

降解率超 99% 他们让退役的“白色巨人”增值再生

近年来,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、邓天昇带领的复合材料专项课题组深耕复合材料回收领域,突破传统回收技术瓶颈,创新探索出热固性树脂定向化学解聚新路径,成功将废弃风电叶片转化为高附加值新材料。

这是在新疆昌吉市的新疆成飞新材料有限公司拍摄的成品风电叶片(8月31日摄)。——新华社记者 丁磊 摄

超前布局

体量庞大、通体洁白的风机叶片,被大众形象地称作风电“白色巨人”。据了解,风电叶片的热固复合材料固化成型后分子形成稳定网状结构,不能加热熔化,也无法被溶剂溶解。自然降解需数千年,不当处置会持续释放有害物质污染生态。随着环保监管趋严,按照现行固废相关法规与政策要求,退役风电叶片不能再随意填埋。

当前,行业普遍采用切割、粉碎的物理回收方式,但这套办法只能把叶片打碎,没办法把树脂和玻璃纤维分离开。破碎后的混合料只能低价当作填料使用,再生价值不高。

作为国内最早布局碳纤维及复合材料回收研究的团队之一,侯相林团队这些年来为国内多个碳纤维产业化项目提供了技术支撑。

2010年,团队启动热固性复合材料回收相关实验研究。这类材料由小分子

原料通过化学键聚合而成,团队的核心研究思路是通过精准技术手段,靶向断裂碳氮键、碳氧键等合成化学键,让固化的高分子树脂逆向还原为小分子单体或低聚物,实现复合材料可逆循环利用。

团队最初开展热固性复合材料回收研究,并非专门针对风电叶片,而是聚焦全行业共性回收难题。

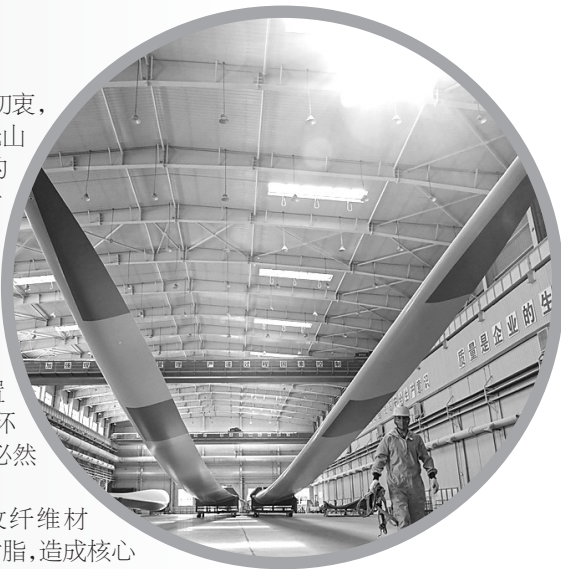
“热固性复合材料的应用场景,远不止风电领域。”邓天昇介绍,供暖热力管道、冰箱保温层、化工储罐、船舶壳体、人造石台面、密胺仿瓷餐具、电器配件等日常生活设施,核心用材均为各类热固性树脂材料。

2013年,团队成功申请首个环氧树脂化学降解发明专利。彼时,行业尚未关注到复合材料固废污染问题,循环利用需求也未凸显。团队已完成了关键技术的超前布局,目前在热固树脂化学降解领域已获授权国家发明专

利28件。

谈及提前布局的初衷,侯相林表示,这既依托山西煤化所在材料学科的积淀,也源于团队对行业趋势的精准预判。源自石油化工的树脂在生产、使用、报废全流程中会产生大量废料和边角料,既浪费化石资源,又形成难处置固废,绿色资源化循环是行业和生态发展的必然趋势。

传统技术仅回收纤维材料,完全舍弃高价值树脂,造成核心资源浪费。针对这一弊端,团队明确了“纤维、树脂双向高质回收”的核心目标,重点攻关树脂定向高质化解聚技术。



风电叶片后处理车间。
新华社记者 丁磊 摄

反复试错

研究初期,团队先尝试超临界、亚临界有机溶剂降解体系,虽能实现树脂降解,但存在明显缺陷。

2014年,团队提出“定向解聚”理念,希望通过精准断裂特定化学键,可控产出高附加值产物,消除传统技术弊端。

科研攻坚之路充满坎坷。邓天昇回忆,团队虽然首次实验便成功实现树脂降解,但后续多次重复试验均宣告失败,这让团队一度陷入迷茫。叠加经费短缺、项目停滞的困境,团队士气备受打击。

