

附件:

2023年度山西省重点研发计划 (能源与节能环保领域)支持方向信息

一、碳达峰碳中和关键技术与示范

1. 二氧化碳-甲烷光热耦合重整制合成气关键技术研究

研究内容: 针对 $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ 重整制合成气过程中 Ni 基催化剂的烧结和积碳失活等问题, 开展光热耦合反应器/催化剂的研究。开发多种 $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ 光热耦合重整制合成气催化剂, 提高光利用率、反应转化率和太阳能-化学能转化效率; 从宏观实验到微观分子电子模拟, 研究催化剂与重整反应性能内在关系, 发展新的高效催化反应路线; 探究 C-H/C-O 键活化以及中间体形成的热力学和微观动力学, 阐明反应机制, 形成光热催化的新理论和新方法。研制光热耦合反应釜, 探究 $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ 光热耦合重整制备合成气反应性能, 开展中试示范验证。

技术指标: 开发 2 种以上新型 $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ 重整光热耦合催化剂, 反应温度小于 400°C , 甲烷单程转化率大于 85%, 二氧化碳转化率大于 90%, 合成气选择性大于 90%, 太阳能-化学能转化效率大于 25%, 连续稳定运行时间不小于 100 h, 并在自主研发的催化剂装填量不小于 10 kg 的光热耦合反应釜进行示范验证。

2. 含 CO₂合成气制高碳醇关键技术研究

研究内容：针对煤转化过程 CO₂温室气体排放造成的环境污染及综合碳效低等问题，研究煤基含 CO₂合成气转化制醇过程中 C-O 键活化、C-C 键形成、碳链增长及 CO 插入的协同反应机制；开发含 CO₂合成气直接转化串级耦联甲醇/乙醇缩合工艺，高选择性合成 C3+高碳醇的催化剂和反应工艺，突破反应工程化与产品分离的集成关键技术。

技术指标：掌握含 CO₂合成气制 C3+醇过程反应物活化、碳链增长和产物选择性调控机制；研制获得新型含 CO₂合成气 C3+醇的催化剂及配套工艺，完成百吨级中试试验，CO 单程转化率 $\geq 25\%$ （总转化率 $\geq 85\%$ ），CO₂总利用率 $\geq 65\%$ ，总醇选择性 $\geq 65\%$ ，总醇中 C3+醇含量 $\geq 70\%$ 。

3. 煤制聚乙醇酸关键催化技术与示范

研究内容：针对草酸二甲酯（DMO）加氢反应中产物选择性、稳定性不足的问题，重点开发高效高稳定性 DMO 加氢制备乙醇酸甲酯（MG）非贵金属催化剂，探索催化剂制备及成型工艺，提高现有非贵金属催化剂的活性及稳定性，满足催化剂在温和条件下兼具高效率和高选择性的工业化生产需求，形成具有自主知识产权的草酸酯加氢催化剂制备技术，完善 DMO 加氢制 MG 工艺。

考核指标：建立500吨/年 DMO 加氢制 MG 工业示范项目，DMO 单程转化率 $\geq 95\%$ ，MG 选择性 $\geq 95\%$ ，MG 时空收率 $\geq$

0.28g/(g·h)，产品纯度 $\geq 99.5\%$ ，催化剂寿命 ≥ 8000 小时。

4. 复杂条件下综放开采均压通风系统智能监测与管控关键技术研发

研究内容：针对复杂条件下综放开采均压通风系统调压效果差的问题，研发基于激光光谱技术的全激光火灾预警系统，实现采空区标志性气体浓度监测和分析，系统包括模块化设计、防爆设计、自动校准设计、束管堵漏分析诊断监测技术、远程故障诊断服务和异常火情预警分析；研发分布式均压通风系统管控平台，基于井下气体监测数据、温度数据、设备状态数据、束管监测数据、风压数据等，实现复杂条件下综放开采均压通风系统全过程管控，并采用可视化配置工具，提供丰富的数据可视化组件以及多种主题风格，实时共享到大屏幕、PC等终端平台上。

技术指标：形成全激光束管监测系统1套，检测气体至少包括 O_2 、 CO_2 、 CH_4 、 CO 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 等7种，采用模块化设计，采样路数 ≥ 7 ，响应时间（T90） $\leq 10s$ ，校准周期 ≥ 1 年，主机防爆类型为矿用本安型，获得矿用产品安全标志证书；开发分布式均压通风系统管控平台1套，具体包括：风量风压智能监测模块1个，温度趋势分析模块1个，设备故障诊断模块1个，环境参量评价模块1个，通风设施智能调控模块1个，井下数据传输延时 $\leq 1s$ ，智能控制响应时间 $\leq 300ms$ ；建立至少1个均压通风系统智能监测与管控的应用示范工程，实现不

少于 2 个回采工作面均压通风智能管控的可视化。

5. 大容量蒸汽直供型工业热泵系统关键技术与示范

研究内容：针对工业领域清洁蒸汽供应需求，研发大容量蒸汽直供型工业热泵技术。研究用于高温热泵的环保型非共沸混合工质热物理性质，并建立模型和数据库；研究高温条件下新工质与系统各部件的材料相容性，建立新工质的高温分解特性模型；构建多热源高温热泵系统仿真模型，研究系统各核心部件之间以及与环境之间的匹配特性和协调规律；研究热泵系统的动态调节特性，形成变工况控制策略；研发基于工业余热源等多热源的大容量蒸汽直供型高温热泵机组，并完成应用示范。

技术指标：研发大容量多热源蒸汽直供型高温热泵机组，最高制热温度不低于 120℃，最大循环温升不低于 140℃；当循环温升 100℃，出水温度 120℃ 时，系统制热 COP 不低于 1.8；当循环温升 60℃，出水温度 120℃ 时，系统制热 COP 不低于 2.5；单机制热量不低于 120 kW；制冷剂臭氧破坏指数（ODP）为零，安全等级不低于 A2L；建成余热源、空气源等多热源蒸汽直供型高温热泵工程应用示范，实现应用不少于 10 台。

