回收物资的运输费用。

其中，风机舱罩、塔筒中包括的铜、钢等90%左右的可回收材料都有成熟的回收体系，在不考虑长周期内废钢及废铜材料的市场价格出现大幅度波动的情

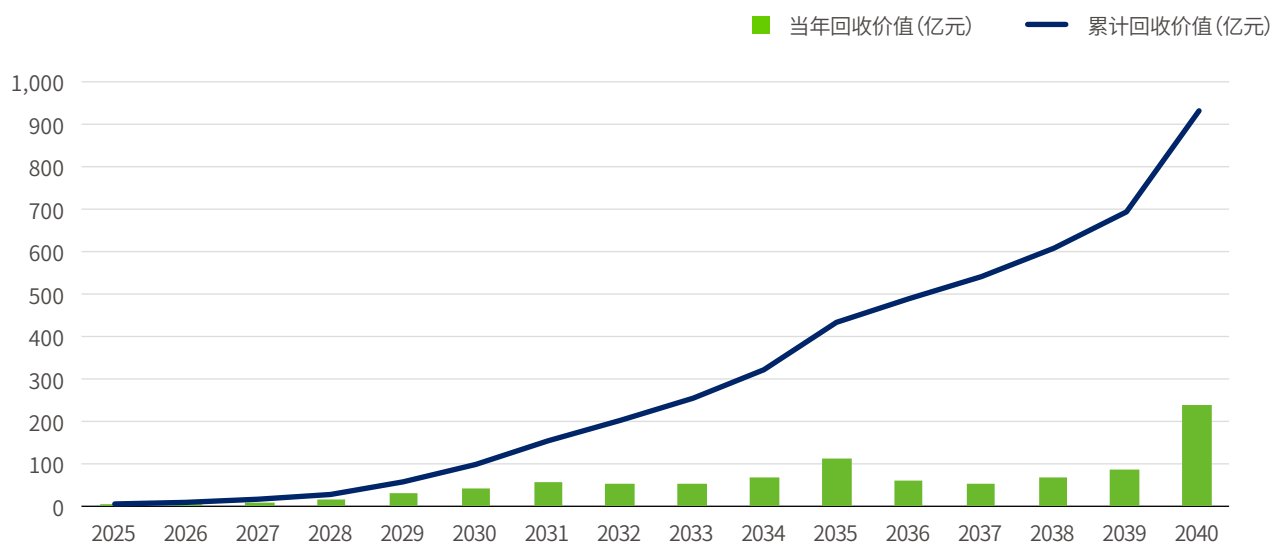
况下，按照风机20年生命周期后即退役的情景，对其回收价值进行估算。

钢的回收价值：随着风电机组单机功率的增大，用钢量会略有下降。但最先退役的机组多为1.5MW机型，所以本研究以1.5MW风机为例计算钢的回收价值。1.5MW机组其用钢量大约为170吨^{6,7}，则每千瓦用钢量约为0.11吨。近一年内，国内废钢价格在2800-3800元/吨范围内⁸，且有进一步上涨趋势，以废钢价格3000元/吨计，可预估出叶片中钢材料回收市场估值情况如下图。

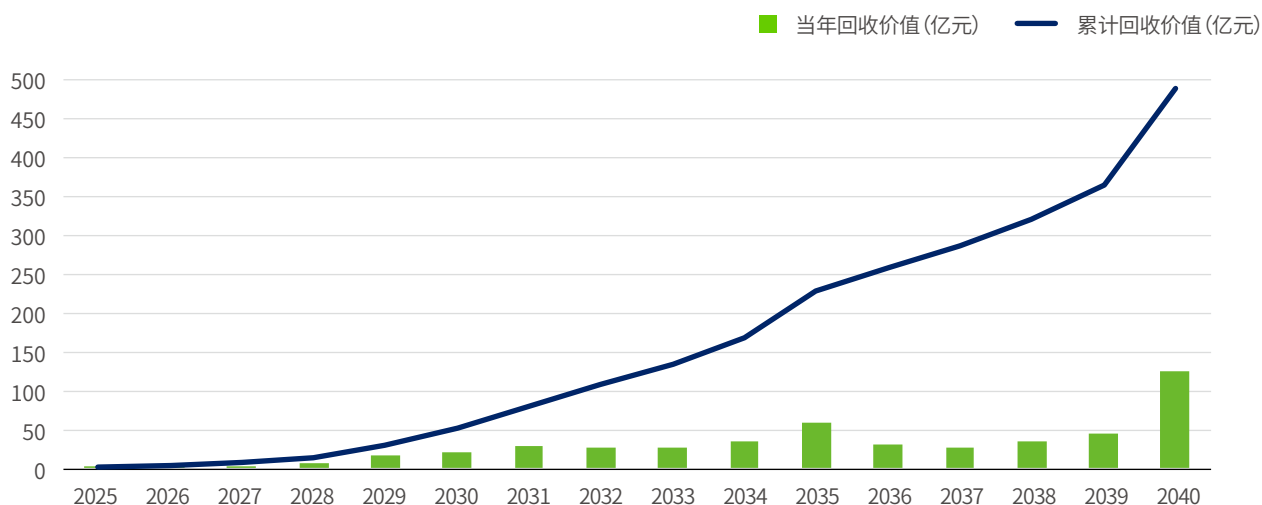
风机主要部件及可回收材料分解示意图 | 图6



2025-2040年风电机组退役废钢回收价值预测 | 图7



2025-2040年风电机组退役废铜回收价值预测 | 图 8



铜的回收价值：一般来讲，每兆瓦陆上风电用铜量约2900千克—3520千克，即2.9-3.52千克/千瓦^{9,10}。为避免高估铜的回收价值，这里本研究取低值计算，废铜的回收价格约为60000元/吨，由此可以计算出废铜的回收市场估值。

叶片回收价值：风机叶片回收是风电机组最为复杂、也是最具技术和市场创新价值的部分，成为影响风电产业回收整体效果和产业绿色低碳形象的关键。

风电叶片是一个由复合材料制成的薄壳结构，结构较为复杂，不同部件由不同的材料构成，并且根据制造商和应用场景的不同，叶片所涉及的结构和使用的材料也各不相同。整体而言，玻璃纤维/碳纤维树脂复合材料凭借其轻质高强、性能可设计的优质特点，成为全球风机叶片的核心材料，其在整个风电叶片中的重量占了90%以上。但复合材料由于在化学交联过程中具有不可逆性，产品固化成型后不可再熔化、重塑或自然降解，难以进行循环利用。因此，当前风机叶片回收技术难度大、成本高，其退役后的回收模式也尚处于探索中。对其的回收市场预估如下：

风机叶片复合材料用量约在16-18千克/千瓦左右，每年退役风机复合材料用量预测见下表。假设按

照目前国内已应用的废弃叶片回收利用模式——叶片破碎之后用来铺路，以节省铺路的石子价格约100元/吨¹¹计，则可简单计算出在即将到来的首批风机退役潮初期（2025-2030年），风机叶片采用现有回收利用模式在复合材料利用方面每年可产生的价值约在200万-2000万之间。

按照上述估算情景，到2040年风机叶片回收利用的估值将达到亿元以上的规模，而随着国家对循环经济的重视程度不断提高，以及技术的不断成熟和市场模式的创新，更高利用价值的叶片回收市场也将有机会得以建立，叶片复合材料的回收利用附加值不断提高，为此，其回收市场估值将远远高于现有的简单道路建设材料的价值。

2. 不当处置对社会环境的影响

2.1 产生碳排放

风力发电技术通过利用风力资源产生清洁电力，是推动能源转型和实现温室气体减排的重要途径。然而，除大力推动生产过程的清洁无碳的风电应用外，还应提高对风电项目生命周期内碳排放的关注。根据伍德麦肯兹数据显示，风电场全生命周期中约有14%



的碳排放来自于运输、吊装、运维及风电场退役后的设备处置等环节。

风电机组大量部件的主要材料包括钢铁，铝，铜，树脂等，在生产过程中由于能源消耗和工艺流程会产生大量的二氧化碳排放，而使用回收材料则可以减少相应的碳排放¹²。

基于生态环境部环境规划院所披露的工业产品二氧化碳排放数据，本报告以一个1.5MW，叶片长度为34-45米的风机为例，计算了风电机组原材料在使用过程中产生的碳排放。下面表格展示了如果该风机可以被100%回收，约600吨碳排放将被减少，约等于开车行驶500万公里会产生的碳排（开车行驶每公里平均会产生122.3克碳排放¹³）。因此，如果能实现风电机组主要材料的回收利用，则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。

假设一个1.5MW的风机为测算单位，在2030年，当风电累计退役规模达到约30GW时，可减少碳排放

预计达到约1200万吨。2040年，随着280GW风机的退役，可减少的碳排放量将达到约1.13亿吨。

在风机叶片的回收和处理过程中，通过焚烧处置叶片复合材料的方式是产生碳排放的主要环节。由于叶片复合材料的基体树脂为有机高分子，虽然具体含碳量与树脂分子结构有关，但是碳元素是其主要构成元素之一，大量燃烧树脂，将带来大量的CO₂排放。以环氧树脂为例，其分子式为(C₁₁H₁₂O₃)_n，含碳量约为69%，焚烧一吨环氧树脂，大约排放2.53吨CO₂。对于酚醛树脂，其分子式为(C₇H₈O₂)_n，含碳量约为68%，焚烧一吨酚醛树脂，大约排放2.48吨CO₂。减少或避免树脂的燃烧，将减少风电全生命周期的碳排放，进一步提高风电行业的低碳发展水平。

2.2 造成资源浪费

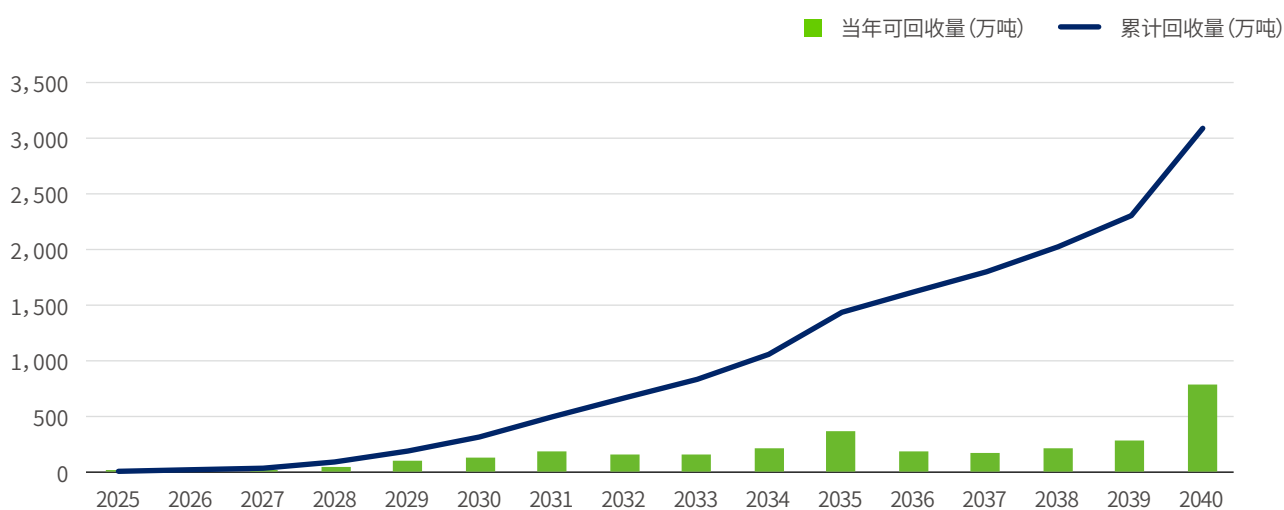
由于当前风机回收综合利用的技术成本高、效益低，产业化尚难实现，导致企业采取简单的方式进行处置，在资源循环和高效再利用方面造成浪费。

