



为“白色巨人”拆解“终极材料”

■本报见习记者 李清波

风力发电机也被称为“白色巨人”，它们高高耸立在荒野、山巅和海岸线，源源不断地将风能转化为电能。最令人瞩目的就是其巨大的叶片——这些长达上百米、重达数十吨的庞然大物，不仅造价高昂，且难以回收利用。

从风电机组服役年限来看，到2025年，我国将迎来一大波风机叶片报废潮；到2030年，我国将有超过3万台风电机组面临换新；而到2035年这一数字将超过9万台。

过期的预浸料、制造过程中产生的下脚料、测试材料以及达到使用寿命的材料，全都面临着回收难题。如何实现风机叶片全生命周期的绿色化、无害化，一直困扰着整个风电行业。

中国科学院山西煤炭化学研究所（以下简称山西煤化所）研究员侯相林团队经过十多年研究，终于掌握了“拆解”风机叶片主要材料——热固性碳纤维树脂复合材料的办法，让这种最“顽固”的固体废料回归本源，补齐了风机叶片绿色回收最关键一环。

“终极材料”坚不可摧

叶片是风力发电机的核心部件之一，占风机成本的20%~30%，所用的复合材料既有较轻的重量，也有较高的强度，还具有抗腐蚀、耐疲劳等优异性能。

风机厂商在叶片外壳上通常采用玻璃纤维增强树脂，叶尖、叶片主梁则采用强度更高的碳纤维。这些复合材料结构极其坚固，而且空气动力性好，可以使叶片更轻、更长，让风机吸收更多的风能。

热固性树脂在叶片中占比超三成，相当于混凝土建筑中的填充物，碳纤维、玻璃纤维等材料则相当于混凝土中的钢筋，占比约七成。两者结合，坚不可摧。

其中，热固性树脂有个外号——“终极材料”。它是一种高分子聚合物材料，在聚合过程后，这种交联结构不能重复加工成型，所以回收利用几乎是无法完成的任务。

侯相林举例说，普通的热塑性塑料，如农田里的地膜，自然降解需要200~400



侯相林(左)、邓天昇在查看反应条件。
中国科学院山西煤炭化学研究所供图

年，其分子链为线型结构，而热固性树脂的分子链为体型网状结构，是一个刚性的三维网络结构。前者像竹竿，是线性的；后者像不锈钢梯子，是立体的。以热固性树脂为基础制成的复合材料单位的力学性能却是金属的好几倍。

“终极材料”的“实力”可见一斑。

回收技术需求高涨

风机叶片的寿命约为20~25年，我国本世纪初新建的一批风电机组即将面临退役，加之受风电抢装潮影响和原材料的限制，今年叶片市场甚至供不应求，回收这种高价值材料的技术需求越来越大。

对于这种材料，由于不可降解，填埋会向环境缓慢释放少量芳烃物质，焚烧更不可取，会产生有毒气体，唯有绿色回收利用这一途径。有的企业尝试用热塑性树脂代替热固性树脂制造复合材料，有的企业只能回收复合材料里的一部分玻璃纤维。但风电作为一个新兴行业，风机叶片实际处理经验很少，真正做到产业化，至少还需20年。

记者了解到，国内诸多风电机组制造企业为了处理好生产加工叶片产生的废料，会拿出3000元/吨左右的处

理费给专业公司，而后者只是将固废切割破碎，将树脂和木质粉料按一定比例混合后经热挤压成型，制成板材，用于公园的板凳、围栏。热固性树脂并没有因此消失，所谓的“专业处理”也仅仅是半处理，而且今后的回收造成了更大困难。

2020年9月1日，《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》颁布实施，要求产生工业固体废物的单位应当根据经济、技术条件对工业固体废物加以利用。愈发收紧的固废处理政策，给专业从事固废研究的侯相林团队提供了一个契机。

“这几年，国内在本世纪初装机的一大批风电机组面临集中退役，回收风电叶片里的复合材料应该提上日程了。”侯相林说，“国外研究团队也在紧锣密鼓开展相关研究，特别是风电技术很强的大公司，明知道叶片有很高的价值，但对回收却一筹莫展。”

实际上，侯相林开展叶片材料回收研究远远早于叶片大规模退役的时间。他所负责的山西煤化所311课题组多年来瞄准热固性树脂开发利用方向，产出一系列研究成果及专利，蕴含了多项国际领先技术，形成了一套极具竞争优势的化学降解综合开发工艺，生产出大量高价值化学品。

