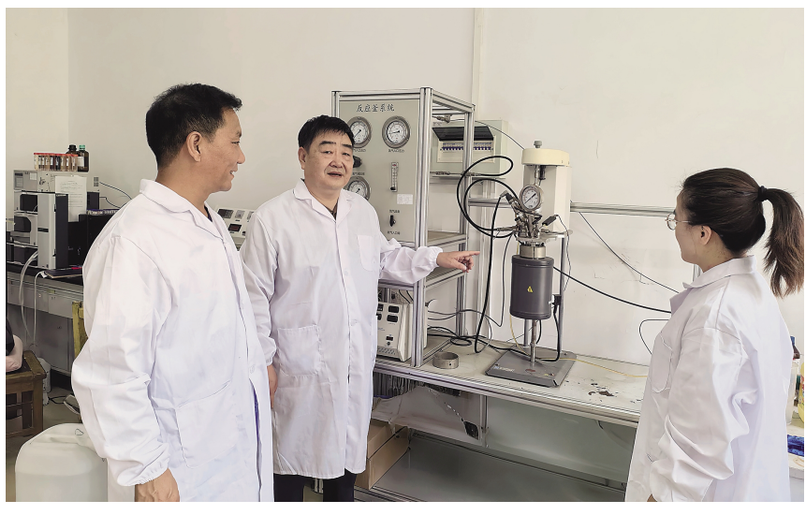
他们让风电“白色巨人”固废增值再生

■本报记者 李媛 李晨

2022年前后，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站在了艰难的十字路口。他们深耕复合材料回收领域，不仅面临重大纵向项目长期缺位的问题，还缺少持续的企业合作经费保障，不少实验难以继续开展，团队骨干渐渐出现动摇。

对此，侯相林不断为团队分析宏观政策、行业远景，持续打气。与此同时，业界源源不断的咨询与关注，让团队看到了技术的实际价值。整个团队咬牙坚持攻关，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。

如今，这项技术成果正式迈入产业化示范阶段。依托与山西本地企业的深度产学研合作，技术成功落地山西省能源革命重点项目，配套建成千吨级化学解聚产线，具备年处理1000吨退役风电叶片的能力，项目预计2027年正式投产运行。



山西煤化所研究员侯相林（中）、邓天昇（左一）等在实验室。 受访者供图

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”。随着国内早期风电机组陆续老化退役，2025年被业界认为是我国风电叶片规模化退役的关键节点，风电固废处置压力将持续攀升。

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。“风电叶片之所以备受关注，是因为体量大、露天摆放，视觉辨识度更高。”侯相林解释说。

“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、电器配件等日常生产生活设施，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。

侯相林以“玻纤是钢筋、树脂是水泥”的通俗类比，点出行业回收痛点。传统建筑废料可实现钢筋、水泥完全分离再利用，而玻璃纤维市场附加值低，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。

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。比如，反应温压条件严苛，设备投入和运行成本高昂，且降解产物复杂无序，再生利用价值低，无法实现产业化应用。

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。

邓天昇告诉《中国科学报》，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。同时，团队相继攻克密胺树脂、不饱和树脂等多品类热固性树脂升级回收技术，真正实现低值固废向高附加值新材料的转化。

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，同时对接装备制造企业，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。

眼下，团队正全力构建复合材料全生命周期绿色循环体系，践行“材料从哪里来、回到哪里去”的循环理念。邓天昇介绍，团队持续优化技术，推动回收后的玻纤、碳纤、树脂全部回流风电、新能源原生应用领域，同时将技术覆盖风机机舱罩、碳纤维主梁等全品类风电复合材料部件。

回首科研岁月，侯相林总结道，科研切忌跟风逐热，要瞄准具备长期价值的研究方向，深耕细作、坐稳“冷板凳”。前期扎实的技术积累是后续产业化落地、规避行业弯路的核心基础。未来，团队将持续升级回收体系，拓展多品类热固性固废高质再生场景，提升产物附加值，拓宽技术产业化应用边界。

