

# 新技术施展“膜”力 发电源头高效捕碳

关注国家重点研发计划  
“煤炭清洁高效利用和新型节能技术”重点专项⑤

◎实习记者 何亮

在山东省东营市九章膜技术有限公司里,二氧化碳(CO<sub>2</sub>)分离膜生产线正常运转,年生产能力可达10万平方米以上;在中石化南京化工研究院有限公司厂区内,正在建设中的膜法碳捕集示范装置将实现烟道气日处理量50000标准立方米,年捕集CO<sub>2</sub>超3000吨的目标……相距700千米的两家公司通力配合,面向燃煤电厂的膜法烟道气碳捕集技术开展攻关,实现了“节能”与“节地”的双优成效。

自2017年立项以来,在国家重点研发计划“煤炭清洁高效利用和新型节能技术”专项支持下,天津大学作为项目牵头单位,联合山东九章膜技术有限公司、中国科学院大连化学物理研究所和中石化南京化工研究院有限公司等全国多家单位,共同承担了“膜法捕集CO<sub>2</sub>技术及工业示范”项目。该项目旨在开发出国际领先的膜法捕集CO<sub>2</sub>完整技术链,并建成CO<sub>2</sub>捕集率≥90%、产品气浓度≥95%的膜法碳捕集工业示范装置。

## 高效分离和溶解烟道气中二氧化碳

“现阶段我国面临碳排放总量大、碳减排时间短、经济转型升级挑战多和能源系统转型难度大等复杂挑战。因此,要实现2060年前的碳中和目标需要采取有力措施。”“膜法捕集CO<sub>2</sub>技术及工业示范”项目负责人、天津大学王纪孝研究员介绍,在煤炭燃烧发电时排出的烟道气经脱硫、脱硝等工艺净化后的主要成分为二氧化碳和氮气(N<sub>2</sub>),具有常压、排放量大、成分复杂和CO<sub>2</sub>含量低等特点。因而捕集烟道气中的CO<sub>2</sub>是实现碳捕获、利用与封存(CCUS)的重要环节,对降低温室气体排放、减少极端气候的发生具有重要意义。

膜分离技术具有分离性能好、运行稳定和膜寿命较长的特点,可用于分离各种含有CO<sub>2</sub>的气体体系。

王纪孝进一步解释了气体分离膜的原理。当与膜表面接触时,气体分子会溶解在膜表面,并在两侧气体压力差或某组分分压差的驱动下,从膜的一侧(原料侧)扩散到另一侧(渗透侧),最终在渗透侧解吸。不同的气体分子在膜中的溶解和扩散速率不同,因而能够实现混合气体的分离。