这无疑使教科书里的“终极材料”从此不再“终极”。

从暴力破解到精巧拆除

从2019年开始，侯相林团队成员、山西煤化所研究员邓天昇和在读博士生武少弟从十多种催化剂中挑选出性能最优的，全新的催化体系在10千等级别的高压反应釜中连续运行超过300小时，得到了试验关键数据。今年，“碳纤维增强环氧树脂回收回收”项目获北京地区高校大学生优秀创业团队三等奖。这项技术就是降解碳纤维增强环氧树脂复合材料，致力于从风机叶片中回收高价值的碳纤维。

碳纤维增强环氧树脂的优点多、品质好，但是回收时，优点全部变成“绊脚石”。

侯相林团队采用定向解聚法处理复合材料，通过特定溶剂及催化体系，在较温和的条件下将高分子在特定的键位“拆解”开，形成长链热塑高分子或树脂合成单体。这一方法国内首创，也是学术界普遍承认的实现循环经济的好方法。

不同于传统以小分子降解产物为目标“以破为主”的回收思路，该团队提出选择性断键降解回收热固性树脂的新思路，并利用配位不饱和或弱配位的金属离子选择性断裂树脂化学键，实现了热固性树脂基复合材料的高效降解和全成分回收。例如，利用水相体系配位不饱和的锌离子，选择性断裂环氧树脂的碳氧键，实现了碳纤维增强环氧树脂的高效降解及循环利用。

回收高价值碳纤维增强复合材料中的聚合物组分，回收高价值化学品。“我们在实验室阶段取得了一部分成绩，现在准备进行中试放大。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%，纤维强度损失小于5%，回收的碳纤维单丝强度指标、模量与原丝相差无几。”侯相林表示。

据介绍，回收的树脂产物可制成环氧树脂膏，进一步处理可以得到双酚A等，每吨市场售价数千至上万元。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。

邓天昇评价道，这套技术有两大优点：较温和的条件下实现树脂降解，耗能少；特定定位选择性断键，产物可控，价值更高。其他回收方法与这种相比，前者是暴力破解，后者是精巧拆除。

从废弃PET到纤维增强环氧树脂，从聚氨酯材料到密胺树脂，以热固性树脂为主要回收对象的环保技术，在侯相林团队的系列技术加持下，已经可以通过化学回收制备十多种高价值化学品。

“经过十多年的专注科研，我们有信心与企业合作扩大生产规模，早日‘变废为宝’，提取出更多有价值的化学品，创造更大的环保效益和经济效益。”侯相林说。

去除微塑料 还看甲壳素

■本报记者 廖洋 通讯员 李华昌

“微塑料”是指粒径小于5毫米的塑料碎片和颗粒。与普通塑料相比，微塑料因其颗粒直径微小难以去除，对环境和生物体的潜在危害更大。如今，微塑料污染已引起全球关注。其中，水体中微塑料的去除成为确保水质和水生态安全亟须解决的难题。

近日，中国海洋大学教授李锋民团队与国外合作者成功制备出可降解、能重复利用的甲壳素/碳质纳米材料复合材料，实现了对水环境中微塑料的高效去除，并揭示了吸附的主要作用机制，对于研究水环境中微塑料的环境行为、定量测定和污染控制有重要科学意义。

相关研究成果已发表于《化学工程学报》和《有害物质学报》等期刊。

以废治废 聚焦甲壳素

“目前，针对水体中微塑料的分离、去除方法主要是离心、密度浮选、过滤等。”李锋民告诉《中国科学报》，“以过滤为例，在分级过滤过程中，水中的各类杂质会堵塞滤膜，操作复杂且选择性差，一般只能实现直径大于30微米的微塑料检测。”

吸附法是去除水体污染物相对简单高效的方法，但现有的吸附材料无法实现对水生生物危害性更大、直径小于3微米的小粒径微塑料的高效去除，且吸附选择性较弱。

能否研制一种针对直径小于3微米微塑料的高吸附性、高选择性、可循环利用的吸附材料，成为科学家面临的一道难题。

通过分析研讨和广泛比对，李锋民团队将目光聚焦于甲壳素。

甲壳素是自然界中存量仅次于纤维素的一类天然多糖，是自然界中唯一含有氮元素的多糖，广泛存在于各类软体动物的骨骼，以及真菌和藻类的细胞壁中，在甲壳类动物如螃蟹等外壳中含量尤为丰富。全球每年废弃的螃蟹壳高达800万~1000万吨，大部分被丢弃大海或作为垃圾填埋，这些螃蟹壳中甲壳素