6. 用于煤层气提氮的聚酰亚胺中空纤维膜及分离提取工艺研发

研究内容：研发高氮气选择性和高渗透性的氮气分离膜材

料，实现膜材料批量制备，开发中空纤维氦气分离膜连续纺丝生产工艺，研制具有自主知识产权的氦气分离膜组件；采用所研制的氦气分离膜组件，开发煤层气提氦工艺，研究煤层气中氦气初始含量、杂质气体组分等对氦气分离提取效果的影响；形成膜法-变压吸附组合氦气提取工艺，获得成套煤层气氦气分离提取工艺参数，建立示范装置并进行验证。

技术指标：开发高性能的氦气分离膜材料，氦气渗透系数大于 60 Barrer，He/CH₄ 选择性大于 200，实现氦气分离膜材料 10kg 级批次稳定制备；实现氦气分离膜连续纺丝制备，膜组件面积单只不少于 10 m²，膜组件耐压大于 3 MPa，膜组件 He/CH₄ 分离因子大于 150，He 渗透速率大于 600 GPU；开发出膜法-变压吸附耦合煤层气氦气提取工艺，当煤层气中氦气浓度大于 0.05% 时，经膜法提浓后，氦气纯度大于 80%，经变压吸附后，氦气纯度大于 99.99%，氦气回收率大于 95%；建立膜法-变压吸附煤层气提氦全自动控制系统及示范装置，设备针对不同氦气浓度的原料气具有自动进气调节控制功能，可对氦气浓度为 0.05%~40% 的不同原料气自主切换工艺流程，示范装置煤层气处理量不少于 2000 Nm³/d。

7. 拜耳法提铝种分母液中钒镓高效分离和回收关键技术与示范

研究内容：针对拜耳法提铝种分母液提镓过程杂质钒干扰及树脂使用寿命短的核心问题，开发拜耳法提铝种分母液中高

效预脱钒的新技术；研究钒、有机物导致树脂中毒的机理，开发母液中有机物脱除、镓钒梯级高效洗脱和树脂再生技术；形成拜耳法提铝种分母钒镓高效分离和回收的成套技术体系，开展工艺优化和系统集成，获得物料平衡和能源消耗等关键数据，在吨级提镓生产线上完成验证。

技术指标：实现预脱钒后母液中钒浓度 ≤ 100 ppm；树脂寿命大于 5 个月；母液中镓的回收率 $\geq 70\%$ ，钒的回收率 $\geq 60\%$ ，五氧化二钒的产品满足《五氧化二钒》（YB/T 5304-2017）产品质量标准；完成吨级/年镓回收生产线的示范验证，连续稳定运行不少于 90 天，形成可复制推广的成套技术与装备。

8. 陆上超低风速超长叶片5MW 中速永磁风力发电机组研发

研究内容：针对陆上风力发电机超长叶片载荷安全性需求，开展超低风速超长叶片5MW 中速永磁风力发电机关键技术研究，主要包括：研究叶轮独立变桨、机组净空控制、加阻减振控制、推力削减与阵风载荷非线性控制等，形成超长叶片风轮载荷控制技术；建立风电机组主传动系的精细化刚柔耦合多体模型，揭示超长叶片主传动系的振动特性，形成主传动系共振风险评价体系；建立超长叶片弯扭耦合非线性模型及整机气-弹-控制耦合仿真模型，分析超长叶片气弹稳定性与整机振动稳定性。开发5MW 超长叶片中速永磁风电机组，实现工程示范应用。

技术指标：研制额定功率不低于5MW 陆上风电机组并完成示范验证，叶片长度 $\geq 94\text{m}$ ，叶根抗弯能力 $\geq 31000\text{kN}\cdot\text{m}$ ，叶根弯矩载荷 $< 30000\text{kN}\cdot\text{m}$ ，机组风轮直径 $\geq 192\text{m}$ ，设计寿命 ≥ 20 年，最大承载风速 42m/s ，机组综合效率 $\geq 92\%$ ；机舱重量 ≤ 125 吨，叶轮重量 ≤ 125 吨，总体传动效率 $\geq 94\%$ ；编制风电机组传动链动力学仿真分析企业标准1-2项。

9. 风电叶片环氧复材高效化学拆解关键技术研发

研究内容：针对风电产业废旧风机叶片无害化处理困难、产物附加值低等问题，突破风机叶片化学催化降解关键技术，具体包括：研发高效、经济、绿色的化学降解新技术，开发环氧树脂高效分解与杂质同步脱除、增强纤维分离及回收、树脂降解产物的资源化利用、污染物控制等核心技术与装备，发展风机叶片催化降解及产物增值利用新方法，形成创新工艺及装备，并在国家风力发电重点区域开展工程应用示范。

技术指标：建成 50L 风机叶片化学催化降解装备并示范应用；风机叶片复材中环氧树脂降解率 $\geq 99\%$ ，增强纤维强度保留率 $\geq 95\%$ ，纤维表面环氧树脂残留率 $\leq 1\%$ ；处理每吨风电叶片成本低于 3000 元；催化降解过程关键污染物 VOC 排放：苯 $< 0.5\text{mg}/\text{m}^3$ ，苯同系物 $< 20\text{mg}/\text{m}^3$ ，非甲烷总烃 $< 50\text{mg}/\text{m}^3$ ，颗粒物 $< 10\text{mg}/\text{m}^3$ 。