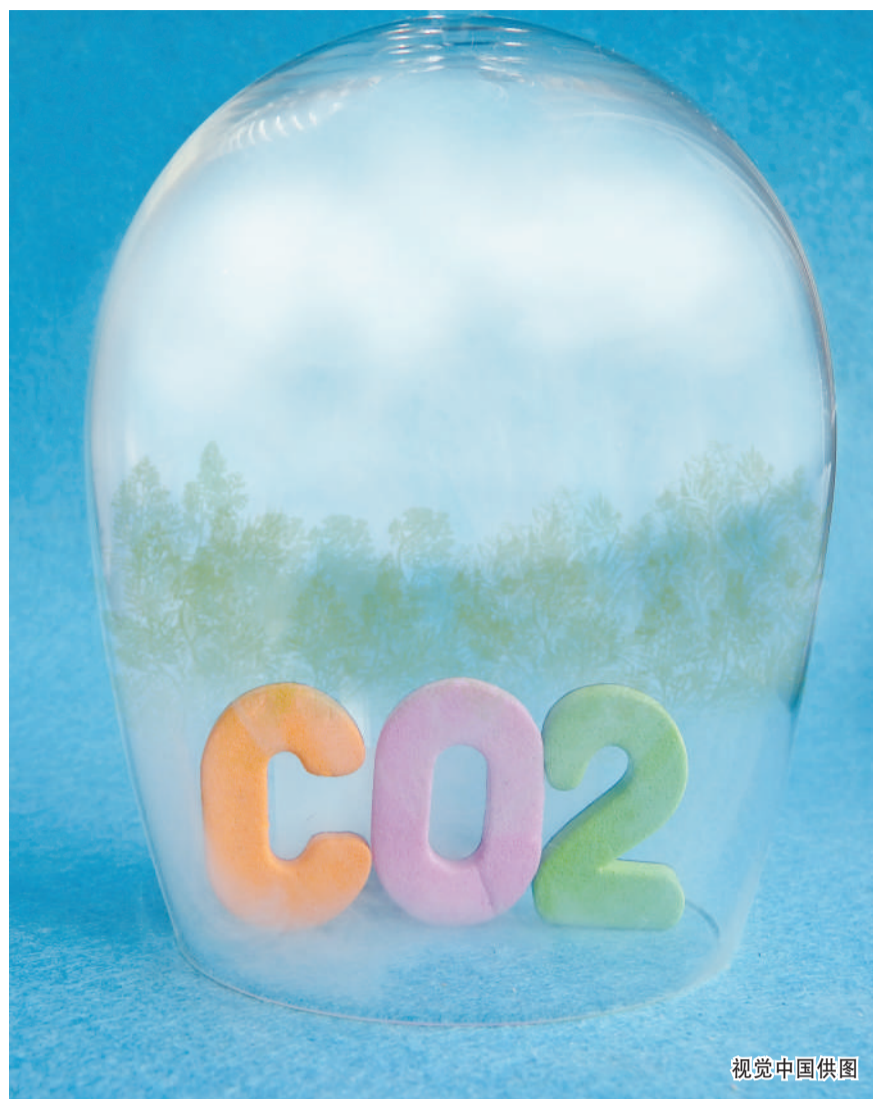
“与其他气体分离技术相比,膜分离技术分离能耗低、无溶剂挥发;设备简单、操作方便、运行可靠性高;放大效应不显著、可适用于各种处理规模。”王纪孝表示,该项目所使用的膜材料为聚乙烯基胺材料,其中含有大量可与CO<sub>2</sub>产生可逆相互作用的仲胺基。这些仲胺基促进了CO<sub>2</sub>在分离膜中的吸附和溶解,并强化了CO<sub>2</sub>在分离膜中的传递,使分离膜具有很高的CO<sub>2</sub>分离性能。

## 建成国内首套工业规模碳捕集膜生产线

膜规模化制备是膜法捕集CO<sub>2</sub>完整技术链的重要一环。为了实现分离膜规模化制备,天津大学于2012年率先研制出了用于制备CO<sub>2</sub>分离膜的工业规模制膜试验机,并开发出了高性能复合膜规模化制备工艺。然而,这套设备存在调节精度低、生产速度慢和干燥效率低等问题。基于此,天津大学针对逐层复合工艺

的要求,确定生产参数范围,对生产线的涂布单元、干燥单元和收卷单元进行了优化设计,最终形成了高性能的分离膜规模化制备装置工艺设计方案。

在天津大学的协助下,山东九章膜技术有限公司建立了国内首套工业规模碳捕集膜生产线。要实现示范应用,企业具有“打通最后一公里”的优势。该生产线配备有恒温恒湿净化



视觉中国供图

系统,保证厂房的温湿度和洁净度可以满足高性能分离膜的生产工艺要求,同时保证了在连续生产过程中厂房内有机溶剂的浓度满足安全生产规范的要求。

王纪孝透露,目前该生产线能够均匀制备出幅宽1.1米的高性能CO<sub>2</sub>分离膜,生产能力可

达10万平方米/年。该生产线上所制备的膜在模拟烟道气环境中,体积分数为15%的CO<sub>2</sub>和85%的氮气(15%CO<sub>2</sub>, 85%N<sub>2</sub>)条件下进行了测试。结果显示,该膜的CO<sub>2</sub>渗透速率达到商业膜的6倍以上,CO<sub>2</sub>和氮气的渗透选择性达到商业膜的3倍。

