

“膜”法打通降碳新路径

——太原理工大学自主研发中空纤维气体分离膜关键核心技术实现进口替代

节能降碳，科技先行。

2024年太原能源低碳发展论坛上，由太原理工大学膜科学技术团队自主研发的中空纤维气体分离膜材料和膜组件引发广泛关注。

基于国家能源安全和能源清洁高效利用的现实需求，气体膜分离技术广泛应用于富氢、碳捕集、天然气提氮和挥发性有机物治理等领域，已经成为新能源开发、环境保护、资源回收等领域共性关键技术和传统产业升级的重要支撑，对提升我国战略资源储备，实现碳达峰碳中和目标具有重要意义。然而，受原材料和膜制备工艺限制，我国气体分离膜长期被国外垄断，存在巨大隐患。

太原理工大学膜科学技术团队依托该校国家“双一流”建设化学工程与技术学科和省部共建煤基能源清洁高效利用国家重点实验室的先进科研平台，突破国外对气体分离膜原材料、膜生产工艺、膜组件装配的技术壁垒，自主研发出具有特殊桥联结构的聚酰亚胺类高分子膜材料，在国内率先实现气体分离膜材料工业化生产和工业应用，解决了氮气等特殊气体高效分离的关键技术难题，有效填补国内空白，实现进口替代，为我国能源气体脱碳、天然气提氮等提供了“膜”法解决方案。

打破国外垄断 攻克气体分离膜关键核心技术

在太原理工大学膜科学与技术研究中心实验室里，工作人员李师傅依照既定配方将状如乱麻的白色、黄色膜材料放入纺丝机，经混溶挤压机加工后，生产出如胡须般细长修长的膜丝。这些外直径约为0.3毫米的中空纤维膜丝将被装入不同规格的标准化膜组件，应用于各种气体分离和提纯场景。

“通俗来讲，气体膜分离技术的作用就是‘过滤’，即以膜两侧气体的压力差为推动力，利用混合气中不同气体在膜中渗透速率不同，从而达到气体分离目的。”该校膜科学技术团队技术负责人廖家友介绍，气体膜分离技术是一种成本低、能耗少、绿色无污染的新型高效气体分离技术。长期以来，该技术主要被国外少数几家企业垄断，导致我国天然气提氮、大规模能源气体净化等都受制于人。

膜材料是气体膜分离技术的核心。为了打破国外垄断，膜科学技术团队从膜材料出发，突破了高分子膜材料批量化生产壁垒，开发出高性能膜材料。同时采用表面偏析技术，并借鉴碳纤维生产工艺，自主设计纺丝配方，实现了超细中空纤维膜连续纺丝生产。该成果被授予国家发明专利6项、实用新型专利12项。

“实现气体分离膜材料批量化生产并非易事，仅是克服膜材料大规模制备过程中的凝胶现象就困难重重。”提及艰难攻关过程，团队成员高成云博士至今记忆犹新：气体分离膜材料批量化合成过程中，溶液极易暴聚形成固态凝胶，导致整锅料被毁。团队成员不厌



山东汇海膜材料科技有限公司工作人员正在对氮气分离膜进行性能测试。

其烦调配方、做实验，历经无数次失败，终于设计出特殊的分子桥联结构膜材料，破解了这一难题。

有了科研成果的坚实基础，在投资伙伴和学校领导支持下，团队2018年成立山西格瑞思科技有限公司，将实验室成果逐步中试放大；2020年在山东省临沂市投资1.2亿元建立生产基地——山东汇海膜材料科技有限公司，在全国率先实现中空纤维气体分离膜量产和工业化应用，填补了中空纤维气体分离膜国产化批量生产空白。2023年，团队与山东汇海膜材料科技有限公司、四川星泰能源科技有限责任公司共建膜科学与技术研究中心，开启了产学研用全产业链一体化发展之路。

“新型科技产品推广应用难度很大，特别是许多企业都不敢第一个吃螃蟹，不敢尝试新技术。”追忆创业之初，团队成员马纪伟博士感慨万千，“成果转化需要大量资金投入，更需要企业家用发展的眼光看问题。希望政府层面能够发挥更大引导作用，让新产品在替代进口产品和替代传统技术过程中得到更多机会。”