10. 低成本阴离子交换膜电解槽制氢系统关键技术与示范

研究内容:针对可再生能源利用率及发电特性的高效制氢耦合性问题,重点研发阴离子交换膜分子结构多样性和可剪裁性与离子传导率和机械强度的依存关系、非贵金属催化剂结构与活性之间的构效关系、电解槽功能组件结构方案、多模块并联的电解制氢设备优化及线性扩容技术,系统集成及运行条件与产气量及运行参数之间的耦合规律,研发高效稳定运行的阴离子交换膜电解池集成技术,形成适应不同可再生能源规模的大容量制氢设备,并开展工程应用示范。

技术指标:阴离子交换膜离子电导率 $\geq 0.06\text{ S/cm}$,溶胀率 $\leq 10\%$,拉伸强度 $\geq 10\text{MPa}$;非贵金属催化剂过电位 $\leq 100\text{mV}@10\text{mA/cm}^2$;研制 AEM 电解水制氢设备1套,额定功率 $\geq 10\text{kW}$,系统效率 $\geq 65\%$,额定制氢量 $\geq 2\text{Nm}^3/\text{h}$,制氢纯度 $\geq 99.99\%$,产氢压力 $\geq 3.5\text{MPa}$,制氢直流电耗 $\leq 4.1\text{kWh/Nm}^3\text{H}_2$,设备示范稳定连续运行时长 $\geq 500\text{h}$,产氢量调整范围20–150%,电流密度 $\geq 1\text{A/cm}^2$,动态响应速度 $\geq 2.5\%/s$;标准工况下运行200h 衰减至不低于 0.8A/cm^2 、运行500h 衰减至不低于 0.5A/cm^2 。

11. 空冷型氢燃料电池无人机动力系统关键技术研发

研究内容:针对空冷型氢燃料电池动力系统的高能量密度、高适应性的发展要求,研发空冷型氢燃料电池动力系统关键技术及其无人机应用,主要包括:研究空冷型燃料电池深流道构型优化与制备、电堆温湿度耦合作用机制、低压低氧电池输出特性,形成高功率密度空冷燃料电池堆设计制造技术路线;

研究面向不同高度和输出功率的供气系统输出特性及补偿调控方法、空冷型燃料电池系统电电混合能量管理技术，研发高能量密度空冷型燃料电池动力总成系统；研究动力总成系统运行状态监测技术，研制空冷型燃料电池监测系统；研究燃料电池无人机动力系统集成技术，开展不同作业场景的氢燃料电池动力系统性能测试验证。

技术指标：研制空冷型氢燃料电池无人机样机不少于 3 台，空冷型燃料电池堆动力系统能量密度 $\geq 600\text{Wh/kg}$ （含储供氢系统、控制器、辅助电池），系统额定输出功率 $\geq 2.5\text{kW}$ ，累计运行 500h 额定功率衰减率 $\leq 1.5\%$ ，工作温度范围 $-15^{\circ}\text{C}-45^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度范围 5%（RH）-95%（RH）；氢燃料电池无人机重量等级 25kg，最大载荷能力 $\geq 5\text{kg}$ ，满载续航时间 $\geq 2.5\text{h}$ ；完成不少于 3 项应用场景示范。

12. 镁基储氢材料及其固态储氢关键技术研发

研究内容：针对镁基多孔储氢材料高储运容量发展需求，研究镁基储氢材料规模化制备及其储氢系统高效集成技术，具体内容包括：低成本、高容量多孔镁基储氢材料批量化制备技术；镁基多孔固态储氢材料吸/放氢过程的结构演变机制及循环性能的稳定化方案；以低成本、高容量镁基多孔储氢材料为应用对象，研制安全可靠、快速可逆吸/放氢和环境适应性好的镁基多孔储氢材料的填装技术，研究储氢罐的换热仿真设计及结构优化技术，搭建固态储氢系统示范应用装置。

技术指标：研制镁基多孔储氢材料制备装置，实现百公斤级/批次的材料制备；吸/放氢速率 $\geq 3.5/0.4 \text{ g H}_2/\text{min}$ ， 260°C 下镁基储氢材料的可逆质量储氢密度 $\geq 6.5\text{wt}\%$ ，可逆放氢量 $\geq 95\%$ ，吸/放氢循环容量（1000次） $\geq 90\%$ ，储氢压力 $\leq 2\text{MPa}$ ；建成固态储氢系统示范装置1套，储氢单元单管质量储氢密度 $\geq 4.5\text{wt}\%$ ，储氢系统储氢量 $\geq 35\text{kg/m}^3$ ，总储氢量 $\geq 300\text{kg}$ 。

13. 多轴甲醇增程式重卡关键技术与示范

研究内容：针对多轴甲醇增程重卡能量转化效率、环境适应性、整车状态监测与制造等发展需求，突破多轴甲醇增程重卡动力系统与整车集成等关键技术。主要包括：研究低损耗的甲醇增程重卡电驱动技术、多轴动力总成构型智能衍生设计与多目标妥协寻优方法、多驱动模式高效动力耦合器优化设计，开发高效增程式多轴驱动重卡动力总成；研究面向整车综合能效优化的动力总成系统动态匹配技术，开发整车能量管理集成控制系统；研究动力总成系统的故障诱因，建立体系化故障库，分析典型故障的潜在风险与健康状态，开发整车运行状态监测系统；研究甲醇增程重卡经济性、动力性快速测评技术，建设49吨甲醇增程重卡总装线，开展整车开发验证并运营示范。

技术指标：甲醇增程式动力总成热效率 $\geq 46\%$ ，升功率 $\geq 30\text{kW/L}$ ，最高醇电转化率 $\geq 1.75\text{kWh/L}$ ，驱动模式 ≥ 6 个，系统效率 $\geq 90\%$ ； -30°C 冷启动时间 $\leq 10\text{s}$ ，环境温度 45°C 行驶 100km 增程器维持最大发电功率；甲醇增程动力总成系统故障库1项，