风机可以被100%回收时约600吨碳排放将被减少 | 表 1

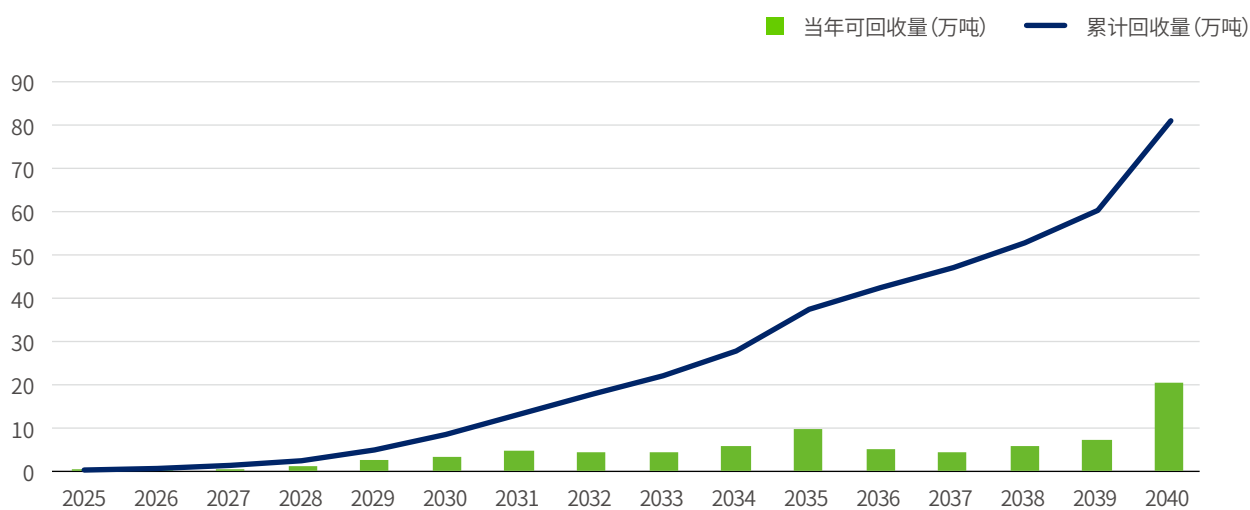
部件	主要可回收材料	材料重量 (吨)	可减少碳排放 (吨)
塔筒及机舱	铜	4.35	25.23
	钕磁铁	1	52.41
	铝	2.6	20.67
	钢铁	170	453.9
叶片	玻璃纤维	11.55	11.55
	树脂和胶	6.3	37.23
总量			601.19*

* 此数据仅为基于当前技术下1.5兆瓦风机生产过程产生的碳排放为例估算，使用回收风机原材料可减少的碳排放总量会随着技术的发展与风机结构的优化而发生改变。风机在回收过程中根据回收方法的不同会产生相应不同程度的碳排放，此计算不考虑废弃处置与回收过程中的二氧化碳排放。

2025-2040年风电机组退役废钢回收量预测 | 图9



2025-2040年风电机组退役废铜回收量预测 | 图10



首先，风电机组中铜、钢等金属材料如不能完全得到回收利用，将造成资源浪费。按照报告之前章节对风机退役规模及金属材料含量的评估，若风电机组退役后以简单的废弃或堆放处置，每年将造成几十甚至几百万吨钢，以及上万吨铜材料的浪费。

其次，就叶片而言，机械回收方式工业较为简单，即通过将废旧叶片材料采取一定机械处理后进

行二次利用，但此过程中玻璃/碳纤维会受到一定损伤，使得可获得的材料强度下降，只能进行次级利用。通过焚烧处置风电叶片等复合材料固体废物的方式，其原理是将有机成分燃烧以获取能量，可以实现一定资源能量的回收利用。但复合材料固体废物包含了树脂有机高分子成分和玻璃纤维成分，由于高温将导致复合材料中玻璃纤维熔化，将成为无法利用的废物，只能进行填埋，再次占用土地资源。



2.3 污染环境

当前，风机叶片回收后通常采用露天堆放、填埋、焚烧或粉碎再塑形等方式进行处置。而这些处理方法通常会带来对生态环境污染问题。风机叶片含有约55%的玻璃纤维，30%左右的树脂和胶，15%的其他材料。以1.5MW的风机为例，单台风机退役时将产生11.55吨废弃玻璃纤维和6.3吨废弃树脂和胶，以此推算，在2040年将累计产生近220万吨废弃玻璃纤维，近120万吨废弃树脂和胶。随着风机单机规模的大型化，以及叶片技术和材料的改进，各种材料占比会产生改变，此处以1.5MW风机为例，作为材料废弃量的粗略计算，不能作为未来市场投资预测的准确参考。玻璃纤维、树脂和胶在常规条件下具有不熔不溶的特性，废弃叶片露天堆放，将占用地表土地资源，大量堆放的情况下，甚至将造成土地利用性质的改变。若破碎填埋，则产生的玻璃纤维微小颗粒和树脂微小颗粒将进入土壤和地下水，改变土壤的理化性质，造成土壤污染和地下水污染。

复合材料主要由无机物即玻璃纤维和有机物树脂组成，玻璃纤维在破损过程中容易产生粉尘，如果细小的玻璃纤维通过呼吸进入肺内，而不能被主动排出或吸收，还可能会刺激肺部组织出现纤维包裹、结节等，即出现职业病中的“尘肺”。此外，长时间接触玻璃纤维，还可能会刺激支气管等部位，引起支气管炎、哮喘等¹⁴。有机物树脂虽具备一定热值，但燃烧过程中会产生有毒有害气体，需要配备专门的污染治理设施减少大气污染。特别是因燃烧温度、燃烧过程、现有锅炉结构不匹配时，还会有爆炸隐患。此外，燃烧后产生的灰烬含有未完全分解、易挥发的有机低分子污染物质，将会带来二次污染。

3. 不当处置对风电行业的影响

3.1 产业层面：能否实现绿色化处理，将影响全产业链低碳发展

当前，绿色可持续发展已成为全球共识，各个国家和行业都在寻求绿色低碳环保的发展方式和路

径，以缓解由于人类工业化发展所带来的自然环境和气候变化所造成的严重影响。风电行业作为清洁的可再生能源，长期以来，通过大量的风电项目开发和建设和电力供应，为推动和实现全球能源转型做出了重要贡献。

随着大规模风电机组退役潮的到来，风电产业所产生的风机叶片等固体废弃物可否实现可持续、绿色处理，成为了关注的焦点。特别是随着中国“双碳”目标的提出，可再生能源将获得更大的发展空间，而项目生命周期的清洁化的重要意义尤为凸显。叶片等固体废弃物的处置关系将影响到全产业链的低碳发展效果，正确引导并向资源化利用成为行业发展的关键之一。

3.2 企业层面：能否承担可持续发展责任，将影响企业竞争力与声誉

随着全球面临越来越严峻的气候、环境、资源挑战。环保问题引起了高度关注，倡导经济发展的同时注重环境保护，实现可持续发展成为全球共识。在市场机制作用下，相关概念也被引入投资领域，投资者逐渐意识到企业环境绩效可能也会影响企业财务绩效，ESG、绿色金融等逐渐成为影响企业声誉和竞争力的因素。

碳中和是全球大势，是人类社会与自然和谐共生、可持续发展的需求。未来，具备技术创新能力，能够实现风电与自然和谐共生的企业，将更能满足客户和社会的需求，也将得到资本市场的青睐，并创造出新的商业模式，实现在行业竞争中处于不败之地。

4. 中国风电回收的机遇与挑战

中国风机回收市场正处在建设的初期阶段，目前已经具备基本的物理回收利用、以及一定的处于实验室阶段的化学回收技术能力，虽然回收处理规模尚在起步阶段，部分技术的效率和发展有待革新，相关政策有待完善，但大规模风机退役所带来的回收空间巨大。

4.1 机遇

机遇一：循环经济是双碳目标的重要手段

应对气候变化是全球面临的挑战，循环经济被世界主要经济体和组织作为应对气候变化工具清单中的重要内容。早在2016年，习近平主席就指出“中国坚持创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念，将大力推进绿色低碳循环发展，采取有力行动应对气候变化”。2020年9月，我国提出了“碳达峰、碳中和”国家战略，并加速构建“1+N”政策体系，其中‘1’是中国实现碳达峰、碳中和的指导思想和顶层设计，‘N’则包括了能源绿色转型行动、工业领域碳达峰行动、交通运输绿色低碳行动、循环经济降碳行动等重点领域和行业实施方案。

全面推行绿色低碳循环经济发展成为了实现双碳目标的重要手段。在此大背景下，风电回收产业作为满足产业发展需求、推动科技创新、助力减污降碳的领域，必将在循环经济发展的需求下，获得更有力的政策支持和市场的发展空间。

机遇二：创造新的发展空间

首先，推动跨领域合作。风机叶片回收具备巨大的市场潜力，但在成本和技术的制约下，实现经济、可持续的回收处理还需要较长的过程。为更好地解决这一问题，可与材料、建筑等多领域进行跨行业合作，通过多行业融合协作，将有助于寻找到更加合适的途径，同时促进更多行业和领域的可持续发展。

第二，推动技术创新。加强技术研发和投入，是实现风机叶片回收利用的基础和关键，这将推动复合材料处理方面的技术创新和突破。同时，考虑到复合材料也大量应用于石化、交通、航天等领域，风机叶片复合材料回收处理技术的进步也将为其他使用同类复合材料领域提供材料循环利用的解决方案。

第三，增加就业机会。从风机叶片回收处理的运作流程分析，包括了废弃物的拆解、运输、收购、循环利用等不同的环节，同时也会在市场上催生出相关的新产业形态，这些都将带来劳动力需求和就业岗位

的增加。参考目前我国资源循环利用产业已吸纳就业人口超过1000万的规模，风机叶片回收作为尚未大规模启动的产业，未来在提供就业机会方面也存在一定空间。

机遇三：风电与生态环境和谐发展日益受到重视

生态环境保护和应对气候变化相辅相成，风电等可再生能源在其中发挥着重要作用。在“双碳”目标下，可再生能源尤为重要，不但要通过大力发展新能源、提高非化石能源消费占比来落实“双碳”目标，更要通过重视和实施新能源开发建设、运营维护和退役回收等环境的生态保护工作，使得风电等可再生能源在生态文明建设中起到实实在在的引领和促进作用。

4.2 挑战

挑战一：经济效益有待挖掘

风机叶片回收处理的最大障碍并不在技术，而是经济性亟待提升。

一方面，在早期风电项目开发建设时，项目业主或制造商并未对风机退役所造成的成本摊销问题进行周全考虑，导致此部分成本成为风机退役后废弃物处理的经济压力，而承担方为减少经济成本，往往选择简单的填埋、焚烧等处理方式。

另一方面，风机叶片回收技术往往成本较高。由于风电项目多位于偏远地区，运输距离远，且叶片尺寸大，回收难度大、成本高。在缺少补贴等优惠政策支持的情况下，回收公司仅靠加工费和制成品的销售收入很难完全覆盖处置成本，低利润或负利润导致回收企业没有参与的积极性。

此外，当前以电厂焚烧的方式处理风机叶片复合材料固体废弃的成本低，而综合利用的处理途径给企业带来的成本较高。这导致了废弃物生产企业选择以低成本方式处理废弃叶片，而开展正规回收综合利用业务的企业面临无法收集到固体废物材料的窘境。受



经济性因素的影响，风电叶片等复合材料固体废物资源化利用产业在源头上遭到扼杀。

风机叶片回收成本高，未能形成规模化利用能力，产业经济性低，对市场相关参与方的吸引力不足，导致了我国风机叶片回收仍是个小众产业，不能满足未来大规模退役潮的需求，更远不能达到环保和循环再利用的要求。

挑战二：技术体系尚不成熟

全球范围来看，目前国外的一些大型企业，比如GE，维斯塔斯、西门子歌美飒等企业已经开始风机叶片回收布局，并做了一些示范项目，走在了前列，其掌握的核心技术或将成为风电行业新的技术壁垒。中国尚处于起步阶段，技术体系仍不成熟。表现在几个方面：

缺少循环利用的技术路线：热固性复合材料难以降解、收回处理流程复杂，普通的固废掩埋方式对生态环境影响较大，且正在逐步被淘汰和禁止。而循环处理及高值化利用尚无有效方法，再利用过程中的肢解、粉碎、分离等环节的工艺技术亟待研发。

无完整的回收产业链：当前中国尚未建立完善的固废回收利用体系，风机叶片回收产业链缺乏系统性，上游产业的循环设计水平不足，生产工艺未能突破技术瓶颈，致使下游产业循环设计无法实现，下游与上游产业循环设计脱节，难以实现产业循环和可持续发展。

新材料研发待加强：新材料的研发可实现从源头上推动叶片的循环利用，但当前中国相关研究机构、企业在风机叶片的新材料研发方面的意识和投入不足，也制约了新一代风机叶片材料的应用进度。

挑战三：政策、规范、监管待完善

当前，中国新能源项目退出机制尚在建设过程中。老旧风机设备更换、退役、报废等后续机制尚不明确。然而叶片无害化处理需要投入大量资金，在平价上网的大背景下，由于没有明确退役机组回收再利

用的补贴或税收优惠政策，风电开发商开展叶片无害化处理的动力和意愿大打折扣。

风机退役具体执行政策缺位。一方面，中国现行政策法规对风机叶片退役后的回收处置主要是从整体上做出原则性规定，实践中缺乏可操作性。另一方面，政策标准有待完善，相关标准规范则多处于编制或立项之中，滞后于风电产业发展的进程，不能满足市场需求。