图片识别技术 成农户好『帮手』

■本报记者 沈春蕾

让马铃薯“自己排队”，让杨梅“开口说话”，让图片识别技术成为农户的好“帮手”。

不久前，杭州电子科技大学副教授陈丰农收到农业农村部发来的感谢函，赞扬他和团队成员利用图像处理、光谱分析与模式识别等技术检测农产品品质。近年来，陈丰农团队开发的智能分选设备帮助农户实现了杨梅、草莓、水蜜桃等易损水果的分等分级，以及形状不规则、表面干扰多的马铃薯、红薯的分选。

日前，陈丰农告诉《中国科学报》：“智能分选设备长、宽、高分别是4.8米、1.2米、1.5米，如果按照一个马铃薯200克计算，每小时可以分选10吨左右。”浙江某设施农业基地自从引入这套设备后，杨梅品质的优果率提高了20%以上，效率提高了50%以上，保障了杨梅从基地到消费者手中的新鲜度。

意料之外的项目

陈丰农与农产品检测的结缘得从2020年的一个科研项目说起。“我与合作者一起申请了浙江省的重点研发计划项目，对薯类农产品进行品质检测，没想到项目中了。”

随着项目的深入推进，陈丰农发现，当时国内没有适用于薯类农产品的检测机器。高端的设备大多来自国外，不仅价格贵，而且不适用于国内的应用场景。

马铃薯比较常见的表面缺陷有磕碰伤、绿皮、腐烂、发芽等，这些肉眼就能看到，还有一些是肉眼看不到的缺陷，如黑心、皮下损伤等。除此之外，薯类检测还需要对其内部的淀粉含量、含水率、干物质、还原糖等进行检测。

陈丰农的专业是机器视觉。机器视觉技术主要包括两个部分：一是得到好的图像数据，二是对图像数据进行处理和分析并得到最想要的结果。

对陈丰农来说，薯类农产品检测设备的工作原理并不复杂。他告诉《中国科学报》：“马铃薯经过输送带时，我们首先利用高速视觉和光谱检测设备采集图像和光谱信息，就像医院做CT、验血一样，可以为每个马铃薯生成一份数字化‘体检报告’。”随后，人工智能模型会在几十毫秒的时间里对马铃薯作出分析判断，把不同等级、不同品质的马铃薯精准分选到不同出口。

整套设备系统主要包括三个部分：数据采集、智能分析和自动分选。前端负责“看”，中间负责“思考”，后端负责“执行”，实现了从只能看外观到内外品质同步检测的全自动流程。“设备在实现高速精准检测的同时，还满足了产业化生产效率的要求，可以广泛应用于马铃薯分级、加工和种薯筛选等多个环节。”陈丰农说。

“只能算是刚及格”

从研发项目到实验室样机，陈丰农团队仅用了几个月的时间。但为了验证设备能用和好用，他们前后花了几年的时间。

“吉林梅河口的用户是这套设备的第一个客户。”陈丰农回忆道，“为了获得第一手资料，我们将每袋60斤重的马铃薯，一袋袋搬到设备上，进行调试。”

由于第一套设备是按照水果检测的思路来设计的，用作检测马铃薯时出现“水土不服”的情况——对大小形状差异较大的马铃薯的适用性并不好。陈丰农介绍，水果检测设备大多采用滚轮式，个头比较小的马铃薯在设备上旋转不起来，个头大的马铃薯旋转时有可能会掉下去。另外，整个工作环境粉尘比较多，导致称重的触点受粉尘的影响磨损加快，光电传感器也因为粉尘导致触发异常。

设备调试过程让陈丰农发现了过去在实验室没有遇到过的问题，如成本高、占地大、适用性不好、检测效果不太好、机器易磨损等。为此，他们根据客户需求，对设备进行了迭代升级，并在2023年8月将设备正式交付客户。

如今，这套检测设备比第一代产品更成熟，不仅可以根据用户需求设置检测的缺陷大小和种类，还可以更换检测品种，无论是马铃薯，还是甘薯、萝卜等，都可以通过设备实现360度无死角检测。