故障数目 ≥ 80 条；整车（三轴6L增程器）最大爬坡度 $\geq 25\%$ ，最高车速 $\geq 110\text{km/h}$ ，满载0-80km/h加速时间 $\leq 50\text{s}$ ，中国重型商用车瞬态工况（C-WTVC）经济性 $\leq 85\text{L}/100\text{km}$ （ $150\text{kWh}/100\text{km}$ ）；建成49吨多轴甲醇增程重卡总装线，开发出49吨甲醇增程式重卡样车1辆并示范应用。

14. 基于功率优化器的智慧储能系统研发与示范

研究内容：针对目前储能系统全生命周期内利用率低和容量失配等痛点问题，重点研究基于功率优化器的智慧储能系统，主要包括：高频高效储能功率优化器拓扑结构设计及多模态运行机理研究、高频高效储能功率优化器软开关控制技术研究、电磁干扰对电池包的影响机理探析及基于储能功率优化器的电池包电压脉动抑制策略研究、基于“电池包+储能功率优化器”的多模块串/并联智慧储能系统匹配原则及运行机制研究、智慧储能系统容量行为模型及能流管控策略研究、智慧储能系统可重构运行优化与控制研究、智慧储能系统安全运行及故障保护机制研究等核心技术与装备研制，构建基于功率优化器的高效智慧储能系统，形成创新储能能流管控体系，并在交直流混联配用电系统等典型场景应用示范。

技术指标：建立智慧储能系统应用示范工程2项以上，单项智慧储能系统容量 $\geq 100\text{kW}$ ，循环寿命 ≥ 5000 次且容量保持 $\geq 80\%$ ，放电效率 $\geq 90\%$ ，智慧储能系统输出电压可根据实际工程需求进行400-1500Vdc调节，并可进行并联扩容；与电池

包配合使用的储能功率优化器单机功率3.3kW，可实现升压、降压、直通和旁路等多模态运行控制，根据实际使用需求可通过串/并联进行扩容，单机输入电压23-80Vdc，输出40-58Vdc，输出电压纹波系数 $\leq 5\%$ ，输出电流最大可达150A，运行效率 $\geq 98\%$ ，储能功率优化器的功率密度 $\geq 100\text{W/inch}^3$ 。

15. 隧穿氧化层钝化接触（TOPCon）电池选择性发射极关键技术与示范

研究内容：针对 TOPCon 电池量产效率提升瓶颈问题，开展能够提升量产效率的关键技术研究与应用。具体内容为：研究激光掺杂表面浓度和结深对电池转化效率的影响，突破激光掺杂图形与丝网印刷图图形匹配技术、激光选择性发射极结区表面浓度和结深对浆料窗口优化技术，开展全流程工艺参数匹配优化，开发 TOPCon 电池硼扩散工序选择性发射极制备生产工艺；形成完备高效的拥有选择性发射极技术的 TOPCon 电池生产示范线。

技术指标：在选择性发射极区域的掺杂方阻 $\leq 80\Omega/\square$ ；选择性发射极区激光结深推进下饱和电流密度 $\leq 1.1 \times 10^{-14}\text{A/cm}^2$ ，隐性开路电压 $\geq 733\text{mV}$ ，最终开路电压增益效率 $\geq 25.9\%$ ；选择性发射极光斑 $\leq 60\mu\text{m}$ ，对应网板线宽 $\leq 14\mu\text{m}$ ，栅线遮光面积同比降低18.5%，最终短路电流增益效率 $\geq 26.2\%$ ；烧结峰值温度 $\geq 910^\circ\text{C}$ ，最终填充因子增益效率 $\geq 26.4\%$ 。开发拥有选择性发射极先进 TOPcon 工艺技术，量产平均转化效率

$\geq 26.4\%$ ，建立不低于2GW的电池片(M10/182*182mm)的生产示范线。

16. 清洁节能矿井供热关键技术及装备研发

研究内容：针对煤矿供热存在的能耗高、污染大等问题，重点研发高效超低温空气源热泵供热和矿井回风余热型热管供热技术。研究基于热泵系统余热深度利用的相变工质，研制蓄放热管束相间布置的低温相变蓄热器，构建极低温条件下经济器和相变蓄热器的并联补气工艺，开发集蒸发器、冷凝器、经济器和相变蓄热器一体的高效超低温空气源热泵热水机组；研究高湿、高尘、低温换热技术，研制回风收集及降尘装置；形成清洁节能低碳矿井供热技术，并在大型煤矿开展工程应用示范。

技术指标：空气源热泵能够高效运行在 $-20 \sim -30^{\circ}\text{C}$ 的极低温工况，在 -25°C 的极低温条件下，热泵的供热性能系数COP ≥ 2.44 ；环境温度 0°C ，蓄热完成时间不高于6.7h；环境温度 -2°C 时，蓄热完成时间不高于7.5h；严寒气候下，矿井回风余热型热管换热器进风井新风温度 $\geq -2^{\circ}\text{C}$ ；建立供热负荷 $\geq 5\text{MW}$ 的超低温空气源热泵供热示范工程和供热负荷 $\geq 4\text{MW}$ 的矿井回风热管供热示范工程。

二、黄河流域生态保护关键技术与示范

17. 黄河流域工矿区生态水文演变及修复关键技术研究

研究内容：基于样方、样地和样带调查，开展“基础研究

-关键技术研发-应用示范”全链条研究，阐明工矿修复区生态水文演变及异质性，揭示不同时空尺度生态系统结构、功能和格局演变机理；开展不同修复年限和模式下生态水文过程及生态响应机制研究，构建强调生态水文功能的工矿区生态系统恢复力评价系统；利用煤矸石、粉煤灰、混合介质和土壤等开展多因素土壤水文系统重构；基于物种组成、种间关系、生物多样性和生态系统稳定性等特征和分异规律，揭示生态恢复过程中生物结皮和植被结构等人工群落的形成和维持机制，开展最佳植被群落配置和生态修复模式研发；研发工矿区生态水文修复关键技术，并开展生态修复技术集成示范。