实现进口替代 神奇“膜”法应用场景广阔

二氧化碳分离膜、氮气分离膜、氢气膜、富氧膜、甲烷氮气分离膜、挥发性有机物分离膜、脱湿膜……走进山东汇海膜材料科技有限公司展厅，仿佛走进一座膜材料博物馆。

从2020年创建至今，公司已建成现代化生产车间1万余平方米，装配投产5条高速多喷头自动化生产线，可年产中空纤维膜约100万平方米。提及企业发展，公司董事长谢忠宝深感欣慰：“我们已经形成膜材料—膜组件—膜应用设备为一体的全产业链服务体系，可为石油、天然气、煤焦、钢铁、水泥、热电、农产品保鲜仓储及物流运输等行业提供

二氧化碳捕集、硫化氢脱除、氮气提取、氮气保护、挥发性有机物治理等分离系统及技术支撑。”

“气体膜分离是碳减排的重要手段之一。在我国实现‘双碳’目标关键时期，团队研发的二氧化碳分离膜将为我国低成本二氧化碳分离捕集提供有力工具。”团队成员孟洁博士解释，二氧化碳排放加剧温室效应，对全球生态环境构成严重威胁，但二氧化碳也并非一无是处，它也是重要的碳资源。将天然气、油田伴生气、沼气、烟道气等体系中的二氧化碳分离捕集，再加以合理开发利用，如制成甲醇、甲酸或用作植物气肥、海上驱油剂等，是将其转化为能源和产品的重要途径。

2023年5月，全国首套CCUS（碳捕集利用与封存）膜法脱碳装置上线。“我们在胜利油田组装的这套5万立方米/天的油田伴生气膜法二氧化碳分离捕集与回注工业化装置，已连续稳定运行1年多，大大降低了传统伴生气脱碳能耗和成本，并在其他油田开展了初步推广应用。目前，已另外建立10万立方米/天的装置1套，正在设计30万立方米/天的装置1套。上述装置建成运行，预计可年产天然气1.2亿立方米，产生经济效益超2.5亿元。”采访中，廖家友如数家珍，“团队还在山东省临沂市开发了沼气二氧化碳脱除装置，与中国石油大学合作组装150立方米时的烟道气二氧化碳捕集示范装置。”

与晋能控股集团有限公司合作膜法瓦斯脱氧提浓实验；在青岛金源祥机械科技有限公司开展氮气灭火；在山东省济南市进行加油站挥发性有机物回收；与宇通客车、安徽中科中澳智能装备股份有限公司等企业合作电动车、燃料电池车电池系统氮气保护、集装箱气氮调节；还有广泛应用于高铁、船舶、精密仪器、医疗器械等的脱湿膜……如今，汇海膜产品已在全国多地展开应用，神奇“膜”法正悄然影响着生产生活的每个角落。

深耕氮气提取 为稀缺资源自主供给提供科技支撑

深秋时节，天高云淡。中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司成都天然气化工总厂金茂3井内机器轰鸣，日处理量3500立方米的液化天然气副产BOG尾气氮气分离提取装置正在高效运转。这套由太原理工大学膜科学与技术研究中心提供技术支持，山东汇海膜材料科技有限公司、四川星泰能源科技有限责任公司与成都天然气化工总厂合作建立的提氮装置已平稳运行1年有余，获得中石油专家组验收通过。

2024年5月，西南油气田分公司天然气研究院专家就该装置出具评价报告称：膜性能评价的三项关键指标均达标，膜分离性能能够达到生产要求，国产膜与国外膜的工业应用效果相当。

氮气广泛应用于导弹武器工业、卫星飞船发射、低温超导生产等领域，是不可再生的稀有气体资源，也是关乎国家安全和经济命脉的战略资源。从2012—2022年，我国氮气年需求量从500万立方米增长到约2200万立方米，居全球第二，但95%依赖进口。因此，实现氮气资源自给自足极为重要。

“当前，氮气主要来源是从天然气或深层煤层气中提取。但我国天然气和煤层气中氮气浓度相对较低，经济合理的氮气提取方法是采用膜法初步提浓再进入变压吸附或者深冷设备中精提。这两种工艺均离不开氮气分离膜。唯有自主创新，有望打破我国氮气资源受制于人的局面。”廖家友表示，团队采用自主生产的氮气分离膜，已先后与安徽中科院皖能科技有限公司、安徽万瑞冷电科技有限公司、中国文昌航天发射场等合作开展使用场地氮气回收，并在甘肃省兰州市海石湾进行管道天然气提氮。