从项目研发到现在，设备已在河北、青海、广东、湖北、陕西等地使用，陈丰农团队先后帮助不少农户增产增收。从样机到产品，从研发到应用，陈丰农时刻提醒自己和团队成员：“我们只能算是刚及格，还有不少路要走。”

做产品跟做实验不一样

“市场认可的产品需要稳定性、可靠性和准确性达到综合平衡。”陈丰农在跟客户打交道的过程中发现，做产品跟做实验不一样，不能按照自己的想法来做，而要开展充分的市场调研，根据用户反馈的问题，及时改进迭代。

成果转化过程中还会遇到落地成本高和市场接受不足的问题。陈丰农认为，要梳理客户的需求，作出正确的决策。为此，他会让团队跟客户充分沟通，双方一起打磨产品。“这也是一个发现问题、改进问题的漫长过程。”有时产品可能出现市场接受度不高的情况，陈丰农会从技术本身展开反思，寻找新的解决方案。

在目前市场上，马铃薯人工分选已达到每天2吨至3吨，而陈丰农团队的设备满载运行可达到每小时10吨，按一天工作10小时计算，可检测100吨的马铃薯。他算了一笔账：“如果按照现在人工成本一个人每月3000元，一年需要支付3万多元。而我们的设备可以代替约30个工人，用户一年内就可以收回成本。”

2024年，陈丰农主动请缨援疆。新疆是国家重要棉花和粮油生产基地，但一些地方农业机械化、智能化水平较落后。陈丰农告诉记者：“我们将智能分选技术在新疆推广，并结合当地特色做适应性改造，搭建了产学研平台，给当地‘输血’的同时，帮助地方实现自我‘造血’。”

2025年1月，陈丰农团队的智能分选设备获得浙江省首台（套）认证，成为相关领域全国首个入市产品。团队还与企业联合申报了“浙江省一体化”项目，并以103台套、1.09亿元产值通过验收，获浙江省科技厅高度肯定。

与此同时，陈丰农带领团队开展新的成果转化尝试。“我们正和甘肃一家企业合作开展羊胴体切割项目。”他介绍，“羊肉不同部位的切割主要通过人工来操作，人工的费用占整个羊肉价格的26%左右。企业找到我们，希望做一条自动切割的生产线。”

陈丰农指出，这个项目的技术路径和果蔬分选差不多，难点是工程化落地。例如，用什么刀具比较好切割；刀具每切割一次都要进行高温消毒，高温对刀具的材料产生什么影响；视觉识别结果与机械手的协同效应，如何做到精准、实时和高效等。他坦言，距离落地还有很长一段路要走。

陈丰农（右二）在企业调研。 受访者供图

资讯

医药产业融合专题培训举行 高价值专利培育布局与生物

本报讯（记者朱汉斌 通讯员邓韵霖）近日，“高价值专利培育布局与生物医药产业融合”专题培训活动在广东药科大学举行。活动旨在落实广东省高价值专利培育布局中心建设部署，推动高校科研成果与地方医药产业有效对接。

在活动专题报告环节，国家知识产权局知识产权发展研究中心特聘研究员谷办才围绕《科研创新双翼：研发标准化管理与高价值专利战略布局》，结合《特医食品生产许可审查细则（2026版）》新要求，剖析高校研发标准化不足、专利转化滞后等问题，提出将标准规范和专利布局前置融入研发全流程的建议；广东欧谱曼迪科技股份有限公司首席知识产权官庄志杰结合医疗器械产业化案例，系统讲解医工协同、专利挖掘、产学研合作及商业化路径；广东省知识产权研究会理事长谢红介绍了全国及广东知识产权现状、高价值专利评判维度及医药领域实操要点，指出专利是市场竞争的核心工具，建议高校借助专利导航和优质代理机构培育高价值专利，并通过许可、入股、产学研合作实现转化。