技术指标：研发黄河流域工矿区生态水文修复关键技术体系1套；构建工矿区生态系统恢复力评价系统1套；新构土壤系统中固体废弃物掺量大于50%，新构持水性提高至75%以上，新构稳渗率提高至60%以上；筛选出耐干旱、耐贫瘠、生态适应性较强的建群植物6-8种和生物土壤结皮3-5种。林草综合植被覆盖度达到85%以上，生物丰度指数提高至40以上；开展工矿区生态修复关键技术研发，建成不少于10万平方米的生态修复示范区。

18. 高精度关键温室气体激光分析技术及应用示范

研究内容：针对“双碳目标”对关键温室气体高精度监测的需求，研发基于超灵敏腔增强激光吸收光谱的痕量气体检测核心技术和装备，突破激光-腔吸收池高效耦合系统设计、高

稳定光学系统设计加工、高精度光电系统温度控制、高精度压力控制、低噪声激光驱动、高精度控制电路设计以及样品预处理等关键技术，构建完善的地面站点关键温室气体监测方法，形成成套工程化产品，并在省级及以上环境检测站点开展应用示范。

技术指标：研制具有自主知识产权的高精度关键温室气体 CO₂、CH₄ 和 CO 激光分析工程化产品一套，满足 CO₂ 的测量量程为 0-1000 ppm，且在 300-500 ppm 测量范围内：5 分钟平均测量精度（1s）优于 100 ppb，6 小时漂移量小于 100 ppb，测量间隔小于 5 s；CH₄ 的测量量程为 0-20ppm，且在 1-3 ppm 测量范围内：5 分钟平均测量精度（1s）优于 2ppb，6 小时漂移量小于 2ppb，测量间隔小于 5s；CO 的测量量程为 0-5ppm，且在 1-3 ppm 测量范围内：5 分钟平均测量精度（1s）优于 2ppb，6 小时漂移量小于 2ppb，测量间隔小于 5s。激光-腔吸收池耦合效率优于 30%，光电系统温度控制精度优于 5mK，压力控制精度优于 0.2mBar。在不少于 2 家省级及以上环境检测站点开展应用示范。

19. 焦炉烟气 NO_x 与 VOC_s 协同高效脱除催化技术研究示范

研究内容：针对山西焦化行业严峻的 NO_x 和 VOC_s 双重减排难题，重点研究含硫焦炉烟气中 NO_x 与 VOC_s 的协同脱除催化剂的作用机制及失活机理；开发窄粒度分布、高固含量、高稳定

性的涂层料液制备技术及耐硫低温催化剂可控定量涂覆技术；采用流场模拟，建立 NH_3 -SCR 反应器内部流场、温度场及稳态-动态响应模型，优化设计与现有脱硝系统耦合集成的协同催化脱除工艺，并在山西大型焦炭企业开展工程应用示范。

技术指标：建立 NO_x 与 VOC_s 协同脱除应用示范工程1项，单项工程烟气处理能力 $\geq 10000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ，连续稳定运行时间不少于 1000 h，各种污染物浓度符合山西焦化行业超低排放标准，其中 NO_x 脱除率 $\geq 90\%$ ， VOC_s 浓度 $\leq 80 \text{ mg/m}^3$ ；在不小于 $3000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 风量工业侧线完成催化剂寿命验证试验，寿命超过2年。

20. 微藻处理养殖废水兼产生物有机肥料技术与示范

研究内容：针对养殖废水中氮、磷、重金属、抗生素以及有机物含量高等特点，构建藻种筛选及评价体系；构建微藻废水净化方法与装置，开展不同培养条件和不同废水稀释梯度下，微藻系统对废水污染组分去除效果研究，确定废水处理效果；分别在无外加和外加碳源的情况下，探讨微藻系统废水污染组分的去除机理；对微藻生物质开展营养成分分析、生物质预处理保存、生物肥料功能等应用研究，并在农村建设重点区域开展工程应用示范。

技术指标：筛选包括螺旋藻在内的具备高污染组分处理潜力与生物质含量较高的藻种2株以上；针对最优藻种，完成微藻处理废水工业开发与示范，微藻养殖面积达到 5000 m^2 以上，

藻类生产效率达到 $25.0\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，COD 去除率大于85%，氨氮和总磷去除效率均不低于90%，重金属和抗生素去除效率大于50%；开发微藻废水净化方法与装置兼产大宗生物有机肥料技术并建成示范装置1-2套，生产规模 $>1.5\text{ t/年}$ ；开发微藻生物质配方液体肥料和微藻菌剂至少各1种，其中，液体肥料产品中蛋白质含量不低于50%，藻细胞密度 $\geq 1.0 \times 10^7\text{ cfu/ml}$ ，脂肪含量不低于20%，纤维素和维生素含量均不低于5%，氮磷钾的标准含量分别不低于0.75%、1.0%、1.8%。微藻菌剂中，粗灰分不高于15%，尿素残留不高于0.5%， $\text{Ca}+\text{Mg} \geq 100\text{ g/L}$ ，微囊藻毒素不得检出；液体肥料产品符合《有机水溶肥料 通用要求》（NY/T 3831-2021）标准，微藻菌剂产品符合《农用微生物菌剂》（GB 20287-2006）标准。