山西煤层气资源丰富，总量约占全国的1/3，截至2022年底，已探明地质储量超7600亿立方米。2024年前8个月，山西煤层气总产量91.2亿立方米，占全国同期产量的81.6%。其中，临兴区块的煤层气特别是深层煤层气中富含高浓度氮气资源，具有良好提取价值。“团队与临汾市大宁县宁杨能源有限公司展开合作，已经设计出整套煤层气制备液化天然气过程中副产BOG气体的氮气提取工艺和产业链延伸方案，项目预计明年上马。”高成云说。

“能源保障和安全事关国计民生，是须臾不可忽视的‘国之大者’。大力开展氮气分离提取工作，既能降低我国氮气对外依存度，保障用氮安全，也能实现煤层气高值化利用，避免稀缺资源浪费，可产生巨大资源、环境、经济价值，提供大量就业岗位。于山西高质量发展而言，这无疑是一座尚待开发的金山和富矿。”展望未来，廖家友满怀憧憬，“团队将全力推广应用自主研发的煤层气提氮工艺包和设备，力争在山西乃至全国建立完整的氮气分析检测—氮气分离提取—氮气储备—氮气销售产业链，助力我国氮气资源自主供给，为山西因地制宜发展新质生产力提供有力技术支撑。” 郭帅莉

“列车检查确认完毕，可以装车！” “站台明白！” 11月14日，宁武县旭阳能源有限公司双万吨环保煤炭物流园的定量快速装车站内，一辆108节的煤运列车缓缓驶来，6名技术人员紧盯屏幕上的监测数据，熟练地操作着装车系统。

检测到车厢经过，上方的出煤口迅速落入车厢，随着列车前进，防冻、出煤、平量、抑尘，多项工序同步进行，细碎的煤炭逐渐堆成一块块厚实的黑色“面包”，装满一节车厢用时1分钟。高亢的汽笛响起，千米长的列车满载万吨煤炭，如一条钢铁巨龙般盘桓在山间，沿着朔黄铁路向东隆隆而去。“有了定量快速装车系统，简直就是给煤炭运站装上了‘智慧大脑’，两组万吨列车可以同时进行移动式装车作业，两个多小时即装满，发车时效提高了好几倍。”该公司负责人李云飞说。

过去，运煤车直接在站台卸货，再由铲车一斗一斗往车厢里装，最后还得靠工人爬上车厢用铁锹逐一平量，装车时间总是定不了。不仅如此，煤尘肆意飘落，污染环境又造成浪费。

站在高耸的装车站上俯瞰500多亩的煤炭物流园，储煤运煤却不见煤，只有在最后的列车装车时才能窥到煤炭的身影。“装车站与东西两翼的煤棚之间靠皮带输煤系统相连接，储存、装卸、发运都在全封闭的管道里完成。谁能想到我们这跟煤炭打交道的行当也能穿上白衬衣。”现场运营经理刘军笑着说。在装车站不远处，两座白色的全封闭储煤棚并排伫立，在阳光的照耀下格外耀眼。煤棚内，不见了往日发动机的阵阵轰鸣和滚滚黑烟，只有一抹抹清新的荧光绿在小山似的煤堆间快速穿梭，忙着将煤炭推进通往地下皮带系统的输煤口。“全封闭煤棚内装有智能监测系统，可根据棚内情况自动通风、抑尘，去年还上新了20多辆纯电动装载机，比柴油装载机噪音小、动力强，关键还是零排放。”刘军介绍说。

2020年，宁武县旭阳能源有限公司紧跟国家“公转铁”政策，决定在宁武投资建设煤炭物流园。“选择宁武主要是看准了这里能承接雄安新区、联通晋西北、辐射冀陕蒙，又紧靠朔黄铁路，可以打造成朔黄线上第一个具备单线、双万吨装车条件的集运站。”李云飞说，宁武西双万吨环保煤炭物流园铁路专用线项目从规划开始就得到了政府的大力支持，相关部门经常性入企走访，协助企业办理用地、环评、铁路接轨等关键手续。项目2020年9月开工建设，2023年6月即开出奔向黄骅港的首趟专列。

巍巍宁武关，如今凭借独特的地理位置，成为打通本地煤炭外运通道的重要节点，眼下，园区建设又将迈入新阶段。“经过前期与物流企业接洽合作，二期项目还将利用朔黄线返空车皮资源将民需、农资、工缺运入宁武，从单向单一煤炭发运向双向多品种综合接发转变，将物流园打造成综合性物流配送集散基地。”李云飞满怀信心地说。 薛志浩



定量快速装车系统装车现场。

宁武西双万吨环保煤炭物流园铁路专用线项目——装上「智慧大脑」节能环保增效

绿色环保

保护自然 共享文明

科学导报社宣