的含量约为15%~40%。

“开发利用废弃虾蟹壳中的甲壳素，既解决了废物处理问题，防止环境污染，又为合成高价值聚合物基质提供了一种低成本且可持续的原材料，这将会产生巨大的生态效益和经济效益。”李锋民说。

分子量较高以及分子间氢键的存在，使甲壳素难溶于水、稀酸、稀碱和大多数有机溶剂，碱/尿素水体系能够通过破坏甲壳素分子内的氢键相互作用实现低温条件下的快速溶解，为甲壳素在生物工程、医学、水处理等领域的应用提供了可能。

通过对甲壳素中的功能基团进行衍生化改性后可以显著增加其吸附能力。李锋民团队利用这种特性，启动开展了小粒径微塑料吸附材料的科学研究。

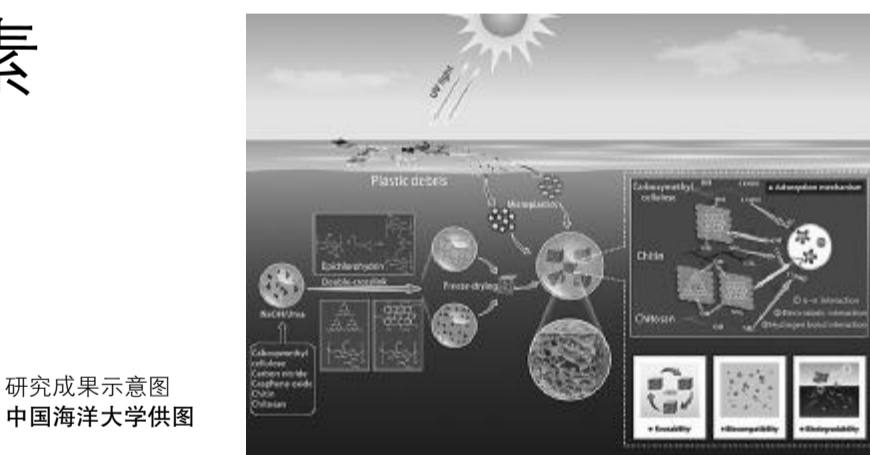
千挑万选终于找到它

为了实现对水中聚苯乙烯等小粒径微塑料的选择性吸附，基于聚苯乙烯分子中的苯环结构及已有研究中关于吸附机制的探究，李锋民团队以甲壳素为原料，掺杂能够通过 $\pi-\pi$ 作用吸附聚苯乙烯的碳质纳米材料，如氧化石墨烯(GO)和氧化石墨烯氮化碳(O-C₂N₂)，构建双交联网络，成功制备出高强度、可压缩的多孔甲壳素基复合材料。

李锋民介绍，相较于其他已有材料，GO和O-C₂N₂的掺杂显著改善了该复合材料的机械性能，有利于吸附中的再生和循环应用。同时其对聚苯乙烯微塑料的吸附性能也得到显著提升，去除率最高可达92%，实现了小粒径微塑料吸附材料的重要突破。

实验过程中，微塑料的检测也是一大难点。

目前，微塑料的计数方法主要通过显微镜观察，操作复杂且误差大。为了实现实验对聚苯乙烯微塑料的快速大批量检测，团队成员在实验中选择负载了荧光的聚苯乙烯微球，通过前期预实验，确定了荧光分



研究成果示意图
中国海洋大学供图

光光度计快速准确定量的方法，为吸附实验的顺利进行提供了必要保障。

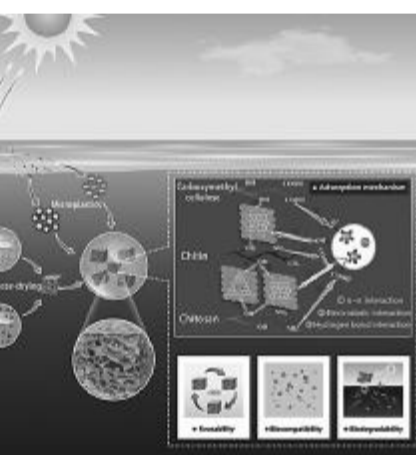
在甲壳素基复合材料制备过程中，需要反复调整交联过程中交联剂的用量、反应温度、GO添加量等，从而最终确定具备最优机械性能的复合材料中的甲壳素和GO等的最佳配比，以及最佳反应时间和温度。同时，复合材料孔径是吸附微塑料过程中至关重要的因素，研究人员通过尝试多种造孔剂及调整交联剂的添加量，对制备的材料进行表征和性质对比，最终确定了最佳的材料制备方案。