21. 负荷调节型农村生活污水处理技术与示范

研究内容：针对山西省典型农村污水处理处置现状，开展适应水量大幅波动的负荷可调式污水处理技术研发，构建负荷调节型农村生活污水处理系统；考察水力负荷、进水水质、微氧/好氧条件控制等技术参数对污水处理效果的影响；研究在微氧/好氧状态切换调节下工艺的微生物学特征，重点考察切换过程中多种关键菌群活性、微生物种群的变化规律，并深入分析微生物变化规律与工艺技术参数之间的响应关系；通过解析功能菌群代谢规律与菌群演替的关系，提出农村生活污水负荷可调节型微生物系统快速启动和高效稳定运行调控策略；开

展运行管理与技术经济指标研究，并在山西开展工程应用示范。

技术指标：研发成套负荷调节型一体化污水处理技术，建设负荷调节型一体化污水处理工艺应用示范工程，总处理能力大于100吨/天；可在实际处理量为标准设计水量30%-120%的条件下稳定运行，出水COD、氨氮和总磷三项指标达到地表水Ⅴ类标准，总氮去除率大于70%；高负荷运行条件下（即处理水量大于设计能力的80%），吨水能耗小于0.5 kW•h，产泥率小于0.3 gVSS/gCOD_{去除}；低负荷运行条件下（即处理水量小于设计能力的80%），吨水能耗小于0.1 kg/kW•h，产泥率小于0.1g VSS/gCOD_{去除}，平均充氧动力效率大于1.5 kgO₂/kW•h。

22. 焦化废水酚类化合物的高质化利用关键技术与示范

研究内容：针对焦化剩余氨水中酚含量高，毒性大，难降解等难处理的问题，重点研发焦化剩余氨水中酚类化合物、吸附剂与其它物质间的交互原理及其与原位吸附脱除性能的关系，再生剂的种类、用量、浓度与再生条件及使用寿命间的关系分析及技术参数优化，酚类化合物回收、提纯和高值化利用方式的选择及优化，建立吸附、再生和回收三个工段间工艺条件和设备的耦联及完整应用数据包，设计焦化剩余氨水中酚的脱除与高质化利用技术工业化应用装置。

技术指标：形成500 t/d 焦化废水中酚的脱除与高质化利

用技术工艺包和示范装置，并进行验证；高浓焦化废水（COD 初始值大于4000mg/L）的 COD 单程直接（不稀释）去除率大于50%；吸附过程所用时间小于10 min，吸附剂单位吸附容量大于300 mgCOD/g，催化吸附剂循环使用次数大于100；回收粗酚产品中酚及同系物（按无水计算）含量 $\geq 83\%$ ；制定水处理企业标准1-2项。

23. 晋北地区盐渍化土壤生态化改良技术研究示范

研究内容：针对晋北盐碱区水资源约束强、盐碱化逐年加重且胁迫大、土壤理化结构差等问题，利用本区域煤矸石资源、石膏矿资源以及畜牧养殖的废弃物，研发本地化盐碱地生态改良剂、本土化有机质提升材料、可降解保水材料，通过以上材料的优化组合构建肥沃耕层、重构土壤生态系统、调控水分蒸发及离子均衡，提高土壤可耕作性；筛选耐盐粮食作物与特色抗逆牧草植物等适应性植物品种，通过研发盐碱地生态改良材料、适应性作物种植等技术手段，构建适宜不同盐碱胁迫程度土壤的绿色改良与综合利用技术，实现耕地质量快速提升、作物提质增效，农牧结合循环的土壤综合利用模式，并在典型盐碱区进行示范应用。

技术指标：利用煤矸石、低品位石膏矿、养殖废弃物以及秸秆等研发本地化盐碱地生态改良剂、本土化有机质提升材料、保水降盐材料等5种以上，改良后土壤 pH 降低1-2个单位；土壤钠吸附比（SAR）降低30~50%；土壤有机质含量提高至改

良前2倍以上；土壤电导率较改良前降低20%以上；抑农田水分蒸发率达到20%以上；土壤持水能力增加10%以上；处理后土壤平均排盐率达到50%以上；筛选抗逆适生农作物或牧草品种5-7个；创建典型区域示范区1个，面积500亩以上，示范区耕地地力提高1-2个等级，牧草作物产量提高20%以上，农业生产亩增效益在100元以上；形成可推广的综合技术模式不少于5套。

24. 黄土崩解性的评价方法研究及示范应用

研究内容：重点研究评价黄土崩解性的最优室内试验方法和指标、崩解性指标与可蚀性指标相关关系、室内崩解指标阈值点与野外边坡崩解临界值关系等问题，解析三相黄土在完全浸水情况下的崩解机制，明确精准稳定评价黄土崩解性的试验方法和流程，形成试验装备，并在山西高速公路水土流失防治重点边坡策源地开展工程应用示范。

技术指标：研发可精准、稳定、定量评价黄土崩解性能测试的仪器1套，确定匹配的试验流程与细节，提出评价三相土壤在浸水饱和情况下最优崩解性指标1个，黄土崩解性指标试验复现率达到90%以上，室内崩解性指标评价边坡可蚀性准确率达到80%以上，对山西省5座以上边坡开展黄土崩解性评价，并提出坡面侵蚀控制方法，示范区水土流失量下降5%以上。

25. 循环流化床电厂固废微生物活化协同 CO₂矿化制备低碳胶凝材料关键技术与示范

研究内容：针对循环流化床（CFB）电厂固废 CO₂矿化效

率低，及传统胶凝材料激发技术高耗能、高成本等问题，重点研发微生物激发多元固废胶凝性能、微生物矿化诱导固废胶凝材料裂缝自修复性能、微生物矿化协同碳化养护捕集 CO₂、微生物固废胶凝材料制备自流平砂浆及预制件等核心技术，构建微生物固废胶凝材料及其低碳建材生产技术体系，形成创新工艺及成套装备，并实现规模化生产与应用示范。