## 突破工业规模膜组件成型技术

气体分离膜在使用之前需要将其单元化,制备成膜组件,以提高装填密度,便于安装和更换,并对膜起到保护作用。

由于气体和液体之间的差异较大,目前已经较成熟的水处理膜组件制备工艺无法用于制备高选择透过性气体分离膜组件。因此,在充分认识了膜组件流道的流体力学和传质特性的基础上,构建与高选择透过性膜相适应的膜组件流道,以保证低浓差极化、低压力降和足够的装填密度就成为必须突破的关键技术之一。

面对这道难题,项目团队从构建组件内部合适的气体流道出发,通过计算流体力学方法模拟计算,设计了合理的流道分布,研发了使得组件内部黏接密封的技术,解决了复杂流道内的流体力学和传质行为中的科学问题。

通过探索卷制工艺,优化设备操作参数,项目团队研发出了工业规模的膜组件制备技术。项目团队完成的组件批量生产卷制设备,实现了低浓差极化、低压力降、高装填密度的工业规模膜组件批量生产。

## 集结全国多家单位力量实现应用示范

为实现捕集目标且节能,必须在充分认识膜渗透性能和选择性能及二者的匹配、膜两侧压力、原料气组成等各种因素对捕集效果影响规律的基础上,优化设计出集成多级(或多级和多段耦合)膜过程以及预处理和能量回收的完整膜分离系统。

中石化南京化工研究院有限公司为此开发了一套适合膜法捕集烟道气CO<sub>2</sub>的烟道气预处理工艺,以减小烟尘对压缩机、管路、膜组件等的影响,使预处理后的燃煤烟道气达到膜组件的进气要求。

除此之外,为更可靠地建立示范装置,项目组还设计、建造并运行了国内首套膜法捕集烟道气CO<sub>2</sub>中试装置,考察了温湿度波动、烟道气组成波动等对膜组件性能的影响,系统探究了

操作条件对CO<sub>2</sub>捕集率和浓度的影响。在此基础上,项目组设计和开发出国内首套膜法捕集CO<sub>2</sub>示范装置工艺包。

王纪孝介绍,开发示范装置工艺包,需要设计集成完整膜分离系统,建立数学模型,以性能强化和节能为目标,进行模拟优化计算。据此得出膜面积、能耗、成本,确定所需要的膜组件个数和排布方式及管路连接形式,并设计与之相应的动力设备、传送设备及检验设备等成套装备。

目前,在全国多家单位的协同努力下,膜法捕集CO<sub>2</sub>工业示范装置正在南京建设中,其运行及系统评价将在年内完成,预计将实现CO<sub>2</sub>捕集率≥90%、产品气浓度≥95%的烟道气碳捕集目标。

# 有“智慧大脑”,戴“黄金面具” 新型市域列车助力构建1小时通勤圈

◎李迪 陈科

以三星堆文化的“黄金面具”作为外观原型、自动升降的司机室,最大载客2956人……4月22日上午,由四川成都本地企业研发、制造、试验的新型时速160千米的全自动智慧市域列车,在2021成都国际工业博览会上全国首发,线上线下载均引起围观。

“列车不仅融入三星堆文化、太阳神鸟、成都银杏树等蜀地文化,同时还应用了全自动驾驶、智能检测系统、5G通讯技术、以太网列车控制系统等轨道交通最新科技,具有智能、安全、绿色、舒适等特点,将成为四川成都崭新的城市名片。”该车辆研制方、成都中车长客公司总工程师张洪军介绍。

## 内有“智慧大脑” 随时判断车辆状态

作为连接中心城区和卫星城的轨道交通装备,市域列车能为通勤客流提供速度快、运量大、公交化的运输服务。

此次最新亮相的市域列车拥有与客室贯通的开放式司机室,采用最高等级自动驾驶技术,赋予车辆自动唤醒、自动启停、自动回库等智能

行车功能,同时应用车—车通信技术,实现车辆自适应、自感知。

此外,该市域列车最高时速达160千米,采用A型铝合金车体,能够按运量需求灵活编组,8辆编组最大载客量可达2956人,将为成都市1小时通勤圈的构建和区域一体化发展助力提速。