此外，由于存在监管缺失或不位，风机叶片在收集、储存、运输、处理等过程中不能完全遵守相关国家污染防治标准、技术政策和技术规范，违反污染防治法律法规的行为缺少监管和处罚措施，也对风电产业的健康发展产生了严重制约。

5. 国内外政策及市场的解决方案

5.1 相关政策对回收市场的引导

当前，世界各国风电行业尚没有经济可行的大规模拆解回收风叶片的方案，但由于风机叶片材料难以经过简单加工回收利用，堆积填埋或燃烧的方式会对生态环境带来负面影响，尤其是随着叶片退役报废规模的增长，其影响将愈发凸显。为应对这一情况，各国正在探索和出台相关的政策措施，对风机叶片回收利用市场加以引导。

欧洲是全球风电发展最早、也是最大的风电市场之一，据统计，到2023年欧洲预计将约有1.4万个风机叶片面临退役¹⁵。为更好地应对大规模退役潮，减少对环境的污染，欧洲政府多提倡实施积极环保的政策措施。当前，德国、荷兰、奥地利和荷兰四国已经出台限制措施，禁止以填埋的方式处理风机叶片等复合材料。欧洲风能协会已经提出倡议，到2025年欧盟和英国等禁止使用填埋方式处理退役的风机叶片，并呼吁政府部门鼓励可回收再利用材料的使用。

在中国，生态文明建设受到高度重视，是实现人与自然和谐发展的必然要求，关系中华民族永续发展。绿色发展、循环发展、低碳发展成为了建设生态文明建设的基本途径。十九大报告中就已明确要求，“加强固体废弃物和垃圾处置，推进资源全面节约和循环”。2020年9月1日最新修订的《固体废物污染环境防治法》正式实施，被称为了“史上最严固废法”。对于风电产业而言，国家战略目标以及法律规划使得与其相关的环保政策也随之不断明确和加强，风机叶片等废弃物回收、循环利用获得越来越高的关注。

未来，为落实碳达峰、碳中和目标，以及2030年非化石能源占一次能源消费比重达到25%左右，可再生能源将发挥越来越重要的作用，风电太阳能发电规模将快速增长，到2030年总装机容量需达到12亿千瓦以上。解决风电叶片的回收处置及综合利用是必须完成的任务之一。

在2021年10月国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》中，提出“完善废旧物资回收网络，推行‘互联网+’回收模式；推进退役动力电池、光伏组件、风电机组叶片等新型产业废物循环利用”。

为实现行动方案目标，科技研发方面也需提供保障。为此，2022年2月，国家工信部、国家发改委、科技部等八部委联合印发了《加快推动工业资源综合利用实施方案》，提出推动废旧风电叶片等新型固废综合利用技术研发及产业化应用，未来的政策措施可以包括补贴或纳税减免。这将十分有助于推动加快建设完整、健全的风机叶片回收产业。

针对风电产业本身，能源主管部门也根据产业发展的新阶段、新需求制定和出台了相关的政策。包括2021年12月国家能源局发布的《风电场改造升级和退役管理办法》（征求意见稿），对风电场改造升级提出指导，其中专章规范了风机的循环利用和处置，加快构建风电产业循环利用新业态；2022年1月，国家能源局综合司发布《2022年能源行业标准计划立项指南》，将风电场改造升级，风电设备退役循环利用列入能源行业标准计划立项重点方向。



5.2 国内外回收市场的创新案例

国内外风机叶片回收市场尚处于起步阶段，缺少成熟的商业化模式。通过政策激励，引导更多资金进入叶片回收产业，推动新技术路线的研发和新商业模式的建立，以及鼓励叶片回收与其他领域联合应用，实现跨产业协同，都将是促进叶片回收市场发展的重要方向和途径。

5.2.1. 创新商业模式

通过创新的商业模式，激发新的回收处理方式，将改变社会对风电等新能源回收的已有认知，找寻更多循环利用的出路。废弃风机叶片的回收处置有机会在以下方面开展和推广新的商业模式，为风电产业带来新的商机和经济增长点。

商业模式一：风机制造企业主导。在市场建立初期，市场规模相对较小，对产业了解程度较深入的风机制造企业，可以充分发挥自身在市场和技术方面的优势，带领专业回收市场的初步建设。通过风机制造企业负责风机拆解和有用物资的回收利用，循环经济领域企业负责废物的处理，风电场配合，利益三方分成的方式尽量准确地摸索出可行的商业模式。

商业模式二：专业化公司主导。进入市场大规模阶段，专业化公司在充分了解风电市场的基础上，利用自身专业的回收技术和市场运营方面的专长，主导风机拆解回收利用和废物处理，风电场业主无需付费给专业化公司，双方收益进行分成。

商业模式三：应用端的多领域协同。除上述模式外，在回收废弃物应用端的商业合作模式创新同样值得关注。此类模式下，通过扩大废弃叶片的回收应用途径，促进多领域协同，可以增加市场消费量，提高其循环利用价值。

在美国、欧洲等国家和地区，一些大型风机制造商已经通过与建筑或环境企业合作的方式，对叶片进行回收，在粉碎处理后作为添加剂添加到建筑材料里，比如水泥等。在荷兰，废弃风机叶片也被用来打造特色儿童公园、做成城市公共座椅等。国内也有公司尝试将切割后的大块材料研磨成细小颗粒粉末，用作地坪涂料补强剂和防腐涂料的添加剂。

案例1：废弃风机叶片用于生产水泥——通用电气可再生能源公司与威立雅北美公司合作

基本情况：

2020年12月8日，全球领先的可再生能源制造企业之一的通用电气可再生能源公司（GE Renewable Energy）与知名的资源优化管理企业——威立雅北美公司（VNA）签署了一项多年期风机叶片回收利用协议。按照协议要求，GE公司在美国的陆上风电机组叶片将被回收并用于水泥制造的原材料。该回收合同是美国风电行业中的首个此类合同。

威立雅公司把从风机上拆除的叶片运送到密苏里州的工厂粉碎，将由玻璃纤维组成的叶片转化为原材料，用于窑炉，以取代制造水泥所需的煤、砂和粘土。该解决方案的有效性已经在欧洲得到证明。

实施效果：

通过新能源固体废弃物与传统建筑材料两个不同领域，在废弃物材料、能源消耗等方面实现了创新性的协同效应，同时这种解决方案可以快速大规模部署，便于提高行业效益。

从效果看，无论在降低能源资源消耗，还是减少污染物和二氧化碳排放方面都表现良好。一是，通过此过程回收的单一风机叶片重达7吨，超过90%的叶片材料都可被再利用：65%的叶片在水泥厂用作原料，28%转化为窑内化学反应所需的能量。二是，可减少水泥转窑燃料和原材料消耗，包括近5吨煤，2.7吨二氧化硅，1.9吨石灰石和近1吨的其他矿物原料。三是，与传统的水泥生产相比，此方法可以减少27%的二氧化碳排放量，以及13%的水消耗量¹⁶。

回收处理现场



图片来源：CNBC

微信扫描二维码
进入该案例



5.2.2. 创新技术方向

随着风电机组退役规模的迅速增长，叶片回收需求将大幅提高，但对于废弃叶片的回收利用、再循环当前并未得到充分实施。为了满足未来大规模退役叶片回收的需求，减少废弃叶片对生态环境的影响，需要尽快推动和实施叶片回收的产业化，利用产业化带动规模效应，提高回收的可行性和经济性。

风机叶片回收利用产业化可归为两个主要方向：一是物理化回收处理产业化；另一个是化学降解技术产业化。

物理化回收处理的产业化

物理化回收处理并非简单的回收、切割、填埋的处理方式，而是通过重复利用或者机械粉碎法，利用

叶片材料保留的功能继续应用到其他领域，从而实现资源循环利用和节约资源能源的目的。

其中重复利用是指将叶片进行简单分割，利用其未丧失的性能、功能，进行再次利用。例如景观、休闲长椅等。该方法可使用最简单的方式延长叶片材料的应用周期，是对实现其他材料的替代，是风机叶片回收在实现技术突破性创新前，技术难点较低、操作性较强的产业化途径。

此外，机械粉碎法是通过机械撕碎、粉碎的方式将叶片生产为块状、粉末状等材料，用于建筑板材、木塑板、石膏板的生产，从而实现再利用。该方法运行成本较低，易实现产业化，目前市场上已有相对成熟的生产线。

新兴固废综合利用技术装备(风电叶片部分) | 表 2

序号	技术装备名称	应用范围	技术装备简介	技术指标	未来推广前景
1	废旧风电叶片分级绿色处理循环利用技术	废旧风电叶片综合利用	该技术通过对风电叶片大型肢解装备、多级破碎装置，对叶片、叶梢和叶中进行分解、研磨获得再生材料，同时通过采取低温溶解、高压降解、中温热裂解等分离技术实现玻璃纤维与固化树脂的完全分离。分离出来的玻璃纤维可广泛用作纤维材料制品、水泥及混凝土、公路交通、建筑材料等领域的增强材料。	全自动横向肢解平均速度5~10min每道；风电叶片资源化综合利用率达到90%以上。	该技术装备由河北安恕朗晴环保设备有限公司自主研发，可实现废旧风电叶片分级处理循环利用。截至2021年底，我国风电并网装机容量达到3.28亿千瓦，未来随着风电机组退役规模扩大，废旧风电叶片综合利用需求将逐步增加，市场推广潜力较大。
2	退役风电叶片工厂智能化切割工艺及设备	废旧风电叶片综合利用	该装备由风电叶片精细化剖解设备与风电叶片加工的高效除尘设备组成，一方面剖解设备通过建立模型实现风电叶片的高速、高效、智能化剖解，提高出材率；另一方面除尘设备采用覆膜滤芯，可有效降低粉尘排放，余料和粉尘经过筛选机构收集后用于制作板材。	出材率达到70%；自动切割设备设计切割速度20~30m/min；扫描精度0.3mm，扫描范围1-150m；正常工作过滤风速为1.2m/min，全速过滤时为0.8m/min。	该技术已在吉林重通成飞新材料股份公司进行推广应用，预计10年内普及率可达到70%以上，而且随着高铁用玻璃纤维复合材料等其他产品退役或报废，设备端的市场需求将进一步拓展，应用前景广阔。
3	废旧风电叶片拆解处理技术	热固性复合材料、风电叶片、废旧玻璃钢等固废回收利用	采用绳锯将废旧风电叶片切割成1米大小矩形块，再用多级双轴撕碎设备对矩形块进行撕碎和立体锤体粉碎，然后通过自动化筛选、分离、研磨、分类包装，得到不同长度或直径比的纤维、PVC颗粒、巴沙木、二氧化硅、富含树脂的粉末等可再利用材料。	每条产线年处理热固性复合材料废旧风电叶片量约1万吨，按每支废旧风电叶片3.5吨，可处理2587支叶片（叶片长度12.5m，宽度1.5m）	该技术设备应用范围包括退役风电叶片的回收处理及玻璃钢等热固性复合材料处理，适用于风电场运营企业、风电主机厂、叶片生产厂、机舱罩企业、拉挤型材企业、管罐生产企业等，可有效促进退役风电叶片和废旧玻璃钢类热固性复合材料的资源综合利用，市场前景广阔。



值得引起市场振奋的是，在中国，叶片回收和综合利用技术越来越受到有关部门的重视，并积极推动技术设备的推广应用。参照《国家工业资源综合利用先进适用工艺技术设备目录（2021年版）》供需对接指南之三：新兴固废综合利用技术装备，此领域的一些工艺技术装备已经在技术研发、产业化生产等方面具备推荐推广条件。

化学降解技术产业化

化学降解技术主要包括超临界流体法、溶剂溶解法，是将树脂高分子成分降解成新的高分子材料，降解后得到的纤维强度损伤小，可以继续作为增强材料应用到相关领域。风机叶片复合材料化学降解再利用，可以节约大量化石资源和矿产资源的消费，对“双碳”目标的实现也会做出巨大贡献¹⁷。

其中，超临界流体法是指流体的温度与所受压力超过临界温度与临界压力的状态，此时的超临界流体具有很强的溶剂特性，能有效溶解和降解聚合物废物。作为一种新型的回收技术，超临界流体法具有技术清洁无污染，再生纤维性能优良等特点。但超临界条件苛刻，要求高温高压，且腐蚀性较强，对反应设备的要求高，从而导致其成本高昂，安全系数较低，目前还只处于实验室阶段。

溶剂溶解法是在加热条件利用催化剂打断树脂中的碳氮键，进行开环反应，从而将树脂的网状高分子交联链结构转化为线状高分子交联链结构，使其被有机溶剂溶解，实现树脂降解的目的。溶剂溶解法操作简单，反应条件较为温和，但存在有机溶剂使用量大，反应时间较长等缺点。