技术指标：微生物固废胶凝材料中 CFB 固废（以灰渣和脱硫石膏为主）利用率 $\geq 60\%$ ，总固废利用率 $\geq 80\%$ ，3d 抗折强度 $\geq 5\text{MPa}$ ，3d 抗压强度 $\geq 27\text{MPa}$ ，28d 抗折强度 $\geq 7\text{MPa}$ ，28d 抗压强度 $\geq 52.5\text{MPa}$ ，软化系数 ≥ 0.8 ；用于砂浆和混凝土时，对宽度 $\leq 0.2\text{mm}$ 的裂缝具有自修复功能；用于预制件生产时，碳化养护过程 CO₂捕集量 ≥ 100 千克/吨。建成年产不少于 10 万吨微生物固废胶凝材料生产线 1 条、年产不少于 5 万吨微生物固废自流平砂浆生产线 1 条、年捕集不少于 1000 吨 CO₂的碳化养护预制件中试生产项目 1 项；建成不少于 1 万平方米的微生物固废自流平砂浆应用示范工程 1 项。

26. 废旧沥青混合料绿色再生关键技术与工业示范

研究内容：针对乳化沥青冷再生层抗水损害能力差的问题，重点研究高性能冷再生用乳化沥青、高性能冷再生用乳化沥青混合料、乳化沥青冷再生层专用界面粘结防水材料及其检测方法和评价体系、乳化沥青冷再生层与上设层层间粘结防水性能、废旧沥青混合料（RAP）预制构件的配方、RAP 预制构

件的应用性能及其评价方法、RAP 预制构件生产设备的设计及工业化生产工艺、RAP 绿色再生技术适用领域等核心技术，构建两种 RAP 绿色再生成套工艺并形成工业示范。

技术指标：建立 2 条 RAP 绿色再生工艺示范工程并进行验证。乳化沥青厂拌冷再生工艺示范工程：RAP 处理能力 ≥ 5000 吨/年；高性能冷再生用乳化沥青产能 ≥ 240 吨/年，蒸发残留物 15℃ 延度 $\geq 50\text{cm}$ ；乳化沥青冷再生混合料产能 ≥ 5800 吨/年，15℃ 劈裂试验强度 $\geq 0.6\text{MPa}$ 、冻融劈裂强度比 TSR $\geq 95\%$ ；乳化沥青冷再生层界面粘结防水材料产能 ≥ 5 吨/年，蒸发残留物软化点 $\geq 160^\circ\text{C}$ 、蒸发残留物 15℃ 延度 $\geq 60\text{cm}$ 、蒸发残留物 5℃ 延度 $\geq 40\text{cm}$ 、粘结强度 $\geq 0.4\text{MPa}$ ；采用上述产品进行示范道路建设不小于 15000 m^2 。RAP 基装配式构件再生工艺示范工程：产能 ≥ 10000 立方米/年；RAP 基装配式构件性能指标达到 60℃ 动稳定度 ≥ 2000 次/mm、低温弯曲破坏应变 $\geq 3000\text{ }\mu\text{ }\epsilon$ 。两种再生工艺联合实施后，RAP 利用率达到 100%。

27. 煤气化渣活化解毒与铝硅碳分质利用关键技术与示范

研究内容：针对煤气化渣全湿法利用制备高模数水玻璃过程的关键问题与瓶颈难题，研究气化渣铝硅酸盐 Al-O-Si 多聚体解聚与 Si-O 羟基化耦合活化除杂机制，开发气化渣铝硅酸盐多场协同活化与深度除杂耦合基础理论与技术；阐明活化渣 Si-OH 稀碱解离/重聚与寡聚体聚合度调控耦合提模机制，开发

活化渣炭硅分离与 SiO_2 稀碱调控制备高模数水玻璃技术及活化液 Fe/Cr 共沉淀解毒与聚合调控制备 PAC 技术；形成气化渣全湿法流程重构制备高模数水玻璃整体工艺，优化流程参数，获得物料平衡和能源消耗等关键数据，并开展过程强化与集成优化，开展百吨级扩试试验。

技术指标：开发铝铁钙高效活化杂质脱除技术，铝铁钙脱除率均 $>85\%$ ，重金属 Cr 脱除率 $\geq 95\%$ ，且硅渣反应活性提高 8 倍以上；开发气化渣全湿法制备高模数水玻璃技术，气化渣 100% 替代高纯石英砂，水玻璃模数 ≥ 3.45 ， SiO_2 质量分数 $>26\%$ ，且钙铁杂质 $<200\text{ppm}$ ；形成煤气化渣全组分高效高值利用成套技术，全流程 CO_2 与传统石英砂制备高模数水玻璃工艺减排 52% 以上，同时系统能耗降低 30% 以上，完成年处理百吨级煤气化渣全组分高值利用示范验证，制备满足“GB/T4209-2008 液-1 优等品”水玻璃产品，并达到全部技术指标。

28. 焚烧烟气余热再生废活性炭制备催化剂关键技术与示范

研究内容：研究不同来源废活性炭的组成与结构，构建废活性炭分类和利用体系；考察工艺参数对废活性炭再生过程中污染物释放的影响规律以及理化结构演化机制；研究不同烟气条件下再生活性炭理化结构对 SO_2 等污染物的协同脱除影响机制；研究再生工艺对废活性炭基催化剂活性组分结构、表面活性位点分布及化学性质的影响机制及过程强化机理；开发再生

活性炭基 NO_x 、VOCs 协同脱除催化剂，并探究其高效吸脱附机制，考察烟气中 SO_2 等组分对其性能的影响，分析其协同处置过程中的失活机理；形成废活性炭循环利用整体技术工艺，完成千吨级示范。