团队成员、中国海洋大学环境科学与工程学院博士孙翠竹自2018年赴加拿大阿尔伯塔大学学习，推进这项课题的研究。从查文献、预实验尝试各种甲壳素改性方法，到确定方法之后不断调整和优化不同物质的掺杂量、反应时间、温度等，前后耗时近1年。

“在吸附实验中，水中微塑料浓度前期需要半小时检测一次，样品多、工作量大，每次实验要连续进行至少14个小时，经常半夜才能回家。”她清楚地记得实验获得成功的那一刻，“以往无数次实验获取的材料都像凉粉，缺乏弹性，而那次实验获取的复合材料水凝胶就像乒乓球一样，弹性十足，总算找到它了！”

控制微塑料任重道远

记者了解到，目前与该技术相关的系列论文已经发表，专利正在撰写和申请中，但尚未大规模应用。不过，基于甲壳素基复



合材料组装的简易装置，经测试能够实现不同粒径的聚苯乙烯微塑料的高效去除。

李锋民表示，微塑料在水环境中的污染已经引起关注，且已经证实会对各类水生生物产生毒性效应。该技术中甲壳素基复合材料实现了小粒径聚苯乙烯微塑料的选择性吸附，为分析、监测水环境中微塑料的分布提供了简单高效的方法，同时，也对控制水环境中微塑料污染具有重要意义。

尽管目前尚未实现大规模实际应用，但李锋民希望后续能够跟企业或其他机构合作，制作相应的检测设备或仪器，应用于水环境中微塑料的检测和污染控制。

李锋民表示，下一步，团队将对甲壳素基复合材料做进一步的改性和优化，以期实现材料制备工艺的简化和吸附性能的提升，同时降低制备成本。通过对该材料进行改性，团队将制备和开发对水环境中其他污染物如抗生素、持久性有机污染物等具有选择性吸附能力的复合材料。

此外，基于甲壳素基复合材料，团队还将进一步开展关于海洋环境中微塑料、增塑剂等污染物的环境行为研究。“前期我们已经调研和检测了青岛近岸、黄海、东海表层水中微塑料和增塑剂的分布，接下来想通过甲壳素基复合材料对实际样品中的微塑料进行富集、回收和检测，从而验证其在实际应用中的潜力。”李锋民说。

相关论文信息：<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126599>

作为中国国际服务贸易交易会的重要活动之一，“2021中国碳中和发展论坛”近日在北京召开。会上，由中华环保联合会、北京绿色交易所、罗克佳华科技集团(以下简称佳华科技)等联合推出的“生态环境双碳云图”正式发布。

生态环境双碳云图是将历年来和生态环境及碳排放息息相关的经济、农业、交通、建筑、能源结构等数据和实时监测的物联网数据相结合，建立起的多元数据系统。

“建立一套全社会、多维度、立体化、动态化的数据体系，势在必行。”国家生态环境部工业污染源监控工程技术中心主任、佳华科技董事长李玮在接受《中国科学报》采访时说，提升数据质量和碳资产管理水平，将助推推各类用户实现“双碳”目标。

夯实数据“底座”

中华环保联合会副主席兼秘书长谢玉红在论坛上表示，随着“双碳”时代到来，碳排放目标正逐渐变成具体行动。目前，全国各地陆续发布了多个行业企业温室气体排放核算方法和报告指南，温室气体自愿减排方法学，碳数据管理体系不断完善。

“能源是温室气体排放的主要行业，对能源行业的监测或核算统计是非常重要的，但存在核算统计不全面、不合理等问题。”中国科学院数量经济与技术经济研究所能源研究室主任刘强表示，要推动中国能源转型及碳市场发展，能源核算非常重要。

据李玮介绍，生态环境双碳云图是从工业化和工程化的视角，基于数据安全、可信和隐私保护，建立的数据平台。

今年8月，佳华科技在智博会上发布的“工业互联网标识解析二级节点”已正式上线，这为生态环境双碳云图提供了坚实的数据标识“底座”。佳华科技前期也获得了国家互联网信息办公室区块链平台运营许可，可对每一条平台数据进行身份标识和可信存证，为数据建立“身份证”，为用户提供更清晰、更严谨的数据来源。