案例2：碳纤维增强环氧树脂回收利用技术——中国科学院山西煤炭化学研究所

基本情况：

随着中国第一轮大规模风电机组退役潮即将来临，风机叶片绿色回收成为业内热点，风机叶片材料的回收技术需求也随之不断增高。国内大多数风机制造企业多采取将叶片废弃材料转给相关回收企业进行物理化处理。但是这种处理方式并不能将叶片的主要材质——热固性树脂复合材料彻底处理掉。经过十多年研究，中国科学院山西煤炭化学研究所，终于掌握了“拆解”此复合材料的办法，填补了风机叶片绿色回收最关键的一环¹⁸。

实施效果：

该技术采用定向解聚法处理复合材料，通过特定溶剂及催化剂体系，在较温和的条件下将高分子在特定的键位“拆解”开，实现了热固性树脂基复合材料的高效降解和全成分回收，是学术界普遍承认的实现循环经济的好方法。

该技术可以在较温和的条件下实现树脂降解，耗能少；同时通过特定位点选择性断键，产物可控。通过该技术，实现了高价值碳纤维回收。从数据指标看，环氧树脂降解率大于99%，回收率大于95%，碳纤维回收率大于96%。高价值化学品使得回收技术“含金量十足”，预期经济效益十分可观。

微信扫描二维码
进入该案例



案例3：“零废风机”技术——维斯塔斯、西门子歌美飒

基本情况：

除单一的采用物理方式或化学方式实现叶片回收外，风电产业内的整机龙头企业针对已经或即将退役的风机叶片，创新性的提出了“零废风机”这一新的技术应用途径。

2020年1月，风机制造巨头维斯塔斯宣称，将在2040年前生产“零废风机”。相比于维斯塔斯当前86%的风机平均可回收率，以及42%的叶片和轮毂的回收率，“零废风机”目标的提出将进一步满足未来市场的需求。2021年5月，维斯塔斯进一步公布了一项热固性环氧树脂复合材料叶片回收技术。此项方案可以在风机退役拆除后轻松回收叶片，用于较低级别产品的二次生产。

另一业内巨头——西门子歌美飒也于2020年7月宣布了可持续发展愿景战略目标：到2040年销售风电机组实现100%可回收，到2030年叶片实现可完全回收，并承诺提前10年（2040年）实现净零排放，包括其供应链的排放。

实施效果：

“零废风机”在其生产、使用、回收、再利用以及复原的过程中可做到保护材料和资源，不再需要将风机叶片打碎进行焚化或填埋。同时对复合材料叶片回收并实现低级别产品二次生产的技术可以避免对叶片生产工艺进行大改造，这样既节省了工艺改造费用，也无需承担叶片材质变化导致质量问题的风险¹⁹。“零废风机”目标的提出将大大促进在回收技术方面的投入，并提高风电产业链整体对循环利用的认知和重视，推动早日实现风电全生命周期的绿色可持续发展目标。

微信扫描二维码
进入该案例



案例4：“生态风机叶片”——Zebra项目

基本情况：

这是一项由研究机构IRT Jules Verne发起的研究项目，全名为Zebra (Zero Waste Blade Rese Arch)，法国开发商Engie、GE旗下的叶片制造商LM Wind Power及多家产业链上的企业共同参与，各方共投入2180万美元，旨在开发一种全部材料都易于回收的风机叶片²⁰。

实施效果：

使用该技术所生产的新型叶片使用热塑性材料，即注入一种由专业机构Arkema研发的名“Elium”的新型树脂，使得在生产环节就解决了叶片回收所面临的问题。同时，通过优化设计、制造、回收过程，对降低叶片成本、缩短生产时间、降低风机叶片对环境的影响都有很大的帮助。

微信扫描二维码
进入该案例





案例5：风机材料循环利用——Dreamwind项目

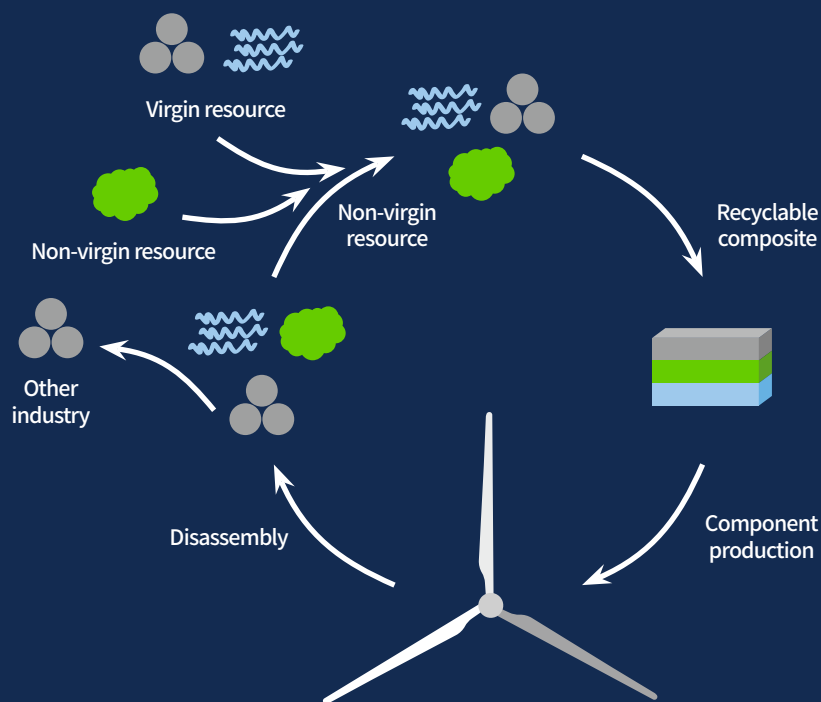
基本情况：

由丹麦投资基金支持开展的针对可回收的风机材料设计的项目，参与方包括维斯塔斯、奥尔胡斯大学和丹麦技术研究所。目标是实现用于叶片制造的高强度复合材料的新材料研发，可以拆卸并在新的风机中重复使用，这将增加未来风机的可持续性。

实施效果：

新材料的研发在循环经济框架下进行，产品具备可持续性，并且与经济和资源相关度高。利用材料开发领域的最新知识，确保产品的性能与最先进的材料相匹配。同时，材料生命周期内将创造新的工作机会，对环境和社会产生效益，创造出远高于产品寿命结束所带来的价值²¹。

风机材料循环利用示意图



图片来源: Dreamwind

微信扫描二维码
进入该案例



6. 结语建议

我国已将绿色发展、循环发展、低碳发展作为建设生态文明建设的基本途径。在3060双碳目标下，风电产业不仅在提供绿色低碳能源发面发挥了重要作用，自身的低碳循环利用也是关键。建议从以下方面推动风机叶片回收工作：

6.1 政策层面：

1. 完善固废回收利用体系。根据产业发展阶段和规模的需求，加快包括退役风机叶片在内的固废回收利用体系建设，全面提高资源利用效率，为国家绿色低碳发展，以及双碳目标的实现提供切实可行的实施途径。
2. 加强财政税收支持力度。在回收利用规模较小的初期，缺乏规模效应，可出台一些财政税收政策，并设立专门的风机回收利用基金。对拆解回收项目进行验收，验收合格后给予一定资金奖励；对于推动产业链实施、或满足绿色供应要求的企业，给予税收或金融政策优惠。
3. 建立回收标准和监管认证体系。加快对现行风机叶片回收处理现行政策法规的落实，出台具备操作性的回收标准和监管政策措施，确保实现全过程环保、实现循环经济、实现高值化利用，构架网络回收体系，引导行业和企业向叶片回收利用方向发展。

6.2 市场层面：

1. 强化源头治理。鼓励风电整机制造企业牵头，实施绿色供应链，加强叶片的绿色生产和回收。要在风电机组设计、材料选择的时候，把整个生命周期的利用考虑进去。
2. 探索商业模式。按照风电产业发展特点和回收市场需求的特点，遵循分阶段、分目标的原则开展商业模式的推广，试验不同的商业模

式，降低处理和回收成本，开拓回收利用空间，调动利益相关方的积极性。

3. 加强科技攻关。针对叶片回收技术的难点、对环境友好的替代材料的研发，组织相关科研机构、风机制造企业、风电开发企业联合攻关，加强跨行业协作。充分利用市场资源配置的特点，推动风电产业与社会其他行业间的合作交流，增加利用途径，扩大市场消纳空间，提高循环利用价值和经济效益。

光伏篇



1. 中国光伏产业回收现状及展望

1.1 中国光伏产业发展历程

中国光伏组件产量连续15年位居全球首位²²，累计装机量连续7年位居全球首位，中国光伏产业经过数年经验累积和市场成长，如今已经取得了在全球光伏市场遥遥领先的成绩，占据全球光伏总装机容量的近1/3。为了更清晰地了解中国光伏产业，本报告分析了产业发展规模及趋势，按照技术和产业化情况对产业发展历程进行了梳理，其不同发展阶段和特点如下：

光伏起步期（1998-2002）：全球光伏市场规模化发展，中国光伏制造业在此背景下，迅速形成规模。英利三兆瓦项目，尚德的建立，标志着初始化规模建立。

快速发展期（2003-2006）：在以德国为代表的欧洲市场拉动下，保定英利和无锡尚德持续扩大产能，更多光伏企业也逐步建立生产线。以尚德电力、江西赛维为代表的一批太阳能电池制造企业先后登陆美国资本市场。

产业成熟期（2007-2013）：2007年中国超越日本成为全球最大的太阳能电池生产国²³。连续17年全球制造第一，2013年全产业链打通，设备自主制造，原材料自主国产化，象征着产业发展的成熟。尽管金融危机到来，加之欧洲多国的政策支持力度减弱导致光伏电池需求减退，产品价格迅速下跌给中国光伏带来一些挫折，但是总体来说，光伏产业依旧是螺旋向上的态势。

高速发展期（2014-2015）：随着中国光伏技术的快速进步，从国产原、辅料到国产设备成为主流，成本的降低和发电效率的提升使光伏发电成本已越来越接近于上网电价。中国及全球主要的光伏市场装机容量呈持续快速健康增长。

爆发增长期（2016-至今）：2015年《巴黎协定》签署，各国对新能源愈发重视。随着我国提出3060

双碳目标，同时光伏技术进步推动光伏发电成本持续下降，部分国家地区已可以实现平价上网，光伏发电正式进入可以和传统能源竞争的高速发展阶段。

1.2 中国光伏产业规模现状

截至2021年底，全球新增光伏装机183GW，中国新增光伏并网装机容量54.88GW，同比上升13.9%²⁴。根据《全球光伏》的调查，截止2022年3月底，全球累计光伏装机总量跨越1太瓦大关，光伏正式进入太瓦级“T”时代；中国累计光伏并网装机容量达到318GW，新增和累计装机容量均为全球第一。伴随光伏产业的迅猛发展，大量光伏组件的使用也产生了一个新的环境问题：光伏组件的使用寿命一般在20到25年左右，但随着光伏组件产品的快速更迭，目前安装的第一批太阳能电池板中有相当一部分已经需要退役。

1.3 光伏组件预期退役规模

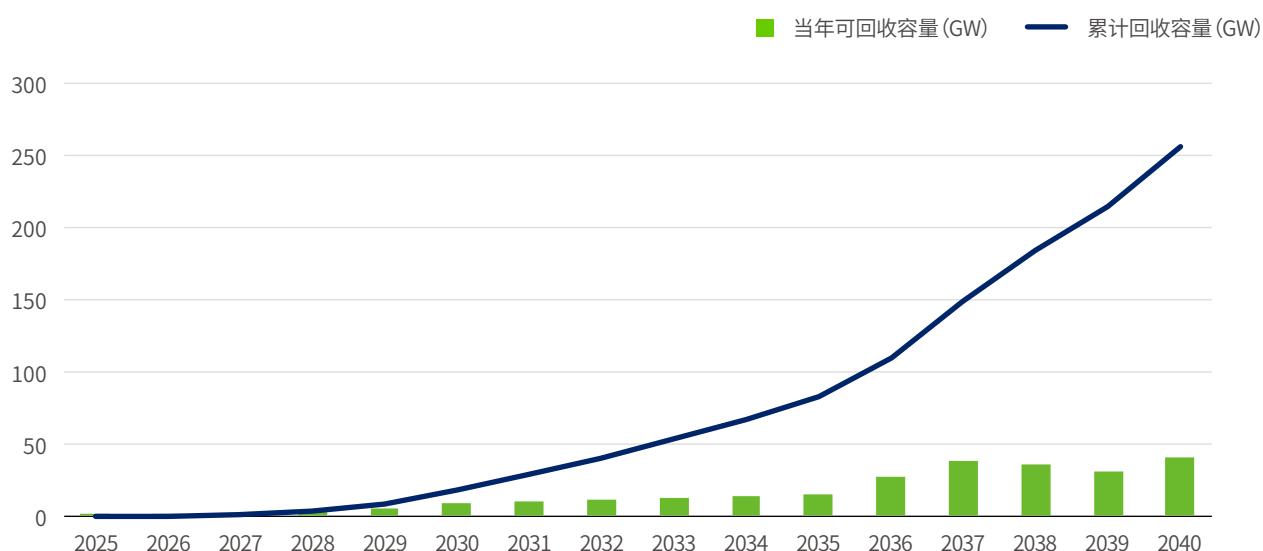
中国光伏市场起步于2000年前后，本研究采用寿命平行推移方法预测，基于光伏组件20到25年的设计寿命与过往装机量数据的预测，2025年前后首批光伏组件将陆续走向退役，自2030年开始，光伏组件的废弃量随着2000年到2010年装机量的大幅发展而显著增加，行业将进入光伏组件报废的密集期，截至2030年累计待回收容量达17.8GW，相当于需要1200列满载50个四十英尺集装箱的中欧班列方可装载；因2015年前后爆发式的装机量增长，从2035年开始待回收总量将呈爆发式增长，2040年预计累计回收量将达到252GW（见图11）。