技术指标：形成废活性炭再生技术规范或标准1-2项，废活性炭的再生利用率达到90%以上，废活性炭再生10次后，比表面积大于 $600 \text{ m}^2/\text{g}$ ；开发再生活性炭基 NO_x 、VOC_s 协同脱除催化剂1-2种，且在 $120\sim 180^\circ\text{C}$ 内 NO_x 和 VOC_s 脱除率90%以上；形成利用焚烧烟气余热再生废活性炭协同多污染物协同控制整体工艺，建设千吨级焚烧烟气余热活性炭再生系统和不小于 $10000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 烟气处理量的烟气集成净化系统示范装置，实现超低排放（颗粒物 $\leq 15 \text{ mg}/\text{m}^3$ ， $\text{SO}_2 \leq 30 \text{ mg}/\text{m}^3$ ，HF $\leq 2.0 \text{ mg}/\text{m}^3$ ，HCl $\leq 30 \text{ mg}/\text{m}^3$ ， $\text{NO}_x \leq 150 \text{ mg}/\text{m}^3$ ，Hg 及其化合物 $\leq 0.025 \text{ mg}/\text{m}^3$ ，二噁英 $\leq 0.1 \text{ ng}/\text{m}^3$ ），并实现稳定运行168h 以上，形成可复制推广的成套技术和装备。

29. 煤矸石制备人工生态土壤技术与示范

研究内容：针对煤矸石综合利用制备人工土壤过程中存在的营养成分释放不完全、养分配比不合理、土壤微生态环境建设缓慢、可能存在重金属污染、应用领域不广泛的问题，开展可用于煤矸石处理的优良微生物菌株的选育、煤矸石中营养元素有效缓慢释放及重金属控制技术、实现不同种植场景对人工土壤透气性和保水性的要求、快速构建有益植物生长的区系微

生物菌群、制备可用于多种领域适宜不同植物生长的煤矸石微生物活性土壤方面的研发，建成人工土壤制备中试车间、形成可实施可复制的技术推广方案、并在煤矸石堆积区进行矿区生态修复种植示范。

技术指标：筛选用于解磷、解钾、降硫、分解腐殖质、吸附各种重金属的微生物菌株，复配制备至少 3 种煤矸石人工土壤工业菌剂；形成 1 套煤矸石评价及人工土壤制备体系；制备 1 种人工土壤、1 种高品质植物生长基质，产品符合《人造有机土》（T/CPPC 1027-2021）、《育苗基质》（T/CPPC 1026-2021）及《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618-2018）等标准，且产品使用符合国家固体废物相关法律法规要求；建成年产万吨级煤矸石制备人工土壤中试生产线，建成不少于 10 亩的人工土壤用于土地复垦或生态重建的示范工程。

30. 山西省村镇垃圾热解气化焚烧技术装备研发与示范

研究内容：针对我省村镇垃圾散乱分布、组成特性差异大、分散收运、集中处理成本高等问题，研发村镇垃圾就地分拣、收运的小型化集中处理技术模式；针对村镇垃圾组成特性、热解气化特性及污染物迁移特性，开发适应村镇应用条件、投资运行成本合理、易维护、易操作的村镇热解气化焚烧一体化设备；研发污染物的全过程控制技术及垃圾处理过程无害化、资源利用高值化途径；形成我省村镇垃圾创新工艺及成套装备，

并在我省开展工程应用示范。

考核指标：建立村镇垃圾科学分拣、收运、小型化集中处理的运营模式；形成垃圾热解气化、污染物迁移的理论体系；建立垃圾热解气化焚烧一体化处理示范装置：处理量 ≥ 10 吨/天，连续稳定运行时间不小于3000h，直接运行成本 ≤ 80 元/吨垃圾，垃圾减容率 $\geq 90\%$ ，二噁英类排放值低于 0.1ng TEQ/m^3 ，烟气污染物排放符合《生活垃圾焚烧污染控制标准》（GB 18485-2014）标准。

31. 山西省焦化工业园区地下水污染在线监测预警技术研究示范

研究内容：针对山西省在地下水污染风险监测预警技术方向的需求，选择省内典型焦化工业园区，收集园区内地质勘察、水文地质等钻探资料和地下水历史监测数据，优化园区监测井网，构建地下水多层位微洗井采样监测井和自动洗井采样装置，实现远程地下水自动采样和自动洗井；建立工业园区的三维地质、水文地质模型、水流模型、溶质迁移模型、地下水污染预警指标体系及预警模型，建设基于模型的包括数据库和应用平台两大部分的园区地下水污染在线监测预警系统；利用在线传感器采集实时监测数据，并通过应用平台分析确定预警等级，实现污染快速监测和实时预警结果展示，形成典型焦化工业园区地下水污染监测预警与数字化技术平台应用示范。

技术指标：研发地下水低流量低扰动多层采样及多因子在

线监测技术,实现可覆盖焦化工业园区地下水特征污染物的全自动、批量化和在线监测,洗井抽水速率 $\leq 0.3\text{L/min}$,洗井体积比国标监测井降低20%以上,地下水温度、pH、主要特征污染物指标监测准确度分别 $\leq 0.2^{\circ}\text{C}$ 、0.1、5%,重复性 $\leq 0.1^{\circ}\text{C}$ 、0.1、2%,分辨率达到 0.01°C 、0.01、 0.1mg/L (针对有机污染物指标分辨率达到 $0.1\mu\text{g/L}$);构建污染物的高精度多维污染预警体系模型;形成1套地下水环境污染风险监测预警方法;建立1个实现实时监测功能的可长周期无故障运行的焦化工业园区地下水污染在线监测预警平台;选取1个占地面积不小于 20km^2 的焦化工业园区开展示范化建设和运行。