“凭借佳华科技多年来在生态环境和能源监测方面的技术积累和工程积淀，生态环境双碳云图建立了一套针对生态环境、碳排放、碳资产管理、监测、量化、智能分析体系。”李玮说。

据了解，生态环境双碳云图囊括了从2007年起，全国各省、市、区、县的碳排放数据、空气质量数据、企业排放数据、人口数据、交通数据、车辆数据、能源消耗数据、产业结构数据等，并由此建立大数据库，实时接入气象数据、碳排放数据、企业用能数据、排放数据等动态数据。

在应用层面，各个省、市、县及行业管理部门、行业企业都可以依据“生态环境双碳云图”的可信数

构建安全可信的「双碳」数据体系

■本报记者 郑金武

据资源，建立最适合自己的“生态环境双碳数据平台”，实现双碳目标下的时间表、路线图、施工图、施工图的长期规划、阶段分析和实时管控。

强化推广应用

李玮指出，生态环境双碳云图将物联网时序数据库、区块链+工业互联网标识双重存证、碳数据链、碳数据七对AI算法有机结合，动态接入实时数据；依托可信存证技术、国密传输通道技术，建立了安全可信的生态环境及双碳领域数据体系；为终端用户量身打造各类应用服务，例如快速生成排放清单、远程诊断、合同能源管理、低碳环保管家服务等。

同时，该双碳云图为业内专家的“工作室”提供各类数据资源，提供安全存证存储的办公环境及专业化的数据工具，为需求方远程提供比市面通用聊天工具更专业的“把脉就诊”服务。

李玮表示，生态环境双碳云图将联合更多的生态合作伙伴，依法依规地共建共赢，在经过标识和存证的海量多元数据基础上，为政府、企业、民众提供更多的应用服务，助力国家双碳政策落地，加速绿色经济建设，为全社会双碳目标的实现提供有力的技术支持。

资讯

国家能源局发布抽水蓄能中长期发展规划

本报讯9月9日，国家能源局官网发布消息称，为推进抽水蓄能快速发展，适应新型电力系统建设和大规模高比例新能源发展需要，助力实现碳达峰、碳中和目标，《抽水蓄能中长期发展规划(2021—2035年)》(以下简称《规划》)印发实施。

《规划》要求，到2025年抽水蓄能投产总规模较“十三五”翻一番，达到6200万千瓦以上；到2030年，抽水蓄能投产总规模较“十四五”再翻一番，达到1.2亿千瓦左右；到2035年，形成满足新能源高比例大规模发展需求、技术先进、

管理优质、国际竞争力强的抽水蓄能现代化产业，培育形成一批抽水蓄能大型骨干企业。

《规划》提出了抽水蓄能发展的主要任务。一是做好资源站点保护，为抽水蓄能预留发展空间；二是加强规划站点储备和管理，滚动开展抽水蓄能站点资源普查和项目储备工作；三是积极推进项目建设，加强项目优化布局和工程建设管理；四是因地制宜开展中小型抽水蓄能建设，探索推进水电梯级融合改造，加强科技和装备创新；五是建立行业监测体系，按年度发布抽水蓄能发展报告。(李惠钰)

国内首款智能加油机器人在南宁投入试运行

本报讯9月10日，《中国科学报》从中国石化新闻办获悉，国内首款智能加油机器人在中国石化广西南宁石油南石西加油站投入试运行。这标志着国内智能加油机器人已经进入市场应用阶段。

在南石西加油站，车主使用中国石化一键加油App下单后，智能加油机器人就可精准识别并伸出“手臂”灵活打开油箱盖，插入加油枪。加油完成后，机器人停止加油自动拔出加油枪，盖好油箱盖，车辆便可安全驶出加油站，实现了全程无接触。司机无需下车、仅用180秒完成加油业务。

据悉，该智能加油机器人由中国石化自主研发，采用语音、触摸屏、一键加油App等人机交互技术及人脸识别、北斗卫星定位等智能应用，具备自动识别、精准定位、仿真操作、动态监控、实时反馈、人机协作、信息共享、云端维护等八大功能，具有重量轻、信息安全、防爆



国内首款智能加油机器人。
中国石化供图

安全等特点。

值得关注的是，这款机器人还能识别不同车辆油箱盖的颜色、形状、大小、位置、开启方式等，能够自动判断车型、定位油箱盖位置、自动开关油箱内外盖，实现了“开盖+插拔枪”动作的智能化。此外，它还具备异常入侵报警、紧急停车连锁、车辆异常离开后迅速紧急拉断等多种功能，可有效保障车主人身安全。(计红梅)