1.4 光伏组件回收主流方式

目前全球光伏组件回收市场逐渐形成的大背景下，回收技术突破显得尤为迫切。全球如何更低碳、环保、高效处理光伏组件，使废弃光伏组件充分资源化利用、达到经济可行的光伏回收技术，国内外科研工作者提出了多种技术途径。目前较为主流的方式包括：



2025-2040年待回收容量及累计回收容量 | 图 11



物理回收法

物理分离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。但是物理分离法不能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。

化学回收法

无机酸溶解法：用混合酸，将EVA溶解掉，与玻璃分离，此法可保持硅片的完整，但需要进一步对硅片进行处理。

有机酸溶解法：用有机溶剂溶胀EVA，以达到分离电池片、EVA、玻璃和背板的目的。该法所需时间较长，大约7天为一次反应周期。另外，EVA膨胀后使电池片破碎且存在有机废液处理问题，因此该法仍处在实验室研究阶段。

化学法主要针对回收组件的金属组分，该方法需要较高成本，但最终获得高价值金属的纯度要明显高于其他方法。

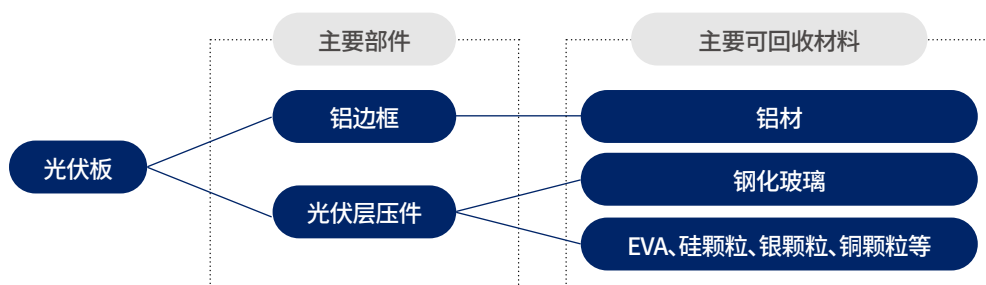
热解回收法

固定容器热处理法：光伏组件放入焚烧炉中，设置反应温度600°C进行焚烧。完成后，将电池、玻璃和边框等手工分离，进入相应的回收程序。

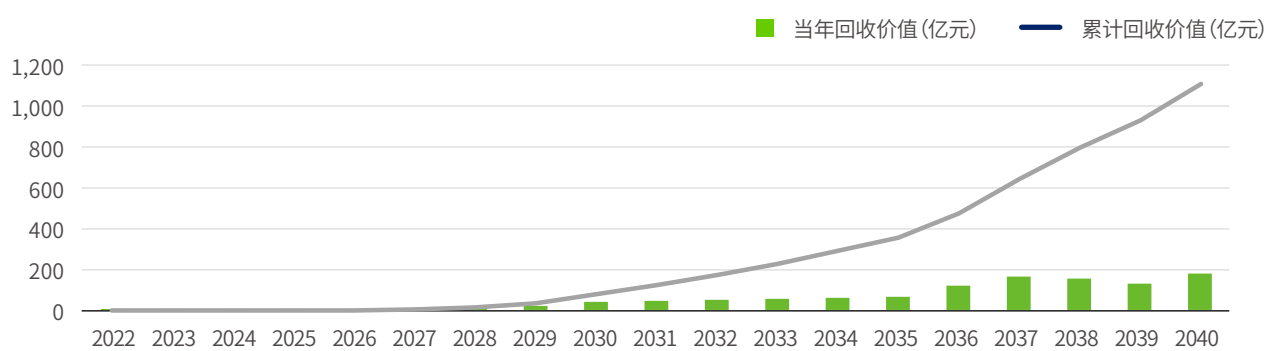
流化床反应器热处理法：将细沙放入流化床反应器中，在一定温度、流速的空气作用下，细沙处于滚烫流动状态，具有液体的物理性质。EVA和背板材料会在反应器中气化，对于厚度达到400微米以上的电池片，可以回收完好的硅片。由于制造技术不断发展，电池片逐代变薄，热处理法已无法获得完好的硅片，因此也只能适用于回收硅料。

尽管国内外已初步形成回收相关的技术，但现部分组件回收技术仍存在成本偏高、效率较低、带来环境二次污染等问题，因此目前技术的难点仍聚焦于既要提高组件拆解、回收效率，又须兼顾绿色环保特性。越来越多的研究机构开始采用复合工艺处理废弃光伏组件，根据不同光伏组件类型合理选取工艺，有效提升资源化利用效率。

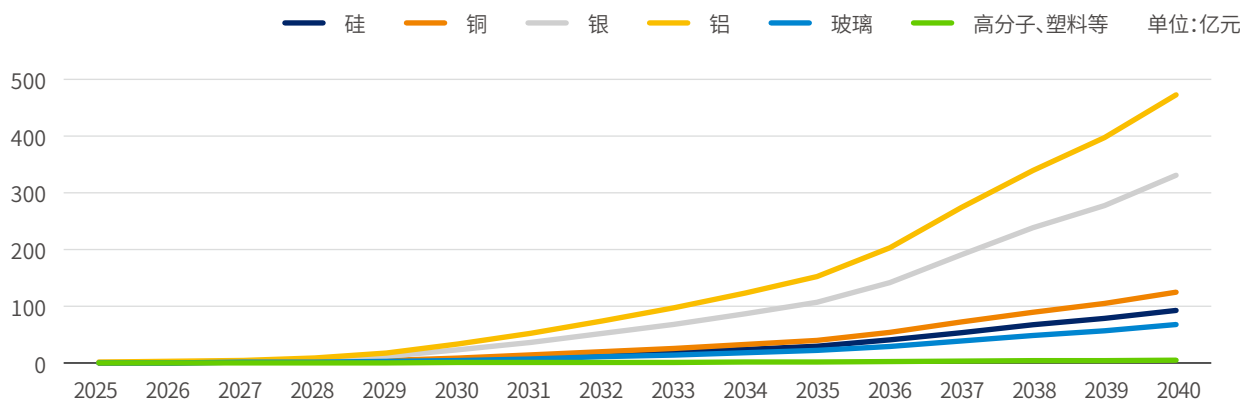
光伏板主要部件及可回收材料分解示意图 | 图 12



2025-2040年待回收价值及累计回收价值 | 图 13



2025-2040年各材料累计回收价值 | 图 14



1.5 光伏组件回收市场估值

晶体硅光伏组件的组成材料包括玻璃(65%~75%)、铝材(10%~15%)、塑料(EVA或POE等)(10%)、硅(3%~5%)、铜(1.5%)、银(0.3%)以及其他。其中超过90%的组件材料可以回收,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。

基于对于回收容量的预测,到退役密集期的2030年,通过光伏组件回收技术可获取的原材料累计价值达76.83亿元,截止到2040年,累计可回收价值高达1.1千亿元。



2. 不当处置对社会环境的影响

2.1 产生碳排放

在光伏组件的生产过程中，主要物料铝、银、硅片、玻璃、铜、EVA等原材料的生产过程都会产生二氧化碳排放，以当前技术下的生产过程为例，其产生的排放量如图表3所示：

如下表所示，选取1kW参数如图表4所示的废弃光伏组件测算，在1kW光伏板的生产过程中会产生428.8kg的碳排放。如果组件能够100%回收再利用，约428.8kg的碳排放将被减少。

1kW相当于4块组件，每块组件19.8kg，共79.2kg。也就是说，每79.2kg的废弃光伏组件可以减少428.8kg的碳排放，那么1吨废弃光伏组件约减少5.41吨二氧化碳的排放。

光伏组件生产过程中产生的二氧化碳排放 | 表 3

原材料	排放量 (kg/kWp)	累积贡献比
铝	64.32	15.00%
硅片	13.72	3.20%
银	1.29	0.30%
玻璃	300.16	70.00%
铜	6.43	1.50%
EVA	42.88	10.00%
总量	428.8*	100%

* 此数据仅为基于当前技术下一块参数如表4的光伏板生产过程产生的碳排放为例估算，使用回收光伏组件可减少的碳排放总量会随着技术的发展与光伏板结构的优化而发生改变。光伏组件在回收过程中根据回收方法的不同会产生相应不同程度的碳排放，此计算不考虑废弃处置与回收过程中的二氧化碳排放。

废弃光伏组件测算参数 | 表 4

参数	参数值
组件尺寸 L*W*H(mm)	1650 x 990 x 40
组件质量 (kg)	19.8
前盖板钢化玻璃厚度 (mm)	3.2
边框材质	阳极氧化铝合金
使用寿命 (年)	25
峰值功率 (Wp)	250
电池片数量 (片)	60 (6 x 10)
电池片尺寸 L*W (mm)	156 x 156
组件转换效率	16.5%

以此测算，截至2030年累计可回收量高达140万吨，如合理回收及再利用，则可以减少760万吨二氧化碳的排放；截至2040年，累计可回收总量达到252GW，约2000万吨，则可以减少约1.08亿吨二氧化碳的排放。

2.2 造成资源浪费

节约和高效利用资源对于传统能源适用，对于光伏发电这类绿色能源同样适用。对光伏组件回收实现循环再利用，可节约资源，减少对原生资源开采并降低资源提炼的耗能，减轻对生态环境的影响。

大规模光伏系统的应用是建立在庞大的资源供应的基础上的，废旧光伏系统中材料的回收利用可以提高资源的利用率。光伏组件90%的材料可进行循环再利用，通过废旧光伏组件的回收再利用，可以实现稀有金属、玻璃、铝材以及半导体等物质的循环使用，其中晶体硅电池的电极制备需要消耗银、铜、硅等材料，这些材料在其他尖端技术领域也有着广泛的应用前景。在2040年，报废光伏组件中累计可回收利用的玻璃高达近1400万吨，其他材料也分别达数十万及数百万吨不等。如果光伏组件报废之后，不对其中的材料进行回收利用，必

然造成资源的极大浪费。新兴固废物质组成与相应产品基本相同，因而含多种有价金属，资源回收价值极高。

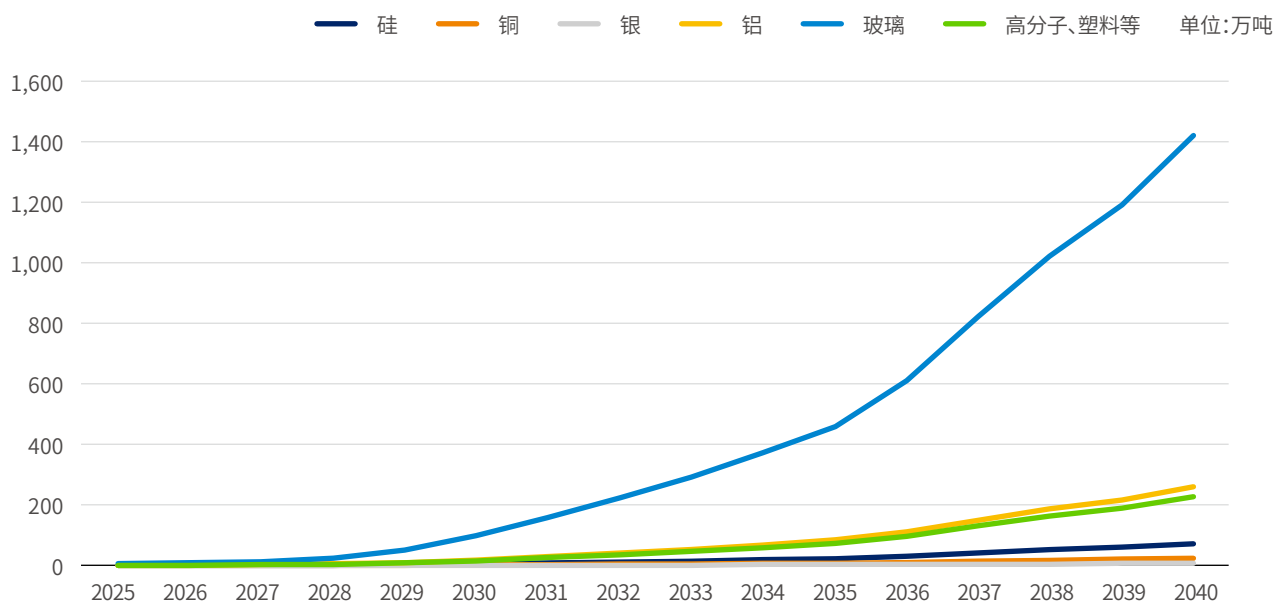
2.3 污染环境

废弃光伏组件不妥善处理会导致一定的环境风险问题。2021年我国光伏累积装机容量达到306GW，若以一块250W、重达19.8kg的光伏组件计算，废弃光伏组件将产生约2000余万吨的固体废弃物，光伏组件达到寿命年限后如果不妥善回收处理，将给环境带来巨大的污染，破坏生态结构，威胁人体健康。