“那段时间格外煎熬。每当大家感到迷茫时,侯老师总会站出来鼓舞众人,带领大家厘清思路,找到目标。”邓天昇说。

为找到问题根源,团队耗时两三个月全面排查实验流程与设备参数,最终发现症结在于实验原料未完全浸没于

反应体系。修正操作规范后,这一技术难题被顺利攻克。

然而,新的挑战接踵而至。团队长时间卡在两大核心问题上:如何筛选温和、低成本的催化体系,实现化学键精准定向断裂;如何实现催化剂高效分离,在压低成本的同时,保障降解产物的后续利用价值。

十余年间,随着技术不断迭代,上述问题得以解决。团队早期仅能产出类似沥青的低聚物,而近两年通过技术体系升级,成功高效获取双酚A等高价值单体材料。团队还摒弃高成本有机溶剂体系,创新研发低成本水基催化体系,大幅压缩设备投资和生产运行成本。

2023年,当实验室跑出降解率超99%、纤维强度损失低于5%的优异数据时,团队成员倍感

振奋。“让人激动的不仅是亮眼的数据,还是我们坚持多年的科研思路被证明完全可行。”侯相林说。

邓天昇说,目前,相较于韩国企业每公斤10美元的碳纤维回收成本,团队技术可将废旧叶片单吨处理成本控制在1000至2000元人民币,成本优势显著。



废弃风电叶片化学解聚回收高值化学品。

企业主动找来

2023年,在山西省举行的一场循环经济协会论坛上,侯相林的技术路演吸引了山西省安装集团股份有限公司(以下简称山西安装集团)新能源与固废处理领域负责人赵文婧的关注。

赵文婧当场判断该技术兼具操作性、经济性和落地价值。彼时,山西安装集团已有风电叶片物理法处置规划,但该路线再生产品附加值偏低。企业决定将侯相林团队的化学降解技术作为战略储备,携手推进技术中试放大与产业化落地。

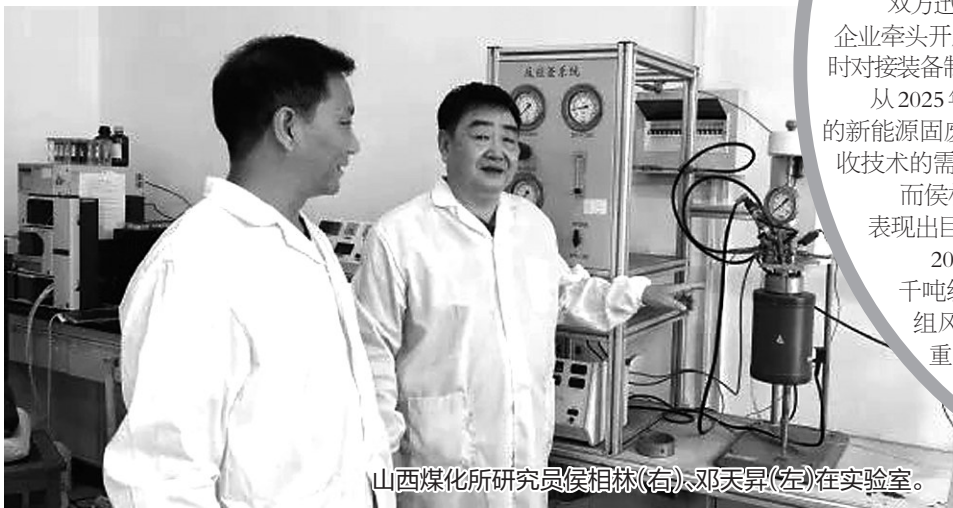
双方迅速达成合作共识。针对实验室点状试验,缺乏全链条工艺数据的短板,企业牵头开展全工艺流程设计,联合两所高校及行业专家完成全套工艺包论证,同时对装备制造企业,定制适配新工艺的专用设备,稳步推进产业化前置工作。

从2025年开始,国内风电退役潮到来,风电叶片、光伏板、废旧动力电池组成的新能源固废“新三样”,成为国家绿色低碳产业的重点发力方向,市场对高质回收技术的需求愈发迫切。

而侯相林团队的提前布局,以及赵文婧的“慧眼识才”在产业转型的当口表现出巨大价值。

2025年,依托山西省重大专项“揭榜挂帅”项目支撑,双方启动共建千吨级化学解聚产线项目,年可处理1000吨退役风电叶片,适配约50组风机叶片处置需求,项目计划2027年正式投产。“这是公司未来重点布局的发展方向,我们对项目前景充满信心。”赵文婧说。

(据中国科学报)



山西煤化所研究员侯相林(右)、邓天昇(左)在实验室。