“时速160千米,是这款列车最大的特点。研发团队对这一速度进行了充分的考量认证,是当前最适合成渝资同城化的市域列车。”张洪军说,这辆列车设计时在要求速度快的同时,也要考虑市域交通站间距特点,比如说在地铁的平台上采用高铁的创新技术,要同时兼顾高铁的快速运行和地铁的公交化特点。

值得注意的是,一些设计元素使列车充满了现代感。这辆列车有行业内首次设置的自动升降司机室,在无人驾驶时可以隐藏在车内,使列车充满现代感;列车内有与车窗融为一体OLED显示屏,通过智能的人机交互系统,乘客在乘车时可在线查询交通信息或观看视频直播,享受车地一体的智能服务。

谈到现代感,不可或缺的便是5G元素。“这辆列车采用5G大容量通讯技术,可实现车地信息传输多网融合,利用前沿的信息交互融合技术、视频智能分析技术,实现旅客信息的精准推送。为保障自动驾驶时的行车安全,列车设置了

## 此次最新亮相的市域列车拥有与客室贯通的开放式司机室,采用最高等级自动驾驶技术,赋予车辆自动唤醒、自动启停、自动回库等智能行车功能,同时应用车—车通信技术,实现车辆自适应、自感知。

百兆速度等级的以太网控制智能检测系统,实时监控车辆牵引、制动、弓网、蓄电池等关键系统的状态,并设置主动障碍物检测系统和辅助防撞系统,犹如为列车安装了智慧大脑,随时对车辆状态进行识别判断。”张洪军介绍。

## 外戴“黄金面具” 地域文化贯穿全车

据了解,此次亮相的新型市域动车组首次采

用与中国高铁“复兴号”同款的高强度车体断面结构、流线型车头设计和噪音防控技术,车头阻力系数降低9%,客室高度优化至2.2米,高速行驶时车内平均噪声70分贝,堪称具有高铁品质的市域列车。

不仅如此,列车采用了专门为市域列车“量身定制”的大轴重转向架以及成熟可靠的牵引系统,轻量化程度达到行业领先水平,能够为列车提供更大的载客容量,并适应快起快停的市域运输需求。

张洪军说,在车内列车智能环境感知系统能够自动调节客室温度、亮度以及车辆内外压力差,提升旅客乘坐的舒适度。通过设置空气净化装置及传感器,能够全方位监测、控制和改善车内空气质量,为长时间的乘车提供健康保障。车内还贴心地设置了大件行李柜、双曲面旅客信息显示屏,提供人性化的乘车服务。

谈到这辆列车独特的外观和内饰,成都中车长客公司董事长曲强介绍,这辆列车采用了三星堆文化黄金面具中的“纵目凤眼”作为灵感来源,以成都银杏这一网红主题作为外观点缀,从车头造型再到车身涂装,地域文化贯穿其中。内饰以简洁、清爽并富有科技感的浅色调为主,并将太阳神鸟、金沙面具等元素融入座椅、挡风屏、侧壁等内饰设计中,实现现代科技与古代文明的完美融合。

## 成果播报

## 年产超10000台套 轻轨直流供电装备实现自主化

科技日报讯(记者刘志伟 通讯员周弥)4月24日,记者从在武汉召开的2021年城市轨道交通直流供电保护技术研讨会上获悉,武汉已建成国际一流的城轨直流牵引开关设备产业基地,使这一被国外垄断的核心装备实现自主化。全国投入使用的12条地铁线,以及在建的6条地铁线,都用上了“武汉造”直流牵引供电系统。

“直流快速开关肯定会实现国产化,这个民族工业的空白一定会被有识之士填补,这一天不会太远!”这是1999年时任北京市城建工程设计院副总工程师于松伟做出的判断,今天中国船舶七一二研究所(以下简称七一二所)和武汉地铁集团科技人员终于将其实现了。

20世纪90年代,北京地铁联合七一二所开展了直流装备国产化工作。到2008年,轨道交通直流牵引供电设备中,整流变压器、整流器、接触网、接触轨等先后实现国产化,直流断路器、直流综合保护测控装置等关键核心设备仍被国外垄断,成为直流供电装备自主化最后需要攻克的“堡垒”。