截至2040年，中国退役光伏组件将累计产生约30万吨废弃铜和6万吨废弃银。废弃晶体硅光伏组件直接掩埋会对土壤环境造成极大破坏，一方面，光伏组件所含有的银、铜等重金属元素会通过理化作用逐渐渗漏至土壤中，进而对土壤、地下水等环境介质和植被、动物等生态要素造成危害和污染，直至通过生物富集作用从而危害人类自身的生命健康。

以铜为例，在自然环境中，铜污染主要集中在植物的根部，损伤植物根系细胞质膜，进而对植物产生毒害作用。另外，重金属对于土壤微生物能够构成严重的危害，

2025-2040年各材料累计回收数量 | 图 15





让土壤微生物的数量与种群发生变化，威胁生态系统的稳定性²⁵。另外，光伏板在焚烧处理中会释放四种有毒气体：二氧化硫、氟化氢、氰化氢和少量的挥发性有机物²⁶。上述有害气体对人的呼吸系统具有刺激作用，长期吸入可能会引发中毒或致癌，对肝肾、心脏都有危害^{27,28}。另一方面，未经处理的废弃光伏组件极易造成光污染。这种光污染会损害人体视网膜、虹膜等，提高白内障发病率，以及失眠、神经衰弱等精神疾病²⁹。

对废弃光伏组件采用合适的资源化利用技术，不仅可以缓解半导体材料资源供应短缺的风险，降低能源消耗和生产成本，还有助于预防有害物质释放到环境中，避免环境污染和对人类健康的威胁。

3. 不当处置对光伏行业的影响

3.1 产业层面：能否实现绿色化处理，将影响全产业链低碳发展

光伏在全球能源绿色转型方面发挥着重要作用，提供着越来越多的清洁能源，是在“制造绿色”，但是随着废弃光伏组件的规模增长，一方面，在中国双碳目标的提出下，这些废旧组件如果处理不当，将会给环境、社会带来严重的负面影响，使原本“绿色”的初衷变得不再“绿色”。从另一方面看，当光伏产业发展遗留下的废旧光伏组件问题得不到妥善解决时，必然会阻碍光伏产业的可持续发展，导致行业声誉大打折扣，影响可持续发展。要实现光伏产业形成节约资源和保护环境的新格局，必须走循环经济的发展模式，以光伏产业全生命周期的视角重视光伏产业的绿色发展，重视光伏系统的回收。因此，只有做好光伏产业链的最后一环—废旧光伏组件回收，才能实现光伏产业全生命周期的绿色无污染，从而促进产业的可持续发展，带动整个行业提升绿色发展水平，助力双碳目标的实现。

3.2 企业层面：能否承担可持续发展责任，将影响企业竞争力与声誉

在全球对气候变化和低碳发展的共识下，在人与自然和谐共生的现代化的倡导下，企业的环境表现越

来越被社会、市场及投资者关注和重视，也与企业的财务表现日趋紧密联系。面对光伏组件的待回收规模增长，相关企业的影响集中在刺激企业提高竞争力以及与回收相关的社会声誉两方面。

从企业竞争力角度：

其一，激发企业加快提高技术创新能力。为了抢占回收这个潜力市场份额而聚焦产品、产线、技术的更新换代，要确保光伏组件回收技术、模式和相关配套服务能符合市场发展的需要，迎合行业发展整体趋势。与此同时，企业自身产品与服务水平的提高，需要完整、高端的人才梯队的支持。企业的创新能力同样可以吸引更多高水平人才的引进，进而有利于提高行业发展水平和相关行规行标，有利于光伏组件回收产业的健康发展，新陈代谢。

其二，推动和强化企业责任制度的完善和设计。作为全球光伏产业发展支柱大国，我们必须树立生产者社会责任理念，在光伏产品全生命周期，包括生产、使用、废弃和回收利用各个阶段应该负起责任，加强对光伏产品的生产和回收管理，尽可能避免相关产品在未来成为废弃物，对自然环境和人类造成不良影响。

其三，打造新型绿色供应链。在企业、协会、相关专家等社会力量进入光伏组件回收产业后，以“互联网+”为理念探索与工业互联网和数字技术的结合，在物料供应、生产制造、应用推广、报废处理的全生命周期内，打通上下游供需通道，打破以往因地域、信息等传统限制，打造中国光伏绿色技术和应用的交流合作平台。

从社会反响和企业商誉角度：

绿色低碳的声誉直接影响着企业的社会认可和舆论评价，同时也关系到企业利益相关者对企业的态度和行为。

其一，对上下游供应链及合作伙伴的正反馈与引导。目前，越来越多的企业认识到，绿色循环可持续不仅取决于企业自身要求，还受制于供应链合作伙伴。

因此，光伏组件回收同样对全产业链提出了绿色要求，用严格的程序监督、管理全产业链和供应链的流程，确保所有步骤都符合环保低碳要求，从而实现对上下游供应链的正反馈与引导。

其二，吸引专业、高层次人才的同时，提高企业雇员的绿色意识和行业能力。一方面，良好的企业声誉将会帮助企业吸引更多高素质的人才加入，也有助于帮助人才对企业形成认同感，更加忠诚于企业；另一方面，在企业雇员进入工作岗位后，随着对企业文化、产业布局以及工作业务的深入了解，也将促使企业雇员不断学习相关知识，进而提高自身的绿色意识和行业专业能力。

4. 中国光伏回收的机遇与挑战

随着中国废弃光伏板数量的爆发式增长，伴随而来的废弃光伏组件日益引起社会关注，大规模废弃光伏组件的浪潮，可以带来新的业态和商机，期待更完善的制度支持以及市场规范。

4.1 机遇

机遇一：可持续发展助力双碳目标

退役光伏组件的环保回收不仅将实现光伏组件全生命周期绿色清洁，也为光伏电站的可持续发展提供强有力支撑。根据中国光伏行业预测，“十四五”期间中国年均光伏新增装机规模将达到90GW³⁰。然而如果退役光伏组件无法得到妥善回收，将占据大量土地资源，进而直接影响到新增装机规模，阻碍双碳目标的实现。《2030年前碳达峰行动方案》已将“推进退役光伏组件等新兴产业废物循环利用”纳入该方案³¹，循环经济降碳行动是我国应对气候变化实现双碳国家战略的必要路径，作为新兴固废的废旧光伏组件的综合利用技术和产业化应用势必得到更大专注和投入。退役光伏组件的环保回收之后，可在原光伏电站场址安装更加高效的新型光伏组件，同等占地面积情况下，光伏电站的发电功率将大幅提升50%以上，源源不断的绿色电力可助推我国双碳目标早日实现。

机遇二：跨领域创新合作

包括稀有金属、玻璃、铝材、铜、银等物质在内，光伏组件90%的材料可循环再利用，光伏组件回收具备广泛的市场前景，打通更大更丰富的应用场景将释放回收市场的潜能，如与建筑建材、交通运输、城市建设等更多跨领域进行创新应用的探索；同时拓宽上下游和相关领域的协同进步，如沿着废弃物产生的源头，可以追溯生产制造行业和生活消费场所；沿着同类相关行业扩展，可以联合垃圾处理、生态修复、环境治理等活动；沿着产品生命周期，可以追溯到绿色设计、环保材料、清洁生产、生态足迹等概念；沿着资源循环所需的各类要素，可以扩展到科技、人力、资金等要素。通过沿着这些线索向纵横不断扩展，产业才能由单一扁平的模式向着立体化发展，进而带动相关领域的协同进步。

机遇三：研发创新带动经济新动能

废弃光伏组件的回收再利用可以催生新的产业形态，每年大量的铜、银等多类金属被回收后可进入金属交易市场，可以衍生如“有色金属期货交易平台”等新型平台渠道，催生经济增长点，增加税收。与此同时将带动光伏组件回收处理流程各个环节（组件收集、运输、处理、再利用等）的劳动力需求和就业岗位的增加。同时科技研发将获得更大的投入，这将推动回收产业在回收处理的降本增效、材料设计、应用落地等新突破，同时将会带动一大批先进科技和优秀人才，用创新理念、创新模式和创新技术来重塑产业体系，提高产业体系的现代化水平。在此背景下，光伏组件回收产业相关的科技创新、模式创新、人才培养、产学研用转化等，将获得更大的支持和推广力度，将迎来产业升级和配套的最佳时机。

4.2 挑战

挑战一：经济效益有待挖掘

经济效益上，光伏组件回收若不能产生规模效应则经济效益不明显。目前，只有以PV CYCLE为例



的少数企业能够实现盈利。在欧洲电子电气废弃物（WEEE）新规等政策的推动下，PV CYCLE自成立以来占据了欧洲90%的市场份额，运营业绩持续增长。在国内，由于目前的回收规模较小，尚无专业企业开展，资源化的回收技术及模式还未成熟，另外，光伏组件的回收需要购置专门的回收设备与相关材料，这将进一步增加光伏组件的回收成本。因此，由于废旧光伏组件的回收成本过高以及可获得的利润较小的原因，在没有补贴的情况下，企业参与组件回收的积极性并不高，经济性较差，导致市场发展动力不大。

挑战二：技术体系尚不成熟

1. 回收组件时的无害化处理，废气、废液、废物收集与处理

在光伏组件回收时，含氟背板更是给人们出了一道难题。由于含氟背板含有卤族元素，在组件报废后，若通过焚烧处理会产生氟化氢等毒性气体，改用其他方式，氟同样也很难处理。加之碳氟化合物异常牢固的化学结构，通常的掩埋处理方法在1000年内都无法降解该成分。另外，使用有机/无机酸溶液处理组件后的废液收集和处理也是个难题。

2. 回收技术上的难点

对目前国内外的退役晶体硅光伏组件回收技术进行分析后发现，回收难点在于如何有效去除晶体硅光伏组件中的乙烯-醋酸乙烯酯共聚物（EVA）层。EVA材料在晶体硅光伏组件中充当粘合剂，将太阳能电池固定在背板和玻璃板之间，若能高效地破坏EVA层，则可以最大程度地保留太阳能电池的完整性，为后续回收提供便利。

其次，由于科研投入不足及研究历史过短等问题，回收技术都将重点集中在电池片及硅片回收上，对电池片中的其他金属的回收却无能为力，其原因在于贵金属回收的技术还不成熟，如果回收工艺使用了化学溶剂来溶解光伏组件中的乙烯-醋酸乙烯酯共聚物（EVA），虽然可以回收高纯硅、高价值金属材料，

但也会产生大量有机和无机酸、碱废液，对环境污染较严重。以及很多新能源材料都存在材料使用分散、单个产品用量少，并以复杂合金的形式存在于产品之中，给回收利用带来非常大的挑战。

挑战三：政策、规范、监管待完善

按照行业统一的技术标准，国内现存的光伏组件仅有20年左右的寿命周期。随着行业高速增长的背后，隐藏着本行业对于组件产品服役期满后去向问题的关注度不够，更没有形成与之相匹配的回收、处置产业设置。另一方面，由于国内光伏回收产业起步较晚，关注废旧光伏组件回收处理工作以及政策体系建设的研究者较少，无论是在人才培养还是储备方面，都难以满足现如今日益增长的对于光伏回收专业人才的巨量需求。

在以上种种问题的背后，实际上是政策标准层面的空缺，特别是对行业准入门槛、统一标准和规范、市场监管等方面，缺乏明确的指示与引导，导致不规范的回收组织受其自身技术、工艺、资金等限制，不科学、不完全回收导致的资源浪费、环境污染等现象时有发生。