本次活动聚焦生物医药与南药领域知识产权发展需求，通过专题授课与校企交流，有效提升了科研人员的专利实务能力，打通了高校成果与产业需求的对接渠道，为区域医药产业专利创造、保护和运用水平提升及产学研深度融合提供了有力支撑。

1类抗肿瘤新药HZ-V055胶囊获批进入临床试验

本报讯（记者江庆龄）日前，由中国科学院上海药物研究所、杭州和正医药有限公司联合申报的1类创新药pan-RAS抑制剂HZ-V055胶囊，获得国家药品监督管理局颁发的临床试验批准通知书，同意开展治疗RAS突变晚期实体瘤的临床试验。

RAS是人类癌症中最常见的突变基因之一。其编码蛋白在三磷酸鸟苷（GTP）结合的“ON”活性状态与二磷酸鸟苷（GDP）结合的“OFF”非活性状态之间循环，作为“分子开关”调控RAS信号通路。RAS基因突变会导致蛋白维持活化状态，驱动胰腺癌、结直肠癌、肺癌等多种恶性肿瘤的发生发展。

由于缺少小分子药物结合口袋，RAS蛋白曾长期被视为“不可成药”靶点。近年来，针对部分RAS突变亚型的靶向药物研究取得重要突破，但覆盖更广泛RAS突变类型的治疗方案仍是临床迫切需求。

HZ-V055通过选择性结合细胞内源性亲环蛋白A（CypA），形成CypA/抑制剂/RAS三元复合物，从空间上阻断RAS与下游信号蛋白相互作用，抑制RAS介导癌症信号通路实现抗肿瘤活性。临床前研究显示，HZ-V055对KRAS G12X突变具有高活性和高选择性，在多种RAS突变肿瘤模型中展现出良好的抗肿瘤活性，临床开发潜力巨大。

植保绿色防控新技术新产品在新疆展示

本报讯（记者李晨）近日，国家农业技术集成创新中心新疆粮棉果种植区病虫害全程绿色监控技术集成示范基地建设成效工作报告会在新疆库尔勒试验站举行。会议由中国农业科学院植物保护研究所（以下简称植保所）组织召开。

针对新疆植物保护科技创新能力相对薄弱、产业支撑水平有待提升等突出问题，植保所自“六五”期间便开启新疆棉花病虫害防治工作，20世纪90年代后期全面推进外来入侵生物治理、主要农作物病虫害防控和草原有害生物生态防控。

40余年来，植保所聚焦小麦一号病、马铃薯甲虫、苹果蠹蛾、番茄潜叶蛾、梨火疫病等重大跨境入侵病害，以及棉花、西甜瓜、小麦、玉米、果树等主要作物病虫害及鼠害，联合全国农技推广中心及疆内科研、教学、推广、企业等单位，持续开展灾变规律解析、监测预警技术研发、防控产品创制与技术体系集成推广，推动了一批重大科技成果在南北疆大面积应用。

以库尔勒试验基地为核心，植保所建成了辐射昌吉、石河子、伊犁、阿克苏、喀什等地的试验站点体系，打造了一支长期扎根边疆的科研攻关队伍，构建了联通疆内各单位的协同创新网络。

与会代表实地参观了库尔勒试验基地在棉花病虫害绿色防控技术方面的集成应用成效。现场的展板集中展示了小麦、果树等作物病虫害的检测监测、理化诱控、生物防治及化学防治等领域的40余项关键技术，以及自主研发的50余个产品。

在交流环节，全国植保领域同行专家围绕产业问题、技术瓶颈展开研讨，呼吁全国植保同行协同联动，切实推动植保科技成果从“试验田”走向“生产田”，确保技术落地生根、应用见效。

活动同期还举办了棉花及新疆特色农作物病虫害监控技术培训班。

社址：北京市海淀区中关村南一条乙3号 邮政编码：100190 新闻热线：010-62580621 广告热线：010-62580726 发行热线：010-62580707 广告经营许可证：京海工商广登字20170236号 零售价：1.00元 年价：218元 工人日报社印刷厂印刷 印厂地址：北京市东城区安德路甲61号