“10年前,我们制定了科学严谨的自主化‘五步走’方针。计划用3—5年时间对直流供电自主化装备进行充分验证,再用3—5年时间全面推广应用。”武汉地铁集团建设事业总部副总经理张刚介绍。

2011年武汉地铁集团与七一二所联手,利用七一二所多年深耕积累的直流快速断路器的多项核心技术,启动了《城轨交通用直流牵引供电系统国产化》项目,并于2012年先后在武汉地铁一号线二期东吴大道站、汉口北站实现单站整套国产化设备应用。武汉地铁从四号线二期开始,全面应用该所自主研发的直流快速断路器和直流综合保护装置。实践证明,国产化设备更有利于保障武汉地铁供电系统的稳定运行。

目前,七一二所已在武汉中国光谷建成国际一流的直流牵引开关设备产业基地,可年产直流开关设备10000多套。据悉,该基地将立足智能化、信息化的行业发展要求,逐步实现牵引直流开关设备的谱化、系统化和智能化,为我国城市轨道交通直流保护技术的发展发挥核心骨干力量。

## 5G无人驾驶卡车 在内蒙古极寒矿区连续作业

科技日报讯(记者张景阳 通讯员张晓敏)记者4月25日从内蒙古科技厅获悉,世界首个极寒工况5G+220吨级无人驾驶卡车编组全流程24小时不间断运输作业在内蒙古呼伦贝尔市宝日希勒露天煤矿实现稳定运行,这也标志着该项目将按照计划于今年6月正式进入工业化运行。

据介绍,该项目的成功应用开创了五个“第一”:世界第一个在极寒(零下50摄氏度)环境下实现大型矿用自卸矿卡无人驾驶编组运行项目;国内第一个在5G网络下实现大型矿用自卸矿卡无人驾驶编组,且与电铲、遥控推土机实现了智能协同作业;国内第一个5G网络下实现5台大型矿用自卸矿卡无人驾驶工业性运行;国内第一个无人驾驶综合运输效率超过有人驾驶的露天矿无人化项目;国内第一个在极寒工况下实现5G智能遥控驾驶推土机测试及应用。

该项目的实施将填补世界极寒地区矿山设备无人化运行空白和国内露天矿无人驾驶技术领域多项空白,提高设备生产效率。项目试运行以来,已经呼伦贝尔地区零下50摄氏度极寒复杂气候环境下的安全测试,进入三班24小时不间断作业测试阶段。

据悉,宝日希勒露天煤矿地处高寒地区,冬季最低气温低于零下50摄氏度,夏季最高气温高于零上30摄氏度,温差达到80摄氏度。这种极寒复杂气候环境对露天矿无人驾驶矿卡应用提出了极高的技术要求。技术资料显示,无人驾驶矿卡最高车速达到38千米/小时,超过了有人驾驶规定的30千米/小时,提升26.7%。5台矿卡累计运行1113小时,运输里程18191千米,运输3593车次,累计土方运输量287740立方米。

## 青藏铁路完成 接触网控制工程基础试验

科技日报讯(记者矫阳)4月26日,由中铁电气化局牵头组织的青藏铁路格拉段电气化接触网基础桩现场试验在沱沱河站完成。

青藏铁路格拉段电气化改造工程是国家西南部战略规划的重点项目,其中接触网控制工程基础试验被青藏铁路公司列为重大科研项目。针对高原、冻土电气化铁路施工难题,经过两年探索实践,中铁电气化局成功研制出旋挖机等相关施工装备,为青藏铁路格拉段电气化接触网基础桩施工组织、优化设计提供了重要依据。

据了解,青藏铁路格拉段电气化改造工程目前已初步搭建起基于BIM与智能检测的接触网数字施工技术体系,总体为高原接触网机械化智能建造与运维做好了关键技术储备。



在青藏铁路格拉段沱沱河站进行的电气化接触网基础桩现场试验 受访单位供图