从现实角度看，考虑到一些外在因素对光伏组件寿命的影响，会把组件回收的高峰期提前。以及在服役期间出现破损、故障而被淘汰的光伏组件，其回收需求更是迫在眉睫。此外，由于缺乏政策指导，多数发电企业退役光伏组件或积压堆放或焚烧掩埋，对环境造成极大的隐患。因此，整个光伏回收产业亟待政策、监管的指导和引领。

5. 国内外政策及市场的解决方案

5.1 相关政策对回收市场的引导

在全球范围，特别是德国、日本等光伏产业发展较早的发达国家，随着第一批商业化应用的光伏组件使用陆续满25年甚至满30年，光伏组件的回收处理问题已受到这些国家的关注。

国家/地区	时间	政策内容
日本	2004年	日本发行了《关于太阳能电池类物品废弃处理的法律事项》 ³² 。
	2016年	日本环境省公布了光伏发电设备处理方法相关的方针，方针规定，废旧光伏设备需要根据《废弃物处理法》及《建设回收法》等进行处理 ³³ 。
欧盟 ³⁴	2012年	《欧洲废弃电子电器产品管理条例》首次将光伏组件纳入。
	2014年	欧盟成员国陆续执行WEEE法令对光伏组件的回收令，目前WEEE法令进入第三阶段，对达到使用寿命的光伏组件将实现85%的回收率、80%的再利用率，凡在欧洲的光伏制造商、分销商以及安装商都要全面遵守欧洲国家对废弃物的管理规定，进入欧盟市场的光伏组件将必须上交一笔回收费用。
澳大利亚	2021年	澳大利亚维多利亚州政府通过一项法律，禁止对太阳能电池板实施垃圾填埋，要求废弃光伏组件被送往组件回收工厂 ³⁵ 。
	2021年	澳大利亚议会通过一项议案，澳大利亚首都地区（ACT）政府决定探索新的光伏组件、逆变器、和电池回收方案及产品管理计划 ³⁶ 。

中国目前有完善的针对废弃电器、电子产品回收处理的政策体系，类似欧盟的WEEE，我国也于 2009 年 2 月 25 日签发了《废弃电器电子产品回收处理管理条例》（以下简称《管理条例》）³⁷，并于 2011 年 1 月 1 日起执行。但尚未将废弃光伏组件纳入其中。在现阶段，我国光伏组件退役数量尚未爆发性增长，光

伏组件回收规模还较小，国内也没有形成相应的产业链，仍未有光伏组件回收处理相关的完善政策和法规。但目前，相关部门正努力研究和出台相关的政策，对光伏组件回收处理产业加以指导和要求，填补这部分空白。以下是近年来相关支持性政策文件汇总。（见下页）

近年相关支持性政策文件汇总 | 表 6

发文时间	印发部门	文件名称	支持内容
2017年 12月27日	工信部、 科技部	《国家鼓励发展的重大环保技术装备目录(2017年版)》(2017年第61号)	将“ 废晶体硅太阳能电池板资源回收成套装备 ”纳入该目录，提高光伏回收产业装备制造业水平，促进环保产业持续健康发展。
2018年 7月30日	科技部	《“可再生能源与氢能技术”重点专项2018年度项目申报指南》(国科发资〔2018〕108号)	将“ 晶硅光伏组件回收处理成套技术和装备 ”纳入该指南，对光伏组件环保处理和回收的关键技术及装备进行研制。
2020年 6月24日	国家能源局	《国家能源局2020年度能源软科学研究选题指南》(2020年第2号)	将“ 光伏电站设备回收利用技术 ”研究纳入该指南，鼓励开展相关技术研究。
2021年 3月18日	国家发改委等 10部委	《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》	提出针对“ 退役 ”光伏组件、风电机组叶片等新兴产业固废，探索规范回收以及可循环、高值化的再生利用途径。



近年相关支持性政策文件汇总(续) | 表6

发文时间	印发部门	文件名称	支持内容
2021年7月1日	国家发改委	《“十四五”循环经济发展规划》(发改环资〔2021〕969号)	将“ 推进退役光伏组件分类利用和集中处置 ”纳入该规划,引导再生资源加工利用项目集聚发展,并 鼓励京津冀等重点城市群建设区域性再生资源加工利用基地 。
2021年8月19日	工信部、国家发改委、科技部、生态环境部	《国家工业资源综合利用先进适用工艺技术设备目录(2021年版)》征求意见稿	将“ 晶硅光伏组件高压研磨拆解成套技术与装备 ”纳入该征求意见稿。
2021年10月24日	国务院	《2030年前碳达峰行动方案》(国发〔2021〕23号)	将“ 推进退役光伏组件等新兴产业废物循环利用 ”纳入该方案,助力循环经济降碳行动。
2021年12月14日	财政部、税务总局、国家发改委、生态环境部	《资源综合利用企业所得税优惠目录(2021年版)》(2021年第36号)	将“ 废旧太阳能光伏板作为再生资源 ”纳入该目录,给予税收优惠。
2022年1月4日	工信部、住建部、交通运输部、农业农村部、国家能源局	《智能光伏产业创新发展行动计划(2021-2025年)》(工信部联电子〔2021〕226号)	将“ 开发退役光伏组件资源化利用的技术路线和实施路径 ”纳入该计划,推动废旧光伏组件回收利用技术研发及产业化应用,加快资源综合利用。
2022年1月27日	工信部、国家发改委、科技部、财政部、自然资源部、生态环境部、商务部、国家税务总局	《关于加快推动工业资源综合利用的实施方案》	探索新兴固废综合利用路径,推动 废旧光伏组件、风电叶片等新兴固废综合利用技术研发及产业化应用 ,加大综合利用成套技术设备研发推广力度,探索新兴固废综合利用技术路线。
2022年2月9日	国家发改委、生态环境部、住建部、国家卫健委	《关于加快推进城镇环境基础设施建设的指导意见》	持续推进固体废物处置设施建设。 推进工业园区工业固体废物处置及综合利用设施建设,提升处置及综合利用能力 。健全区域性再生资源回收利用体系,推进废钢铁、废有色金属、报废机动车、“ 退役 ”光伏组件和风电机组叶片、废旧家电、废旧电池、废旧轮胎、废旧木制品、废旧纺织品、废塑料、废纸、废玻璃等废弃物分类利用和集中处置。 开展100个大宗固体废弃物综合利用示范 。
2022年2月10日	工信部、国家发改委、科技部、财政部、自然资源部、生态环境部、商务部、国家税务总局	《加快推动工业资源综合利用实施方案》	推动废旧光伏组件、风电叶片等新兴固废综合利用技术研发及产业化应用 ,加大综合利用成套技术设备研发推广力度,探索新兴固废综合利用技术路线。
2022年3月30日	国家能源局、科技部	“十四五”能源领域科技创新规划	光伏组件回收处理与再利用技术 。 [示范试验]研发基于物理法和化学法的晶硅光伏组件低成本绿色拆解、高价值组分高效环保分离技术装备,开发新材料及新结构组件的环保处理技术和实验平台,高效回收和再利用退役光伏组件中银、铜等高价值组分。

5.2 国内外回收市场的创新案例

光伏作为新兴固废，在我国回收产业尚处于起步阶段，欧美地区可再生能源发展较早的国家已经在市场中进行了初步的探索，通过创新的商业模式，降低组件回收成本，探索经济价值。其中规模较大的商业模式包括建立回收网络，批量化运输处理待回收组件，大范围服务光伏电站的回收需求；通过龙头企业投入资金，在回收处置客户端退役组件后，循环利用其中有价值的材料。

5.2.1 创新商业模式

案例1：废旧光伏组件回收和循环利用服务回收网络——PV CYCLE

基本情况：

2007年，欧盟设立了全面运作晶硅光伏组件回收与循环利用的机构——PV CYCLE。PV CYCLE根据不同国家的政策，致力于为各级企业提供完善的废旧晶硅光伏组件回收和循环利用服务，并联合物流运输公司等合作伙伴一起组建回收网络。该组织采取会员制，全球范围内的行业机构、协会、企业都可以申请成为PV CYCLE会员，缴纳一定会费并支付处理费用后，PV CYCLE将协助会员进行光伏组件的回收和后续处理工作，通过为会员及其最终客户提供的收集与循环利用服务，使得会员能履行作为生产企业的责任。费用多少取决于各国政策法规的具体要求和市场大小，市场份额越大的公司支付的越多。目前会员数占欧洲市场的90%以上³⁸。

实施效果：

该机构目前已在欧洲范围内设立了数百个回收点，从2010年PV CYCLE开始运营，该联盟回收处理总量超过6万吨的废旧晶硅光伏组件，在2021年处理约1.7万吨³⁹。

微信扫描二维码
进入该案例



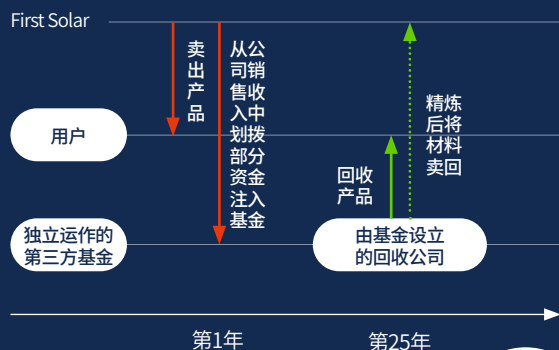
案例2：独立基金负责回收和再利用服务——First Solar

基本情况：

以First Solar完整的产品回收机制为例，如下图所示。这一套机制的重点在于当First Solar每卖出一套产品，就划拨一定比例的销售收入作为回收基金，这个基金由独立的第三方机构所管理。当购买First Solar光伏电池组件的任何客户在产品使用寿命结束时提出回收要求，第三方基金设立的回收公司会将产品回收，并负担回收和循环利用这些产品的成本。由于第三方基金独立运作，不受First Solar运营状况好坏的影响，因此可以保证光伏电池组件产品全部回收，不会在产品超过使用年限后被任意丢弃。同时，第三方基金设立的回收公司将回收的光伏电池组件产品精炼后，把其中的部分稀有材料（如碲元素）再卖给First Solar，供其再利用。

实施效果：

目前，该机制已经被德国、美国等主要光伏电池应用国家所接纳，因此First Solar的产品可以顺利在这些国家进行销售。根据First Solar提供的数据，90%以上的半导体材料可以通过封闭的再利用流程进行回收，并最终用于生产新的光伏电池组件；90%的玻璃可以用于制造其他产品⁴⁰。



微信扫描二维码
进入该案例





5.2.2 创新技术

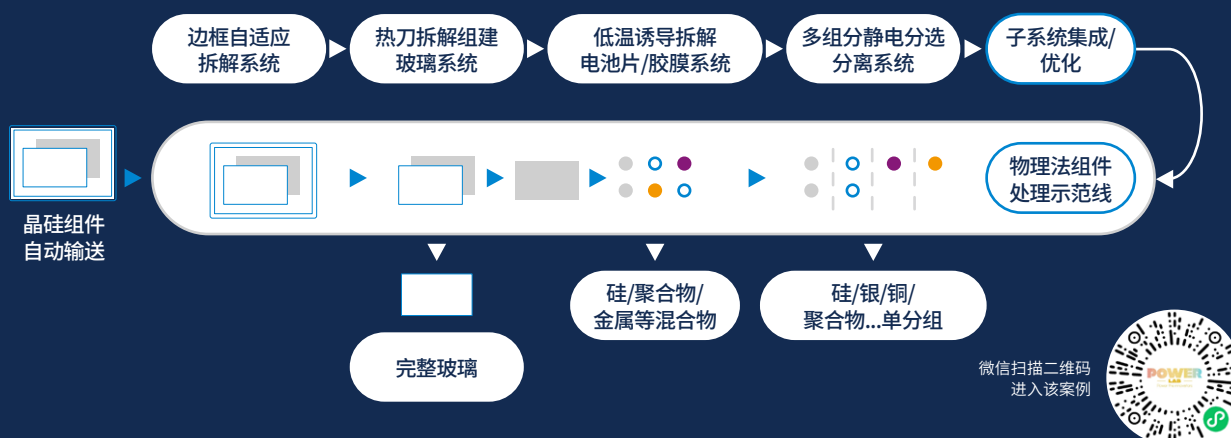
案例3：基于物理法的研究——英利集团、河北大学、零碳研究院

基本情况：

英利集团、河北大学、零碳发展研究院等单位自 2010 年开始研究组件回收关键技术，重点研究以物理法为主的绿色环保拆解分离技术及装备，涵盖光伏组件回收方法、装备及关键技术等。

实施效果：

示范线年处理能力12MW，可实现铝材、玻璃、硅、铜等材料的高效分离，产品综合回收率高达93%，其中硅、银、铜回收率分别可实现96%、93%、97%；具有玻璃与胶膜热刀高效分离、振动研磨分选、多组分静电分选等核心技术。



案例4：基于化学法的研究——晶科、中国环科院

基本情况：

晶科能源联合中国环科院和中南大学，以热解化学法为核心，开发光伏组件高价值环保处理关键技术及核心设备，并搭建实验平台及示范线。

实施效果：

示范线年处理能力12MW，可拆解出完整背板、玻璃（无胶膜）、电池片，总质量回收率可达92%，其中硅、银、铜回收率可实现95%、95%、98%；具有基于气氛控制和热场匀流热解的绿色拆解技术、高价值金属组环保分离技术、背板高效低损分离技术等。电池片回收涉及化学废液需进一步结合污水处理设施处理。

微信扫描二维码
进入该案例



案例5：基于热解法的研究-空气燃烧法——韩国能源技术研究院 (KIER)

基本情况：

韩国能源技术研究院 (KIER) 研究出一种低成本回收退役晶体硅光伏组件的方法，旨在回收完整的晶体硅太阳能电池和金属材料，即空气燃烧法。该方法首先将组件的铝边框置于加热炉中，通入空气后加热至 500~550 °C，在此种情况下EVA层被氧化分解，玻璃板与太阳能电池相分离，之后可进行玻璃回收；晶体硅太阳能电池分离出来后，用硝酸进行酸洗，可以得到完整的晶体硅太阳能电池；酸洗后的溶液中含有铜离子和银离子，对溶液进行处理，可以得到各种金属材料⁴¹。

实施效果：

目前已成功将72片废弃太阳能板、精炼成6英寸的单晶硅与芯片，发电效率高达20.52%⁴²，效率高于一般的商用太阳能电池，目前KIER已将这项技术转给韩国太阳能发电设备制造商HST以进行商业化。

微信扫描二维码
进入该案例



6. 结语建议

在3060双碳目标的大背景下，光伏行业巨量市场空间下的回收问题必将更被瞩目，行业对环境友好的回收解决方案的需求势必日趋急迫。建议从以下方面开展光伏组件回收利用工作：

6.1 政策层面：

1. 推出支持性的税收政策和专利保护。通过税收杠杆调控市场活力，鼓励企业创新探索，增加对符合回收标准且具有示范作用的企业和项目激励性税收政策，如减免关税、固定资产税、减免增值税和所得税，奖励性资金等。对于具有示范引领作用的新产品、新技术、新工艺，国家对知识产权予以保护，保证创新主体的利益。
2. 建立健全光伏组件回收的统一标准、规范和技术要求。在生产、采购、交付、流通等各个环节设立严格且具体的准入标准和规章制度，由行业协会与龙头企业共同建立回收标

准与流程化规范，强化对于光伏组件回收的质量检测和技术监督，构建光伏产品可追溯的数据管理系统，建立权威性的产品检测中心进行质量认证和追踪。

3. 鼓励和支持多渠道、多形式的光伏组件回收技术国际合作和技术交流。充分利用国际组织、各国政府、行业协会和企业的相关技术经验、渠道、投融资等资源和能力，开展光伏组件回收技术和经验交流会，在条件成熟的地区建立资源循环利用产业示范工程项目，将成功经验、创新模式、先进理念等进行推广示范，以加快中国光伏组件回收技术的提高和产业化发展进程。

6.2 市场层面：

1. 推动实施绿色供应链。鼓励光伏制造企业从产品设计初期按照可回收理念和回收标准开展设计，推动龙头企业先行示范，进而向全行业推广从生产到回收环节的仓储、采购、运输、处置的全链条绿色低碳模式。



2. 促进上下游合作开拓市场新模式。鼓励光伏组件回收企业、上游光伏制造商、下游材料循环利用方通过建立多种形式的信息互通和对话合作平台,形成规模优势,摸索符合回收标准的新商业模式,大幅度降低产品成本,逐步搭建完整的供需产业链条,引导更多利益相关方参与回收市场。
3. 加强跨领域合作,建立光伏组件回收技术发展及产业化基金,将资本引入回收市场。组建以市场为导向、产学研用相结合的清洁能源产业固废资源化团队,探索新技术新材料以及可循环、高值化的再生利用途径,探索退役组件与材料、建筑等跨领域新应用场景中的资源化利用潜力,通过路演、推荐会、案例库等线上线下形式触达和对接更大资本市场。

参考文献

1. 贺德馨, 施鹏飞. (2010). *风电中国三十年*. 中央文献出版社.
2. 李俊峰, 施鹏飞, 高虎. (2010). *中国风电发展报告2010*. 海南出版社.
3. 中国资源综合利用协会可再生能源专委会, 绿色和平. (2011). *中国风电发展报告2011*. <https://www.greenpeace.org.cn/china/Global/china/publications/campaigns/climate-energy/2011/windpower-briefing-2011.pdf>
4. 国家能源局. (2021). *2021年全国电力工业统计数据*. http://www.nea.gov.cn/2022-01/26/c_1310441589.htm
5. 中国可再生能源学会风能专业委员会. (2022). *2021年中国风电吊装容量统计简报*.
6. 魏迎松. (2012). *风电行业发展状况及用钢需求分析*. <https://gc.mysteel.com/12/0520/13/00D83D56F0BAAA42.html>
7. 中国冶金报. (2013). *把握风电建设潮——风电建设加速 用钢性能要求提升*. <http://www.ral.neu.edu.cn/2013/0114/c4417a87156/pagem.htm>
8. 张凯东. (2022, February, 25). *Mysteel热点观察：废钢的强势价格能走多久？*. https://m.mysteel.com/22/0225/23/A4BBB481110BBA9B_abc.html
9. 新能源网. (n.d.). *风机制造用多少铜？*. <http://www.china-nengyuan.com/baike/6545.html>
10. 杨立宏, 胡博. (2022). *宁波博威合金材料股份有限公司：新材料为主、新能源为辅的全球生产布局*. <https://xw.qq.com/cmsid/20220528A03OPR05>
11. 我的钢铁网. (2022). *建筑材料实时价格行情*. https://sem.mysteel.com/?bd_vid=11797438233498930331
12. Jensen, J.P. (2019). Evaluating the environmental impacts of recycling wind turbines. *Wind Energy*. 22 :316-326. <https://doi.org/10.1002/we.2287>
13. European Environment Agency. (2021, November 18). *CO2 performance of new passenger cars in Europe*. <https://www.eea.europa.eu/ims/co2-performance-of-new-passenger>
14. Washington State Department of Health. (n.d.). *Fiberglass*. <https://doh.wa.gov/community-and-environment/air-quality/indoor-air/fiberglass>
15. WindEurope. (2019). *Market outlook to 2023*.
16. Veolia. (2020, December 10). *United States: Veolia makes cement and gives a second life to GE Renewable Energy's wind turbine blades*. <https://www.veolia.cn/en/news/united-states-veolia-makes-cement-and-gives-second-life-ge-renewable-energys-wind-turbine>
17. 张荣琪. (2021, September 15). *再谈风机叶片等复合材料固体废物焚烧法处置存在的问题*. 中国物资再生协会.
18. 中国科学院山西煤炭化学研究所. (2022, April 28). *废弃酸酐固化环氧树脂基复合材料（风电碳梁等）化学降解与资源化回收利用技术取得新进展*. http://www.sxicc.cas.cn/news/kjcx/202204/t20220428_6440223.html
19. Vestas. (n.d.). *Zero-Waste*. <https://www.vestas.com/en/sustainability/environment/zero-waste>
20. IRT Jules Verne. (2020). *IRT Jules Verne launches 'zebra project' to develop 100% recyclable composite wind turbine blades with industrial partners*. <https://www.irt-jules-verne.fr/en/follow-our-news/irt-jules-verne-launches-zebra-project-to-develop-100-recyclable-composite-wind-turbine-blades-with-industrial-partners/>
21. Dreamwind. (n.d.). *About: Increased sustainability of wind energy through the development of new materials*. <https://www.dreamwind.dk/en/about/>
22. 中国光伏行业协会CPIA. (2022). *中国光伏行业2021年回顾与2022年展望*.
23. 罗兰. (2015). *光伏新政推出“领跑者”计划*. <http://finance.people.com.cn/stock/n/2015/0612/c67815-27143770.html>
24. 国家能源局. (2022, March 09). *2021年光伏发电建设运行情况*. http://www.nea.gov.cn/2022-03/09/c_1310508114.htm

25. 王娜. (2019). 土壤重金属铜污染现状分析. *土壤科学*. 7(3) : 181-185. <https://doi.org/10.12677/HJSS.2019.73022>
26. Bellini, E. (2019, December 9). *Scientists analyze toxic gases released from burning thin-film, PET-laminated modules*. <https://www.pv-magazine.com/2019/12/09/scientists-analyze-toxic-gases-released-from-burning-thin-film-pet-laminated-modules/>
27. United States Environmental Protection Agency. (n.d.). *Sulfur Dioxide Basics*. <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics>
28. United States Environmental Protection Agency. (n.d.). *Volatile Organic Compounds' Impact on Indoor Air Quality*. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality>
29. 刘俊卿. (2011, June 14). 警惕绿色太阳能背后的污染问题. <https://mnewenergy.in-en.com/html/newenergy-1043094.shtml>
30. 索炜. (2020). “十四五”光伏系列新政酝酿中 新增装机将再上台阶. http://www.xinhuanet.com/2020-12/11/c_1126847552.htm
31. 国务院. (2021, October 4). 国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm
32. 一财网. (2021, July 30). 循环经济视角下光伏产业发展的思考: 要绿电 也要绿色产业. https://finance.sina.com.cn/review/jcgc/2021-07-30/doc-ikqcfnc9988950.shtml?cre=tianyi&mod=pcpager_news&loc=35&r=0&rfunc=83&tj=cxvertical_pc_pager_news&tr=174
33. 日经BP社. (2016, April 15). 日本公布废旧光伏设备处理方针. <https://guangfu.bjx.com.cn/news/20160415/725107.shtml>
34. SolarWaste. (n.d.). *Solar Waste/European WEEE Directive*. <http://www.solarwaste.eu/>
35. N.d. (2021, July 21). 禁止填埋 - 澳洲出台全球首个光伏组件垃圾填埋禁令. https://www.sohu.com/a/475281051_418320
36. Carroll, D. (2021, June 25). *Canberra moves forward with new PV module recycling rules*. <https://www.pv-magazine.com/2021/06/25/canberra-moves-forward-with-new-pv-module-recycling-rules/>
37. 生态环境部. (2019, March 18). 废弃电器电子产品回收处理管理条例. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/xzfg/201909/t20190918_734319.shtml
38. PV CYCLE, (n.d.). *About PV CYCLE*. <https://pvcycle.org/about-pv-cycle/>
39. PV CYCLE, (2021). *Annual Report 2021*. <https://www.report.pvcycle.org/>
40. First Solar. (n.d.) *First Solar Recycling Brochure*. <https://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/Sustainability-Documents/Recycling/First-Solar-Recycling-Brochure.ashx>
41. Komoto, K., Lee, J. (2018). End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies. *Report IEA-PVPS T12-10:2018. 52*. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/End_of_Life_Management_of_Photovoltaic_Panels_Trends_in_PV_Module_Recycling_Technologies_by_task_12.pdf
42. Bellini, E. (2021, August 23). 韩国开创新型光伏组件回收技术. <https://www.pv-magazine-china.com/2021/08/23/%E9%9F%A9%E5%9B%BD%E5%BC%80%E5%88%9B%E6%96%B0%E5%9E%8B%E5%85%89%E4%BC%8F%E7%BB%84%E4%BB%B6%E5%9B%9E%E6%94%B6%E6%8A%80%E6%9C%AF/>

关于PowerLab

2016年，国际环保组织绿色和平创立了国内第一个专注于可再生能源的非营利孵化器——PowerLab。在致力于孵化与赋能可再生能源创新创业团队和个人的基础上，PowerLab引入“开放式创新”的概念和实践，希望通过可再生能源产业的开放式创新，以场景赋能、协调创新等多种形式助力能源领域初创团队。同时，通过与创新团队的高效合作，引导有实力的能源企业注入多元创新基因、搭建企业创业生态，进而推动中国再生能源多元应用的发展。

2021年，PowerLab继续从可再生能源产业的内部创新出发，基于产业龙头企业的实际业务需求，经过国内/海外项目征集，为企业发现并对接到合适的项目与团队，并予以网络、技术、资金、人才上的深度支持；基于产业现实的需求与挑战，分析产业发展趋势、提供前瞻性洞察。





GREENPEACE 绿色和平

绿色和平是一个全球性环保组织，
致力于以实际行动推动积极的改变，
保护地球环境与世界和平。

地址:北京东城区东四十条94号亮点文创园A座201室

邮编:100007

电话:010-65546931

传真:010-64087851

www.greenpeace.org.cn